

N° d'ordre : .....

N° de série : .....

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



## Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

**L'Université d'Echahid Mohamed Lakhdar Ammara d'El Oued**

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

## **MASTER ACADEMIQUE**

En commande Electrique

Présenté par

**ABBAS Maroua**

**BEN ACHOUR Amina**

## **Thème**

**Diagnostic des défauts de roulement dans le  
moteur asynchrones à cage d'écureuil**

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

Dr. Gediri Abdelkrim

Maitre de conférences A

Président

Dr. BESSOUS Noureddine

Maitre de conférences A

Rapporteur

Dr. Bougezala M. Salah

Maitre de conférences A

Examineur

**Année Universitaire 2022/2023**

## **Remerciements**

*A l'issue de ce travail, nous adressons nos remerciements  
premièrement à Dieu le tout  
Puissant pour la volonté, le courage, la patience et la force qu'il nous  
a donné durant toute la  
Période d'étude.*

*Un Remerciements particuliers au Dr **BESSOUS Nouredine** pour  
avoir dirigé ce travail, et l'intérêt qu'il a témoigné tout au long de la  
réalisation de ce travail.*

*Nos remerciements distingués vont aussi aux membres du jury pour  
nous avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance et  
examiner ce mémoire.*

*Mes remerciements vont également à toute ma famille, en particulier  
mon père et tous mes amis pour leur aide et  
Encouragez-les.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui de près ou de loin ont  
participé à l'élaboration de ce travail.*

## ***Dédicace***

*Je dédie le fruit de cet effort à la bougie qui a fondu pour éclairer ma vie, à ma chère mère qui m'a inculqué les valeurs les plus profondes.*

*A celui qui s'est sacrifié pour atteindre mon objectif et qui n'a pas hésité un jour à m'offrir un chemin de bonté et de bonheur à mon estimé père **Ahmed**.*

*Pour ceux qui m'ont soutenu et facilité mes difficultés, avec ses encouragements constants, mon fiancé **Taher**.*

*Et aux personnes les plus chères et les plus proches, ma sœur bien-aimée **Safa** et son mari, mon petit ange **Rasim** et **Batool**, mes frères **Adel**, **Khaled**, **Hafed**, **Abdullah** et **Moataz** et **Hamed**.*

*À tous ceux-ci, je dédie l'humble travail; Nous demandons à Dieu Tout-Puissant de nous en faire bénéficiaire et de nous accorder son succès.*

*MAROUA*

## ***Dédicace***

*Je m'incline devant dieu le tout-puissant qui m'a ouvert la porte du savoir et m'a aidé à la franchir . Je dédie ce modeste travail à celle qui s'est réveillée à l'aube pour moi .....*

*ma chère mère **Wafia** et mon chère père **Mohammed**  
en témoignage de ma profonde reconnaissance pour tout l'effort et le soutien incessant qu'il m'a toujours apporte Mon grand-père **Abdel wahab***

*A la bougie de la maison , ma petite sœur **Bayan**, et mes frères **Firas**  
et **Diaa eddine***

*Et A la personne la plus chère à mon cœur.*

*A tout mes amis et tout*

*enfin, tout ceux qui ont contribué à m'aide de près ou de loin, vous avez mes sincères remerciements et ma reconnaissance.*

*Amína*

## ملخص

تعد استخدامات الآلات غير المتزامنة في المجالات الصناعية هي الأكثر تنوعًا ، وخاصة المحركات غير المتزامنة ذات قفص السنجاب. لذلك فإن الحاجة تفرض العديد من المشاريع البحثية لدراسة التحكم في هذا النوع من الآلات وصيانتته وكشف العيوب ، والغرض من التشخيص هو معرفة العيوب ، ويجب تشخيص أي خلل قبل حدوثه.

في هذه الدراسة ، قمنا بتشخيص عيب خلل في الحلقة الخارجية للمدحرجات بناءً على التقنيات المستخدمة مؤخرًا. تهدف هذه الرسالة إلى تحليل الخلل من خلال التقنيات الثلاث التالية: MCSA و MVSA و SFSA. تعتمد هذه التقنيات أيضًا على الأداة المسماة (Fast Fourier Transform (FFT).

**الكلمات الرئيسية:** المحركات غير المتزامنة ذات قفص السنجاب (IM) ، خطأ المحمل ، التشخيص ، تحويل فورييه السريع (FFT) ، محلل توقيع التيار الحركي (MCSA) ، محلل توقيع التدفق الثابت (SFSA) ، تحليل التوقيع الاهتزازي للمحرك (MVSA).

## Résumés

Les utilisations des machines asynchrones dans les domaines industriels sont les plus diverses, notamment les moteurs asynchrones à cage d'écureuil. Par conséquent, le besoin impose de nombreux projets de recherche pour étudier le contrôle et la maintenance de cet MAS et pour détecter les défauts, et le but du diagnostic est de découvrir les défauts, et tout défaut doit être diagnostiqué avant qu'il ne se produise.

Dans cette étude, nous avons diagnostiqué le défaut de la bague extérieure du roulement en se basant sur des techniques récemment utilisées. Ce mémoire a l'objectif d'analyser le défaut par les trois techniques suivantes : MCSA, MVSA et SFSA. Ces techniques se base aussi sur l'outil qui s'appelle la transformée de Fourier rapide (FFT).

**Mots clés :** Moteurs asynchrones à cage d'écureuil(MAS), défaut du roulement, diagnostic, transformée de Fourier rapide(TFR), Moteur Courant Signature Analysais(MCSA), Stary Flux Signature Analysais (SFSA), motor vibratory signature analysis(MVSA).

# Abstract

The uses of asynchronous machines in industrial fields are the most diverse, especially squirrel-cage asynchronous motors. Therefore, the need imposes many research projects to study the control and maintenance of this induction machine (IM) and to detect the faults, and the purpose of diagnosis is to find out the faults, and any fault must be diagnosed before it produce.

In this study, we diagnosed the bearing outer race defect based on recently used techniques. This dissetration aims to analyze the defect by the following three techniques: MCSA, MVSA and SFSA. These techniques are also based on the tool called the Fast Fourier Transform (FFT).

**Keywords:** Squirrel-Cage Asynchronous motors (MAS), bearing fault, diagnosis, fast Fourier transform (FFT), Motor Current Signature Analyzer (MCSA), Stary Flux Signature Analyzer (SFSA), motor vibratory signature analysis (MVSA).



# *Table des matières*

## *Table des matières*

Titre.....	page
Liste des figures.....	vi
List des tableaux.....	xi
List des Symboles et des Abréviations .....	xiii
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>

### *CHAPITRE I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts dans la Machine Asynchrone*

<b>I.1 Introduction:</b>	<b>3</b>
<b>I.2- Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone</b>	<b>3</b>
<b>I.3-Constitutions des machines asynchrones:</b>	<b>4</b>
I.3.1-Stator :	<b>5</b>
I.3.2-Rotor :	<b>6</b>
I.3.2.1. Le rotor à cage :	<b>6</b>
I.3.2.1. Le rotor bobiné :	<b>7</b>
I.3.2.3 -Rotors spéciaux :	<b>7</b>
I.3.3-Les paliers :	<b>7</b>
<b>I.4-Les défauts des machines asynchrones :</b>	<b>8</b>
I.4.1-causes des défauts:	<b>9</b>
I.4.2.Les défaillances des machines électriques:	<b>11</b>
I.4.2.1.les défauts statoriques :	<b>12</b>
I.4.2.1.1- Court-circuit enter phases:	<b>12</b>
I.4.2.1.2 -Court-circuit enter spire :	<b>13</b>
I.4.2.1.3- Défauts de circuit magnétique :	<b>14</b>
I.4.2.1.4- Court-circuit avec la bâti (la carcasse) :	<b>14</b>
I.4.2.2 -Défauts rotoriques:	<b>15</b>

I.4.2.2.1- Excentricité :	15
I.4.2.2.2-Rupture d barres et d'anneau des court-circuit:	16
I.4.2.2.3. Roulement à billes :	16
<b>I.5-Techniques du diagnostic des machines asynchrones:</b>	<b>17</b>
I.5.1- Techniques mécaniques :	18
I.5.1.1_ Diagnostic par mesure de la température:	18
I.5.1.2- Diagnostic par mesure des vibrations:	18
I.5.2- Diagnostic chimiques:	19
I.5.3- Techniques magnétiques et électriques :	19
I.5.3.1-Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite :	19
I.5.3.2- Diagnostic par l'analyse du courant statorique :	20
<b>I.6-Conclusion:</b>	<b>21</b>

## ***CHAPITRE II : Aperçu Detaille Sur Le Défaut Du Roulement Dans Les MAS***

<b>II.1- Introduction :</b>	<b>22</b>
<b>II .2-Etude Théorique Sur Les Roulements:</b>	<b>22</b>
II .2.1-les roulements :	22
II.2.1.1-Conception d'un roulement :	23
II.2.2-Caractéristiques des roulements:	25
II.2.3-Types de roulement :	25
II.2.4-Les défaut de roulements :	26
II.2.4.1-L'usure :	27
II.2.4.1.1-Usure par déformation :	27
II.2.4.2-Ecaillage de fatigue:	28
II.2.4.2.1-Ecaillage superficiel de la bague externe:	28
II.2.4.3-Croisson :	29
II.2.4.4-Le Grippage:	30
II.2.4.5-Déformation des cages :	30
II.2.4.6-Le piquetage:	31

II.2.4.7-Jeu de roulement:	31
II.2.5-Les causes des défauts de roulement:	32
II.2.6-fréquence caractéristique pour les défauts de roulements:	32
II.2.6.1-défaut de la cage :	33
II.2.6.2-défaut de l'élément roulant :	33
II.2.6.3-défaut de la bague interne :	34
II.2.6.4-défaut de la bague externe :	34
<b>II.3-Etude détaillée sur les techniques MCSA , MVSA ,SFSA:</b>	<b>35</b>
II.3.1-Technique de diagnostic (MCSA):	35
II.3.2-Technique de diagnostic (MVSA):	35
II.3.3-Technique de diagnostic (SFSA):	36
II.3.4-la transformée de Fourier FFT:	37
<b>II.4-Conclusion:</b>	<b>38</b>

### ***CHAPITRE III : Détection du défaut dans la bague externe en utilisant trois techniques***

<b>III.1- Introduction :</b>	<b>39</b>
<b>III.2-Transformée de Fourier rapide (FFT):</b>	<b>39</b>
<b>III.3-Analyse du défaut de roulement de la bague extérieure par MCSA-FFT :</b>	<b>40</b>
III.3.1- Fonctionnement à vide:	40
III.3.2- Fonctionnement à charge:	43
III.3.3- Discussion la MCSA pour la bague extérieure:	46
<b>III.4-Analyse du défaut de la bague extérieure par MVSA-FFT:</b>	<b>47</b>
III.4.1-Fonctionnement en charge:	47
III.4.2-Discussion la MVSA pour la bague extérieure:	49

III.5-Analyse du défaut de la bague extérieur par SFSA –FFT	49
III.5.1-Analyse du défaut dans la bague extérieure :	50
III.5.2-Discussion la SFSA pour la bague extérieur :	53
<b>III.6-Conclusion:</b>	<b>54</b>

---

# *Liste des figures*

## **CHAPITRE I:**

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

<b>Figure I.1.</b> Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.	4
<b>Figure I.2.</b> Principe de fonctionnement MAS.	5
<b>Figure I.3.</b> Stator de la machine asynchrone.	6
<b>Figure I.4.</b> Rotor à cage (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux (bagues) de court-circuit.	6
<b>Figure I.5.</b> causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	9
<b>Figure I.6.</b> causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée cage.	9
<b>Figure I.7.</b> Court-circuit entre phases .	12
<b>Figure I.8.</b> court-circuit entre spires.	12
<b>Figure I.9.</b> Défauts statoriques.	13
<b>Figure I.10</b> Représentation de l'excentricité statique et dynamique.	14
<b>Figure I.11</b> Défaut rupture des barres de rotor.	15

---

<b>Figure I.12</b> Roulements à billes.	16
<b>Figure I.13</b> Les différentes grandeurs de diagnostique dans une machine.	16
<b>Figure I.14</b> Capteur de température dans une plaque à bornes.	17
<b>Figure I.15</b> Mesure du flux axial.	18
<b>Figure I.16</b> Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique.	19

## ***CHAPITRE II:***

### ***Modélisation de la MAS à des défauts de roulement à cage d'écureuil***

<b>Figure II.1</b> : Principaux éléments constitutifs d'un roulement.	23
<b>Figure II.2</b> : Eléments tournants ; billes, rouleaux : cylindriques, coniques, sphériques.	23
<b>Figure II.3</b> : Types de roulements.	25
<b>Figure II.4</b> : Usure à billes.	26
<b>Figure II.5</b> : Usure par déformation d'une bague externe.	27
<b>Figure II.6</b> : Ecaillage superficiel de la bague externe.	28
<b>Figure II.7</b> : Photo d'un écaillage de fatigue d'un roulement sur la BE.	28
<b>Figure II.8</b> : Corrosion de contact sur la bague Intérieure d'un roulement à rouleaux Sphérique.	28

---

<b>Figure II.9</b> : Grippage d'une bague externe.	30
<b>Figure II.10</b> : Déformation de cage d'un roulement à billes de contact angulaire	30
<b>Figure II.11</b> : Fissure (cassure) et piquetage dans la bague extérieure.	31
<b>Figure II.12</b> : Jeu de roulement (axial et radial)	31
<b>Figure II.13</b> : Caractéristique d'un roulement.	33
<b>Figure II.14</b> : Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.	36
<b>Figure II.15</b> : Répartition de lignes de flux de fuite dans une machine électrique.	36
<b>Figure II.16</b> : Mesure du flux axial.	37
<b>Figure II.16</b> : Mesure du flux radial.	37

### ***CHAPITRE III:***

#### ***Détection du défaut dans la bague externe en utilisant trois techniques***

<b>Figure (III.1)</b> : Principe de la Transformée de Fourier.	39
<b>Figure (III.2)</b> : Spectre du courant statorique ((A) sain, (b) BE à vide) ; 0-100Hz.	42
<b>Figure (III.3)</b> : Spectre du courant statorique ((A) sain, (b) BE à vide) ; 100-400Hz.	42
<b>Figure (III.4)</b> : Spectre du courant statorique ((A) sain, (b) BE à vide) ; 400-650Hz.	43

---

<b>Figure (III.5) :</b> Spectre du courant statorique ((A) sain, (b) BE à charge) ; 0-100 Hz.	45
<b>Figure (III.6) :</b> Spectre du courant statorique (A) sain, (b) BE à charge) ; 100-300 Hz.	45
<b>Figure (III.7) :</b> Spectre du courant statorique (A) sain, (b) BE à charge) ; 300-650 Hz.	46
<b>Figure (III.8) :</b> Spectre d'un signal vibratoire (A) sain, (b) BE en charge) ; 0-100 Hz	48
<b>Figure (III.9) :</b> Spectre d'un signal vibratoire(A) sain, (b) BE en charge) ; 100-300 Hz	48
<b>Figure (III.10) :</b> Spectre d'un signal vibratoire (A) sain, (b) BE en charge) ; 300-450Hz	49
<b>Figure (III.11) :</b> spectre de flux à plage 0_100 Hz.	50
<b>Figure (III.12) :</b> spectre de flux à plage 100_200 Hz.	51
<b>Figure (III.13) :</b> spectre de flux à plage 200_300 Hz.	52
<b>Figure (III.14) :</b> spectre de flux à plage 300_400 Hz.	52

## *List des tableaux*

<i>Tableau (III.1) : représente quelques valeurs des fréquences caractéristiques calculées en se basant sur la formule .</i>	41
<i>Tableau (III.2) : Fréquences caractéristiques du défaut de roulement de la bague extérieure (fonctionnement en charge).</i>	44
<i>Tableau (III.3) : Représente les harmoniques du défaut d'une bague extérieure dans le spectre d'un signal vibratoire.</i>	47
<i>Tableau (III.4) : Représentation les deux harmoniques de spectre de flux</i>	51
<i>Tableau (III.5) : les valeurs de fréquence et l'amplitude pour un état sain et un état défectueux de la MAS</i>	53

## *Liste des symboles et Abréviations*

$f$	La fréquence d'alimentation
$p$	Représente le nombre de paire de pôles.
$N_s$	Vitesse du champ tournant stator
$N_r$	Vitesse du champ tournant rotor
$g$	Glissement
$p$	Le nombre de paire de pôles
$N_b$	Le nombre de barres
$n_{os}$	L'ordre des harmoniques de temps
$\lambda$	Entier positif
$f_s$	Fréquence de courant statorique
$f_R$	Fréquence de courant rotorique
MAS	Machine asynchrone
MCSA	Motor Current Signature Analysis
MVSA	Motor Vibration Signature Analysis
SFSA	Stray flux signature analysis
FFT	Fast Fourier Transform
BE	Bague extérieur
$C_R$	Constante caractéristique de roulement
$P_R$	La charge équivalente sur le roulement.
$N$	Le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).
$D_m$	Le diamètre primitif

$\alpha$	Angle de contact
Db	Le diamètre des éléments roulants
Fe	la fréquence caractéristique de la bague extérieure
Fbi	la fréquence caractéristique de la bague interne
Fr	la fréquence de rotation de la cage
Fbille	la fréquence caractéristique de rotation des billes
Dm	le diamètre du centre des billes
$f_{RSHs}$	fréquences d'harmoniques d'encoches rotoriques
<i>RSHs</i>	Rotor Slot Harmonics



# ***INTRODUCTION GENERALE***

## *INTRODUCTION GENERALE*

La machine asynchrone, de par sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère du marché. Les progrès réalisés en commande et les avancées technologiques considérables, tant dans le domaine de l'électronique de puissance que dans celui de la micro-électronique, ont rendu possible l'implantation de commandes performantes de cette machine faisant d'elle un concurrent redoutable dans les secteurs de vitesse variable et contrôle rapide du couple [BOUD20].

