

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQU
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES Technologies

DEPARTEMENT DE génie électrique

N° :...../2024



DOMAINE : Science Technologie

FILIERE : Electromécanique

OPTION : Electromécanique

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme

Master

Par:

Mohammed AKBAR

Radwan BRAHIMI

THEME

Diagnostic et surveillance d'un moteur asynchrone sous défaut cassure des barres rotoriques

Soutenu le 08 / 6 /2024 devant le jury composé de

Mabrouk DEFDAF
Bilal Djamal Eddine CHERIF
Zine GHEMARI

Université de Msila
Université de Msila
Université de Msila

Président
Rapporteur
Examineur

Année universitaire : 2023/2024

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes chers parents, en qui j'ai trouvé l'immense
soutien dans les études et la vie

espérant que ce travail soit pour eux le témoignage
de ma profonde affection et

; mon grand respect

; A Tous mes chers frères et chères sœurs

; A Mes chers enseignants

; A tous mes amis

A toutes les personnes qui m'ont soutenu de près
ou de loin pour la réalisation de
ce travail

REMERCIEMENTS

"Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et appréciations à monsieur l'enseignant superviseur cherif bilal djamal eddine pour ses conseils et directives qu'il n'a jamais cessé de nous donner. Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude à toutes les mains qui ont contribué à ce travail, que ce soit de près ou de loin. Mes remerciements vont également à nos tuteurs qui ont veillé à nous fournir toutes les conditions propices à la réalisation de ce travail.

Je n'oublie pas non plus de remercier tous les enseignants et les encadreurs qui nous ont apporté leur aide, ainsi que tous les collègues et enseignants auprès desquels nous avons appris et tiré beaucoup de connaissances."

Sommaire

Introduction Générale	1
<u>Chapitre I : Généralités sur la maintenance et la surveillance des entrainements électriques</u>	
<u>I.1 : Introduction</u>	3
<u>I.2 : Défaillances</u>	3
<u>I.2.1 : Définition de la défaillance</u>	3
<u>I.2.2 : Cause de défaillance</u>	3
<u>I.3. Notion sur la maintenance</u>	3
<u>I.3.1 : Définition de la maintenance</u>	4
<u>I.3.2 : Différents types de maintenance</u>	4
<u>I.3.2.1 : Maintenance palliative</u>	4
<u>I.3.2.2 : Maintenance préventive</u>	4
<u>I.3.3 : Objectifs de la maintenance</u>	4
<u>I.3.4 : Niveaux de la maintenance</u>	5
<u>I.3.4.1 : Maintenance du premier niveau</u>	5
<u>I.3.4.2 : Maintenance de deuxième niveau</u>	5
<u>I.3.4.3 : Maintenance de troisième niveau</u>	5
<u>I.3.4.4 : Maintenance du quatrième niveau</u>	5
<u>I.3.4.5 : Maintenance du cinquième niveau</u>	5
<u>I.4 : Surveillance</u>	6
<u>I.4.1 : Définition de surveillance</u>	6
<u>I.4.2 : Différents niveaux de la surveillance</u>	6
<u>I.4.3 : Surveillance par analyse vibratoire</u>	6
<u>I.4.4 : Caractéristiques d'un signal vibratoire</u>	6
<u>I.4.4.1 : Fréquence</u>	6
<u>I.4.4.2 : Amplitude</u>	7
<u>I.4.4.3 : Nature d'une vibration</u>	7
<u>I.5 : Pratique de l'analyse vibratoire</u>	8
<u>I.5.1 : Accéléromètre</u>	8
<u>I.5.1.1 : Avantages</u>	9
<u>I.5.1.2 : Inconvénients</u>	9
<u>I.5.1.3 : Problèmes et défauts détectés</u>	9
<u>I.5.2 : Choix de l'emplacement de capteurs</u>	9
<u>I.5.2.1 : Efforts tournants</u>	9
<u>I.5.2.2 : Efforts directionnels</u>	10
<u>I.5.2.3 : Conditionnement du signal</u>	10

<u>I.6 : Généralités sur les moteurs asynchrones</u>	10
<u>I.6.1 : Constitution de la machine asynchrone</u>	10
<u>I.6.1.1 : Stator</u>	11
<u>I.6.1.2 : Rotor</u>	11
<u>I.7 : Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone</u>	13
<u>I.8 : Causes des défauts</u>	14
<u>I.9 : Principaux défauts dans la machine</u>	15
<u>I.9.1 : Défaillances mécaniques</u>	16
<u>I.9.1.1. Défauts des roulements</u>	16
<u>I.9.1.2. Défaillances du flasque</u>	17
<u>I.9.1.3. Défaillances de l'arbre</u>	17
<u>I.9.2 : Défaillances au stator</u>	17
<u>I.9.2.1 : Défauts d'isolant dans un enroulement</u>	18
<u>I.9.2.2 : Court-circuit entre spires</u>	18
<u>I.9.2.3 : Court-circuit entre phases</u>	18
<u>I.9.2.4 : Court-circuit phase/bâti</u>	19
<u>I.9.2.5 : Défauts de circuit magnétique</u>	19
<u>I.9.3 : Défaillances au rotor</u>	19
<u>I.9.3.1 : Ruptures de barres</u>	20
<u>I.9.3.2 : Ruptures d'anneaux</u>	20
<u>I.9.3.3 : Excentricité statique et dynamique</u>	20
<u>I.10 : Conclusion</u>	21
<u>Chapitre II : Etat de l'art sur les techniques de traitement de signal appliquées à l'analyse vibratoire.</u>	20
<u>II.1 : Introduction</u>	20
<u>II.2 : Analyse temporelle</u>	20
<u>II.2.1 : Valeur efficace (RMS)</u>	20
<u>II.2.2 : Valeur crête</u>	20
<u>II.2.3 : Facteur de crête</u>	20
<u>II.2.4 : Facteur K</u>	21
<u>II.2.5 : Moment d'ordre 3</u>	21
<u>II.2.6 : Kurtosis</u>	21
<u>II.2.7 : Niveau global</u>	21
<u>II.2.8 : Talaf et Thikat</u>	22
<u>II.3 : Analyse fréquentielle</u>	22
<u>II.3.1 : Analyse spectrale</u>	22
<u>II.3.2 : Analyse d'enveloppe</u>	22
<u>II.3.3 : Kurtosis spectral</u>	23

<u>II.3.4 : Analyse cepstrale</u>	24
<u>II.4.2 : Transformée en Ondelettes</u>	26
<u>II.4.3 : Transformée de Hilbert Huang</u>	29
<u>II.5 : Conclusion</u>	29
 <u>Chapitre III : Modélisation du Moteur Asynchrone a Cage.</u>	30
<u>III.1 : Introduction</u>	30
<u>III.2 : Equations des tensions statoriques [56]</u>	30
<u>III.3 : Equations des tensions rotoriques [57]</u>	31
<u>III.4 : Calcul des inductances du modèle dont le flux d'entrefer est sinusoïdal [58]</u>	33
<u>III.5 : Equations mécaniques [59]</u>	37
<u>III.6 : Conclusion</u>	38
 Chapitre IV : Détection et Localisation du Défaut Cassure des Barres Rotorique Basée sur la Transformée D'ondelette Discret.	40
IV.1 : Introduction	40
IV.2 : Transformée en ondelettes discrète (TOD)	40
IV.2.1 : Algorithme de MALLAT :	41
IV.2.2 : Décomposition en multi-niveau du signal [64] :	41
IV.2.3: Application de la technique des Ondelettes (TOD) au diagnostic de l'onduleur	43
IV.2.4 : Exigences d'acquisition des signaux	44
IV.3 : Etude statistique	46
IV.4 : Conclusion	48
 <u>Conclusion générale...</u>	49

Liste des figures

Figure I.1 : Différentes amplitudes (vibration sinusoïdale).	7
Figure I.2 : Nature d'une vibration.	8
Figure I.3 : Schéma de principe d'un accéléromètre.	9
Figure I.4 : Fixation du capteur sur palier.	10
Figure I.5 : Choix directement pour la prise de mesure.	10
Figure I.6 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage de d'écureuil.	10
Figure I.7 Différentes vues et coupes d'un stator du moteur asynchrone.	11
Figure I.8: Rotor bobiné.	12
Figure I.9 : Vue schématique en perspective du rotor à cage d'écureuil.	12
Figure I.10 : Proportion de défauts d'un moteur asynchrone.	13
Figure I.11: Répartition des pannes sur les machines asynchrones de faibles ou moyennes puissances.	14
Figure I.12 Répartition des pannes sur les machines asynchrones de fortes puissances.	14
Figure I.13: Répartition des causes des défauts pour une machines asynchrones.	15
Figure I.14: Répartition des défauts suivant le composant.	15
Figure I.15: Répartition des défauts roulement.	16
Figure I.16: Modélisation schématique de rupture de barres ou rupture d'anneaux.	20
Figure I.17: Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique et mixte.	21
Figure II.1 : Algorithme de MALLAT unidimensionnel.	26
Figure II.2 : Filtres miroirs en quadrature.	27
Figure II.3 : Décomposition en multi-niveau du signal $f(n)$.	27
Figure II.4 : Dépendance de l'échelle à la fréquence des ondelettes.	28
Figure II.5 : Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux.	29
Figure III.1 : Schéma électrique équivalent du rotor à cage.	31
Figure III.2 : Champ crée par une maille rotorique.	35
Figure IV.1: Algorithme de MALLAT unidimensionnel.	41
Figure IV.2: Filtres miroirs en quadrature.	41
Figure IV.3: Décomposition en multi-niveau du signal $f(n)$.	42
Figure IV.4: Dépendance de l'échelle à la fréquence des ondelettes.	42

Figure IV. 5: Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux.....	43
Figure IV.6 : Signaux vibratoire.....	45
Figure IV.7 : Détails.....	46
Figure IV.8: Coefficient de corrélation.....	47
Figure IV.9: Enveloppe spectrale.....	47

Liste des Tableaux

Tableau II.1: Critère de sévérité du kurtosis.....	21
Tableau IV.4: Les coefficients et les bandes fréquentielles.....	44

Introduction générale

Actuellement, l'entraînement électrique à courant alternatif est considéré comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le domaine industriel. Car ce type d'entraînement est justifié par la simplicité de la construction, avec un coût optimal de maintenance et d'achat, ainsi que sa robustesse mécanique [1]. Des applications industrielles de la machine asynchrone triphasé à vitesse variable, ont vu le jour dans divers domaines en l'occurrence l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision. De par leur présence grandissante dans des domaines applicatifs toujours plus diversifiés, les problèmes liés au vieillissement et aux défaillances de ce type d'entraînement électrique prennent une grande part dans les contraintes d'exploitation [2]. La mise en place de dispositifs de sûreté de fonctionnement est souvent exigée afin d'améliorer la disponibilité des systèmes intégrant, de minimiser le coût de la maintenance et d'assurer efficacement la sécurité des équipements et des personnes.

Néanmoins, les équipements électriques et mécaniques subissent au cours de leur durée de vie un certain nombre de sollicitations externes ou internes qui peuvent les rendre défaillantes. Les contraintes industrielles en fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité des équipements sont par ailleurs très importantes. C'est pour cela le monde industriel est très intéressé par les techniques permettant de déterminer l'état de santé de ces entraînements.

Plusieurs méthodes de surveillances emploient un modèle du système considéré. Le principe général de ces approches consiste à vérifier la consistance des données prélevées en ligne sur l'installation avec un modèle comportemental [3]. La qualité du modèle utilisé conditionne les performances du système de surveillance. La localisation des défaillances parfois nécessite l'utilisation du modèle du système défaillant. Plusieurs niveaux de connaissance sur les défaillances peuvent être utilisés. Il est à noter que l'obtention d'un modèle précis du comportement défaillant est souvent difficile et coûteux.

Pour atteindre les objectifs fixés, le travail présenté dans cette mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre consiste à apporter quelques éléments de diagnostic des entraînements électriques et les différents défauts liés au moteur asynchrone. Ce diagnostic consiste à connaître, à évaluer, à prévoir, à mesurer et à maîtriser les défaillances des systèmes.

Dans le deuxième chapitre, nous avons expliqué le principe des méthodes de diagnostic : méthode statistique, méthode fréquentielle et les méthodes temps fréquences.

Le troisième chapitre sera consacré pour le modèle triphasé de la machine asynchrone et de sa transformation en utilisant la transformation de Park, par la suite nous allons présenter l'impact de défaut cassure des barres rotoriques sur le comportement du moteur asynchrone.

Le quatrième chapitre sera consacré pour présenter une étude préliminaire sur les méthodes destinées à ce type de signaux. Elles sont les méthodes de transformée en l'ondelette (TO) ou (WT) pour « wavelet transform ». Dans la première partie, la méthode de transformation en ondelettes est expliquée de façon détaillée en donnant un aperçu général sur

cette méthode son historique, le principe d'utilisation, les différents types d'ondelettes, et la manière de calcul de la transformation des signaux analysés. La deuxième partie est consacrée à l'utilisation de l'enveloppe spectrale pour extraire les harmoniques qui caractérise le défaut cassure des barres rotoriques.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance et la surveillance des entraînements électriques.

I.1 : Introduction

Dans ce chapitre, la première partie nous avons présenté les différents types de maintenance, les niveaux de maintenance, la surveillance et les caractéristiques d'un signal vibratoire.

Dans la deuxième partie, de ce chapitre nous avons présenté les moteurs asynchrones d'une façon générale et plus spécialement le moteur asynchrone à cage. On la décrit, explique son principe de fonctionnement, son rôle et même les défauts qui peuvent arriver pendant leur fonctionnement.

I.2 : Défaillances

Dans cette section, nous avons présente la définition de la défaillance et les cause de défaillance.

I.2.1 : Définition de la défaillance

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques, les défaillances peuvent être classées selon différents critères [3] :

- Défaillance progressive ou soudaine, selon la rapidité de leur manifestation ;
- Défaillance partielle ou complété ou intermédiaire, selon l'amplitude ;
- Défaillance précoce, à taux constant ou d'usure, selon le moment d'apparition dans le cycle de vie du matériel ;
- Défaillance mineure, significative, critique ou catastrophique, selon leur effet sur les systèmes, l'environnement et l'homme ;
- Défaillance première, seconde et de commande, selon les causes des défaillances.

I.2.2 : Cause de défaillance

La norme AFNOR NF X60010, définit la cause de défaillance par : " les circonstances liées à la conception, la fabrication ou l'emploi et qui ont entraîné la défaillance ". Cette définition est fondamentale en diagnostic industriel. Une bonne politique de maintenance passe obligatoirement par une maitrise parfaite des mécanismes de ruine liés à la conception, à la construction et à l'exploitation des matériels. Il est important de connaitre et de prévenir les défaillances, d'une manière précoce en suivant l'évolution de dégradation d'un élément [4].

I.3. Notion sur la maintenance

Dans cette partie, nous avons présente la définition de la maintenance, les différents types de maintenance, les objectifs de la maintenance et les niveaux de maintenances.

I.3.1 : Définition de la maintenance

Selon la définition de l'AFNOR, la maintenance vise à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé [5].

La maintenance regroupe ainsi les actions de dépannage et de réparation, de réglage, de révision, de contrôle et de vérification des équipements matériels (machines, véhicules, objets manufacturés, etc.) ou même immatériels (logiciels) [6].

I.3.2 : Différents types de maintenance

I.3.2.1 : Maintenance palliative

Dépannage (donc provisoire) de l'équipement, permettant à celui-ci d'assurer tout ou partie d'une fonction requise ; elle doit toutefois être suivie d'une action curative dans les plus brefs délais [7].

I.3.2.1.1 : Maintenance curative

Réparation (donc durable) consistant en une remise en l'état initial [8].

I.3.2.1.2 : Maintenance corrective

La maintenance «CORRECTIVE», qui correspond à une attitude passive d'attente de la panne ou de l'incident l'action consiste alors à éliminer le défaut, grâce à dépannage ou une réparation [9].

I.3.2.2 : Maintenance préventive

La maintenance «PREVENTIVE», qui correspond à la volonté de maîtriser la dégradation d'un équipement afin d'éviter d'être pris au dépourvu par la panne [9].

I.3.2.2.1 : Maintenance préventive systématique

La maintenance «PREVENTIVE SYSTEMATIQUE», qui correspond aux changements ou à la réparation systématique des éléments [9].

I.3.2.2.2 : Maintenance préventive conditionnelle

La maintenance «PREVENTIVE CONDITIONNELLE», qui correspond aux changements ou à la réparation des éléments en fonction de leur état de dégradation [9].

I.3.3 : Objectifs de la maintenance

La maintenance doit se faire de telle sorte que l'outil de production soit disponible et en bon état de fonctionnement ; elle est, de ce fait, intimement liée à la production et à la qualité. Les objectifs de la maintenance, se greffent sur ceux de la production ou services attendus tel que la qualité, le coût, les délais...etc [10].

De ces points de vue, les objectifs de la maintenance réalisés à travers son organisation, sa gestion et ses interventions, sont nombreux.

-  Assurer la disponibilité ;
-  Développer l'économie de l'entreprise ;
-  Assurer la bonne qualité des produits ;
-  Assurer la maintenabilité des équipements ;

-  Assurer la sécurité du personnel et des installations ;
-  Augmenter la productivité.

I.3.4 : Niveaux de la maintenance

La norme X60-010 propose un découpage de la maintenance à cinq niveaux, d'une part pour classer les différentes opérations de maintenance en fonction de leur importance, d'autre part pour déterminer la famille d'intervenants qui va réaliser les opérations en toute sécurité [11].

I.3.4.1 : Maintenance du premier niveau

1. Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement ;
2. Échange d'éléments consommables, facilement accessible (fusible, voyants...etc.).

I.3.4.2 : Maintenance de deuxième niveau

1. Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet ;
2. Opérations mineures d'entretien (graissage par exemple) ;
3. Contrôles de bon fonctionnement.

I.3.4.3 : Maintenance de troisième niveau

1. Identification des pannes ;
2. Réparation au niveau des composants ou par échange d'éléments fonctionnels ;
3. Réparations mécaniques mineures ;
4. Réglage général et réaligement des appareils ;
5. Organisation de la maintenance préventive conformément aux instructions reçues.

I.3.4.4 : Maintenance du quatrième niveau

1. Tous travaux de maintenance corrective ou préventive à l'exception éventuellement des mises à neuf ;
2. Réglage des appareils de mesure utilisée pour la maintenance ;
3. Vérification par des organismes spécialisés pour la maintenance ;
4. Vérification par des organismes spécialisés des étalons secondaires possédés ;
5. Réception des équipements réparés au cinquième degré ;
6. Contribution à la formation des agents affectés au troisième degré de maintenance ;
7. Participation à la définition de la politique de maintenance ;

I.3.4.5 : Maintenance du cinquième niveau

1. Exécution des remises à neuf ;
2. Exécution des réparations importantes normalement du ressort du quatrième degré mais confiées pour des raisons économiques ou d'opportunité ;
3. Formation du personnel de maintenance (en principe uniquement celui de quatrième degré).

