

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Études

L'Université d'Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En commande Electriques

Présenté par

AOUN Nassim

LACHRAF Ayoub

Thème

**Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones à
cage d'écureuil : détection des défauts mécaniques**

Soutenu le .../06/2023. Devant le jury composé de :

Dr. Guediri Abdelkrim

Maitre de conférences

Président

M. BESSOUS Noureddine

Maitre d'assistant

Rapporteur

Dr. Bougazal Mohamed asalh

Maitre de conférences

Examineur

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Nous remercions tout d'abord « **ALLAH** » qui nous a donné la force et la patience nécessaire pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur du mémoire de Master, **Dr. BESSOUS Noureddine**, pour la confiance dont il nous a gratifié, pour sa gentillesse et ses conseils judicieux qu'il nous a prodigué à chacune de nos rencontres et nous avoir soutenu et dirigé tout au long de ce travail.

Nos vifs remerciements aux membres de jury pour nous avoir fait l'honneur d'examiner et de juger notre travail.

Enfin, nous adressons nos remerciements à tous nos enseignants de la Faculté de la Technologie et précisément les enseignants du Département de Génie Electrique de l'Université d'El-Oued et à toutes les personnes qui, de manière directe ou indirecte, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

ملخص

الآلة غير المتزامنة واحدة من أكثر الآلات استخدامًا في الصناعة، وذلك بفضل متانتها وموثوقيتها وتكلفتها المنخفضة. لسوء الحظ، تتأثر هذه الآلات بعيوب مختلفة مثل انكسار القضبان أو الانحراف المركزي في الجزء الدوار أو حتى الدوائر القصيرة في ملفات الجزء الساكن، مما قد يؤدي إلى إيقاف النظام ككل. هناك العديد من الطرق لاكتشاف العيوب في الآلات غير المتزامنة. من بين هذه التقنيات نذكر: تحليل الإشارة الاهتزازية للمحرك وتحليل إشارة تيار الجزء الساكن للمحرك وتحليل إشارة الحقل المغناطيسي الخارجي التي تعتمد على التحليل الطيفي للإشارات باستخدام تحويل فورييه السريع. الهدف من هذه المذكرة هو تشخيص العيوب في الآلات الكهربائية غير المتزامنة ثلاثية الطور ذات القفص السنجابي. قمنا بتحليل الخلل في الحلقة الداخلية للمدحرجات باستخدام الطرق السابقة. بالإضافة إلى ذلك، قمنا أيضًا بإجراء دراسة مقارنة بين التقنيات من أجل الحصول على قرار نهائي بشأن فعالية التقنيات.

الكلمات المفتاحية: آلة غير متزامنة على شكل قفص السنجاب - تشخيص الأعطاب - عدم تمركز الجزء الدوار - تحويل فورييه - الحلقة الداخلية - التحليل الطيفي - المدحرجات.

Abstract

The asynchronous machine is one of the most widely used machines in industry, thanks to its robustness, reliability and low cost. Unfortunately, these machines are affected by various failures such as broken rotor bars, eccentricity, short circuits between the stator turns, etc. which can lead to its shutdown. There are many methods for detecting faults in asynchronous machines. Among these techniques we mention: Motor Vibration Signature Analysis (ASVM) and Motor Current Signature Analysis (ASCM) and Motor Flux Signature Analysis (ASFM) which are based on fast Fourier transform (FFT). The objective of this dissertation is the fault diagnosis in three-phase squirrel cage induction machine. We analyzed bearing inner ring fault (IR) using the previous methods. In addition, we also made a comparative study between the techniques in order to have a final decision on the effectiveness of the used techniques.

Keywords: squirrel cage induction motor - fault diagnosis - eccentricity - Fourier transform - inner ring - spectral analysis - bearing.

Résumé

La machine asynchrone est l'une des machines les plus utilisées dans l'industrie, grâce à sa robustesse, sa fiabilité et son faible coût. Malheureusement, ces machines sont impactées par des défaillances diverses comme les barres cassées ou l'excentricité au niveau du rotor ou encore les courts-circuits entre spires au stator, qui peuvent conduire à l'arrêt de celle-ci. Il existe de nombreuses méthodes pour détecter les défauts dans les machines asynchrones. Parmi ces techniques, nous mentionnons : L'Analyse des Signatures de Vibration du Moteur (ASVM) et L'Analyse des Signatures des Courants du Moteur (ASCM) et L'Analyse des Signatures des Flux du Moteur (ASFM) qui sont basés sur l'analyse spectrale des signaux à l'aide de la transformée de Fourier rapide (TFR). L'objectif de ce mémoire est le diagnostic des défauts dans les machines électriques asynchrones triphasées à cage d'écureuil. Nous avons analysé le défaut dans la bague interne du roulement (BI) en utilisant les méthodes précédentes. En plus, on a fait aussi une étude comparative entre les techniques afin d'avoir à une décision finale sur l'efficacité des techniques.

Mots clés : machine asynchrone à cage d'écureuil - diagnostic des défauts - excentricité - Transformée de Fourier - bague intérieure - analyse spectrale – roulement.

Table des matières

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	ii
Liste des tableaux	iii
Liste des symboles et abréviations	iv
Introduction générale	2
Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones	
I.1. Introduction	4
I.2 Constitution des machines asynchrones	4
I.2.1 Stator	5
I.2.2 Rotor	6
I.3 Principe de fonctionnement	7
I.4 Présentations des différents défauts dans machine asynchrone.....	8
I.4.1 Défauts statoriques	8
I.4.1.1 Court-circuit entre phases	9
I.4.1.2 Court-circuit entre spires	10
I.4.1.3 Circuit ouvert sur une phase	10

I.4.1.4 Court-circuit avec le bâti (la carcasse)	10
I.4.1.5 Défauts du circuit magnétique	11
I.4.2 Défauts rotoriques	11
I.4.2.1 Excentricité	12
I.4.2.1.1. Excentricité statique	12
I.4.2.1.2. Excentricité dynamique	12
I.4.2.1.3. Excentricité mixte	13
I.4.2.2 Ruptures de d'anneaux	13
I.4.2.3 Ruptures de barres	14
I.4.3 Défauts roulements	15
I.5 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone	17
I.6 Les cause des défauts	18
I.6.1. Les défauts internes	18
I.6.2. Les défauts externes	18
I.7 Techniques de diagnostic	19
I.7.1 L'analyse vibratoire	20
I.7.2 Analyse du couple électromagnétique	20
I.7.3 Analyse de la température	20
I.7.4Analyse de la signature du courant statorique (MCSA)	21

I.7.5 Analyse par mesure ultrasonore	21
I.7.6 Analyse du flux	22
I.7.7 Analyse du bruit	22
I.8 Conclusion	22
Chapitre II : Diagnostic Des Défauts De Roulement	
II.1 Introduction	24
II.2. Structure d'un roulement	24
II.2.1 La bague extérieure	24
II.2.2 La bague intérieure	25
II.2.3 La cage	25
II.2.4 Les éléments roulants	25
II.3. Types des défauts roulements	25
II.3.1. Fracture	25
II.3.2. Fissures	26
II.3.3. Usure	26
II.4. Fréquences caractéristiques et défauts	26
II.5. Techniques d'analyse	27
II.5.1. L'analyse vibratoire	28
II.6. Vibrations des machines tournantes	28

II.6.1. Principales causes de vibrations des machines	29
II.6.2. Différentes formes de vibrations	29
II.6.2.1. Vibrations harmoniques	30
II.6.2.2. Vibrations périodiques	30
II.6.2.3. Vibrations aléatoires	31
II.6.3. Objectifs d'analyse vibratoire	31
II.6.4. Les avantages et les inconvénients d'analyse vibratoire	32
II.7. Transformée de Fourier	32
II.7.1. Technique de la FFT	33
II.8. Étude détaillé MCSA, MVSA, SFSA	34
II.8.1. Motor Current Signature Analysis (MCSA)	34
II.8.1.1. Principe	34
II.8.1.2. Exemple sur MCSA	35
II.8.1.3. Les avantages et les inconvénients de MCSA	36
II.8.2. Motor Vibration Signature Analysis (MVSA)	37
II.8.2.1 Représentation temporelle du signal vibratoire	37
II.8.2.2 Mesure de la vibration	37
II.8.2.3. Capteurs de vibrations	37
II.8.2.3.1 Vitesse (vélocimètre ; mm/s ou mV)	38

II.8.2.3.2 Accélération (accéléromètre ; mm/s ² ou $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ ou mV)	38
II.8.2.3.3 Déplacement (μm , mm ou mV)	38
II.8.2.4 Les points de mesure	39
II.8.2.5 Objectifs d'analyse vibratoire	39
II.8.2.6. Les avantages et les inconvénients de MVSA	39
II.8.3. Stray Flux Signature Analysis (SFSA)	40
II.8.3.1. Exemple sur SFSA	40
II.8.3.2. Capteurs de flux	41
II.8.3.3. Les points de mesure	42
II.9. Conclusion	43
Chapitre III : Analyse des défauts de roulement dans la bague intérieure	
III.1 Introduction	45
III.2. Détection du défaut de roulement par la méthode de MCSA	45
III.3. Détection du défaut de roulement par la méthode de MVSA	48
III.4. Détection du défaut de roulement par la méthode de SFSA	52
III.5. Conclusion	56

Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE I : Etat de l'art de la machine asynchrone

Figure I.1 Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil	4
Figure I.2 Vue schématique en perspective du stator	5
Figure I.3 Paquet statorique et stator bobiné	5
Figure I.4 Rotor à cage d'écureuil	6
Figure I.5 Rotor bobiné	6
Figure I.6 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage	7
Figure I.7 Représentation des différents défauts statoriques possible	9
Figure I.8 Court-circuit entre les phases	9
Figure I.9 Courts-circuits entre spires entre spires d'une même phase	10
Figure I.10 Courts-circuits entre bobinage et stator	11
Figure I.11 Représentation de l'excentricité statique	12
Figure I.12 Représentation de l'excentricité dynamique	13
Figure I.13 Représentation de l'excentricité mixte	13
Figure I.14 Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : rupture d'anneau	13
Figure I.15 Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : rupture barres	14
Figure I.16 Structure d'un roulement à billes	15

Figure I.17 Proportion des défauts	17
Figure I.18 Proportion des défauts des MAS de faible et moyenne puissance.....	17
Figure I.19 Causes externes des défauts de la MAS triphasée à cage	18
Figure I.20 Différentes méthodes d'analyse	19
Figure I.21 Analyse vibratoire	20
Figure I.22 Image thermique d'un moteur, A) sain, B) court-circuit de 26% et court-circuit de 40%	21
Figure I.23 Utilisation des ultrasonore	21
Figure I.24 Analyse du bruit	22

CHAPITRE II : Diagnostic des défauts de roulement

Figure II.1 Eléments d'un roulement	24
Figure II.2 Fracture sur la bague extérieure	25
Figure II.3 Fissures sur la bague extérieure	26
Figure II.4 Usure sur la bague Intérieur	26
Figure II.5 Spectre théorique d'un défaut	27
Figure II.6 Fréquence caractéristique d'un défaut de type écaillage affectant la bague extérieure	27
Figure II.7 Différentes méthodes d'analyse	28
Figure II.8 Vibration harmonique	30

Figure II.9 Vibration périodique	31
Figure II.10 Vibration aléatoire	31
Figure II.11 Principe de la Transformée de Fourier	33
Figure II.12 Représentation temporelle et fréquentielle somme de deux sinusoïdes	33
Figure II.13 Signal vibratoire sinusoïdal généré par un balourd	35
Figure II.14 Spectre de courant d'un moteur sain	35
Figure II.15 Spectre de courant moteur avec un rotor endommagé	36
Figure II.16 (a) : Signal vibratoire sinusoïdal généré par un balourd (b) : Signal vibratoire complexe	37
Figure II.17 Schéma de principe d'un capteur de vibration	38
Figure II.18 Différents points de mesure des vibrations d'une MAS	39
Figure II.19 Analyse fréquentielle de la mesure de tension induite en conditions saines, en position haute	41
Figure II.20 Analyse fréquentielle de la mesure de tension induite avec une sévérité de défaut rotor inter-spores de 15%, en position haute	41
Figure II.21 Capteurs de flux : air, noyau de fer U et noyau de fer E	42
Figure II.22 Positions du capteur de bobine	42

CHAPITRE III : Analyse des défauts de roulement dans la bague intérieure

Figure III.1 Photos d'un roulement défectueux dans la BI	45
Figure III.2. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut	46

de la BI, $g = s = 0.048$) (a) : 0-1000Hz	
Figure III.3. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BI, $g = s = 0.048$) (b) : 0-200Hz, (c) : 200-500 Hz, (d) : 500-750 Hz	47
Figure III.4. Différentes plages des fréquences du spectre d'un signal vibratoire (BI, $g = 0.032$)	51
Figure III.5. Spectre du flux (défaut de la BI, $g = s = 0.0366$) 0-800 Hz	53
Figure III.6. Spectre du flux (défaut de la BI, $g = s = 0.0366$) 0-200 Hz	54
Figure III.7. Spectre du flux (défaut de la BI, $g = s = 0.0366$) 200-400 Hz	54
Figure III.8. Spectre du flux (défaut de la BI, $g = s = 0.0366$) 400-600 Hz	55
Figure III.9. Spectre du flux (défaut de la BI, $g = s = 0.0366$) 600-800 Hz	55

Liste des tableaux

Liste des tableaux

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

Tableau I.1 Synthèse des signatures des défauts	16
--	----

Chapitre III : Analyse des défauts de roulement dans la bague intérieure

Tableau III.1. Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague interne ($g = 0.048$)	48
Tableau III.2. Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BI, $g=0.032$)	52
Tableau III.3. Fréquences caractéristiques théoriques et Amplitude (saine et défectueuse) de la bague interne ($g = s = 0.0366$)	55

Liste des symboles et des abréviations

Liste des symboles et des abréviations

p	: Nombre de pair de pôles.
g, s	: Glissement
f_s	: Fréquence d'alimentation.
f_r	: Fréquence rotorique.
f_{BI}	: fréquence caractéristique du défaut de la bague interne du roulement
N_b	: Nombre des billes
MCSA	: Motor Current Signal Analysis.
MVSA	Motor Vibration Signature Analysis
SFSA	Stray Flux Signature Analysis
MAS	Machine (Moteur) Asynchrone
FFT	: Fast Fourier Transform
BI	: La Bague Intérieure

Introduction générale

Introduction générale

Les machines asynchrones, de par leur robustesse et leur rapport poids/puissance, sont largement utilisées en milieu industriel. En effet, la fiabilité et la sûreté de leur fonctionnement permettent en partie d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations. Le choix d'une approche liée à la connaissance et le diagnostic de défauts assez une étape primordiale. Cependant, les contraintes nouvelles et l'intégration de ces machines dans des systèmes de conversion d'énergie de plus en plus complexes rendent le diagnostic plus difficile [Bel 17]. Dans divers secteurs industriels, la disponibilité et le coût sont des facteurs clés pour rassurer une continuité optimale de la production. Tout changement indésirable ou un arrêt inattendu provoque des pertes économiques considérables. Pour éviter ce genre de problèmes, les chaînes de production doivent être équipées de systèmes de diagnostic fiables permettant de détecter tout défaut ou changement dans l'état de fonctionnement avant la défaillance totale [Ben 22].

Dans ce mémoire on va analyser le défaut dans bague interne du roulement. Pour cela, nous avons organisé le mémoire en trois chapitres. Cette organisation est faite comme suivant :

Le premier chapitre consiste en une vision générale sur les machines asynchrones en expliquant leurs composants et le principe de son fonctionnement. En plus, certains défauts dans les machines asynchrones seront cités avec les causes qu'ils peuvent les produire. Quelques techniques de diagnostic des défauts dans les MAS vont mentionner dans ce chapitre brièvement.

Le deuxième chapitre sera consacré pour définir le diagnostic de la MAS sous un défaut du roulement, exactement le défaut dans la bague interne du roulement. Pour détecter ce type de défaut, il existe plusieurs techniques, les plus importantes d'entre elles : la technique de la FFT (Fast Fourier Transformer) que nous allons adopter dans notre étude où nous allons présenter les méthodes d'analyse utilisées dans ce travail qui sont : MCSA, MVSA et SFSA.

Le troisième chapitre portera sur l'utilisation des trois méthodes d'analyse pour étudier les données expérimentales et identifier les défauts du roulement.

On conclut ce travail par une conclusion générale qui résume l'essentiel des résultats.

Chapitre I

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

I.1. Introduction

Dans ce premier chapitre, nous présenterons les principaux composants de la machine à induction (Machine asynchrone). Ensuite, nous discuterons des différents types de défauts (électriques et mécaniques) qui peuvent se produire dans la machine asynchrone (MAS). En plus, nous verrons comment diagnostiquer les défauts dans une machine à induction pour détecter et localiser les défauts. Les méthodes de diagnostic les plus couramment utilisées ont été bien décrites.

I.2. Constitution des machines asynchrones

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. L'une fixe appelée stator portant un bobinage triphasé logé dans les encoches et relié à la source d'alimentation [Che 14]. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil [Bac 02]. La figure I.1 représente la machine asynchrone.

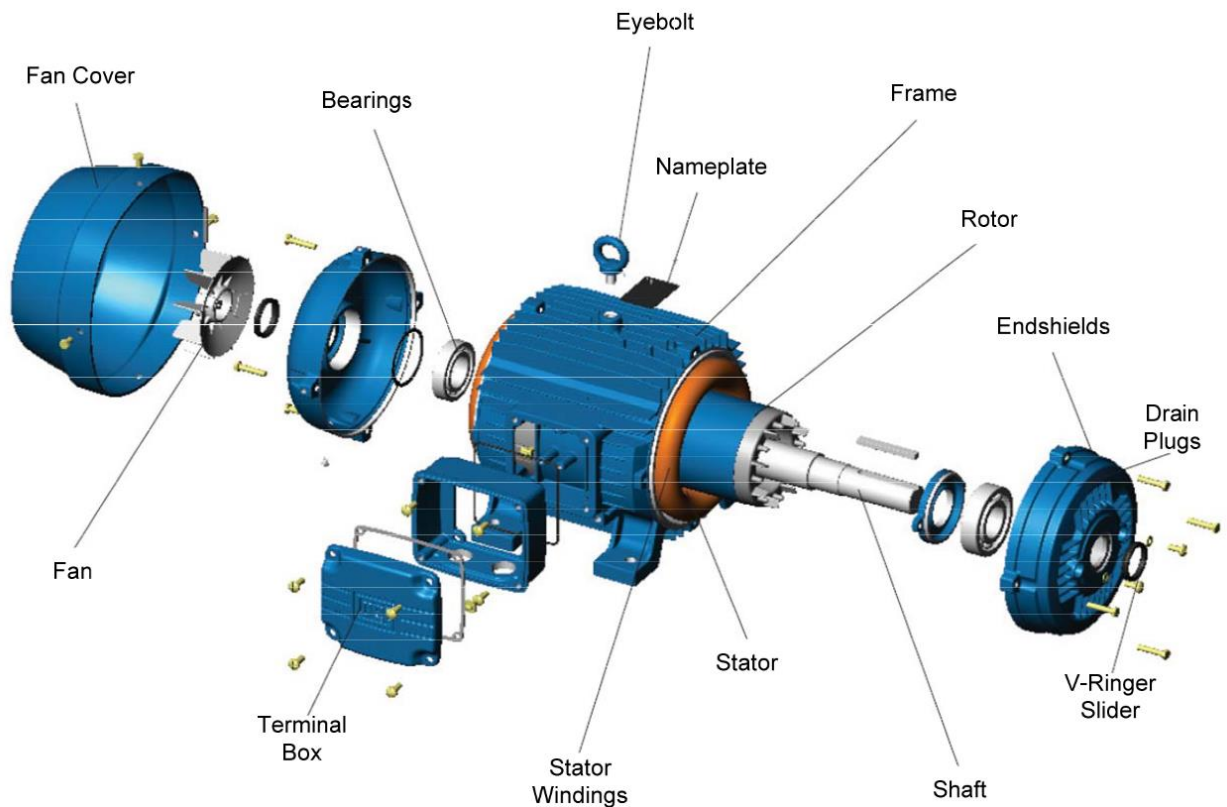


Figure I.1 Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil [Adr 06].

