

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



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Commande Electrique

Présenté par

BACHI Ramzi, KRIEME Ahmed, OUADA Ali

Thème

Détection des défauts du roulement dans les moteurs asynchrones en utilisant les vecteurs de Park

Soutenu le .. /06/2022. Devant le jury composé de :

Dr. H.....

Maitre de conférences

Président

M. BESSOUS Nouredine

Maitre de conférences

Rapporteur

Dr. A.....

Maitre de conférences

Examineur

Année Universitaire 2021/2022

REMERCIEMENTS

*Nous tenons tout d'abord à remercier à Dieu qui nous a aidés à terminer cette thèse, Nous tenons à exprimer également nos remerciements et gratitude à notre encadreur **Dr. BESSOUS Nouredine** à l'université Hama Lakhdar El-oued pour ses aides et pour ses encouragements sincères pour la finalisation de ce mémoire et ses précieux conseils. Nous remercions tous les professeurs qui nous ont étudiés et apprécions le soutien moral des parents et de tous les amis.*

DÉDICACES

Nous dédions ce travail à tous les parents et proches pour leur soutien moral et matériel tout au long de notre parcours d'étude et pour tous les sacrifices qu'ils ont endurés dans les moments difficiles.

À tous ceux dont nous avons perdu les bonnes âmes

BACHI Mohamed Sayeh , BACHI Mohamed Laid

OUADA Maamer

A notre encadreur

Dr. BESSOUS Noureddine

A tous les amis.

ملخص

نظرا للاستعمال الكثير للآلات الكهربائية الغير متزامنة في المجال الصناعي وخاصة آلات قفص السنجاب لما تتميز من خصائص تجعلها في ريادة التصنيع التكلفة المناسبة وانتاج طاقة عالية، والعديد من المميزات. تتعرض هذه الآلات الى العديد من المشاكل طيلة استعمالها يلعب التشخيص المبكر للأعطال الى ربح الوقت والحفاظ على سلامة الخط الصناعي، لذا فإن تشخيص وصيانة الآلات الكهربائية يحظى باهتمام كبير توجد العديد من طرق التشخيص، سنحاول في هذه الدراسة التطرق الى تقنية تحليل التيارات الساكنة وسلوكها الكهربائي في الكشف عن عيوب المحامل في المحرك الحثي غير المتزامن وذلك باستعمال تيارات بارك. كما قمنا بتحويل فورييه السريع لتحليل ذات التيارات وعرض طيفها.

الكلمات المفتاحية: الآلات غير متزامنة، تشخيص، محمل، محامل، عيب في الحلقة الخارجية، عيب في الحلقة الداخلية، اشعة بارك، تيارات بارك، تحويل فورييه السريع.

Résumé

En raison de l'utilisation généralisée des machines électriques asynchrones dans le domaine industriel. En particulier, des machines à cage d'écureuil, qui présentent des caractéristiques qui en font un leader dans la fabrication, le coût approprié et la production de puissance élevée, et de nombreux avantages. Ces machines sont exposées à de nombreux problèmes tout au long de leur utilisation. Un diagnostic précoce des pannes est un gain dans le temps et préserve l'intégrité de la chaîne industrielle. Par conséquent, le diagnostic et la maintenance des machines électriques présentent un grand intérêt. Il existe de nombreuses méthodes de diagnostic. Cette étude, nous allons essayer d'aborder la technique d'analyse des courants statiques et leur comportement électrique dans la détection des défauts de roulement dans un moteur asynchrone en utilisant les vecteurs de Park. Comme nous avons utilisé la transformée de Fourier rapide pour avoir les spectres des courants de Park.

Mot clés : Machine asynchrone, diagnostic, roulement, défaut dans la bague externe, défaut dans la bague interne, vecteurs de Park, TFR.

Abstract

Due to the widespread use of asynchronous electric machines in the industrial field, especially squirrel-cage machines, which have characteristics that make them a leader in manufacturing, appropriate cost and high-power output, and many advantages. These machines are exposed to many problems throughout their use. Early fault diagnosis saves time and preserves the integrity of the industrial chain. Therefore, the diagnosis and maintenance of electrical machines are of great interest. There are many diagnostic methods. In this study, we will try to approach the technique of analysis of static currents and their electrical behavior in the detection of bearing faults in an asynchronous motor. We also used current Park vectors in order to detect rolling element bearing fault. As we used the fast Fourier transform to represent the Park vector spectra.

Key words: *Asynchronous machine, diagnosis, bearing, fault in the outer ring, fault in the inner ring, Park vectors, FFT.*

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : Etat De L'art Sur Le Diagnostic Des Défauts Dans Les MAS

Figure I.1: La machine asynchrone	16
Figure I.2: Symbole de la machine asynchrone à cage d'écureuil	16
Figure I.3: Stator d'une machine asynchrone	17
Figure 1.4: Rotor à cage d'écureuil	18
Figure I.5: Aperçu des différentes composantes de la machine asynchrone à cage	19
Figure I.6: Photo simplifiant le principe de fonctionnement de MAS a cage	20
Figure I.7: Forme de la main droite	20
Figure I.8: Surveillance	23
Figure I.9: Proportion des défauts	28
Figure I.10: Répartition des pannes de faible et moyenne puissance	28
Figure I.11: Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances	29
Figure I.12: Représentation des défauts statoriques	30
Figure I.13: Quelques défauts statoriques	30
Figure I.14: Rupture au même niveau	32
Figure I.15: Rupture à la fin qui ca le relie à l'anneaux du rotor	32
Figure I.16: Une barre partiellement cassée et une barre complètement cassée	32
Figure I.17: Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit	33
Figure I.18: Différents types d'excentricités	34
Figure I.19: Structure roulement à billes	35
Figure I.20: Certains des defauts de roulmement a billes	35
Figure I.21: Dimension du roulement à bille	36

Figure I.22: Certains techniques de diagnostic	37
Figure I.23: Image thermique d'un moteur, A) sain, B) court-circuit de 26% et court-circuit de 40%	37
Figure I.24: Spectre du couple électromagnétique avec défaut de roulement	38
Figure I.25: Positions of the flux probes for measuring different fluxes	39
Figure I.26: Spectre du flux en cas sain et avec défaut de roulement	39
Figure I.27: Montage du capteur du vibratoire sur le moteur asynchrone	39
Figure I.28: Les spectres de puissance vibratoire d'une machine sans et avec défaut de barre de rotor cassé sous une charge de 0%	40
Figure I.29: Spectre du courant statorique d'un moteur sain et avec une barre cassée en charge	41
Figure I.30: Aperçu sur réseau de neurone artificiel	41