I.4 : Surveillance

I.4.1 : Définition de surveillance

Une tâche continue, réalisée en temps réel, qui permet de déterminer l'état d'un système physique, elle consiste en l'enregistrement des informations ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication des anomalies du comportement [12].

I.4.2 : Différents niveaux de la surveillance

La surveillance se compose de deux fonctions principales qui sont la détection des défauts s'il existe, et le diagnostic.

- ✓ **Détection :** Elle consiste à observer l'état de fonctionnement de la machine à travers des indicateurs le plus souvent globaux. Une augmentation de ces indicateurs par rapport à des valeurs de référence caractérisée par la signature vibratoire de la machine en bon état permet de déclencher des alertes de dysfonctionnement [13].
- ✓ **Diagnostic :** Le diagnostic permet donc d'isoler le défaut, de le localiser et de le caractériser et identifier la nature du défaut. la fonction de diagnostic se décompose en deux fonctions élémentaires : localisation et identification des causes. La localisation permet de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant tandis que l'identification de la cause consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale [14].

I.4.3 : Surveillance par analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est la plus largement utilisée car elle est adaptée aux plusieurs composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc....) Et de sa structure.

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence. Une vibration est caractérisée principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature [15].

I.4.4 : Caractéristiques d'un signal vibratoire

I.4.4.1 : Fréquence

Définition

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] [16].

1 hertz = 1 cycle/seconde. Une vibration qui se produira 10 fois par seconde aura donc une fréquence " f " de 10 hertz.

Si la fréquence " f " d'un phénomène est de 50 hertz, c'est-à-dire 50 cycles par seconde, la durée d'un cycle (ou période T) est de $1/50^{\text{ème}}$ de seconde. La fréquence " f " est l'inverse de la période T : $f = 1/T$.

Unités

Si l'unité normalisée de la fréquence est l'hertz [Hz], on rencontre parfois des valeurs exprimées en CPM (cycle par minute) ou RPM (rotation par minute). D'où : 1 hertz = 1 CPM/60 = 1 RPM/60.

I.4.4.2 : Amplitude

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre et on peut définir [17] :

- ❖ L'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelé amplitude crête (A_c) ou niveau crête.
- ❖ L'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête (A_{cc}) (peak to peak, en anglais) ou niveau crête-crête.
- ❖ L'amplitude efficace (A_{eff}), aussi appelée RMS (Root Mean Square, en anglais) ou niveau efficace :

$$A_{eff} = \frac{A_c}{\sqrt{2}} = \frac{A_{cc}}{2\sqrt{2}} \quad (I.1)$$

La figure suivante présente les différentes amplitudes.

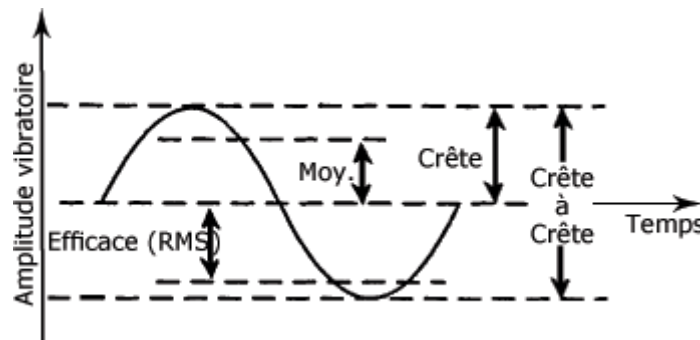


Figure I.1 : Différentes amplitudes (vibration sinusoïdale).

I.4.4.3 : 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 (figure I.2-a) ou sinusoïdal complexe (figure I.2-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, ...) [18].

L'équation de mouvement de ce type de vibration est donnée par la formule :

$$X(t) = X_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (I.2)$$

Avec: $\omega = 2\pi f$ (rad/sec) : la pulsation (f : la fréquence du mouvement).

: La phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps.

Les vibrations périodiques de type impulsif 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, ... Elle est décrite par l'équation [19] :

$$A(t) = \sum A_i \cdot \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (I.3)$$

Les vibrations aléatoires de type impulsif peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe.

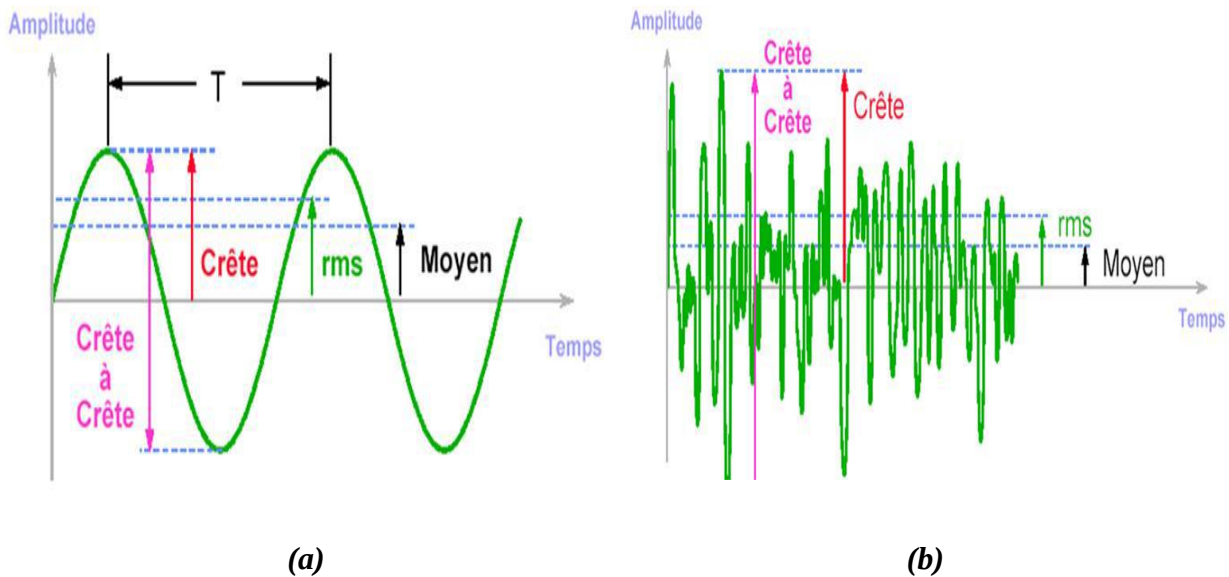


Figure I.2 : Nature d'une vibration.

I.5 : Pratique de l'analyse vibratoire

La qualité de la détection et de la localisation de défaut par l'analyse vibratoire passe par une bonne maîtrise de la chaîne de mesures. On peut distinguer trois grandes étapes pour réaliser l'acquisition [20] :

1. Les vibrations mécaniques sont transformées en signaux électriques grâce aux accéléromètres.
2. Les signaux électriques sont conditionnés pour rendre exploitables les signaux par les appareils d'analyses.
3. Les signaux sont enregistrés par différents matériels tels que les cartes d'acquisitions associées à des logiciels de traitement.

I.5.1 : Accéléromètre

Un accéléromètre piézoélectrique (figure I.3) est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte [21].

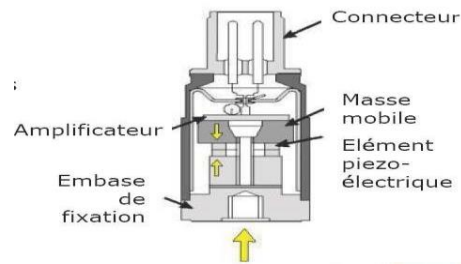


Figure I.3 : Schéma de principe d'un accéléromètre.

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

- ✓ Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.
- ✓ Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique.
- ✓ Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse.
- ✓ Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.

I.5.1.1 : Avantages

- Facile à installer ;
- Petit, léger ;
- Supporte les hautes températures.

I.5.1.2 : Inconvénients

- Nécessite une double intégration pour le déplacement ;
- Nécessite une source extérieure ;
- Fournit des informations limitées sur la dynamique d'arbre ;
- Médiocre pour les faibles vitesses.

I.5.1.3 : Problèmes et défauts détectés

- ✓ Roulements ;
- ✓ Engrenages ;
- ✓ Machine à pâles ;
- ✓ Machine électrique ;
- ✓ Généraux : balourd, désalignement, usure, etc.

I.5.2 : Choix de l'emplacement de capteurs

Dans le cas des machines tournantes, les principales mesures seront effectuées le plus souvent au droit des paliers qui sont les parties fixes les plus directement en relation avec les efforts appliqués à la partie mobile (figure I.4 et figure I.5) Ces efforts sont de deux types [22]:

I.5.2.1 : Efforts tournants

Ce sont les efforts liés à la rotation de l'arbre, générés par exemple par un balourd ou un désalignement et dont les amplitudes seront plus grandes dans le cas d'une mesure effectuée dans un plan radial [23].

I.5.2.2 : Efforts directionnels

Ce sont des efforts liés à une contrainte de l'arbre, générés par exemple par la tension d'une courroie (effort directionnel radial) ou un par le contact d'un engrenage conique (effort directionnel axial) [24].

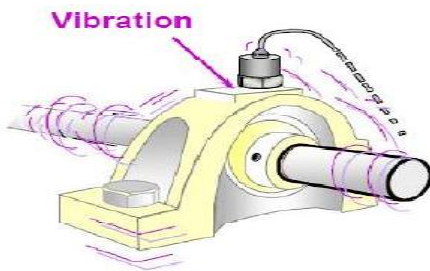


Figure I.4 : Fixation du capteur sur palier.

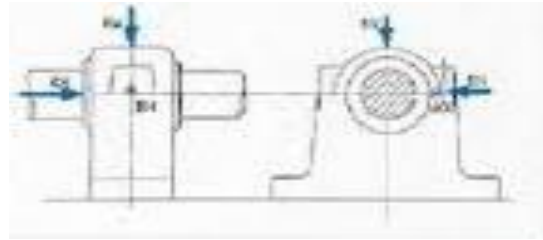


Figure I. 5 : Choix directement pour la prise de mesure.

I.5.2.3 : Conditionnement du signal

Le signal électrique doit être conditionné pour être traité par les appareils d'analyse. Le conditionnement est donné par les points suivants [25]:

- A. Amplifier le signal issu du capteur pour le rendre exploitable ;
- B. L'intégration du signal pour passer à la vitesse ou au déplacement ;
- C. Filtrer le signal analogique par les filtres passe haut et passe bas ;
- D. Amplification du signal obtenu pour transmettre à l'appareil d'analyse ;
- E. Numériser le signal.

I.6 : Généralités sur les moteurs asynchrones

I.6.1 : Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe : on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit [26].

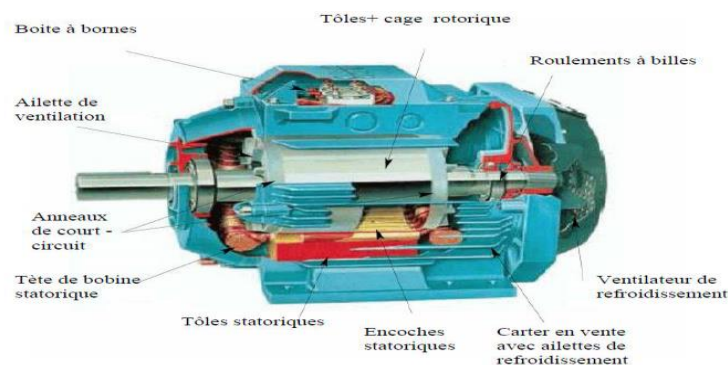


Figure I. 6 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage de d'écureuil.

I.6.1.1 : Stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure I.7). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique [27].

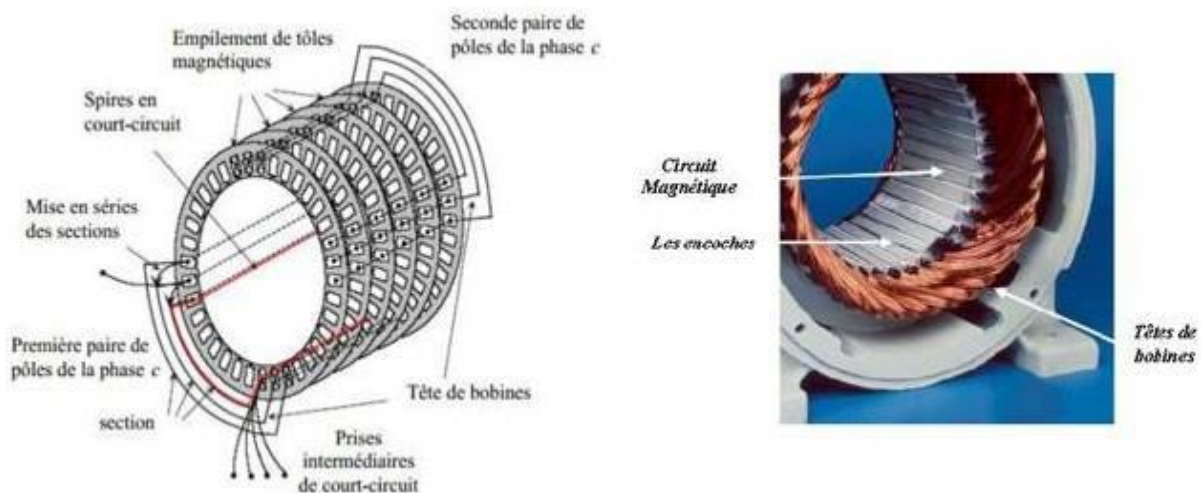


Figure I. 7 : Différentes vues et coupes d'un stator du moteur asynchrone.

I.6.1.2 : Rotor

Dans le rotor le circuit magnétique est constituées d'un assemblage de tôles, Dans les Petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de Plusieurs sections montées sur un noyau. Donc le rotor constitue de deux types de rotor : le rotor a bobiné ou à cage d'écureuil [28].

I.6.1.2.1 : Rotor a bobiné

Les enroulements sont bobinés de manière à obtenir un enroulement triphasé à « p » Paires de pôle, ces enroulements localisés dans les encoches situées à la périphérie du rotor. Les bobinages rotoriques sont toujours couplés en étoile, et les trois bornes accessibles sont reliées à la carcasse du stator à l'aide d'un système constitué de trois bagues tournants et de trois balais fixe, le (Figure I.8) représente le rotor a bobiné [29].



Figure I. 8: Rotor bobiné.

I.6.1.2.2: Rotor a cage

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure I.9). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Dans le cas de rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes) [30].

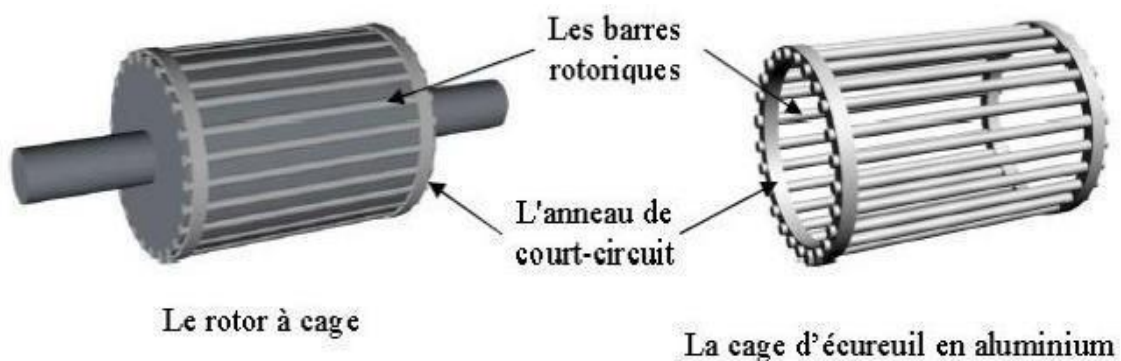


Figure I.9 : Vue schématique en perspective du rotor à cage d'écureuil.

I.6.1.2.3 : 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 de torsion (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 [31].

I.7 : Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes [32] :

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

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants (figure I.10) [33] :

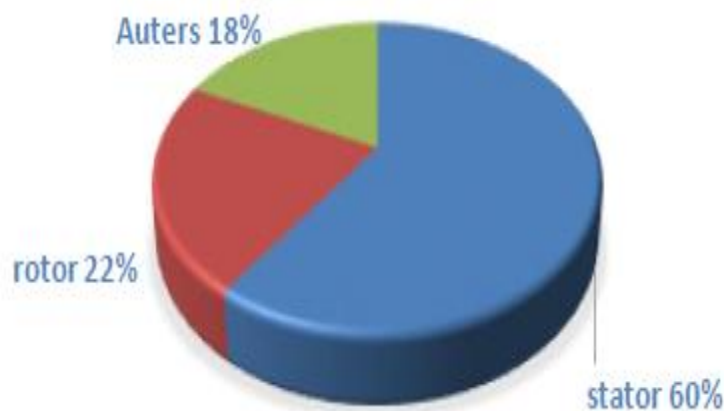


Figure I.10 : Proportion de défauts d'un moteur asynchrone.

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure (I.11) [34] :

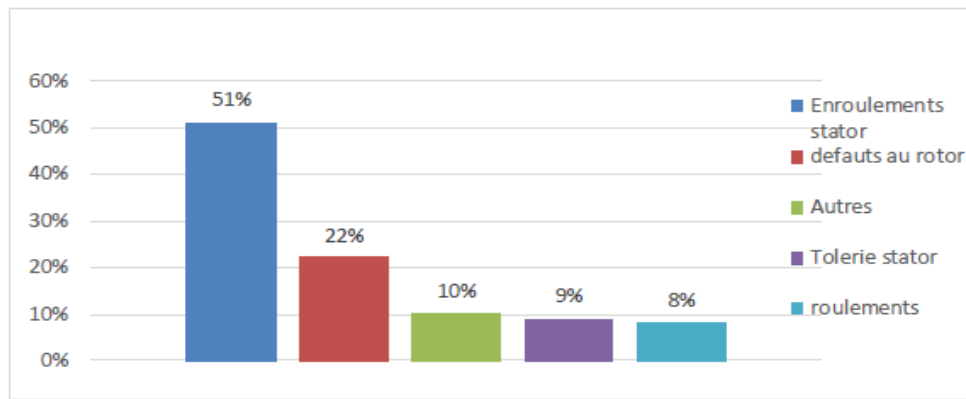


Figure I.11 : Répartition des pannes sur les machines asynchrones de faibles ou moyennes puissances.