I.2.1. Stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique. Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet [Did 04].

Le bobinage statorique est constitué de deux parties Figure I.2 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 leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique [Bac 02].

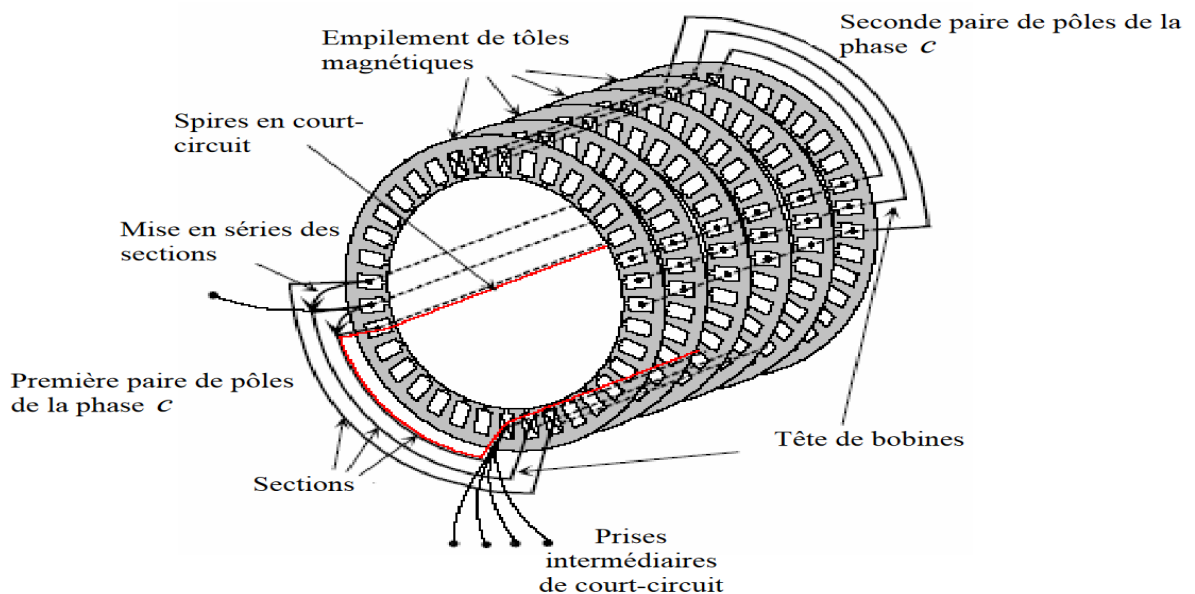


Figure I.2 Vue schématique en perspective du stator [Bes].



Figure I.3 Paquet statorique et stator bobiné [Amm 13].

I.2.2. Rotor

Le rotor est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu [Bac 02].

Les rotors de machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil. Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits [Did 04]. 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 [Mer 09]. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium. Il existe différentes structures de rotor à cage qui dépendent principalement de la taille du moteur et de l'application qu'il en sera fait. Nous donnons à la figure I.1 les différents éléments de constitution d'un rotor à cage d'écureuil [Did 04].

Rotor à cage, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service.

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

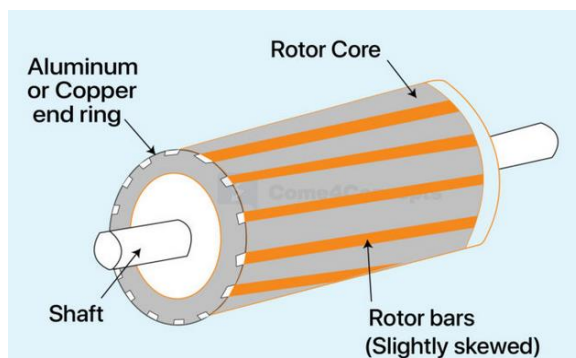


Figure I.4 Rotor à cage d'écureuil

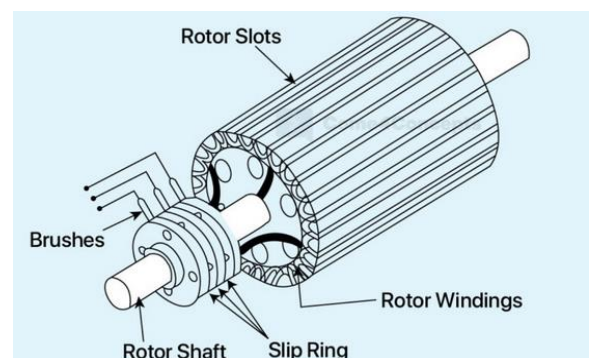


Figure I.5 Rotor bobiné [Site Web 5].

I.3. Principe de fonctionnement

Quand les enroulements de stator sont alimentés par un courant alternatif, ils produisent un champ magnétique rotatif. Cela, génère des courants induits dans le rotor (dans la cage de l'écureuil) qui à son tour crée un autre champ magnétique qui provoque l'apparition de forces. Ces dernières provoquent la rotation du rotor (force motrice). L'induction du courant ne peut se faire que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux). La vitesse de rotation est légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique rotatif "glissement" [Site Web 1].

D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite [Site Web 2].

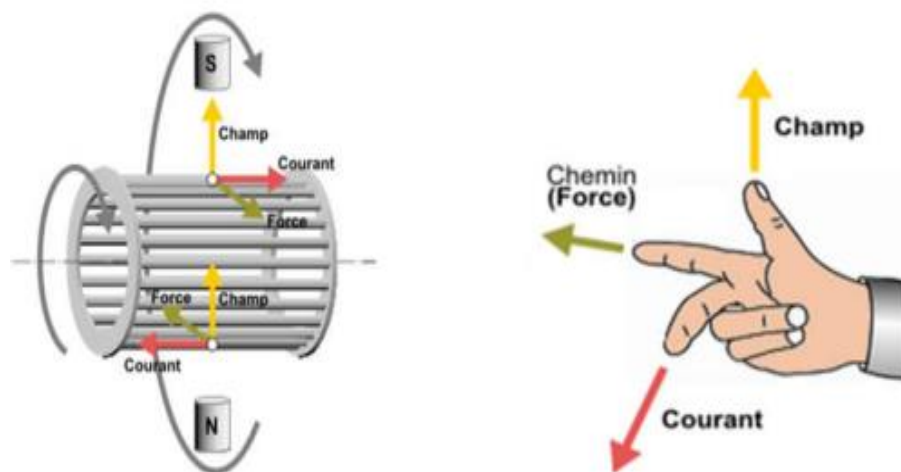


Figure I.6 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage [Laa 16].

Le rotor mis en rotation tend à rattraper le champ tournant. Pour qu'il y ait un couple entretenu au niveau des conducteurs, la variation de flux doit être présente en permanence ; ce qui signifie que si les conducteurs tournent à la vitesse de synchronisme comme le champ tournant, la variation de flux sur les conducteurs devient nulle et le couple moteur disparaît.

Un rotor de moteur asynchrone ne tourne donc jamais à la vitesse de synchronisme (50 Hz). Pour un moteur à une paire de pôles (à 50 Hz, la vitesse de rotation du champ tournant est de 3 000 [tr/min]) la vitesse de rotation du rotor peut être de 2 950 [tr/min] par exemple ; intervient ici la notion de glissement [Site Web 3].

I.4. Présentations des différents défauts dans machine asynchrone

Malgré que la machine asynchrone est robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts, qui peuvent être soit d'origine électrique, ou mécanique. Cependant, les contraintes de différentes natures auxquelles ces machines sont sollicitées, sont les principales causes des défauts structurels et fonctionnels qui selon leur nature, peuvent endommager totalement la machine et causer inévitablement l'arrêt du processus, donc une perte conséquence de la production [Mer 09].

I.4.1. Défauts statoriques

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit : [Bel 17].

- Court-circuit entre spire.
- Court-circuit entre bobine.
- Court-circuit entre phase.
- Phase à la terre.
- Ouverture d'une phase.
- Défaut de circuit magnétique.
- Coupure d'une phase.
- Défaut de l'isolation de masse.

Les défauts du stator sont des défauts électriques potentiellement nocifs dans les moteurs, ils sont produits fréquemment en fonction du type et de la taille de la machine. Les bobines du stator sont sujettes à diverses anomalies et, à leur tour, provoquent différentes réponses d'équipement. [Mou 18]. Les défauts liés au stator, également connus sous le nom de défauts de court-circuit, se produisent lorsque les enroulements du stator sont court-circuités en raison d'une défaillance de l'isolation [Bel 19]. Il reste que le facteur principal de vieillissement est l'échauffement anormal de bobinages.

En effet, pour les machines fonctionnant en milieu hostile, poussière et humidité viennent se déposer pour les machines fermées entre les ailettes extérieures, et pour les machines ouvertes au niveau des têtes de bobine, affaiblissant ainsi l'isolation électrique et court-circuitant ainsi les conducteurs [Bes 17].

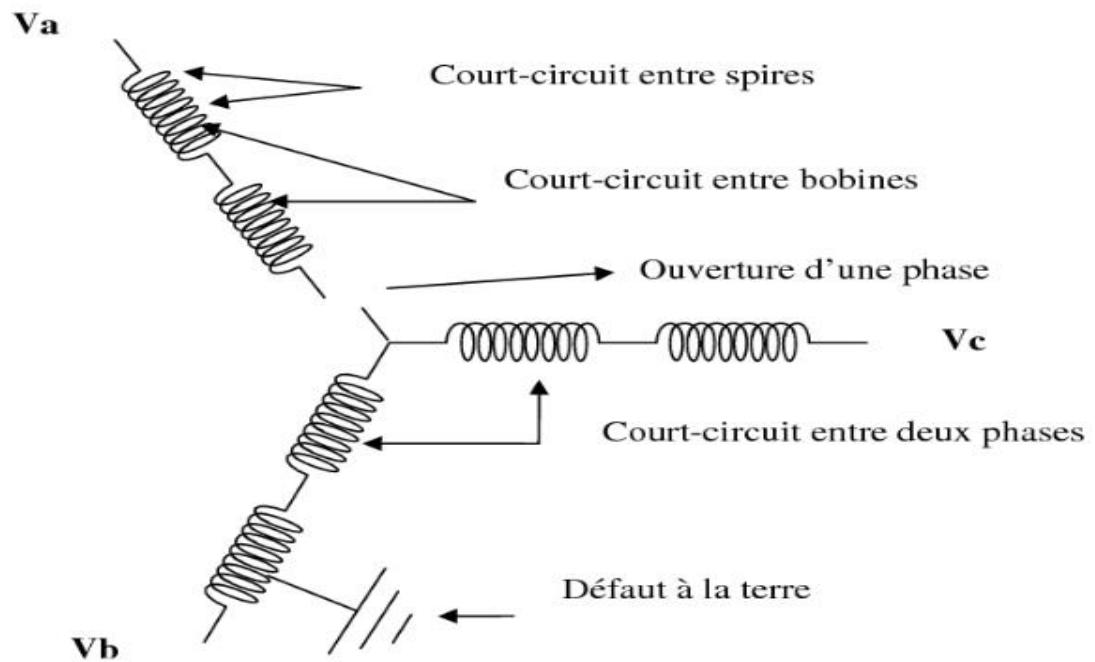


Figure I.7 Représentation des différents défauts statoriques possible [Her 09].

I.4.1.1. Court-circuit entre phases

Un court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. Cependant, un court-circuit au bobinage près du neutre où entre spires n'a pas d'effet aussi radical. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui provoque une répercussion directe sur le couple [Ond 06].

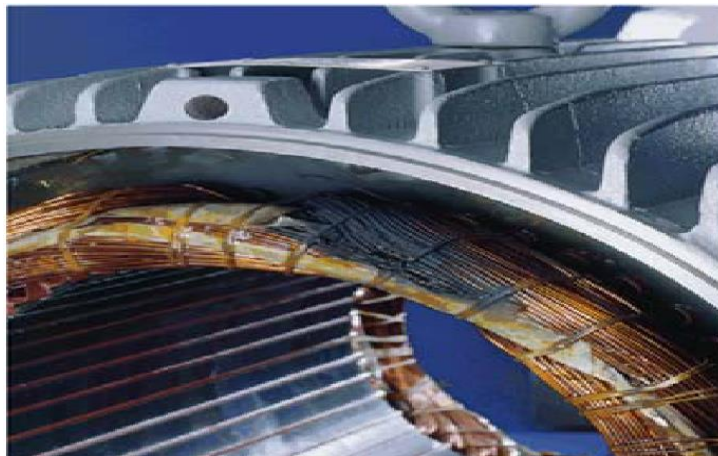


Figure I.8 Court-circuit entre les phases [Adr 06].

I.4.1.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spire de même phase entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique.

Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [Lad 21].

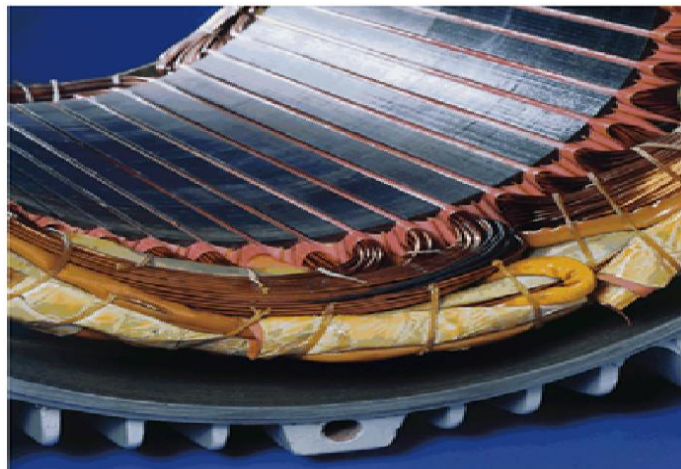


Figure I.9 Courts-circuits entre spires entre spires d'une même phase [Adr 06].

I.4.1.3. Circuit ouvert sur une phase

Les conséquences d'ouverture de phase sont moins graves qu'un court-circuit entre spires ou entre phases. Le courant ne peut pas circuler, et ça ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de bobinage. De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine [Bes 17].

I.4.1.4. Court-circuit avec le bâti (la carcasse)

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels).

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas.

Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [Ond 06].

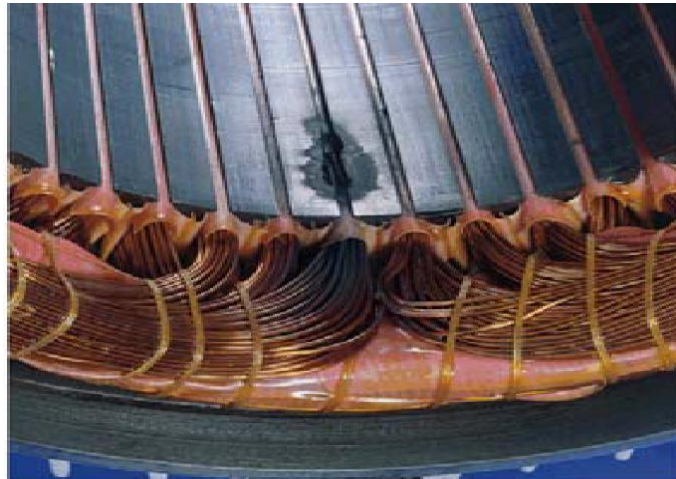


Figure I.10 Courts-circuits entre bobinage et stator [Adr 06].

I.4.1.5. Défauts du circuit magnétique

Les tôles du circuit magnétique sont feuilletées et isolées entre elles, cependant elles peuvent se retrouver court-circuitées. Les causes les plus fréquentes de défaut de circuit magnétiques sont généralement liées à un défaut sévère d'excentricité statique et/ou dynamique qui peut conduire à un contact front entre le stator et le rotor ce qui détruit le circuit magnétique, ou bien court-circuit des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles, ainsi la projection des corps étrangers dans l'entrefer peut entraîner l'abrasion des tôles et ainsi les court-circuitées [Hal 15].

I.4.2. Défauts rotoriques

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit : [Bel 17].

- Rupture de barreaux (Cassures partielles ou totales des barres).
- Cassure de l'anneau de court-circuit de la cage (Cassures partielles ou totales des anneaux).
- Excentricité statique ou dynamique.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles) [Lad 21].

I.4.2.1. Excentricité

Les effets des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe dès sa fabrication [Hal 15]. Cependant, suite à la flexion de l'arbre, à l'usure des roulements ou à un défaut de charge la machine peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple [Kai 10].

Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator. Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité. La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement. Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine ; en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor [And 12].

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

I.4.2.1.1. Excentricité statique : si le rotor tourne autour de son axe fixé qui est différent de celui du stator, l'excentricité statique se produit, et la figure I.11 illustre ce défaut. Les problèmes de centrage des flasques, qui provoquent le désalignement de l'axe de rotation, et l'ovalisation de l'intérieur du cylindre statorique restent souvent le générateur principal de ce type d'excentricité [Mou 18].

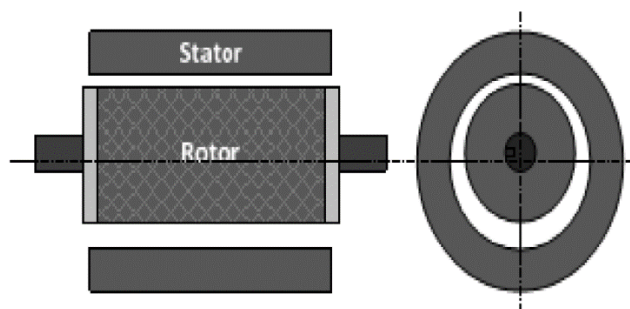


Figure I.11 Représentation de l'excentricité statique [Bel 18].

I.4.2.1.2. Excentricité dynamique : correspond à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator et la figure I.12 illustre ce défaut. Le centre du rotor n'est pas en son centre de rotation et de ce fait la position d'épaisseur minimale d'entrefer tourne avec le rotor [Bes 17].

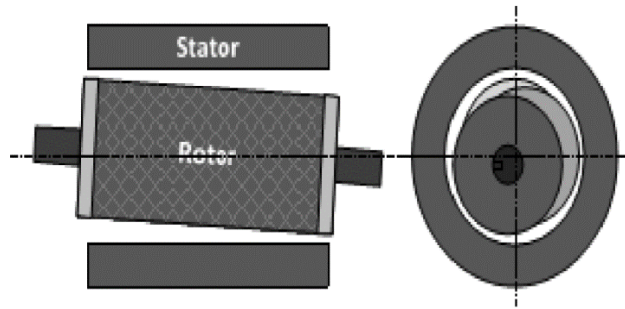


Figure I.12 Représentation de l'excentricité dynamique [Bel 18].

I.4.2.1.3. Excentricité mixte : est la plus fréquente, elle fait la combinaison des deux excentricités précédemment citées et la figure I.12 illustre ce défaut.

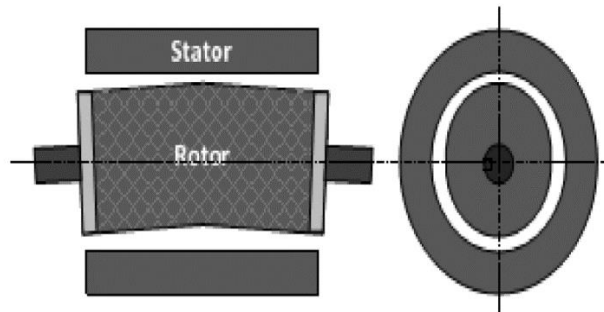


Figure I.13 Représentation de l'excentricité mixte [Bel 18].

I.4.2.2. Ruptures de d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux (figure I.14).

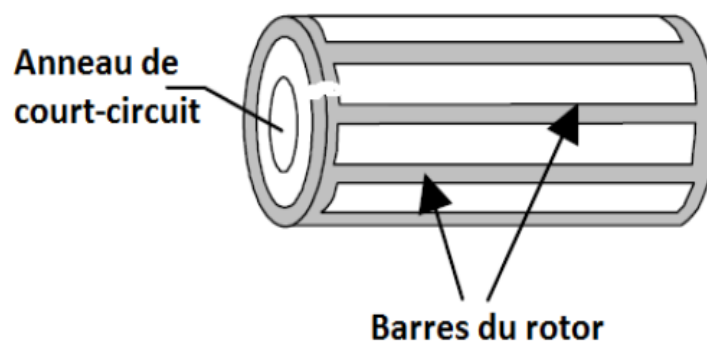


Figure I.14 Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : rupture d'anneau [And 12].

