



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
ELGHOUL Walid / Tassourit Mohamed cherif

Le : lundi 27 juin 2022

Détection et diagnostic des défauts d'excentricité du moteur asynchrone

Jury :

| | | | | |
|-----|----------------------|-----|-----------------------------|-------------------|
| Dr. | KHALED Yahia | Pr | Université de Biskra | Président |
| Dr. | CHERIET Ahmed | Pr | Université de Biskra | Examineur |
| M. | DERGHAL Hamid | MAA | Université de Biskra | Rapporteur |

Année universitaire : 2021 – 2022



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique

Réf. :

Détection et diagnostic des défauts d'excentricité du moteur asynchrone

Le : lundi 27 juin 2022

Présenté par :

ELGHOUL Walid

Tassourit Mohamed cherif

Avis favorable de l'encadreur :

DERGHAL Hamid

Signature Avis favorable du Président du Jury :

KHALED Yahia

Cachet et signature

Résumé

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans la thématique de diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence des défauts de types:

- Excentricité statique.
- Excentricité dynamique
- Excentricité mixte.

La thématique du diagnostic de défaut se base sur l'application de deux techniques de traitement de signal qui est une solution efficace pour le problème de diagnostic des défauts: l'une se base sur l'analyse spectrale du courant statorique (FFT) et la seconde sur l'analyse par ondelette qui offre une analyse très fine des signaux unidimensionnels et bidimensionnels. À travers une décomposition en ondelettes discrètes "multi niveau" on peut extraire les informations nécessaires pour le pronostic du défaut en régime permanent de la machine.

Mots clés : Excentricité, Machine asynchrone, analyse spectrale, diagnostic, FFT, Ondelette.

Abstract:

This work fits into the theme of defects diagnostic of squirrel cage induction machine cage with faulty:

- Static eccentricity.
- Dynamic eccentricity.
- Mixed eccentricity.

The thematic fault diagnosis is based on the application of two techniques of signal processing which is an effective solution of the fault diagnosis problem: one is based from spectral analysis of the stator current using (FFT) and the second analysis from using the Wavelet technique, which offers a very detailed of one-dimensional and two-dimensional signals analysis. Through the decomposition into discrete "multilevel" we can extract the necessary information for the prognostic fault at variable state operating of the machine.

Keywords: Eccentricity, Asynchronous machine, spectral analysis, diagnosis, FFT, Wavelet.

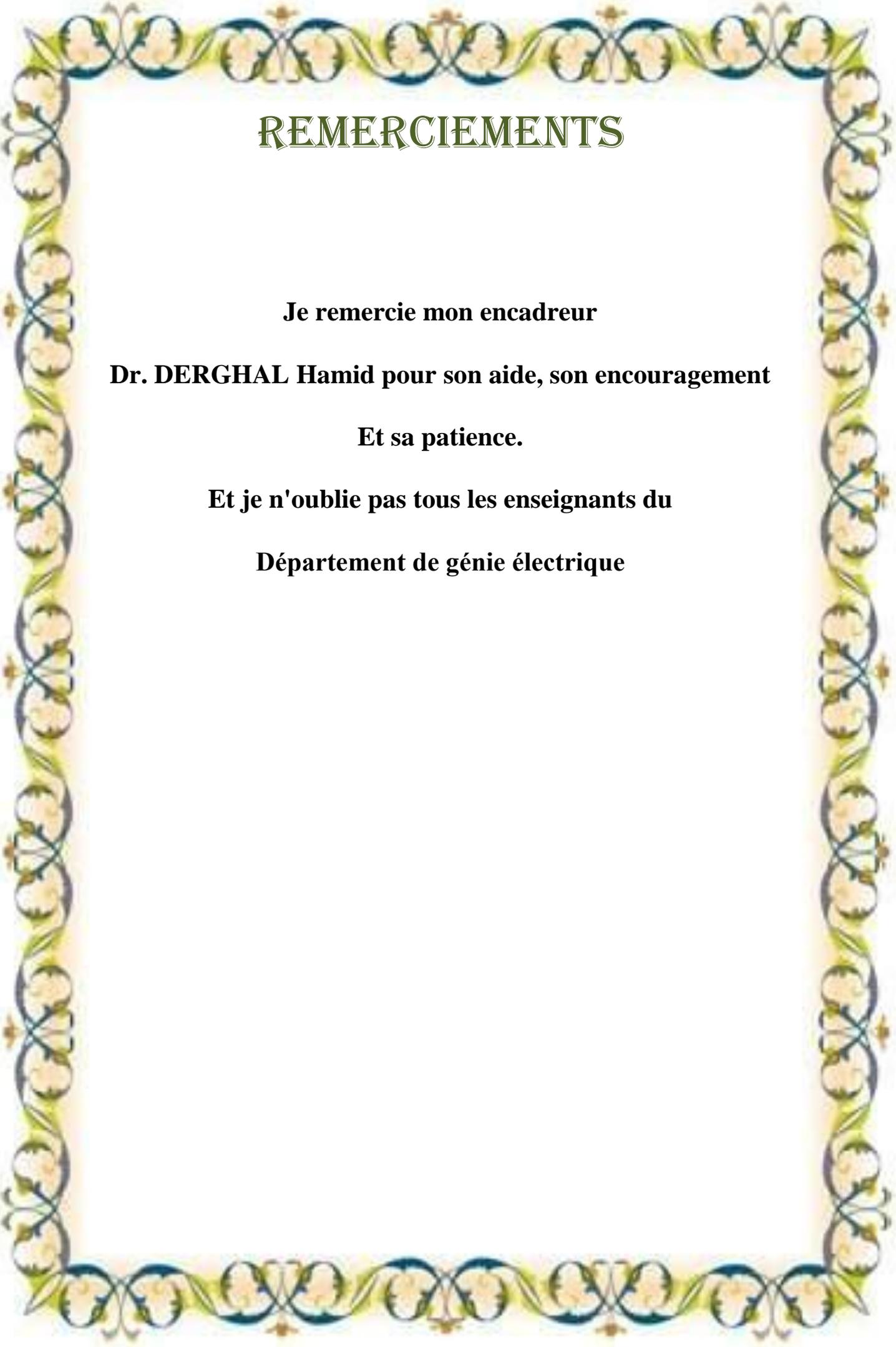
ملخص:

يندرج هذا العمل حول موضوع التشخيص في المحرك اللا تزامني ثلاثي الطور نوع قفص السنجاب و تشخيص ورصد الأعطاب التالية:

- الانحراف الثابت
- الانحراف الديناميكي
- الانحراف المختلط

يستند موضوع تشخيص الأعطاب على طريقتين لمعالجة الإشارات, وهما يعتبران حلان ناجعان في التشخيص : الطريقة الأولى هي التحليل الطيفي لتيار الجزء الثابت (FFT), والثانية تقنية الموجات , والتي لديها تحليل دقيق جدا ذات البعد الواحد و البعدين للإشارة من خلال تحلل الموجات المنفصلة , وتستخدم لاستخراج المعلومات اللازمة من تيار الجزء الثابت للمحرك.

الكلمات المفتاحية: الانحراف, الآلة الغير متزامنة , التحليل الطيفي , التشخيص, FFT, الموجات.



REMERCIEMENTS

Je remercie mon encadreur

Dr. DERGHAL Hamid pour son aide, son encouragement

Et sa patience.

Et je n'oublie pas tous les enseignants du

Département de génie électrique

DÉDICACE

Je dédie ce travail

**A mes très chers parents qui ont sacrifié leur vie pour
ma réussite, et pour leurs encouragements.**

A toute ma famille,

**A tout mes amis et mes collègues, et à tous ceux qui
m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.**

DÉDICACE

Je dédie ce travail

**À ma très chère mère, pour son soutien et sa patience, son sacrifice
tout au long de mes études. Que Dieu, lui procure santé et longue
vie.**

**Mon honorable et très cher père qui a sacrifié sa vie qu'on puisse
se trouver à ce niveau et qui m'a été source de réussite.**

À Mes chers Frères

À Ma chère Soeur

À Toute Ma famille, Mes très chers Amis

Tassourit Mohamed cherif

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION GENERALE..... | a |
| Chapitre I : etat de l'art de la machine asynchrone et ses défauts..... | 1 |
| I.1.INTRODUCTION : | 2 |
| I.2. CONSTITUTION DES MACHINES ASYNCHRONES : | 2 |
| I.2.1. Le stator : | 3 |
| I.2.2. Rotor à cage : | 4 |
| I.2.3.Rotor Bobiné : | 6 |
| I.2.4.Organes mécaniques : | 6 |
| I.3.ETUDE STATISTIQUE DES DEFAILLANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE :. | 7 |
| I.4. ORIGINES ET CAUSES DES DEFAUTS : | 9 |
| I.5.CLASSIFICATION DES DEFAUTS DANS LA MACHINE ASYNCHRONE : | 12 |
| I.5.1. Défaillances au stator : | 12 |
| I.5.1.1. Les courts- circuits internes : | 12 |
| I.5.1.2. Défaut d'isolant : | 13 |
| I.5.1.3. Décharge partielle : | 14 |
| I.5.2. Défaillances au rotor : | 15 |
| I.5.2.1. Ruptures de barres : | 15 |
| I.5.2.2. Ruptures de portions d'anneaux de court-circuit : | 15 |
| I.5.2.3. Défaut d'excentricité : | 16 |
| I.5.3. Défaillance d'ordre mécanique : | 19 |
| I.5.3.1. Défaillance de l'arbre : | 19 |
| I.5.3.2. Défauts des roulements : | 19 |
| I.6. CONSEQUENCES DES DEFAUTS : | 20 |
| I.7. CONCLUSION : | 21 |
| Chapitre II : méthodes de diagnostic du moteur asynchrone | 22 |
| II.1.INTRODUCTION : | 23 |
| II.2. METHODES DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES :..... | 23 |
| II.2.1. Méthodes de diagnostic avec modèle analytique : | 23 |
| II.2.1.1. Techniques d'estimation d'état : | 23 |
| II.2.1.2. Technique de génération de résidus : | 23 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| II.2.1.3. Techniques d'identification : | 24 |
| II.2.2. Méthodes de diagnostic sans modèle analytique : | 24 |
| II.2.2.1. Méthode par traitement de signal : | 24 |
| II.2.2.2. Méthode par intelligence artificielle (IA) : | 25 |
| II.3. TECHNIQUE DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ELECTRIQUE : | 25 |
| II.3.1. Techniques mécaniques : | 26 |
| II.3.1.1. diagnostique par mesure de la température : | 26 |
| II.3.1.2. Diagnostique par mesure des vibrations : | 26 |
| II.3.2. Diagnostique chimiques : | 27 |
| II.3.3. Techniques magnétiques et électriques : | 28 |
| II.3.3.1. Diagnostique par mesure du flux magnétique axial de fuite : | 28 |
| II.3.3.2. Diagnostic par mesure du Flux magnétique radial de fuite : | 29 |
| II.3.3.3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites : | 29 |
| II.3.3.4. Analyse fréquentielle de la tension de neutre : | 30 |
| II.3.3.5. Diagnostic par mesure de la puissance instantanée : | 30 |
| II.3.3.6. Diagnostic par les courants de Park : | 30 |
| II.3.3.7. Diagnostique par l'analyse du courant statorique : | 30 |
| II.4. LES DIFFERENTS HARMONIQUES EXISTANT DANS LE COURANT STATORIQUE : | 31 |
| II.5.CONCLUSION : | 32 |
| Chapitre III : méthodes de traitement des signaux dédiées au diagnostic des défauts du moteur asynchrone..... | 23 |
| III.1.INTRODUCTION : | 34 |
| III.2.TECHNIQUE DE DIAGNOSTIC (MCSA) : | 35 |
| III.2.1.analyse spectrale : | 35 |
| III.2.1.1. principe : | 35 |
| III.2.1.2.Spectre d'un signal : | 36 |
| III.2.2.Analyse spectrale de courant statorique(MCSA): | 36 |
| III.2.2.1. Définitions : | 36 |
| III.3. METHODE DE TRAITEMENT DE SIGNAUX UTILISES DANS LE DIAGNOSTIC : | 37 |
| III.3.1. L'échantillonnage : | 37 |
| III.3.2. Transformée de Fourier discrète : | 38 |
| III.3.3. Transformée de Fourier rapide (FFT) : | 38 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| III.3.4. Analyse des signaux dans le domaine temps fréquence (STFT) : | 40 |
| III.3.5. Transformée en Ondelette (TO) : | 41 |
| III.3.5.1. Transformée en ondelettes continue (TOC) : | 42 |
| III.3.5.2. Transformée en ondelette discrète (TOD) : | 44 |
| III.3.6. Transformée de HILBERT : | 46 |
| III.3.7. Wigner-Ville et autres distributions quadratiques. : | 47 |
| III.4. CONCLUSION : | 48 |
| Chapitre IV : application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone . | 49 |
| IV.1. INTRODUCTION : | 50 |
| IV.2. MODELISATION DES DEFAUTS D'EXCENTRICITE : | 50 |
| IV.2.1 Excentricité statique : | 50 |
| IV.2.2. Excentricité dynamique : | 51 |
| IV.3. EXCENTRICITE STATIQUE :(RESULTATS DE SIMULATION)..... | 53 |
| IV. 4. EXCENTRICITE MIXTE : | 56 |
| IV.5. analyse du courant statorique par la technique des ondelettes : | 65 |
| IV.5.1 Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelette : | 65 |
| IV.6. ANALYSE DU DEFAUT D'EXCENTRICITE ROTORIQUE (RESULTATS EXPERIMENTAUX) : | 71 |
| IV.6.1. Analyse spectrale du courant statorique avec excentricité statique : | 71 |
| IV.6.2. Analyse spectrale du courant statorique avec excentricité dynamique : | 77 |
| IV.7. TECHNIQUE D'ONDELETTES POUR LE DEFAUT D'EXCENTRICITE ROTORIQUE : | 80 |
| IV.7.1. Energies et bandes fréquentielles pour TOD : | 80 |
| IV.7.2. Défaut d'excentricité statique : | 81 |
| IV.7.3. Défaut d'excentricité dynamique : | 84 |
| IV.8. CONCLUSION : | 86 |
| Conclusion générale | 48 |
| Annexe | 89 |
| BIBLIOGRAPHIE | 90 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure (I. 1): Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil..... | 3 |
| Figure(I. 2): vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs | 4 |
| Figure (I. 3): Photo du stator d'une machine asynchrone | 4 |
| Figure(I. 4): Vue schématique en perspective du rotor à cage d'écureuil [5]..... | 5 |
| Figure (I. 5): Rotor bobiné d'une MAS [6]..... | 6 |
| Figure(I. 6): Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances [7] .. | 7 |
| Figure (I. 7): Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances [7]..... | 8 |
| Figure (I. 8): Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances [7]..... | 8 |
| Figure(I. 9): Les différents défauts statoriques | 14 |
| Figure (I. 10): Exemple de dégâts provoqués par les défauts de court-circuit statoriques..... | 14 |
| Figure (I. 11): Défauts du rotor à cage : a) rupture de barres (b) rupture d'anneau de court-circuit..... | 16 |
| Figure (I. 12): Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte. | 17 |
| Figure (I. 13): Représentation d'un roulement à billes, [32]..... | 20 |
| Figure (II. 1): Les différentes grandeurs de diagnostique dans une machine. | 25 |
| Figure (II. 2): Mesures vibratoires sur la machine asynchrone..... | 27 |
| Figure (II. 3): Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial. | 28 |
| Figure (II. 4): Mesure du flux radial. | 29 |
| Figure (II. 5): schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique. | 31 |
| Figure (III. 1): Principe de la surveillance par analyse spectral [65]..... | 35 |
| Figure (III. 2): Représentation temporelle vers fréquentielle..... | 39 |
| Figure (III. 3): Représentation temporelle vers ondelettes..... | 41 |
| Figure (III. 4): Quelques formes des ondelettes usuelles | 43 |
| Figure (III. 5): Boîtes Temps-fréquence des deux ondelettes $\psi_{a1,b1}$ et $\psi_{a0,b0}$ | 44 |
| Figure (III. 6): Décomposition du signal f en approximations et détails | 45 |
| Figure (IV. 1): Représentation schématique de l'excentricité statique..... | 51 |
| Figure (IV. 2): Représentation schématique de l'excentricité dynamique..... | 52 |
| Figure (IV. 3): (a) Courant de la phase statorique A, (b) le zoom correspondant : $\delta s = 60\%$, $C_r = 10Nm$ | 53 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure (IV. 4): Spectre correspondant du courant de la phase statorique A: $\delta s = 60\%$ $Cr=10Nm$ | 54 |
| Figure (IV.5): Evolution des PSH en fonction du degré d'excentricité statique..... | 55 |
| Figure (IV. 6): Vitesse de rotation (a) au démarrage, (b) en régime permanent, pour un fonctionnement avec degré d'excentricité statique $\delta s = 50\%$ et dynamique $\delta d = 30\%$, $Cr=40Nm$ | 56 |
| Figure (IV. 7): Courant statorique (a) en régime permanent, (b) le zoom correspondant , pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité statique $\delta s = 50\%$ et dynamique $\delta d = 30\%$ $Cr=40Nm$ | 57 |
| Figure (IV. 8): Spectre du courant de la phase statorique A : $\delta d = 30\%$, $\delta s = 50\%$, $Cr=40Nm$ | 58 |
| Figure (IV. 9): Spectre basses fréquences du courant de la phase statorique A : $\delta d = 30\%$, $\delta s = 50\%$, $Cr=40Nm$ | 58 |
| Figure (IV. 10): Spectre du courant de la phase statorique A : $\delta d = 30\%$, $\delta s = 30\%$, $Cr=40Nm$ | 59 |
| Figure (IV. 11): Spectre basses fréquences du courant de la phase statorique A : $\delta d = 30\%$, δs $= 30\%$, $Cr=40Nm$ | 59 |
| Figure (IV.12): Evolution des raies caractéristiques en fonction de la charge et du degré d'excentricité statique pour une excentricité dynamique de 30%..... | 61 |
| Figure (IV. 13): Spectre du courant de la phase statorique A : $\delta d = 30\%$, $\delta s = 60\%$, $Cr=10Nm$ | 62 |
| Figure (IV. 14): Spectre basses fréquences du courant de la phase statorique A : $\delta d = 30\%$, $\delta s = 60\%$, $Cr=10Nm$ | 62 |
| Figure (IV. 15): Evolution des raies caractéristiques en fonction de la charge et du degré d'excentricité statique pour une excentricité dynamique de 30% | 64 |
| Figure (IV. 16): Analyse par TOD type multi niveau de la phase ias avec défaut d'excentricité mixte (statique 20% et dynamique 30% avec une charge 10Nm)..... | 66 |
| Figure (IV. 17): Analyse par TOD type multi niveau de la phase ias pour défaut d'excentricité mixte (statique 60% et dynamique 30% avec une charge 10Nm)..... | 67 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure (IV. 18): Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db44) pour différent degré d'excentricité mixte avec une seule charge (10Nm) | 68 |
| Figure (IV. 19): Analyse par TOD type multi niveau de la phase ias pour défaut d'excentricité mixte (statique 20% et dynamique 30% avec une charge 30Nm)..... | 69 |
| Figure (IV. 20): Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db44) pour différent charge et avec un seul degré de défaut d'excentricité mixte (statique 20%, dynamique 60%) | 70 |
| Figure (IV. 21): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($g=0.004$, à vide); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour des | 73 |
| Figure (IV. 22): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($g=0.032$); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour des PSHs. | 75 |
| Figure (IV. 23): Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique $\delta_d=30\%$ ($g=0.004$); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour des PSHs..... | 78 |
| Figure (IV. 24): TOD multi niveau en fonctionnement sain et à vide de la machine | 81 |
| Figure (IV. 25): Analyse par TOD d'une phase statorique is pour un fonctionnement à vide en présence des défauts d'une (ES)..... | 82 |
| Figure (IV. 26): Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (ES)..... | 82 |
| Figure (IV. 27): TOD multi niveau en fonctionnement sain et en charge de la machine..... | 83 |
| Figure (IV. 28): Analyse par TOD d'une phase statorique is pour un fonctionnement en charge en présent des défauts d'une (ES)..... | 83 |
| Figure (IV.29): Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (ES)... | 84 |
| Figure (IV.30): Analyse par TOD d'une phase statorique is pour un fonctionnement à vide en présent des défauts d'une (ED)..... | 85 |
| Figure (IV.31): Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (ED)..... | 86 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau (I.1): Les causes des défauts de la machine asynchrone. | 11 |
| Tableau (II. 1): les différents harmoniques du courant statorique..... | 32 |
| Tableau (III. 1): Familles d'ondelettes..... | 43 |
| Tableau (IV. 1): Evolution des harmoniques d'encoches principales en fonction du degré d'excentricité statique. | 55 |
| Tableau (IV. 2): Amplitudes en dB des raies ($f_s \pm kfr$) en fonction de degré d'excentricité statique pour une excentricité dynamique de 30% ,avec une charge(40Nm). | 60 |
| Tableau (IV. 3): Amplitudes en dB des raies ($f_s \pm kfr$) en fonction de degré d'excentricité statique pour une excentricité dynamique de 30% ,avec une charge(10Nm). | 60 |
| Tableau (IV. 4): Amplitudes en dB des raies ($f_s \pm kfr$) en fonction de degré d'excentricité statique pour une excentricité dynamique de 30% ,avec une charge(30Nm). | 61 |
| Tableau (IV. 5): Amplitudes en dB des raies ($f_s \pm kfr$) en fonction de la charge avec degré d'excentricité statique(60%) et excentricité dynamique de(30%) | 63 |
| Tableau (IV. 6): Amplitudes en dB des raies ($f_s \pm kfr$) en fonction de la charge avec degré d'excentricité statique(30%) et excentricité dynamique de(30%) | 63 |
| Tableau (IV. 7): Amplitudes en dB des raies ($f_s \pm kfr$) en fonction de la charge avec degré d'excentricité statique(10%) et excentricité dynamique de(30%) | 64 |
| Tableau (IV. 8): Bandes de fréquences obtenues par la décomposition en multi niveau. | 66 |
| Tableau (IV. 9): Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta_s=45\%$)...... | 76 |
| Tableau (IV. 10): Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta_d=30\%$). | 79 |
| Tableau (IV. 11) montre les bandes fréquentielles de chaque niveau..... | 80 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS

$g=s$: le glissement dû au fondamental.

N_b : Nombre de barres rotoriques de moteur asynchrone à cage.

f_e : La fréquence d'échantillonnage.

n_{ws} : L'ordre du temps harmonique.

f_s : La fréquence fondamentale.

f_r : La vitesse mécanique du rotor exprimée en Hertz.

P : Nombre de paires de pôles.

TH: Les harmoniques du temps.

RSH : Les harmoniques d'encoches rotoriques.

EFH: Eccentricity Fault Harmonics.

RBFH: Rotor Bar Fault Harmonics.

PSH : L'harmonique principal d'encoches rotoriques.

δ_s : Degré d'excentricité statique.

δ_d : Degré d'excentricité dynamique.

f_{es} : fréquence caractéristique du défaut d'excentricité statique

f_{ed} : fréquence caractéristique du défaut d'excentricité dynamique

f_{mix} : Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte.

FFT : Transformation de fourie rapide.

TO : Transformation d'ondelette.

TOD : Transformation d'ondelette discrète.

TOC : Transformation d'ondelette continue.

MCSA: Motor Current Signal Analysis.

MAS : Machine asynchrone.

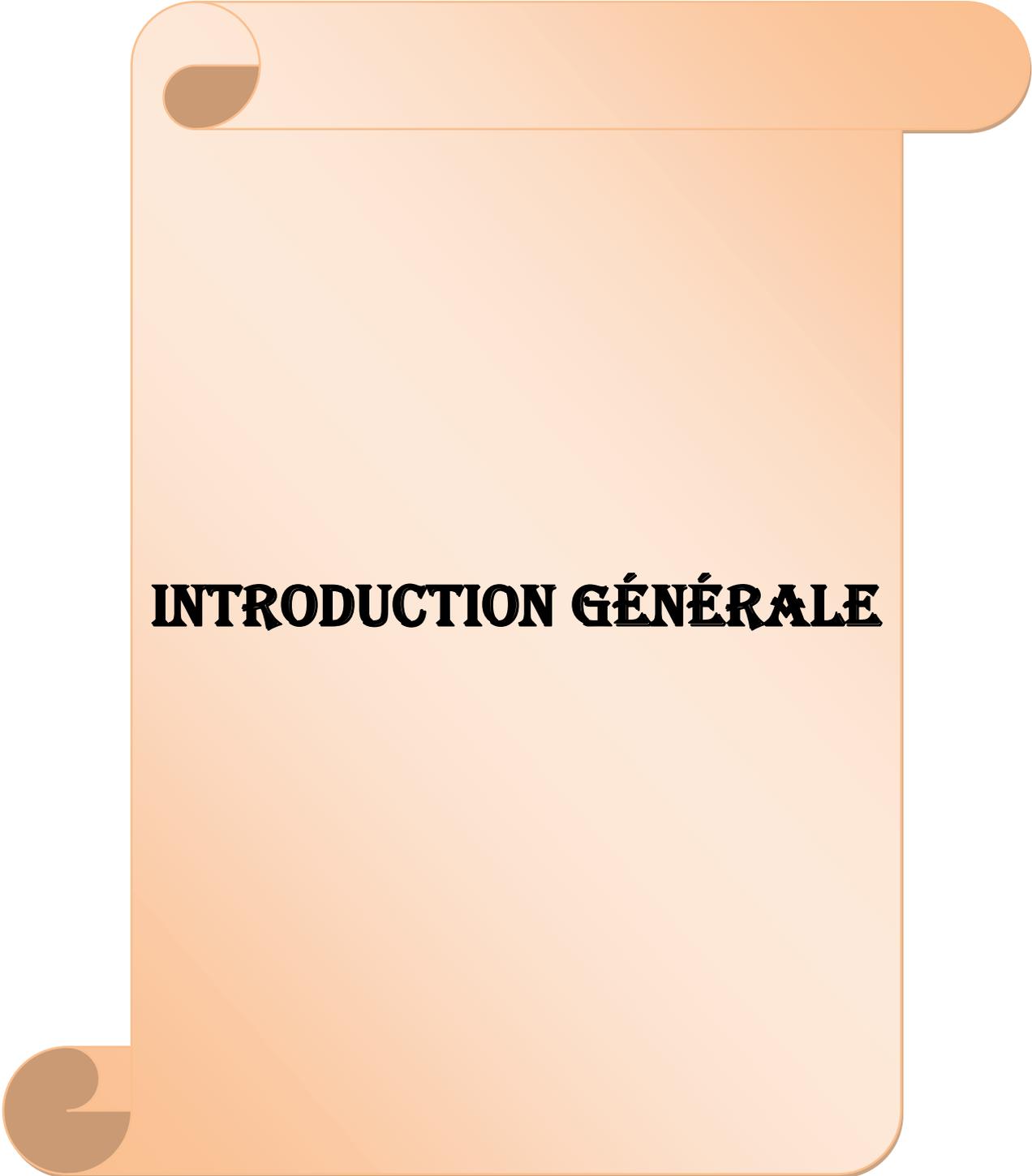
Db44 : ordre d'ondelette mère de Daubechies.

ES : excentricité statique.

Liste des abréviations

ED : excentricité dynamique.

DWT : Discrete Wavelet Transform.



INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

La machine asynchrone, de par sa construction et sa robustesse, assure une large plage d'application dans le domaine de l'industrie. Son exploitation pour fournir de l'énergie mécanique est excellente. Par contre, son utilisation comme variateur de vitesse, telles que les machines à courant continu, a été tardive à cause de sa complexité en commande.

Le diagnostic des machines électriques s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables car une quelconque défaillance, même la plus anodine, peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système [1] [2].

La machine asynchrone n'est pas à l'abri d'un dysfonctionnement. Elle peut être affectée par des défauts électriques ou magnétique (court circuit des spires du stator, ...) ou mécaniques au niveau du stator, ou du rotor, (usure des roulements, défaut d'excentricité de l'arbre...), ou les deux en même temps. Les causes des défauts peuvent être dues à un simple problème de fabrication ou à une utilisation non conforme de la machine. Parfois le milieu dans lequel la machine est utilisée peut être responsable à la détérioration de la machine (milieu corrosif, milieu chimique,...). De ce fait, un arrêt brusque dû à une anomalie quelconque peut engendrer des pertes financières (pertes de production, la remise en état de l'outil de production, les retards de livraison) et matériels inévitables. Par conséquent, il est recommandé de détecter de façon précoce un défaut afin d'y remédier dans des délais les plus brefs et minimiser les effets induits (arrêt d'une chaîne de production, pertes de produits, etc...). Ceci a poussé la majorité des industriels à doter leurs chaînes de production par des systèmes sophistiqués de détection et de diagnostic de défauts. Ces deux dernières fonctions ont pour objectif d'une part l'amélioration de la sécurité des êtres humains et des biens et d'autre part l'augmentation des gains de productivité résultant de l'accroissement de la disponibilité des équipements et d'une gestion efficace des opérations de maintenance. Un système de surveillance n'a pas pour vocation de remplacer l'homme mais pour l'aider dans sa prise de décision finale.

Introduction générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente la détection des défauts rotorique dans la machine asynchrone. Les outils d'analyse et diagnostic de défaut sont à base de l'utilisation du spectre par le biais de la transformée de Fourier (FFT) et de l'ondelette (TOD). Pour mener cette étude, le mémoire est structuré en quatre chapitres:

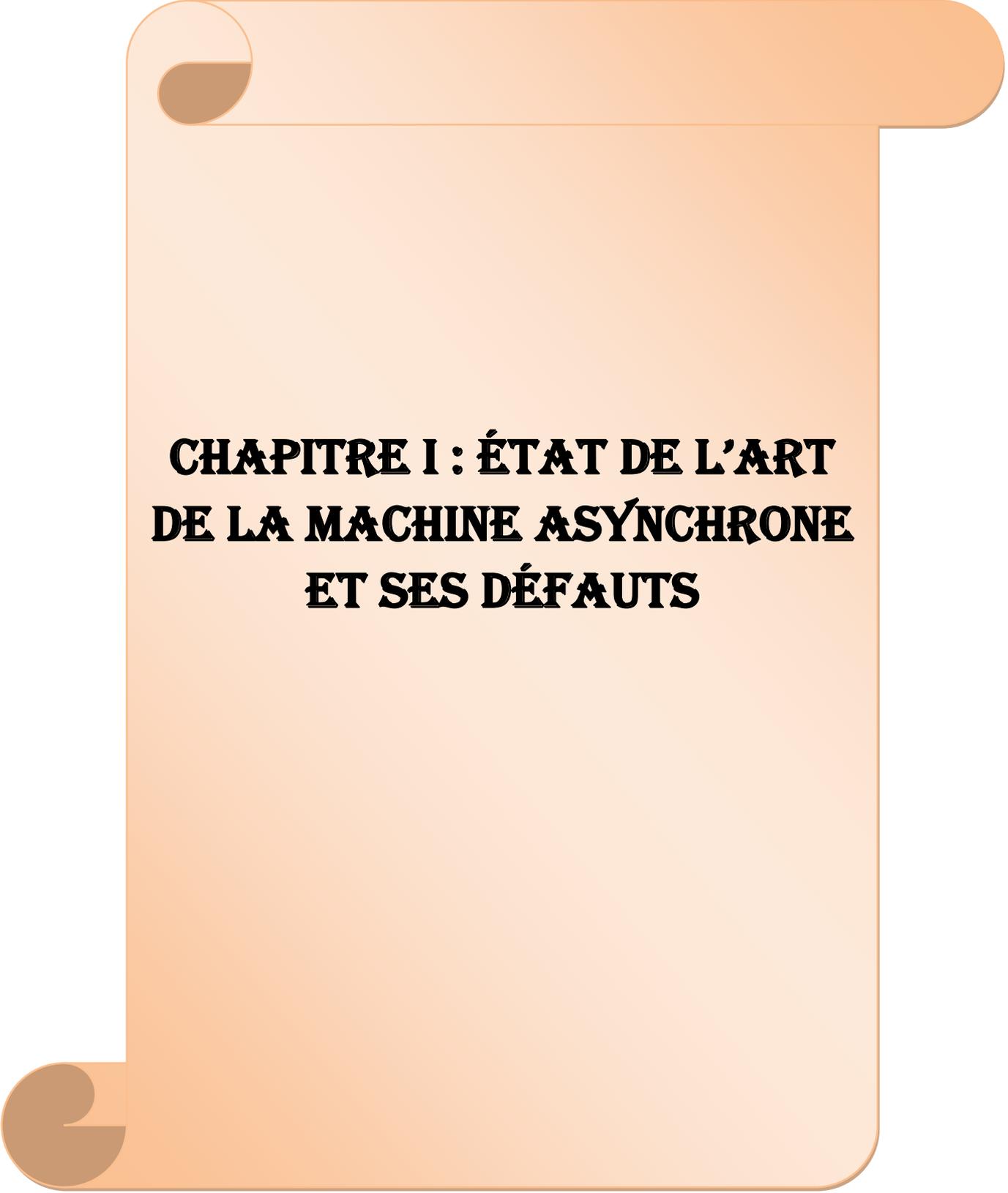
Le premier chapitre traite les différents défauts qui peuvent apparaître dans les machines asynchrones.

Le deuxième chapitre est consacré aux méthodes de diagnostic du moteur asynchrone.

Le troisième chapitre est consacré aux méthodes de traitement des signaux dédiées au diagnostic des défauts du moteur asynchrone.

Le quatrième chapitre présente la modélisation et application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone.

Enfin une conclusion générale où on présente une synthèse des résultats.

The background is a light orange scroll with rounded corners and a shadow effect, giving it a three-dimensional appearance. The text is centered on the scroll.

**CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART
DE LA MACHINE ASYNCHRONE
ET SES DÉFAUTS**

I.1.INTRODUCTION :

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en oeuvre, son faible coût, etc.... L'apparition dans les années 1980 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc....), [3].

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies [3].

L'objectif de ce premier chapitre est d'effectuer quelques rappels élémentaires sur les éléments de constitution de la machine asynchrone. Nous effectuons ensuite une présentation des différents défauts pouvant survenir sur chacun de ces éléments, en citant leurs causes et effets sur le comportement de la machine.

I.2. CONSTITUTION DES MACHINES ASYNCHRONES :

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée le stator et d'une partie tournante appelée rotor figure(I.1) Contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seul les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulements d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction [4].