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

Figure II.1: Dommages usure par type de roulement	48
Figure II.2: Dommages écaillage par type de roulement	48
Figure II.3: Dommages Grippage par type de roulement	49
Figure II.4: Dommages Rouillé et Corrosion par type de roulement	49
Figure II.5: Différents types d'excentricités	50
Figure II.6: Distribution spatiale de la densité de flux magnétique de la machine : (a) sain (b) avec excentricité	51
Figure II.7: Densité de l'induction magnétique B_r du l'entrefer dans un certain côté de la circonférence de la machine	51
Figure II.8: Transformation de PARK (a, b, c) à (d, q)	52

Figure II.9: Forme Lissajous du courant statorique de vecteur de Park: (a) cas sain (b) cas de défaut trou unique de 1 mm sur la bague intérieure et (c) cas sain (d) cas de défaut d'excentricité dynamique53

Figure II.10: Spectre du courant statorique de vecteur de Park : (a) cas sain (b) cas de défaut trou unique de 8 mm sur la bague extérieure et (c) cas sain (d) cas de défaut d'excentricité dynamique54

CHAPITER III : Détection des Defaults des Roulements Par Analyse des Vecteurs de Park

Figure III.5: Les courants statoriques de la machine sain i_a , i_b , i_c 57

Figure III.6: Vecteurs de Park pour un MAS sain en pleine charge (20Nm)58

Figure III.7: Vecteurs de Park pour un MAS en pleine charge (BE)59

Figure III.8: Vecteurs de Park pour un MAS en pleine charge (BI)59

Figure III.5: Spectre des vecteurs de Park (i_d) sous différentes conditions (a, b, c) : 0-100Hz61

Figure III.6: Spectre des vecteurs de Park (i_q) sous différentes conditions (a, b, c) : 0-100Hz62

LISTE DE TABLEAU :

Tableau I.1: Classification des défauts des machines par rapport d'origine27

Tableau III 1: Fréquences additionnelles dans le spectre du courant i_d et i_q (0-100Hz).....63

LISTES DES SYMBOLES

MAS : Machine asynchrone.

RNM : la méthode des réseaux de permanées.

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

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

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

p : Nombre de paires de pôles.

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

g : Glissement.

f.m.m : La force magnétomotrice.

f : Fréquence [Hz].

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

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

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

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

f_r : Fréquence rotorique [Hz].

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

$f_{b.int}$: Fréquence de défauts [Hz].

$f_{b.ext}$: Fréquence de défauts [Hz].

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

L_{10} : Durée de vie des roulements.

C : Charge nominale (donnée constructeur).

P : Charge dynamique appliquée au roulement.

BE : Bague extérieure.

BI : Bague intérieure.

(MCSA) : Analyse spectrale du courant statorique.

SOMMAIRE

Remerciements	2
Dédicaces	3
Résumé	4
Liste des figures	6
Liste des figures	8
Listes des symboles	7
Introduction Générale	14

CHAPITER I: Etat De L'art Sur Le Diagnostic Des Défauts Dans Les MAS

I.1 Introduction	16
I.2 Définition la machine asynchrone à cage	16
I.3 Constitution de la machine asynchrone	17
I.3.1 Stator.....	17
I.3.2 Rotor	18
I.3.3 Les organes mécaniques	18
I.4 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone	19
I.4.1 Le champ tournant	21
I.4.2 La vitesse de synchronisme	21
I.4.3 La vitesse de rotation	21
I.4.4 Le glissement	21
I.5 Les avantages et les inconvénients des machines asynchrones	22
I.5.1 Avantages	22
I.5.2 Inconvénients	22
I.6 Notion sur la sûreté de fonctionnement	22
I.6.1 La surveillance et le diagnostic	22

I.6.2 La maintenance	23
I.6.3 Défaillance et panne	24
I.7 Etude des différents défauts dans la machine asynchrone	24
I.7.1 Causes et conséquences des défauts	25
I.7.2 Les principaux défauts courants des machines asynchrones	27
I.7.2.1 Défauts internes et externes	27
I.7.3 Etudes statistiques	28
I.7.4 Défauts statoriques	29
I.7.5 Défauts rotoriques	31
I.7.5.1 Rupture des barres	31
I.7.5.2 Rupture d'anneaux de court-circuit	32
I.7.5.3 Excentricité d'entrefer	34
I.7.6 Défauts de roulements à billes	35
I.8 Techniques et méthodes de diagnostic	37
I.8.1 Diagnostic par analyse de la température	37
I.8.2 Diagnostic par analyse du couple électromagnétique	37
I.8.3 Diagnostic par analyse du flux	38
I.8.4 Diagnostic par analyse vibratoire	39
I.8.5 Diagnostic par analyse des courants statoriques	40
I.8.6 Diagnostic par réseaux de neurones artificiels	41
I.8.7 Diagnostic par analyse du vecteur de Park	42
I.9 Conclusion	42

CHAPITER II: Aperçu Detaille Sur Le Défaut Du Roulement Dans Les MAS

II.1 Introduction	44
II.2 Défauts de roulement	44

II.2.1	Présentation du roulement à billes	44
II.2.1.1	Causes et les conséquences des défauts roulements à bille	45
II.2.1.2	Durée de vie des roulements	45
II.2.1.3	Différents types de roulements	46
II.2.1.3.1	Roulements à Billes	46
II.2.1.3.2	Roulements à Rouleaux	47
II.2.1.4	Différents dommages aux roulements	47
II.3	Défauts d'excentricité d'entrefer	50
II.3.1	Déséquilibre le champ magnétique	51
II.4	Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park	52
II.4.1	Transformation de Park	52
II.4.2	Technique d'analyse du vecteur de Park	53
II.5	Conclusion	55
 CHAPTER III: Détection des Defaults des Roulements Par Analyse des Vecteurs de		
Park		
III.1	Introduction	57
III.2	Courbes de Lissajous	57
III.3	Détection du défaut du roulement	57
III.3.1	Détection du défaut dans la bague extérieure et intérieur	58
III.3.1.1	Détection du défaut dans la Bague Extérieure (BE)	58
III.3.1.2	Détection du défaut dans la Bague Intérieure (BI)	59
III.4	Résulta and discussion	60
III.5	Analyse spectrale du courant statorique (MCSA)	60
III.5.1	Analyse spectrale du vecteur de Park dans l'intervalle 0-100Hz	60
III.6	Résulta and discussion	61

III.7 Conclusion	61
Conclusion Générale	66

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les machines électriques dans tous les secteurs industriels sont un élément clé important qui en fait un composant efficace des industries de toutes sortes. Ces secteurs s'appuient sur des machines asynchrones à triphasé, en particulier des machines à cage d'écureuil, pour plusieurs raisons, dont la plus importante est la force et le faible coût, malgré ce que nous avons mentionné, ce n'est pas absolument infaillible.