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur la figure (I.12) [34].

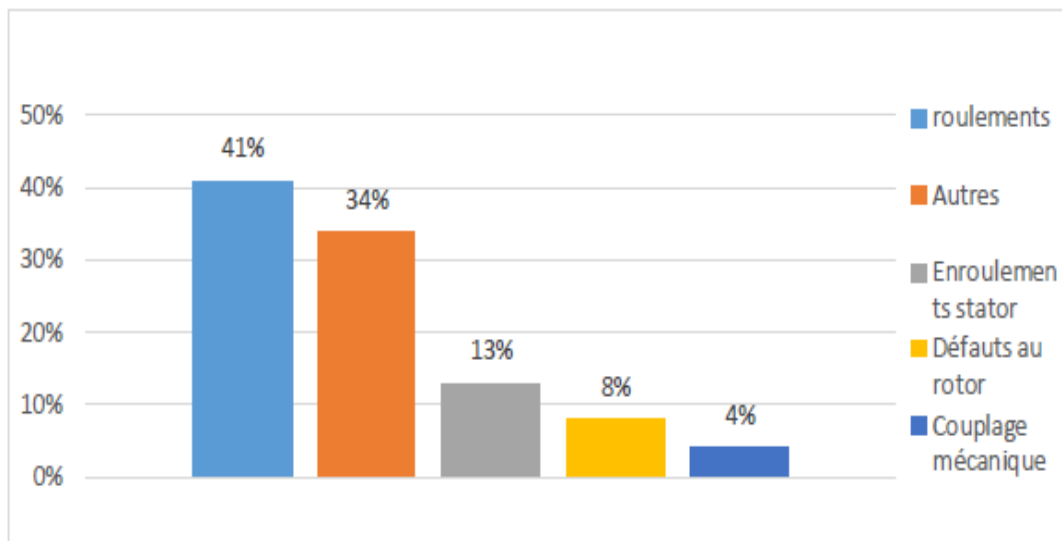


Figure I.12 : Répartition des pannes sur les machines asynchrones de fortes puissances.

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue [34].

I.8 : Causes des défauts

La figure (I.13) présente les phénomènes à l'origine des défauts dans la machine. La principale source de défauts provient de la mécanique. La deuxième cause de défauts est la surchauffe du moteur qui accentue le vieillissement des composants. La troisième cause de défauts référencée est le claquage d'isolants conduisant à des court-circuit. Notons que de nombreuses sources de défauts ne sont pas bien connues [35].

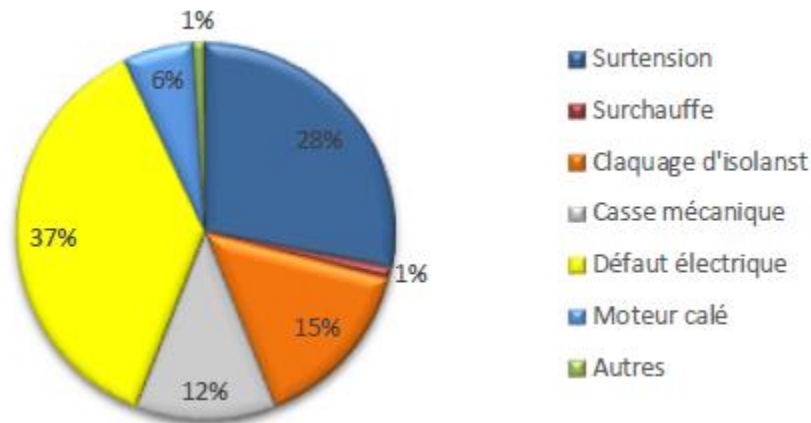


Figure I.13: Répartition des causes des défauts pour une machines asynchrones.

I.9 : Principaux défauts dans la machine

Les principaux défauts pouvant se produire dans une machine à cage peuvent être classés comme suit [36] :

- ✓ Défauts au stator résultant d'une ouverture ou d'un court-circuit sur au moins une phase du stator ;
- ✓ Connexion anormale des enroulements stator ;
- ✓ Barre ou anneau de court-circuit au rotor cassé ;
- ✓ Excentricité dynamique ou statique ;
- ✓ Axe plié (proche de l'excentricité dynamique) ;
- ✓ Roulements.

Une étude conduite pour IEEE a établi une statistique des différents défauts pouvant se produire sur une machine électrique (figure I.14) [37].

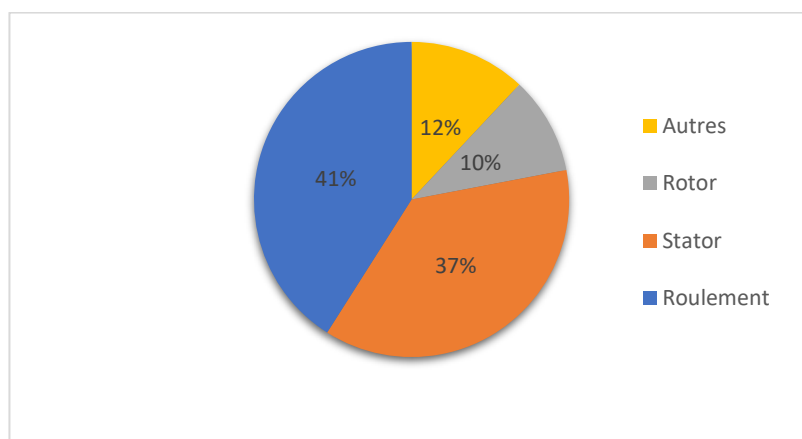


Figure I.14 : Répartition des défauts suivant le composant.

Cette répartition tend à montrer que les défauts se situent principalement dans la chaîne mécanique et dans le stator. Du fait des conditions de fabrication des moteurs, les défauts

dans le rotor sont de moins en moins fréquents. Nous allons détailler les principales caractéristiques des défauts cités [37].

I.9.1 : Défaillances mécaniques

I.9.1.1. Défauts des roulements

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor [36]. Ces éléments assurant le positionnement correct de l'axe de la machine, constituent des éléments critiques [37].

Il ressort de la figure (I.15) que la principale source de défaillances est constituée par les roulements qui assurent la bonne rotation et le maintien de l'axe du rotor. Dans les causes de défaillance des roulements, nous pouvons noter l'usure due au fonctionnement normal et les phénomènes de courant d'arbre qui renforcent cette usure. Un défaut dans les roulements affecte certes la vitesse de l'axe du rotor mais aussi la répartition du flux dans l'entrefer qui n'est plus alors constant (phénomène d'excentricité). Ceci se traduit donc par une évolution des grandeurs électromagnétiques et donc des courants dans la machine [37].

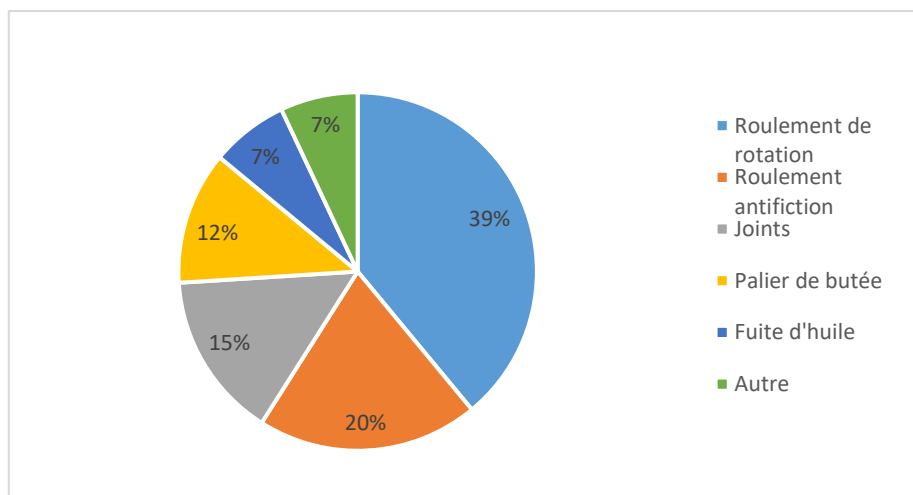


Figure I.15 : Répartition des défauts roulement.

Ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles [36] :

- + L'usure due au vieillissement ;
- + La température de fonctionnement élevée ;
- + La perte de lubrification ;
- + L'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement) ;
- + Le défaut de montage ;
- + Les courants d'arbres (Shaft Current) ;
- + Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont ;

- ✚ Des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures ;
- ✚ L'ondulation de leur surface de roulement ;
- ✚ L'attaque des billes ;
- ✚ La corrosion due à l'eau ;
- ✚ Défaut de graissage, problème dû à la température ;
- ✚ Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge.

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur [36].

I.9.1.2.Défaillances du flasque

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [38].

I.9.1.3.Défaillances de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [39].

I.9.2 : Défaillances au stator

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème :

- Thermique (surcharge, ...) ;
- Électrique (diélectrique, ...) ;
- Mécanique (bobinage, ...) ;
- Environnemental (agression, ...).

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

I.9.2.1 : Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des court-circuit. 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 [36].

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 [36] :

- 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 ;
- Vieillesse naturelle 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.

I.9.2.2 : Court-circuit entre spires

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) [36].

Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [36].

I.9.2.3 : 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 [36].

I.9.2.4 : 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 [36].

I.9.2.5 : Défaits 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 [36].

I.5.3 : Défaillances au rotor

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème [38] :

1. Thermique (surcharge, ...) ;
2. Électromagnétique (force en $B^2(t)$, ...) ;
3. Résiduel (déformation, ...) ;
4. Dynamique (arbre de transmission, ...) ;
5. Mécanique (roulement, ...) ;
6. Environnemental (agression, ...).

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit [36] :

- Rupture de barres.
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.
- Excentricité statique et dynamique.

I.9.3.1 : Ruptures de barres

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine.

Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [36].

I.9.3.2 : Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces 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 [36].

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 similaire à celui provoqué par la cassure de barres [36].

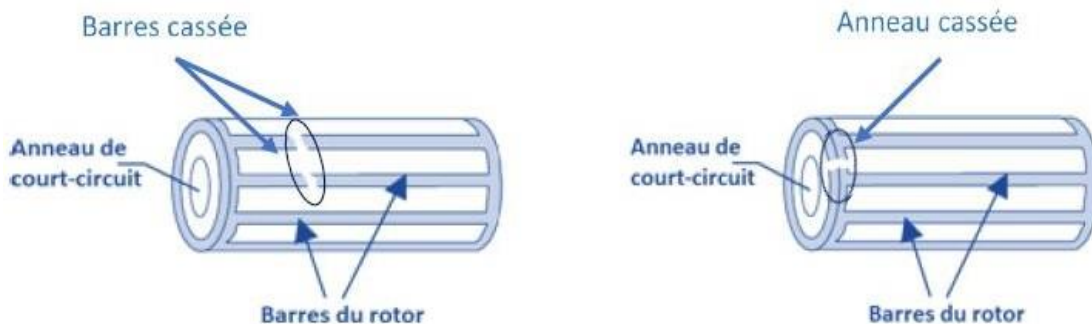


Figure I.16 : Modélisation schématique de rupture de barres ou rupture d'anneaux.

I.9.3.3 : Excentricité statique et dynamique

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor (figure I.17) [39].

Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage) [36].

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

- ❖ L'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- ❖ L'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- ❖ L'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités.

Ce défaut modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine.

En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [36].

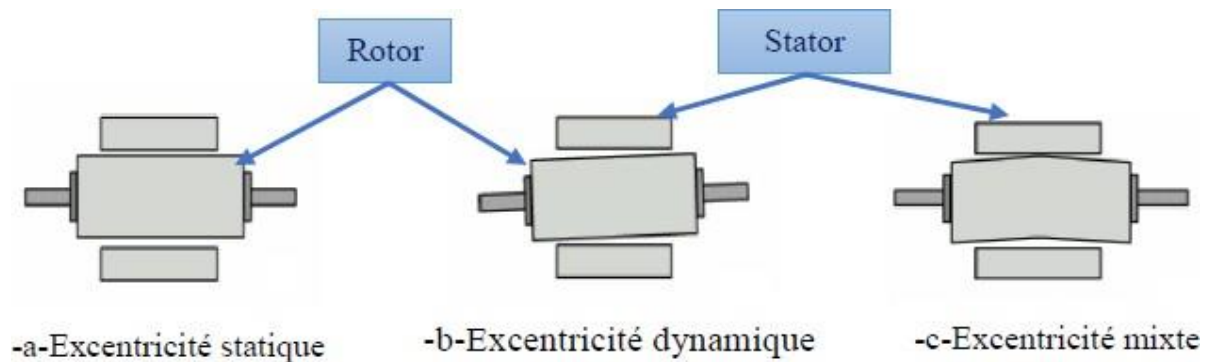


Figure I.17 : Modélisation schématisée de l'excentricité statique et dynamique et mixte.

I.10 : Conclusion

La première partie de ce chapitre nous a permis de mieux connaître les différents types de maintenance, les niveaux de maintenance, la surveillance, les caractéristiques d'un signal vibratoire et le choix de l'emplacement des capteurs de vibration.

Dans la deuxième partie de ce chapitre est divisée en deux parties : La première partie concerne la constitution de la machine asynchrone. Ensuite dans la deuxième partie, nous avons présenté les principales défaillances au niveau des différentes parties de la machine. Ces défaillances peuvent être d'origine électrique ou mécanique, et dans différents emplacements de l'élément ou la partie du système, nous nous sommes intéressés à répertorier les principales défaillances se produisant sur les différentes parties de moteur asynchrone ainsi que les causes et les conséquences de leur apparition.

Le chapitre qui suit sera consacré à l'état de l'art de l'utilisation des outils de traitement de signal pour la détection des défauts.

Chapitre II : Etat de l'art sur les techniques de traitement de signal appliquées à l'analyse vibratoire.

II.1 : Introduction

Nous présentons dans ce chapitre un état de l'art sur les méthodes de traitement du signal les plus fréquemment utilisées dans l'analyse des signaux vibratoires. Une synthèse bibliographique sur l'application de chaque outil de traitement du signal dans le domaine de la détection des défauts par l'analyse vibratoire.

II.2 : Analyse temporelle

Plusieurs techniques d'analyses des signaux vibratoires dans le domaine temporel existent et sont basées sur l'analyse statistique du signal recueilli à travers des indicateurs dits globaux. Ces indicateurs évaluent l'état de fonctionnement global des équipements mais ne localisent pas le défaut, ce sont des méthodes utiles à la surveillance.

II.2.1 : Valeur efficace (RMS)

C'est une valeur très caractéristique du signal, vu qu'elle a une relation directe avec l'énergie contenue dans celui-ci [40] :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (II.1)$$

Où : $x(t)$ est la fonction représentative du signal et « t » le temps d'analyse.

L'avantage d'un tel indicateur est son extrême facilité de mise en œuvre. Cependant, il est peu sensible, on l'utilise en général quand la puissance du signal vibratoire en fonctionnement sain est faible par rapport à la puissance du défaut.

Cet indicateur est traditionnellement utilisé pour des signaux de type accélérations et sur une large bande de fréquences entre 0 et 20kHz. Cependant, il n'est pas rare de voir des valeurs RMS calculées sur des bandes de fréquences correspondant à des résonances de structure pour augmenter la sensibilité de l'indicateur.

II.2.2 : Valeur crête

Sont les valeurs maximales du signal temporel mesuré [41] :

$$V_{crête} = \max |x(i)| \quad i = 1, \dots, N \quad (II.2)$$

Où : N est le nombre de points du signal.

II.2.3 : Facteur de crête

C'est un indicateur de surveillance simple à calculer, car c'est le rapport entre la valeur de crête du signal et sa valeur efficace (RMS), comme il peut se calculer par le rapport entre la valeur maximale du signal et son écart type [42].

$$F_c = \frac{V_{crête}}{RMS} \quad (II.3)$$

Cet indicateur est utilisé pour la détection spécifique d'impulsions ou de choc présents dans le signal vibratoire.

En rappelant que cet indicateur vaut $\sqrt{2}$ pour une vibration de type sinusoïdale.

II.2.4 : Facteur K

Le facteur K d'un signal est défini comme étant le produit entre la valeur crête et la valeur efficace [43] :

$$F_K = V_{crête} RMS \quad (II.4)$$

L'interprétation du facteur crête se fait au travers de son évolution au fur et à mesure de la dégradation des éléments de l'entraînement, la valeur du facteur K augmente avec l'usure.

II.2.5 : Moment d'ordre 3

Couramment appelé « Skewness », représente le taux de dissymétrie de la distribution d'amplitudes du signal par rapport à la valeur moyenne [44] :

$$M_3 = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^3 p(x) dx \quad (II.5)$$

C'est une quantité sans dimension, Elle sera positive ou négative selon l'étalement de la courbe à droite ou à gauche, respectivement, de la valeur moyenne.

II.2.6 : Kurtosis

Qui, mathématiquement est le moment d'ordre 4, est couramment nommé en traitement de signal par « Kurtosis ». Il représente le taux d'aplatissement de la distribution, il donne une évaluation de l'importance du pic du sommet de la courbe, il est défini par [45] :

$$K_u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right]^4 \quad (II.6)$$

Ce moment est utilisé pour détecter la présence de chocs dans le signal vibratoire. En effet, pour un signal de distribution gaussienne, le kurtosis est égal à 3.

Kurtosis	Sévérité
1.5	Bon : signal harmonique
2.8 à 3.2	Passable : signal aléatoire
3.2 à 4	Elevé
>4	Critique

Tableau II.1: Critère de sévérité du kurtosis.

II.2.7 : Niveau global

Le suivi par le niveau global consiste à mesurer la valeur efficace des composantes vibratoires constituant le signal [46] :

$$NG = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2} \quad (II.7)$$

Avec $a_1, a_2, \dots, a_n$ sont des composantes vibratoire constituant le signal et n le nombre de composantes.

II.2.8 : Talaf et Thikat

Talaf et Thikat propose des nouveaux indicateurs temporels, qui permettent de distinguer les quatre étapes de dégradation [47] :

1^{ère} étape : Période de maturité (aucun défaut significatif) ;

2^{ème} étape : Initiation du défaut (le défaut prend naissance et une légère augmentation de la vibration peut être remarquée) ;

3^{ème} étape : Propagation de la dégradation (les vibrations sont importantes et les défauts sont visibles dans le signal vibratoire) ;

4^{ème} étape : Fin de vie (la vibration apparait du type large bande).

