



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Machine Electrique

Présenté par :

- BOUCHARIA Nadir
- YAHIA Mohammed Riad
- AHMIMA Mohammed Larbi

Intitulé :

**Diagnostic des défauts d'excentricité rotorique dans la
Machine Asynchrone en utilisant la Technique de
l'analyse spectrale (MCSA-FFT)**

Soutenue le : 03/06/2024

Devant le jury composé de :

Dr : HALEM Noura	Président	Université
Dr : MAMMERI Oussama	Examineur	Université
Pr : BESSOUS Noureddine	Encadreur	Université

Année académique : 2023/2024

Remerciements

الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي بِنِعْمَتِهِ تَمُّ الصَّالِحَاتُ

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur:
Pr. BESSOUS Noureddine (Université d'El Oued), pour
son aide précieuse et ses encouragements sincères qui ont
grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

NB : Les étudiants ont toute la responsabilité de rédiger ce travail et d'avoir leurs résultats sous la supervision et les suggestions du comité de soutenance.

إهداء

إلى من علمني الصمود و المثابرة و مهد لي طريق العلم... والدي العزيز. و إلى من كانت دعواتها سبب نجاحي و انارة دربي... أمي الغالية. إلى من أراد ان يراني أبلغ اعلى المراتب و المستويات... إخوتي و أخواتي . إلى من يسرهم تفوقي و نجاحي... أقاربي و أحبائي . لكم أهدي نجاحي و تخرجي .

بوشاريه نذير

إلى روح غائبة عن الوجود ، تنتظر هذا النجاح إلى ابي رحمه الله . إلى أمي التي دائماً كانت ترافقني بدعواتها المباركة وكلماتها اللطيفة. إلى أولئك الذين يفرحهم نجاحنا، ويحزنهم فشلنا إلى اخوتي واقاربي . إلى كل هؤلاء أهدي هذا التخرج.

يحي محمد رياض

اهدي ثمره هذا الجهد المتواضع إلى من اتبعت خطاه إلى من كان سنداً و ملجأً لي والدي العزيز... وإلى من جعل الله الجنة تحت قدميها أمي الغالية . إلى جدتي الحنونة وإخوتي وإلى كل عائلتي الكريمة .

احميمة محمد العربي

ملخص

من الصعب تخيل عالمنا اليوم من دون الآلات كهربائية و ذلك لأهمية دورها في الصناعة الحديثة، نخص بالحديث في بحثنا هذا الآلات الكهربائية اللامتزامنة لأنها الأكثر استعمالاً في قطاع الصناعة وبالتالي تطوير أساليب حمايتها و الكشف عن عيوبها يعد أولوية قصوى. تتضمن هذه المذكرة دراسة تجريبية قصد التحليل الطيفي لتيار الجزء الثابت و ذلك باستخدام تقنية MCSA-FFT لخطأ عدم تمركز الجزء الدوار الاستاتيكي و الديناميكي .

الكلمات المفتاحية : آلات كهربائية دوارة غير متزامنة، عدم تمركز الجزء الدوار الاستاتيكي والديناميكي، تحويل فوريي السريع، تحليل تيار الجزء الساكن.

Résumé

Il est difficile d'imaginer notre monde aujourd'hui sans les machines électriques en raison de leur importance dans l'industrie moderne. Dans notre mémoire, nous nous concentrons particulièrement sur les machines électriques asynchrones car elles sont les plus utilisées dans le secteur industriel, ce qui fait du développement de méthodes de la détection de leurs défauts une priorité absolue. Ce mémoire comprend une étude expérimentale visant à analyser spectaculairement le courant statorique en utilisant la technique MCSA-FFT pour détecter les défauts d'excentricité statique et dynamique du rotor.

Mots clés : Machines électriques asynchrones, excentricité statique, excentricité dynamique, transformée de Fourier rapide, analyse du courant statorique.

Abstract

It's difficult to imagine our world today without electrical machines due to their importance in modern industry. In our dissertation, we particularly focus on asynchronous electric machines (induction machines) as they are the most widely used in the industrial sector, making the development of methods for detecting their faults a top priority. This work includes an experimental study focus at spectrally analyzing the stator current using the MCSA-FFT technique to detect static and dynamic rotor eccentricity faults.

Keywords: Asynchronous machines, static eccentricity, dynamic eccentricity, fast Fourier transform, stator current analysis.

Table de matières

Table de matières

Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XV
Liste des symboles et abréviations	XVI
Introduction générale.....	2

Chapitre I

L'état De L'art De Diagnostic Des Défauts Dans La Machine Asynchrone

I-1-Introduction.....	5
I-2-Constitution de la machine asynchrone.....	5
I-2-1- Stator	6
I-2-2- Rotor.....	7
I-2-3-Paliers.....	8
I-3- les défaillances des machines asynchrones.....	8
I-3-1- Défaillances d'ordre mécanique.....	10
I-3-1-1-Défaillances des roulements.....	10
I-3-1-2- Défaillances du flasque.....	10
I-3-1-3- Défaillances de l'arbre.....	10
I-3-1-4- Défauts d'excentricité.....	11
I.3.2- Défaillances d'ordre électrique	11
I.3.2.1 Défauts statorique.....	11
I.3.2.2 Défauts rotoriques.....	13
I.3.3 Etude statistique	14
I.4 Techniques de diagnostic dès les machines asynchrone.....	14
I-6 Conclusion.....	17

Chapitre II

Aperçu Sur Les Techniques: MCSA-FFT

II-1-Introduction.....	19
II.2- Défauts rotoriques.....	19
II-2-1- Excentricité.....	19
II-2-2- L'excentricité statique.....	19
II-2-2- L'excentricité dynamique.....	20
II-2-2- L'excentricité mixte.....	20

II-3- Technique de diagnostic (mcsa).....	21
II-3-1- Analyse spectral.....	21
II-3-1-1-Principe.....	21
II-3-1-2-Spectre d'un signal.....	22
II-3-1-2-1- Définition d'un signal.....	22
II-3-1-2-1- Définition de spectre d'un signal.....	22
II-3-2- Analyse spectrale de courant statorique (MCSA).....	22
II.3.2-1- Définitions.....	22
II.3.2.2- L'Approche de MCSA.....	24
II-4- Technique de la FFT.....	25
II-4-1- Surveillance du moteur asynchrone basée sur la technique de la MCSA.....	26
II-5- L'approche de réseaux neurone.....	26
II-5-1- Structure des réseaux neuronaux.....	27
II-5-2- Apprentissage des réseaux de neurones.....	27
II-6-Conclusion.....	29

Chapitre III

Analyse et Discussion Du Défaut D'excentricité

III-1- INTRODUCTION.....	31
III-2-détection des défauts d'excentricité par MCSA-FFT.....	31
III-2-1- Excentricité statique.....	31
III-2-1-1- Fonctionnement à vide.....	32
III-2-1-2- Fonctionnement en charge.....	37
III-2-2- Excentricité dynamique.....	43
III-2-2-1- Fonctionnement à vide.....	43
III-2-2-3- Fonctionnement en charge.....	48
III-4-Conclusion.....	59
Conclusion générale.....	60
Bibliographie.....	62

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones

Figure I.1. Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.	5
Figure I.2. Stator et enroulement d'un moteur asynchrone triphasé.	6
Figure I.3. Rotor à cage d'écureuil complète.	7
Figure I.4. Cage d'écureuil en aluminium moulé.	7
Figure I.5. Représentation d'un roulement à billes.	8
Figure I.6. Principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes.	9
Figure I.7. Défauts d'excentricité statique et dynamique.	11
Figure I.8. Différents défauts au niveau de stator de la machine asynchrone.	12
Figure I.9. Rupture d'une barre et d'un anneau de court-circuit.	13
Figure I.10. Répartition d'entaille des défauts.	14

Chapitre II : Aperçu sur les méthodes de diagnostic (MCSA et MVSA)

Figure II.1. Types d'excentricité de rotor.	21
Figure II.2. Principe de la surveillance par analyse spectral.	22
Figure II.3. Principe de la surveillance par analyse spectral.	25
Figure II.4. Diagramme de flux de la procédure de diagnostic par MCSA.	27

Chapitre III : Analyse et discussion du défaut d'excentricité

Figure III.1. Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ES $\delta=45\%$ [0-1000Hz] (à vide).	32
Figure III.2. Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec ES $\delta=45\%$ [0-150Hz] (à vide).	33
Figure III.3. Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec ES $\delta=45\%$ [150-300Hz] (à vide).	34
Figure III.4. Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec ES $\delta=45\%$ [300-450Hz] (à vide).	35
Figure III.5. Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec ES $\delta=45\%$ [450-755Hz] (à vide).	36
Figure III.6. Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ES $\delta=45\%$ [0-1000Hz] (en charge).	37

Figure III.7. Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec ES $\delta=45\%$ [0-150Hz] (en charge).	38
Figure III.8. Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec ES $\delta=45\%$ [150-300Hz] (en charge).	39
Figure III.9. Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec ES $\delta=45\%$ [300-450Hz] (en charge).	40
Figure III.10. Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec ES $\delta=45\%$ [450-755Hz] (en charge).	41
Figure III.11. Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [0-1000Hz] (à vide).	43
Figure III.12. Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [0-150Hz] (à vide).	44
Figure III.13. Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [150-300Hz] (à vide).	45
Figure III.14. Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [300-450Hz] (à vide).	46
Figure III.15. Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [450-755Hz] (à vide).	47
Figure III.16. Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [0-1000Hz] (en charge).	48
Figure III.17. Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [0-150Hz] (en charge).	49
Figure III.18. Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [150-300Hz] (en charge).	50
Figure III.19. Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [300-450Hz] (en charge).	51

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre III : Analyse et discussion du défaut d'excentricité

Tableau III.1 Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta_s=45\%$).	42
Tableau III.2 Tableau (II. 1) : Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta_s=30\%$).	53

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles et abréviations

MAS :	Machine asynchrone.
F.E.M :	La force électromotrice.
ASCM :	Analyse des Signatures des Courants du Moteur.
MCSA :	Motor Current Signature Analysis.
FFT :	Fast Fourier Transform.
RMS :	Root Mean Square.
RN :	Réseaux des neurons
exc :	Excentricité
ES :	Excentricité Statique
ED :	Excentricité Dynamique
N_{br} :	le nombre des barres rotoriques
n_d :	La vitesse de rotation du rotor.
g,s :	Le glissement.
f_s :	Fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation.
p :	Le nombre de paires de pôles.
$X(f)$:	La valeur d'un coefficient de Fourier à la fréquence.
$X(t)$:	Signal généré par le défaut à caractère transitoire.
ω :	Fréquence angulaire ou pulsation du mouvement.
f :	Fréquence du mouvement en Hz.
φ :	Phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps.
A_c :	Amplitude crête.
Acc :	L'amplitude crête à crée.
A_{eff} :	L'amplitude efficace.
f_{BE} :	Fréquence caractéristique du défaut de la bague externe du roulement.
f_{BE-I} :	Fréquence caractéristique du défaut de la bague externe dans le spectre du courant statorique.
f_s :	Fréquence de glissement.
ν :	Ordre d'harmoniques du temps.
N_b :	Nombre de billes de roulement.

Introduction générale

La machine asynchrone à cage d'écureuil était initialement destinée aux entraînements électriques à vitesse constante en raison de la complexité de sa commande et du suivi de ses paramètres rotoriques. Cependant, cette machine présente de nombreux avantages, tels que sa robustesse, son faible coût de fabrication et ses besoins d'entretien minimaux. Ces qualités justifient son utilisation répandue dans l'industrie. Le développement de l'électronique de puissance a également simplifié sa commande, rendant ces machines très populaires dans le domaine industriel.

Toutefois, certaines applications des moteurs asynchrones ne tolèrent pas les défauts imprévus, qu'ils soient mécaniques (comme l'excentricité du rotor, les défauts d'accouplement ou les défaillances des roulements) ou électriques et magnétiques (comme les courts-circuits dans les bobinages statoriques, les cassures des barres ou des portions d'anneaux de court-circuit, ou encore les cassures de dents). De plus, d'autres défauts peuvent résulter des éléments de l'entraînement, tels que les dysfonctionnements dans l'alimentation, la charge ou les réducteurs mécaniques.

La survenue d'un défaut dans la machine asynchrone à cage pendant son fonctionnement n'entraîne pas nécessairement un arrêt immédiat de la machine, mais elle affecte directement ses performances, notamment le couple électromagnétique, les courants et la vitesse. D'où la nécessité de diagnostiquer la machine pour identifier et déterminer les causes des défauts.

Ce mémoire est composé de trois chapitres. Le premier chapitre décrit la construction et fonctionnement de la machine à cage d'écureuil, présentation du deuxième chapitre elle est une définition générale de défauts d'excentricité du rotor et constitue la base de notre travail dans la dernière partie, le chapitre troisième détection et classification des défauts de rotor à l'aide de technique de MCSA-FFT

Chapitre I

L'ETAT DE L'ART DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DANS LA MACHINE ASYNCHRONE

I.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à explorer et analyser la structure des machines asynchrones ainsi que leur fonctionnement, y compris la composition interne de ces machines et les composants qui en font partie. Nous discuterons également des facteurs influençant les performances de ces machines et de la manière de diagnostiquer les problèmes potentiels qui pourraient survenir. De plus, nous fournirons un aperçu complet de plusieurs types de méthodes de diagnostic utilisées dans l'industrie pour détecter les problèmes des machines asynchrones. Nous examinerons les méthodes traditionnelles ainsi que les techniques modernes innovantes qui aident à identifier et diagnostiquer les défauts avec précision et efficacité.

À travers ce chapitre, notre objectif est de fournir une compréhension globale sur les machines asynchrones, ainsi que l'importance de comprendre leur structure et leur principe de fonctionnement, en plus de présenter une variété de méthodes et techniques pouvant être utilisées pour diagnostiquer les défauts potentiels.

I.2 Constitution de la machine asynchrone

La connaissance des composants d'une machine asynchrone nous aidera à comprendre comment le système est physiquement fonctionné. D'un point de vue mécanique, une machine asynchrone triphasée peut être divisée en trois parties différentes :

- ✓ Le stator (partie fixe) constitué de disques en tôle magnétique portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- ✓ Le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôle magnétique empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement bobiné ou injecté.
- ✓ Organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

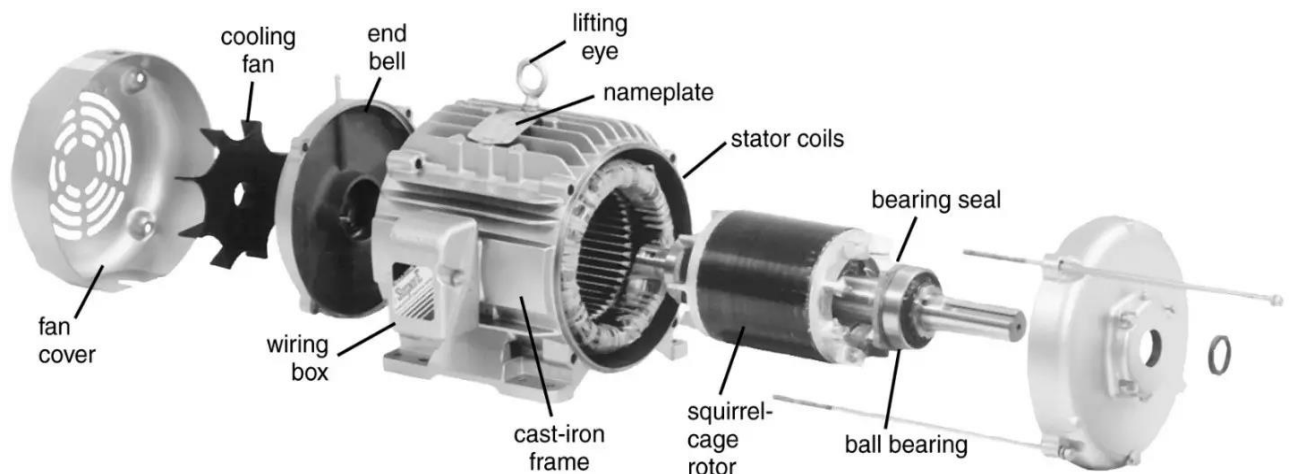


Figure (I.1) : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [EAC18]

I.2.1 Stator

Le stator d'une machine asynchrone est constitué de plaques d'acier qui abritent les enroulements du stator. Ces feuilles sont découpées en une seule pièce sur des machines plus petites et en plusieurs sections sur des machines plus grandes. Généralement recouvert de vernis pour limiter les effets des courants de Foucault. Enfin, ils sont assemblés par vis ou par soudure pour former le circuit magnétique du stator.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les bobinages du stator sont insérés dans les évidements prévus. Ces enroulements peuvent être imbriqués, ondulés ou insérés de manière concentrique. Le bobinage concentrique est souvent utilisé lors du bobinage mécanique de machines asynchrones.

Dans les grandes machines, le bobinage est constitué de plaques de cuivre de différentes sections, qui sont insérées directement dans les fentes. L'isolation entre le bobinage électrique et la plaque d'acier est réalisée à l'aide de différents types de matériaux isolants en fonction de la destination de la machine asynchrone.

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Nous représentons sur la figure I.1 les différentes parties de constitution du stator d'une machine asynchrone. Nous pouvons visualiser la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement de la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge. [BOL02], [DID04].

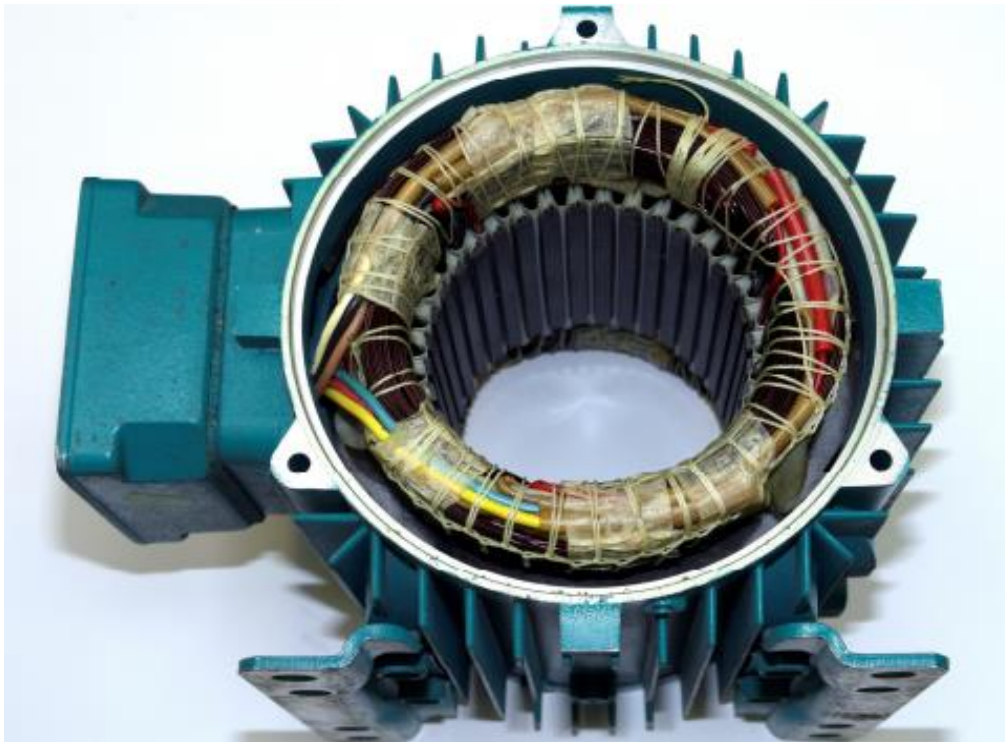


Figure (I.2) : Stator et enroulement d'un moteur asynchrone triphasé [SLI15].

I.2.2 Rotor

Le rotor présente quant à lui deux configurations dont le choix dépend de l'utilisation faite 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 usité 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. Les conducteurs des rotors à cage sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor. [BAB14].



Figure (I.3) : Rotor à cage d'écureuil complète [SAV24].

Si le métal laminé pouvait être retiré, il ne resterait que la cage d'écureuil en aluminium. Un démarrage plus efficace et un fonctionnement plus silencieux sont obtenus en inclinant légèrement les barres du rotor (conducteurs).

