



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de la Technologie

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

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Technologie
Filière : Génie Électrique
Spécialité : Commande Electrique

Thème

**Contribution au diagnostic des défauts
rotoriques dans les machines asynchrones
à cage d'écureuil par la méthode de la
(MCSA)**

Réalisé par :

HAMMI Sami

BENARABI Adel

Encadré par :

Dr. BESSOUS Nouredine

Soutenu en juin 2018

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui ont passés leur vie
rêvant de voir ce jour-ci, à ceux qui m'ont entourés d'amour et de
tendresse, à:*

*Au la fleur de ma vie... ma très chère mère en témoignage de
ma profonde et ma grande reconnaissance pour sa tendresse, sa
patience, son sacrifice tout au long de mes études.*

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

Au mes très chers frères

Au mes très chers sœurs

A toute ma famille

A mes très chers amis.

HAMMI Sami

Dédicace

A mes parents

A ma femme

A ma petite fille "Hadil "

A mes frères et soeurs

.....

(BENARABI ADEL)

REMERCIEMENTS

C'est à mon Dieu que j'adresse en premier lieu mes remerciements.

*Nous tenons à exprimer nos remerciements et gratitude à notre encadreur : **Dr. BESSOUS Noureddine** (Docteur à l'université d'El oued) pour ses aides et pour ses encouragements sincères pour la finalisation de ce mémoire.*

HAMMI Sami

BENARABI Adel

-ملخص-

إن الآلة اللامتزامنة لها نسبة معتبرة من الإستعمال مقارنة بباقي الأنواع لذلك فإن حمايتها وصيانتها وكذا اكتشاف أعطابها يعتبر من أهم الأبحاث.

يضمن هذا العمل دراسة تجريبية ومحاكاة تكسر القضبان في القفص الدوار في الماكينة الكهربائية اللامتزامنة، وذلك باستخدام تقنية التحليل الطيفي للتيار الكهربائي في الساكن، محاكاة تكسر القضبان في المحرك الحثي تهدف أساسا إلى التحقق من تأثير تكسر القضبان على السلوك الكهربائي للماكينة.

-Résumé-

Devant l'utilisation croissante de la machine asynchrone dans les divers domaines, les études en vue de la protection, la maintenance et de la détection des défauts est devenu l'un des plus importants axes de recherche.

Ce travail est consacré à l'étude expérimentale et à la simulation des cassures de barres dans la cage rotorique de la machine asynchrone triphasée en utilisant la technique d'analyse spectrale du courant statorique. La simulation des barres cassées dans la machine asynchrone a le but de vérifier l'effet de cassure de barres rotoriques sur le comportement électrique de la machine asynchrone.

- Abstract -

The asynchronous machine has a significant percentage of use compared to the rest machines, so the protection and maintenance as well as the discovery of defects are one of the most important researches.

This work is devoted to the experimental study and the simulation of broken rotor bars in the rotor cage of the three-phase asynchronous machine using the spectral analysis technique of the stator current. The simulation of the broken rotor bars in the asynchronous machine has the purpose of verifying the effect of rotor bar breaking on the electrical behaviour of the asynchronous machine.

SOMMAIRE

SOMMARE

Sommaire	VI
Liste des figures	X
Liste des symboles et abréviations	XIII
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

Chapitre I

GENERALITES SUR LE DIAGNOSTIQUE DES DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

I.1	Introduction	5
I.2	Notion sur la sûreté de fonctionnement	5
I.2.1	La Maintenance	5
I.2.2	La surveillance et le diagnostic	6
I.2.3	Défaillance et panne.....	7
I.3	Généralités sur la Machine Asynchrone (MAS).....	8
I.3.1	Constitution de la machine asynchrone	8
I.3.1.1	Stator	10
I.3.1.2	Rotor	11
I.3.1.2.1	Rotor Bobiné.....	11
I.3.1.2.2	Rotor à cage	12
I.3.1.3	Les paliers	12
I.3.2	Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone à cage.....	13
I.3.3	Différents types de défauts	14
I.3.3.1	Causes et conséquences des défauts	14
I.3.4	Les principaux défauts dans la machine asynchrone à cage	15
I.3.4.1	Défauts internes et externes.....	15
I.3.4.1.1	Les défauts statoriques	18
I.3.4.1.1.1	Défauts d'isolant dans un enroulement.....	18
I.3.4.1.1.2	Court-circuit entre spires	19
I.3.4.1.1.3	Court-circuit entre phases.....	19

I.3.4.1.1.4	Court-circuit phase/bâti	19
I.3.4.1.2	Défauts rotoriques	20
I.3.4.1.2.1	Défaut de rupture de barres ou d'anneau de la cage rotorique.....	21
I.3.4.1.2.2	Ruptures d'anneaux	22
I.3.4.1.2.3	Dissymétrie du rotor (excentricité).....	22
I.3.4.1.2.4	Défauts de roulement à billes.....	23
I.4	Les méthodes de diagnostic des défauts dans la (MAS).....	25
I.4.1	Diagnostic par les analyses chimiques.....	25
I.4.2	Diagnostic par analyse de la température.....	25
I.4.3	Méthodes basées sur l'intelligence artificielle.....	26
I.4.4	Diagnostic par identification paramétrique.....	26
I.4.5	Méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse spectrale des signaux.....	27
I.4.5.1	Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques.....	27
I.4.5.2	Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite.....	28
I.4.5.3	Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites.....	29
I.4.5.4	Diagnostic par mesure du couple électromagnétique.....	29
I.4.5.5	Diagnostic par mesure de la puissance instantanée.....	29
I.4.5.6	Diagnostic par analyse des courants statorique.....	29
I.5	Conclusion.....	31

Chapitre II

APERÇU SUR LA TECHNIQUE DE LA(MCSA)

II.1	Introduction	33
II.2	Technique de diagnostic (MCSA)	33
II.2.1	Analyse spectrale	33
II.2.1.1	Principe	33
II.2.1.2	Spectre d'un signal	34
II.2.1.2.1	Définition d'un signal.....	34
II.2.1.2.2	Définition de spectre d'un signal.....	34
II.2.2	Analyse spectrale de courant statorique(MCSA).....	34
II.2.2.1	Définitions	34

II.2.2.2	Technique de(FFT).....	36
II.2.2.3	Surveillance du moteur asynchrone basée sur la technique de(MCSA)...	36
II.3	Signatures spectrales des défauts dans le spectre du courant statorique..	37
II.3.1	Défauts rotoriques.....	37
II.3.1.1	Excentricité.....	38
II.3.1.1.1	L'excentricité statique.....	38
II.3.1.1.2	L'excentricité dynamique.....	38
II.3.1.1.3	L'excentricité mixte.....	38
II.3.2	Défauts au niveau des roulements.....	39
II.3.3	Cassure de barres.....	41
II.4	Conclusion	42

Chapitre III

ANALYSE ET DISCUSSION DU DEFAUT DE LA CASSURE DE BARRE

III.1	Introduction	44
III.2	Ruptures de barres dans les machines asynchrones.....	44
III.3	Banc d'essai	44
III.3.1	Résultats et discussion de la cassure de barres	45
III.3.1.1	Fonctionnement à vide	46
III.3.1.2	Fonctionnement en charge	49
III.4	Conclusion	55
	Conclusion générale	57
	Bibliographique	58
	Annexe	63

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur le diagnostic des défauts de la machine asynchrone

<i>Figure (I.1) :</i>	Diagramme des différents concepts de maintenance.....	6
<i>Figure (I.2) :</i>	Surveillance d'un système quelconque	7
<i>Figure (I.3) :</i>	Machine asynchrone(MAS).....	8
<i>Figure (I.4) :</i>	Structure de la machine asynchrone à cage.....	9
<i>Figure (I.5) :</i>	Les déferant composant de la machine asynchrone à cage.....	9
<i>Figure (I.6) :</i>	Coup schématique de la constitution du stator.....	10
<i>Figure (I.7) :</i>	Rotor Bobiné d'une MAS.....	11
<i>Figure (I.8) :</i>	Coup schématique de la constitution du Rotor.....	12
<i>Figure (I.9) :</i>	Simplifier le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.....	13
<i>Figure (I.10) :</i>	Causes internes des défauts de la MAS triphasée à cage.....	16
<i>Figure (I.11) :</i>	Causes externes des défauts de la MAS triphasée à cage.....	17
<i>Figure (I.12) :</i>	Différents défauts statoriques concerne le court-circuit.....	20
<i>Figure (I.13) :</i>	Présence la cassure de barre dans le rotor de la MAS.....	21
<i>Figure (I.14) :</i>	Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.....	22
<i>Figure (I.15) :</i>	Type d'excentricité : Rotor concentré (a) ; Excentricité statique(b) ; Excentricité dynamique(c).....	23
<i>Figure (I.16) :</i>	Architecture d'un roulement rigide à billes	25
<i>Figure (I.17) :</i>	Mesure vibratoire de la MAS	28
<i>Figure (I.18) :</i>	Mesure du flux axial.....	28
<i>Figure (I.19) :</i>	Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique	30

Chapitre II: Aperçu sur la technique de la MCSA

<i>Figure (II.1) :</i>	Principe de la surveillance par analyse spectrale.....	34
<i>Figure (II.2) :</i>	Dimension du roulement à bille.....	40

Chapitre III : Analyse et discussion du défaut de la cassure de barres

<i>Figure (III.1) :</i>	Photo du banc d'essai dédié à l'analyse au diagnostic.....	45
<i>Figure (III.2) :</i>	Photographie des rotors de la MAS de 3 kW pour une barre cassée (gauche) et avec deux barres cassées (droite).....	46
<i>Figure (III.3) :</i>	Courant statorique en fonction du temps ($g=0\%$, 1BC).....	47
<i>Figure (III.4) :</i>	Courants statoriques du moteur asynchrone à l'état sain (à vide.)	47
<i>Figure (III.5) :</i>	Courants statoriques du moteur asynchrone avec 1BC (à vide).....	47
<i>Figure (III.6) :</i>	Spectre du courant statorique avec 1BC (à vide).....	47
<i>Figure (III.7) :</i>	Zoom de spectre du courant statorique à l'état sain (à vide).....	48
<i>Figure (III.8) :</i>	Zoom de spectre du courant statorique avec 1BC (à vide)	48
<i>Figure (III.9) :</i>	Les fréquences correspondent aux ordres 5et7 à l'état sain (à vide).....	48
<i>Figure (III.10) :</i>	Fréquences qui correspondent aux ordres 5et7 avec 1BC (à vide).....	49
<i>Figure (III.11) :</i>	Courant statorique en fonction du temps ($g= 3.6\%$, 1BC).....	49
<i>Figure (III.12) :</i>	Courants statoriques du moteur asynchrone à l'état sain (en charge).....	50
<i>Figure (III.13) :</i>	Courants statoriques du moteur asynchrone avec 1BC (en charge).....	50
<i>Figure (III.14) :</i>	Spectre du courant statorique avec 1BC (en charge).....	50
<i>Figure (III.15) :</i>	Zoom de spectre du courant statorique à l'état sain (en charge).....	51
<i>Figure (III.16) :</i>	Zoom de spectre du courant statorique avec 1BC (en charge).....	51
<i>Figure (III.17) :</i>	Fréquences correspondent aux ordres 5et7 à l'état sain (en charge).....	51
<i>Figure (III.18) :</i>	Fréquences qui correspondent aux ordres 5et7 avec 1BC (en charge)....	52
<i>Figure (III.19):</i>	Courant statorique en fonction du temps ($g= 3.6\%$, 2BC).....	52
<i>Figure (III.20) :</i>	Spectre du courant statorique avec 2BC (en charge).....	53
<i>Figure (III.21) :</i>	Spectre du courant statorique avec 2BC (en charge).....	53
<i>Figure (III.22) :</i>	Fréquences qui correspondent aux ordres 5et7 avec 2BC (en charge)...	53
<i>Figure (III.23) :</i>	Amplitudes des composantes fréquentielles.....	55

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : Aperçu sur la technique de la MCSA

II.1 :	Signature spectrale.....	41
---------------	--------------------------	----

Chapitre II : Analyse et discussion du défaut de la cassure de barres

III.1 :	Récapitulation des raies dans le spectre du courant statorique 1BC ,2BC...	54
----------------	--	----

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATION

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATION

p :	Nombre de pair de pôles.
f_s :	Présente la fréquence de courant de stator.
f_{ext} :	Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité.
f_e :	Fréquence d'échantionnage.
i_{sa} :	Courant statorique.
f_{rot} :	Fréquence de rotation du rotor.
f_{brc} :	Fréquence caractéristique du défaut de barres cassées.
f_v :	Fréquences caractéristiques des vibrations.
f_{roul} :	Fréquence caractéristique du défaut de roulement.
$f_{b.ext}$:	La fréquence caractéristique d'un défaut au niveau de la bague extérieure du roulement.
f_b :	Fréquence caractéristique d'un défaut au niveau d'une bille du roulement.
$f_{b.int}$:	Fréquence caractéristique d'un défaut au niveau bague intérieure du roulement.
K :	Nombre entier.
g :	Glissement.
B :	L'induction magnétique.
n_s :	Vitesse du champ tournant .
N_e	Nombre d'encoches rotoriques.
n_d :	Ordre de l'excentricité dynamique.
n_w :	L'ordre de l'harmonique de la Fmm du stator.
n_b	Nombre d'éléments roulants.
BD :	Diamètre d'un élément roulant.
PD :	Distance entre les centres des billes diamétralement opposées.
β :	L'angle du contact des billes avec les bagues du roulement.
F_{mm} :	La f orce m agnéto m otrice.
MAS :	M achine a synchrone.
$MCSA$:	M otor C urrent S ignal A nalys i s.
$ASCS$:	A nalys e de S ignat u re du C ourant S tatorique.
FFT :	F ast F ourier T ransform.
$LGEB$:	L aboratoire du G énie E lectrique à B iskra.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Ce travail entre dans le cadre du diagnostic des défauts dans les machines électriques et spécialement le moteur asynchrone à cage d'écureuil. Le moteur asynchrone à cage est un composant clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa grande robustesse et son faible coût. Il est en effet, omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,... Malgré le fait que la machine asynchrone à cage soit réputée pour être la plus robuste des machines électriques, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent affecter la durée de vie de celle-ci en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables. Il est impératif donc de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats afin d'éviter les arrêts imprévus [1].

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.

A partir des grandeurs caractéristiques du fonctionnement des machines électriques, la mise en œuvre des méthodes décisionnelles permet de concevoir des systèmes de surveillance ou des algorithmes performants au service du diagnostic [2].

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

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur le diagnostic du défaut de cassure de la cassure de barres dans la machine asynchrone à cage d'écureuil 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).

Par ailleurs, les défauts ont un effet cumulatif, la rupture d'une barre se traduit par l'augmentation de la résistance équivalente de l'enroulement rotorique. Le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres à leurs tours seront surchargées, ce qui conduit à leurs futures ruptures jusqu'à l'arrêt de la machine. [3]

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.
- ✚ Le deuxième chapitre sera présentera quelques notions sur la méthode la plus couramment appliqués au diagnostic de la machine asynchrone.
- ✚ Dans le troisième chapitre, on va analyser et discuter les résultats obtenus pour un défaut de la cassure de barres. Dans ce chapitre, on va comparer entre le fonctionnement du moteur sain et défectueux.

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

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LE

DIGNOSTIC DES DÉFAUTS

DE LA MACHINE

ASYNCHRONE

Chapitre I

GENERALITES SUR LE DIAGNOSTIQUE DES DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

I.1_Introduction

Le moteur asynchrone est le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de son faible coût, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité.

