

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



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université 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 Electrique

Présenté par

SOBTI Takey Eddine

GUEDDA Alla Eddine

Thème

**Détection des défauts mécaniques dans les
systèmes électromécaniques**

- Application aux moteurs à induction –

Soutenu le 07/06/2023. Devant le jury composé de :

Dr. GUEDIRI Abdelkrim

Maitre de conférences

Président

M. BESSOUS Nouredine

Maitre de conférences

Rapporteur

Dr.Bougazal mohamed asalah

Maitre de conférences

Examineur

Année Universitaire 2022/2023

Remerciement

Nous Remercions premièrement **Allah** Soubhanhou Wa Taala

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur :

Dr. BESSOUS Noureddine, pour sa gentillesse, sa disponibilité
et sa contribution générale à l'élaboration de ce travail .

Nous souhaitons également de remercier nos enseignants de la
faculté de la technologie.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous
nos proches et amis qui nous ont toujours soutenu et encouragé
pour la réalisation de ce mémoire .

Dédicace

Je dédie ce fruit du travail : à ma mère Mariem et à mon père Said, qui
bénéficient de tous les bienfaits

Je dédie ce mémoire à mes frères et ma sœur et toute la famille.

A ma compagne ALLA que je remercie d'avoir partagé ces moments
avec moi afin de faire cet humble travail

A mon cher ami d'enfance Ali et à tous mes amis

Je dédie aussi ce travail à notre promoteur, Dr. BESSOUS Nouredine,
pour avoir accepté de nous encadrer et pour les efforts qu'il a partagés
avec nous.

Takey

Dédicace

Je dédie ce fruit du travail : à ma mère saida et à mon père abdellah , qui
bénéficient de tous les bienfaits

Je dédie ce mémoire à mes frères et ma sœur et toute la famille.

A ma compagne Takey que je remercie d'avoir partagé ces moments
avec moi afin de faire cet humble travail

Je dédie aussi ce travail à notre promoteur, Dr. BESSOUS Nouredine,
pour avoir accepté de nous encadrer et pour les efforts qu'il a partagés
avec nous.

.

Alla

Résumé

En raison de l'utilisation importante des machines électriques asynchrones dans le domaine industriel, en particulier des machines à cage d'écureuil, en raison de leurs caractéristiques qui en font des pionniers dans la fabrication, un coût approprié, une production d'énergie élevée et de nombreux avantages. Ces machines sont exposées à de nombreux problèmes tout au long de leur utilisation. Le diagnostic précoce des défauts participe au gain de temps et au maintien de la sécurité de la chaîne industrielle. Par conséquent, le diagnostic et la maintenance des machines électriques reçoivent une grande attention. Il existe de nombreuses méthodes de diagnostic. Nous avons fait cette étude, nous tenterons d'aborder la technique d'analyse par courants statoriques et la technique d'analyse vibratoire et son comportement électrique dans la détection de défauts de roulements dans un moteur asynchrone à induction. Nous avons également effectué la transformée de Fourier rapide pour analyser les signaux.

Mots clés : Machines asynchrones, diagnostic, roulement, bague extérieure, bague intérieure, Motor Current Signal Analysis (MCSA), Motor vibration Signal Analysis (MVSA), transformée de Fourier rapide.

ملخص

نظرا للاستعمال الوافر للآلات الكهربائية غير المتزامنة في المجال الصناعي وخاصة آلات قفص السنجاب لما تتميز به من خصائص تجعلها في ريادة التصنيع وذلك لتمييزها بالتكلفة المنخفضة ومردود انتاج طاقة عالية، والعديد من المميزات. تتعرض هذه الآلات الى العديد من المشاكل أثناء استعمالها وهنا يلعب التشخيص المبكر للعيوب دورا مهما لربح الوقت والحفاظ على سلامة التجهيز الصناعي. لذا فإن تشخيص وصيانة الآلات الكهربائية يحظى باهتمام كبير. توجد العديد من طرق التشخيص، فلقد تطرقنا في هذه الدراسة الى تقنية تحليل تيار الجزء الساكن و تقنية تحليل الاشارة الاهتزازية وسلوكها الكهربائي في الكشف عن عيوب المدحرجات في المحرك الحثي غير المتزامن. كما قمنا بتحويل فورييه السريع لتحليل ذات الاشارات المستخرجة تجريبيا.

الكلمات المفتاحية :

الآلات غير متزامنة، تشخيص، مدحرجات، الحلقة الخارجية، الحلقة الداخلية، تحليل إشارة تيار الجزء الساكن، تقنية تحليل الاشارة الاهتزازية، تحويل فورييه السريع.

Abstract

Due to the large use of asynchronous electrical machines in the industrial field, especially squirrel cage machines, because of their characteristics that make them pioneers in manufacturing, appropriate cost, high energy production, and many advantages. These machines are exposed to many problems throughout their use. Early diagnosis of faults plays into saving time and maintaining the safety of the industrial equipment. Therefore, the diagnosis and maintenance of electrical machines receives great attention. There are many methods of diagnosis. We will try in this study to address the stator current analysis and the vibration signal analysis techniques. We studied the electrical behavior of induction motor (IM) under bearing faults. We also performed a fast Fourier transform to analyze the extracted signals.

Key words : Asynchronous machines (induction machine), diagnosis, bearing, outer ring fault, inner ring fault, motor current signal analysis, motor vibration signature analysis, fast Fourier transform.

LISTES DES SYMBOLES

MAS : Machine asynchrone.

Ω_s : La vitesse de synchronisme[rad/s].

ω_s : Pulsation électrique synchrone du champ tournant [rad/s].

Ns :Vitesse de synchronisme en [tr/min].

p : Nombre de paires de pôles.

Ω_r :Vitesse angulaire réelle de la machine [rd/s].

g : Glissement.

f.é.m : La force magnétomotrice.

f : Fréquence [Hz].

f_{cc} : Fréquence de court-circuit.[Hz].

f_{cb} : Fréquence de défaut cassure de barre [Hz].

f_{exc} : Fréquence de défaut d'excentricité [Hz].

f_{mix} : Fréquence de défaut d'excentricité mixte [Hz].

f_r : Fréquence rotorique [Hz].

f_b : Fréquence de défauts au niveau d'une bille[Hz].

$f_{b.int}$: Fréquence de défauts de bague intérieure.

$f_{b.ext}$: Fréquence de défauts de bague extérieure.

f_c : Fréquence de défauts dans la cage[Hz].

L_{10} : Durée de vie des roulements.

C : Charge nominale (donnée constructeur).

P : Charge dynamique appliquée au roulement.

BE : Bague extérieure.

BI : Bague intérieure.

MCSA : Motor Current Signature Analysais.

MVSA : Motor vibration Signature Analysais.

SOMMAIRE

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Dédicace.....	III
Résumé.....	IV
LISTES DES SYMBOLES.....	VII
SOMMAIRE.....	VIII
LISTE DE FIGURES.....	XII
LISTE DE TABLEAU.....	XIV
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES DEFAUTS DANS LES MAS

I.1 Introduction:.....	5
I.2 Constitution de la machine asynchrone.....	5
I.2.1 stator:.....	6
I.2.2 rotor:.....	6
I.2.3 les pièces mécaniques :.....	7
I.3 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	8
I.3.1 Le champ tournant :.....	9
I.3.2 La vitesse de synchronisme :.....	9
I.3.3 La vitesse de rotation :.....	10
I.3.4 Le glissement :.....	10
I.4 Notion sur la surveillance.....	10
I.4.1 La surveillance et le diagnostic:.....	10
I.4.2 La maintenance :.....	11
I.4.3 Défaillance et panne:.....	12

SOMMAIR

I. 5 Etude des différents défauts dans la machine asynchrone	12
I.5.1 Causes et conséquences des défauts :	12
a). Les Contraintes électriques :	13
b). Les Contraintes dynamiques:	13
c). Les contraintes magnétiques On distingue:	13
d). Les contraintes d'environnement :	13
e). Les contraintes mécaniques	13
f). Les contraintes thermiques	13
g). Les contraintes de démarrage :	13
I.6 Les principaux défauts dans la machine asynchrone	14
I.6.1 Défauts internes et externes.....	14
I.6.2 Etudes statistiques:.....	15
I.6.3 Défauts statoriques :.....	16
I.6.4 Défauts rotoriques.....	18
I.6.4.1 Rupture des barres :	18
I.6.4.2 Ruptures d'anneaux de court-circuit :	19
I.6.4.3 Excentricité d'entrefer :	20
I.6.5 Défauts de roulements à billes :.....	21
I.7 Techniques et méthodes de diagnostic :.....	22
I.7.1 Analyse des signaux vibratoires	22
I.7.2 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite:.....	24
I.7.5 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle	25
I.7.7 Diagnostic par identification paramétrique	26
I.8 Conclusion.....	27

CHAPITRE II

APERÇU DETAILLE SUR LES DEFAUTS DU ROULEMENT DANS LES MAS

II.1 Introduction :	29
---------------------------	----

SOMMAIR

II.2 Défauts de roulement :.....	29
II.2.1 Présentation du roulement à billes :.....	29
II.2.1.1 Causes et les conséquences des défauts roulements à bille :	29
II.2.1.2 Durée de vie des roulements :	30
II.2.1.3 Différents types de roulements[BAC22]:	31
II.2.1.3.1 Roulements à Billes:	31
a- Roulements à billes à contact oblique :.....	31
b- Roulement à contact oblique sur deux rangées de billes :	31
II.2.1.3.2 Roulements à Rouleaux :	31
a- Roulement à une seule rangée de rouleaux cylindriques :	32
b- Roulements à rotule sur deux rangées de rouleaux :	32
II.2.1.4 Choix du roulement :	32
II.2.1.5 Désalignement entre les bagues intérieure et extérieure	32
II.3. Les défauts de roulements : causes et solutions	33
II.3.1. Usure.....	33
II.3.2. Dentelure.....	33
II.3.3. Bavure.....	34
II.3.4. Ecaillage.....	34
II.3.4.1.Défaut de la bague interne :	34
II.3.4.2.Défaut sur la bague externe :.....	35
II.3.5.Corrosion.....	35
II.3.6.Cassure.....	35
II.3.7.Choc électrique.....	35
II.4. Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement :.....	36
II.4.1 Fréquence de défaut sur la bague intérieure :	37
II.4.2 Fréquence de défaut sur la bague extérieure :	37
II.4.3 Fréquence de défaut sur la cage.:	37

SOMMAIR

II.4.4 Fréquence de défaut sur l'élément roulant :.....	38
II.5 Etude sur les technique (MCSA) (MVSA)	38
II.5.1 Technique de diagnostique (MVSA).....	38
II.5.1.1 L'Amplitude	39
II.5.1.2.La fréquence	39
II.5.2.Technique de diagnostic (MCSA).....	39
II.5.2.1 Analyse spectrale	40
II.5.2.1.1 principe.....	40
II 5.2.2 Spectre d'un signal	40
II 5.2.2.1 Définition d'un signal	40
II.5.2.2.2 Définition de spectre d'un signal.....	40
II.6.CONCLUSION	41

CHAPITRE III

ANALYSE DES DEFAUTS DU ROULEMENT EN UTILISANT : MCSA et MVSA

III.1.Introduction :.....	43
III.2.Rappel sur les deux méthodes d'analyse MCSA ET MVSA	43
III.2.1La méthode MCSA.....	43
' III.2.2La méthode MVSA.....	43
III.3. Banc d'essai	43
III.4.Résultats expérimentaux dédiés au défaut de la bague intérieure du roulement et extérieur par la méthode de MCSA.....	44
III.4.1. Fonctionnement en charge (BE, $C_e = 20$ Nm).....	44
III.4.2. Fonctionnement en charge (BI, $C_e = 20$ Nm) statiques	46
III.5.Résultats expérimentaux dédiés au défaut de la bague intérieure du roulement et intérieur par la méthode de MVSA.....	48
III.5.1Fonctionnement en charge (BE, $C_e = 15$ Nm).....	48
III.5.2 Fonctionnement en charge (BI)	50
III.7 Conclusion	52

SOMMAIR

CONCLUSION GENERALE	53
RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUES	55

LISTE DE FIGURES

CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES DEFAUTS DANS LES MAS

Figure(I.1) : Structure de la machine asynchrone à cage	6
Figure (I.2) : Stator d'une machine asynchrone	6
Figure (I.3): Rotor bobiné d'une MAS	7
Figure (I.4) : Vue éclaté d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	8
Figure (I.5): Photo simplifiant le principe de fonctionnement de MAS a cage.....	9
Figure (I.6): Forme de la main droite.....	9
Figure (I.5) : Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage.	9
Figure(I.7) : Surveillance	11
Figure(I.8) : Répartition des défauts pour une machine de moyenne puissance	15
Figure(I.9) : Répartition des défauts pour une machine de grande puissance	16
Figure (I.10): Représentation des différents défauts statoriques possible.....	17
Figure (I.11): Quelques défauts statoriques	17
Figure(I.12) : Rupture au même niveau	18
Figure(I.13) : Rupture à la fin qui ça le relie à l'anneaux du rotor	19
Figure(I.14) : Une barre partiellement cassée et un barre complètement cassée	19
Figure(I.15) : Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit	19
Figure(I.16) :TYPES D'EXCENTRICITE	20
Figure(I.17). Architecture d'un roulement rigide à billes.	21
Figure(I.18) : Dimension du roulement à bille	22
Figure(I.19) : Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial	24
Figure(I.20) : Spectre du couple électromagnétique avec défaut de roulement	25
Figure(I.21) : image colorée infrarouge thermique	25
Figure(I.22) : Spectre du courant statorique d'un moteur sain et avec une barre cassée en charge	26

CHAPITRE II APERÇU DETAILLE SUR LES DEFAUTS DU ROULEMENT DANS LES MAS

Figure (II.1): Géométrie du roulement à billes.....	29
Figure (II.2): Défaut de roulement – usure.....	33
Figure (II.3): Défaut de roulement – dentelure.....	34
Figure (II.4): Défaut de roulement – bavure	34
Figure (II.5) : Défaut de roulement – écaillage	34

Figure (II.6) : Défaut de roulement – corrosion[BEL17].....	Error! Bookmark not defined.
Figure (II.7) : Défaut de roulement – cassure. [BEL17].....	Error! Bookmark not defined.
Figure (II.8): Défaut de roulement – choc électrique[BEL17].....	35
Figure (II.9): caractéristiques d'un roulement.....	35
Figure (II.10): Caractéristiques d'une vibration Sinusoïdale ou quelconque.....	36
Figure (II.11): Principe de la surveillance par analyse spectral.	40

CHAPITRE III ANALYSE DES DEFAUTS DU ROULEMENT EN UTILISANT : MCSA et MVSA

Figure (III.1) : Photo du banc d'essai dédié au diagnostic.....	44
Figure (III.2) : Spectre du courant statorique (BE, en charge) ; 0-100Hz.	45
Figure (III.3) : Spectre du courant statorique (BE, en charge) ; 100-150Hz.....	46
Figure (III.4) : Spectre du courant statorique (BI, en charge) ; 200-400Hz.....	47
Figure (III.5) : Spectre du courant statorique (BI, en charge) ; 400-500Hz.....	48
Figure (III.6) : Présentation des fréquences de bandes latérales alentours de $k \times f_{be}$ dans le spectre du signal vibratoire (BE, $s=0.032$).	49
Figure (III.7) : Présentation des fréquences caractéristiques et latérales pour différentes plages des fréquences dans le spectre d'un signal vibratoire (BI, $s=0.032$).	51

LISTE DE TABLEAU

CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES DEFAUTS DANS LES MAS

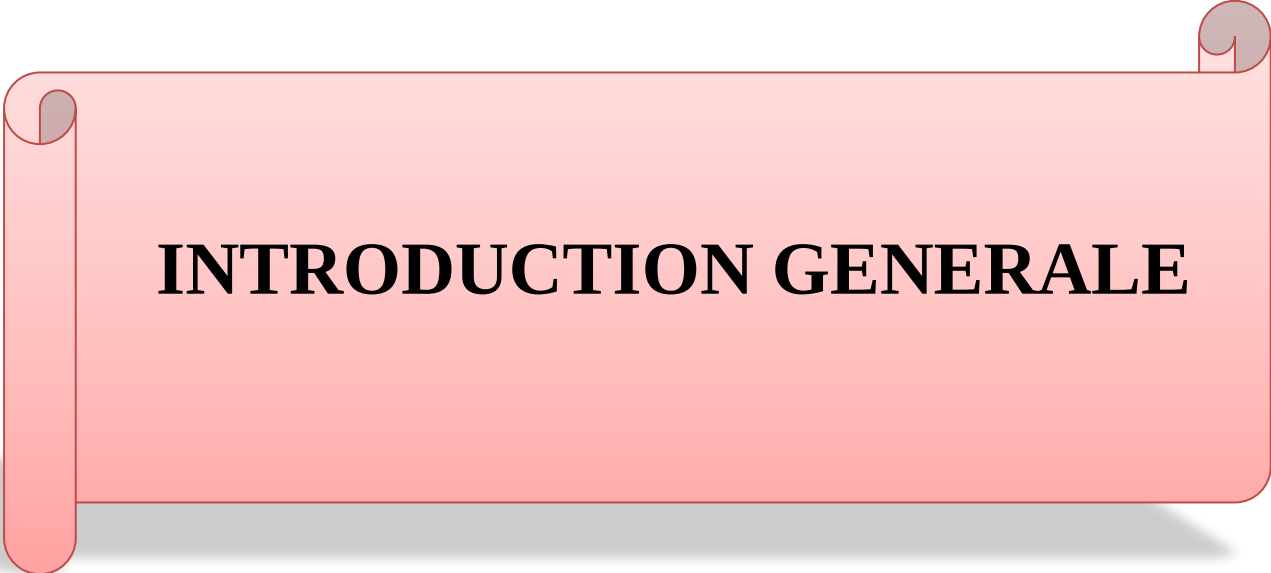
Tableau(I.1): Classification des défauts des machines électriques selon leurs origines14

Tableau(I.2) : Analyses vibratoires, signatures fréquentielles22

CHAPITRE II APERÇU DÉTAILLÉ SUR LES DEFAUTS DU ROULEMENT DANS LES MASTableau(II.1). La relation entre la vitesse de rotation n et le facteur31**CHAPITRE III ANALYSE DES DEFAUTS DU ROULEMENT EN UTILISANT : MCSA et MVSA**

Tableau (III.1) : Fréquences caractéristiques du défaut de roulement de la bague extérieure (fonctionnement en charge).45

Tableau (III.2) : Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague interne ($s=0.048$).47Tableau (III.3) :Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BE, $s=0.032$).50Tableau (III.4):Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BI, $s=0.032$).51

A red scroll with a dark red border and rounded corners. The scroll is unrolled, showing a light red interior. The text "INTRODUCTION GENERALE" is written in a bold, black, serif font in the center. The scroll has a shadow underneath it.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La machine asynchrone est la machine la plus puissante et la moins chère du marché, et sa bonne construction lui a permis d'être la machine la plus utilisée dans l'industrie, en particulier en ce qui concerne les moteurs électriques dans de nombreux domaines industriels, en particulier pour les variables demandes de vitesse.