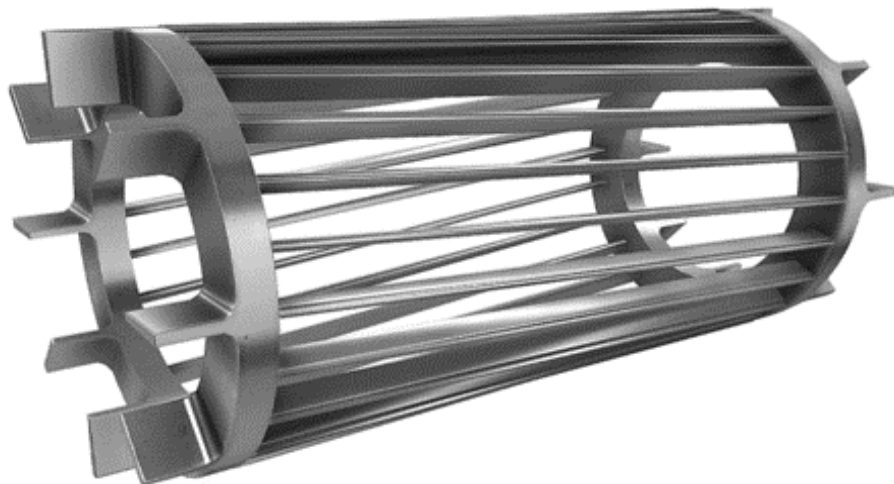


Figure (I.4) : Cage d'écureuil en aluminium moulé [SAV24].

I.2.3 Paliers

Les paliers sont constitués de roulements à billes et de flasques. Les roulements assurent le guidage en rotation libre de l'arbre. Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixés sur le carter statorique. L'ensemble ainsi établi constitue, alors, la machine asynchrone. [BAZ16].



Figure (I.5) : Représentation d'un roulement à billes [SAV24]

I.3 Le défaillances des machines asynchrones

La machine asynchrone est reconnue pour sa robustesse, mais elle peut également présenter des défaillances lorsqu'elle est utilisée sur de longues périodes et dans des conditions difficiles. Il est donc crucial de prendre des mesures pour diagnostiquer l'état de la machine au fur et à mesure qu'elle entre en mode défaillant. Un contrôle continu, qu'il soit en ligne ou hors ligne, des variables de la machine est nécessaire. Les défauts dans les machines électriques peuvent avoir diverses origines, telles que la conception, les tolérances de fabrication, l'installation, l'environnement opérationnel, la nature de la charge et le programme de maintenance. Comme toute autre machine électrique tournante, le moteur asynchrone est soumis à des forces électromagnétiques et mécaniques. Son fonctionnement stable avec un minimum de bruit et de vibrations est le résultat d'un équilibre entre ces forces dans des conditions normales. Cependant, lorsque des défauts surviennent, cet équilibre est perturbé, entraînant l'aggravation des défaillances. Ces défauts peuvent être classés en deux catégories : mécaniques et électriques. Ils peuvent avoir des origines internes, externes ou environnementales. Les défauts internes peuvent être classés en fonction de leur origine, électrique ou mécanique. Les défauts de roulement et de refroidissement sont généralement associés aux défauts du rotor, car ils concernent les pièces mobiles. Un schéma de défaut de la machine asynchrone, présenté dans la Figure I.6, classe les défauts selon leur emplacement : rotor et stator. [KAZ03], [BEN03].

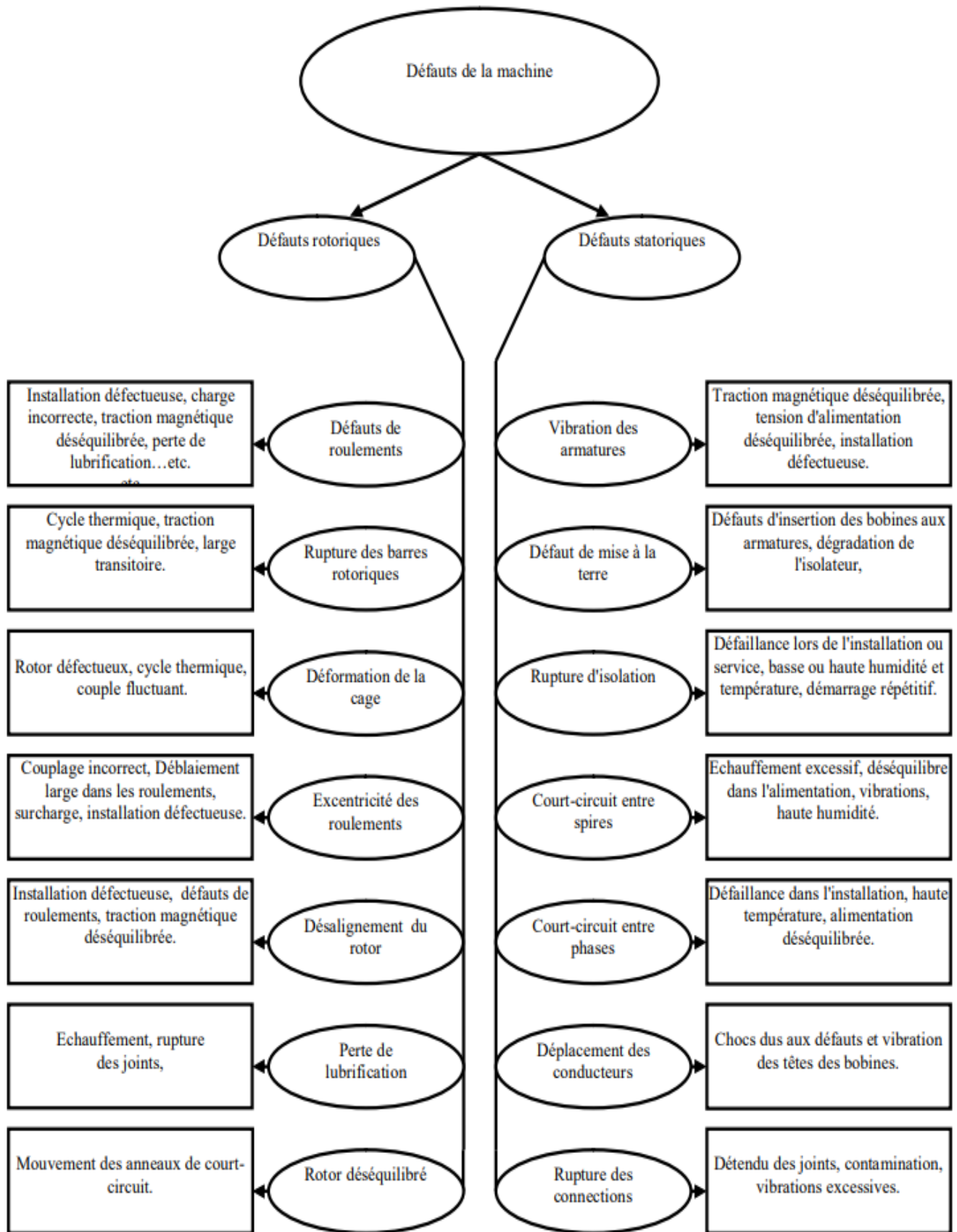


Figure (I.6) : Principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes [BOU08].

I.3.1 Défaillances d'ordre mécanique

Les défaillances d'ordre mécanique sont, en général, les plus souvent rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur. On énumérera par la suite certains de ces défauts [BOU08].

I.3.1.1 Défaillances des roulements

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tous types des machines électriques. Les défauts des roulements ont de nombreuses causes telles que l'écaillage de fatigue, la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou des causes électrique comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs, les dysfonctionnements de rotation à l'intérieur du palier de roulement, résultant d'un enroulement endommagé, écaillé ou fissuré, peuvent entraîner des perturbations dans la machine. Les courants électriques circulant à travers les roulements d'une machine asynchrone, notamment à des vitesses élevées, peuvent causer leur détérioration. [DID04].

I.3.1.2 Défaillances du flasque

Les défauts engendrés par les flasques de la machine asynchrone sont principalement attribuables à des erreurs de fabrication. En effet, un positionnement incorrect des flasques peut entraîner un désalignement des roulements à billes, provoquant ainsi une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Ce type de défaillance peut être détecté grâce à une analyse vibratoire ou à une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [BOU08].

I.3.1.3 Défaillances de l'arbre

Une fissure peut apparaître sur l'arbre de la machine en raison de l'utilisation d'un matériau inadapté lors de sa fabrication. À court ou à long terme, cette fissure peut évoluer vers une fracture nette de l'arbre, entraînant un arrêt immédiat de la machine asynchrone. De plus, les environnements corrosifs peuvent compromettre la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'exposition à l'humidité peut entraîner la formation de microfissures et conduire à la défaillance complète de la machine. Par ailleurs, une excentricité statique, dynamique ou mixte peut engendrer des contraintes importantes sur l'arbre moteur, contribuant ainsi à une fatigue accrue. Pour détecter ce type de défaillance, diverses méthodes d'analyse peuvent être utilisées,

telles que l'analyse vibratoire, l'analyse par ultrasons, l'analyse fréquentielle des courants absorbés, ou simplement une inspection visuelle de l'arbre de la machine. [DID04]

I.3.1.4 Défauts d'excentricité

Parfois, la machine peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).[BES17].

On distingue trois catégories d'excentricité (figure 1.7):

- **Le défaut d'excentricité statique** : est généralement dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator, dont la cause la plus fréquente est un défaut de centrage des asques.
- **Le défaut d'excentricité dynamique** : peut-être cause par une déformation du cylindre rotorique, ou la détérioration des roulements à billes.
- **L'excentricité mixte** : la plus fréquente, est la combinaison d'une excentricité statique et d'une excentricité dynamique.

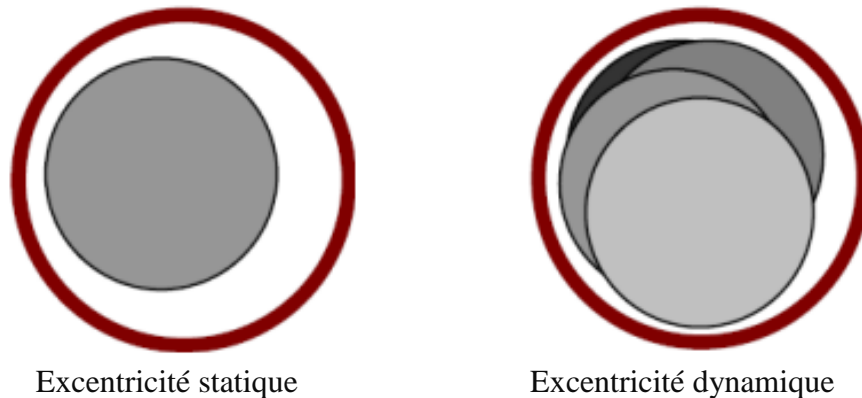


Figure (I.7) : Défauts d'excentricité statique et dynamique [BES16].

I.3.2 Défaillances d'ordre électrique

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certains cas, causer l'arrêt définitif de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances sont classées en deux catégories bien distinctes. On peut citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques [BOU01].

I.3.2.1 Défauts statorique

Les défauts statorique se manifestent sous la forme d'un court-circuit inter-spores, d'un court-circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse (figures I.8). Il

est schématisé par la connexion franche entre deux points du bobinage. Le court-circuit entre phases apparaît préférentiellement dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. Le court-circuit entre spires de la même phase peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement. Un court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Cependant, un court-circuit entre une phase et le neutre (via la carcasse) ou entre spires d'une même phase. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui a une répercussion directe sur le couple. Ce type de défaut perturbe aussi sensiblement les commandes développées sur la base du modèle de Park (hypothèse d'un modèle équilibré) [BAZ09].

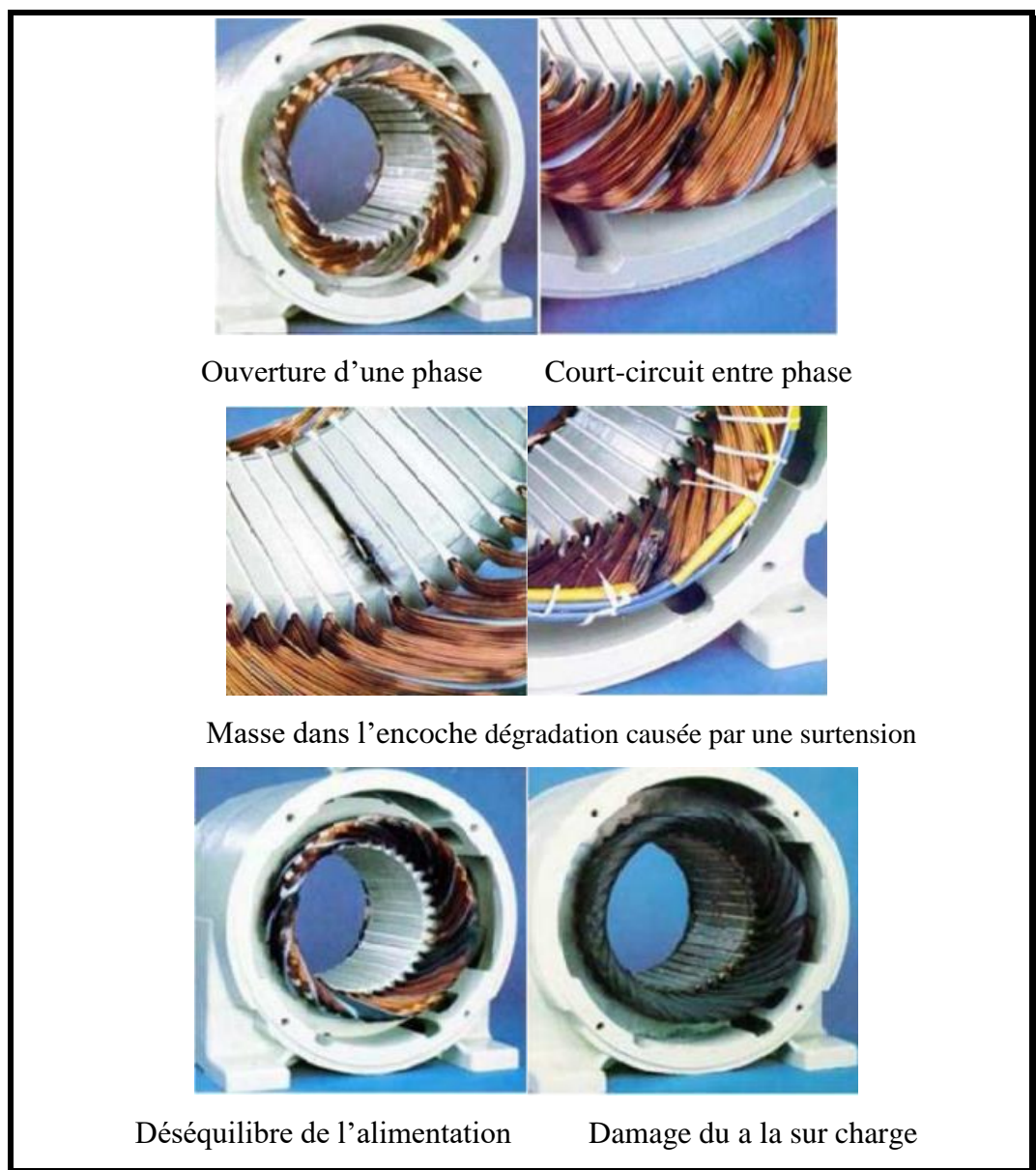


Figure (I.8) : Différents défauts au niveau de stator de la machine asynchrone [CHA16].

I.3.2.2 Défauts rotoriques

L'analyse du spectre du courant statorique en régime permanent fournit des indications sur les défaillances rotorique telles que les ruptures des barres, d'anneaux de court-circuit.[RAZ02].

- **Ruptures de barres** : La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine, ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées. [MED12].

- **Ruptures D'Anneaux** : La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotorique. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassures. [BOU01].

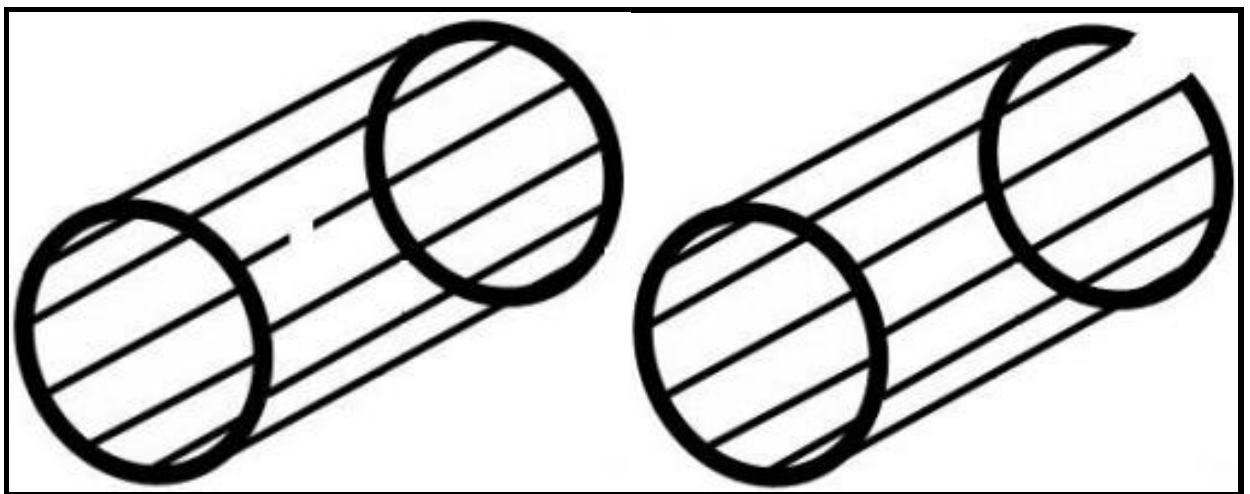


Figure (I.9) : Rupture d'une barre et d'un anneau de court-circuit [BOU08].

I.3.3 Etude statistique

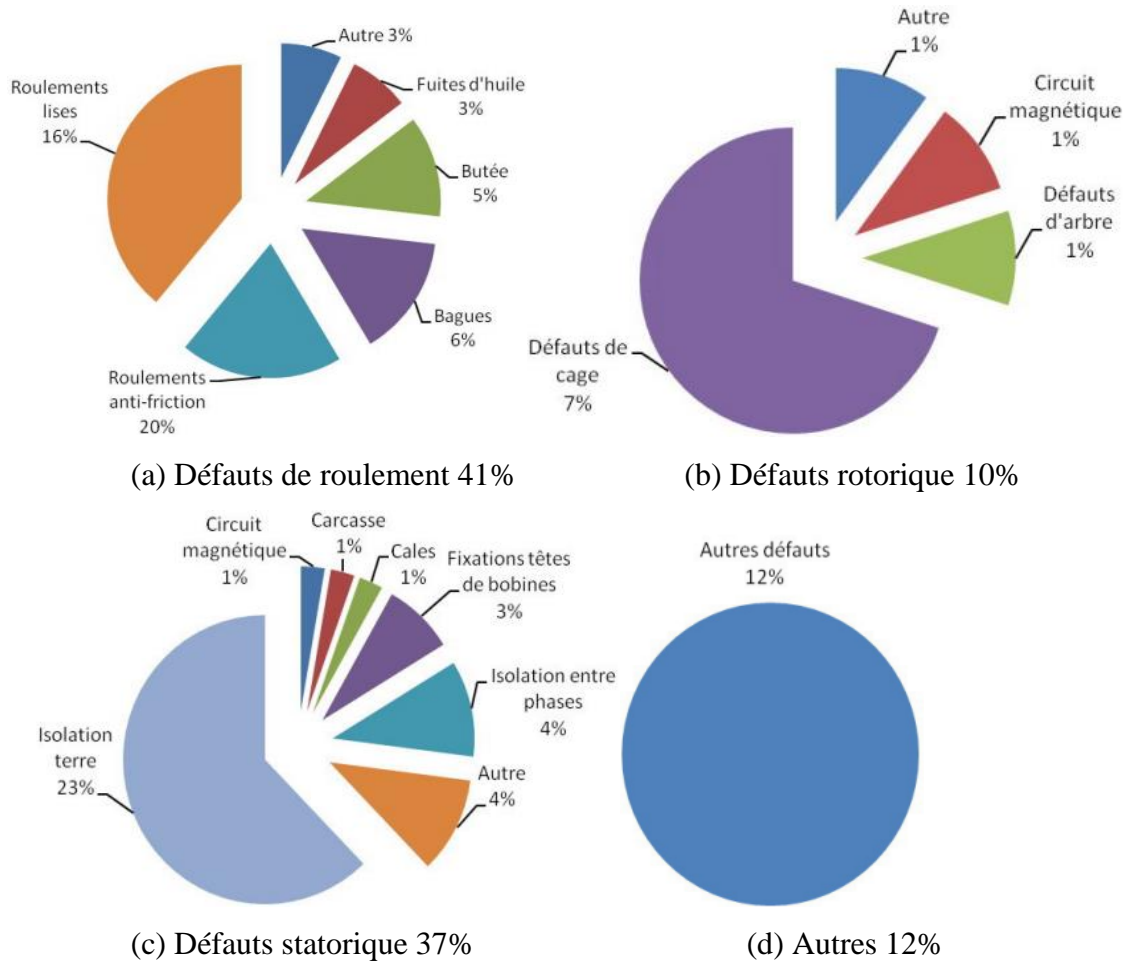


Figure (I.10) : Répartition d'entailée des défauts (EPRI) [COR82].

