

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

BELAHAMMOU Abdelhak et BENINE Abderrezak

Thème

**Diagnostic des défauts des roulements dans les
machines asynchrones par la méthode
de la MCSA**

Soutenu le 28/05/2017. Devant le jury composé de :

Dr. Halem Noura

Maitre de conférences

Président

M. BESSOUS Nouredine

Maitre assistant

Rapporteur

Dr. ALLAL Abderrahim

Maitre de conférences

Examineur

Année Universitaire 2016/2017

Remerciements

Avant tout, nous remercions le bon DIEU tout puissant qui nous donne à la fois, du courage et de la patience afin d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur Mr. BESSOUS Noureddine d'avoir accepté de nous encadrer et pour les efforts qu'il a déployé, pour nous aider, conseiller, encourager et corriger avec une grande gentillesse durant toute cette période.

Nous remercions les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.

Nous n'oublions pas de remercier tous les enseignants qui ont contribué durant notre formation.

Et enfin nous remercions l'ensemble des collègues de notre promotion, et surtout mon binôme qui m'a aidé à réaliser ce travail remarquable.

Abdelhak et Abderrezak

Sommaire

Sommaire

Sommaire

Liste des symboles et abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I

Etat de l'art de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

I.1.	Introduction	3
I.2.	Généralités sur la Machine Asynchrone (MAS)	3
I.2.1.	Constitution de la machine asynchrone	3
I.2.1.1.	Stator	3
I.2.1.2.	Rotor	4
I.2.2.	Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone	5
I.3.	Principaux défauts dans la machine asynchrone	6
I.3.1.	Défauts statorique	6
I.3.1.1.	Défauts d'isolant dans un enroulement	7
I.3.1.2.	Court-circuit entre spires	7
I.3.1.3.	Court-circuit entre phases	8
I.3.1.4.	Court-circuit phase/bâti	8
I.3.2.	Défauts rotoriques	9
I.3.2.1.	Cassure de barre	9
I.3.2.2.	Ruptures d'anneaux	10
I.3.2.3.	Dissymétrie du rotor (excentricité)	10
I.3.3.	Défauts de roulement à billes	11
I.4.	Présentation des causes et des conséquences des différents défauts de MAS	13
I.4.1.	Causes des défauts	13

I.4.2.	Conséquences des défauts	13
I.5.	Aperçu sur les méthodes de diagnostic	13
I.5.1.	Détection des défauts par traitement du signal	14
I.5.2.	Diagnostic par analyse des flux	15
I.5.3.	Diagnostic par les analyses chimiques	15
I.5.4.	Diagnostic par analyse de la température	15
I.5.5.	Méthodes basées sur l'intelligence artificielle	16
I.5.6.	Diagnostic par identification paramétrique	16
I.5.7.	Diagnostic par analyse des courants statorique	16
I.6.	Conclusion	17

Chapitre II

Modèle et étude théorique sur le défaut de roulement dans les MAS

II.1.	Introduction	18
II.2.	Modèles applicables à la machine asynchrone	18
II.2.1.	Modèle triphasé- triphasé	18
II.2.2.	Modèle de Park	19
II.2.3.	Modèle multi-enroulements	20
II.2.3.1.	Modélisation du stator	20
II.2.3.2.	Modélisation du rotor	22
II.2.3.3.	Equation mécanique	25
II.3.	Généralités sur les roulements	26
II.3.1.	Constitutions des roulements	26
II.3.2.	Les majeurs types de roulements et leurs utilisations	26
II.3.3.	Choix du roulement	28
II.3.4.	Les défauts de roulements : causes et solutions	28
II.3.4.1.	Usure	28
II.3.4.2.	Dentelure	29
II.3.4.3.	Bavure	30
II.3.4.4.	Ecaillage	30
II.3.4.5.	Corrosion	30
II.3.4.6.	Cassure	31

II.3.4.7.	Choc électrique	31
II.3.5.	les caractéristiques des roulements	32
II.3.5.1.	Angle de contact α	32
II.3.5.2.	Paramètre de chargement ε	32
II.3.5.3.	Efforts axial et radial appliqués	34
II.3.5.4.	Charge maximale	34
II.3.5.5.	Expression de la charge Q_i	35
II.3.5.6.	Effort de choc dynamique	35
II.3.6.	Mise en place d'un modèle général du roulement	37
II.3.7.	Fréquences de défauts associés aux roulements	38
II.3.8.	Nature d'une vibration	39
II.3.8.1.	Capteurs de vibration	40
	a) Types et caractéristiques des capteurs	40
	b) Prosimètres	40
	a) Vélocimétries	41
	a) Accéléromètres	41
II.3.8.2.	Stratégies de surveillance vibratoire	42
	a) Mesure vibratoire en niveau global	42
	b) Analyse temporelle	42
	a) Analyse spectrale	43
II.3.	Conclusion	43

Chapitre III

Analyse du défaut de roulement par la méthode de MCSA

III.1.	Introduction	44
III.2.	Banc d'essai	44
III.3.	Analyse du défaut de roulement	45
III.3.1.	Analyse du défaut de roulement de la bague extérieure	45
III.3.1.1.	Fonctionnement à vide (BE, $C_e = 0$ nm)	45
III.3.1.2.	Fonctionnement en charge (BE, $C_e = 20$ nm)	48
III.3.2.	Analyse du défaut de roulement de la bague intérieure	51
III.3.2. 1.	Fonctionnement à vide (BI, $C_e = 0$ nm)	51

III.3.2.2.	Fonctionnement en charge (BI, Ce = 20 nm)	54
III.4.	Conclusion	56
	Conclusion générale	57
	Bibliographique.....	58

Liste des symboles et abréviations

Chapitre I

f_s	Fréquence statorique (d'alimentation)
p	Nombre de paires de pôle
n_s	Vitesse du champ tournant
n	Vitesse du champ rotor
s, g	Glissement d'une machine asynchrone
TFR	Transformée de Fourier rapide
FFT	Fast Fourier Transform
FDI	Fault Detection and Isolation
Fmm	Force magnétomotrice

Chapitre II

a, b, c	Trois phases du stator
ω_r	Vitesse de rotation du rotor
ω_s	Pulsation statorique
n_b	Nombre de barres rotoriques
ψ_m	Angle maximal de chargement

Chapitre III

f_{be}	Défaut bague extérieure
p	Le nombre de paires de pôle
N_b	Nombre des billes
γ	Ordre d'harmonique des temps
f_r	Fréquence de rotation
f_{car_be}	Fréquence caractéristique de la bague extérieure
f_{car_bi}	Fréquence caractéristique de la bague intérieure

Liste des figures

Chapitre I

Figure (I.1) :	Photo d'une machine asynchrone avec le Stator et le Rotor qui la constituent	3
Figure (I.2) :	Photos du stator d'une machine asynchrone	4
Figure (I.3) :	Photo du rotor et vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit	5
Figure (I.4) :	Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone	5
Figure (I.5) :	Représentation des différents défauts statoriques concerne le court circuit	9
Figure (I.6) :	Présence cassure de barre dans le rotor de MAS	9
Figure (I.7) :	Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit	10
Figure (I.8) :	Excentricité statique(a) ; dynamique(b) et mixte (c)	11
Figure (I.9) :	Architecture d'un roulement rigide à billes	12
Figure (I.10) :	Méthodes du diagnostic des défauts	13
Figure (I.11) :	Les points de mesures	14
Figure (I.12) :	schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique	17

Chapitre II

Figure (II.1) :	Représentation du modèle triphasé- triphasé	19
Figure (II.2) :	Modèle de Park de la MAS triphasé	20
Figure (II.3) :	Trois phases statoriques sous formes des circuits électriques	20
Figure (II.4) :	Structure multi-enroulements du rotor	22
Figure (II.5) :	Circuit équivalent du rotor à cage d'écureuil	22
Figure (II.6) :	Géométrie du roulement à billes	26
Figure (II.7) :	Roulement à rotules sur billes (self aligning)	27
Figure (II.8) :	Variété de roulements	28
Figure (II.9) :	Défaut de roulement – usure	29
Figure (II.10) :	Défaut de roulement – dentelure	29

Figure (II.11) :	Défaut de roulement – bavure	30
Figure (II.12) :	Défaut de roulement – écaillage	30
Figure (II.13) :	Défaut de roulement – corrosion	31
Figure (II.14) :	Défaut de roulement – cassure	31
Figure (II.15) :	Défaut de roulement – choc électrique	31
Figure (II.16) :	Chargement et paramétrage	32
Figure (II.17) :	Déplacement rigide de la bague intérieure BI	33
Figure (II.18) :	Synoptique de la distribution de charge	35
Figure (II.19) :	Effort Total lors du choc au point S, la somme de l'effort Statique et de l'effort Dynamique	36
Figure (II.20) :	Modèle du roulement suivant une ligne radiale	37
Figure (II.21) :	Nature d'une vibration	39
Figure (II.22) :	Prosimètres et leur driver	41
Figure (II.23) :	Prosimètre monte sur un palier	41
Figure (II.24) :	Schéma de principe d'une vélocimétrie	41
Figure (II.25) :	Schéma de principe d'un accéléromètre	42

Chapitre III

Figure (III.1) :	Photo du banc d'essai dédié au diagnostic	45
Figure (III.2) :	Spectre du courant statorique (BE, à vide) ; 0-100Hz	47
Figure (III.3) :	Spectre du courant statorique (BE, à vide) ; 100-300Hz	47
Figure (III.4) :	Spectre du courant statorique (BE, à vide) ; 300-500Hz	48
Figure (III.5) :	Spectre du courant statorique (BE, en charge) ; 0-100Hz	49
Figure (III.6) :	Spectre du courant statorique (BE, en charge) ; 100-300Hz	50
Figure (III.7) :	Spectre du courant statorique (BE, en charge) ; 300-500Hz	50
Figure (III.8) :	Spectre du courant statorique (BI, à vide) ; 0-100Hz	52
Figure (III.9) :	Spectre du courant statorique (BI, à vide) ; 100-300Hz	53
Figure (III.10) :	Spectre du courant statorique (BI, à vide) ; 300-500Hz	53
Figure (III.11) :	Spectre du courant statorique (BI, en charge) ; 0-100Hz	55
Figure (III.12) :	Spectre du courant statorique (BI, en charge) ; 100-300Hz	55
Figure (III.13) :	Spectre du courant statorique (BI, en charge) ; 300-500Hz	56

Liste des Tableaux

Chapitre II

Tableau (II.1) :	<i>Paramètre de chargement ε par rapport aux efforts axial, radial et l'angle de contact α</i>	33
------------------	---	----

Chapitre III

Tableau (III.1) :	<i>Fréquences caractéristiques du défaut de roulement de la bague extérieure (fonctionnement à vide).</i>	46
Tableau (III.2) :	<i>Fréquences caractéristiques du défaut de roulement de la bague extérieure (fonctionnement en charge).</i>	49
Tableau (III.3) :	<i>Fréquences caractéristiques du défaut de roulement de la bague intérieure dans le cas du fonctionnement à vide de la MAS.</i>	52
Tableau (III.4) :	<i>Fréquences caractéristiques du défaut de roulement de la bague intérieure dans le cas du fonctionnement en charge de la MAS.</i>	54

Introduction générale

Introduction générale

Les machines asynchrones, de par leur robustesse et leur rapport poids/puissance, sont largement utilisées en milieu industriel. En effet, la fiabilité et la sûreté de leur fonctionnement permettent en partie d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations. Le choix d'une approche liée à la connaissance et le diagnostic de défauts assez une étape primordiale. Cependant, les contraintes nouvelles et l'intégration de ces machines dans des systèmes de conversion d'énergie de plus en plus complexes rendent le diagnostic plus difficile.

Généralement, deux grandes familles de procédures sont utilisées dans le domaine du diagnostic en génie électrique [10]: les méthodes de diagnostic à base de modèles analytiques et les méthodes sans modèle.

Les méthodes à base de modèles analytiques reposent sur le suivi des paramètres et des grandeurs de la machine, au moyen d'algorithmes d'observation. Elles détectent les défaillances en comparant l'évolution de l'écart entre le modèle et le processus réel. Le principal avantage de ces méthodes réside dans l'intégration d'une connaissance a priori du système et donc un filtrage de l'information.

Les méthodes sans modèle sont basées sur l'extraction d'informations par le biais du traitement des signaux mesurés. Les signaux mesurables (les courants, les tensions, la vitesse, les vibrations, la température, les émissions sonores) peuvent fournir des informations significatives sur les défauts.

A partir de ces grandeurs caractéristiques du fonctionnement des machines électriques, la mise en œuvre de méthodes décisionnelles permet de concevoir des systèmes de surveillance ou des algorithmes performants au service du diagnostic.

Les performances de ces méthodes sont étroitement liées à la pertinence des indicateurs de défauts retenus et à la finesse d'analyse des mesures.

Les travaux présentés dans ce mémoire portent sur le diagnostic des défauts de roulement d'une machine asynchrone en utilisant la méthode d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA-FFT). Cette technique est connue sous l'abréviation Anglaise MCSA (Motor Current Signature Analysis).

La défaillance d'un roulement se manifeste par des ondulations de surface des billes, par des fissures dans les deux bagues « interne et externe » ou par la détérioration de la cage. La détection de ces défauts a été largement étudiée à l'aide de la technique d'analyse des courants statoriques s'est avérée être très intéressante, car elle permet de diagnostiquer bien les défauts électriques que mécaniques.

Dans ce contexte, le mémoire comporte trois chapitres qui sont organisés comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à un état de l'art de diagnostic des défauts dans la machine asynchrones, leurs origines ainsi que les fréquences caractérisent ces défauts, seront exposés. Des différentes techniques de diagnostic seront aussi présentées.

Le deuxième chapitre présentera quelques modèles utilisés à l'étude des machines asynchrones, on présentera, ici, des notions sur les modèles les plus couramment appliqués à la modélisation de la machine asynchrone et ensuite un résumé d'une théorie sur le roulement à bille que nous verrons l'utiliser comme un défaut à diagnostiquer.

Dans le troisième chapitre, on va analyser et discuter les résultats obtenus pour un défaut du roulement. Dans ce chapitre, on va comparer entre le fonctionnement du moteur sain et en charge, tout en analysant le fonctionnement sous un défaut de la bague extérieure et intérieure.

Enfin, nous allons finaliser notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

**Etat de l'art de diagnostic
des défauts dans la
machine asynchrone**

I.1. Introduction

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc.

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies [1].

I.2. Généralités sur la machine asynchrone (MAS)

I.2.1. Constitution de la machine asynchrone

La machine à induction comprend un stator et un rotor constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation qui doit être bobiné ou à cage d'écuréuil (Figure I.1) [1].

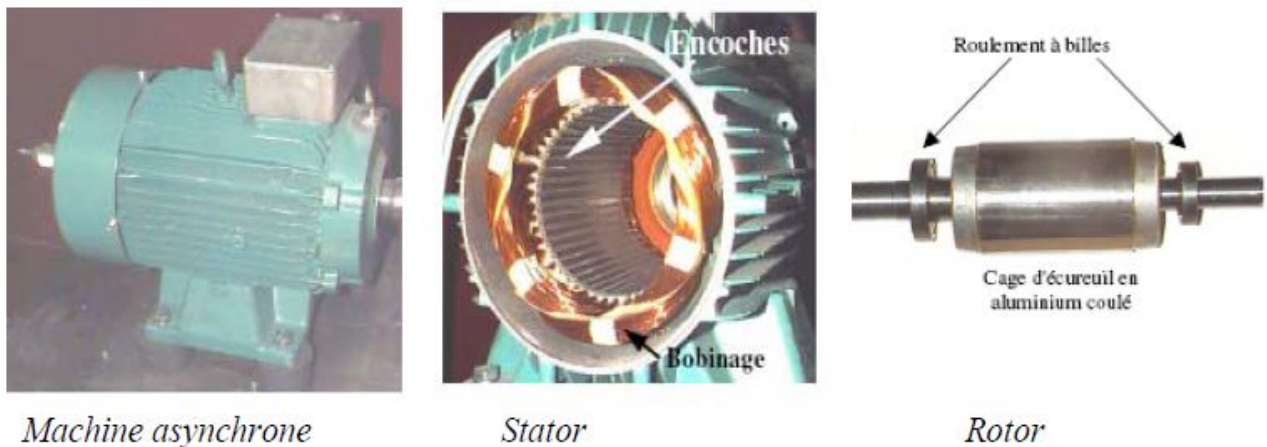


Figure (I.1): Photo d'une machine asynchrone avec le Stator et le Rotor qui la constituent [1]

I.2.1.1. Stator

Le circuit magnétique est un empilement de tôles d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude (figure I.2). Le bobinage statorique est constitué de deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Quant aux têtes de bobines elles permettent la fermeture des courants en organisant leur circulation,

l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique [1].

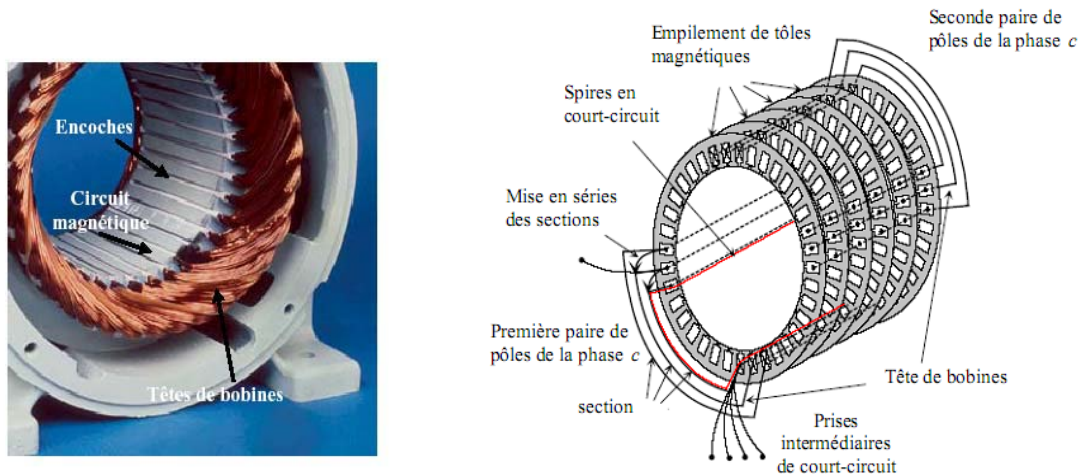


Figure (I.2) : Photos du stator d'une machine asynchrone [1]

I.2.1.2. Rotor

Le circuit magnétique du rotor est constitué d'un assemblage de tôles ferromagnétiques rainurées. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un noyau. On trouve deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil.