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [Bes 17].

I.4.2.3. Ruptures de barres

Parmi les défauts les plus étudiés, la rupture de barres rotoriques de la machine asynchrone à cage, fait sans doute partie des plus courants.

Une défaillance au niveau de la cage rotorique se situe généralement à la jointure entre une barre et un anneau de court-circuit. En effet, les barres rotoriques et les anneaux de court-circuit ne pouvant pas être construits d'un seul bloc (sauf pour les machines de petites puissances), une soudure est pratiquée aux extrémités de chaque barre pour relier ces dernières aux deux anneaux de court-circuit. La fragilité de ces soudures, par rapport aux barres et aux anneaux fabriqués d'un seul bloc, provoque, à ces endroits précis, une fragilité de la cage d'écureuil (figure I.15) [Kai 10].

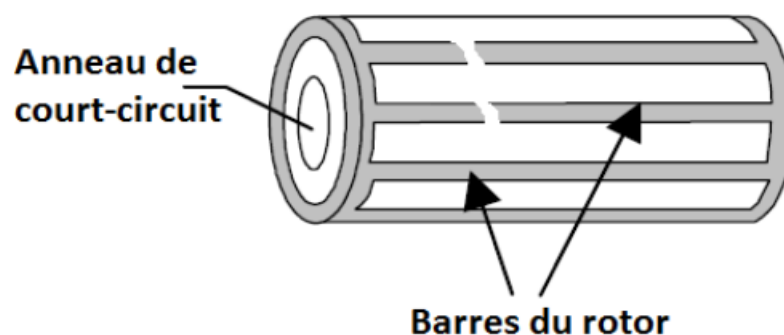


Figure I.15 Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : rupture barres [And 12].

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 [Bel 14].

I.4.3. Défauts roulements

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du roulements, peuvent être définis comme suit : [Bel 17]

- Défaut de bague extérieure.
- Défaut de bague intérieure.
- Défaut de billes.
- Défaut de cage. [Lad 21]

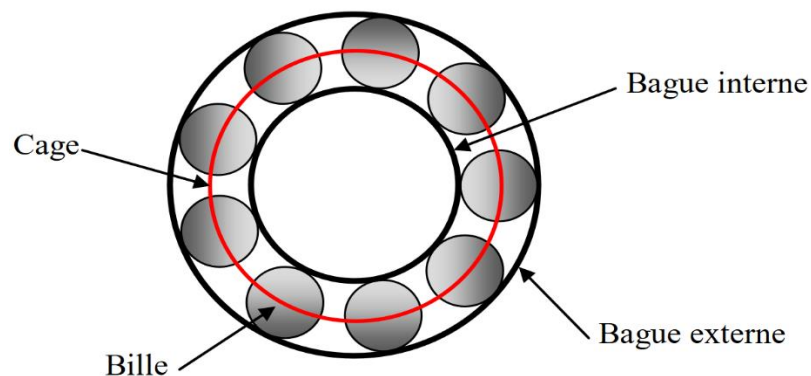


Figure I.16 Structure d'un roulement à billes [Hal 15].

Le roulement à billes est un organe de base dans la machine asynchrone qui joue le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En plus, il représente l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance-prix [Hal 15].

Dans un roulement, les billes, qui roulent normalement dans un lubrifiant entre la bague extérieure fixée au flasque et la bague intérieure fixée à l'arbre, sont plus susceptibles aux problèmes. Le lubrifiant contribue également à éliminer la chaleur et les contaminants du roulement, fournit une isolation électrique entre le rotor et le stator et améliore la stabilité mécanique en augmentant l'amortissement du système [Mou 18].

Les roulements à bille qui assurent la rotation et le maintien de l'axe du rotor sont les composants les plus fragiles des machines électriques et les plus sensibles aux défauts.

Les défauts des machines électriques proviennent principalement des roulements et du bobinage statorique. Il faut dire que les différents éléments qui les constituent (les billes, la cage et les bagues) sont en permanence sollicités. Le passage répétitif des billes sur les pistes engendre de fortes contraintes mécaniques qui entraînent peu à peu une dégradation du métal par

fatigue, et finissent par provoquer l'apparition de défauts ponctuels (des fissures, un écaillage des surfaces, etc.) [Kai 10].

Tableau I.1 Synthèse des signatures des défauts [Bes 17].

Type de défaut	Signaux et signatures	
	Courants statoriques	Vibrations
Cassure de barres	$f_{cb} = (1 \pm 2kg).f_s$	$f_{cb} = f_r \pm 2.s.f_s$
Excentricité: - Statique - Dynamique - Mixte	Statique : $f_{ES} = \left[\left(\frac{kn_b}{p} \right) (1 - s) \pm n_{\omega s} \right].f_s$ Dynamique : $f_{ED} = \left[\left(\frac{kn_b \pm n_d}{p} \right) (1 - s) \pm n_{\omega s} \right].f_s$ Mixte : $f_{mix} = f_s \pm kf_r $	Statique : $2f_s$ ou $k.f_r \pm f_s$ Dynamique : $f_r \pm 2.s.f_s$ ou f_r
Roulement : - Bague extérieure - Bague intérieure - Cage - Bille	Bague extérieure : $f_{c-be} = f_s \pm k.f_{be}$ Bague intérieure : $f_{c-bi} = f_s \pm k.f_{bi}$ Cage : $f_{c-cage} = f_s \pm k.f_{cage}$ Bille : $f_{c-bille} = f_s \pm k.f_{bille}$	Bague extérieure : $f_{be-vib} = k.f_{be} = 0,4.k.N_b.f_r$ Bague intérieure : $f_{bi-vib} = k.f_{bi} = 0,6.k.N_b.f_r$ Cage : $f_{cage-vib} = k.f_{cage} = 04.k.f_r$ Bille : $f_{bille-vib} = k.f_{bille} = 2,32.k.f_f$

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

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de système industriel sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50kw à 200kw) a donné les résultats suivants (Figure I.17) [Bac 22].



Figure I.17 Proportion des défauts.

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.

Une autre étude statistique faite sur des machines asynchrones de faible et moyenne puissance a donné les résultats suivants :

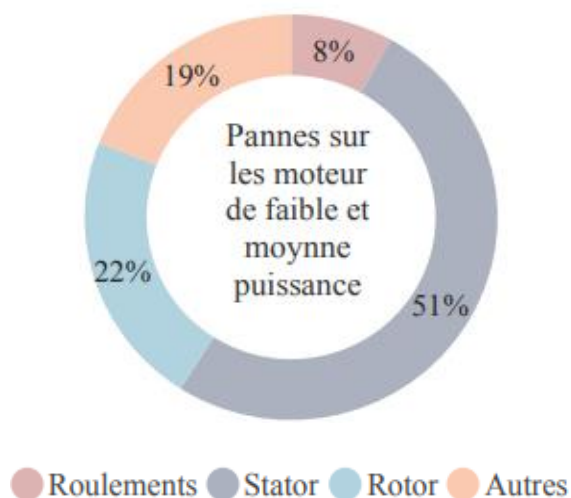


Figure I.18 Proportion des défauts des MAS de faible et moyenne puissance.

I.6. Les cause des défauts

Il existe 2 types de défauts principaux : Internes et externes.

I.6.1. Les défauts internes : sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.).

I.6.2. Les défauts externes : sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Ces défauts peuvent se classer en deux familles principales.

Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans l'organigramme de figure I.19:

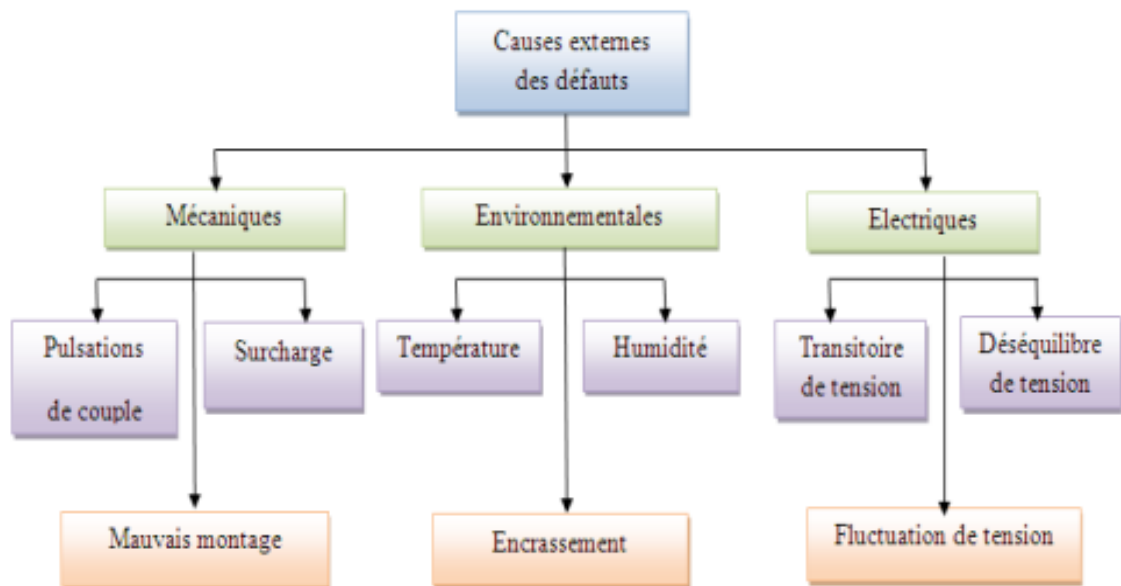


Figure I.19 Causes externes des défauts de la MAS triphasée à cage.

Malgré que la machine asynchrone à cage d'écureuil soit robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts, qui peuvent être soit d'origine électrique, ou mécanique. Cependant, les contraintes de différentes natures auxquelles ces machines sont sollicitées, sont les principales causes des défauts structurels et fonctionnels qui selon leur nature, peuvent endommager totalement la machine et causer inévitablement l'arrêt du processus, donc une perte conséquence de la production [Mer 09].

Les origines des défauts peuvent être diverse, recensons d'après l'organigramme des origines : mécaniques, électriques, thermiques et environnementales [Kai 10].

I.7. Techniques de diagnostic

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance, il existe différentes techniques d'analyse (Figure I.20) tels que

- La mesure de vibrations.
- La thermographie infrarouge.
- L'analyse des mesures ultrasonores.
- L'analyse du bruit.

Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts, on établit une courbe d'évolution de l'indicateur au cours du temps. Sur cette figure I.20, on définit différents seuils correspondant à un niveau d'alerte, à une alarme, à un niveau de défaillance, ces niveaux sont établis soit par expérience soit en appliquant une norme pour les roulements, on utilise des abaques de sévérité vibratoire pour définir les différents seuils [Bou 19].

Pourcentage d'utilisation de différentes méthodes dans le monde

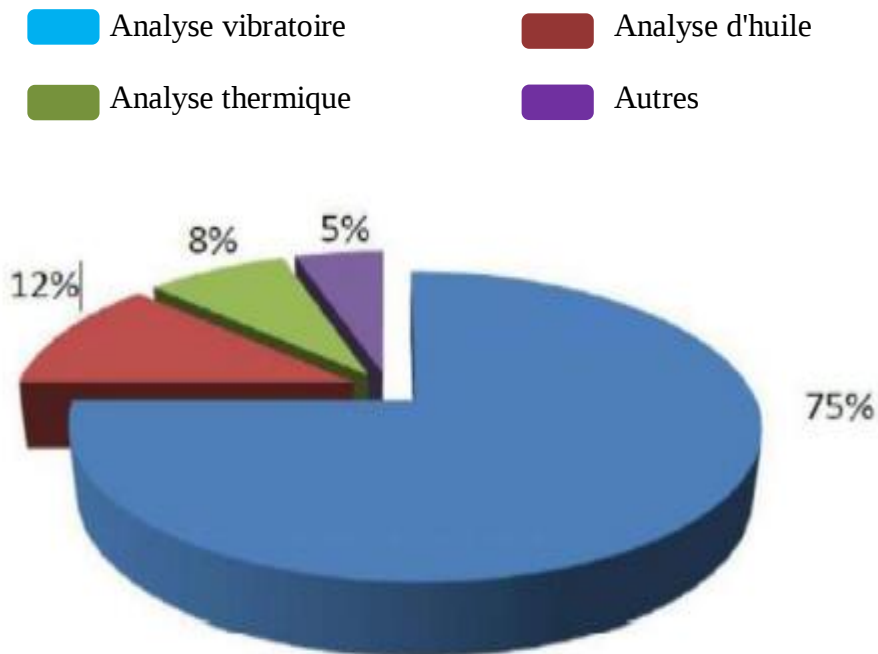


Figure I.20 Différentes méthodes d'analyse.

I.7.1 L'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus utilisée car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines asynchrones [Bou 19].



Figure I.21 Analyse vibratoire [Bou 19].

I.7.2 Analyse du couple électromagnétique

L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même la torsion de l'arbre, entraîne l'apparition d'harmoniques dans le spectre du couple. Donc il peut servir pour la détection des défauts électriques et mécaniques [Baz 16].

I.7.3 Analyse de la température

Toute partie défectueuse dans un moteur asynchrone dissipe une température anormale (augmentation de température due au défaut). Donc, il est très intéressant de suivre l'évolution de la caractéristique thermique du moteur dans ce cas. A cet effet, la technique de diagnostic par mesure de température est basée sur l'analyse de l'évolution de la température dans chaque partie du moteur afin de déterminer le dépassement au-delà du niveau normal qui indique l'existence d'un défaut (Figure I.121) illustre l'image thermique d'un moteur sain et d'un moteur avec un court-circuit de 26% et 40% [Kho 20].

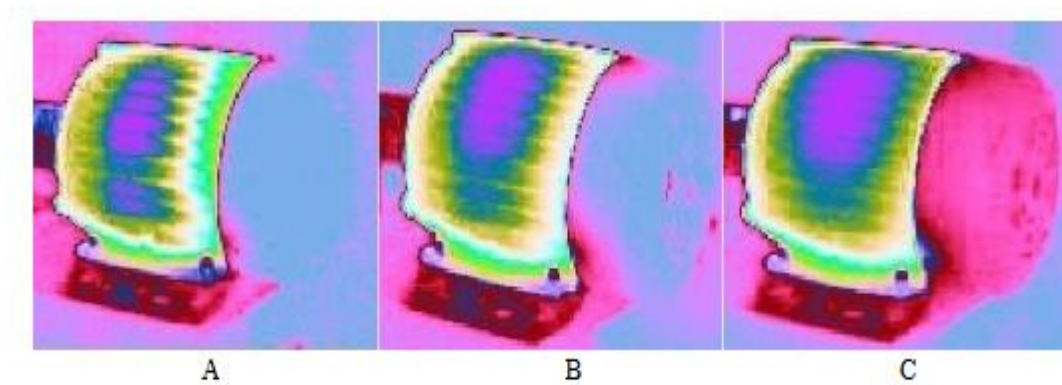


Figure I.22 Image thermique d'un moteur, A) sain, B) court-circuit de 26% et court-circuit de 40% [Mef].

I.7.4 Analyse de la signature du courant statorique (MCSA)

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la plus utilisée car le spectre résultant est riche en informations sur les défauts électriques et mécaniques pouvant apparaître sur la machine asynchrone. Les courants sont faciles à mesurer, ils fournissent des informations sur de nombreux défauts [Baz 16].

I.7.5 Analyse par mesure ultrasonore

Certains instruments ultrasonores sont sensibles à la détection d'émissions sonores de très hautes fréquences comprises entre 20 kHz et 100 kHz. Cette large bande de détection accroît la pertinence du diagnostic. Les signaux sont alors transformés par hétérodynes en fréquences audibles.

La technique consiste à émettre une onde ultrasonore et à mesurer le temps de réception des échos de l'onde à l'aide d'un capteur piézoélectrique [Site Web 4].



Figure I.23 Utilisation des ultrasonore [Site Web4].

I.7.6 Analyse du flux

Toute distorsion de la densité de flux d'entrefer en raison de défauts, quel que soit sa nature électrique ou mécanique, peut affecter la conversion électromécanique et la répartition du champ électromagnétique dans la machine. Un flux homopolaire axial dans l'arbre va être créé, qui peut être détectée par des bobines exploratrices placées à l'extérieur de la machine, parallèlement et perpendiculairement à l'axe du rotor [Baz 16].

I.7.7 Analyse du bruit

Le changement de bruit est souvent un phénomène créé par une défaillance et la mesure du bruit des machines par mesure des vibrations peut être un indice de défektivité.

Le stéthoscope, qui comprend un casque et une sonde, est un instrument qui permet par contact de détecter les composants défectueux par l'écoute des bruits de la machine, pour des fréquences variantes entre 30 et 15 000 Hz [Site Web 4].

La technique consiste à comparer subjectivement les bruits avec des bruits de référence déjà préenregistrés.



Figure I.24 Analyse du bruit [Site Web 4].

1.8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre certaines notions de bases qui concernent la constitution et le principe de fonctionnement du moteur asynchrone. Ainsi que les divers défauts qui peuvent affecter le bon fonctionnement de la MAS. On a indiqué aussi aux quelques techniques utilisées dans le domaine du détection des défauts dans les machines à induction.

Chapitre II

Diagnostic Des Défauts De Roulement

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons essayer de faire une étude assez détaillée sur l'analyse vibratoire appliquée à la machine à induction. Précisément, on va présenter en détail les défauts du roulement qui est un organe mécanique important dans le système complet (MAS). En plus, nous allons présenter avec un peu des détails de quelques techniques à utiliser dans le chapitre d'analyse.

II.2. Structure d'un roulement

Le roulement est un organe de base qui assure une liaison mobile entre deux éléments d'un mécanisme en rotation l'un par rapport à l'autre. Sa fonction est de permettre la rotation relative de ces éléments, sous charge, avec précision et avec un frottement minimal. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux [Ibr 09]. Ils assurent la transmission des efforts et la rotation de l'arbre, un roulement est constitué (composé) de quatre éléments fondamentaux, C'est comme montré dans (figureII.1) suivante

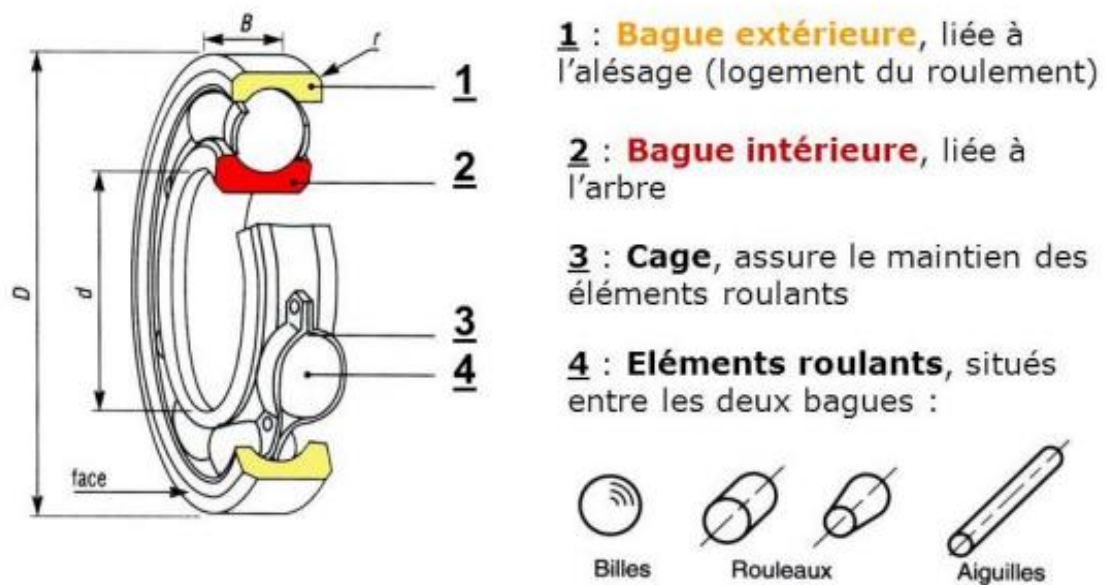


Figure II.1 Eléments d'un roulement [Adb10].