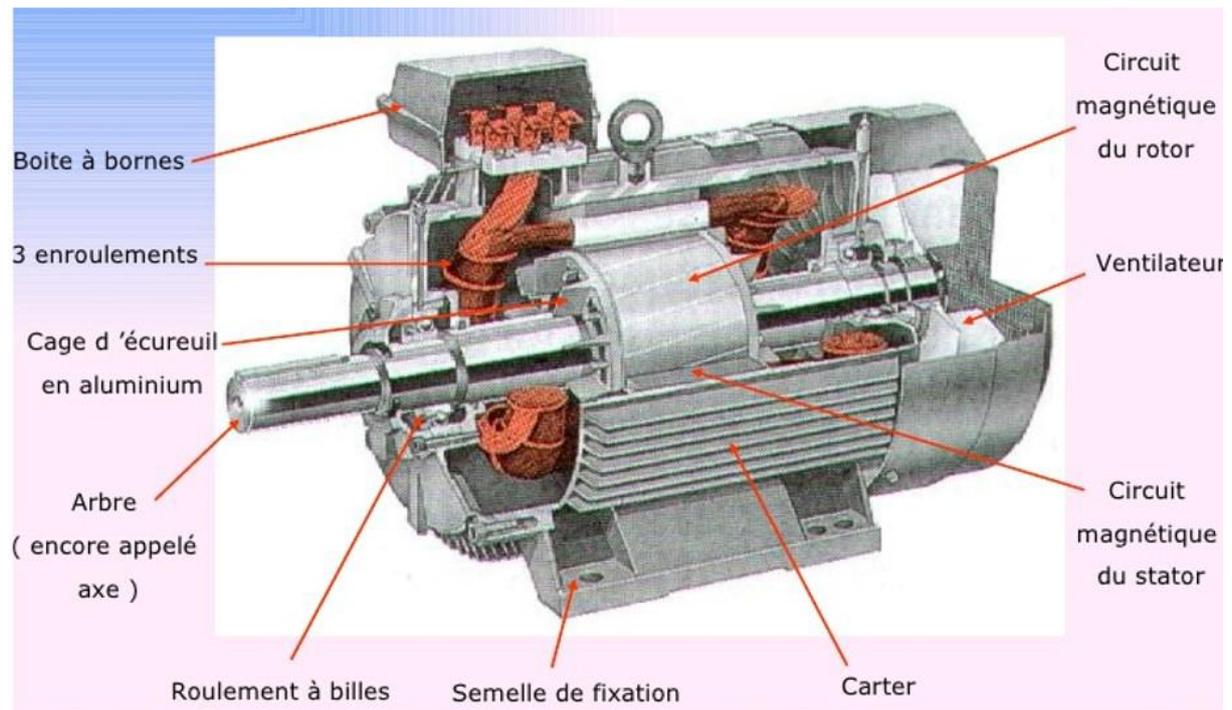
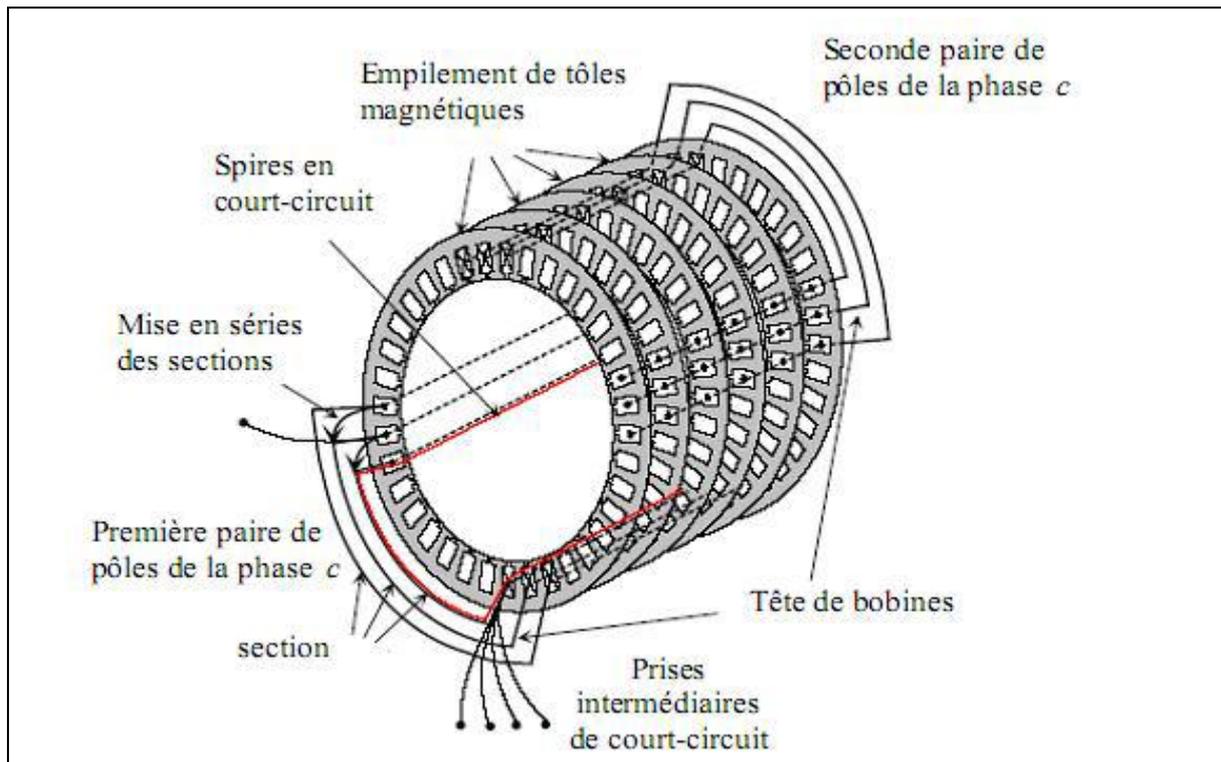


Figure (I. 1): Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écuriel.

I.2.1. Le 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.2). 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.



Figure(I.2) : vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs d'encoches, tête de bobines). (Enroulement statorique d'une machine a 4 pôles).

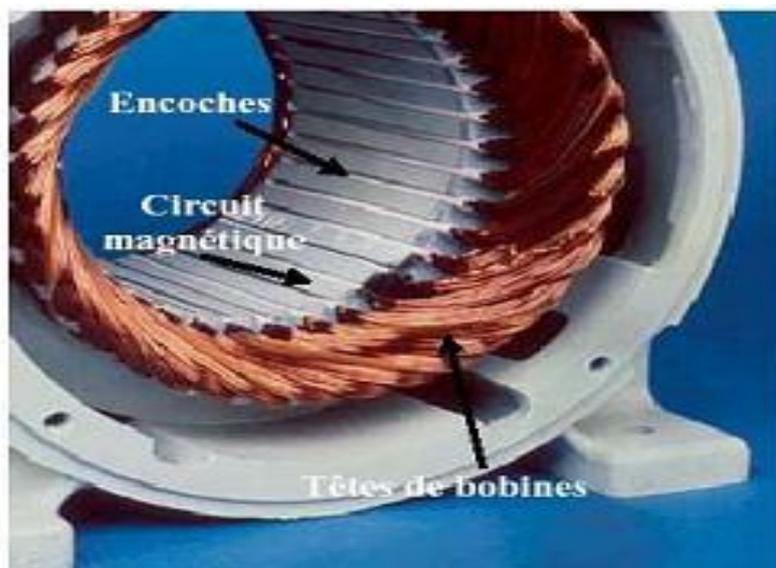


Figure (I. 3): Photo du stator d'une machine asynchrone

I.2.2. Rotor à cage :

Le rotor présent deux configurations dont le choix dépend de l'utilisation de la machine. Nous distinguons le rotor bobiné qui supporte un bobinage semblable à celui du stator où ces trois bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux même. La deuxième configuration qui est la plus usitée dans l'industrie et qui est également celle utilisée au

niveau des différents axes de recherche concernant la machine asynchrone est le rotor à cage d'écureuil, [5].

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor figure (I.4). 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, [3].

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 et il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service, [3]

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 développées deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes), [5]

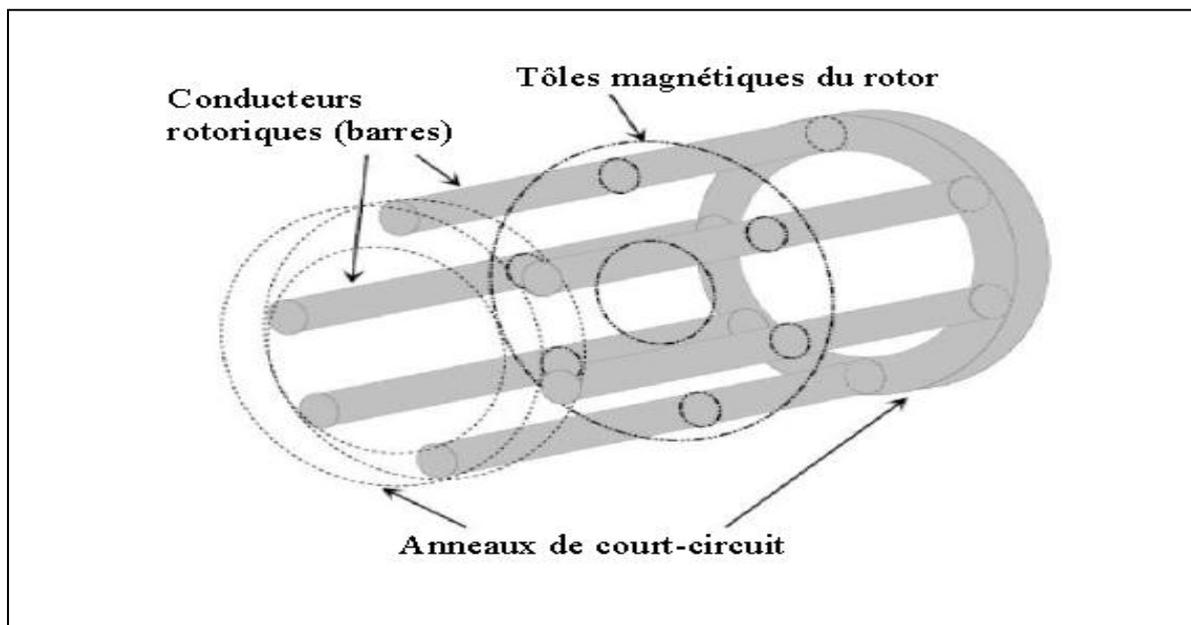


Figure (I.4) : Vue schématique en perspective du rotor à cage d'écureuil [5].

I.2.3. Rotor Bobiné :

Les enroulements rotoriques sont localisés dans les encoches situées à la périphérie du rotor. Ces enroulements sont bobinés de manière à obtenir un enroulement triphasé à « p » paires de pôle. 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 fixes.

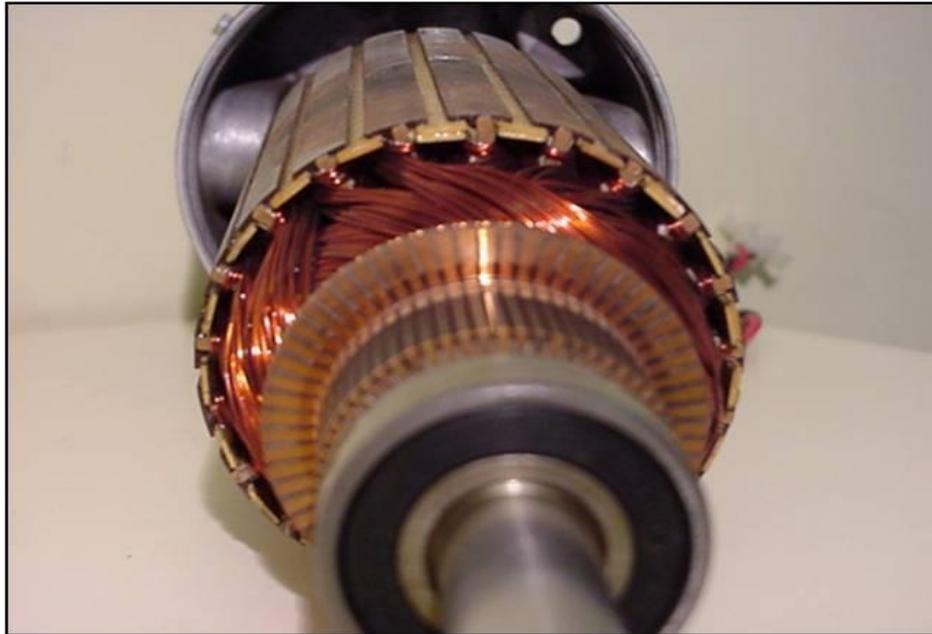


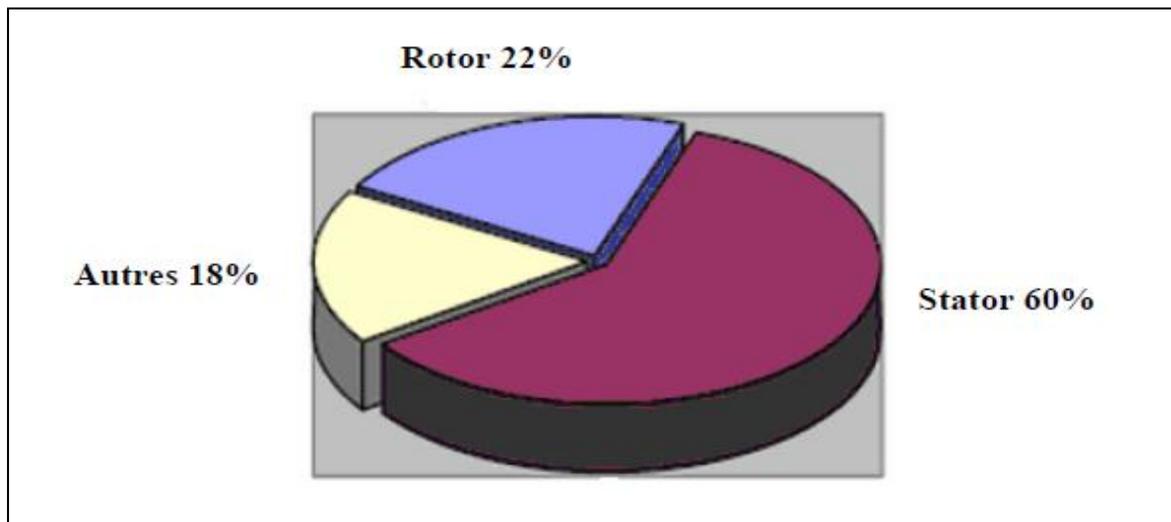
Figure (I. 5): Rotor bobiné d'une MAS [6].

I.2.4. 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 en 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, [3]

I.3.ETUDE STATISTIQUE DES DEFAILLANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE :

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.6):



Figure(I.6) : Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances [7]

D'autres parts, les mêmes études montrent qu'en 1973 et 1988, les pannes au stator sont passées de 78% à, 60% et au rotor de 12% à 22%. Ces variations sont dues à l'amélioration des isolants pendant cette période. La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est établie comme suit :

| | | | |
|---------------------|-----|--------------|----|
| Enroulements stator | 51% | Tôles stator | 9% |
| Défauts au rotor | 22% | Roulements | 8% |

Autres 10% Une autre étude statistique faite sur des machines asynchrones de grande puissance (100KW à 1MW) a donné les résultats suivants [8] :

| | | | |
|---------------------|-----|--------------------|-----|
| Enroulements stator | 13% | Couplage mécanique | 4% |
| Défauts au rotor | 8% | Roulements | 41% |
| Autres | 34% | | |

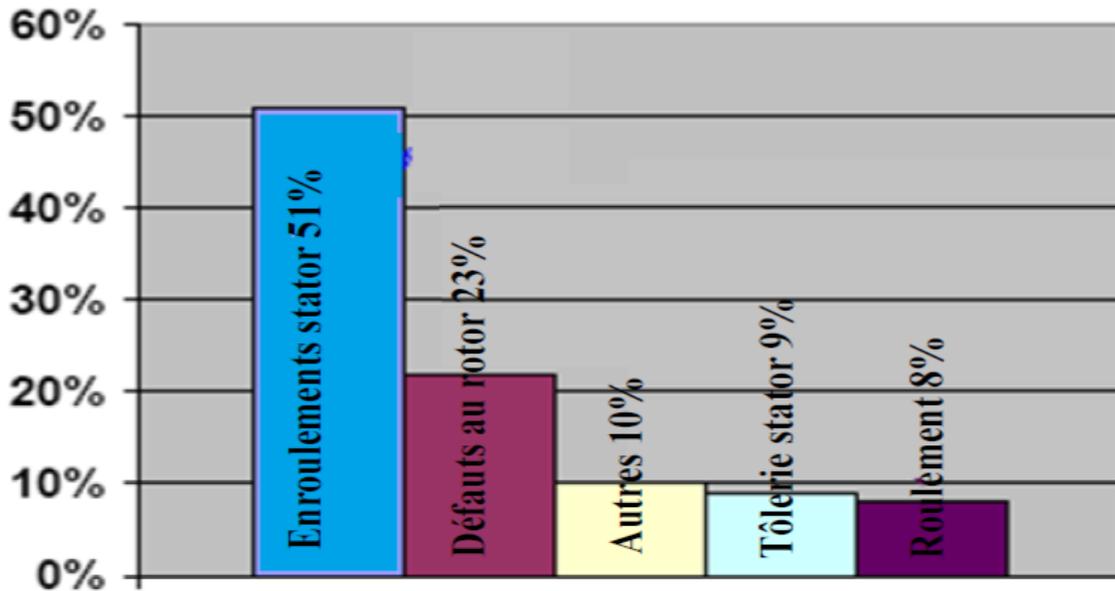


Figure (I. 7): Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances [7].

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.8).

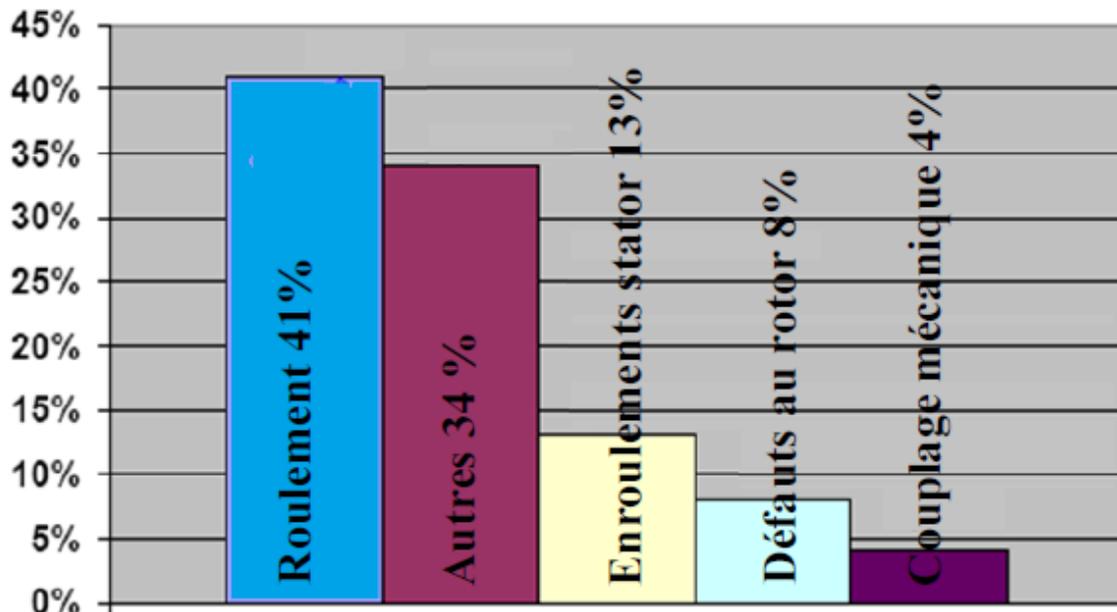


Figure (I. 8): Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances [7].

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines. Ceci explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Ce qui exige une maintenance mécanique accrue.

I.4. ORIGINES ET CAUSES DES DEFAUTS :

La majorité de ces défauts sont l'origine d'une combinaison de diverses contraintes agissant sur la machine, ce qui peut être classée en thermique, électrique, mécanique, environnemental et défauts de fabrication [9].

- **Thermique** : l'augmentation de la température au dessus de la température de fonctionnement normal de la machine entraîne la détérioration de l'isolant du bobinage au niveau du stator et également le rotor bobiné. Donc, par cet effet la durée de vie de l'isolant se

raccourcit rapidement. Elle influe également sur le lubrifiant, dans les roulements, qui perd ses propriétés physiques et qui perturbe la rotation normale des billes dans la cage.

Cette surcharge thermique peut se produire en raison des variations de tension appliquées, tension de phase déséquilibrée, ventilation obstruée, température ambiante plus élevée, démarrages répétitifs dans un court laps de temps, à des surcharges, etc.

- **Electrique** : Une tension supérieure à la valeur nominale ou des variations brutales et instantanées de cette tension, va conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation. Ces spots causent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut) [10]. Pour les roulements, il y a la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs qui cause les arcs électriques [11] et cause le vieillissement rapide de ces derniers.

- **Mécanique** : les démarrages répétitifs ont pour conséquence d'augmenter la température dans les bobinages du stator et du rotor. Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure [12]. Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration. L'entraînement des surcharges, les vibrations dues aux excentricités de l'arbre ou au mauvais ajustement des roulements, manque de ventilation, manque de lubrifiant ces effets influent négativement sur le fonctionnement normal de la machine.

- **Environnemental** : La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant

jusqu'au court-circuit franc. Les milieux poussiéreux influent également sur la lubrification des roulements ce qui provoquent leurs usures et corrosions et conduisent à leurs détériorations [10].

• **Défauts de fabrication** : les défauts de fabrication ont un effet néfaste sur le fonctionnement normal des machines. Ils peuvent être la conséquence de :

Mauvaise soudure entre les barres et les anneaux, mauvais serrage, insuffisance baignade pour l'isolant, montage anormal des roulements ou des enroulements, moulage défectueux dans le cas de rotors injectés sous pression d'aluminium [11].

La référence [13] rapporte sur [14] le tableau (I.1) qui résume les causes provoquant les défauts statoriques et rotoriques.

| | Défauts | Causes | Effets sur le système |
|----------------------------|--|--|--|
| Défauts statoriques | Vibration du support | Un déséquilibre magnétique, mouvement des enroulements, un déséquilibre de l'alimentation, surcharge, mauvaise installation, un contact avec le rotor. | Vibrations mécaniques |
| | Un défaut entre le stator et la carcasse | Ecrasement des spires par la carcasse, le cycle thermique, une abrasion de l'isolant, présence de points anguleux dans les encoches, un choc. | courant dans la phase |
| | Défaut d'isolation | Endommagement de l'isolant lors de l'insertion des enroulements, démarrage fréquent, condition de température ou l'humidité extrême. | Court-circuit dans l'enroulement |
| | Court-circuit inter spires | Température excessive, humidité, vibration, surtension. | variation courants statoriques, augmentation d'amplitude sur les autres phases |

| | | | |
|---------------------------|---------------------------------------|---|---|
| | Déséquilibre d'alimentation | Défauts d'installation, haute température, alimentation déséquilibrée, contrainte d'écrasement au niveau des enroulements. | déséquilibre des courants statoriques |
| | Déséquilibre d'alimentation | Problème sur le réseau d'alimentation Défaillance du convertisseur | Augmentation : courants dans les autres phases de vibrations de l'échauffement |
| Défauts rotoriques | Défauts de roulements | Mauvaise installation, déséquilibre magnétique, perte de lubrifiant ou mal lubrifiés, mauvaise qualité de lubrifiant, haute température, manque de propreté, charge déséquilibrée. Surcharge. jeu au niveau des paliers | oscillations du couple de charge augmentation des pertes augmentation vibrations Altération de l'équilibre magnétique |
| | Rupture de barres | déséquilibre magnétique, régime transitoire à longue durée, fatigue thermique. Réduction de la valeur moyenne de couple électromagnétique Oscillations de la vitesse Vibrations mécaniques | Réduction de la valeur moyenne de couple électromagnétique Oscillations de la vitesse Vibrations mécaniques |
| | Ruptures d'anneaux | Défaut de fabrication. Surcharge du couple | Déséquilibre la répartition des courants |
| | Défaut du circuit magnétique | Défaut de fabrication, fatigue thermique, surcharge | Vibrations mécaniques |
| | Désalignement du rotor (excentricité) | Mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défaut de roulements. Positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage Usure des roulements Défaut de charge Défaut de fabrication | oscillations de couple |

Tableau (I. 1): Les causes des défauts de la machine asynchrone.

En général, ces défauts produisent un ou plusieurs symptômes qui peuvent être [9]:

- Un déséquilibre des courants de ligne et des tensions.
- Une augmentation des oscillations du couple.
- Une diminution du couple moyen.
- Une augmentation des pertes et donc une réduction de l'efficacité énergétique.
- Un échauffement excessif et donc un vieillissement accéléré.

I.5.CLASSIFICATION DES DEFAUTS DANS LA MACHINE ASYNCHRONE :

I.5.1. Défaillances au stator :

Même si les vibrations des conducteurs d'encoches et les divers frottements qui en résultent, suite à de grandes sollicitations de la machine, accélèrent l'usure des isolants, il reste que le facteur principal du vieillissement est l'échauffement anormal des bobinages [15].

En effet, les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator sont : les courts circuits internes, défaut d'isolant et décharge partielle [16].

I.5.1.1. Les courts- circuits internes :

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, par exemple, les défauts de type court-circuit inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Les courts circuits apparaissant entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou encore entre deux phases statoriques [17] [18]. Ces défauts ont le plus souvent une origine mécanique. En effet, des vibrations excessives peuvent mener à un desserrement des boulons de la plaque à bornes de la machine créant ainsi le court-circuit. Une cosse mal serrée à la jonction du câble d'alimentation et des bornes de la machine peut être à l'origine d'une ouverture de la phase. Le défaut le plus couramment rencontré reste encore la fusion d'un fusible de protection [19].

I.5.1.1.1.Court-circuit entre phases :

L'apparition d'un court-circuit entre phases, induirait des courants très élevés conduisant la fusion des conducteurs. Cependant, un court-circuit au bobinage près du neutre ou entre deux phases n'a pas un effet radical, il conduit à un déséquilibre de phase sans

provoquer la fusion des conducteurs [20]. 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 amplifiés lors de l'apparition de ce défaut.

I.5.1.1.2.Court-circuit entre une phase et le neutre :

Le courant dans la phase concernée a une amplitude supérieure par rapport au courant des autres phases. Toute fois, les courants qui parcourent ces phases sont amplifiés par rapport au cas de la machine saine. Plus important est le nombre de spires en court-circuit, plus forte est l'augmentation des courants [21]. De plus, le facteur de puissance diminue avec l'augmentation du nombre de spires en court circuit, ce qui explique la modification des bobinages, qui implique une variation de l'inductance propre de la phase affectée par le défaut et affecte les autres phases par couplage magnétique.

I.5.1.1.3.Court-circuit entre spires :

Un court-circuit entre spires de la même phase est assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Dans ce cas, la machine peut continuer à fonctionner, mais si le courant de court -circuit est important il peut entraîner une légère variation d'amplitude sur les autres phases, modifier le facteur de puissance et amplifier les courants dans le circuit rotorique [22] [20] .

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 deuxième court-circuit). Il est donc important de détecter un tel défaut très rapidement avant la destruction complète de la machine.

I.5.1.2. Défaut d'isolant :

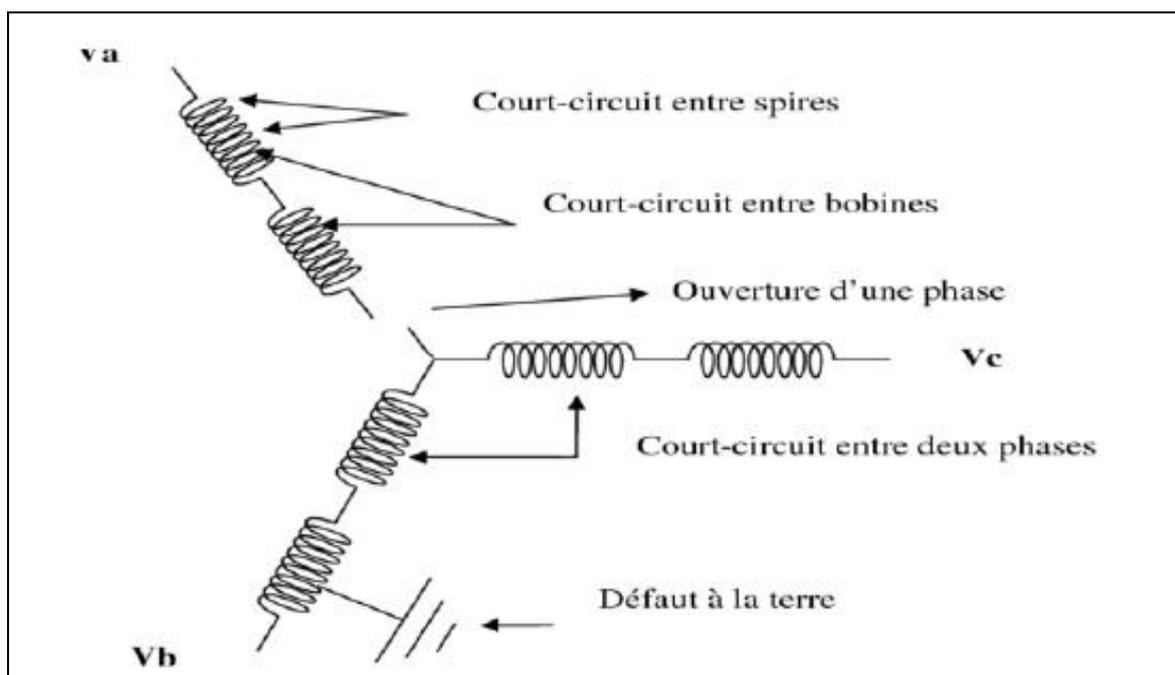
La dégradation des isolants dans les enroulements est à l'origine des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques qui se traduisent par une augmentation de la température des différents constituants du moteur.

Or les matériaux d'isolation ont une limite de température et de tension. 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, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Les différentes causes de ce type de défaut sont : une tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation, un courant élevé dans l'enrouement dû à un court-circuit et une

surchauffe qui entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.

I.5.1.3. Décharge partielle :

Ce phénomène naturel dû aux décharges dans les isolants entre conducteurs ou entre conducteur et la masse s'amplifie avec le vieillissement des isolants. Il est pratiquement imperceptible dans les isolants neufs par les moyens de mesure classiques car son effet n'est pas discernable par rapport aux bruits de mesure [21]. Sa présence précède l'apparition des courts-circuits entre phases ou entre phase et masse lorsque ces décharges partielles ont suffisamment détérioré les isolants.



Figure(I.9) : Les différents défauts statoriques

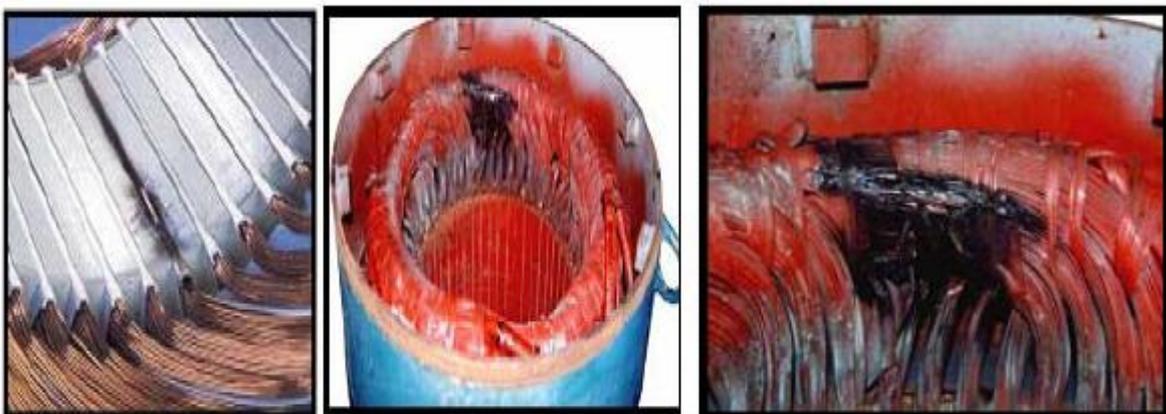


Figure (I. 10): Exemple de dégâts provoqués par les défauts de court-circuit statoriques

I.5.2. Défaillances au rotor :

Les défauts qui sont les plus fréquents, localisés au niveau du rotor sont : rupture totale ou partielle des barres, rupture totale ou partielle de portion d'anneau de court-circuit, et excentricité statique et dynamique [23].

I.5.2.1. Ruptures de barres :

Les cassures de barres sont les défauts les plus fréquents au niveau du rotor, elles se présentent par des ruptures totales ou partielles d'une ou plusieurs barres de la cage. Ces

défauts se traduisent par une augmentation de la résistance équivalente d'un enroulement rotorique. La rupture d'une barre peut être due à plusieurs phénomènes qui sont souvent indépendants les uns des autres. Nous pouvons citer par exemple une mauvaise utilisation de la machine (charge trop importante) ou encore l'environnement hostile dans lequel elle fonctionne [24][25].

La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et [26] augmente l'hétérogénéité électrique et magnétique qui se traduisent par des oscillations engendrant des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine.

I.5.2.2. Ruptures de portions d'anneaux de court-circuit :

Les cassures de portions d'anneaux sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations entre les barres et les anneaux. Ce type de défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres, par conséquent, il est difficile de le détecter figure(I.11). Les anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques [20].

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres

rotoriques, ce qui engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres. Un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge peuvent entraîner leur cassure.

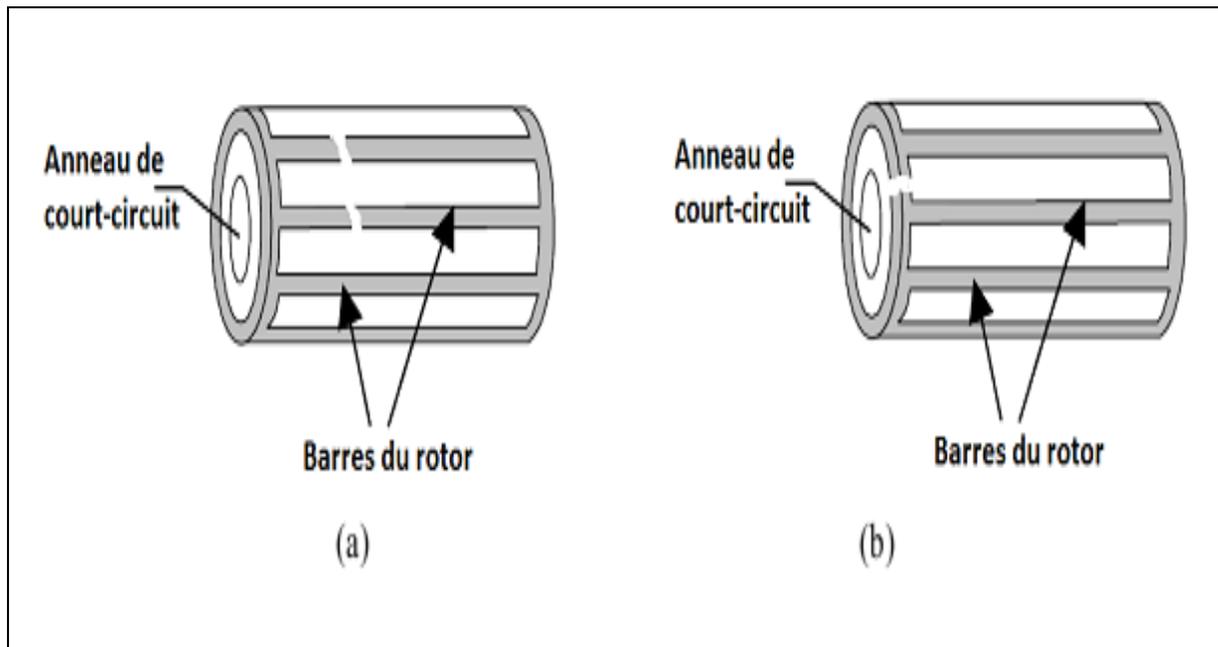


Figure (I. 11): Défauts du rotor à cage : a) rupture de barres (b) rupture d'anneau de court-circuit

I.5.2.3. Défaut d'excentricité :

L'excentricité de la machine est définie comme une asymétrie dans l'entrefer à vide qui existe entre le stator et le rotor. La présence d'un certain niveau d'excentricité est normale dans les machines électriques. Des fabricants et utilisateurs spécifient un niveau admissible maximum de 5%, tandis que dans d'autres cas, un niveau maximum de 10% de la largeur d'entrefer est permis par d'autre utilisateur. Cependant, les fabricants essayent d'avoir un niveau d'excentricité très faible afin de réduire les vibrations et le bruit et de minimiser les forces radiales résultantes qui peuvent créer une bande de frottement entre le stator et le rotor qui endommage la machine. Par conception, l'entrefer d'une machine à induction est considérablement plus petit que dans d'autres types de machines ayant les mêmes grandeurs et performances, la machine synchrone sera la plus sensible aux excentricités. [27].

On distingue deux principaux types d'excentricité qui peuvent apparaître dans les machines tournantes. [28]

■ **L'excentricité statique** : Généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Peut-être causée par l'ovalité de la partie intérieure du stator, ou par un mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction. Si l'assemblage arbre-rotor est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique ne change pas.