Comme toute autre machine, une machine asynchrone n'est pas à l'abri des pannes. Ils peuvent être affectés par des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator ou du rotor et parfois les deux à la fois, les causes de défauts pouvant être dues à un simple problème de fabrication ou à une mauvaise utilisation de la machine par exemple. Tant l'environnement dans la machine utilisée peut être responsable de la détérioration de la machine (environnement corrosif ou chimique). Par conséquent, un arrêt soudain dû à une anomalie quelconque peut entraîner des pertes financières et peut affecter la sécurité des êtres humains.

Dans ce mémoire, nous étudierons à ce sujet, car l'analyse et la détection précoce reste la meilleure solution pour éviter ou au moins réduire les dysfonctionnements, et pour cela, il existe de nombreux programmes pour concevoir et analyser des systèmes électromagnétiques pour prédire le comportement et les performances de l'appareil avant de passer à la étape de fabrication. La maîtrise de ces programmes est d'une grande importance, car ils permettent de réduire significativement le coût des prototypes à réaliser.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur le diagnostic des défauts de charge dans une machine asynchrone à l'aide de deux méthodes : la première est la méthode d'analyse du courant statorique (MCSA-FFT). Cette technique est connue sous le nom de MCSA (Motor Current Signature Analysis) et l'autre c'est la MVSA (Motor Vibration Signature Analysis) qui signifie l'analyse du signal de vibration. La défaillance des roulements se manifeste par des ondulations superficielles des billes, des fissures dans les bagues « intérieure et extérieure » ou par une détérioration de la cage. La détection de ces défauts a été largement étudiée à l'aide de la technique d'analyse vibratoire (MVSA).

Ce travail est structuré en trois chapitres qui sont agencés de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous donnerons un bref aperçu de la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil en listant les différents défauts affectant la machine asynchrone et leurs causes.

Le deuxième chapitre présentera les défauts du roulement dans les machines asynchrones,. Nous montrerons aussi les différents types de roulements, leurs causes et solutions, puis un aperçu de deux méthodes d'analyse MCSA et MVSA qui ont une partie de notre travail.

INTRODUCTION GENERALE

Dans le troisième chapitre, nous analyserons et discuterons les résultats obtenus pour un défaut de roulement. Dans ce chapitre, nous allons comparer le bon fonctionnement d'un moteur à son fonctionnement en charge, en analysant le fonctionnement sous le défaut dans la bague extérieure et intérieure.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES DEFAUTS

DANS LES MAS

I.1 Introduction:

La croissance d'utilisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la trouvons maintenant dans tous les domaines industriels et en particulier dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ou encore les transports ferroviaires. Il est évident que ces moteurs conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse quant à leur fonctionnement et leur disponibilité [BOU08]. Dans ce chapitre, nous donnerons un bref aperçu de la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil en listant les différents défauts affectant la machine asynchrone et leurs causes.

I.2 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor (figure I.1). Contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction. En réalité, le moteur asynchrone triphasé à cage est un système très compliqué. Malgré cela, on peut le décomposer en trois sous-systèmes:

Le stator : c'est une partie fixe, où est connecté l'alimentation électrique.

Le rotor : c'est une partie tournante, qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.

Les paliers : ce sont des organes mécaniques permettant la mise en rotation du rotor et assurant le maintien des différents sous-ensembles. Il est à noter que chaque sous-système, cité ci-dessus est formé de plusieurs composants auxquels on attribue un ou plusieurs fonctions [HAM18].

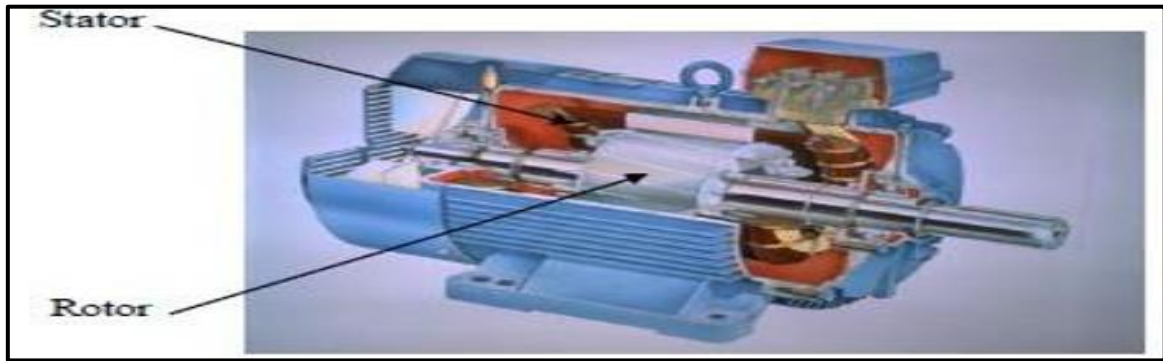


Figure (I.1) : Structure de la machine asynchrone à cage [HAM18].

I.2.1 stator:

Le stator comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles minces identiques en forme de couronne qui constituent un cylindre vide ; ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé. Cette couronne est serrée dans une carcasse en fonte [BAC22]..

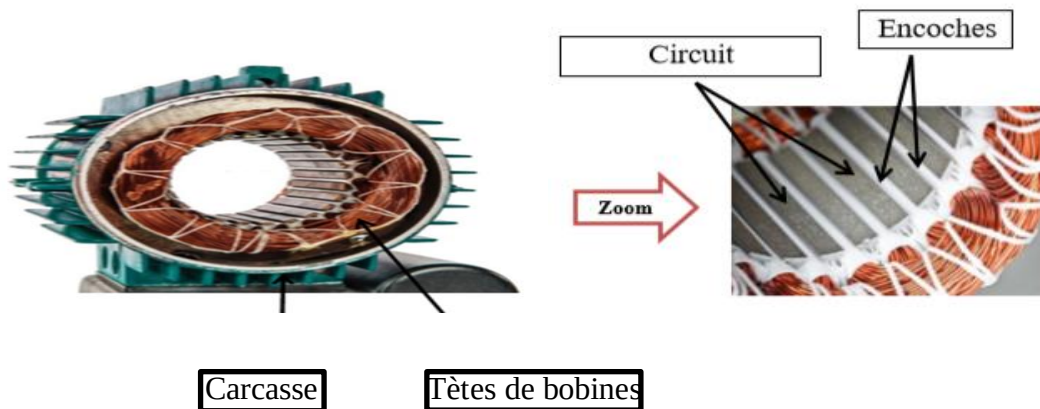


Figure (I.2) : Stator d'une machine asynchrone [BAC22].

I.2.2 rotor:

Le rotor présente quant à lui deux configurations dont le choix dépend de l'utilisation faite de la machine. Nous distinguons le rotor bobiné qui supporte un bobinage semblable à celui du stator où ces trois bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux même. La deuxième configuration qui est la plus usitée dans l'industrie et qui est également celle utilisée au niveau des différents axes de recherche concernant la machine par coulage d'un alliage d'aluminium ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor [BAB14].

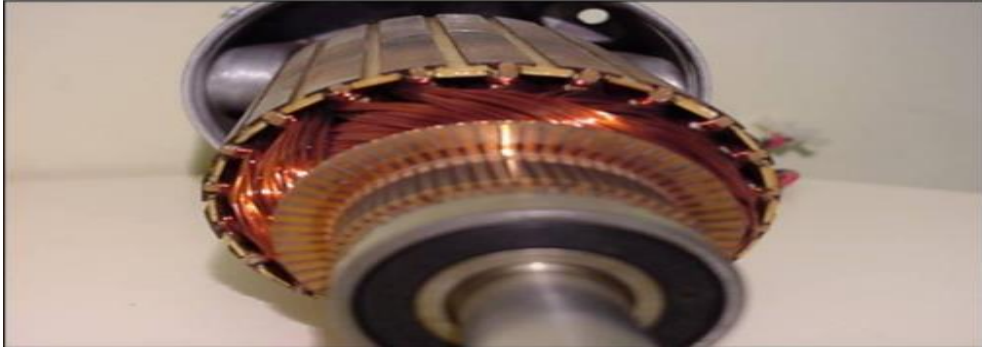


Figure (I.3): Rotor bobiné d'une MAS [HAM18].

I.2.3 les pièces mécaniques :

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc....), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire).

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

Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage,...). Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse [CHE12].

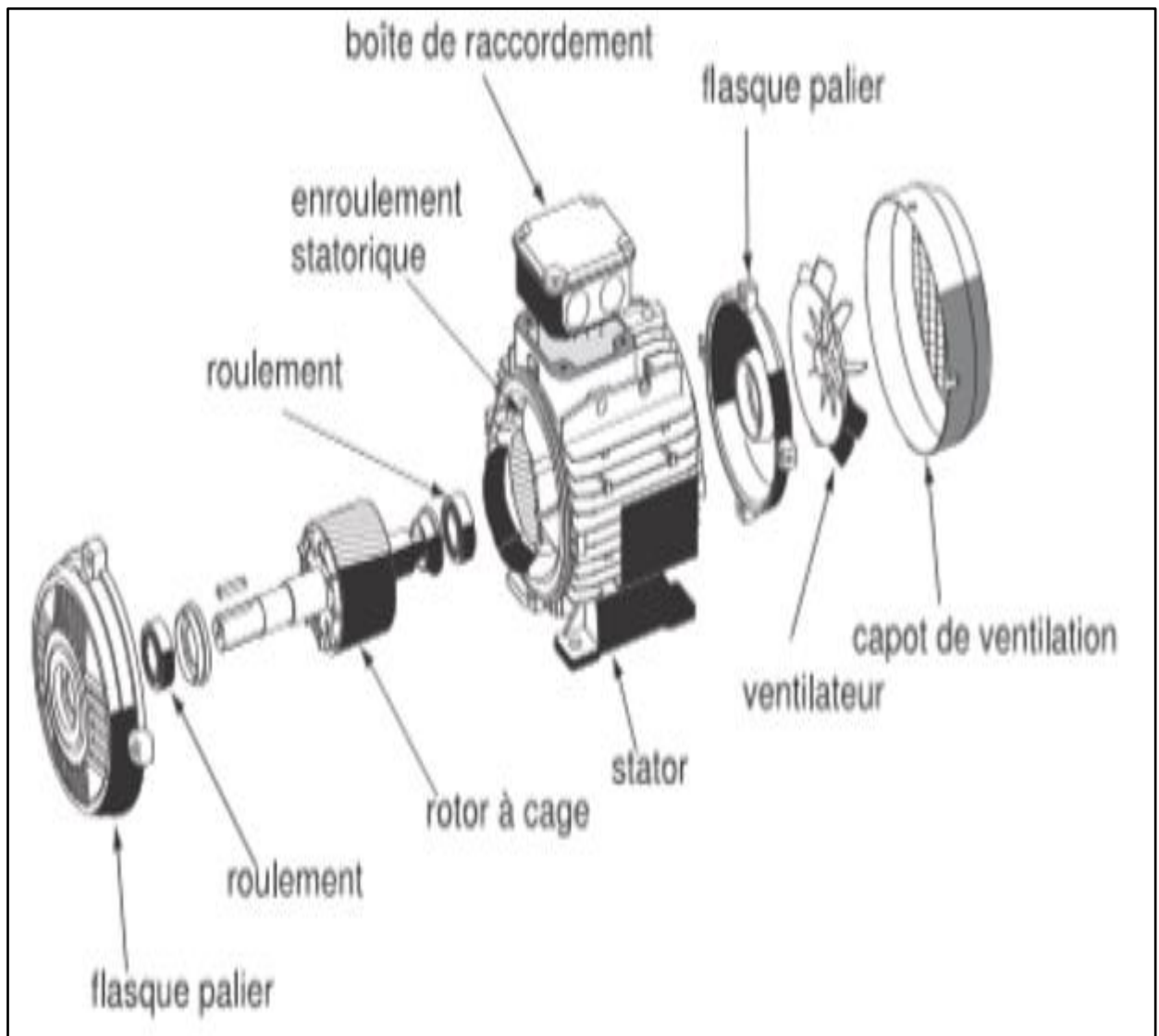


Figure (I.4) : Vue éclaté d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil [SAN17].

I.3 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil

D'une part sur la création d'un courant électrique induit dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant. Le conducteur en question est un des barreaux de la cage d'écureuil ci-dessous constituant le rotor du moteur. 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) [SW1].

Pour comprendre le fonctionnement de ce moteur, on a un conducteur électrique a un longueur L , qui va être soumis à un champ magnétique et il le traverse un courant, il est subit à une force électromagnétique F qu'on l'appelle la force de Laplace (pour savoir le sens il faut utiliser la règle de la main droite) qui tend à le mettre en mouvement [SW2].

$$F = B.I.L.\sin\alpha \quad (I.1)$$

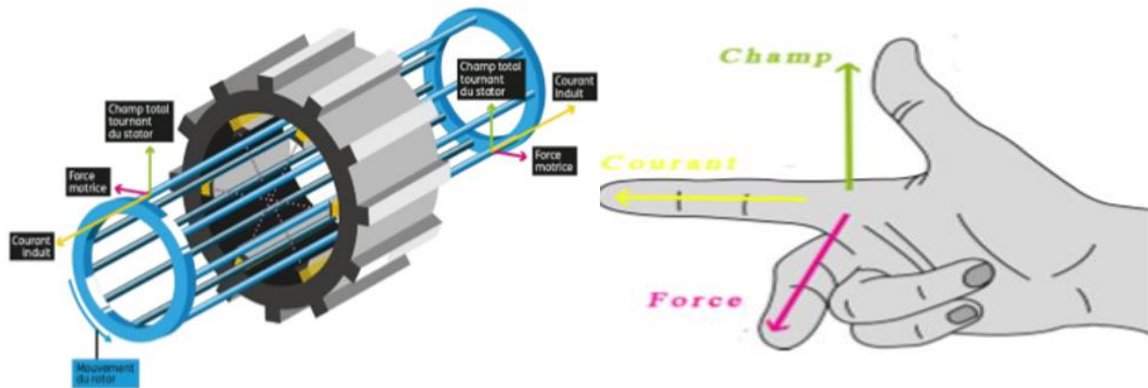


Figure (I.5): Photo simplifiant le principe de fonctionnement de MAS a cage [SW3]

Figure (I.6): Forme de la main droite [SW4].

Figure (I.5) : Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage[SW3].

I.3.1 Le champ tournant :

C'est la variation du flux magnétique crée par les courants statorique, et sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence des courants du stator. C'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence d'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme Ω_s [rad/s]. [TAB16]

Elle est exprimé comme suit : $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$ [rad/s] (I.2) Ou : $\Omega_s = \frac{2\pi N_s}{60}$ (I.3)

Avec:

Ω_s : la vitesse angulaire de synchronisme[rad/s]

ω_s : Pulsation électrique synchrone du champ tournant [rad/s]

N_s : vitesse de synchronisme en [tr/min]

p : nombre de pair de pole

I.3.2 La vitesse de synchronisme :

Pour les moteurs asynchrones, la vitesse de synchronisme dépend de la fréquence d'alimentation et du nombre de paires de pôles p constituant le stator[MOH17]

$$n_s = \frac{60.f}{p} \quad (I.4)$$

f : Fréquence [Hz].

I.3.3 La vitesse de rotation :

D'après la relation précédente (I.5), il est évident que la vitesse mécanique peut être donnée par la relation suivante[SW7] [BAC22]:

$$n_s = \frac{60.f}{p} (1 - g) \quad (I.5)$$

I.3.4 Le glissement :

Le rotor n'arrivera jamais à tourner à la même vitesse que le champ statorique, cet écart avec la vitesse de synchronisme joue un rôle fondamental et il est défini par un paramètre important dit : glissement.

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (I.6)$$

Le glissement vaut 1 au démarrage et 0 à la vitesse de synchronisme. En fonctionnement normal, il est toujours faible : 7% pour les petites machines et pour les grosses machines jusqu'à 2%.

En fonctionnement normal, la fréquence des f.é.m. et des courants rotoriques est très faible, elle est donnée en fonction du glissement[SAN17]. :

$$f_r = g.f \quad (I.7)$$

Avec :

f : fréquence du réseau en hertz (Hz).

N_s : vitesse de synchronisme en [tr/min]

N : vitesse de rotation du rotor en [tr/min]

Ω_s : vitesse angulaire en [rad/s]

Ω : vitesse mécanique de rotation du moteur en [rad/s]

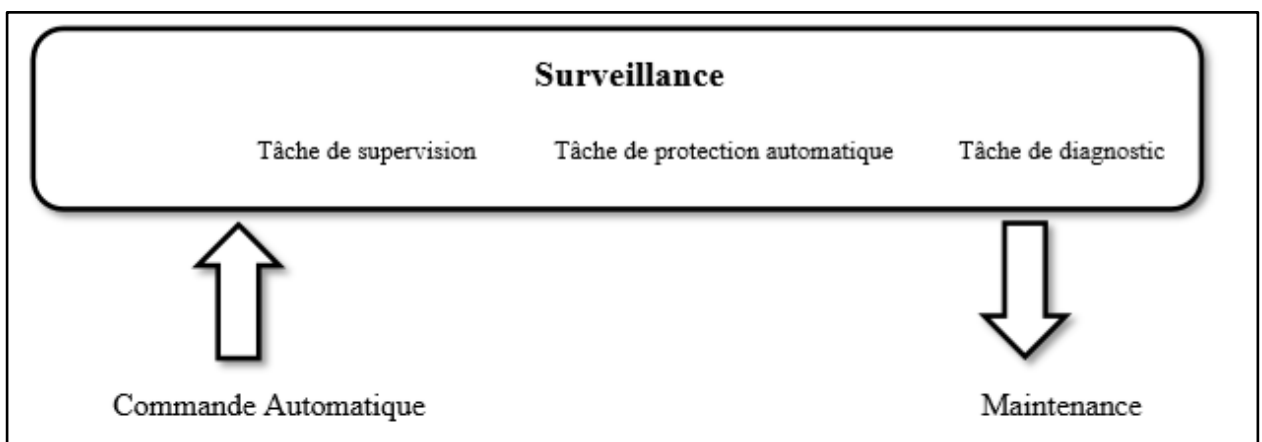
I.4 Notion sur la surveillance

La sûreté de fonctionnement s'appelle la science des défaillances qui consiste à évaluer les risques potentiels, prévoir l'occurrence des défaillances et tenter de minimiser les conséquences des situations catastrophiques lorsqu'elles se présentent. La démarche "sûreté de fonctionnement" s'appuie sur quelques notions de base, qui se sont précisées au cours de l'évolution de cette discipline, et qui continuent à s'affiner. La sûreté de fonctionnement possède, comme toute science, ses propres concepts terminologiques. Parcourir ce vocabulaire de base est donc une introduction nécessaire à cette discipline [HAM18], [KOV09] [BAC22].