II.2.1 Bague extérieure

C'est l'élément qui limite les dimensions extérieures du roulement, Elle sera montée dans un logement fixe (bague extérieure fixe) ou dans un moyeu tournant (bague extérieure tournante) [Cha16].

II.2.2 Bague intérieure

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

II.2.3 La cage

Les cages à billes ou à rouleaux ne participent jamais à la transmission de la charge sur le roulement. Elles peuvent cependant être soumises à des forces d'inertie, centrifuges, des secousses, etc. [Cha16].

II.2.4 Les éléments roulants

Il s'agit des billes, rouleaux et des aiguilles. Ce sont les éléments des roulements qui assurent la transmission de la charge entre les deux bagues du roulement, ils sont responsables de la rotation relative d'une bague par rapport à l'autre [Adb10].

II.3. Types des défauts roulements

I.3.1 Fracture

Le phénomène de fracture concerne des petites pièces qui ont été cassées en raison d'une charge excessive ou de chocs agissant localement sur une arrête de roulement ou sur l'épaule d'un chemin de roulement [Site Web 8].



Figure II.2 Fracture sur la bague extérieure.

II.3.2. Fissures

Fissures sur la piste de roulement et des éléments roulants. Le fait de poursuivre l'utilisation dans ces conditions provoque des fissures plus importantes ou des fractures.



Figure II.3 Fissures sur la bague extérieure.

II.3.3. Usure

L'usure est une détérioration de surface causée par un frottement par glissement à la surface du chemin de roulement, des éléments roulants, des faces des rouleaux, de la face de l'épaulement, des poches de cage, etc. [Site Web 8].



Figure II.4 Usure sur la bague Intérieure.

II.4. Fréquences caractéristiques et défauts

La présence d'un défaut au niveau d'un roulement à un impact sur le spectre de son signal vibratoire tel qu'une augmentation de l'amplitude de la vibration aux fréquences du roulement, mais aussi la présence des vibrations aux harmoniques de ces fréquences ainsi qu'à

des fréquences de modulation, le spectre va faire apparaître un peigne de raie à la fréquence du défaut et des bandes latérales à la fréquence de rotation de l'arbre Figure II.05. [Ham18]

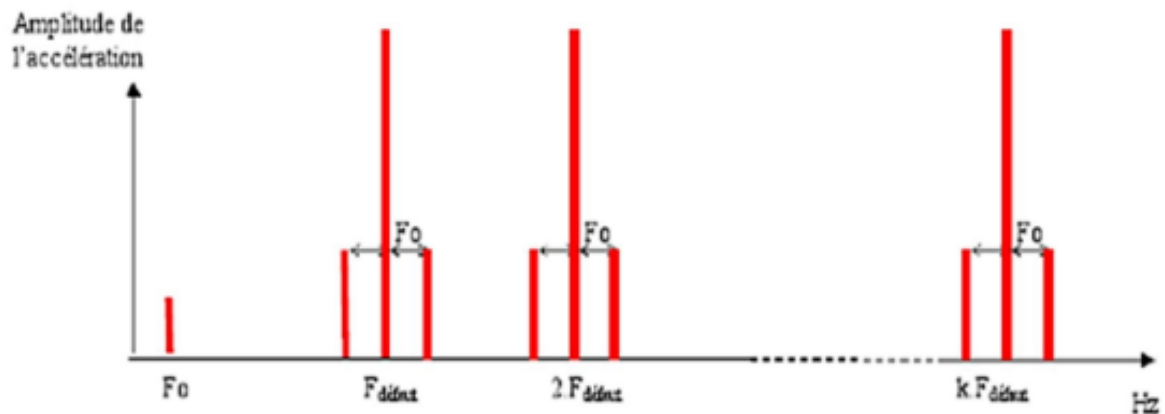


Figure II.5 Spectre théorique d'un défaut

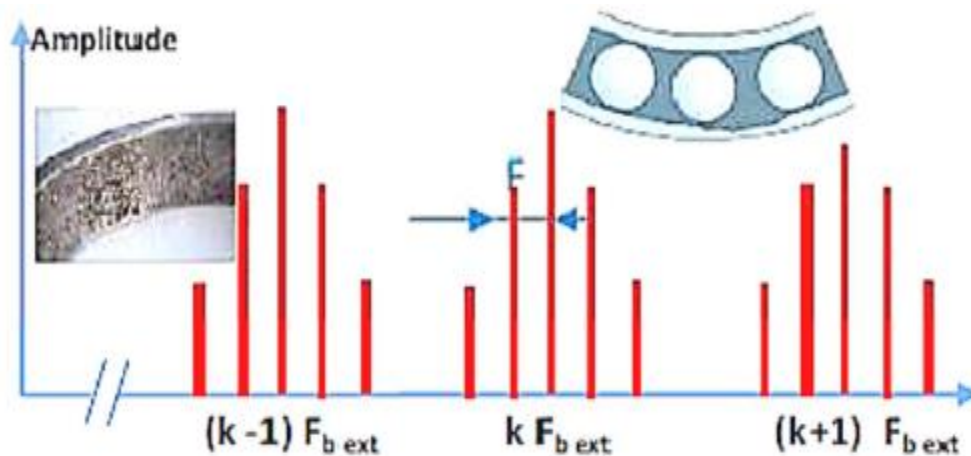


Figure II.6 Fréquence caractéristique d'un défaut de type écaillage affectant la bague extérieure.

II.5. Techniques d'analyse

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance, il existe différentes techniques d'analyse (figure II.7) tels que l'analyse vibratoire, l'émission acoustique, la thermographie, l'analyse des huiles et des lubrifiants, la variation de résistance dans un circuit électrique, etc... [Lar 18].

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

appliquant une norme (pour les roulements, on utilise des abaques de sévérité vibratoire pour définir les différents seuils) [Dje 13].

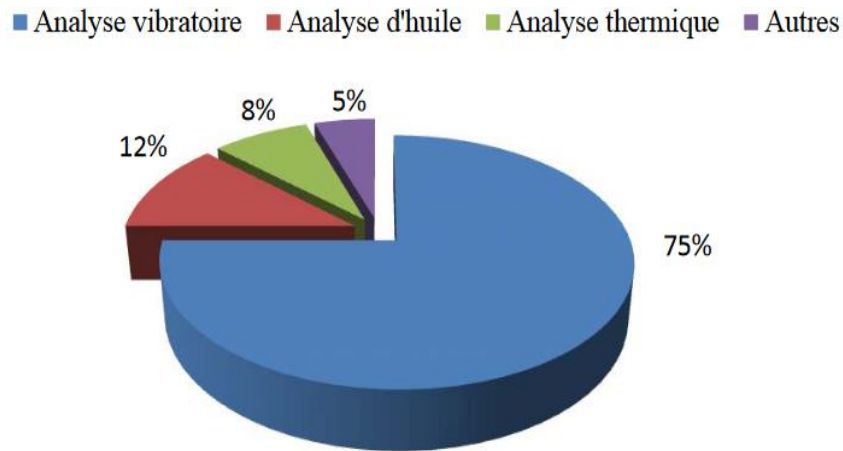


Figure II.7 Différentes méthodes d'analyse [Dje 13].

II.5.1. L'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une politique de maintenance prévisionnelle de l'outil de production industrielle.

Les objectifs d'une telle démarche sont de :

- ☒ Réduire le nombre d'arrêts sur casse.
- ☒ Fiabiliser l'outil de production.
- ☒ Augmenter son taux de disponibilité.
- ☒ Mieux gérer le stock de pièces détachées, etc.

À partir des vibrations régulièrement recueillies sur une machine tournante, l'analyse vibratoire consiste à détecter d'éventuels dysfonctionnements et à suivre leur évolution dans le but de planifier ou reporter une intervention mécanique [Ber 17].

II.6. Vibrations des machines tournantes [Dje 13]

En pratique, une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires dans une machine tournante. Cependant, la machine vieillissante, les fondations travaillent, les pièces se déforment et s'usent, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent.

Les arbres se désalignent, les paliers s'usent, les rotors se déséquilibrent, les courroies se détendent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de

l'énergie vibratoire qui excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux paliers.

Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée. C'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser.

II.6.1. Principales causes de vibrations des machines [Site Web 6]

Les vibrations peuvent être le résultat de plusieurs facteurs, isolés ou combinés. N'oubliez pas que les problèmes de vibrations ne sont pas provoqués uniquement par l'équipement principal mais peuvent aussi provenir d'un équipement auxiliaire.

- ❖ **Déséquilibre** : un « point lourd » dans un composant rotatif entraîne des vibrations lorsque le poids déséquilibré tourne autour de l'axe de la machine, créant ainsi une force centrifuge. Un déséquilibre peut être provoqué par des défauts de fabrication ou des problèmes d'entretien. Les effets du déséquilibre s'accroissent à mesure que la vitesse de la machine augmente.
- ❖ **Mauvais alignement / détérioration de l'arbre** : des vibrations peuvent survenir lorsque les arbres de la machine ne sont plus alignés. Un mauvais alignement angulaire apparaît lorsque les axes du moteur et de la pompe ne sont pas parallèles. Lorsque les axes sont parallèles mais pas précisément alignés, il s'agit d'un mauvais alignement parallèle. Les vibrations qui en résultent peuvent être radiales ou axiales (dans l'axe de la machine), ou les deux à la fois.
- ❖ **Usure** : lorsque des composants s'usent, tels que les roulements à billes ou à rouleaux, les courroies de transmission ou les engrenages, des vibrations peuvent survenir. Par exemple, lorsqu'une bague de roulement commence à s'user, les rouleaux provoquent des vibrations à chaque fois qu'ils passent sur la zone endommagée.
- ❖ **Desserrement** : des vibrations, qui pourraient être tout à fait anodines, peuvent devenir évidentes et destructrices si le composant qui vibre est mal fixé ou si ses roulements sont desserrés. Ce desserrement peut éventuellement être causé par des vibrations sous-jacentes.

II.6.2. Différentes formes de vibrations

On classe généralement les vibrations d'après l'évolution de la variable considérée dans le temps (périodicité). On distingue ainsi les vibrations :

- Harmoniques.
- Périodiques.

- Aléatoire [Bou 18].

II.6.2.1. Vibrations harmoniques

Une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme amplitude-temps est représenté par une sinusoïde (figure II.8).

Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle qui est générée par le balourd d'un rotor en mouvement [Lar 18].



Figure II.8 Vibration harmonique.

Est décrite par l'équation :

$$X(t) = x \sin(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots (I.1)$$

Avec :

ω : vitesse angulaire ou pulsation du mouvement ($2\pi f$).

f : fréquence du mouvement.

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

II.6.2.2. Vibrations périodiques

Une vibration périodique est telle qu'elle se reproduit exactement après un certain temps appelé période. Une telle vibration est créée par une excitation elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines figure II.9.

Une Vibration périodique est la composée de plusieurs Vibrations harmoniques [Ber 17].

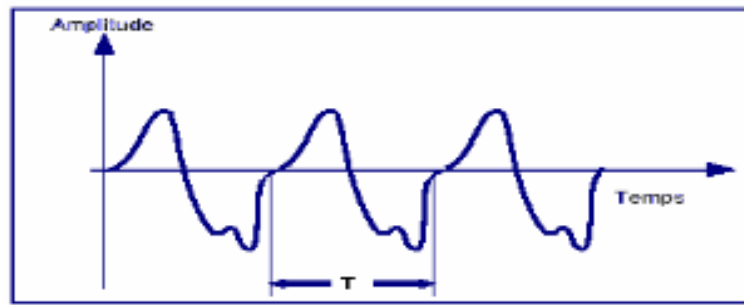


Figure II.9 Vibration périodique.

Elle est décrite par l'équation :

$$v(t) = \sum_{i=1}^{\infty} v_i * \sin(\omega_i . t + \phi_i) \dots\dots\dots (I.2)$$

II.6.2.3. Vibrations aléatoires :

Une vibration aléatoire est telle que son comportement temporel est quelconque, c'est à dire que l'on n'observe jamais de reproductibilité dans le temps figure II.10. C'est le cas des chocs que l'on enregistre sur un broyeur [Bou 18].

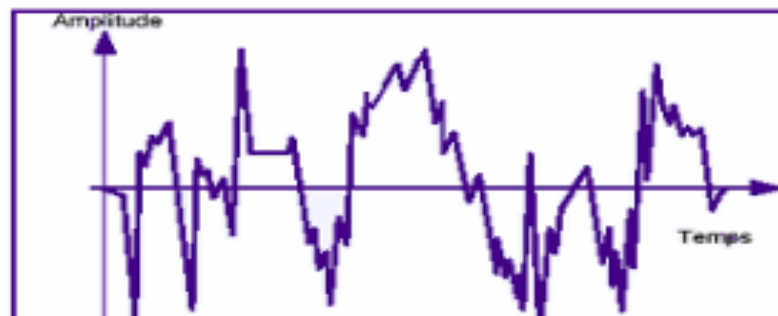


Figure II.10 Vibration aléatoire.

Elle est décrite par l'équation :

$$v(t) = \sum_{i=1}^{\infty} X_i * \sin(\omega_i . t + \phi_i) \dots\dots\dots (I.3)$$

II.6.3. Objectifs d'analyse vibratoire

La détection des défauts.

L'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- ✚ Soit dans le domaine temporel.
- ✚ Soit dans le domaine fréquentiel.
- ✚ Soit dans les deux à la fois [Lar 18].

II.6.4. Les avantages et les inconvénients d'analyse vibratoire

✚ Les avantages

- Détection de défauts à un stade précoce,
- Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi.
- Autorise une surveillance continue.
- Permet de surveiller.
- L'équipement à distance.

✚ Les inconvénients

- Spectres parfois difficiles interpréter,
- Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses.

II.7. Transformée de Fourier

En 1807, la transformation de Fourier a vu le jour, l'analyse de Fourier est une base majeure de la physique et des mathématiques. Elle est indissociable du traitement du signal, et ce pour deux raisons principales. La première est l'universalité du concept de fréquence sur lequel elle repose. La seconde tient à la structure même de l'analyse de Fourier qui se prête aisément à des transformations communes comme le filtrage linéaire en les traduisant de manière particulièrement simple.

Le principe de la transformée de Fourier repose sur le fait que toute fonction périodique peut être représentée comme la somme d'une série de sinus et de cosinus dont on fait varier d'une part les amplitudes en les multipliant par des coefficients, et d'autre part les phases en les décalant de manière à ce qu'elles s'additionnent où se compensent [Ker 16].

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot t} dt \dots\dots\dots (I.4)$$

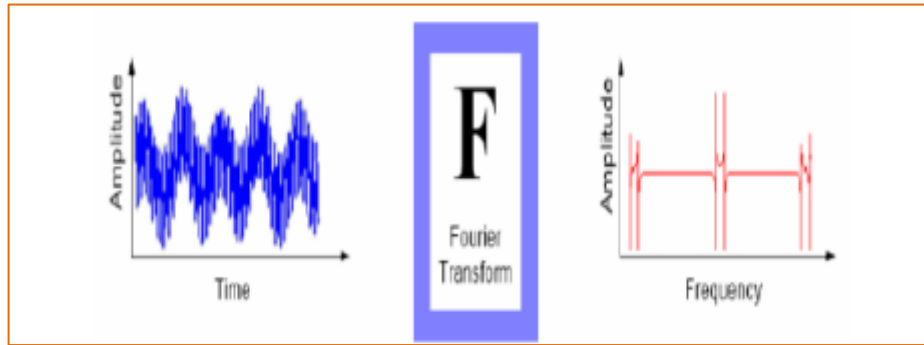
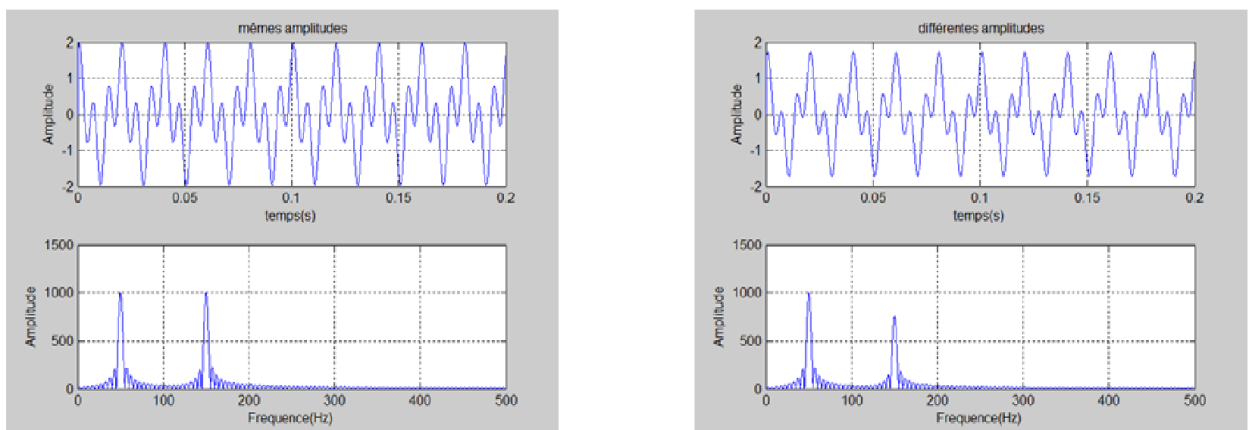


Figure II.11 Principe de la Transformée de Fourier.

Pour une meilleure visualisation d'une analyse fréquentielle, la FFT est utilisée au travers d'une fenêtre glissante d'observation.

Ci-après un exemple sur un signal stationnaire est donné. Ce signal est composé d'une somme de deux sinusoïdes de fréquences (50 et 150 Hertz) de même amplitude et d'amplitude différente, dont FFT voir Figure II.12. On constate qu'avec l'analyse de Fourier, les deux signaux sont identiques en raies spectrales et bien sûr les amplitudes diffèrent [Baz 16].



(a) : mêmes amplitudes.

(b) : amplitudes différentes.

Figure II.12 Représentation temporelle et fréquentielle somme de deux sinusoïdes [Baz 16].

II.7.1. Technique de la FFT

La FFT est un moyen efficace qui réduit le nombre d'opérations arithmétiques nécessaire à la transformée discrète, son importance augmente aussi avec l'évolution du traitement numérique des signaux, de même avec la possibilité de pouvoir l'utiliser pour des signaux analogiques ou plus généralement pour des fonctions continues dans des nombreux domaines scientifiques. L'utilisation de cette méthode est très simple car elle ne nécessite pas l'introduction d'appareillage de mesure à l'intérieur de la machine électrique, mais consiste à analyser le courant statorique du moteur [Ham 18].

II.8. Étude détaillé MCSA, MVSA, SFSA

Bien que les machines électriques soient considérées comme des dispositifs électromécaniques robustes de conversion de l'énergie, les défaillances des moteurs à induction sont très fréquentes et compromettent la fiabilité de la production industrielle. Si elles ne sont pas détectées, les défaillances précoces peuvent s'aggraver et conduire à des pannes catastrophiques entraînant d'énormes pertes financières et des périodes prolongées avant la remise en service des lignes de production. De nombreuses méthodes ont été proposées au fil des ans pour traiter les défaillances de roulements. Parmi celles-ci, on peut citer Motor Current Signature Analysis (MCSA), Motor Vibration Signature Analysis (MVSA) et Stray Flux Signature Analysis (SFSA) [Spy 21].

L'analyse de la détection des défaillances à l'aide de différentes méthodes n'est pas toujours possible car elle nécessite des paramètres de modèle de moteur complets et précis [Swa 18].

II.8.1. Motor Current Signature Analysis (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.

L'analyse du courant statorique 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 pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone [Ham18].

II.8.1.1. Principe

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 produit dans l'enroulement statorique une harmonique à deux composantes, la première ayant la fréquence $(1-2k_g)fs$ et la deuxième ayant la fréquence $(1+2k_g)fs$. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signal Analysis) [Har 09].