Au cours de leur durée de vie, ces machines sont soumises à de nombreuses contraintes internes et externes qui provoquent de nombreux défauts dans différentes parties du moteur, qui provoquent de nombreux défauts dans différentes parties du moteur, des pertes importantes et des réparations coûteuses. Les techniciens ont donc réduit ces défauts en les prédisant et en les diagnostiquant avant une défaillance complète par différents systèmes de contrôle et de maintenance utilisant des quantités électromagnétiques (courant, tension, débit... etc.) et les analyser nous permettant de diagnostiquer avec précision le défaut.

Avec l'avancement de la technologie, les équipements numériques et informatiques sont devenus un grand avantage dans la vie des machines électriques et contribuent à l'avancement des activités de production industrielle. Pour cela, notre mémoire est encadrée comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons état de l'art sur les machines asynchrones à cage d'écureuil en termes de composants et de principe de fonctionnement et des types de défauts les plus importants qui peuvent être infligés, et surtout pour identifier les techniques de diagnostic les plus importantes utilisées par les ingénieurs.
- Dans le deuxième chapitre, nous approfondirons l'étude du défaut des roulements, puisqu'il s'agit de l'un des défauts les plus courants dans le domaine industriel, nous mentionnerons également certains de ses types et les pressions auxquelles ils peuvent être exposés. Parmi les conséquences des défauts des roulements, on cite notamment le défaut d'excentricité du rotor, car il est considéré comme une conséquence inévitable de celui-ci dans tous les cas.
- Concernant le troisième chapitre, nous allons adopter l'approche analyse des vecteurs de Park des courants statiques comme technique de diagnostic des roulements défectueux pour les machines asynchrones en les simulant dans les états sains et défectueux, en étudiant les différences qui se produisent dans ces courants. Une analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier rapide sera un objectif dans ce chapitre.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale par laquelle nous présenterons les résultats du travail.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART SUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DANS LES MAS

I.1 Introduction :

Les machines électriques tournantes jouent un rôle important dans tous les domaines industriels. Le moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil est le moteur le plus utilisé dans l'industrie en raison de ses différents avantages tels que : son faible coût de fabrication ; sa robustesse et ses performances. Malheureusement, lors du fonctionnement de ce moteur, plusieurs contraintes de nature différente l'affectent. L'accumulation de ces contraintes peut entraîner divers défauts dans les différentes pièces qui le composent. Si ces défauts ne sont pas détectés à temps, il y a un risque d'arrêt du processus industriel, avec d'énormes pertes économiques attendues. A cet effet, plusieurs techniques de diagnostic ont été développées pour détecter et diagnostiquer ces défauts. Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter un aperçu sur les machines asynchrones (MAS): composants, principe du fonctionnement et comment elles sont tournées en détail. Comme nous indiquerons aux mécanismes de la surveillance et de diagnostic des MAS. Nous allons présenter les différents problèmes des MAS dans le domaine industriel en indiquant les causes et les conséquences des défauts. Enfin, la dernière partie de ce chapitre sera consacrée aux différentes techniques utilisées pour diagnostiquer les défauts dans les MAS.

I.2 Définition la machine asynchrone à cage :

Une machine asynchrone ou à induction est une machine à courant alternatif. Elle peut transformer l'énergie électrique en énergie mécanique (Moteur) ou l'inverse (Génératrice). Il contient deux types de rotor : le rotor à cage d'écureuil et le rotor bobiné, dans cette thèse nous allons étudier just le rotor à cage d'écureuil. Où appelé "Une machine a cage d'écureuil", (Figure I-1) . Le terme asynchrone vient de la différence entre la vitesse de rotation du rotor et le champ magnétique tournant du stator. Il est symbolisée par le symbole suivant (Figure I.2) [MOH17] :

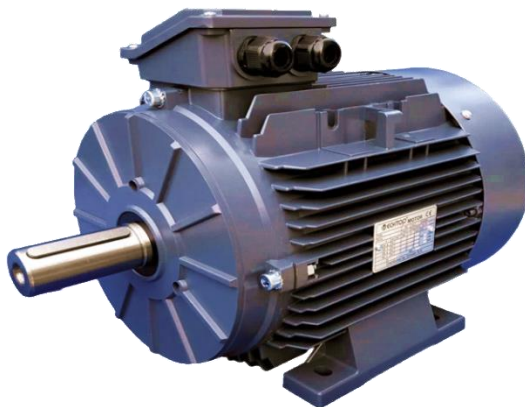


Figure I.1: La machine asynchrone [SW1]

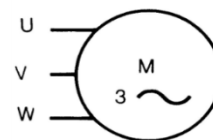


Figure I.2: Symbole de la machine asynchrone à cage d'écureuil [SAN17]

I.3 Constitution de la machine asynchrone :

Nous nous limiterons à une brève introduction aux moteurs asynchrones triphasés et décrirons en détail les composants de ces moteurs. D'un point de vue structurel, un moteur asynchrone triphasé peut être divisé en trois parties distinctes [YAS09], [MOH17], [RAD07].

- ❖ Le stator : c'est une partie fixe, où est connecté l'alimentation électrique.
- ❖ Le rotor : c'est une partie tournante, qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- ❖ Les composants mécaniques permettent la rotation du rotor et l'entretien des différents sous-ensembles.

I.3.1 Stator :

Le stator comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles minces identiques en forme de couronne qui constituent un cylindre vide ; ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé. Cette couronne est serrée dans une carcasse en fonte [BAP10].