Talaf et Thikat sont donnés par les équations suivantes :

$$Talaf = \log \left| K_u + \frac{RMS}{RMS_0} \right| \quad (II.8)$$

$$Thikat = \log \left[(K_u)^{FC} + \left(\frac{RMS}{RMS_0} \right)^{V_{crée}} \right] \quad (II.9)$$

Ou RMS_0 est la valeur efficace de signal vibratoire d'un équipement sans défaut.

II.3 : Analyse fréquentielle

II.3.1 : Analyse spectrale

Elle s'appuie sur la transformé de Fourier du signal vibratoire, cet outil de connaitre le contenu spectral du signal et de localiser les fréquences caractéristiques des défauts des composants mécanique (roulement, engrenage, turbine....etc). Chaque élément est caractérisé par une ou plusieurs fréquences caractéristiques de défaut. Ces fréquences fondamentales dépendent de la géométrie du composant et de sa vitesse de rotation. La transformée de Fourier est définie par l'équation suivante [48] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (II.10)$$

Ou $X(f)$ est la transformée de Fourier, t est le variable de temps, f est la variable de fréquence.

II.3.2 : Analyse d'enveloppe

Un défaut localisé dans un entraînement électrique se traduit par la présence d'une impulsion périodique dans le signal temporel pouvant servir pour le diagnostic. L'analyse d'enveloppe est une technique de détection précoce des défauts du type choc. Elle est basée sur la transformée d'Hilbert qui est un outil très utilisé pour le diagnostic des entraînements électriques. La transformée d'Hilbert d'un signal $x(t)$ est définie par la formule suivante [49] :

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(t)}{t - \tau} d\tau = x(t) \quad (\text{II.11})$$

Où : $x(t)$ est la partie imaginaire du signal analytique $z(t)$ qui est défini comme suit :

$$z(t) = x(t) + jx(t) = x(t) + j[x(t)] = A(t)e^{j\varphi(t)} \quad (\text{II.12})$$

L'enveloppe du signal $A(t)$ est représentée par le module du signal analytique $A(t) = |x(t)|$. La phase et la fréquence instantanée du signal sont données par les équations suivantes :

$$\varphi(t) = \arctg \left[\frac{\hat{x}(t)}{x(t)} \right] \quad (\text{II.13})$$

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (\text{II.14})$$

En pratique, la méthode d'enveloppe demande une série de traitement du signal temporel brut avant d'obtenir le résultat. Ces étapes sont résumées comme suit :

Etape 1 : Filtrage du signal brut afin d'éliminer les composantes indésirables ;

Etape 2 : Nous appliquons la transformée d'Hilbert pour calculer l'enveloppe;

Etape 3 : Le spectre d'enveloppe est calculé et à partir duquel on peut extraire les informations sur le défaut.

II.3.3 : Kurtosis spectral

Le Kurtosis spectral est de plus en plus utilisé pour la détection de défaut des machines électriques, en raison de la simplicité de l'algorithme, et de sa capacité à détecter des événements non stationnaires. Cette technique consiste à calculer le Kurtosis du signal analysé à chaque fréquence afin de discerner les structures non stationnaires et d'indiquer dans quelle bande de fréquences celles-ci se réalisent. Cette manière de faire s'avère relativement robuste par rapport au bruit additif stationnaire, contrairement au Kurtosis global. Le Kurtosis spectral (KS) d'un processus non stationnaire $x(i)$ se formule [50]:

$$K_x = \frac{|H(i, f)|^4}{\langle |H(i, f)|^2 \rangle^2} - 2 \quad (\text{II.15})$$

Cette définition jouit de nombreuses propriétés dont les plus importantes sont:

- a)** Le Kurtosis spectral des processus stationnaires réguliers est une fonction constante de la fréquence ;
- b)** Le Kurtosis spectral des processus stationnaires gaussiens est une fonction identiquement nulle ;
- c)** En présence du bruit stationnaire additif $\eta(i)$, le KS d'un processus non stationnaire $X(i)$ s'exprime par :

$$K_{(x+\eta)}(f) = K_x(f) / |1 + \rho(f)| \quad (\text{II.16})$$

Où $\rho(f)$ est le rapport bruit à signal en fonction de la fréquence.

II.3.4 : Analyse cepstrale

Le Cepstre (anagramme du mot spectre) est un opérateur mathématique qui permet d'identifier et de quantifier immédiatement toutes les structures périodiques ou de type écho [51].

La première application du cepstrale a été faite par Bogert en 1963 pour la détection des échos. Le cepstrale se définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme du spectre, il est donné par l'équation suivante :

$$C(\tau) = C[x(t)] = TF^{-1}[\log\{TF(x(t))\}] \quad (\text{II.17})$$

La variable τ est appelée fréquence (anagramme du mot fréquence), qui représente la dimension d'un temps, une petite fréquence représente des espacements grands entre les fluctuations dans le spectre et une haute fréquence des espacements petits. Alors que le spectre permet de visualiser les différentes périodicités contenues dans un signal, le cepstrale permet lui de retrouver d'éventuelles périodicités dans un spectre. Cette technique a été très utilisée dans la détection des défauts du types chocs périodiques notamment ceux des engrenages, car elle permet de mettre en évidence les pas séparant les harmoniques d'un pignon de raies aussi bien pour les hautes vitesses de rotation que pour les plus basses.

II.4 : Analyse Temps-Fréquence et Temps-Echelle

II.4.1 : Méthode basé sur Transformée de Fourier de courte durée (STFT)

La transformée de Fourier est exprimée par l'équation suivante [52]:

$$FT_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{II.18})$$

Nous définissons la densité spectrale de puissance ou PSD comme le module carré de la transformée de Fourier, qui est donc indépendante de la phase du signal. Par conséquent, toute information sur les changements de fréquence avec variation de temps est perdue dans le PSD. La distribution temps-fréquence, connue sous le nom de Transformée de Fourier à Temps Court ou STFT est définie par :

$$STFT_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (\text{II.19})$$

$$STFT_x(t, f) = \int x(\theta + f)H(\theta)e^{-j2\pi\theta t} d\theta_R \quad (\text{II.20})$$

Seconde expression du $STFT_x$ est obtenue à partir des propriétés classiques du FT: conservation du produit scalaire, propriétés de décalage et transformation d'un produit normal en un produit de convolution. STFT est constitué par le FT de $x(\tau)h(\tau-t)$ obtenu en pondérant $x(\tau)$ par la fenêtre $h(\tau-t)$ qui est une fenêtre d'analyse courte localisée autour de t et qui se décale en faisant varier paramètre t . Rejoindre $h(\tau)$, la famille de fonctions dépendant de deux paramètres t et f , définis par:

$$h_{t,f}(\tau) = h(\tau - t)e^{j2\pi ft}, \quad (t, f) \in \mathcal{R}^2 \quad (\text{II.21})$$

Les nombres $STFT_x(t, f)$, sont communément appelés projections de $x(\tau)$ sur le système de la fonction $h_{t,f}$. Si h est la fenêtre rectangle du support T , la STFT consiste à prendre le FT d'une suite de signaux égale à x sur le support et nulle ailleurs. Nous commençons par le signal discret $[x_n = x(nT)]$, $T > 0$. Soit $h_n = h(nT)$ et N le nombre d'échantillons dans la fenêtre d'analyse. Enfin, nous introduisons une discrétisation de variable de fréquence f . Le STFT est alors défini par les nombres entiers $X_{k,n}$ calculés comme suit:

$$X_{k,n} = \sum_{\ell}^{N-1} x_{\ell+k} h_{\ell} e^{-j2\pi \ell \tau \frac{n}{N}}, \quad k \in n = 1, 2, 3 \dots \dots \quad (II.22)$$

Comme pour le FT, la technique du (zéro-padding) permet d'améliorer la résolution en fréquence. Le principe de cette méthode est de compléter par M zéros un ensemble de N échantillons de sorte que $M + N$ soit une puissance de 2 et puisse ensuite effectuer des calculs en utilisant l'algorithme Fast FT en utilisant les points $N + M$. Lorsque $M = N$, la méthode utilise les algorithmes Discrète FT qui sont en cours de calcul pour calculer des points $2N$ à partir du spectre, à partir de seulement N points du signal.

▪ Principe d'incertitude de Heisenberg-Gabor

Le principe d'incertitude, également appelé inégalité temps-fréquence, est basé sur les relations d'incertitude établies par Werner Heisenberg en mécanique quantique. L'analogie avec le travail de Heisenberg pour la transformée de Fourier a été faite par Dennis Gabor en 1946. Considérons le signal d'énergie finie $x(t)$, centré dans le temps et la fréquence autour de zéro. Gabor définit la durée Δt et la bande spectrale Δf comme suit:

$$\Delta t = \frac{1}{E_x} \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \quad (II.23)$$

$$\Delta f = \frac{1}{E_x} \int_{-\infty}^{\infty} f^2 |x(f)|^2 df \quad (II.24)$$

E_x : est l'énergie du signal donné par la relation Parseval:

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |x(f)|^2 df \quad (II.25)$$

Therefore, the time-frequency inequality is defined by:

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (II.26)$$

Il exprime le fait que le produit de la bande de durée d'un signal est borné pour une durée Δt et une bande spectrale Δf . En d'autres termes, plus la précision de la localisation des fréquences est grande, plus la précision de la localisation temporelle est faible et vice versa. Le spectrogramme est soumis au principe d'incertitude dû à l'utilisation de la transformée de Fourier. Ce problème nécessite la recherche du bon compromis temps-fréquence adapté au cas considéré pour déterminer la largeur de fenêtre correcte. La fenêtre gaussienne a la meilleure localisation temps-fréquence. En effet, il vérifie l'égalité suivante:

$$\Delta t \cdot \Delta f = \frac{1}{4\pi} \quad (II.27)$$

Enfin, le choix de la fenêtre est important car il représente un autre compromis (comparable au compromis temps-fréquence) entre la largeur du lobe principal et l'amplitude de la bande latérale dans le domaine fréquentiel.

II.4.2 : Transformée en Ondelettes

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la différence de cette dernière, la TOD utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. On appelle transformée en ondelettes discrète toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur d'échelle $a = 2^i$. Il est clair que la transformée en ondelettes discrète est pratique en implémentation sur tout système numérique [53].

L'analyse en multi-résolution permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue de la plus fine à la plus grossière. Soit ϕ la fonction échelle. Elle doit être dans L^2 et ayant une moyenne non nulle.

On forme une base de fonctions d'échelle pour tout $i \in \mathbb{Z}$ comme suit :

$$\varphi_{i,j}(t) = 2^{-i/2} \varphi(2^{-i}t - j) \quad (\text{II.28})$$

Et de la même manière la base d'ondelette :

$$\Psi_{i,j} = 2^{-i/2} \Psi(2^{-i}t - j) \quad (\text{II.29})$$

Le facteur d'échelle dyadique mène à :

$$\phi(t) = \sum_j 2h(j)\phi(2t - j) \quad (\text{II.30})$$

$$\Psi(t) = \sum_j 2g(j)\phi(2t - j) \quad (\text{II.31})$$

Les équations (II.30) et (II.31), représentent la décomposition de la fonction échelle et de l'ondelette en combinaisons linéaires de la fonction échelle à la résolution haute directement.

On note que $h(j)$ et $g(j)$ sont les filtres passe bas et passe haut respectivement lors d'une décomposition par ondelettes.

- **Algorithme de MALLAT**

Cet algorithme est schématisé par la structure suivante :

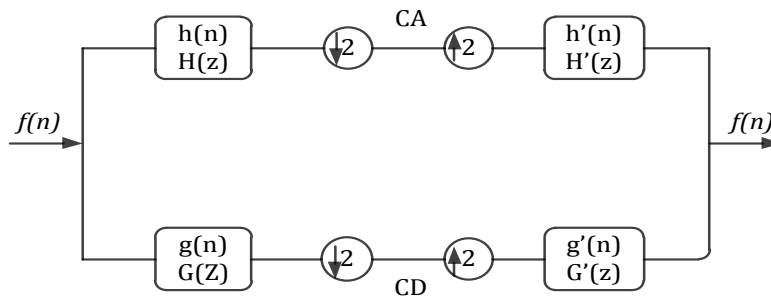


Figure II.1: Algorithme de MALLAT unidimensionnel.

$H(z)$, $G(z)$, $H'(z)$ et $G'(z)$ représentent respectivement la transformée en z de $h(n)$, $g(n)$, $h'(n)$ et $g'(n)$.

Le signal $f(n)$ est décomposé par les deux filtres d'analyse $h(n)$ (filtre basses fréquences) et $g(n)$ (filtre hautes fréquences) pour donner deux vecteurs respectivement CA (Coefficients ondelette d'approximation) et CD (Coefficients ondelette de détails). Tous deux sont de taille

approximativement égale à la moitié du vecteur d'origine. Ceci est dû au fait de l'opération de décimation par 2.

La reconstruction parfaite est théoriquement possible. Les deux vecteurs CA et CD, en les faisant passer par un sur-échantillonnage (up sampling) puis un filtrage en utilisant respectivement les filtres $h'(n)$ (filtre passe bas de reconstruction) et $g'(n)$ (filtres passe haut de reconstruction) donnent en somme le vecteur d'origine $f(n)$.

Cette «décomposition/reconstruction», est appelée décomposition/reconstruction en banc de filtres. Elle est caractéristique aux signaux unidimensionnels. Le quadruple $(h(n), g(n), h'(n)$ et $g'(n))$ forme un banc de filtres miroirs en quadrature.

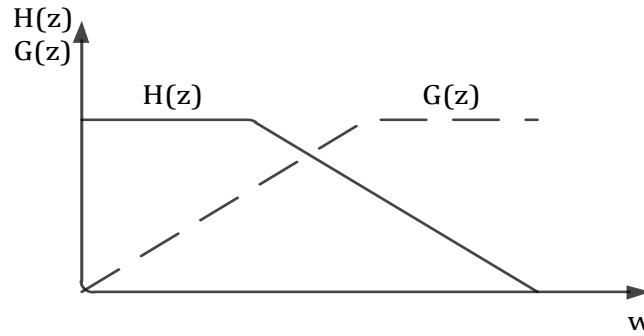


Figure II.2: Filtres miroirs en quadrature.

- **Décomposition en multi-niveau du signal**

L'algorithme de Mallat permet de décomposer le signal $f(n)$ en plusieurs niveaux comme illustré à la Figure II.3.

$$\begin{cases} F_{TOD}(0, k) = D_{k,0} = D_0 \\ F_{TOD}(1, k) = D_{k,1} = D_1 \\ F_{TOD}(2, k) = D_{k,2} = D_2 \end{cases} \quad (II.32)$$

Figure (II.3), présenté la décomposition en multi-niveau du signal.

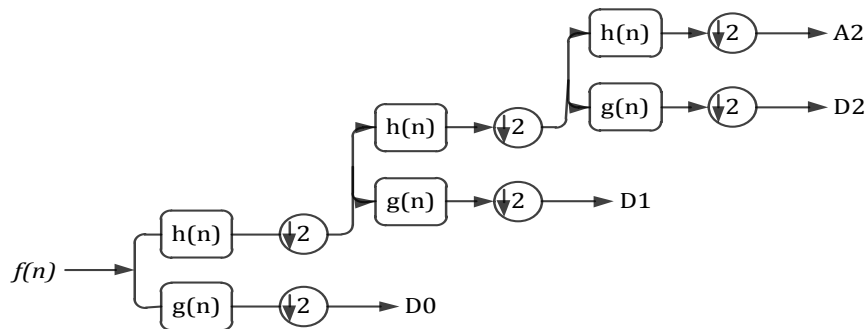


Figure II.3 : Décomposition en multi-niveau du signal $f(n)$.

Le processus de décomposition peut être réitéré, avec des approximations successives étant décomposées alternativement, de sorte qu'un signal soit décomposé en beaucoup de composants de hautes résolutions. Ceci s'appelle l'arbre de décomposition en ondelettes. Puisque le processus d'analyse est itératif, dans la théorie il peut être continué indéfiniment. En réalité, la décomposition peut procéder seulement jusqu'à ce que les différents détails se

composent d'un échantillon ou d'un Pixel simple. Dans la pratique, on choisira un nombre approprié de niveaux basés sur la nature du signal à décomposer, ou sur un critère approprié tel que l'entropie.

Le signal $f(n)$ est un signal de temps discret pour être décomposé en ses versions approximatives et détaillées en utilisant l'analyse multi-résolutionnel.

Les premiers coefficients de décomposition sont A_1 et D_1 , où A_1 est la version approximative du signal original $f(n)$ et D_1 est la représentation détaillée du signal original $f(n)$ qui est défini dans la Figure (II.4).

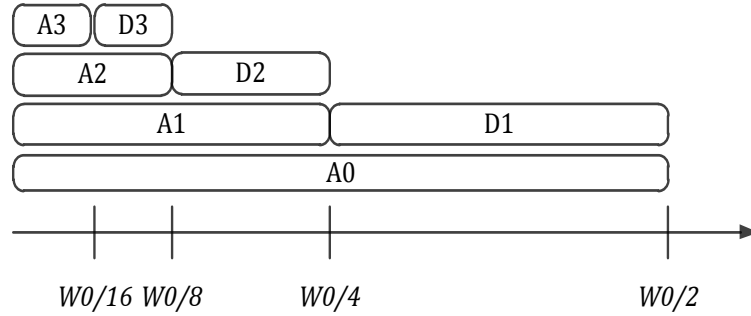


Figure II.4: Dépendance de l'échelle à la fréquence des ondelettes.

Lorsque $h(n)$ et $g(n)$ sont les filtres de décomposition de $f(n)$ dans D_1 et A_1 respectivement. Le prochain (en second lieu) niveau de décomposition est basé sur A_1 et les coefficients sont exprimés comme suit:

$$A_2 = \sum_k h(k - 2n)A_1(k) \quad (\text{II.33})$$

$$D_2 = \sum_k g(k - 2n)A_1(k) \quad (\text{II.34})$$

Des décompositions de niveau supérieur peuvent être obtenues d'un mode semblable. Les coefficients A_j et D_j sont calculés en utilisant l'algorithme de décomposition d'arbre laissant stockée l'information de base du signal fréquence aussi bien que les discontinuités.

Pour décomposer un signal dans la bande de fréquence entière, une décomposition en ondelettes peut être utilisée. Après la décomposition par périodes, nous obtiendrons 2^i bandes de fréquence chacune avec la même largeur de bande :

$$\left[(i-1)f_n/2, if_n/2 \right], i=1, 2, \dots, 2^i \quad (\text{II.35})$$

Telle que f_n est la fréquence de Nyquist dans la bande i de fréquence. D'après la relation (II.35), on peut présenter les différents niveaux de décomposition avec leurs bandes de fréquences Figure (II.5).