Nous présenterons dans ce chapitre un ensemble des notions de base concernant les activités de diagnostic. Tout d'abord, nous allons explorer les différents constituants de la machine asynchrone à cage d'écureuil, puis nous évoquerons essentiellement les divers défauts qui peuvent affecter ces constituants. Nous découvrirons par la suite les différentes méthodes utilisées pour la détection des défauts.

I.2_Notion sur la sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement peut être définie par l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Elle est scientifiquement caractérisable par l'étude statique et dynamique des systèmes du point de vue prévisionnel, opérationnel et expérimental, en tenant compte des aspects de probabilités et de conséquences liées aux défaillances. La démarche "sûreté de fonctionnement" s'appuie sur quelques notions de base, qui se sont précisées au cours de l'évolution de cette discipline, et qui continuent à s'affiner. La sûreté de fonctionnement possède, comme toute science, ses propres concepts terminologiques. Parcourir ce vocabulaire de base est donc une introduction nécessaire à cette discipline [4].

I.2.1_ La Maintenance

La notion de maintenance revêt une importance particulière dans le contexte de la sûreté de fonctionnement. Elle englobe en effet les concepts liés à la surveillance et au diagnostic auxquels nous nous intéressons plus particulièrement. Nous donnons ci-après quelques définitions relatives à ce terme [5].

- ❖ **Maintenance:** Ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise.

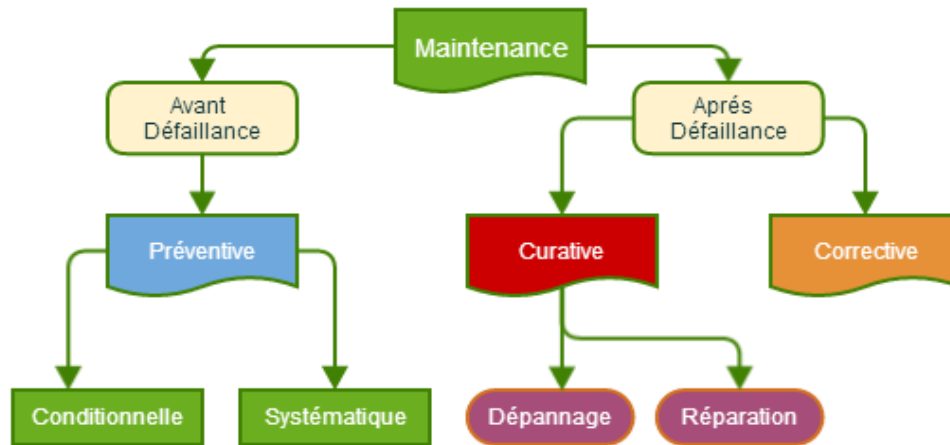


Figure (I.1) : Diagramme des différents concepts de maintenance [4].

- ❖ **Maintenance préventive:** Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre de dégradation du bien ou du service.
- ❖ **Maintenance corrective:** Ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien, ou la dégradation de sa fonction, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement. La maintenance corrective comprend en particulier : la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement.
- ❖ **Maintenance curative:** Activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. Ces activités peuvent être : des réparations, des modifications ou des améliorations ayant pour objet de supprimer la ou les défaillances.

I.2.2_ La surveillance et le diagnostic

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la fiabilité, la disponibilité et la sûreté des systèmes industriels. Les définitions de ces caractéristiques sont [6] :

Fiabilité: c'est l'aptitude d'un système à accomplir sa mission dans des conditions données d'utilisation.

Disponibilité: c'est l'aptitude d'un système à fonctionner lorsqu'on le sollicite.

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

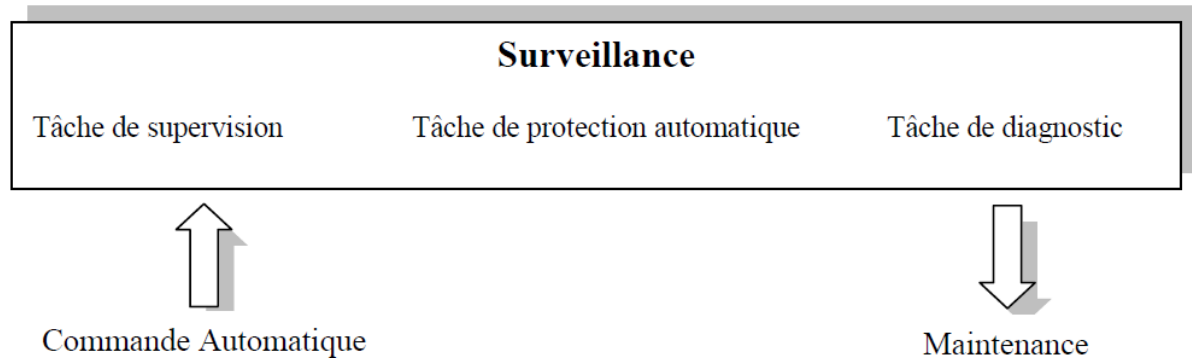


Figure (I.2) : Surveillance d'un système quelconque [4].

I.2.3_ Défaillance et panne

Enfin, pour finir ce parcours non exhaustif du vocabulaire lié à la sûreté de fonctionnement, il serait utile de définir avec précision les termes de défaillance et panne [5].

- ❖ **Défaillance:** cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Après défaillance d'une entité, cette entité est en état de panne. Une défaillance est un passage d'un état à un autre par opposition à une panne qui est un état.
- ❖ **Défaillance partielle:** défaillance à la suite de laquelle le bien ne peut accomplir qu'une partie des fonctions requises ou ne peut les accomplir qu'avec des performances limitées.
- ❖ **Défaillance complète:** défaillance qui entraîne l'inaptitude totale de l'entité à accomplir toutes les fonctions requises.
- ❖ **Panne:** état d'une entité inapte à accomplir une fonction requise dans des conditions données d'utilisation.
- ❖ **Panne complète:** panne résultant d'une défaillance complète.

Il est clair que dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation d'une entité à accomplir sa fonction, celle-ci est déclarée en panne. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une défaillance.

I.3_ Généralités sur la Machine Asynchrone (MAS)

Les moteurs asynchrones triphasés représentent plus de 80% du parc moteur électrique. Ils sont utilisés pour transformer l'énergie électrique en énergie mécanique grâce à des phénomènes électromagnétiques. C'est une machine robuste, économique à l'achat et ne nécessitant que peu de maintenance.

Le moteur asynchrone (ou moteur d'induction) permet la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique.

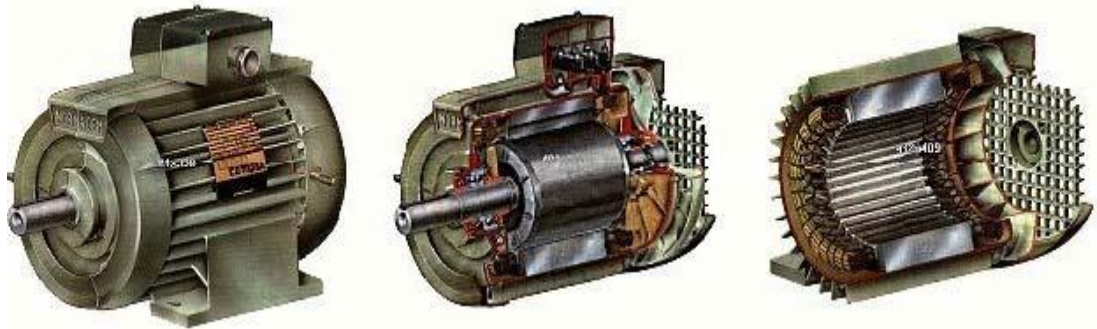


Figure (I.3) : Machine asynchrone (MAS) [5].

I.3.1_ Constitution de la machine asynchrone

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

En réalité, le moteur asynchrone triphasé à cage est un système très compliqué. Malgré cela, on peut le décomposer en trois sous-systèmes :

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

- Le rotor : c'est une partie tournante, qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- Les paliers : ce sont des organes mécaniques permettant la mise en rotation du rotor et assurant le maintien des différents sous-ensembles.

Il est à noter que chaque sous-système, cité ci-dessus est formé de plusieurs composants auxquels on attribue un ou plusieurs fonctions [7].

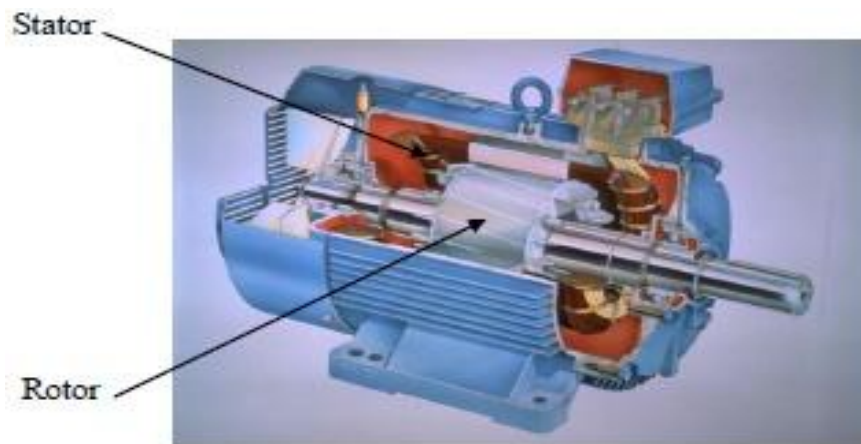


Figure (I.4) : Structure de la machine asynchrone à cage [3].

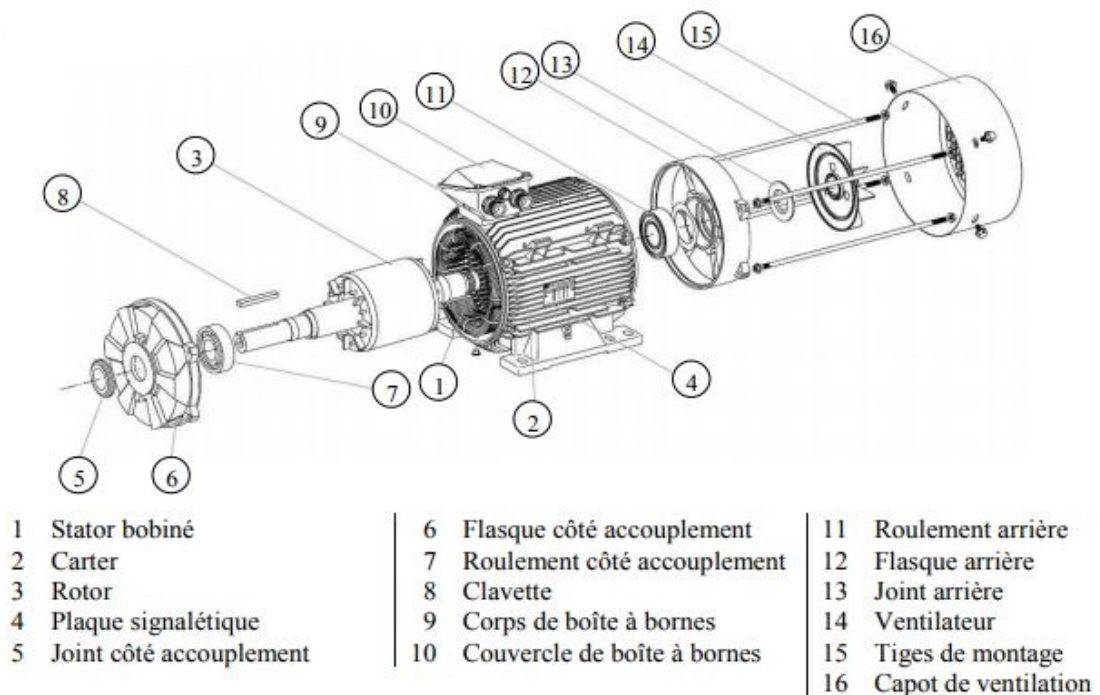
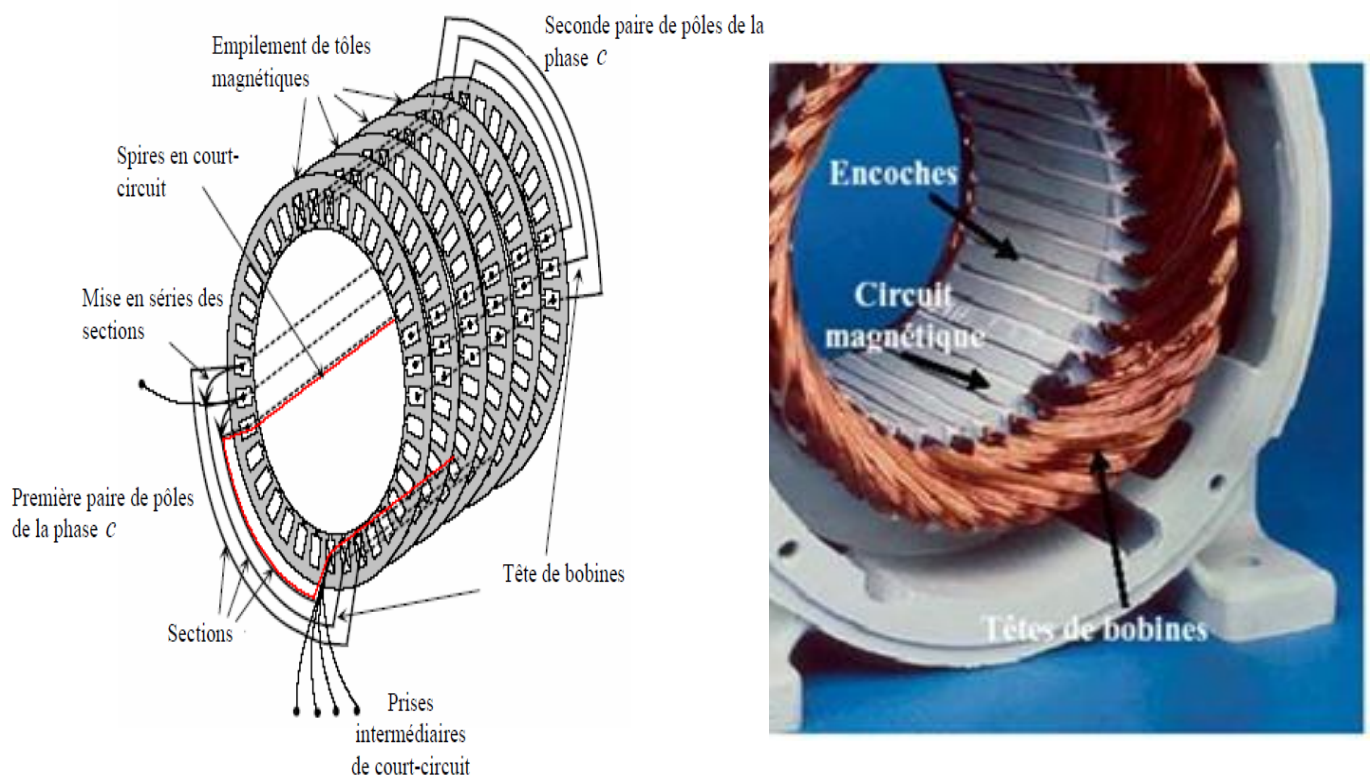


Figure (I.5) : Différentes composantes de la machine asynchrone à cage [6].

I.3.1.1_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.6). 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 [8]



Figure(I.6) : Coup schématique de la constitution du stator [7].

I.3.1.2_Rotor

Le rotor est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu. Dans le rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont des barres obtenues par injection d'un alliage d'aluminium ou préformées en cuivre et introduites dans les tôles du rotor, il n'y a généralement pas ou très peu d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment forte pour que les courants ne circulent pratiquement pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre.

On trouve deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil.