■ **L'excentricité dynamique** : est due à une déformation ou un désalignement du rotor ou à un desserrage de barres rotoriques. Dans le cas de l'excentricité dynamique, le centre du rotor n'est pas confondu avec son centre de rotation. Et par conséquent, la position de l'entrefer minimale change avec la position du rotor. Ce qui fait que l'excentricité dynamique dépend du temps et de l'espace, alors que l'excentricité statique dépend seulement de l'espace.

L'excentricité dynamique peut être provoquée par la flexion de l'arbre, l'usure des roulements, les défauts d'alignement entre le rotor et la charge, la résonance mécanique à la vitesse critique,.....etc. .

En réalité les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à coexister. Même à l'état sain, la machine présente toujours un certain degré d'excentricité statique résiduelle dû aux inévitables erreurs de fabrication. [28]. Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature 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 déséquilibre le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements. [29]

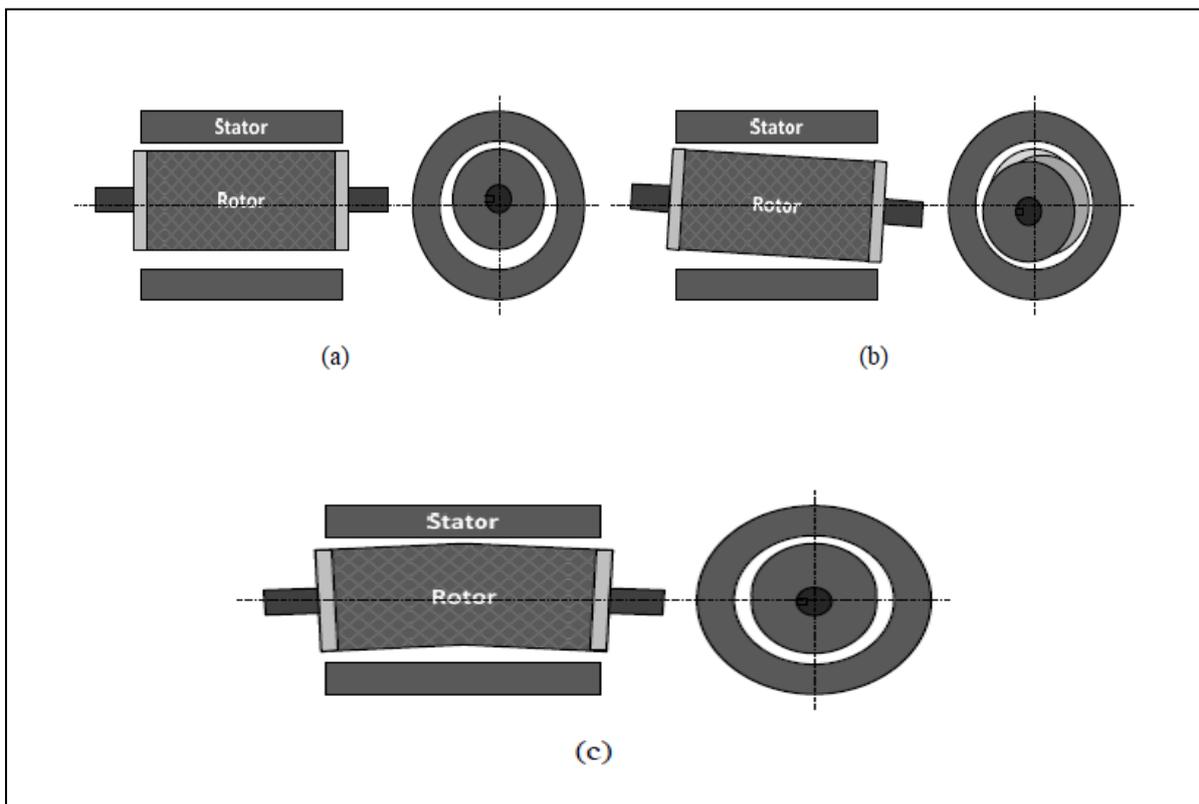


Figure (I. 12): Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.

I.5.2.3.1. Causes de l'excentricité statique :

L'excentricité statique résulte soit d'une imperfection dans l'alésage du stator, soit d'un mauvais positionnement du rotor et/ou du stator à l'assemblage. Supposant que l'arbre du rotor est suffisamment raide, le niveau de l'excentricité statique ne change pas. [27]

I.5.2.3.2. Causes de l'excentricité dynamique :

L'excentricité dynamique peut être provoquée par plusieurs facteurs, tels que des tolérances de fabrication, usure des roulements, désalignement, résonance mécanique à la vitesse critique, ou aussi à des pièces endommagés à la fabrication. [27]

I.5.2.3.3. Concept de défaut d'excentricité statique dans le moteur électrique :

Normalement, le rotor qui est centré sur l'alésage du stator d'un moteur sain entraîne un entrefer identique entre le stator et le rotor. En conséquence, les forces magnétiques sont équilibrées dans les directions opposées, mais lorsque l'excentricité émerge, cet entrefer diminue d'un côté alors qu'il augmente de l'autre côté à tout angle de giration qui entraîne une force d'absorption plus élevée dans l'intervalle le plus court. [30]

I.5.2.3.4. Indicateurs d'excentricité :

Si un certain niveau d'excentricité entre le rotor et le stator se produit dans un moteur électrique, quelle que soit son origine, il fait apparaître de nouvelles harmoniques dans l'entrefer et/ou une augmentation dans l'amplitude des harmoniques existants auparavant. Ensuite, il produit un effet global qui stimule le développement d'effets secondaires suivants :

- Efforts d'attraction magnétiques non compensés (Unbalanced Magnetic Pull UMP),
- Distorsion du couple,
- Intensification de vibrations et de bruit,
- Réduction de la vitesse du rotor,
- Passage du courant électrique à travers les roulements

De nombreux systèmes de surveillance déterminent le spectre de Fourier du courant d'une phase afin de surveiller l'état du moteur. Ces systèmes estiment les harmoniques spécifiques de défaut additionnel qui sont dues au désalignement du rotor. Les fréquences de ces harmoniques sont calculées à partir du nombre de barres du rotor et du glissement définit les composantes fréquentielles à surveiller dans le spectre du courant statorique pour la détection d'excentricité statique ou dynamique en rappelant que toute excentricité dans l'entrefer perturbe la densité du flux électromagnétique. Les fréquences d'intérêt sont données par :

$$f_{exc} = f_s \left[1 + k \left(\frac{1-g}{p} \right) \right] \quad (\text{I. 1})$$

(f_s : fréquence d'alimentation du stator)

où $k = 1, 2, 3, \dots$

Les déséquilibres mécaniques provoquent deux harmoniques du premier ordre du courant. En raison de l'interaction des courants et des tensions, ces deux harmoniques du courant se traduisent par une seule composante harmonique dans le spectre de la puissance électrique. Montrent que la composante sur la puissance est plus facile à localiser que celle sur le courant.

Les signaux spécifiques aux excentricités sont également présents dans le flux électromagnétique, qui peut être mesuré par des bobines exploratrices "search coils" qui captent le flux axial de fuite et le flux électromagnétique de l'entrefer]. D'autres méthodes analysent les vibrations mécaniques ou acoustiques provoquées par des déséquilibres mécaniques, analyse du couple, et les forces radiales. [27]

I.5.3. Défaillance d'ordre mécanique :

Ces défaillances peuvent apparaître au niveau des flasques, des roulements à billes ou encore de l'arbre du moteur [19] [31] [20].

I.5.3.1. Défaillance de l'arbre :

L'arbre de la machine peut laisser apparaître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A 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 micro-fissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une analyse

vibratoire, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillances.

I.5.3.2. Défauts des roulements :

Dans l'étude statistique nous remarquons une présence d'un pourcentage élevé pour ce type de défaut. Pourtant, ce type de défaut ainsi que sa détection est très peu mentionnée dans la littérature des électrotechniciens. Les roulements se composent généralement de deux bagues, une bague intérieure et une autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble billes ou de rouleaux tournants (**voir figure (I.13)**). En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par de petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de

roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Les défauts de roulements entraînent une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations dans le couple de charge de la machine. Ces défauts ont des causes multiples telles que la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou encore des causes électriques comme la circulation des courants de fuites induits par les onduleurs.

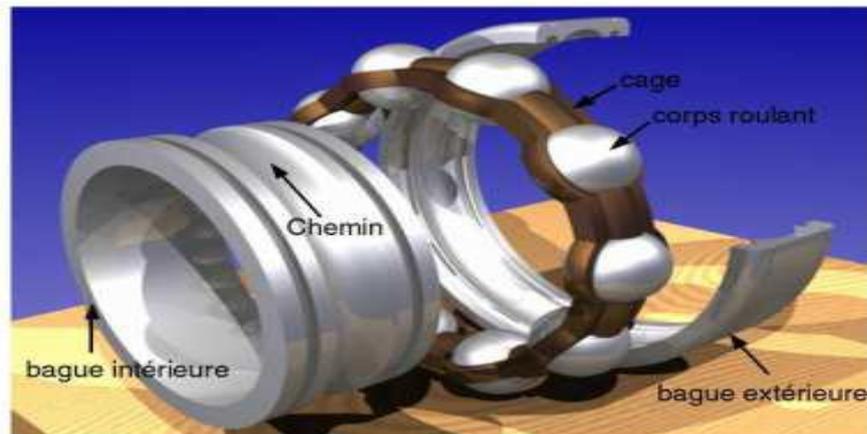


Figure (I. 13): Représentation d'un roulement à billes, [32]

I.6. CONSEQUENCES DES DEFAUTS :

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total [9].

On cite parmi les conséquences des défauts:

- Fluctuations au niveau du couple et de la vitesse.
- Appel supplémentaire de courant.
- Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.
- Augmentations des arrêts non programmés, des pertes de production, et par conséquent, du rendement global.

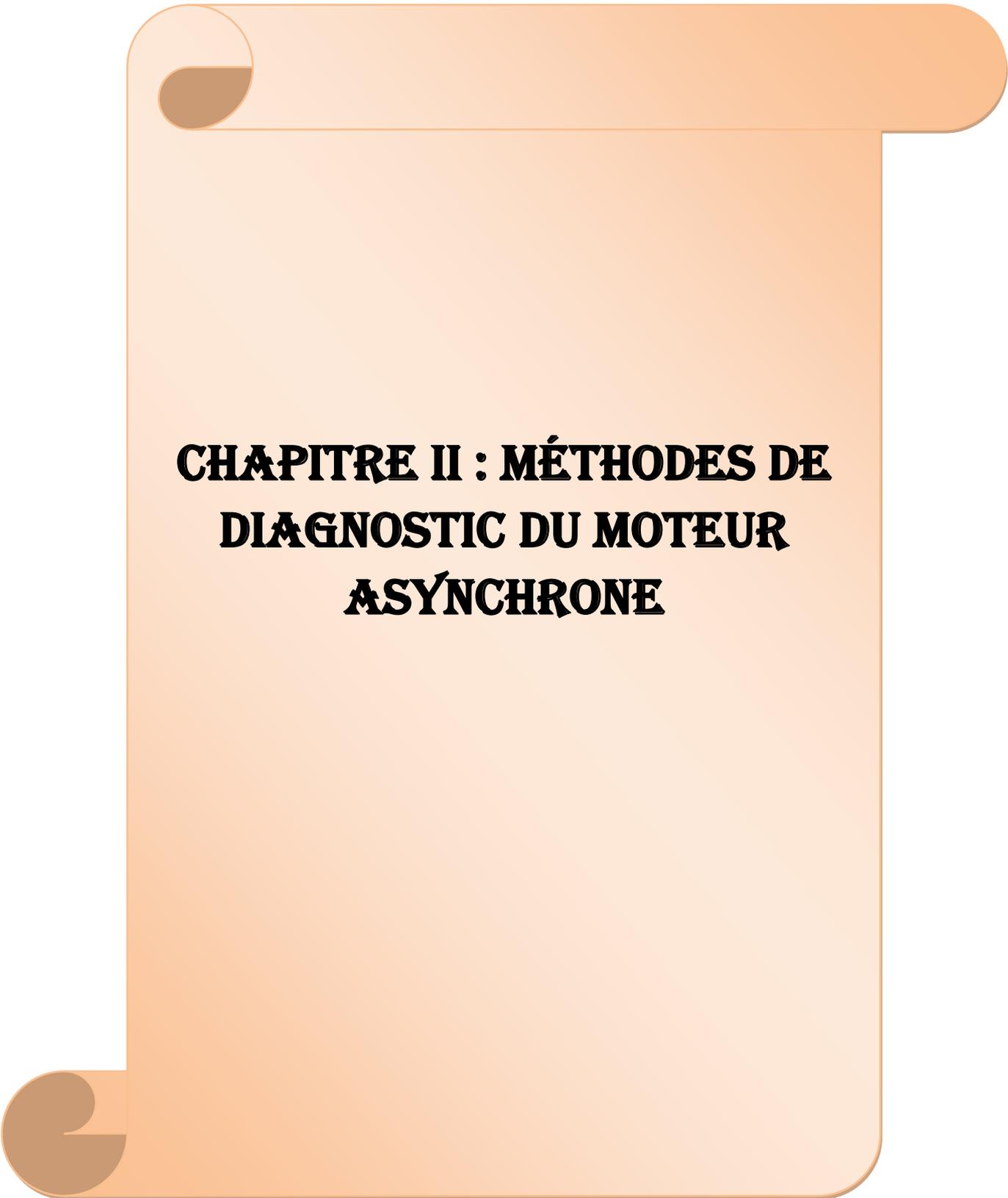
Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies.

Afin de mieux situer notre travail, il a été nécessaire de regarder quelles sont les différentes méthodes de diagnostic actuellement utilisées pour détecter la présence d'une anomalie au sein de la machine asynchrone.

Le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application. Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver la cause d'une défaillance ou d'un défaut. La définition de ce dernier, adoptée par les instances internationales de normalisation, est la suivante : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test ».

I.7. CONCLUSION :

Ce chapitre, a été consacré à la représentation des différents défauts pouvant se produire sur la machine asynchrone. Dans un premier temps, après avoir rappelé succinctement les éléments de constitution de la machine asynchrone, nous nous sommes intéressés à répertorier les principales défaillances se produisant sur les différentes parties de la machine ainsi que les causes et les conséquences de leur apparition.

The background is a light orange scroll with rounded corners and a darker orange shadow on the left side, suggesting it is unrolled. The text is centered on the scroll.

**CHAPITRE II : MÉTHODES DE
DIAGNOSTIC DU MOTEUR
ASYNCHRONE**

II.1.INTRODUCTION :

Dans le présent chapitre, nous allons énumérer les différentes méthodes de diagnostic et de montrer l'avantage de l'emploi l'une de ces méthodes, qui est la méthode de l'analyse spectrale du courant statorique comme une technique permettant la détection des défauts de l'excentricité dans les moteurs asynchrones.

II.2. METHODES DE DIAGNOSTIC DES MACHINES

ASYNCHRONES :

L'objectif de cette section est de présenter les diverses méthodes de diagnostic appliquées aux machines électriques. Ces méthodes sont nombreuses et peuvent être classées, selon plusieurs auteurs [34-35], [33] en deux catégories, celles qui utilisent un modèle analytique (connaissance à priori) du système et celles qui se dispensent de ce modèle (sans connaissance à priori). L'approche analytique est plutôt inspirée par les automaticiens, alors que les communautés du génie électrique et du traitement du signal préfèrent s'intéresser à des méthodes plus heuristiques.

II.2.1. Méthodes de diagnostic avec modèle analytique :

Ces méthodes de détection reposent sur des connaissances à priori du système. Elles supposent la connaissance des modèles et des paramètres représentant le processus physique à étudier. La comparaison des signaux disponibles obtenus d'un modèle sain et des signaux générés par un modèle inconnu permet la détection ainsi que l'identification de la défaillance susceptible de se produire. La différence étant la signature du défaut. Si cette différence dépasse un seuil prédéfini, la présence d'un défaut est signalée. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories citées ci-après:

II.2.1.1. Techniques d'estimation d'état : utilisent le filtre de Kalman et l'observateur de Luenberger pour la reconstruction de l'état du système en connaissant son modèle mathématique, dans [36] a utilisé le filtre de Kalman pour détecter les cassures de barres par estimation de la résistance rotorique.

II.2.1.2. Technique de génération de résidus : Les résidus sont des signaux qui reflètent l'écart entre un modèle et le système à surveiller. Ces techniques d'extraction des résidus visent à fournir des signaux indicatifs et exploitables pour détecter la présence d'une

défaillance spécifique. En mode sain, ces résidus doivent s'approcher de zéro et refléter la présence d'un défaut en convergeant à des valeurs significatives [34].

II.2.1.3. Techniques d'identification : ces techniques ont pour objectif de déterminer un modèle dynamique du système à surveiller à partir d'un modèle de référence. L'idée fondamentale est que les paramètres caractérisant ce modèle identifié vont être sensibles aux défauts affectant la machine, et vont donc permettre par leurs variations de caractériser ces défauts. L'estimation des paramètres du modèle est assurée par un algorithme d'optimisation pour minimiser l'erreur entre la sortie du modèle et celle de la machine [34].

Ces méthodes de diagnostic par identification sont généralement utilisées pour la surveillance et la détection des défaillances, le plus souvent à l'aide de modèles spécifiques [37-38] :

- les ruptures de barres ou de portions d'anneaux au rotor.
- l'excentricité statique et dynamique.
- de réduction de spires ou court-circuit entre spires d'une même phase au stator. Les techniques de diagnostic suscitées nécessitent la connaissance du comportement dynamique de la machine à l'aide d'un modèle de connaissance. Toutefois, ces méthodes ne permettent pas d'étudier tous les défauts de la machine (défauts de roulements par exemple). Ci après, on cite les méthodes de diagnostic sans modèle, basées sur le suivi et l'analyse des grandeurs telles que les courants, les vibrations, les flux et le couple.

II.2.2. Méthodes de diagnostic sans modèle analytique :

Ces méthodes ne nécessitent pas forcément de modèle précis du système mais reposent plutôt sur une reconnaissance de signatures. Les signatures de défauts, obtenues par modélisation ou par relevé expérimental, sont généralement classées dans une base de données qui seront exploitées ultérieurement par analyse signal ou par système expert (classification, reconnaissance de forme...) [34].

II.2.2.1. Méthode par traitement de signal :

L'approche signal est très utilisée en diagnostic pour des raisons de simplicité et d'efficacité. Cette approche repose sur la connaissance du comportement du système sain, elle est ensuite comparée avec les signaux mesurés. Les méthodes courantes d'analyse des signaux de diagnostic sont l'analyse spectrale [39-40], le spectrogramme [41], l'analyse temporelle [39], l'analyse temps-fréquence [28-29] et l'analyse temps-échelle ou ondelettes (wavelets) [42-43]. Les défauts étudiés par ces méthodes de diagnostic sont :

- Les ruptures de barres ou de portions d'anneaux au rotor.
- Les courts-circuits entre spires au stator.

- L'excentricité statique et dynamique.

II.2.2.2. Méthode par intelligence artificielle (IA) :

L'intelligence artificielle imite l'intelligence humaine, inspirée des phénomènes de la nature, heuristique et évolutionnaire, est de plus en plus utilisée dans le domaine de la supervision et du diagnostic, elle a permis d'augmenter l'efficacité et la fiabilité du diagnostic. Elles exploitent les signatures avec ou sans modèle pour réaliser la supervision et le diagnostic du système. Elles ne nécessitent pas de modèle précis du système. Une véritable mutation des recherches vers ce genre de technique pour augmenter l'efficacité du diagnostic et la détection des défauts. En fait, l'Intelligence Artificielle comprend diverses techniques qui sont exploitées dans le domaine du diagnostic, telles que les systèmes experts, les réseaux de neurones[44-45], la logique floue [46-47], les algorithmes génétiques [48], les (PSO) Particle Swarm optimization [49], les (SVM) Support Vector Machine [50] et la reconnaissance des formes (Pattern Recognition) [51], [52] qui peuvent être utilisées de manière indépendante ou combinées pour améliorer l'efficacité du diagnostic.

II.3. TECHNIQUE DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ELECTRIQUE :

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur.

Pour remédier au problème de détection des défauts, il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts [53] [31]. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure (mesure de champ magnétique, mesure de bruit) d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut (courant statorique, couple et vitesse) Figure (I.14) [4].

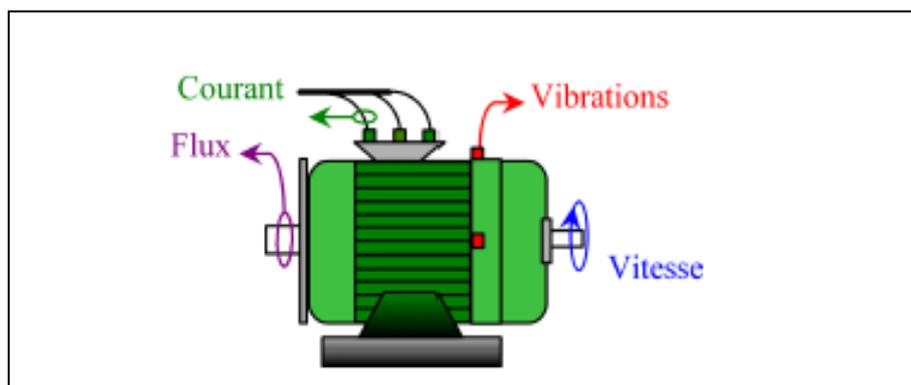


Figure (II. 1): Les différentes grandeurs de diagnostic dans une machine.

Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : les techniques mécaniques, les techniques chimiques et les techniques magnétiques et électriques.

II.3.1. Techniques mécaniques :

Parmi ces techniques, on trouve :

II.3.1.1. diagnostic par mesure de la température :

Les températures des supports sont surveillées sur des bases de routine, et fournissent des informations utiles. Un volume de liquide refroidissant, débouché sur des températures, est aussi précieux pour l'indication des problèmes de refroidissement et pour le contrôle lorsqu'il est proposé de faire opérer la machine au delà de sa puissance.

Les températures des bobines sont aussi impératives pour la détermination de la limite pour laquelle le moteur peut être chargé et pour l'estimation de la durée de vie rémanente de l'isolation des enroulements. Elles sont rarement mesurées à cause des problèmes d'obtention de l'isolation électrique contre les conducteurs de haute tension, bien que les détecteurs de température soient parfois intercalés dans l'isolant renfermé sur le point surchauffé du conducteur, mais cela affaiblit l'intégrité de l'isolant.

Il demeure donc une nécessité pour le capteur de fortes températures lequel peut être monté sur les enroulements ou inséré dans l'isolant électriquement isolé par rapport à son instrument de mesure.

II .3.1.2. Diagnostic par mesure des vibrations :

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

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

Plus souvent, les mesures sont faites comme une procédure non fréquente ou lorsqu'un problème est suspecté, les mesures sont faites en utilisant des accéléromètres ou des capteurs de vitesse à boulons.

Des sondes de déphasage sont aussi employées pour le contrôle du mouvement de l'arbre.

Le désalignement entre les centres des supports donnant naissance à un entrefer non uniforme produit la vibration à une fréquence double, tandis que le déséquilibre mécanique engendre la

vibration à la vitesse angulaire, au moment où les deux dépendent de la réponse mécanique à cette fréquence.

Les signaux de vibrations détectés contiennent des informations essentielles sur l'état de la machine. L'analyse spectrale de ces signaux nous renseigne sur les différents défauts qui sont à l'origine de ces vibrations.

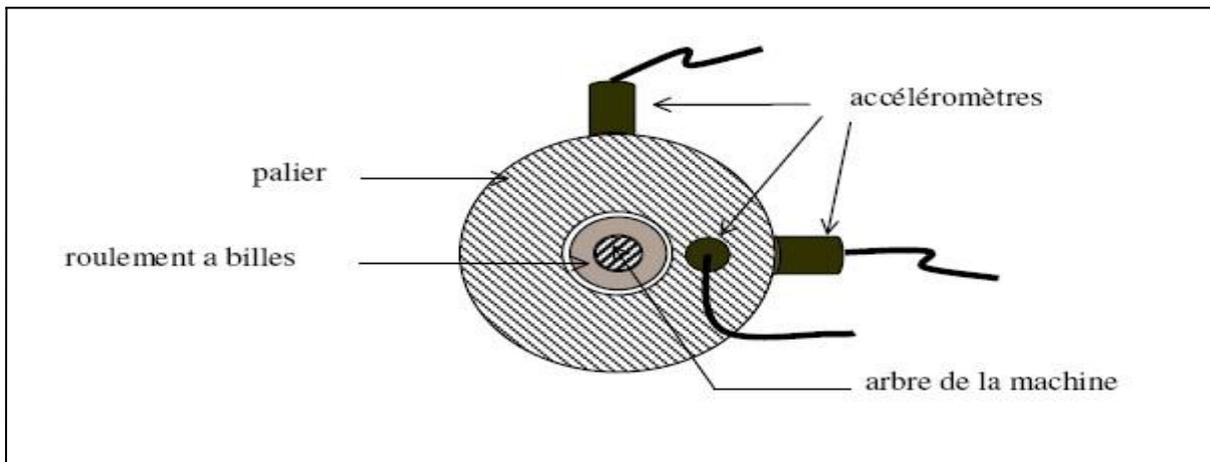


Figure (II. 2): Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.

II.3.2. Diagnostic chimiques :

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

L'air est tiré du moteur à travers le tube vers le détecteur infrarouge par une pompe auxiliaire. Seuls les moteurs en service sont échantillonnés et la forme de l'air de chaque moteur est analysée pendant deux minutes.

L'huile de roulement est aussi analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents [53].

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

Ces techniques sont basées généralement sur l'utilisation des grandeurs mécaniques, afin que les ingénieurs mécaniciens puissent faire leur interprétation, malgré que les machines sont des moteurs électriques. La présence des ingénieurs électriciens est nécessaire pour intervenir dans la partie électrique et pour cette raison, les techniques de diagnostic sont de

plus en plus orientées vers l'emploi des grandeurs électriques vu leur accessibilité et la simplicité du capteur utilisé.

II.3.3. Techniques magnétiques et électriques :

II.3.3.1. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite :

Le flux de fuite axial peut être détecté par une bobine (bobine exploratrice) enroulée autour de l'arbre de la machine Figure (II.3) et aussi par n'importe quel arrangement symétrique simple des bobines placées à l'extrémité de l'arbre de la machine ou par d'autres dispositifs sensibles tels que les sondes à effet hall.

Lorsque la bobine est enroulée autour de l'arbre d'une machine électrique, elle est le siège d'une force électromotrice (Fem) induite qui est liée aux flux de fuite axiaux.

Les flux de fuites sont présents dans toutes les machines électriques en raison des asymétries dans les circuits électriques et magnétiques qui sont dues aux fluctuations du réseau électrique et les tolérances pendant le processus de fabrication.*

L'analyse spectrale de la tension induite peut être utilisée pour identifier les différentes asymétries et défauts. Le contenu d'harmoniques des flux de fuites axiaux du stator et du rotor est directement en relation avec les harmoniques contenus respectivement dans les courants du stator et du rotor.

La conséquence directe d'un défaut est l'augmentation du flux de fuite axial. Cette augmentation du flux est la condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite axial comme une technique de diagnostic, c'est-à-dire ce dernier doit avoir une valeur importante.

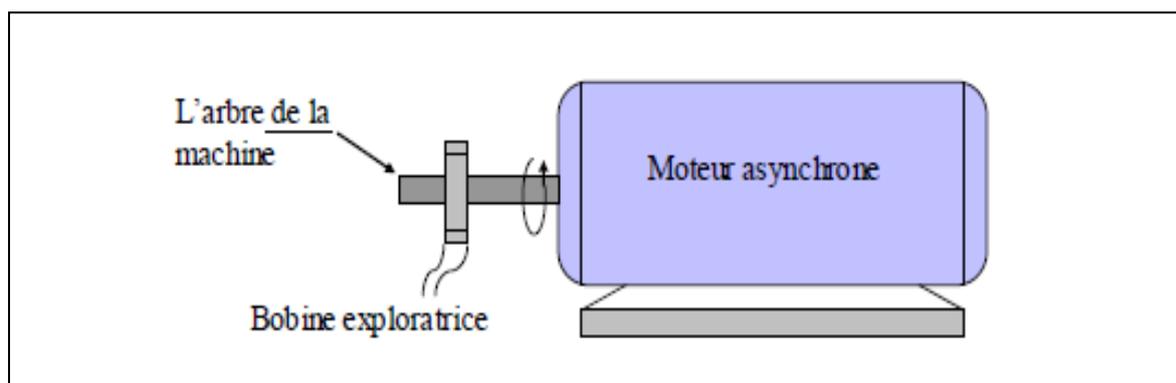


Figure (II. 3): Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial.

II.3.3.2. Diagnostic par mesure du Flux magnétique radial de fuite :

La mesure du flux magnétique extérieur s'effectue à l'aide d'un capteur bobiné. Celui-ci est placé sur le côté de la machine, à égale distance des extrémités de la culasse et à une distance x de l'axe, comme indiqué sur la figure (II.4). Le contenu spectral du flux axial, concernant les fréquences de ses composantes, sera similaire à celui du flux radial. En fait il sera moins riche, car il existe plusieurs conditions pour qu'un harmonique d'induction génère une composante de courant associée. D'autre part, le fait de placer le capteur à mi-distance des extrémités de la culasse minimise l'influence de la composante axiale. C'est pourquoi la caractérisation du flux mesuré résultera uniquement de l'induction d'entrefer, qui nous offre une image plus réelle sur l'état de santé de notre machine. [54].

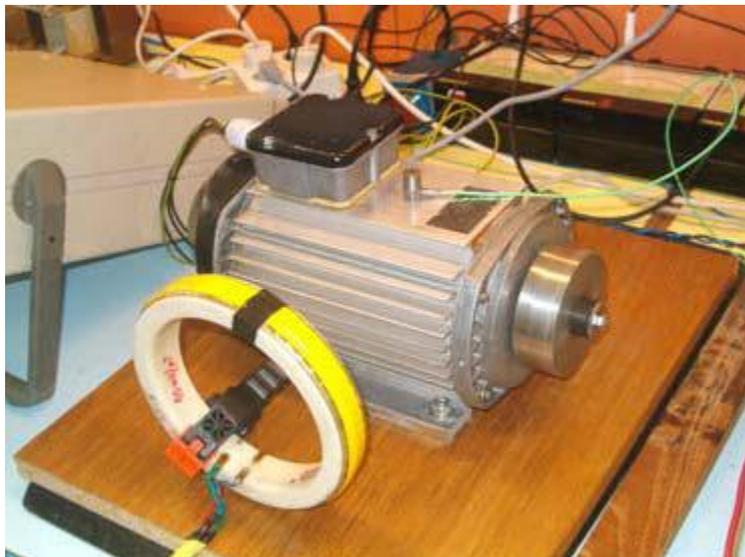


Figure (II. 4): Mesure du flux radial.

II.3.3.3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites :

La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette technique pour exploiter le contenu fréquentiel de la tension induite, par le flux rotorique, directement dans les enroulements statoriques pendant la déconnexion du moteur de réseau, en éliminant ainsi toutes les asymétries de la source d'alimentation (déséquilibres, harmoniques) ou la non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine [55].

II.3.3.4. Analyse fréquentielle de la tension de neutre :

En 1998, Cash a utilisé la tension présente entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre de la MAS pour détecter des courts-circuits entre spires dans le bobinage statorique. Une analyse similaire a été effectuée dans le but de détecter un défaut rotorique dans les machines asynchrones. On montre que l'information donnée par la tension présente entre les deux neutres était pertinente pour le diagnostic des défauts rotoriques. Cette technique a tout d'abord été testée sur différents essais de simulation. L'information la plus significative pour permettre un diagnostic fiable de la cage rotorique se situe au niveau des composantes harmoniques de fréquence [56].

$$f_{br} = f_s \{ 3(1-g) \pm g \}.$$

II.3.3.5. Diagnostic par mesure de la puissance instantanée :

La quantité d'information donnée par la puissance instantanée d'une phase, qui n'est autre que le produit de la tension d'alimentation et du courant absorbé par le moteur, est plus importante que l'analyse du courant seul. En effet, en plus de la composante fondamentale et des deux composantes latérales, le spectre de la puissance instantanée contient une composante additionnelle située à la fréquence de défaut. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [56].

II.3. 3.6. Diagnostic par les courants de Park :

Il existe une autre méthode d'analyse du courant c'est l'analyse par l'approche des vecteurs de Park. Elle est utilisée pour les moteurs alimentés par un système triphasé. Les trois grandeurs de la machine sont transformées en grandeurs biphasées selon les axes "d" et "q", et qui sont utilisées pour tracer la courbe de Lissajou "Iq=f(Id)". Le changement de la forme et de l'épaisseur de cette courbe donne une information sur le défaut. L'analyse spectrale du module des deux vecteurs de Park est aussi un moyen pour surveiller l'état de la machine [57].

II.3.3.7. Diagnostic par l'analyse du courant statorique :

Cette méthode est un outil puissant pour détecter la présence des défauts mécaniques et électriques. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes, parce qu'elle ne demande ni l'introduction d'un capteur au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant mais seulement un capteur de courant (sonde à effet de hall ou transformateur de courant) qui donne une image sur le courant de phase statorique.

C'est cette méthode de diagnostic qui sera utilisée comme outil de diagnostic dans la recherche des différents défauts dans ce travail.

C'est une méthode de surveillance, qui consiste à utiliser le spectre du courant statorique [58][59][60]. Sachant que dans un spectre de courant d'un moteur sans défaut apparaît uniquement la composante du fondamental, pour une répartition sinusoïdale de la Fmm.

Dans le cas d'une répartition non sinusoïdale de la Fmm en plus du fondamental apparaît des harmoniques de l'encochage rotorique, cas d'un moteur à cage.

Pour montrer le principe de cette méthode, on considère le cas d'une asymétrie rotorique d'un moteur asynchrone, l'existence de ce défaut engendre un courant de défaut dans le rotor, Ce courant produit une Fmm pulsatoire dont la fréquence d'ondulation est, cette Fmm (f_s) produit dans l'enroulement statorique une harmonique à deux composantes, la première ayant la fréquence $(1-2s)f$ et la deuxième ayant la fréquence $(1+2s)f$. Figure (II.5).

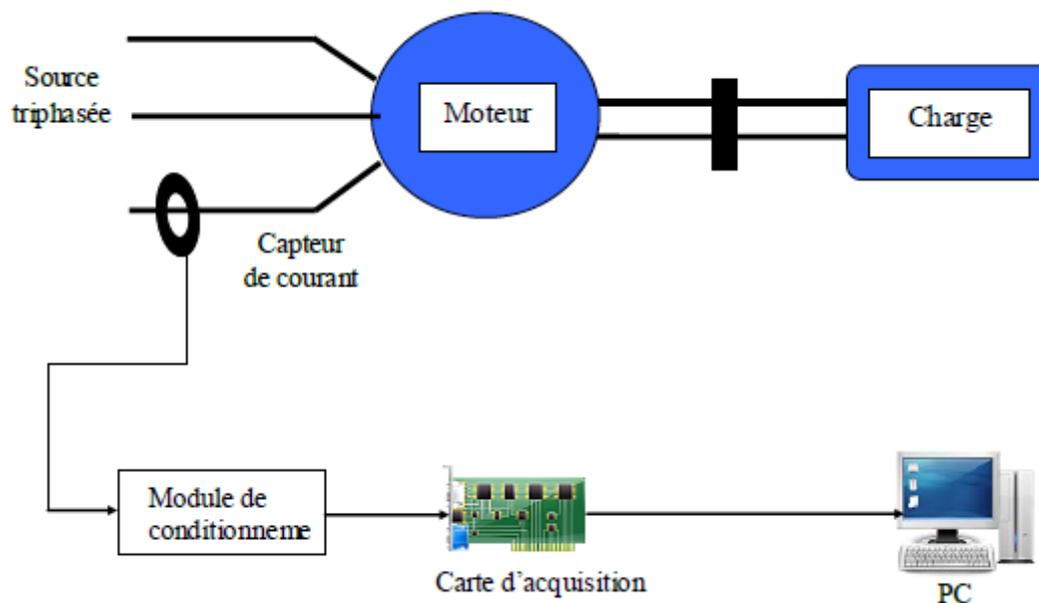


Figure (II. 5): schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique.