D'après l'arbre de décomposition (Fig. II.5), on peut estimer le signal original à n'importe quel niveau par la somme des signaux approximation et de détail. Pour une décomposition en quatre niveaux, le signal original est reconstruit en chaque niveau comme suit :

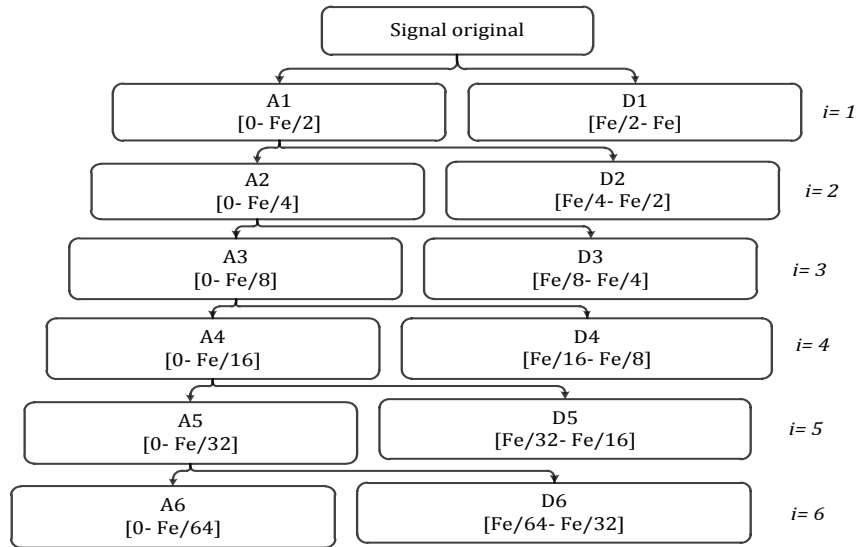


Figure II. 5 : Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux.

$$i = 1, f(n) = A_1(n) + D_1(n) \quad (II.36)$$

$$i = 2, f(n) = A_2(n) + D_2(n) + D_1(n) \quad (II.37)$$

$$i = k, f(n) = A_k(n) + D_k(n) + D_{k-1}(n) \quad (II.38)$$

II.4.3 : Transformée de Hilbert Huang

La transformée d'Hilbert Huang est une méthode d'analyse Temps-Fréquence introduite pour la première fois en 1998 par Huang. Le principe de cette technique consiste à décomposer de façon adaptative un signal en une somme de composantes oscillantes qui possède une seule fréquence à chaque échantillon, cette opération est appelée la décomposition en mode empirique (EMD) (acronyme Empirical Mode Decomposition). Elle calcule ensuite la fréquence et l'amplitude instantanée de ses composantes en utilisant la transformée d'Hilbert [54].

La méthode d'EMD et leur version (EEMD, CEEMD, CEEMDAN) seront expliqués en détail dans le chapitre IV.

II.5 : Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude de l'état de l'art sur les techniques de traitement de signal appliquées dans le diagnostic de défaut des entraînements électriques. Dans la littérature, on trouve plusieurs applications et méthodes sur le thème de l'analyse des signaux vibratoires dans le but de résoudre les problèmes de diagnostic des défauts des entraînements électriques. Nous avons présenté le principe de quelques méthodes, leur efficacité et leurs limites dans le diagnostic et la détection des défauts. Ces outils peuvent être regroupés en quatre types d'analyse : L'analyse temporelle, l'analyse fréquentielle, l'analyse Temps-Fréquence et l'analyse Temps-Echelle.

Le chapitre qui suit sera consacré à la modélisation d'un moteur asynchrone sain et avec défaut cassure des barres rotoriques.

Chapitre III : Modélisation du Moteur Asynchrone a Cage.

III.1 : Introduction

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle mathématique du moteur asynchrone à cage.

III.2 : Equations des tensions statoriques [56]

Le système d'équations des tensions des trois phases statoriques s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d[\Psi_s]}{dt} \quad (\text{III.1})$$

Où la matrice des flux statoriques $[\Psi_s]$ est donné par :

$$[\Psi_s] = [L_{ss}] [I_s] + [L_{sr}] [I_r] \quad (\text{III.2})$$

Les vecteurs des tensions et des courants de phases statoriques et celui des courants de mailles rotoriques sont respectivement:

$$[V_s] = [V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc}]^T \quad (\text{III.3})$$

$$[I_s] = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T \quad (\text{III.4})$$

$$[I_r] = [i_{r1} \quad i_{r2} \quad i_{r3} \quad \dots \quad \dots \quad i_{rn_b} \quad i_{re}]^T \quad (\text{III.5})$$

En notant que les indices s_a, s_b, s_c font référence au stator et les indices $r_1, r_2, r_3, \dots, r_{nb}, r_e$ aux mailles et anneaux rotoriques.

La matrice des résistances statoriques $[R_s]$ est donnée par :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

La matrice des inductances statoriques $[L_{ss}]$ est donnée par :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

La matrice des inductances mutuelles entre les phases statoriques et les mailles rotoriques $[L_{sr}]$ est donnée par :

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} L_{ar1} & L_{ar2} & \dots & L_{ar(nb-1)} & L_{arnb} & 0 \\ L_{br1} & L_{br2} & \dots & L_{br(nb-1)} & L_{brnb} & 0 \\ L_{cr1} & L_{cr2} & \dots & L_{cr(nb-1)} & L_{crnb} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

En remplaçant l'équation (III.2) dans (III.1) on obtient :

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + [L_{ss}] \frac{d[I_s]}{dt} + [L_{sr}] \frac{d[I_r]}{dt} + \frac{d[L_{sr}]}{dt} [I_r] \quad (\text{III.9})$$

Le quatrième terme de l'équation (III.9) peut être écrit comme suit :

$$\frac{d[L_{sr}]}{dt} [I_r] = \frac{d[L_{sr}]}{d\theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} [I_r] \quad (\text{III.10})$$

Où θ_r est l'angle qui définit la position du rotor par rapport au stator.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (\text{III.11})$$

Avec ω_r la vitesse du rotor.

Par substitution de (III.9) et (III.10) dans (III.11), l'équation (III.9) devient :

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + [L_{ss}] \frac{d[I_s]}{dt} + [L_{sr}] \frac{d[I_r]}{dt} + \omega_r \frac{d[L_{sr}]}{d\theta_r} [I_r] \quad (\text{III.12})$$

Nous obtenons donc un système d'équations différentielles d'ordre 3.

III.3 : Equations des tensions rotoriques [57]

La cage rotorique est représentée par un circuit maillé de n_b mailles, où chaque maille est constituée de deux barres adjacentes et les deux portions d'anneaux les reliant à chaque extrémité. La figure (III.1) illustre une partie du rotor sous la forme d'un schéma électrique équivalent.

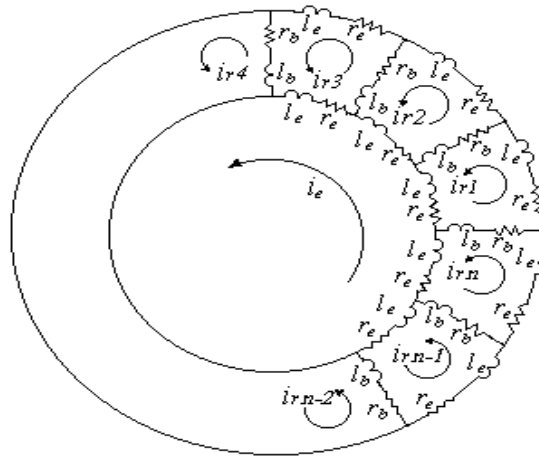


Figure. III.1 : Schéma électrique équivalent du rotor à cage.

La modélisation de la cage rotorique consiste à écrire les équations de tensions des n_b mailles parcourues par n_b courants indépendants et de tenir compte d'un des deux anneaux de court-circuit. Nous obtenons ainsi un système de n_b+1 équations qui est donné par la relation matricielle suivante :

$$[V_r] = [R_r] [I_r] + \frac{d[\Psi_r]}{dt} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$$[\Psi_r] = [L_{rr}] [I_r] + [L_{rs}] [I_s] \quad (\text{III.14})$$

Sachant que les tensions rotoriques sont nulles, et que :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & 0 & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & \dots & 0 & 0 & -R_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 2(R_b + R_e) & -R_b & -R_e \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \dots & -R_e & -R_e & n_b R_e \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Où R_b et R_e sont respectivement la résistance d'une barre rotorique et celle d'un segment d'anneau de court-circuit.

La matrice des inductances rotoriques est donnée par :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{r1r2} - L_b & L_{r1r3} & \dots & L_{r1r(nb-1)} & L_{r1rnb} - L_b & -L_e \\ L_{r1r2} - L_b & l_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{r2r3} - L_b & \dots & L_{r2r(nb-1)} & L_{r2rnb} & -L_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{r(nb-1)r1} & L_{r(nb-1)r2} & L_{r(nb-1)r3} & \dots & l_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{r(nb-1)rnb} - L_b & -L_e \\ L_{rnbr1} - L_b & L_{rnbr2} & L_{rnbr3} & \dots & L_{rnbr(nb-1)} & l_{mr} + 2(L_b + L_e) & -L_e \\ -L_e & -L_e & -L_e & \dots & -L_e & -L_e & n_b L_e \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

Avec :

L_{mr} , inductance de magnétisation d'une maille rotorique.

L_b , inductance de fuite d'une barre rotorique.

L_e , inductance de fuite d'un segment d'anneau de court-circuit.

L_{rirj} , inductance mutuelle entre la $i^{\text{ème}}$ et la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique.

La matrice des inductances mutuelles entre les mailles rotoriques et les phases statoriques $[L_{rs}]$ est égale à la transposée de la matrice $[L_{sr}]$ dans le cas d'un moteur avec entrefer uniforme.

$$[L_{rs}] = [L_{sr}]^T \quad (\text{III.17})$$

En remplaçant l'équation (III.13) dans (III.14), on obtient :

$$[V_r] = [R_r] [I_r] + [L_{rr}] \frac{d[I_r]}{dt} + [L_{rs}] \frac{d[I_s]}{dt} + \frac{d[L_{rs}]}{dt} [I_s] \quad (\text{III.18})$$

Sachant que :

$$\frac{d[L_{rs}]}{dt} [I_s] = \frac{d[L_{rs}]}{d\theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} [I_s] \quad (\text{III.19})$$

Il en résulte que :

$$[V_r] = [R_r] [I_r] + [L_{rr}] \frac{d[I_r]}{dt} + [L_{rs}] \frac{d[I_s]}{dt} + \omega_r \frac{d[L_{rs}]}{d\theta_r} [I_s] \quad (\text{III.20})$$

Le système obtenu est un système d'équations différentielles d'ordre n_b+1 .

Afin d'obtenir le système d'équations électriques global de la machine, on rassemble les deux systèmes (III.12) et (III.20) sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} + \omega_r \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

En posant :

$$[V] = \begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix}, [R] = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix}, [L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix}, [I] = \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

On obtient :

$$[V] = [R] [I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + \omega_r \frac{d[L]}{d\theta_r} [I] \quad (\text{III.23})$$

Le système ainsi obtenu est de n_b+4 équations différentielles à coefficients variables (les inductances dépendent de la position du rotor par rapport au stator). Pour le résoudre il faut avoir les valeurs des différentes inductances de la machine.

III.4 : Calcul des inductances du modèle dont le flux d'entrefer est sinusoïdal [58]

Dans ce modèle, nous supposons que l'enroulement statorique triphasé est à distribution idéale autour de la périphérie de l'entrefer. Par conséquent, le champ résultant a une forme sinusoïdale. Le déphasage entre chaque phase de l'enroulement statorique est de $2\pi/3$ degré électrique. L'expression de FMM de la phase "a" est donnée par la relation suivante [..]:

$$F_a(\varphi) = \frac{2 N_s}{\pi p} i_{sa} \cos(p\varphi) \quad (\text{III.24})$$

N_s le nombre de tours de l'enroulement de la phase, p le nombre de paires de pôles et φ un angle décrivant une position dans l'espace.

D'où l'induction créée dans l'entrefer :

$$B_a(\varphi) = \frac{2 \mu_0 N_s}{\pi g p} i_{sa} \cos(p\varphi) \quad (\text{III.25})$$

Où, μ_0 la perméabilité magnétique de l'air et g l'épaisseur d'entrefer.

Le flux magnétique dans l'entrefer par pôle est obtenu par intégration de l'expression (III.25) autour d'un intervalle polaire le long de la machine :

$$\Phi = BS = \int_0^l dz \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_a(\varphi) r d\varphi \quad (\text{III.26})$$

Il en résulte :

$$\Phi = \frac{4 \mu_0 N_s r l}{\pi g p^2} i_{sa} \quad (\text{III.27})$$

Où, r le rayon moyen de la machine et l la longueur de la machine.

Le flux total traversant l'enroulement de la phase "a" dû au courant i_{sa} est donné par :

$$\Psi_{sa} = \Phi N_s = \frac{4 \mu_0 N_s^2 r l}{\pi g p^2} i_{sa} \quad (\text{III.28})$$

L'inductance de magnétisation de la phase "a" est exprimée par :

$$L_{am} = \frac{\Psi_{sa}}{i_{sa}} = \frac{4 \mu_0 N_s^2 r l}{\pi g p^2} \quad (\text{III.29})$$

L'inductance totale de la phase "a" est égale à la somme de l'inductance de magnétisation, et l'inductance de fuite correspond au flux de fuite d'encoche, flux de fuite des têtes de bobines...etc, dont l'expression est :

$$L_{aa} = L_{am} + L_{fa} \quad (\text{III.30})$$

Les enroulements statoriques sont séparés par $2\pi/3$, Par conséquent les inductances mutuelles entre phases statoriques sont exprimées par :

$$\begin{cases} L_{ab} = L_{ba} = L_{am} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{L_{am}}{2} \\ L_{bc} = L_{cb} = L_{am} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) = -\frac{L_{am}}{2} \\ L_{ca} = L_{ac} = L_{am} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{L_{am}}{2} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

Etant donné que les enroulements statoriques sont symétriques, par conséquent les inductances propres des trois phases et les inductances mutuelles sont égales.

Nous supposons que les barres rotoriques sont identiques et régulièrement décalées, séparées l'une de l'autre par un angle $\alpha = 2\pi / nb$. La figure III.2 représente le champ créé par une maille parcourue par le courant i_{rj} .

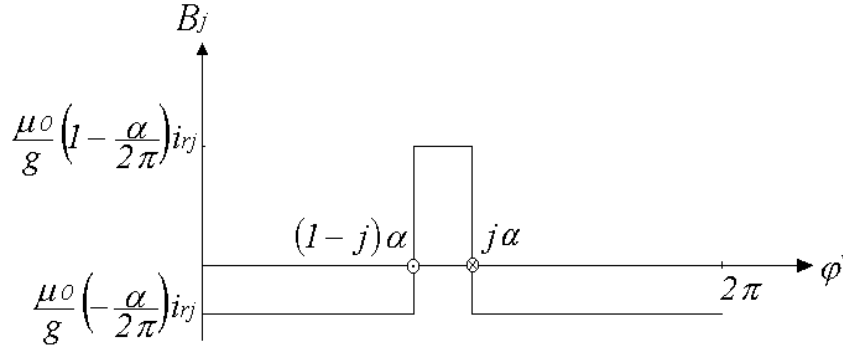


Figure III.2 : Champ créé par une maille rotorique.

Chaque maille rotorique est considérée comme une bobine à une seule spire, parcourue par le courant i_{rj} est le siège d'un flux propre exprimé par la relation :

$$\Psi_{rjrj} = \int_0^l dz. \int_{(j-1)\alpha}^{j\alpha} \frac{\mu_0 r}{g} \left(1 - \frac{\alpha}{2\pi}\right) i_{rj} d(\varphi') \quad (\text{III.32})$$

D'où,

$$\Psi_{rjrj} = \frac{\mu_0 r l}{g} \left(1 - \frac{\alpha}{2\pi}\right) \alpha i_{rj} \quad (\text{III.33})$$

Le flux traversant la $k^{\text{ème}}$ maille, produit par le courant i_{rj} circulant dans la maille j est donné par :

$$\Psi_{rkrj} = \int_0^l dz. \int_{(k-1)\alpha}^{k\alpha} \frac{\mu_0 r}{g} \left(-\frac{\alpha}{2\pi}\right) i_{rj} d(\varphi') \quad (\text{III.34})$$

Avec $k \neq j$, d'où,

$$\Psi_{rkrj} = \frac{\mu_0 r l}{g} \left(-\frac{\alpha}{2\pi}\right) \alpha i_{rj} \quad (\text{II.35})$$

L'inductance de magnétisation de la maille j , est exprimée par la relation :

$$L_{mrj} = \frac{\Psi_{rjrj}}{i_{rj}} = \frac{2\pi \mu_0 (n_b - 1) r l}{g n_b^2} \quad (\text{III.36})$$

L'inductance totale de la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique est égale à la somme de son inductance de magnétisation, des inductances de fuite des deux barres et des inductances de fuite des deux segments d'anneaux de court-circuit fermant la maille et dont l'expression est donnée par :

$$L_{rjj}=L_{mrj}+L_{bj}+L_{b(j+1)}+2L_e \quad (\text{III.37})$$

Les mailles rotoriques sont magnétiquement couplées par l'intermédiaire du flux rotorique d'entrefer. Les inductances mutuelles entre la $j^{\text{ème}}$ maille, les mailles adjacentes et non adjacentes sont exprimées par les relations suivantes :

$$L_{r(j+1)j}=\frac{\Psi_{r(j+1)rj}}{i_{rj}}-L_{b(j+1)}=-\frac{2\pi\mu_0 r l}{g n_b^2}-L_{b(j+1)} \quad (\text{III.38})$$

$$L_{r(j-1)j}=\frac{\Psi_{r(j-1)rj}}{i_{rj}}-L_{bj}=-\frac{2\pi\mu_0 r l}{g n_b^2}-L_{bj} \quad (\text{III.39})$$

$$L_{rjk}=\frac{\Psi_{rkrj}}{i_{rj}}=-\frac{2\pi\mu_0 r l}{g n_b^2} \quad (\text{III.40})$$

De la transformation dans le repère lié au rotor de la densité de flux d'entrefer créée par le courant i_{sa} , il en résulte :

$$B_a(\varphi')=\frac{2}{\pi}\frac{\mu_0 N_s}{g p}i_{sa}\cos[p(\varphi'+\omega_r t)] \quad (\text{III.41})$$

Avec :

$$\varphi=\varphi'+\omega_r t \quad (\text{III.42})$$

D'où le flux traversant la maille j est :

$$\Psi_{rja}=\int_0^l dz \int_{(j-1)\alpha}^{j\alpha} B_a(\varphi') r d\varphi' \quad (\text{III.43})$$

L'intégrale de l'équation ci-dessus conduit à :

$$\Psi_{rja}=M i_{sa}\cos\left[p\left(\frac{(2j-1)\pi}{n_b}+\omega_r t\right)\right] \quad (\text{III.44})$$

Avec ;

$$M=\frac{4\mu_0 N_s r l}{\pi g p^2}\sin\left(\frac{\pi p}{n_b}\right) \quad (\text{III.45})$$

L'inductance mutuelle entre la maille rotorique j et la phase "a" est donnée par la relation :

$$L_{rja}=\frac{\Psi_{rja}}{i_{sa}}=M\cos\left[p\left(\frac{(2j-1)\pi}{n_b}+\omega_r t\right)\right] \quad (\text{III.46})$$

De même, les inductances mutuelles entre la $j^{\text{ème}}$ maille et les phases statoriques "b" et "c" sont exprimées par :

$$L_{rjb}=\frac{\Psi_{rjb}}{i_{sb}}=M\cos\left[p\left(\frac{(2j-1)\pi}{n_b}+\omega_r t\right)-\frac{2\pi}{3}\right] \quad (\text{III.47})$$

$$L_{rjc} = \frac{\Psi_{rjc}}{i_{sc}} = M \cos \left[p \left(\frac{(2j-1)\pi}{n_b} + \omega_r t \right) + \frac{2\pi}{3} \right] \quad (\text{III.48})$$

III.5 : Equations mécaniques [59]

L'équation mécanique du mouvement dépend des caractéristiques de la charge qui diffère largement d'une application à l'autre. Dans cette étude, nous ne prenons en considération que le couple d'inertie et le couple externe qui constitue le couple de charge de la machine. Par conséquent l'équation mécanique du mouvement s'écrit sous la forme suivante :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + T_c = T_e \quad (\text{III.49})$$

Et :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (\text{III.50})$$

J : le moment d'inertie du rotor –charge combinée.