I.4 Techniques de diagnostic dès les machines asynchrone

Le diagnostic consiste à détecter, à localiser et éventuellement à identifier les défaillances et/ou les défauts qui affectent un système. Le diagnostic s'intègre dans le cadre plus générale de la surveillance et de la supervision. Il existe plusieurs techniques (méthodes) de diagnostic, notamment :

1) Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans le cas idéal de fonctionnement, les courants et les tensions statoriques de la machine sont équilibrés. Mais lors d'un défaut quelconque, il entraîne un déséquilibre électrique dans la partie statorique, ce qui provoque l'apparition des flux axial, on place à l'extrémité de la machine ou autour de l'arbre une bobine. Elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le flux de mesure peut être utilisé sans l'analyse spectrale pour le suivi de l'état électrique et détecter le défaut [ZOU15].

2) Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. On peut utiliser 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 [CHA16].

3) Diagnostic par redondance analytique

Comme pour les observateurs, la redondance analytique et la projection dans l'espace de parité sont basées sur l'exploitation des résidus issus du modèle de bon fonctionnement. La philosophie de cette approche est d'exploiter la redondance analytique existant dans les équations d'état lorsque celles-ci sont écrites sur un horizon d'observation. Le vecteur de résidus est alors généré en projetant les mesures observées sur cet horizon dans un espace appelé espace de parité [VAS09].

4) Diagnostic par mesure du courant statorique

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une MAS. Cette technique est dénommée dans la littérature « Motor Current Signature Analysis » (MCSA). Les défauts de la MAS se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par, Les raies spectrales qui apparaissent avec des fréquences qui sont directement liées à la vitesse de rotation de la machine, aux vitesses des champs tournants et aux paramètres de la machine. Ou bien, les raies spectrales ont une modification de leurs amplitudes, dans le spectre du courant [SAH10].

5) Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans la machine, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'Etat de santé de la machine.

6) Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour détecter les défauts. Une des plus connue repose sur le calcul des courants dits de Park. En fonction des courants de phase $i_{sa}(t)$, $i_{sb}(t)$, $i_{sc}(t)$, les courants de Park $i_d(t)$ et $i_q(t)$ peuvent être calculés pour

l'obtention de la courbe de Lissajous : $i_{qs} = f(i_{ds})$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut.

7) Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle

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, la logique floue, les algorithmes génétiques, les (PSO) ParticuleSwarmoptimisation, les (SVM) Support Vector Machine et la reconnaissance des formes (Pattern Recognition), qui peuvent être utilisées de manière indépendante ou combinées pour améliorer l'efficacité du diagnostic [BAZ16].

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure de la machine asynchrone de type cage d'écureuil, ainsi que la plupart de ses défauts, tant au niveau mécanique qu'électrique. Nous avons également réalisé une étude statistique dans laquelle nous avons fourni des pourcentages de défaillance pour chaque composant de la machine.

Enfin, nous avons exposé quelques techniques de diagnostic pour les machines asynchrones, en décrivant brièvement les principes de fonctionnement de chacune technique. Nous avons constaté qu'il existe de nombreuses méthodes de diagnostic pouvant être exploitées pour identifier les défauts et même en anticiper certaines avant leur survenue.

Chapitre II
APERÇU SUR LES TECHNIQUES:
MCSA-FFT

II.1 Introduction

Plusieurs approches sont considérées pour effectuer la surveillance et le diagnostic des machines asynchrones. Tout d'abord, l'approche est employée pour analyser les paramètres et les variables de l'entraînement et pour en caractériser l'évolution en fonction de la présence des défauts, par utilisation des méthodes différentes. Une approche de traitement de signal, en considérant l'analyse et le traitement de différentes grandeurs mesurables. Ces dernières peuvent être de nature mécanique (vitesse, couple, vibrations), thermique ou encore électrique (courants, tension puissance)

Dans ce chapitre, nous allons présenter des notions de base concernant deux méthodes couramment appliquées au diagnostic des défauts de la machine asynchrone qui sont: MCSA-FFT et Réseaux des neurones (RN).

II.2 Défauts rotoriques

Plusieurs défauts qui peuvent affecter le rotor, tels que les ruptures de barres rotoriques, excentricité du rotor, défaut dans le circuit magnétique, etc. Cette partie va expliquer le défaut d'excentricité rotorique attentivement.

II.2.1 Excentricité

Les impacts des défauts mécaniques se révèlent généralement au niveau de l'entrefer, sous forme d'irrégularités d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène en constante évolution, présent dès sa fabrication. Une certaine mesure d'excentricité est normale dans les machines électriques. Les fabricants et les utilisateurs spécifient généralement un niveau maximal admissible de 5 %, tandis que dans d'autres cas, une tolérance jusqu'à 10 % de la largeur d'entrefer est acceptée. Trois types d'excentricité sont généralement distingués :

II.2.2 L'excentricité statique

Généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle résulte d'un défaut de centrage des flasques et se manifeste même dans des machines fabriquées récemment en raison des méthodes de fabrication et d'assemblage (Voir figure I.7). La formule généralisée du défaut d'excentricité statique est :

$$f_{ES} = \left[\frac{kN_{br}}{p} (1 - g) + \mu \right] f_s \dots \text{(II. 1)}$$

II.2.3 L'excentricité dynamique

Cette forme d'excentricité est engendrée par une déformation du cylindre du rotor, une déformation du cylindre du stator, ou encore la détérioration des roulements à billes. Elle se traduit par un décalage du centre de rotation du rotor par rapport au stator, accompagné d'une rotation du centre du rotor autour du centre géométrique de ce stator. (Voir figure I.7). La formule généralisée du défaut d'excentricité statique est :

$$f_{ED} = \left[\frac{(kN_{br} + n_d)}{p} (1 - g) + \mu \right] f_s \dots \text{(II. 2)}$$

II.2.4 L'excentricité mixte

En pratique, les excentricités statiques et dynamiques ont souvent tendance à se trouver conjointement. Un certain niveau d'excentricité statique persiste généralement, même dans les machines récemment fabriquées. Cela entraîne des forces magnétiques d'attraction non compensées, régulières et unidirectionnelles [CHA17], et avec le temps cela peut conduire à la flexion d'un arbre et la dégradation de roulement ..., tout cela entamant une excentricité dynamique. Sans détection précoce, l'excentricité devient suffisamment grande pour développer des forces radiales déséquilibrées qui peuvent créer un frottement entre le stator et le rotor, ce qui mène à une panne très grave de la machine.

$$f_{exc} = f_s \left[1 \pm k \frac{(1-g)}{p} \right] \dots \text{(II. 3)}$$

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

La détection des excentricités est aussi possible en surveillant les harmoniques principales d'encoches du courant et certaines de leurs composantes spectrales latérales. Cette méthode nécessite la connaissance du nombre d'encoches rotoriques N_e . Les fréquences des composantes spectrales d'encoches et de celles associées aux excentricités d'entrefer dynamiques sont les suivantes :

$$f_{enc+exc} = f_s \left[(kN_{br} \pm n_d) \frac{(1-g)}{p} \pm \mu \right] \dots \text{(II. 4)}$$

μ : S'il y a un défaut d'excentricité statique.

$n_d=1$ ou 2 s'il y a un défaut d'excentricité dynamique.

N_{br} : C'est le nombre des barres rotoriques.

$k = 1, 2, 3, \dots$ et $\mu = 1, 3, 5, 7, \dots$ (l'ordre de l'harmonique de la Fmm du stator)

La présence d'une excentricité statique, modifie l'amplitude des harmoniques principales d'encoches du courant statorique, tandis que celle d'une excentricité dynamique fait apparaître de nouvelles raies spectrales.

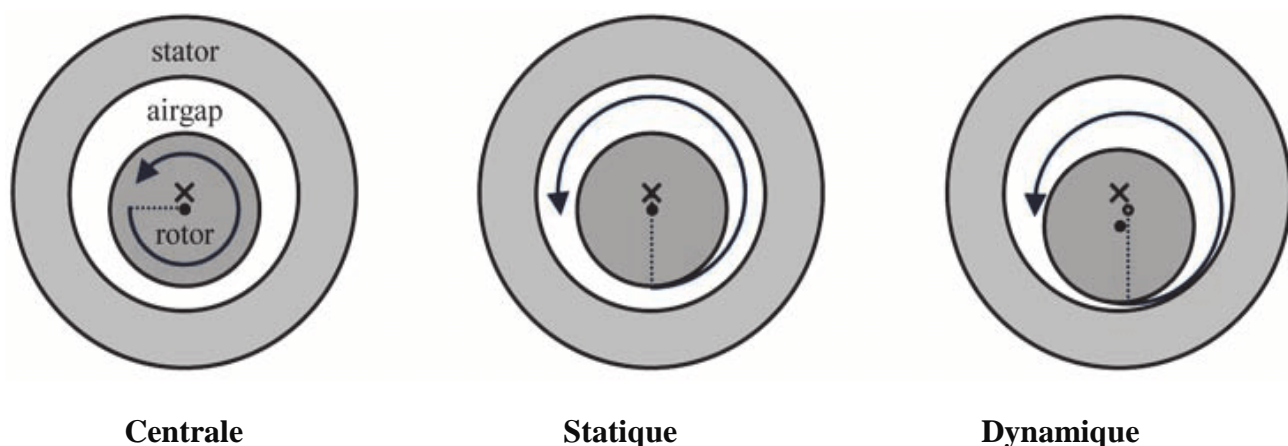


Figure (II.1) : Types d'excentricité de rotor [RES15].

II.3 Technique de diagnostic (MCSA)

L'analyse de la signature du courant moteur (MCSA) est largement utilisée depuis des décennies dans la détection de défauts moteurs en raison de son efficacité et de sa propriété non invasive. Basées sur le spectre de fréquence du courant statorique, les méthodes MCSA visent à extraire les composantes de fréquence caractéristiques pour différents types de défauts.

II.3.1 Analyse spectral

II.3.1.1 Principe

Depuis de nombreuses années, l'analyse spectrale est employée pour identifier les défaillances des machines électriques, en particulier les ruptures de barres dans le rotor des moteurs asynchrones à cage, l'usure des roulements, les déséquilibres et les court-circuits dans le bobinage. Ces situations sont propices à cette approche car de nombreux phénomènes se manifestent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation [KHA11].

La surveillance de la MAS par analyse spectrale implique de réaliser une transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, puis de visualiser les fréquences indésirables qui composent la signature du défaut dans la machine. Les grandeurs sélectionnées incluent les grandeurs mécaniques telles que les vibrations, le couple électromagnétique et les vitesses [BAC02].



Figure (II.2) : Principe de la surveillance par analyse spectral [KHA11].

II.3.1.2 Spectre d'un signal

II.3.1.2.1 Définition d'un signal

Un signal représente la quantification d'une grandeur physique. Parmi les mesures de grandeurs physiques, on retrouve les signaux sismiques, les mesures de poulx, les déplacements, les tensions, les intensités, etc. De nos jours, la plupart de ces grandeurs physiques sont converties en signaux électriques, puis numérisées sous forme de signaux binaires. Les mesures entièrement analogiques sont devenues rares.

II.3.1.2.2 Définition de spectre d'un signal

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

II.3.2 Analyse spectrale de courant statorique (MCSA)

II.3.2.1 Définitions

a) **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

b) 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 tous 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 "Motorv 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 [SAH03] [BENB03]:

- 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 [SAH03].
- la présence d'harmoniques caractérisant les défauts de la MAS [IBR09].

II.3.2.2 L'Approche de MCSA

La procédure de base de l'analyse de signature du courant moteur (MCSA) est la suivante :

1. Préparer la machine à tester.
2. Vérifier les spécifications de performance de cette machine, en utilisant les équations 1, 2, 3 et 4.
3. Analyser ces spécifications de performance et noter toute opération inhabituelle (un courant statorique est nécessaire).
4. Appliquer la stratégie de diagnostic des défauts.

La formule de fréquence de la tension déséquilibrée est :

$$f_{unbalance} = (1 - 2k)f_s \dots \text{(II. 5)}$$

Pour le cas sain, la fréquence du stator est indiquée comme dans le :

$$f_{healthy} = \left[k \frac{R}{p} (1 - g) \pm \mu \right] f_s \dots \text{(II. 6)}$$

L'analyse de signature du courant moteur (MCSA) est l'une des bonnes méthodes de diagnostic des défauts. Elle présente de nombreux avantages car elle est non intrusive, nécessite uniquement l'enroulement statorique, n'est pas affectée par la charge ou les asymétries, est simple à utiliser en termes de capteurs de courant et d'installation. Cependant, elle présente des inconvénients, tels que le fait que les données de courant statorique doivent être échantillonnées après que la vitesse du moteur a atteint un état stable [KHA12].

Pour expliquer l'approche MCSA dans la détection des défauts de excentricité de rotor, nous suivons la procédure illustrée dans la Figure (II.2).

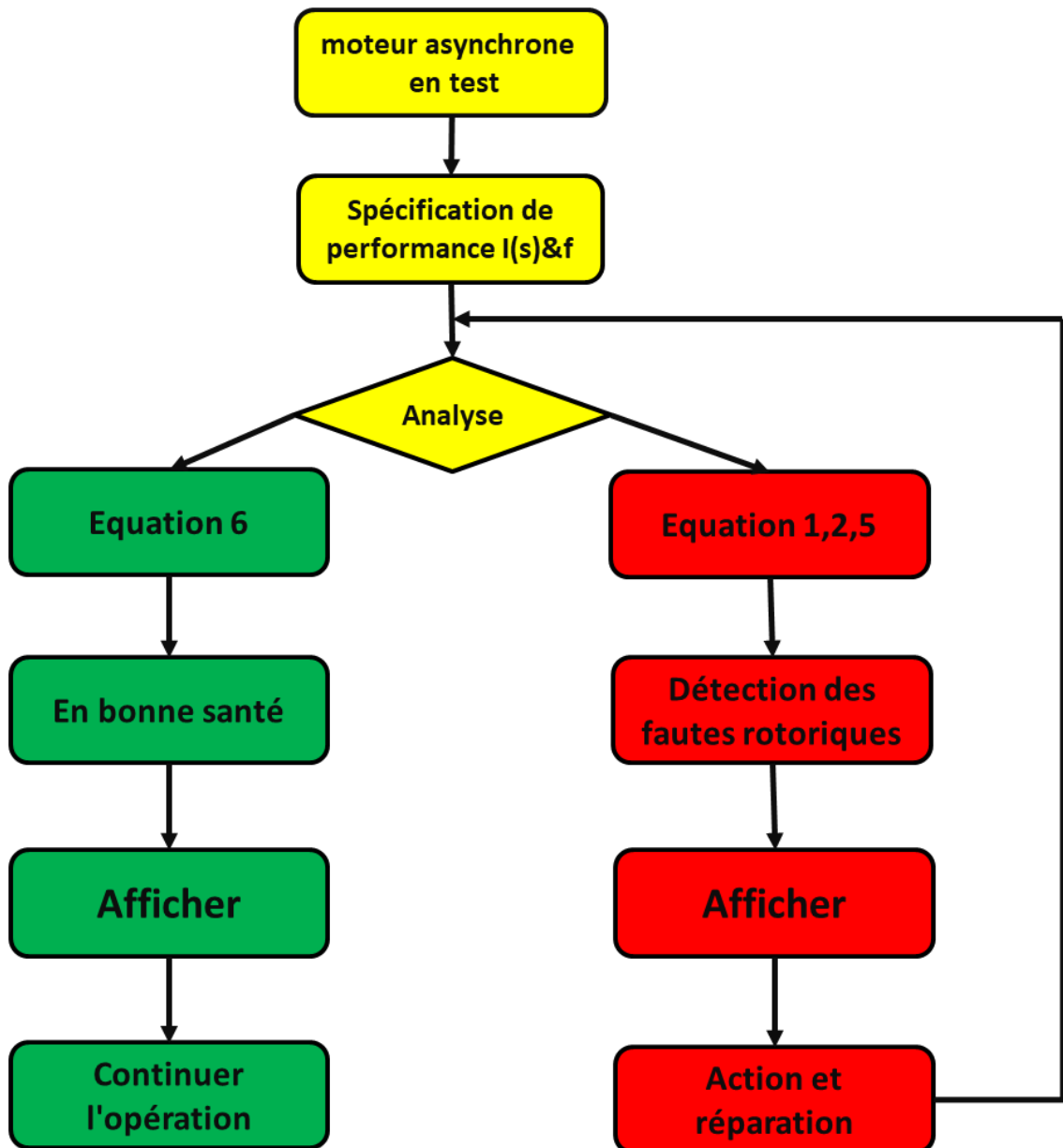


Figure (II.3) : Diagramme de flux de la procédure de diagnostic par MCSA [KHA12].

II.4 Technique de la FFT

La FFT (en français: Transformée de Fourier Rapide) représente un outil efficace qui permet de réduire le nombre d'opérations arithmétiques requises pour effectuer une transformation discrète. Son utilité croît également avec les progrès du traitement numérique des signaux, ainsi qu'avec la possibilité de l'appliquer à des signaux analogiques ou, plus généralement, à des fonctions continues dans de nombreux domaines scientifiques.

L'application de cette méthode est très simple car elle ne requiert pas l'installation d'équipement de mesure à l'intérieur de la machine électrique. Elle se limite à l'analyse du courant statorique du moteur [EMM99] [DID04] [SAH03].

II.4.1 Surveillance du moteur asynchrone basée sur la technique de la MCSA

D'après la littérature, les principaux signaux du moteur utilisés et utilisables pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine sont les suivants :

- ❖ Couple électromagnétique;
- ❖ Courant statorique;
- ❖ Vibration mécanique;
- ❖ Puissance instantanée statorique, etc.

Parmi tous ces signaux utilisable, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants et ce pour deux raisons :

- 1- La surveillance du courant statorique permet de détecter voire de diagnostiquer aussi bien des défauts électromagnétiques (déséquilibre de phase, court-circuit entre spire, excentricités d'entrefer, rupture de barres....) que des défauts purement mécaniques (dégradation des roulements à bille, désalignement)
- 2- Le courant statorique est très facile d'accès puisqu'il est utilisé pour la commande de la machine et qu'il peut être mesuré directement au poste d'alimentation.

II.5 L'approche de réseaux neurone

Le principal avantage de l'algorithme de réseaux de neurones est qu'il peut résoudre les problèmes non linéaires et découvrir les résultats par une relation très complexe entre les entrées et les sorties. Chaque réseaux de neurones se compose de trois couches représentées par des nœuds. Ces nœuds sont généralement connectés en fonction des systèmes. Construction des réseaux de neurones se compose de trois couches principales, couche d'entrée, couche cachée et couches de sortie [CHE16]:

Couche d'entrée : il s'agit de la première couche du réseaux de neurones, qui contient plusieurs nœuds, a reçu l'ensemble de données et des informations de différents types en fonction des formes d'entrée.

Calque caché : il peut être représenté en calques cachés ainsi qu'en un seul calque. Ces couches ont reçu les données de la couche d'entrée et implémentent une formulation mathématique dont les résultats sont envoyés à la couche de sortie sous forme de modèle

Couche de sortie : ces nœuds recevront le résultat par rapport à la sortie souhaitée pour vérifier les performances. Le programmeur effectuera et répétera ces étapes à moins que les résultats étroitement souhaités aient été atteints.