I.4.1 La surveillance et le diagnostic:

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la fiabilité, la disponibilité et la sûreté des systèmes industriels. Les définitions de ces caractéristiques sont [HAM18], [KAD16] [BAC22] :

- **Fiabilité** : c'est l'aptitude d'un système à accomplir sa mission dans des conditions données d'utilisation.
- **Disponibilité** : c'est l'aptitude d'un système à fonctionner lorsqu'on le sollicite.
- **Supervision** : les variables mesurées sont comparées à des valeurs de référence et le résultat est affiché et lu par l'opérateur.
- **Protection automatique** dans le cas d'une anomalie dangereuse, la tâche du moniteur est de déclencher automatiquement des actions préventives. Ces actions ont pour objectif de garantir la sûreté de l'opérateur et du système.
- **Diagnostic** consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance.



Figure(I.7) : Surveillance [KAD16].

I.4.2 La maintenance :

La notion de maintenance revêt une importance particulière dans le contexte de la sûreté de fonctionnement. Elle englobe en effet les concepts liés à la surveillance et au diagnostic auxquels nous nous intéressons plus particulièrement. Nous donnons ci-après quelques définitions relatives à ce terme [KOV09], [KAD16].

- **Maintenance** : ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise.
- **Maintenance préventive** : maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre de dégradation du bien ou du service.
- **Maintenance corrective** : ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien, ou la dégradation de sa fonction, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au

moins provisoirement. La maintenance corrective comprend en particulier : la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement.

- **Maintenance curative** : activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. Ces activités peuvent être : des réparations, des modifications ou des améliorations ayant pour objet de supprimer la ou les défaillances.

I.4.3 Défaillance et panne:

Afin de finir le parcours non exhaustif du vocabulaire lié à la sûreté de fonctionnement, il est important de définir avec précision les termes de défaillance et panne [HAM18], [KAD16], [SW11].

- **Défaillance** : est la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Défaillance partielle défaillance à la suite de laquelle l'équipement ne peut plus accomplir qu'une partie des fonctions prévues initialement ou ne peut les accomplir qu'avec des performances dégradées.
- **Défaillance complète** : défaillance entraînant l'incapacité complète de l'équipement à accomplir toutes les fonctions prévues.
- **Panne** : La panne est l'incapacité d'une entité à accomplir une mission. Une panne résulte toujours d'une défaillance.
- **Panne complète** : panne résultant d'une défaillance complète

I. 5 Etude des différents défauts dans la machine asynchrone

Réputée pour être robuste, la machine asynchrone n'est jamais à l'abri des défaillances, ces anomalies donnent lieu à un comportement anormal de la machine et peuvent à court ou à long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques[DON85] [HAL15]. . Et avant d'étudier les différents types de défauts, il est indéniable de présenter les causes donnant naissance à ces défauts ainsi que leurs conséquences [HAM18].

I.5.1 Causes et conséquences des défauts :

Les défauts majeurs affectant les machines électriques sont dus à un ensemble de contraintes nocives qui sont généralement de nature thermique, électrique, mécanique, environnementale, électromagnétique, résiduelle et dynamique[GUE11].

a). Les Contraintes électriques :

Elles ont des effets directs sur la partie isolante du bobinage. Ce qui crée des problèmes diélectriques pouvant entraîner les ruptures des isolants.

b). Les Contraintes dynamiques:

Elles ont pour conséquence des dépassements dynamiques d'origine externe apparaissant sous forme de couple pulsatoire, vibrations, forces centrifuges, augmentation de la vitesse et la contrainte périodique. Ces contraintes peuvent provoquer le décalage de la masse rotorique, la flexion de l'arbre et des formations au niveau des barres rotoriques.

c). Les contraintes magnétiques On distingue:

- Les effets électromagnétiques.
- La sollicitation magnétique déséquilibrée.
- Les parasites et les vibrations électromagnétiques.

d). Les contraintes d'environnement :

Un moteur doit toujours être gardé dans un endroit propre et sec car sa durée de vie et sa bonne tenue dépend de l'environnement dans lequel il fonctionne. La présence de l'humidité et de la poussière qui contient des particules métalliques engendre de graves endommagements au niveau de la surface rotorique du moteur et détériore l'isolant ce qui provoque des court-circuits dans ses enroulements [GUE11].

e). Les contraintes mécaniques

Elles se présentent sous les formes suivantes : -mouvement des bobinages. -déflexion de l'arbre.

f). Les contraintes thermiques

L'excès de température provoque essentiellement la dégradation des isolants des enroulements et contribue à leur vieillissement, engendrant des court-circuit de différents types. Les dépassements thermiques sont dus :

- à des variations des tensions,
- au déséquilibre des tensions d'alimentation,
- au démarrage du moteur,
- à la surcharge du moteur,
- à la défaillance du système de ventilation,
- à l'augmentation de la température ambiante,
- aux pertes thermiques excessives.

g). Les contraintes de démarrage :

Le démarrage est la période la plus dangereuse pour la tenue de l'enroulement rotorique d'un moteur, durant laquelle tous les phénomènes sont aggravés par suite de l'appel important du courant. Si on prend par exemple le rotor à cage, trois principaux éléments peuvent contribuer à la rupture de sa cage durant cette période de fonctionnement :

- Les conditions de démarrage,
- Les contraintes permanentes,
- Les contraintes vibratoires.

On cite parmi les conséquences des défauts:

- Fluctuations au niveau du couple et de la vitesse.
- Appel supplémentaire de courant.
- Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.

I.6 Les principaux défauts dans la machine asynchrone

I.6.1 Défauts internes et externes

les défauts affectants les moteurs peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories [HAM18], [LEG21] :

- Les défauts internes : sont provoqués par les constituants de la machine (bobinage du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotoriques, entrefer mécanique, etc...).
- Les défauts externes : Ils sont causés par le type d'alimentation utilisée, la charge mécanique ainsi que l'environnement d'utilisation de la machine.

Tableau(I.1):CLASSIFICATION DES DEFAUTS DES MACHINES ELECTRIQUES
SELON LEURS ORIGINES

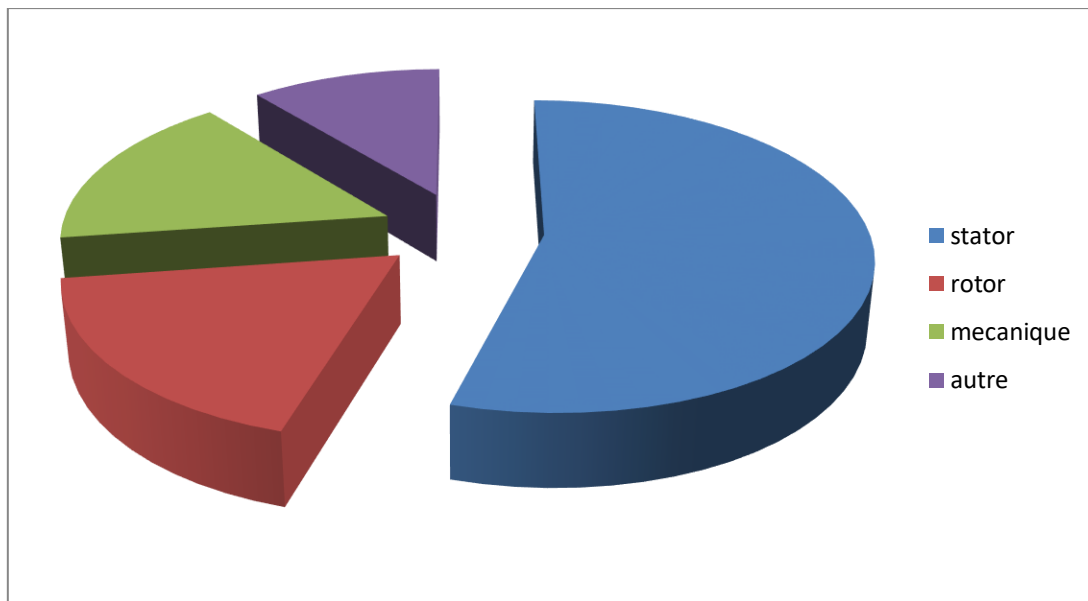
	Origins	Classification de defaults
interne	Electrique	• Défauts de stator • Défauts l'isolation. • Rupture de barre ou d'anneaux de court-circuit .
	Mécanique	• Contact entre le stator et rotor. • Excentricité. • Défaut de roulements • Déplacement des conducteurs
	Environnementale	• Humidité. • Température.

externe		• Propreté
	Mécanique	• Surcharge. • Défaut de montage • Charge oscillante.
	Electrique	• Déséquilibre de la tension. • Sources de tensions déséquilibrées. • Réseau bruité.

I.6.2 Etudes statistiques:

Une étude statistique est effectuée en 1998, par une compagnie d'assurance allemande des systèmes industriels, sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50KW à 200KW) a donné les résultats suivantes [GUE11] [Sad07]:

- Stator : 60%
- Rotor : 20%
- Mécanique : 18% - Autre : 12%

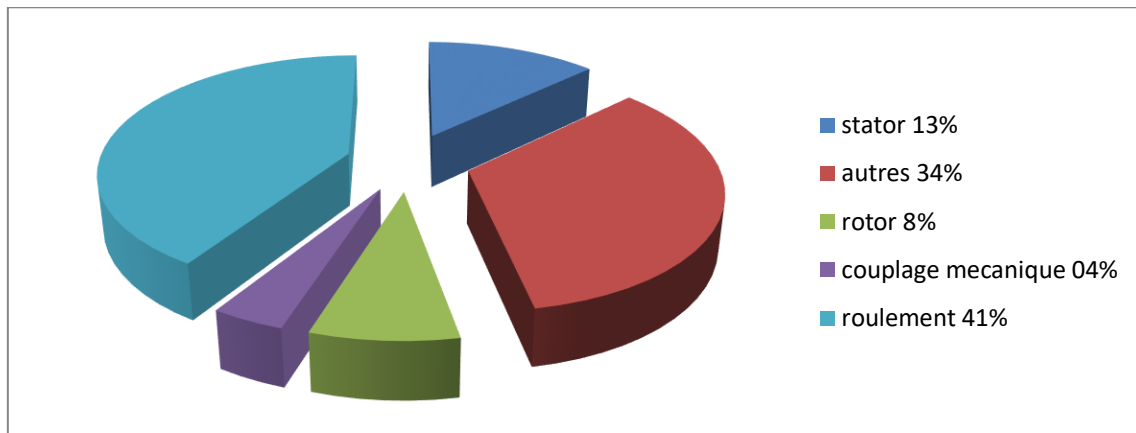


Figure(I.8) : Répartition des défauts pour une machine de moyenne puissance.

Une autre étude statistique a été faite sur les machines de grande puissance (de 100KW à 1MW) a donné les résultats suivantes :

- | | |
|----------------|----------------------------|
| 1-Stator : 13% | 4-couplage mécanique : 04% |
| 2-Autres : 34% | 5-Roulement : 41% |

3-Rotor : 08%



Figure(I.9) : Répartition des défauts pour une machine de grande puissance.

I.6.3 Défauts statoriques :

Ces défauts apparaissent souvent au niveau des enroulements statoriques (Fig.I.2) et sont dus à des dépassements de différentes natures [bon92] On distingue :

- Court-circuit dans les spires d'une même phase ;
- Court-circuit entre phases ou entre bobines ;
- Coupure d'une phase ;
- Défaut du circuit magnétique (rupture de tôles) ;
- Défaut de l'isolation masse.

A partir des études théoriques, il a été montré que le courant statorique avait un spectre enrichi par la création d'un court-circuit au stator. Les fréquences sont données par la relation [RAZ02] :

$$f_{cc} = [(n/p)(1 - s) \pm K].f$$

- f_{cc} = fréquence « de court-circuit » ;
- f = fréquence d'alimentation ;
- $n = 1, 2, 3, \dots, N_n$;
- p = nombre de pair de pôles ;
- s = glissement ;
- $k = 1, 2, 3, \dots, N_k$

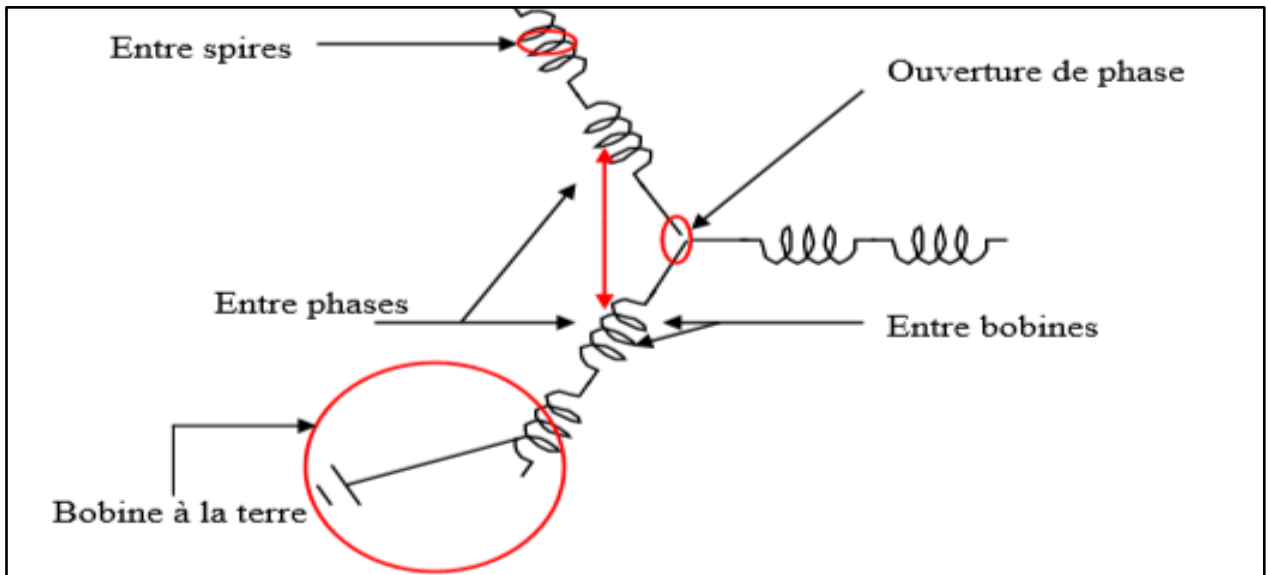
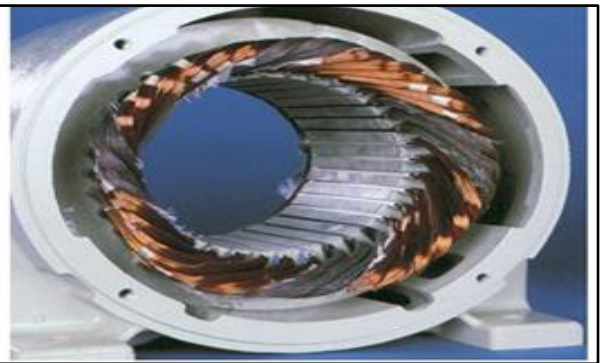


Figure (I.10): Représentation des différents défauts statoriques possible [BES17].



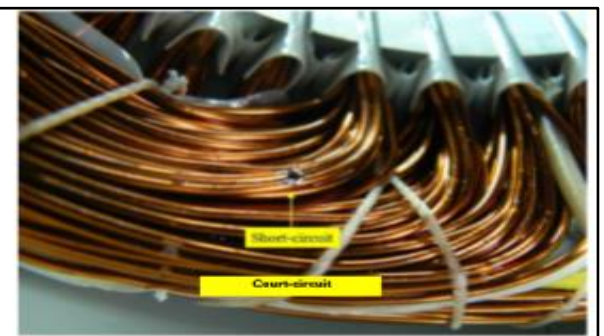
Court-circuit entre phase ou entre bobine [SW5]



Ouverture d'une phase [SW5]



Masse dans l'encoche [SW5]



Court-circuit entre les spires [SW6]

Figure (I.11): Quelques défauts statoriques [BES17].

I.6.4 Défaits rotoriques

Les différents éléments pouvant être défaillants se répartissent en 3 catégories. Celles-ci sont [RAZ03]:

- portion d'anneau ou de barre au rotor,
- roulement à billes,
- excentricité statique, dynamique, mixte.

Il est important de souligner que les défauts rotoriques peuvent être la cause de défauts dans les autres parties de la machine, et entraîner ainsi un dysfonctionnement plus grave.

I.6.4.1 Rupture des barres :

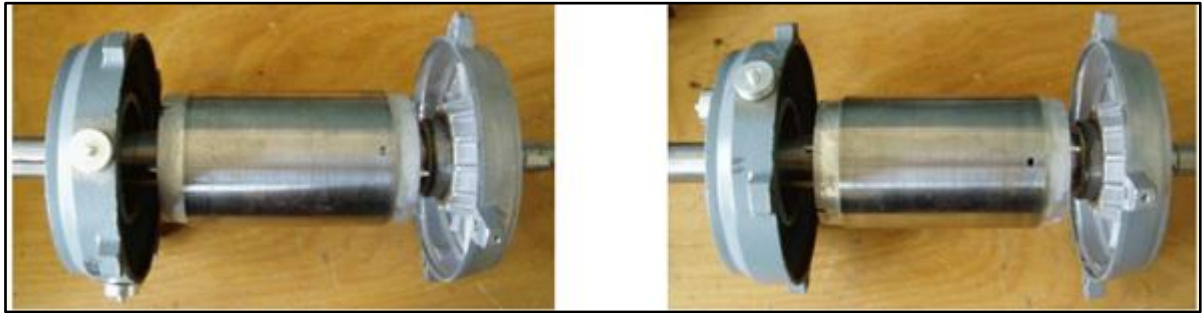
La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées[CB12][KI19]. Il y a deux type cassure :

Cassure totale : Barre cassée totalement signifie que le courant circulant dans celle-ci est nul et le courant qui circulait à travers cette barre se répartit sur les autres barres adjacentes. Ces derniers seront surchargés, ce qui provoquera leurs ruptures, et parfois un arrêt total de la machine [BAC22] [KOU11].

Cassure partielle : Barre cassée partiellement le courant circulant dans la barre n'est pas nul mais avec le temps, ça va se briser complètement cassé, car la surface de barre cassé est petite et ne résistera pas au passage du courant, ce qui accélère sa rupture complètement[BAC2].