T_c : le couple de charge.

θ_r : l'angle de déplacement.

ω_r : la vitesse de rotation.

Où θ_r l'angle de déplacement du rotor, ω_r la vitesse de rotation, J le moment d'inertie, T_c le couple de charge, et T_e le couple électromagnétique produit par la machine.

Le couple électromagnétique est déduit de la co-énergie magnétique W_{co} à l'aide de l'équation suivante :

$$T_e = \left[\frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_r} \right]_{(I_s, I_r \text{ constants})} \quad (\text{III.51})$$

La co-énergie est l'énergie emmagasinée dans le circuit magnétique, par conséquent dans le cas du moteur à cage, elle peut être exprimée par la relation ci-dessous :

$$W_{co} = \frac{1}{2} \left[I_s^t L_{ss} I_s + I_s^t L_{sr} I_r + I_r^t L_{rs} I_s + I_r^t L_{rr} I_r \right] \quad (\text{III.52})$$

Le couple électromagnétique est donné par la relation :

$$T_e = \frac{1}{2} \left[I_s^t \frac{\partial L_{ss}}{\partial \theta_r} I_s + I_s^t \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_r} I_r + I_r^t \frac{\partial L_{rs}}{\partial \theta_r} I_s + I_r^t \frac{\partial L_{rr}}{\partial \theta_r} I_r \right] \quad (\text{III.53})$$

Si les deux matrices $[L_{rr}]$ et $[L_{ss}]$ sont constantes:

$$T_e = \frac{1}{2} \left[I_s^t \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_r} I_r + I_r^t \frac{\partial L_{rs}}{\partial \theta_r} I_s \right] \quad (\text{III.54})$$

Et si $[L_{sr}]$ et $[L_{rs}]$ sont égaux, nous obtenons l'expression suivante du couple :

$$T_e = I_s^t \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_r} I_r$$

$$T_e = \frac{1}{2} [I]^t \frac{d[L]}{dt} [I]$$

Dans le but de faire une étude du fonctionnement de la machine du point de vue électromécanique l'équation mécanique générale donnée est associée au système d'équations électriques. Le modèle complet de la machine prend la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} [V] \\ [Te - Tc] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R] + \frac{d[L]}{d\theta_r} & [0] \\ [0] & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & [0] \\ [0] & \begin{bmatrix} J & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [I] \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} \quad (III-55)$$

D'où on tire :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [I] \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L] & [0] \\ [0] & \begin{bmatrix} J & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix}^{-1} \left[\begin{bmatrix} [V] \\ [Te - Tc] \\ [0] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [R] + \frac{d[L]}{d\theta_r} & [0] \\ [0] & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] \\ \omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} \right] \quad (III-56)$$

D'où la forme générale suivante :

$$\frac{d}{dt} [X] = [A]^{-1} \left([U] - [B] [X] \right) \quad (III.57)$$

Étant donné que ces équations d'ordre n_b+6 , qui sont non linéaires, une méthode numérique doit être mise en œuvre. Pour parvenir à la solution, nous avons choisi la méthode explicite et classique de Runge Kutta d'ordre 4

III.6 : Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le modèle mathématique du moteur asynchrone. Le chapitre qui suit sera consacré à la détection du défaut cassure des barres rotoriques.

Chapitre IV : Détection et Localisation du Défaut Cassure des Barres Rotorique Basée sur la Transformée D'ondelette Discret.

IV.1 : Introduction

Dans le présent chapitre, on va présenter une étude préliminaire sur les méthodes destinées à ce type de signaux. Elles sont les méthodes de transformée en l'ondelette (TO) ou (WT) pour « wavelet transform ».

Dans la première partie, la méthode de transformation en ondelettes est expliquée de façon détaillée en donnant un aperçu général sur cette méthode son historique, le principe d'utilisation, les différents types d'ondelettes, et la manière de calcul de la transformation des signaux analysés.

La deuxième partie est consacrée à l'utilisation de l'enveloppe spectrale pour extraire les harmoniques qui caractérise le défaut cassure des barres rotoriques.

IV.2 : Transformée en ondelettes discrète (TOD)

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la différence de cette dernière, la TOD utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. On appelle transformée en ondelettes discrète toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur d'échelle $a = 2^i$. Il est clair que la transformée en ondelettes discrète est pratique en implémentation sur tout système numérique [60].

L'analyse en multi-résolution permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue de la plus fine à la plus grossière. Soit φ la fonction échelle. Elle doit être dans L^2 et ayant une moyenne non nulle [61].

On forme une base de fonctions d'échelle pour tout $i \in \mathbb{Z}$ comme suit :

$$\varphi_{i,j}(t) = 2^{-i/2} \varphi(2^{-i}t - j) \quad (\text{IV.1})$$

Et de la même manière la base d'ondelette :

$$\Psi_{i,j} = 2^{-i/2} \Psi(2^{-i}t - j) \quad (\text{IV.2})$$

Le facteur d'échelle dyadique mène à :

$$\varphi(t) = \sum_j 2h(j)\varphi(2t - j) \quad (\text{IV.3})$$

$$\Psi(t) = \sum_j 2g(j)\varphi(2t - j) \quad (\text{IV.4})$$

Les équations (IV.3) et (IV.4), représentent la décomposition de la fonction échelle et de l'ondelette en combinaisons linéaires de la fonction échelle à la résolution haute directement.

On note que $h(j)$ et $g(j)$ sont les filtres passe bas et passe haut respectivement lors d'une décomposition par ondelettes.

IV.2.1 : Algorithme de MALLAT :

Cet algorithme est schématisé par la structure suivante [62] :

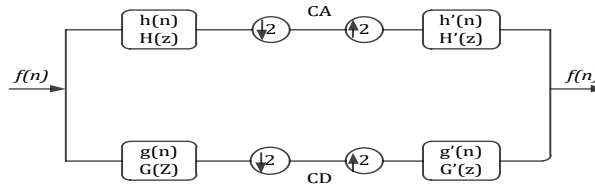


Figure IV.1: Algorithme de MALLAT unidimensionnel.

$H(z)$, $G(z)$, $H'(z)$ et $G'(z)$ représentent respectivement la transformée en z de $h(n)$, $g(n)$, $h'(n)$ et $g'(n)$.

Le signal $f(n)$ est décomposé par les deux filtres d'analyse $h(n)$ (filtre basses fréquences) et $g(n)$ (filtre hautes fréquences) pour donner deux vecteurs respectivement CA (Coefficients ondelette d'approximation) et CD (Coefficients ondelette de détails). Tous deux sont de taille approximativement égale à la moitié du vecteur d'origine. Ceci est dû au fait de l'opération de décimation par 2.

La reconstruction parfaite est théoriquement possible. Les deux vecteurs CA et CD, en les faisant passer par un sur-échantillonnage (up sampling) puis un filtrage en utilisant respectivement les filtres $h'(n)$ (filtre passe bas de reconstruction) et $g'(n)$ (filtre passe haut de reconstruction) donnent en somme le vecteur d'origine $f(n)$.

Cette «décomposition/reconstruction», est appelée décomposition/reconstruction en banc de filtres. Elle est caractéristique aux signaux unidimensionnels. Le quadruple ($h(n)$, $g(n)$, $h'(n)$ et $g'(n)$) forme un banc de filtres miroirs en quadrature [63].

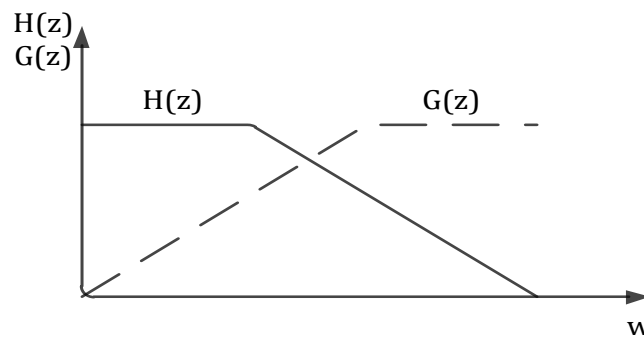


Figure IV.2: Filtrés miroirs en quadrature.

IV.2.2 : Décomposition en multi-niveau du signal [64] :

L'algorithme de Mallat permet de décomposer le signal $f(n)$ en plusieurs niveaux comme illustré à la Figure IV.3.

$$\begin{cases} F_{TOD}(0, k) = D_{k,0} = D_0 \\ F_{TOD}(1, k) = D_{k,1} = D_1 \\ F_{TOD}(2, k) = D_{k,2} = D_2 \end{cases} \quad (IV.5)$$

Figure IV.3, présenté la décomposition en multi-niveau du signal.

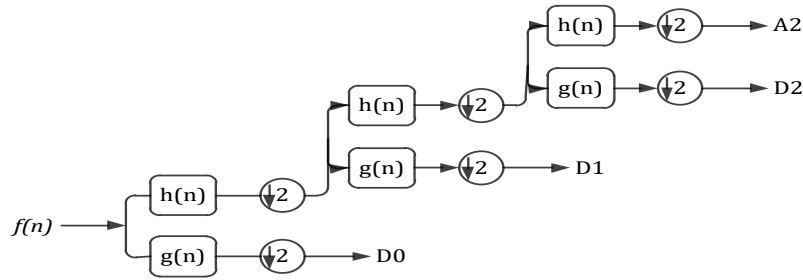


Figure IV.3: Décomposition en multi-niveau du signal $f(n)$.

Le processus de décomposition peut être réitéré, avec des approximations successives étant décomposées alternativement, de sorte qu'un signal soit décomposé en beaucoup de composants de hautes résolutions. Ceci s'appelle l'arbre de décomposition en ondelettes. Puisque le processus d'analyse est itératif, dans la théorie il peut être continué indéfiniment. En réalité, la décomposition peut procéder seulement jusqu'à ce que les différents détails se composent d'un échantillon ou d'un Pixel simple. Dans la pratique, on choisira un nombre approprié de niveaux basés sur la nature du signal à décomposer, ou sur un critère approprié tel que l'entropie.

Le signal $f(n)$ est un signal de temps discret pour être décomposé en ses versions approximatives et détaillées en utilisant l'analyse multi-résolutionnel.

Les premiers coefficients de décomposition sont A_1 et D_1 , où A_1 est la version approximative du signal original $f(n)$ et D_1 est la représentation détaillée du signal original $f(n)$ qui est défini dans la Figure IV.4.

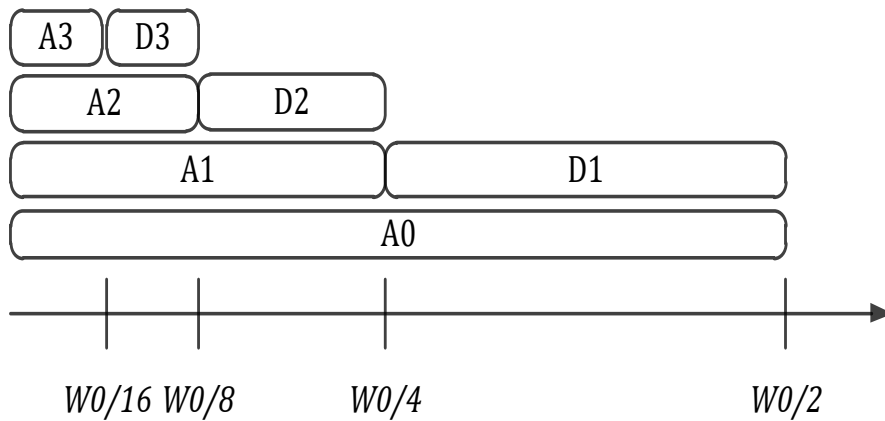


Figure IV.4: Dépendance de l'échelle à la fréquence des ondelettes.

Lorsque $h(n)$ et $g(n)$ sont les filtres de décomposition de $f(n)$ dans D_1 et A_1 respectivement. Le prochain (en second lieu) niveau de décomposition est basé sur A_1 et les coefficients sont exprimés comme suit:

$$A_2 = \sum_k h(k - 2n)A_1(k) \quad (\text{IV.6})$$

$$D_2 = \sum_k g(k - 2n)A_1(k) \quad (\text{IV.7})$$

Des décompositions de niveau supérieur peuvent être obtenues d'un mode semblable. Les coefficients A_j et D_j sont calculés en utilisant l'algorithme de décomposition d'arbre laissant stockée l'information de base du signal fréquence aussi bien que les discontinuités.

Pour décomposer un signal dans la bande de fréquence entière, une décomposition en ondelettes peut être utilisée. Après la décomposition par périodes, nous obtiendrons 2^i bandes de fréquence chacune avec la même largeur de bande :

$$\left[(i-1)f_n/2, if_n/2 \right], i=1, 2, \dots, 2^i \quad (IV.8)$$

Telle que f_n est la fréquence de Nyquist dans la bande i de fréquence. D'après la relation (IV.8), on peut présenter les différents niveaux de décomposition avec leurs bandes de fréquences Figure IV.5.

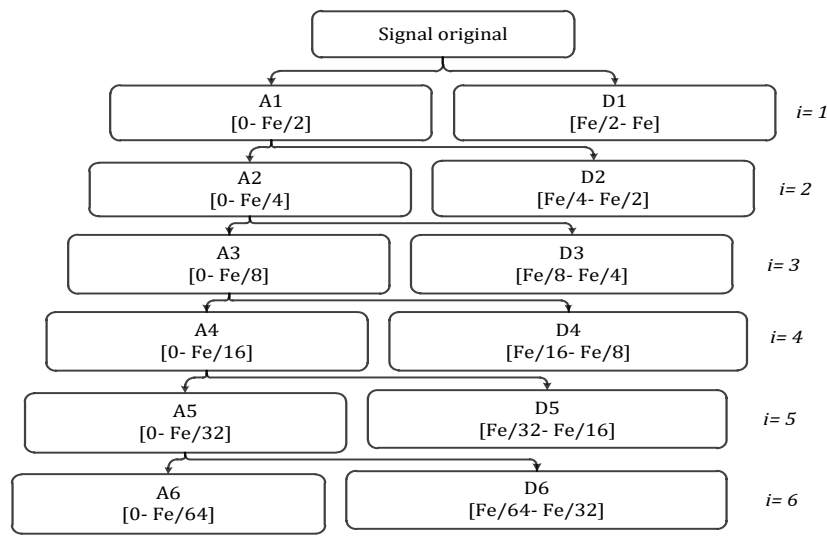


Figure IV. 5: Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux.

D'après l'arbre de décomposition Figure. IV.5, on peut estimer le signal original à n'importe quel niveau par la somme des signaux approximation et de détail. Pour une décomposition en quatre niveaux, le signal original est reconstruit en chaque niveau comme suit :

$$i = 1, f(n) = A_1(n) + D_1(n) \quad (IV.9)$$

$$i = 2, f(n) = A_2(n) + D_2(n) + D_1(n) \quad (IV.10)$$

$$i = k, f(n) = A_k(n) + D_k(n) + D_{k-1}(n) \quad (IV.11)$$

IV.2.3: Application de la technique des Ondelettes (TOD) au diagnostic de l'onduleur

La vibration du moteur représente une source très riche en informations concernant les défauts qui se manifestent souvent dans le rotor, à cet effet la majorité des travaux du diagnostic sont fondus sur l'analyse vibratoire.

Dans le cas de notre d'étude nous avons basé sur l'application de la TOD pour traiter et analyser les signaux vibratoire de la machine pendant son régime permanent pour détecter d'éventuels défauts cassures des barres rotoriques.

IV.2.4 : Exigences d'acquisition des signaux

Pour une bonne analyse des signaux vibratoire doit prendre en considération :

- Une résolution en fréquence adéquate pour l'analyse par (FFT).
- Un niveau de décomposition suffisant en cas d'utilisation des ondelettes discrètes.

Les informations importantes contenues dans le signal vibratoire sont localisées dans la bande fréquentielle le [0-500 Hz], le théorème de Nyquist implique une fréquence d'échantillonnage plus que 800 Hz. Dans cette analyse on prend $F_e=1000$ Hz et $f_r=48.5$ Hz.

D'autre part l'analyse on ondelette discrète montrera différentes bandes de fréquence centrées sur des fréquences différentes. Ces bandes de fréquences dépendra de la fréquence d'échantillonnage.