Les machines asynchrones à cage d'écurie sont largement répandues dans l'industrie en raison de leur fiabilité et construction simple. Elles sont utilisées dans la majorité des secteurs industriels et commerciaux. Cependant, elles sont sujettes à de nombreux défauts comme les barres cassées ou l'excentricité au niveau du rotor ou encore les courts-circuits entre spires au stator.

Les défauts qui apparaissent dans la machine électrique ont des causes variées. Ils peuvent être dus au vieillissement des constituants du moteur ou bien aux conditions d'utilisation ou tout simplement à un défaut de fabrication dont l'effet serait imperceptible lors de la mise en service. Tout ces défauts (usure des paliers, engrenages, rupture de barre, court-circuit statorique, etc.) [BAB14].

L'ensemble des défaillances rotoriques représente quant à lui 10 % du total, loin derrière celles, mécaniques, inhérentes aux roulements et aux paliers, qui sont estimées à environ 45 %. Dès lors, on peut légitimement se poser la question : est-il nécessaire de consacrer des études pour prévenir 5 % des défauts, et ne vaudrait-il pas mieux s'attacher à résoudre les 45 % prépondérants ?

Il existe plusieurs types de techniques de détection et de diagnostic, à savoir l'analyse vibratoire, l'analyse des signatures des courants du moteur, l'analyse acoustique et thermographique, etc. Seulement, Ces méthodes sont principalement préconisées pour la détection des défauts mécaniques [KER17].

Les vibrations sont omniprésentes dans la plupart des machines électriques. Les machines tournantes vibrent pour plusieurs raisons comme : défauts d'équilibrage et d'alignement et les imperfections des paliers, les cassures partielles ou totales des barres rotoriques, les problèmes aux roulements, et l'excentricité. Généralement, les vibrations

diminuent la durée de vie de l'équipement et dans les cas extrêmes peuvent endommager celui-ci ou même provoquer des défaillances catastrophiques.

La procédure de l'analyse des signatures vibratoires du moteur (ASVM ou MVSA en Anglais), consiste à détecter l'apparition d'un défaut sans démontage de la machine en prélevant l'image vibratoire à l'aide d'un capteur de vibration. Dans la plupart des cas, le traitement des signaux vibratoires s'effectue par l'analyse du contenu spectral [BES17].

Une autre technique est également utilisée de plus en plus dans ces dernières années, elle repose sur l'analyse du courant statorique ou MCSA (Motor Current Signature Analysis). Sa particularité réside dans le fait que le courant statorique comporte des informations sur quasiment tous les défauts qui peuvent apparaître au niveau du moteur asynchrone.

La procédure de l'analyse des signatures de flux parasite ou en anglais Stray Flux signature analysis (SFSA) a été appliquée avec succès pour divers types de défauts.

L'objectif de ce travail est détecter le défaut du roulement (bague externe) dans la machine asynchrone à cage d'écureuil en utilisant les techniques suivantes : MCSA, MVSA et SFSA.

Le mémoire est structuré de la manière suivante :

Dans le premier chapitre un état de l'art du domaine de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone MAS sera présenté.

Le deuxième chapitre présentera les méthodes d'analyse utilisées dans ce travail qui sont MCSA-FFT, analyse vibratoire et l'analyse spectrale du flux magnétique.

Dans le troisième chapitre, nous allons exploiter les résultats expérimentaux pour analyser les défauts de roulement en se basant sur les méthodes indiquées précédemment.

Finalement, une conclusion générale va résumer et comparer entre les techniques afin d'avoir une décision précise sur l'état de la MAS.

# CHAPITRE I

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

### ***1.1. Introduction :***

Ce chapitre dresse un panorama des défauts dans les machines asynchrones (MAS) évaluer diagnostic. Précisément, les défauts dans les machines asynchrones afin de détecter les défauts mécaniques.

D'une manière générale, la surveillance et le diagnostic des machines électriques tournantes remettent en cause les concepts et les outils traditionnels utilisés dans le domaine de la conception des machines électriques tournantes. Ce chapitre va traiter des généralités sur les MAS en indiquant les différents défauts qui peuvent affecter ce type des machines. Dans cette partie, nous allons présenter quelques techniques de diagnostic utilisés dans le domaine de la surveillance.

### ***1.2.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :***

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction. La machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit.

Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau du courant induit dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant :

Lorsque le rotor tourne à une vitesse  $N_s$  différent du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulements rotoriques montre que celui -ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuit sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limité par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est [GIL13] :

$$N_r = f/p \quad (\text{I.1})$$

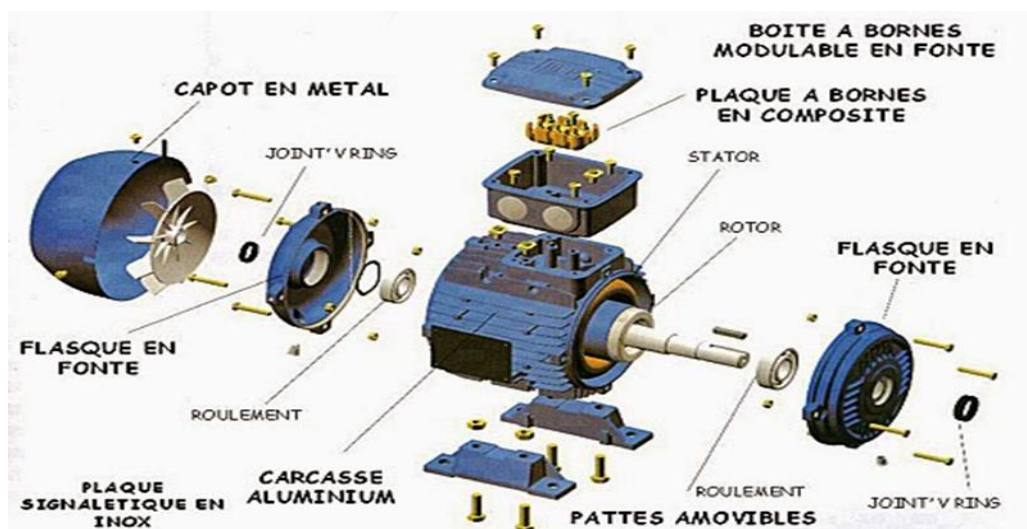
Ou

$f$  : est la fréquence d'alimentation.

$p$  : représente le nombre de paire de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant ( $N_s$ ) diffère de celle du rotor ( $N_r$ ) ; c'est-à-dire lorsque  $N_r \neq N_s$  ; car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque  $N_r = N_s$  champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique le rapport  $g = N_s - N_r$  est appelé glissement de la machine asynchrone [GIL13].

Loi principale de la rotation rotorique



**Figure I.1** : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

### ***1.3. Constitutions des machines asynchrones :***

La connaissance des éléments de constitution des machines asynchrones permet de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones

Triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes [BOUZ08] :

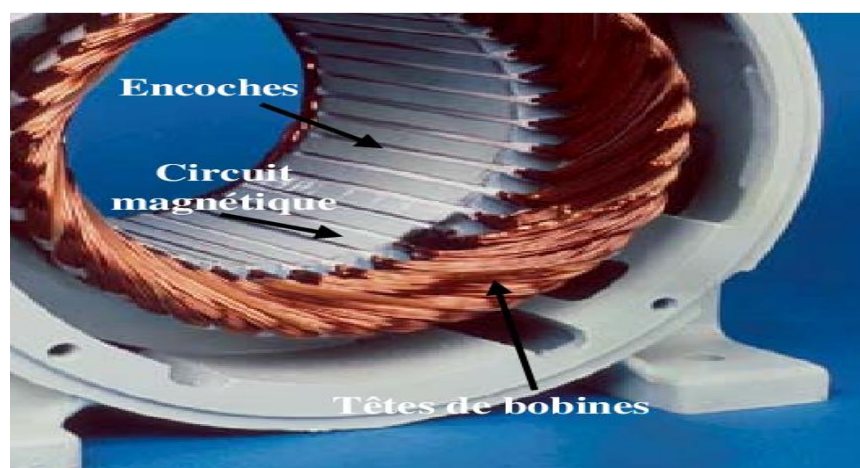
- ✓ le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- ✓ le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- ✓ les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.



**Figure I.2:** Principe de fonctionnement MAS [BOU20].

### I.3.1. Stator :

Le circuit magnétique du stator est réalisé par un assemblage de tôles ferromagnétiques fines et découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. L'utilisation des tôles minces permet de minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique peut se décomposer. En 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. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique [HAL15].



**Figure I.3 :** Stator de la machine asynchrone.

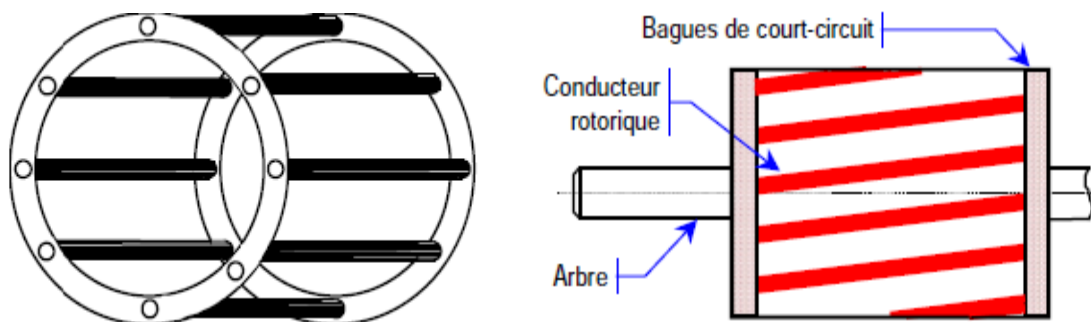
### I.3.2. Rotor :

C'est par le rotor, la partie mobile, que la machine asynchrone se distingue de l'autre machine triphasée, la machine synchrone. De manière générale, le rotor est le siège de grandeurs électromagnétiques variables [ZER13].

#### I.3.2.1. Le rotor à cage :

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure. I.4). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées 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 [ZER13] résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre.

Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service [ZER13].



**Figure I.4 :** Rotor à cage (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux (bagues) de court-circuit.

**I.3.2.2. Le rotor bobiné :**

Les bobinages répartis sont logés dans des encoches à la périphérie rotorique feuilleté. Souvent triphasés, les bobinages aboutissent à des bagues isolées fixées sur l'arbre. Chaque bobinage doit être en court-circuit. Grâce aux bagues, le court-circuit se fait à l'extérieur. Ce type de rotor a les désavantages d'être relativement coûteux, et la présence des contacts entre bagues et balais, qui entraînent une fiabilité moindre et un entretien plus contraignant, font que la solution du rotor bobiné n'est retenue que dans quelques cas particuliers ( par exemple : les conditions des démarrage sont particulièrement difficiles, ..).

**I.3.2.3. Rotors spéciaux :**

En effet, il existe d'autres types des rotors. Ils sont utilisés pour résoudre différents problèmes de démarrage, on peut situer parmi ces rotors :

- Rotors à coupleur centrifuge.
- Rotors à effet de peau [OUL12].

**I.3.3. Paliers :**

Le palier ou 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. 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 [OUL12].

### ***1.4. Les défauts des machines asynchrones :***

Si l'on élimine les pannes dues à des causes intrinsèques, c'est-à-dire, résultant d'une mauvaise conception (mauvais choix des matériaux), d'une mauvaise fabrication (défauts d'usinage) ou d'un mauvais montage (serrage, désalignement) du moteur, les défaillances usuelles d'une machine asynchrone sont les suivantes [HOU19] :

#### **1) Défauts statoriques :**

- ✓ Court-circuit entre phases statorique.
- ✓ Court-circuit entre spire d'une même phase.
- ✓ Ouverture d'une phase.
- ✓ Défauts du circuit magnétique (ruptures de tôles).

#### **2) Défauts rotorique :**

- ✓ Cassure de barres.
- ✓ Rupture d'anneaux.
- ✓ Excentricité statique et dynamique.
- ✓ Excentricité mixte.

#### **3) Roulements à bille :**

- ✓ Trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- ✓ Ondulation de leur surface de roulement.
- ✓ Attaque des billes.
- ✓ Corrosion due à l'eau.
- ✓ Défaut de graissage, problème du à la température.
- ✓ Décollement, effritement de surface, provoquée par une surcharge [BES17].

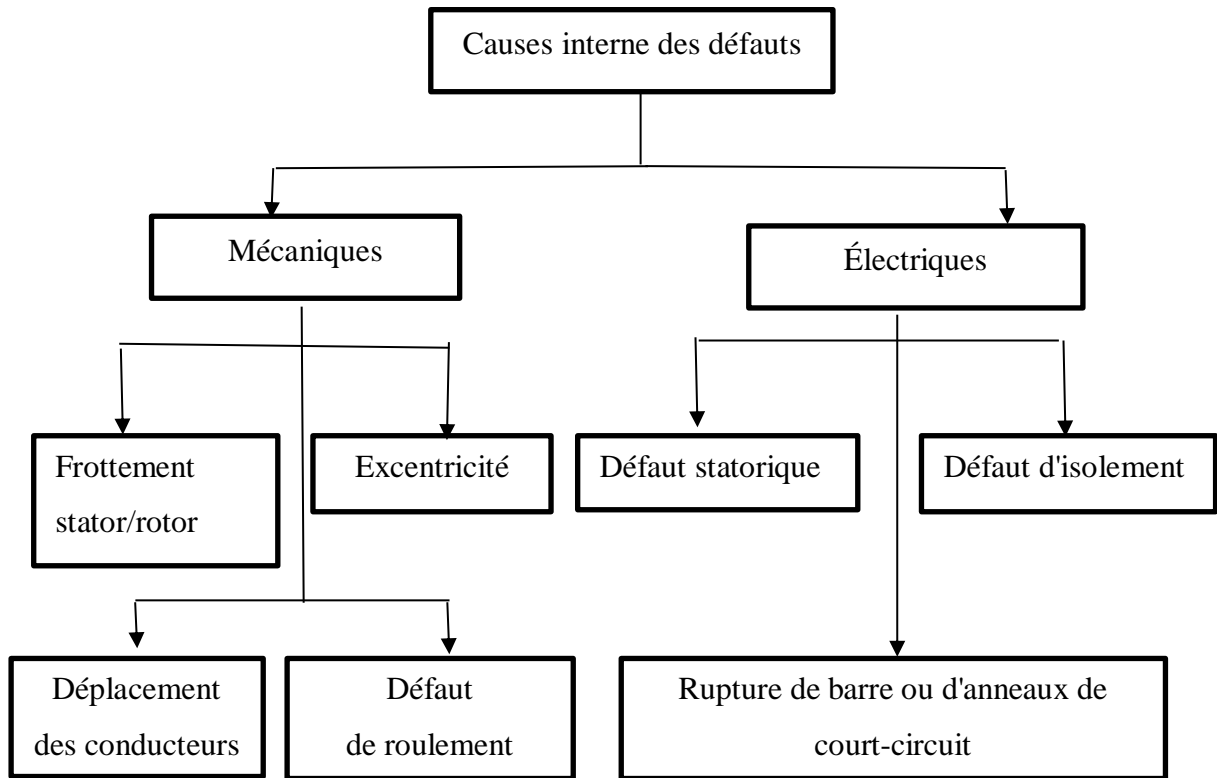
#### **I.4.1. Causes des défauts :**

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes [NEZ12] :

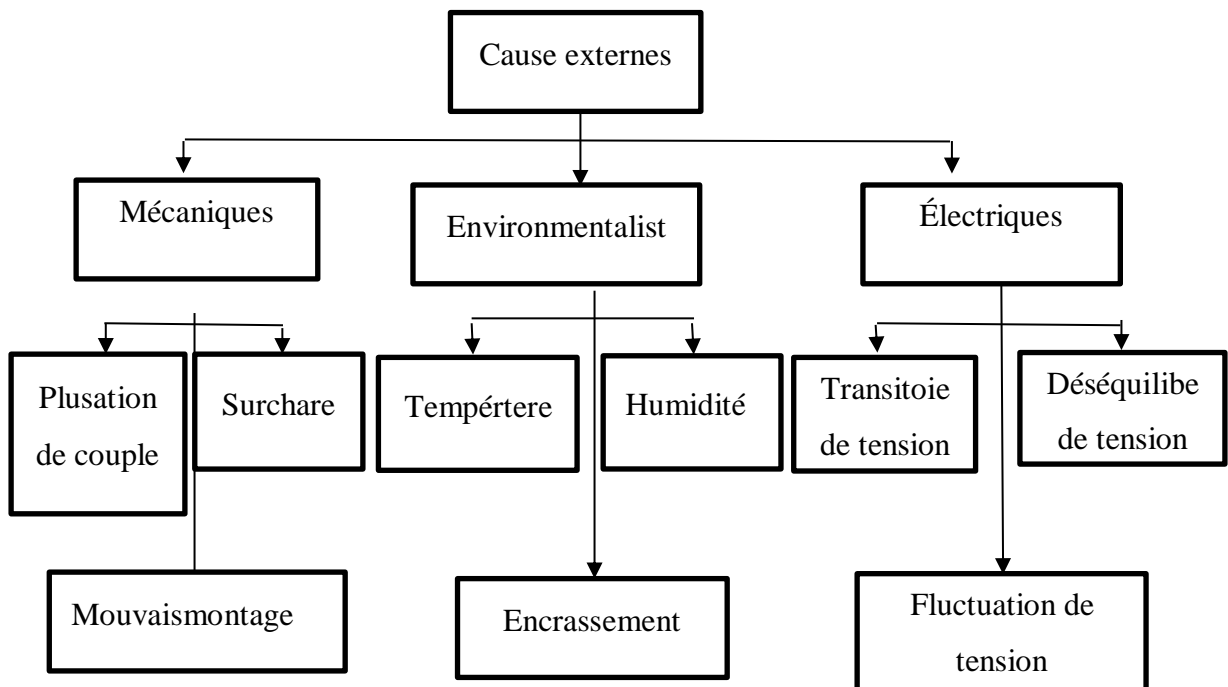
- ✓ Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts: surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), problème mécanique, rupture de fixation, problème d'isolation, survoltage d'alimentation...