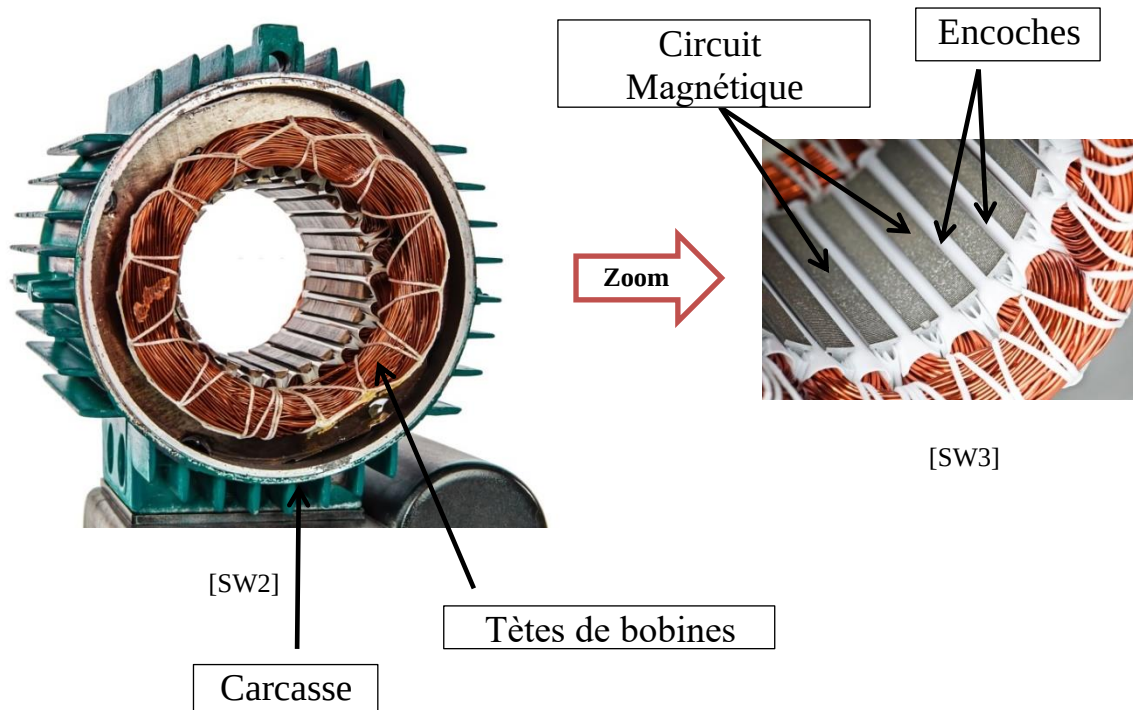


Figure I.3: Stator d'une machine asynchrone

I.3.2 Rotor :

L'enroulement du rotor à cage d'écureuil est constitué de barres de cuivre nues introduites dans les encoches ; ces barres sont soudées ou rivées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. L'ensemble ressemble à une cage d'écureuil d'où le nom de rotor à cage d'écureuil. Dans les moteurs de petite moyenne puissance, les barres et les anneaux sont formés d'un seul bloc d'aluminium coulé [BAP10] .

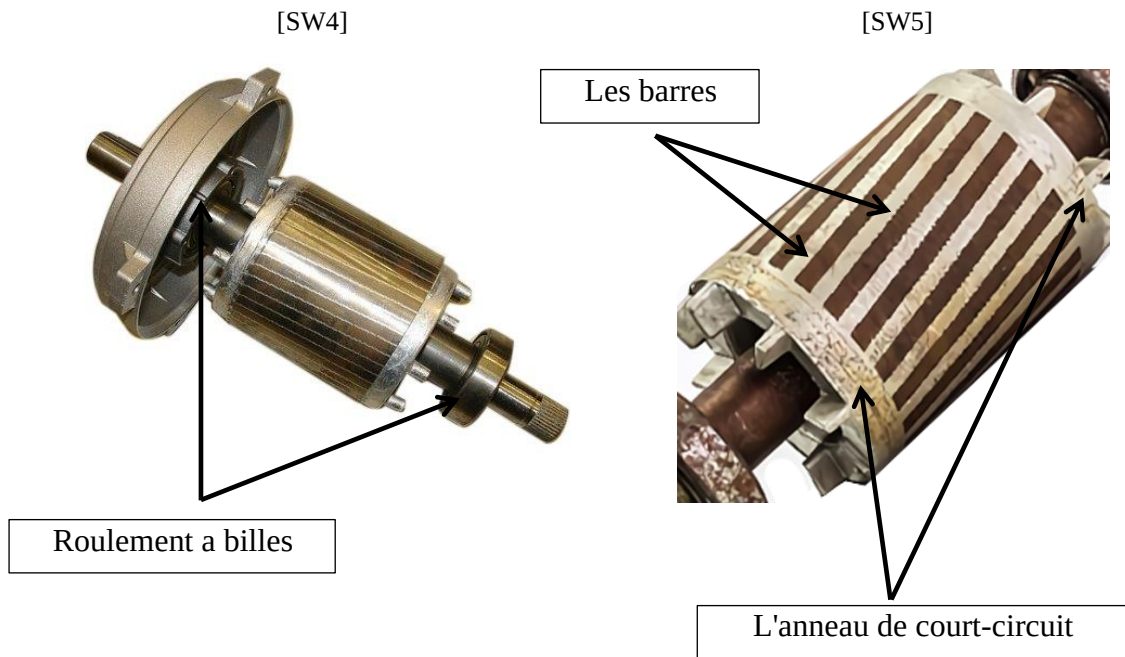


Figure 2.4: Rotor à cage d'écureuil

I.3.3 Les organes mécaniques :

L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur le quel est fixé un demi accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre . Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulement pour les machines de petite et moyenne puissance [YAS09].