I.3.1.2.1_Rotor Bobiné

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

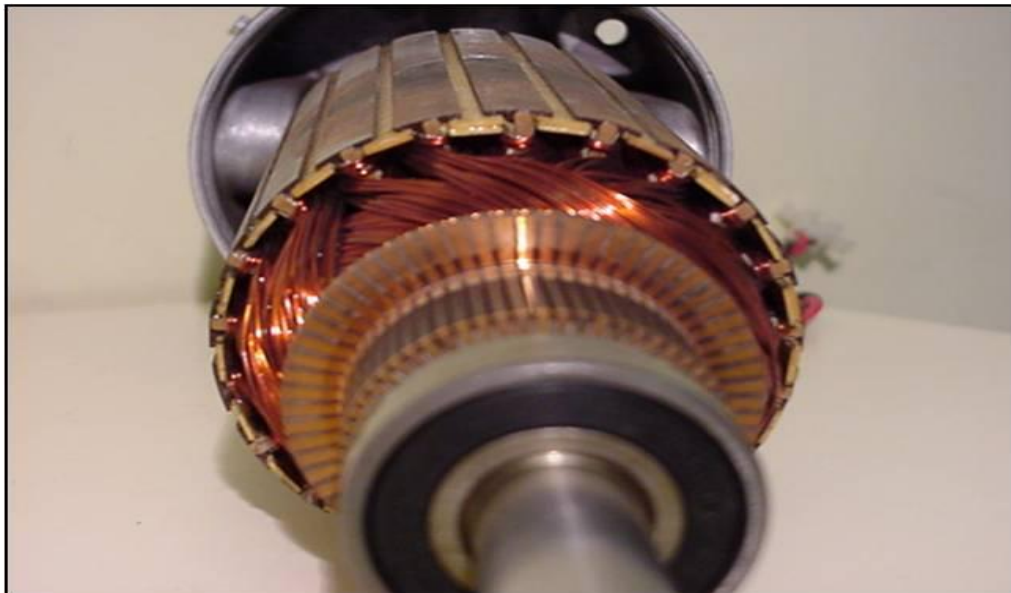


Figure (I.7): Rotor bobiné d'une MAS [7].

I.3.1.2.2_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 [8], [9].

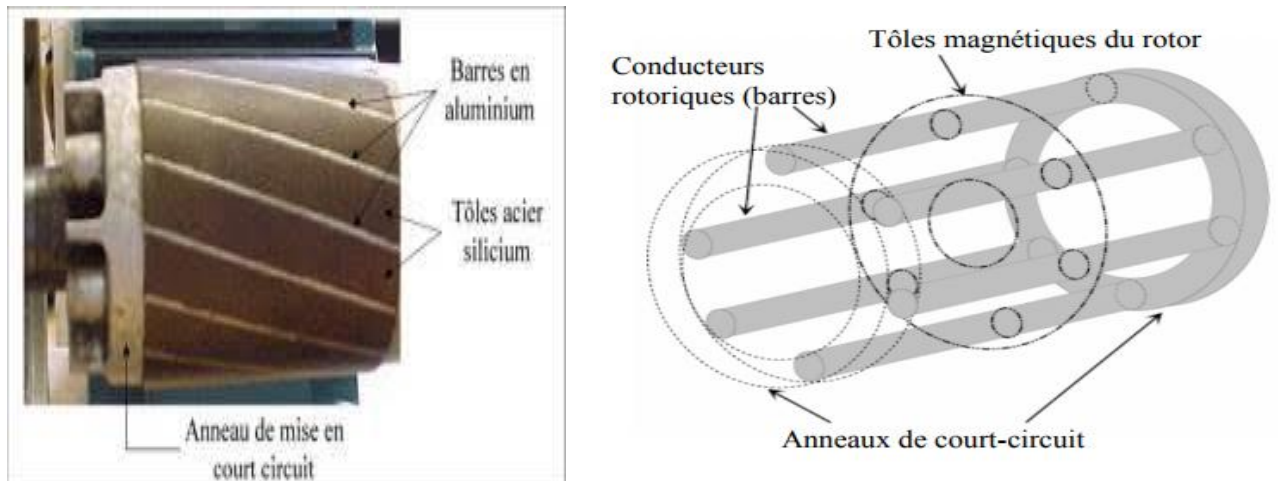


Figure (I.8) : Coup schématique pour la constitution du rotor [8].

I.3.1.3_Les paliers

Les paliers maintiennent le rotor et assurent sa libre rotation. Ils sont constitués des flasques et des roulements à billes. Les flasques moulés en fonte sont fixés sur le carter statorique, ils assurent le support et le centrage des bagues extérieures des roulements à billes. Ces derniers insérés à chaud sur l'arbre garantissent le guidage en rotation du rotor [5].

I.3.2_ 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 [10].

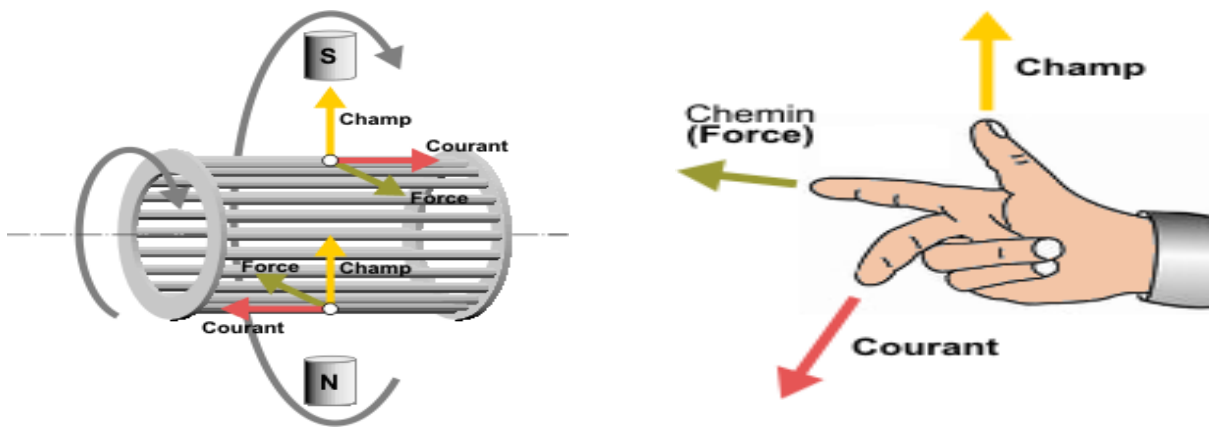


Figure (I.9): Simplifier le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone [8].

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.

Le rapport :

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

g : Est appelé le glissement d'une machine asynchrone [8].

I.3.3_ Différents types de défauts

Avant d'étudier les différents types de défauts, il est indéniable de présenter les causes donnant naissance à ces défauts ainsi que leurs conséquences.

I.3.3.1_ Causes et conséquences des défauts

Les défauts majeurs affectant les machines électriques sont dus à un ensemble de contraintes nocives qui sont généralement de nature thermique, électrique, mécanique, environnementale, électromagnétique, résiduelle et dynamique [11].

a). Les Contraintes électriques

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

b). Les Contraintes dynamiques

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

c). Les contraintes magnétiques

On distingue : - Les effets électromagnétiques. - La sollicitation magnétique déséquilibrée.
- Les parasites et les vibrations électromagnétiques. - Des parasites et des vibrations électromagnétiques.

d). Les contraintes d'environnement :

Un moteur doit toujours être gardé dans un endroit propre et sec car sa durée de vie et sa bonne tenue dépend de l'environnement dans lequel il fonctionne. La présence de l'humidité et de la poussière qui contient des particules métalliques engendre de graves

endommagements au niveau de la surface rotorique du moteur et détériore l'isolant ce qui provoque des court-circuits dans ses enroulements [11].

e). Les contraintes mécaniques

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

f). Les contraintes thermiques

L'excès de température provoque essentiellement la dégradation des isolants des enroulements et contribue à leur vieillissement, engendrant des courts-circuits de différents types.

Les dépassements thermiques sont dus :

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

g)- Les contraintes de démarrage :

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

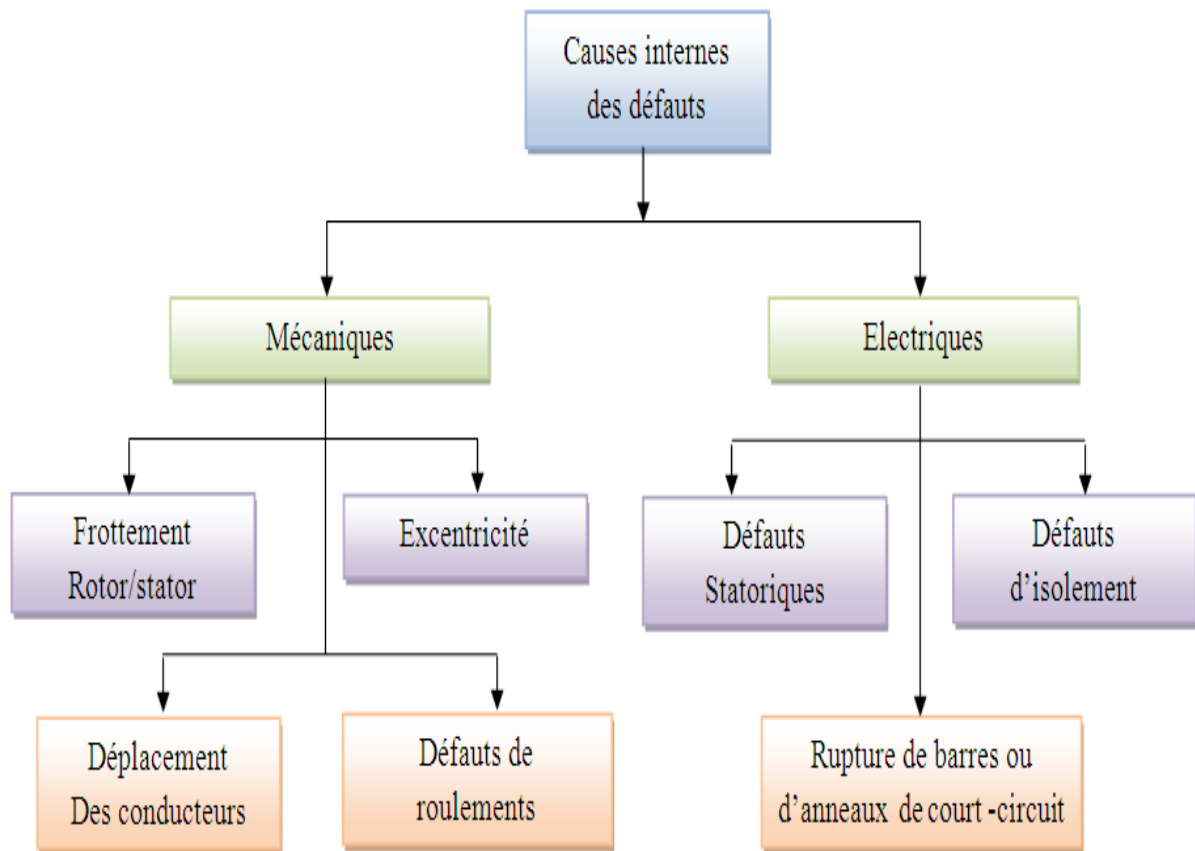
- Les conditions de démarrage,
- Les contraintes permanentes,
- Les contraintes vibratoires.

I.3.4_ Les principaux défauts dans la machine asynchrone

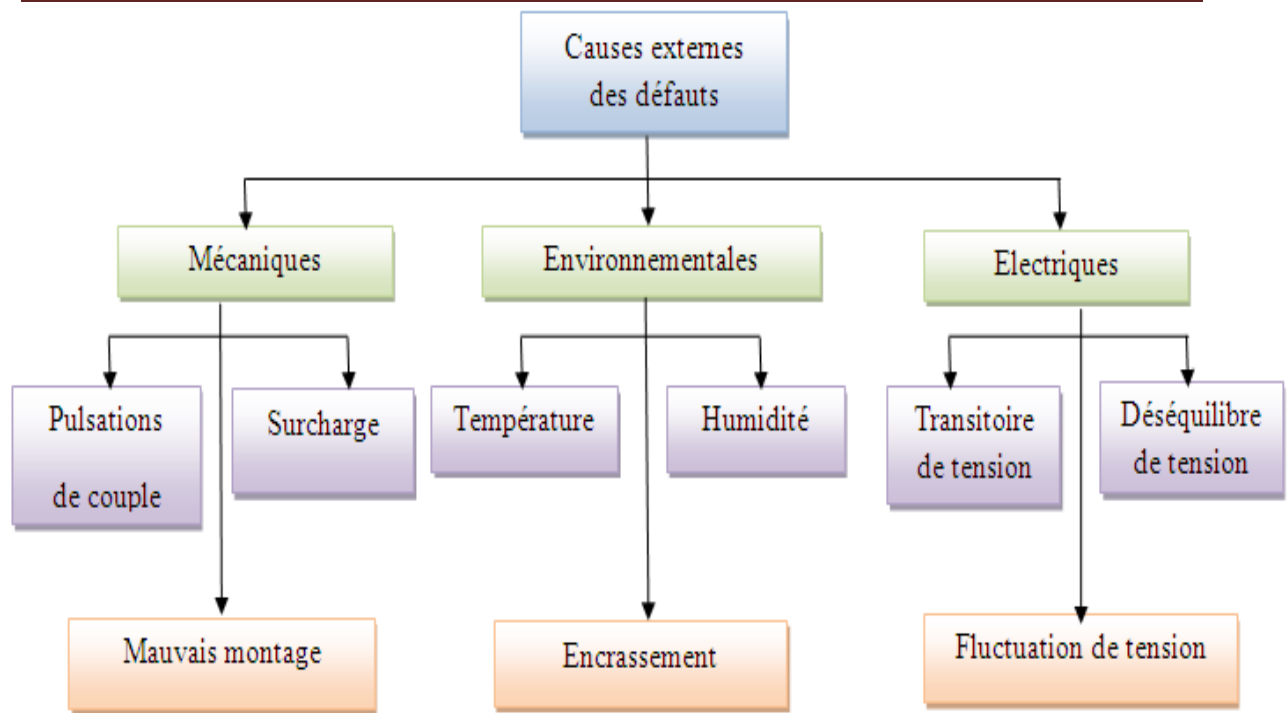
I.3.4.1_ Défauts internes et externes

Il existe deux types de défauts principaux Internes et externes.

Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures(I.10) et (I.11) [12].



Figure(I.10) : Causes internes des défauts de la MAS triphasée à cage [9].



Figure(I.11) : Causes externes des défauts de la MAS triphasée à cage [9].

Nous pouvons ainsi remarquer que les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique,...). Tandis que, les défauts externes sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'environnement de l'utilisation de la machine. D'après les organigrammes (Figures I. 10 et I. 11), les origines des défauts sont diverses : Thermique, mécanique, électrique ou encore environnemental. A titre indicatif, les démarrages fréquents provoquent des courants élevés dans les barres rotoriques.

Après la description des composants du système étudié (la machine asynchrone à cage) ainsi que les fonctions associées à chaque composant, il est important maintenant d'identifier les différents défauts qui peuvent survenir au niveau de chaque composant. Une défaillance est définie par la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Partons de cette définition, on peut citer les défaillances pouvant affecter les machines asynchrones triphasées à cage [13], [14], [15].

I.3.4.1.1_ Les défauts statoriques

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème [16].

- 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.3.4.1.1.1_ 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 [16].

- 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.

- Vieillesse naturelle 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.3.4.1.1.2_ 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 [16].

I.3.4.1.1.3_ 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 [16].

I.3.4.1.1.4_ 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 [17].

On peut clarifier les différents défauts possibles de court circuit par la figure (I.12).