- ✓ Les amplificateurs de défauts: surchauffe fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, alimentation perturbée (instabilité de la tension ou de la fréquence), échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement...

- ✓ Les vices de fabrication et les erreurs humaines: défauts de fabrication, défektivité des composants, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine etc.



**Figure I.5.** Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage [BEL20].



**Figure I.6.** Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage [BEL20].

### I.4.2. Défaillances dans les machines électriques:

Parmi les méthodes les plus utilisées, nous citerons l'analyse du courant statorique et l'analyse vibratoire. Ces dernières sont l'objectif de notre travail ; nous allons mettre en lumière une étude comparative en présence des défauts. La première (basée sur le courant du stator) dépend de la distribution de champ dans l'entrefer et son influence sur les courants statoriques, elle porte l'abréviation ASCM ou ASCS (Analyse les Signatures de Courant du Moteur 'ou du Stator', ou en anglais Motor Current Signature Analysis 'MCSA').

En réalité, l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est en fonction de différents paramètres, tels que la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage]. A cause de cette structure, il a été démontré, qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique, des harmoniques dites d'encoches rotoriques (*RSHs*), ayant pour fréquences [BES17] :

$$f_{RSHs} = \left[ \frac{\lambda n_b}{p} (1 - s) \mp n_{cos} \right] \cdot f_s \quad (I.2)$$

Avec,  $p$  est le nombre de paire de pôles,  $n_b$  le nombre de barres,  $n_{\omega s}$  l'ordre des harmoniques de temps de la FMM ( $n_{\omega s} = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ ), et  $\lambda$  un entier positif. Pour  $\lambda=1$  et  $n_{\omega s}=1$  on définit ce qui est appelé " harmoniques d'espaces ou d'encoches principales " (*PSHs*).

La seconde, est la méthode d'analyse des signatures vibratoires du moteur (ASVM), qui est un des moyens les plus utilisés dans l'industrie, par des équipements disponibles aux mesures des signaux de vibration. L'ASVM a le rôle de suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une politique de maintenance prévisionnelle de l'outil de production industrielle.

La connaissance des différents organes d'une machine, savoir comment déterminer les fréquences prévisibles de vibration et savoir configurer une chaîne de mesures vibratoires, sont des étapes primordiales avant d'utiliser cette méthode. Le relèvement des signaux vibratoires donne l'occasion de les traiter, les analyser et les manipuler par une diversité d'idées. L'analyse vibratoire est encore un sujet actuel, de nos jours. Beaucoup de techniques d'analyse vibratoire orientées aux équipements industriels, ont été proposées par les chercheurs, surtout avec l'introduction et le développement du traitement de signal [BES17].

#### **I.4.2.1.les défauts statoriques :**

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème :

- **Thermique** : l'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de cette température de fonctionnement, la durée de vie raccourcit rapidement Cette augmentation de la température peut être due à une variation de tension ou de déséquilibre, à la répétition des démarrages dans un court laps de temps, à des surcharges, à une mauvaise ventilation ou alors à une haute température ambiante.
- **Electrique** : Une tension supérieure à la valeur nominale ou de hautes valeurs de  $dV/dt$  du à l'ouverture et le fermeture des interrupteurs du convertisseur statique, vont conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines.
- **Mécanique** : les démarrages répétitifs de machine ont pour conséquence d'augmenter la température [OUL12].

Dans le cuivre (bobinage statorique et cage). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure. Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration.

- **Environnemental** : La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant [OUL12].

##### **I.4.2.1.1. Court-circuit enter phases :**

Un court-circuit entre phases peut arriver en tout point du bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des

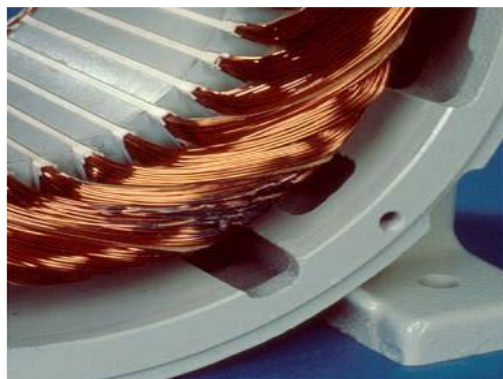
conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs [RAH18].



**Figure I.7.** Court-circuit entre phases [MER20].

#### **I.4.2.1. Court-circuit enter spire :**

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent, cette défaillance a pour origine une ou plusieurs défauts d'isolement dans l'enroulement concerne. Il entraîne une augmentation des courant statoriques dans la phase effectuée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotoriques. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et de ce fait, une dégradation accélérée [MER20].



**Figure I.8** Court-circuit entre spires [MER20].

#### **I.4.2.1.3. Défauts de circuit magnétique :**

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc [BOUG09].

#### I.4.2.1.4. Court-circuit avec la bâti (la carcasse) :

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant [SID11] entraîné des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatile. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [SID11].

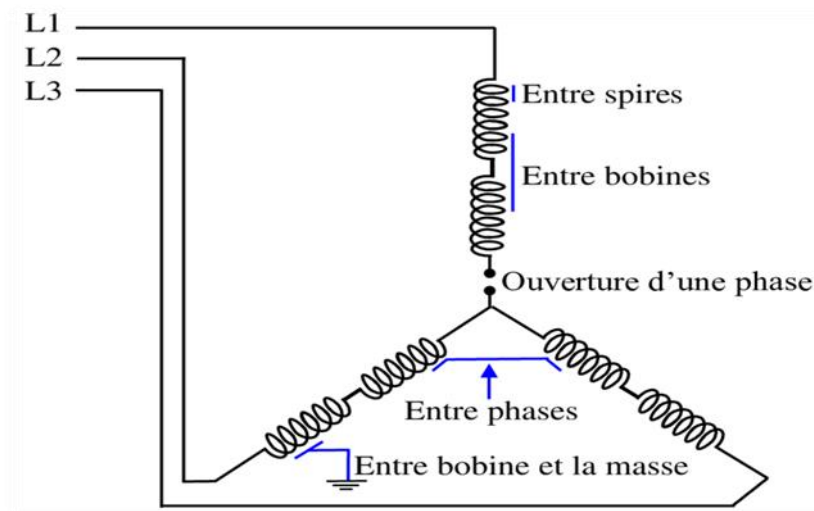


Figure I.9. Défauts statoriques [HAR09].

#### I.4.2.2. Défauts rotoriques :

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

- Excentricité statique, dynamique, mixte
- Portion d'anneau ou de barre au rotor,
- Roulement à billes.

Il est important de souligner que les défauts rotoriques peuvent être la cause de défauts dans les autres parties de la machine, et entraîner ainsi un dysfonctionnement plus grave [HAR09].

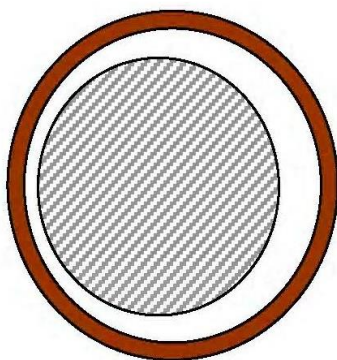
#### I.4.2.2.1. Excentricité statique, dynamique et mixte :

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). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) son origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge ou à un défaut de fabrication.

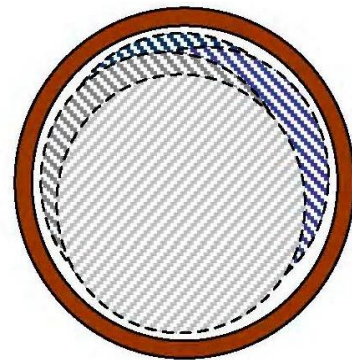
Trois cas d'excentricités sont généralement distingués :

- l'excentricité statique : le rotor est déplacé du centre de l'alésage mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique : le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité mixte : associant les deux cas, statique et dynamique.

On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante [KHA09] :



Excentricité statique



Excentricité dynamique

**Figure I.10.** Représentation de l'excentricité statique et dynamique.

#### I.4.2.2.2. Rupture d barres et d'anneau des courts-circuits :

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la

machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration du machin, 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 [MER20].



**Figure I.11.** Défaillance rupture des barres de rotor.

#### **I.4.2.2.3. Roulement à billes :**

Les roulements sont l'une des causes les plus importantes des défaillances des machines tournantes, Ces défaillances peuvent être classés en fonction de l'élément endommagé, comme suite : défaut de bague extérieure ou intérieure, et défaut à billes.

Parmi ces défaillances nous citons [OUL12] :

- Trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- Dégradations de chemins de roulement dues à des surcharges mécaniques.
- Attaque des billes.
- Défaut de graissage, problème due à la température.
- Cassure d'une bague.

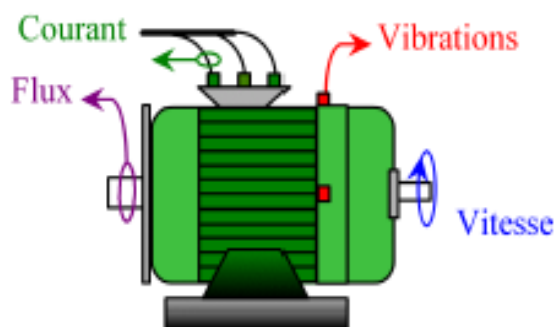


**Figure I.12.** Roulements à billes.

### ***1.5. Techniques du diagnostic des machines asynchrones :***

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur.

Pour remédier au problème de détection des défauts, il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure (mesure de champ magnétique, mesure de bruit) d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut (courant statorique, couple et vitesse) [HAR09].



**Figure I.13.** Les différentes grandeurs de diagnostic dans une machine [HAR09].

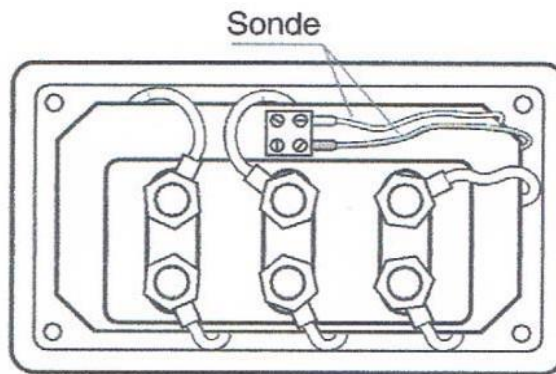
Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : les techniques mécaniques, les techniques chimiques et les techniques magnétiques et électriques.

### I.5.1. Techniques mécaniques :

Parmi ces techniques, on trouve :

#### I.5.1.1. Diagnostic par mesure de la température :

La Thermographie Un capteur peut être monté sur l'enroulement ou noyé (intégré) dans l'isolant ou placé dans la plaque à bornes est un bon indicateur de la surchauffe de la machine qui est un signe de défauts, (figureI.14). En plus, récemment des techniques par visualisation des images thermiques par infrarouge sont utilisées pour le diagnostic des différents défauts, [SAM16] (figureI.16).



**Figure I.14.** Capteur de température dans une plaque à bornes [SAM16].

#### I.5.1.2. Diagnostic par mesure des vibrations :

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales. Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts fréquemment rencontrés, notamment ceux mécaniques. Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients :

- Problème d'accessibilité.
- Difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut.

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

Pour s'affranchir de ces problèmes, [ZER13] les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux.

### **I.5.2. Diagnostic par analyse chimique :**

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 [BES13].

### **I.5.3. Techniques magnétiques et électriques :**

#### **I.5.3.1. Diagnostique par mesure du flux magnétique axial de fuite :**

Dans le cas idéal de fonctionnement, les courants et les tensions statoriques de la machine sont équilibrés. Mais lors d'un défaut quelconque, il entraîne un déséquilibre électrique et magnétique dans la partie statorique, ce qui provoque l'apparition des flux de fuite axial de valeurs liées au degré de sévérité du défaut.

Pour analyser ce flux axial, on place à l'extrémité de la machine ou autour de l'arbre une bobine. Elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le flux de mesure peut être utilisé dans l'analyse spectrale pour le suivi de l'état électrique et détecter le type de défauts d'un MI à cage [ALL10].



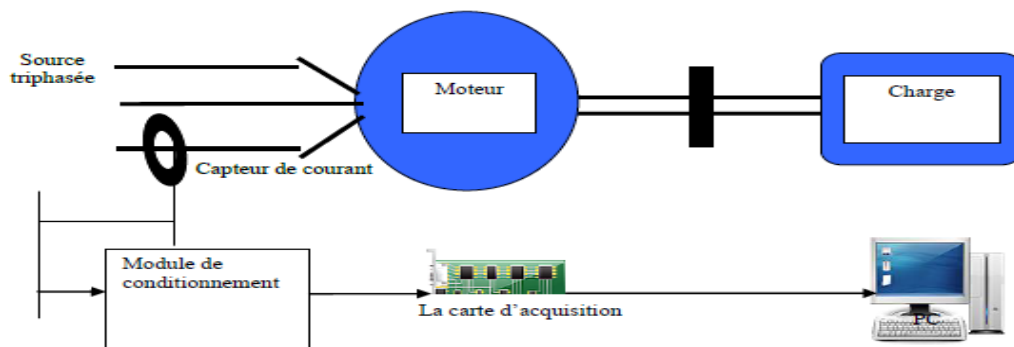
**Figure I.15.** Mesure du flux axial.

### I.5.3.2. Diagnostic par l'analyse du courant statorique :

Cette méthode est un outil puissant pour détecter la présence des défauts mécaniques et électriques. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes, parce qu'elle ne demande ni l'introduction d'un capteur au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant mais seulement un capteur de courant (sonde à effet de hall ou transformateur de courant) qui donne une image sur le courant de phase statorique. C'est cette méthode de diagnostic qui sera utilisée comme outil de 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 [CHA13].

Dans le cas d'une répartition non sinusoïdale de la FMM en plus du fondamental apparaît des Harmoniques de l'encochage rotorique, cas d'un moteur à cage. Pour montrer le principe de cette méthode, on considère le cas d'une asymétrie rotorique d'un moteur asynchrone, l'existence de ce défaut engendre un courant de défaut dans le rotor, Ce courant produit une FMM pulsatoire dont la fréquence d'ondulation est  $(sf)$ , cette FMM produit dans l'enroulement statorique une harmonique à deux composantes, la première ayant la fréquence  $(1 - 2s)f$  et la deuxième ayant la fréquence  $(1 + 2s)f$  [CHA13].



**Figure I.16.** Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique [CHA13].

***1.6. Conclusion:***

Nous avons présenté dans ce premier chapitre la machine asynchrone et ses différentes constitutions. Des études statistiques sur les défaillances des machines ont été présentées dont le taux le plus élevé était les défauts de roulements et du stator. C'est pour remédier ce problème, les chercheurs ont développé des techniques de diagnostic. Cette partie a présenté un ensemble des techniques les plus connues dans le domaine du diagnostic des machines tournantes.

## **CHAPITRE II**

### *Aperçu Détaillé sur le Défaut de Roulement dans les MAS*

### ***II.1. Introduction :***

Les roulements sont plus récents par rapport aux paliers lisses, l'apparition des roulements a été conditionnée par le remplacement du frottement de glissement par celui de roulement. Ils sont largement utilisés dans le domaine de la construction mécanique, en particulier dans le domaine des machines tournantes. L'utilisation aussi de ce produit dans le domaine de l'automobile a donné l'occasion de perfectionnement de la méthode de fabrication, ainsi que l'amélioration de sa qualité.

On appelle roulement, une pièce mécanique composé de plusieurs éléments entre deux organes, un mobile et l'autre immobile, le roulement est destiné à remplacer un glissement par roulement afin de réduire le frottement, il est définis deux critères qui sont : le type et les dimensions.

Dans ce chapitre, nous expliquerons en détail les différents défauts de roulement dans moteur asynchrone à cage. De plus, nous configurerons le roulement, les principaux défauts pouvant affecter le roulement et les fréquences caractéristiques des défauts. Précisément, la bague extérieure du roulement.

Enfin, la dernière partie de ce chapitre sera consacré à une étude détaillée sur les techniques suivantes : MCSA, MVSA et SFSA.

## ***II .2.Etude Théorique sur les Roulements:***

### **II .2.1.Roulements :**

Des roulements, il y en a partout... des pédales de vélos au ventilateur des PC en passant par les compresseurs ou les roues de véhicules, un très grand nombre de systèmes en rotation en sont équipés. Et dans l'industrie, ce sont des composants stratégiques des machines tournantes : situés entre les parties fixes et les parties mobiles de la structure, ils assurent la transmission des efforts et la rotation de l'arbre.

Mais, s'ils sont les plus courants, ces composants sont aussi les plus fragiles. Il faut dire que les différents éléments qui les constituent (les billes, la cage et les bagues) sont en permanence sollicités. Le passage répétitif des billes sur les pistes engendre de fortes contraintes mécaniques qui entraînent peu à peu une dégradation du métal par fatigue, et finissent par Provoquer l'apparition de défauts ponctuels [BOU19] (des fissures, un écaillage des surfaces, etc.). Autre cause d'avarie, les défauts de montage et de conception. Ils provoquent en ~~ef~~

Des surcharges qui entraînent, à terme, l'usure prématurée du roulement. Enfin,

comme tout système de précision, le roulement est sensible à la pollution extérieure.

Un environnement poussiéreux, la présence de copeaux ou d'impuretés dans le corps du système, des lubrifiants pollués ou une atmosphère humide... sont autant d'agents extérieurs susceptibles de causer d'importants dégâts. Pour éviter des arrêts de production imprévus et coûteux, il faut alors surveiller en permanence l'état des roulements, et "traquer" tous les signes précurseurs des défauts : un bruit inhabituel, des vibrations anormales, une élévation de température, etc. [BOU20].