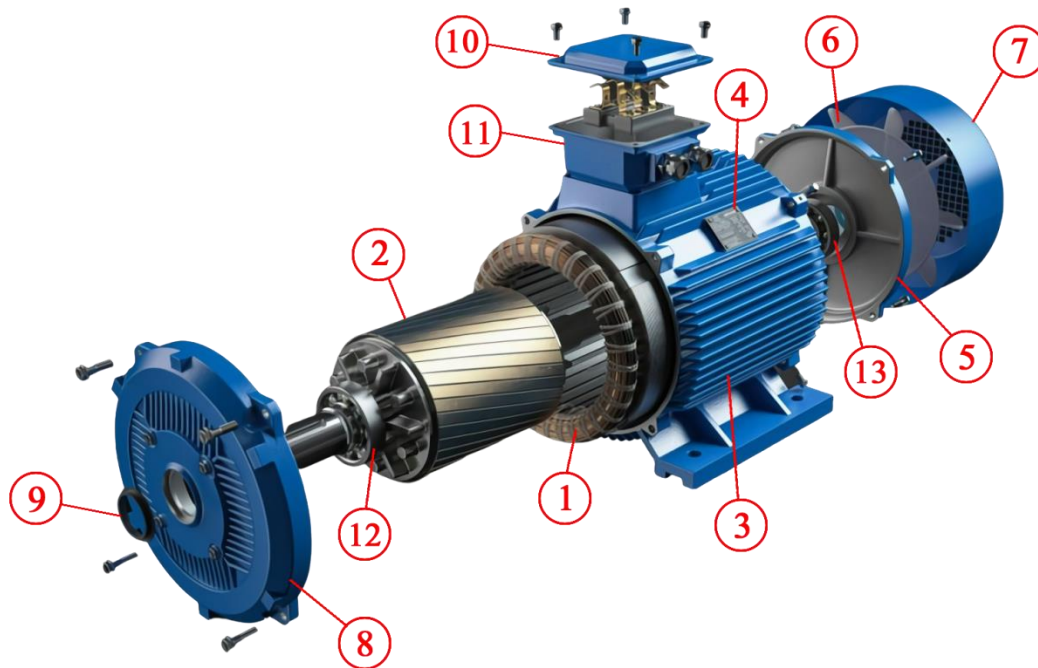


Figure I.5: Aperçu des différentes composantes de la machine asynchrone à cage [SW6],[MOH17],[HAM18]

1- Stator	6- Ventilateur	10- Couvercle de boîte
2- Rotor a cage	7- Capot de ventilation	11- Corps de boîte
3- Carcasse	8- Flasque coté accouplement	12-Roulement coté accouplement
4- Plaque signalétique	9- Joint coté accouplement	13-Roulement arrière
5- Flasque arrière		

I.4 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone :

Quand les enroulements de stator sont alimentés par un courant alternatif, ils produisent un champ magnétique rotatif. Cela, génère des courants induits dans le rotor (dans la cage de l'écureuil) qui à son tour crée un autre champ magnétique qui provoque l'apparition de forces. Ces dernières provoquent la rotation du rotor (force motrice). L'induction du courant ne peut se faire que si le conducteur est en court-circuit (c'est le cas puisque les deux bagues latérales relient tous les barreaux). La vitesse de rotation est légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique rotatif "glissement" [SW7].

D'autre part, sur la création d'une force motrice sur le conducteur considéré (parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite [SW8].

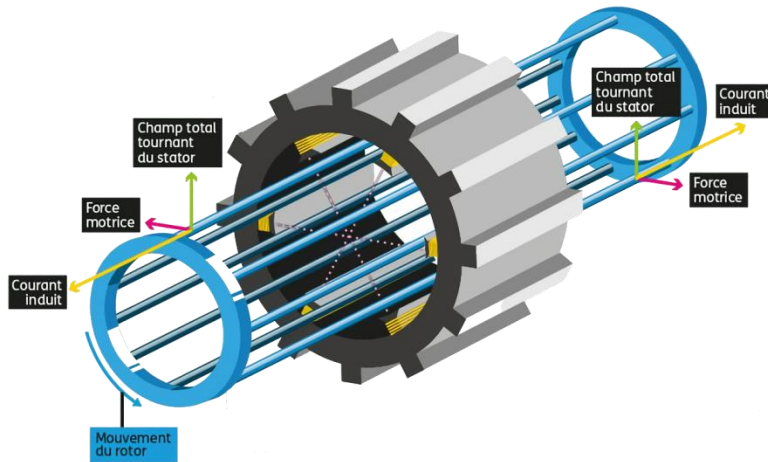


Figure I.6: Photo simplifiant le principe de fonctionnement de MAS a cage [SW10]

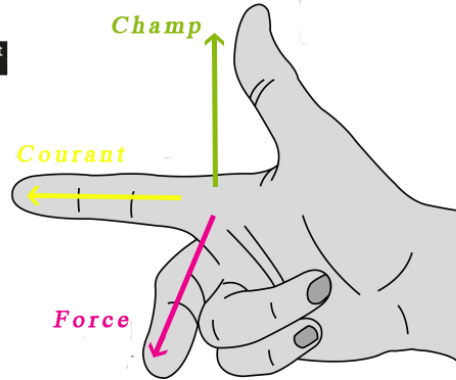


Figure I.7: Forme de la main droite [SW9]

I.4.1 Le champ tournant :

C'est la variation du flux magnétique créée par les courants statoriques, sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence des courants du stator. C'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence d'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme Ω_s (rad/s) [MOH17].

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (I.1)$$

Ou

$$\Omega_s = \frac{2\pi.n_s}{60} \quad (I.2)$$

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

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

n_s : Vitesse de synchronisme en [tr/min]

p : Nombre de paires de pôles

I.4.2 La vitesse de synchronisme :

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

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (I.3)$$

f : Fréquence [Hz]

I.4.3 La vitesse de rotation :

D'après la relation précédente (I.5), il est évident que la vitesse mécanique peut être donnée par la relation suivante [SW8], [LEG21] :

$$n_r = \frac{60 \cdot f_s}{p} (1 - g) \quad (I.4)$$

I.4.4 Le glissement :

En fonctionnement normal, le rotor d'un moteur asynchrone tourne à une vitesse de n_r (tours par minute) ou Ω_r (radians par seconde). La force magnétomotrice générée par le courant statorique tourne à une vitesse synchronisme n_s . La vitesse Ω_r est généralement inférieure à Ω_s . Le glissement "g" est alors défini comme le rapport entre les vitesses par la formule suivante [SW8], [LEG21]:

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (I.5)$$

Remarque :

n_s : vitesse de rotation de synchronisme [tr/min].

n_r : Vitesse de rotation du rotor [tr/min].

Ω_s : vitesse de synchronisme [rd/s].

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

$n_r = 0$	$g = 1$	Demarrage
$n_r = n_s$	$g = 0$	Synchronisme
$0 < n_r < n_s$	$0 < g < 1$	Moteur
$n_r > n_s$	$g < 0$	Génératrice

I.5 Les avantages et les inconvénients des machines asynchrones :

I.5.1 Avantages :

Il y a plusieurs avantages dans le moteur asynchrone [HEN20] :

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Il tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone.
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.

I.5.2 Inconvénients :

- Le couple de démarrage très élevé que les couples nominaux.
- La vitesse dépend de la charge.
- Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse).
- Les moteurs à induction peuvent être assez lourd et encombrant à cause de leurs bobinages.