Les bandes de fréquences issues de la décomposition en ondelettes présentent sur le tableau suivant.

$$N_{niveau} = \text{int} \left(\frac{\log \left(F_e / f_s \right)}{\log(2)} \right) + 2 \quad (\text{IV.12})$$

Application numérique :

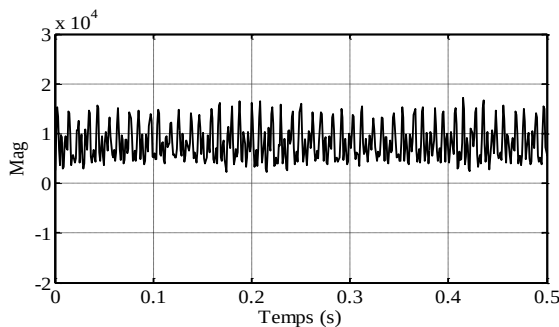
$$N_{niveau} = \text{int} \left(\frac{\log \left(1000 / 50 \right)}{\log(2)} \right) + 2 = \text{int}(4.9068) + 2 = 6 \text{ niveaux}$$

Tableau IV.1, présentée les coefficients et les bandes fréquentielles de décomposition de signal Vx.

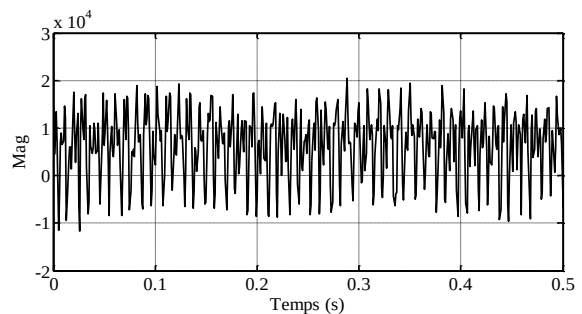
Niveau	Approximation (Hz)	Détail (Hz)
1	[0, 500]	[500, 1000]
2	[0, 250]	[250, 500]
3	[0, 125]	[125, 250]
4	[0, 62.5]	[62.5, 125]
5	[0, 31.25]	[31.25, 62.5]
6	[0, 15.62]	[15.62, 31.25]

Tableau IV.4: Les coefficients et les bandes fréquentielles.

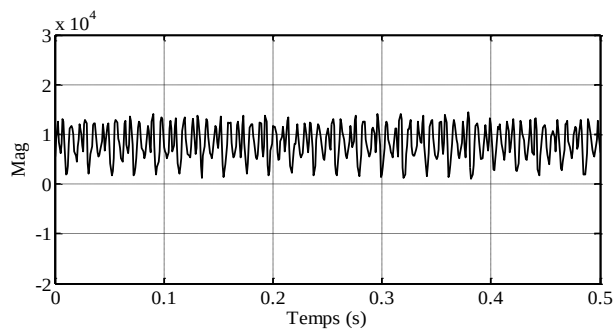
Figure IV.6, présenté les signaux de vibration dans le cas sain et le cas d'un défaut cassure 1 barre, 2 barres et 3 barres.



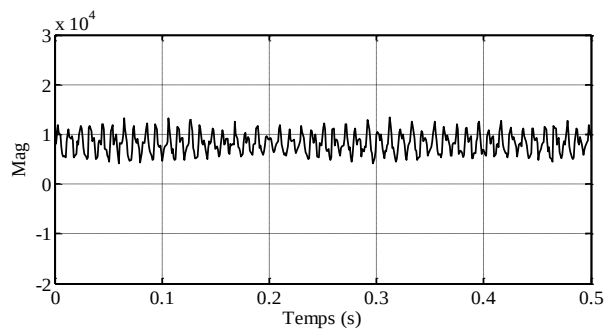
Rotor sain



Rotor avec cassure 1 barre



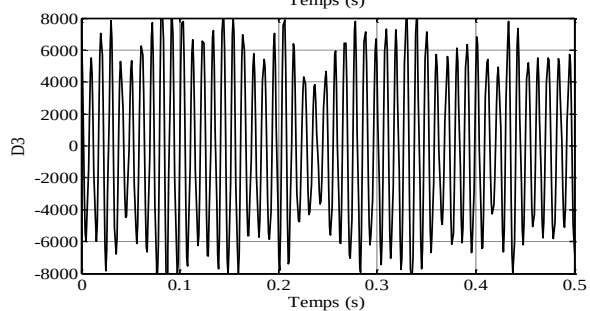
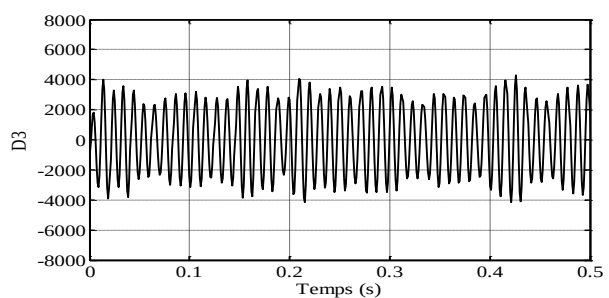
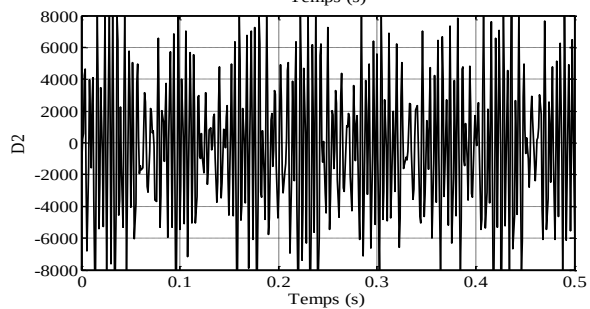
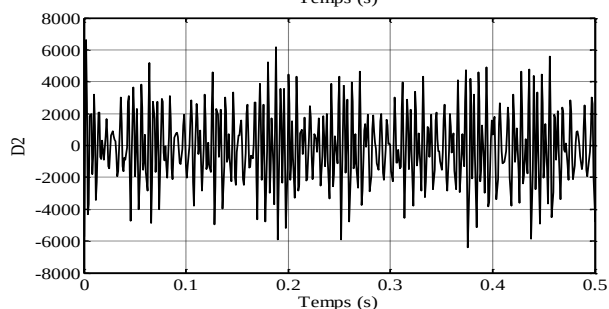
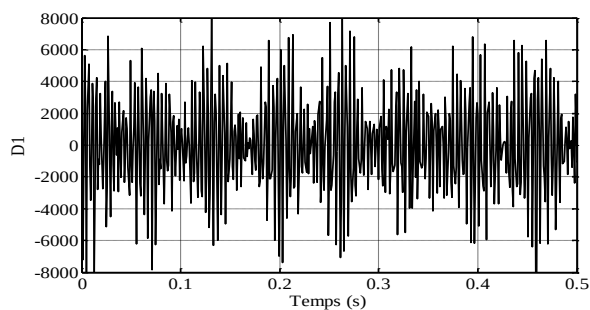
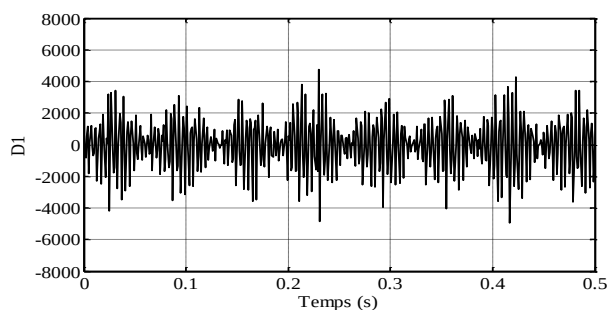
Rotor avec cassure 2 barres



Rotor avec cassure 3 barres

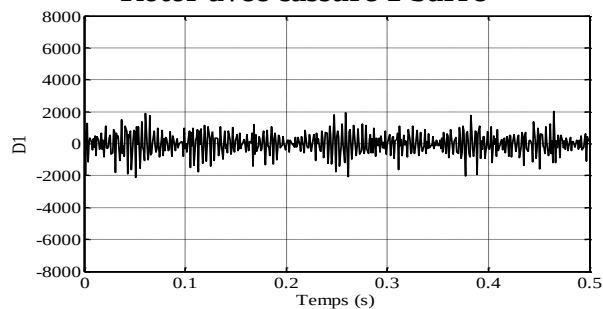
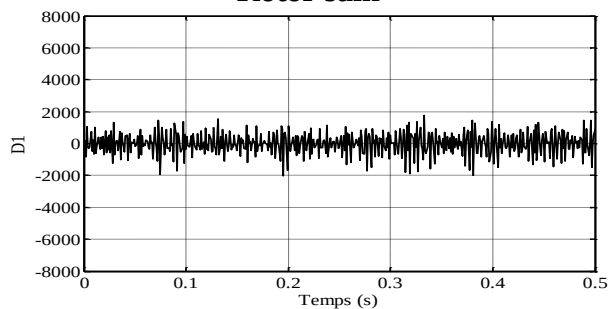
Figure IV.6 : Signaux vibratoire.

Figure IV.7, présentée les détails dans le cas sain et le cas d'un défaut cassure 1 barre, 2 barres et 3 barres.



Rotor sain

Rotor avec cassure 1 barre



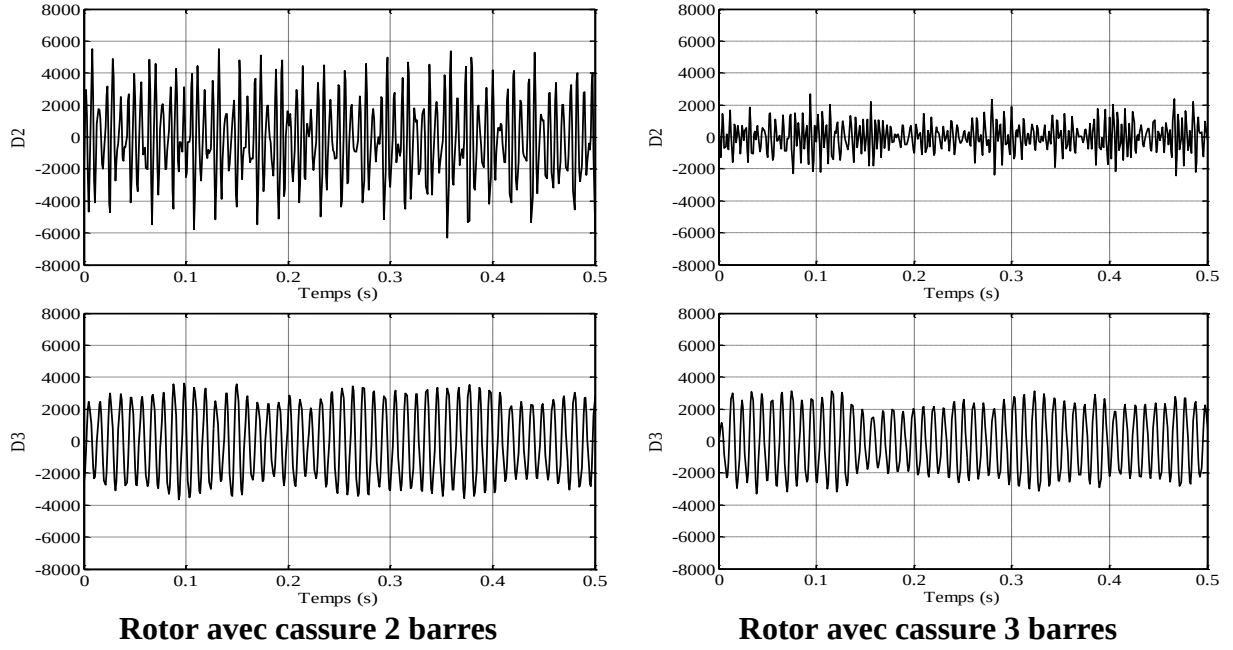


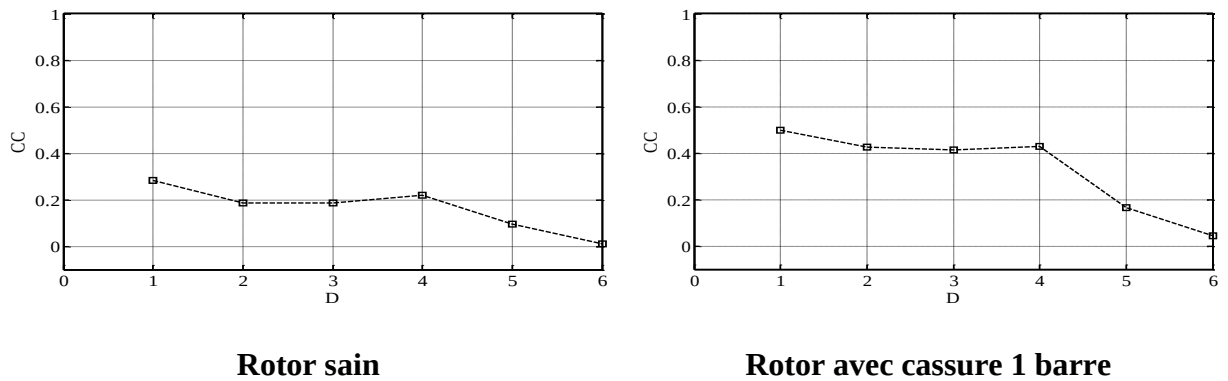
Figure IV.7 : Détails.

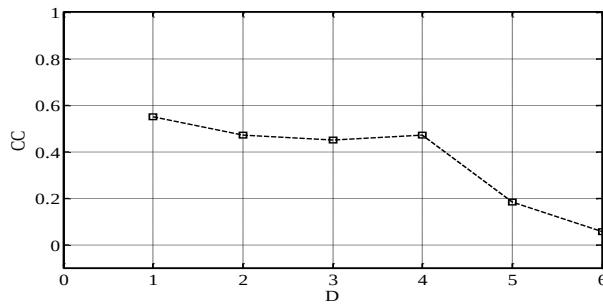
IV.3 : Etude statistique

Le coefficient de corrélation constitue un outil robuste pour sélectionner les modes pertinents. Pour une série temporelle $D(t)$ donnée, le coefficient de corrélation entre le signal d'origine et son D correspondant obtenu par TOD est calculé à l'aide de l'équation suivante:

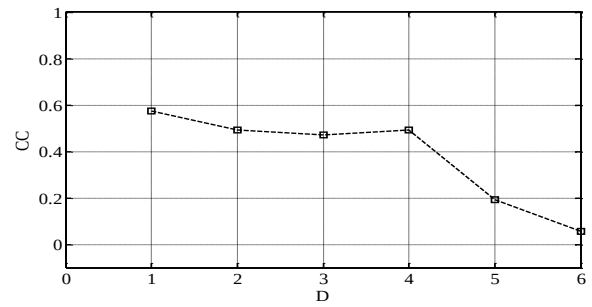
$$CC(i) = \frac{\sum_{t=1}^L x(t)D_i(t)}{\left(\sqrt{\sum_{t=1}^L x^2(t)} \sqrt{\sum_{t=1}^L D_i^2(t)} \right)}, \quad (IV-13)$$

Figure IV.8, présenté les coefficients de corrélation dans le cas sain et le cas d'un défaut cassure 1 barre, 2 barres et 3 barres.





Rotor avec cassure 2 barres



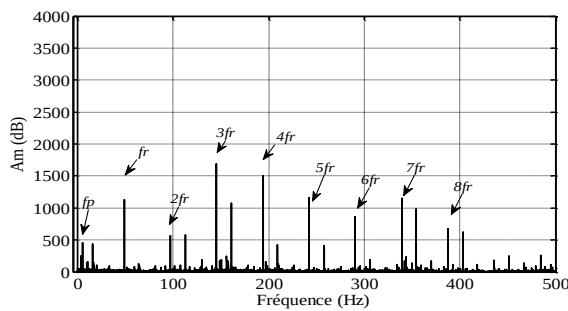
Rotor avec cassure 3 barres

Figure IV.8: Coefficient de corrélation.

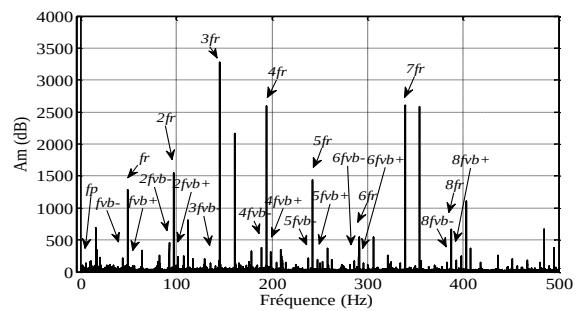
D'après la figure (IV.8), on observe que le détail 1 prend une valeur maximale. Donc ce détail contient l'information des défauts cassures des barres rotoriques.

Pour extraire et expliquer cette information, une analyse spectrale basée sur l'enveloppe spectrale de Hilbert est effectuée pour le détail 1.

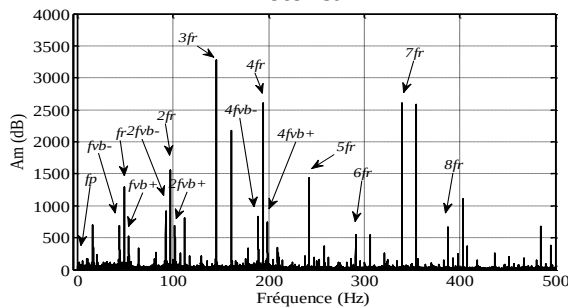
Figure IV.9, présenté l'enveloppe spectrale dans le cas sain et le cas d'un défaut cassure 1 barre, 2 barres et 3 barres.



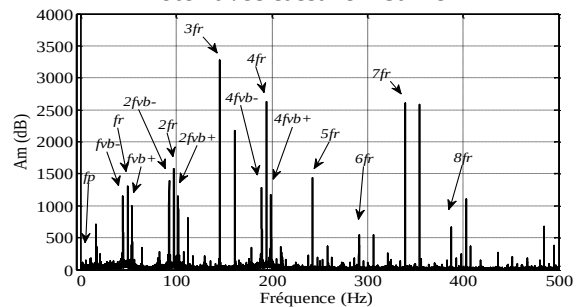
Rotor sain



Rotor avec cassure 1 barre



Rotor avec cassure 2 barres



Rotor avec cassure 3 barres

Figure IV.9: Enveloppe spectrale.

La prépondérance de $2f_r$ devant celle f_r , nous renseigne que le désalignement parallèle est prédominant par rapport au désalignement angulaire. L'analyse d'enveloppe de la D montre que la signature fréquentielle à $3f_r$ (145.32Hz) présente une amplitude plus importante ce phénomène montre la prépondérance éventuelle d'un désalignement angulaire. Les pics des harmoniques supérieures ($3f_r$ - $8f_r$) sont générés lorsque le désalignement devient important.