### II.2.1.1. Conception d'un roulement :

Un roulement est constitué (composé) de quatre éléments fondamentaux, C'est comme montré dans figure(II.1) et figure(II.2) suivante

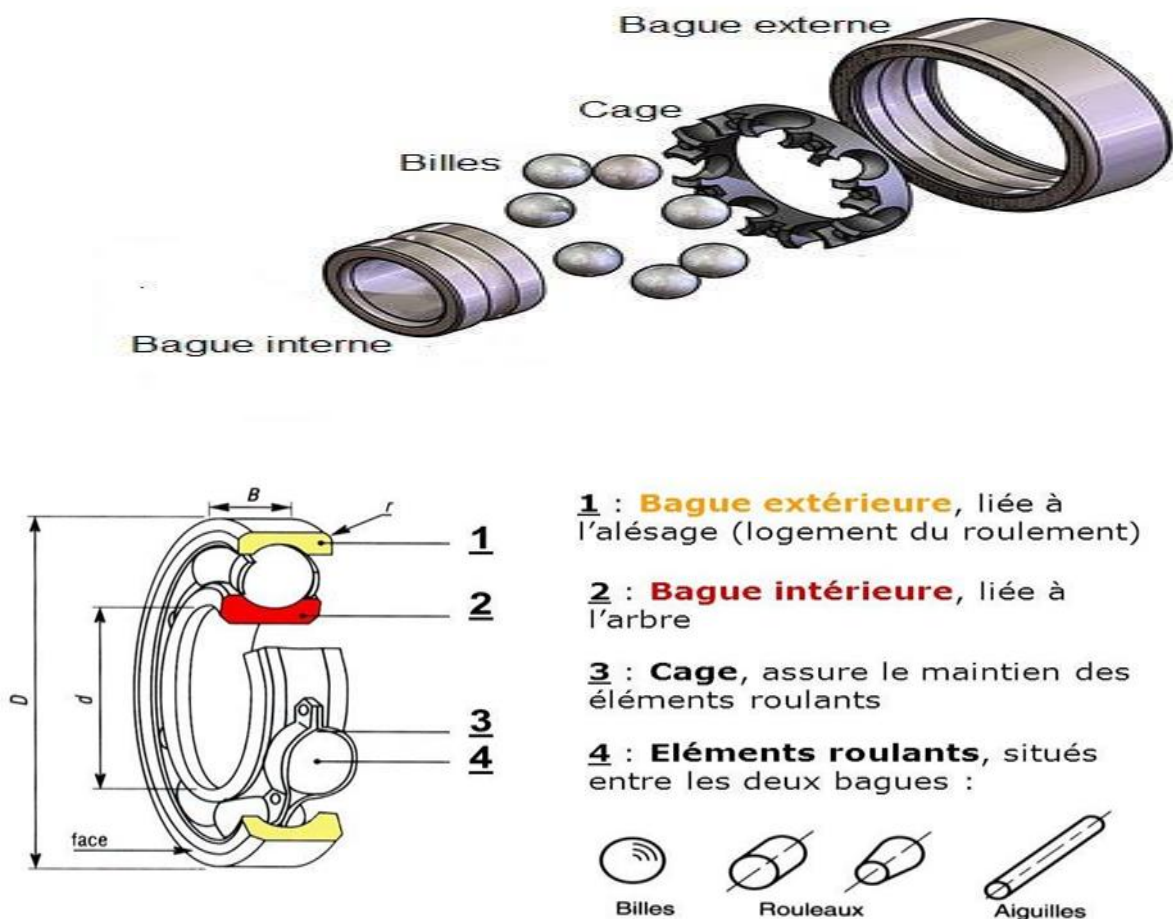


Figure II.1. Principaux éléments constitutifs d'un roulement.

Généralement, le roulement est constitué de 04 éléments suivants :

- ✓ bague extérieure (BE)
  - ✓ bague intérieure (BI)
  - ✓ cage
  - ✓ éléments roulants (corps roulants, billes)
- 1) **La bague extérieure** : C'est l'élément qui limite les dimensions extérieures du roulement, Elle sera monter dans un logement fixe (bague extérieure fixe) ou dans un moyeu tournant (bague extérieure tournante).
  - 2) **La bague intérieure** : Elle est montée sur un arbre fixe ou mobile. C'est-à-dire, elle est fixe si la bague extérieure est mobile, et le contraire [MAO19].
  - 3) **La cage** : La cage a pour rôle de maintenir espacés les éléments roulants et de les guider. Elle est fabriquée dans des matériaux tels que l'acier, le laiton ou le polyamide [BOU20].
  - 4) **Eléments roulements** : Les éléments roulant se présentent sous deux types principaux :
    - Les billes
    - Les rouleaux.

Les rouleaux peuvent avoir différentes formes : rouleaux cylindriques, rouleaux coniques, rouleaux tonneaux, aiguilles.

Ils sont souvent exécutés dans la même matière que celle employée pour la fabrication des bagues [BEN22].



**Figure II.2.** Éléments tournants ; billes, rouleaux : cylindriques, coniques, sphériques [BEN22].

### II.2.2. Caractéristiques des roulements :

Les roulements sont produits sous de diverses formes et variantes ayant chacune des caractéristiques distinctes. En comparaison avec les paliers lisses, les roulements ont les avantages suivants :

- Le couple de frottement au démarrage est plus faible et de plus n'est que légèrement supérieur au couple de frottement dynamique.
- Ils sont fabriqués suivant des normes internationales, sont interchangeables et facilement disponibles.
- Le graissage est simple et la quantité de graisse consommée très faible.
- En règle générale, ils acceptent à la fois des charges radiales et des charges axiales.
- Leur utilisation à basse comme à haute température est possible.

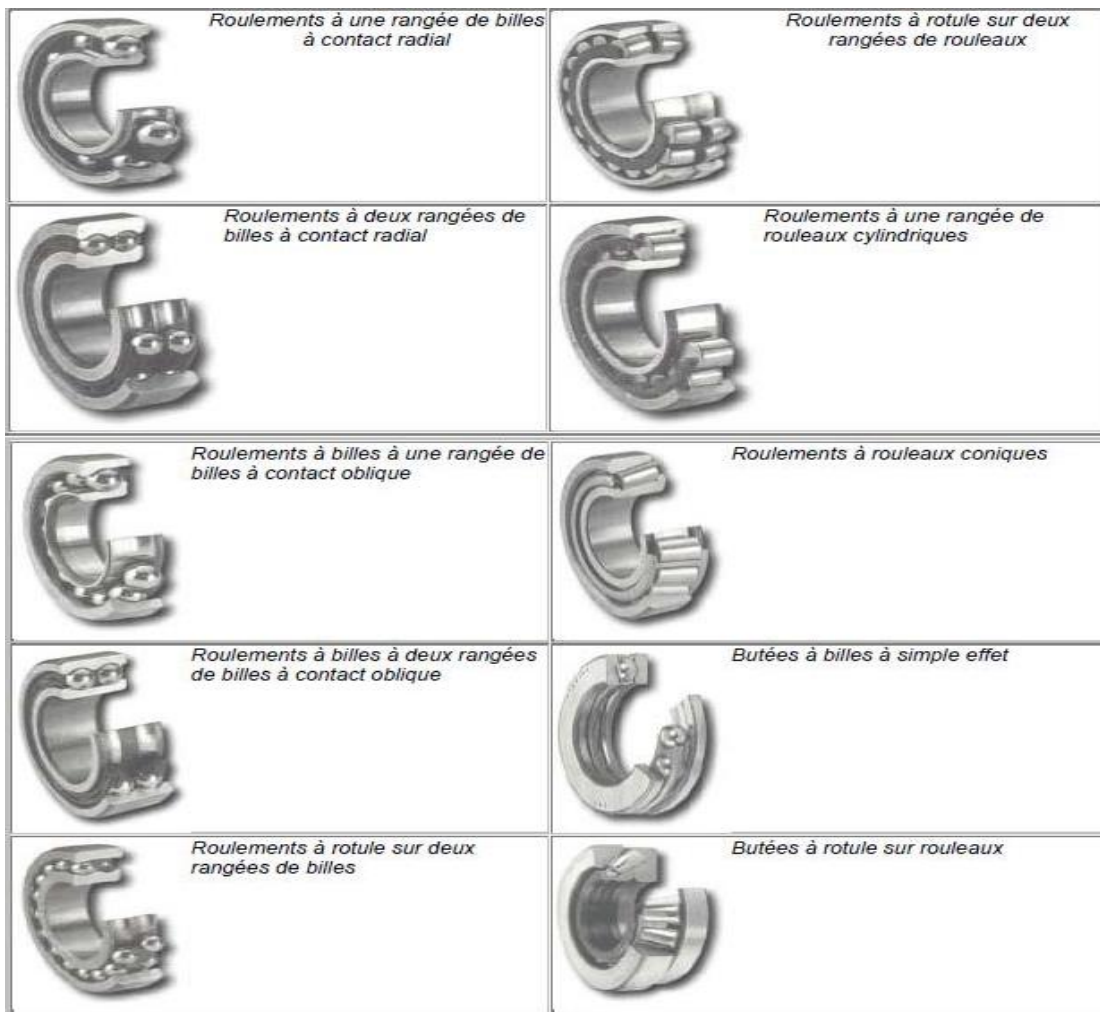
La rigidité des roulements peut être augmentée par un pré charge [BEN18].

### II.2.3. Types de roulement :

En pratique pour chaque application existe un roulement approprié, le roulement à billes offre un faible frottement grâce au contact ponctuel mais n'est utilisé que pour des charges limitées.

Le roulement à rouleaux offre une plus grande capacité de chargement grâce au contact linéaire provoquant aussi un frottement plus important.

Les rouleaux peuvent prendre différentes formes cylindriques, coniques ou sphériques. Les roulements à aiguilles sont quant à eux utilisés lorsqu'un rapport charge encombrement important est requis [BEN18]. Les principaux types de roulements sont illustrés dans la figure (II.3).



**Figure II.3.** Types de roulements.

#### II.2.4. Les défauts de roulements :

Les défauts de roulement se manifestent comme des défauts d'asymétrie au rotor, qui sont usuellement rangés dans la catégorie des défauts relatifs à l'excentricité. Un défaut de roulement se manifeste par la répartition continue du contact défectueux. Le type de roulement dans notre étude est les roulements à billes qui sont constitués de quatre éléments : une bague externe, une bague interne et une rangée de billes gardées par une cage, ainsi que de la graisse pour un mouvement souple (lubrification) [BES 17].

Le roulement de notre machine a une bague extérieure fixe en contact avec le stator, et une bague intérieure tournante en contact avec le rotor. Par ailleurs, les billes sont en contact avec les deux pistes des deux bagues. La durée de vie normale d'un roulement sous une charge est déterminée par la durée de l'usage et la fatigue des surfaces des éléments du roulement. La durée de vie a la notation L10 et se compte par un nombre d'heures [BEN22].

L10 est calculée comme suit :

$$L_{10} = Lh = \frac{C_R/P_R}{60 \cdot f_r} \times 10^6 \quad (\text{II.1})$$

Avec,  $C_R$  est une constante caractéristique de roulement,  $P_R$  : c'est la charge équivalente sur le roulement.

Les défauts qui peuvent affecter le roulement sont nombreux, on peut décrire dans cette partie, certains de ces défauts :

#### II.2.4.1.L'usure :

Le glissement des différents éléments, progresse avec l'introduction de particules contaminant au montage ou pendant le fonctionnement. Il est vrai que l'usure d'un roulement à billes peut être une source de contamination [BEN22].

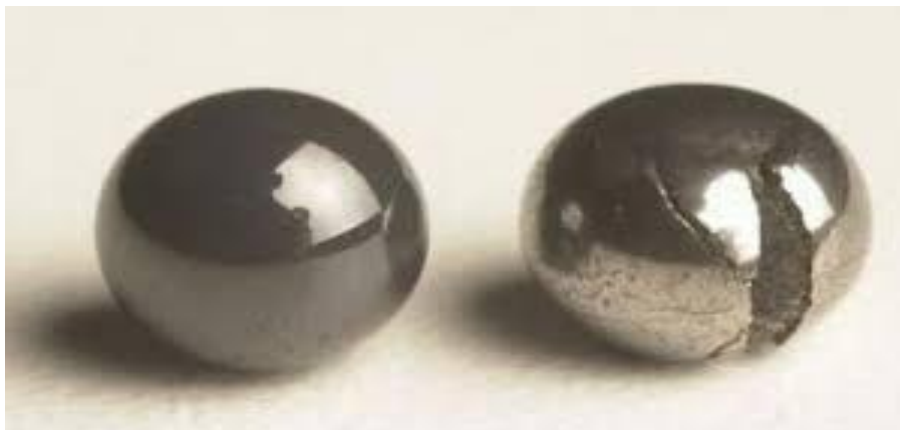
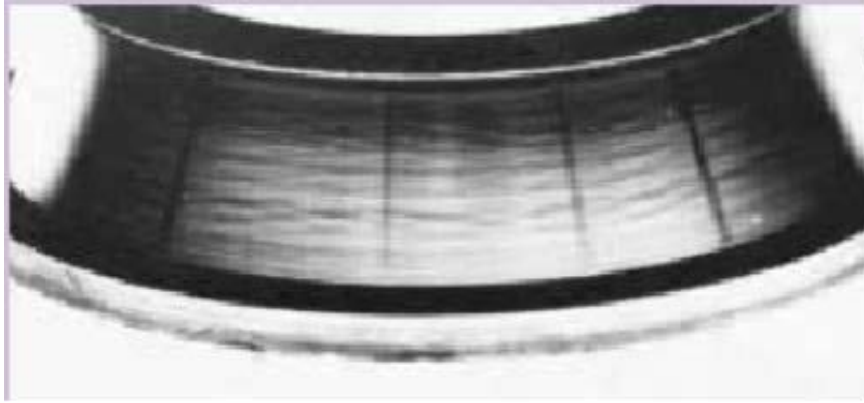


Figure II.4. Usure à billes [BEN22]

#### II.2.4.1.1. Usure par déformation :

C'est une déformation plastique des chemins des roulements, causée par des chocs importants ou répétés voir la Figure (II.5), ou une vibration importante à haute fréquence. C'est une usure sans perte de matière (présence des empreintes).



**Figure II.5.** Usure par déformation d'une bague externe.

#### **II.2.4.2.Ecaillage de fatigue :**

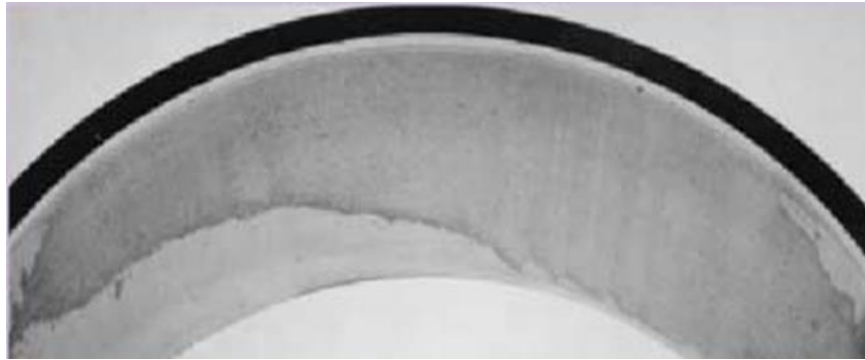
Il existe de nombreux types de fissuration et fatigue :

- fatigue de la bague extérieure
- la bague intérieure est rayée
- Ecaillage superficiel de la bague externe
- Ecaillage par fatigue d'une bague interne
- Ecaillage unilatéral de la bague interne
- Ecaillage unilatéral de la bague externe

On peut distinguer un seul type d'écaillage :

##### **II.2.4.2.1.Ecaillage superficiel de la bague externe :**

Causé par une concentration de contraintes, due à une contrainte accentuée (Résultent probablement d'un défaut d'alignement). Ou bien par la modification de la zone de pré charge .Aussi par la présence des particules étrangers à l'intérieur du roulement voir [BOU08] Figure(II.7).



**Figure II.6.** Ecaillage superficiel de la bague externe.



**Figure II.7.** Photo d'un écaillage de fatigue d'un roulement sur la BE [BEN18].

#### II.2.4.3. Croisson :

Causée par la présence de l'humidité aux points de contact des éléments roulants avec les chemins. La figure représente une corrosion sur bague intérieure d'un roulement à rouleaux conique voir [BEN22] la figure (II.8)

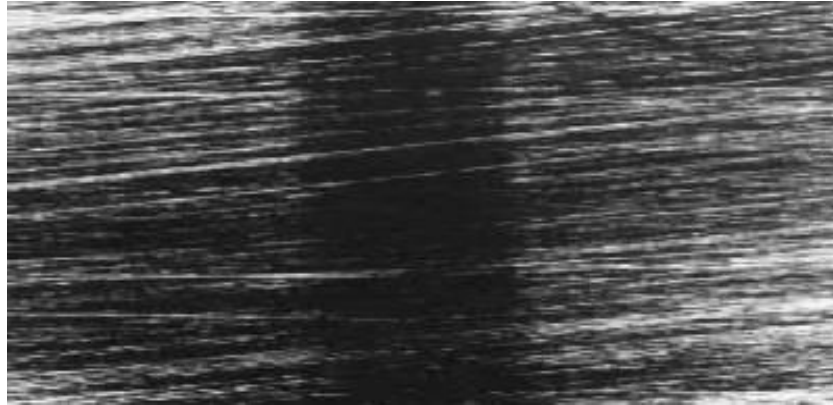


**Figure II.8 .** Corrosion de contact sur la bague Intérieure d'un roulement à rouleaux Sphérique [BEN22].

#### II.2.4.4. Le Grippage :

C'est un effet d'adhérence (blocage) de deux pièces en mouvement relatif. Il est caractérisé par l'apparition des traces brunes d'échauffement, laminage du métal.

Il est dû à leur dilatation (jeu résiduel nul) ou à une absence du lubrifiant. Donc, on peut dire que le grippage est un phénomène caractérisé par des micro -arrachements des particules métalliques. Voir [BOU08] la figure (II.9).