Figure(I.12) : Rupture au même niveau [MHD16] **Figure(I.13) :** Rupture à la fin qui ça le relie à l'anneaux du rotor [HON13]



Figure(I.14) : Une barre partiellement cassée et un barre complètement cassée [GAE04].

I.6.4.2 Ruptures d'anneaux de court-circuit :

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

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques.

Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

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[CHE12].

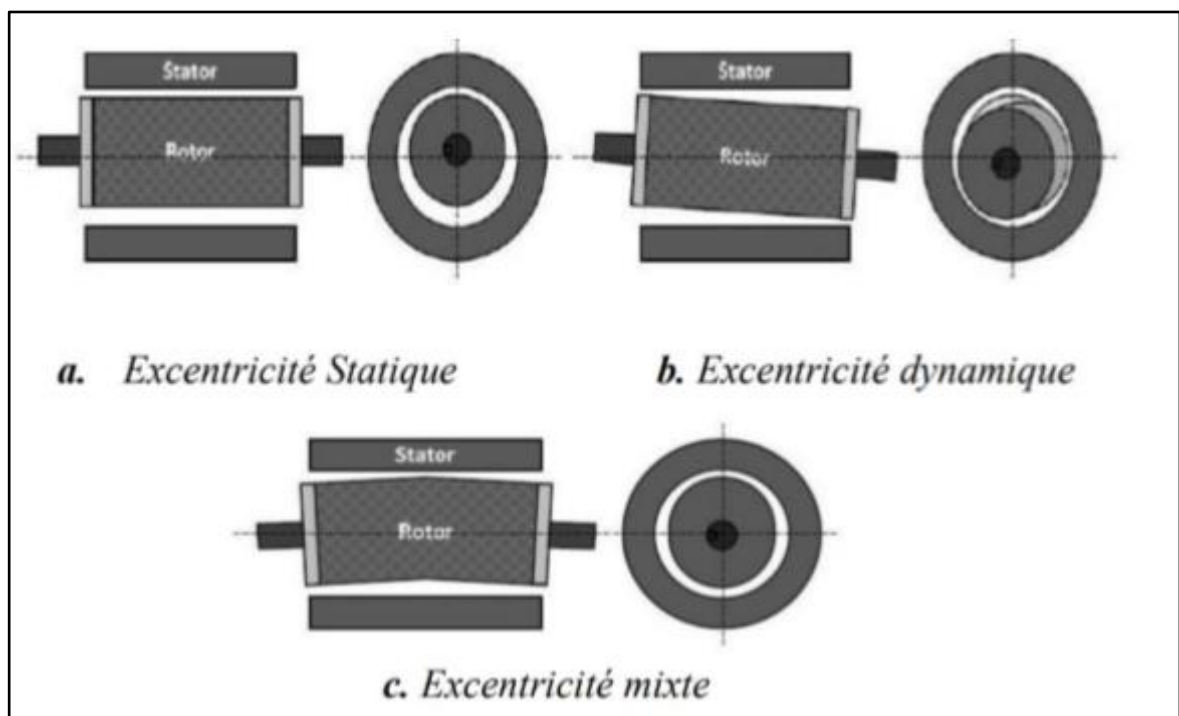


Figure(I.15) : Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit [BAC22].

I.6.4.3 Excentricité d'entrefer :

L'excentricité d'un moteur est le résultat de la non-uniformité de son entrefer. Ce type de défaut peut être la cause d'une flexion de l'arbre, d'un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, de l'usure du roulement ou encore d'un déplacement du noyau statorique. Il existe trois types de défauts d'excentricité [BAB14] :

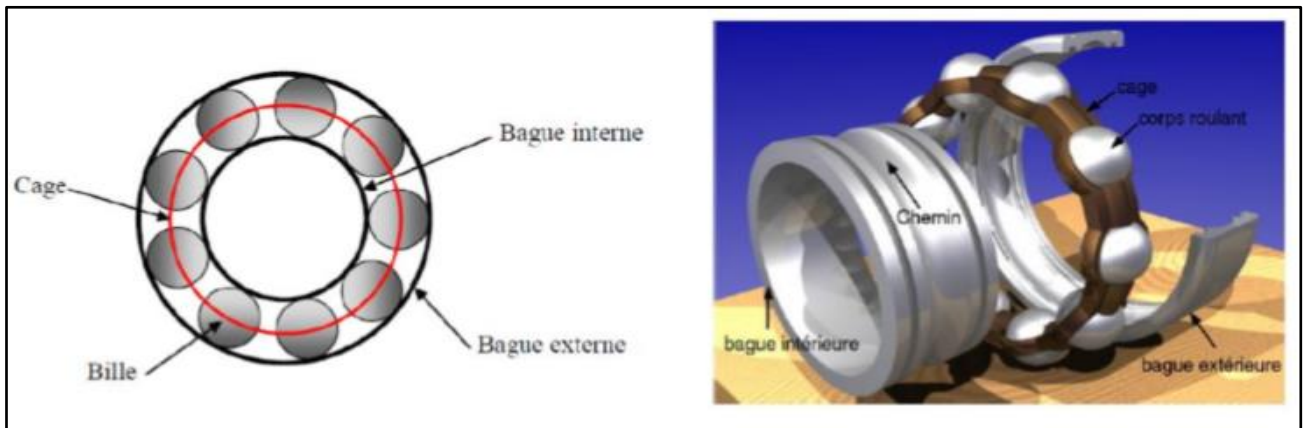
- L'excentricité statique: Ce défaut existe lorsque l'axe du rotor est décalé (non aligné) par rapport à l'axe du stator à l'arrêt de la machine. En fonctionnement, le rotor tourne autour de son axe. La cause principale de ce défaut est généralement due à l'opération de centrage des flasques (Figure I.13.a).
- L'excentricité dynamique: Ce défaut apparaît lorsqu'en fonctionnement de la machine, le rotor ne tourne plus autour de son axe malgré qu'à l'arrêt de celle-ci, l'axe du rotor est positionné au centre de l'alésage du stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes (Figure I.13.b).
- L'excentricité mixte : Ce défaut est le plus fréquent, car c'est le résultat de l'association des deux cas précédents (Figure I.13.c).



Figure(I.16) :TYPES D'EXCENTRICITE.

I.6.5 Défauts de roulements à billes :

Comme il est indiqué sur la (Figure I.13), la majorité des défauts dans les machines électriques concernent les défauts de roulements qui ont de nombreuses causes telles que l'écaillage de fatigue, la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou des causes électriques comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs [AND12] [BAC22].. Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants, cage ... etc. (FigureI.17).



Figure(I.17). Architecture d'un roulement rigide à billes [HAM18].

En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par des petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [BAC22]

$$f_{roul} = |fs - kfv| \quad (I.8)$$

d'où: $k = 1, 2, 3, \dots$, f_{roul} = fréquence de roulement, et fv est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations. Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres du roulement. Les fréquences des vibrations qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont [BAC22] :

- **Défauts au niveau d'une bille**

$$fb = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \right] \quad (I.9)$$

- **Défauts sur la bague intérieure**

$$fb.int = \frac{nb}{2} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \right] \quad (I.10)$$

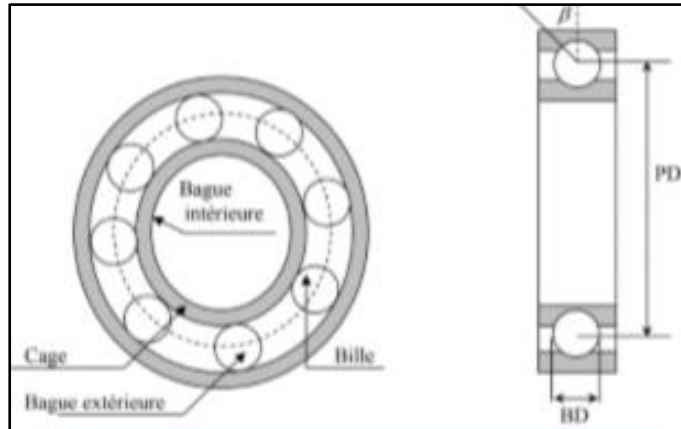
- **Défauts sur la bague extérieure**

$$fb.ext = \frac{nb}{2} frot \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \right] \quad (I.11)$$

- Défauts dans la cage

$$fc = \frac{frot}{2} frot \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \right] \quad (I.12)$$

Où BD le diamètre d'un élément roulant, PD la distance entre les centres des billes diamétralement opposées, nb est le nombre d'éléments roulants, β angle de contact des billes avec les bagues du roulement et $frot$ est la fréquence de rotation du rotor.



Figure(I.18) : Dimension du roulement à bille [RAD07] [BAC22].

I.7 Techniques et méthodes de diagnostic :

I.7.1 Analyse des signaux vibratoires

L'analyse des défaillances des moteurs électriques par les signaux vibratoires et acoustiques permet une détection de quasiment tous les défauts, notamment ceux mécaniques, pouvant se produire sur le processus. Cette analyse peut être réalisée à partir de capteurs, généralement des accéléromètres, placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales.

permettent de construire le tableau Tableau(I.2) résumant les caractéristiques de l'analyse vibratoire des défauts.

Tableau(I.2) : Analyses vibratoires, signatures fréquentielles

Types de défaut	Signatures (analyse vibratoire)	Commentaires
Ruptures des barres Ruptures de portions d'anneaux	$fr \pm 2 \cdot g \cdot fs$ (g : le glissement)	Les vibrations axiales augmentent avec le nombre de barres cassées
Excentricité Statique Dynamique	Excentricité statique : $2.fs$ ou des composants à $Nr.fr \pm fs$ Excentricité dynamique: $fr \pm 2.g.fs$ ou fr	L'excentricité dynamique est fonction du temps et de l'espace L'excentricité statique est fonction de l'espace seulement
Désalignement	fr et $2.fr$ principalement	Vibration plus importantes dans la direction axiale
Déséquilibre Mécanique	 fr	Au niveau de la charge notamment Vibration plus importantes dans la direction axiale Défaillances
Défaillance des paliers	$n.fe$ et $n.fi$ $fi \pm n.fr$ avec : n un nombre entier : 1,2,...	Bagues externes Bagues internes Ces composantes fréquentielles sont modulées par la vitesse

Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients :

- problème d'accessibilité,
- difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour

effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut.

De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant.

Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux.

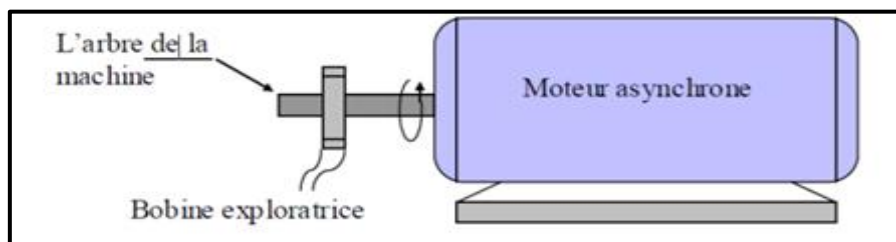
Dans la section suivante, les études concernant l'analyse du spectre du flux dans l'entrefer, du flux axial et même du flux de fuite des têtes de bobines sont présentées.

I.7.2 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite:

La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator et du rotor ce qui affecte la répartition des du champ magnétique dans et hors la machine. Plusieurs auteurs se sont penchés à l'exploitation du flux axial. En fait, si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de cette tension induite, peut être exploité pour détecter les différents défauts statoriques ou rotoriques [BEN16] [LAB19].

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

La conséquence directe d'un défaut est l'augmentation du flux de fuite axial. Cette augmentation du flux est la condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite axial comme une technique de diagnostic, c'est-à-dire ce dernier doit avoir une valeur importante [KHA17] [LAB19].

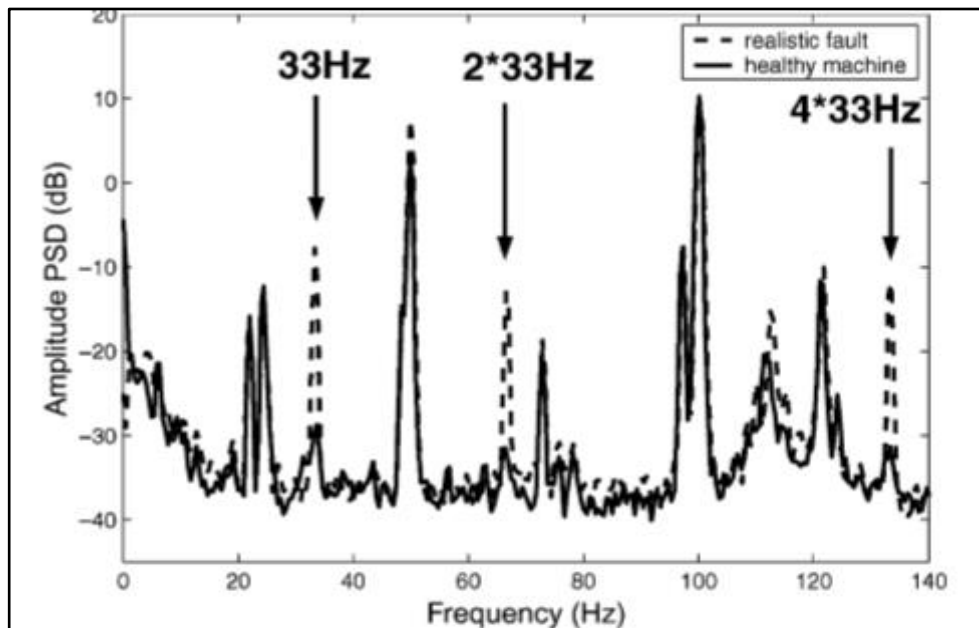


Figure(I.19) : Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial [KHA17].

I.7.3. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Quel que soit le type de défaut mécanique ou électrique une oscillation au niveau du couple électromagnétique est toujours présente. Pour cela, il est très important d'analyser le couple électromagnétique. C'est une technique de diagnostic très efficace pour la détection des défauts surtout les défauts de type mécanique comme : le défaut d'excentricité et le défaut de

roulement... etc. En plus, cette technique d'analyse du couple est très intéressante car la signature des défauts est indépendante de l'harmonique du fondamental comparativement à l'analyse du courant statorique (Figure I.20) [KHO20] [BAC22].

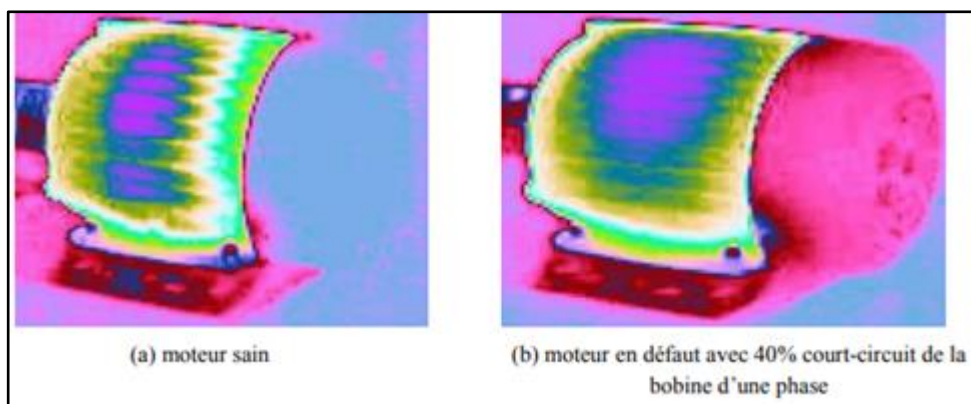


Figure(I.20) : Spectre du couple électromagnétique avec défaut de roulement [MAR08].

I.7.4 Diagnostic par analyse de la température :

La Thermographie Un capteur peut être monté sur l'enroulement ou noyé (intégré) dans l'isolant ou placé dans la plaque à bornes est un bon indicateur de la surchauffe de la machine qui est un signe de défauts,

En plus, récemment des techniques par visualisation des images thermiques par infrarouge sont utilisées pour le diagnostic des différents défauts, (Figure(I.21) [KER17]



Figure(I.21) : Image colorée infrarouge thermique [KER17].

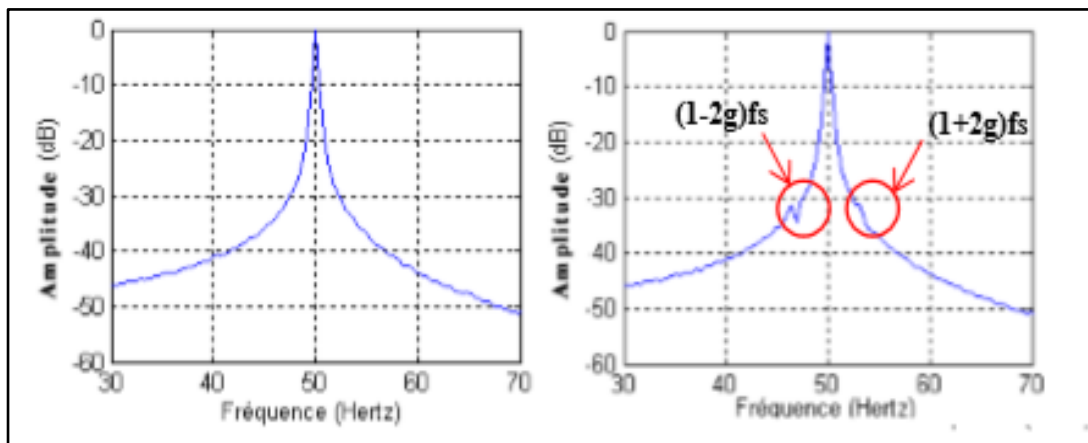
I.7.5 Méthodes basées sur l'intelligence artificielle

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle. Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisent un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance. Parmi ces méthodes, on peut citer [KER17] :

- logique floue,
- réseaux neuronaux,
- reconnaissance des formes.

I.7.6 Diagnostic par analyse des courants statoriques

Il est un peu difficile d'analyser directement les résultats précédents pour détecter un défaut, et tout particulièrement quand il s'agit d'une barre cassée ou portion d'anneau. Seules des méthodes plus utiles comme l'analyse spectrale des signaux offrent un issu pour le diagnostic de ce type de défaut. L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts qui pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone (Figure I.22) [KHA09]. De plus l'avantage majeur de cette technique est l'emplacement du capteur à n'importe quel point entre l'alimentation et le moteur [KHO20] [BAC22].



Figure(I.22) : Spectre du courant statorique d'un moteur sain et avec une barre cassée en charge [KHA09] [BAC22].