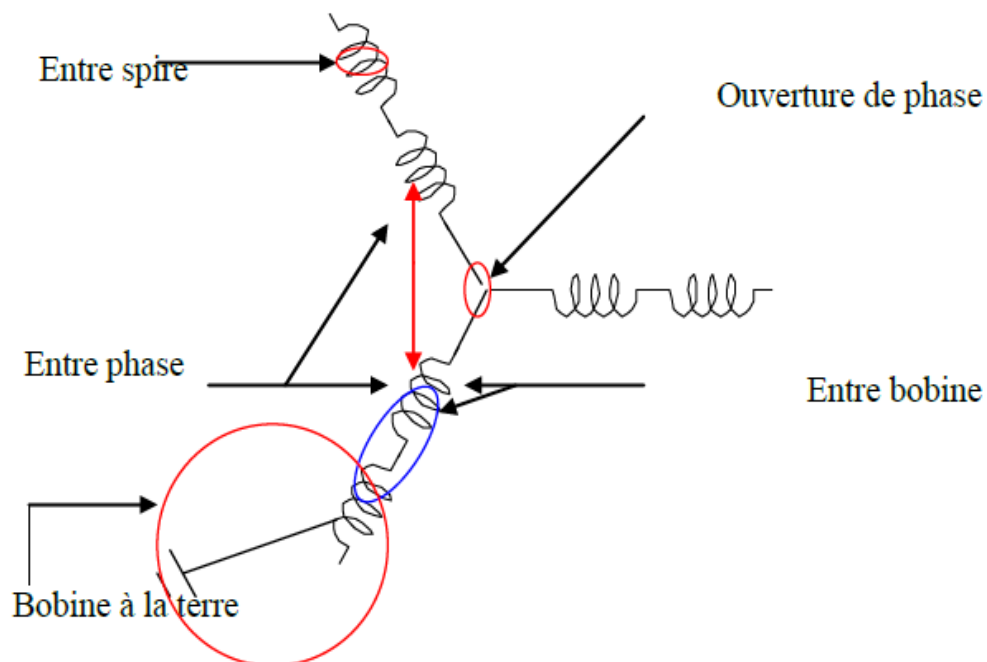


Figure (I.12) : Différents défauts statoriques le court-circuit [17].

I.3.4.1.2_ Défauts rotoriques

Les différents défauts relatifs à la partie rotorique peuvent être traduits par [13] :

- Rupture d'anneau ou de barre de la cage rotorique.
- Défauts de roulements à billes.
- Excentricité statique, dynamique ou mixte.

I.3.4.1.2.1_ Défaut de rupture de barres ou d'anneau de la cage rotorique

Le rotor du moteur asynchrone est soit constitué d'un bobinage triphasé ou de barres conductrices placées dans des encoches et mises en court-circuit par des anneaux. Parmi les défauts qui se manifestent dans la cage rotorique, on cite :

A- Rupture des barres

Une barre cassée, signifie que le courant circulant dans cette barre est nul.

Les phénomènes qui peuvent participer à la rupture de la cage rotorique sont de type thermique ou électrodynamique.



Figure (I.13): Présence la cassure de barre dans le rotor de la MAS [11].

a- phénomènes thermiques

Au démarrage, on considère une répartition inégale de la température dans les barres qui risque de conduire à une rupture. Il y a des parties dans le moteur où la température est assez élevée et ceci est dû à des défauts de fabrication comme dans le cas d'une mauvaise liaison ou soudure entre les barres et les anneaux de court circuit.

b- phénomènes électromagnétiques

L'action du flux de fuites d'encoches sur le courant qui parcourt les barres produit des effets électromagnétiques, ces derniers sont proportionnels au carré de l'intensité du

courant et sont dirigés dans le même sens. Si ces contraintes sont suffisamment élevées, la rupture de barres se produire rapidement.

B- Rétrécissement des barres

Une barre rétrécie représente une plus grande résistance, à cause d'une mauvaise coulée d'aluminium, ce qui provoque le passage d'un faible courant dans cette barre.

C- Mauvaise soudure de la barre

Une barre mal soudée présente un point chaud dans la cage, cela est dû à un défaut de fabrication, ce qui provoque une augmentation de la résistance entre la barre et l'anneau de court-circuit.

D- Rupture des segments d'anneau

Un segment est l'élément de court-circuit entre deux barres, et comme ce dernier lui aussi subit des contraintes de démarrage plus les contraintes thermiques et mécaniques, il peut subir des cassures totales ou partielles (résistance très élevée).

I.3.4.1.2.2_ 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.14) [18].

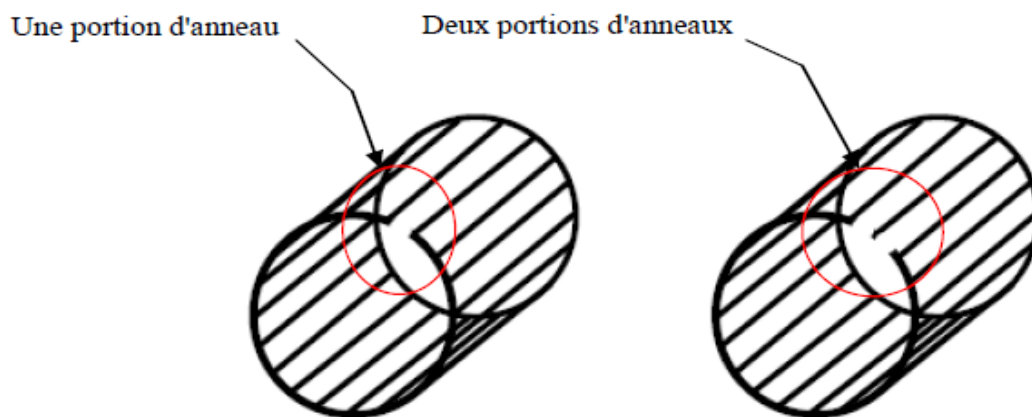


Figure (I.14) : Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit [18].

I.3.4.1.2.3_ 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.15). 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). 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.

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries d'ordre naturel. Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer; à savoir [19]:

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

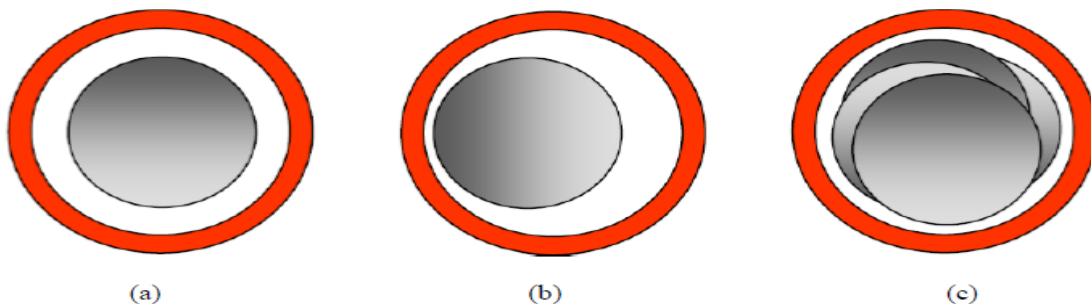


Figure (I.15) : Type d'excentricité : Rotor concentré (a) ; Excentricité statique(b) ; Excentricité dynamique(c) [22].

I.3.4.1.2.4_ 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.

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 :

- 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.

La figure (1.16) 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 [18].

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.

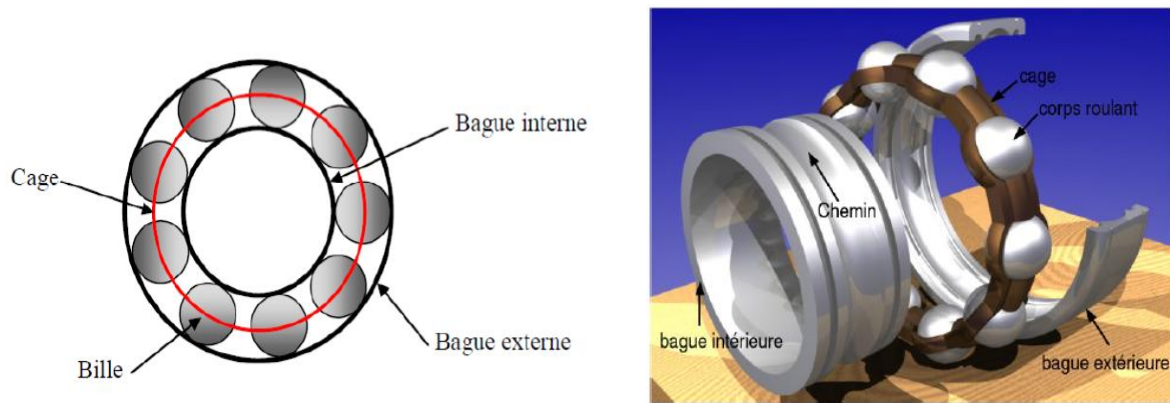


Figure (I.16): Architecture d'un roulement rigide à billes [17].

I.4_ Les méthodes de diagnostic des défauts dans la MAS

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées, elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés.

I.4.1_ 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 [17].

I.4.2_ 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.

La détection serait possible suite à l'analyse du spectrogramme obtenu, au billet du quel 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 [17].

I.4.3_ 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, en particulier, pour les systèmes non linéaires [17].

I.4.4_ Diagnostic par identification paramétrique

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

d'un fonctionnement en défaut. En situation de défaut, la machine asynchrone présente, en plus d'un comportement dynamique conventionnel, un comportement dû aux défauts.

I.4.5_ Méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'analyse spectrale des signaux

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine. D'après la littérature, les principales techniques du diagnostic utilisées pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine sont les suivantes [19].

I.4.5.1_ Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (\text{I.3})$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer, est le produit de la F.m.m (F_m) et de la perméance (P).

$$B = P \cdot F_m \quad (\text{I.4})$$

La force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor, en plus la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, l'excentricité). De ce fait, l'analyse spectrale des signaux de vibrations mécaniques, permet la détection aussi bien les défauts électriques que mécaniques. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres [19].

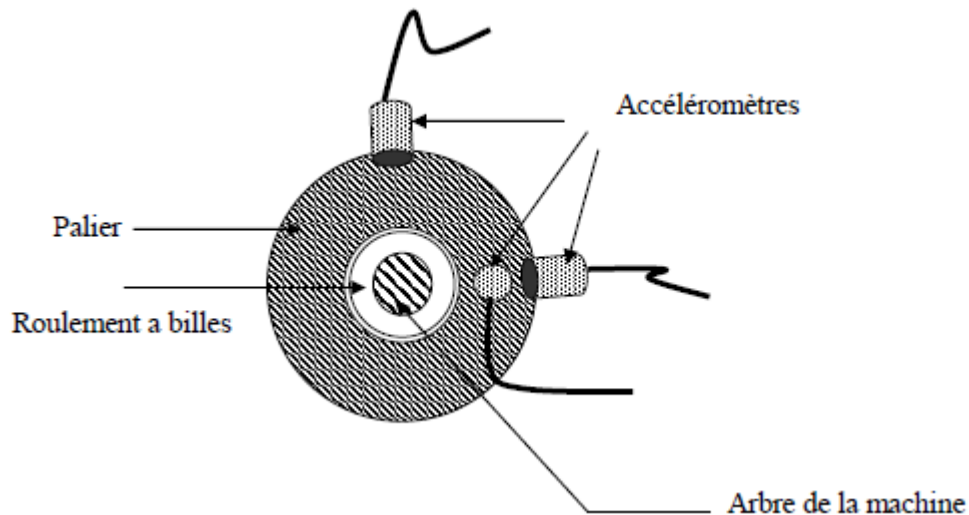


Figure (I.17): Mesure vibratoire de la MAS [26].

I.4.5.2_ Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéale et sans défaut, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendent au degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. L'analyse spectrale de la tension induite dans cette bobine peut être exploitée pour détecter les différents défauts [20].



Figure (I.18): Mesure du flux axial [26].

I.4.5.3_ Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

Une nouvelle technique a été proposée pour la détection des défauts rotoriques dans les machines asynchrones. Cette technique, est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite, par le flux rotorique, dans les enroulements statoriques pendant la déconnexion du moteur de réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette approche, les effets du non – idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non – linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évités [20].

I.4.5.4_ Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Cette technique, permet de détecter aussi bien les défauts rotoriques que les défauts de court-circuit entre spires dans les bobines statoriques. Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tous défauts, soit au niveau du stator ou au rotor, affectent directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur [17]

I.4.5.5_ Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, fait l'objet des nombreux travaux. La puissance instantanée est la somme des produit des courants est des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau des informations, apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par apport aux autres [20].

I.4.5.6_ Diagnostic par analyse des courants statorique

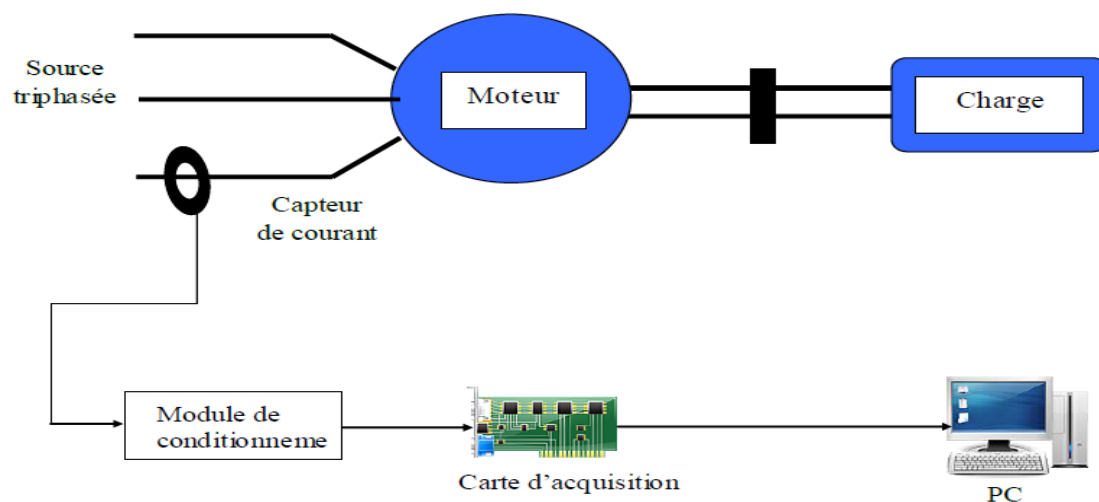
L'analyse du courant statorique dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone [8].

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

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

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

Pour montrer le principe de cette méthode, on considère le cas d'une asymétrie rotorique d'un moteur asynchrone, l'existence de ce défaut engendre un courant de défaut dans le rotor, Ce courant produit une Fmm pulsatoire dont la fréquence d'ondulation est, cette Fmm produit dans l'enroulement statorique une harmonique à deux composantes, la première ayant la fréquence $(1-2k_g) f_s$ et la deuxième ayant la fréquence $(1+2k_g) f_s$ [21]. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signal Analysis)



Figure(I.19) : schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique [19].

I.5_Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelques notions de base concernant la maintenance et le diagnostic avec un rappel sur la (MAS) et son principe de fonctionnement. En suite, nous avons présenté les différents types de défauts qui peuvent exister dans les machines asynchrones, nous terminons ce chapitre par une aperçue sur les différentes techniques de diagnostic actuellement appliquée à la machine asynchrone. Un rappel sera réalisé dans le chapitre suivant qui se base sur une synthèse pour la technique spectrale d'analyse qui a l'abréviation MCSA (Motor Current Signal Analysis) ou en français : Analyse des Signatures du Courant Statorique (ASCS).