**Figure II.9.** Grippage d'une bague externe [BOU08]

#### II.2.4.5. Déformation des cages :

La vibration inadmissible ainsi que les coups durant le montage sont responsables de la déformation et de la détérioration des cages. Il s'agit même de la déformation et de la rupture de la cage du roulement figure(II.10) [BEN18]



**Figure II.10.** Déformation de cage d'un roulement à billes de contact angulaire [BEN18].

### II.2.4.6. Le piquetage :

Ce phénomène important est créé par des arcs électriques qui traversent le roulement, ce courant se traduit par des points de fusions, des stries circonférentielles, des micro-trous ou des soudures. Le problème va donc s'aggraver en présence d'un refroidissement rapide, c.-à-d. l'élément visé peut être exposé aux fissurations [BES17].



Figure II.11: Fissure (cassure) et piquetage dans la bague extérieure.

### II.2.4.7. Jeu de roulement :

Comme indiqué sur la figure ci-dessous, on peut distinguer plusieurs positions des vides bagues intérieure ou extérieure, billes ou cage, le jeu est très dangereux puisqu'il aggrave l'état de roulement rapidement (ex. écaillage) et fait une dégradation des contacts mécaniques sur tout dans un milieu pollué. Le jeu radial ou axial au niveau de roulement peut provoquer l'usure [BEN22].

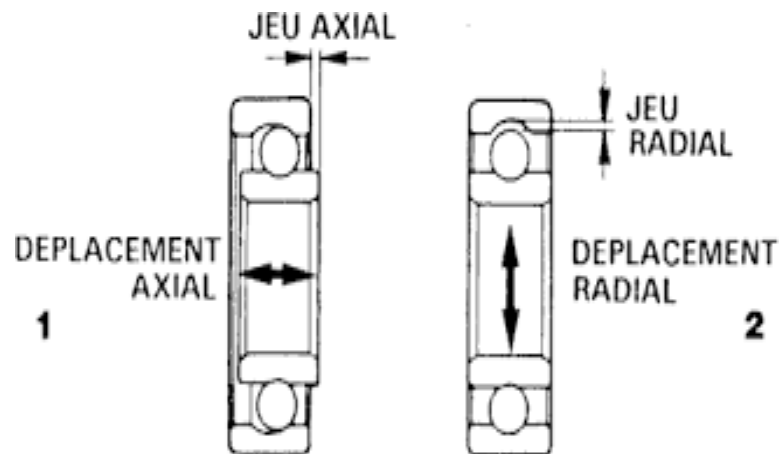


Figure II.12. Jeu de roulement (axial et radial).

**II.2.5. Causes des défauts de roulement :**

Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable,

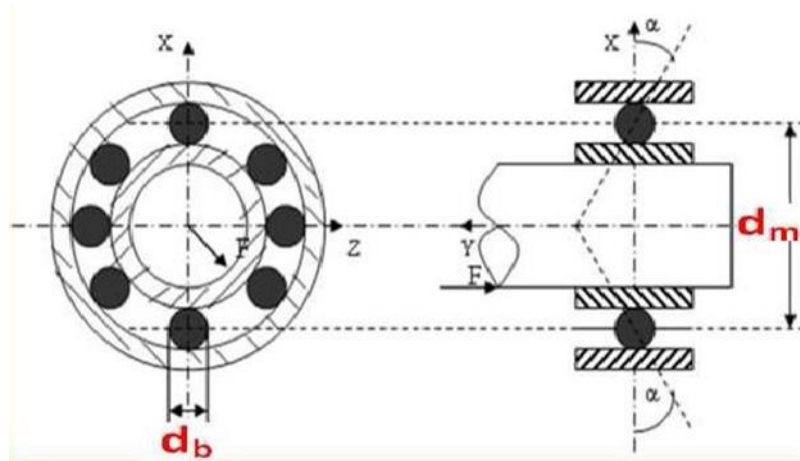
- ✓ corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, ...
- ✓ lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement
- ✓ mauvais alignement du rotor
- ✓ courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques
- ✓ installation inexacte du roulement ; en forçant incorrectement le roulement sur l'arbre du rotor ou dans les flasques (dû au désalignement), des entailles seront formées sur les chemins de roulement.

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts [GUE13] Suivants :

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

**II.2.6. Fréquence caractéristique pour les défauts de roulements :**

Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage) etc. Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues [MAO19]



**Figure II.13.** Caractéristique d'un roulement [MAO19].

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

$d_m$  Le diamètre primitif.

$\alpha$  Angle de contact.

$d_b$  Le diamètre des éléments roulants

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

#### II.2.6.1. Défaut de la cage :

$$f_c = \frac{f_r \cdot n_b}{2} \left( 1 - \frac{d_b}{d} \cos \alpha \right) \quad (\text{II.2})$$

#### II.2.6.2. Défaut de l'élément roulant :

La première fréquence caractéristique de défaut correspond à la fréquence de rotation de l'élément roulant sur lui-même. De plus, cet élément roulant rencontre une fois la bague interne et une fois la bague externe par tour, il génère donc des chocs à 2 fois cette fréquence

$$f_{\text{bille}} = \frac{f_r \cdot d_m}{2 d_b} \left( 1 + \left( \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha^2) \right) \right) \quad (\text{II.3})$$

**II.2.6.3. Défaut de la bague interne :**

Il est caractérisé par la présence d'une raie à la fréquence caractéristique du défaut (fdbi) Cette fréquence est modulée par la fréquence de rotation (bandes latérales autour de la raie de défaut [NAD20].

$$fdbi = \frac{fr.N}{2} \left( 1 + \frac{db}{d} \right) \cos \alpha \quad (\text{II.4})$$

fr: fréquence de rotation

**II.2.6.4. Défaut de la bague externe :**

Ce défaut est caractérisé par la présence d'une raie à la fréquence (fdbe). Bien que la charge appliquée sur la bague externe soit constante, on peut remarquer une modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre autour de la fréquence de défaut [NAD20].

$$fdbe = \frac{fr.N}{2} \left( 1 - \frac{db}{d} \right) \cos \alpha \quad (\text{II.4})$$

On considère qu'il existe un défaut sur la bague extérieure, s'il n'y a pas de contact entre la bille et le défaut, le rotor est parfaitement centré, donc, il n'existe plus d'excentricité, dans le cas contraire le contact entre la bille et le défaut conduit à un petit mouvement radial du rotor, donc une excentricité [GUE13].

Fe la fréquence caractéristique de la bague extérieure ;

Fbi la fréquence caractéristique de la bague interne ;

Fr la fréquence de rotation de la cage ;

Fbille la fréquence caractéristique de rotation des billes ;

Nb le nombre de billes ;

Db le diamètre de la bille ;

Dm le diamètre du centre des billes

### ***II.3. Etude détaillée sur les techniques MCSA, MVSA, SFSA :***

#### **II.3.1. Technique de diagnostic (MCSA) :**

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone [ZER13].

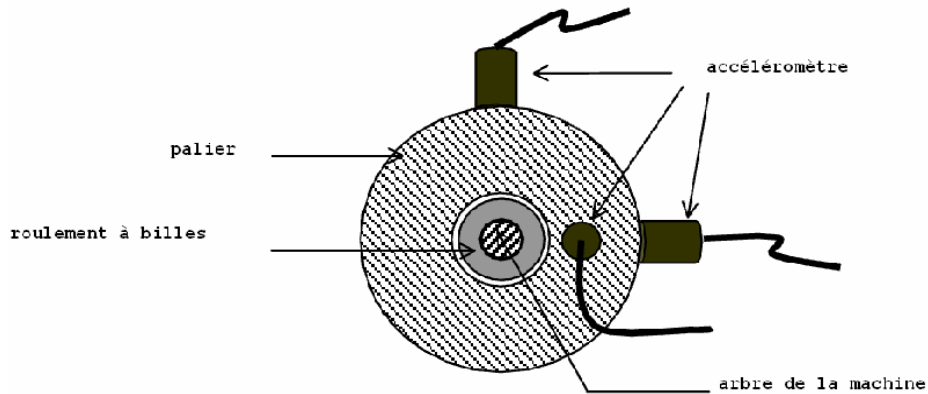
Cette technique est dénommée "Motor Current Signature Analysis" (MCSA) Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

- ✓ L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles).
- ✓ La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présentés dans le spectre du courant [BEN18].

#### **II.3.2. Technique de diagnostic (MVSA) :**

Cette technique de diagnostic est basée sur la mesure de la vibration grâce à des capteurs de vibrations comme par exemple des accéléromètres selon les trois axes : Axiale ; Radiale Horizontale et Radiale Verticale. Cette technique est l'une des techniques de diagnostic les plus utilisées dans l'industrie. Cette technique permet la détection de la plupart des défauts mécaniques surtout pour le diagnostic de défaut de roulement et certains défauts électriques [BAC22].

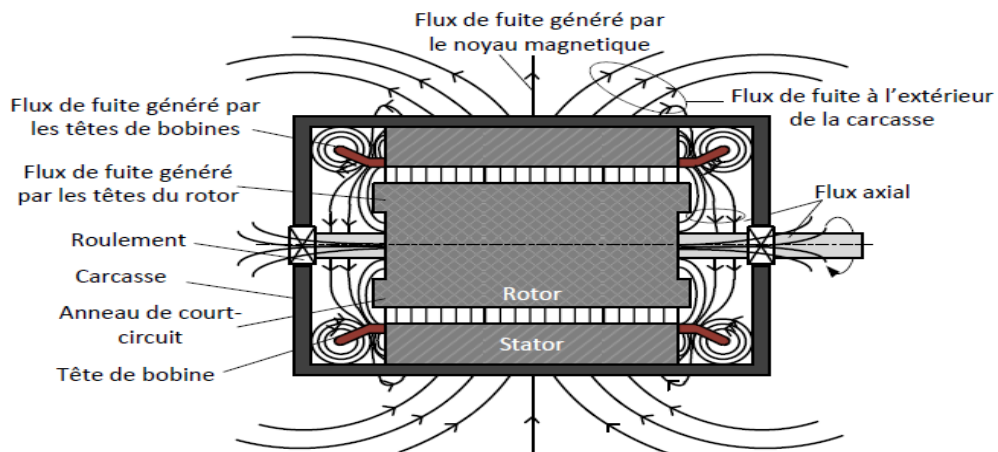
De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant. Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux [ZER13].



**Figure II.14.** Mesures vibratoires sur la machine asynchrone. [ZER13]

### II.3.3. Technique de diagnostic (SFSA) :

Tout phénomène au niveau du moteur asynchrone se répercute sur la distribution du Flux au niveau de l'entrefer. Donc, la signature de chaque défaut quel que soit son type existe dans le flux de fuite, ce qui montre l'importance d'utilisation l'analyse du flux de fuite comme une **technique** de diagnostic. Cette technique est basée sur la mesure du flux de fuite détecté par une bobine enroulée autour de l'arbre du moteur, ou par un arrangement symétrique simple des bobines placées à l'extrémité du moteur. En plus, la performance de cette technique est illustrée dans plusieurs travaux dans la détection des défauts statoriques et rotoriques d'un moteur synchrone [BAC22].



**Figure II.15.** Répartition de lignes de flux de fuite dans une machine électrique.



**Figure.II.16.** Mesure du flux axial.



**Figure.II.17.** Mesure du flux radial [ALL10].

#### **II.3.4. la transformée de Fourier FFT:**

La transformée de Fourier est une des méthodes (la plus utilisée aujourd'hui) pour représenter un phénomène temporel dans le domaine fréquentiel. Cette représentation fréquentielle est une image parmi d'autres possibles du phénomène étudié. Il existe d'autres méthodes plus complexes mais plus efficaces. La compréhension de la FFT aide cependant à mieux les comprendre le domaine temporelle au domaine fréquentielle avec une présentation de amplitude/fréquence [BEN18].

***II.4.Conclusion :***

Ce chapitre est consacré principalement à des généralités sur le roulement de la machine asynchrone à cage d'écureuil en indiquant les conceptions de ce composant et ses caractéristiques. De plus, nous avons étudié les différents types de défauts pouvant apparaître sur ce MAS. Comme nous avons constaté que la charge influe sur l'état du roulement.

Nous avons conclut ce chapitre par un aperçu de quelques techniques de diagnostic actuellement utilisées à la machine asynchrone à cage d'écureuil.

## **CHAPITRE III**

*Détection du défaut dans la bague externe en  
utilisant trois techniques*

### III.1. Introduction :

Les défauts qui apparaissent dans les machines électriques ont des causes variées. Les défauts dans les roulements dans moteurs électriques ont fait l'objet des nombreux travaux. En plus, plusieurs méthodes ont été proposées afin de détecter ce défaut et le diagnostiquer. Dans ce chapitre nous allons analyser et discuter ce défaut en le comparant avec l'état sain de la MAS. Pour cela, on va utiliser trois récentes techniques de diagnostic qui sont : MCSA, MVSA et SFSA afin d'aboutir à un choix judicieux sur l'état de la MAS.

#### Remarque :

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

### III.2. Transformée de Fourier rapide (FFT) :

La transformée de Fourier rapide, est une technique mathématique de calcul rapide élaborée en 1965 par J. W. Cooley et J. W. Tucker. La FFT permet de ramener le calcul de la transformée de Fourier discrète de  $N^2$  à  $N \cdot \log(N)$  opérations. Cette réduction de la complexité de calcul a suffi à faire passer facilement résolubles de nombreux problèmes liés à l'analyse spectrale. Pour une meilleure visualisation d'une analyse fréquentielle, la FFT est utilisée au travers d'une fenêtre glissante d'observation. Malgré l'introduction et les succès de la transformée de Fourier rapide (FFT), est donc par définition peu adaptée à l'étude des signaux non-stationnaires. Hors, ces signaux se rencontrent beaucoup plus souvent que les signaux stationnaires.

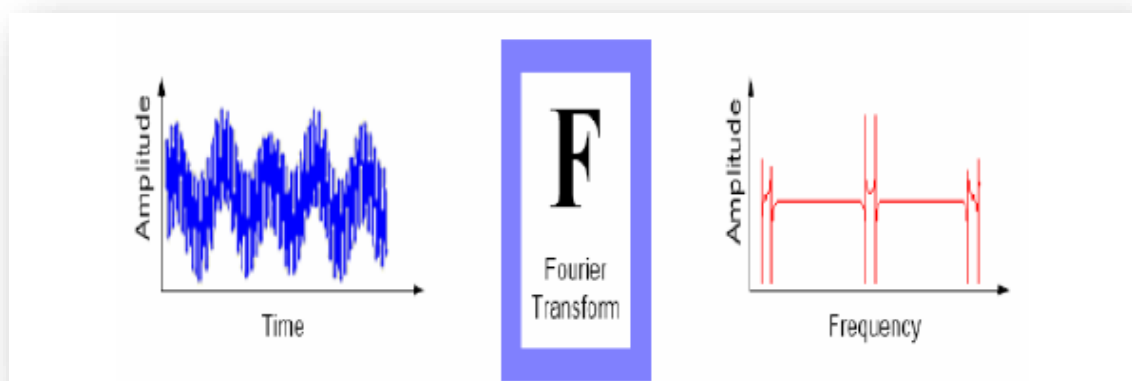


Figure III.1. Principe de la Transformée de Fourier.

### III.3. Analyse du défaut de roulement de la bague extérieure par MCSA-FFT:

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.

#### III.3.1. Fonctionnement à vide :

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

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

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

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

Avec,

$$g = 0.0002 \text{ et } p = 2 \Rightarrow f_r = 24.995$$

et,

$$f_{be} = 0.4 \times N_b \times f_r = 0.4 \times 9 \times 24.995 = 89.982 \text{ Hz}$$

$$f_{car\_be} = |\gamma \times f_s \pm k \times f_{be}| = |\gamma \times 50 \pm k \times 89.982|$$

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

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

Le tableau ci-dessous représente un bilan récapitulatif des harmoniques peuvent trouver dans le spectre du courant statorique.

Tableau (III.1) Valeurs des fréquences caractéristiques calculées en se basant sur la formule (III.1).

$f_{car-be}$	Fréquences calculées (Hz)	Fréquences trouvées (Hz)	Amplitude (dB)	
			sain	BE
$ 1 \times 50 - 1 \times 89.982 $	48.982	48.9	-80.22	-78.23
$ 9 \times 50 - 4 \times 89.982 $	90.072	90.1	-96.43	-99.4
$ 5 \times 50 - 2 \times 89.982 $	70.036	70	-81.85	-94.38
$ 7 \times 50 + 3 \times 89.982 $	619.946	619.9	-106.662	-94.35
$ 7 \times 50 - 1 \times 89.982 $	260.018	260	-106.9	-109.2
$ 9 \times 50 - 5 \times 89.982 $	0.09	0.9	-97.03	-100.8
$ 3 \times 50 + 4 \times 89.982 $	509.928	509.9	-121.9	-99.79
$ 1 \times 50 + 5 \times 89.982 $	499.91	499.9	-102.9	-95.14
$ 3 \times 50 + 2 \times 89.982 $	329.964	329.9	-105.5	-101.5
$ 5 \times 50 + 2 \times 89.982 $	429.964	429.9	-108.9	-118.1

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

Les figures (III.2), (III.3) et (III.4) montrent le spectre du courant statorique pour une plage fréquentielle de 0 – 650 Hz en indiquant les fréquences caractéristiques du défaut de la bague extérieure dans le cas où la MAS fonctionne à vide.