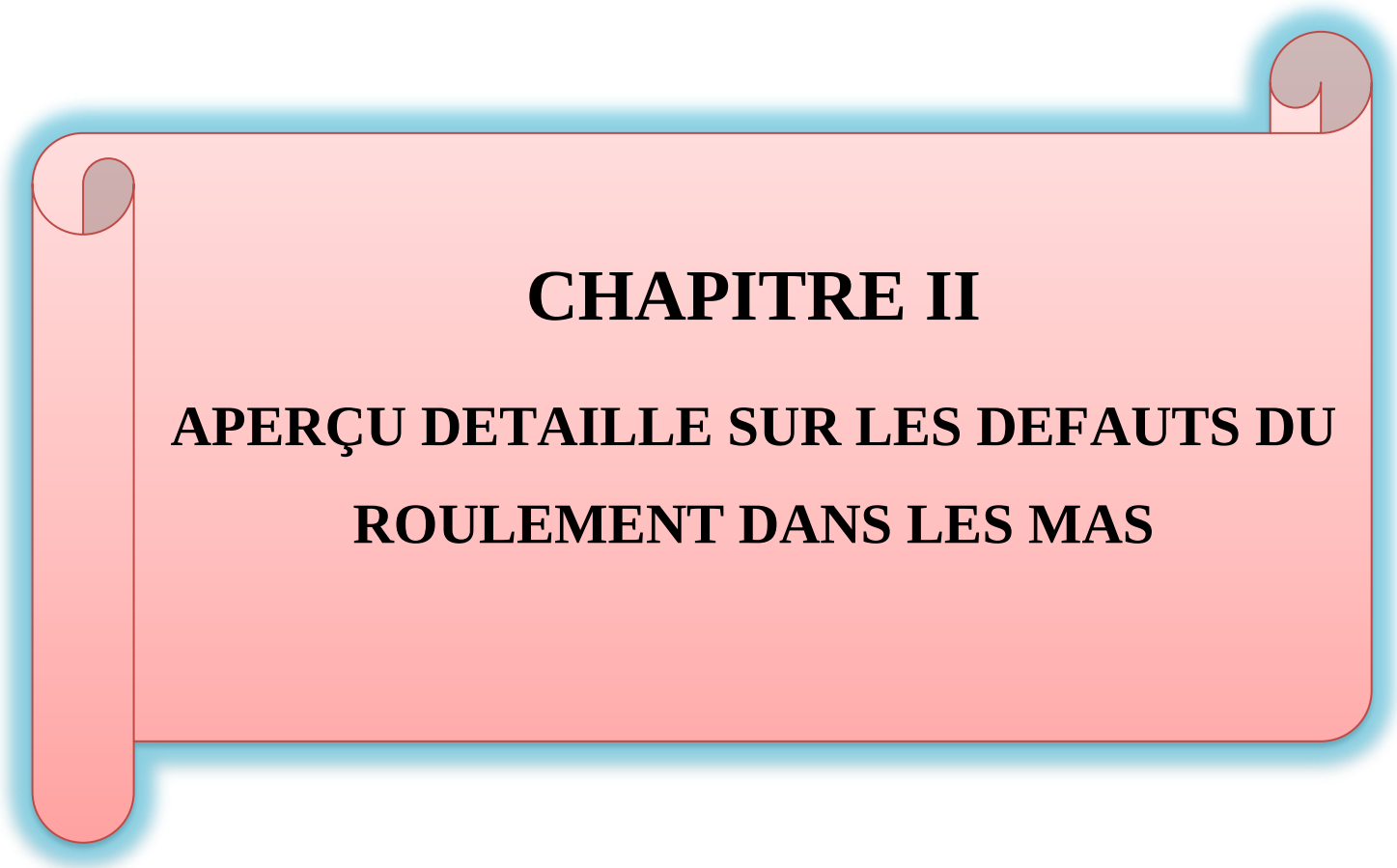
I.7.7 Diagnostic par identification paramétrique

L'estimation paramétrique s'avère également bien adaptée au diagnostic. La mise au point d'algorithmes dédiés à l'estimation réaliste des paramètres physiques, en tenant compte de la connaissance à priori de la machine, a permis une avancée prometteuse du diagnostic de la machine asynchrone par identification paramétrique. Cette approche étant basée sur l'identification des paramètres de la machine, l'un des objectifs les plus importants concerne la mise au point de modèles mathématiques réellement représentatifs d'un fonctionnement en défaut. En situation de défaut, la machine asynchrone présente, en plus d'un comportement dynamique conventionnel, un comportement dû aux défauts.

I.8 Conclusion

Ce chapitre a été essentiellement consacré aux généralités sur de la machine asynchrone à cage d'écureuil. De plus nous avons présenté les différents types de diagnostic et quelques terminologies utilisées. Nous avons étudié aussi les différents types de défauts pouvant apparaître dans la MAS. Nous avons remarqué d'après cette synthèse que le défaut de roulement est le défaut le plus fréquent. Ces défauts peuvent provenir de diverses origines : électriques, mécaniques ou environnementale.

Nous avons terminé ce chapitre par une aperçue sur quelques techniques de diagnostic actuellement utilisées.



CHAPITRE II

APERÇU DETAILLE SUR LES DEFAUTS DU ROULEMENT DANS LES MAS

II.1 Introduction :

Dans le premier chapitre, nous avons vu de nombreux défauts qui pourraient frapper les machines électriques. Comme l'ont montré des études statistiques, les défauts de roulements sont répandus dans le domaine industriel et représentent 40% des défaillances. Par conséquent, d'un point de vue industriel et scientifique, les efforts sont axés sur la détection et le diagnostic des défauts de roulement [TRA09] [BAC22]. Ce chapitre va présenter en détail les défauts du roulement. En plus, les méthodes de diagnostic utilisées dans ce travail vont bien expliquer (MCSA et MVSA).

II.2 Défauts de roulement :

II.2.1 Présentation du roulement à billes :

Comme pour la majorité des roulements, un roulement à billes est composé d'une bague intérieure et d'une bague extérieure, d'éléments roulants qui sont donc des billes, et d'une cage. Les billes situées entre les deux bagues du roulement sont maintenues à égale distance les unes des autres par la cage qui les guide et facilite leur rotation. La cage ne supporte pas ainsi directement les efforts appliqués au roulement. Elle permet de maintenir les éléments roulants à égale distance les uns des autres tout en les retenant à l'intérieur du roulement.

La surface sur laquelle roulent les billes est appelée « chemin de roulement ». Elle supporte les charges appliquées aux roulements. En général, la bague intérieure est montée sur l'arbre et la bague extérieure dans le logement.

Il faut noter que le contact entre les éléments roulants et les bagues pour les roulements à billes est ponctuel alors que le contact pour les roulements à rouleaux est linéaire[SW8].

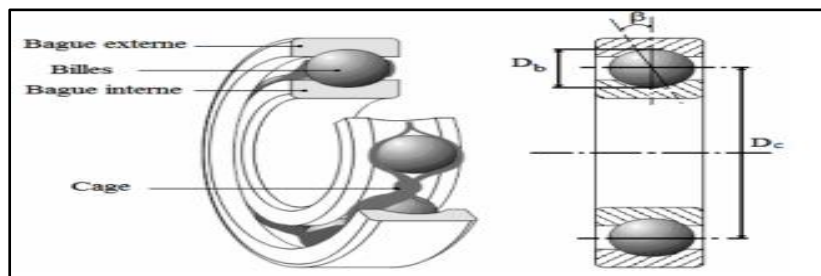


Figure (II.1): Géométrie du roulement à billes.

II.2.1.1 Causes et les conséquences des défauts roulements à bille :

Ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de grande puissance. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles sont [MOH17] [BOU09]:

- L'usure due au vieillissement.
- La température de fonctionnement élevée.

- La perte de lubrification.
- L'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement).
- Le défaut de montage.
- Les courants d'arbres (Shaft Current).
- Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge.

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures
- l'ondulation de leur surface de roulement
- l'attaque des billes • la corrosion due à l'eau
- défaut de graissage, problème dû à la température
- décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge

II.2.1.2 Durée de vie des roulements :

Sur une série de roulements identiques, soumis aux mêmes conditions, les variations de durée de vie sont considérables. Celles-ci sont surtout dues à des différences de fatigue de la matière. Par conséquent, il faut prendre en considération ces variations de fatigue de la matière pour calculer la durée de vie. La durée de vie nominale est définie ci-dessous. La durée de vie nominale est le nombre de tours à vitesse donnée qu'atteignent ou dépassent 90% des roulements d'un même lot soumis aux mêmes conditions de fonctionnement, avant l'apparition des premiers écaillages, signe de fatigue de la matière. Lorsque les roulements ont été soumis à des vitesses constantes, la durée de vie nominale (90% de fiabilité) est exprimée comme le nombre total d'heures de fonctionnement.

La charge dynamique de base est la charge constante que supporte un roulement pour atteindre une durée de vie nominale de 1 millions de tours. La charge prise en compte est purement radiale pour les roulements radiaux, et purement axiale pour les butées. Elles sont appelées « charge de base dynamique (C_r) » et « charge de base dynamique axiale (C_a) ». Les charges dynamiques de base indiquées dans ce catalogue sont valables pour tous les roulements fabriqués avec des matériaux standards NTN et suivant des procédés standards NTN. Le rapport entre la charge dynamique du roulement, la charge appliquée et la durée de vie est donné par formule suivante

Pour des roulements à billes[BEL17] :

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \quad (\text{II.1})$$

Pour les roulements à rouleaux :

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{5}} \quad (\text{II.2})$$

Où :

L₁₀ : durée de vie nominale en millions de tours

C : charge de base dynamique en N {kgf} (Cr: roulements radiaux, Ca: roulements axiaux)

P : charge dynamique équivalente appliquée en N {kgf}

(Pr: roulements radiaux, Pa: roulements axiaux) n : vitesse de rotation en min⁻¹

La relation entre la vitesse de rotation n et le facteur de vitesse fn ainsi que celle entre la durée de vie L_{10h} et le facteur de vie fh sont données dans le tableau II.1.

Tableau(II.1). La relation entre la vitesse de rotation n et le facteur

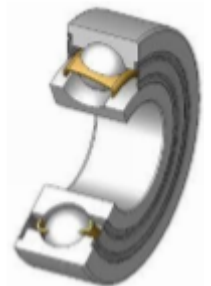
Classement	Roulement à billes	Roulement à rouleaux
Durée de vie L _{10h} h	$\frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^{3=50} fh^3$	$\frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}} = 500 fn^{\frac{10}{3}}$
Facteur durée fh	$fn \frac{C}{P}$	$fn \frac{C}{P}$
Facteur de vitesse fn	$\left(\frac{33.3}{n}\right)^{\frac{1}{10}}$	$\left(\frac{33.3}{n}\right)^{\frac{3}{10}}$

II.2.1.3 Différents types de roulements[BAC22]:

II.2.1.3.1 Roulements à Billes:

a- Roulements à billes à contact oblique :

Pour ce type de roulement, les pistes sont usinées avec un épaulement haut sur la bague intérieure, et un autre bas sur la bague extérieure. Les deux épaulements sont disposés l'un en face de l'autre. Ce type de roulement est adapté pour des charges axiales appliquées sur un seul sens.



b- Roulement à contact oblique sur deux rangées de billes :

C'est le type roulement où les bagues intérieure et extérieure possèdent deux chemins de pistes chacune. Les deux rangées de billes sont disposées de façon que les angles de contact soient deux roulements à une seule rangée. Ils peuvent supporter des charges axiales importantes dans les deux sens.



II.2.1.3.2 Roulements à Rouleaux :

a- Roulement à une seule rangée de rouleaux cylindriques :

Pour réduire les contraintes (forces de contact) dans le cas d'une charge radiale important, il faut que la surface de contact soit important, dans ce cas, il est nécessaire de passer d'un contact ponctuel à un autre linéaire, c'est-à-dire il faut installer des roulements à rouleaux cylindriques au lieu des roulements à billes. Le guidage des rouleaux dans ce type de roulements est assuré par des épaulements usinés et rectifiés sur les bagues intérieures, extérieures ou les deux bagues de roulements à la fois (selon le type de montage)

**b- Roulements à rotule sur deux rangées de rouleaux :**

Les roulements à rotules sur deux rangées de rouleaux comportent deux chemins usinés sur la bague intérieure et séparés par un épaulement à fin d'assurer un bon guidage. La bague extérieure possède un chemin de forme sphérique. Ce type de roulement est utilisé pour compenser les défauts d'alignement, ou la flexion de l'arbre due à l'action d'une charge important. Cette construction permet le déplacement libre de l'ensemble (bague intérieure-cage-rouleaux) à l'intérieure de la bague extérieure, à cet effet et en plus des charges radiales, le roulement peut admettre aussi des charges axiales

**II.2.1.4 Choix du roulement :**

Dans le cas général, la détermination d'un roulement s'effectue suivant[BEL17]:
Nombre de mécanismes prévu (série).

- Charge et la direction de la charge exercée sur le roulement.
- Ordre de grandeur de l'intensité de la charge.
- Précision demandée pour la liaison.
- Caractéristiques de rotation (précision, accélération angulaire, balourd (vibration ...).
- Caractéristiques de montage (coaxiale des portées, montage-démontage).
- Environnement intérieur (lubrification) et extérieure (poussière).
- Durée de vie du roulement.
- Vitesse de rotation N (tr/min).

II.2.1.5 Désalignement entre les bagues intérieure et extérieure

Une flexion de l'arbre, une variation de tolérance de l'arbre ou du logement ou des erreurs d'ajustement peuvent provoquer un désalignement angulaire entre la bague intérieure et extérieure du roulement. Si le désalignement est relativement grand, il est conseillé de choisir des roulements à billes auto aligneurs, à rouleaux sphériques ou des paliers auto aligneurs

II.3. Les défauts de roulements : causes et solutions

Parmi les nombreux défauts qui peuvent se trouver dans un roulement, citons les plus fréquentes entre eux [BEL17]:

II.3.1. Usure

L'usure généralement provient de trois causes principales :

- o L'usure peut provenir à cause de particules qui pénètrent entre le corps roulant, et les bagues interne et externe. Cela se manifeste généralement lorsqu'il y a un manque de propreté lors de l'assemblage du roulement, ou si le lubrifiant est contaminé par des particules. Une légère dentelure apparaît alors sur les bagues externes et internes, et sur le corps roulant Figure (II.2.a).
- o L'usure peut encore se montrer à cause d'une lubrification légère ou manquante. Dans une telle situation, le lubrifiant n'est pas capable d'atteindre l'intérieur du roulement, on a besoin d'une ré-lubrification fréquente. Le roulement possède les différentes parties usées et de surface réfléchissante comme un miroir Figure (II.2.b).
- o La dernière cause qui est responsable d'une telle usure provient d'une vibration excessive qui atteint le roulement sans que celui-ci ne tourne. Généralement, ce type de défaut apparaît lors du transport des machines, sous forme de creux rectangulaires sur le chemin de la bague interne, et circulaires sur le chemin de la bague externe. Plusieurs mesures peuvent être prises pour éviter ce type de défaut. Un pré chargement radial des roulements durant le transport peut résoudre ce problème. Un support amortisseur de vibration peut encore réduire les détériorations Figure (II.2.c).

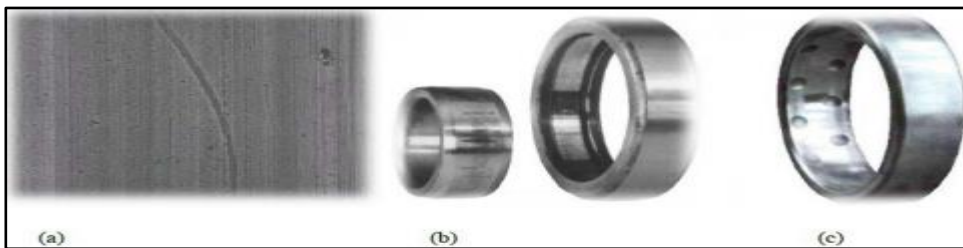


Figure (II.2): Défaut de roulement – usure. [BEL17].

II.3.2. Dentelure

La dentelure apparaît généralement lorsque le roulement n'est pas correctement monté, ou lorsque le roulement est soumis à une grande charge lorsqu'il est immobile. Une dentelure alors apparaît dont la distance entre les fissures est égale à la distance entre les corps roulants (figure II.3).



Figure (II.3): Défaut de roulement – dentelure[BEL17].

II.3.3. Bavure

Le phénomène de bavure apparaît sous forme d'un transfert de la matière d'une surface à une autre. Cela peut être causé par plusieurs facteurs : un manque de lubrification, pénétration du corps roulant dans la zone chargée, une charge légère par rapport à la vitesse de rotation et d'autres...Chaque cas doit être traité de façon à éliminer la cause. Le développement de la bavure conduit à une cassure totale de la bague ou du corps roulant (figure II.4).

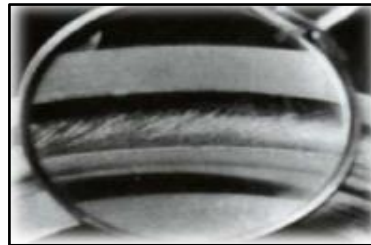


Figure (II.4): Défaut de roulement – bavure[BEL17].

II.3.4. Ecaillage

L'écaillage apparaît normalement à cause du vieillissement du roulement, mais ce n'est pas la raison unique pour que cet écaillage apparaisse, celui-ci peut arriver à cause d'une grande différence de température entre la bague interne et externe, de même, si le boîtier qui porte le roulement possède la forme ovale, on obtient le même résultat, il faut changer le boîtier immédiatement. D'autres causes peuvent être : un montage incorrect du roulement, ou une liberté axiale légère qui n'est pas suffisante pour le mouvement de la dilatation (Figure II.5).



Figure (II.5) : Défaut de roulement – écaillage[BEL17].

II.3.4.1.Défaut de la bague interne :

Il est caractérisé par la présence d'une raie à la fréquence caractéristique du défaut

(fdbi.). Cette fréquence est modulée par la fréquence de rotation (bandes latérales autour de la raie de défaut [MOK19].

$$fdbi = \frac{fr.nb}{2} \left(1 + \frac{Db}{Dm} \cos(\alpha) \right) \quad (II.1)$$

Avec:

fr : fréquence de rotation

α : angle de contact

II.3.4.2. Défaut sur la bague externe :

Ce défaut est caractérisé par la présence d'une raie à la fréquence (fd,be). Bien que la charge appliquée sur la bague externe soit constante, on peut remarquer une modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre autour de la fréquence de défaut [MOK19].

$$fdbi = \frac{fr.nb}{2} \left(1 - \frac{Db}{Dm} \cos(\alpha) \right) \quad (II.2)$$

II.3.5. Corrosion

Elle apparaît après la présence de l'eau ou de l'humidité pour une longue période dans le roulement. La corrosion peut entraîner à la cassure d'une bague ou du corps roulant. Pour la corriger, il faut utiliser un meilleur lubrifiant antirouille (figure II.8).