Chapitre II

APERÇUE SUR LA TECHNIQUE DE LA(MCSA)

Chapitre II

APERÇUE SUR LA TECHNIQUE DE LA (MCSA)

II .1_Introduction

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

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

II.2_Technique de diagnostic (MCSA)

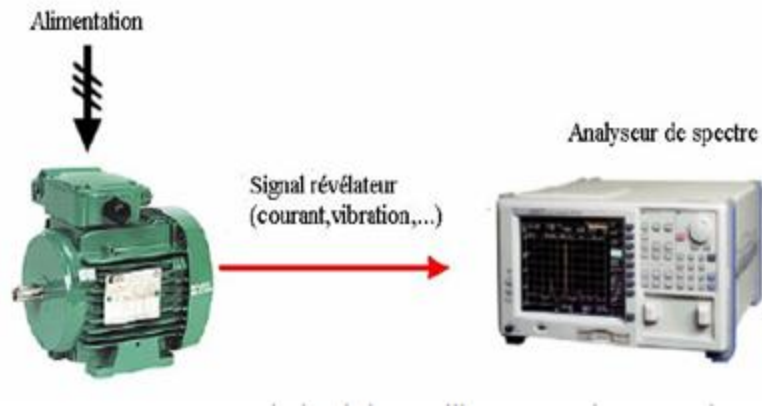
La méthode de la MCSA est l'abréviation des mots Motor Current Signal Analysis qui a l'abréviation française ASCS qui signifie : Analyse des Signatures du Courant Statorique ou Analyse Spectrale du Courant Statorique.

II.2.1_Analyse spectrale

II.2.1.1_principe

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones à cage, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans le bobinage. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquence directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation [24].

La surveillance par analyse spectrale de la MAS consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont les grandeurs mécanique (vibration, couple électromagnétique, vitesses) [25].



Figure(II.1) : Principe de la surveillance par analyse spectral [24].

II .2.1.2_Spectre d'un signal

II.2.1.2.1_ Définition d'un signal

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

II.2.1.2.2_Définition de spectre d'un signal

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

II.2.2_ Analyse spectrale de courant statorique(MCSA):

II.2.2.1_ Définitions

- a) **L'analyse spectrale du courant statorique** : est une méthode de contrôle qui consiste à analyser le spectre du courant statorique sachant que dans un spectre d'un moteur sans défaut, apparait la composante du fondamental à la fréquence du réseau d'alimentation en régime permanent, accompagnée des composantes à

faibles et hautes fréquences qui sont dues à la géométrie de la machine considérée. Un bon équipement d'analyse de spectre (grande sensibilité) et la comparaison entre les spectres du courant d'un moteur avec défaut et celui de la référence (le spectre du courant d'un moteur sans défaut), permet d'avoir une bonne analyse et obtenir la maximum d'information sur l'état de moteur.

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

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

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

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

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

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

Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique par [19], [26] :

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux paramètres physiques de la machine (nombre de barres rotoriques et nombre des paires de pôles).
- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présents dans le spectre du courant. La surveillance via le courant statorique, nécessite une bonne connaissance des défauts et de leurs signatures. Elles sont utilisées pour le moment dans le contexte de machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquences caractéristiques de défauts [19].
- la présence d'harmoniques caractérisant les défauts de la MAS [18].

II.2.2.2_ Technique de la FFT

La FFT est un moyen efficace qui réduit le nombre d'opérations arithmétiques nécessaire à la transformée discrète, son importance augmente aussi avec l'évolution du traitement numérique des signaux, de même avec la possibilité de pouvoir l'utiliser pour des signaux analogiques ou plus généralement pour des fonctions continues dans des nombreux domaines scientifiques

L'utilisation de cette méthode est très simple car elle ne nécessite pas l'introduction d'appareillage de mesure à l'intérieur de la machine électrique, mais consiste à analyser le courant statorique du moteur [22], [23], [19].

II.2.2.3 Surveillance du moteur asynchrone basée sur la technique de la MCSA

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

- Couple électromagnétique
- Puissance instantanée statorique
- Vibration mécanique
- Courant statorique

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

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

➤ **Remarque**

Trois remarques peuvent être faites sur la surveillance du moteur asynchrone basée sur le courant statorique.

- 1- La charge est un paramètre extrêmement important à prendre en considération dans la formulation du diagnostic. En effet les fréquences de certaines composantes spectrales du courant statorique dépendent du glissement g et donc de la charge. Lorsque g est très faible l'espacement entre certaines raies spectrales adjacentes devient très proche et l'analyse des signaux est plus délicate.
- 2- L'utilisation d'un même signal, pour détecter différentes défaillances entraîne des problèmes de recouvrement de leur signature. Par exemple une excentricité d'entrefer occasionnée par un défaut mécanique, comme le mauvais alignement du rotor, et celle occasionnée par un défaut électromagnétique ont la même signature spectrale.
- 3- Vu la richesse et la complexité du spectre du courant statorique, la discrimination d'un bon ou mauvais fonctionnement du moteur asynchrone est difficile à décider par un praticien non expert en la matière face aux multiples événements pouvant être induit par les multiples conditions de fonctionnement même les plus normales [25].

II.3_ Signatures spectrales des défauts dans le spectre du courant statorique

II.3.1_ Défauts rotoriques

L'analyse du spectre du courant statorique en régime permanent, fournit des indications sur les défaillances rotoriques telles que les ruptures de barres, d'anneaux de court-circuit ou l'excentricité d'entrefer.

II.3.1.1_ Excentricité

Les effets des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe dès sa fabrication. La présence d'un certain niveau d'excentricité est normale dans les machines électriques. Des fabricants et utilisateurs spécifient un niveau admissible maximum de 5%, tandis que dans d'autres cas, un niveau maximum de 10% de la largeur d'entrefer est toléré.

Trois types d'excentricité sont généralement distingués :

II.3.1.1.1_ L'excentricité statique

Généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle résulte d'un défaut de centrage des flasques et se manifeste même dans des machines fabriquées récemment en raison des méthodes de fabrication et d'assemblage (voir figure I.15.b).

II.3.1.1.2_ L'excentricité dynamique

Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes. Elle correspond au décalage du centre de rotation du rotor par stator, avec en plus, une rotation du centre du rotor autour du centre géométrique de ce stator (voir figure I.15.c).

II.3.1.1.3_ L'excentricité mixte

En réalité, les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à co-exister. Un niveau inhérent d'excentricité statique existe toujours, même dans des machines de fabrication récentes. Cela provoque des efforts réguliers d'attraction magnétiques non compensés dans une seule direction [27], et avec le temps cela peut conduire à la flexion d'un arbre et la dégradation de roulement ..., tout cela entamant une excentricité dynamique. Sans détection précoce, l'excentricité devient suffisamment grande pour développer des forces radiales déséquilibrées qui peuvent créer un frottement entre le stator et le rotor, ce qui mène à une panne très grave de la machine.

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

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

La détection des excentricités est aussi possible en surveillant les harmoniques principales d'encoques du courant et certaines de leurs composantes spectrales latérales. Cette méthode

nécessite la connaissance du nombre d'encoches rotoriques N_e . Les fréquences des composantes spectrales d'encoches et de celles associées aux excentricités d'entrefer dynamiques sont les suivantes :

$$f_{enc+exc} = f_s \left[(k N_e \pm n_d) \frac{(1-g)}{p} \pm n_w \right] \quad (II.2)$$

$n_d = 0$, dans le cas d'une excentricité statique et

$n_d = 1$, dans le cas d'une excentricité dynamique

N_e est le nombre d'encoches rotoriques.

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

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

II.3.2_ Défauts au niveau des roulements

Puisque les éléments roulants du roulement supportent le rotor, quelque soient les défauts dans les roulements, ils vont produire des mouvements radiaux entre le rotor et le stator dans la machine. Par conséquent, des variations d'entrefer génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquence [19]:

$$f_{roul} = |f_s \pm k f_v| \quad (II.3)$$

D'où : $k = 1, 2, \dots$,

f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations (f_b , $f_{b, \text{int}}$ ou $f_{b, \text{ext}}$)

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées sur les paramètres physiques du roulement.

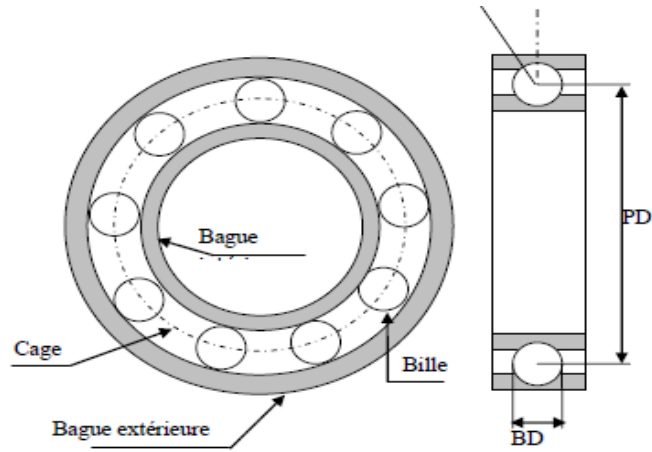


Figure (II.2) : Dimension du roulement à bille [25].

➤ Défaut au niveau d'une bille :

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos\beta \right)^2 \right] \quad (II.4)$$

➤ Défaut sur la bague intérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos\beta \right] \quad (II.5)$$

➤ Défaut sur la bague extérieure :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos\beta \right] \quad (II.6)$$

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

Pour des dimensions courantes, c'est-à-dire que le nombre de billes est de 6 à 12, les fréquences de vibrations peuvent être approximés par :

$$f_{b.int} = 0.6 n_b f_{rot} \quad (II.7)$$

$$f_{b.ext} = 0.4 n_b f_{rot} \quad (II.8)$$

II.3.3_ Cassure de barres

Une asymétrie rotorique générée par la présence de barres rotoriques cassées produit des raies spectrales autour de la fréquence fondamentale f_s telles que

$$f_{brc} = f_s(1 \pm 2kg) \quad (II.9)$$

L'amplitude de ces composantes spectrales est proportionnelle à la sévérité du défaut.

Le tableau II.1 suivant résume les signatures spectrale qui caractérisent les défaut de la (MAS).

Tableau (II.1) : Signature spectrale.

Défaut	Signature Spectrale
Roulement	$f_{roul} = f_s \pm kf_v , k = 1, 2, \dots$ $f_{bille} = \frac{PD}{BD} f_r [1 - (BD/PD \cos \beta) 2]$ $f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_r [1 + (BD/PD \cos \beta)]$ $f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_r [1 - (BD/PD \cos \beta)]$
Exentricité	$f_H = \left \left(\lambda \pm (kR + n_b) \frac{(1-s)}{p} \right) f_s \right $ $f_{exc} = f_s \pm k \cdot f_r , k = 1, 2, 3, \dots$
Cassure de barre	$f_{brc} = f_s(1 \pm 2kg), \quad k = 1, 2, 3, \dots$

II.4_Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté des termes et des notions très importantes sur la technique de diagnostic MCSA. Cette dernière, sera appliquée dans le troisième chapitre afin de détecter le défaut de la cassure de barres.

Chapitre III

ANALYSE ET DISCUSSION DU DÉFAUT DE LA CASSURE DE BARRES

Chapitre III

ANALYSE ET DISCUSSION DU DEFAUT DE LA CASSURE DE BARRES

III.1_Introduction

Plusieurs techniques sont développées pour effectuer la tâche de diagnostic. La plupart de ces techniques se basent sur la comparaison des grandeurs de la machine à l'état sain et à l'état avec défaut. Dans ce chapitre, Nous présenterons, l'analyse spectrale du courant statorique (expérimentalement, courant statorique instantané i_{sa}) de la machine asynchrone triphasé à cage saine et avec défaut en utilisant la transformé de Fourier rapide (Fast Fourier Transform) « FFT ». Nous montrerons comment cette méthode permet de détecter les signatures de défaut de barres cassées. En plus, on va montrer aussi, l'influence de nombre de barres cassées sur le contenu spectral du courant statorique [28].

III.2_Ruptures de barres dans les machines asynchrones

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 de court-circuit. 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. [28].

III. 3_banc d'essai

On a exploité les résultats du banc de tests qui a été effectué dans le laboratoire du génie électrique à Biskra (LGEB). L'acquisition des courants nous permet d'appliquer la technique de la MCSA afin de détecter le défaut de la cassure de barres en comparant avec l'état sain de la machine asynchrone [29].

Les constituants principaux du banc d'essai sont :

- Une carte DSPACE DS1104 ;

- Une MAS à rotor à cage d'écureuil : AZAZGA 3 kW, couplage triangle, $p=2$;
- Une charge pour le freinage.

La figure (III. 1) illustre une photo de système expérimentale connecté avec la cart Dspace qui se traduit par Matlab /Simulink sous une fréquence d'échantionnage $f_e=1000\text{Hz}$



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

Nous allons présenter une analyse complète sur le défaut des cassures de barres en se basant sur les résultats expérimentaux obtenus à partir de banc d'essai.

III.3.1_ Résultats et discussion de la cassure de barres

Nous avons trouvé deux testes ; le premier pour une seule barre cassée et le second pour deux barres cassées. La figure (III.2) représente des photos pour un rotor avec une barre cassée (1BC) et un autre pour deux barres cassées (2BC).



Figure (III.2): Photographie des rotors de la MAS de 3 kW pour une barre cassée (gauche) et avec deux barres cassées (droite).

Remarque : Dans ce chapitre, tout ce qui est simulé en bleu désigne l'état sain et tout ce qui est simulé en rouge désigne l'état de la cassure de barres [29].

III.3.1.1_Fonctionnement à vide

Dans ce cas la machine est d'un couple résistant d'une valeur de 0 N.m qui équivaut à 0% de la charge et un glissement de (0 %)

Le courant électrique d'une phase statorique du MAS est représenté dans la figure (III.3)

Sous un défaut de **1BC** pour la condition, à vide

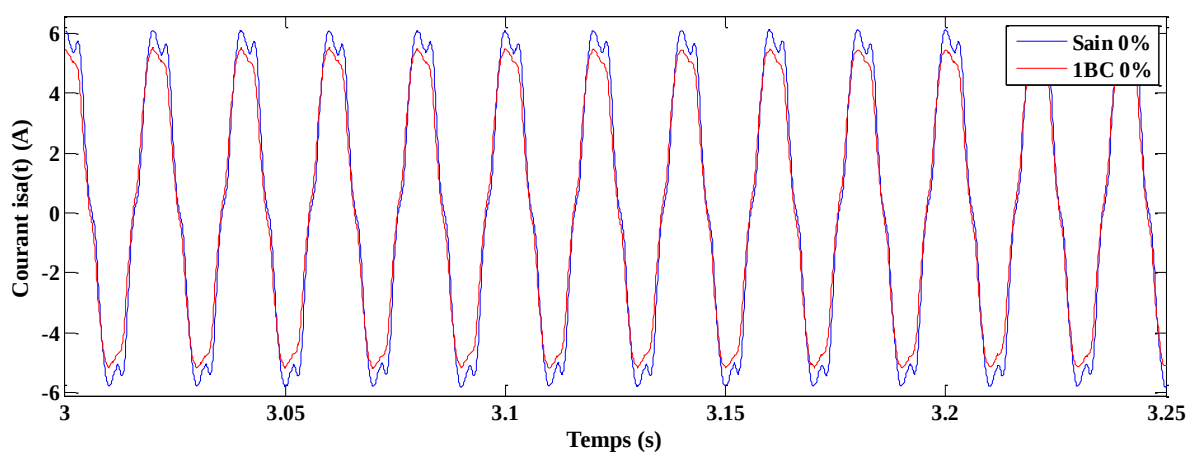


Figure (III.3) : Courant statorique en fonction du temps ($g=0\%$,1BC).