II.4. LES DIFFERENTS HARMONIQUES EXISTANT DANS LE COURANT STATORIQUE :

Une étude analytique détaillée qui a été effectuée dans [61] a identifié quatre types d'harmoniques qui sont toujours présents dans le spectre du courant statorique même à l'état

sain. Le tableau (II.1) présente les expressions générales des fréquences gouvernant chaque famille d'harmonique ainsi que leurs causes d'apparition.

| Les différents harmoniques | Les formules globales | Les causes principales |
|---|--|--|
| Les harmoniques du temps (TH) | $TH = n_{ws} \cdot f_s$ | Ce type d'harmonique est imposé par le réseau électrique |
| Les harmonique d'encoche rotorique.(RSH) | $RSH = (n_{ws} \cdot f_s \pm k \cdot N_b \cdot f_r)$ | Sont dus à la structure naturelle de la Machine asynchrone à cage (la distribution discrète des barres rotoriques dans les encoches rotorique.) |
| Harmonique de défauts d'excentricité (EFH) | $EFH = (n_{ws} \cdot f_s \pm k \cdot f_r)$ | Sont dus à un certain degré d'excentricité mixte résiduelle |
| Harmonique de défauts de cassure de barre (RBFH) | $RBFH = (n_{ws} \pm 2 \cdot k \cdot g) \cdot f_s$ | Sont dus à l'asymétrie résiduelle du moteur au niveau du rotor. |

Tableau (II. 1): les différents harmoniques du courant statorique.

Avec : $k = 1, 2, 3, \dots$; $f_s = 50$ Hz ; $N_b =$ nombre de barres. $n_{ws} = 1, 3, 5, \dots$

II.5.CONCLUSION :

Nous avons présenté dans ce deuxième chapitre les différentes méthodes diagnostic. On a aussi fait l'objet de la présentation de la méthode de l'analyse spectrale du courant statorique qui fait l'objet de notre travail ; pour la détection des défauts dans les machines asynchrones.

**CHAPITRE III : MÉTHODES DE
TRAITEMENT DES SIGNAUX
DÉDIÉES AU DIAGNOSTIC DES
DÉFAUTS DU MOTEUR
ASYNCHRONE**

III.1.INTRODUCTION :

L'objectif du traitement du signal est d'analyser avec soin, coder efficacement, transmettre rapidement et reconstruire soigneusement un signal à partir de ses fluctuations et de ses oscillations, c'est dans cet axe que les outils de traitement de signal ont pris naissance l'un après l'autre de la transformée de Fourier avec ses variétés aux ondelettes de nos jours utilisées massivement dans le traitement des signaux dans les différents domaines [62].

La transformée de Fourier, ou plus généralement l'analyse fréquentielle ou spectrale, est un outil fondamental pour la compréhension et la mise en œuvre de nombreuses techniques numériques de traitement des signaux. Cet outil trouve de nombreuses applications dans des différents secteurs tels que la reconnaissance vocale, l'amélioration de la qualité des images, la transmission numériques, le milieu biomédical et autres. Il a, également, envahi le domaine de diagnostic et détection des défauts dans les machines électriques statiques ou tournantes [62].

De nos jours, l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables, des machines électriques, reste la plus utilisée pour le diagnostic des défauts, car la plupart d'entre eux et qui sont connus peuvent être détectés avec ce type d'approche. Avec les limitations qu'ont connues ces méthodes, les recherches ont poussé vers une autre envergure pour améliorer la qualité et l'efficacité du traitement du signal d'où la naissance des ondelettes. La transformée en ondelettes décompose le signal à la fois en temps et en fréquence et qui introduit une fenêtre dont la taille variant avec la fréquence.

Les ondelettes donnent une bonne alternative pour l'étude des classificateurs dans les différents domaines (traitement d'image, biomédical, ...) et aussi dans la détection et la classification des défauts dans les machines électriques [63 - 64].

Dans ce chapitre, nous allons présenter des notions de base concernant l'une des méthodes couramment appliquée au diagnostic des défauts de la machine asynchrone.

III.2.TECHNIQUE DE DIAGNOSTIC (MCSA) :

La méthode de la MCSA est l'abréviation des mots Motor Current Signal Analysis qui a l'abréviation française ASCS qui signifie : Analyse des Signatures du Courant Statorique ou Analyse Spectrale du Courant Statorique.

III.2.1.analyse spectrale :

III.2.1.1. principe :

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones à cage, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans le bobinage. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquence directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation [65].

La surveillance par analyse spectrale de la MAS consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut.et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont les grandeurs mécanique (vibration, couple électromagnétique, vitesses) [66].

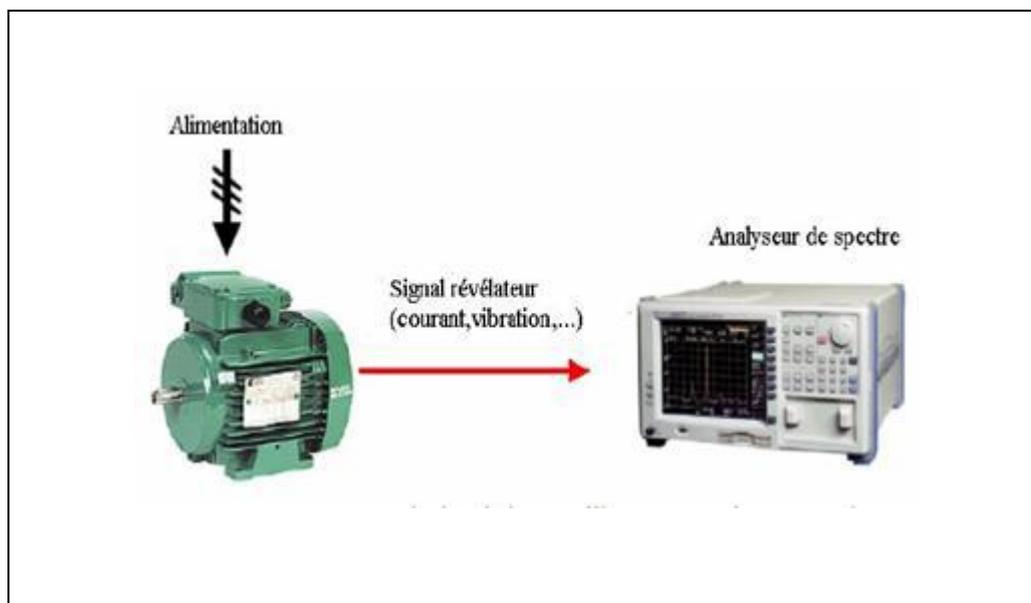


Figure (III. 1): Principe de la surveillance par analyse spectral [65].

III .2.1.2.Spectre d'un signal :

III.2.1.2.1. Définition d'un signal :

Le signal correspond à la mesure d'une grandeur physique. Mesures de grandeur physique : signal sismique, mesure du pouls, déplacement, voltage, intensité, etc... La plupart des grandeurs physiques sont aujourd'hui converties en signaux électriques puis codées en signal numérique binaires. Il existe très peu de mesures totalement analogiques.

III.2.1.2.2.Définition de spectre d'un signal :

C'est la représentation en fonction de la fréquence des amplitudes des différentes composantes présentes dans le signal.

III.2.2.Analyse spectrale de courant statorique(MCSA):

III.2.2.1. Définitions :

III.2.2.1.1.L'analyse spectrale du courant statorique : est une méthode de contrôle qui consiste à analyser le spectre du courant statorique sachant que dans un spectre d'un moteur sans défaut, apparait la composante du fondamental à la fréquence du réseau d'alimentation en régime permanent, accompagnée des composantes à Faibles et hautes fréquences qui sont dues à la géométrie de la machine considérée. Un bon équipement d'analyse de spectre (grande de sensibilité) et la comparaison entre les spectres du courant d'un moteur avec défaut et celui de la référence (le spectre du courant d'un moteur sans défaut), permet d'avoir une bonne analyse et obtenir la maximum d'information sur l'état de moteur.

Cette méthode est utilisée lors de fonctionnement normale du moteur (moteur en marche) ce qui facilite beaucoup la surveillance de la machine et indique à chaque instant l'état de leur fonctionnement.

III.2.2.1.2.L'analyse du courant statorique : est un outil puissant pour détecter la présence d'anomalies mécaniques et électriques, non seulement dans le moteur, mais également dans la charge. Des améliorations considérables sont apportées à cette technique qui est dénommée dans la littérature.

* Les signaux de courants présentent l'avantage d'être facilement mesurable, et à moindre cout.

* Des composantes fréquentielles ont été déterminées pour chaque type de défaut. Il est important de noter, que l'amplitude de la composante fréquentielle augmente avec la sévérité du défaut.

* Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressant, car il est facile à mesurer et nous permet de détecter les défauts électriques, y compris les défauts purement mécaniques.

* Cette méthode qui est connue sous le nom "Motor Current Signature Analysis" (MCSA), se base sur les phénomènes électromagnétiques qui se transforment, par influence à une information dans le courant statorique. Elle est appuyée par un algorithme de calcul rapide appelée Transformée de Fourier Rapide ou bien en Anglais : Fast Fourier Transform (FFT).

Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique par [67], [66] :

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux paramètres physiques de la machine (nombre de barres rotoriques et nombre des paires de pôles).

- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présents dans le spectre du courant. La surveillance via le courant statorique, nécessite une bonne connaissance des défauts et de leurs signatures. Elles sont utilisées pour le moment dans le contexte de machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquences caractéristiques de défauts [67].

- la présence d'harmoniques caractérisant les défauts de la MAS [68].

III.3. METHODE DE TRAITEMENT DE SIGNAUX UTILISES DANS LE DIAGNOSTIC :

III.3.1. L'échantillonnage :

Le théorème d'échantillonnage énonce qu'un signal réel à fréquence maximal f_s peut être reconstruit de façon parfaite (on entend par là que l'on espère pouvoir reconstituer le signal original à temps continu à partir de la seule connaissance des échantillons du signal) si la fréquence d'échantillonnage f_e est supérieure ou égale à deux fois f_s , i.e. $f_e \geq 2f_s$. Si $f_e < 2f_s$, l'opération de reconstruction parfaite n'est plus possible [69].

III.3.2. Transformée de Fourier discrète :

La transformée de Fourier discrète, généralement notée TFD, d'une suite finie de P échantillons $x(0), \dots, x(p-1)$, tel qu'un courant statorique, se calcul grâce à la relation :

$$x(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j2\pi mk/N} \quad (\text{III.1})$$

$m=0,1,\dots, N-1$

Où le terme N représente le nombre de points de calcul de la TFD. Ce terme joue sur la précision du tracé alors que le terme P est lié à ce que l'on appelle la résolution en fréquence. En pratique, on essaye d'avoir un nombre de point N de la suite $x(k)$ supérieur ou égal au nombre de point de la TFD ($P \geq N$). Si ce n'est pas le cas, on utilise une technique appelée zéro-padding qui consiste à compléter la suite $x(k)$ avec (N-P) zéros, ce qui permet d'obtenir autant de point pour la suite temporelle que la suite fréquentielle. La transformée de Fourier Inverse, notée ITFD, se calcul grâce à la relation :

$$x(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) e^{-\frac{j2\pi mk}{N}} \quad (\text{III.2})$$

$m=0,1,\dots, N-1$

Notons que le rapport m/N est la fréquence normalisée discrète par rapport à la fréquence d'échantillonnage f_e . La fréquence f est obtenue par :

$$f = \frac{m}{N} f_e$$

On peut décomposer l'exponentielle de $X(k)$, Cette décomposition permet d'écrire la transformée de Fourier en cosinus, notée TDF-cos et la transformée de Fourier en sinus, notée TDF-sin, Ces deux transformées permettent d'obtenir des temps de calcul réduits lorsqu'elles sont implémentées dans un algorithme de calcul.

III.3.3. Transformée de Fourier rapide (FFT) :

Considérons le signal $X(t)$ à temps continu. Si X est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence f est la suivante [70] :

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi f t} dt \quad (\text{III.3})$$

Son inverse est donnée par:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) e^{-2\pi f t} df \quad (\text{III.4})$$

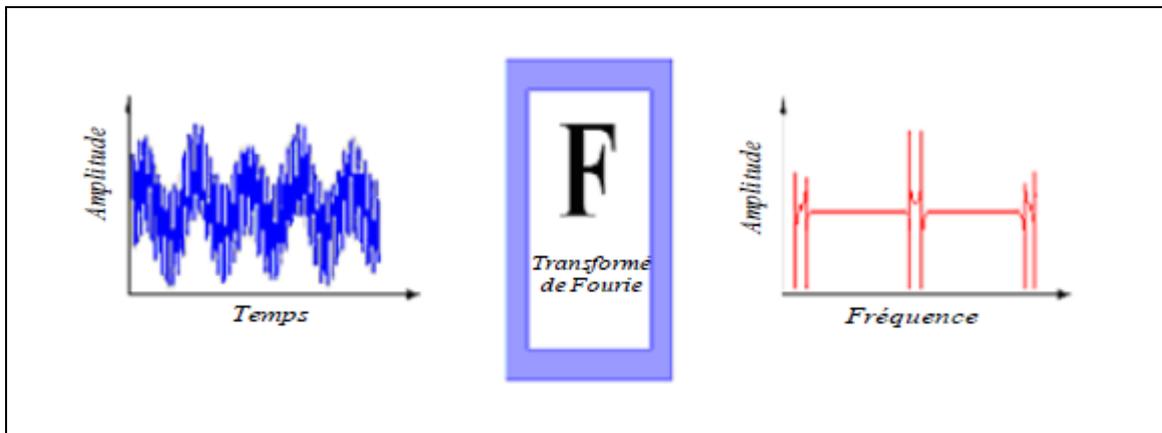


Figure (III. 2): Représentation temporelle vers fréquentielle

Sa transformée de Fourier discrète de N points avec une période d'échantillonnage T est donnée par :

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x(kT) e^{-\frac{2\pi f k T}{NT}} \quad (\text{III.5})$$

et sa relation inverse est donnée par:

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{-j\frac{2\pi f k T}{NT}} \quad (\text{III.6})$$

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier discrète. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la transformée de Fourier discrète, de $\frac{N}{\log_2(N)}$

Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal $x(t)$. En effet, la FFT décompose le signal $x(t)$ sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux $\{e^{2\pi f k T}\}_{f \in \mathbb{R}}$. Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate. Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence. Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps. Dans le cas de l'existence de sauts d'impulsions ou de changements de fréquence par exemple, la FFT ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent dans le signal [71], [72]. Ces phénomènes sont non stationnaires et du fait qu'ils sont brefs et souvent à caractère oscillatoire, leur contenu spectral est difficile à mettre en évidence. Pour résoudre ce problème, GABOR (1964) a introduit la transformée de Fourier à court terme qui se base sur le fenêtrage (Windowing). Il s'agit de segmenter en tranche de temps fixes le signal à analyser et d'appliquer par la suite la Transformée de Fourier à chaque tranche. La suite logique pour la résolution de ce problème a été l'élaboration d'un puissant outil localisé en temps et en fréquences dénommé la transformée en Ondelettes (Wavelets transform).

III.3.4. Analyse des signaux dans le domaine temps fréquence (STFT) :

L'analyse, par ces méthodes, est introduite pour l'étude des signaux non stationnaire c'est à dire les signaux qui évoluent dans le temps. Elle est connue en anglais sous le nom STFT (Short Time Fourier Transform). L'idée originale sur laquelle est basée cette méthode est apparue en 1946 grâce au physicien Denis Gabor [73]. Il s'agit de calculer la transformée de Fourier du signal temporel découpée en morceaux. Multiplication du signal $x(t)$ par une fenêtre glissante $h(t - b)$ (réelle) et calcul de la transformée de Fourier de ce produit. Par conséquent, la STFT décompose le signal dans le domaine temporel en deux dimensions temps et fréquence (f, b) . Le module de ce plan qui est le carré de l'amplitude de la STFT $|F(f, b)|^2$ est appelé le spectrogram. Le problème, pour cette représentation, est le fenêtrage où le signal ne peut être représenté fidèlement et il se retrouve, donc, dans les mêmes limites que la transformée de Fourier. La résolution en temps et en fréquence du spectrogramme est limitée par le principe d'incertitude de Heisenberg-Gabor qui stipule que l'on ne peut être infiniment précis en temps et en fréquence. Le spectrogramme est une analyse mono-

résolution; on ne pas être à la fois « précis » en temps et en fréquence. Cependant, pour une large classe de signaux réels, les zones d'énergie sont nonstationnaires sur des périodes courtes à haute fréquence d'où l'intérêt d'une analyse multirésolution [74]

Parmi les techniques de l'analyse temps fréquence, la transformation de Wigner-Ville permet des diagnostics précis. Cette transformation est une fonction réelle qui définit une distribution d'énergie dans le plan temps-fréquence. Elle peut être interprétée comme une densité spectrale instantanée. Cependant, cette analogie est tempérée par l'existence de valeurs négatives qui en rendent l'interprétation délicate. Des procédures de lissage (fréquentiel et temporel) par fenêtrage permettant de réduire les interférences entre les différentes composantes fréquentielles du signal. La représentation temps fréquence a permis ainsi de mettre en évidence la modulation de fréquence linéaire en fonction du temps [75].

III.3.5. Transformée en Ondelette (TO) :

La transformée en Ondelette est un outil récent de traitement de signal [76]. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier [77]. Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse Temps-fréquence classique.



Figure (III. 3): Représentation temporelle vers ondelettes

III.3.5.1. Transformée en ondelettes continue (TOC) :

La transformée continue en ondelettes (TOC), réalise une projection sur une base de fonctions dont la construction diffère de celle de la Transformée de Fourier à Court Terme et auxquelles on réserve classiquement le terme d'ondelettes. Les ondelettes sont construites à partir d'une "ondelette mère" $\psi(t)$ à l'aide d'un opérateur de translation temporelle et d'un opérateur de changement d'échelle [78].

$\psi(t)$ est une fonction de moyenne nulle telque:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)dt = 0 \tag{III.7}$$

Cette dernière est dilatée avec d'un facteur d'échelle " a" et translatée par "b"

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{III.8}$$

Il y a plusieurs ondelettes mères utilisées pour le calcul de la transformée en ondelette des signaux analysés. Le tableau (II.1) contient les familles les plus usuelles:

| Nom des familles d'ondelettes | Nom court en Matlab |
|---|---------------------|
| Ondelette de Haar | Haar |
| Ondelette de Daubechies | Db |
| Symlets | Sym |
| Coiflets | Coif |
| Ondelettes biorthogonales | Bior |
| Ondelette de Meyer | Meyr |
| Approximation discrète de l'ondelette de Meyer | Dmey |
| Ondelettes de Battle et Lemarié | Btlm |
| Ondelettes gaussiennes | Gaus |
| Chapeau mexicain | Mexh |
| Ondelette de Morlet | Morl |
| Ondelettes gaussiennes complexes | Cgau |
| Ondelettes de Shannon complexes | Shan |

| | |
|--|------|
| Ondelettes B-spline fréquentielles complexes | Fbsp |
| Ondelettes de Morlet complexes | Cmor |

Tableau (III. 1): Familles d'ondelettes.

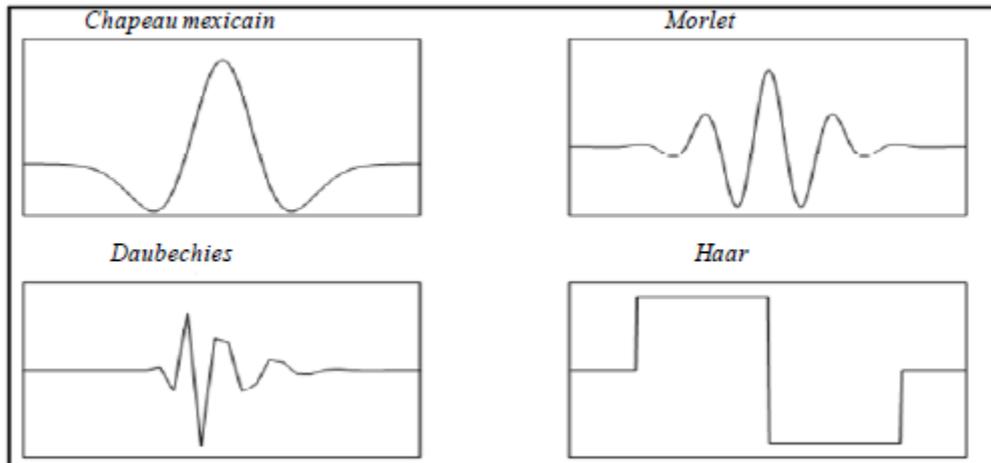


Figure (III. 4): Quelques formes des ondelettes usuelles

La transformée en ondelettes est une décomposition atomique dont les atomes sont issus d'une même fonction, l'ondelette mère, par opérations de translation et dilatation. Cette ondelette, appelée ainsi car représentant des oscillations, comme une onde, mais limitée en temps d'où le nom de la petite onde.

La transformée continue en ondelettes est définie par [78]:

$$T_x(a, b) = \left\langle x, \psi_{a,b} \right\rangle \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (\text{III.9})$$

Sa version fréquentielle est donnée par:

$$T_x(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) \psi^*(af) e^{j2\pi fb} df \quad (\text{III.10})$$

La transformée prend les deux arguments a et b qui sont respectivement des coefficients de dilatation et de translation. En faisant varier ces arguments, on peut couvrir complètement le plan temps-fréquence avec des boîtes; on obtient ainsi une représentation complète et redondante du signal à analyser.

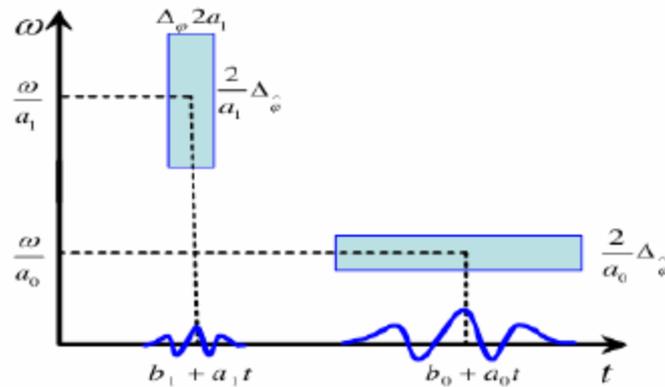


Figure (III. 5): Boîtes Temps-fréquence des deux ondelettes ψ_{a_1, b_1} et ψ_{a_0, b_0}

Quand l'échelle a diminué, le support du temps est réduit mais la diffusion de fréquence augmente et couvre un intervalle qui est décalé vers des hautes fréquences.

La notion de représentation temps-échelle ou espace-échelle permet de voir la transformée en ondelettes comme un microscope mathématique, le zoom étant l'échelle et l'optique, l'ondelette. Le paramètre échelle est très similaire à la notion d'échelle pour les cartes géographiques. En tant qu'opération mathématique, les grandes échelles, ou basses fréquences, dilatent le signal et correspondent à des vues plus globales non détaillées du signal. Les petites échelles, ou hautes fréquences, correspondent à des vues détaillées et donnent des informations détaillées sur un motif caché dans le signal.

III.3.5.2. Transformée en ondelette 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 dyadique 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 (PC, DSP, CARTE a P...) [79].

Il est à noter que la transformée en ondelette continue TOC est aussi implantable sur les systèmes digitaux avec un lourd calcul provenant de la nature continue du facteur d'échelle et de la dilatation (Toutes les valeurs sont possibles) [80].

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:

$$\varphi_{i,j}(t) = 2^{-i/2} \varphi(2^{-i} t - j) \quad (\text{III.11})$$

et de la même manière la base d'ondelette:

$$\psi_{i,l}(t) = 2^{-i/2} \psi(2^{-i} t - j) \quad (\text{III.12})$$

Le facteur d'échelle dyadique mène à:

$$\Phi(t) = \sum_j 2h(j) \varphi(2t - j) \quad (\text{III.13})$$

$$\Psi(t) = \sum_j 2g(j) \varphi(2t - j) \quad (\text{III.14})$$

La transformation en ondelettes peut aussi être considérée comme un processus de décomposition du signal en approximations et en détails. Le signal d'origine $f(t)$, traverse deux filtres complémentaires, passe-haut et passe-bas et émerge en tant que deux signaux respectivement le signal d'approximations A et le signal de détails D comme le montre la figure (III.6) [81].



Figure (III. 6): Décomposition du signal f en approximations et détails

- L'approximation: est la partie grand échelle, basse -fréquence du signal,
- Le détail: est la partie petit-échelle, haute-fréquence du signal.

III.3.6. Transformée de HILBERT :

C'est une méthode parmi les plus connues dans le domaine du traitement de signal. Elle peut être utilisée pour analyser les signaux dans les différents secteurs techniques même en diagnostic. Contrairement à la transformée de Fourier, qui transforme un signal issu du domaine temporel en un signal exprimé dans le domaine fréquentiel, la transformée de Hilbert ne change pas le domaine du signal. En effet, la transformée de Hilbert d'un signal dépendant du temps est aussi une fonction du temps. Mathématiquement, la transformée de Hilbert d'un signal réel $x(t)$, tel qu'un courant stator, est défini par :

$$y(t) = HT\{x(t)\} = \frac{1}{\pi t} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (\text{III.15})$$

En associant la fonction et sa transformée de Hilbert $x(t)$, $y(t)$, on obtient ce qu'on appelle le signal analytique, défini par :

$$\dot{x}(t) = x(t) + jy(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (\text{III.16})$$

Avec:

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (\text{III.17})$$

$a(t)$ est l'amplitude instantanée de $x(t)$ qui reflète la modulation d'amplitude du signal réel $x(t)$.

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right) \quad (\text{III.18})$$

$\theta(t)$ la phase instantanée de $x(t)$ qui reflète la modulation de phase du signal réel $x(t)$. Il faut noter que la transformée de Hilbert d'une fonction trigonométrique est une version d'elle-même. Autrement dit, la transformée de Hilbert d'un sin est un cos et vice versa. Par conséquent, le spectre de la transformée de Hilbert d'un signal contient les mêmes harmoniques avec les mêmes amplitudes et fréquences que le spectre du signal réel. Mais la phase de chaque harmonique est décalée de 90° [82]. De ce fait on peut calculer la transformée de Hilbert à partir de la transformée de Fourier comme suit :

Si $s(t)$ est un signal à valeurs réelles avec un spectre $S(\omega)$, alors le signal complexe appelée signal analytique $z(t)$ est obtenu à partir de $S(\omega)$ par transformée de Fourier inverse, où l'intégration passe uniquement sur les fréquences positif

$$z(t) = 2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} dt \quad (\text{III.19})$$

Et le spectre

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) e^{-j\omega t} dt \quad (\text{III.20})$$

La Relation résultante décrivant le signal analytique $z(t)$ est :

$$z(t) = S(t) + \frac{j}{\pi} \int \frac{S(t')}{t - t'} dt' \quad (\text{III.21})$$

La deuxième partie de cette équation, qui est la partie imaginaire est appelée transformée de Hilbert de $s(t)$.

III.3.7. Wigner-Ville et autres distributions quadratiques. :

Contrairement aux techniques précédentes, qui mettent l'accent sur la décomposition du signal lui-même, la distribution de Wigner-Ville (WVD) met l'accent sur la décomposition de l'énergie du signal dans le plan temps-fréquence [83]. Mathématiquement, la WVD peut être exprimée comme :

$$w_{x,x}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (\text{III.22})$$

La résolution temps-fréquence de WVD n'est pas contrainte par l'inégalité de Heisenberg Gabor. Cependant, la WVD est non linéaire car $w_{(x+y),(x+y)}(t, f) \neq w_{x,x}(t, f) + w_{y,y}(t, f)$.

Cette non-linéarité est responsable de l'introduction de termes d'interférence. Ces termes d'interférence peuvent rendre la représentation temps-fréquence difficiles à interpréter. Pour réduire les termes d'interférence, le signal analytique de $x(t)$ est généralement utilisé à la place du signal lui-même. Par ailleurs, plusieurs auteurs ont proposé des extensions de la WVD pour réduire les interférences au détriment de la résolution réduite. Ces extensions ont été unifiées par la classe de Cohen des distributions temps-fréquence. Cette classe est donnée par :

$$C_{x,x}^{\phi}(t, f) = \iiint_{\mathbb{R}^3} \phi(\xi, \tau) e^{j2\pi\xi(s-t)} x\left(s + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\xi ds d\tau \quad (\text{III.23})$$

Où $\phi(\xi, \tau)$ est le noyau de la distribution. La classe de Cohen comprend de nombreuses distributions temps-fréquence couramment utilisées telles que le pseudo Wigner-Ville, les distributions Choi-Williams et Zhao-Atlas-Marks [83].

III.4.CONCLUSION :

Dans cette partie, nous avons présenté des termes et des notions très importantes sur la technique de diagnostic MCSA. et les méthodes de diagnostic, telles que les méthodes basées sur le traitement du signal (analyse spectrale).

**CHAPITRE IV : APPLICATION
AU DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS
DE L'EXCENTRICITÉ DU
MOTEUR ASYNCHRONE**

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

IV.1. INTRODUCTION :

Le défaut d'excentricité de l'entrefer existe dans toutes les machines électriques tournantes avec un degré plus ou moins sévère ce qui est le plus souvent le résultat de nombreux facteurs combinés ou séparés, tels que l'usure des roulements et le désalignement de l'arbre du rotor. Il existe deux types d'excentricité de l'entrefer : l'excentricité statique et l'excentricité dynamique, mais en réalité les deux tendent à coexister, même dans un état sain, la machine a un certain degré d'excentricité mixte codifié dans la tolérance de fabrication. Les effets indésirables causés par l'excentricité de l'entrefer comprennent les harmoniques du courant d'enroulement, les contraintes supplémentaires sur les paliers du moteur, la traction magnétique déséquilibrée entre le rotor et le stator, les pertes accrues, les variations de couple.....

Dans ce chapitre, on présentera au début la modélisation de défaut rotorique de type d'excentricité de la machine asynchrone triphasé à cage d'écureuil, ensuite on utilise en vue la détection de ce défaut deux méthodes de traitement du signal l'une à base de la FFT utilisée en régime permanent et la seconde à base de l'ondelette discrète (multi niveau) en régime permanent.

IV.2. MODELISATION DES DEFAUTS D'EXCENTRICITE :

Pour avoir un modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil excentrée, il est nécessaire de modéliser la variation de la perméance d'entrefer ce qui permet de redéfinir les expressions des inductances de la machine. Les figures IV.1 et IV.2 présentent respectivement une vue de face d'un rotor statiquement et dynamiquement excentré. O_s et O_r sont respectivement les centres du stator et du rotor, la distance $O_r O_s$ est le décalage entre les deux centres.

IV.2.1 Excentricité statique :

Dans le cas d'une excentricité purement statique (figure IV.1), la fonction d'entrefer est définie comme suit [84-86] :

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

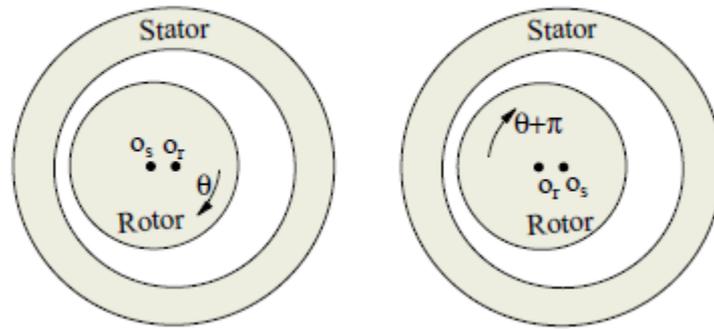


Figure (IV.1): Représentation schématique de l'excentricité statique..

$$g(\theta s) = g_0(1 - \varpi_s \cos(\theta s)) \quad (\text{IV. 1})$$

tel que :

δs est le degré d'excentricité statique qui est donné par :

$$\varpi_s = \frac{O_r O_s}{g_0} \quad (\text{IV. 2})$$

Le développement en série de Fourier de la fonction de perméance que nous avons besoin pour parvenir à des expressions analytiques des inductances [84-86] :

$$g(\theta s)^{-1} = \frac{1}{g_0} (a_0 + a_n \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n \theta s)) \quad (\text{IV. 3})$$

Où :

$$a_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \varpi_s^2}}$$

$$a_n = (2a_0 \frac{\varpi_s}{\sqrt{1 - \varpi_s^2}})^n$$

IV.2.2. Excentricité dynamique :

Pour une excentricité de type dynamique représentée par la figure (IV.2), la fonction d'épaisseur d'entrefer sera exprimée en δd comme suit [84-86] :

$$g(\theta s, \theta) = g_0(1 - \varpi d \cos(\theta s - \theta)) \quad (\text{IV. 4})$$

et la fonction de perméance en série de Fourier est [84-86] :

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

$$g(\theta_s, \theta)^{-1} = \frac{1}{g_0} \left(a_0 + a_n \sum_{n=1}^{\infty} \cos(n(\theta - \theta_s)) \right) \quad (\text{IV.5})$$

Où:

$$a_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \delta_d^2}}$$

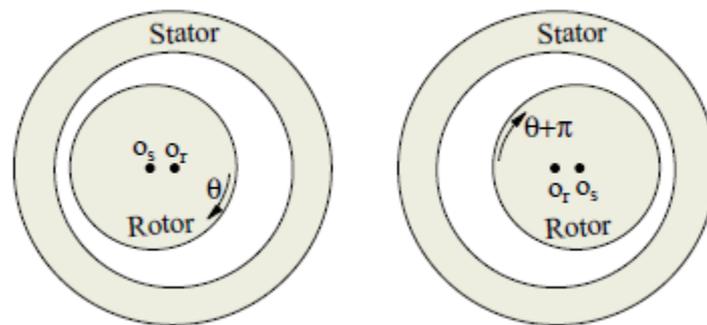


Figure (IV. 2): Représentation schématique de l'excentricité dynamique

$$a_n = \left(2a_0 \frac{\delta_d}{\sqrt{1 - \delta_d^2}} \right)^n$$

Pour un degré faible d'excentricité statique ou dynamique, $\delta_d \leq 0.4$ est généralement le cas, les amplitudes des termes $a_{n>1}$ de développement en série de Fourier de la fonction de perméance sont négligeables. Par conséquent, [85] ne tient en compte que le premier terme $a_{n=1}$ ce qui simplifie les formules des inductances de machine. Dans ce cas, la fonction de perméance peut être réécrite sous la forme :

$$g(\Theta)^{-1} = \frac{1}{g_0} (1 + \delta \cos(\Theta)) \quad (\text{IV.6})$$

Tels que :

$\delta = \delta_s$ et $\Theta = \theta_s$ dans le cas d'une excentricité statique.

$\delta = \delta_d$ et $\Theta = \theta - \theta_s$ dans le cas d'une excentricité dynamique.

IV.3.EXCENTRICITE STATIQUE :(RESULTATS DE SIMULATION)

Tel que reporté dans [87], si la combinaison du nombre de barres et du nombre de paires de pôles du moteur fait que les PSHs doivent exister dans le spectre du courant, aucune fréquence additionnelle ne peut être une suite à une excentricité statique [88].

Les figures (IV.3) présentent l'allure t du courant statorique en régime permanent, et cela sous une charge de 10Nm et avec $\delta s = 60\%$.