Figure (II.6): Défaut de roulement – corrosion[BEL17].

II.3.6. Cassure

La cassure provient dans la plupart des cas d'une mauvaise manipulation du roulement, par exemple lui donner un coup de marteau au temps de montage. La cassure peut encore provenir d'une corrosion ou d'une bavure (figure II.9).

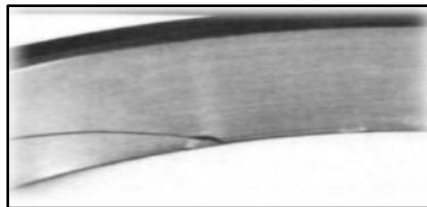


Figure (II.7): Défaut de roulement – cassure. [BEL17].

II.3.7. Choc électrique

Le passage d'un courant électrique dans un roulement en rotation ou non, peut

endommager ces différentes parties (figure II.10).

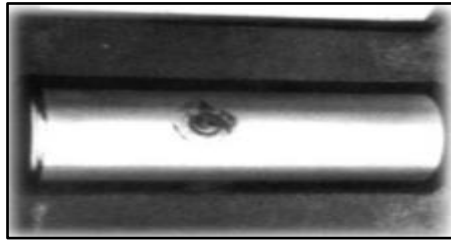


Figure (II.8): Défaut de roulement – choc électrique[BEL17].

II.4. Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement :

Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage) ; les avaries les plus fréquentes sur les roulements sont les défauts d'écaillage. Lors de la mise en rotation, un train d'impulsion est généré par ces défauts, à une fréquence bien déniée que l'on appelle "fréquence caractéristique" de défaut du roulement. Ce signal périodique est l'origine de nombreuses méthodes de détection de défaut de roulement. Les fréquences caractéristiques sont déterminées à partir de la géométrie du roulement et de la cinématique de la machine étudiée [MAO].

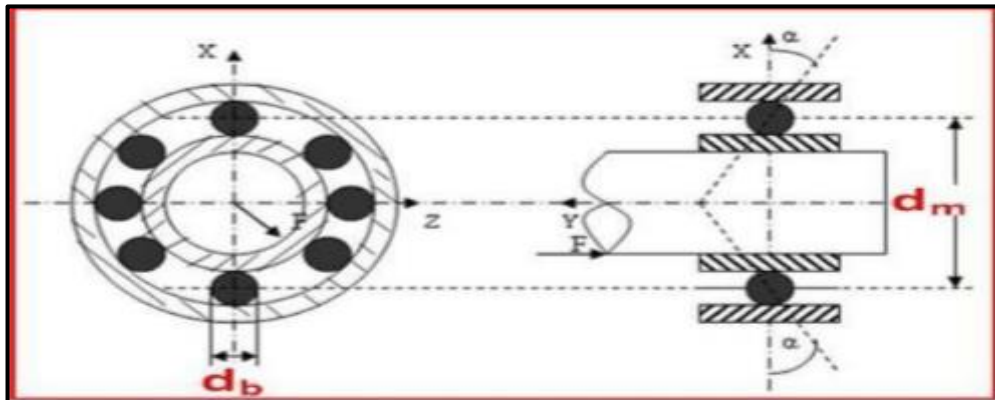


Figure (II.9): caractéristiques d'un roulement.

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

dm: Le diamètre primitif.

db: Le diamètre des éléments roulants.

α : Angle de contact.

1. Un défaut sur la bague extérieure générera un signal contenant des chocs espacés de la période de passage des billes sur la bague extérieure, la fréquence de ces chocs est appelée BPFO (Ball Passage Frequency Outer race).

$$BPFO = f_{outer}(HZ) = \frac{n}{2fr\left(1 - \frac{db}{dm} \cos \alpha\right)} \quad (II.3)$$

f_r : est la vitesse de rotation.

2. La fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague intérieure, cette fréquence est BPFI (Ball Passage Frequency Inner race

$$BPFI = f_{outer}(HZ) = \frac{n}{2f_r \left(1 + \frac{db}{dm} \cos \alpha\right)} \quad (II.4)$$

3. Pour un défaut sur une bille, la vibration sera générée à deux fois la fréquence de rotation de la bille BSF (Ball Spin Frequency), puisque la bille sur un tour cognera sur la piste externe et interne :

$$BSF = f_{ball}(HZ) = f_r \frac{dm}{db} \left[1 - \left(\frac{db}{dm} \cos \alpha\right) * 2\right] \quad (II.5)$$

Le calcul de ces fréquences caractéristiques nécessite une connaissance précise des caractéristiques dimensionnelles du roulement.

Pour chaque type de roulement, et en fonction de ses cotes de fabrication, on peut considérer les fréquences caractéristiques données par les équations suivant

II.4.1 Fréquence de défaut sur la bague intérieure :

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (II.6). Cette fréquence est modulée par sa fréquence de rotation de l'arbre (bandes latérales autour de la raie de défaut).

$$f_{bi} = \frac{n}{2} \left(1 + \frac{db}{dm} \cos \alpha (f_{rot} - f_{ext})\right) \quad (II.6)$$

Avec :

f_{bi} : Fréquence de défaut de la bague intérieure. f_{rot} : Fréquence de rotation de la bague intérieure.

f_{ext} : Fréquence de rotation de la bague extérieure.

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

d_m : Le diamètre primitif.

d_b : Le diamètre des éléments roulants.

α : Angle de contact.

II.4.2 Fréquence de défaut sur la bague extérieure :

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (II.7). Bien que la charge appliquée sur la bague externe soit constante, on peut remarquer une modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre autour de la fréquence de défaut.

$$f_{be} = \frac{n}{2} \left(1 - \frac{db}{dm} \cos \alpha (f_{rot} - f_{ext})\right) \quad (II.7)$$

Avec :

f_{be} : Fréquence de défaut de la bague extérieure

II.4.3 Fréquence de défaut sur la cage.:

La fréquence de passage d'un défaut de cage est donnée par l'équation (II.8) Ce défaut se manifeste par la présence de raies à la fréquence et ses harmoniques.

$$f_{ca} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{db}{dm} \cos(\alpha) \right) f_{rot} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{db}{dm} \cos(\alpha) \right) f_{ext} \quad (II.8)$$

Avec :

f_{ca} : Fréquence de défaut de la cage.

II.4.4 Fréquence de défaut sur l'élément roulant :

La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau), sur la bague externe ou sur la première fréquence caractéristique de défaut correspond à la fréquence de rotation de l'élément roulant sur lui-même. De plus, cet élément roulant rencontre une fois la bague intérieure et une fois la bague extérieure par tour, il génère donc des chocs à 2 fois cette fréquence.

$$f_{fb} = \frac{1}{2} \frac{dm}{db} \left(1 - \left(\frac{db}{dm} \cos(\alpha) \right)^2 \right) (f_{rot} - f_{ext}) \quad (II.9)$$

Avec :

f_{fb} : Fréquence de défaut de la bille [MAO].

II.5 Etude sur les technique (MCSA) (MVSA)

II.5.1 Technique de diagnostique (MVSA)

Toutes les machines vibrent et le spectre des fréquences de leurs vibrations a un profil particulier lorsqu'elles sont en état de "bon fonctionnement". Mais dès que les phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement apparaissent, le profil de ce spectre se modifie. Dans ce chapitre, nous chercherons à fournir un bon diagnostic pour incarner la technique d'analyse des vibration MVSA par un système de simulation de machine asynchrone (MATLAB) et l'utiliser pour détecter les défauts des roulements (bague intérieure, bague extérieure). Et utilisez ensuite l'analyse du spectre des vibration pour déterminer les erreurs le plus précisément possible. ouvre de réelles perspectives de diagnostic et devient par là un élément important de la maintenance conditionnelle. Une machine idéale ne vibrerait pas car toute l'énergie serait employée pour effectuer le travail. Des vibrations apparaissent, provoquées par des excitations provenant des organes en mouvement. Une partie de l'énergie est dissipée dans la structure sous forme de vibrations. La machine vieillissant, les pièces se déforment et de légers changements dans leurs propriétés dynamiques apparaissent. Les arbres se désalignent, les paliers et les roulements s'usent, les rotors se déséquilibrent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire donc une baisse de l'énergie efficace. L'intérêt des signaux de vibrations est de pouvoir accéder, par l'intermédiaire de traitements adaptés, à la

caractérisation des efforts dynamiques, et particulièrement ceux résultant d'excitations anormales [SW9].

II.5.1.1 L'Amplitude

On appelle amplitude d'un mouvement vibratoire la valeur de ses écarts par rapport à sa position d'équilibre. De cette définition générale, la complexité d'un signal vibratoire réel conduit à définir plusieurs grandeurs d'amplitude [DEB]:

L'Amplitude crête (AC) : Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.

L'Amplitude crête à crête (ACC) : Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné. Dans le cas d'une vibration sinusoïdale, elle est parfois appelée amplitude double. Il est noté que :

$$ACC = 2AC \quad (II.10)$$

L'Amplitude efficace (Aeff) ou RMS (Root Mean Square) : Elle indique l'énergie donnée par le mouvement vibratoire.

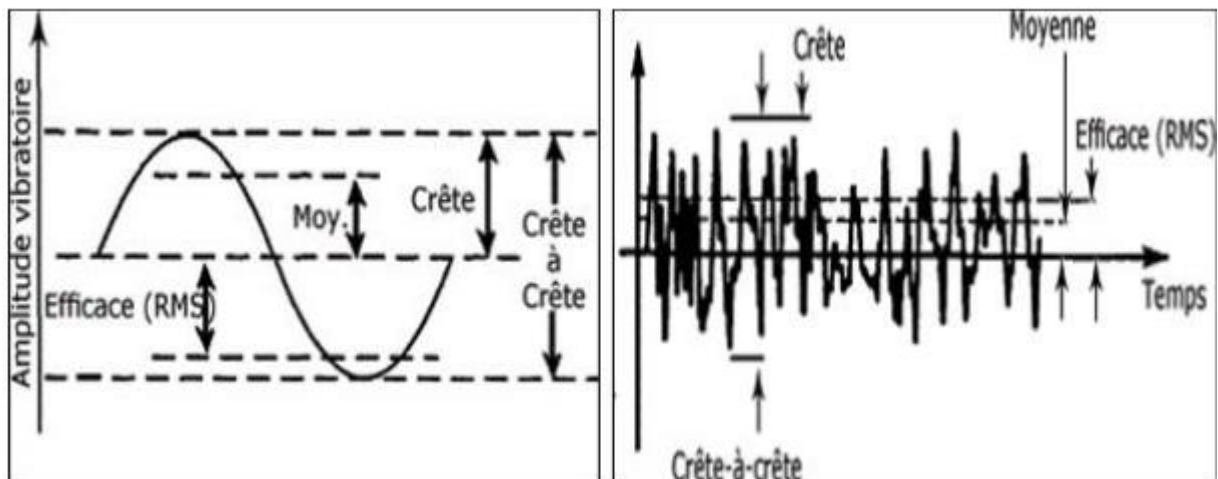


Figure (II.10): Caractéristiques d'une vibration Sinusoïdale ou quelconque.

II.5.1.2. La fréquence

La fréquence représente la cadence de répétition d'un phénomène ou le nombre de fois qu'il se reproduit en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisi est la seconde, la fréquence s'exprime en Hertz (Hz). Une vibration qui se produira 50 fois/seconde aura donc une fréquence de 50 Hz. La fréquence f est l'inverse de la période T qui est la durée d'un cycle [DEB].

II.5.2. Technique de diagnostic (MCSA)

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

II.5.2.1 Analyse spectrale

II.5.2.1.1 principe

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones à cage, la dégradation des roulements, les excentricités et les court-circuits dans le bobinage. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquence directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation [KHA11] [HAM18].

La surveillance par analyse spectrale de la MAS consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut. et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont les grandeurs mécanique (vibration, couple électromagnétique, vitesses) [BAC02] [HAM18].

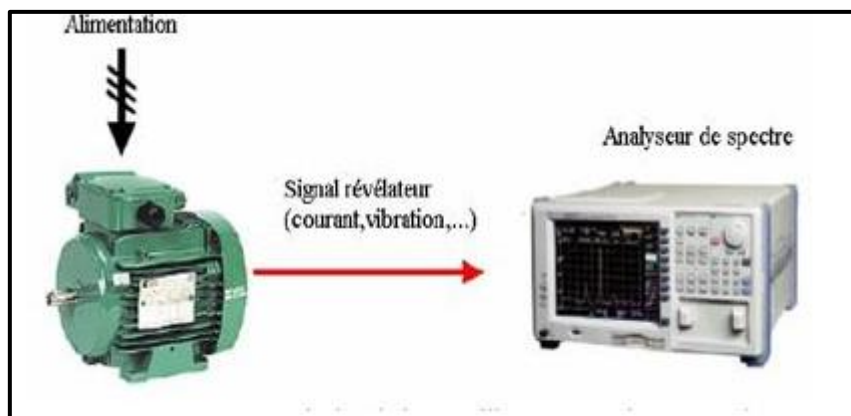


Figure (II.11): Principe de la surveillance par analyse spectral [KHA11].

II 5.2.2 Spectre d'un signal

II 5.2.2.1 Définition d'un signal

Le signal correspond à la mesure d'une grandeur physique. Mesures de grandeur physique : signal sismique, mesure du pouls, déplacement, voltage, intensité, etc... La plupart des grandeurs physiques sont aujourd'hui converties en signaux électriques puis codées en signal numérique binaires. Il existe très peu de mesures totalement analogiques [HAM18].

II.5.2.2.2 Définition de spectre d'un signal

C'est la représentation en fonction de la fréquence des amplitudes des différentes composantes présentes dans le signal [HAM18].

II.6.CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les types de roulements, ainsi que leurs composants, y compris la bague intérieure, bague extérieure, cage et billes. Le choix d'un tel roulement dépend des conditions d'utilisation, des charges appliquées, et d'autres conditions qui doivent assurer le bon fonctionnement de la machine tournante. Comme nous avons indiqué aux techniques qui vont exploiter dans le troisième chapitre.

CHAPITRE III

ANALYSE DES DEFAUTS DU ROULEMENT EN UTILISANT : MCSA et MVSA

III.1.Introduction :

Plusieurs techniques de diagnostic ont été développées dans le domaine industriel. La plupart de ces techniques reposent sur la comparaison des informations et des grandeurs d'un état de santé avec les mêmes résultats en présence d'un défaut au niveau de la MAS.

Dans ce chapitre, nous chercherons à fournir un bon diagnostic pour incarner la technique d'analyse des courants MCSA et analyses vibratoires MVSA afin de détecter les défauts des roulements (bague intérieure, bague extérieure) dans les MAS. Ensuite l'analyse du spectre des courants et l'analyse du spectre des vibrations a l'objectif d'avoir une bonne information sur l'état de la MAS.

III.2.Rappel sur les deux méthodes d'analyse MCSA ET MVSA

III.2.1La méthode MCSA

La méthode MCSA est une abréviation des mots Motor Curent Signal Analysais, qui a l'abréviation française ASCS, qui signifie : Analyse des signatures à courant constant ou spectroscopie à courant constant car il n'est pas possible de faire la différence entre l'état sain du moteur et dans cas de faute

' III.2.2La méthode MVSA

l'analyse vibratoire des machines tournantes est aujourd'hui très utilisée par les industriels, pour diagnostiquer des défauts. L'identification du problème permet de mettre en place des actions curatives comme un réglage ou le remplacement d'une pièce défectueuse avant la panne de la machine. L'analyse des signatures de vibration du moteur électrique (ASVM) ou sous l'abréviation Anglaise MVSA (Motor Vibration Signature Analysais) est l'un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement

III.3. Banc d'essai

Le banc de tests est constitué d'un moteur asynchrone triphasé (à tester) accouplé à un frein, jouant le rôle de charge variable. Divers défauts de ligne sont reproduits (ouverture de phase(s), déséquilibre de la tension du réseau). D'autres défauts sont, quant à eux, reproduits directement dans le moteur asynchrone (courts-circuits des enroulements, défaut d'isolation, barres rotoriques brisées). Différentes grandeurs physiques sont mesurées à l'aide de capteurs en courant, tension, température, vitesse et couple. Elles sont conditionnées et ensuite enregistrées à l'aide d'un système d'acquisition. Ce banc permet de valider le comportement du spectre fréquentiel en fonction des défauts présents dans le moteur. D'après une carte d'acquisition

accordée avec un PC, nous pouvons exploiter les résultats par le logiciel Matlab/Simulink. Les constituants principaux du banc d'essai sont :

- Une carte en temps réel DSPACE DS1104.
- Le moteur utilisé dans ces essais est de type triphasé à cage d'écureuil, d'une puissance nominale de 3 kW, de fréquence 50 Hz et de couplage triangle, $p=2$.
- Une charge pour le freinage.

La figure (III.1) illustre une photo de ce banc expérimental.



Figure (III.1) : Photo du banc d'essai dédié au diagnostic.

III.4. Résultats expérimentaux dédiés au défaut de la bague intérieure du roulement et extérieur par la méthode de MCSA

III.4.1. Fonctionnement en charge (BE, $C_e = 20$ Nm)

Lorsqu'une machine passe vers un nouveau mode de fonctionnement, la détection de l'évolution vers ce mode permet d'anticiper le calcul des valeurs qui e changent à cause du fonctionnement en charge de la machine.

De la même manière, et afin de vérifier les fréquences causées par le défaut de la BE on fait le calcul suivant :

$$f_{car_be} = |V \times f_s \pm k \times f_{be}| \quad (III.1)$$

$$f_{be} = 0.4 \times Nb \times f_r \quad (III.2)$$

$$f_r = \frac{(1 - g) \times f_s}{p} \quad (III.3)$$

$$g = 0.056 \text{ et } p = 2 \Rightarrow f_r = 23.583$$

où

$$f_{be} = 0.4 \times Nb \times f_r = 0.4 \times 9 \times 23.583 = 84.8988 \text{ Hz}$$

$$f_{car_be} = |V \times f_s \pm k \times f_{be}| = |V \times 50 \pm k \times 84.8988|$$

$V = 1, 3, 5, 7, \dots$

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

Le tableau (III.1) représente quelques valeurs des fréquences caractéristiques calculées en se basant sur la formule (III.1).

Tableau (III.1) : Fréquences caractéristiques du défaut de roulement de la bague extérieure (fonctionnement en charge).

fcar_be	Fréquence calculée (Hz)	Fréquence trouvée (Hz)	Amplitude (dB)
$ 3 \times f_s - 2 \times f_{be} $	19.7976	17.6	-63.59
$ 2 \times f_s - 2 \times f_{be} $	69.79	69.3	-70.72
$ 5 \times f_s - 2 \times f_{be} $	84.20	83.9	-95.05
$ 4 \times f_s - 1 \times f_{be} $	115.1012	117.6	-85.46
$ 1 \times f_s - 2 \times f_{be} $	119.79	121.5	-61.64
$ 1 \times f_s + 1 \times f_{be} $	134.89	136	-72.29

À partir de ce tableau, on peut dire que la bande fréquentielle à analyser apporte des informations sur l'existence du défaut de la bague externe.