II.5.1 Structure des réseaux neuronaux

La structure du réseaux de neurones se compose de neurones dans les couches d'entrée, de la première fonction d'activation dans la couche d'entrée, des poids et des biais, des neurones cachés dans la couche cachée, de la deuxième fonction d'activation dans la couche de sortie et de la sortie souhaitée. La figure 3.4 montre la structure générale d'un réseaux de neurones. [JAM15]

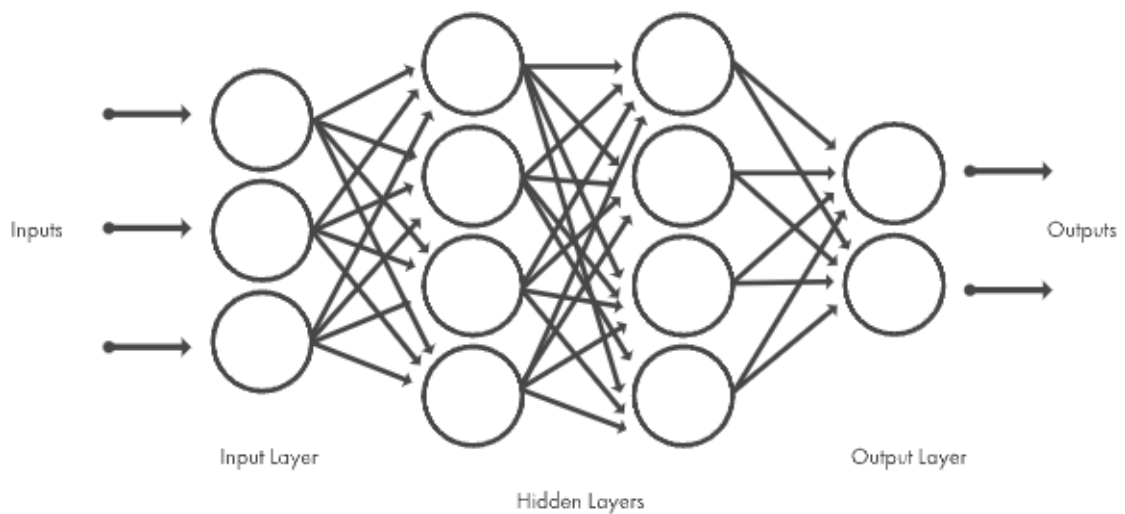


Figure (II.4) : Architecture typique d'un réseaux neuronal [MAT21].

II.5.2 Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est vraisemblablement la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux. L'apprentissage est une phase du développement d'un réseaux de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement. Durant cette phase de fonctionnement, le réseau adapte sa structure (les poids des connexions) afin de fournir sur ses neurones de sortie les valeurs désirées. Cet apprentissage nécessite des exemples désignés aussi sous l'appellation d'échantillon d'apprentissage ainsi qu'un algorithme d'apprentissage. Dans le cadre de cette définition, on peut distinguer deux types d'apprentissage : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé [BOU09].

a) Apprentissage supervisé

Dans ce mode, un professeur qui connaît parfaitement la sortie désirée ou correcte guide le réseau en lui apprenant à chaque étape le bon résultat. Donc l'apprentissage consiste à comparer le résultat obtenu avec le résultat désiré, puis à ajuster les poids des connexions pour minimiser la différence entre les deux. Les règles d'apprentissage supervisé les plus connues sont [OUL05], [HAY99]:

- La règle de Widrow-Hoff.
- La règle de rétro-propagation de gradient.

b) Apprentissage non supervisé

Dans l'apprentissage non supervisé, le réseau modifie ses paramètres en tenant compte seulement des informations locales. Ces méthodes n'ont pas besoin de sorties désirées préétablies. On peut citer la règle de Hebb.

Le choix de l'architecture et du type d'apprentissage des réseaux neuronaux dépend à la fois de l'application envisagée et des capacités de traitement du système sur lequel ces architectures seront déployées. Dans notre étude, nous avons opté pour l'utilisation de réseaux de neurones de type Perceptrons, en raison de leur simplicité de mise en œuvre et de l'exécution parallèle des calculs, ce qui favorise un apprentissage en ligne efficace. Nous avons également utilisé des réseaux de neurones de type Adaline, qui constitue un cas particulier des réseaux multicouches avec une architecture très simple comprenant une couche d'entrée et une couche de sortie.

II.6 Conclusion

L'analyse de la signature du courant moteur (MCSA) est une technique largement utilisée pour la détection de défauts dans les machines électriques. Cette technique offre de nombreux avantages, notamment l'identification des problèmes liés au casseur de barre et à l'excentricité du rotor. Dans le dernier chapitre, nous verrons comment exploiter la technique MCSA pour détecter les défauts de d'excentricité dans une machine à cage d'écureuil, et traiter les informations des défauts de la machine à l'aide de réseaux de neurones.

Chapitre III

ANALYSE ET DISCUSSION DU DEFAUT D'EXCENTRICITE

III.1 Introduction

De nombreuses techniques ont été développées pour effectuer des diagnostics dans le domaine des machines électriques. La plupart de ces méthodes reposent sur la comparaison des grandeurs mesurées à l'état normal et à l'état présentant un défaut. Dans ce chapitre, nous nous concentrons spécifiquement sur l'analyse spectrale du courant statorique, d'une machine asynchrone triphasée à cage, tant en état de fonctionnement normal que défectueux, en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT). Nous démontrons comment cette approche permet de détecter les signatures caractéristiques des défauts d'excentricité.

III.2 Détection des défauts d'excentricité par MCSA-FFT

La détection des défauts d'excentricité à l'aide de la méthode MCSA-FFT implique la collecte de données expérimentales de courant statorique des machines asynchrones. L'objectif est le traitement des signaux en utilisant l'analyse de transformée de Fourier rapide (FFT) pour les convertir en spectres de fréquences. L'analyse des spectres est pour identifier les signatures caractéristiques des défauts d'excentricité, tels que des composantes fréquentielles supplémentaires ou des changements d'amplitude. En comparant les spectres des conditions saines et défectueuses, des différences indicatives de défauts d'excentricité peuvent être identifiées. La validation et l'interprétation des résultats avec d'autres méthodes de diagnostic permettent de prendre des décisions de maintenance éclairées.

III.2.1 Excentricité statique

L'utilisation de l'analyse spectrale vise à détecter les défauts dans les machines asynchrones, en se concentrant notamment sur l'excentricité statique. Cette méthode s'avère particulièrement appropriée pour évaluer le courant, où des fréquences supplémentaires peuvent apparaître en présence de défauts. La surveillance par analyse spectrale du courant statorique consiste à appliquer une transformée de Fourier aux grandeurs affectées par le défaut, permettant ainsi de visualiser les fréquences supplémentaires qui constituent la signature d'un défaut dans la machine. Pour ce type de défaut d'excentricité statique, une analyse du spectre du courant statorique peut être effectuée dans deux conditions de fonctionnement : à vide (le glissement $g \approx 0.4\%$) et à 75% de la charge ($g \approx 3.2\%$). Comprendre les principes énoncés dans les règles des Chapitre précédent est essentiel pour identifier les harmoniques de survitesse partielle, qui revêtent une importance cruciale dans la détection de l'excentricité statique ou dynamique.

On souligne que l'excentricité mixte ne suit pas la règle de combinaison, ce qui signifie que ses harmoniques apparaissent systématiquement. Cette recherche vise à améliorer le diagnostic des défauts d'excentricité statique et dynamique pure. Dans notre cas spécifique (avec $nb=28$), cette règle n'est pas vérifiée. Par conséquent,

III.2.1.1 Fonctionnement à vide

Dans ce cas, la machine à un couple résistant de 0 Nm, ce qui équivaut à 0 % de charge et avec un glissement de 0.04 %. La figure ci-dessous montre le spectre du courant pour un intervalle de 0 à 1000 Hz.

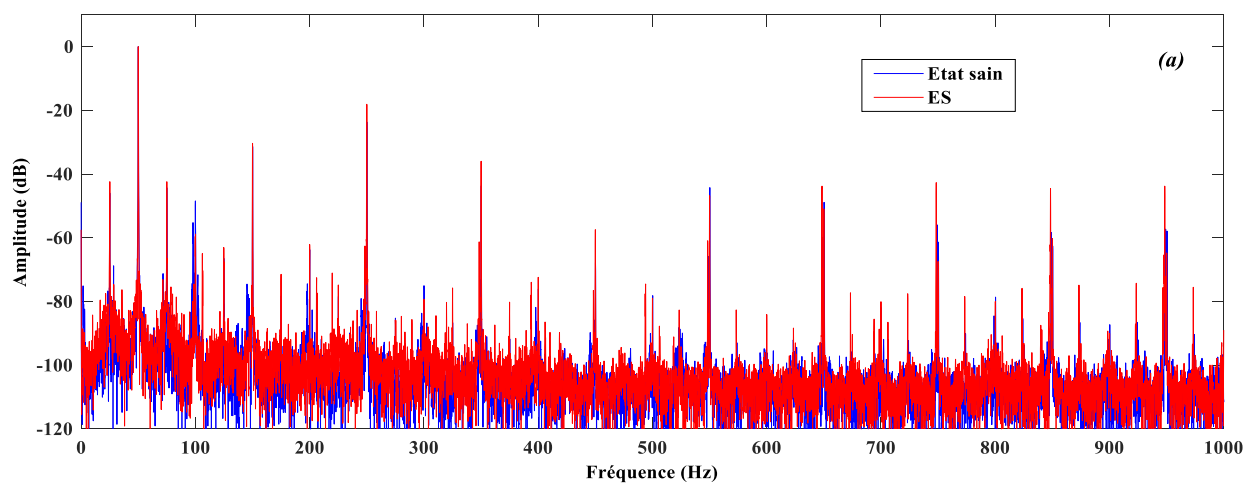


Figure (III.1) : Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ES $\delta=45\%$ [0-1000Hz] (à vide).

La figure (III.2) représente le spectre dans une bande fréquentielle de 0-150Hz. Le spectre montre clairement quelques harmoniques additionnels comme: 35.7Hz et 106.1Hz. Il est important de noter que la valeur est en correspondance avec la formule généralisée du défaut d'excentricité statique qui a été dans l'équation (II.1).

$$\left[\left(5 \cdot \frac{28}{2} \right) (1 - 0,004) - 69 \right] 50 = 36Hz \approx 35.7Hz$$

Mais la valeur 106.1Hz n'est pas en correspondance avec la formule (II.1). En plus, des fréquences dues à l'excentricité mixte sont clairement apparues.

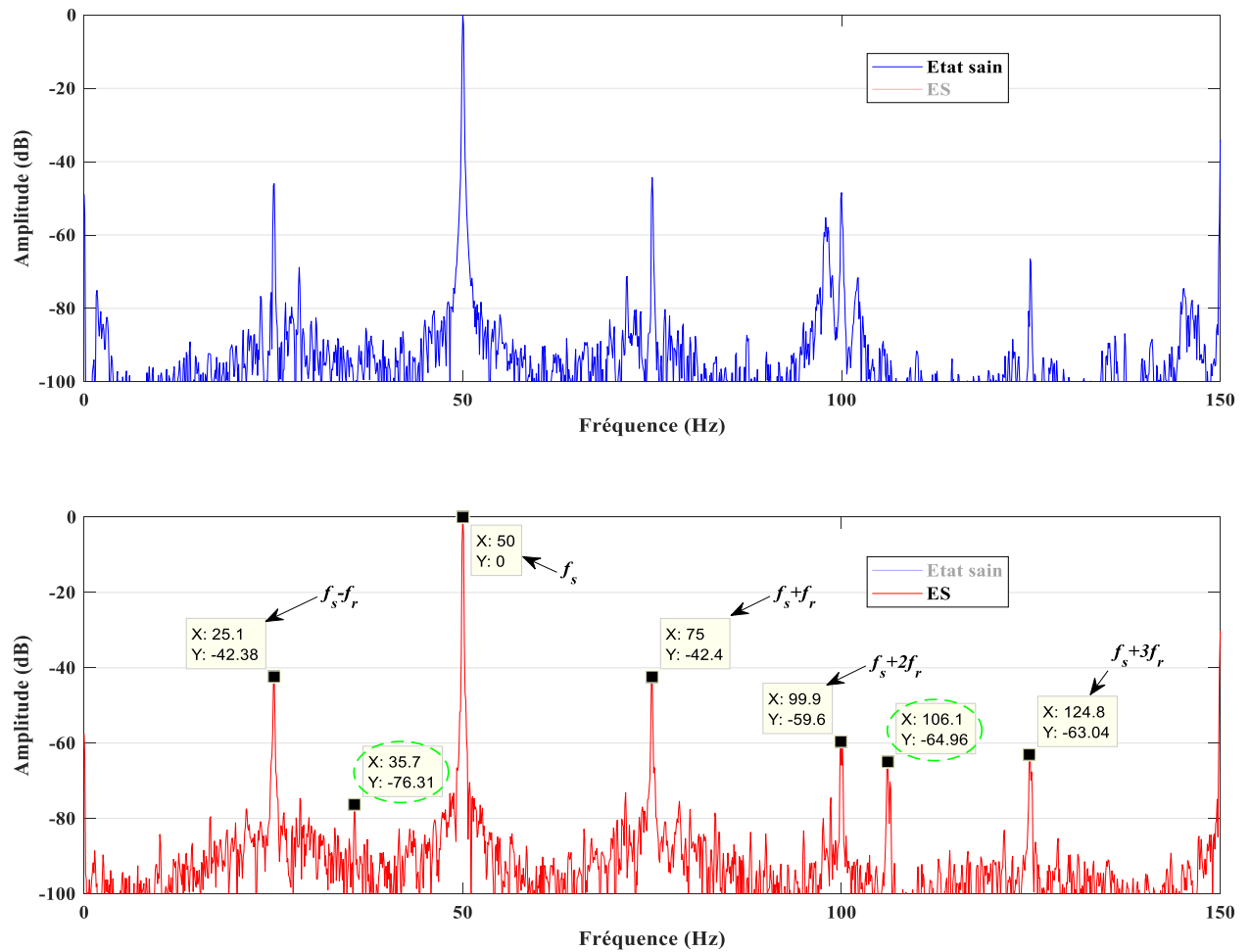


Figure (III.2) : Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec ES $\delta=45\%$ [0-150Hz] (à vide).

Le calcul de fréquences additionnels:

$$f_s - f_r = 50 - 24.2 = 25.8 \text{ Hz}$$

$$f_s + f_r = 50 + 24.2 = 74.2 \text{ Hz}$$

$$f_s + 2f_r = 50 + 2 \cdot 24.2 = 98.4 \text{ Hz}$$

$$f_s + 3f_r = 50 + 3 \cdot 24.2 = 124.8 \text{ Hz}$$

$$5f_s = 5 \cdot 50 = 250 \text{ Hz}$$

$$7f_s = 7 \cdot 50 = 350 \text{ Hz}$$

Ces fréquences ont la formule suivante: $f_{mix} = |f_s \pm kf_r|$ avec $k = 1, 2, 3, \dots$

Les signatures de défaut d'excentricité autour de la Sixième composante du courant (150 Hz) sont : $(3f_s \pm f_r) = ((3 \cdot 50) \pm ((1 - 0.004)/2)50) = 125.1\text{Hz}$ et 174.9Hz

Ces fréquences ont des amplitudes très importantes qui sont respectivement -63.04 dB et -71.45 dB, très proches des amplitudes des fréquences ($f_s \pm f_r$) qui ont respectivement les valeurs suivantes: -42.38 dB et -42.4 dB.

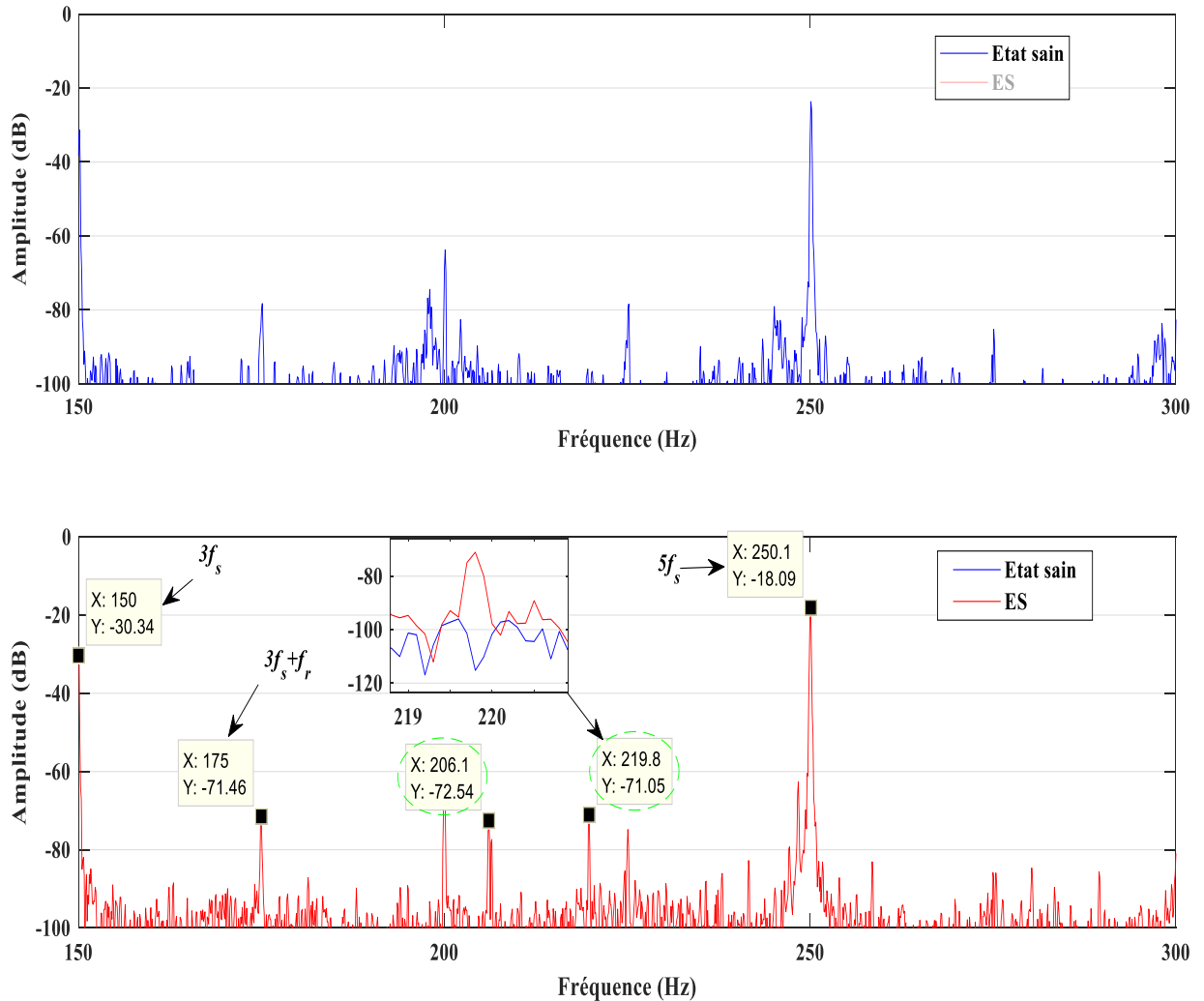


Figure (III.3) : Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec ES $\delta=45\%$ [150-300Hz] (à vide).

Le point X=219.8 avec l'amplitude de -71.05 dB est un excellent exemple de d'excentricité statique défauts car c'est clairement différent de l'état sain et il correspond au calcul suivant :

$$\left[\left(11 \times \frac{28}{2} \right) (1 - 0,004) - 149 \right] 50 = 219.2Hz \approx 219.8Hz$$

La figure III.2 présente le spectre dans une bande fréquentielle de 300 à 450 Hz. Le spectre révèle clairement quelques harmoniques supplémentaires, notamment à 325,1 Hz. Comme dans les exemples précédents, ces valeurs correspondent à la formule généralisée du défaut d'excentricité statique, comme indiqué dans l'équation II.1.