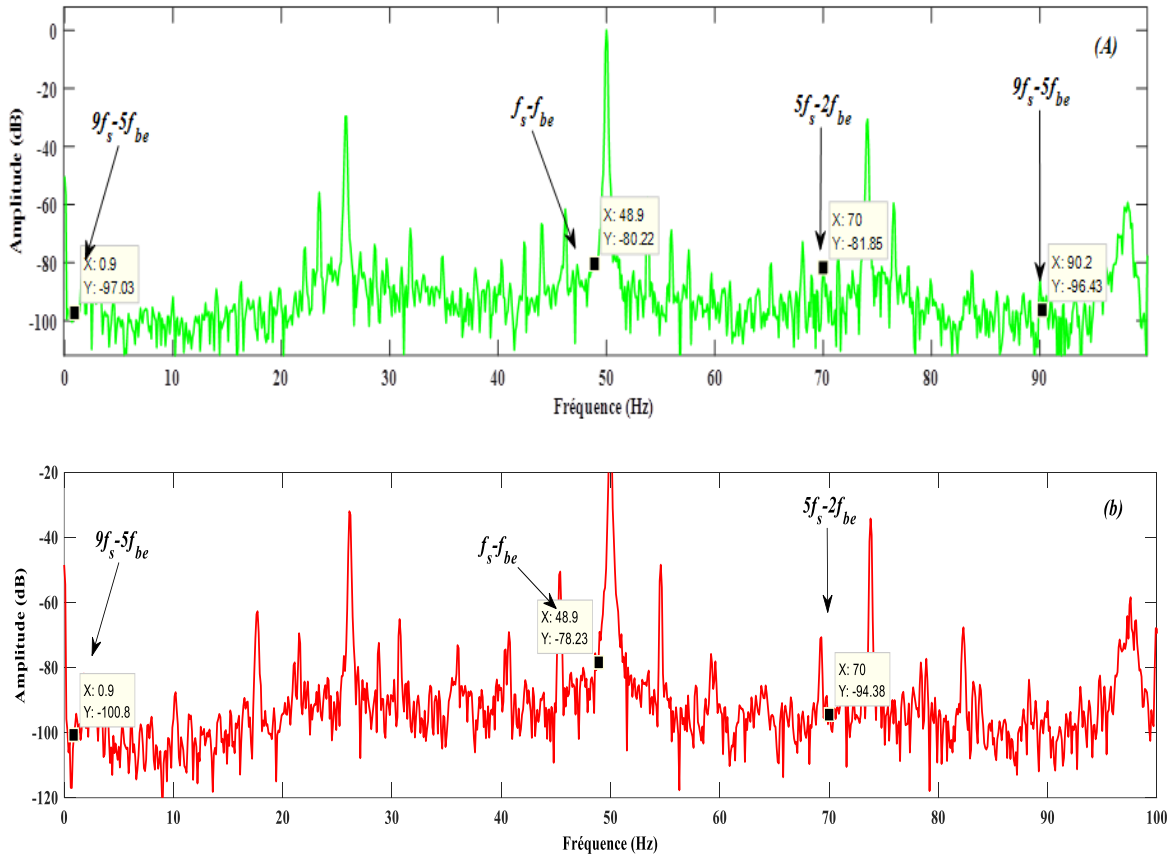


Figure (III.2) : Spectre du courant statorique ((A) sain, (b) BE à vide) ; 0\_100 Hz.

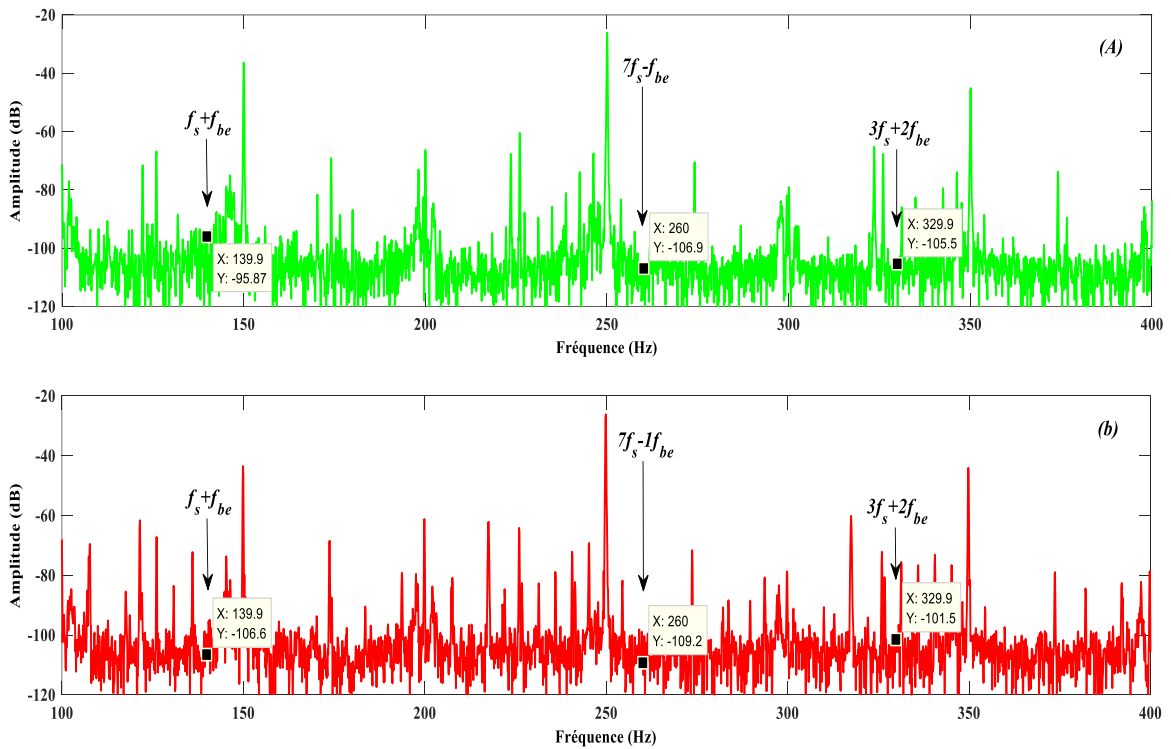


Figure (III.3) : Spectre du courant statorique ((A) sain, (b) BE à vide) ; 100-400 Hz.

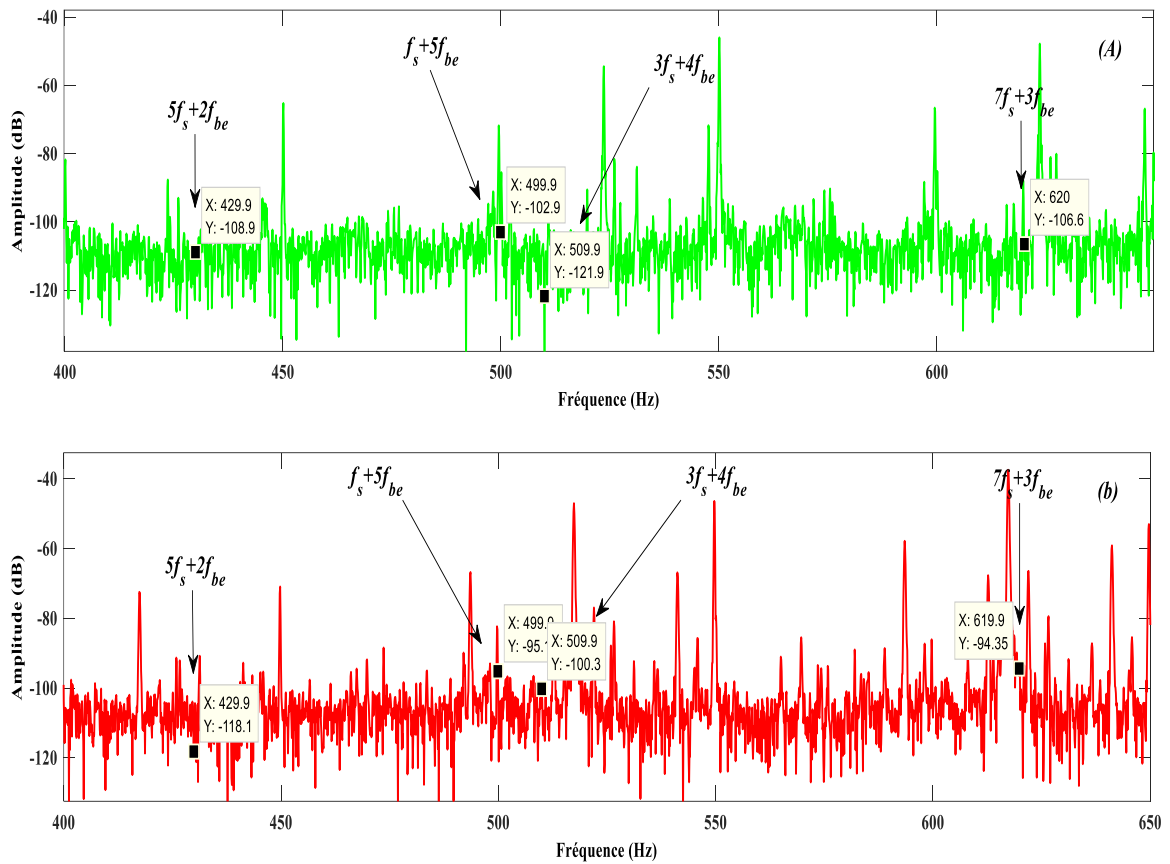


Figure (III.4) : Spectre du courant statorique ((A) sain, (b) BE à vide) ; 400\_650 Hz.

### III.3.2. Fonctionnement en charge :

Lorsqu'une machine passe vers un nouveau mode de fonctionnement, la détection s'évolue avec le nouveau régime. Ce mode permet d'anticiper le calcul avec des nouvelles valeurs à cause de changement du glissement.

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

Les valeurs des fréquences caractéristiques calculées en se basant sur les formules (III.1) et (III.2)

avec  $g = 0.0566$   $p = 2$  et  $f_r = 23.583$

Alors

$$f_{be} = 0.4 \times N_b \times f_r = 0.4 \times 9 \times 23.583 = 84.898 \text{ Hz}$$

$$f_{car-be} = |\gamma \times f_s \pm 50 \pm k \times 84.898|$$

$$\gamma = 1,3,5,7, \dots \dots \quad k = 1,2,3,4, \dots \dots$$

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

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

$f_{car-be}$	Fréquences calculées (Hz)	Fréquences trouvées (Hz)	Amplitude (dB)	
			sain	BE
$ 1 \times 50 + 1 \times 84.898 $	134.898	134.9	-113.4	-104.6
$ 5 \times 50 - 4 \times 84.898 $	89.592	89.6	-104.3	-100.2
$ 3 \times 50 + 2 \times 84.898 $	319.796	189.4	-106.1	-106.3
$ 5 \times 50 + 2 \times 84.898 $	419.796	419.7	-111.7	-110.9
$ 7 \times 50 + 2 \times 84.898 $	519.796	519.7	-96.55	-102.1
$ 5 \times 50 - 3 \times 84.898 $	4.694	4.6	-95.58	-106.2
$ 5 \times 50 - 2 \times 84.898 $	80.204	80.2	-92.81	-94.67
$ 3 \times 50 - 4 \times 84.898 $	189.592	189.6	-104.3	-103.6
$ 7 \times 50 + 3 \times 84.898 $	604.694	604.6	-104.2	-110.3
$ 9 \times 50 - 1 \times 84.898 $	365.102	365.1	-108.2	-102.1
$ 1 \times 50 + 2 \times 84.898 $	219.796	219.8	-113.2	-101.7
$ 9 \times 50 - 6 \times 84.898 $	59.388	59.4	-96.72	-86.47

Les figures (III.5), (III.6) et (III.7) montrent les fréquences caractéristiques du défaut de la bague extérieure dans la bande fréquentielle de 0\_650 Hz sous un fonctionnement en charge.

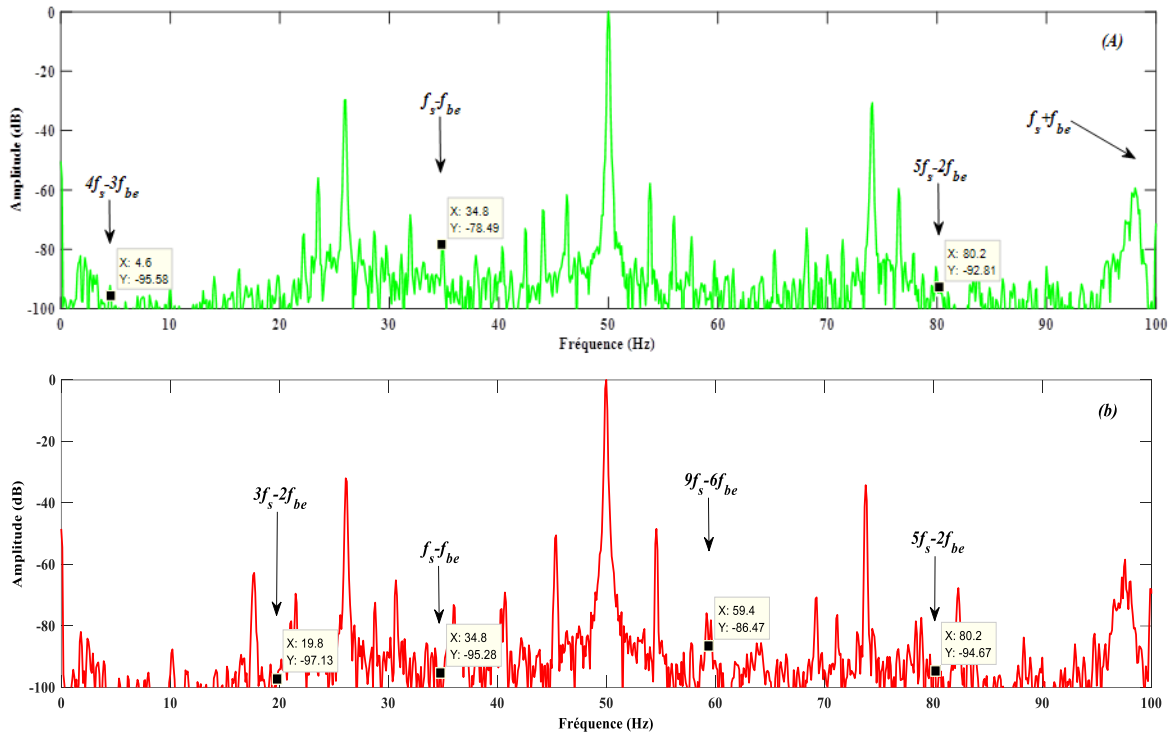


Figure (III.5) : Spectre du courant statorique ((A) sain, (b) BE à charge ( ; 0\_100 Hz).

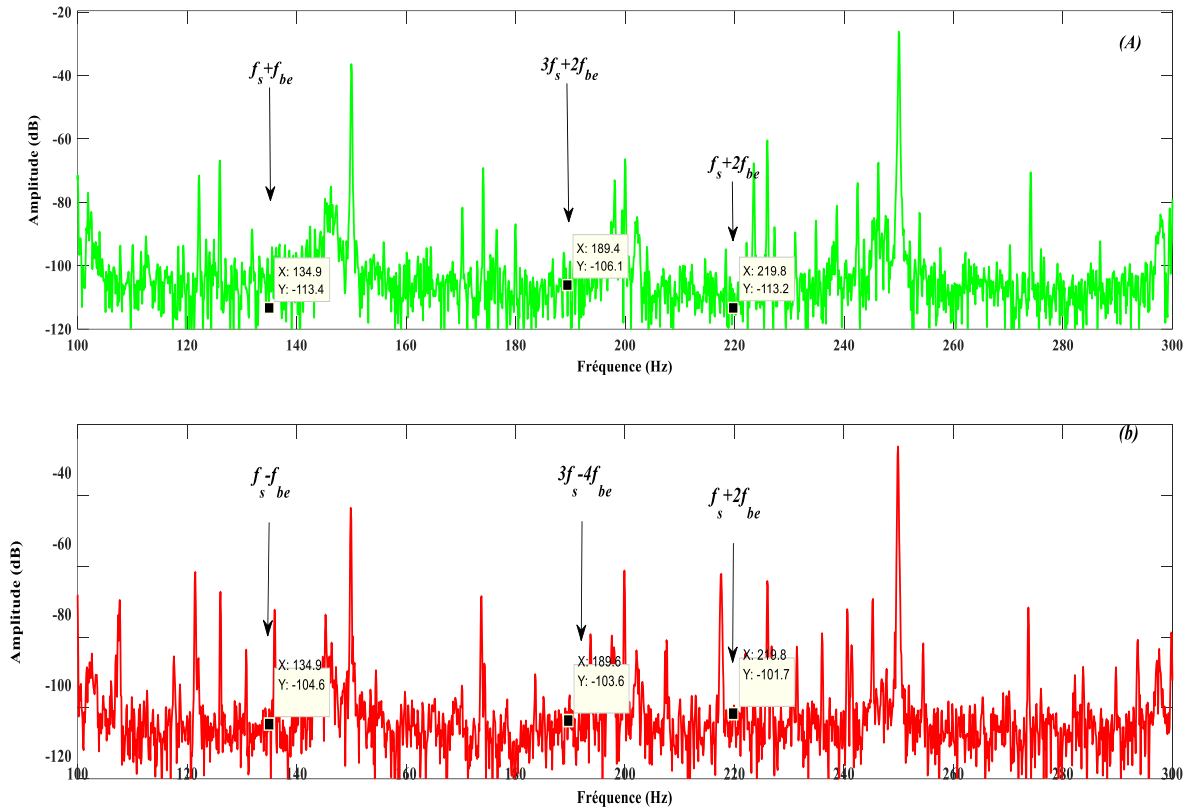


Figure (III.6) : Spectre du courant statorique ((A) sain, (b) BE à charge ( ; 100\_300 Hz).