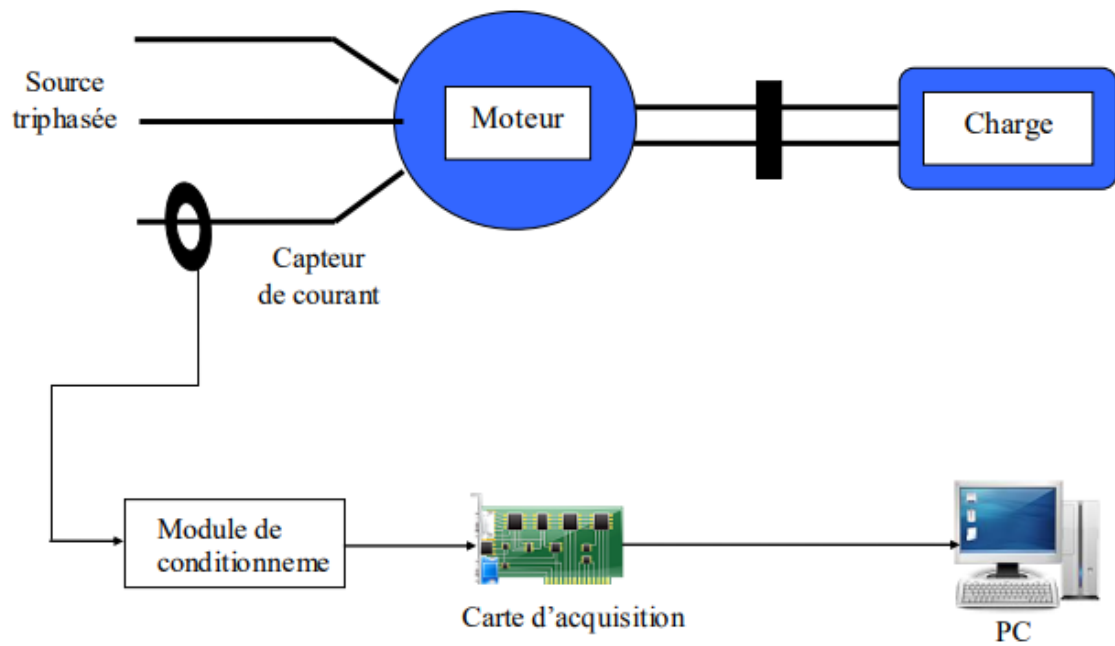


Figure II.13 Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique.

II.8.1.2. Exemple sur MCSA

Présenter le résultat du capteur mesurant le current dans une machine synchrone de laboratoire en conditions saines.

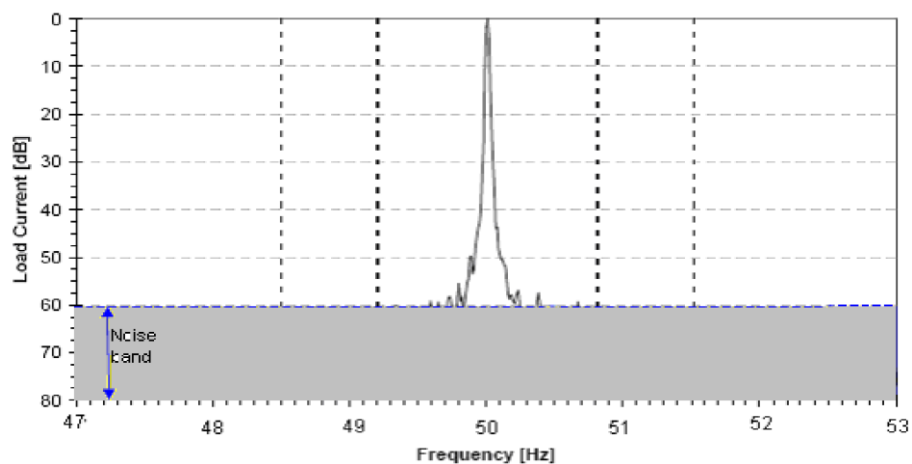


Figure II.14 Spectre de courant d'un moteur sain.

Sur la figure II.14 l'analyse des harmoniques est présentée pour le cas de la machine saine avec le capteur de courant.

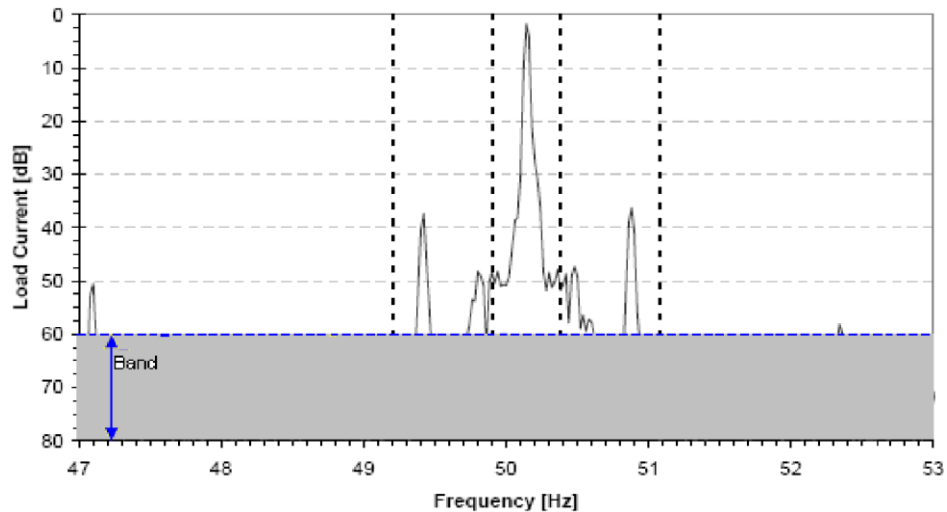


Figure II.15 Spectre de courant moteur avec un rotor endommagé.

Sur la figure II.15 montre une partie du spectre de courant résolu en fréquence pour moteur avec un rotor endommagé.

Produisant un intervalle de fréquence de 48 Hz à 52 Hz pour la détection des barres de rotor cassées. Sur la base du courant d'alimentation, l'instrument a prédit que les bandes latérales dues aux barres de rotor cassées seraient positionnées à 49,70 Hz et 50,57 Hz [Nee 07].

II.8.1.3. Les avantages et les inconvénients de MCSA

🚦 Les avantages

- ✓ Pas coûteux en calcul.
- ✓ Simple à mettre en œuvre.
- ✓ Une analyse précise du défaut est possible.
- ✓ La possibilité d'être appliqué en ligne.

🚦 Les inconvénients

- ✓ Pas si efficace pour les applications où la charge change constamment.
- ✓ Vulnérable au masquage de signature en fonction de divers facteurs, c'est-à-dire les propriétés géométriques, les défauts de fabrication, les cas de défauts mixtes, etc.

II.8.2. Motor Vibration Signature Analysis (MVSA)

II.8.2.1. Représentation temporelle du signal vibratoire

La première façon de représentation du signal vibratoire délivré par un capteur, est la représentation en fonction du temps (représentation temporelle). Cette représentation est utilisée pour suivre le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ces paramètres de fonctionnement (étude de la vibration d'une turbine lors de sa décélération). Ce type de représentation, aisé à exploiter lorsque le signal est simple (vibration sinusoïdale induite par un balourd), devient vite inexploitable lorsque le signal a pour origine des sollicitations multiples (Figure II.16) [Land].

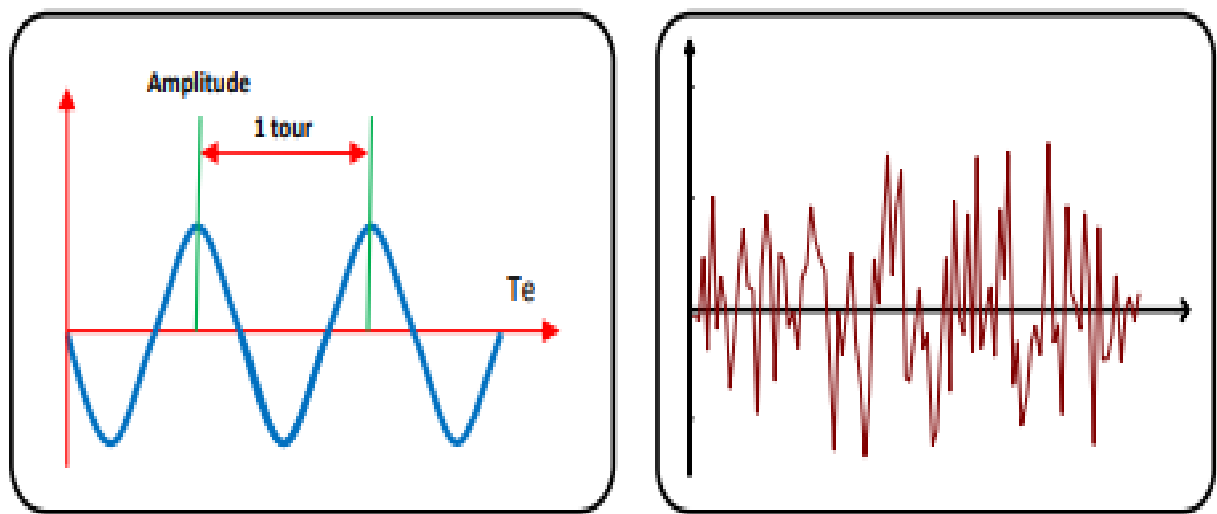


Figure II.16 (a) : Signal vibratoire sinusoïdal généré par un balourd (b) : Signal vibratoire complexe.

II.8.2.2 Mesure de la vibration :

La mesure est réalisée par deux types de capteurs :

- Les accéléromètres pour des mesures de vibration absolues (placés sur des paliers à roulement).
- Les sondes de déplacement ou de proximité pour des mesures de déplacement relatif de l'arbre dans les paliers [Bes17].

II.8.2.3 Capteurs et grandeurs mesurées :

Le capteur de vibration est un transducteur capable de convertir le niveau de vibration ressenti à un moment donné en un signal électrique.

Dans la plupart des applications de mesure de vibrations, on trouve les paramètres suivants :

II.8.2.3.1. Vitesse (vélocimètre ; mm/s ou mV)

Un aimant permanent génère une induction magnétique constante B . Les lignes de champ se referment par l'intermédiaire du boîtier. Une bobine suspendue par des membranes peut se déplacer dans la direction des lignes de champ. Une force électromotrice (fém) d'induction 'e' est alors générée, qui est le produit de la vitesse v de vibration, de l'induction magnétique B et de la longueur l de l'enroulement ($e=P.l.v.$) [Ben 08].

II.8.2.3.2. Accélération (accéléromètre ; mm/s² ou $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ ou mV)

Les éléments actifs de ce type de capteur sont des disques spéciaux de cristal piézo-électrique, qui ont la propriété de transformer une contrainte (solicitation mécanique : pression ou cisaillement) en charges électriques Q (en pC). Ces disques piézo-électriques doivent se trouver entre deux masses relativement importantes par l'intermédiaire d'un ressort. Lorsque le capteur est soumis à une vibration, les masses exercent une pression alternative sur les disques qui, grâce à leur effet piézo-électrique, créent une variation de charge électrique proportionnelle à la force appliquée et donc à l'accélération des masses [Bes 17].

II.8.2.3.3. Déplacement (μm , mm ou mV)

Il existe en effet des capteurs : (Inductifs, Capacitifs et à courants de Foucault), c'est ce dernier qui s'est imposé dans le monde entier, le circuit oscillant crée un champ magnétique alternatif dans la bobine du capteur. D'après le principe d'induction, il se crée alors des courants de Foucault dans un corps conducteur que l'on approche du capteur. Ces courants de Foucault agissent à leur tour sur la bobine par l'intermédiaire du champ magnétique et consomment ainsi de l'énergie électrique. Elle se traduit alors dans le conditionneur par une diminution de la tension. Cet effet est démodulé dans le conditionneur et transformé en un signal de mesure proportionnel à la distance objet/bobine (de mV à mm) [Ben 08].

Pour une sonde de déplacement le signal est exprimé en déplacement (μm).

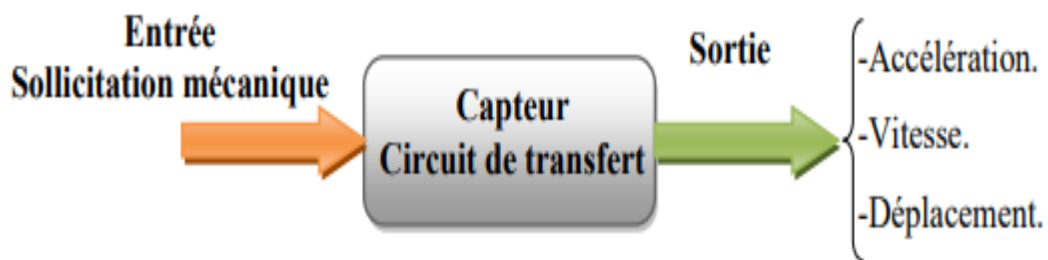


Figure II.17 Schéma de principe d'un capteur de vibration.

II.8.2.4. Les points de mesure des vibrations

Généralement, la localisation des points de mesure se fait pour les raisons suivantes :

- ✓ Les mesures de vibrations sont réalisées sur les paliers de la machine.
- ✓ Le capteur doit être placé de façon à assurer un trajet direct (rotor-structure) aux vibrations.

Les mesures peuvent se faire :

- dans un plan radial (vertical : PRV, horizontal : PRH, oblique : PRO).
- et/ou dans un plan axial (axial : PA).



Figure II.18 Différents points de mesure des vibrations d'une MAS [Bes 17].

II.8.2.5. Objectifs d'analyse vibratoire

La détection des défauts.

L'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- Soit dans le domaine temporel.
- Soit dans le domaine fréquentiel.
- Soit dans les deux à la fois. [Lar 18]

II.8.2.6. Les avantages et les inconvénients de MVSA

Les avantages

- Détection de défauts à un stade précoce.

- Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi.
- Autorise une surveillance continue.
- Permet de surveiller.
- L'équipement à distance.

Les inconvénients

- Spectres parfois difficiles interpréter.
- Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses [Bac17].

II.8.3. Stray Flux Signature Analysis (SFSA)

Le fait que les machines à induction ont pris le contrôle de la majorité des applications industrielles dans le monde moderne a augmenté la demande de méthodes de surveillance efficaces et fiables. Cette demande a été satisfaite au fil des ans avec différentes techniques de surveillance efficaces combinées à des méthodes de diagnostic, utilisant des mesures des courants ou des tensions du stator, des ondulations de vitesse ou de couple et des quantités liées au champ magnétique.

L'analyse de signature de flux parasite (SFSA) a été appliquée avec succès pour différents types de défauts. Pour ce type d'analyse, le flux magnétique qui s'égare à l'extérieur du moteur est surveillé en capturant la tension induite sur des bobines de recherche rigides, dimensionnées de manière inversement proportionnelle à la hauteur de la machine. Cela permet de rechercher des signatures dans les spectres de fréquence, selon l'origine du flux parasite, soit flux axial, flux axial & radial ou flux radial pur.

La détection de telles signatures est basée sur les études anciennes et récentes pour la surveillance de l'état, dans lesquelles la modélisation théorique, expérimentale et quantitative du contenu harmonique et spectral est fournie [Pan 18].

II.8.3.1. Exemple sur SFSA

Présenter le résultat du capteur mesurant le flux dans une machine synchrone de laboratoire en conditions saines, en position haute de la machine.

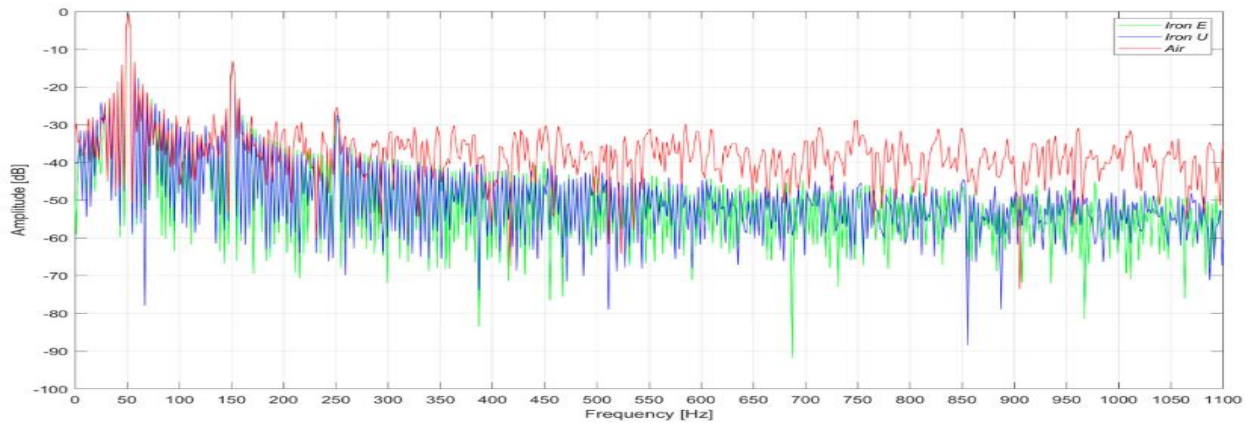


Figure II.19 Analyse fréquentielle de la mesure de tension induite en conditions saines, en position haute [Pen 20].

Sur la Figure 19, l'analyse des harmoniques est présentée pour le cas de la machine saine avec les capteurs de flux placés en position haute.

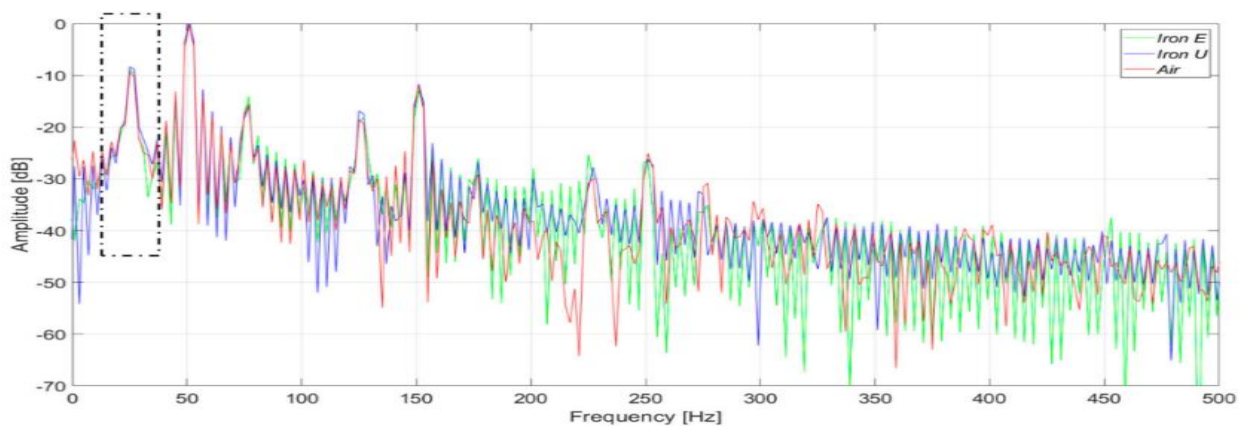


Figure II.20 Analyse fréquentielle de la mesure de tension induite avec une sévérité de défaut rotor inter-spaires de 15%, en position haute [Pen 20].

On voit clairement que l'harmonique 25 Hz, correspondant au défaut inter-spaires dans l'inducteur, présente une amplitude accrue par rapport à la machine saine. Sur (Figure 20), l'analyse des harmoniques dans le capteur, pour un défaut inter-spaires rotor de 15 %. Les résultats sont proches de ceux présentés ci-dessus. [Pen 20].

II.8.3.2. Capteurs des flux

Les capteurs ont été fabriqués avec une forme rectangulaire et comprennent 200 tours de fil de cuivre. Les bobines ont été placées dans des supports diélectriques similaires. Puis dans un second temps, les trois bobines individuelles ont été encore discriminées par l'utilisation ou non d'un noyau de fer. La première bobine formait un capteur de flux sans noyau. Pour les deux

autres capteurs, les bobines étaient montées sur des noyaux de fer, respectivement en forme de U et de E. Les noyaux de fer ont été construits par des tôles magnétiques standard en acier utilisées dans les petits transformateurs. Les supports de bobine de capteur sont illustrés à (figure II.21).