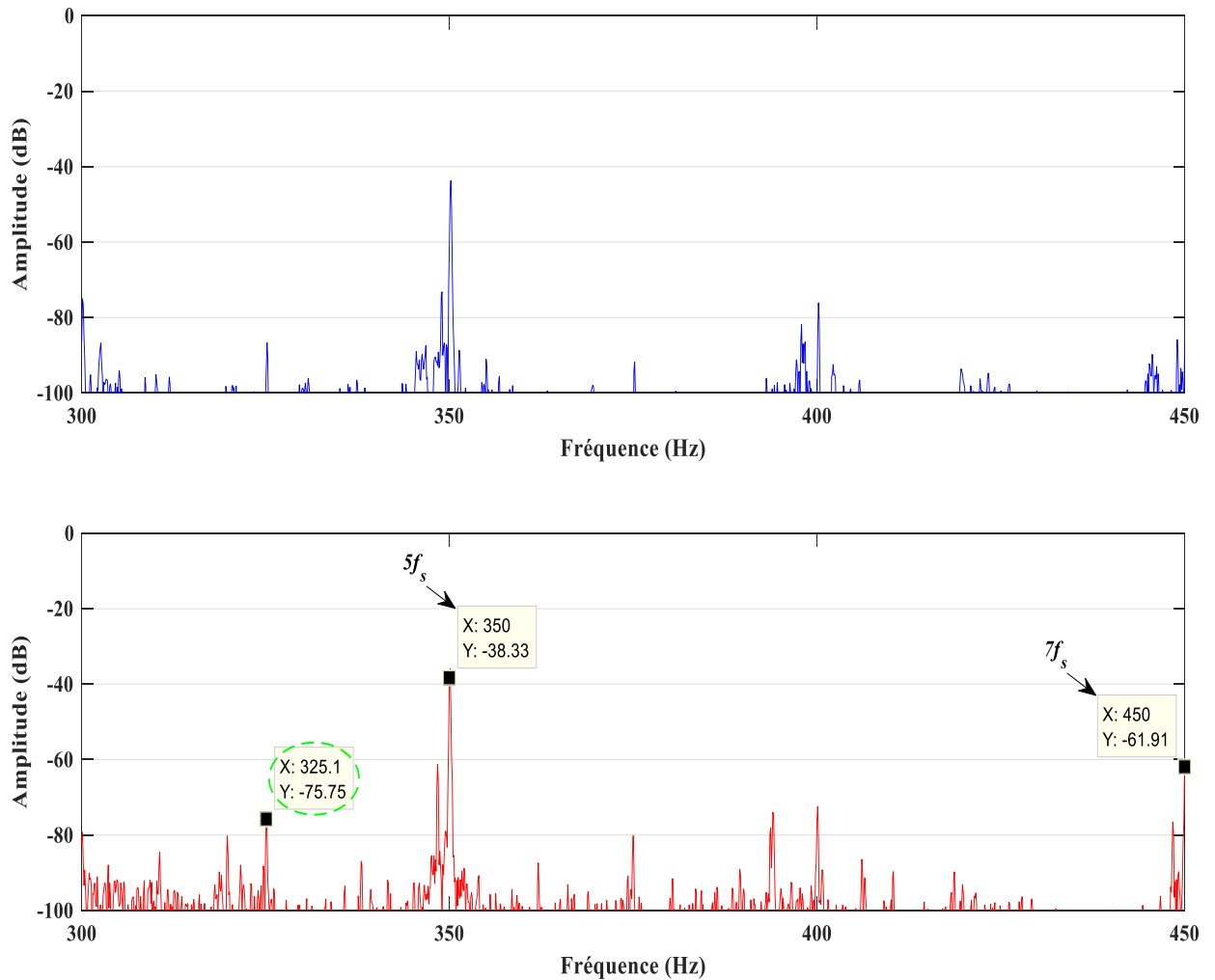


Figure (III.4) : Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec **ES** $\delta=45\%$ [300-450Hz] (à vide).

On remarque également que plus on avance dans le spectre de fréquence, plus il devient difficile de détecter les défauts, et l'effet sur l'amplitude est plus faible. Par exemple, à la fréquence de 325,1 Hz, l'amplitude atteint -75,75 dB, ce qui est la seule valeur apparaissant clairement à côté des fréquences fondamentales [HAL15].

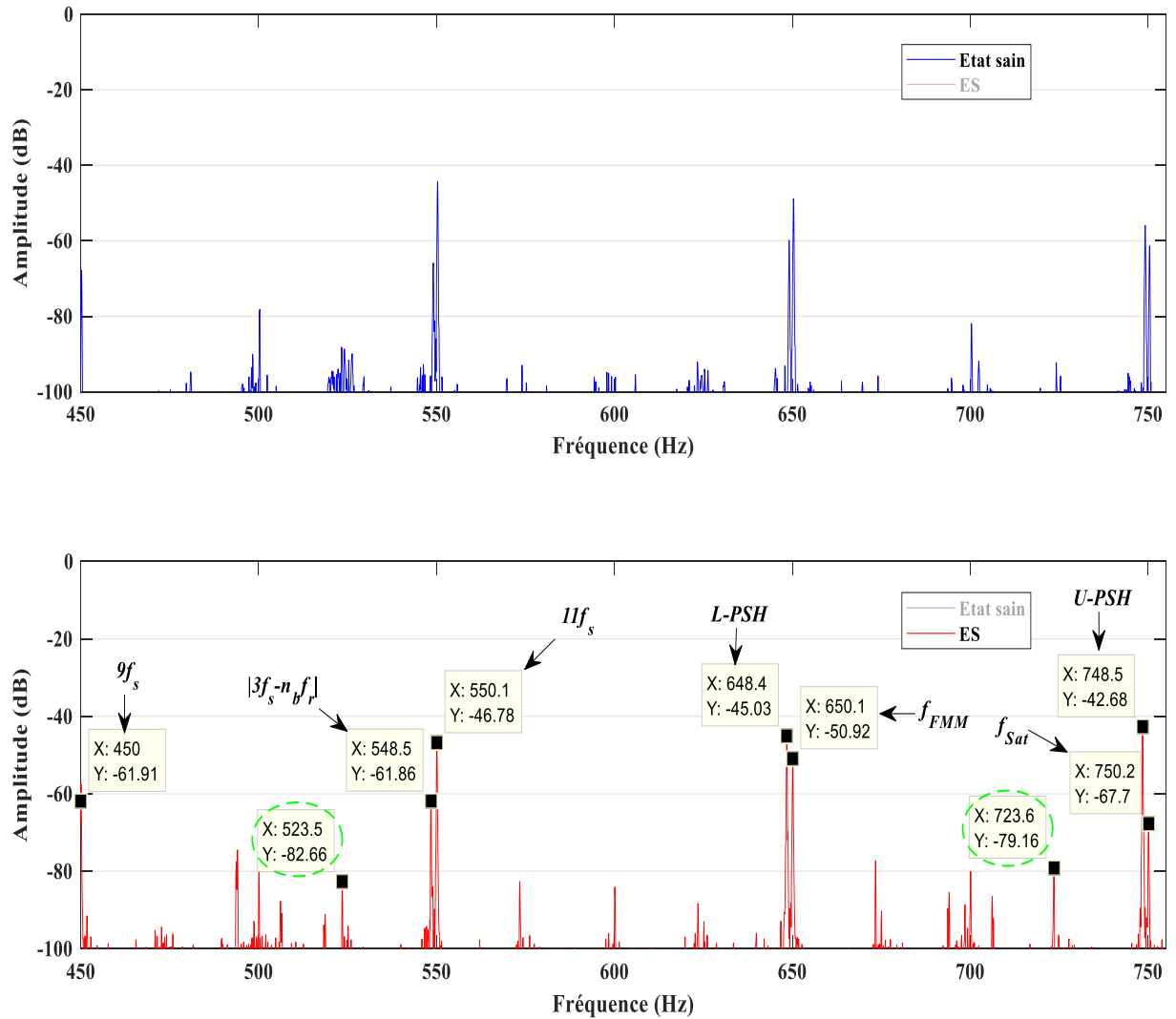


Figure (III.5) : Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec **ES** $\delta=45\%$ [450-755Hz] (à vide).

On observe que les composants harmoniques du courant statorique ne sont pas influencés par le changement d'état de la MAS (à vide) pour une excentricité statique. Certains points cohérents avec nos calculs théoriques peuvent être considérés comme des erreurs expérimentales ne déterminant pas la présence d'un défaut dans la machine. Cela est dû à la valeur du glissement pour un fonctionnement à vide, qui est proche de zéro.

III.2.1.2 Fonctionnement en charge :

Dans ce cas, la machine à un couple résistant de 15 Nm, ce qui équivaut à 75 % de charge et avec un glissement de 3.2 %. La figure ci-dessous montre le spectre du courant pour un intervalle de 0 à 1000 Hz.

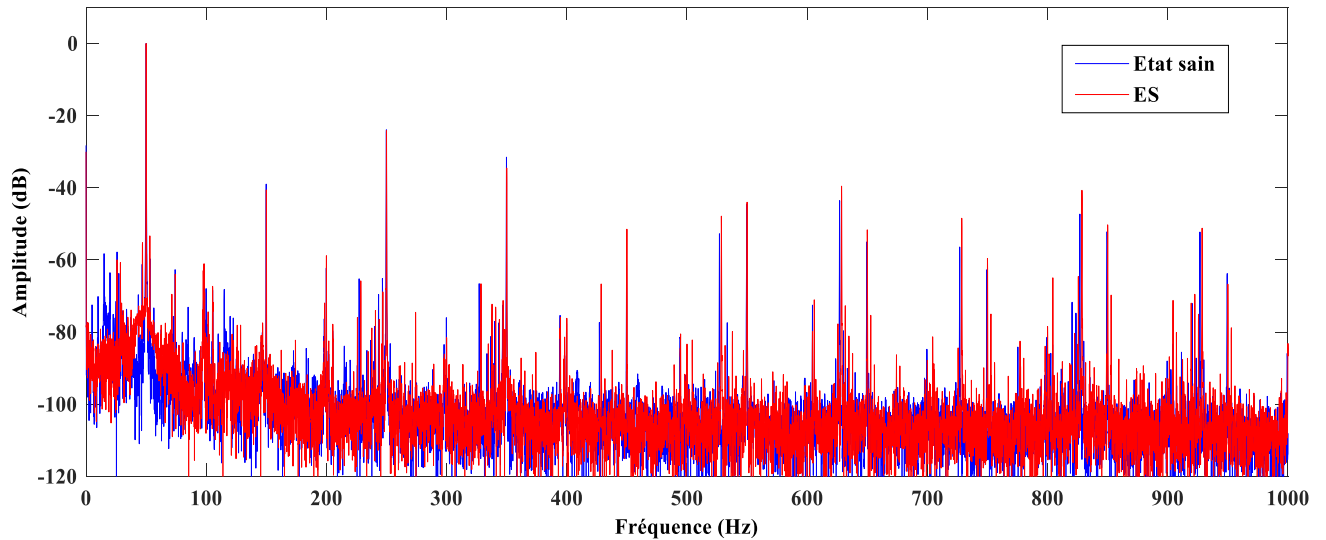


Figure (III.6) : Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ES $\delta=45\%$ [0-1000Hz] (en charge).

La figure III.6 montre les spectres de l'induction magnétique d'entrefer d'une machine asynchrone avec 45% d'excentricité statique pour une charge 15 Nm dans le but de vérifier l'influence de la charge sur les amplitudes de défaut. D'après cette figure on peut également constater que les amplitudes des signatures de défaut autour de la fondamentale augmentent par rapport à le cas de fonctions à vide. L'influence du moment d'inertie de la machine et sa relation avec la charge peut justifier cette relation inverse entre l'augmentation des amplitudes d'indices de défaut et la diminution de la charge.

La figure III.7 présente le spectre dans une bande fréquentielle de 0 à 150 Hz. Le spectre révèle clairement quelques harmoniques additionnels tels que 28,6 Hz, 71,4 Hz et 128,6 Hz. Il est important de noter que ces valeurs correspondent à la formule généralisée du défaut d'excentricité statique (en charge) décrite dans l'équation II.1.

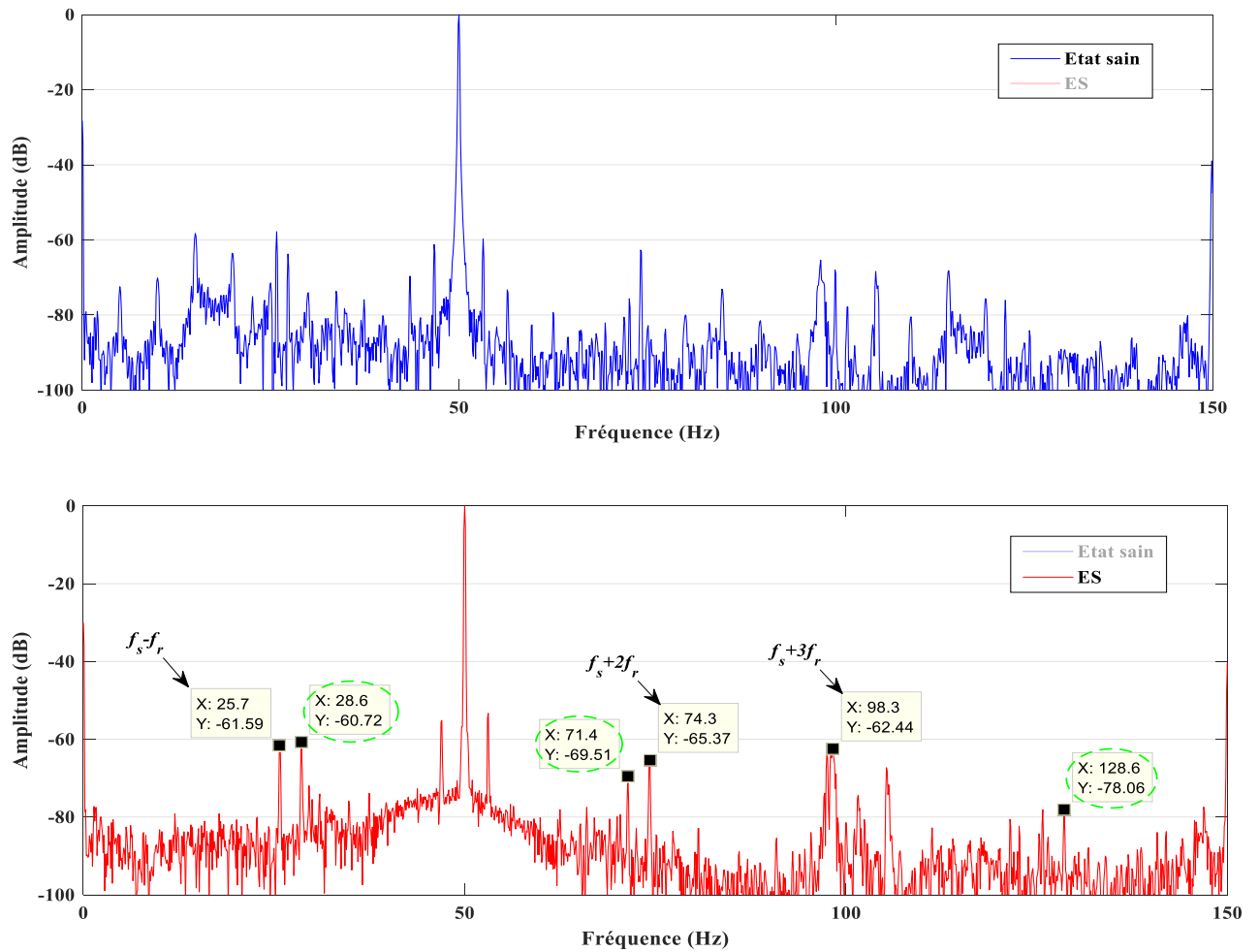


Figure (III.7) : Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec ES $\delta=45\%$ [0-150Hz] (en charge).

Le calcul de ce bond :

$$\left[\left(1 \cdot \frac{28}{2} \right) (1 - 0,032) - 13 \right] 50 = 27,6\text{Hz} \approx 28,6\text{Hz}$$

$$\left[\left(8 \cdot \frac{28}{2} \right) (1 - 0,032) - 107 \right] 50 = 70,8\text{Hz} \approx 71,4\text{Hz}$$

$$\left[\left(1 \cdot \frac{28}{2} \right) (1 - 0,032) - 11 \right] 50 = 127,6\text{Hz} \approx 128,6\text{Hz}$$

La figure III.8 présente le spectre dans une bande fréquentielle de 0 à 150 Hz. Le spectre révèle clairement quelques harmoniques additionnels tels que 205.4Hz, 247Hz. Il est important de noter que ces valeurs correspondent à la formule généralisée du défaut d'excentricité statique (en charge) décrite dans l'équation II.1.

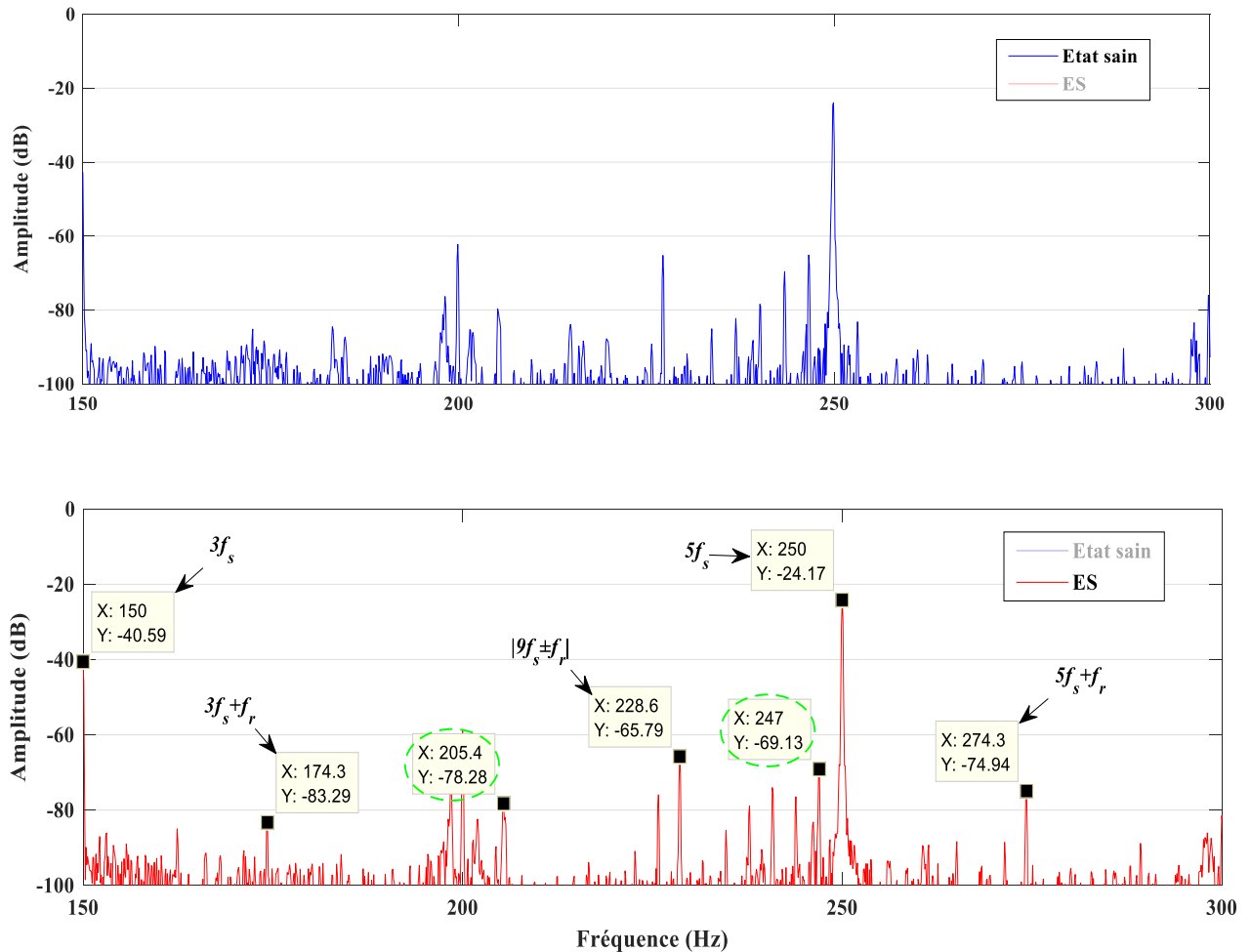


Figure (III.8) : Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec ES $\delta=45\%$ [0-150Hz] (en charge).

Le calcul de ce bond :

$$\left[\left(2 \cdot \frac{28}{2} \right) (1 - 0,032) - 23 \right] 50 = 205,2Hz \approx 205.4Hz$$

$$\left[\left(9 \cdot \frac{28}{2} \right) (1 - 0,032) - 117 \right] 50 = 248,4Hz \approx 247Hz$$

La figure III.9 présente le spectre dans une bande fréquentielle de 300 à 450 Hz. Le spectre révèle clairement quelques harmoniques additionnels tels que 337,8 Hz et 437,8 Hz. Il est important de noter que ces valeurs correspondent à la formule généralisée du défaut d'excentricité statique (en charge) décrite dans l'équation II.1.