➤ Rotor Bobiné

Les enroulements rotoriques sont localisés dans les encoches situées à la périphérie du rotor. Ces enroulements sont bobinés de manière à obtenir un enroulement triphasé à « p » paires de pôle. Les bobinages rotoriques sont toujours couplés en étoile, et les trois bornes accessibles sont reliées à la carcasse du stator à l'aide d'un système constitué de trois bagues tournants et de trois balais fixes.

➤ Rotor à cage :

La grande majorité des moteurs sont à cages. Dans chaque encoche rotorique est placée une barre. Ces barres sont en cuivre pour les moteurs de forte puissance, et en alliage d'aluminium pour les machines de faible et moyenne puissance. Elles sont réunies à chaque extrémité du rotor par des anneaux réalisant le court-circuit. L'enroulement rotorique ainsi réalisé n'est pas accessible à partir du stator (Figure I.3) [1].

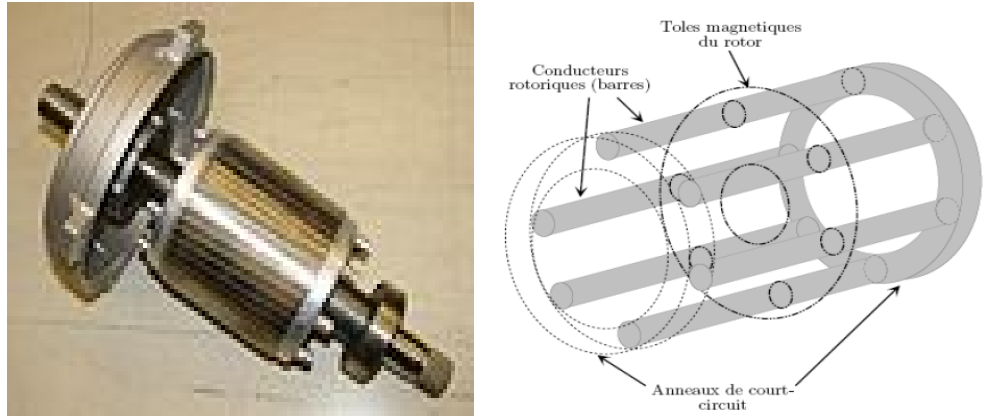


Figure (I.3) : Photo du rotor et vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit [1])

I.2.2. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose :

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).

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

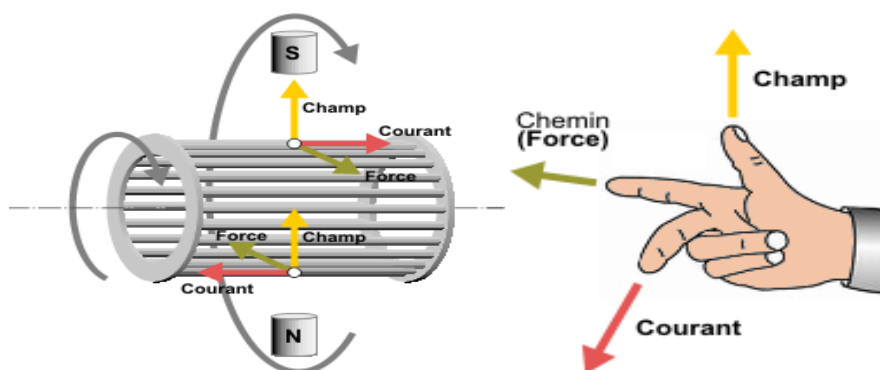


Figure (I.4): Simplifier le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone [12]

De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur : le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement

secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant:

$$n_1 = \frac{f_s}{p} \quad (\text{I.1})$$

f_s : présente la fréquence de courant de stator et p le nombre de paires de pôle.

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone (sans collecteur) n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_s) diffère de celle du rotor (n), c'est-à-dire, lorsque $n \neq n_s$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $n=n_s$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique [1].

Le rapport :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{I.2})$$

g : Est appelé glissement d'une machine asynchrone.

I.3. Les principaux défauts dans la machine asynchrone

Bien que les machines asynchrones à cage d'écureuil soient réputées robustes, elles peuvent parfois présenter différents types de défauts, ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique. Un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut, tout comme une utilisation non conforme de la machine.

I.3.1. Les défauts statorique

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème [2] :

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

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

- Défaut d'isolant.
- Court-circuit entre spires.
- Court-circuit entre phases.
- Court-circuit phase/bâti.
- Déséquilibre d'alimentation.

I.3.1.1. Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction.

Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes pour ce type de défaut sont [2]:

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- Vibrations mécaniques.
- Vieillessement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Fonctionnement dans un environnement sévère.

I.3.1.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2^{ème} court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [2].

I.3.1.3. Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [2].

I.3.1.4. Court-circuit phase / bâti

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

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [2].

On peut clarifier les différents défauts possibles de court circuit par la figure (I.5).

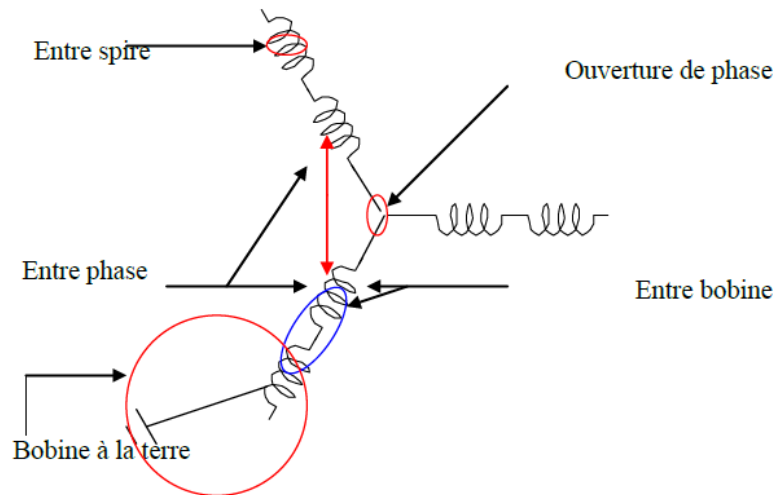


Figure (I.5) : Représentation des différents défauts statoriques concerne le court circuit [3]

I.3.2. Défauts rotoriques

I.3.2.1. Cassure de barre

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 [2].

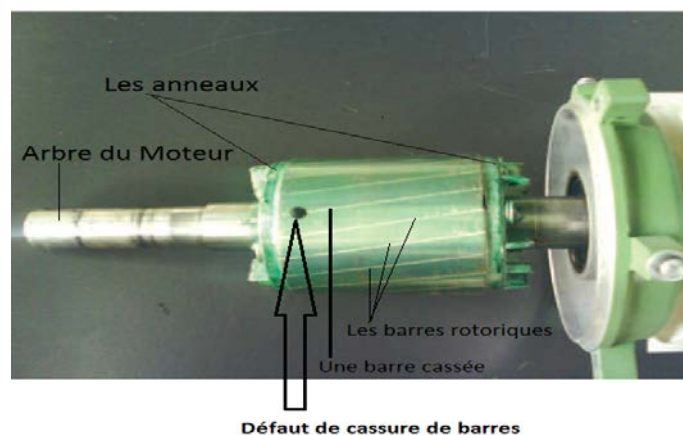


Figure (I.6): Présence cassure de barres dans le rotor de MAS [3]

I.3.2.2. Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux (figure I.7).

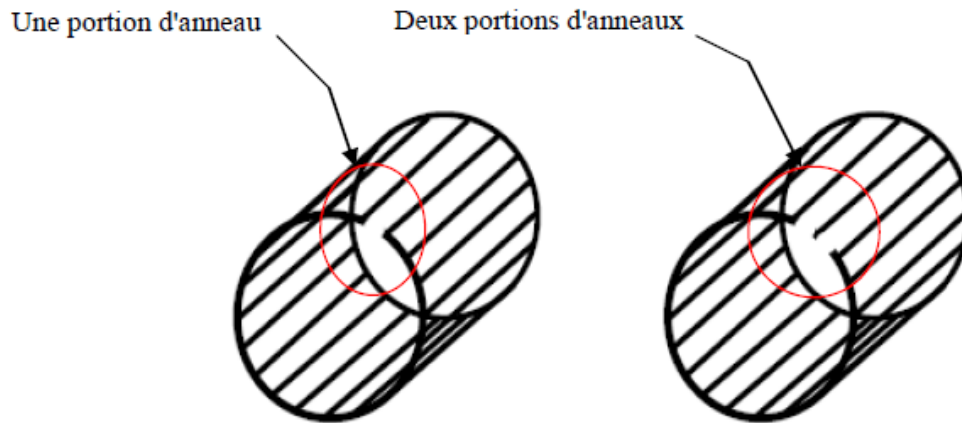


Figure (I.7) : Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit [3]

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 [3].

I.3.2.3. Dissymétrie du rotor (excentricité)

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor, (figure I.8). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage) [3].

Celui-ci provoque la variation de l'entrefer dans le moteur, une répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant. Quand l'excentricité devient grande, les forces

radiales résultantes causées par le stator avec la bande de frottement du rotor, ce qui conduit à des dommages du stator et du rotor [3].

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries d'ordre naturel. Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer; à savoir [3]:

- **Excentricité statique** : lorsque l'axe du stator coïncide avec l'axe de rotation et non avec l'axe du rotor.
- **Excentricité dynamique** : lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide pas avec l'axe de symétrie du stator.
- **Excentricité mixte** : lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide pas avec les axes de symétrie du rotor et du stator.

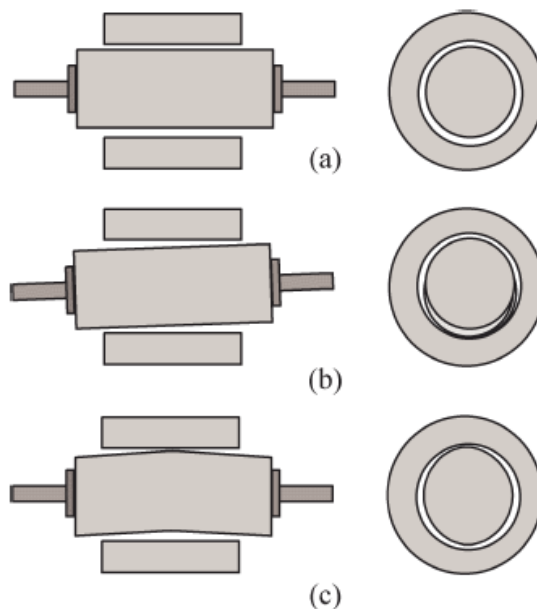


Figure (I.8) : Excentricité statique(a) ; dynamique(b) et mixte (c) [13]

I.3.3. Défauts de roulement à billes

Le roulement est un organe de base qui assure une liaison mobile entre deux éléments d'un mécanisme en rotation l'un par rapport à l'autre. Sa fonction est de permettre la rotation relative de ces éléments, sous charge, avec précision et avec un frottement minimal [4].

La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Environ 40 % à 50 % des défauts rencontrés dans les machines asynchrones sont liés aux roulements.

Le roulement est composé des éléments suivants [4]:

- Deux bagues concentriques en acier, appelés bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles "roulent" les corps roulants).

- Des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal.
- Une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine).

On distingue deux types de roulements : le roulement à billes, où le contact bille-chemin est théoriquement ponctuel et le roulement à rouleaux où le contact rouleau-chemin est théoriquement linéaire. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance prix [4].

La figure (1.9) montre la construction typique d'un roulement à billes. Les billes sont liées par une cage qui assure une distance uniforme entre elles et empêche tout contact.

Les défauts de roulement peuvent se produire lors d'une fatigue des matériaux sous des conditions normales de fonctionnement. Au début, des fissures vont apparaître sur les pistes et sur les billes. Ensuite, des écaillages et des arrachements de matière peuvent accélérer rapidement l'usure d'un roulement. Ces phénomènes seront accompagnés par des niveaux de bruit et de vibrations croissants [4].

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts suivants :

- Défaut de bague extérieure.
- Défaut de bague intérieure.
- Défaut de billes.
- Défaut de cage.

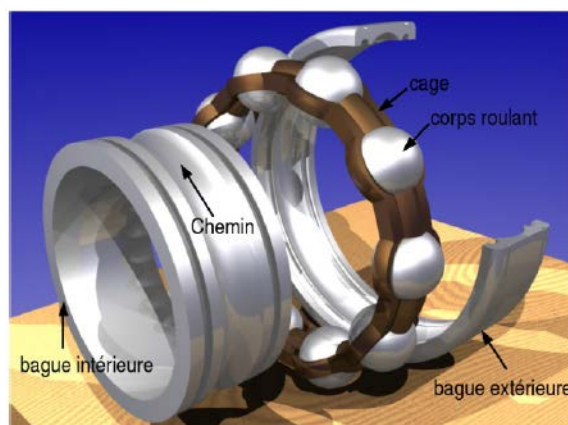


Figure (I.9): Architecture d'un roulement rigide à billes [4]

I.4. Présentation des causes et des conséquences des différents défauts de MAS

I.4.1. Causes des défauts

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes [3] :

- **Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts** : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), problèmes mécaniques, rupture de fixations, problème d'isolation, survolage d'alimentation...
- **Les amplificateurs de défauts** : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, alimentation perturbée (instabilité de la tension ou de la fréquence), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement...
- **Les vices de fabrication et les erreurs humaines** : défauts de fabrication, défectuosité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine...

I.4.2. Conséquences des défauts.

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total [3]. On cite parmi les conséquences des défauts :

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

I.5. Aperçu sur les méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées, elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés. Il est possible de les classer selon le schéma de la figure (I.10).

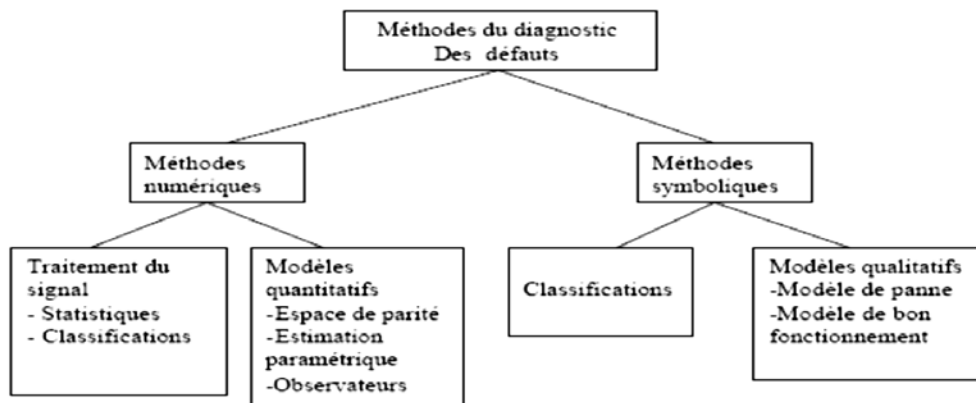


Figure (I.10) Méthodes du diagnostic des défauts [3].

Selon que l'on dispose, ou pas, d'un modèle mathématique représentatif du système, les méthodes de diagnostic se répartissent en deux grandes classes. Dans le premier cas, on a des redondances d'informations et la connaissance fournie par le modèle mathématique pour caractériser le mode de fonctionnement ou l'état du système puis décider s'il est normal ou anormal. Dans le deuxième cas, c'est l'analyse des données fournies par le système qui permet de décider de son état. Les méthodes précédentes font alors appel à des procédures d'apprentissage et de reconnaissance de forme ou à l'intelligence artificielle [3]. Vu la diversification dans les techniques de diagnostic, un tour d'horizon sur les techniques les plus utilisées s'impose.

I.5.1. Détection des défauts par traitement du signal

L'objectif des méthodes de diagnostic et de surveillance de la machine à induction à partir des informations données par des capteurs non invasifs. Les signaux utilisés sont les tensions (même la tension de neutre), les courants et le flux (ou de fuite) de la machine. Les informations données par les différents capteurs peuvent être utilisées séparément ou traitées dans l'ensemble pour détecter des défauts électriques tels que la rupture totale ou partielle de barres ou d'anneaux ou l'excentricité au rotor et des courts-circuits entre spires ou entre phases ou des déséquilibres dans l'alimentation au niveau du stator. La méthode de traitement numérique de base utilisée est la transformée de Fourier rapide (FFT) sous sa forme réelle et complexe ainsi que la transformée de Fourier discrète (DFT) [3].

Les points de mesures des différents signaux (courant, flux, vibrations,...) à l'aide d'une variété des appareils sont illustrés par la figure (I.11) [3].