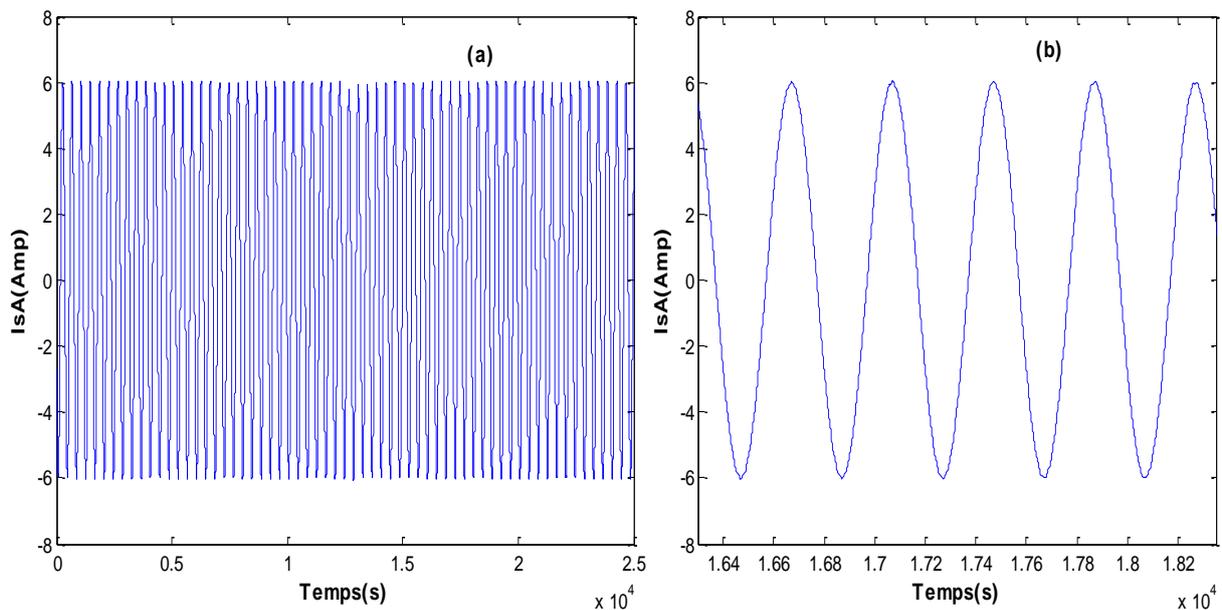


Figure (IV.3): (a) Courant de la phase statorique A, (b) le zoom correspondant : $\delta s = 60\%$, $C_r = 10Nm$

Il est clair que la représentation temporelle de ces signaux ne permet pas de contribuer à un bon diagnostic quant à l'état de santé de la machine.

La figure (IV.4) illustrant le spectre relatif au courant de la première phase statorique, montre bien qu'aucune fréquence additionnelle ne peut surgir suite à ce défaut, cependant, on constate une modulation des fréquences des harmoniques d'encoches rotoriques.

On a fait un calcul concernant le défaut d'excentricité statique :

$$f_{es} = f_s \cdot \left[1 \pm \frac{k \cdot N_b (1 - g)}{P} \right] \quad (IV.7)$$

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

$$f_{es} = 50. \left[1 - \frac{1.40(1 - 0.0051)}{2} \right] = 944.9\text{Hz} \quad (\text{IV.8})$$

$$f_{es} = 50. \left[1 + \frac{1.40(1 - 0.0051)}{2} \right] = 1044.9\text{Hz} \quad (\text{IV.9})$$

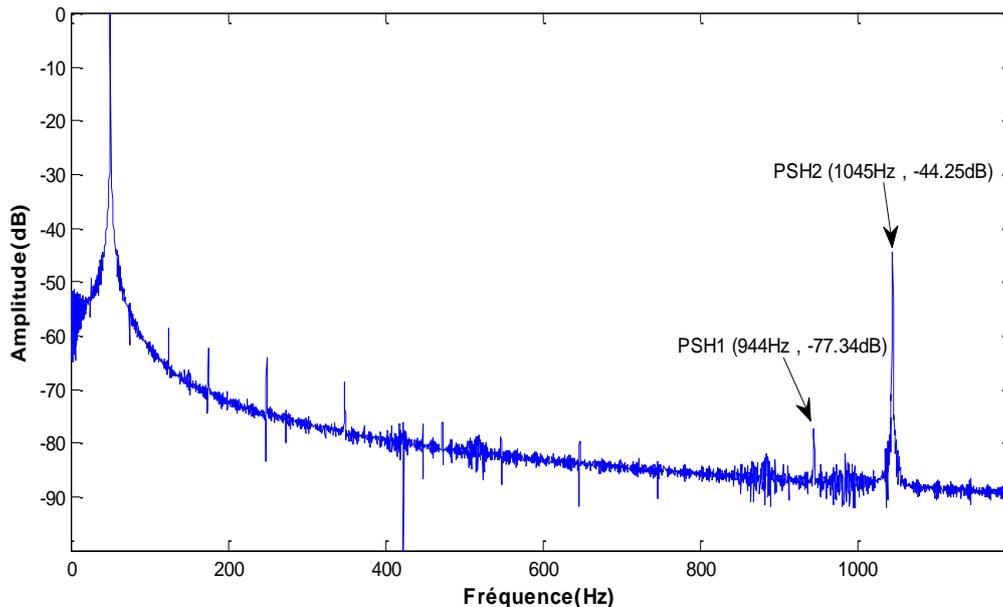


Figure (IV.4): Spectre correspondant du courant de la phase statorique A: $\delta s = 60\%$
 $C_r = 10\text{Nm}$

Le tableau (IV.1) regroupe les valeurs des fréquences correspondant aux harmoniques principales d'encoches rotoriques pour un fonctionnement sous une charge de 10Nm, et pour différentes valeurs d'excentricités statiques. L'évolution des harmoniques se voit dans les figures (IV.5) [89], et c'est bien ce qui fait que cette évolution suit l'évolution de la sévérité du défaut. Mais la question qui se pose est si on peut ou non utiliser ces fréquences pour inspecter la présence d'une excentricité statique ? En fait, la contrainte qui constitue l'handicap de cette méthode est qu'elle requiert au préalable la connaissance du spectre du courant du moteur sain afin d'établir la comparaison [90].

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

| | Etat sain | $\delta s = 20\%$ | $\delta s = 40\%$ | $\delta s = 60\%$ |
|-------------------------------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Amplitude de PSH1 (dB) | -82.32 | -79.12 | -78.42 | -77.34 |
| Amplitude de PSH2 (dB) | -47.25 | -45.52 | -45.1 | -44.25 |

Tableau (IV. 1): Evolution des harmoniques d'encoches principales en fonction du degré d'excentricité statique.

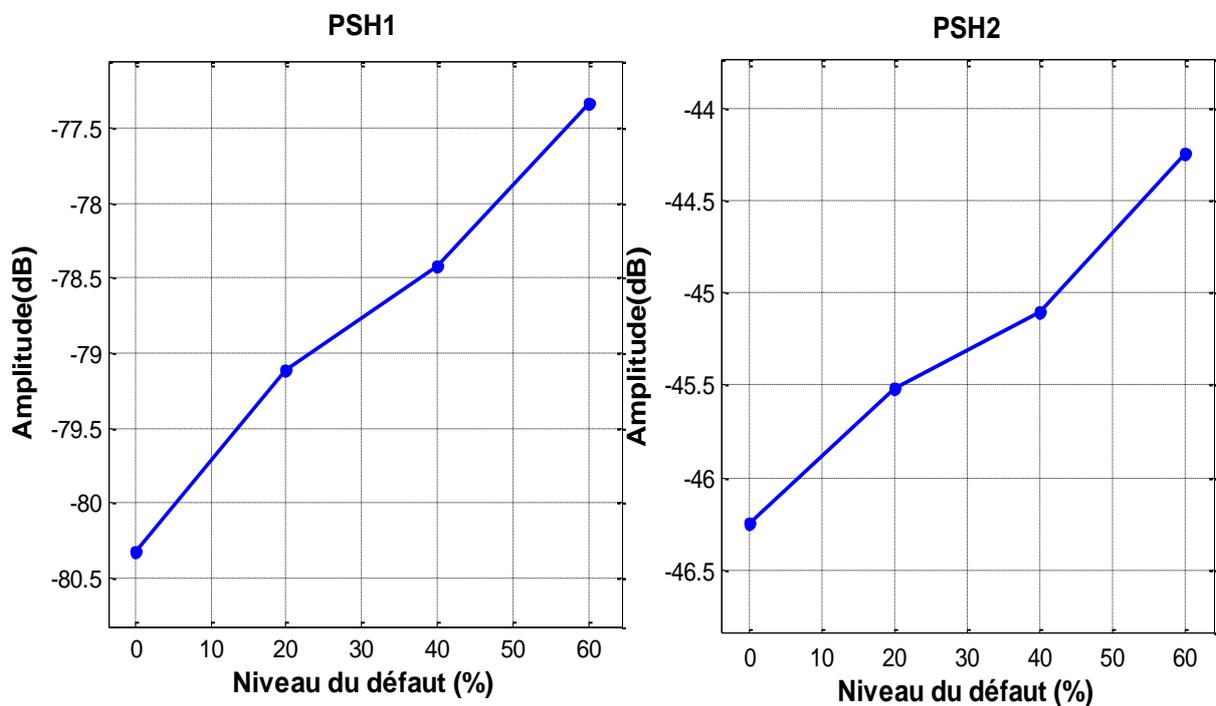


Figure (IV.5): Evolution des PSH en fonction du degré d'excentricité statique.

On compare les amplitudes de PSH avec l'état sain et défectueux, on remarque une augmentation à l'état de défaut par rapport au cas sain de la machine cette augmentation indique la présence de défaut.

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

IV. 4.EXCENTRICITE MIXTE :

Les Figures IV6, IV7 illustrent les grandeurs électromagnétiques du moteur chargé de 40Nm ($g = 0.0251$) et présentant une excentricité mixte évaluée à 50% statique et 30% dynamique

La figure IV.6-a- correspondant à la vitesse de rotation, montre le changement qui survient dans le régime transitoire si une excentricité mixte est introduite. Le temps d'établissement du régime permanent est sensiblement plus important. Dans la figure IV.1-b, il est bien évident que la vitesse oscille autour d'un intervalle plus grand que celui correspondant à un cas d'excentricité purement statique ou purement dynamique. Autrement dit, les fluctuations de vitesse sont plus importantes.

La figure IV.7 représenté le courant statorique, en régime permanent.

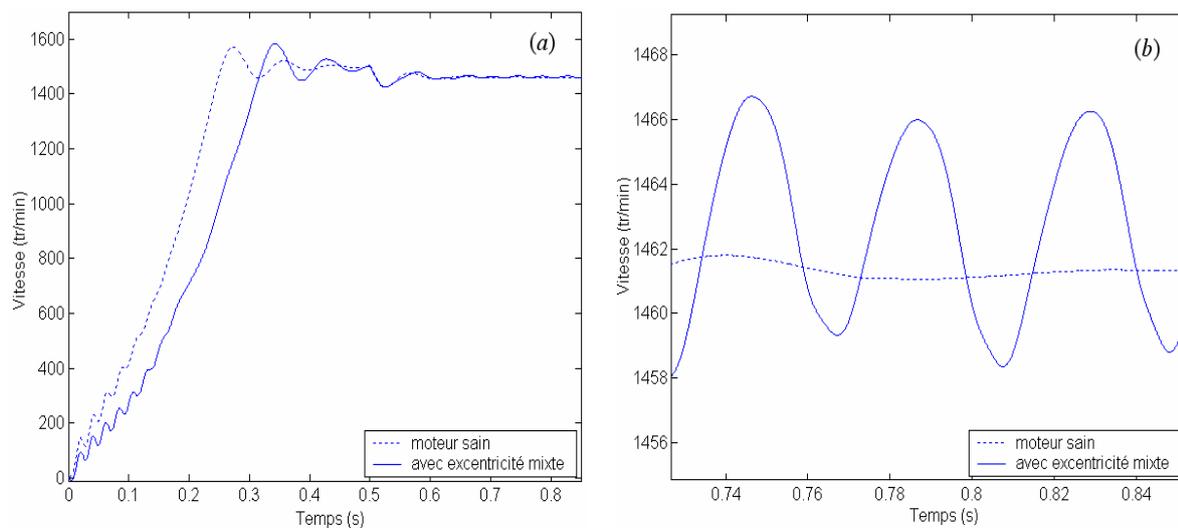


Figure (IV.6): Vitesse de rotation (a) au démarrage, (b) en régime permanent, pour un fonctionnement avec degré d'excentricité statique $\delta s = 50\%$ et dynamique $\delta d = 30\%$,

$Cr=40Nm$.

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

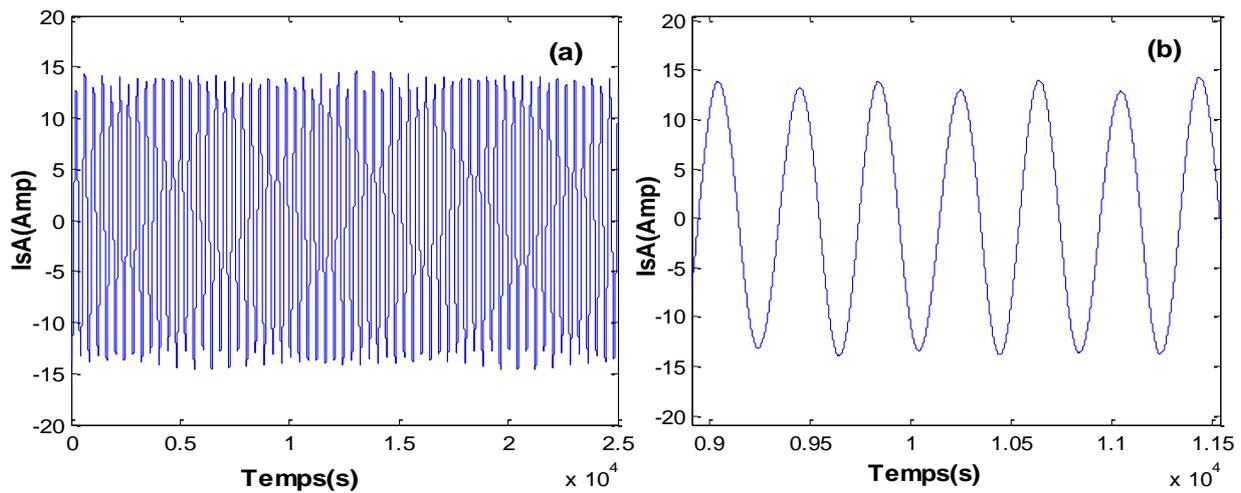


Figure (IV.7): Courant statorique (a) en régime permanent, (b) le zoom correspondant , pour un fonctionnement avec un degré d'excentricité statique $\delta_s = 50\%$ et dynamique $\delta_d = 30\%$,

$$C_r = 40 \text{ Nm}$$

Le spectre du courant statorique de la figure (IV.8) met en évidence les fréquences prédites par [91]. Dans la figure (IV.9) apparaissent les fréquences considérées comme caractéristiques du défaut d'excentricité mixte, et sont ceux obtenues en remplaçant par $k=1$ dans l'équation :

$$f_{mix} = |f_s \pm k f_r| \quad (\text{IV.10})$$

Ils ont pour valeurs :

$$f_{mix1}^- = |(1 - (1 - g)/p) \cdot f_s| = 25.63 \text{ Hz} \quad (\text{IV.11})$$

$$f_{mix2}^+ = |(1 - (1 - g)/p) \cdot f_s| = 74.37 \text{ Hz} \quad (\text{IV.12})$$

Il est bien clair que leurs modules sont significatifs par rapport aux autres harmoniques, et que ceux-ci sont une bonne indication de la sévérité du défaut.

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

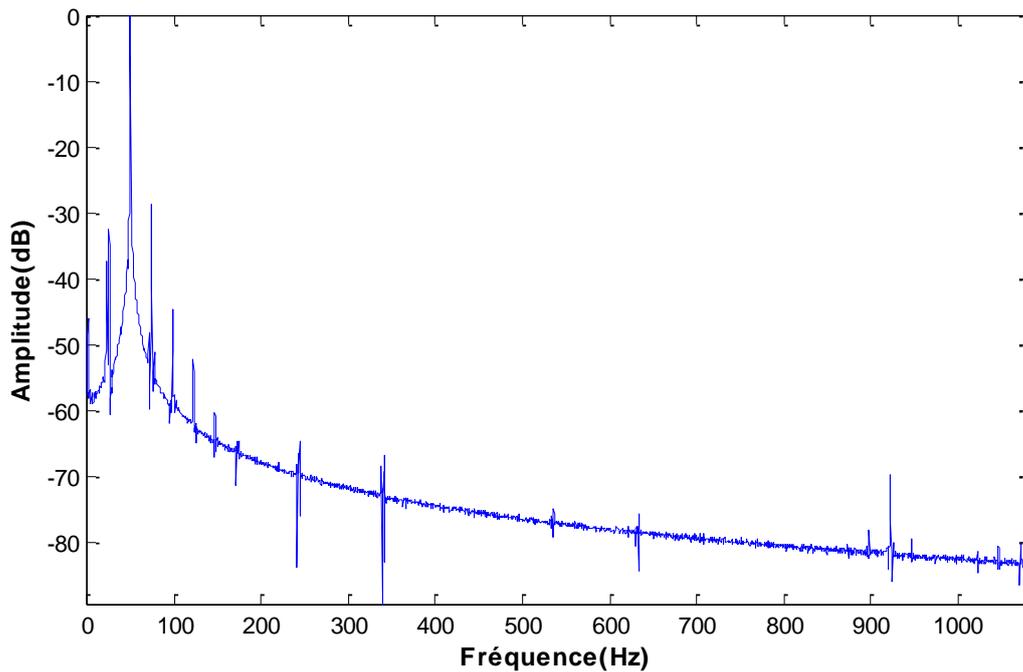


Figure (IV.8): Spectre du courant de la phase statorique A : $\delta d = 30\%$, $\delta s = 50\%$, $Cr=40Nm$

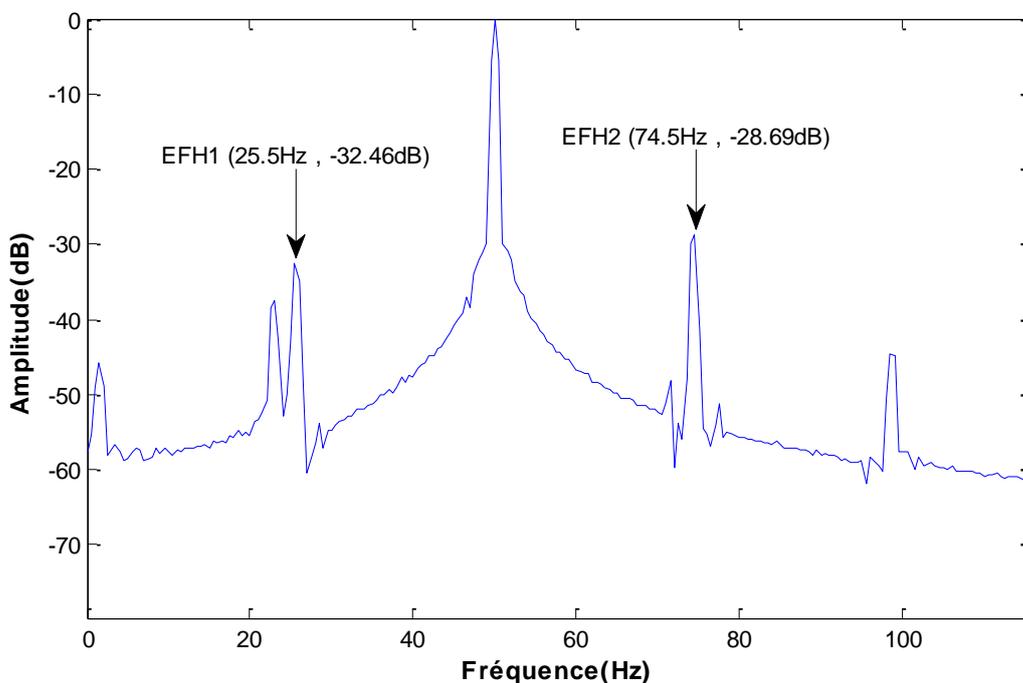


Figure (IV.9): Spectre basses fréquences du courant de la phase statorique A : $\delta d = 30\%$,
 $\delta s = 50\%$, $Cr=40Nm$

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

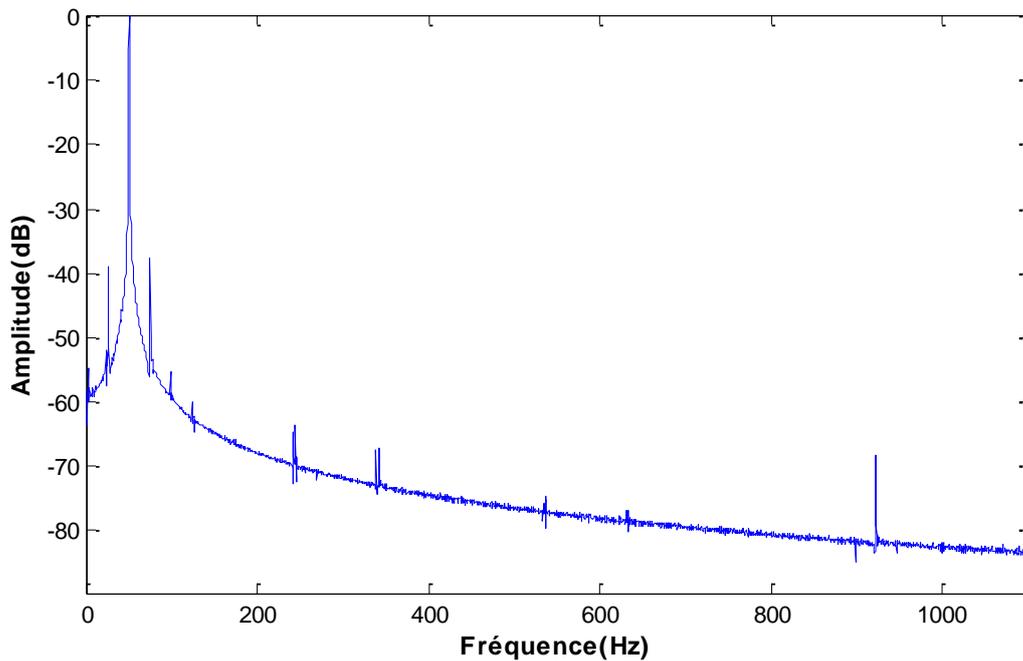


Figure (IV.10): Spectre du courant de la phase statorique A : $\delta d = 30\%$, $\delta s = 30\%$,
 $Cr=40Nm$.

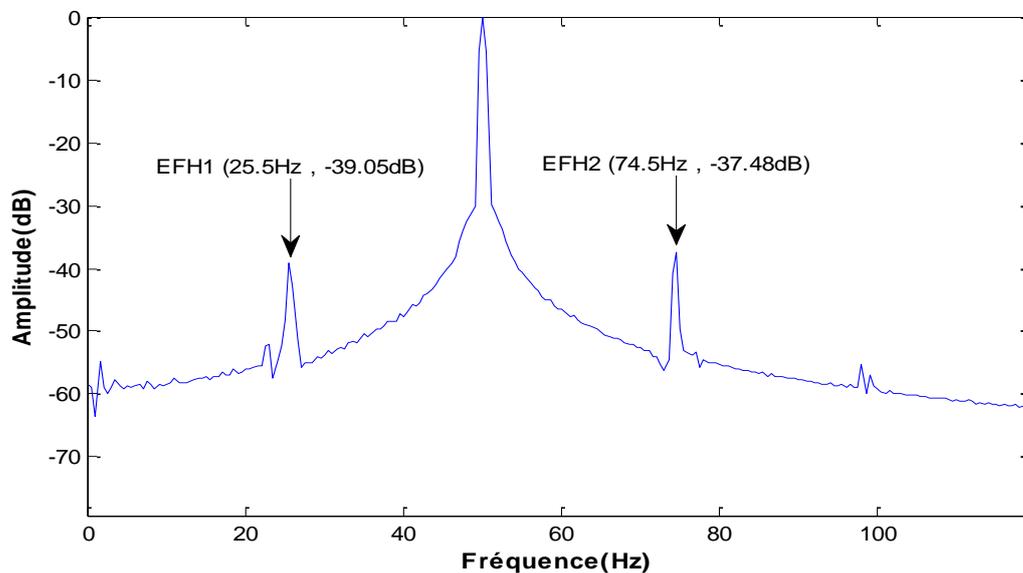


Figure (IV.11): Spectre basses fréquences du courant de la phase statorique A :
 $\delta d = 30\%$, $\delta s = 30\%$, $Cr=40Nm$

Les tableaux ci-dessous regroupe les modules des raies caractérisant le défaut pour différentes charges et degré d'excentricité.

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

La simulation du fonctionnement en faisant varier la charge et degré d'excentricité est le moyen qui nous permet d'inspecter la sensibilité de ces raies, et de prédire leurs lois de variation en fonction des deux plus importants paramètres : la charge et degré d'excentricité. A la base de ces résultats s'obtiennent les tracés des courbes relatives aux lois de variation correspondantes.

| Amplitude de EFH (dB) | | Degré d'excentricité (%) | | Charge(Nm) |
|-----------------------|--------|--------------------------|-----------|------------|
| EFH2 | EFH1 | statique | dynamique | |
| -28.69 | -32.46 | 50 | 30 | 40 |
| -37.48 | -39.05 | 30 | 30 | 40 |
| -41.12 | -42.27 | 20 | 30 | 40 |

Tableau (IV. 2): Amplitudes en dB des raies ($f_s \pm kfr$) en fonction de degré d'excentricité statique pour une excentricité dynamique de 30% ,avec une charge(40Nm).

| Amplitude de EFH (dB) | | Degré d'excentricité (%) | | Charge(Nm) |
|-----------------------|--------|--------------------------|-----------|------------|
| EFH2 | EFH1 | statique | dynamique | |
| -29.33 | -31.67 | 50 | 30 | 10 |
| -37.33 | -36.27 | 30 | 30 | 10 |
| -40.63 | -39.12 | 20 | 30 | 10 |

Tableau (IV. 3): Amplitudes en dB des raies ($f_s \pm kfr$) en fonction de degré d'excentricité statique pour une excentricité dynamique de 30% ,avec une charge(10Nm).

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

| Amplitude de EFH (dB) | | Degré d'excentricité (%) | | Charge(Nm) |
|-----------------------|--------|--------------------------|-----------|------------|
| EFH2 | EFH1 | statique | dynamique | |
| -28.87 | -32.49 | 50 | 30 | 30 |
| -38.93 | -38.59 | 30 | 30 | 30 |
| -43.63 | -42.18 | 20 | 30 | 30 |

Tableau (IV. 4): Amplitudes en dB des raies ($f_s \pm kfr$) en fonction de degré d'excentricité statique pour une excentricité dynamique de 30% ,avec une charge(30Nm).

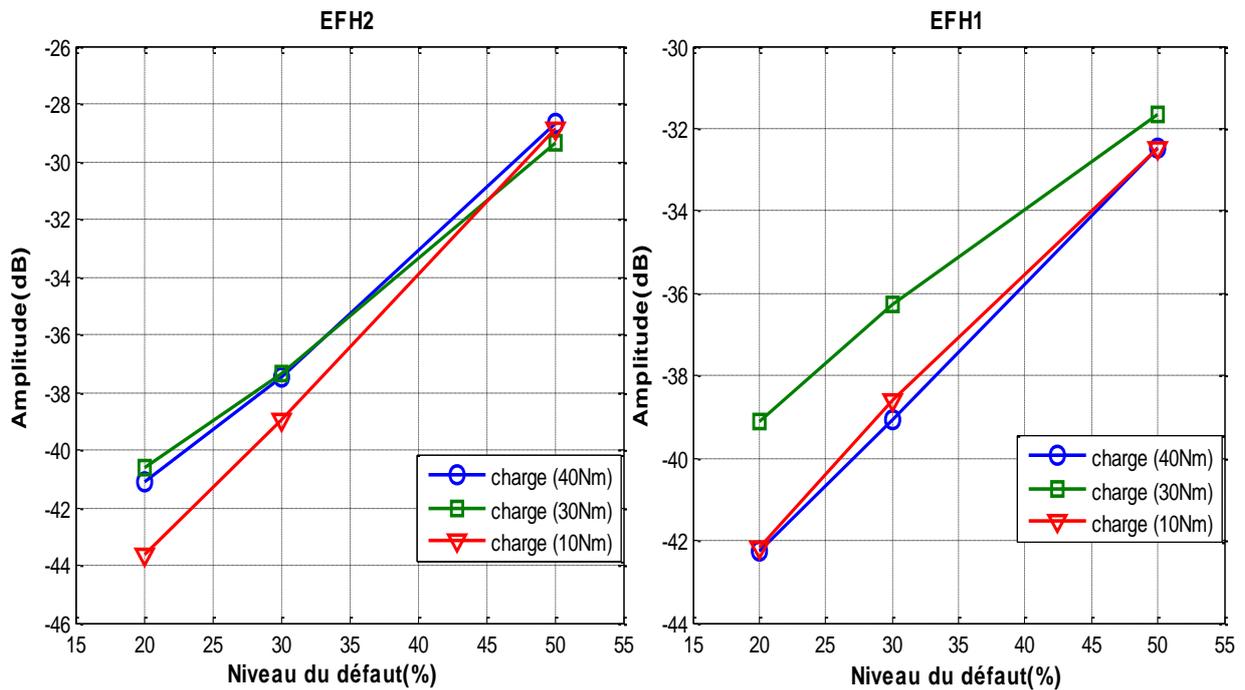


Figure (IV.12): Evolution des raies caractéristiques en fonction de la charge et du degré d'excentricité statique pour une excentricité dynamique de 30%

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

A partir des courbes de la figure (IV.12) on constate que les amplitudes des raies ($f_s + kfr$) évoluent avec l'évolution du degré d'excentricité.

On se permet de dire pour ce moteur que les amplitudes des raies caractéristiques du défaut tendent à augmenter avec l'augmentation de degré d'excentricité.

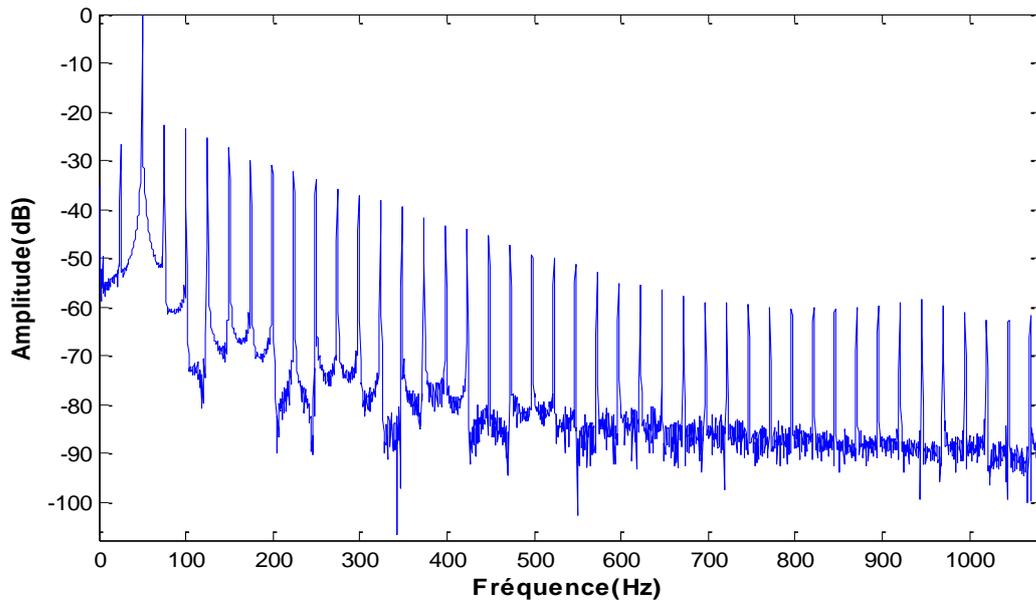


Figure (IV.13): Spectre du courant de la phase statorique A : $\delta d = 30\%$, $\delta s = 60\%$,
 $Cr=10Nm..$

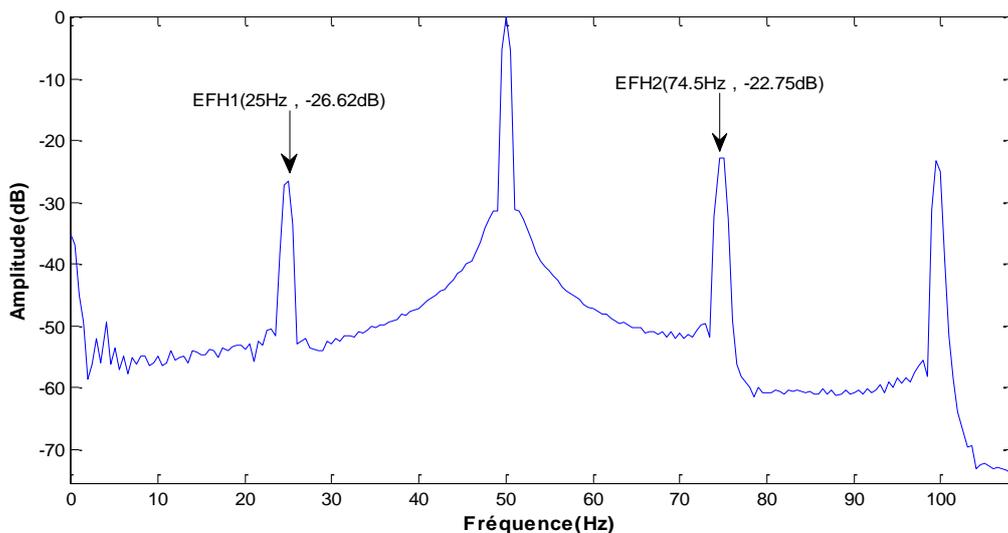


Figure (IV.14): Spectre basses fréquences du courant de la phase statorique A : $\delta d = 30\%$,
 $\delta s = 60\%$, $Cr=10Nm$

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

| Amplitude de EFH(dB) | | Degré d'excentricité (%) | | Charge(Nm) |
|----------------------|--------|--------------------------|-----------|------------|
| EFH2 | EFH1 | statique | dynamique | |
| -22.75 | -26.62 | 60 | 30 | 10 |
| -23.18 | -35.02 | 60 | 30 | 30 |
| -24.11 | -28.39 | 60 | 30 | 40 |

Tableau (IV. 5): Amplitudes en dB des raies ($f_s \pm kfr$) en fonction de la charge avec degré d'excentricité statique(60%) et excentricité dynamique de(30%)

| Amplitude de EFH(dB) | | Degré d'excentricité (%) | | Charge(Nm) |
|----------------------|--------|--------------------------|-----------|------------|
| EFH2 | EFH1 | statique | dynamique | |
| -37.33 | -36.27 | 30 | 30 | 10 |
| -38.93 | -38.59 | 30 | 30 | 30 |
| -39.48 | -39.05 | 30 | 30 | 40 |

Tableau (IV. 6): Amplitudes en dB des raies ($f_s \pm kfr$) en fonction de la charge avec degré d'excentricité statique(30%) et excentricité dynamique de(30%)

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

| Amplitude de EFH (dB) | | Degré d'excentricité (%) | | Charge(Nm) |
|-----------------------|--------|--------------------------|-----------|------------|
| EFH2 | EFH1 | statique | dynamique | |
| -45.18 | -44.09 | 10 | 30 | 10 |
| -48.69 | -47.3 | 10 | 30 | 30 |
| -49.76 | -46.75 | 10 | 30 | 40 |

Tableau (IV. 7): Amplitudes en dB des raies ($f_s \pm kfr$) en fonction de la charge avec degré d'excentricité statique(10%) et excentricité dynamique de(30%)

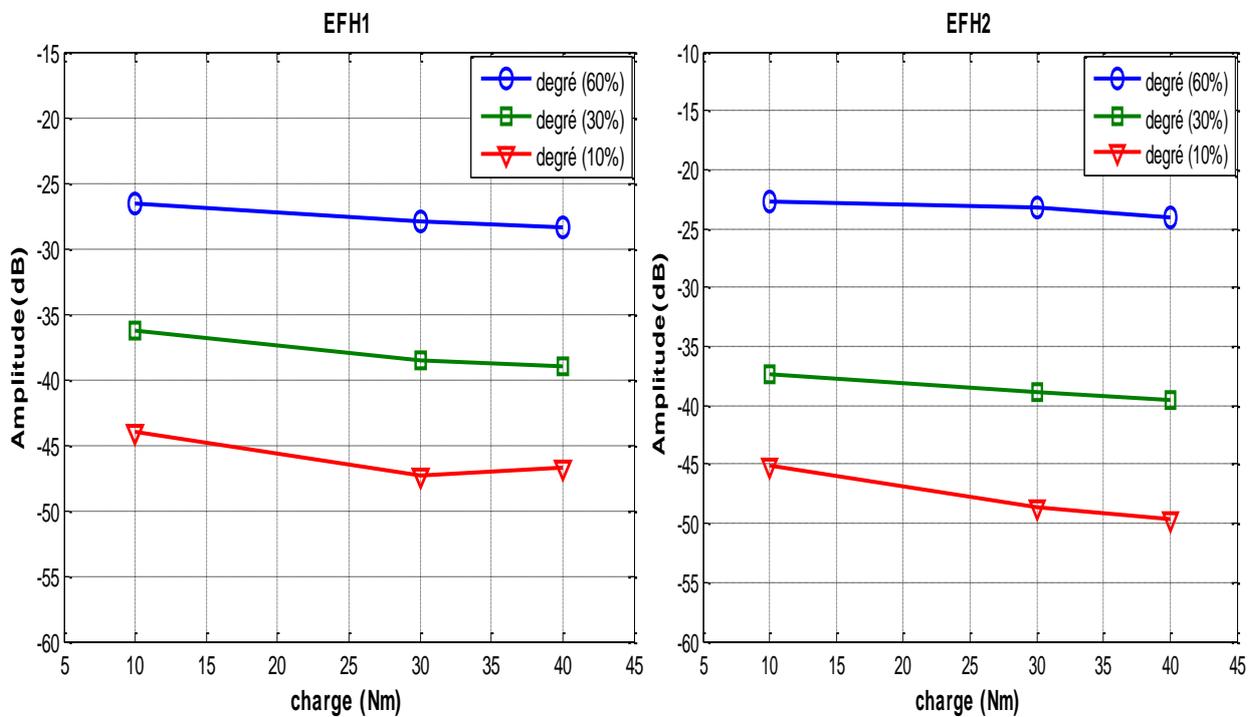


Figure (IV.15): Evolution des raies caractéristiques en fonction de la charge et du degré d'excentricité statique pour une excentricité dynamique de 30%

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

D'après la figure (IV.15), on voit que les amplitudes des composantes fréquentielles ($f_s \pm kf_r$) diminué avec l'augmentation de la charge et avec la diminution de degré d'excentricité, elle est inversement proportionnelle à la charge.