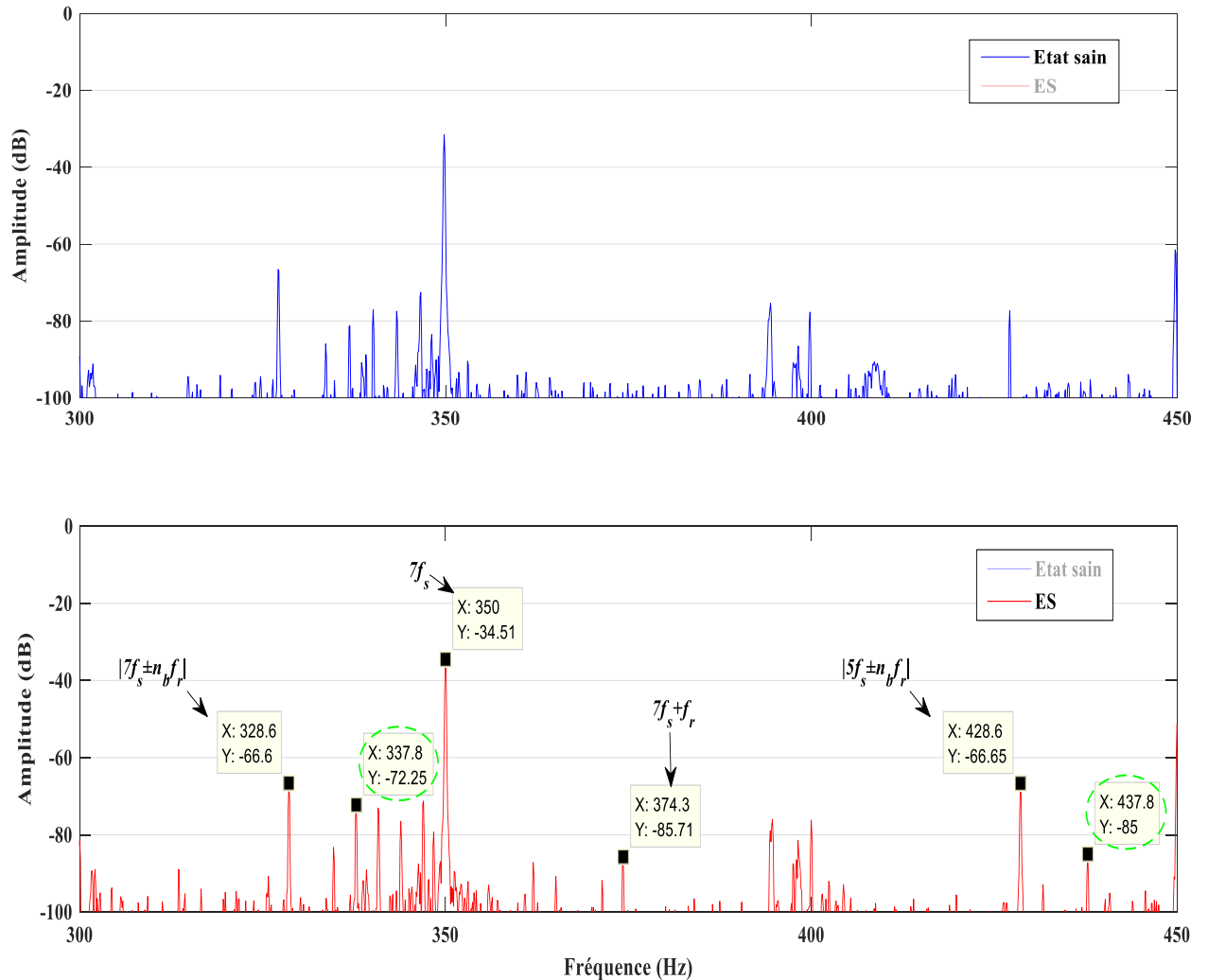


Figure (III.9) : Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec **ES** $\delta=45\%$ [0-150Hz] (en charge).

Le calcul de ce bond :

$$\left[\left(2 \cdot \frac{28}{2} \right) (1 - 0,032) - 23 \right] 50 = 205,2 \text{ Hz} \approx 205,4 \text{ Hz}$$

$$\left[\left(9 \cdot \frac{28}{2} \right) (1 - 0,032) - 117 \right] 50 = 248,4 \text{ Hz} \approx 247 \text{ Hz}$$

La figure III.10 présente le spectre dans une bande fréquentielle de 450 à 755 Hz. Le spectre révèle clairement quelques harmoniques additionnels tels que 337,8 Hz et 437,8 Hz. Il est important de noter que ces valeurs correspondent à la formule généralisée du défaut d'excentricité statique (en charge) décrite dans l'équation II.1.

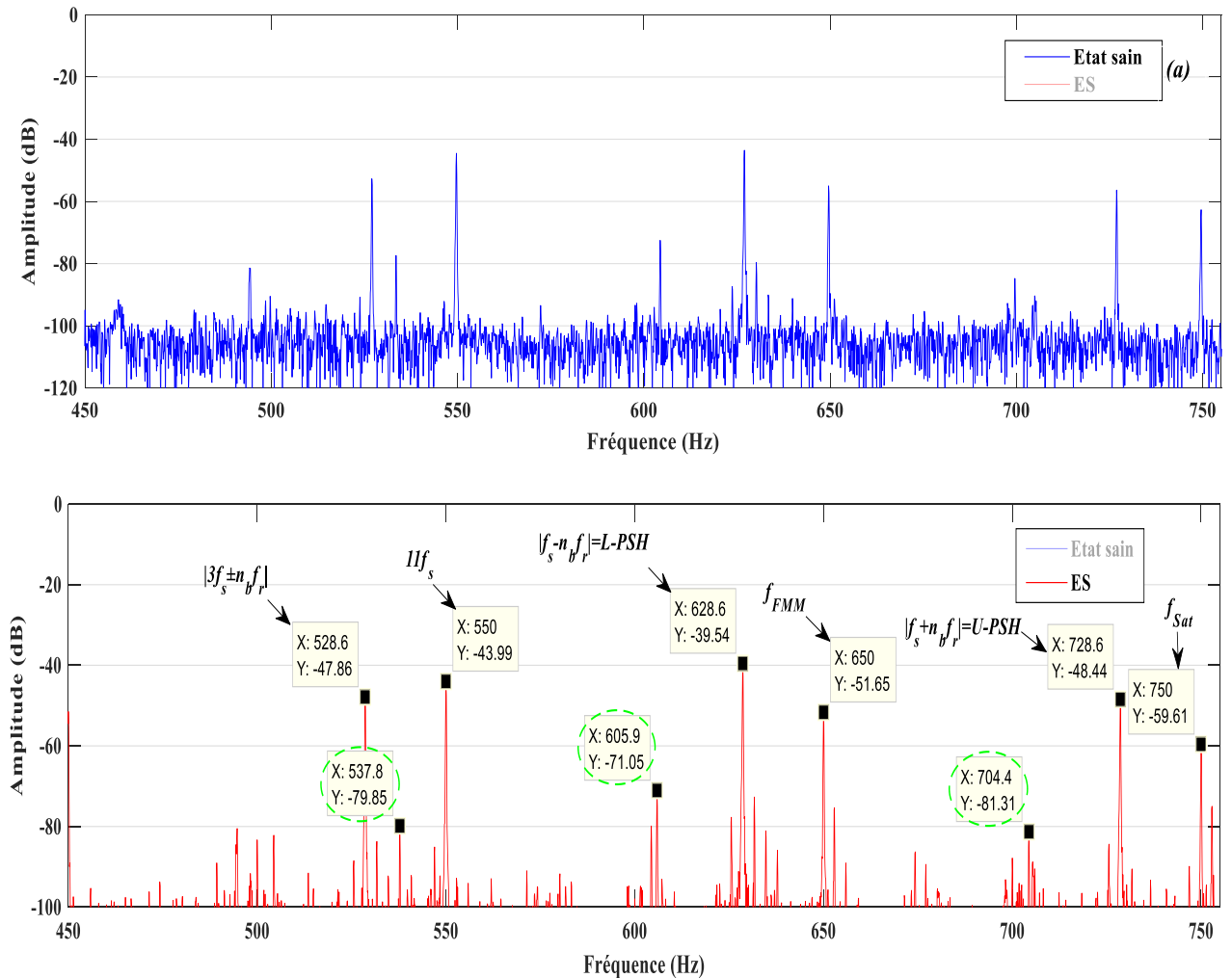


Figure (III.10) : Spectres du courant statorique d'état sain et spectres avec **ES** $\delta=45\%$ [0-150Hz] (en charge).

Lorsqu'il s'agit d'une excentricité du rotor, de nouvelles composantes harmoniques apparaissent dans le spectre du courant statorique, caractérisant ainsi ce défaut. Ces harmoniques, ou fréquences, sont déterminées par le nombre de paires de pôles et le nombre de barres rotoriques, et peuvent être exprimées par la relation (II.1).

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. La formule qui montre l'existence de cette excentricité est :

$$f_{mix} = |f_s \pm k f_r|$$

Les figures des deux cas (à vide et en charge) montrent le spectre du courant statorique pour des bandes fréquentielles différentes. Un zoom effectué dans chaque zone (autour de la fréquence fondamentale, autour des RSHs, ...etc.) nous a amené à un bon diagnostic. Les fréquences associées à l'excentricité mixte (en fonctionnement à vide) sont clairement identifiables. Pour $k=1$, nous obtenons $f_s+f_r=74.9$ Hz et $f_s-f_r=25.1$ Hz. Cette section présente les divers essais expérimentaux réalisés, à la fois en fonctionnement à vide et en charge, pour étudier l'excentricité statique. L'analyse du courant statorique nous a permis de confirmer, à partir de son spectre, la présence des harmoniques liées aux défauts.

Tableau (II. 1) : Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta=45\%$).

Formules des Fréquences caractéristiques	Valeurs Théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amplitude (dB) ($\delta_s=0\%$)	Amplitude (dB) ($\delta_s=45\%$)
$f_s - f_r$	25.8	25.8	-57.80	-59.97
$f_s + f_r$	74.2	74.1	-62.69	-63.96
L-PSH	627.6	628.6	-43.55	-39.54
U-PSH	727.6	728.6	-56.40	-48.44
$ 7f_s - n_b f_r $	327.6	328.6	-66.57	-66.60
$ 5f_s - n_b f_r $	427.6	428.6	-77.35	-66.65
$5f_s$	250	250	250	-24.17
$5f_s + f_r$	274.2	274.2	/	-74.51
$7f_s$	350	350	-31.51	-34.51
$7f_s + f_r$	374.2	374.2	/	-85.60

III.2.2 Excentricité dynamique

Dans cette section, nous effectuons l'analyse d'une machine asynchrone triphasée présentant un défaut d'excentricité purement dynamique. L'objectif de ce paragraphe est de détecter les signatures caractéristiques de ce défaut d'excentricité dynamique à l'aide des formules suivantes :

$$f_{ED} = \left[\left(\frac{kn_b \pm n_d}{p} \right) (1 - s) \pm \mu \right] \cdot f_s$$

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 figures suivants illustre le spectres du courant statorique pour un moteur asynchrone sain et un autre avec un défaut d'ED sous un fonctionnement à vide ($s \approx 0.4\%$).

III.2.2.1 Fonctionnement à vide

Dans ce cas, la machine à un couple résistant de 0 Nm, ce qui équivaut à 0 % de charge et avec un glissement de 0.04 %. La figure ci-dessous montre le spectre du courant pour un intervalle de 0 à 1000 Hz.

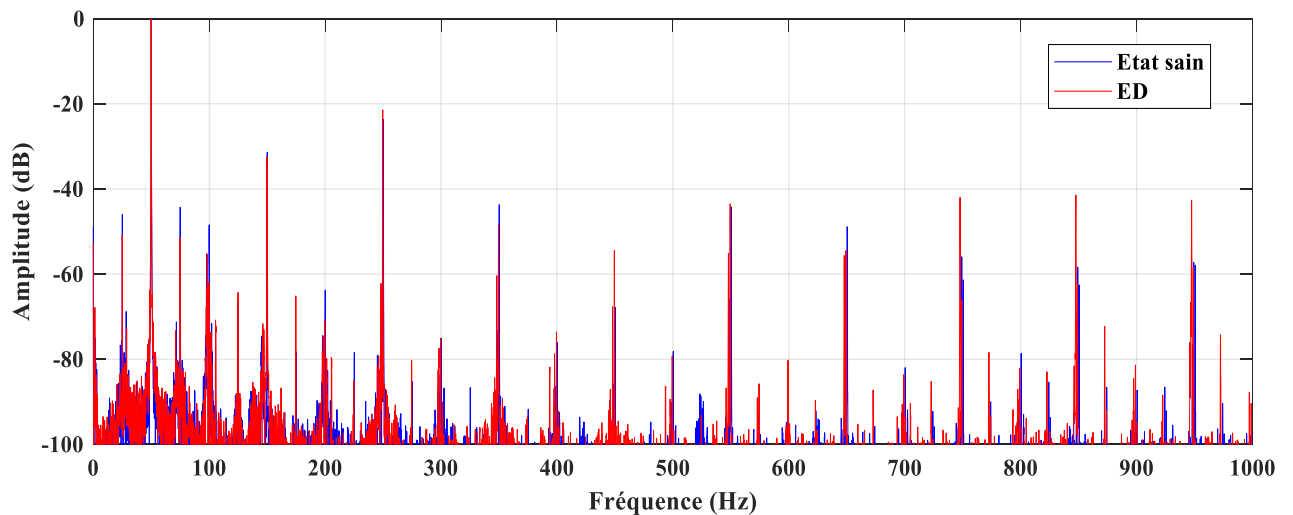


Figure (III.11) : Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [0-1000Hz] (à vide).

Les fréquences proches de la fréquence fondamentale sont le résultat de l'excentricité mixte. Ces harmoniques présentent l'avantage de ne pas exiger une connaissance précise de la conception de la machine asynchrone, car elles ne contiennent pas de termes associés à celle-ci.

La figure III.12 présente le spectre dans une bande fréquentielle de 0 à 150 Hz. Le spectre révèle clairement quelques harmoniques additionnels tels que 71.1 Hz, 105.6 Hz et 146.3 Hz. Il est important de noter que ces valeurs correspondent à la formule généralisée du défaut d'excentricité dynamique décrite dans l'équation II.2.

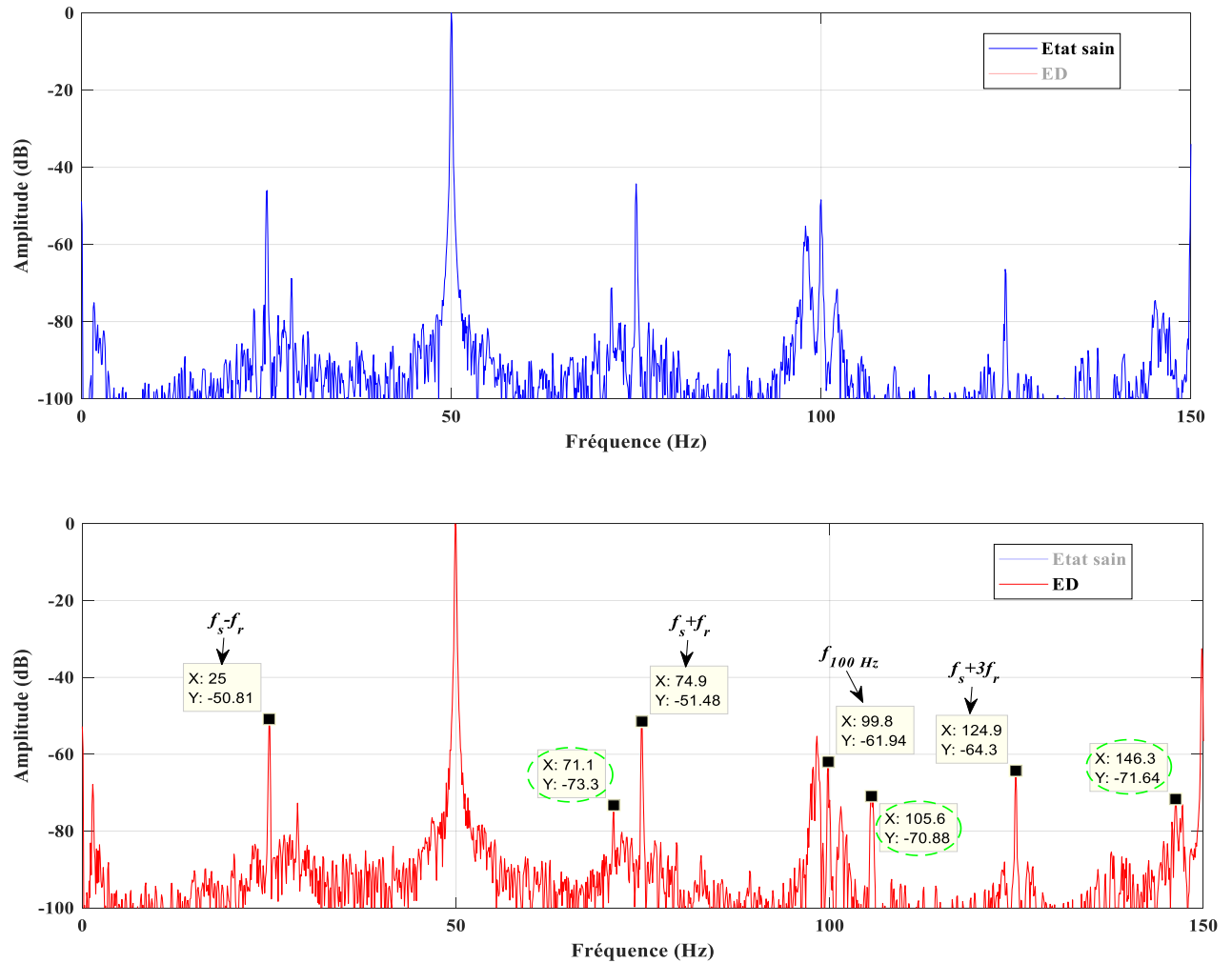


Figure (III.12) : Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [0-150Hz] (à vide).

Le calcul de ce bond :

$$\left[\left(10 \cdot \frac{28}{2} + 1 \right) (1 - 0,004) - 139 \right] 50 = 71.8 \text{ Hz} \approx 71.1 \text{ Hz}$$

Mais la valeur 105.6 Hz n'est pas en correspondance avec la formule (II.2). En plus, des fréquences dues à l'excentricité mixte sont clairement apparues.

La figure III.13 présente le spectre dans une bande fréquentielle de 150 à 300 Hz. Le spectre révèle clairement quelques harmoniques additionnels tels que 205.6 Hz et 248.2 Hz. Il est important de noter que ces valeurs correspondent à la formule généralisée du défaut d'excentricité dynamique décrite dans l'équation II.2.

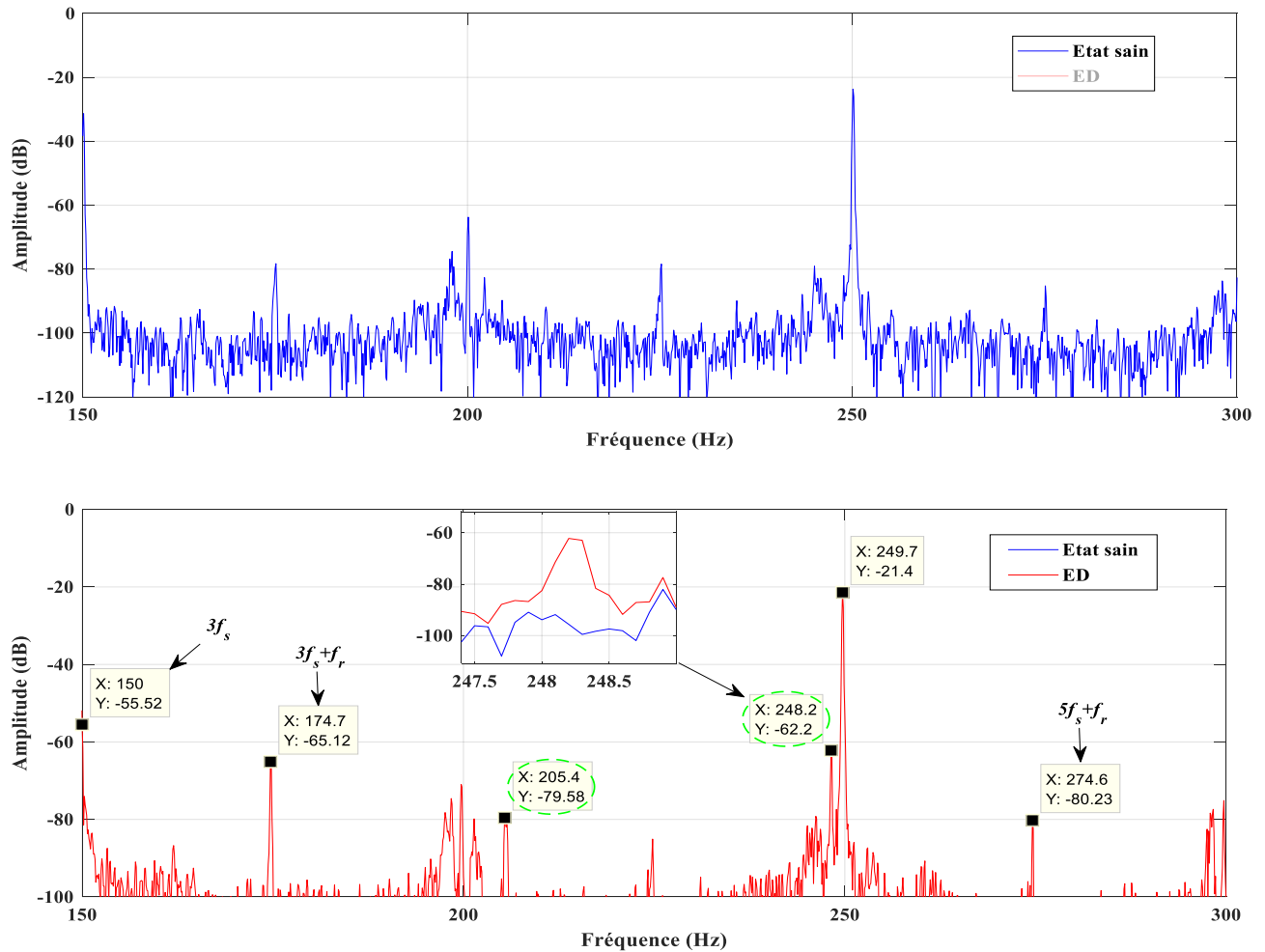


Figure (III.13) : Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [150-300Hz] (à vide).