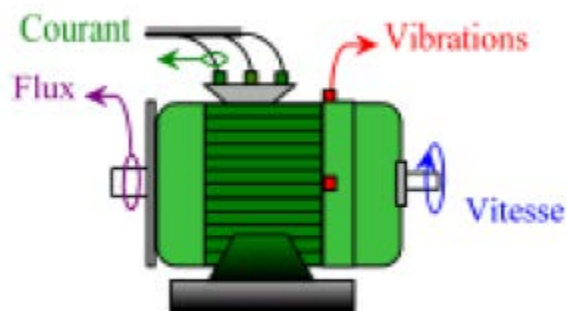


Figure (I.11) Les points de mesures[3]

L'analyse d'un signal donc est une source d'informations. En effet, la mesure d'un signal indique des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. La variation de ces signaux peut être reliée aux défauts [3]. Pour extraire les

caractéristiques d'un signal relatif à un défaut, généralement, on extrait l'amplitude ou les densités d'amplitude. Il existe toutefois d'autres possibilités qui consistent à déterminer les fonctions d'auto corrélation, les transformées de Fourier ou la densité spectrale [3].

I.5.2. Diagnostic par analyse des flux

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion peut être affectée par tout déséquilibre de type magnétique, électrique ou électromagnétique au niveau du rotor ou du stator. Le flux d'entrefer, le flux embrassé par les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés.

Par exemple, le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leur fabrication. L'étude des variations de ce flux est donc considérée par beaucoup d'auteurs comme une solution pour détecter et localiser un défaut [3].

I.5.3. Diagnostic par les analyses chimiques

La plus part des moteurs sont refroidis par l'air, ou le plus souvent à l'aide d'un circuit fermé avec échangeur de chaleur refroidi à l'eau, la dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air de refroidissement et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge. Dans certains cas, l'huile de roulement est analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents [3].

I.5.4. Diagnostic par analyse de la température

Grâce à des dispositifs à infrarouge, on perçoit les zones chaudes dont les températures dépassent les températures limites prédéterminées. Pour ce faire, un balayage systématique de l'ensemble de l'installation électrique, et notamment du moteur asynchrone, est effectué. Les systèmes examinés étant en fonctionnement, les éléments qui composent l'installation électrique sont en charge normale. En fait, ils vont nous apparaître, sur l'image infrarouge, plus ou moins rayonnant suivant leur rôle, leur conception, leur charge et leur matériau. L'opérateur fait la part de choses entre les températures normales de fonctionnement et les anomalies. Les anomalies sont localisées spatialement, un réglage des paramètres de l'objet (émissivité, ambiance...) permet le calcul direct de la température maximale observée et éventuellement la surchauffe. Un calcul complémentaire peut, dans le cas où le système n'est pas à sa charge normale, permettre d'estimer la surchauffe ramenée à son fonctionnement normal. La surchauffe étant calculée, nous rapprochons celle-ci de la cinétique de dégradation et donc des degrés d'urgence. Cette

détermination est très importante car elle permet une véritable localisation dans le temps ; d'où une gestion aisée du traitement des anomalies. Un cliché dans l'infrarouge et une photo dans le visible mémorisent le défaut [3].

La détection serait possible suite à l'analyse du spectrogramme obtenu, à le billet duquel les zones en dégradation seraient délimitées. Un frottement excessif au niveau des paliers ou bien des billes de roulements se traduira par un échauffement graduel qui risque de devenir important. Un mauvais contact est susceptible de générer des décharges électriques traduisant l'augmentation locale de la température, une corrosion, une oxydation, une tresse défectueuse, et beaucoup d'autres exemples de cas pratiques pouvant être l'objet d'une inspection thermographique [3].

I.5.5. Méthodes basées sur l'intelligence artificielle

L'intégration des connaissances symboliques et quantitatives, en utilisant un système neuro-flou, constitue un nouvel axe de recherche dans le domaine de la détection et de la localisation des défauts. De tels systèmes combinent entre l'habilité des réseaux de neurones et la représentation explicite de la logique floue, ce qui constitue un avantage considérable pour la résolution du problème FDI, en particulier, pour les systèmes non linéaires [3].

I.5.6. 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 [3].

I.5.7. Diagnostic par analyse des courants statorique

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

méthode de diagnostic qui sera utilisée comme outil de diagnostique dans la recherche des différents défauts dans ce travail [5].

C'est une méthode de surveillance, qui consiste à utiliser le spectre du courant statorique. Sachant que dans un spectre de courant d'un moteur sans défaut apparaît uniquement la composante du fondamental, pour une répartition sinusoïdale de la Fmm [5].

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

Pour montrer le principe de cette méthode, on considère le cas d'une asymétrie rotorique d'un moteur asynchrone, l'existence de ce défaut engendre un courant de défaut dans le rotor, Ce courant produit une Fmm pulsatoire dont la fréquence d'ondulation est $(g f_s)$, cette Fmm produit dans l'enroulement statorique une harmonique à deux composantes, la première ayant la fréquence $(1-2g) f_s$ et la deuxième ayant la fréquence $(1+2g) f_s$ (figure I.12) [5].

Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis) [3].

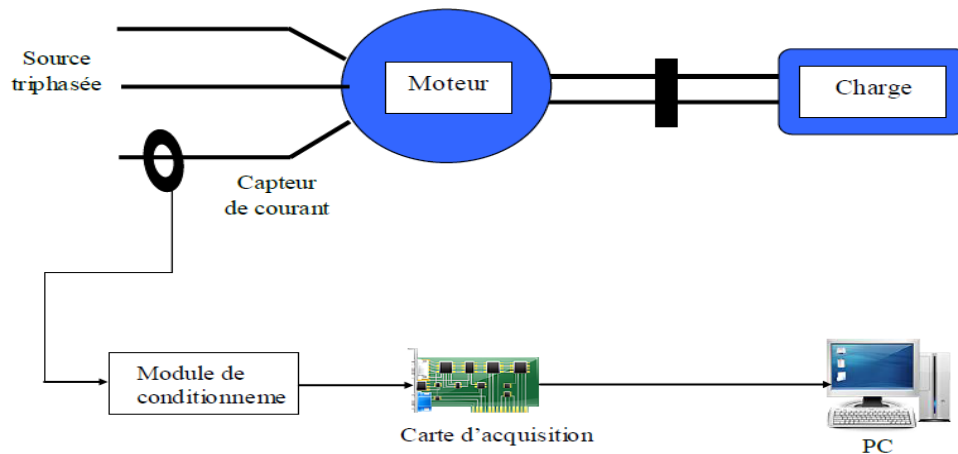


Figure (I.12): schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique [5]

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé que les éléments constructifs de la machine asynchrone et son principe de fonctionnement.

En suite nous avons également décrit la majorité des défauts qui peuvent apparaitre aussi que leurs influences sur le comportement de la machine.

En plus nous avons présenté les différentes méthodes utiliser pour la détection des défauts; on a aussi fait l'objet de la présentation de la méthode de l'analyse spectrale du courant statorique qui fait l'objet de notre travail ; pour la détection des défauts de roulements dans les machines asynchrones. Son principe est basé sur l'emploi des grandeurs électriques faciles à manipuler.

Chapitre II

**Modèle et étude théorique
sur les défauts de
roulement dans les MAS**

II.1. Introduction

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

La modélisation d'une machine électrique est une phase primordiale en vue de diagnostic. Les progrès de l'informatique et du génie logiciels, ont permis de réaliser des modélisations fiables et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Le but de ce chapitre est de présenter des notions sur les modèles les plus couramment appliqués à la modélisation de la machine asynchrone. Une théorie sur le roulement à bille que nous verrons ensuite l'utiliser comme un défaut à diagnostiquer.

II.2. Modèles applicables à la machine asynchrone

II.2.1. Modèle triphasé- triphasé

Tous les modèles de machine asynchrone que nous présenterons sont dits par phase, c'est à dire qu'ils représentent le comportement électrique d'une phase de la machine. Par ailleurs, dans le cadre des machines asynchrones à cage d'écureuil ou à rotor bobiné en court-circuit, d'un point de vue électromagnétique la machine se comporte de manière analogue à un transformateur. Le stator constitue le circuit primaire et le rotor le secondaire en court-circuit.

En considérant les hypothèses simplificatrices suivantes [9]:

- ✓ les pertes fer sont négligées.
- ✓ la saturation du circuit magnétique est négligée.
- ✓ l'effet d'extrémité des têtes des bobines est négligé.
- ✓ le stator est considéré lisse et l'entrefer constant (l'effet des encoches est négligé).
- ✓ les harmoniques, dans ce modèle, de toute origine temporelle sont négligées.
- ✓ la cage rotorique est assimilée à un système triphasé dont les phases en court-circuit.

On présente le modèle dans le repère a, b, c d'une machine. Dans le plan triphasé, la représentation des circuits statoriques et rotoriques sont illustrée par la figure (II.1).

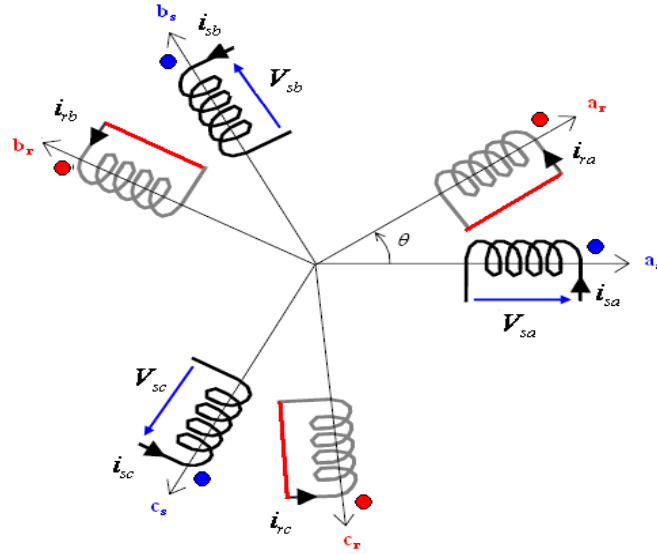


Figure (II.1) : Représentation du modèle triphasé- triphasé

II.2 .2. Modèle de Park

Dans ce modèle, les enroulements des phases a, b, c de la machine sont considérés comme des enroulements équivalents disposés selon un axe direct "d" et un autre en quadrature "q". Cette transformation a pour hypothèse de base, une distribution sinusoïdale des enroulements statoriques et rotoriques.

Ce modèle est largement utilisé, car il permet une diminution du nombre des équations régissant le moteur, ainsi que la disparition de l'interdépendance entre les équations statorique et rotorique localisée au niveau de la matrice des inductances mutuelles. Une matrice unique de transformation $[P(\theta)]$ est appliquée aux courants, aux tensions, et aux flux du modèle triphasé-triphasé de la machine asynchrone [9].

Le passage du système triphasé (à 3 axes) dit réel au système biphasé (à 2 axes) s'effectue par l'intermédiaire d'une matrice de transformation dite matrice de Park:

$$[A_p] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_a & \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) \\ -\cos\theta_a & -\cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_a + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.1)$$

L'angle θ_a dans la matrice de Park $[A_p]$ prend la valeur (θ_s) pour les grandeurs statoriques.

L'étude du moteur asynchrone modélisé selon Park nécessite le choix du référentiel le mieux adapté aux objectifs de l'application. Il existe pratiquement trois référentiels possibles selon le choix de l'orientation du repère d'axes (U, V) présenté dans la figure (II.2).

1. Repère α - β lié au stator $\theta_a = 0$ et $\omega_r = -\omega_m$.
2. Repère x-y lié au Rotor $\theta_a = \omega_m$ et $\omega_r = 0$.
3. Repère d-q lié au Champ tournant $\theta_a = \omega_s$ et $\omega_r = \omega_s - \omega_r$.

La représentation de la MAS à cage dans le plan de Park est illustrée par la figure (II.2)

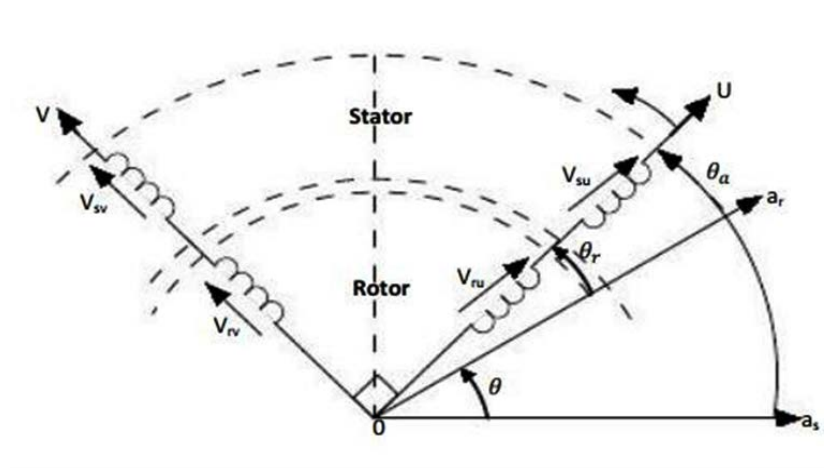


Figure (II.2): Modèle de Park de la MAS triphasé

II.2 .3. Modèle multi-enroulements

II.2.3.1. Modélisation du stator

Les équations électriques du stator sont élaborées à partir de la théorie des circuits statoriques sont présentés dans la figure (II.3).

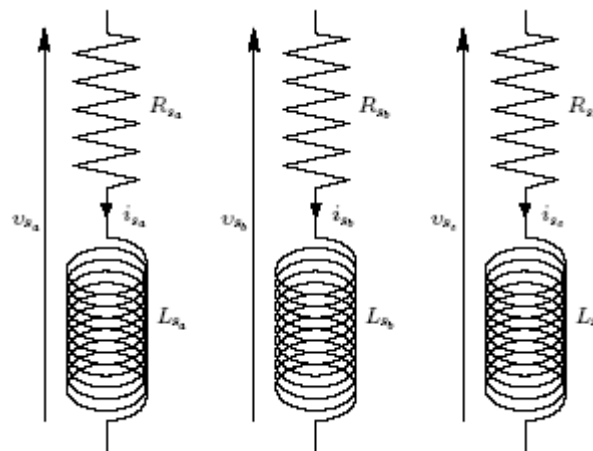


Figure (II.3) : Trois phases statoriques sous formes des circuits électriques

Les équations des tensions des trois phases statoriques sont:

$$\begin{cases} [V_{sa}] = [R_s] [I_{sa}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sa}] \\ [V_{sb}] = [R_s] [I_{sb}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sb}] \\ [V_{sc}] = [R_s] [I_{sc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sc}] \end{cases} \quad (II.2)$$

Où

- V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.
- I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : Courants qui traversent celles-ci.
- $\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: Flux totaux à travers ces enroulements.
- R_s : leurs résistance.

La forme matricielle du système (II.1) est écrite comme suit :

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (II.3)$$

$[\phi_s]$: Vecteur flux.

$[I_s]$: Vecteur des courants.

$$[V_s] = [V_{sa} \quad V_{sb} \quad V_{sc}]^T \quad (II.4)$$

$$[\phi_s] = [L_{ss}] [I_s] + [L_{sr}] [I_r] \quad (II.5)$$

$[L_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelle entre les phases statoriques et les mailles rotoriques :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.6)$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

II.2.3.2. Modélisation du rotor

Le modèle multi-enroulements, permet de mieux se rapprocher de la structure réelle de la cage rotorique [3].

Le rotor est assimilé à un enroulement polyphasé de (n_b+1) mailles, chaque maille est constituée de deux barres adjacentes et de deux portions des deux anneaux de court-circuit (figure II.4).

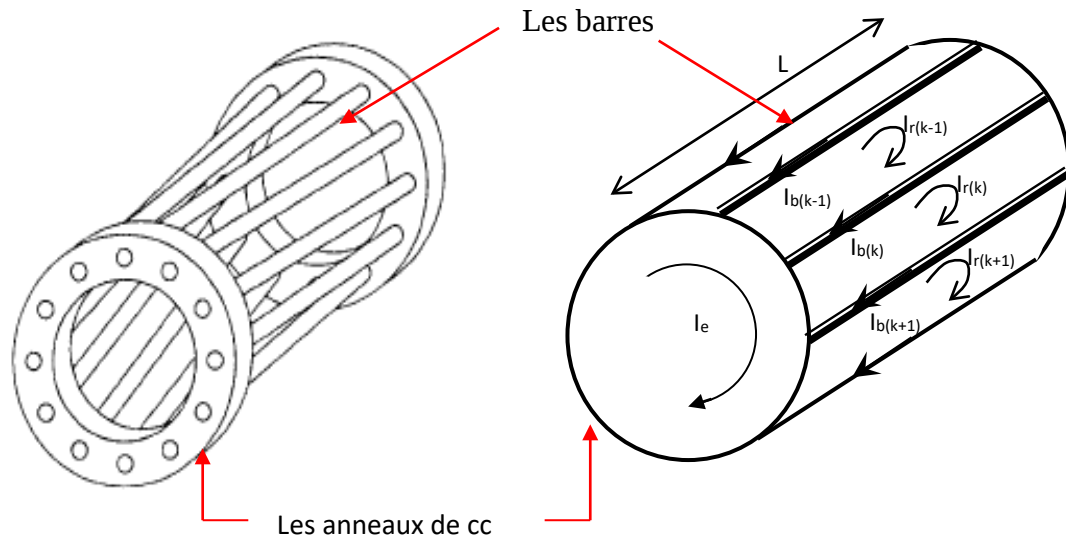


Figure (II.4) : Structure multi-enroulements du rotor [3]

La barre et la portion d'anneau sont représentés par des résistances et des inductances, R_b , R_e (ou R_a) et L_b , L_e (ou L_a) respectivement (figure II.5).