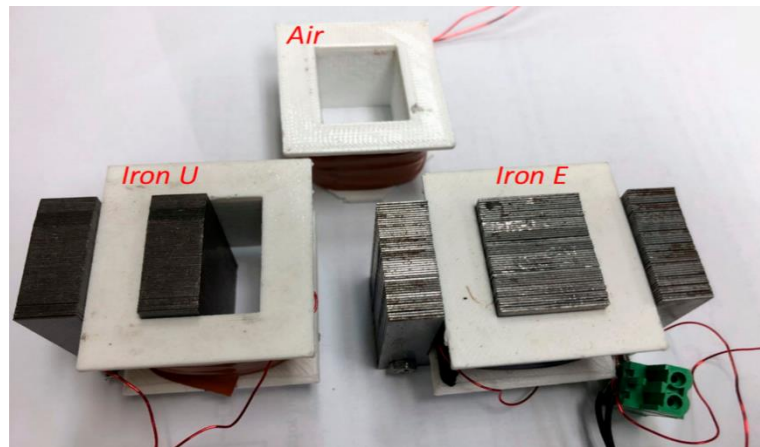


Figure II.21 Capteurs de flux : air, noyau de fer U et noyau de fer E [Pen 20].

II.8.3.3. Les points de mesure

Plusieurs études antérieures ont prouvé que l'analyse du champ magnétique externe permet de détecter différents types de pannes dans les moteurs à induction. Démontré que, une fois obtenu le spectre de Fourier de l'EMF induit dans un capteur à bobine approprié.

Selon la position du capteur, les composantes radiales ou axiales prévaudront sur les autres. Selon cela, comme indiqué dans, le champ axial est mesuré lorsque le capteur est installé dans la position A. Le champ radial est principalement mesuré en plaçant le capteur dans la position C et lorsqu'il est installé dans la position B, le capteur mesure le champ radial. Champ et une partie du champ axial (Figure II.22) [Vic 21].



Figure II.22 Positions du capteur de bobine [Vic 21].

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une présentation du défaut de roulement dans machine asynchrone d'une manière détaillée. Ces défauts peuvent transmettre aux d'autres parties du moteur asynchrone. Enfin, nous avons indiqué aux notions fondamentales dans les techniques de diagnostic (MCSA, MVSA et SFSA) qui ont une grande partie de notre travail.

Chapitre III

Analyse des défauts de roulement dans la bague intérieure

III.1. Introduction

Les roulements sont parmi les composants les plus sollicités des machines et représentent une source de panne fréquente. Il est donc nécessaire, de diagnostiquer très tôt les défaillances des roulements afin de préserver la sécurité du personnel, éviter l'arrêt de toute la chaîne de production, et ainsi minimiser les pertes financières.

Donc dans ce chapitre, nous allons exploiter des résultats expérimentaux pour analyser les défauts de roulement en se basant sur les méthodes de la MCSA, MVSA et SFSA.

III.2. Détection du défaut de roulement par la méthode de MCSA

L'analyse du courant est la méthode la plus utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts pouvant apparaître au sein d'une machine. Cette méthode a été étudiée dans le deuxième chapitre.

Les roulements sont présents dans de nombreux types de machines électriques. Le roulement à billes est un organe de base dans la machine asynchrone qui joue le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. Il existe de nombreuses raisons de défaillance des roulements. Tous ces défauts ont en commun le fait, qu'ils se traduisent tôt ou tard par une perte sur le couple électromagnétique de la machine.

Un petit trou au niveau de la bague intérieure se traduit par des chocs répétés des billes sur la cage ou les chemins du roulement.

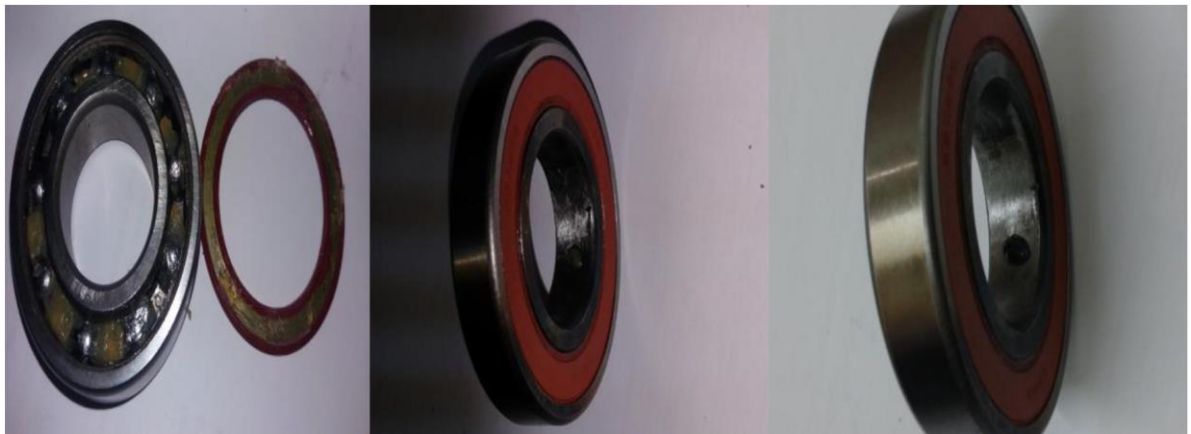


Figure III.1 Photos d'un roulement défectueux dans la BI [Bes 17].

Dans cette étape, nous allons analyser le courant statorique dans le cas d'un fonctionnement en charge.

$$f_{c-bi} = 0,6 \times N_b \times f_r \quad (III.1)$$

$$f_r = \frac{(1-g)}{p} \times f_s \quad (III.2)$$

De plus, la série d'harmoniques est vérifiée par l'équation (III.1) sur la bande illustrée de [0-1000] Hz. Il y a beaucoup d'harmoniques pour s'assurer qu'il y a un défaut dans BI. Les valeurs calculées de ces harmoniques sont :

$$f_{c-bi}^- = |(1)f_s - 0.6(1)N_b \times f_r| = 78.52 \text{ Hz}$$

$$f_{c-bi}^+ = (1)|f_s + 0.6(1)N_b \times f_r| = 178.52 \text{ Hz}$$

$$f_{c-bi}^- = |(1)f_s - 0.6(2)N_b \times f_r| = 207.04 \text{ Hz}$$

$$f_{c-bi}^+ = |(1)f_s - 0.6(2)N_b \times f_r| = 307.04 \text{ Hz}$$

$$f_{c-bi}^+ = |(3)f_s + 0.6(4)N_b \times f_r| = 664.08 \text{ Hz}$$

$$f_{c-bi}^- = |(3)f_s - 0.6(1)N_b \times f_r| = 21.48 \text{ Hz}$$

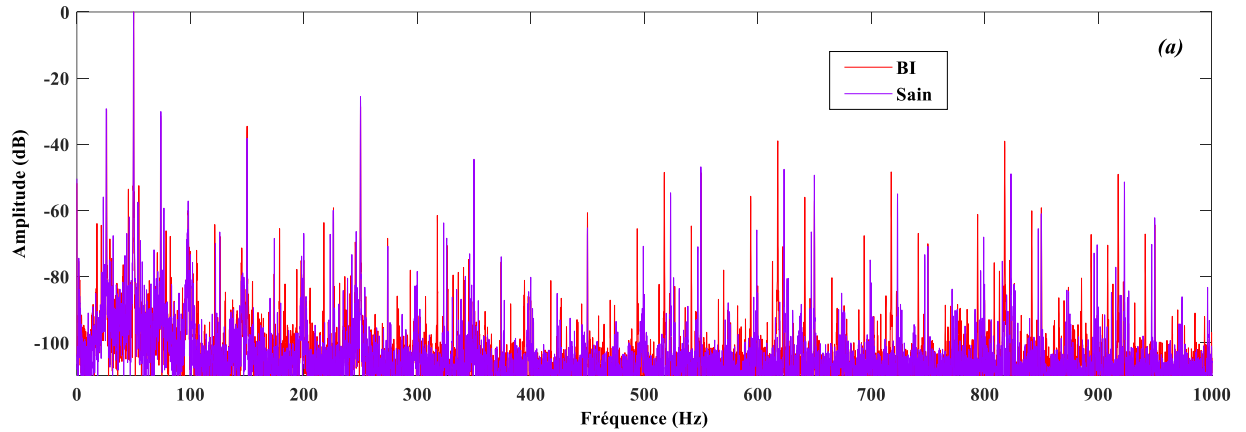


Figure III.2. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BI, $g = s = 0.048$) (a) : 0-1000Hz

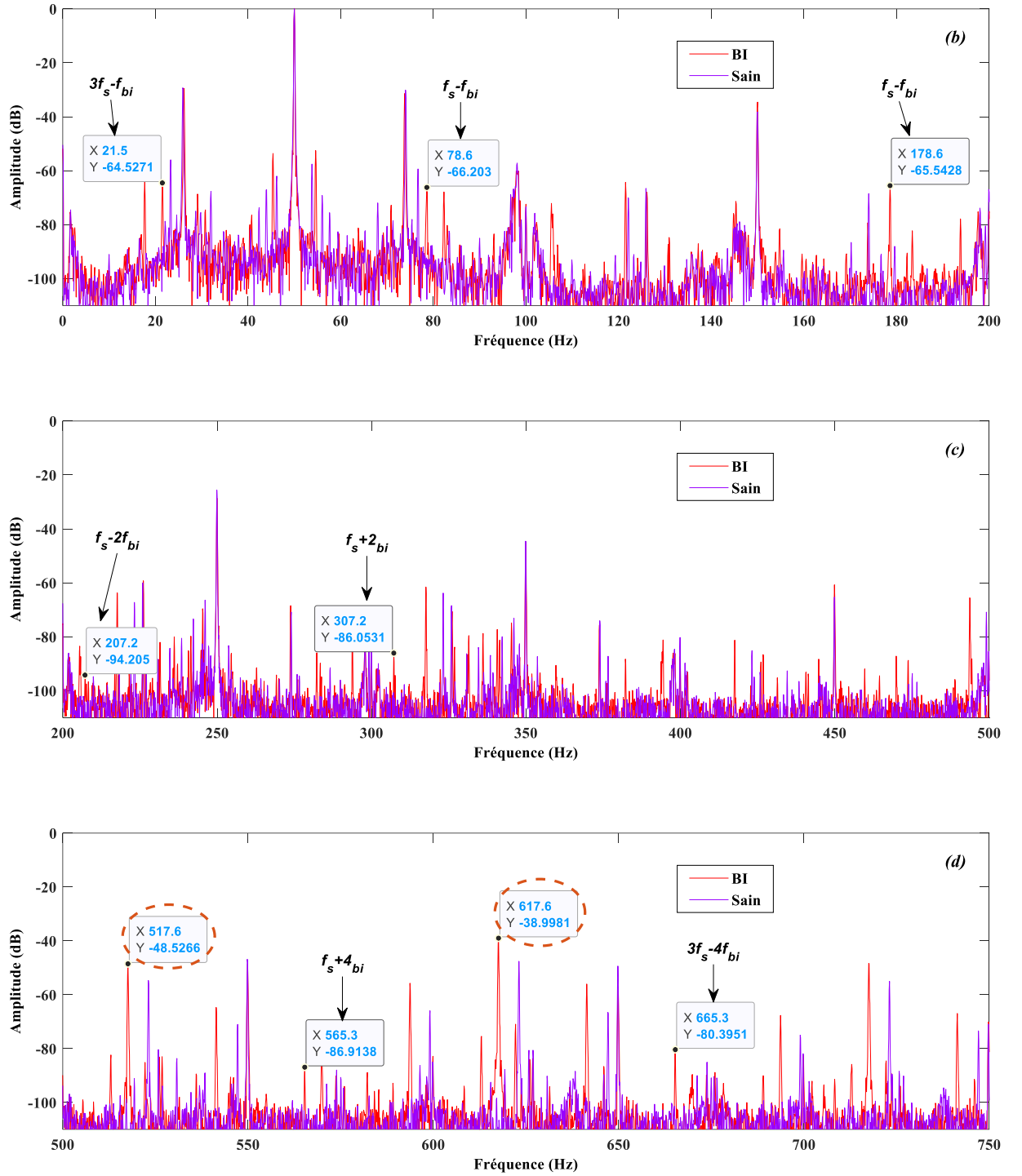


Figure III.3. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BI, $g = s = 0.048$) (b) : 0-200Hz, (c) : 200-500 Hz, (d) : 500-750 Hz

A partir de la figure III.3, on note les fréquences caractéristiques du défaut bague intérieure autour de la fondamentale : $f_s - f_{bi} = 78.52$ Hz et $f_s + f_{bi} = 178.52$ Hz.

Cette confrontation réussite des tout résultats expérimentaux avec les formules des fréquences caractéristiques du défaut de la BI, nous permet d'assurer l'efficacité de la méthode du diagnostic pour une défaillance dans la BI du roulement.

Tableau III.1. Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague interne
($g = 0.048$)

Formule $f_{c-bi}^{\pm} = vf_s \pm k \times f_{bi} $	Valeurs théoriques [Hz]	Valeurs pratiques [Hz]	Amplitude [dB]
$ f_s - f_{bi} $	78.52	78.6	-66.2
$ f_s + f_{bi} $	178.52	178.6	-65.54
$ f_s - 2f_{bi} $	207.04	207.3	-94.03
$ f_s + 2f_{bi} $	307.04	307.2	-86.05
$ 3f_s + 4f_{bi} $	664.08	665.2	-80.4
$ 3f_s - f_{bi} $	21.48	21.5	-64.53

De ce tableau, on peut dire que les bandes de fréquences que nous avons analysées ont confirmé la présence d'un défaut BI.

III.3. Détection du défaut de roulement par la méthode de MVSA

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs, la détection des défauts et l'analyse détaillée des défauts, On utilise à cet effet des paramètres calculés soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel ou soit dans les deux à la fois.

Pour déterminer la nature du défaut de la bague interne, nous suivons les mêmes étapes de l'analyse spectrale d'un signal de vibration présenté. Les figures (a et b) représenter les deux l'état (état sain et état défaut).

La vérification des fréquences caractéristiques du défaut dans la bague interne du roulement est présentée dans la figure (a et b). Les fréquences qui caractérisent ce défaut sont correspondance avec la formule des fréquences caractéristiques.

$$f_{v-bi}=0,6 \times k \times N_b \times f_r \quad (\text{III.3})$$

L'observation du spectre, pour des plages différentes de fréquences, montre l'efficacité de la méthode de diagnostic appliquée. Les fréquences caractéristiques de défauts ont été calculées en fonction de la vitesse de rotation et des caractéristiques du roulement ($N_b=9$). Les valeurs théoriques pour un fonctionnement en charge ($s = g = 0.032$, $f_r = 24.2\text{Hz}$) sont :

✚ **Etat en charge ($s = g = 0.032$, $f_r = 24.2\text{Hz}$)**

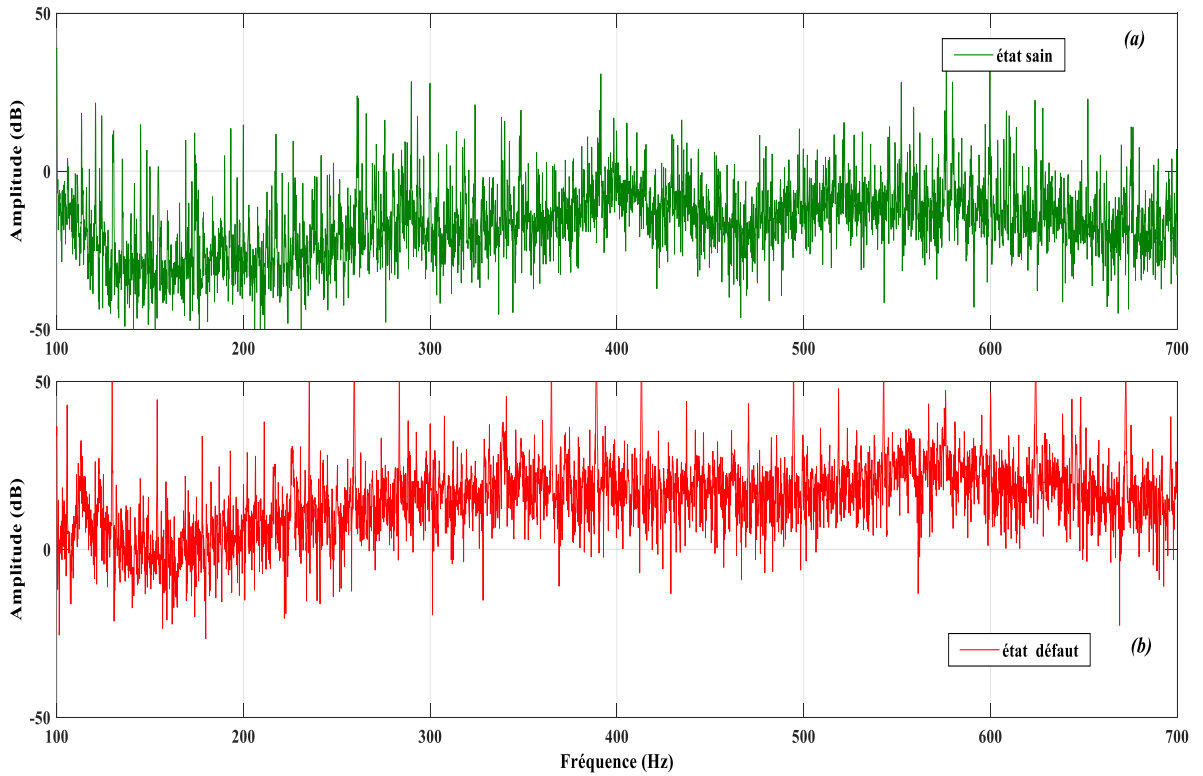
$$1 \times f_{bi} = 0,6 \times k \times N_b \times f_r = 0,6 \times 1 \times 9 \times 24,2 = 130,68 \text{ Hz}$$