I.6 Notion sur la sûreté de fonctionnement :

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

I.6.1 La surveillance et le diagnostic :

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

- **Fiabilité** : c'est l'aptitude d'un système à accomplir sa mission dans des conditions données d'utilisation.
- **Disponibilité** : c'est l'aptitude d'un système à fonctionner lorsqu'on le sollicite.

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

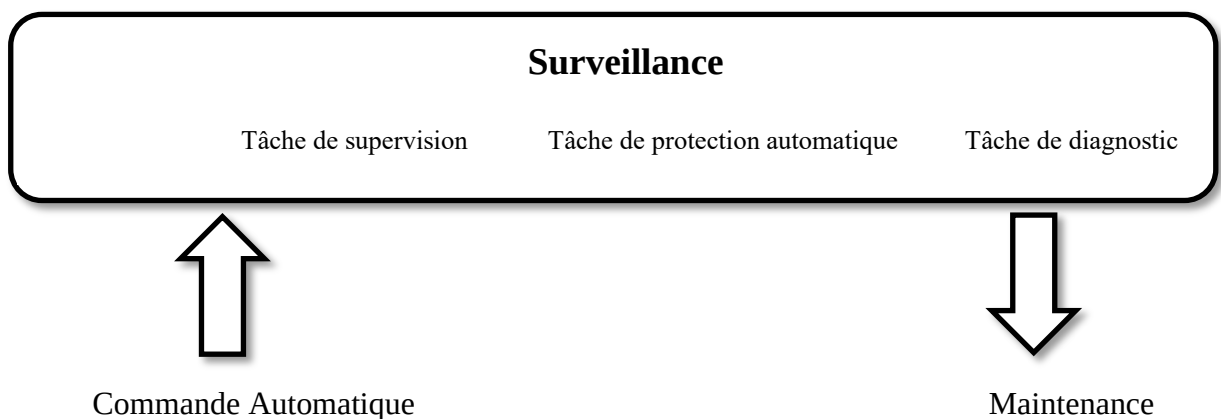


Figure I.8: Surveillance [HAM18], [KAD16]

I.6.2 La maintenance :

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

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

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

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

I.6.3 Défaillance et panne :

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

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

I.7 Etude des différents défauts dans la machine asynchrone :

Pendant la vie de la machine asynchrone est bien souvent soumise à des sollicitations sévères qui peuvent conduire à un certain nombre de défaillances [YAS09], bien que les machines asynchrones à cage d'écureuil soient réputées robustes, elles peuvent parfois présenter différents types de défauts, ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique soit autre. Et avant d'étudier les différents types de défauts, il est indéniable de présenter les causes donnant naissance à ces défauts ainsi que leurs conséquences [LAR05].

I.7.1 Causes et conséquences des défauts :

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

a- Les contraintes électriques

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

b- Les contraintes dynamiques

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

c- Les Contraintes magnétiques

On distingue les contraintes suivantes :

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

d- Les Contraintes d'environnement

Une machine doit toujours être gardée dans un endroit propre et sec, car sa durée de vie et sa bonne tenue dépendent de l'environnement dont lequel elle fonctionne. La présence de l'humidité et de la poussière, qui contient des particules métalliques, engendrent de graves endommagements au niveau de la surface rotorique de la machine et détériorent l'isolant provoquant par conséquent des courts-circuits dans les enroulements de la machine.

e- Les Contraintes mécaniques

Ces contraintes s'interprètent physiquement sous la forme de :

- o Mouvement de l'enroulement.
- o Déflexion du rotor.

f- Les Contraintes thermiques

L'excès de la température provoque essentiellement la dégradation des isolants des enroulements et contribue à leur vieillissement, engendrant des courts-circuits de différents types. Parmi les causes faisant apparaître les dépassements thermiques on cite :

- o Les variations de la tension.
- o Le déséquilibre des tensions d'alimentation.
- o Le démarrage du moteur.
- o La surcharge du moteur.
- o La défaillance du système de ventilation.
- o L'augmentation de la température ambiante.
- o Les pertes thermiques excessives.

g- Les contraintes de démarrage

Le démarrage est la période la plus dangereuse pour la tenue de l'enroulement rotorique d'un moteur, durant laquelle tous les phénomènes sont aggravés par suite de l'appel important du courant.

- o Les conditions de démarrage.
- o Les contraintes permanents.
- o Les contraintes vibratoires.

I.7.2 Les principaux défauts courants des machines asynchrones :

I.7.2.1 Défauts internes et externes : les défauts affectants les moteurs peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories [HAM18], [LEG21] :

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

Tableau I.1: Classification des défauts des machines par rapport d'origine

<i>Origines</i>		Classification de défauts
<i>Interne</i>	Mécanique	• Contact entre le stator et rotor. • Excentricité. • Défaut de roulements. • Déplacement des conducteurs.
	Electrique	• Défauts de stator. • Défauts l'isolation. • Rupture de barre ou d'anneaux de court-circuit .
<i>Externe</i>	Mécanique	• Surcharge. • Défaut de montage. • Charge oscillante.
	Electrique	• Déséquilibre de la tension. • Sources de tensions déséquilibrées. • Réseau bruité.
	Environnementale	• Humidité. • Température. • Propreté.

I.7.3 Etudes statistiques :

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de système industriel sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50kw à 200kw) a donné les résultats suivants (Figure I.9) [YAS09],[ABL09]:

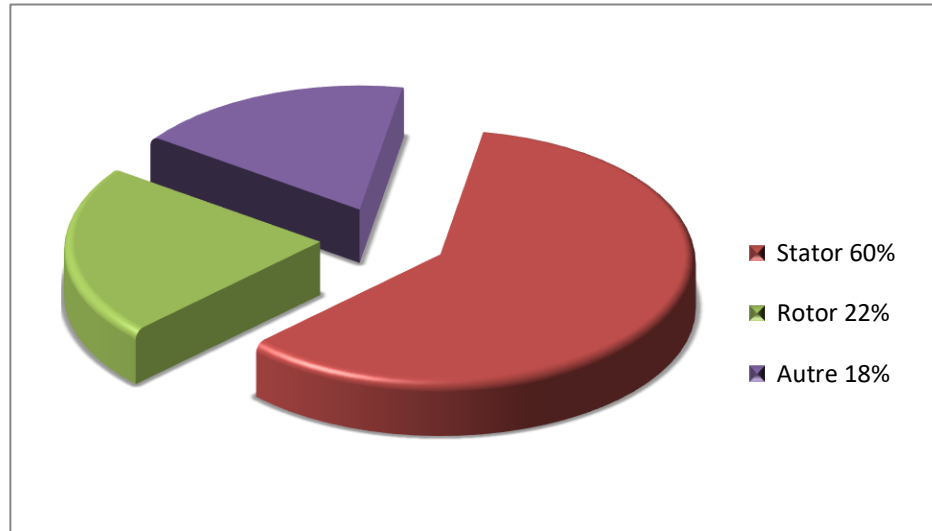


Figure I.9: Proportion des défauts

D'autres parts, les mêmes études montrent qu'en 1973 et 1988, les pannes au stator sont passées de 78% à 60% et au rotor de 12% à 22%. Ces variations sont dues à l'amélioration des isolants pendant cette période. La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est établie comme suit :