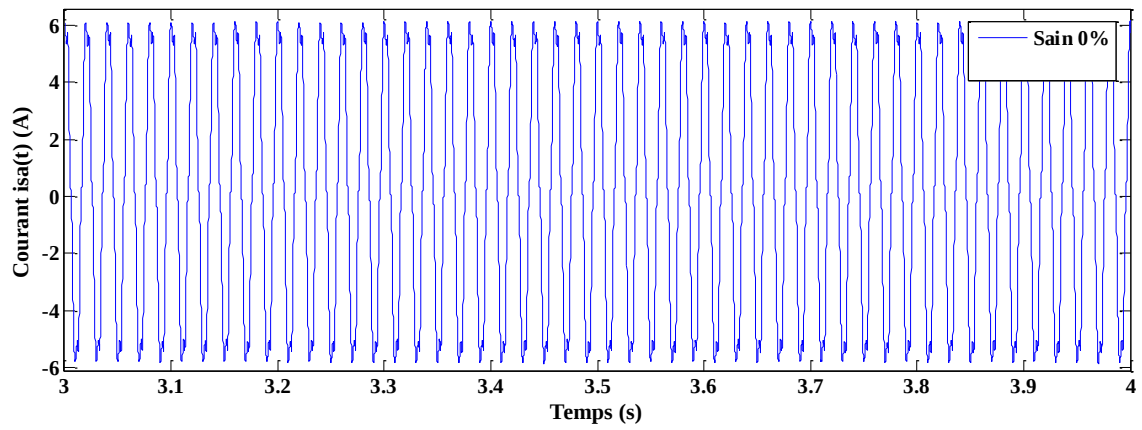


Figure (III.4): Courants statoriques du moteur asynchrone à l'état sain (à vide).

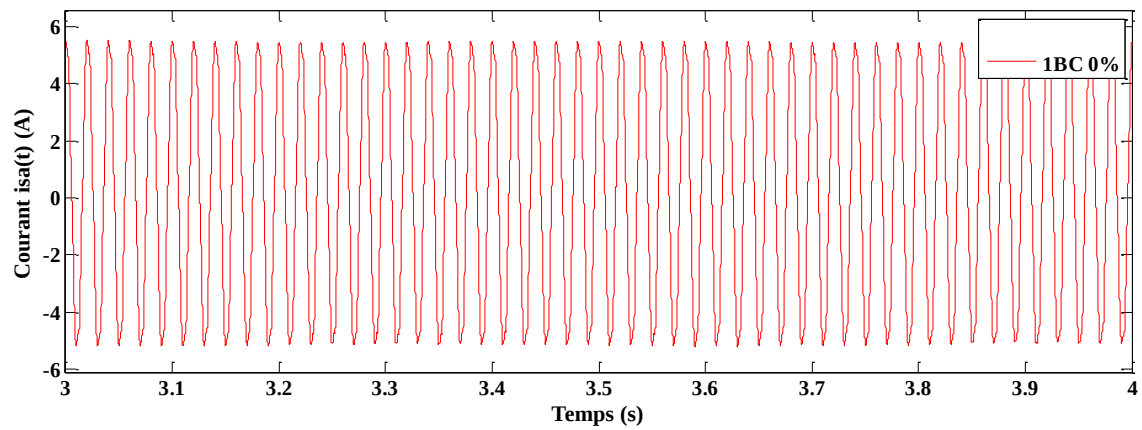


Figure (III.5) : Courants statoriques du moteur asynchrone avec 1BC (à vide).

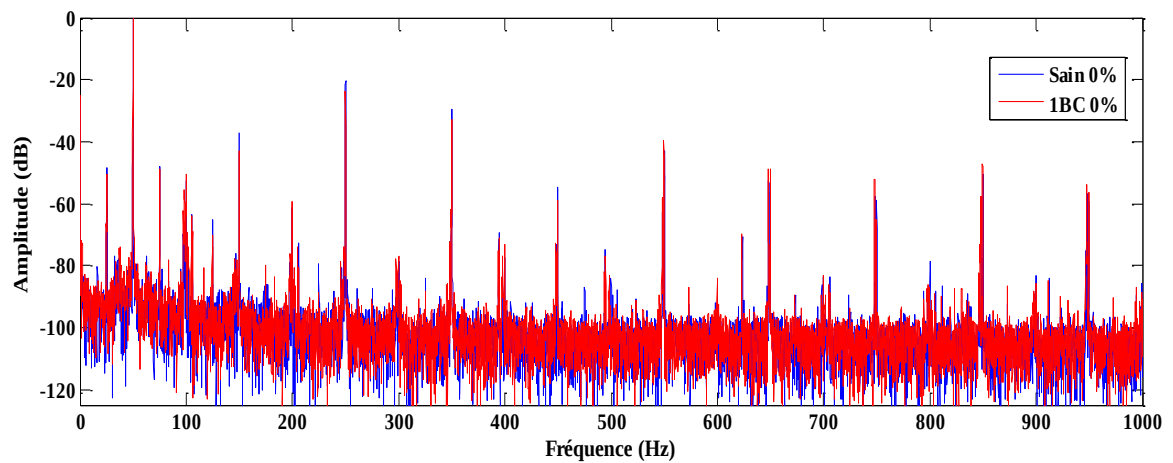
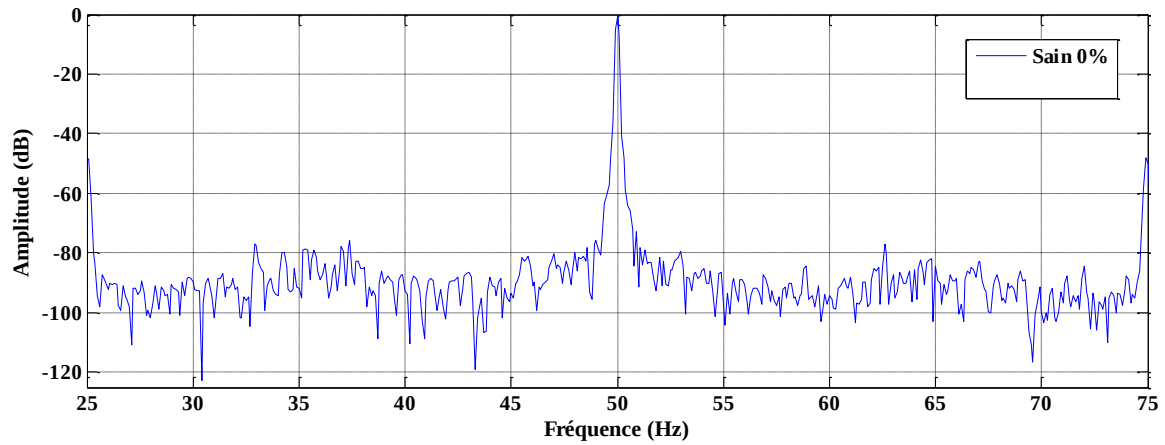


Figure (III.6) : Spectre du courant statorique avec 1BC (à vide).



Figure(III.7) : Zoom de spectre du courant statorique à l'état sain (à vide).

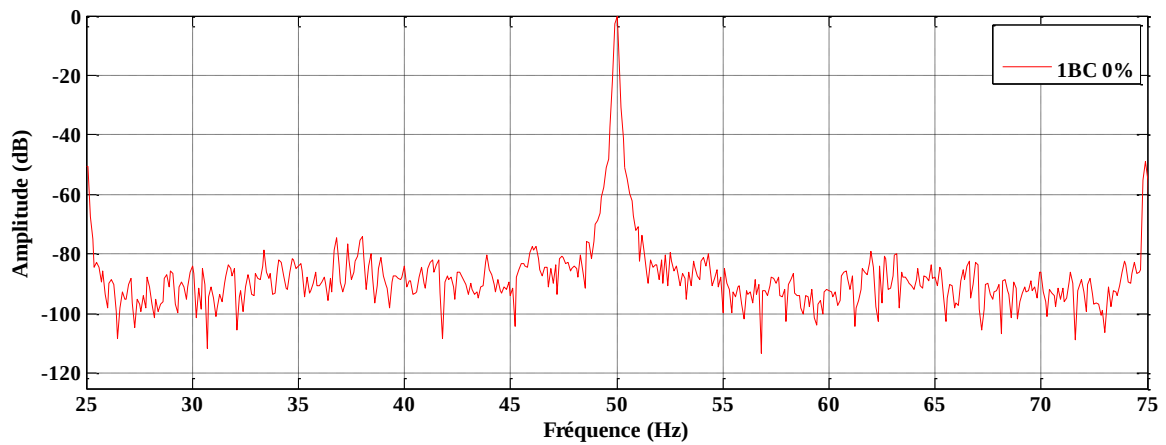


Figure (III.8) : Zoom de spectre du courant statorique avec 1BC (à vide).

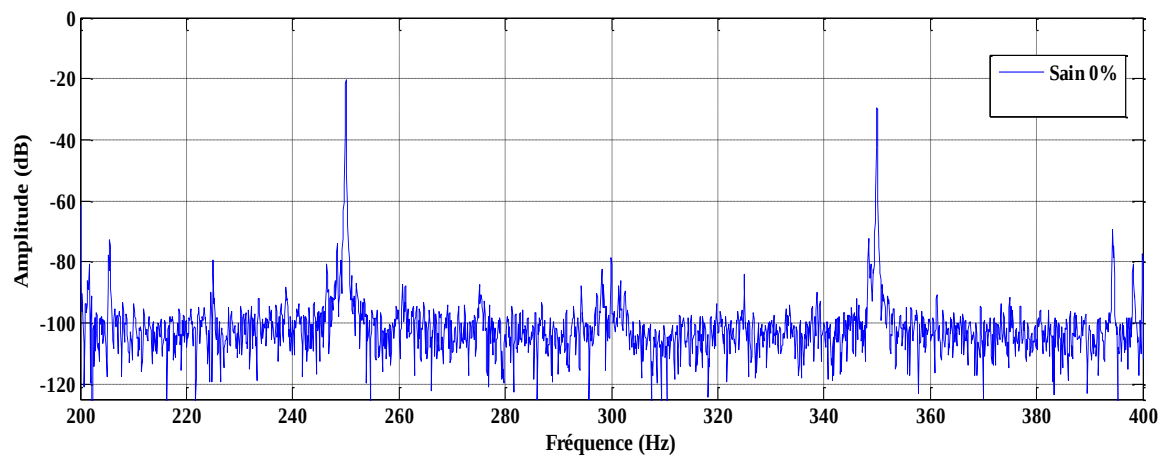


Figure (III.9) : Les fréquences qui correspondent aux ordres 5 et 7 à l'état sain (à vide).

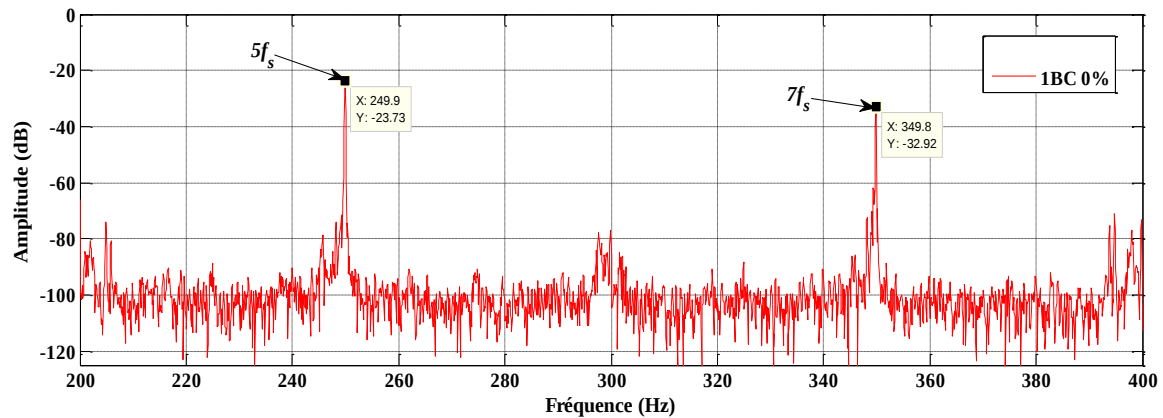


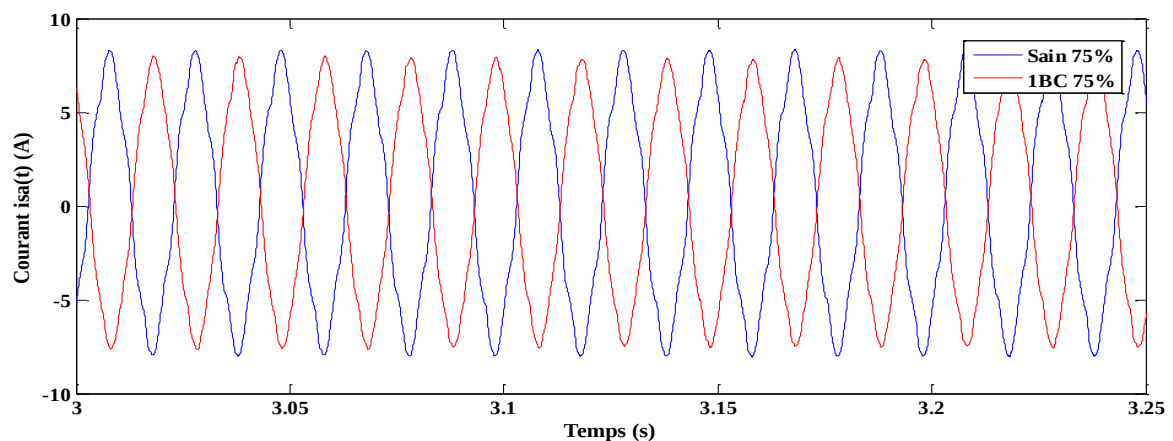
Figure (III. 10):Fréquences qui correspondent aux ordres 5et7 avec **1BC** (à vide).

On remarque que les composants harmoniques du courant statorique ne sont pas influencés par le changement de l'état de la MAS (à vide) pour une barre cassée dans ce cas; les fréquences supplémentaires causées par la rupture de barre sont encore presque invisibles; ceci est dû à la valeur du glissement pour un fonctionnement à vide proche de zéro [29].

III.3.1.2_Fonctionnement en charge

Dans ce cas la machine est d'un couple résistant d'une valeur de 15 N.m qui équivalent à 75 % de la charge et avec un glissement de (3,6 %)

Le courant électrique d'une phase statorique du MAS est représenté dans la figure (III. 11) Sous un défaut de **1BC** pour la condition en charge.



Figure(III.11) : Courant statorique en fonction du temps ($g= 3.6\%$, **1BC**).

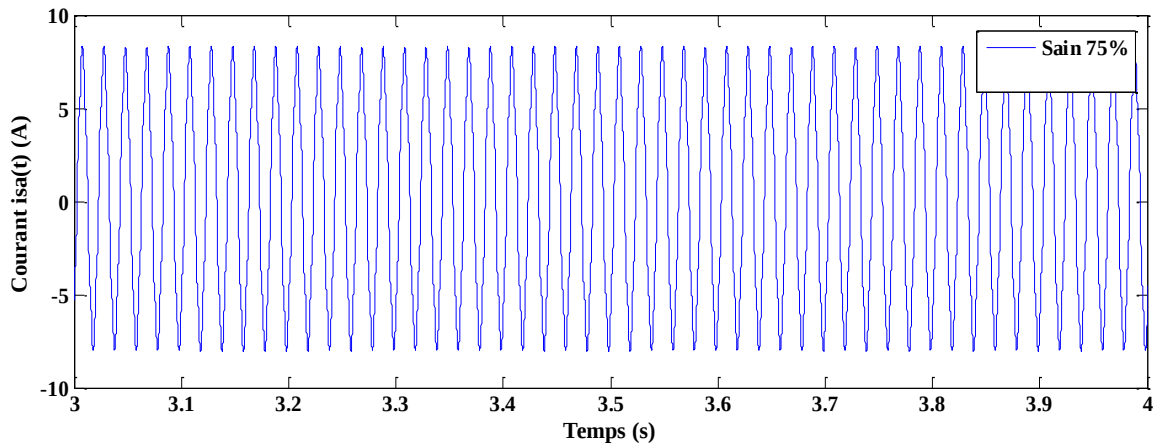


Figure (III.12) : Courants statoriques du moteur asynchrone à l'état sain (en charge).