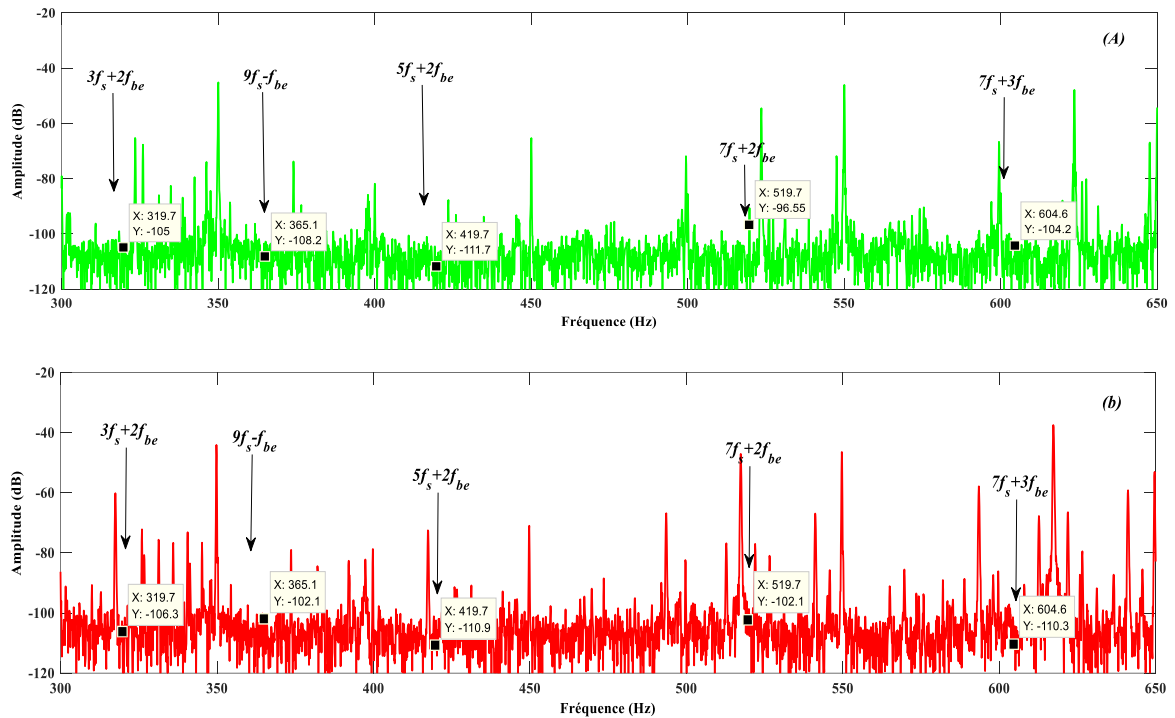


Figure (III.7) : Spectre du courant statorique ((A) sain, (b) BE en charge (300\_650 Hz)).

### III.3.3. Discussion la MCSA pour la bague extérieure :

On peut remarquer dans les figures précédentes, sur les spectres de courant statorique présence d'un défaut de roulement de la bague extérieure. L'apparition de raies harmoniques à des fréquences caractéristiques des défauts bague externe apparaissent d'une manière un peu difficile à détecter. En plus, notons que toutes les combinaisons possibles des fréquences caractéristiques existent. En conséquence, le contenu spectral du courant du stator se déplace pour les deux fonctionnements :

Fonctionnement à vide et en charge relativement ont les mêmes souffrances pour avoir les nouveaux pics facilement sous un défaut du roulement. Notons aussi que la détection des défaillances de la bague externe des roulements pourrait se faire via l'analyse du contenu spectral du courant avec une intention. Ensuite, nous avons constaté que les amplitudes des harmoniques dans l'état défectueux sont augmentées par rapport aux amplitudes de l'état sain de la MAS. On peut conclure que l'apparition des harmoniques additionnelles est très difficile d'obtenir dans le spectre du courant.

### III.4. Analyse du défaut de la bague extérieure par MVSA-FFT :

La méthode de MVSA qui est l'abréviation des plus utilisées des mots en Anglais Motor vibration Signature Analysis l'abréviation française ASVM qui signifie : Analyse des Signatures de vibration du motor .

#### III.4.1. Fonctionnement en charge :

Les Fonctionnement en charge de la machine et de la même manière sur défaut BE on calcule les fréquences avec es valeurs suivantes :

Avec :

$$g = 0.032 , p = 2 \text{ et } f_r = 24.2 \text{ Hz}$$

Alors :

$$f_{BE} = 0.4 \times N_b \times f_r \times k \quad (\text{III.4})$$

$$f_{BE} = 0.4 \times 9 \times 24.2 = 87.12 \text{ Hz}$$

$$k = 1.2.3 \dots$$

$$1 \times f_{BE} = 87.12 \text{ Hz}, 2 \times f_{BE} = 174.24 \text{ Hz}, 3 \times f_{BE} = 261.36 \text{ Hz}, 4 \times f_{BE} = 348.48 \text{ Hz},$$

$$5 \times f_{BE} = 435.6 \text{ Hz}$$

Dans ce tableau on résume les fréquences trouvées d'après une analyse vibratoire.

Tableau (III.3) : Harmoniques du défaut dans la bague extérieure.

Formule de fréquence $f_{BE}$	Fréquence calculée (Hz)	Fréquence trouvée (Hz)	Amplitude (dB)	
			Sain	BE
$1 \times f_{BE}$	87.12	87.1	-3.873	-14.51
$2 \times f_{BE}$	174.24	174.2	-0.6429	-14.81
$3 \times f_{BE}$	261.36	261.3	9.496	-16.53
$4 \times f_{BE}$	348.48	348.4	-1.824	12.57
$5 \times f_{BE}$	435.6	435.6	-3.687	8.844

De même façon, Les figures (III.13), (III.14) et (III.15) montre le spectre d'une analyse vibratoire pour une plage fréquentielle de 0 – 450 Hz en indiquant les fréquences caractéristiques du défaut de la bague extérieure dans le cas la MAS qui fonctionne en

charge.

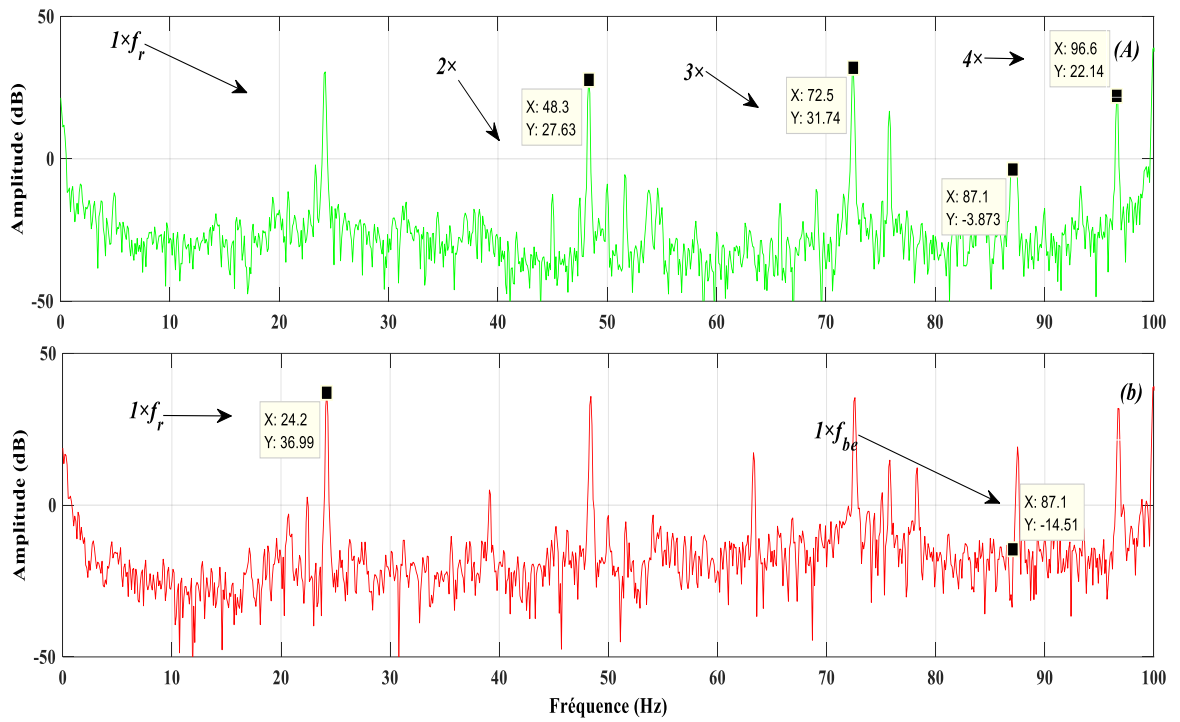


Figure (III.8) : Spectre d'un signal vibratoire ((A) sain, (b) BE en charge) ; 0\_100 Hz.

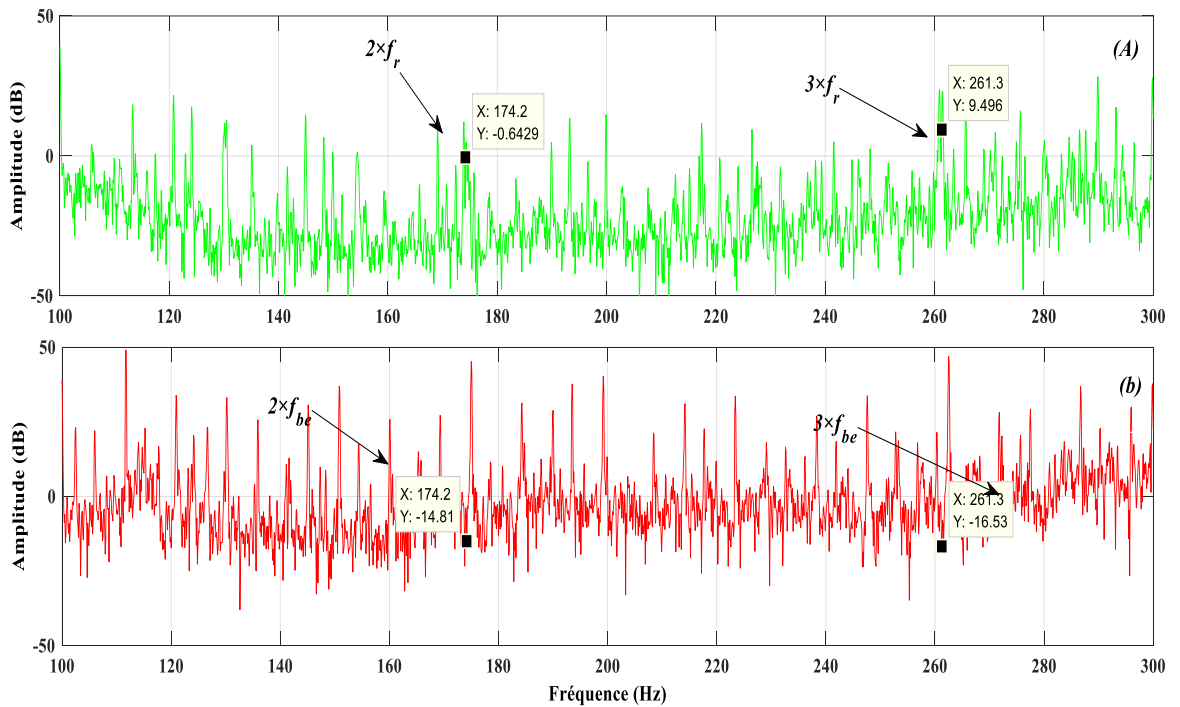


Figure (III.9) : Spectre d'un signal vibratoire ((A) sain, (b) BE en charge) ; 100\_300 Hz.

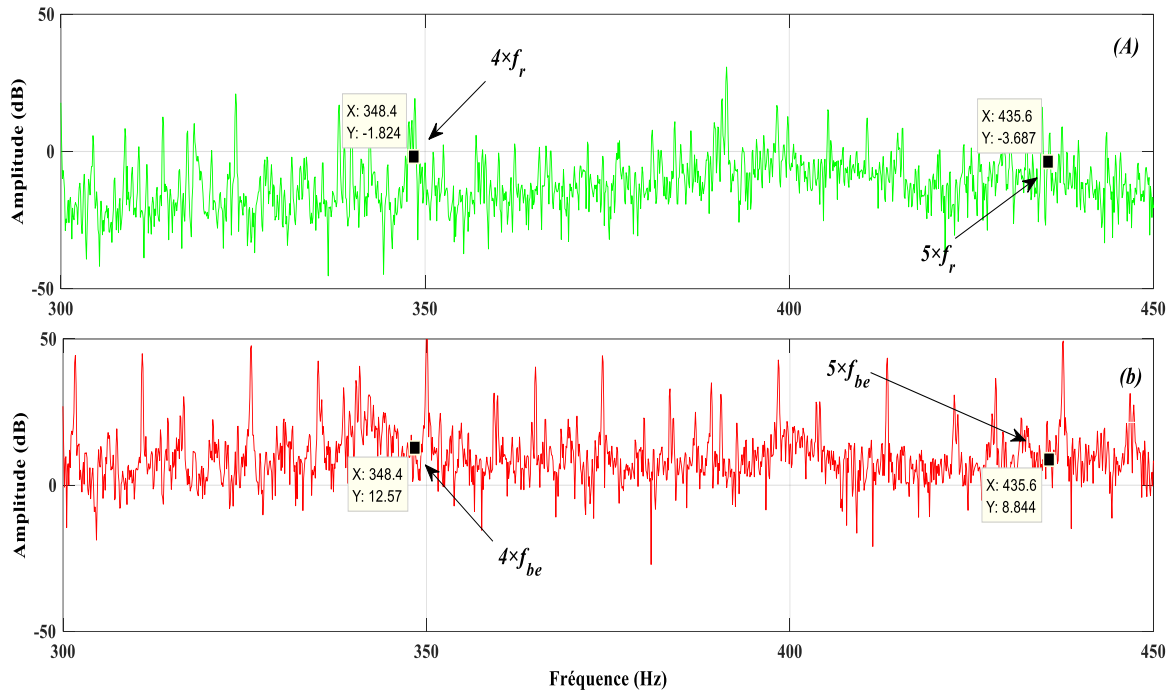


Figure (III.10) : Spectre d'un signal vibratoire ((A) sain, (b) BE en charge) ; 300\_450 Hz.

#### III.4.2. Discussion la MVSA pour la bague extérieure :

Nous avons remarqué dans cette étude que le spectre du signal vibratoire est riche en harmoniques pour des plages de fréquences un peu plus avancées (hautes fréquences). Les figures précédentes montrent clairement les indicateurs du défaut d'après les spectres.

#### III.5. Analyse du défaut de la bague extérieur par SFSA –FFT :

L'analyse des signatures du flux parasite (ASFP) est une technique assure la surveillance et le diagnostic des défauts dans les MAS.

Plusieurs études antérieures ont prouvé que l'analyse du champ magnétique externe permet de détecter différents types de défauts dans les moteurs à induction.

**III.5.1. Analyse du défaut dans la bague extérieure :**

Nous avons remarqué que l'état de sain et l'état en présence du défaut dans la bague extérieure du roulement sont inclus dans les plages fréquentielles le long de [0 ; 100].

Ils apparaissent des deux côtés du composant fondamental, apportant des informations importantes sur les conditions du rotor. De plus, dans il a été prouvé que les composantes données par les expressions :  $g=0.0375$

$$g \times f_s \tag{III.5}$$

$$3 \times g \times f_s \tag{III.6}$$

Nous remarquons également une augmentation d'amplitude de la fréquence  $f=94.38$  Hz et une diminution de la fréquence  $f=57.66$  Hz où les valeurs d'amplitudes indiquées dans la figure (III.16).

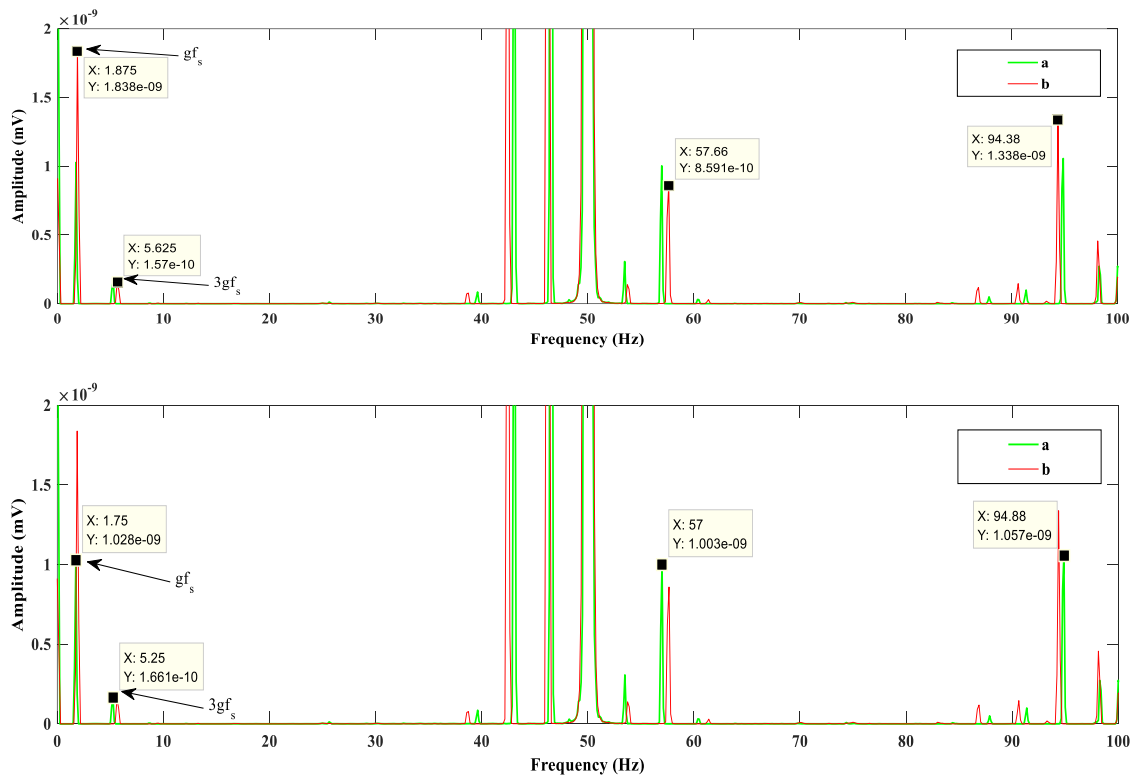


Figure (III.11) : Spectre de flux à plage 0\_100 Hz.