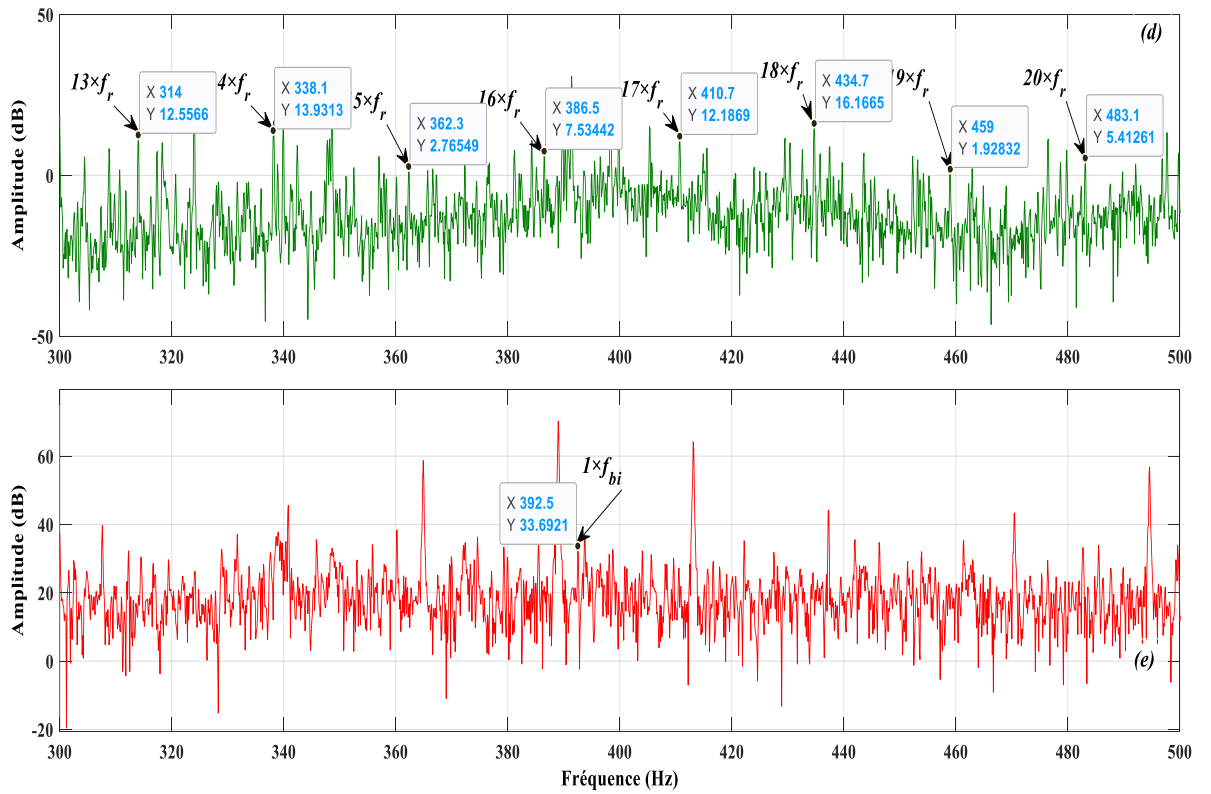
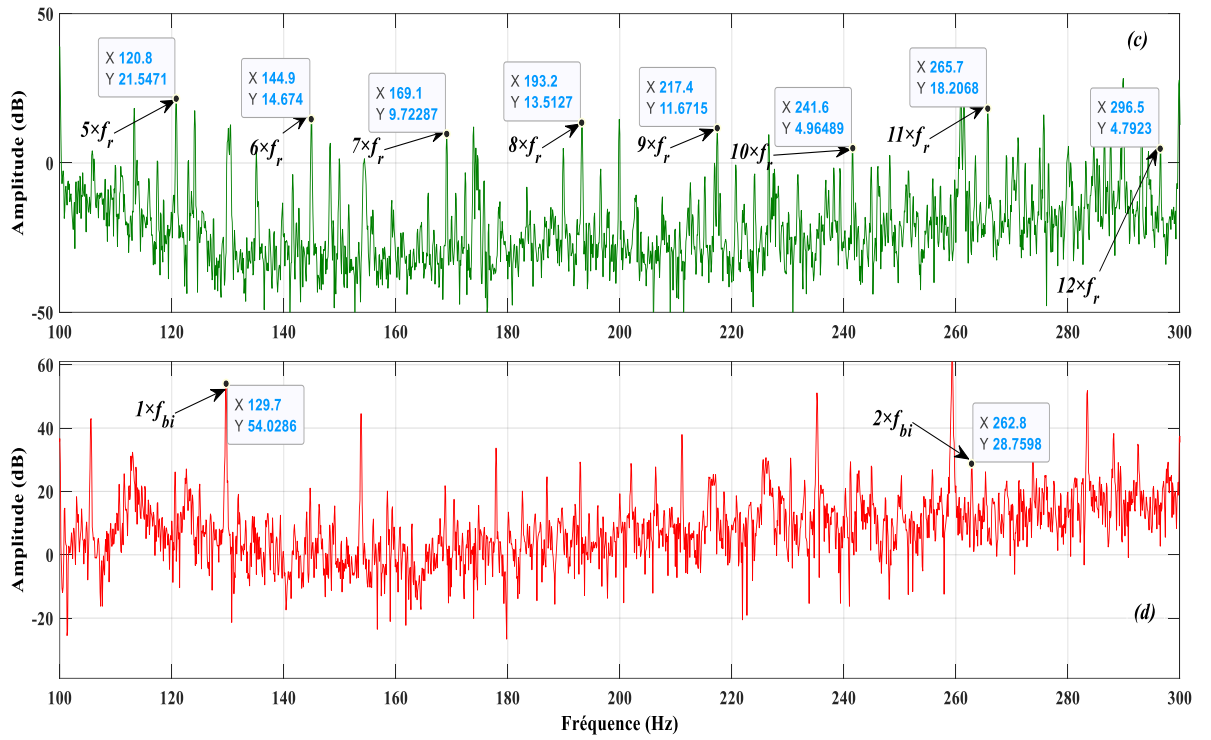
$$2 \times f_{bi} = 0,6 \times k \times N_b \times f_r = 0,6 \times 2 \times 9 \times 24,2 = 261,36 \text{ Hz}$$

$$3 \times f_{bi} = 0,6 \times k \times N_b \times f_r = 0,6 \times 3 \times 9 \times 24,2 = 392,04 \text{ Hz}$$

$$4 \times f_{bi} = 0,6 \times k \times N_b \times f_r = 0,6 \times 4 \times 9 \times 24,2 = 522,72 \text{ Hz}$$

$$5 \times f_{bi} = 0,6 \times k \times N_b \times f_r = 0,6 \times 5 \times 9 \times 24,2 = 653,4 \text{ Hz}$$





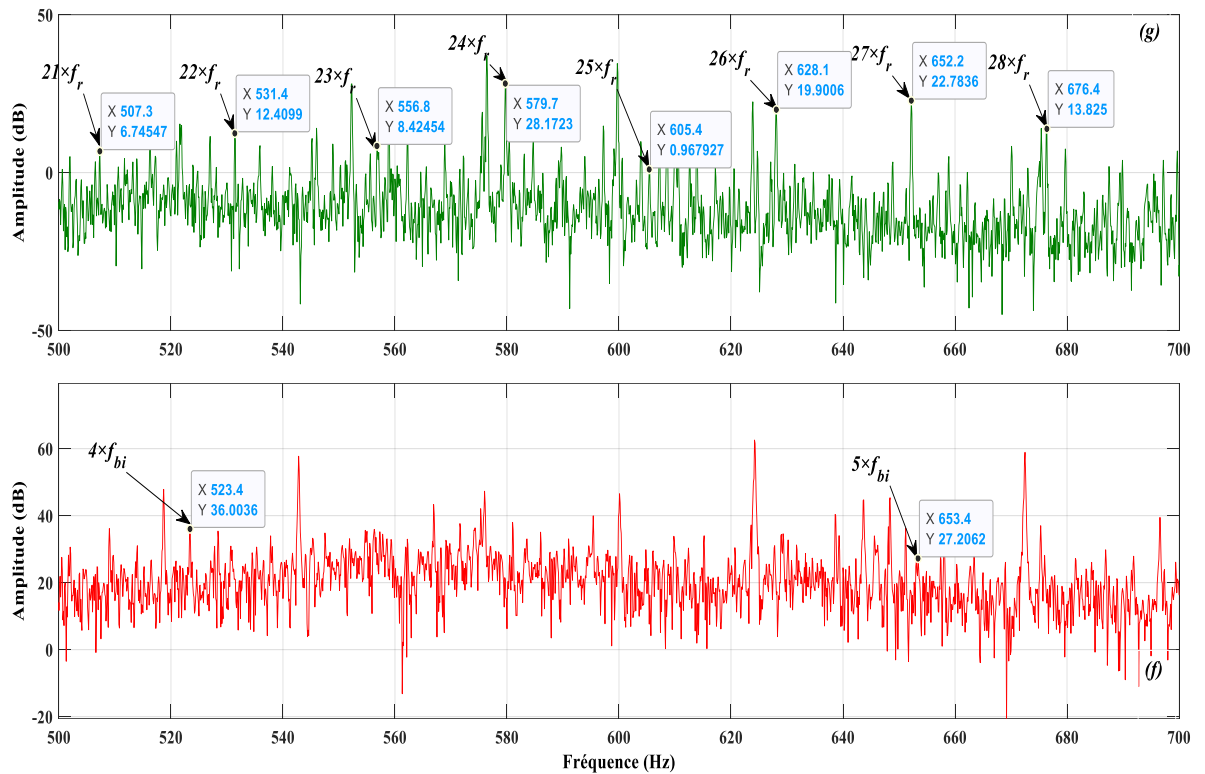


Figure III.4. Différentes plages des fréquences du spectre d'un signal vibratoire (BI , $g = 0.032$)

Notez qu'il y a de valeurs de fréquences caractéristiques dans le spectre du signal vibratoire pour le défaut de la bague interne. Les fréquences additionnelles du défaut de la bague intérieure sont nombreuses tout au long du spectre. Donc On fait un zoom aux alentours de différentes plages fréquentielles afin de bien visualiser les harmoniques supplémentaires dus au défaut de la bague interne. Une présentation d'amplitudes de quelques harmoniques caractéristiques avec leurs valeurs est organisée dans le tableau suivant :

Tableau III.2. Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BI, $g=0.032$)

Formules Des fréquences (BI)	Valeurs théoriques ($g=0.032$)	Valeurs Expérimentales ($g=0.032$)	Amplitude « état sain » (dB)	Amplitude «état défectueux» (dB)
$1 \times f_{bi}$	130,68	129.6	12.78	51.54
$2 \times f_{bi}$	261,36	262.8	23	28.76
$3 \times f_{bi}$	392,04	392.5	-3.125	33.69
$4 \times f_{bi}$	522,72	523.4	2.393	36
$5 \times f_{bi}$	653,4	653.4	-11.14	27.21

III.4. Détection du défaut de roulement par la méthode de SFSA

L'analyse de signature de flux parasite (SFSA) pour ce type d'analyse, le flux magnétique qui s'échappe à l'extérieur du moteur est surveillé en capturant la tension induite sur des bobines de recherche rigides. Cela permet de rechercher des signatures dans les spectres de fréquence.

Dans cette partie, le moteur asynchrone est analysé sous un défaut dans la bague intérieure. Le but de cette analyse est de détecter les signatures qui marquent le défaut.

Remarque :

- Dans ce titre III.4, tout ce qui est simulé en bleu indique une MAS sain (a).
- La couleur rouge indique l'état défectueux de la MAS (b).

Dans cette étape, nous allons analyser le flux dans le cas d'un fonctionnement en charge ($g = s = 0.0366$).

$$f_{f-bi} = f_s \pm k \times f_r \quad (\text{III.4})$$

De plus, la série d'harmoniques est vérifiée par l'équation (III.3) sur la bande illustrée de [0-800] Hz. Il y a beaucoup d'harmoniques pour s'assurer qu'il y a un défaut dans BI. Les valeurs calculées de ces harmoniques sont :