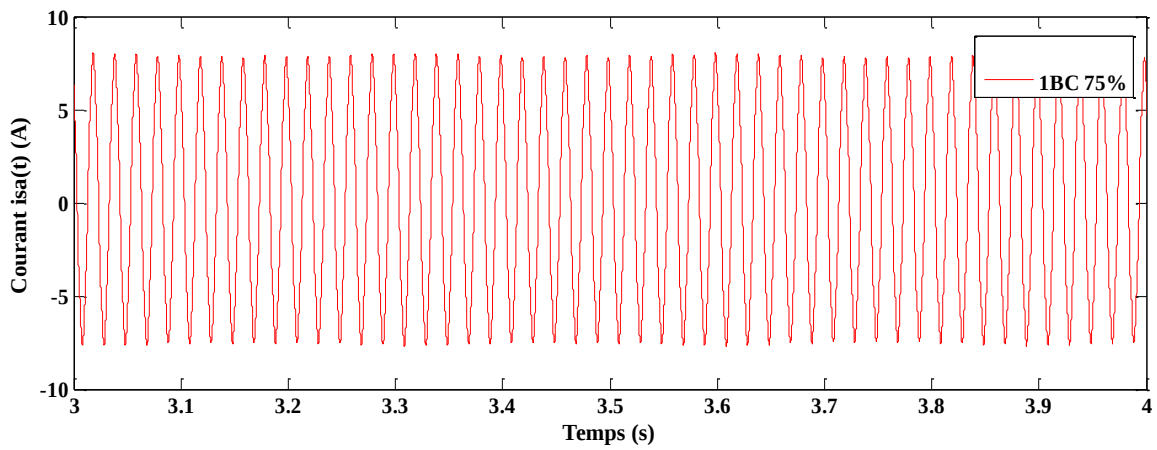


Figure (III.13) : Courants statoriques du moteur asynchrone avec 1BC (en charge).

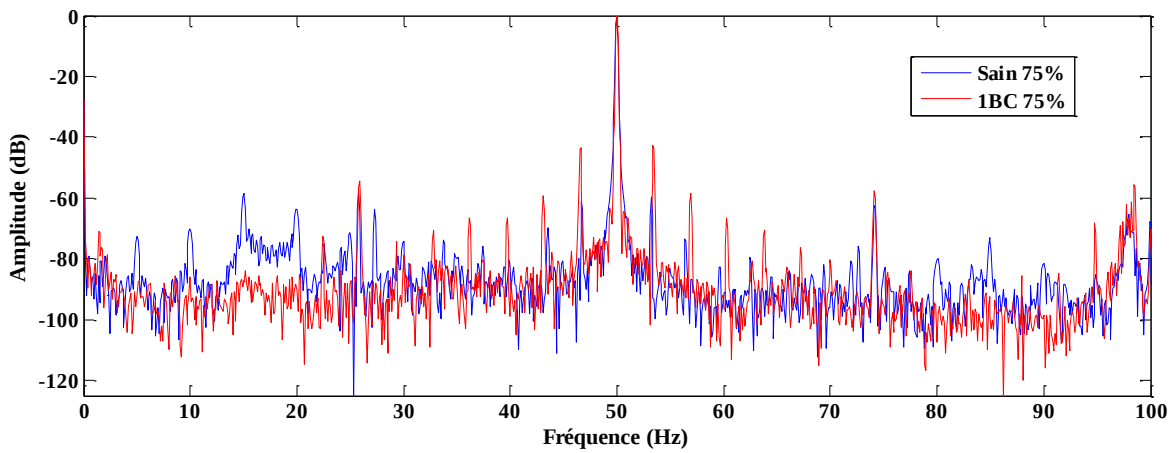


Figure (III.14) : Spectre du courant statorique avec 1BC (en charge).

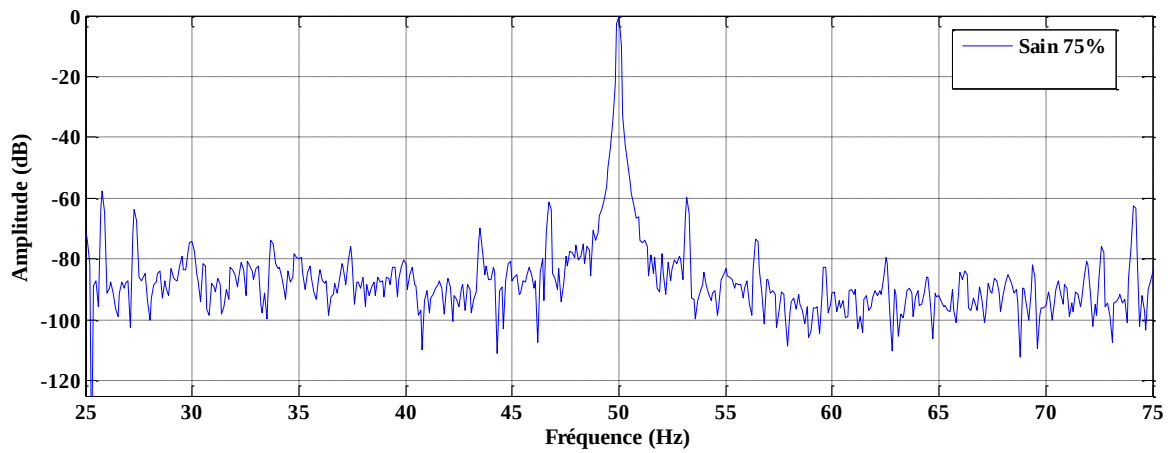
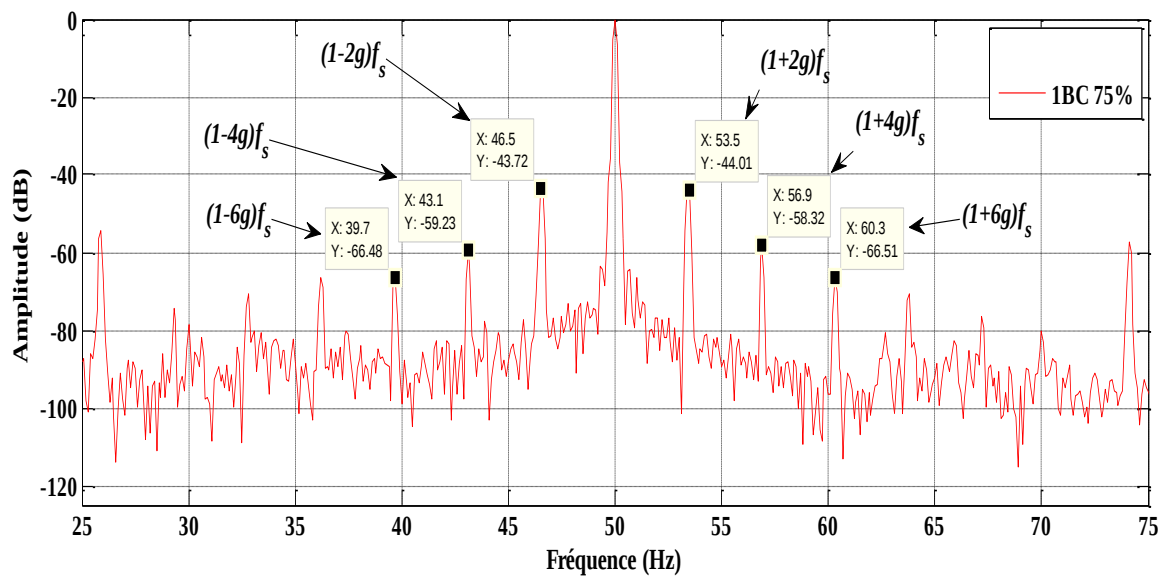


Figure (III.15) : Zoom de spectre du courant statorique à l'état sain (en charge).



Figure(III.16) : Zoom de spectre du courant statorique avec 1BC(en charge).

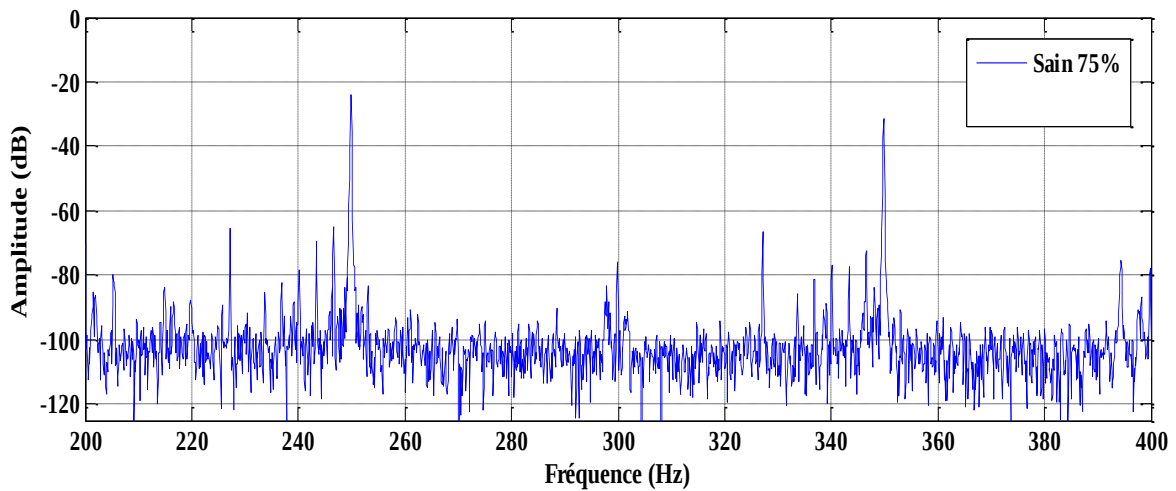


Figure (III.17) : Fréquences qui correspondent aux ordres 5 et 7 à l'état sain (en charge).

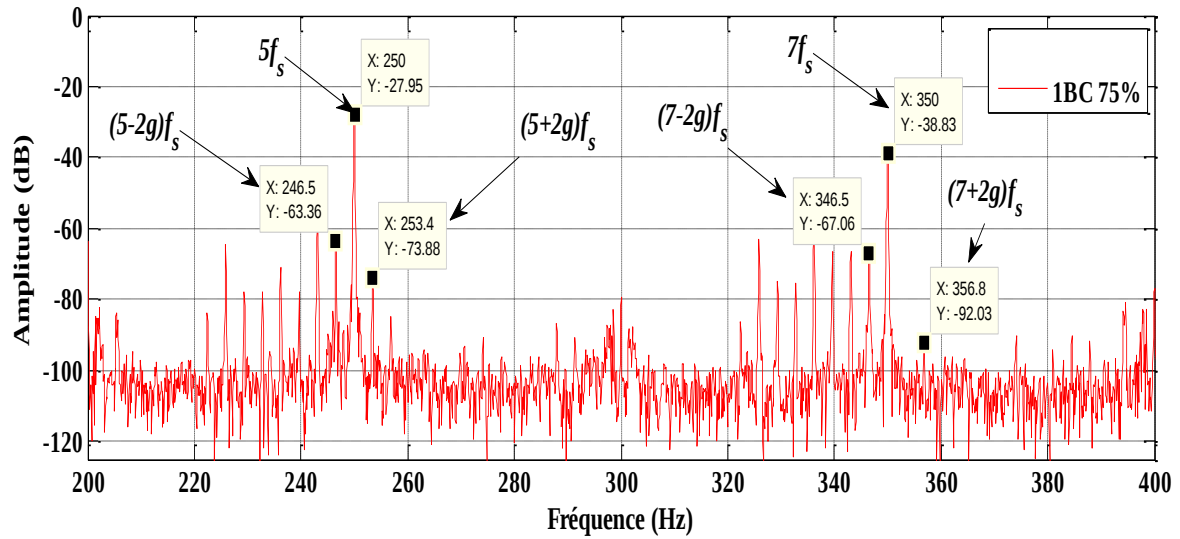


Figure (III.18): Fréquences qui correspondent aux ordres 5 et 7 avec 1BC (en charge).

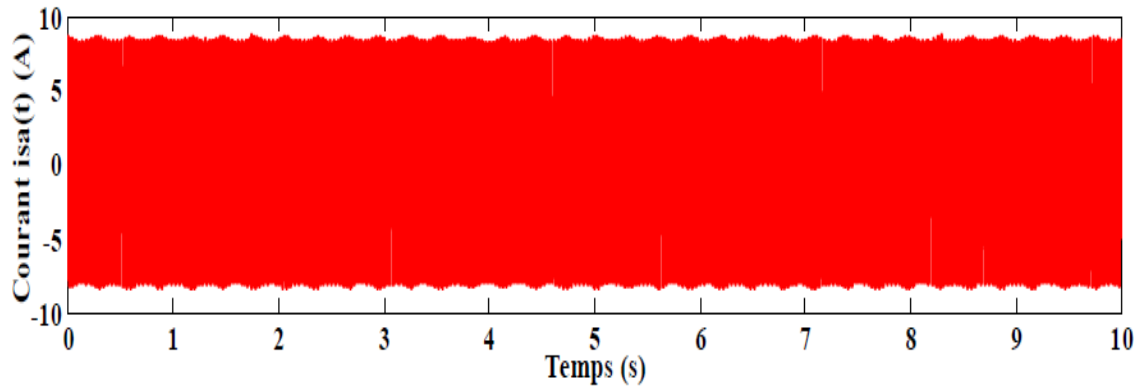


Figure (III.19) : Courant statorique en fonction du temps ($g = 3.6\%$, 2BC).

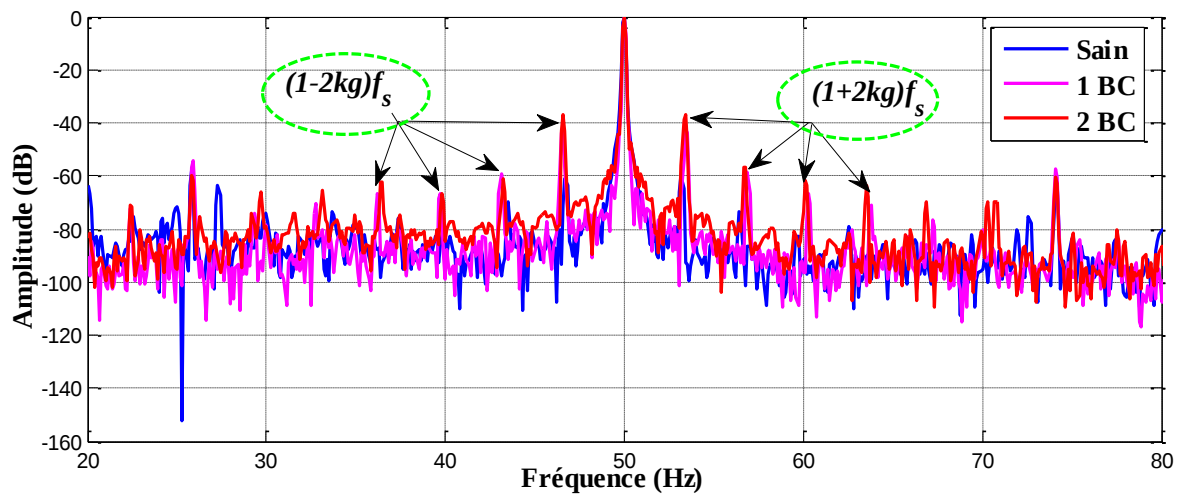


Figure (III.20) : Spectre du courant statorique avec 2BC (en charge).