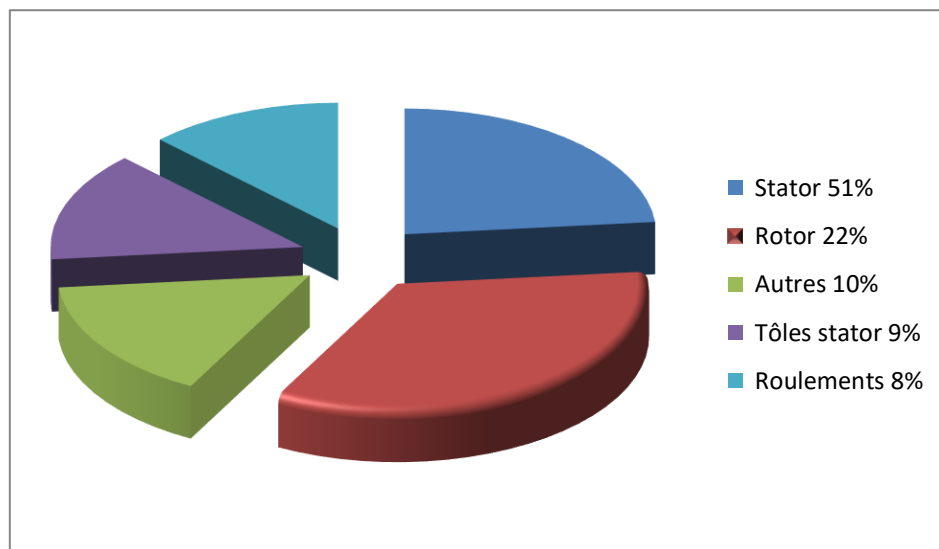


Figure I.10: Répartition des pannes de faible et moyenne puissance

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

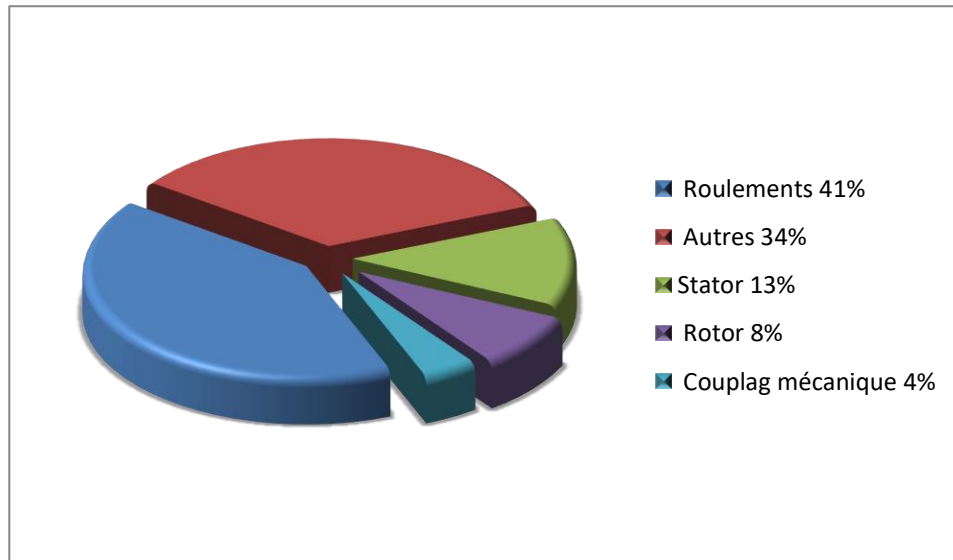


Figure I.91: Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances

I.7.4 Défaits statoriques :

Ces défauts apparaissent souvent au niveau des enroulements statoriques et sont dus à des dépassements de différentes natures (Figure I.13) [BES17], [HAR09]. On distingue :

- Court-circuit entre spires d'une même phase.
- Court-circuit entre phases ou entre bobines.
- Défaut de bobine a la terre.
- Coupure d'une phase.
- Défaut du circuit magnétique (rupture de tôles).

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

$$f_{cc} = f. \left(k \pm \frac{n(1-g)}{p} \right) \text{ (Hz)} \quad (\text{I.6})$$

- | | |
|----------------------------------|---|
| • f = Fréquence d'alimentation | • p = Nombre de paire de pôles |
| • $n = 1, 2, 3, \dots n \in N$ | • g = glissement |
| | • $k = 1, 2, 3, \dots n \in N$ |
| | • f_{cc} = Fréquence de court-circuit |