IV.5. analyse du courant statorique par la technique des ondelettes :

La transformée en Ondelette (Wavelet) est une technique avancée, utilisée pour améliorer l'analyse du signal du courant statorique et de permettre la détection d'une manière précoce les défauts d'une machine asynchrone en régime stationnaire et variable.

Dans ce partie en applique la transformée en ondelettes discret (TOD) aux signaux du courant statorique. L'extraction des informations des signaux nécessite des choix judicieux pour certains paramètres tels que, la fréquence d'échantillonnage des signaux expérimentaux, le type de l'ondelette, l'ordre de l'ondelette et le niveau de décomposition. Le choix de l'ondelette mère type "Daubechies".

Le type d'ondelette discret sont utilisée : décomposition multi niveaux.

IV.5.1 Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelette :

La décomposition en multi niveau du courant statorique est réalisée à l'aide de l'ondelette mère Daubechies44 (db44), le niveau de décomposition nécessaire est calculé d'après la relation:

$$N_{ls} = \text{int} \left(\frac{\log\left(\frac{f_e}{f_s}\right)}{\log(2)} \right) + 2 \quad (\text{IV.13})$$

Avec f_s : fréquence du réseau, f_e : fréquence d'échantillonnage.

Connaissant $f_s = 50\text{Hz}$ et $f_e = 20\text{kHz}$, on peut calculer le nombre de décompositions appropriés qu'est égales à :

$$N_{ls} = \text{int} \left(\frac{\log\left(\frac{2 \cdot 10^4}{50}\right)}{\log(2)} \right) + 2 = 10 \text{ niveaux} \quad (\text{IV.14})$$

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

Le tableau (IV.8) indique les différentes bandes de fréquence obtenues par la décomposition en ondelettes multi niveau.

| Niveau | Bandes de fréquences Approximation | | Bandes de fréquences Détail | |
|--------|------------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------------|
| J=1 | A1 | 0-5000 | D1 | 5000-10000 |
| J=2 | A2 | 0-2500 | D2 | 2500-5000 |
| J=3 | A3 | 0-1250 | D3 | 1250-2500 |
| J=4 | A4 | 0-625 | D4 <td 625-1250 | |
| J=5 | A5 | 0-312.5 | D5 | 312.5-625 |
| J=6 | A6 | 0-156.25 | D6 | 156.25-312.5 |
| J=7 | A7 | 0-78.125 | D7 | 78.125-156.25 |
| J=8 | A8 | 0-39.0625 | D8 | 39.062-78.125 |
| J=9 | A9 | 0-19.531 | D9 | 19.53 - 39.0625 |
| J=10 | A10 | 0-9.765 | D10 | 9.765-19.531 |

Tableau (IV. 8): Bandes de fréquences obtenues par la décomposition en multi niveau.

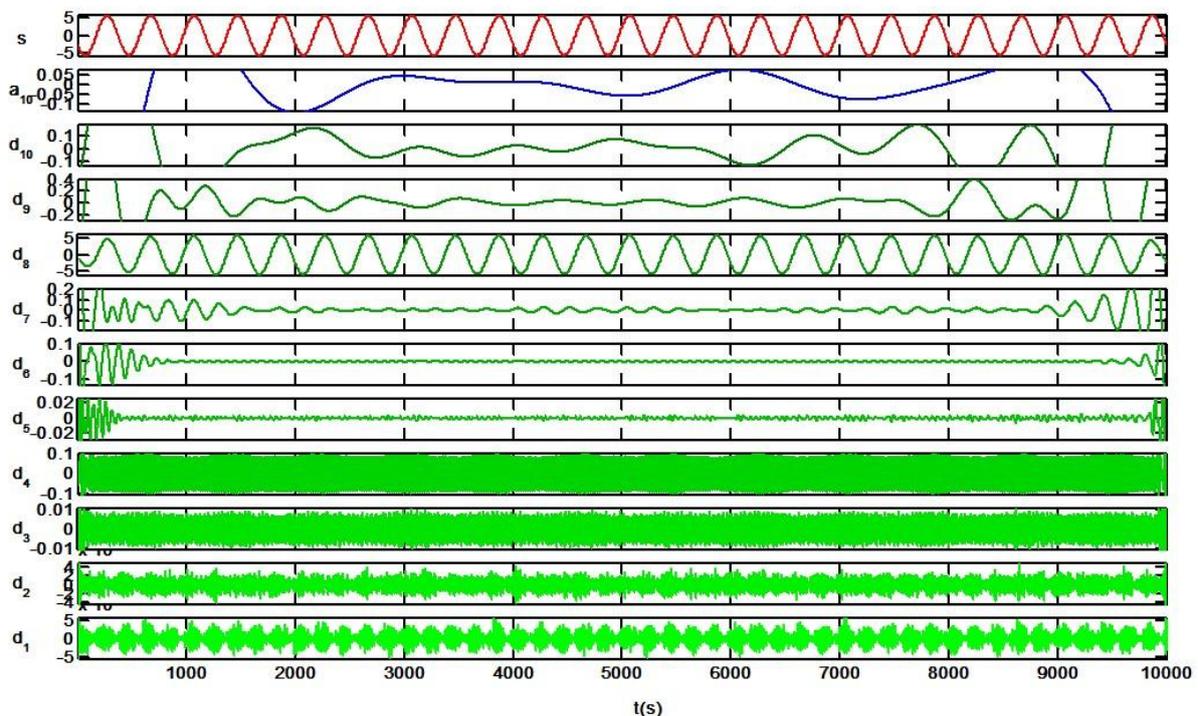


Figure (IV.16): Analyse par TOD type multi niveau de la phase ias avec défaut d'excentricité mixte (statique 20% et dynamique 30% avec une charge 10Nm)

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

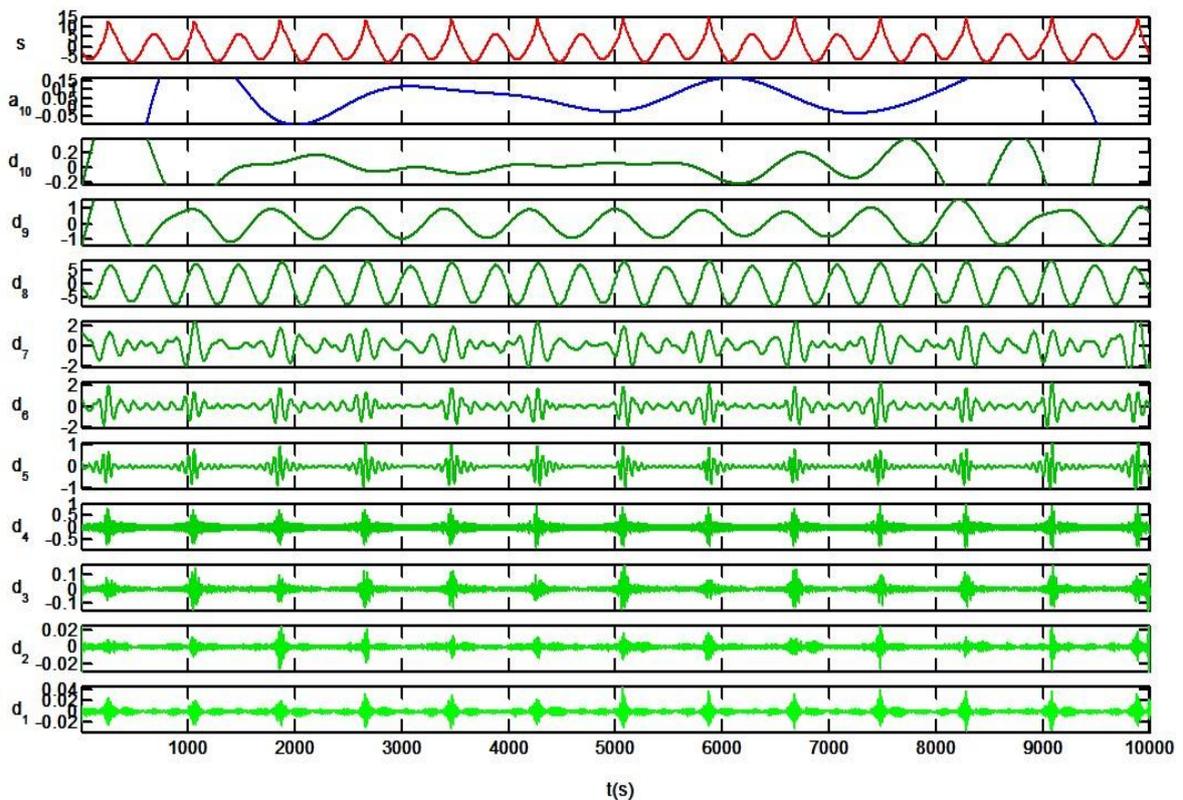


Figure (IV.17): Analyse par TOD type multi niveau de la phase ias pour défaut d'excentricité mixte (statique 60% et dynamique 30% avec une charge 10Nm)

Les figures (IV.16), (IV.17) représentent les signaux de détail et d'approximation (d_1 , d_2 , d_3 , d_4 , d_5 , d_6 , d_7 , d_8 , d_9 , d_{10} et a_{10}) obtenus par la décomposition en multi niveau courant statorique I_{sa} pour un fonctionnement (en charge) et avec défaut d'excentricité mixte. Dans tous les cas, l'application de l'ondelette s'effectue en régime stationnaire.

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

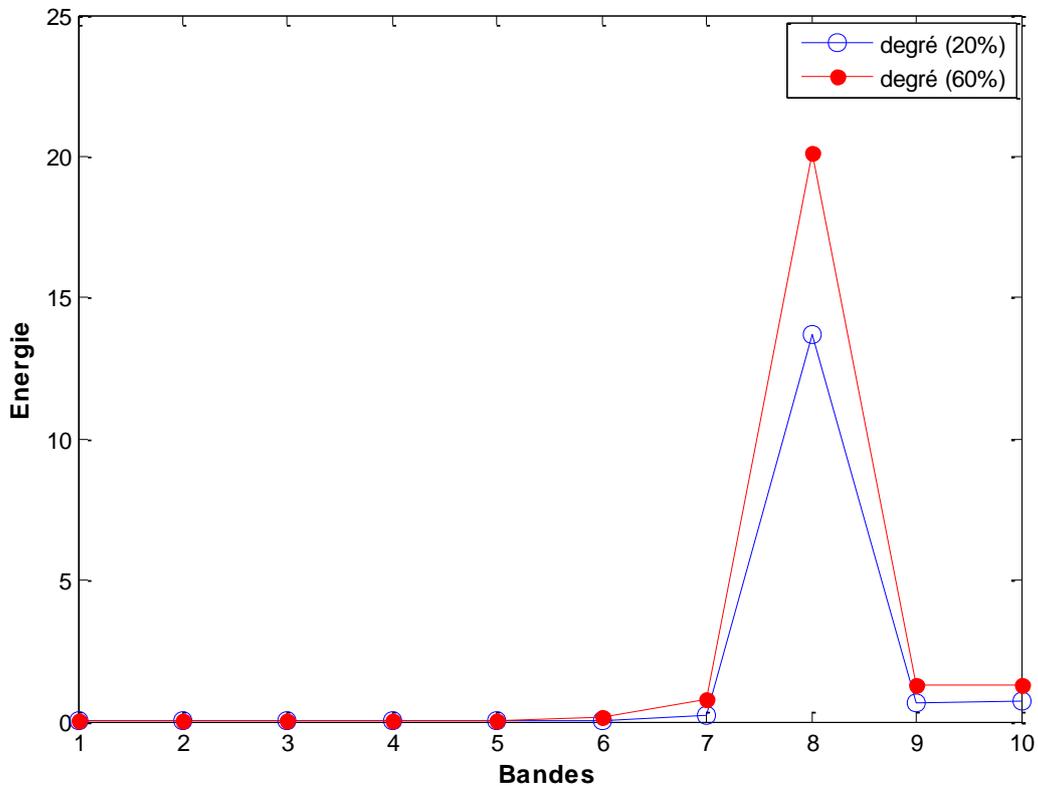


Figure (IV.18): Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db44) pour différent degré d'excentricité mixte avec une seule charge (10Nm)

La figure (IV.18) montre la variation d'énergie associée à chaque niveau de décomposition de l'ondelette multi niveau dans le cas de la machine avec différent degré des défauts d'excentricité mixte.

Le calcul de l'énergie emmagasinée dans chaque niveau de décomposition confirme l'augmentation observée dans les signaux de détail et d'approximation et surtout dans le niveau8.

On voit clairement l'effet de défaut d'excentricité sur l'énergie emmagasinée dans le niveau8, cette augmentation diffère selon les niveaux de défaut (excentricité statique 20%,60%), et (dynamique 30%).

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

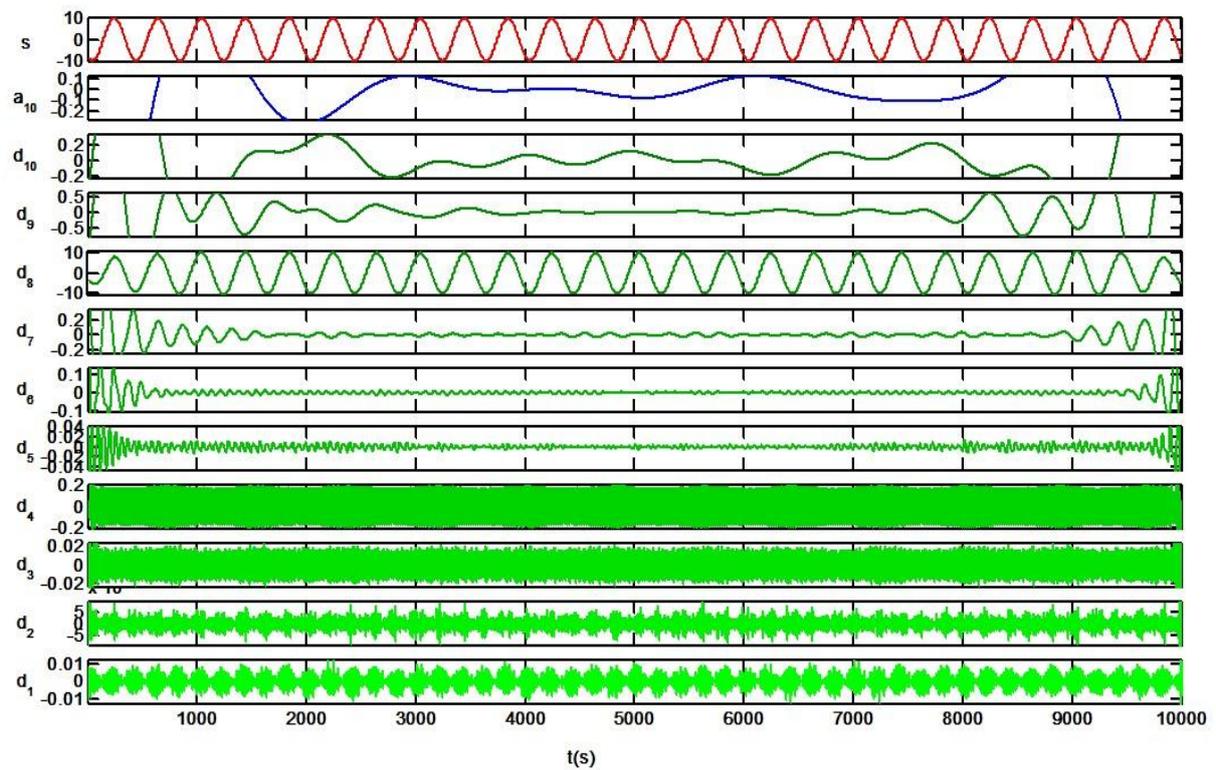


Figure (IV.19): Analyse par TOD type multi niveau de la phase ias pour défaut d'excentricité mixte (statique 20% et dynamique 30% avec une charge 30Nm)

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

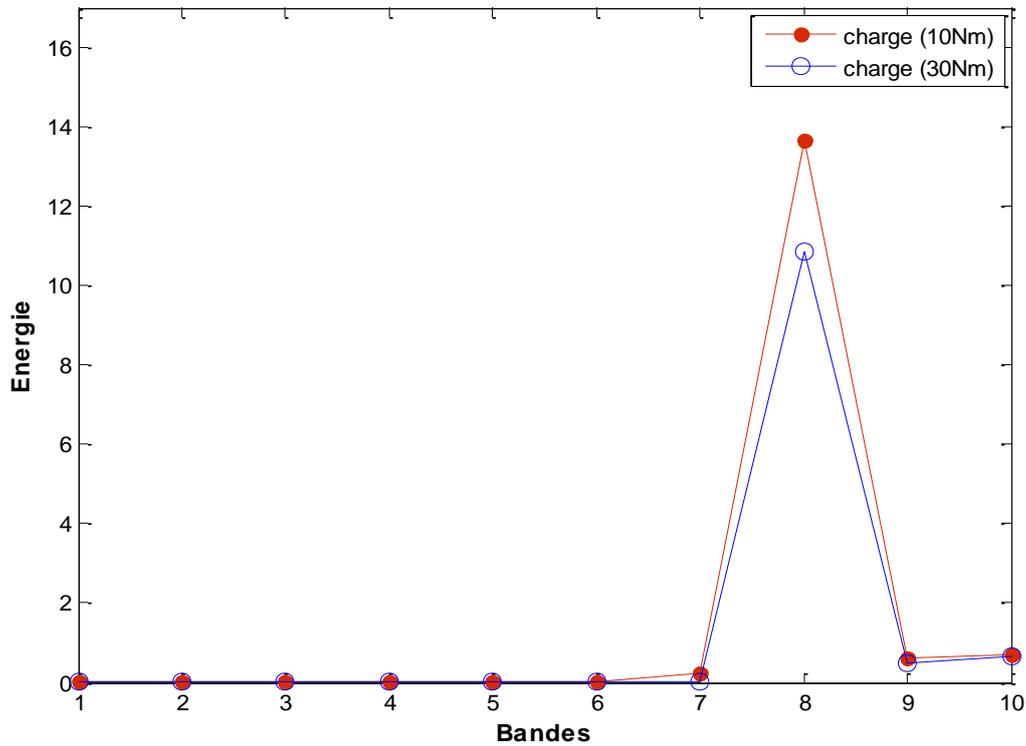


Figure (IV.20): Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db44) pour différent charge et avec un seul degré de défaut d'excentricité mixte (statique 20%, dynamique 60%)

La figure (IV.20) montre la variation d'énergie associée à chaque niveau de décomposition de l'ondelette multi niveau dans le cas de la machine avec différent charge et un seul degré de défaut d'excentricité mixte.

Le calcul de l'énergie emmagasinée dans chaque niveau de décomposition confirme la diminution observée dans les signaux de détail et d'approximation et surtout dans le niveau8.

On voit clairement l'effet de la charge sur l'énergie emmagasinée dans le niveau8, cette diminution diffère selon les niveaux de la charge (10Nm, 30Nm).

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

IV.6. ANALYSE DU DEFAUT D'EXCENTRICITE ROTORIQUE :(RESULTATS EXPERIMENTAUX)

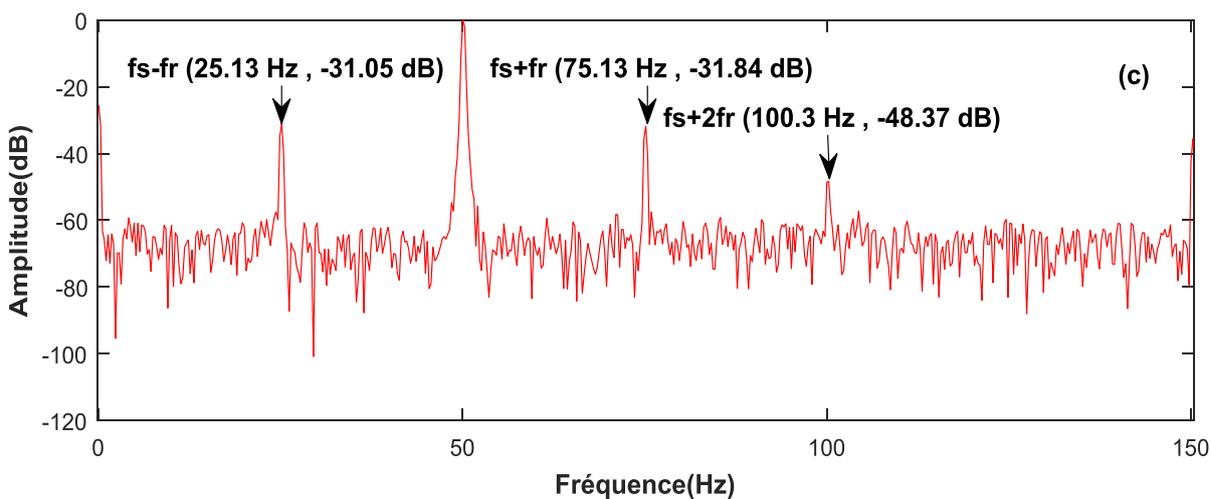
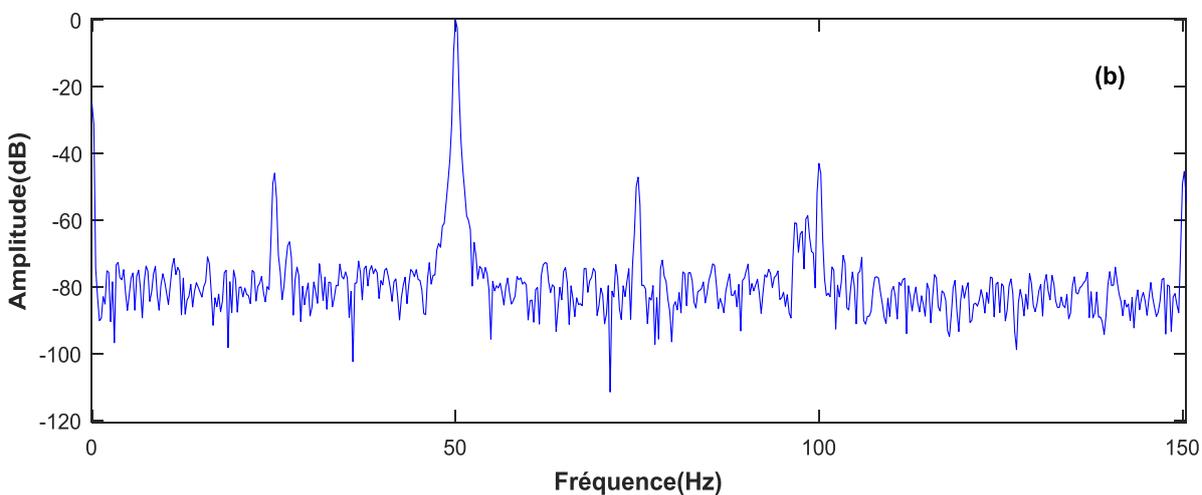
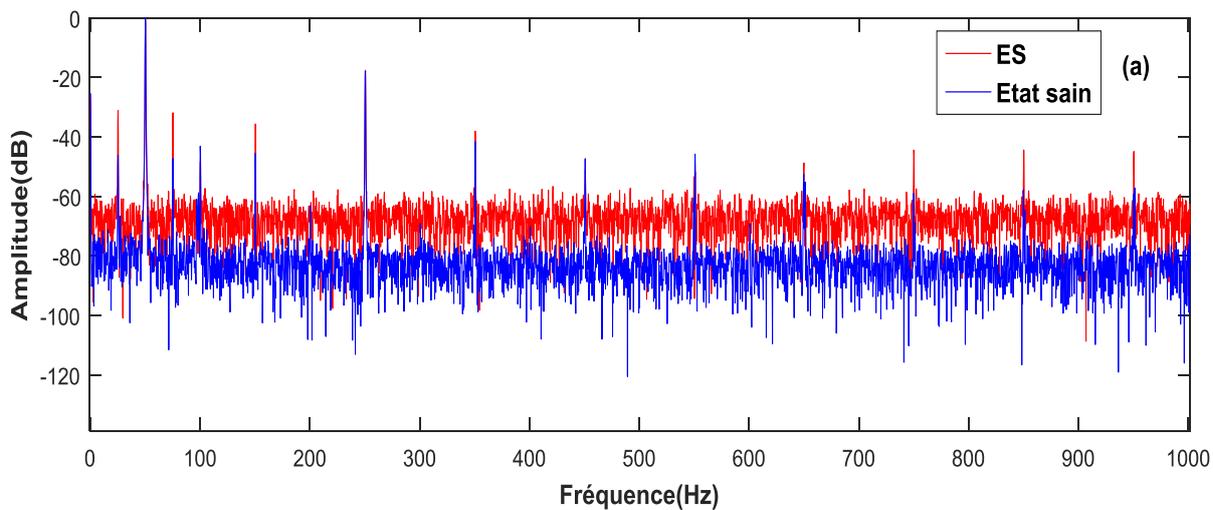
Les machines électriques peuvent être soumises à un décentrement du rotor. La présence d'un certain degré d'excentricité est normale dans les machines électriques. Les fabricants et utilisateurs spécifient un degré naturel maximum de 5%, tandis que dans d'autres cas, un pourcentage maximum de 10% est acceptable. Cependant, un degré d'excentricité très faible réduit les vibrations et le bruit, et minimise les forces radiales résultantes que peuvent créer un frottement entre stator-rotor qui peut endommager la machine. Généralement, l'entrefer d'une machine asynchrone est plus petit que dans d'autres types de machines ayant les mêmes grandeurs et performances, la machine asynchrone est la plus sensible aux excentricités [92].

Notre étude, dans cette partie, consiste à détecter le défaut d'excentricité rotorique en se basant sur la méthode de MCSA-FFT. Comme nous l'avons déjà vu ; l'analyse spectrale du courant joue un rôle important pour la détection du défaut de la cassure de barres. Nous allons étudier soigneusement le défaut d'excentricité statique (ES) et dynamique (ED).

IV.6.1. Analyse spectrale du courant statorique avec excentricité statique :

L'analyse spectrale est utilisée pour détecter des défauts dans les MAS, essentiellement ici, l'excentricité statique. Ce cas se prête bien à l'approche dans la mesure du courant qui se peut se traduire par l'apparition de fréquences additionnelles. La surveillance par analyse spectrale du courant de la machine asynchrone consiste donc à effectuer une transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences supplémentaires constituant la signature d'un défaut dans la machine. Pour cette configuration du défaut d'ES, nous avons la possibilité de faire une analyse du spectre de courant statorique pour les deux fonctionnements de la machines : à vide ($g \approx 0.4\%$) et en charge (15Nm), ($g \approx 3.2\%$).

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone



Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

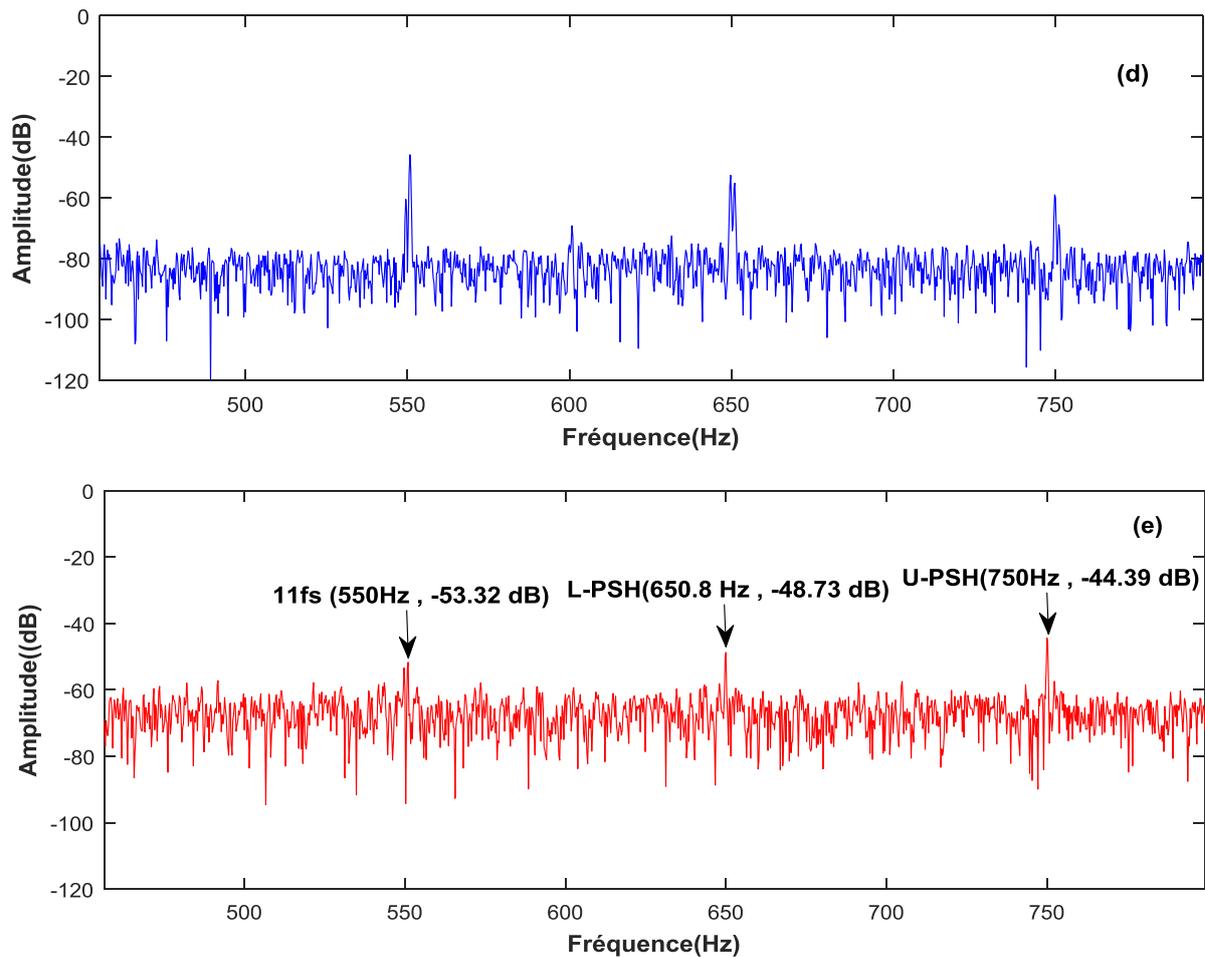
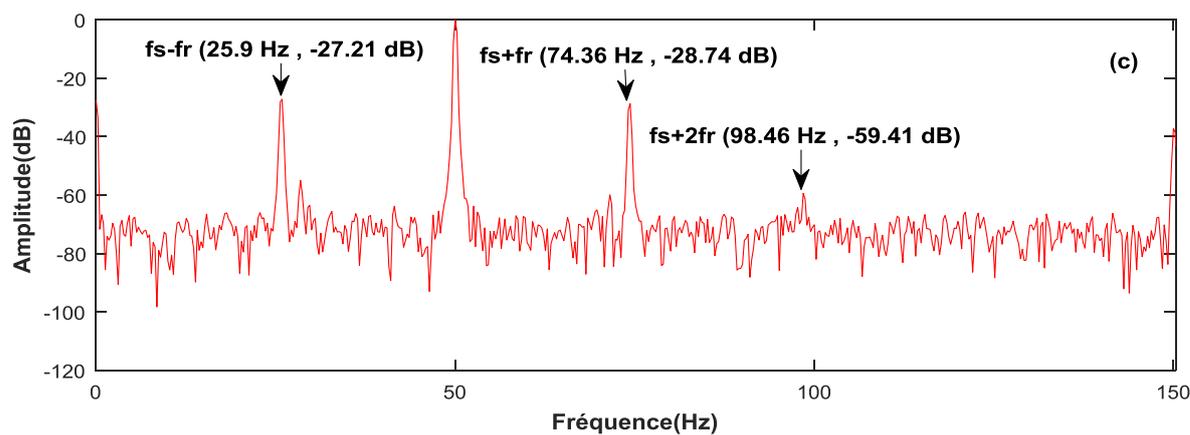
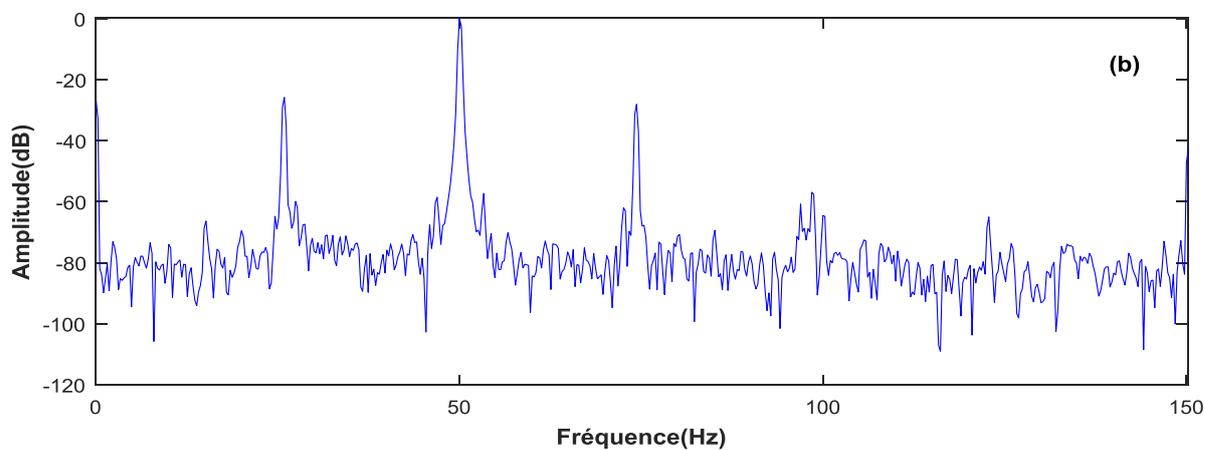
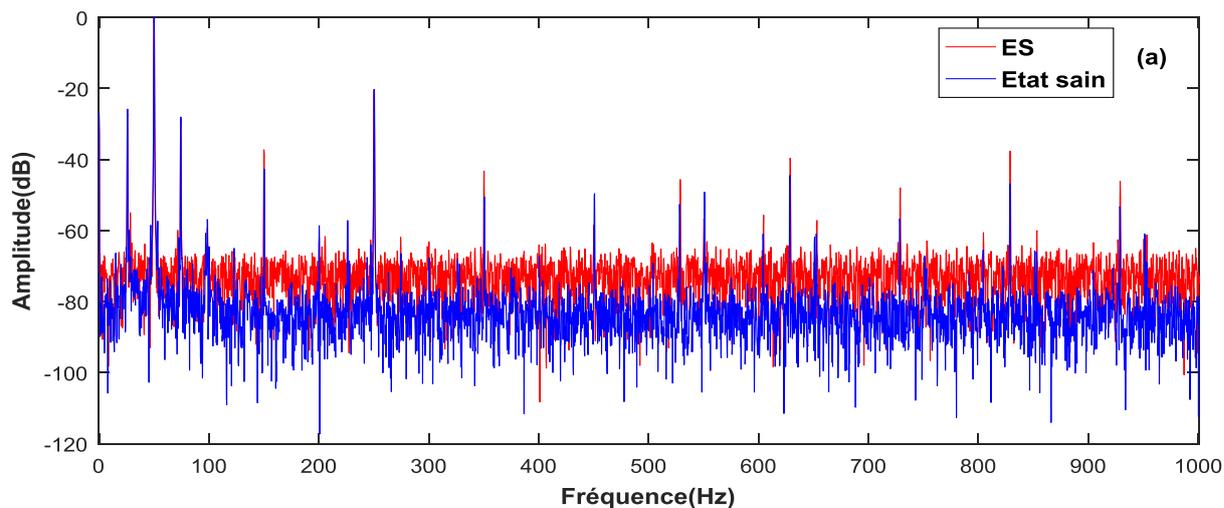


Figure (IV.21): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($g=0.004$, à vide); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour des PSHs.