L'analyse d'enveloppe spectrale de D, montre la présence des harmoniques apparaît à $f_{vb-}=43.67$ Hz, $f_{vb+}=53.21$ Hz, $2f_{vb-}=92.11$ Hz, $2f_{vb+}=101.65$ Hz, $4f_{vb-}=188.99$ Hz et

$4f_{vb} = 198.53\text{Hz}$ sa symétrie par rapport à f_r , $2f_r$ et $4f_r$. ce qui indique le rotor sous défaut cassure des bars rotorique (Fig.9. b-d).

IV.4 : Conclusion

Un aperçu sur les techniques de diagnostic par ondelette discrètes appliqués aux signaux a été bien détaillé dans ce chapitre. La technique d'ondelette utilisée pour détecter et localiser les défauts cassure des barres rotorique mais aussi pour localiser leur fréquence par la décomposition du signal vibratoire en multi-niveaux. Afin une analyse spectrale effectuée pour détail 1 pour extraire les fréquences qui caractérise le défaut cassure des barres rotoriques.

Conclusion générale

Au cours de ce travail, nous avons présenté une étude sur la contribution des différents types des défauts cassure des barres rotoriques d'un moteur asynchrone et les techniques de détection au diagnostic des défauts des moteurs asynchrones.

Pour cela nous avons présenté une étude générale sur les moteurs asynchrone, leur constitution, leurs rôles, les principes de fonctionnements, et les différents défauts de cassure des barres rotoriques des moteurs asynchrones.

Nous avons par la suite appliqué la technique ondelette discrète afin de détecter les différents défauts cassure des barres rotoriques des moteurs asynchrone.

La technique discutée et appliquer est celle basée sur la transformée en ondelette discrète (TOD). Cette technique utilise la décomposition du signal vibratoire pour l'extraction des détails pour le cas sain et le cas défaillant à l'aide de l'algorithme TOD. Les détails sollicités correspondant à l'harmonique du défaut cassure des barres rotoriques sont choisis en fonction du changement important de coefficient de corrélation de ces détails par rapport au cas sain (considéré comme référence). L'investigation des harmoniques liée aux détails obtenus ; en particulier le détail ($D1$ dans notre cas d'étude) ; est ensuite effectué à l'aide de l'enveloppe spectrale technique. L'ENV est appliquée au détail sélectionné pour déterminer la fréquence de l'harmonique qui caractérise le défaut cassure des barres rotoriques.

Bibliographie

- [1] : **M. Benkaci**, « Surveillance des systèmes mécatronique d'automobile par des méthodes d'apprentissage », *Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier*, 2011.
- [2] : **Khenfer Riad**, « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques » *thèse de Docteur en Sciences Université Ferhat Abbas - Setif-1*.le 05 Mars 2015.
- [3] : **H. Hacene**, «Identification et surveillance de processus dynamiques complexes par logique floue. Application à un échangeur de chaleur», *Université M'hamed Bougara de Boumerdès*, 2007.
- [4] : **D. Berdjag**, «Méthodes algébriques pour la décomposition de modèles comportementaux: Application à la détection et à la localisation de défaillances», *Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I*, 2007.
- [5] : **R. Fellouah**, «Contribution au diagnostic de pannes pour les systèmes différentiellement plats», *INSA de Toulouse*, 2007.
- [6] : **F. Castang**, «Synthèse robuste de filtres de diagnostic pour la surveillance à base de modèle des systèmes multivariables et incertains», *Bordeaux 1*, 2003.
- [7] : **C. Christophe**, «Surveillance des systèmes non linéaires: Application aux machines électriques». *Livre*. 2001.
- [8] : **R. J. Patton**, «Fault detection and diagnosis in aerospace systems using analytical redundancy», *Comput Control Eng. J.*, vol. 2, no. 3, pp. 127–136, 1991.
- [9] : **R. Mrani Alaoui**, «Conception d'un module de diagnostic à base de suites de bandes temporelles en vue de la supervision des procédés énergétiques: application en ligne à un générateur de vapeur», *Lille 1*, 2004.
- [10] : **H. Derbel**, «Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides», *Université Joseph-Fourier-Grenoble I*, 2009.
- [11] : **Youcef Soufi**, « Modélisation et diagnostic d'une association convertisseur machine électrique », *Thèse de Doctorat en Sciences ; Université de Annaba*. 2012.
- [12] : **Medoued Ammar**, « Surveillance et diagnostic des défauts des Machines électriques : applications aux moteurs asynchrones », *thèse de Docteur en Sciences*,

Université du 20 Août 1955-Skikda, 2012.

- [13] : **Leila Nacib, Salah Saad, Saadi Sakhara**, «A Comparative Study of Various Methods of Gear Faults Diagnosis», *Journal of Failure Analysis and Prevention*; October 2014, Volume 14, Issue 5, pp 645-656.
- [14] : **G. Didier**, «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances», *Thèse Dr. l'université Henri Poincaré, Nancy-I*, 2004.
- [15] : **R. Bensaadi and H. Mouss**, «Diagnostic de défaillances par Reconnaissance de Formes».
- [16] : **O. Ondel**, «Diagnostic par reconnaissance des formes: Application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone», *Ecole Centrale de Lyon*, 2006.
- [17] : **A. O. Molina**, «Méthodologie pour le placement des capteurs à base de méthodes de classification en vue du diagnostic», *INSA de Toulouse*, 2005.
- [18] : **J.P. Haton and M.-C. Haton**, «L'intelligence artificielle», *Presses universitaires de France*, 1989.
- [19] : **S. Guillaume and B. Charnomordic**, «Systèmes d'inférence floue: collaboration expertise et données dans un environnement de modélisation intégrée à l'aide de Fis Pro» *Rev. d'intelligence Artif.*, vol. 1, p. 26, 2013.
- [20] : **R. Mrani Alaoui**, «Conception d'un module de diagnostic à base de suites de bandes temporelles en vue de la supervision des procédés énergétiques: application en ligne à un générateur de vapeur» *Lille 1*, 2004.
- [21] : **S. Bachir, I. B. A. Bazine, T. Poinot, K. Jellassi, and J.-C. Trigeassou**, «Estimation paramétrique pour le diagnostic des processus: Application à la bobine à noyau de fer», *J. Eur. Des Systèmes Autom.*, vol. 42, no. 5, pp. 509–539, 2008.
- [22] : **R. Fellouah**, «Contribution au diagnostic de pannes pour les systèmes différentiellement plats», *INSA de Toulouse*, 2007.
- [23] : **V. Cocquempot**, «Contribution à la surveillance des systèmes industriels complexes», *Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I*, 2004.
- [24] : **R. E. Kalman and R. S. Bucy**, «New results in linear filtering and prediction theory», *J. Fluids Eng.*, vol. 83, no. 1, pp. 95–108, 1961.
- [25] : **Bendiabdellah Azzedine**, « Cours modélisation machine électrique ». *Université USTO.ORAN*.2012.

- [26] : **Moumna Mohammed**, « Détection et Diagnostic Des Défauts d'une Machine Synchrones A Aimants Permanents », *Mémoire de Magister en électrotechnique, USTO*, Avr 2011.
- [27] : **Jean Luc Thomas**, « Problématique industrielle, Chapitre du livre Modélisation contrôle vectoriel et DTC, Commande des moteurs asynchrones 1 », *Carlos Canudas de Wit, Sermes Sciences Publications*, pp. 27-68, 2000.
- [28] : **Ramirez. J. M**, « Contribution à la commande optimale des machines asynchrones », *Thèse de Doctorat. Spécialité : Automatique et productique. Institut National Polytechnique de Grenoble*, 1998.
- [29] : **Xavier Roboam, Bernard De Fornel et Maria Pietrzak David**,« Lois de commande de couple du moteur asynchrone, Chapitre du livre Modélisation contrôle vectoriel et DTC, Commande des moteurs asynchrones 1 », *Carlos Canudas de Wit, Sermes Sciences Publications*, 2000, pp.183-216.
- [30] : **Bernard De Fornel**, « Modélisation dynamique des machines asynchrones, Chapitre du livre Modélisation contrôle vectoriel et DTC Modèles pour la commande des actionneurs électriques », *Jean Paul Louis, Sermes Sciences Publications*, 2004, pp.215-287.
- [31] : **Jérôme MAVIER**, «Convertisseurs génériques à tolérance de panne Applications pour le domaine aéronautique », *thèse de Doctorat de L'institut National Polytechnique, Toulouse*, 2007.
- [32] : **Cherif Bilal Djamal Eddine ; Bendiabdellah Azzeddine ; Bendjebbar Mokhtar ; Benouzza Noureddine ; Khelif Mohamed Amine**, « Review on External and Internal Faults of an, Association Inverter-Motor and Their Impact on the Motor Operation», *International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*, Hammamet-Tunisia. 2017.
- [33] : **Amine Mohamed Khelif, Bilal Djamal Eddine Cherif, Azeddine Bendiabdellah**, «Diagnosis of SVM Controlled Three-Phase Rectifier Using Mean Value of Park Currents Technique», *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, Vol 11. No 2.2018. pp. 93-101.
- [34] : **H. W. Van Der Broeck, H. C. Skudelny, G. V. Stanke**, «Analysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vectors», *IEEE Transactions On Industrial Applications*, Vol. 24, No. 1, Jan./Feb. 1988, pp. 142-150.
- [35] : **B. Chetate. Dj. Khodja**, «diagnostic en temps réel des défaillances d'un ensemble moteur asynchrone- convertisseur électronique en utilisant les réseaux neurones

- artificiels», *Journal Electrotekhnika. Moscou* 12/203, pp.16-20.
- [36] : **R. Bigret. J. L. Feron.** «Diagnostic maintenance et disponibilité des machines tournantes», *E.D. Masson. Paris*.1994.
- [37] : **A. Lebaroud,** «Le diagnostic automatique des défaillances des systèmes électromécanique», *Mémoire de magister INHC.* 1997 sous la direction de Mr. Chetate.
- [38] : **N. Bianchi, S. Bolognani, M. Zigliotto,** «Analysis of PM synchronous motor drive failures during flux weakening operation», *Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, vol. 2, pp. 1542-1548, June 1996.
- [39] : **C.Z. Liaw, W.L. Soong, B.A. Welchko, N. Ertugrul,** «Uncontrolled generation in interior permanent-magnet machines», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, issue 4, pp. 945–954, July-Aug. 2005.
- [40] : **T.M. Jahns, V. Caliskan,** «Uncontrolled generator operation of interior PM synchronous machines following high-speed inverter shutdown», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, Issue 6, pp. 1347–1357, Nov.- Dec. 1999.
- [41] : **J. Vallon,** «Introduction à l'étude de la fiabilité des cellules de commutation à IGBT sous fortes contraintes», *thèse de doctorat, INP Toulouse*, 2003.
- [42] : **A. Kheldoun,** «Amélioration des Performances d'un Variateur de Vitesse par Moteur Asynchrone Contrôlé par la Méthode à Flux Orienté». *Thèse de doctorat à l'université de Boumerdes – 2007.*
- [43] : **T. Benslimane,** «Caractérisation Précise des Défautes d'un Variateur de Vitesse en Vue d'Elaborer un Système Automatique de Surveillance et de Diagnostic». *Thèse de doctorat à l'université de Boumerdes – 2009.*
- [44] : **Bilal Djamal Eddine Cherif, Azeddine Bendiabdellah, Mohamed Amine Khelif,** «Detection of Open-Circuit Fault in a Three-Phase Voltage Inverter Fed Induction Motor». *International Review of Automatic Control (I.R.E.A.CO.)*, Vol. 9, N. 6. November, 2016, pp.374-382.
- [45] : **Bilal Djamal Eddine Cherif, Azeddine Bendiabdellah, Mokhtar Bendjebbar and Abderrahim Telli,** «A comparative study between methods of detection and localisation of open-circuit faults in a three phase voltage inverter fed induction motor», *Int. J. Modelling, Identification and Control (IJMIC)*, Vol. 29, No. 4, 2018, pp.327-340.
- [46] : **Cherif Bilal Djamal Eddine, Bendiabdellah Azzeddine, Khelif Mohamed Amine, Bendjebbar Mokhtar and Benouzza Nouredine,** « The Enhancement of

- Park Current Vectors Technique for Inverter Fault Detection», *the 6th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, University of Batna 2, Batna, Algeria. 2017. pp. 377-382.
- [47] : **Bilal Djamal Eddine Cherif, Mokhtar Bendjebbar, Azeddine Bendiabdellah**, «Detection and diagnostic of open-circuit fault in a three phase voltage inverter fed induction motor», *the 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Boumerdes, Algeria, 2015.
- [48] : **J. Ribrant**, «Reliability performance and maintenance - a survey of failure in wind power systems», *Master's thesis, KTH School of Electrical Engineering*, 2006.
- [49] : **R. Isermann**, «Model-based fault-detection and diagnosis–status and applications», *Annual Reviews in control*, vol. 29, no. 1, pp. 71–85, 2005.
- [50] : **I. M. Culbert and W. Rhodes**, «Using current signature analysis technology to reliably detect cage winding defects in squirrel-cage induction motors», *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 43, no. 2, pp. 422–428, Mar./Apr. 2007.
- [51] : **A. Garcia-Perez, R. de Jesus Romero-Troncoso, E. Cabal, Yopez, and R. Osornio, Rios**, «The application of high-resolution spectral analysis for identifying multiple combined faults in induction motors», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 5, pp. 2002–2010, May 2011.
- [52] : **Abdelhak Oulmane**, «Surveillance et diagnostic des défauts des machines tournantes dans le domaine temps-fréquences utilisant les réseaux de neurones et la logique floue», *mémoire doctorale, Université de Montréal, Juillet 2014*.
- [53] : **Bilal Djamal Eddine Cherif, Mokhtar Bendjebbar, Nouredine Benouzza, H. Boudinar, Azeddine Bendiabdellah**, « A comparative study between two open-circuit fault detection and localization techniques in a three phase inverter fed induction motor», *8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, Algiers, Algeria- November. 2016. Pp.22-28.
- [54] : **F. A. Andrade, I. Esat, M. N. M. Badi**, «Gearbox fault detection using statistical methods, time-frequency methods (STFT and Wigner-Ville distribution) and harmonic wavelet - A comparative study», *in: Proceedings of COMADEM _99, Chipping Norton*, pp. 77-85, 1999.
- [55] : **R. Yan, R. X. Gao, and X. Chen**, «Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: a review with applications», *Signal Processing*, vol. 96, pp. 1–15, 2013.
- [56] : **Z. Liu, Y. Cui, and W. Li**, «Combined power quality disturbances recognition using wavelet packet entropies and S-transform», *Entropy*, vol. 17, no. 8, pp. 5811–

5828, 2015.

- [57] : **J. A. Antonino, Daviu, M. Riera, Guasp, J. R. Folch, and M. P. Molina Palomares**, «Validation of a new method for the diagnosis of rotor bar failures via wavelet transform in industrial induction machines», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 4, pp. 990–996, 2006.
- [58] : **Z. Liu, Y. Cui, and W. Li**, «Combined power quality disturbances recognition using wavelet packet entropies and S-transform», *Entropy*, vol. 17, no. 8, pp. 5811–5828, 2015.
- [59] : **Bilal Djamal Eddine Cherif, Azeddine Bendiabdellah**, «Detection of Two-Level Inverter Open-Circuit Fault Using a Combined DWT-NN Approach», *Hindawi, Journal of Control Science and Engineering (JCSE)*, Vol. 2018, pp.11.
- [60] : **Azeddine Bendiabdellah, Bilal Djamal Eddine Cherif**, « Inverter Fault Diagnosis by Artificial Neural Network aided with Clarke Transform», *6th International Conference on Control Engineering and Information Technology (CEIT), Istanbul-Turkey*. October, 2018.
- [61] : **T. Nondahl**, «Evolution of electrical machines for motion control». *Proc. of the IFAC World congress, pages 439-443, sans Francisco, USA*, 1996.
- [62] : **Bergmann C**, «Contribution à l'étude de la commande numérique directe des moteurs synchrones à aimants permanents. Modélisation réalisation et expérimentations». *Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), L.G.E.P*, 1986.
- [63] : **Blaschke, F**, «The principle of field orientation as applied to the new TRANSVECTOR closed loop control system for rotating field machines». *Siemens Review, Vol.34, pp.217-220, 1972. Reprinted in: Bose. B.K. Adjustable Speed AC drive systems, IEEE Press, 99. pp.162-165. 1980*.
- [64] : **A, Baba**, «Optimisation du flux dans la machine à Induction par une Commande Vectorielle Minimisation des pertes», *Thèse de Doctorat, Université Paris VI, Janvier*, 1997.

ملخص:

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تشخيص عطل محرك قفص السنجاب غير المتزامن، وذلك بفضل اكتشاف أخطاء قضبان مكسورة عن طريق تحليل تيار الجزء الثابت. ينصب التركيز على تقنية معالجة الإشارات لاكتشاف الخطأ. تعتمد هذه التقنية على التحويل الموجي المنفصل للكشف عن التوافقيات التي تميز أخطاء قضبان مكسورة (قضيب اول قضيب الثاني و التاللات). باستخدام التحلل متعدد المستويات لإشارات التيار للحصول على التفاصيل. في النهاية يتم إجراء تحليل طيفي لتحديد موقع التوافقتين الخاطئة.

كلمات مفتاحية: محرك غير متزامن ; خطأ ; قضيب مكسور ; تحويل الموجي المنفصل ; تفصيل ; تحويل فورية السريع.

Résumé :

Le but principal de ce travail est le diagnostic de défaut du moteur asynchrone à cage, grâce à la détection de défaut cassure des barres rotoriques par l'analyse vibratoire. L'accent est mis sur la technique de traitement du signal pour détecter le défaut. Cette technique est basée sur la transformée d'ondelettes discret (DWT) pour détecter les harmoniques qui caractérisent les défauts cassures des barres rotoriques (un barre, deux barres et trois barres), en utilisant la décomposition à plusieurs niveau des signaux de courant pour obtenir les détails. A la fin une analyse spectrale est réalisée pour localiser les deux harmoniques de défaut.

Mot clé : moteur asynchrone ; défaut ; cassure des barres ; DWT ; détail ; FFT.

Abstract:

The primary objective of this study is to diagnose faults in asynchronous cage motors by detecting broken rotor bars through vibration analysis. The focus lies on employing signal processing techniques, specifically the discrete wavelet transform (DWT), to identify these faults. The DWT method is utilized for detecting harmonics that are indicative of broken rotor bars (whether one, two, or three bars), achieved through multilevel decomposition of current signals to extract relevant details. Finally, spectral analysis is conducted to pinpoint the exact locations of these fault harmonics.

Key word : induction motor ; default ; Broken bar rotor ; DWT ; detail ; FFT.