La figure (III.2) montre les fréquences caractéristiques du défaut de la bague extérieure dans la bande fréquentielle de 0 – 100 Hz sous un fonctionnement en charge.

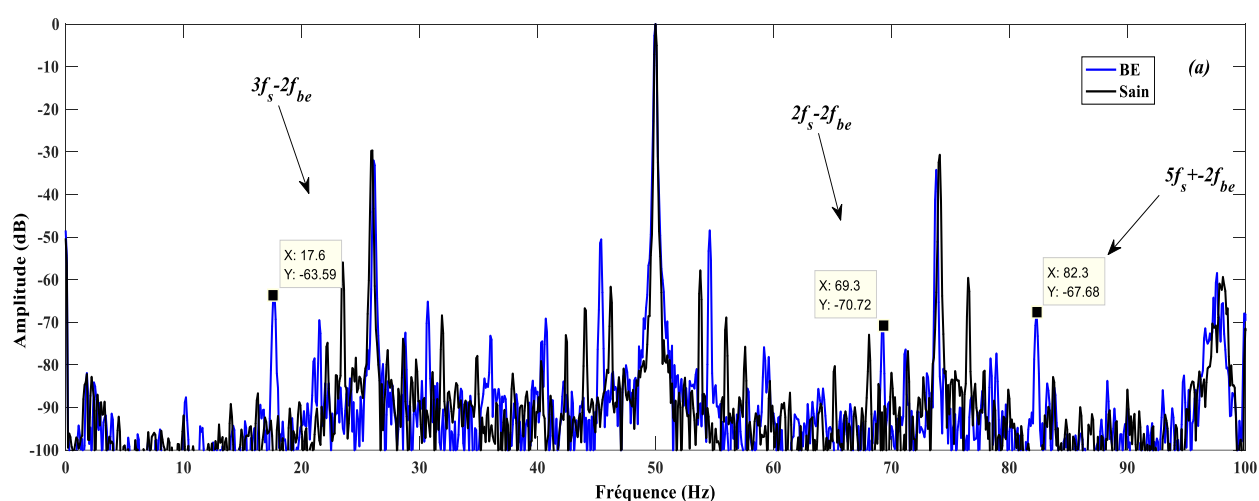


Figure (III.2) : Spectre du courant statorique (BE, en charge) ; 0-100Hz.

Le figures (III.3) représentent le fréquence additionnelle dans le spectre du courant statorique.

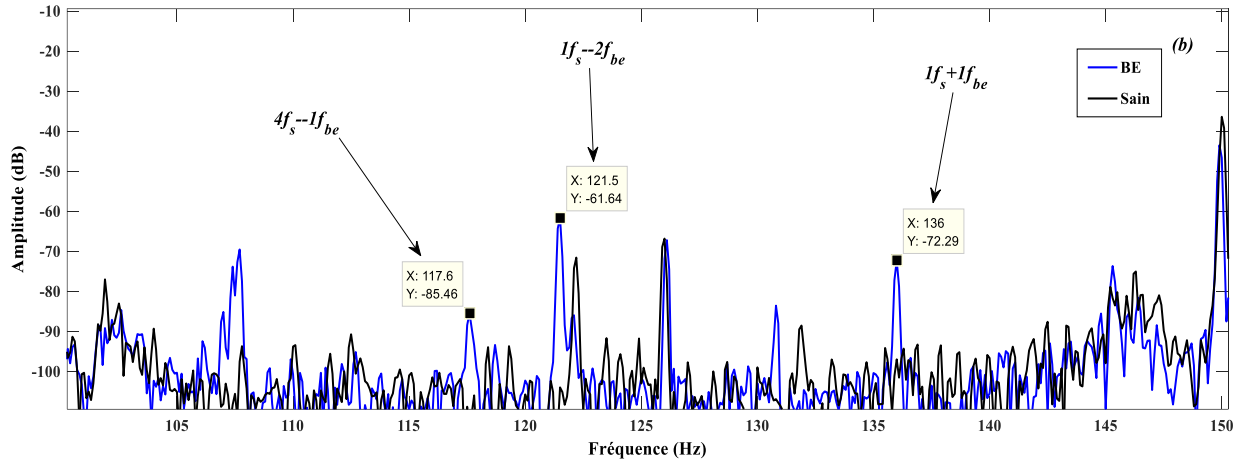


Figure (III.3) : Spectre du courant statorique (BE, en charge) ; 100-150Hz.

On remarque sur les figures précédentes, sur les spectres du courant constant en présence d'une boucle externe en cas de défaut, l'apparition de raies harmoniques aux fréquences caractéristiques des défauts de la boucle externe. De plus, notez que toutes les combinaisons possibles de fréquences caractéristiques sont présentes. De ce fait, le contenu spectral du courant stator pour le fonctionnement en charge se décale par rapport aux défauts de roulement. Il convient également de noter que les défaillances de la boucle externe peuvent être détectées en analysant le contenu spectral du courant statorique.

III.4.2. Fonctionnement en charge (BI, Ce = 20 Nm) statoriques

Le glissement joue un rôle important pour les calculs des harmoniques, il dépend, systématiquement, par la variation de la charge. La figure (III-1) représente le spectre du courant sous un fonctionnement en charge, dont le glissement est égal à $g=0.048$. Elle montre qu'autour de l'harmonique fondamental, existe d'autres harmoniques particuliers du spectre pouvant confirmer qu'il y a un défaut de roulement de la BI. Les valeurs calculées de ces harmoniques sont :

$$fr = \frac{(1 - g) \times fs}{p}$$

On a

$$fs - fr = 26.2 \Rightarrow fr = 23.8 \text{ Hz}$$

Donc :

$$fcract_{bi} = |Vfs \pm 0.6 \times k \times Nb \times fr|$$

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

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

Une étude récapitulative de quelques valeurs de vérifications sont présentées dans le tableau suivant:

Tableau (III.2) : Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague interne ($s=0.048$).

Formule $f_{cra_{bi}} = Vfs \pm kfb_i $	Valeurs théoriques [Hz]	Valeurs pratiques [Hz]	Amplitude [dB]
$ fs - 2fb_i $	207.04	205.4	-85.42
$ fs - 7fb_i $	221.48	217.6	-63.71
$ 11fs - 2fb_i $	292.96	293.8	-78.1
$ fs - 3fb_i $	335.56	336.1	-78.76
$ fs + 3fb_i $	435.56	431.4	-95.21
$ fs - 4fb_i $	464.08	464.5	-94.44
$ 7fs + 1fb_i $	478.52	473.8	-88.72
$ 2fs + 3fb_i $	485.56	488.9	-95.83

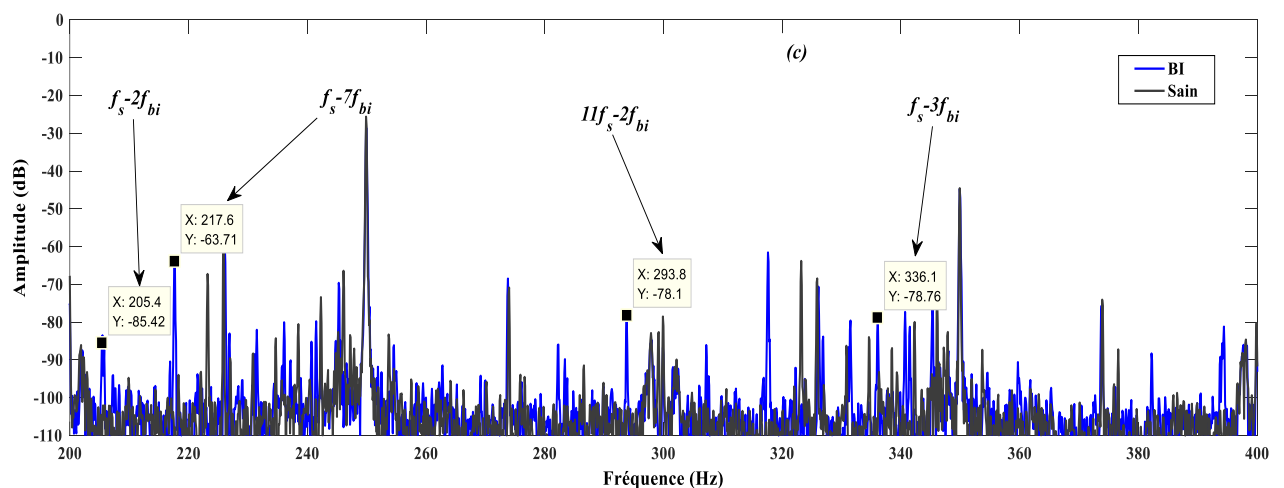


Figure (III.4) : Spectre du courant statorique (BI, en charge) ; 200-400Hz.

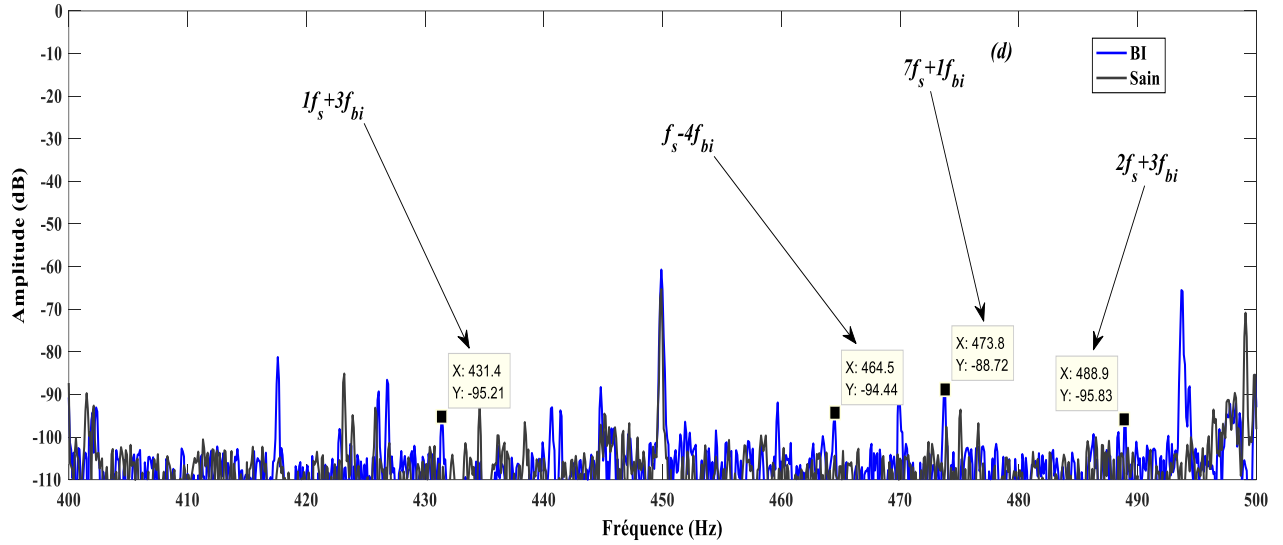


Figure (III.5) : Spectre du courant statorique (BI, en charge) ; 400-500Hz.

Nous avons utilisé dans cette étude spécialisée la méthode d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA-FFT) pour détecter les défauts dans les bagues (externe et interne) du roulement de la machine asynchrone. Les résultats qui ont été obtenus sont suffisamment acceptables pour l'analyse des deux défauts (BE et BI). Les signatures, aussi, sont claires au long du spectre, et surtout, autour de la fréquence fondamentale.

III.5. Résultats expérimentaux dédiés au défaut de la bague intérieure du roulement et intérieur par la méthode de MVSA

III.5.1 Fonctionnement en charge (BE, Ce = 15 Nm)

La variation de la charge provoque, logiquement, une variation au niveau de la vitesse de rotation, donc au glissement 's'. On applique au MAS un couple de charge de 75% ; il rend le glissement à la valeur $s=0.032$ ($f_r=24.2$ Hz). . nous aurons dans ce cas: $f_{be}=0.4(9).f_r$

On a remarqué aussi, plusieurs raies d'harmoniques espacés autour des fréquences caractéristiques qui ont la formule suivante :

$$f_{FBL_{be}} = k \cdot f_{be} \pm k' f_r \quad (II.4)$$

k et k' sont égaux 1,2,3,...

Ces valeurs des fréquences ($f_{FBL_{be}}$) seront changées systématiquement pour un moteur qui fonctionne en charge.

la figure (III.6) montre bien ces deux points intéressants.

Le tableau (III-3) résume un ensemble d'harmoniques caractérisant le défaut de la BE..

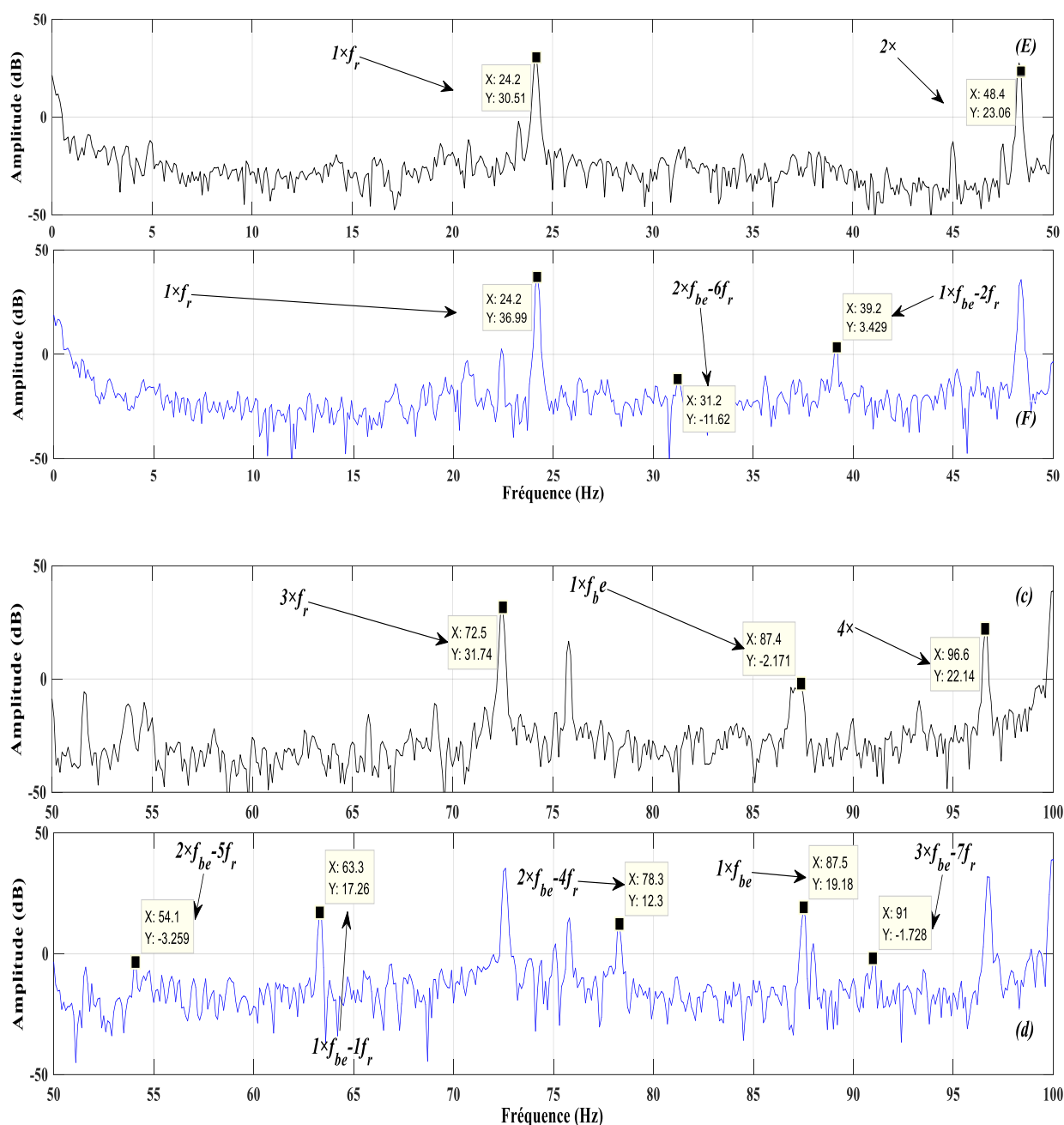


Figure (III.6) : Présentation des fréquences de bandes latérales alentours de $k \times f_{be}$ dans le spectre du signal vibratoire (BE, s=0.032).

Tableau (III.3) :Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BE, s=0.032).

Formules caractéristiques du défaut de la BE	Valeurs théoriques[Hz] (s=0.032)	Valeurs pratiques [Hz] (s=0.032)	Amplitude [dB]	
			Sain	BE
$2 \times f_{be} - 6fr$	29.04	31.2	/	-11.62
$1 \times f_{be} - 2fr$	38.72	39.2	/	-3.429
$2 \times f_{be} - 5fr$	53.24	54.1	/	-3.259
$1 \times f_{be} - 1fr$	62.92	63.3	/	17.26
$2 \times f_{be} - 4fr$	77.44	78.3	/	12.3
$1 \times f_{be}$	87.12	87.5	-2.17	19.18
$3 \times f_{be} - 7fr$	91.96	91	/	-1.728

D'après cette étude, et dans le cadre de diagnostic du défaut de la BE en se basant sur la MVSA ; on peut dire que les valeurs importantes des fréquences caractéristiques de ce défaut sont visibles. Donc, l'analyse en fréquence des signaux vibratoires permet d'identifier la provenance du défaut de roulement dans la bague externe.