On applique maintenant à la machine asynchrone un couple résistant de (15Nm), ($g=3.2\%$) ; l'objectif est d'étudier le comportement de la machine quand le glissement est différent de zéro. La figure (IV-22) montre le spectre du courant statorique pour une charge de (15Nm). Les fréquences dues à l'excentricité mixte apparaissent systématiquement et logiquement par la série des fréquences $f_s \pm f_r$. Cela peut s'expliquer, en effet, par l'existence d'un faible déséquilibre, dû à la fabrication du rotor. Les PSHs ont les valeurs 628.7Hz et 729Hz, avec des amplitudes un peu supérieures comparant avec l'état sain de la machine.

Le suivi d'amplitude des raies d'harmoniques est considéré comme un indicateur du défaut.

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone



Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

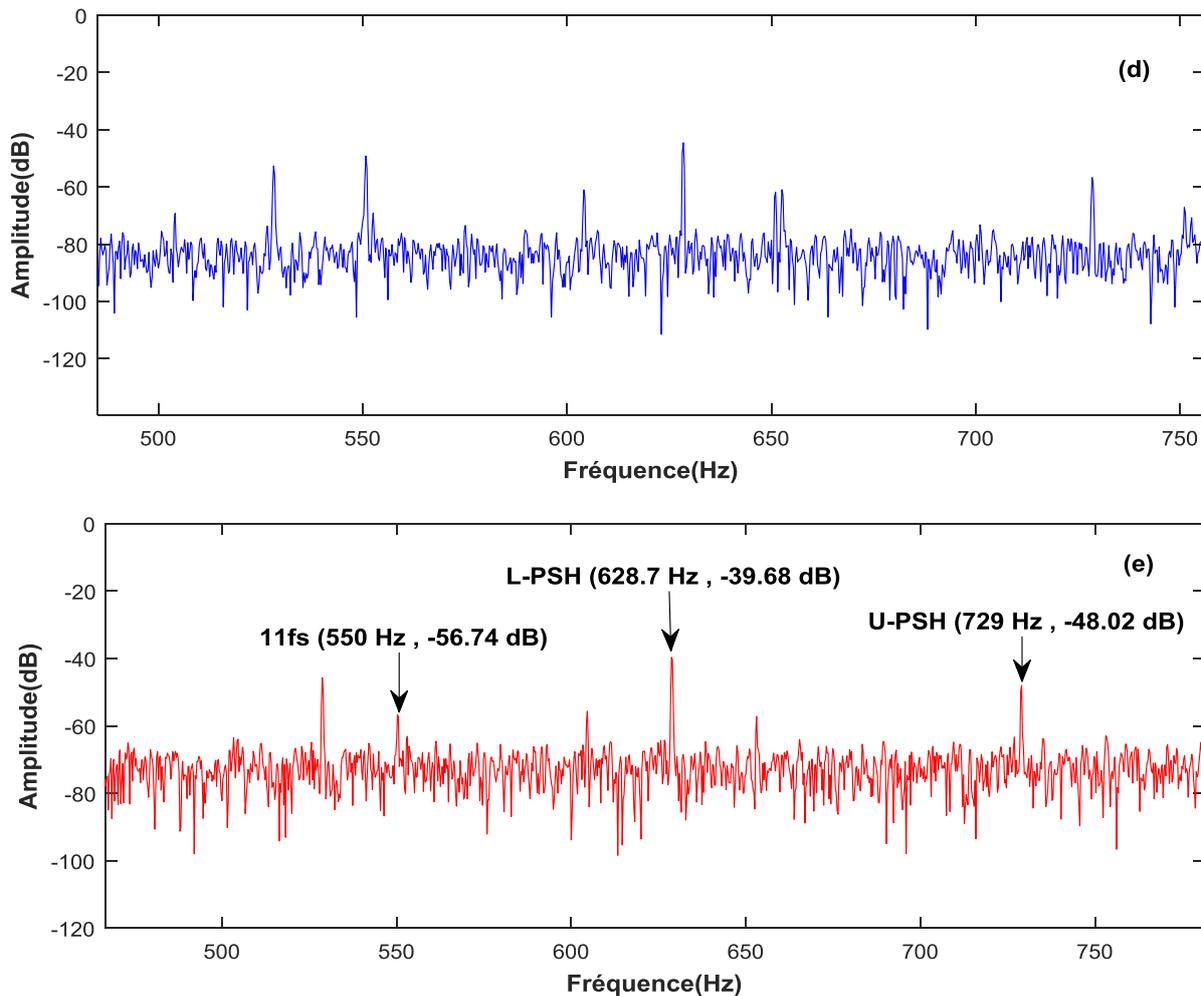


Figure (IV.22): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($g=0.032$); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour des PSHs.

Dans le cas d'une excentricité du rotor, nous notons l'apparition de nouvelles composantes des harmoniques, au contenu spectral du courant statorique qui caractérisent ce défaut.

Les deux types de défauts se conjuguent souvent en même temps ; nous l'appelons donc, l'excentricité mixte. Le contenu spectral du courant statorique a des harmoniques additionnels causés par l'excentricité mixte.

Dans cette partie, nous avons présenté les différents essais expérimentaux (à vide et en charge) d'excentricité statique. Le courant statorique nous a permis de vérifier (d'après son spectre) les harmoniques des défauts.

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

On a fait un calcul concernant le défaut d'excentricité statique et en les comparant avec les résultats obtenus :

Pour $k=1$, $n_{ws}=1$ et $g=0.004$:

$$f_{es} = \left[\frac{kn_b}{p} (1 - g) + n_{ws} \right] \cdot f_s = 747.2 \text{ Hz} \quad (\text{IV.15})$$

$$f_{es} = \left[\frac{kn_b}{p} (1 - g) - n_{ws} \right] \cdot f_s = 647.2 \text{ Hz} \quad (\text{IV.16})$$

De même, nous avons vérifié les fréquences supplémentaires dans le cas où la machine asynchrone fonctionne avec une charge de (15Nm) ; les fréquences caractéristiques sont:

Pour $k=1$, $n_{ws}=1$ et $g=0.032$:

$$f_{es} = \left[\frac{kn_b}{p} (1 - g) + n_{ws} \right] \cdot f_s = 727.6 \text{ Hz} \quad (\text{IV.17})$$

$$f_{es} = \left[\frac{kn_b}{p} (1 - g) - n_{ws} \right] \cdot f_s = 627.6 \text{ Hz} \quad (\text{IV.18})$$

Nous avons remarqué dans cette étude une bonne correspondance des résultats expérimentaux avec la vérification théorique.

Le tableau (II.9) résume quelques valeurs des harmoniques et les évolutions de leurs amplitudes pour une excentricité statique.

| Formules des harmoniques (g=0.032) | Valeurs théoriques (Hz) | Valeurs expérimentales (Hz) | Amplitude (dB) ($\delta s=0\%$) | Amplitude (dB) ($\delta s=45\%$) |
|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| fs – fr | 25.8 | 25.9 | -25.9 | -27.21 |
| fs +fr | 74.2 | 74.34 | -28.06 | -28.74 |
| L-PSH | 627.6 | 628.7 | -44.55 | -39.68 |
| U-PSH | 727.6 | 729 | -56.72 | -48.02 |

Tableau (IV. 9): Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta s=45\%$).

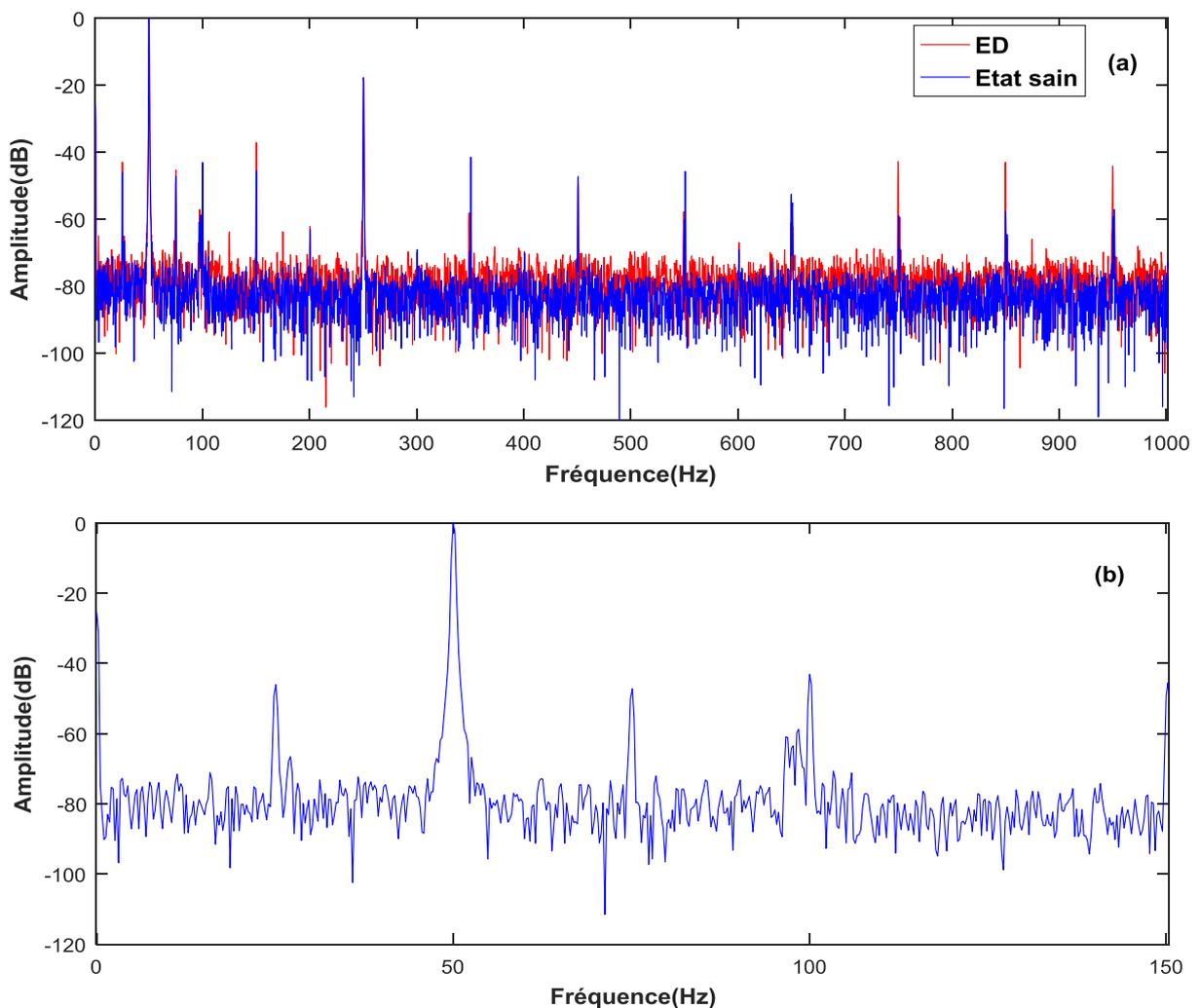
Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

IV.6.2. Analyse spectrale du courant statorique avec excentricité dynamique :

Dans cette partie, l'analyse de la machine asynchrone triphasée est réalisée avec la présence d'un défaut d'excentricité purement dynamique.

La technique de la MCSA-FFT a pour objectif de déceler les signatures qui indiquent l'existence du défaut d'ES seule ou d'ED seule pour notre moteur asynchrone. La figure (IV.23) illustre le spectre du courant statorique pour un moteur asynchrone sain et un autre avec un défaut d'ED sous un fonctionnement à vide ($s \approx 0.4\%$).

Les fréquences proches de la fréquence fondamentale, sont dues à l'excentricité mixte. Ces harmoniques ont l'avantage qui n'oblige pas à une connaissance précise de la machine asynchrone puisqu'ils ne possèdent pas des termes liés à sa conception.



Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

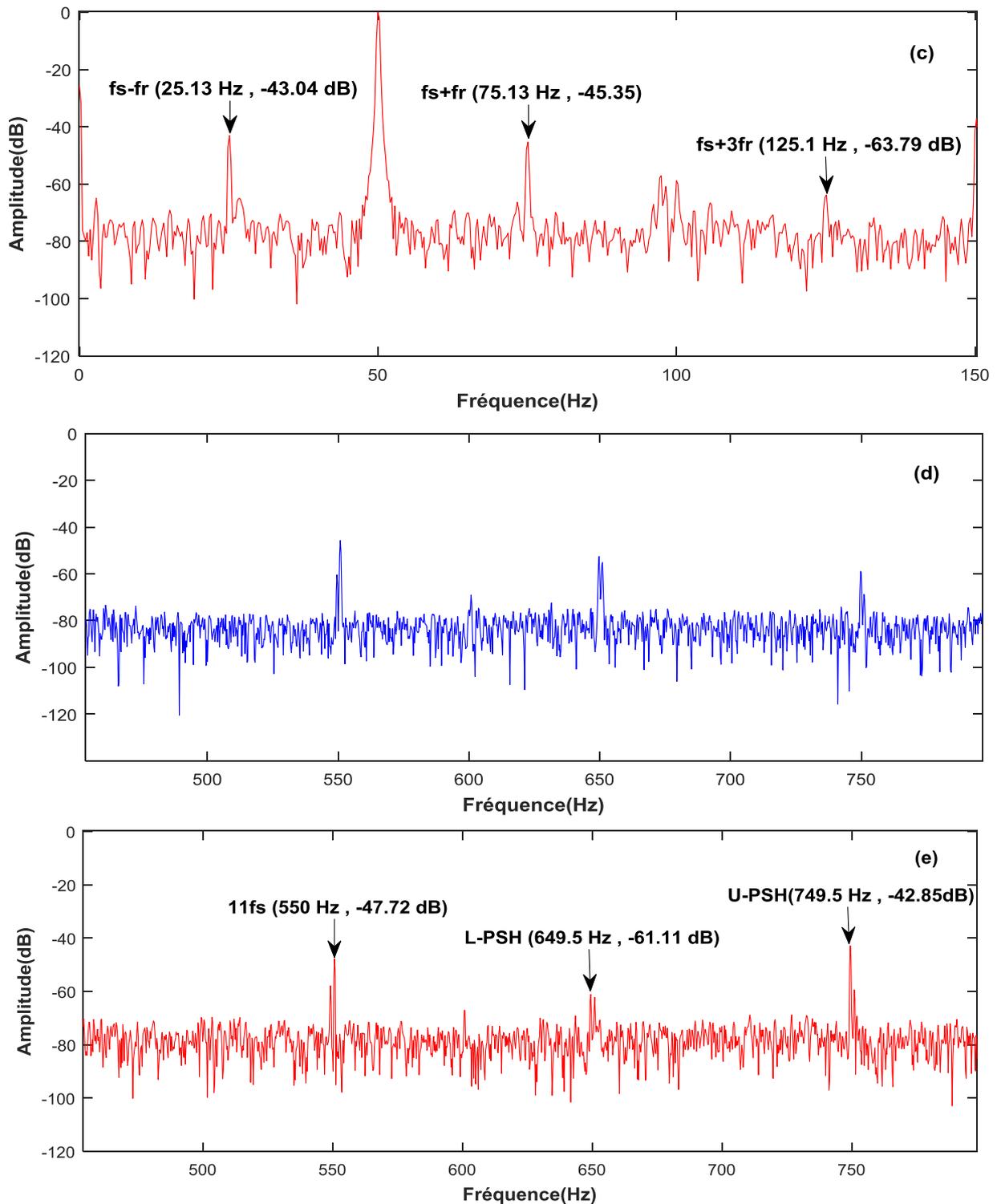


Figure (IV.23): Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique $\delta d=30\%$ ($g=0.004$); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour des PSHs.

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

La vérification ou la détection d'une information du défaut doit être extraite du spectre pour les deux cas de la machine (sans et avec défaut).

Le spectre du courant statorique sous un fonctionnement à vide ($s= 0.004$) contient toujours les fréquences dues à l'excentricité mixte.

Les valeurs des fréquences caractéristiques sont vérifiées comme suit:

Pour $g=0.004$, $k=1$, $nd=1$ and $n_{ws}=1$:

$$f_{ed} = \left[(kn_b + n_d) \frac{(1-g)}{p} + n_{ws} \right] \cdot f_s = f_{ed}(++) = 772.1\text{Hz} \quad (\text{IV.19})$$

$$f_{ed} = \left[(kn_b - n_d) \frac{(1-g)}{p} + n_{ws} \right] \cdot f_s = f_{ed}(-+) = 722.3\text{Hz} \quad (\text{IV.20})$$

$$f_{ed} = \left[(kn_b + n_d) \frac{(1-g)}{p} - n_{ws} \right] \cdot f_s = f_{ed}(+-) = 672.1\text{Hz} \quad (\text{IV.21})$$

$$f_{ed} = \left[(kn_b - n_d) \frac{(1-g)}{p} - n_{ws} \right] \cdot f_s = f_{ed}(- -) = 622.3\text{Hz} \quad (\text{IV.22})$$

Les résultats expérimentaux obtenus sont en concordance avec la théorie. Nous pouvons dire que ces résultats sont des indicateurs de défauts d'excentricité dynamique. On voit même une augmentation d'amplitude de quelques pics à cause du défaut.

Il est admissible aussi qu'une excentricité dynamique pure ne peut exister seule, et qu'il y'existe toujours avec un certain degré d'excentricité statique résiduelle qui nous amène au troisième type d'excentricité.

| Formules des harmoniques ($g=0.004$) | Valeurs théoriques (Hz) | Valeurs expérimentales (Hz) | Amplitude (dB) ($\delta d=0\%$) | Amplitude (dB) ($\delta d=30\%$) |
|--|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| fs – fr | 25.1 | 25.13 | -46 | -43.04 |
| fs +fr | 74.9 | 74.13 | -47.22 | -45.35 |
| L-PSH | 647.2 | 649.5 | -52.55 | -61.11 |
| U-PSH | 747.2 | 749.5 | -58.95 | -42.85 |

Tableau (IV. 10): Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta d=30\%$).

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

IV.7. TECHNIQUE D'ONDELETTES POUR LE DEFAUT D'EXCENTRICITE ROTORIQUE :

IV.7.1. Energies et bandes fréquentielles pour TOD :

Notre étude se base sur la MCSA par TOD sous une fréquence d'échantillonnage égale à 12800Hz.

Pour avoir des indications plus claires des défauts, on peut ajouter 1 ou 2 à la formule précédente, comme [93]:

$$N_{SA} = \text{int} \left(\frac{\log\left(\frac{f_e}{f_s}\right)}{\log(2)} \right) + 1 \text{ ou } + 2 \quad (\text{IV.23})$$

Le seuil d'arrêt pour une fréquence d'échantillonnage $f_e=12.8\text{kHz}$ est calculé comme suit :

$$N_{SA} = \text{int} \left(\frac{\log\left(\frac{12800}{50}\right)}{\log(2)} \right) + 2 = 10 \text{ Niveaux} \quad (\text{IV.24})$$

L'indicateur du défaut peut se trouver dans n'importe quel niveau et détail. Les bandes fréquentielles (BF) de tel di sont considérées comme une orientation à la zone de détection importante. Le Tableau (IV. 11) montre les bandes fréquentielles de chaque niveau.

| Niveau | Bandes de fréquences Approximation | | Bandes de fréquences Détail | |
|--------|------------------------------------|--------|-----------------------------|-----------|
| J=1 | A1 | 0-3200 | D1 | 3200-6400 |
| J=2 | A2 | 0-1600 | D2 | 1600-3200 |
| J=3 | A3 | 0-800 | D3 | 800-1600 |
| J=4 | A4 | 0-400 | D4 | 400-800 |
| J=5 | A5 | 0-200 | D5 | 200-400 |
| J=6 | A6 | 0-100 | D6 | 100-200 |
| J=7 | A7 | 0-50 | D7 | 50-100 |
| J=8 | A8 | 0-25 | D8 | 25-50 |
| J=9 | A9 | 0-12.5 | D9 | 12.5-25 |
| J=10 | A10 | 0-6.25 | D10 | 6.25-12.5 |

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

IV.7.2. Défaut d'excentricité statique :

L'approche est basée sur l'analyse des signaux pour plusieurs niveaux de détail (et d'approximation), résultant de la décomposition en ondelettes, dont les bandes de fréquence associées sont incluses de 0 Hz jusqu'à la moitié de la fréquence d'échantillonnage.

Les figures (IV.24), (IV.25), (IV.26), (IV.27), (IV.28) et (IV.29) comparent la TOD du courant statorique et l'énergie de chaque détail sous les conditions suivantes :

- Fonctionnement à vide et en charge ;
- Etat sain et avec défaut d'excentricité statique.

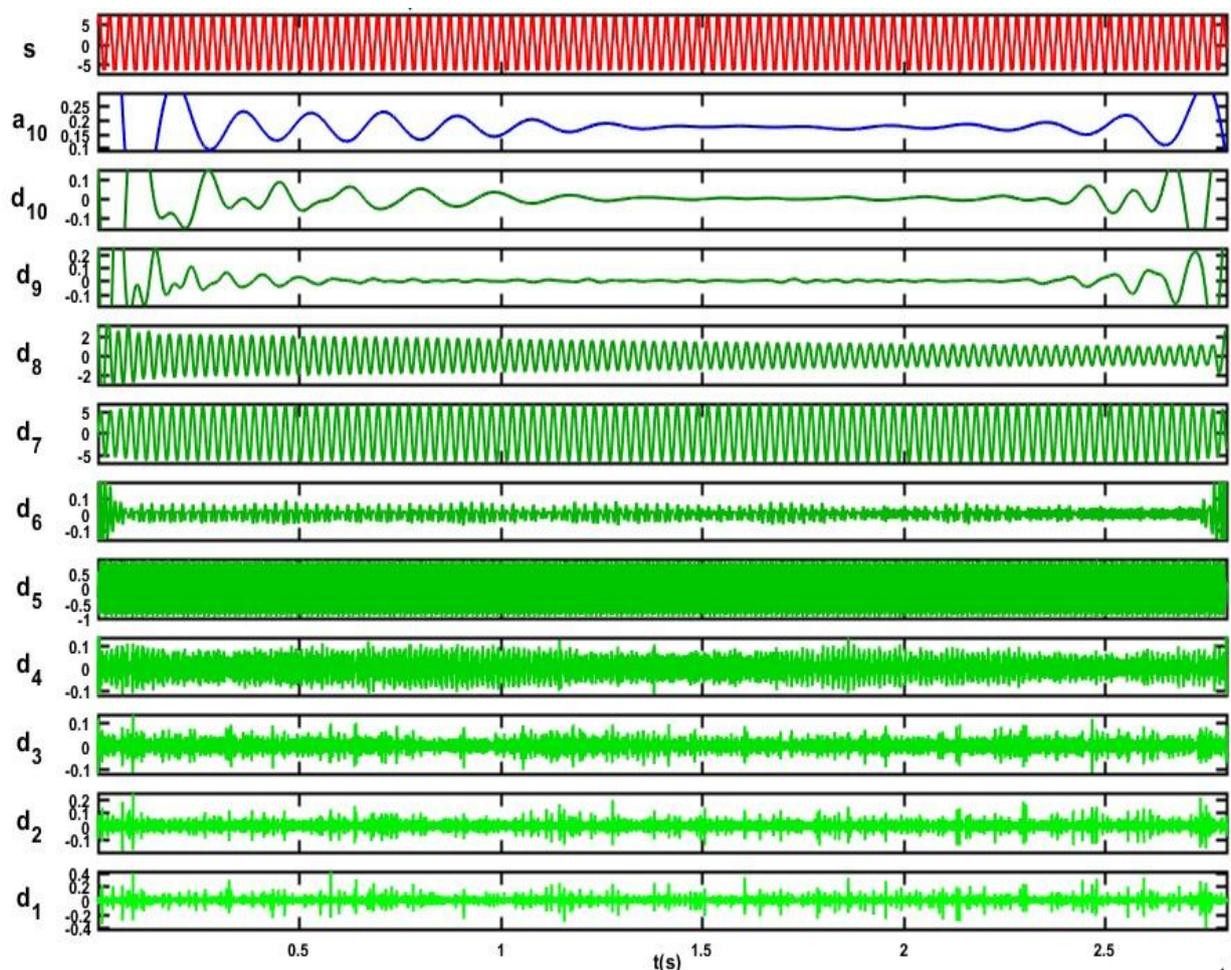


Figure (IV.24): TOD multi niveau en fonctionnement sain et à vide de la machine

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

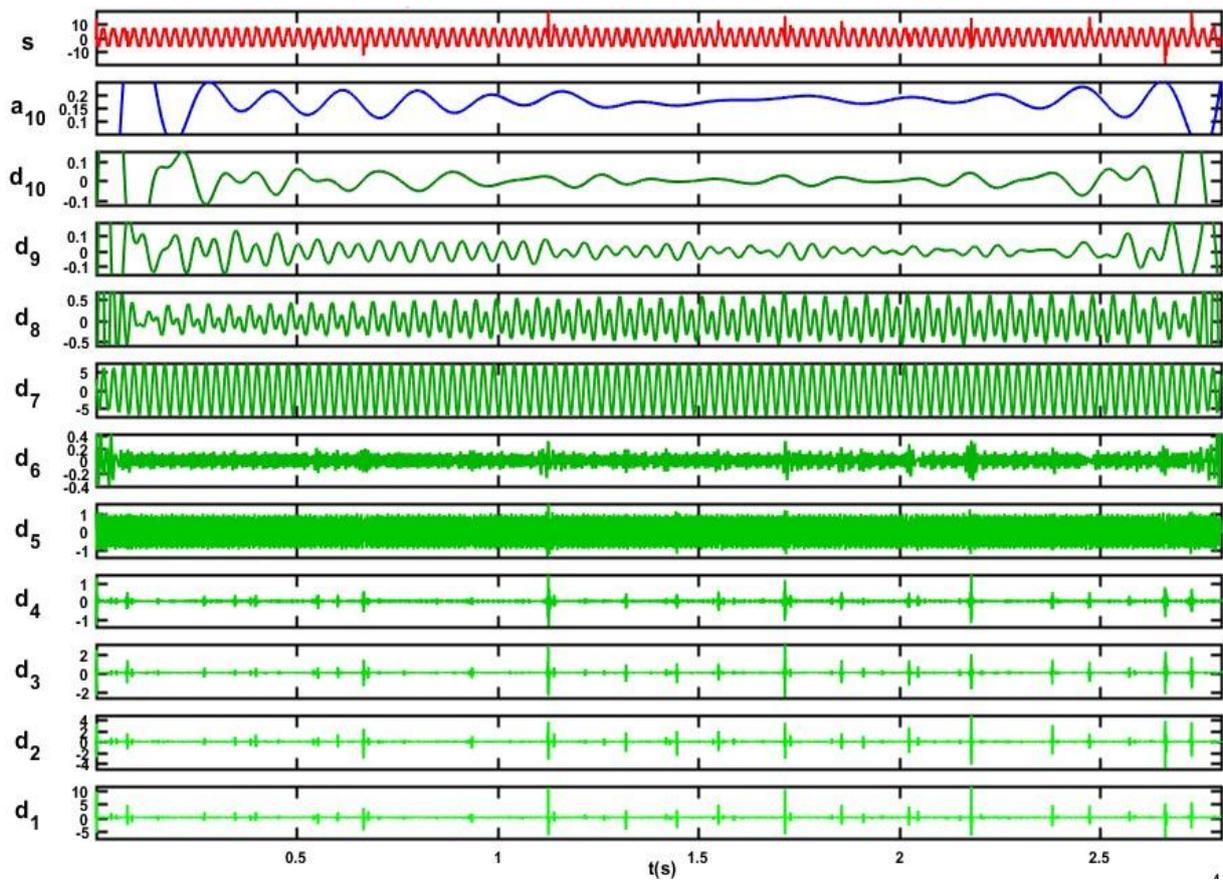


Figure (IV.25): Analyse par TOD d'une phase statorique is pour un fonctionnement à vide en présence des défauts d'une (ES).

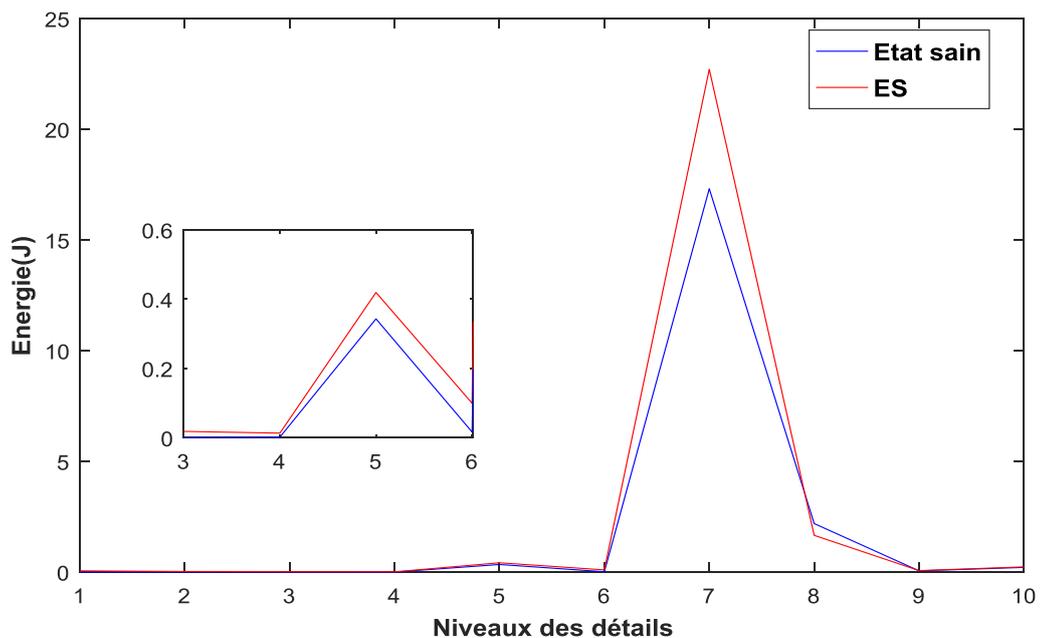


Figure (IV. 26): Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (ES).

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

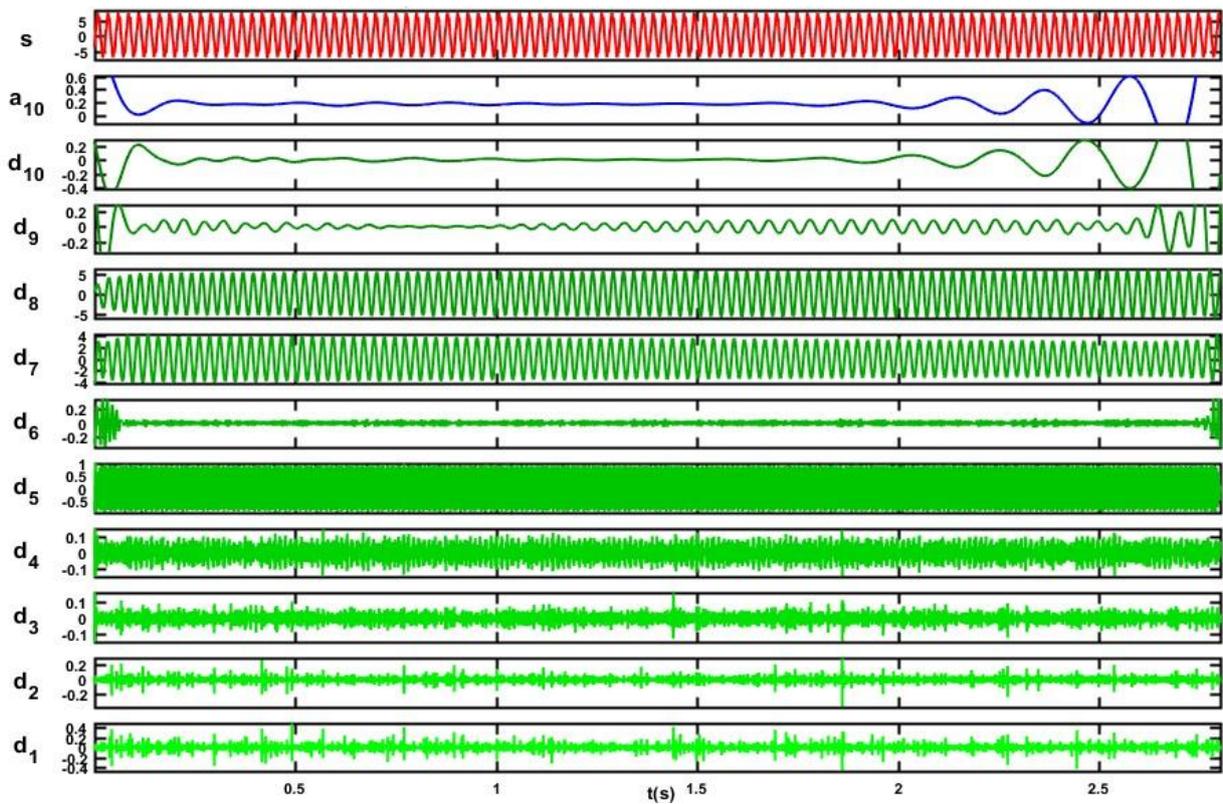


Figure (IV. 27): TOD multi niveau en fonctionnement sain et en charge de la machine.