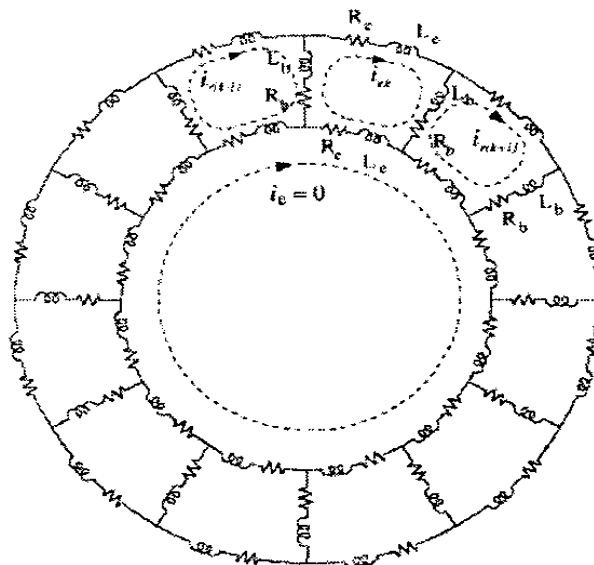


Figure (II.5) : Circuit équivalent du rotor à cage d'écureuil [3]

Les équations de tensions des (n_b+1) mailles rotoriques sont écrites sous la forme matricielle suivante :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \quad (II.8)$$

où :

$$[V_r] = [V_{r1} \quad V_{r2} \quad V_{r3} \dots V_{rn_b} \quad V_e]^T \quad (II.9)$$

La tension de l'anneau de court-circuit $V_e=0$, et la tension des mailles rotoriques $V_{rj} = 0$; avec $j=1,2,\dots,n_b$.

$[\phi_r]$: est le vecteur flux rotorique.

$[I_r]$: est le vecteur

Tel que :

$$[\phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [L_{rs}][I_s] \quad (II.10)$$

Et

$$[I_r] = [i_{r1} i_{r2} i_{r3} \dots i_{rn_b} i_{re}]^T \quad (II.11)$$

I_{rj} et I_{re} sont respectivement les courants de la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique et de l'anneau de court-circuit.

$[R_r]$: est une matrice symétrique de dimensions $(n_b + 1) \times (n_b + 1)$.

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & 0 & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & \dots & 0 & 0 & -R_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & -R_b & \dots & 2(R_b + R_e) & -R_b & -R_e \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \dots & -R_e & -R_e & n_b \cdot R_e \end{bmatrix} \quad (II.12)$$

R_b , R_e : Représentent respectivement la résistance d'une barre et la résistance d'un segment de l'anneau de court-circuit.

La matrice des inductances rotorique est une matrice de dimension $(n_b + 1) \times (n_b + 1)$.

L'expression détaillée des éléments de la matrice $[L_{rr}]$ est :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{r1r2} - L_b & L_{r1r3} & \dots & L_{r1rnb-1} & L_{r1rnb} - L_b & -L_e \\ L_{r2r1} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{r2r3} - L_b & \dots & L_{r2rnb-1} & L_{r2rnb} & -L_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{rnb-1r1} & L_{rnb-1r2} & L_{rnb-1r3} & \dots & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{rnb-1rn} & -L_e \\ L_{rnbr1} - L_b & L_{rnbr2} & L_{rnbr3} & \dots & L_{rnb-1rn} & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & -L_e \\ -L_e & -L_e & -L_e & \dots & -L_e & -L_e & n_b \cdot L_e \end{bmatrix} \quad (II.13)$$

L_{mr} , L_b , L_e sont l'inductance de magnétisation de chaque maille rotorique, l'inductance de fuite d'une barre rotorique et l'inductance de fuite d'un segment de l'anneau de court-circuit respectivement.

L_{rirj} est l'inductance mutuelle entre la $i^{ème}$ et la $j^{ème}$ maille rotorique.

$[L_{sr}]$ Comporte $3 \times (n_b + 1)$ éléments qui constituent les inductances mutuelles entre les phases statoriques et les mailles rotoriques, et est donnée par :

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} L_{a1}^{sr} & L_{a2}^{sr} & \dots & L_{an}^{sr} & L_{ae}^{sr} \\ L_{b1}^{sr} & L_{b2}^{sr} & \dots & L_{bn}^{sr} & L_{be}^{sr} \\ L_{c1}^{sr} & L_{c2}^{sr} & \dots & L_{cn}^{sr} & L_{ce}^{sr} \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

et

$$[L_{rs}] = [L_{sr}]^t \quad (II.15)$$

L_{aj}^{sr} représente l'inductance mutuelle entre la phase "a" et la $j^{ème}$ maille.. De même pour les phases "b" et "c". L'inductance mutuelle entre chaque phase statorique et l'anneau de court-circuit est négligée du fait qu'ils peuvent être assimilés à des bobines à axes perpendiculaires.

En regroupant les équations statoriques et rotoriques dans une même équation matricielle, nous trouvons :

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d[L]}{d\theta_r} + [L] \frac{d[I]}{dt}, \quad (II.16)$$

Avec,

$$[V] = \begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

$$[I] = \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$\Omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.21})$$

θ_r : est la position angulaire du rotor.

Ω_r : est la vitesse angulaire du rotor.

II.2.3.3. Equation mécanique

L'équation du mouvement, reliant les parties électrique et mécanique est :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f_v \omega_r \quad (\text{II.22})$$

$$\text{avec : } \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (\text{II.23})$$

C_r : le couple résistant, f_v le coefficient de frottement visqueux et J le moment d'inertie des parties tournantes.

Le couple électromagnétique « C_{em} », est obtenu à partir de la co-énergie :

$$C_{em} = \left[\frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_r} \right]_{(I_s, I_r, \text{constants})} \quad (\text{II.24})$$

Avec,

$$W_{co} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s]^T & [I_r]^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Ce qui donne :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \left[[I_s]^T \frac{\partial [L_{ss}]}{\partial \theta_r} [I_s] + [I_s]^T \frac{\partial [L_{sr}]}{\partial \theta_r} [I_r] + [I_r]^T \frac{\partial [L_{rs}]}{\partial \theta_r} [I_s] + [I_r]^T \frac{\partial [L_{rr}]}{\partial \theta_r} [I_r] \right] \quad (\text{II.26})$$

II.3. Généralités sur les roulements

II.3.1. Constitutions des roulements

Un roulement est un corps formé par deux bagues coaxiales appelées bague interne et bague externe, entre lesquelles existent des corps roulants uniformément espacés par une cage et tournants sur un chemin. Le corps roulant peut être une bille, un rouleau cylindrique ou trapézoïdal. Certains roulements possèdent de plus une flasque qui est une couverture latérale, couvrant l'espace entre les deux bagues externe et interne (figure II.6) [6].

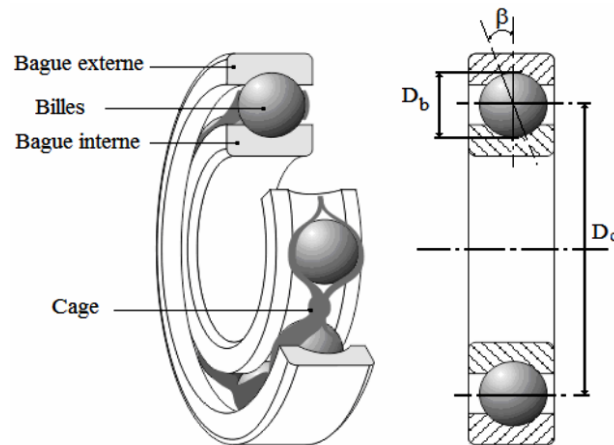


Figure (II.6): Géométrie du roulement à billes [6]

II.3.2. Majeurs types de roulements et leurs utilisations [6]

La grande variété des applications où les roulements sont utilisés, a imposé la conception de plusieurs architectures de roulements selon l'application visée. On cite :

- **Les roulements rigides à billes (à rouleaux cylindriques)** : ce sont les roulements les plus répandus, ils sont conçus pour des charges radiales, mais peuvent supporter une petite charge axiale. Les roulements à rouleaux peuvent supporter des charges plus élevées.
- **Les roulements à aiguilles** : ils possèdent une forme cylindrique, et sont suffisamment fins pour résoudre le problème où l'espace radial est fin.
- **Roulements à billes à contact oblique** : l'architecture de ces roulements les rend capable de supporter des charges axiales et radiales à la fois.
- **Roulements à rotules sur billes (de même sur rouleaux)** : « Ce type de roulement (figure II.7) célèbre, inventé en 1907 par le fondateur de SKF Sven Wingquist, a permis de résoudre l'un des problèmes industriels les plus épineux de l'époque, celui des arrêts de production récurrents dus à des défaillances de roulements.

Comme l'alignement des arbres n'était pas suffisamment précis pour permettre une utilisation normale des roulements rigides à billes, les pannes étaient fréquentes. Les roulements à rotule sur billes à deux rangées, qui tolèrent un défaut d'alignement pour une durée de service identique, ont permis de résoudre le problème.»

Ce type de roulement est recommandé pour plusieurs intérêts :

- Applications à haute vitesse
- Charge plus élevée
- Faibles besoins de maintenance
- Bruits et vibration minimaux
- Haute tolérance à un défaut d'alignement



Figure (II.7): Roulement à rotules sur billes (self aligning) [6]

- **Roulements à rouleaux toroïdaux** : ils tolèrent des défauts d'alignement et un déplacement axial.
- **Roulements de précision et de super-précision** : ils offrent la précision de rotation nécessaire pour quelques applications par exemple optiques, de laminage.

D'autres types de roulements existent encore tel que les roulements d'orientation, les roulements éco-énergétiques, les butées. Il existe même des roulements spéciaux qui sont conçus pour des applications spécifiques tels que les roulements en poly acétal dont les billes sont en verre pour résister à la corrosion [6].



Figure (II.8): Une variété de roulements [6]

II.3.3. Choix du roulement

Dans le cas général, la détermination d'un roulement s'effectue suivant:

- 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.3.4. Les défauts de roulements : causes et solutions [6]

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

II.3.4.1. Usure

L'usure généralement provient de trois causes principales :

- 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.9.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 1.9.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.9.c).

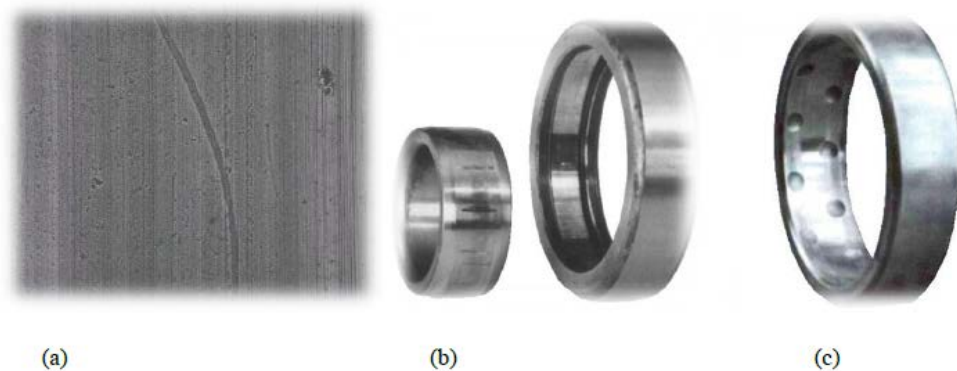


Figure (II.9): Défaut de roulement – usure. [6]

II.3.4.2. 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.10).

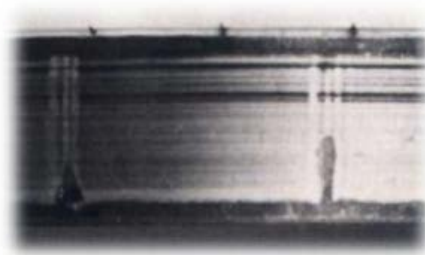


Figure (II.10): Défaut de roulement – dentelure [6]

II.3.4.3. 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.11).



Figure (II.11): Défaut de roulement – bavure [6]

II.3.4.4. 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.12).



Figure (II.12) : Défaut de roulement – écaillage [6]

II.3.4.5. 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.13).

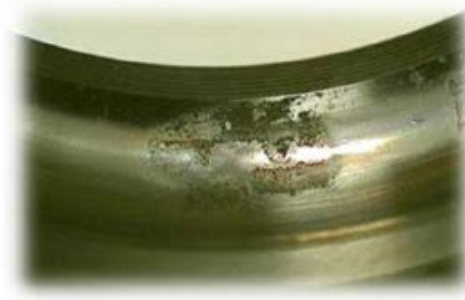


Figure (II.13): Défaut de roulement – corrosion [6]

II.3.4.6.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.14).

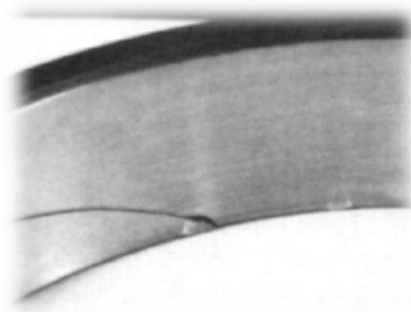


Figure (II.14): Défaut de roulement – cassure. [6]

II.3.4.7.Choc électrique

Le passage d'un courant électrique dans un roulement en rotation ou non, peut endommager ces différentes parties (figure II.15).



Figure (II.15): Défaut de roulement – choc électrique [6]

II.3.5. les caractéristiques des roulements [7]

Soit $(O, \vec{x}, \vec{y})$ le repère de travail considéré.

Ou :

O : Désigne le centre de poussées.

$\vec{x}$: Direction axiale.

$\vec{y}$: Direction radiale.

Le roulement est soumis d'une part à la résultante

$$\vec{F} = F_a \vec{x} + F_r \vec{y} \quad (\text{II.27})$$

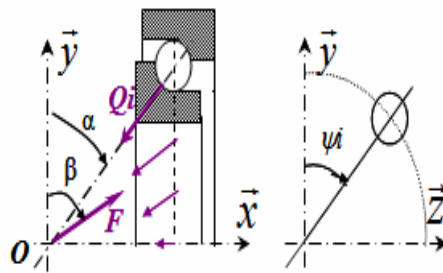


Figure (II.16) : chargement et paramétrage [7]

Et d'autre par aux actions de contact.

On paramètre par ψ_i la position du $i^{\text{ème}}$ élément roulant.

II.3.5.1. Angle de contact α et β

L'angle de contact α est l'angle que fait la ligne de contact du roulement avec la direction radiale.

L'angle de chargement β est l'angle que fait l'effort F avec la direction radiale.

II.3.5.2. Paramètre de chargement ϵ

Soit $\vec{\delta}(0)$ le déplacement rigide de la bague intérieure BI par rapport à la bague extérieure BE

$$\vec{\delta}(0) = \delta_a \vec{x} + \delta_r \vec{y} \quad (\text{II.28})$$

Avec

δ_a : Déflexion axiale.

δ_r : Déflexion radiale.

δ_i : Rapprochement des deux bagues selon la normale commune aux points de contact avec $i^{\text{ème}}$ élément roulant.

$$\delta_i = \delta_a \sin \alpha + \delta_r \cos \alpha \cos(\varphi_i) \quad (\text{II.29})$$

δ_i Est maximal pour l'élément roulant le plus chargé.

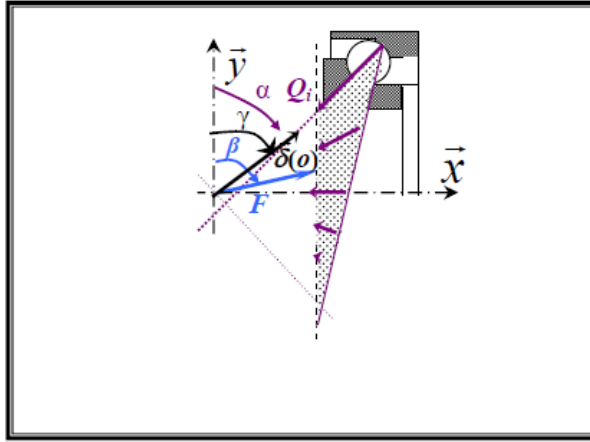


Figure (II.17): Le déplacement rigide de la bague intérieure BI [7]

$$\delta_{max} = \delta_a \sin \alpha + \delta_r \cos \alpha \quad (\text{II.30})$$

$$\frac{\delta_i}{\delta_{max}} = 1 - \frac{1 - \cos(\varphi_i)}{1 + \frac{\delta_a}{\delta_r} \tan \alpha} \quad (\text{II.31})$$

Par définition, le paramètre de chargement ε est donnée par :

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \times \left[1 + \frac{\delta_a}{\delta_r} \tan \alpha \right] \quad (\text{II.32})$$

S'écrit alors

$$\frac{\delta_i}{\delta_{max}} = 1 - \frac{1 - \cos(\varphi_i)}{2\varepsilon} \quad (\text{II.33})$$

En pratique, connaissant les efforts axial et radial et l'angle de contact α , on détermine ε à partir du tableau suivant :

Tableau (II.1) : Paramètre de chargement ε par rapport à les efforts axial, radial et l'angle de contact α [7]

$\frac{F_r}{F_a} \tan \alpha$	1	0.9318	0.8964	0.8601	0.8225	0.7835	0.7427	0.6995
ε	0.0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$\frac{F_r}{F_a} \tan \alpha$	0.6529	0.6000	0.4338	0.3088	0.1850	0.0831	0	
ε	0.9	1.0	1.25	1.67	2.5	5.0	∞	

II.3.5.3. Efforts axial et radial appliqués [7]

En tenant compte des équations d'équilibre de la bague intérieure et en utilisant la loi de comportement élastique des contacts liant δ_i à Q_i :

$$Q_i = K \cdot \delta_i^t \quad (\text{II.34})$$

Où K et t sont des constantes qui dépendent de la nature du contact, le système devient :

$$\begin{cases} F_a = Q_{max} \sin \alpha \left(1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{E(Nb/2)} \left(1 - \frac{1-\cos(\varphi_i)}{2\varepsilon} \right)^t \right) \\ F_r = Q_{max} \cos \alpha \left(1 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{E(Nb/2)} \left(1 - \frac{1-\cos(\varphi_i)}{2\varepsilon} \right)^t \cdot \cos(\varphi_i) \right) \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Avec Nb : nombre d'éléments roulants.