Les figures(III.14) et (III.20) montre les spectres du courant statorique obtenus expérimentalement pour un fonctionnement en charge de la machine à l'état sain et avec une barre cassée et avec deux barres cassées. Les signatures de défaut de cassure de barres sont présentées dans les spectres de la machine asynchrone avec défaut (voir figures III.16 et (III.21).

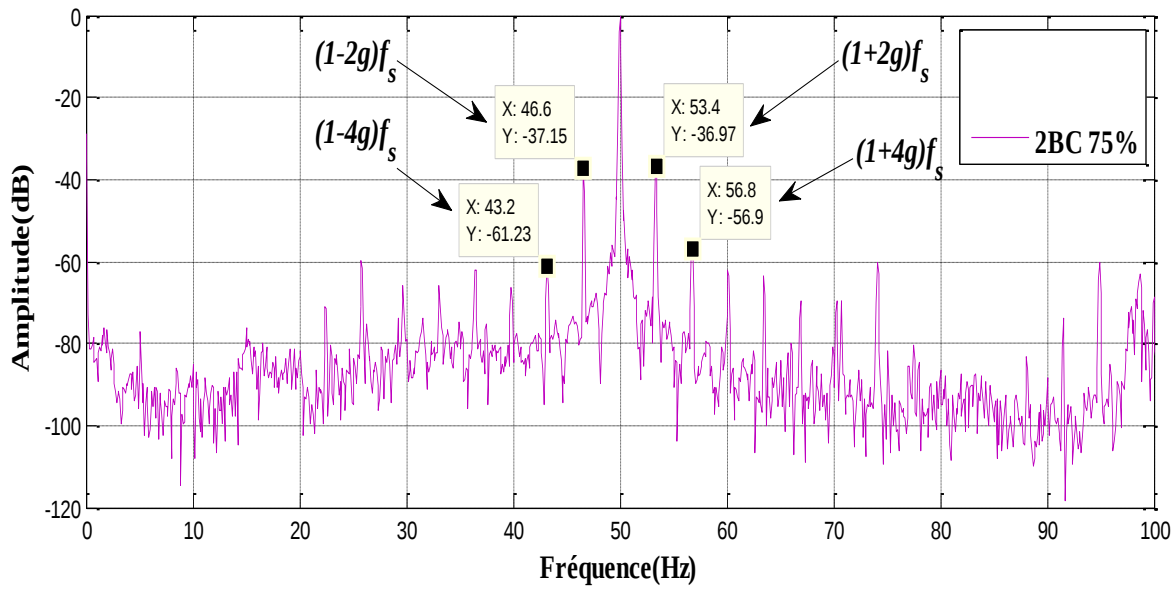


Figure (III.21) : Spectre du courant statorique avec 2BC(en charge).

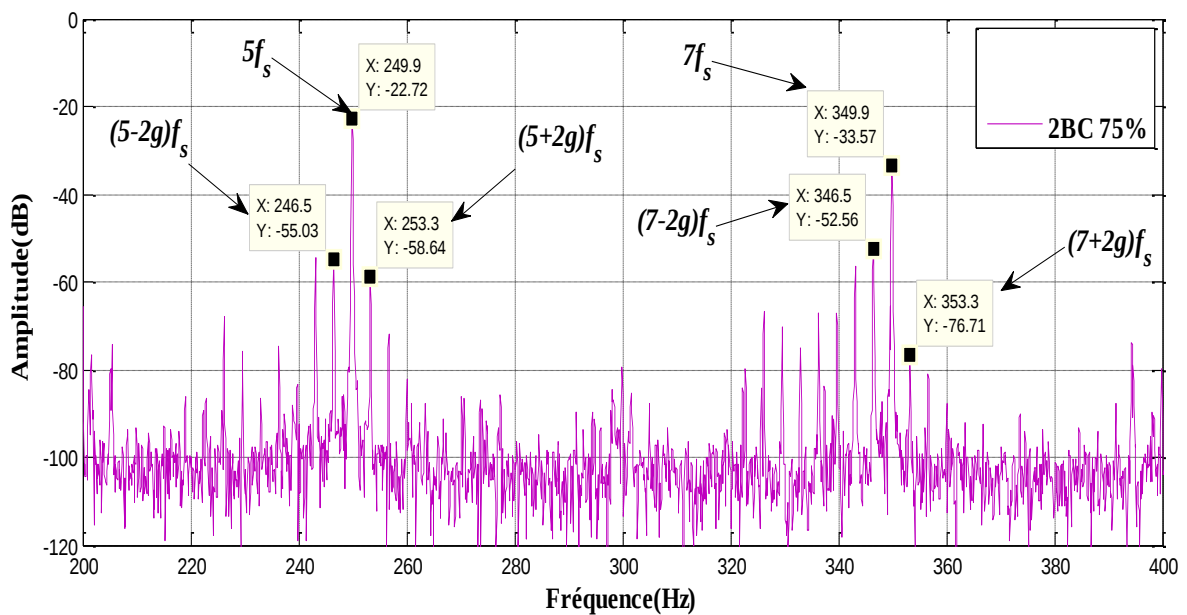


Figure (III.22):Fréquences qui correspondent aux ordres 5et7 avec 2BC (en charge).

D'après la figure(III.15) on constate que pour la machine à l'état sain en charge aucune composante fréquentielle n'est présente dans le spectre du courant statorique, sauf pour les composantes permanentes: les harmoniques de la saturation et les harmoniques de la force magnétomotrice (fmm).

Comme on a déjà mentionné auparavant, lorsque la machine en charge avec une barre cassée (figure III.16), on note que le défaut crée également des composantes fréquentielles autour de la fondamentale, sont: 46.5 Hz et 53.4 Hz.

Pour une seule barre cassée, les fréquences 46.5 Hz et 53.5 Hz ont respectivement les amplitudes -42.54 dB et -43.72 dB, ces amplitudes deviennent plus importantes avec la sévérité du défaut [28]. En effet, pour le cas d'une machine avec un défaut de deux barres cassées ; les fréquences 46.6 Hz et 53.4 Hz ont respectivement les amplitudes -37.15 dB et -36.97 dB (figure III.21).

L'analyse spectrale du courant statorique relève ses composantes supplémentaires qui apparaissent en situation de défaut .Nous pouvons affirmer que la manifestation des raies $(1\pm 2g)fs$ (tableau III.1) est un signe de l'existence de cassures de barres.

Tableau III.1.Récapitulation des raies dans le spectre du courant statorique (1BC ,2BC).

Formules des Fréquences caractéristiques	Valeurs Théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amplitude Pour 1BC (dB)	Amplitude pour 2BC (dB)
fs	50	50	0	0
$(1-2g) fs$	46 ,4	46.6	-43 .72	-37.15
$(1+2g) fs$	53.6	53.4	-42.54	-36.97
$5fs$	250	249.9	-27 .95	-22.72
$(5-2g) fs$	246.4	246.5	-63.36	-55.03
$(5+2g) fs$	253.6	253.4	-73.85	-58.64
$7fs$	350	349.9	-38.47	-33.57
$(7-2g) fs$	346.4	346.5	-67.06	-52.56
$(7+2g) fs$	353.6	256 .8	-92.03	-76.71

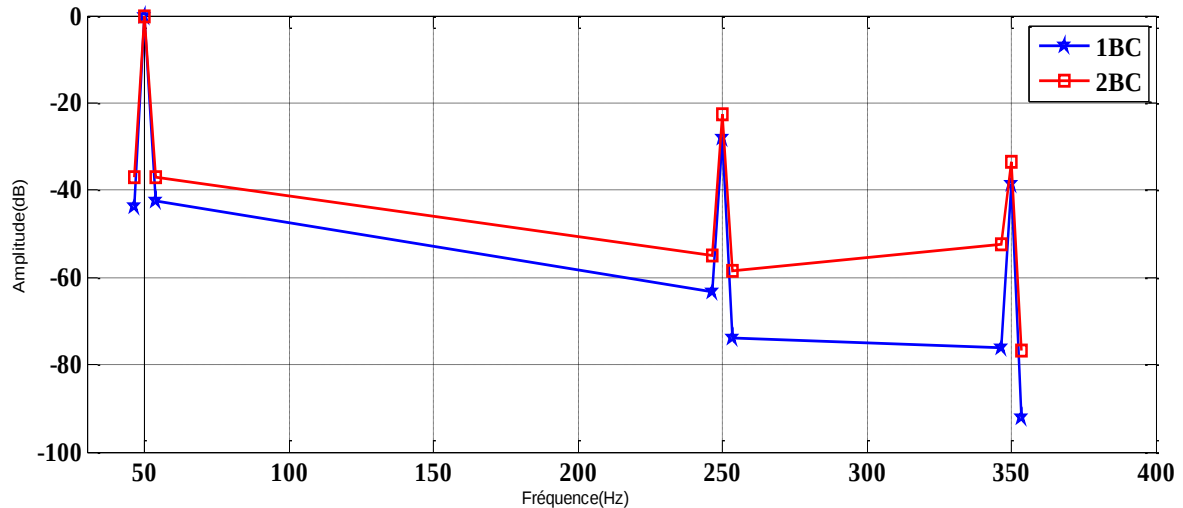


Figure (III.23) : Amplitudes des composantes fréquentielles.

D'après le tableau (III.1) et la figure (III.23), on voit que les amplitudes des composantes fréquentielles $(1 \pm 2kg)f_s$ augmentent avec le nombre des barres cassées, cette augmentation est une signification important quand les barres cassées augmentes.

En plus, ça explique bien que la barre rompue entraine une augmentation des courants dans les barres ce qui provoque automatiquement une autre réaction magnétique qui influe sur la valeur du courant statorique.

III .4_Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude pratique sur l'application de la MCSA pour le diagnostic de défaut de cassure de barres rotoriques dans un moteur asynchrone en utilisant les signaux du courant statorique instantané (i_{sa}).

- ✚ Aussi nous avons présenté des résultats expérimentaux de la machine asynchrone à l'état sain et avec défaut.
- ✚ Au cours de ce chapitre nous avons fait une comparaison entre les spectres.
- ✚ Nous avons trouvé que la rupture d'une barre provoque des oscillations dans le courant, cet indice peut argumenter la présence d'un défaut mais ne peut pas le préciser, la méthode d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA) est, donc, efficace.
- ✚ l'analyse de spectre nous permet d'avoir une bonne analyse et obtenir le maximum d'information sur l'état du moteur.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

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

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

Nous avons localisé l'étude sur les moteurs à cage pour deux raisons :

- La première raison : 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 la cassure de barres est le centre de notre intérêt dans le présent travail par la technique de l'analyse spectrale du courant statorique.

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 cassure de barre pour différente plage de fréquences. Il est important, ici, de noter la relation entre la sévérité du défaut et l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère.

Dans ce mémoire on a traité l'état de l'art ensuite on a fait une définition sur la méthode de MCSA et à la fin on a traité l'aspect lié à la simulation et à l'interprétation des résultats obtenues, dans le but d'avoir un ordre de grandeur sur l'effet de défauts sur les machines à l'état sain et à l'état défectueux.

Il s'est avéré que la détection des défauts est plus aisée par le FFT du courant statorique. Cette constatation s'explique en partie par le fait que le courant statorique est plus accessible et mesurable extérieurement au [31].

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. Didier, "**Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence défaillances**", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2004.
- [2] R. Casimire, "**Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes**" Thèse de doctorat en génie électrique. L'école centrale de lyon 2003.
- [3] R. Merad, "**Outils diagnostic Appliqués a la machine asynchrone triphasée a cage d'écureuil**" Thèse de Magister en électrotechnique. Université de Constantine 2006.
- [4] M. Khoy, "**Surveillance et Diagnostic des Machines Synchrones à Aimants Permanents: Détection des Courts-Circuits par Suivi Paramétrique**" Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2009.
- [5] M. Sahraoui, "**Étude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones**" Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2010.
- [6] A. Abed, "**Contribution à l'Étude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone**" Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002 .
- [7] B. Fatima "**Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : "Application au diagnostic des défauts statoriques"**". Thèse de Doctorat, Université Constantine 1, 2014.
- [8] R. Bousseksou "**Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic**". Mémoire de magister En Electrotechnique. Université Mentouri Constantine ,2007 .

-
- [9] S. Bachir **"Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique"** Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2003.
- [10] Première Bac pro Elec, Lycée Professionnel Clément Ader Le moteur asynchrone triphasé - Dossier ressources.
- [11] G. Abdelkader, **"Effet de l'alimentation sur la détection des défauts dans une machine asynchrone à cage basée sur l'analyse de signal du courant"**, Mémoire de magister En G.Elec Université Chlef, 2011.
- [12] A Lebaroud, **"Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables"**, Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Alegria, 2006.
- [13] A. H. Bonnet and G. C. Soukup, **"Analysis of Rotor Failures in Squirrel-Cage Induction Motors"**, *IEEE Transactions on Industry Applications* Vol. 24, No. 6, November/December 1988, pp. 1124-1130.
- [14] A. H. Bonnet and G. C. Soukup, **"Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors"**, *IEEE Transactions on Industry Applications* , Vol. 28, No 4, July/August 1992, pp. 921-937.
- [15] S. Grubic , **"A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems"**, *IEEE Trans. on Industrial Electronics* "Vol. 55, no. 12, December 2008, pp. 4127-4136.
- [16] O. Ondel, **"Diagnostic par reconnaissance des formes : application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone"** , Thèse de doctorat. L'école centrale de Lyon 2006.
- [17] N .Bessous **" Contribution au diagnostic des machines asynchrones "**. Mémoire de magister En Electrotechnique. Université Mentouri Constantine 2007.
-

- [18] A. Ibrahim" **Contribution au diagnostic de machines électromécaniques "**
Thèse de doctorat, université de saint Etienne Mars 2009.
- [19] M. Sahraoui " **Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage"**Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie, 2003.
- [20] A. A .Rahim " **Grandeur non invasive pour le diagnostic des MAS"** Mémoire de Magistère en électrotechnique, Université de Sétif, Algérie, 2010.
- [21] H. 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.
- [22] G. Didier, "**Modélisation et diagnostic de la MAS en présence de défaillance"**
Thèse de doctorat, 2004, Université D'Henri Poincaré, Nancy-I, France.
- [23] S. Emmanuel, "**Diagnostic des MAS : Modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts "**,Thèse de doctorat,1999,Ecole central de Nantes France.
- [24] A. Khaled, "**Modélisation d'un Moteur Asynchrones pour le suivi de la sévérité des défauts rotorique par l'approche de la fonction d'enroulement "** , Mémoire de Magistère en électrotechnique, Université, d'Oran Mohamed Boudiaf, 2011.
- [25] S. Bachir, "**Contribution au diagnostic de la MAS par estimation paramétrique "** , Thèse doctorat, 2002, Université de Poitiers France.
- [26] M. E. H. Benbouzid and G. B. Kliman, "**What Stator Current Processing-Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis"** IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 2, pages 238-244, June 2003.

- [27] Ch, Abdelghani, **"Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic"**. Mémoire de Doctorat En Science. Université Oran 2017.
- [28] N. Halem, **"Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Éléments Finis"**, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2015.
- [29] N. Bessouse , **" Contribution au diagnostic des défauts dans les machines asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation "** Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2017.
- [30] M. AMMAR, **" Surveillance et Diagnostic des défauts des Machines Electriques : Application Aux Moteurs Asynchrones "**, Thèse de Doctorat, Université de Skikda, Nancy-1, Algérie, Mars 2012 .
- [31] **"DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DANS LES MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASES A CAGE"** Article · January 2004 :[https://www .researchgate.net/publication/238740991](https://www.researchgate.net/publication/238740991) .

ANNEXE

ANNEXE**PARAMETRE DU MOTEUR DE L'EXPEREMENTATION**

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