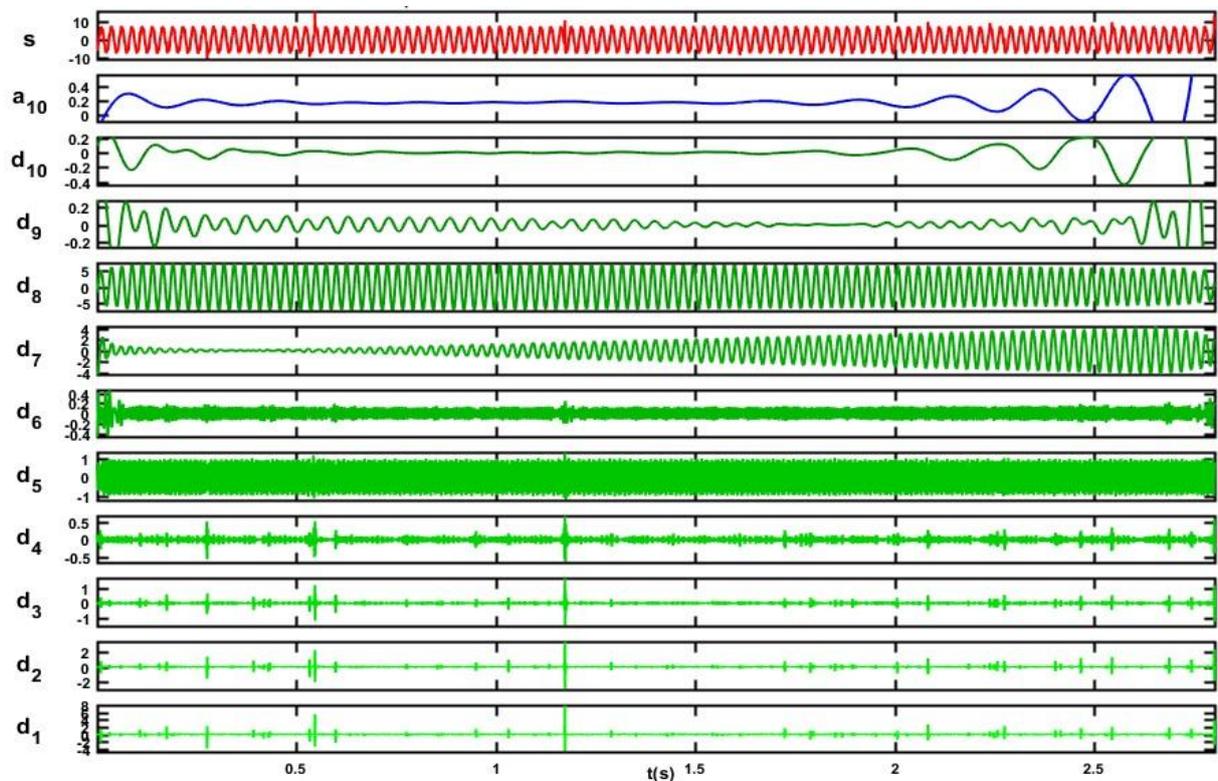


Figure (IV. 28): Analyse par TOD d'une phase statorique is pour un fonctionnement en charge en présent des défauts d'une (ES)

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

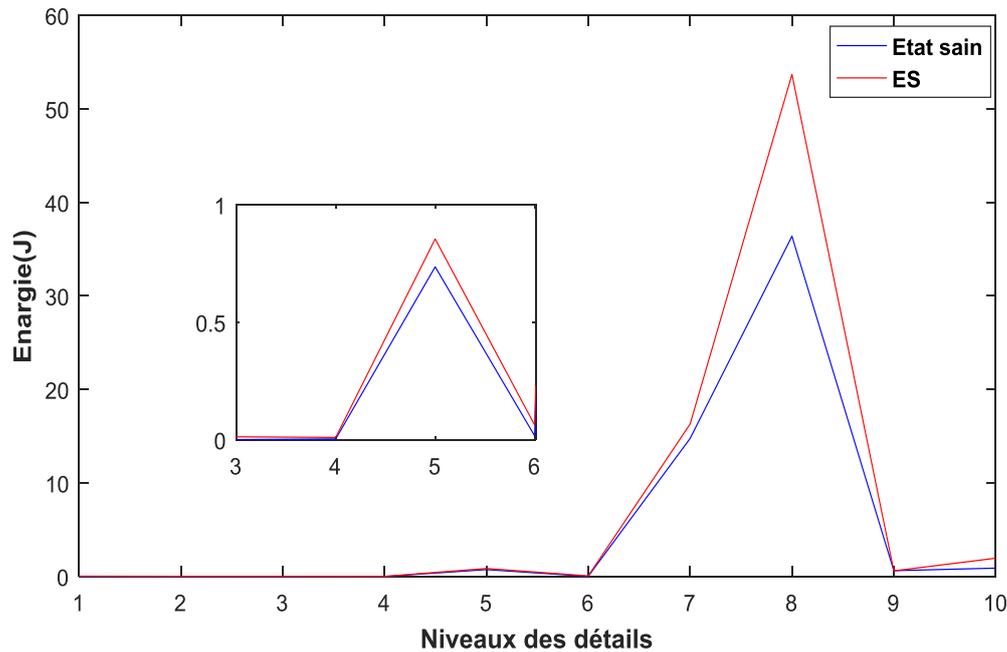


Figure (IV.29): Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (ES).

La comparaison des signaux de détails et d'approximation pour une machine avec défaut d'excentricité statique, montre que l'amplitude des coefficients d7, d8, d9 et a changée par rapport à celui dans le cas de la machine saine ; cette variation dans les signaux d7, d8, d9 est due à l'effet du défaut d'ES. Les bandes de fréquence correspondantes sont liées aux détails et l'approximation touchés par la présence du défaut d'excentricité statique.

Ainsi, on remarque qu'il y a des différences plus claires au niveau des détails d7 et d8 qui se traduisent par les énergies de celles-ci. Il faut noter aussi que l'énergie du détail d5 est affectée par l'existence du défaut.

IV.7.3. Défaut d'excentricité dynamique :

Sur les figures (IV.30) et (IV.31), on peut observer que l'évolution dans les bandes de fréquences d'observation du signal associé au défaut d'excentricité dynamique peut être analysée, en utilisant les coefficients a10 et d7 à d9, ou en utilisant seulement le coefficient d7 qui fournit toute l'information dans la bande de fréquence contenant les informations reliées aux défauts d'ED.

Par comparaison de l'énergie des détails représentée dans la figure (IV.31) on voit que la différence entre les deux détails 7 et 8 est très claire.

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

Ceci signifie que l'utilisation de la transformée en ondelettes directement sur le signal du courant du moteur asynchrone peut être efficace. La différence entre les détails (approximations) pour un état sain et un autre état défectueux donne des signatures plus significatives, c'est à dire que plus d'informations sur le défaut.

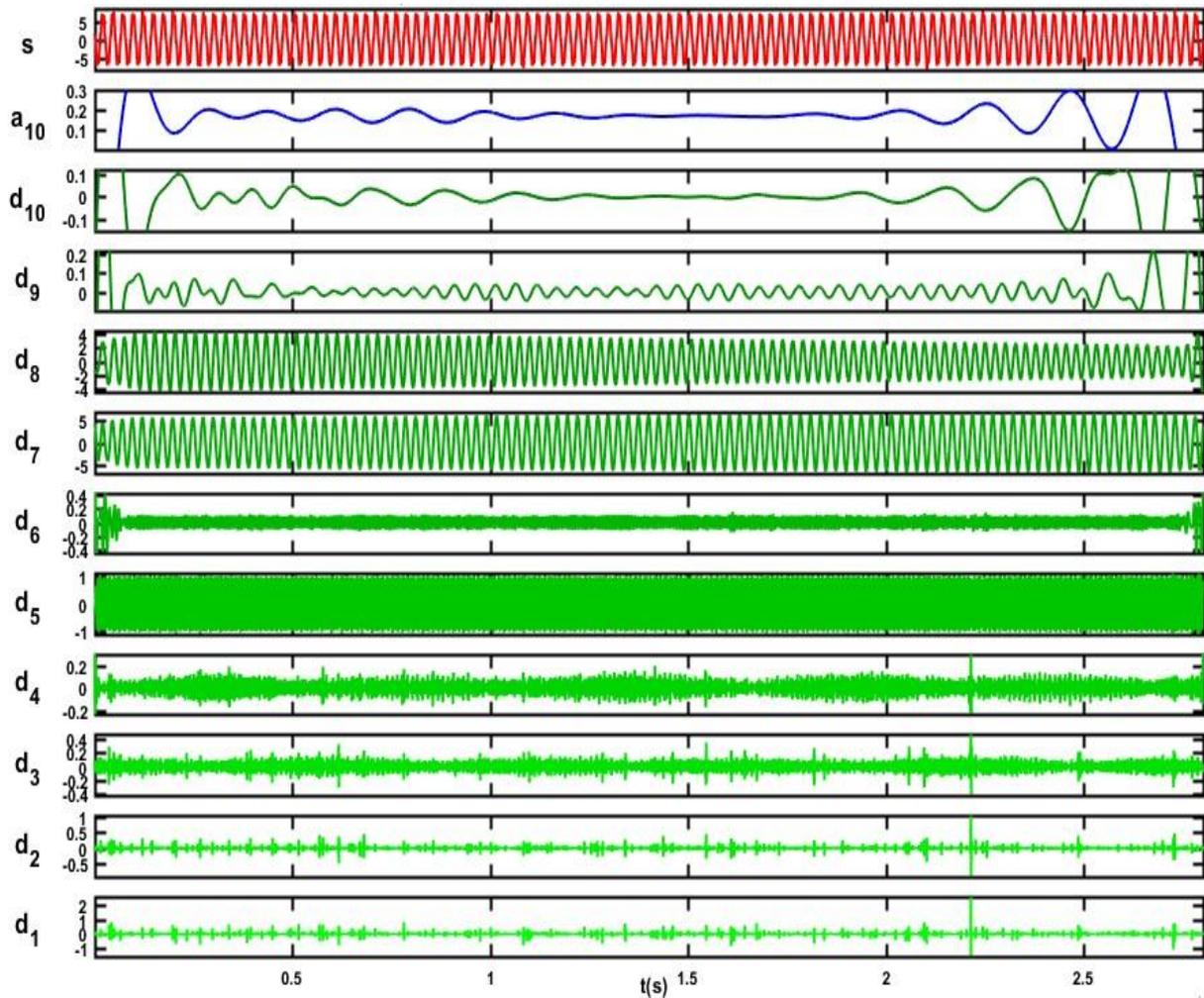


Figure (IV.30): Analyse par TOD d'une phase statorique is pour un fonctionnement à vide en présence de défauts d'une (ED).

Chapitre IV Application au diagnostic des défauts de l'excentricité du moteur asynchrone

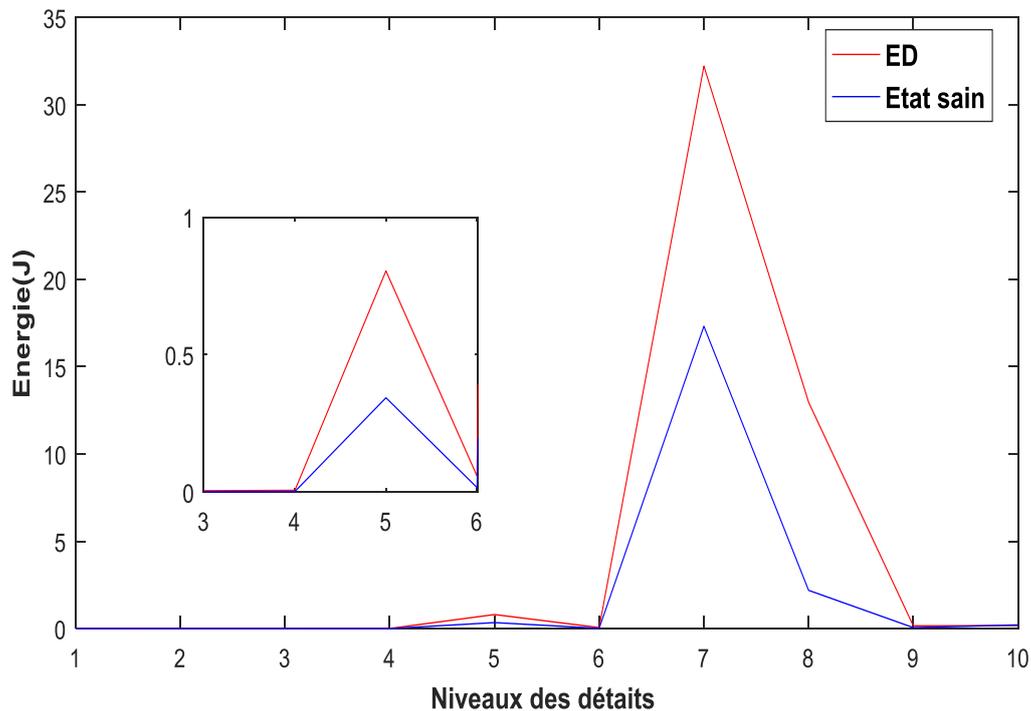
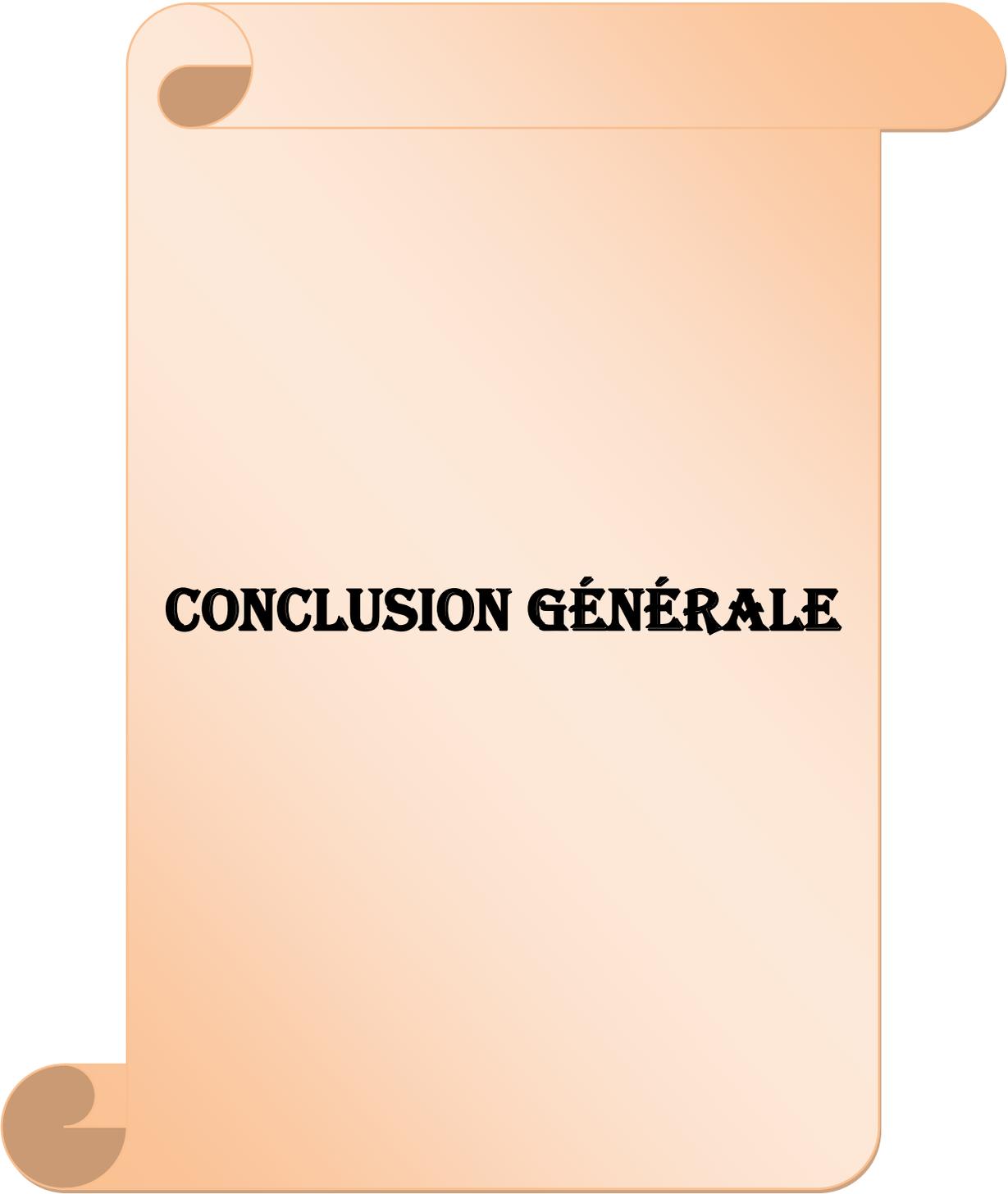


Figure (IV.31): Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (ED).

L'extraction des signaux de chaque niveau, est considérée comme une source très riche en informations dans le cas d'un défaut par rapport à celui d'une machine sans défaut.

IV.8. CONCLUSION :

Ce chapitre a été consacré le diagnostic est réalisé pour la détection du défaut par deux techniques de traitement de signale la première est la FFT qui est une méthode classique, elle nous a donné de bon résultat pour la détection du défaut d'excentricité en régime stationnaire par contre la deuxième technique d'ondelette discrète qui nous donné bon résultat surtout par l'énergie de décomposition par le TOD type multi niveau à durée courte et en régime stationnaire.

An orange scroll graphic with a gradient from light to dark orange. The top-left and bottom-left corners are rolled up, and the top-right corner is rounded. The text is centered on the scroll.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire se base sur le diagnostic des défauts d'excentricités dans la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil en utilisant la technique de la MCSA.

Le diagnostic de défauts par l'analyse spectrale du courant statorique en régime permanent, a été fait dans notre étude. Cette approche reste, largement, la méthode la plus utilisée par les auteurs pour plusieurs raisons, notamment à cause de l'accessibilité du courant statorique extérieurement, et surtout pour la sensibilité des harmoniques associées aux défauts de la machine par rapport aux sévérités de ces derniers.

La MCSA consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale caractérisant le défaut étudié. Dans le même contexte, nous avons vérifié tous les fréquences caractéristiques du défaut d'excentricité pour différente plage de fréquences. Il est important, ici, de noter la relation entre la sévérité du défaut et l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère.

Dans ce mémoire on a traité l'aspect lié à la simulation et à l'interprétation des résultats obtenus, dans le but d'avoir un ordre de grandeur sur l'effet de défauts sur les machines à l'état sain et à l'état défectueux.

La méthode de la MCSA-FFT n'est pas en mesure de détecter tous les défauts de la machines asynchrones de façon définitive. L'excentricité statique pure ou dynamique pure est un défaut à détecter pour de nombreux moteurs.

Parmi les méthodes temps-échelle, la transformée en ondelettes discrètes, non seulement plus rapide grâce à l'outil informatique, mais aussi plus à même de révéler des symptômes de défaut à un stade plus précoce. Cette technique est très efficace et très sensible à tous les défauts étudiés dans cette mémoire. Parmi les inconvénients de cette dernière, est la difficulté d'identifier d'une manière précise le type du défaut.

Par conséquent, ce travail suggère qu'une combinaison de MCSA-FFT, MCSA-DWT serait plus efficace au diagnostic des MAS.

ANNEXE

PARAMETRES DU MOTEUR UTILISE

- $g_0 = 0.0008\text{m}$

- $r = 0.082\text{m}$

- $l = 0.11\text{m}$

- $w = 28$

- $N_b = 40$

- $N_e = 48$

- $L_b = 95\text{nH}$

- $L_e = 18\text{nH}$

- $L_{fA} = 0.062\text{H}$

- $R_s = 1.75\Omega$

- $R_b = 31\mu\Omega$

- $R_e = 2.2\mu\Omega$

- $J_T = 0.0754\text{kgm}^2$

- $\gamma = \pi / 20\text{rad}$

- $\beta = \pi / 86\text{rad}$

PATAMETRES DU MOTEUR DE L'EXPERIMENTATION

| | |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| Puissance | 3KW |
| Nombre de paires de pôles | 2 |
| Nombre d'encoches statoriques | 36 |
| Nombre de barres rotoriques | 28 |
| Moment d'inertie | $6.2 \times 10^{-3} \text{ Kg.m}^2$ |

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : G. Didier “ Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ”.Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2004.
- [2] :Zebri.Fouad,Mehamelle.Houcine “ Detection et localisation des défauts de la machine asynchrone à double stator application de la technique l’intelligence artificielle” Université de Biskra (Algerie).
- [3] Ab. Bouguerne, "Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrone", Thèse Magister, Université MENTOURI de Constantine.
- [4] B. Fatma, "Contribution à la modélisation et la commande de la machine asynchrone : application au diagnostic des défauts statorique", Thèse de doctorat, Université de Constantine 1, juin 2014.
- [5] N. Bessous,"Contribution au diagnostic des machines Asynchrone", Thèse Magister, Université MENTOURI de Constantine.
- [6] B. Fatima" Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : "Application au diagnostic des défauts statoriques". Thèse de Doctorat, Université Constantine 1, 2014.
- [7] Ondel O., «Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone» Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006.
- [8] Thorsen O. V. and Dalva M., "A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.31(5), pp. 1186-1196, September 1995.
- [9] Arfat Siddique, G. S. Yadava, and Bhim Singh, “A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors, “ IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 20, No. 1, March 2005.
- [10] A. H. Bonnet, “Cause and analysis of stator and rotor failures in threephase squirrel-cage induction motors,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, no. 4, pp. 921–437, Jul./Aug. 1992.

- [11] A. Ibrahim, "Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée," Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences, ingénierie, santé, Université Jean Monnet, France, 10 Mars 2009.
- [12] A. H. Bonnett and C. Yung, "Increased Efficiency Versus Increased Reliability," *Industry Applications Magazine*, IEEE, vol. 14, pp. 29-36, 2008.
- [13] S. Bazine, "Conception et implémentation d'un Méta-modèle de machines asynchrones en défaut," Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle (LAI) - EA 1219, Université de Poitiers, 2009.
- [14] S. A. S. Al Kazzaz and G. K. Singh, "Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques," *Electric Power Systems Research*, vol. 65, pp. 197-221, 2003.
- [15] Smail Bachir, « modélisation et diagnostic de la machine asynchrone par identification paramétrique à vitesse constante. » *Thèse de doctorat, Ecole Supérieure d'ingénieur de Poitiers, 2002*
- [16] H.A.Tolyat, Xiadong.Liv « Condition motoring and fault diagnosis of electrical motors. » *IEEE Trans, on Energy Conversion, Vol 20, no.4,*
Décembre 2005
- [17] S.Nandi, H.Toliyat and Li. Xiaodong. «Condition Monitoring and fault diagnosis of electrical motors- A Review .» *IEEE Transactions On Energy Conversion, vol, 20,N°,4,Décembre 2005.*
- [18] Schaeffer. Emmanuelle « Diagnostic des machines asynchrones, modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts. »
Thèse de doctorat, université de Nantes, Décembre 1999.
- [19] Gaetan Didier, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence des défaillances.» *Thèse de doctorat, université de Henry poincaré , Nancy-I, 2004*
- [20] Olivier Ondel, « Diagnostic par reconnaissance des formes Application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone. » *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2006.*

[21] Tarek Boumegoura, « Recherches de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèses d'observateurs en vue de diagnostic. » *Thèse de doctorat, l'école centrale de Lyon, 2001.*

[22] Bui Viet Phuong, « Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite application a l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide. » *Thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, 2007*

[23] M. Adriano, B.S. da Silva « Induction motor, fault diagnostic and monitoring method. » *Marquette University, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Electrical and Computer Engineering Milwaukee, Wisconsin May 2006*

[24] J.Faiz, B.M.Ebrahimi and M.B.B Sharifian « Time stepping finite element analysis of broken bars faults in a three-phase squirrel-cage induction motor. » *progress In Electromagnetic Research, PIER 68,53-70, 2007.*

[25] L.Szabo, J.B.Dobai, K.A.Biro, D.fodor, F. Toth « study on squirrel cage fault of induction machines by means of advanced fem based simulations. » *Internationa Conference on Automation , Qualité and testing, Robotics, May 13-15, 2004, Cluj-Napoca, Romania*

[26] J.Faiz, B.M.Ebrahimi « Mixed fault diagnosis in three-phase squirrel-cage induction motor using analysis of air-gap magnetic field.» *progress In Electromagnetics Research, PIER 64,239-255, 2006.*

[27] **Ali Ibrahim**, « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée», thèse de Doctorat, Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2009.

[28] **Z .Sara** « Détection des défauts statoriques dans la machine synchrone à aimants permanents par les techniques avancées», Magister, Université, Biskra, 2015.

[29] **B.VASEGHI** «Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre -spires», thèse de Doctora, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 3 décembre 2009.

[31] R.Bigret, et J.L. Féron , «Diagnostic- maintenance – disponibilité des

machines tournantes .» *Edition Masson . Paris. Décembre 1995*

[32] B. Trajin, "Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrone", Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1 décembre 2009.

[33] B. Trajin, "Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones," Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1 Décembre 2009.

[34] S. Bazine, "Conception et implémentation d'un Méta-modèle de machines asynchrones en défaut," Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle (LAI) - EA 1219, Université de Poitiers, 2009.

[35] S. A. S. Al Kazzaz and G. K. Singh, "Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques," *Electric Power Systems Research*, vol. 65, pp. 197-221, 2003.

[36] M. S. Naït-Saïd, M. E. H. Benbouzid et A. Benchaid, "Detection of broken bars induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensorless estimation" *IEEE Transactions on energy conversion*, Vol.15, no.1, pp. 66-70, Mars 2000.

[37] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts," Thèse de doctorat, Institut de Recherche en Cybernétique de Nantes, École Centrale de Nantes, Nantes, France, 1999.

[38] S. Bachir, "Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique," Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Poitiers, Université de Poitiers, Poitiers, France, 2002.

[39] G. M. Joksimovic' and J. Penman, "The Detection of Inter-Turn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors", ", *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol. 47, no. 5, pp 1078-1084, OCT. 2000

[40] M. E. H. Benbouzid , M. Vieira and C. Theysal., "Induction motors faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 14, no. 1, pp. 14–22, Jan. 1999.

- [41] J. Cusidó, L. Romeral, Juan A. Ortega, Javier A. Rosero and A. G. Espinosa, "Fault Detection in Induction Machines Using Power Spectral Density in Wavelet Decomposition," IEEE Trans. Ind. Elec., vol. 55, no. 2, February 2008. [30] Z.K. Peng, F.L. Chu, "Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography," Mechanical Systems and Signal Processing 18 (2004) 199–221.
- [42] Z.K. Peng, F.L. Chu, "Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography," Mechanical Systems and Signal Processing 18 (2004) 199–221.
- [43] Zhengping Zhang, Zhen Ren, and Wenying Huang, " A Novel Detection Method of Motor Broken Rotor Bars Based on Wavelet Ridge, " IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 3, p. 417-423, September 2003.
- [44] Ben Khader Bouzid , M.; Champenois, G.; Mrabet, B. N.; Signac, L.; and Jelassi, K. , " An Effective Neural Approach for the Automatic Location of Stator Interturn Faults in Induction Motor, " IEEE Trans. Ind. Elec., 55(12), 4277- 4289. (2008) Bibliographie
- [45] Jing Huang, Ganesh K. Venayagamoorthy, and Keith Corzine, "Identification of Induction Machines Stator Currents with Generalized Neurons," IEEE PES PowerAfrica 2007 Conference and Exposition Johannesburg, South Africa, pp.1-7 , 16-20 July 2007
- [46] Zidani F., Diallo D., Benbouzid M. E. H., Nait-Said R., « A fuzzy based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage-fed PWM inverter induction motor drive », IEEE Transaction on Industry Electronics, vol. 55, n°2, p. 586-593, Feb. 2008.
- [47] P. Vicente J. Rodriguez, A. Arkkio," Detection of stator winding fault in induction motor using fuzzy logic," Applied Soft Computing 8 (2008) 1112–1120
- [48] H. Razik; M. B. R. Correa; E. R. C. da Silva, ," An application of genetic algorithm and fuzzy logic for the induction motor diagnosis," IEEE Conference Publications Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE. Pages : 3067 - 3072, 10-13 Nov. 2008.
- [49] Rajeswari.C, Sathiyabhama.B, Devendiran.S & Manivannan.K, "Bearing fault diagnosis using wavelet packet transform, hybrid PSO and support vector machine," Elsevier, Science Direct, Procedia Engineering 97 (2014) 1772 – 1783.

- [50] Widodo A., Yang B.S and Han T., Combination of independent component analysis and support vector machines for intelligent faults diagnosis of induction motors, *Expert Systems with Applications*, 32 (2007) 299–312.
- [51] O. Ondel," Diagnostic par reconnaissance des formes: Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone," Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 2006.
- [52] R. Casimir, "Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes," Thèse de doctorat, Centre de Génie Electrique de Lyon (CEGELY – UMR 5005 CNRS), Ecole Centrale de Lyon, Villeurbanne, France, 2003.
- [53] G. Didier, "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.
- [54] :Raphaël Romary, Delphine Thailly , Jean-François Brudny, Amine Yazidi,Humberto Henao, Gérard-André Capolino, Pierre Suau, “ Diagnostic de machines électriques par analyse du champ magnétique de dispersion ” Deux laboratoires ont pris part à ces travaux: le LSEE de l’Université d’Artois et le CREA de l’Université Picardie Jules Verne. REE N° 11 Décembre 2006.pp 49-62.
- [55] :Sahraoui.Mohamed “Contribution aux diagnostics des machines asynchrones triphasées à cage ”Université Mohamed Khider Biskra, 10/2003.
- [56] : G. Didier “ Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ”.Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2004.
- [57] : Mr ROUAIBIA Reda « Detection et diagnostic des défauts des moteurs asynchrone »Thèse de Magister, Option : Commande, détection des défauts et diagnostic des processus industriels UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA Année 2009
- MCSA**[58] D.Yang and J.Penman, “Intelligent detection of induction motor bearing faults using current and vibration monitoring”, *Proceeding of COMADEM 2000*, 3-8 December 2000pages 461-470.
- [59] M.Drif, N.Benouzza, B.Kraloua, A.Bendiabdellah and J.A.Dente, “Induction motor load effect diagnostic by instantaneous power spectrum”, *Proceeding of ACEMP 2001*, June 27-29, 2001, Kujadasi, Turkey.

- [60] M.Drif, N.Benouzza, B.Kraloua, A.Bendiabdellah and J.A.Dente, "Squirrel cage rotor faults detection by instantaneous power spectrum approach", Proceeding of IEEE SDEMPED 01, Sep. 1-3, 2001, Gorizia, Italy.
- [61] : SAHRAOUI, Mohamed. Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones. 2010. Thèse de doctorat. Université de Mohamed Khaider-Biskra, Faculté des sciences de technologie département d'électrotechnique, 2010
- [62] G. M. Joksimovic' and J. Penman, "The Detection of Inter-Turn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors", ", IEEE Trans. Ind. Elec., vol. 47, no. 5, pp 1078-1084, OCT. 2000.
- [63] Zhiwen Liu, Hongrui Cao, Xuefeng Chen, ZhengjiaHe, Zhongjie Shen, "Multi-fault classification based on wavelet SVM with PSO algorithm to analyze vibration signals from rolling element bearings, " Elsevier, Science Direct, Neurocomputing 99 (2013) 399–410.
- [64] Matic D., Kulic F., Sanchez M.P, Kamenko I., Support vector machine classifier for diagnosis in electrical machines: Application to broken bar, Expert Systems with Applications, 39 (2012) 8681–8689.
- [65] A. Khaled, "Modélisation d'un Moteur Asynchrones pour le suivi de la sévérité des défauts rotorique par l'approche de la fonction d'enroulement ", Mémoire de Magistère en électrotechnique, Université, d'Oran Mohamed Boudiaf, 2011.
- [66] S. Bachir, "Contribution au diagnostic de la MAS par estimation paramétrique ", Thèse doctorat, 2002, Université de Poitiers France.
- [67] M. Sahraoui " Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage"Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie, 2003.
- [68] A. Ibrahim" Contribution au diagnostic de machines électromécaniques " Thèse de doctorat, université de saint Etienne Mars 2009.
- [69] Blanchet G. and M. Charbit. Traitement numérique du signal. Techniques de l'Ingénieur, traité d'electronique, Août 1998.
- [70] E. Oran Brigham, "Fast Fourier transform and its applications," Prentice Hall, 1988.

- [71] J. Cusido, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, A. Garcia, "Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 2, pp. 633–643, Feb. 2008.
- [72] S. H. Kia, H. Henao, G. A. Capolino, "Diagnosis of broken-bar fault in induction machines using discrete wavelet transform without slip estimation," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 45, No. 4, pp. 107– 121, Jul/ Aug. 2009.
- [73] Frédéric Truchetet, " Ondelettes pour le signal numérique, " Editions Hermes, Paris, 1998.
- [74] El-Houssin El-Bouchikhi, Vincent Choqueuse, Mohamed Benbouzid, Frédéric Charpentier Jean, "Etude Comparative des Techniques de Traitement du Signal NonStationnaires Dédiées au Diagnostic des Génératrices Asynchrones dans les Eoliennes Offshores et les Hydroliennes," EF2011, Dec 2011, Belfort, France. pp.1-10, 2011. . <https://hal.archives-ouvertes.fr>
- [75] Steven T. Karris, "Signals and Systems with Matlab Computing and Simulink Modeling," Fourth Edition, 2008 Orchard Publications. www.orchardpublications.com
- [76] S.G. Mallat, "A wavelet tour of signal processing," second ed., Academic Press, 1998.
- [77] S. G. Malat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 2, No. 7, Jul. 1989.
- [78] E.Hitti "Sélection d'un banc optimal de filtres à partir d'une décomposition en paquets d'ondelettes. Application à la détection de sauts de fréquences dans des signaux multicomposantes", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, France, novembre 1999.
- [79] R. Benzid. "Ondelettes et Statistiques d'Ordre Supérieur Appliquées aux Signaux Uniet Bidimensionnels", Thèse Doctorat, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, Septembre 2005.
- [80] A.Bouzida, "Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes. Mémoire de Magister .Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Algérie 2008

- [81] S.Bourdim, "Méthodes ondelettes et Bayésiennes pour le diagnostic : Application aux machines asynchrones". Mémoire de Magister .Université Ferhat Abbas de Sétif .Algérie 2011.
- [82] SAHRAOUI Mohamed ,Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones, Doctorat en Science, Université Mohamed KHIDER Biskra , Faculté des Sciences et de la Technologie , Département de Génie Electrique,2010.
- [83] El.H. Bouchikhi, V. Choqueuse, M.E.H. Benbouzid, J.F. Charpentier and G. Barakat, "A Comparative Study of Time-Frequency Representations for Fault Detection in Wind Turbine" IEEE 2011, pp. 3584-3589.
- [84] D. DORRELL, W. THOMSON et S. ROACH, « Analysis of airgap flux, current and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors », in , Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95, vol. 1, p. 563–570 vol.1, oct. 1995.
- [85] D. DORRELL, W. THOMSON et S. ROACH, « Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, p. 24–34, jan. 1997.
- [86] S. NANDI, S. AHMED et H. TOLIYAT, « Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 16, p. 253–260, sept. 2001.
- [87] S. Nandi, S. Ahmed, H. Toliyat, "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three-phase induction motor with different rotor cages", IEEE Trans. Energy Conv., vol.16, no. 3, 2001, pp: 253 –260.
- [88] A. Ghoggal, " Diagnostic de la machine asynchrone triphasée- Modèle dédié à la détection des défauts ", Mémoire de Magistère de l'université de Batna, 05/2005.
- [89] W.T. Thomson, A. Barbour, "On-line current monitoring and application of finite element method to predict the level of static air-gap eccentricity in three-phase induction motors," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 13, no. 4, December 1998, pp. 347-357.

[90] W.T. Thomson, D. Rankin, D.G. Dorrell, "On-line current monitoring to diagnose airgap eccentricity in large three-phase Induction motors-Industrial case histories verify the predictions," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, December 1999, pp. 1372-1378.

[91] D.G. Dorrell, W.T. Thomson and S.Roach, "Analyse of air-gap flux, current, and vibration signals as function of combination static and dynamic air-gap eccentricity in 3-phase induction motors," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 33, no. 1, January /February 1997, pp. 24-34.

[92]: Ali Ibrahim. —Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanéel. Thèse de Doctorat, laboratoire d'Analyse des Signaux et des Processus Industriels, université Jean Monnet. Lyon, Mars 2009.

[93]: J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, M. P. M. Palomares, 'Validation of a new a method for the diagnosis of rotor bar failures in induction machines'. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, pp. 990-996, IEEE 2006.