En supposant que le nombre d'éléments roulants est assez grand, les expressions de F_a et F_r deviennent :

$$\begin{cases} F_a = Q_{max} \sin \alpha \cdot \frac{Nb}{\pi} \int_0^{\varphi_m} \left(1 - \frac{1-\cos(\varphi)}{2\varepsilon} \right)^t d\varphi \\ F_r = Q_{max} \cos \alpha \cdot \frac{Nb}{\pi} \int_0^{\varphi_m} \left(1 - \frac{1-\cos(\varphi)}{2\varepsilon} \right)^t \cos(\varphi) d\varphi \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

On définit alors les intégrales de **Sjoväll** :

$$\begin{cases} J_a(\varepsilon) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\varphi_m} \left(1 - \frac{1-\cos(\varphi)}{2\varepsilon} \right)^t d\varphi \\ J_r(\varepsilon) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\varphi_m} \left(1 - \frac{1-\cos(\varphi)}{2\varepsilon} \right)^t \cos(\varphi) d\varphi \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Les expressions de F_a et F_r deviennent alors :

$$\begin{cases} F_a = Nb \cdot Q_{max} \sin \alpha \cdot J_a(\varepsilon) \\ F_r = Nb \cdot Q_{max} \cos \alpha \cdot J_r(\varepsilon) \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

II.3.5.4. Charge maximale [7]

La charge maximale Q_{max} agissant sur l'élément roulant le plus chargé est :

$$Q_{max} = \frac{F_a}{Nb \cdot J_a(\varepsilon) \cdot \sin \alpha} = \frac{F_r}{Nb \cdot J_r(\varepsilon) \cdot \cos \alpha} \quad (\text{II.39})$$

II.3.5.5. Expression de la charge Q_i

$$\frac{Q_i}{Q_{max}} = \frac{Q_i^t}{Q_{max}^t} = \left(\frac{Q_i}{Q_{max}} \right)^t = \left(1 - \frac{1 - \cos(\varphi_i)}{2\varepsilon} \right)^t \quad (II.40)$$

Formule de la distribution de charge

$$Q_i = Q_{max} \cdot \left(1 - \frac{1 - \cos(\varphi_i)}{2\varepsilon} \right)^t \quad (II.41)$$

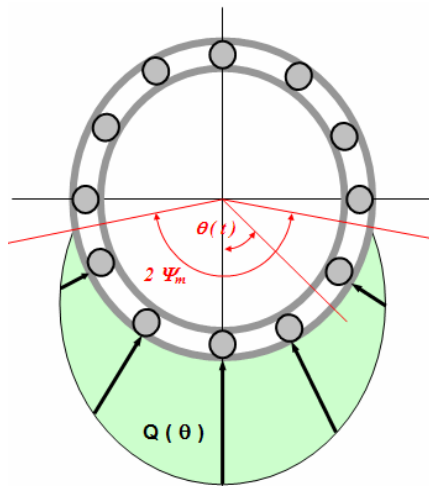


Figure (II.18): synoptique de la distribution de charge

II.3.5.6. Effort de choc dynamique

Caractéristiques Cinématiques de la bille en pivotant autour d'un défaut

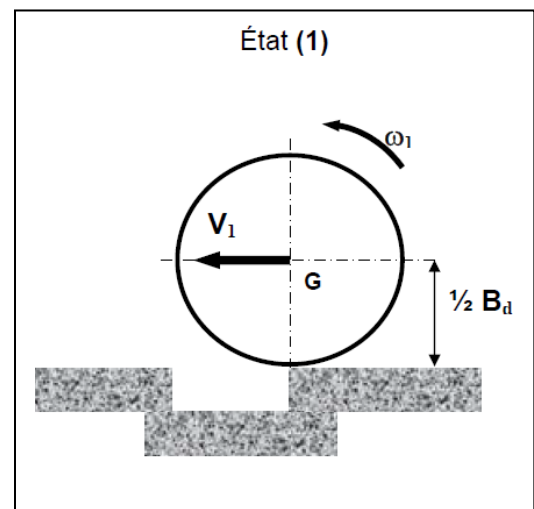
Soit

T_1 = Énergie Cinématique Initiale.

U_1 = Énergie Potentielle Initiale.

$$T_1 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_1^2 + \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega_1^2 \quad (II.42)$$

$$U_1 = m \cdot g \cdot \frac{B_d}{2} \quad (II.43)$$

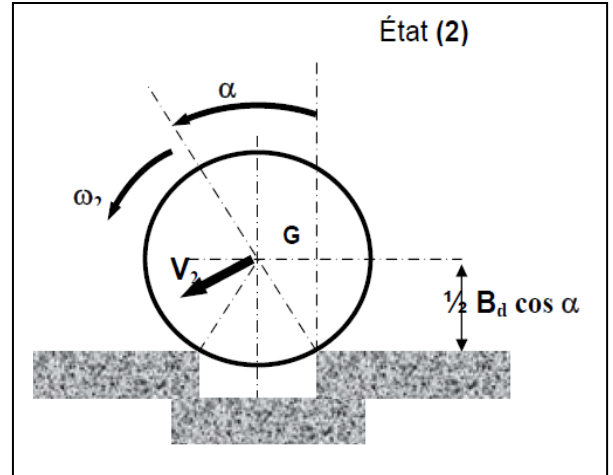


$T_2 = \text{Énergie Cinématique Finale}$

$U_2 = \text{Énergie Potentielle Finale}$

$$T_2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_2^2 + \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega_2^2 \quad (\text{II.44})$$

$$U_2 = m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \frac{B_d}{2} \quad (\text{II.45})$$



La conservation de l'énergie mécanique totale entre l'état (1) et l'état (2) s'écrit comme suit : $T_1 + U_1 = T_2 + U_2$

L'effort Dynamique (ou de choc) est celui qui correspond à une transmission de l'énergie cinétique de la bille.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \frac{\Delta V^2}{\Delta S} \quad (\text{II.46})$$

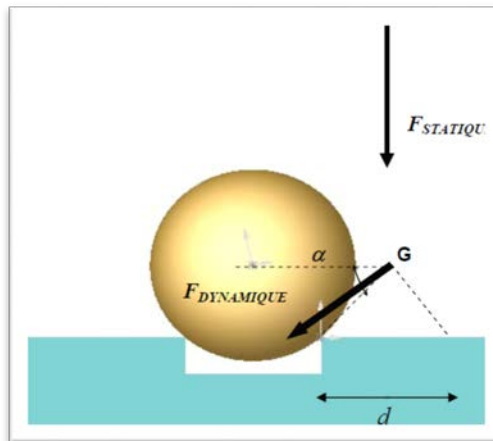
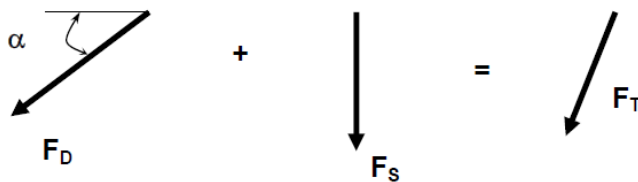


Figure (II.19): L'effort Total lors du choc au point S, la somme de l'effort Statique et de l'effort Dynamique

Effort (Dynamique) + Effort (Statique) = Effort (Total)



$$F_T = F_s + F_D \cdot \sin \alpha = F_s + \frac{1}{2} \cdot \frac{F_s}{g} \cdot \frac{\Delta V^2}{\Delta S} \cdot \sin \alpha$$

(II.47)

$$\text{Ou } \sin \alpha = \frac{\frac{d_{\text{def}}}{2}}{\frac{B_d}{2}} = \frac{d_{\text{def}}}{B_d} \quad (\text{II.48})$$

On obtient alors :

$$F_T = F_s \cdot \left[1 + \frac{\sin \alpha}{2 \cdot g} \cdot \frac{\Delta V^2}{\Delta S} \right] / \quad \Delta S = \frac{d^2}{B_d} \quad (\text{II.49})$$

II.3.6. Mise en place d'un modèle général du roulement [7]

Le modèle général du roulement suivant une ligne radiale donnée est explicité dans la figure suivante [7] :

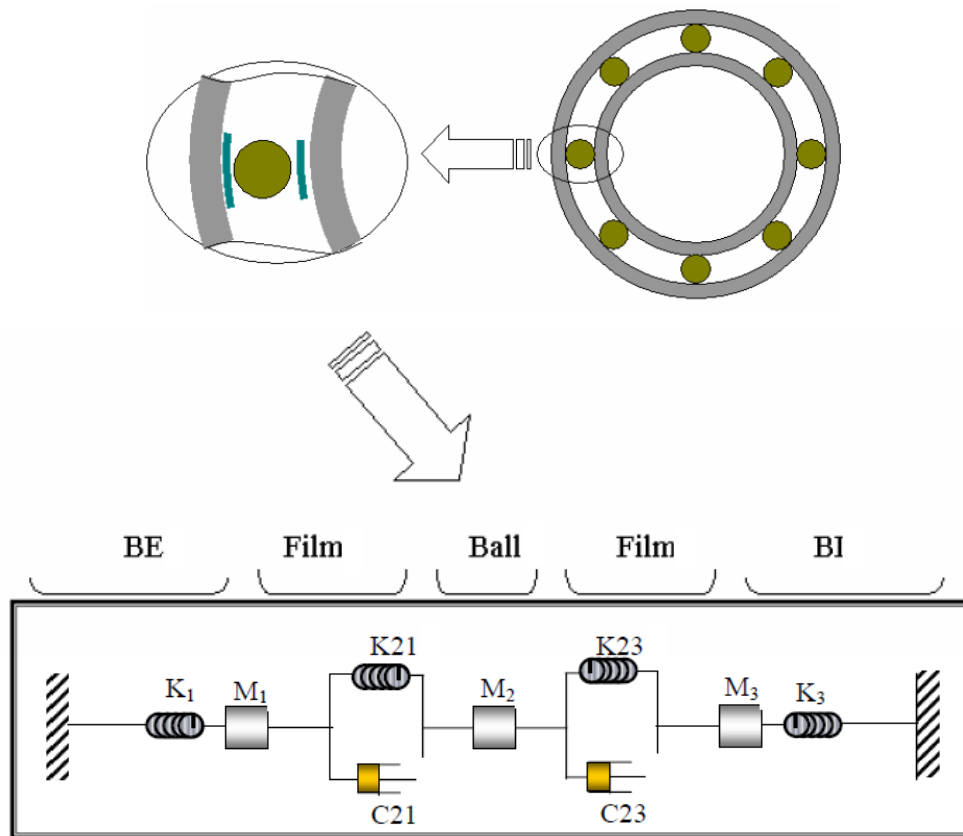


Figure (II.20): Modèle du roulement suivant une ligne radiale [7]

Où :

K21 : Rigidité du film d'huile entre billes et BE [N.m⁻¹]

K23 : Rigidité du film d'huile entre billes et BI [N.m⁻¹]

C21 : Amortissement du film d'huile entre billes et BE [N.s.m⁻¹]

C23 : Amortissement du film d'huile entre billes et BI [N.s.m⁻¹]

M1: Masse de la bague extérieure [Kg]

M2 : Masse de la bille [Kg]

M3: Masse de la bague intérieure [Kg]

K1: Rigidité de la bague extérieure [N.m⁻¹]

K3: Rigidité de la bague intérieure [N.m⁻¹]

II.3.7. Fréquences de défauts associés aux roulements [6]

Lorsqu'un roulement tourne, n'importe quelle irrégularité dans les chemins ou dans le corps roulant, excite la structure de ce roulement par des vibrations de fréquences périodiques.

Les concepteurs de roulements offrent, généralement sur demande, des informations qui sont reliées aux régimes défaillants de leurs produits. Ces informations comprennent principalement des multiplicateurs qui sont reliés directement aux différentes fréquences de défauts des roulements. Pour chercher la fréquence du défaut, il suffit seulement de multiplier la fréquence de rotation par ces multiplicateurs. De même, les simulateurs de roulements possèdent des bases de données qui contiennent les multiplicateurs de défauts pour les roulements qui se trouvent au marché.

Les défauts de bague externe sont les défauts qu'on trouve le plus, spécialement dans la zone où la charge est concentrée. Le deuxième défaut parmi les plus courants est le défaut de la bague interne. Il est moins répandu de trouver un défaut de bille (corps roulant).

Néanmoins, si les données relatives aux défauts ne sont pas disponibles, on peut calculer les fréquences de défauts de chaque roulement en connaissant les informations sur sa géométrie qui sont les suivantes:

- D_b : diamètre de la bille
- P_d : le diamètre primitif = $(D_i + d_i) / 2$
- D_i : le diamètre intérieur de la bague extérieure
- d_i : diamètre extérieur de la bague intérieure
- N : nombre de corps roulants
- θ : angle de contact
- f_r : fréquence de rotation

Et par suite, les fréquences de défauts sont les suivantes:

o FTF (fundamental train frequency) ou la fréquence de la cage.

$$FTF = \frac{f_r}{2} \left[1 - \left(\frac{D_b}{D_p} \cos \theta \right) \right] \quad (II.50)$$

o BSF (ball spin frequency) ou la fréquence circulaire de chaque corps roulant défectueux quand il tourne.

$$\text{BSF} = \frac{D_p}{2D_b} f_r \left[1 - \left(\frac{D_b}{D_p} \cos \theta \right)^2 \right] \quad (\text{II.50})$$

o BPFO (ball pass frequency of the outer race) ou la fréquence créée par le passage de tous les éléments roulants parmi le défaut de bague externe.

$$\text{BPFO} = \frac{N}{2} f_r \left[1 - \left(\frac{D_b}{D_p} \cos \theta \right) \right] \quad (\text{II.51})$$

o BPFI (ball pass frequency of the inner race) ou la fréquence créée par le passage de tous les éléments roulants parmi le défaut de bague interne.

$$\text{BPFI} = \frac{N}{2} f_r \left[1 + \left(\frac{D_b}{D_p} \cos \theta \right) \right] \quad (\text{II.52})$$

II.3.8.Nature d'une vibration [8]

Une machine tournante quelconque en fonctionnement génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante:

- Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple (figure II.21.a) ou sinusoïdal complexe (Figure II.21.b) représentatives du fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques (rotation de lignes d'arbres, engrènnements,...) ou d'un certain nombre d'anomalies (déséquilibre, désalignement, déformations, instabilité de paliers fluides, déversement de bagues sur roulements, ...).
- Les vibrations périodiques de type impulsif (Figure II.21.c) sont appelées ainsi par référence aux forces qui les génèrent et à leur caractère brutal, bref et périodique. Ces chocs peuvent être produits par des événements normaux (presses automatiques, broyeurs à marteaux, compresseurs à pistons, ...) ou par des événements anormaux comme l'écaillage de roulements ou un défaut sur des engrenages, un jeu excessif, ...
- Les vibrations aléatoires de type impulsif (Figure II.21.d) peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe,

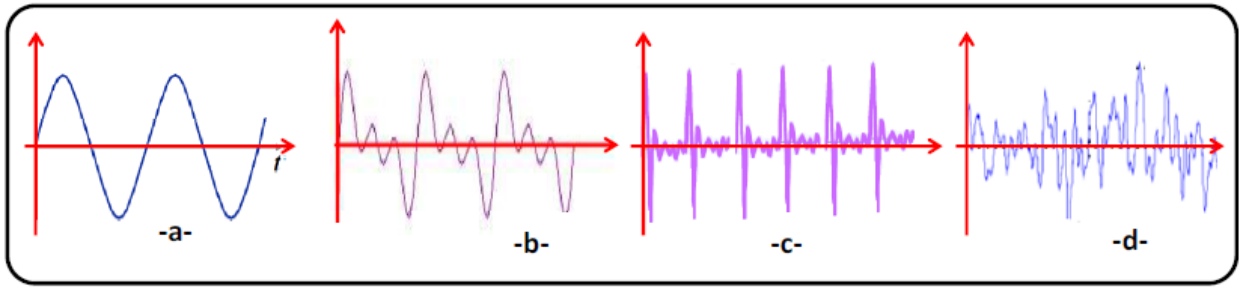


Figure (II.21): Nature d'une vibration [8]

II.3.8.1. Capteurs de vibration [8]

a) Types et caractéristiques des capteurs

La première étape conduisant à l'obtention d'une lecture de vibration consiste à convertir la vibration mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent. Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations. On retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés le proximètre (mesure de déplacement), la vélocimétrie (mesure de vitesse) et l'accéléromètre (mesure d'accélération).

Un capteur de vibration est caractérisé principalement par :

- Sa **bande passante** (plage d'utilisation) : plage de fréquences à l'intérieur de laquelle l'amplitude mesurée par le capteur ne dépasse pas une marge d'erreur fixée par le constructeur (par exemple + 3 % ou + 3 dB de [3–8000] Hz).
- Sa **gamme dynamique** (gamme de mesure d'amplitude) : gamme comprise entre la plus petite et la plus grande amplitude acceptée par le capteur.
- Sa **sensibilité** : relation entre la grandeur électrique délivrée à la sortie l'amplitude du mouvement mécanique qui lui donne naissance (par exemple 8 mV par μm).

Elle est donnée par le constructeur du capteur, généralement sous forme de courbe d'étalonnage qui devra faire l'objet d'une vérification périodique.

b) Proximètres

Le proximètre, ou sonde de proximité (Figure II.22), est un capteur de déplacement sans contact qui produit un signal électrique directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor. Il est monté en permanence à l'intérieur du palier (Figure II.23). Les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence. Ces mesures seront limitées aux basses fréquences (< 100 Hz).