$$f_{f-bi}^+ = |f_s + (1) \times f_r| = 98,17 \text{ Hz}$$

$$f_{f-bi}^- = |f_s - (1) \times f_r| = 1,83 \text{ Hz}$$

$$f_{f-bi}^+ = |f_s + (3) \times f_r| = 194,51 \text{ Hz}$$

$$f_{f-bi}^- = |f_s - (3) \times f_r| = 94,51 \text{ Hz}$$

$$f_{f-bi}^+ = |f_s + (5) \times f_r| = 290,85 \text{ Hz}$$

$$f_{f-bi}^- = |f_s - (5) \times f_r| = 190,85 \text{ Hz}$$

$$f_{f-bi}^+ = |f_s + (9) \times f_r| = 483,53 \text{ Hz}$$

$$f_{f-bi}^- = |f_s - (9) \times f_r| = 383,53 \text{ Hz}$$

$$f_{f-bi}^+ = |f_s + (12) \times f_r| = 628,04 \text{ Hz}$$

$$f_{f-bi}^- = |f_s - (12) \times f_r| = 528,04 \text{ Hz}$$

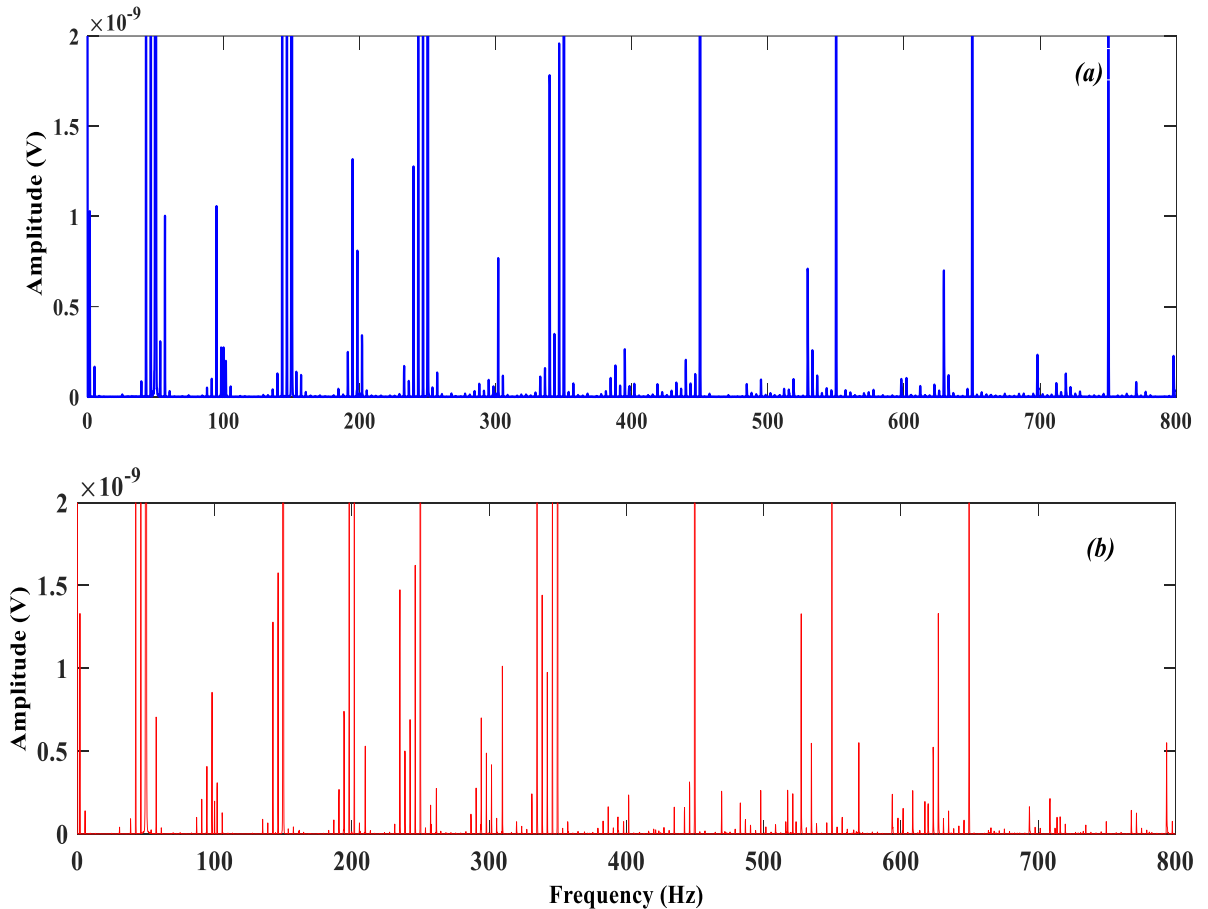


Figure III.5. Spectre du flux (défaut de la BI, $g = s = 0.0366$) 0-800 Hz

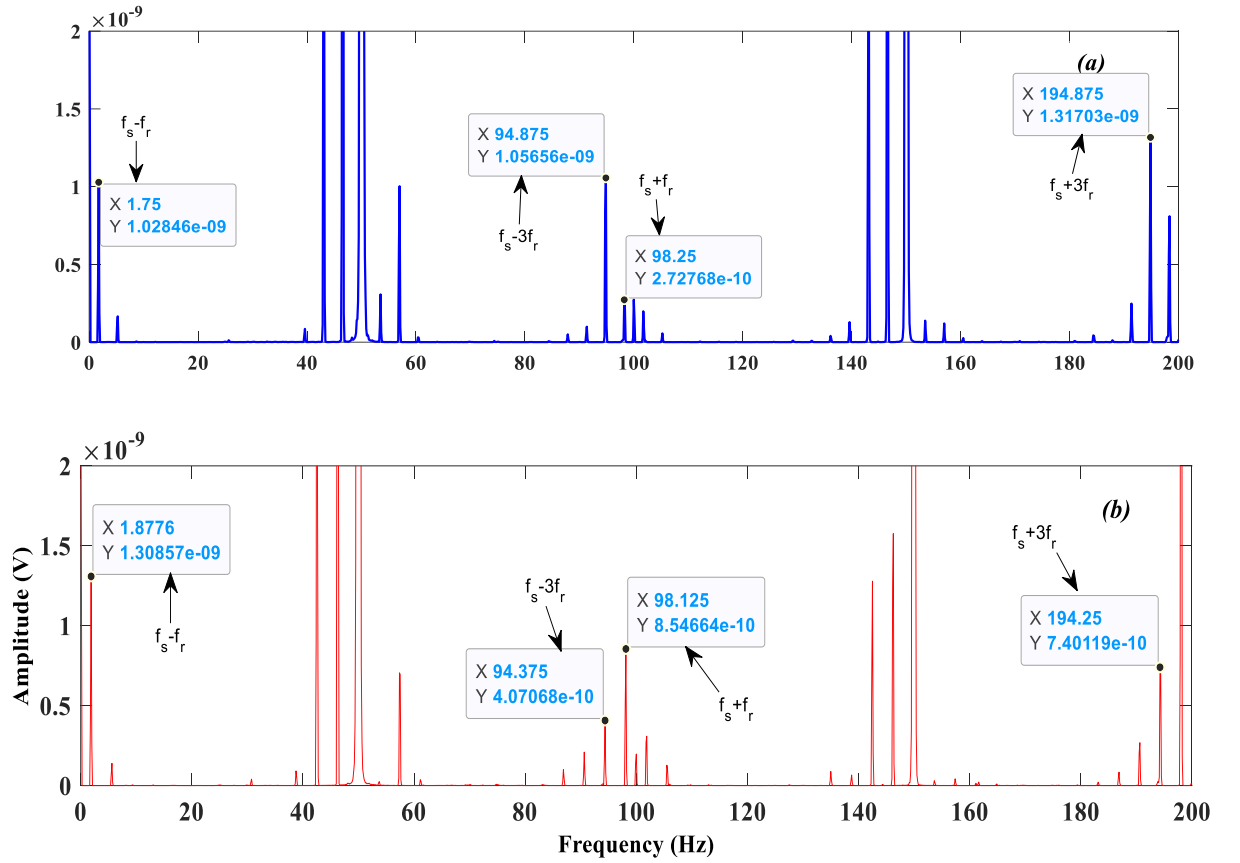


Figure III.6. Spectre du flux (défaut de la BI, $g = s = 0.0366$) 0-200 Hz

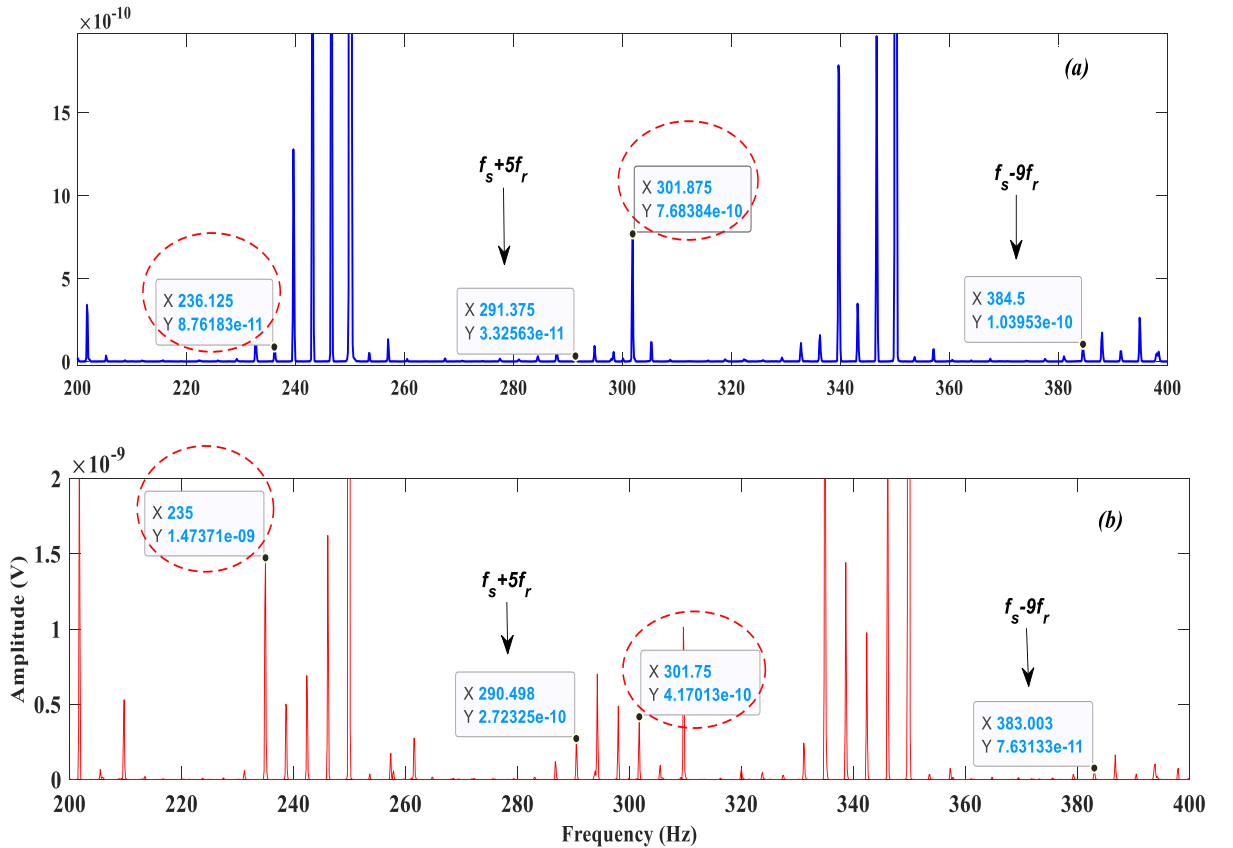


Figure III.7. Spectre du flux (défaut de la BI, $g = s = 0.0366$) 200-400 Hz

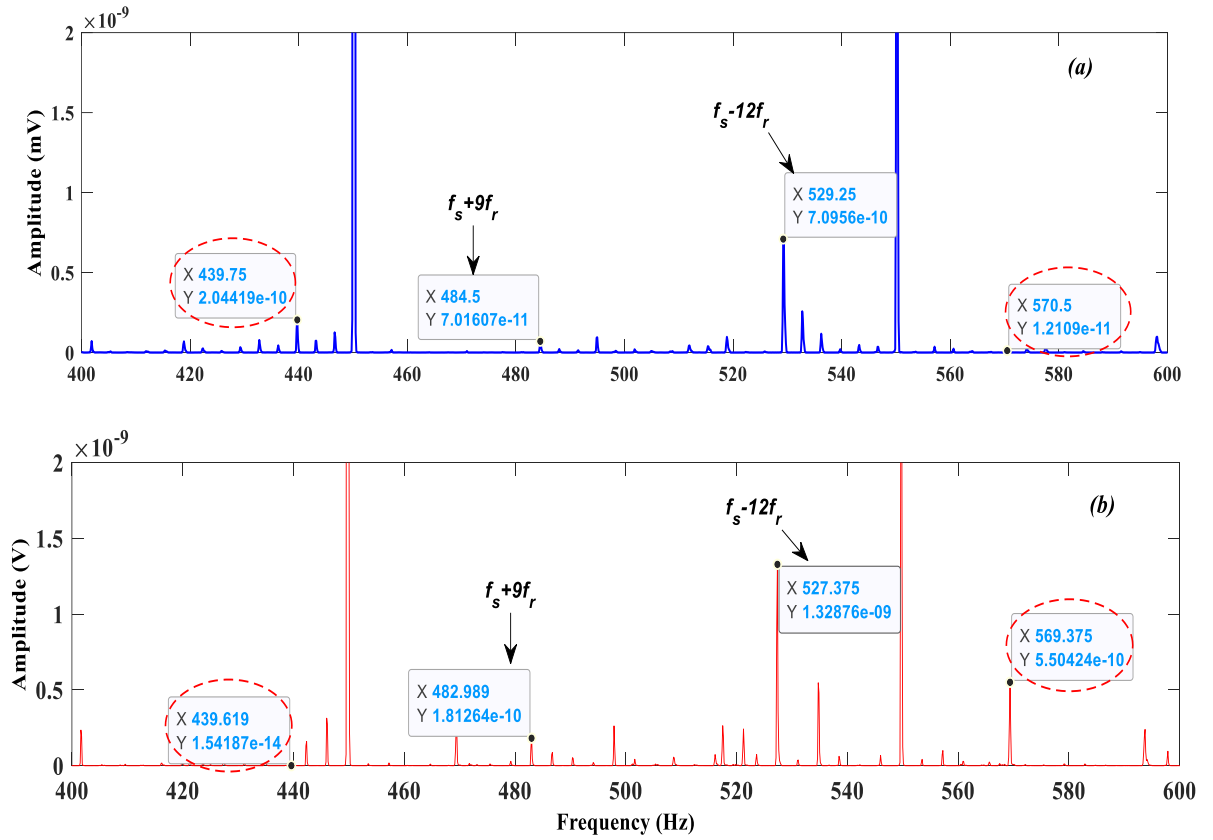


Figure III.8. Spectre du flux (défaut de la BI, $g = s = 0.0366$) 400-600 Hz

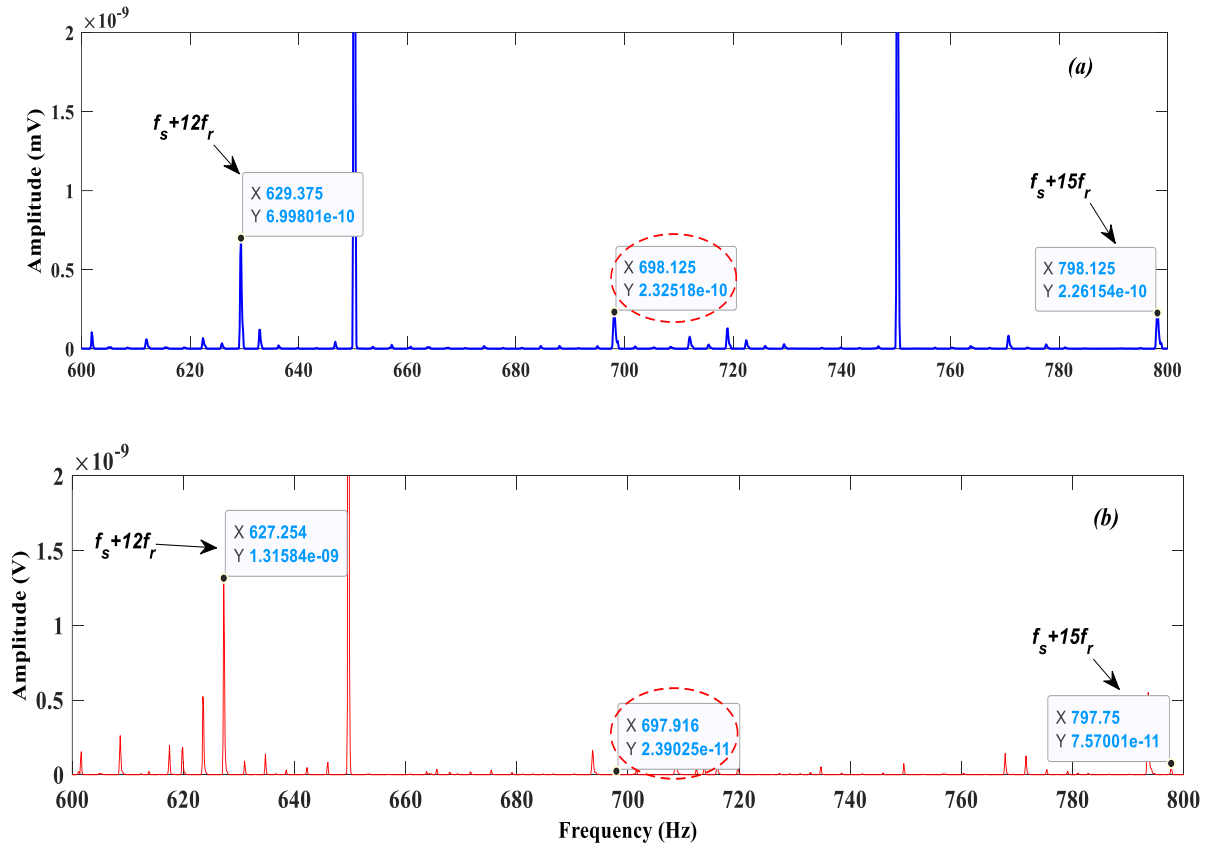


Figure III.9. Spectre du flux (défaut de la BI, $g = s = 0.0366$) 600-800 Hz

On peut remarquer sur les figures précédentes, sur les spectres de flux en présence d'une bague intérieure porteuse de défauts, l'apparition de raies harmoniques à des fréquences caractéristiques des défauts de la bague externe. En plus, notons que toutes les combinaisons possibles de fréquences caractéristiques sont présentes : $f_s + 1.f_r = 98,17 \text{ Hz}$, $f_s + 3.f_r = 194,51 \text{ Hz}$ et $f_s + 5.f_r = 290,85 \text{ Hz}$

Notons aussi que la détection des défaillances de la bague interne des roulements pourrait se faire via l'analyse du contenu spectral du flux.

Tableau III.3. Fréquences caractéristiques théoriques et Amplitude (saine et défectueuse) de la bague interne ($g = s = 0.0366$)

Formule $f_{f-bi} = f_s \pm k \times f_r $	Valeurs théoriques [Hz]	Amplitude saine [V × 10 ⁻⁹]	Amplitude défectueuse [V × 10 ⁻⁹]
$ f_s + 1 \times f_r $	98,17	2,72	8,54
$ f_s - 1 \times f_r $	1,83	1,02	1,30
$ f_s + 3 \times f_r $	194,51	1,31	0740
$ f_s - 3 \times f_r $	94,51	1,05	4,07
$ f_s + 5 \times f_r $	290,85	0,0332	0,27
$ f_s + 9 \times f_r $	483,53	0,07	0,18
$ f_s - 9 \times f_r $	383,53	0,103	0,0763
$ f_s + 12 \times f_r $	628,04	0,699	1,31
$ f_s - 12 \times f_r $	528,04	0,709	1,32

De ce tableau, on peut dire que les bandes de fréquences que nous avons analysées ont confirmé la présence d'un défaut BI.

III.5. Conclusion

Dans ce troisième chapitre, on a utilisé trois techniques : MCSA, MVSA et SFSA pour détecter le défaut du roulement dans la BI.

D'après cette étude, on peut conclure que la méthode de la MVSA donne des bons résultats par rapport à la méthode de la MCSA et SFSA pour la détection du défaut dans la bague interne du roulement de la MAS. Par ce que le spectre du signal vibratoire est riche en harmoniques pour différentes plages de fréquences. Nous pensons que la raison qui favorise la méthode de l'analyse vibratoire par rapport à l'analyse du courant et l'analyse du flux au type du défaut. C'est-à-dire, un défaut mécanique peut le détecter facilement par une méthode qui a l'analyse du signal mécanique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts des moteurs asynchrones à cage d'écureuil. Dans cette étude, nous sommes concentrés sur le défaut de la bague intérieure du roulement.

Au début de ce travail, nous avons mené une étude généralisée sur le diagnostic des machines asynchrones et évoqué toutes les erreurs pouvant survenir lors de leur fonctionnement et les raisons qui conduisent à ces dysfonctionnements. Puis, nous avons évoqué les différentes méthodes de détection actuellement utilisées, et parmi ces méthodes nous avons mentionné la méthode d'analyse du signal. La méthode d'analyse de vibration et la méthode d'analyse du courant la méthode d'analyse du flux électrique par la transformée de Fourier rapide. Comme nous avons parlé en général sur les méthodes exploitées dans ce travail.

Nous avons effectué une analyse spectrale de la transformée de Fourier rapide (TFR ou FFT en Anglais) par MATLAB.

La méthode de l'analyse de la signature du courant moteur n'est pas en mesure de détecter tous les défauts de la machines asynchrones de façon définitive. Par contre, les signatures de ces défauts mécaniques apparaissent dans le spectre du signal vibratoire.

L'analyse de la signature vibratoire du moteur est un outil puissant pour la détection de défauts des machines électriques tournantes. En plus, l'analyse de la signature vibratoire du moteur est sensible aux défauts mécaniques lorsque l'on la compare avec sa sensibilité aux défauts électriques.

D'après les résultats obtenus, la méthode de l'analyse de la signature vibratoire du moteur donne des bons résultats par rapport aux autres méthodes.

Pour cela, on atteint à une décision que la méthode de l'analyse vibratoire est plus efficace à la détection des défauts du roulement. C'est-à-dire, un défaut mécanique peut le détecter facilement par une méthode qui a l'analyse du signal mécanique et pas électrique ou magnétique.

Bibliographie

Bibliographie

- [Adb 10]: Adbi Zohra. "Etude de effets vibratoires sur la durée de vie des roulements a rouleaux" Mémoire Magister Université Badji Mokhtar –Annaba. 2010.
- [Adr 06]: Aderiano da Silva, "Induction motor fault diagnostic and monitoring method", thèse de master, Université de Marquette, Mai 2006.
- [And 12]: ANDRIAN CEBAN, "METHODE GLOBALE DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ELECTRIQUES", thèse de Doctorat, Université Lille de Nord de France 02 /02 /2012.
- [Bac 02]: Bachir S, « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique », thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2002.
- [Bac17]: Bachouche Hassina, Azzi Ouahiba, " Analyse des signaux vibratoires par la transformée en ondelette", Mémoire de Master, Université Akli M’hand Oulhadj – Bouira, 2017.
- [Baz 16]: BAZI Smail, " Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur", thèse de Master, Université de Batna, 08/12/2016.
- [Bel 14]: BELHAMDI Saad, "Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande", thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 08/05/2014.
- [Bel 17]: BELAHAMMOU Abdelhak et BENINE Abderrazak, "Diagnostic des défauts des roulements dans les machines asynchrones par la méthode de la MCSA", mémoire de master Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 28 /05 /2017.
- [Bel 18]: BELACEL Mohammed et BOUDINA Seid, "Modélisation et simulation les défauts rotoriques d’un moteur asynchrone à cage d’écureuil", thèse de master, Université Akli mohand Oulhadj – Bouira, 2018.

- [Bel 19]: BELASSEL Atef, "Diagnostic des Défauts d'Excentricité d'une Machine Asynchrone par la Méthode d'Ondelettes", thèse de master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019.
- [Ben 08]: Toufik, Bensana, " Diagnostic des défaillances basées sur l'analyse vibratoire d'une turbine à vapeur ". Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar de Annaba, Algérie, 2008.
- [Ben 18]: Benine Hamza, Derdouri Mohamede Aymane "etude de la vibration des machines a induction sous un défaut de roulement " université echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, diplôme de Master, 2018.
- [Ber 17]: BERKOUS HAFID, "Détection des défauts d'engrenage par analyse vibratoire", thèse de Master, Université Badji Mokhtar Annaba 2017.
- [Bes]: Noureddine BESSOUS, "Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones", thèse de master, Université de Constantine.
- [Bes 17]: Noureddine BESSOUS, "Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation", thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra 28 /09 /2017.
- [Bou 18]: BOUMAILA AHMED DHIA EDDINE, "Diagnostic des défauts d'un ventilateur M14A par analyse vibratoire au niveau de l'unité SIDER TSS", thèse de Master, Université Badji Mokhtar Annaba 2018.
- [Bou 19]: Boughagha Fouzi, " Diagnostic et détection des défauts mécaniques affectant les systèmes électromécaniques", Université Badji Mokhtar Annaba, 2019.
- [Cha 16]: CHAIB Sid Ali et Boussaidi Azeddine, " détection et caractérisation des défauts des roulements par l'analyse spectrale" Mémoire de Master Université M'Hamed Bougara Boumerdes,2016.
- [Che 14]: Hakima CHERIF, "Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes", mémoire de master Université Biskra, 30/09/2014.

- [Did 04]: Gaëtan DIDIER, "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances", thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, 29 Octobre 2004.
- [Dje 13]: Omar DJEBILI, "Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement", thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 26/09/2013.
- [Hal 15]: HALEM Noura, "Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis", thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra 07/04/2015.
- [Ham 18]: Hamis Rabia, "Multi-Classification des Défaits de Roulements d'une Machine Asynchrone par Combinaison de l'Analyse en Composantes Principales et des Séparateurs à Vaste Marges " université Badji Mokhtar Annaba, diplôme de Master, 2018.
- [Her 09]: HARIR Miloud, "Etude des Défaits dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée", mémoire de magister, Université Mohamed BOUDIAF d'Oran, 2009.
- [Kab 16]: KABOUCHE Abdallah "Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défaits De la Machine asynchrones" Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba 2016.
- [Kai 10]: Kaikaa Mohamed Yazid, "Modélisation de la machine asynchrone avec prise en compte de la non uniformité de l'entrefer. Application au diagnostic", thèse de Doctorat, Université Frère Mentouri, 09/06/2010.
- [Kho 20]: KHODJA Mohammed-El-Amine, "Suivi de la sévérité des défauts de roulements d'un moteur asynchrone alimenté par onduleur", thèse doctorat, Université d'Oran Mohamed BOUDIAF, Algérie, 2020.
- [Laa 16]: Y. Laamari, "Diagnostic des défaillances dans les systèmes électromécaniques", Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016.

- [Lad 21]: LADGHEM Anis, "Contribution au diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones à cage d'écureuil : Détection du défaut mécanique", mémoire de master Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 06 /2021.
- [Land]: Landolsi Foued, " l'analyse spectrale ", cours de techniques de surveillance
- [Lar 18]: LARBA WIEME, " Surveillance vibratoire et interventions pratiques sur le Compresseur « SPIROS » Au niveau de l'entreprise FIRROVIAL - Annaba", thèse de Master, Université Badji Mokhtar Annaba 2018.
- [Mef]: M. Eftekhari, "Review of Induction Motor Testing and Monitoring Methods for Inter-turn Stator Winding Faults", Article, IEEE.
- [Mer 09]: MERABET HICHEM, "SURVEILLANCE ET DETECTION DE DEFAUTS D'UNE MACHINE A INDUCTION ", thèse de magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2009.
- [Mou 18]: Mohamed Amine MOUSSA, "Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone en Temps Réel", thèse de Doctorat, Université Frères Mentouri - Constantine 1, 15 \ 05 \ 2018.
- [Nee 07]: Neelam Mehala, Ratna Dahiya," Motor Current Signature Analysis and its Applications in Induction Motor Fault Diagnosis ", INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEMS APPLICATIONS, ENGINEERING & DEVELOPMENT, 2007.
- [Ond 06]: Olivier ONDEL, "Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur - machine asynchrone", thèse de docteur, Ecole Centrale de Lyon, 2006.
- [Pan 18]: Panagiotou," Analysis of Stray Flux Spectral Components in Induction Machines under Rotor Bar Breakages at Various Locations ", Article, International Conference on Electrical Machines. IEEE, Alexandroupoli, Greece, 03/09/2018.
- [Pen 20]: Pengfei Tian" Stray Flux Sensor Core Impact on the Condition Monitoring of Electrical Machines", Article MDPI, Switzerland, 01/29/2020.
- [Spy 21]: D. V. Spyropoulos, P. A. Panagiotou, I. Arvanitakis, E. D. Mitronikas, and K. N.

- Gyftaki, "Extraction of Frequency Information for the Reliable Screening of Rotor Electrical Faults via Torque Monitoring in Induction Motors", Université de Coventry, Transactions IEEE sur les applications industriels, 2021.
- [Swa 18]: Swapnali Janrao an Rupalee Ambek, " Fault Diagnosis of an Induction Motor Using Motor Current Signature Analysis ", International Journal of Applied Engineering Research ISS, India 2018.
- [Tha 15]: Alka Thakur, Dr. S. Wadhwani, Dr. A.K. Wadhwan, " Motor Current Signature Analysis as a Tool for Induction Machine Fault Diagnosis ", International Journal of Computer Science and Information Technology Research ISS, 2015.
- [Tiw] : TIWILSON, "Capteurs utilisés pour la mesure de signaux dynamiques Acquisition et traitement de signaux dynamiques", National Instruments.
- [Vic 21]: Vicente Biot-Monterde," Stray Flux Analysis for the Detection and Severity Categorization of Rotor Failures in Induction Machines Driven by Soft-Starters ", Article, Special Issue Failure Diagnosis and Prognosis of Induction Machines, 13/09/ 2021.
- [Zad 13]: S. A. Mortazavi Zadeh and S. M. G. Mousavi, " A Review on Condition Monitoring and Diagnostic Techniques of Rotating Electrical Machines ", Université Iran des sciences et technologies (IUST), Téhéran, Iran 2013.
- [Site Web 1]: <https://temoignagefiscal.com/comprendre-leelectricite-5eme-partie/>
- [Site Web 2]: <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-asynchrone/>
- [Site Web 3]: <https://cutt.us/WGtMd>
- [Site Web 4]: <https://cutt.us/nWVTM>
- [Site Web 5]: <https://come4concepts.com/>
- [Site Web 6]: <https://www.fluke.com/fr>
- [Site Web 7]: <https://www.electricalindia.in/>
- [Site Web 8]: <https://www.nskeurope.fr/fr.html>