III.5.2 Fonctionnement en charge (BI)

Nous présentons maintenant le spectre du signal de vibration sous un fonctionnement de la machine en charge (s=0.032). Le signal vibratoire est l'identité de la machine, lié à chaque instant aux conditions de fonctionnement. Pour faire un bon diagnostic, on peut passer à l'analyse spectrale pour confirmer les signatures du défaut. La figure (III.7) permet de présenter le FFT du signal de vibration pour différentes plages fréquentielles. On remarque que les valeurs des harmoniques caractérisant ce défaut apparaissent clairement ; ce qui démontre, bien, l'efficacité de l'analyse spectrale des signaux vibratoires. Les FL autour des kf_{bi} existent le long du spectre par :

$$kf_{bi} \pm k'fr ; \text{ avec } fr=24.2\text{Hz (pour s=0.032)}$$

$$f_{bi} = 0.6 \times Nb \times fr$$

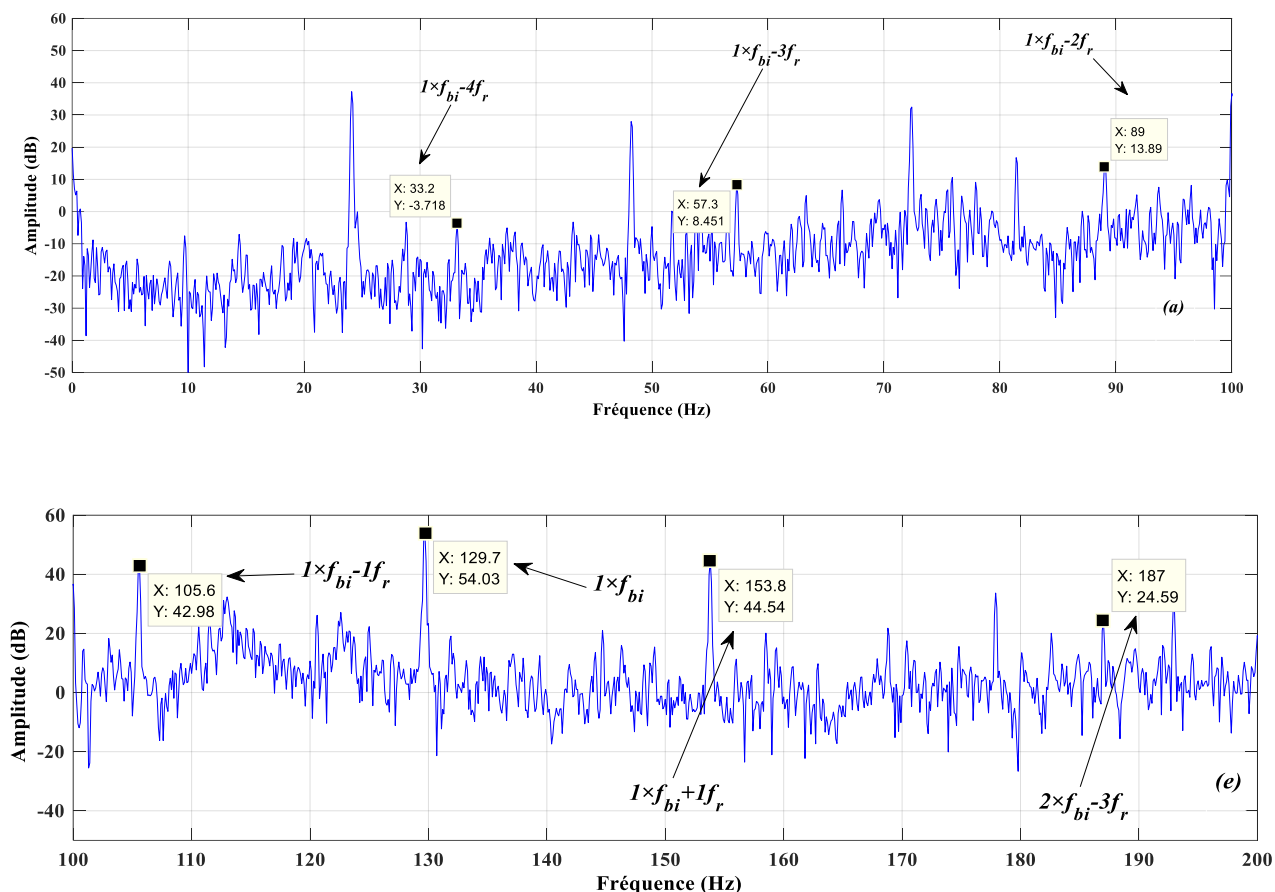


Figure (III.7) : Présentation des fréquences caractéristiques et latérales pour différentes pages des fréquences dans le spectre d'un signal vibratoire (BI, s=0.032).

Dans le tableau (III.4), on présente quelques calculs théoriques et pratiques pour certaines valeurs des harmoniques du défaut de la bague interne.

Tableau (III.4):Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BI, s=0.032).

Formules caractéristiques du défaut de la BI	Valeurs théoriques [Hz] (s=0.032)	Valeurs pratiques [Hz] (s=0.032)	Amplitude [dB]
			BI
$1 \times f_{be}$	130.68	129.7	54.03
$1 \times f_{be} - 4f_r$	33.88	33.2	-3.718
$1 \times f_{be} - 3f_r$	58.08	57.3	8.451
$1 \times f_{be} - 2f_r$	88.28	89	13.89
$1 \times f_{be} - 1f_r$	106.48	105.6	42.98

$1 \times f_{be} + 1f_r$	154.88	153.8	44.54
$2 \times f_{be} - 3f_r$	188.76	187	24.59

Nous avons étudié le cas d'un roulement à billes, pour de conditions de fonctionnement en charge), c'est à dire pour différentes valeurs de vitesses de rotation. Le défaut dans la bague extérieure a donné de bons indices dans le spectre des signaux vibratoires. Les mêmes résultats positifs ont été obtenus pour un défaut dans la bague intérieure du roulement. Ce qui explique l'efficacité de la méthode de MVSA pour le diagnostic du défaut de roulement

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné la possibilité de détecter des défauts de roulement dans une machine asynchrone en analysant des courants statoriques et le signal vibratoire. D'après cette analyse, on conclut que la technique d'analyse du spectre de courant statorique est un outil approprié permettant de faire la distinction entre l'état d'un moteur sain et d'un autre moteur défectueux. Si un défaut survient, la nature des défauts peut être déterminée par la localisation des harmoniques caractéristiques du défaut. Les pics d'harmoniques sont les mieux adaptées pour être utilisées comme moyen de détection les défauts dans le roulement lors de la comparaison de deux états de la machine.

Quant aux deux méthodes d'analyse, MCSA et MVSA, elles ont toutes deux d'excellents résultats pour détecter les défauts. Mais la MVSA a des avantages où les fréquences additionnelles sont claires dans le spectre du signal vibratoire par rapport au spectre du courant statoriques.



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La machine asynchrone occupe aujourd'hui une place importante dans le monde de l'industrie grâce à son intérêt et la simplicité de sa structure du fait de ses nombreuses utilisations dans différentes applications, les machines asynchrones nécessitent une détection et rapide des défauts.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés.

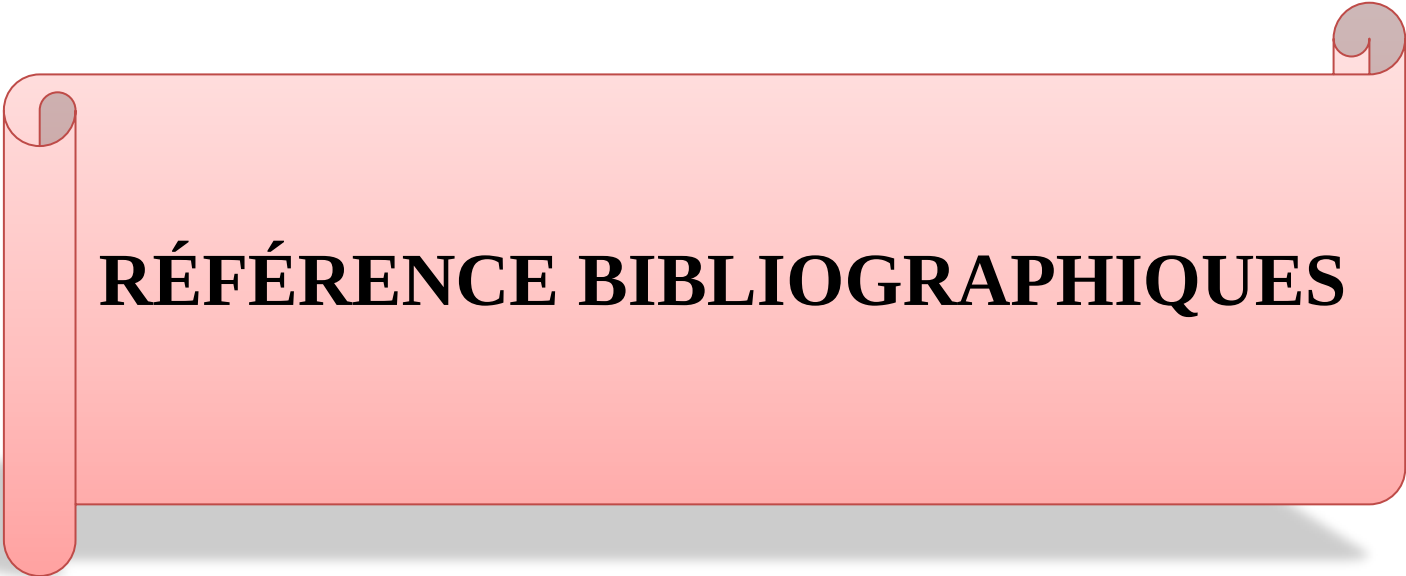
Au début de ce travail, nous avons localisé notre étude sur les moteurs à cage pour deux raisons : Le premier est parce que les moteurs asynchrones à cage sont les plus utilisés, tandis que la deuxième raison réside dans le fait que d'un point de vue structure multi enroulement, les moteurs à rotors bobinés constituent un cas particulier des moteurs à cage. Le défaut de roulement a été le centre de notre intérêt dans le présent travail par la technique de l'analyse spectrale du courant statorique et la technique de l'analyse spectrale du vibration.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un aperçu complet dans lequel nous en avons appris davantage sur les machines asynchrones en termes de leur structure, des principales pièces qu'elles contiennent et des éventuels défauts qui peuvent les affecter. Nous avons également consacré une partie aux techniques de diagnostic les plus importantes connues dans le monde de l'industrie.

Nous avons présenté aussi des notions générales concernant les roulements ainsi que leurs modes de dégradation. De nombreux facteurs ont été mis en évidence, dont l'action conduit à une diminution de la durée de vie des organes mécaniques des roulements.

Pour atteindre notre objectif, Nous avons également étudié certaines propriétés cinétiques correspondant au comportement vibratoire dû aux roulements. Le défaut de la bague extérieure (BE) et de la bague intérieure (BI) du roulement peut être analysé par MCSA et MVSA. Ces deux techniques de diagnostic sont des méthodes très prometteuses, car leurs principaux avantages résident dans le matériel utilisé et leur facilité de mise en œuvre ainsi que dans la richesse des informations qu'elles apportent sur l'état du moteur. .Pour obtenir plus d'informations sur les défauts, Ce travail a l'objectif de comparer entre les deux méthodes afin d'avoir une décision finale sur la meilleur méthode. il a été nécessaire d'effectuer une analyse spectrale de ces courants par la méthode de la transformée de Fourier rapide (FFT).

On peut conclure que la MVSA donne des informations mieux que la MCSA pour détecter le défaut du roulement.



RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- [HAM18] HAMMI Sami, BENARABI Adel, "Contribution au diagnostic des défauts rotoriques dans les machines asynchrones à cage d'écureuil par la méthode de la (MCSA)", Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, Algérie, 2018.
- [BAB14] babaa fatima, Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone: "Application au diagnostic des défauts statoriques" , Doctorat , UNIVERSITE UNIVERSITE CONSTANTINE 1 Faculté des Sciences de la Technologie Département d'Electrotechnique, Algérie, 2014.
- [SAN17] SANOUN Djaffar MOUZAOUJ Jugurtha, "Calcul des performances électromagnétique de la machine asynchrone à cage" Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2017.
- [CHE12] CHERMAT Badreddine ,Diagnostic des défauts de MAS par les méthodes paramétriques de traitement du signal ,master, Université Mohamed Khider Biskra ,2012.
- [TAB16] TABOU Asmane, OUGHACHA Menad " évaluation des pertes fer dans une machine asynchrone à cage " mémoire de fin d'étude en master. UMMTO. Année 2016
- [MOH17] MOURAD Hellal, Salim RAMDANE, "Etude des Performances de la Machine Asynchrone sous Défauts", Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2017.
- [LEG21] Legma Mohsen Berrik Yahia, "c", Master, Université Mohamed Boudiaf – M'sila, Algérie, 2021.
- [DON85] P. O'Donnell, "Report of Large Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-21, Part 1, N°4, PP. 853-864, 1985.
- [HAL15] HALEM Noura ,Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis ,Doctorat en Sciences ,Université Mohamed Kheider -Biskra,2015
- [LAR05] LARIBI Souad, " Synthèse des Méthodes de Diagnostic Appliquées à la Détection des Défauts dans les Machines Asynchrones", Magister, Université d'Oran Mohamed

- BOUDIAF, Algérie, 2005
- [GUE11] GUETTAB Abdelkader, "Effet de l'alimentation sur la détection des défauts dans une machine asynchrone à cage basée sur l'analyse de signal du courant", Mémoire de magister En G.Elec Université Chlef, 2011.
- [SAD07] M. Saddek, H. Djaafar « Diagnostic de Défauts de la Machine Asynchrone à Cage D'écureuil Par la Méthode de Reconnaissance des Forme » PFE ENP Alger, 2007
- [RAZ02] Hubert Razik, "Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art", Green-UHP. Faculté des Sciences. Revue 3EI n°29- Juin 2002 page 4852.
- [BON92] A. H. Bonnett and G.C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 28, no. 4, July/August 1992, pp. 921-937.
- [RAZ03] Hubert Razik et Gaëtan Didier, "Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone", Notes de cours, I.U.F.M. de Lorraine, Maxeville, 7 janvier 2003.
- [MHD16] Mohammed Obaid Mustafa, "Detecting broken rotor bars in induction motors with model-based support vector classifiers", Article, 2016.
- [MMO20] Dr. M. Mohammedi, "Diagnostic des défaillances des systèmes de commande", 2020.
- [HON13] Hong-yu Zhu, "Practical Aspects of Broken Rotor Bars Detection in PWM Voltage-Source Inverter-Fed Squirrel-Cage Induction Motors", Article ID 128368, 2013
- [GAE04] Gaëtan DIDIER, "Modélisation et Diagnostic De La Machine Asynchrone En Présence De Défaillances", Doctorat, L'Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2004.
- [BAB14] Baba Fatima, « Contribution à la Modélisation et à La Commande de la Machine Asynchrone : Application au diagnostic des défauts statoriques », thèse de doctorat, Université Constantine 1, Algérie, Juin 2014.
- [BAC22] BACHI Ramzi, KRIEME Ahmed, OUADA Ali, Détection des défauts du roulement dans les moteurs asynchrones en utilisant les vecteurs de Park, master, L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2022.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- [KOV09] Makara KHOV, "Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents : Détection des courts-circuits par suivi paramétrique", Doctorat de L'université de Toulouse, France, 2009
- [KAD16] KADRINE Abderrahmane, "Utilisation du Courant Statorique pour la Détection Des Défauts dans les Machines Electriques" , Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, Algérie, 2016
- [BEN16] BENNEDJAI SOUMAYA «Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction», Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de : Doctorat universite badji mokhtar annaba, Année : 2015/2016
- [KHA17] KHATRAOUI ABDERREZAK, ZAID MANSOUR «Diagnostic Des Machines Asynchrones Triphasées», Thèse de MASTER ACADEMIQUE , UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar D'El-oued soutenu en Mai 2017.
- [LAB19] labiod laid Boutadjine fares, Diagnostic des defauts rotoriques des machines asynchrones (Resultats exprimentaux et de simulations) Master ,Universite Echahid hama lakhder d el oued Algeria, 2019
- [KER17] Kerroum Badre eddine Etude et diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction Master Universite Badji mokhtar annaba Algerie 2017
- [KHO20] KHODJA Mohammed-El-Amine, "Suivi de la sévérité des défauts de roulements d'un moteur asynchrone alimenté par onduleur", Doctart, Université d'Oran Mohamed BOUDIAF, Algérie,2020.
- [KHA09] KHATIR Abdelfatah, "Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts", Magister, Universite Ferhat Abbas Setif,
- [MAR08] Martin Blödt, "Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring", Article, 2008
- [BEL17] BELAHAMMOU Abdelhak et BENINE Abderrezak,Diagnostic des défauts des roulements dans les machines asynchrones par la méthode de la MCSA,Mémoire de Fin d'Études,L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued,2017
- [SAH12] SAHRAOUI Saliha et BELKASMI Yasmina,Analyse du comportement

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- thermomécanique d'un roulement, master ,Université Yahia Farés de MEDEA ,2021
- [OMA11] Omar SID, "Diagnostic de défauts de la machine asyncho par les réseaux de neurones", Magister, Université Houari Boumediene, Algérie, 2011.
- [MRS12] M. Rigoni, N. Sadowski, "Detection and Analysis of Rotor Faults in Induction Motors by the Measurement of the Stray Magnetic Flux", Article
- [KNG19] Konstantinos N. Gyftakis, "Diagnosis of Static Eccentricity in 3-Phase Synchronous Machines using a Pseudo Zero-Sequence Current", School of Engineering, The University of Edinburgh, Edinburgh, 2019, Article
- [MAO] Soufiane MAOUCHE Ahmed Oussama BEKOUCHE ,Diagnostic des défauts des roulements par l'analyse d'enveloppe ,Université Mohamed Khider Biskra
- [DEB] DR. DEBBAH YOUNES ,Cours de Meca 06- MÉCANIQUE DE VIBRATION,Université des Frères Mentouri Constantine
- [KHA11] A. Khaled, "Modélisation d'un Moteur Asynchrones pour le suivi de la sévérité des défauts rotorique par l'approche de la fonction d'enroulement ", Mémoire de Magistère en électrotechnique, Université, d'Oran Mohamed Boudiaf, 2011
- [BAC02] S. Bachir, "Contribution au diagnostic de la MAS par estimation paramétrique " , Thèse doctorat, 2002, Université de Poitiers France.
- [CHI01] Amar Chiter «Détection et diagnostic des défauts de roulement : contribution à la maintenance des machines tournantes». Thèse de Magistère en optique et mécanique de précision UFAS 2001
- [MOK19] MOKHTARI Yaakoub, Diagnostic des défauts mécaniques du moteur asynchrone par analyse vibratoire ,master, Université Mohamed Khider de Biskra,2019.
- [SW1] https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-asynchrone/#Principe_de_fonctionnement
- [SW2] <https://gootrio.com/moteur-asynchrone-principe-de-fonctionnement-et-technologie/>
- [SW3] <https://tutormate.in/cbse-class-10-physics/force-on-current-carrying-conductor->

[andflemings-rule/](#)

- [SW4] <https://www.industrie-techno.com/>
- [SW5] <https://www.easa.com/resources/failures-in-three-phase-stator-windings>
- [SW6] <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/5/1319/htm>
- [SW7] <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-asynchrone/>
- [SW8] <https://www.misterindustry.com/blog/fonctionnement-roulement-a-billes.html>
- [SW9] http://stimonge.fr/maintenance/maintenance_a1z2e3/TP_maintenance1/Dossiers%20ressources/Analyse%20vibratoire.pdf