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications où la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers s'avère essentielle. C'est pourquoi l'on retrouve des capteurs de

déplacement installés sur la plupart des turbines hydroélectriques et des turbomachines. A partir des connaissances des jeux radiaux réels d'un palier ou des jeux axiaux rotor - stator, il est beaucoup plus facile de déterminer des seuils d'alerte et de danger en termes de déplacement qu'entretient de vitesse ou d'accélération.

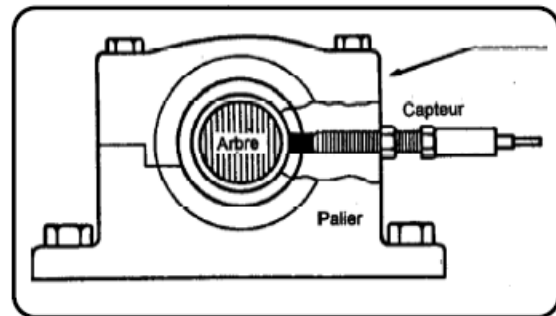


Figure (II.22): proximètres et leur driver [8] Figure (II.23): proximètre monte sur un palier [8]

c) Vélocimétries

Les capteurs de vitesse, ou vélocimétries, sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée.

Les vélocimétries les plus courantes sont constituées d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté (Figure II.24). La vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse de mouvement de la bobine.

La fréquence de résonance de ce type de capteurs se situe généralement entre 8 et 15 Hz et la gamme dynamique s'étend de 10-20 Hz à 2000 Hz environ.

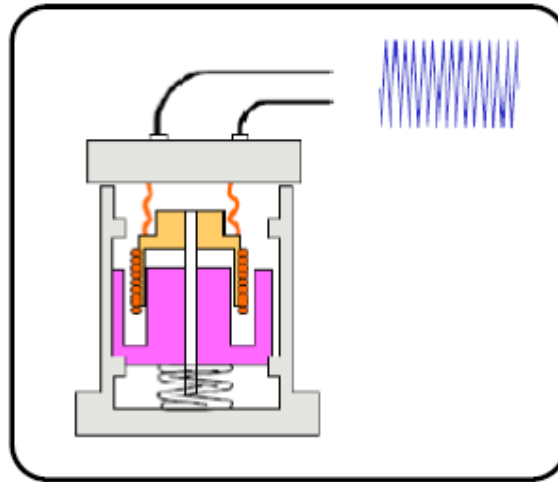


Figure (II.24) : schéma de principe d'une vélocimétrie [8]

d) Accéléromètres

Un accéléromètre piézoélectrique (Figure II.25), est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte. Quand la masse se déplace sous l'effet d'une accélération, elle exerce sur le disque des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération. Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB).
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.

Les accéléromètres à électronique intégrée sont semblables aux accéléromètres piézoélectriques à la différence qu'ils possèdent de manière intégrée un conditionnement de charge pour délivrer une tension proportionnelle à l'accélération.

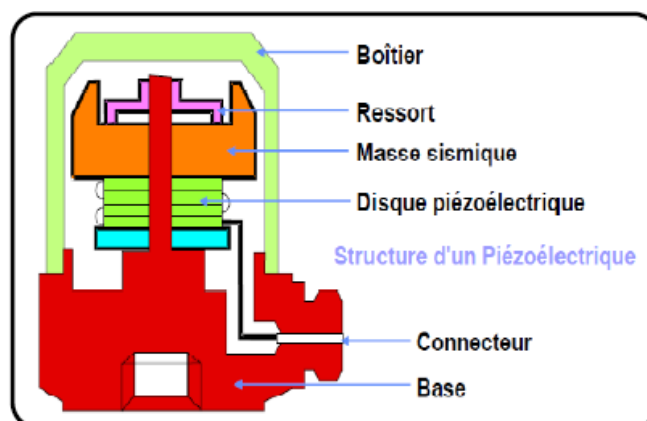


Figure (II.25): schéma de principe d'un accéléromètre [8]

II.3.8.2.Stratégies de surveillance vibratoire [8]

a) Mesure vibratoire en niveau global

Cette stratégie de surveillance consiste à mesurer, à l'aide de capteurs, le niveau global d'un ou de plusieurs indicateurs (déplacement, vitesse ou accélération), à suivre son évolution dans le temps et à le comparer a des normes ou des mesures précédentes. Certes, toute évolution est due à une dégradation de la machine. Cela permet de mettre en évidence l'existence d'une anomalie à un stade précoce et de faire une première idée des types de défauts qui affectent la machine, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis.

b) Analyse temporelle

Cette stratégie consiste à suivre, au cours du temps, le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ces paramètres de fonctionnement (étude de la vibration d'une turbine lors de son accélération ou sa décélération). Ce type de suivi est simple à exploiter lorsque le signal est simple mais il devient inexploitable lorsque le signal a pour origine des sollicitations multiples.

c) Analyse spectrale

L'analyse spectrale consiste à relever le signal vibratoire mesure sur la machine et de procéder à une analyse systématique pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela permet d'accéder au diagnostic, c'est à dire, d'identifier avec précision la nature de l'anomalie et si possible en préciser la gravite.

II.3. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, on s'est intéressé à citer les modèles du moteur asynchrone triphasé.

La modélisation ainsi présentée, est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ce qui permet de dire que ces modèles restent insuffisants pour décrire le comportement réel de la machine, mais ils peuvent constituer en général une approche globale acceptable dans la plus part des fonctionnements normaux du MAS. Pour cela, on trouve un autre modèle qui prend en considération la structure réelle de la MAS qui s'appelle le modèle des éléments finis.

Nous avons présenté aussi des notions génériques 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. Nous avons vu que les modes de dégradation pouvaient se combiner au long du fonctionnement des roulements. Nous avons également étudié les caractéristiques cinématiques correspondant au comportement vibratoire dues aux roulements. Le troisième chapitre sera consacré à une analyse complète du défaut de roulement par la méthode de la MCSA.

Chapitre III

**Analyse du défaut de
roulement par la méthode
de MCSA**

III.1. Introduction

Les roulements à billes sont des organes indispensables à la grande majorité des moteurs électriques. Ils sont responsables de la conversion d'énergie jouant ainsi le rôle d'interface électromécanique. Malheureusement, ce rôle les rend plus fragiles et sont donc une source de pannes fréquentes. En effet, des études statistiques montrent qu'ils représentent entre 40% et 50% des pannes totales des moteurs et peut atteindre 52% dans certains secteurs industriels [11]. Il est donc nécessaire, de diagnostiquer très tôt les défaillances des roulements afin de préserver la sécurité du personnel, éviter l'arrêt de toute la chaîne de production, et ainsi minimiser les pertes financières.

Parmi les techniques de diagnostic, l'analyse du courant statorique est une approche très prometteuse, vu que ses principaux atouts résident dans l'instrumentation employée, la facilité de sa mise en œuvre ainsi que la richesse d'informations qu'elle procure sur l'état du moteur.

L'objet de cette partie est de décrire la signature des défauts de roulements telle qu'elle a été observée sur les signaux enregistrés. Deux défauts de roulement ont été reproduits artificiellement la bague externe et la bague interne.

On se place en régime permanent, les défauts de roulement à vide et avec une charge seront examinés.

Les analyses spectrales ont été réalisées sur la fréquence d'échantillonnage est de 0 - 500Hz.

Le spectre du moteur sain obtenu en fonctionnement à vide ou avec charge sert de référence pour les autres spectres du courant avec défaut.

III.2. 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. Le banc de tests est réalisé dans le laboratoire de génie électrique de l'université de Biskra (LGEB) pour provenir une base de données dédié à l'analyse des courants

statoriques à travers des capteurs à effet Hall. 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.3. Analyse du défaut de roulement

III.3.1. Analyse du défaut de roulement de la bague extérieure

III.3.1.1. Fonctionnement à vide (BE, $C_e = 0$ Nm)

La mesure du courant peut être prise à n'importe quelle position entre le moteur et le poste d'alimentation. Par ailleurs, une défaillance des roulements se manifeste dans le spectre du courant statorique sous la forme d'harmoniques définis par l'expression suivante:

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

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

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

Avec,

$$g = 0 \text{ et } p = 2 \Rightarrow f_r = 25$$

où

$$f_{be} = 0.4 \times N_b \times f_r = 0.4 \times 9 \times 25 = 90 \text{ Hz}$$

$$f_{car_be} = |\gamma \times f_s \pm k \times f_{be}| = |\gamma \times 50 \pm k \times 90|$$

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

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

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 à vide).

f_{car_be} (Hz)	Fréquence calculée (Hz)	Fréquence trouvée (Hz)	Amplitude (dB)
$ 1 \times 50 - 1 \times 90 $	40	40	-70.6
$ 9 \times 50 - 6 \times 90 $	90	90.1	-74.09
$ 5 \times 50 - 4 \times 90 $	110	107.4	-71.02
$ 1 \times 50 + 1 \times 90 $	140	140	-70.98
$ 3 \times 50 - 4 \times 90 $	210	207.5	-80.04
$ 5 \times 50 - 6 \times 90 $	290	289.7	-87.69
$ 1 \times 50 + 3 \times 90 $	320	319.9	-96.23
$ 6 \times 50 + 1 \times 90 $	390	392.3	-84.39
$ 1 \times 50 + 4 \times 90 $	410	409.9	-97.38
$ 8 \times 50 + 1 \times 90 $	490	489.9	-91.57

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 le spectre du courant statorique pour une plage fréquentielle de 0 – 100 Hz en indiquant les fréquences caractéristiques du défaut de la bague extérieure dans le cas la MAS qui fonctionne à vide.

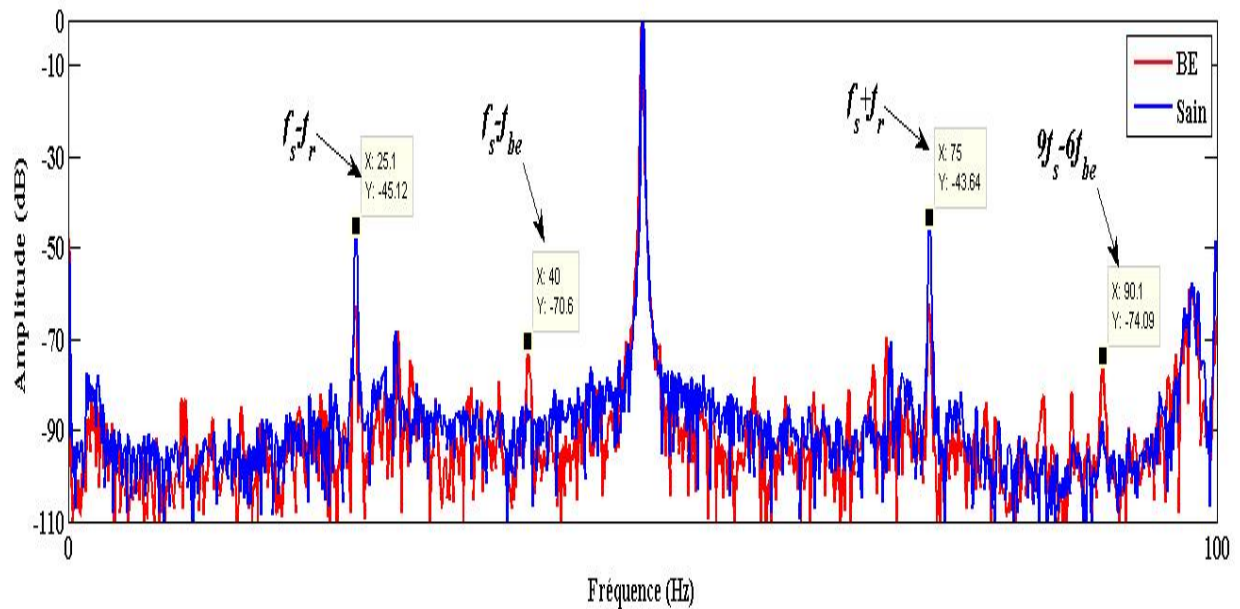


Figure (III.2) : Spectre du courant statorique (BE, à vide) ; 0-100Hz

Les figures (III.3) et (III.4) représentent les fréquences additionnelles causées par un défaut dans la bague extérieure pour différentes plages de fréquences.

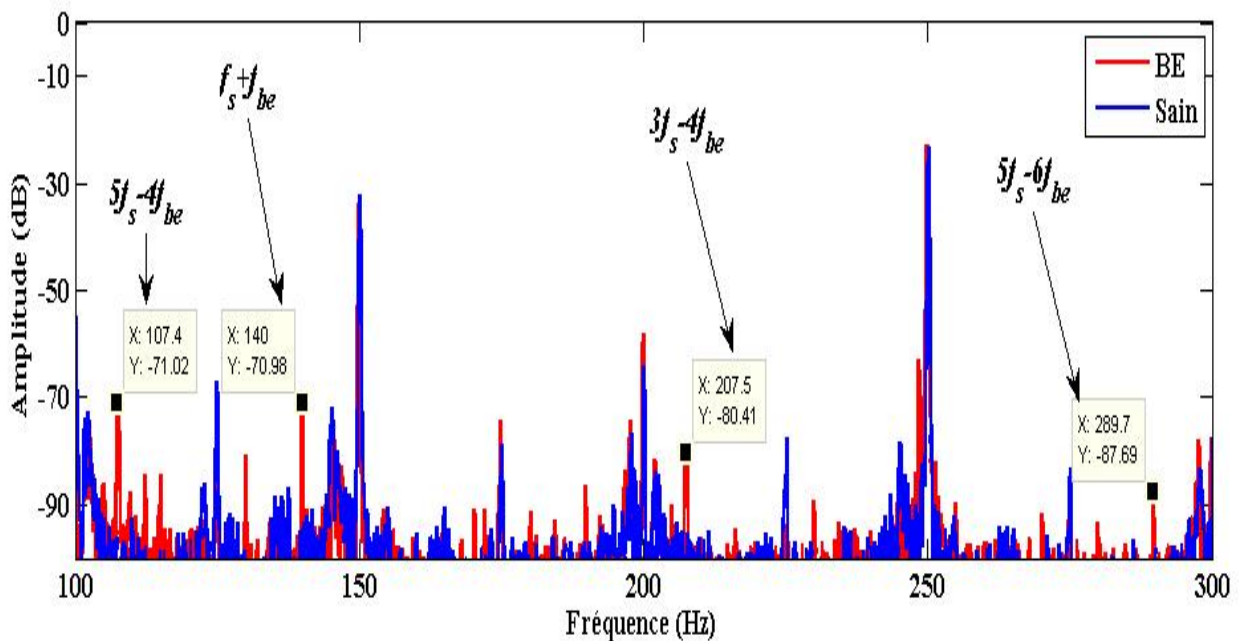


Figure (III.3) : Spectre du courant statorique (BE, à vide) ; 100-300Hz

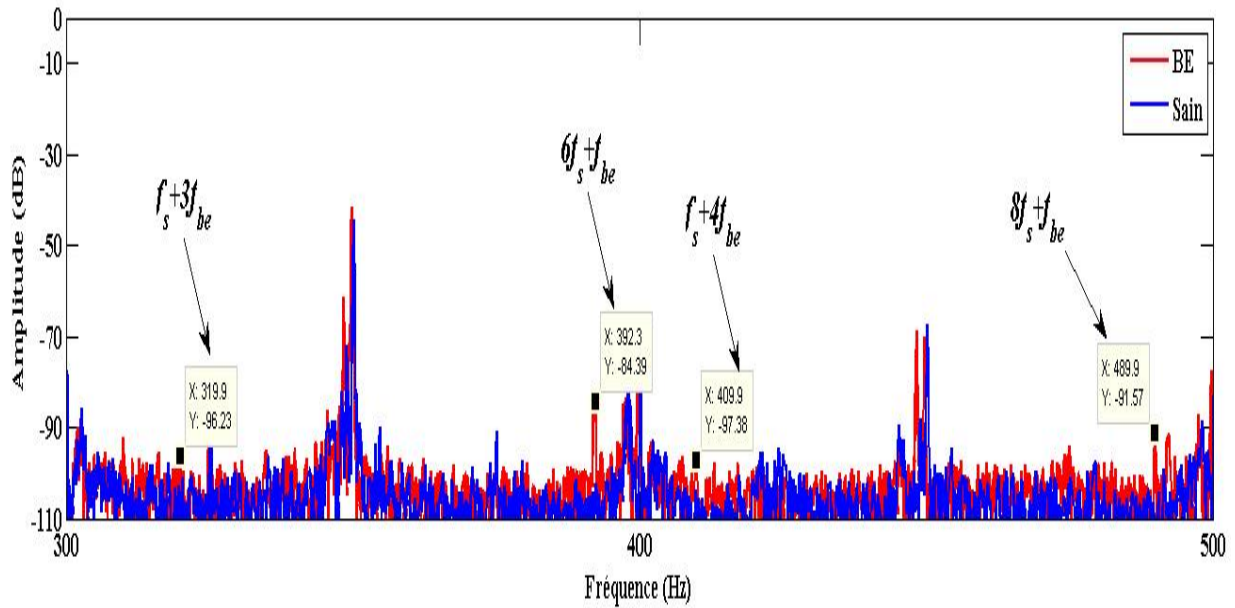


Figure (III.4) : Spectre du courant statorique (BE, à vide) ; 300-500Hz

III.3.1.2. Fonctionnement en charge (BE, $C_e = 20 \text{ Nm}$)

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 :

Les valeurs des fréquences caractéristiques calculées en se basant sur les formules (III.1) et (III.2) avec $p = 2$ et $f_r = 24.1$

Alors,

$$f_{be} = 0.4 \times N_b \times f_r = 0.4 \times 9 \times 24.1 = 86.76 \text{ Hz}$$

$$f_{car_be} = |\gamma \times f_s \pm k \times f_{be}| = |\gamma \times 50 \pm k \times 86.76|$$

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

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

On peut résumer un ensemble des valeurs de fréquences trouvées par calcul dans le tableau ci-dessous.