Le calcul de ce bond :

$$\left[\left(1 \cdot \frac{28}{2} - 2 \right) (1 - 0,004) - 7 \right] 50 = 247.6 \text{ Hz} \approx 248.2 \text{ Hz}$$

La figure III.14 présente le spectre dans une bande fréquentielle de 300 à 450 Hz. Le spectre révèle clairement quelques harmoniques additionnels tels que 393.9 Hz, 399.6 Hz et 449.5 Hz. Il est important de noter que ces valeurs correspondent à la formule généralisée du défaut d'excentricité dynamique décrite dans l'équation II.2.

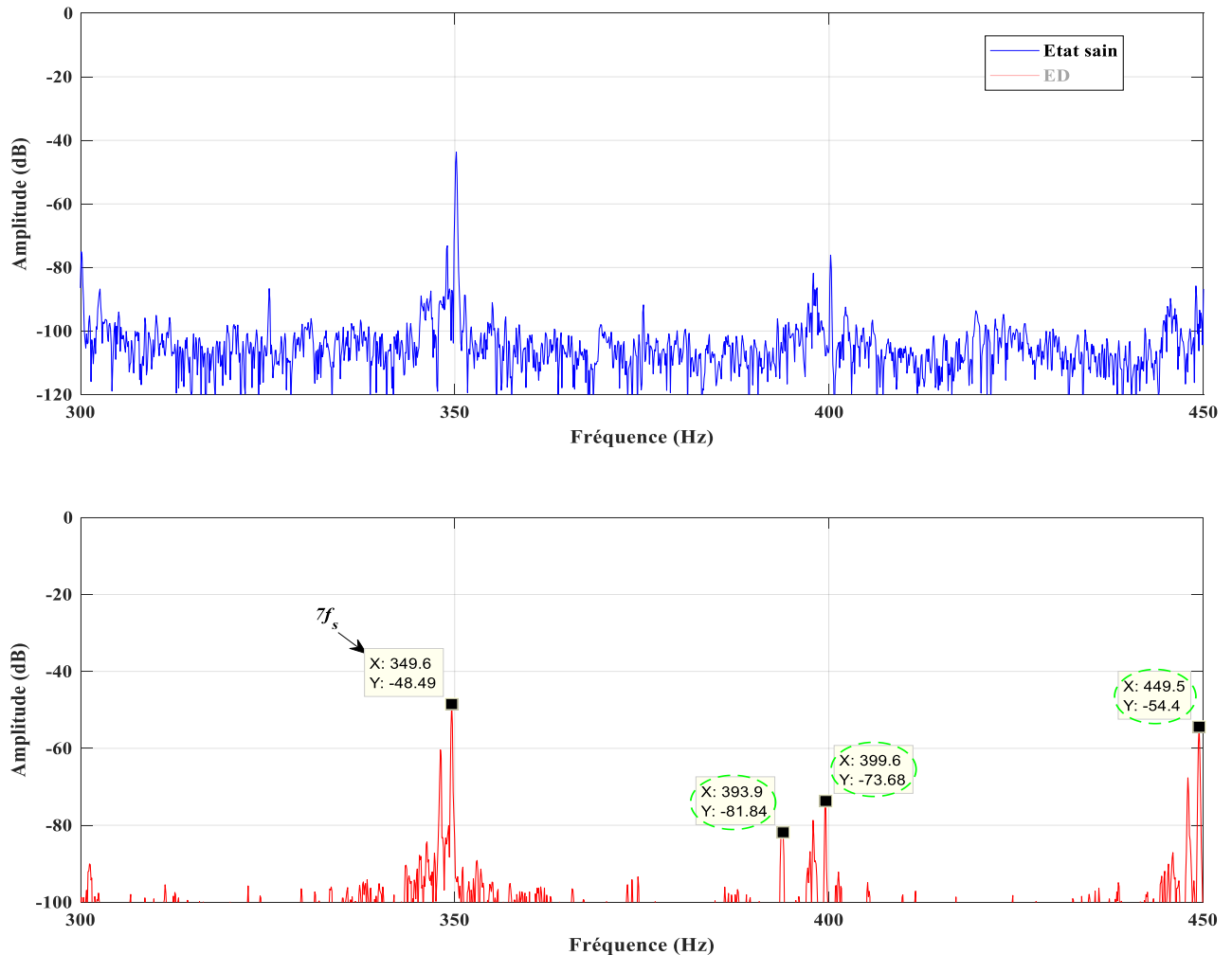


Figure (III.14) : Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [300-450Hz] (à vide).

Le calcul de ce bond :

$$\left[\left(2 \cdot \frac{28}{2} + 1 \right) (1 - 0,004) - 7 \right] 50 = 394.2 \text{ Hz} \approx 393,9 \text{ Hz}$$

$$\left[\left(1 \cdot \frac{28}{2} - 1 \right) (1 - 0,004) - 5 \right] 50 = 397.4 \text{ Hz} \approx 399,6 \text{ Hz}$$

$$\left[\left(1 \cdot \frac{28}{2} - 2 \right) (1 - 0,004) - 3 \right] 50 = 447.6 \text{ Hz} \approx 449.5 \text{ Hz}$$

La figure III.15 présente le spectre dans une bande fréquentielle de 450 à 755 Hz. Le spectre révèle clairement quelques harmoniques additionnels tels que 493,8 Hz, 574.3 Hz, 672.7 Hz et 722,8 Hz. Il est important de noter que ces valeurs correspondent à la formule généralisée du défaut d'excentricité dynamique décrite dans l'équation II.2.

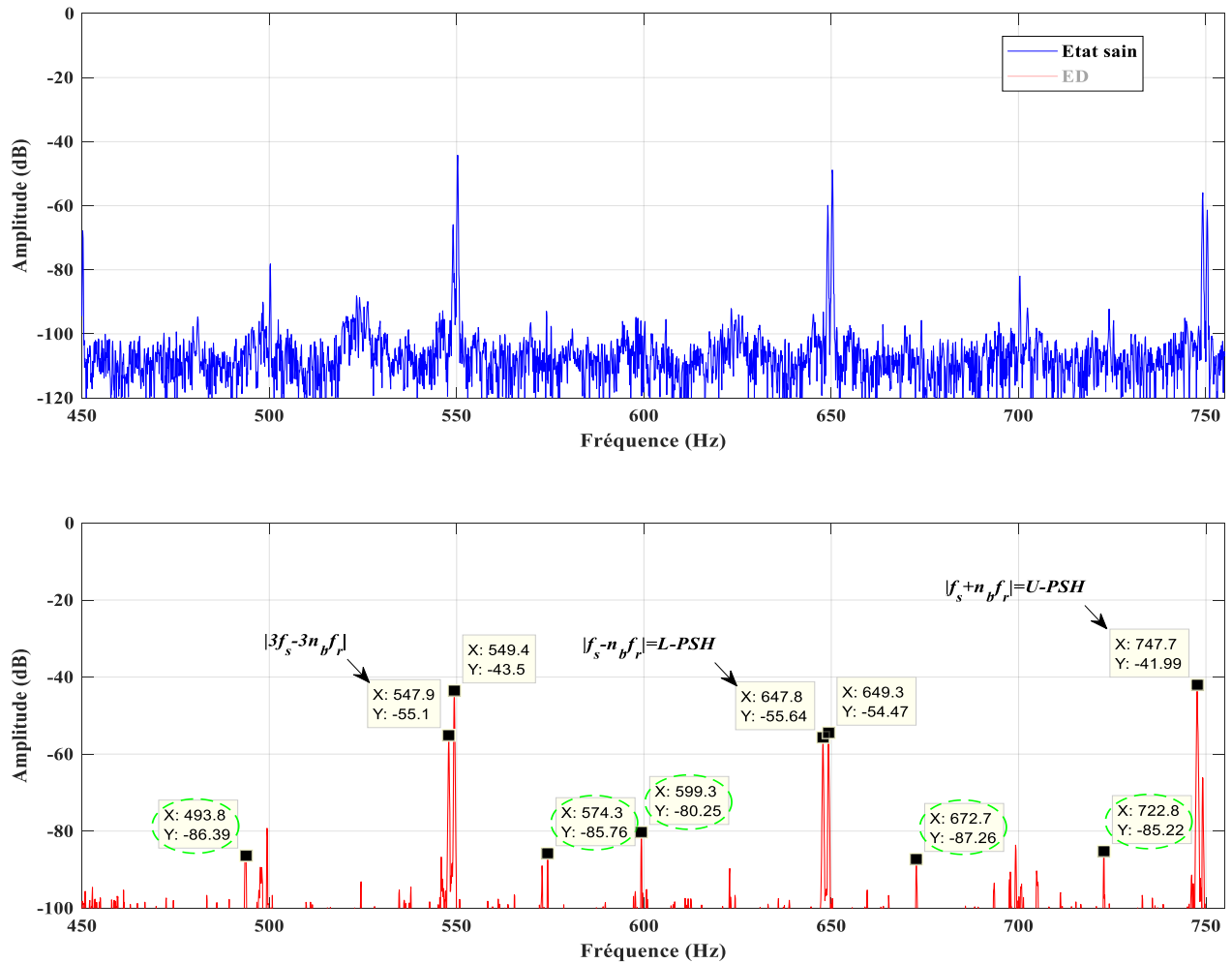


Figure (III.15) : Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [450-755Hz] (à vide).

Le calcul de ce bond :

$$\left[\left(2 \cdot \frac{28}{2} + 1 \right) (1 - 0,004) - 19 \right] 50 = 494,2 \text{ Hz} \approx 493,8 \text{ Hz}$$

$$\left[\left(9 \cdot \frac{28}{2} + 1 \right) (1 - 0,004) - 115 \right] 50 = 574,6 \text{ Hz} \approx 574,3 \text{ Hz}$$

$$\left[\left(1 \cdot \frac{28}{2} - 1 \right) (1 - 0,004) - 1 \right] 50 = 597,4 \text{ Hz} \approx 599,3 \text{ Hz}$$

III.2.2.3 Fonctionnement en charge

Dans ce cas, la machine à un couple résistant de 15 Nm, ce qui équivaut à 75 % de charge et avec un glissement de 3.2 %. La figure ci-dessous montre le spectre du courant pour un intervalle de 0 à 1000 Hz.

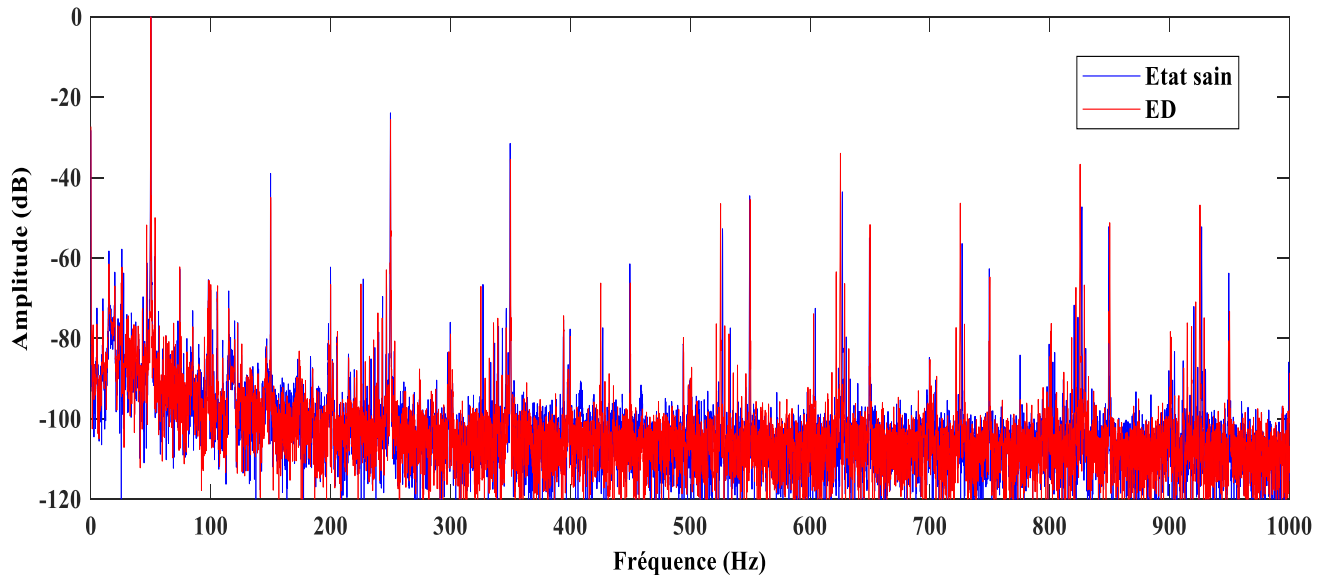


Figure (III.16) : Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'**ED** $\delta=30\%$ [0-1000Hz] (en charge).

La figure III.16 présente les spectres de l'induction magnétique d'entrefer d'une machine asynchrone avec 45% d'excentricité statique sous une charge de 15 Nm, afin de vérifier l'influence de la charge sur les amplitudes de défaut.

On observe que les amplitudes des signatures de défaut autour de la fondamentale augmentent par rapport au fonctionnement à vide. Cette relation inverse entre l'augmentation des amplitudes des indices de défaut et la diminution de la charge peut s'expliquer par l'influence du moment d'inertie de la machine et sa relation avec la charge.

La figure III.17 présente le spectre dans une bande fréquentielle de 0 à 150 Hz. Le spectre révèle clairement quelques harmoniques additionnels tels que 31 Hz, 53,5 Hz et 57.1 Hz. Il est important de noter que ces valeurs correspondent à la formule généralisée du défaut d'excentricité dynamique décrite dans l'équation II.2.

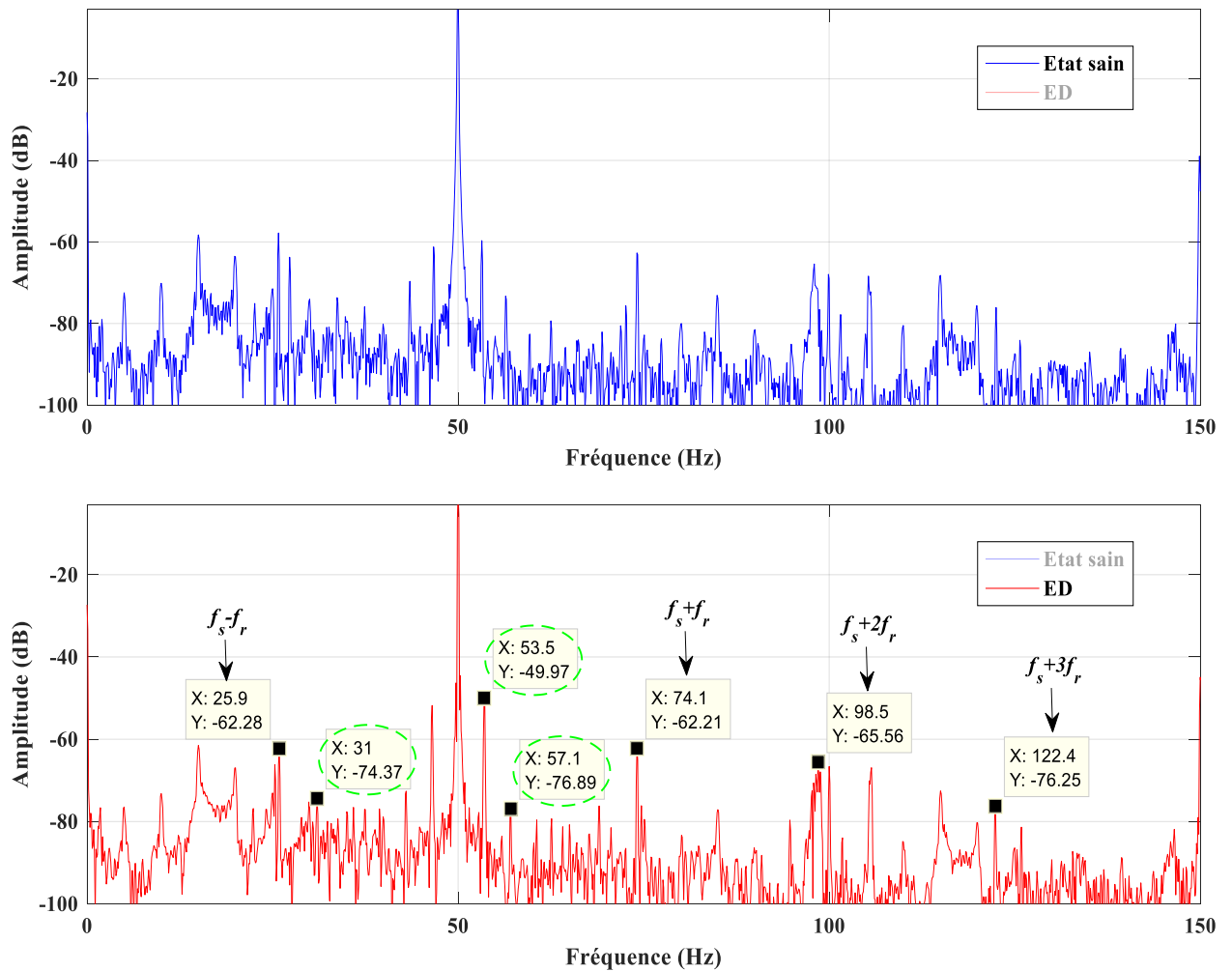


Figure (III.17) : Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [0-150Hz] (en charge).