Nous peut aussi indiquer des valeurs d'amplitude de la fréquence d'une MAS pour un état sain et défaut de bague extérieure dans ce tableau suivant :

Tableau (III.4) : Représentation les deux harmoniques de spectre de flux

<i>fréquence</i>	<i>Amplitude</i>	
	<i>sain</i>	<i>BE</i>
$gf_s$	$1.028 \times 10^{-09}$	$1.838 \times 10^{-09}$
$3gf_s$	$1.661 \times 10^{-10}$	$1.57 \times 10^{-10}$

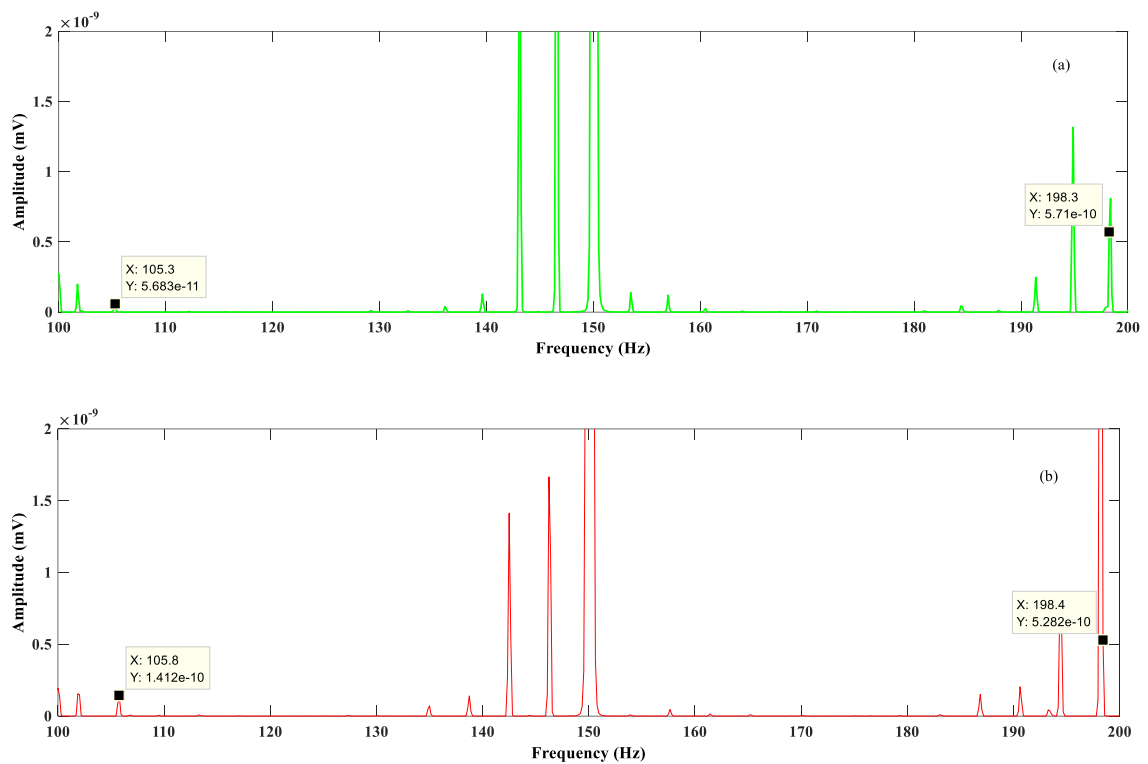


Figure (III.12) : spectre de flux à plage 100\_200 Hz.

Nous avons remarqué que l'état de sain et l'état du défaut dans la bague extérieure du roulement, dans la plage (100\_200) augmentation de la fréquence et l'amplitude.

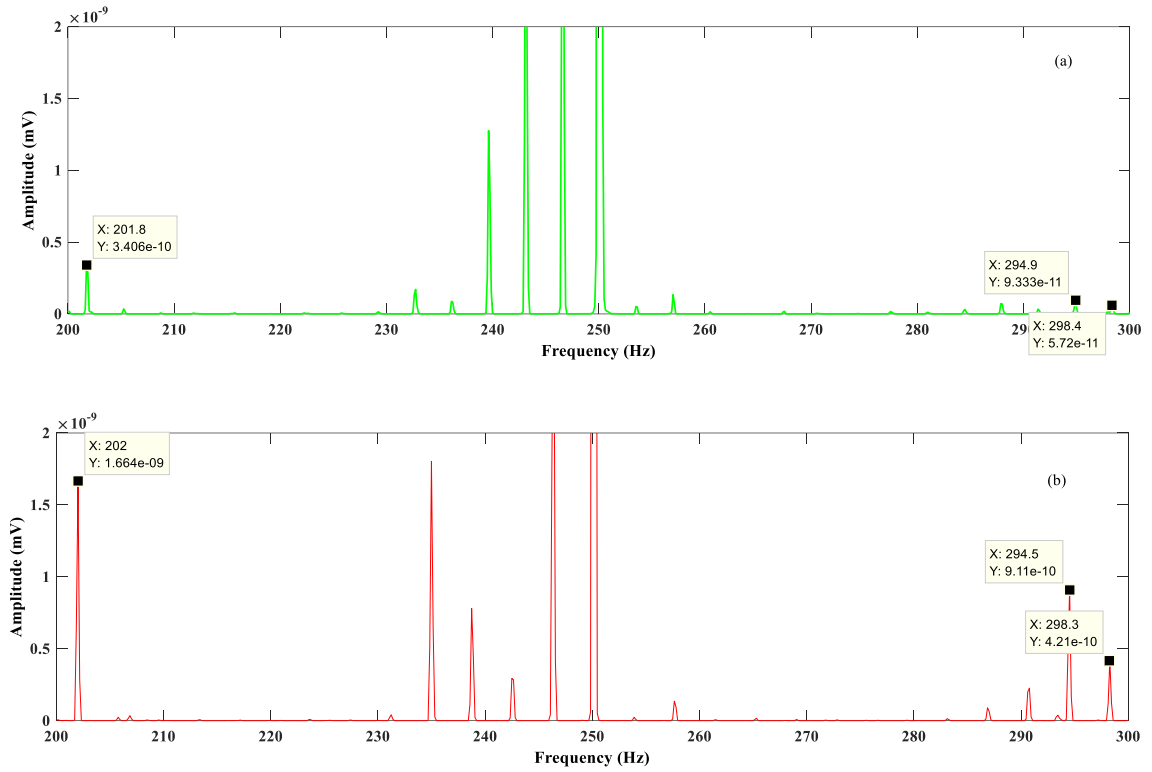


Figure (III.13) : spectre de flux à plage 200\_300 Hz.

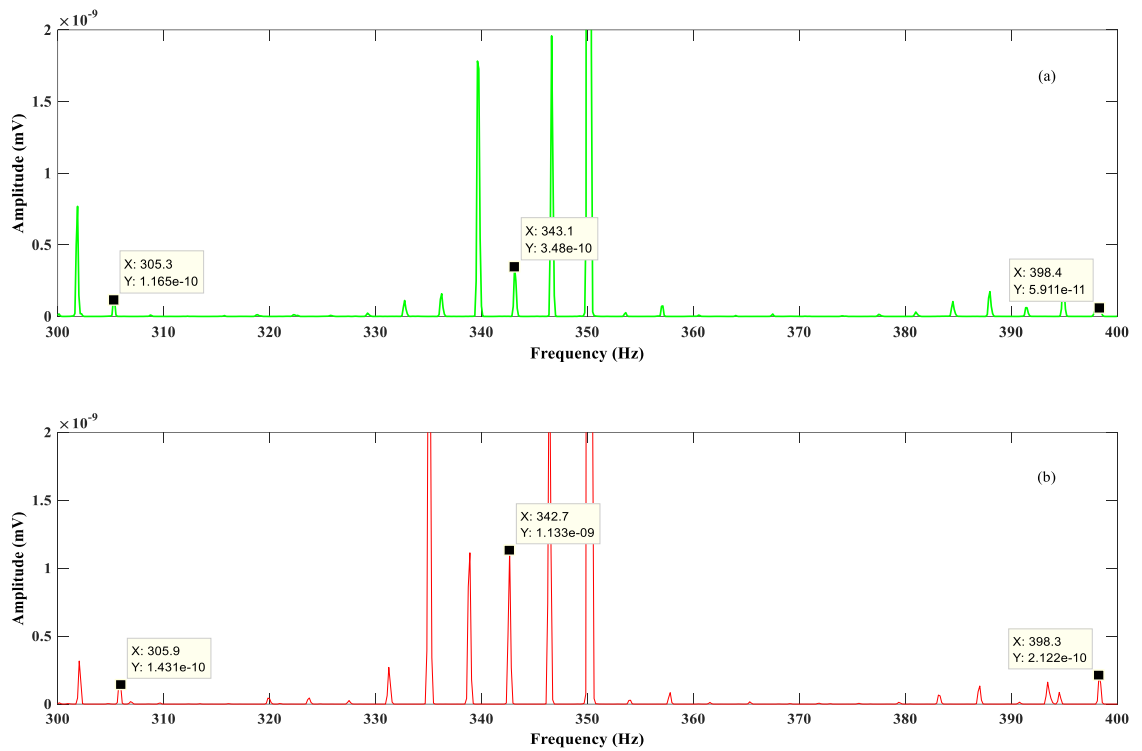


Figure (III.14) : spectre de flux à plage 300\_400 Hz

Il y a des fréquences dans ces bandes (200\_300), (300\_400) montrent bien augmentation et diminution de l'amplitude comme :  $f = 202\text{Hz}$ ,  $f = 298.3\text{Hz}$ ,  $f = 305.9\text{Hz}$ ,  $f = 342.7\text{Hz}$  comme l'indiquée les figures (III.17)( III.18).

Tableau (III.5) : les valeurs de fréquence et l'amplitude pour un état Sain et un état défectueux de la MAS

Sain		BE	
fréquence	Amplitude	fréquence	Amplitude
105.3	$1.165 \times 10^{-11}$	105.8	$1.412 \times 10^{-10}$
198.3	$5.71 \times 10^{-10}$	198.4	$5.282 \times 10^{-10}$
201.8	$3.406 \times 10^{-10}$	202	$1.664 \times 10^{-09}$
294.9	$9.333 \times 10^{-11}$	294.5	$9.11 \times 10^{-10}$
298.4	$5.72 \times 10^{-11}$	298.3	$4.21 \times 10^{-10}$
305.3	$1.165 \times 10^{-10}$	305.9	$1.431 \times 10^{-10}$
343.1	$3.48 \times 10^{-10}$	342.7	$1.33 \times 10^{-09}$
398.4	$5.911 \times 10^{-11}$	398.3	$2.122 \times 10^{-10}$

### III.5.2. Discussion la SFSA pour la bague extérieure :

Cette étude a montré des nouvelles harmoniques, une augmentation d'amplitudes de quelques fréquences et une diminution d'autres. Ces variations peuvent être des indications sur l'existence du défaut de la BE du roulement de la MAS.

L'apparition de vibrations et une augmentation de la consommation du courant électrique par rapport à sa consommation nominale est causée par la variation du flux magnétique dans la plupart des cas. Cela peut conduire au mauvais fonctionnement de la MAS.

**III.6. Conclusion :**

Les techniques les plus largement utilisées récemment pour diagnostiquer les défauts des machines électriques sont MCSA, MVSA et SFSA.

Dans ce chapitre, nous avons utilisé ces techniques pour détecter les défauts du roulement. Les signatures ont été trouvées dans cette partie, nous a permis de vérifier l'état de la MAS. Bien que les techniques se diffèrent l'une par rapport à l'autre au niveau de la précision de détection. Nous pouvons conclure ici que la méthode de la MVSA donne de bons résultats par rapport à la méthode de la MCSA et la SFSA pour la détection de défauts dans le bague extérieure du roulement MAS. Il est important ici d'indiquer que la technique de la SFSA a quelques indicateurs importants sur le défaut.



## ***CONCLUSION GENERALE***

## ***CONCLUSION GENERALE***

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

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

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

Ensuite, nous avons analysé le défaut dans la bague extérieure du roulement par les trois méthodes d'analyse : MVSA ,MCSA et SFSA. Ce travail a l'objectif de comparer entre les trois méthodes afin d'avoir une décision finale sur la meilleur méthode.

D'après cette étude, on peut conclure que la méthode de la MVSA donne des bons résultats par rapport à les méthodes des la MCSA et SFSA pour la détection du défaut dans la bague externe du roulement de la MAS. Nous pensons que la raison qui favorise la méthode de l'analyse vibratoire par rapport à l'analyse du courant au type du défaut. C'est-à-dire, un défaut mécanique peut le détecter facilement par une méthode qui a l'analyse du signal mécanique et pas électrique.



# *Référence bibliographiques*

## *Référence bibliographiques*

- [BOUD20] BOUDJELKHA Abdelhakim ."Simulation et commande d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil" ,Thèse de Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar. El Oued 2020.
- [BAB14] BABAA. FATIMA. " Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone (Application au diagnostic des défauts statoriques)", Thèse de doctorat , Université Constantine.2014
- [GIL13] Gilles Houdouin. "Modeling of the squirrel cage induction machines in presence of rotor faults. Electric power.", Université du Havre, 2004. French Submitted on 5 Jun 2013
- [SID11] SidOmar. "Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par les réseaux de neurones" ,Thèse de Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene,2011.
- [BOUZ08] BOUZIDA Ahcene ."DIAGNOSTIC DE DEFAUTS DE LAMACHINE ASYNCHRON ACAGE PAR LA TECHNIQUE DES ONDELETTES" ,Thèse de Mémoire de Magister, Laboratoire de Recherche :Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier 2008.
- [HOU19] Houioua Moussa." Etude comparative des différents facteurs de sévérité de défauts dans un moteur asynchrone triphasé Jury", Thèse de Mémoire de Master, Université Mohamed Kheider de Biskra, juillet 2019.
- [HAL15] HALEM Noura. "Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis", Thèse de doctorat, Université Mohamed Kheider –Biskra,2015.

- [ZER13] Zerrouk ahmed . " Diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone triphasée", Thèse de Mémoire de Master, Université Mohamed Kheider –Biskra,2013.
- [OUL12] Ahmed Salim Ould Mohamed." Modélisation numérique d'une machine asynchrone à cage : Étude de ses performances en présence de défaut entre spires", Thèse de Mémoire de Master, UNIVERSITE DE M'SILA,2012
- [BES17] Bessous. Noureddine " Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation", Thèse de Laboratoire de Recherche doctorat, Université Mohamed Kheider –Biskra , 2017.
- [NEZ12] Nezloui Said et Yakoub Yazid " Diagnostic des défauts de court circuit statorique d'une machine asynchrone" Thèse de Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou , 2012.
- [BEL20] Belhait Housseem Eddine. "Détection des défauts de moteur asynchrone par l'analyse de courant statorique", Thèse de Mémoire de Master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA, 2020.
- [RAH18] Rahal KAIS et Rezki Mohamed. " Détection des défauts de court-circuit statorique dans la machine synchrone à aimants permanents", Thèse de Mémoire de Fin d'Etudes De master académique, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira , 2018.
- [MER20] Merhi Samir . " Diagnostic de défauts des machines électriques" Thèse de Mémoire de Fin d'Etudes De master académique, UNIVERS ITE LARBI BEN MEHIDI \*OUMEL-BOUAGHI \*, 2020.
- [BOUG09] Abla Bouguerne. " Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones" Thèse de Mémoire de Magister, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE 2009.
- [HAR09] Mr Harir Miloud , "Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée" Thèse de Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2009.

- [KHA09] Khatir Abdelfatah. " Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts", Thèse de Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIFUFAS (ALGERIE), 2009.
- [ALL10] Allal Abderrahim ."Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones ", Thèse de Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIFUFAS (ALGERIE), 2010.
- [CHA13] Chaouch ABDALLAH." Contribution à la modélisation de la machine asynchrone en vue de diagnostic des défauts par analyse spectrale des grandeurs électriques , Thèse de Laboratoire de Recherche doctorat , UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D’ORAN MOHAMED BOUDIAF, 2013.
- [SMA16] M. BAZI Smail ."Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur",", Thèse de Mémoire de Fin d’Etudes De master académique , Université de Batna 2016.
- [BES13] Bessous Nouredine. " Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones" , magister en Electrotechnique, université de Constantine Algérie 2013.
- [NAD20] Nadji Ihab, "Diagnostic des défaut du moteur asynchrone dans le domaine temporel", Mémoire de master, université de Biskra 2019
- [MAO19] Maouche soufiane, "Diagnostic des défauts des roulement par l'analyse développé", Mémoire de master, université de Biskra 2019.
- [BEN17]: Benine hamza,"etude de la vibration des machines à induction sous un défaut de roulement ", Mémoire de master, université El-oued 2017
- [BOU20] Bouaoun oudai ,"contribution au diagnostic des défauts de la casseur de barres rotoriques dans les systèmes électromécaniques application aux moteur à inection", Mémoire de master, université El-oued 2020

- [BEN22]** Bennabi aboubaker essedik , "préparation d'un banc d'essai dédié au diagnostic des défauts des machines électrique ", Mémoire de master, université Mostaganem 2022
- [ELG22]** Elghoul walid , "détection et diagnostic des défauts d'excentricité du moteur asynchrone", Mémoire de master, université de Biskra 2022.
- [MOK19]** Mokhtari yaakoub , "Diagnostic des Défauts mécaniques du moteur asynchrone par l'analyse ", Mémoire de master, université de Biskra 2019
- [GUE13]** Guerguer Mounir, "Diagnostic de la machine Asynchrone par analyse vibratoire", Mémoire de master, université Constantine 2013
- [BOZ08]** Bouzaout Azzedine , " influence de la vibration sur la duree e vie e roulement ",Thèse de doctorat, université BADJI MOHTAR ANNABA 2008
- [KER17]** Kerroum Badreddine , " Etude et Diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction", Diplôme de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.
- [BEN18]** Benine hamza et derdouri mohammed aymen , "Etude de la vibration des machines à induction sous un défaut de roulement ", Mémoire de master, université El-oued 2018
- [BAC22]** Bachi Ramzi et Krime Ahhmed ,Ouada Ali , " détection des défauts du roulement dans les moteurs Asynchrones en utilisant les vecteurs de park ", Mémoire de master, université El-oued 2022