Tableau (III.2) : Fréquences caractéristiques du défaut de roulement de la bague extérieure (fonctionnement en charge).

f_{car_be} (Hz)	Fréquence calculée (Hz)	Fréquence trouvée (Hz)	Amplitude (dB)
$ 1 \times 50 - 1 \times 86.76 $	36.76	40.7	-69.13
$ 3 \times 50 - 1 \times 86.76 $	63.24	59.2	-75.86
$ 7 \times 50 - 6 \times 86.76 $	170.56	169	-97.15
$ 3 \times 50 - 4 \times 86.76 $	197.04	198	-80.2
$ 1 \times 50 - 3 \times 86.76 $	210.28	210.1	-97.58
$ 3 \times 50 + 1 \times 86.76 $	236.76	236	-78.92
$ 1 \times 50 + 3 \times 86.76 $	310.28	310	-90.67
$ 5 \times 50 + 1 \times 86.76 $	336.76	336	-76.66
$ 5 \times 50 - 7 \times 86.76 $	357.32	357.5	-98.61
$ 3 \times 50 + 3 \times 86.76 $	410.28	410.9	-100.5
$ 7 \times 50 + 1 \times 86.76 $	436.76	437.3	-101.8

La figure (III.5) montre les fréquences caractéristiques du défaut de la bague extérieure dans la bande fréquentielle de 0 – 100 Hz sous un fonctionnement en charge.

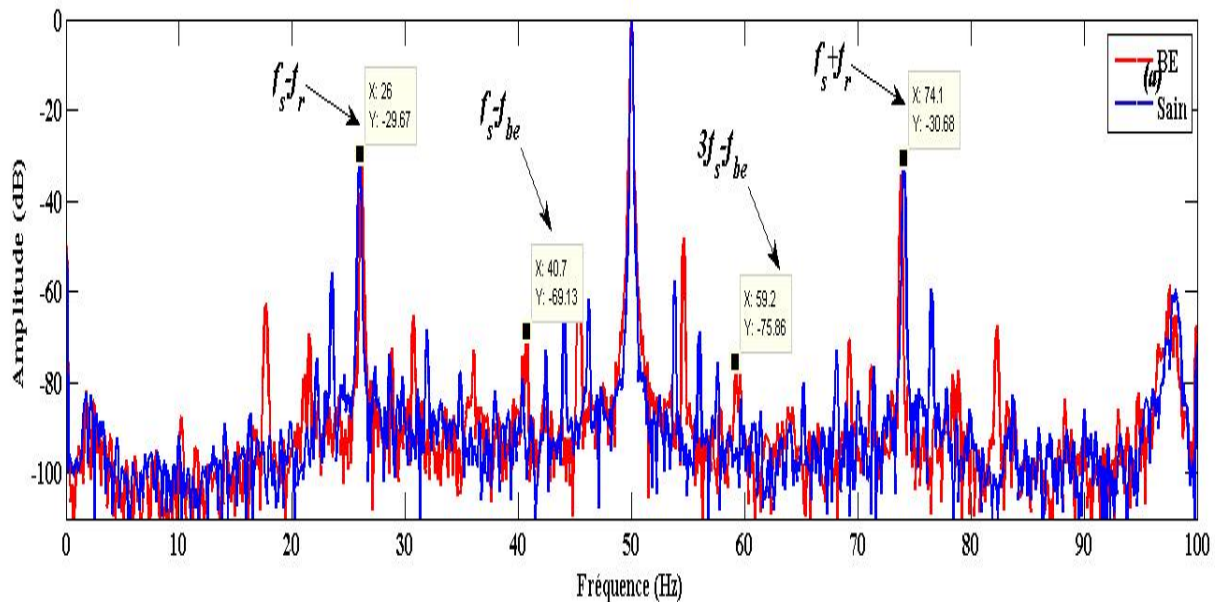


Figure (III.5) : Spectre du courant statorique (BE, en charge) ; 0-100Hz.

Les figures (III.6) et (III.7) représentent les fréquences additionnelles dans le spectre du courant statorique.

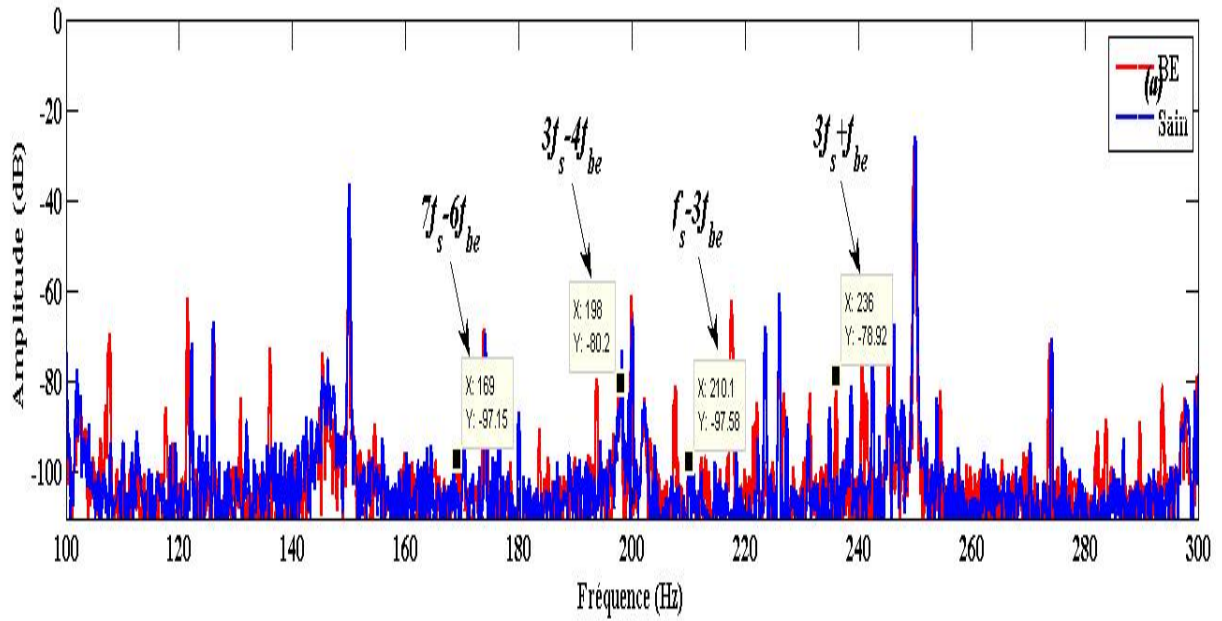


Figure (III.6) : Spectre du courant statorique (BE, en charge) ; 100-300Hz.

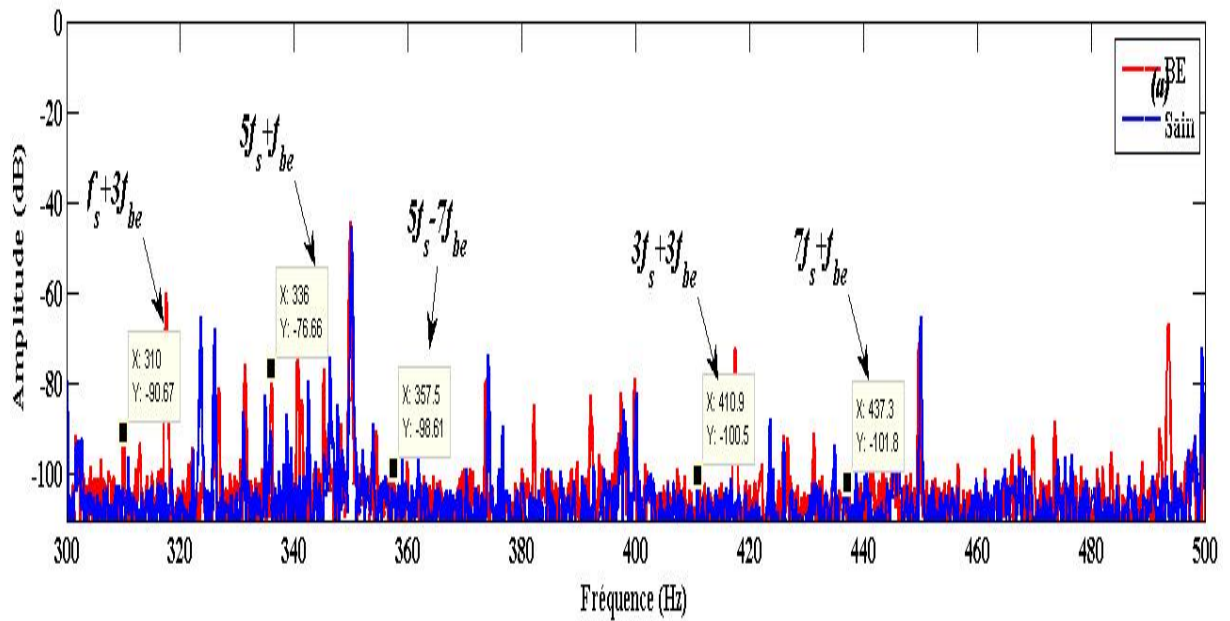


Figure (III.7) : Spectre du courant statorique (BE, en charge) ; 300-500Hz.

On peut remarquer dans les figures précédentes, sur les spectres de courant statorique en présence d'un défaut de roulement de la bague extérieure, l'apparition de raies harmoniques à des fréquences caractéristiques des défauts bague externe. En plus, notons que toutes les combinaisons possibles des fréquences caractéristiques existent. En conséquence, le contenu spectral du courant du stator se déplace pour les deux fonctionnements : à vide et en charge relatif, même, aux défauts de roulements. Notons aussi que la détection des défaillances de la bague externe des roulements pourrait se faire via l'analyse du contenu spectral du courant statorique.

III.3.2. Analyse du défaut de roulement de la bague intérieure

III.3.2. 1. Fonctionnement à vide (BI, $C_e = 0$ Nm)

Lors de la rotation d'un roulement présentant un défaut mécanique, il se produit des chocs entraînant des vibrations. La répétition périodique de ces à-coups de couple dans le temps induit des oscillations du couple de charge. La figure (III.8) montre, sur une plage fréquentielle réduite du spectre du courant statorique avec une comparaison du contenu harmonique pour une machine saine et pour une machine équipée d'un roulement présentant un défaut localisé sur la bague interne. La vitesse de rotation est nominale, soit proche de 25Hz.

La formule qui définit les fréquences supplémentaires du défaut dans la bague interne s'écrit comme suit :

$$f_{car_BI} = |K \times f_s \pm 0.6 \times N_b \times f_r| \quad (III.4)$$

$$f_r = \frac{(1-g) \times f_s}{p}$$

On a

$$f_{car_BI} = |K \times f_s \pm 0.6 \times N_b \times f_r| = |K \times 50 \pm 0.6 \times 9 \times 25|$$

$$f_{car_BI} = |K \times 50 \pm 135|$$

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

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

Tableau (III.3) : Fréquences caractéristiques du défaut de roulement de la bague intérieure dans le cas du fonctionnement à vide de la MAS.

f_{car_BI} (Hz)	Fréquence calculée (Hz)	Fréquence trouvée (Hz)	Amplitude (dB)
$ 1 \times 50 - 135 $	85	84.6	-63.26
$ 2 \times 50 - 135 $	35	35.1	-83.47
$ 3 \times 50 - 135 $	15	15.4	-68.3
$ 4 \times 50 - 135 $	65	65	-83.47
$ 5 \times 50 - 135 $	115	115.5	-74.38
$ 6 \times 50 - 135 $	165	165.4	-90.4
$ 1 \times 50 + 135 $	185	184.6	-66.42
$ 3 \times 50 + 135 $	285	284.4	-91.95
$ 4 \times 50 + 135 $	335	335.1	-98.78
$ 5 \times 50 + 135 $	385	385	-95.2
$ 6 \times 50 + 135 $	435	434.2	-99.62
$ 7 \times 50 + 135 $	485	485	-98.95

Pour bien clarifier la correspondance des fréquences théoriques avec celles-ci trouvées pratiquement. Le spectre présenté dans la figure (III.8) montre les fréquences caractéristiques supplémentaires liées au défaut de la BI.

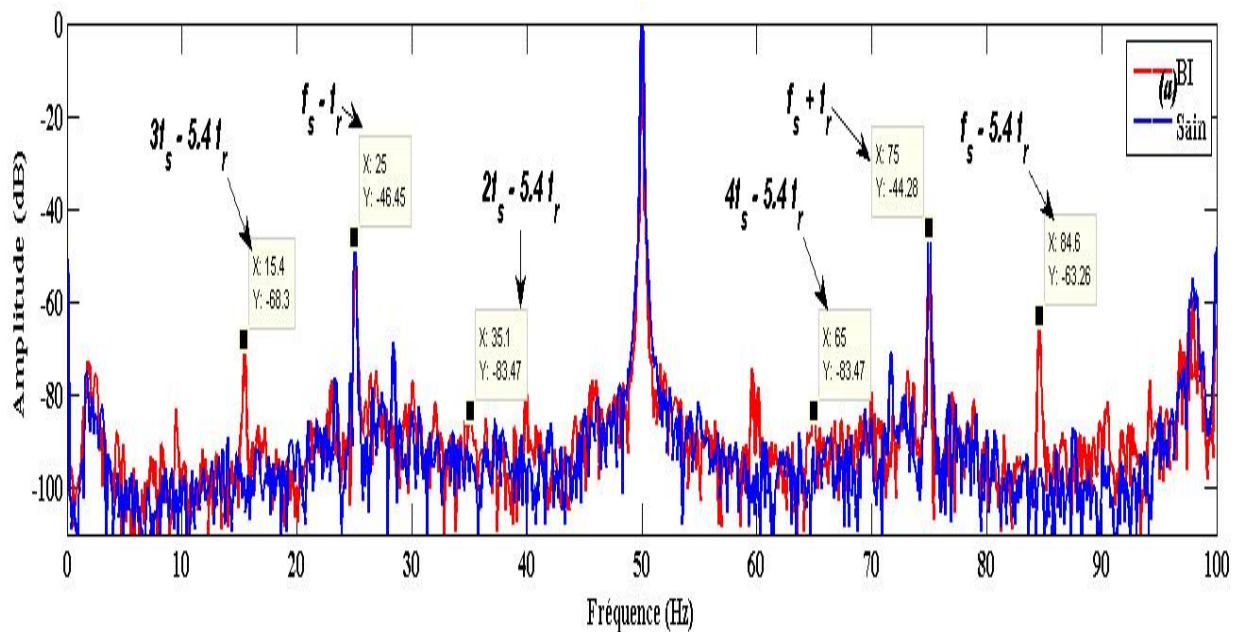


Figure (III.8) : Spectre du courant statorique (BI, à vide) ; 0-100Hz.

Les figures (III.9) et (III.10) représentent les fréquences additionnelles causées par une bague intérieure.

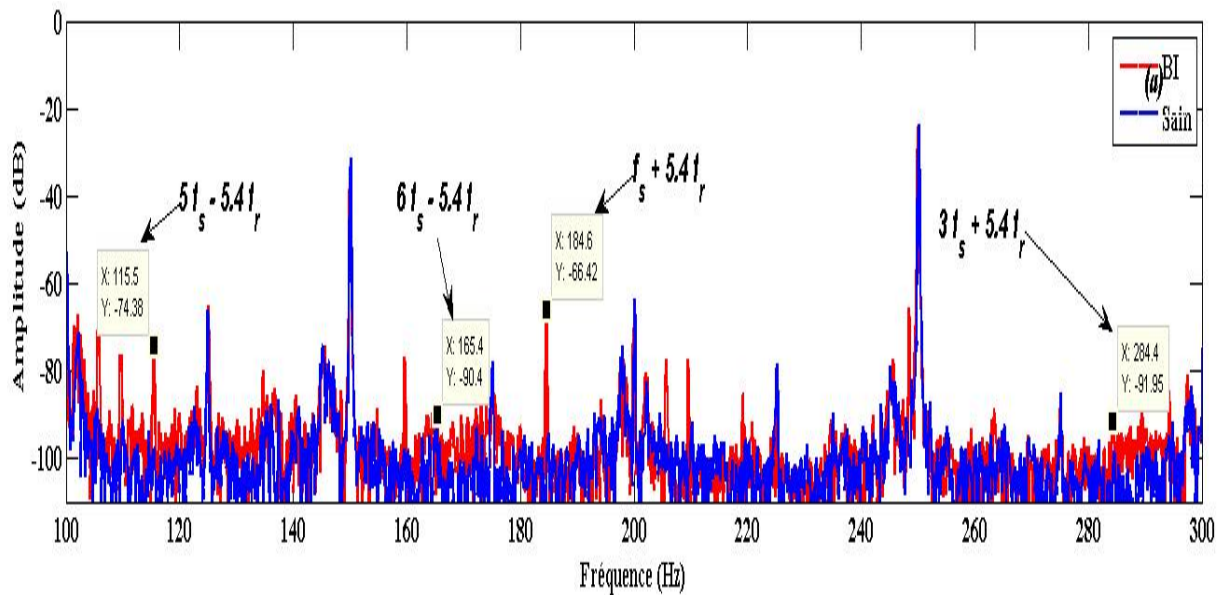


Figure (III.9) : Spectre du courant statorique (BI, à vide) ; 100-300Hz

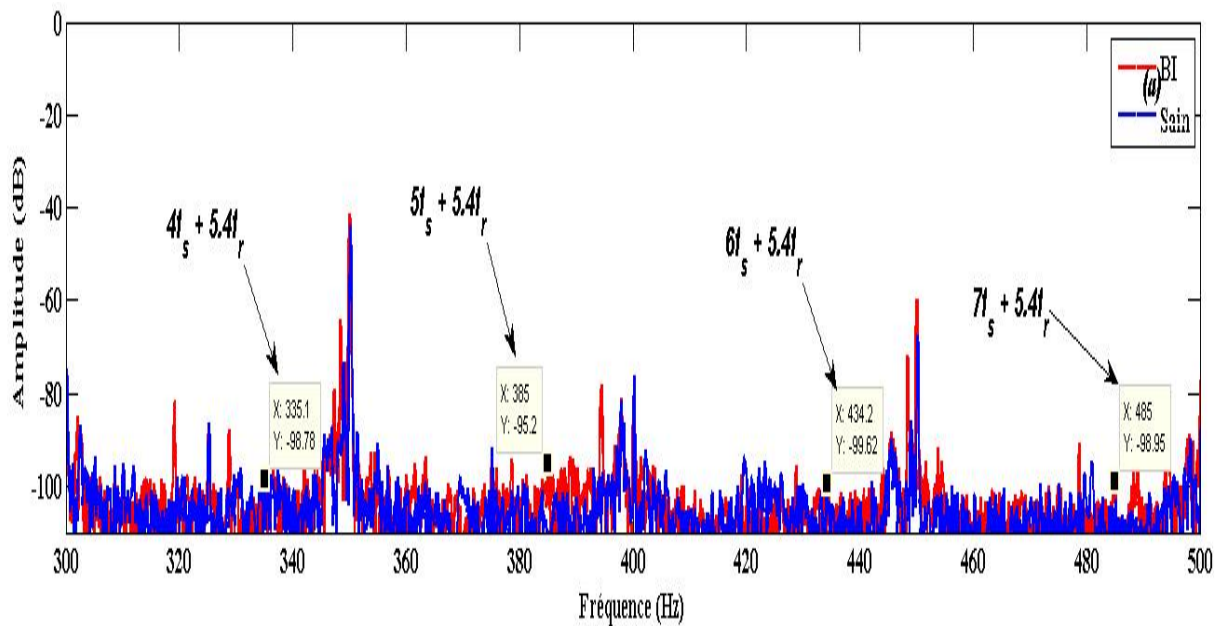


Figure (III.10) : Spectre du courant statorique (BI, à vide) ; 300-500Hz

L'apparition des défauts de roulements peut donc être repérée en analysant les composantes fréquentielles de f_{car_BI} dans le spectre du courant. Une connaissance plus approfondie de paramètre du roulement est nécessaire pour caractériser le système en vue de son diagnostic.