Le calcul de ce bond :

$$\left[\left(1 \cdot \frac{28}{2} - 2 \right) (1 - 0,032) - 11 \right] 50 = 30,8 \text{ Hz} \approx 31 \text{ Hz}$$

$$\left[\left(2 \cdot \frac{28}{2} + 1 \right) (1 - 0,032) - 27 \right] 50 = 53,6 \text{ Hz} \approx 53,2 \text{ Hz}$$

$$\left[\left(4 \cdot \frac{28}{2} + 2 \right) (1 - 0,032) - 55 \right] 50 = 57,2 \text{ Hz} \approx 57,1 \text{ Hz}$$

La figure III.18 et III.19 présente le spectre dans une bande fréquentielle de 150 à 300 Hz et 300 à 450 Hz. Le spectre ne révèle aucun type de défauts d'excentricité dans ces bonds :

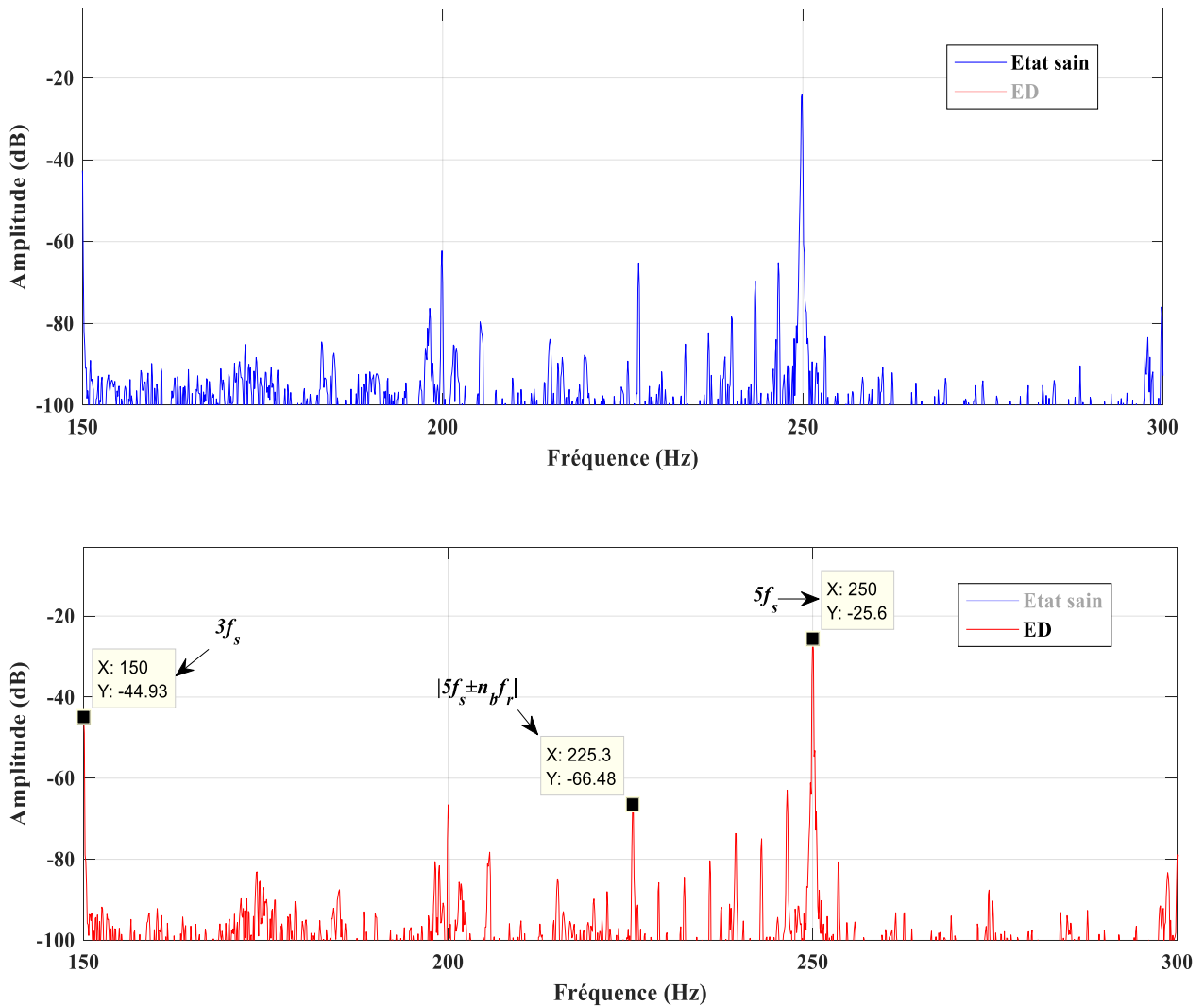
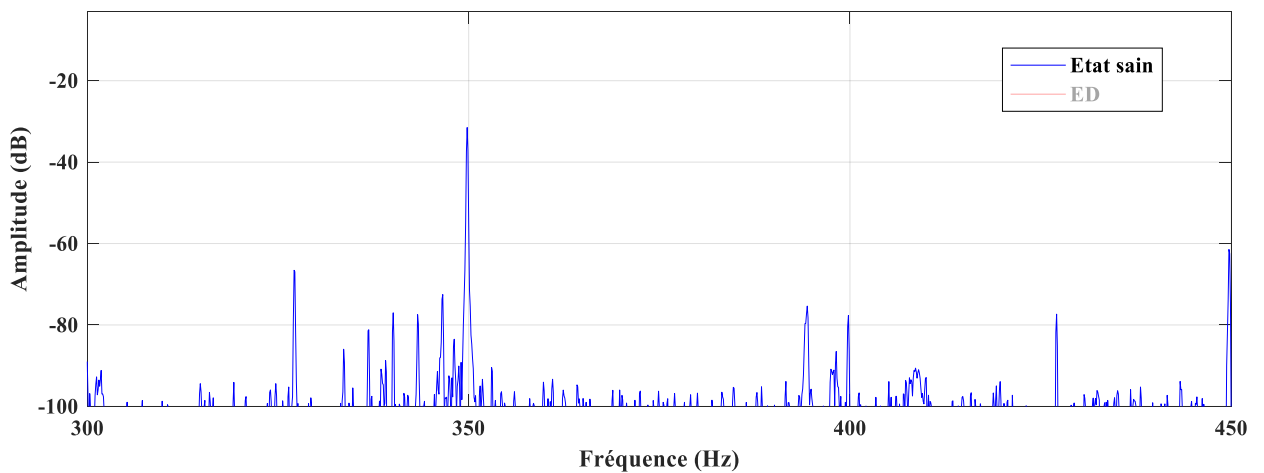


Figure (III.18) : Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [150-300Hz] (en charge).



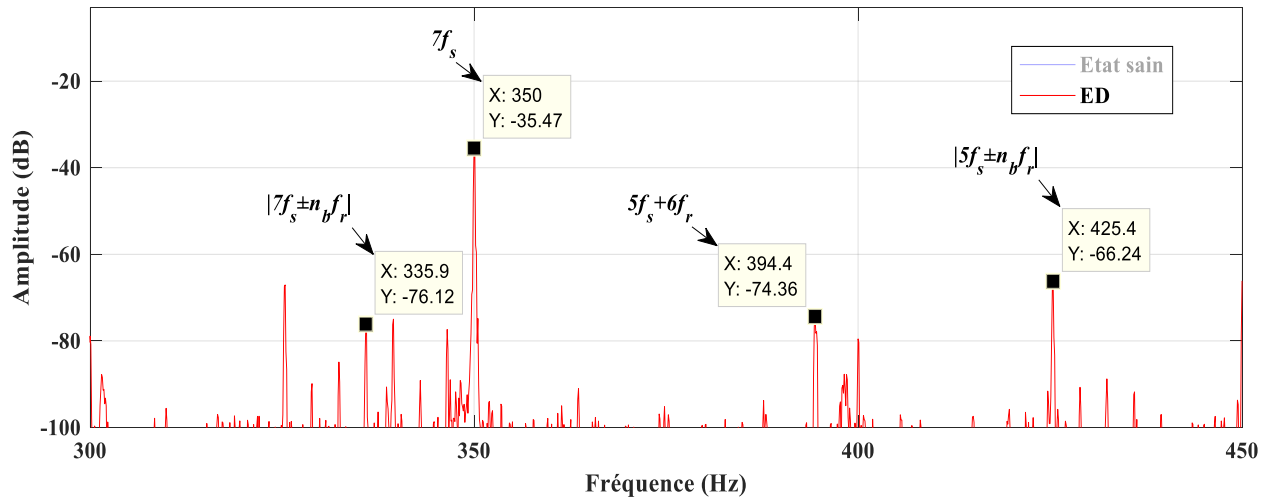


Figure (III.19) : Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [300-450Hz] (en charge).

Dans le cas des machines à cage d'écureuil sous forte charge, la détection des défauts d'excentricité rotorique via la méthode MCSA-FFT devient plus complexe. Cela s'explique par plusieurs facteurs. Premièrement, la forte charge tend à masquer les signatures de défauts spécifiques en augmentant les niveaux de bruit et en complexifiant le spectre de fréquence. Deuxièmement, les harmoniques de courant causées par la charge élevée peuvent interférer avec les fréquences caractéristiques des défauts d'excentricité, rendant leur identification précise plus difficile. Enfin, la dynamique accrue du rotor sous forte charge réduit la sensibilité de la MCSA-FFT aux variations subtiles du spectre de fréquence, nécessaires pour identifier les défauts d'excentricité rotorique.

La figure III.20 présente le spectre dans une bande fréquentielle de 450 à 755 Hz. Le spectre révèle clairement quelques harmoniques additionnels tels que 521.9 Hz, 528,9 Hz, 621,8 Hz, 628,9 Hz, 721,9 Hz 728,9Hz et 449.5Hz. Il est important de noter que ces valeurs correspondent à la formule généralisée du défaut d'excentricité dynamique décrite dans l'équation II.2.

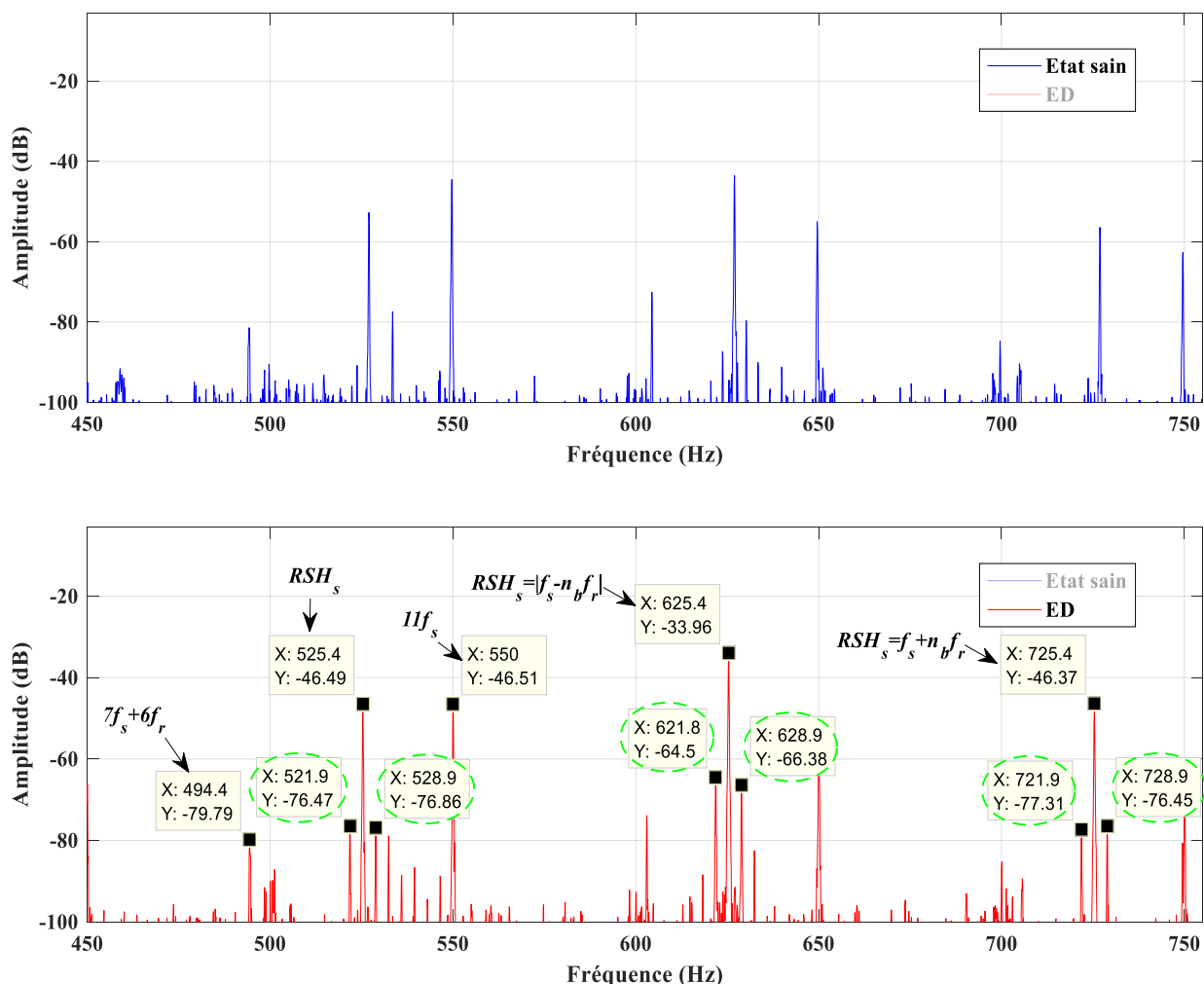


Figure (III.20) : Spectre du courant statorique d'état sain et de défaut d'ED $\delta=30\%$ [450-755Hz] (en charge).

Les résultats expérimentaux concordent avec les valeurs théoriques, confirmant ainsi qu'ils servent d'indicateurs pour les défauts d'excentricité dynamique. Nous observons même une augmentation d'amplitude de certains pics en raison du défaut. Il est également important de noter qu'une excentricité dynamique pure est rarement isolée et est généralement associée à un degré résiduel d'excentricité statique, ce qui conduit à un troisième type d'excentricité, appelé mixte. Le spectre du courant statorique sous un fonctionnement à vide ($s=0.004$) ou à 75% de charge ($s=0.035$) contient toujours les fréquences dues à l'excentricité mixte que l'on peut tirer de l'équation [BES17] :

$$f_{Mix} = |f_s + kf_r|$$

. Cette formule sous forme compacte, fait apparaître les harmoniques des fréquences relatives à ces défauts. On dit aussi qu'il y a une ambiguïté et difficulté de détection de défaut d'excentricité dynamique en présence d'un autre degré d'excentricité statique. Dans ce cas, et en suivant la logique de la proposition, on ne trouve jamais les harmoniques caractéristiques de l'ED pour cette MAS qui a un $n_b=28$. Le tableau ci-dessous résume quelques fréquences caractéristiques

Tableau (II. 1) : Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta s=30\%$).

Formules des Fréquences caractéristiques	Valeurs Théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amplitude (dB) ($\delta s=0\%$)	Amplitude (dB) ($\delta s=30\%$)
$f_s - f_r$	25.87	25.8	-57.80	-59.97
$f_s + f_r$	74.12	74.1	-62.69	-63.96
L-PSH	625.5	625.4	-43.55	-39.54
U-PSH	725.5	725.5	-56.40	-48.44
$ 7f_s - n_b f_r $	325.5	325.4	-66.57	-66.60
$ 5f_s - n_b f_r $	425.5	425.4	-77.35	-66.65
$5f_s$	250	250	250	-24.17
$5f_s + f_r$	274.2	274.2	/	-74.51
$7f_s$	350	350	-31.51	-34.51
$7f_s + f_r$	374.2	374.2	/	-85.60

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les méthodologies utilisées après l'application de la méthode MCSA-FFT sur l'état sain et l'état avec défaut. Nous avons commencé par présenter le diagnostic, en abordant ses caractéristiques, ses étapes et ses types. Au cours de l'analyse, nous avons trouvé des résultats indiquant la présence d'un défaut de désalignement du rotor, ce qui renforce la nécessité d'utiliser d'autres techniques pour obtenir des résultats précis et fiables permettant de diagnostiquer le défaut avec une plus grande précision et facilité.

Sur la base de ces résultats, la situation pourrait nécessiter l'utilisation de méthodes d'analyse supplémentaires ou de techniques de diagnostic avancées pour garantir une détection précise et une correction efficace de la défaillance.

C onclusion général

L'objectif de ce mémoire est de contribuer à la surveillance et à l'évaluation précise du défaut dans les moteurs industriels, notamment des moteurs asynchrones. Le diagnostic des défauts de ces moteurs est crucial dans le secteur industriel, et cela motive une compétition entre chercheurs pour développer des techniques améliorées. Les méthodes de diagnostic des machines tournantes sont diverses, parmi lesquelles l'analyse des signatures du courant statorique à l'aide de la transformée de Fourier rapide qui occupe une place notable. Cette méthode repose sur l'exploitation de l'intensité du courant statorique depuis plusieurs années pour détecter les défauts, démontrant ainsi sa simplicité et sa facilité d'intégration dans les systèmes de surveillance. En effet, elle se base sur l'apparition des fréquences caractéristiques des défauts dans le spectre du courant statorique.

La méthode de la MCSA-FFT n'est pas en mesure de détecter les défauts d'excentricité de la machines asynchrones de façon définitive. L'excentricité statique pure ou dynamique pure impose un grand problème de chevauchement

Références

Bibliographiques

Bibliographie

- [BOL02] I. Boldea, S. A. Nasar. « The Induction Machine Handbook », CRC Press LLC, Chapter 1, 2002.
- [DID04] Gaëtan Didier "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I. Oct 2004.
- [BAB14] Babaa Fatima " Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : "Application au diagnostic des défauts statoriques" ", Doctorat en sciences en électrotechnique, Université Constantine 1, 2014.
- [BAZ09] Bazine S "Conception et implémentation d'un Méta-modèle de machines asynchrones en défaut" Phdthesis, University of Poitiers, Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis, June 2009.
- [BAZ16] Bazi Smail, "Contribution à la détection et au diagnostic des défauts dans un système machine à induction-convertisseur, Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 08 Décembre 2016.
- [BEN03] M. E. H. Benbouzid, G. B. Kliman. « What stator current processing based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis? », IEEE, Transaction on energy conversion, VOL 18 n°2, pp 238-244, Jun 2003.
- [BOU08] Bouzida Ahcene "Diagnostic de défauts de la machine asynchrone a cage par la technique des ondelettes" ,Mémoire de magistère en électrotechnique ,Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [BES17] Bessous Noureddine "Contribution au diagnostic des défauts dans les machines asynchrones : comparaison entre l'analyse vibratoire et l'analyse du courant d'alimentation", doctorat en sciences Université Mohamed Khider – Biskra 2017.
- [BOU01]T. Boumegoura. « Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic », Thèse de Doctorat, Ecole doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon, mars 2001.
- [RAZ02]H. Razik and G. Dider. A novel method of induction motor diagnosis using the line-neutral voltage, EPE-PEMC, September 2004

- [MED12] Medoued Ammar, "Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones" thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, 08/03/2012.
- [ZOU15] Zouzou Sara, "Détection des défauts statoriques dans la machine synchrone à aimants permanents par les techniques avancées, Mémoire de magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
- [CHA16] Chaouche Riadh, Chetti Sif Eddine "Détection et diagnostic de défauts statorique externe d'un moteur asynchrone triphasé à l'aide de la carte arduino mega 2560 ", Mémoire de Magistère en électrotechnique, Université Kasdi Merbah Ouargla 2016.
- [VAS09] Babak Vaseghi "Contribution a l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spires modélisation – réduction du courant de défaut" Nancy Université - Institut National Polytechnique de Lorraine le 3 décembre 2009
- [SAH10] Sahraoui Mohamed "Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones" Université Mohamed KHIDER Biskra 2010.
- [KHA11] 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.
- [BCH02] S. Bachir, "Contribution au diagnostic de la MAS par estimation paramétrique ", Thèse doctorat, 2002, Université de Poitiers France.
- [SAH03] M. Sahraoui " Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage" Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie, 2003.
- [BENB03] M. E. H. Benbouzid and G. B. Kliman, "What Stator Current Processing-Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 2, pages 238-244, June 2003.
- [IBR09] A. Ibrahim" Contribution au diagnostic de machines électromécaniques " Thèse de doctorat, université de saint Etienne Mars 2009.
- [DID04] G. Didier, "Modélisation et diagnostic de la MAS en présence de défaillance" Thèse de doctorat, 2004, Université D'Henri Poincaré, Nancy-I, France.

[EMM99] S. Emmanuel, "Diagnostic des MAS : Modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts ", Thèse de doctorat, 1999, Ecole central de Nantes France.

[CHA17] Ch, Abdelghani, "Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic". Mémoire de Doctorat En Science.Université Oran 2017.

[KHA12] Khalaf Salloum Gaeid , Hew Wooi Ping, Mustafa Khalid ,Atheer Lauy Salih "Fault Diagnosis of Induction Motor Using MCSA and FFT" Department of Electrical Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, 50603, Malaysia

[CHE16] K. Chen, C. Huang, and J. He, "Fault detection, classification and location for transmission lines and distribution systems: a review on the methods," High Volt, vol. I, no.I, pp. 25-33, 2016.

[JAM15] M. Jamil, S. K. Sharma, and R. Singh, "Fault detection and classification in electrical power transmission system using artificial neural network," Springerplus, vol. 4, no. 1,2015.

[BOU09] M. Madjid Boudjedaimi "Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels" Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou faculte du genie électrique et d'informatique departement d'automatique 27/09/2009

[OUL05]. D. Ould Abdeslam, « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension ». Thèse de doctorat, université Haute-Alsace, Décembre 2005.

[HAY99]. S. Haykin, « Neural Networks: A Comprehensive Foundation ». 2nd Edition, Prentice Hall, 1999.

[HAL15] Halem Noura "Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis", Doctorat en Sciences Université Mohamed Khider – Biskra 2015.

[EAC18]<https://electricalacademia.com/induction-motor/three-phase-induction-motor-construction/> 05/03/2024

[SAV24] <https://savree.com/en/encyclopedia/induction-electric-motor-squirrel-cage> 05/03/2024

[SLI15] <https://www.slideshare.net/slideshow/induction-motors-48218864/48218864> 05/03/2024

[BES16] Bessam Besma "Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone a base des technique intelligentes ", doctorat en sciences Université Mohamed Khider – Biskra 2016.

[ACH08] Achour Tahar, ACHOUR Tahar "Diagnostic de défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone à simple cage d'écureuil : Etude expérimentale" d'ingénieur d'état en électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique Département de Génie Electrique Promotion Juin 2008

[COR82] Cornell E.P., E.L. Owen, J.C. Appiarius, R.M. McCoy, P.F. Albrecht, and D.W. Houghtaling. Improved motors for utility applications. Final report. Technical Report EPRI-EL-2678-Vol.1, General Electric Co., Schenectady, NY (USA), October 1982.

[RES15]https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-static-left-dynamic-middle-and-mixed-right-airgap-eccentricity-of_fig2_276557419 25/03/2024