III.3.2.2. Fonctionnement en charge (BI, Ce = 20 Nm)

La variation de la charge impose un changement du glissement. Pour cela, on fait le calcul de la nouvelle valeur du f_r comme suit :

$$f_r = \frac{(1-g) \times f_s}{p}$$

On a

$$f_s - f_r = 25.9\text{Hz} \Rightarrow f_r = 24.1$$

Donc,

$$f_{\text{car_bl}} = |K \times f_s \pm 0.6 \times N_b \times f_r| = |K \times 50 \pm 0.6 \times 9 \times 24.1|$$

$$f_{\text{car_bl}} = |K \times 50 \pm 130.14|$$

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

Un tableau récapitulatif de quelques valeurs théoriques et pratiques est présenté ci-dessous.

Tableau (III.4) : Fréquences caractéristiques du défaut de roulement de la bague intérieure dans le cas du fonctionnement en charge de la MAS.

$f_{\text{car_bl}}$ (Hz)	Fréquence calculée (Hz)	Fréquence trouvée (Hz)	Amplitude (dB)
$ 1 \times 50 - 130.14 $	80.1	80.1	-91.93
$ 2 \times 50 - 130.14 $	30.14	30.8	-74.53
$ 4 \times 50 - 130.14 $	69.86	69.2	-82.97
$ 5 \times 50 - 130.14 $	119.86	120.3	-98.17
$ 6 \times 50 - 130.14 $	169.86	169.2	-90.81
$ 2 \times 50 + 130.14 $	230.14	231.5	-82.04
$ 3 \times 50 + 130.14 $	280.14	279.3	-98.99
$ 9 \times 50 - 130.14 $	319.86	320.2	-99.82
$ 11 \times 50 - 130.14 $	419.86	419.5	-105.9
$ 6 \times 50 + 130.14 $	430.14	431.4	-95.21
$ 7 \times 50 + 130.14 $	480.14	480.3	-104

La figure (III.11) montre les fréquences caractéristiques du défaut de la bague intérieure pour une plage fréquentielle de 0 – 100 Hz.

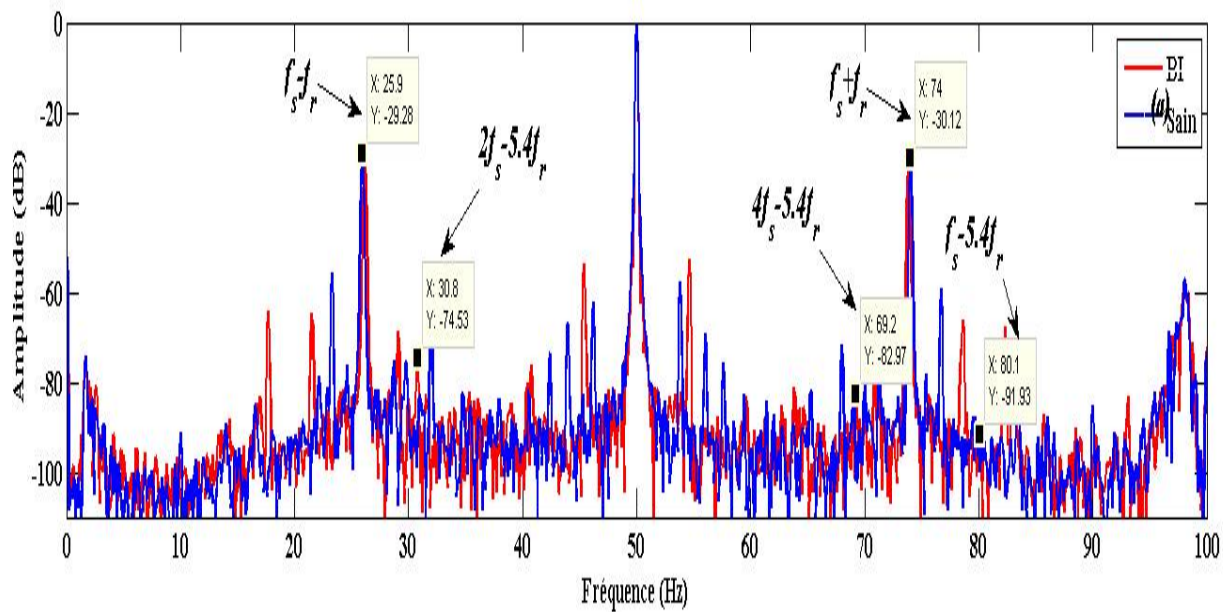


Figure (III.11) : Spectre du courant statorique (BI, en charge) ; 0-100Hz.

Les figures (III.12) et (III.13) représentent quelques fréquences caractéristiques de la bague intérieure.

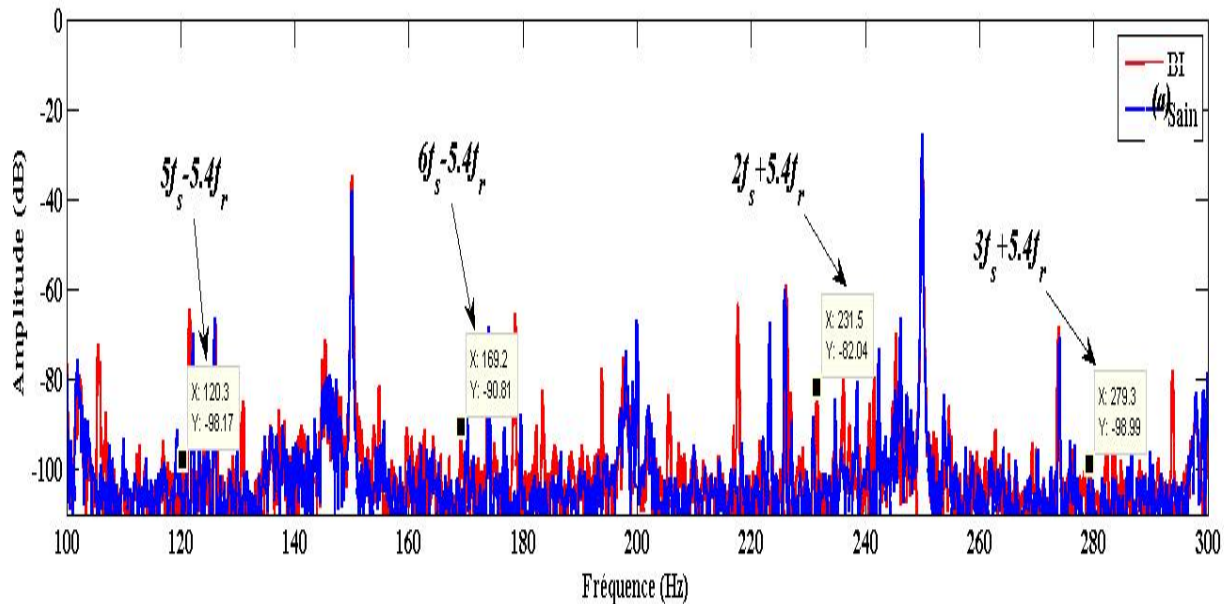


Figure (III.12) : Spectre du courant statorique (BI, en charge) ; 100-300Hz.

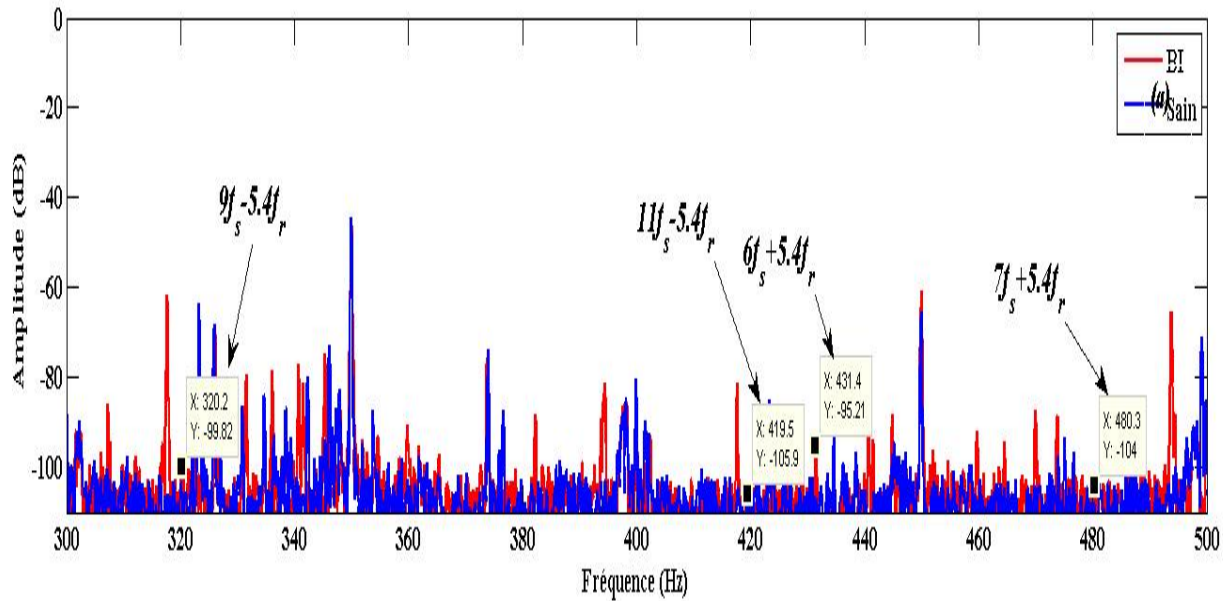


Figure (III.13) : Spectre du courant statorique (BI, en charge) ; 300-500Hz

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la faisabilité de la détection de défauts de roulements dans une machine asynchrone par l'analyse des courants statoriques.

D'après cette analyse, on a conclut que la technique d'analyse de spectre du courant statorique est un outil adéquat qui permet de distinguer entre le cas du moteur sain et un autre moteur défectueux. En cas du défaut, on peut identifier la nature des défauts par la localisation des harmoniques caractéristiques du défaut.

Les raies des harmoniques sont les plus adaptées à être prises comme moyen de détection des défauts de roulement lorsqu'en comparant les deux états de la machine.

Conclusion

générale

Conclusion générale

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

Dans la première partie nous avons commencé par une identification des défauts possibles rencontrés dans le moteur asynchrone, et les différentes techniques appliquées au diagnostic des machines asynchrones.

La deuxième partie, on s'est intéressé à citer les modèles du moteur asynchrone triphasé.

La modélisation présentée est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ce qui permet de dire que ces modèles restent insuffisants pour décrire le comportement réel de la machine, mais ils peuvent constituer en général une approche globale acceptable dans la plus part de fonctionnements normaux des MAS. Pour cela, on trouve un autre modèle qui prend en considération la structure réelle de la MAS qui s'appelle le modèle des éléments finis.

Nous avons présenté aussi des notions génériques 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. Nous avons vu que les modes de dégradation pouvaient se combiner au long du fonctionnement des roulements. Nous avons également étudié quelques caractéristiques cinématiques correspondant au comportement vibratoire dues aux roulements.

L'analyse du défaut de la bague extérieur (BE) et la bague intérieur (BI) du roulement se base par la méthode de la MCSA. Cette technique de diagnostic, est une approche très prometteuse, vu que ses principaux atouts résident dans l'instrumentation employée, la facilité de sa mise en œuvre ainsi que la richesse d'informations qu'elle procure sur l'état du moteur.

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

Bibliographie

Bibliographie

[1] RADOUANE BOUSSEKSOU.

«Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic».
Mémoire de magister En Electrotechnique. Université Mentouri Constantine 2007.

[2] OLIVIER ONDEL

«Diagnostic par reconnaissance des formes : application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone»
Thèse de doctorat. L'école centrale de Lyon 2006.

[3] NOUREDDINE BESSOUS

«Contribution au diagnostic des machines asynchrones».
Mémoire de magister En Electrotechnique. Université Mentouri Constantine 2007.

[4] ALI IBRAHIM

« Contribution au diagnostic de machines électromécaniques »
Thèse de doctorat, université de saint Etienne Mars 2009.

[5] HARIR MILOUD

«Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée»
Mémoire de magister En Commande électrique. Université Mohamed BOUDIAF 2009.

[6] ISHAK GEORGES

«Détection des défauts mécaniques par des indicateurs de cyclostationnarité»
Mémoire de master 2 En Technologie des Systèmes Médicaux et Industriels. Ecole doctorale des sciences et de technologie université libanaise juillet 2013.

[7] BECHIR BADRI¹, MARC THOMAS¹ ET SADOK SASSI²

«Un simulateur virtuel de défauts de roulements»

¹ Département de génie mécanique, École de technologie supérieure, Montréal

² Faculty of Engineering, Sohar university, PO Box 44, Postal code 311, Sohar, Sultanate of OMAN

[8] LANDOLSI FOUED

«Surveillance des machines par analyse vibratoire»
Cours de techniques de surveillance.

[9] MERABET HICHEM

«Surveillance et détection de défaut d'une machine a induction»

Mémoire de magister En Commande électrique. Université BADJI Mokhtar ANABA 2009.

[10] ROLAND CASIMIR

«Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes»

Thèse de doctorat en génie électrique. L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON 2003.

[11] AHMED HAMIDA BOUDINAR, NOUREDDINE BENOZZA, AZEDDINE BENDIABDELLAH

«Diagnostic des défauts de roulements d'un moteur asynchrone»

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Laboratoire de Développement des Entraînements Electriques

[12] CITE ENERGIE

«Le moteur asynchrone»

Efficacité énergétique des bâtiments tertiaire.

[13] HUBERT RAZIK

«Le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de défaillance»

GREEN-UHP ; Faculté des Sciences, BP 239 ; 54 506 Vandoeuvre-Lès-Nancy, CEDEX

Mémoire de Fin d'Études
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Commande Electrique

Proposé et dirigé par : Monsieur. BESSOUS Nouredine

Présenté par : BELAHAMMOU Abdelhak
BENINE Abderrezak

Thème :

Diagnostic des défauts des roulements dans les machines
asynchrones par la méthode de la MCSA

Résumé :

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc. Cependant, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies.

Dans ce travail, et afin de détecter les défauts des roulements, on a utilisé la méthode d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA-FFT). Le principe de cette technique est basé sur: «L'analyse spectrale du courant statorique. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis) ».

Mots clés :

- Machine asynchrone.
- Diagnostic.
- Roulement.
- Analyse Spectrale du courant (FFT).

Thème

Diagnostic des défauts des roulements dans les machines asynchrones par la méthode de la MCSA

Résumé :

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc. Cependant, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses qui peuvent engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies.

Dans ce travail, et afin de détecter les défauts des roulements, on a utilisé la méthode d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA-FFT). Le principe de cette technique est basé sur: «L'analyse spectrale du courant statorique. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis) ».

Abstract:

Asynchronous motors the most used machine for the high powers domains to few kilowatts because it presents many advantages as its heavy power, robust, easy to implement and its low cost...etc.

Although the asynchronous machine has the reputation of being robust, it may presents as any other electrical machine, an electrical and mechanical failures. Also in the raisin of the important consequences and costs which may cause the appearance of a defect on the industrial processes, because of these faults diagnostic has been more focus over the last two decades.

In this work, and to detect the bearings faults we shall use the motor current signature analysis in the help of the Fast Fourier Transform(FFT).The principal of this technical is based on the spectral analysis of the stator current, which is known under the abbreviation MCSA.