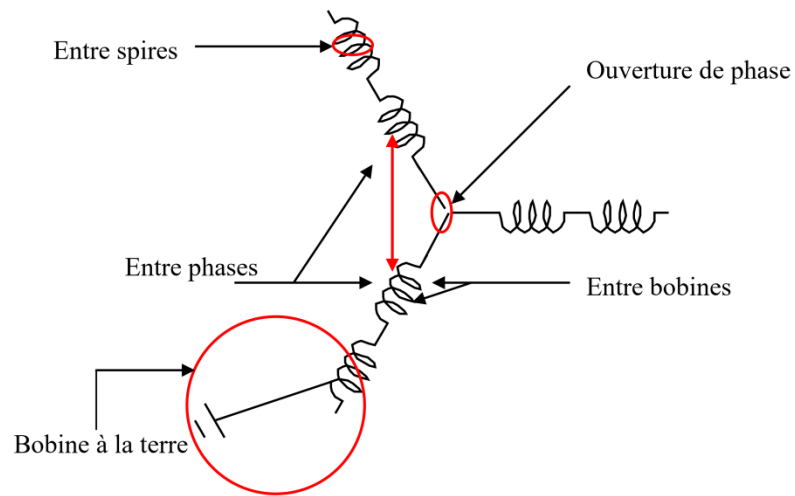
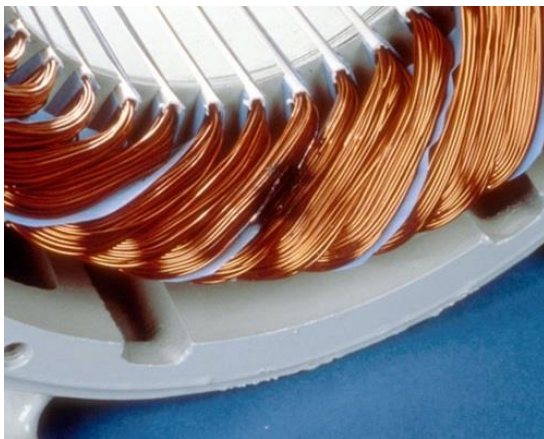
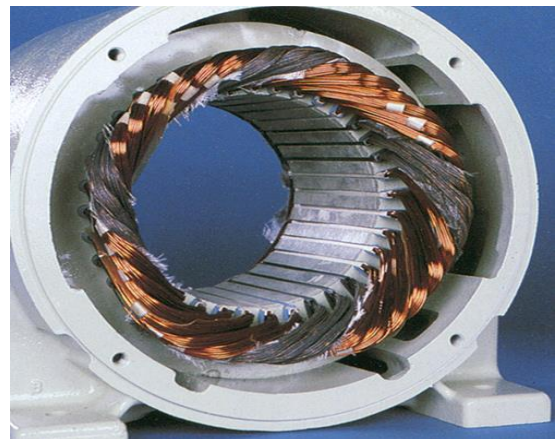


Figure I.12: Représentation des défauts statoriques [BES17]



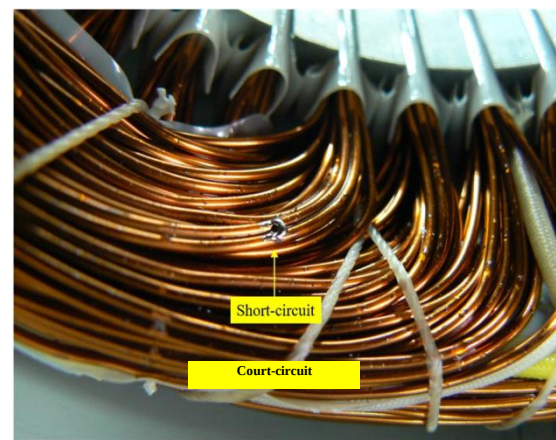
Court-circuit entre phase ou entre bobine [SW12]



Ouverture d'une phase [SW12]



Masse dans l'encoche [SW12]



Court-circuit entre les spires [SW13]

Figure I.13: Quelques défauts statoriques

I.7.5 Défaits rotoriques :

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

- Rupture de barres.
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.
- Excentricité statique, dynamique et mixte.

I.7.5.1 Rupture des barres :

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [MOH17], [OMA11].

Il y'a deux type de cassure :

- **Cassure totale :** Barre cassée totalement signifie que le courant circulant dans celle ci est nul et le courant qui circulait à travers cette barre se répartit sur les autres barres adjacentes. Ces derniers seront surchargés, ce qui provoquera leurs ruptures, et parfois un arrêt total de la machine [KOU11].
- **Cassure partielle :** Barre cassée partiellement le courant circulant dans la barre n'est pas égal nul mais avec le temps, ça va se briser complètement cassé, car la surface de barre cassé est petite et ne résistera pas au passage du courant, ce qui accélère sa rupture complètement.



Figure I.14: Rupture au même niveau [MHD16]

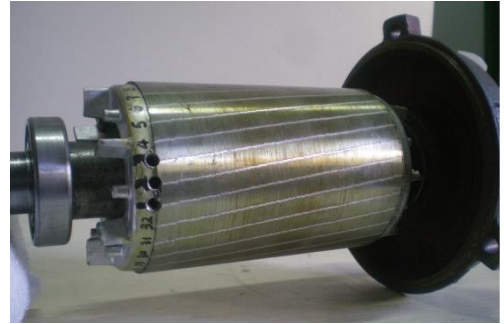


Figure I.15: Rupture à la fin qui ca le relie à l'anneaux du rotor [HON13]



Figure I.16: Une barre partiellement cassée et un barre complètement cassée [GAE04]

I.7.5.2 Rupture d'anneaux de court-circuit :

La rupture d'une portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec La rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité, ...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. Comme le mentionne Filippetti [OMA11], nous savons que la rupture d'une barre de la cage rotorique induit dans le spectre du courant statorique une composante de fréquence:

$$f_{cb} = (1 \pm 2kg)f \quad (I.7)$$

D'autres composantes spectrales peuvent apparaître dans le spectre du courant statorique à des fréquences données par l'expression suivante [HAN19] :

$$f_{cb} = \left[\frac{k}{p}(1 - g) \pm g \right] \cdot f \quad (I.8)$$

En effet, la rupture d'une barre rotorique crée, dans l'entrefer de la machine, un champ tournant inverse de fréquence sf . L'interaction de ce champ tournant avec la vitesse rotorique crée une composante de fréquence $(1 - 2g)f$ dans le spectre du courant statorique. La présence de cette modulation dans le courant statorique induit une oscillation sur le couple électromagnétique de la machine de fréquence $2gf$. Cette oscillation de couple crée inévitablement une oscillation de la vitesse rotorique à la même fréquence. Cette oscillation de vitesse induit une nouvelle composante de fréquence $(1 + 2g)f$ dans le spectre du courant statorique. Cette composante crée dans l'entrefer un nouveau champ tournant inverse de fréquence $3gf$. En utilisant la même approche, ce champ tournant induit une nouvelle composante de fréquence $(1 - 4g)f$ dans le spectre du courant statorique. Le couple électromagnétique ainsi que la vitesse rotorique laissent paraître une nouvelle oscillation ayant pour fréquence $4gf$. Cette oscillation crée dans le courant statorique une nouvelle composante de fréquence $(1 + 4g)f$. Cette nouvelle modulation crée un nouveau champ tournant inverse dans l'entrefer de la machine de fréquence $6gf$. Comme nous l'avons précédemment mentionné, la rupture d'une barre de la cage rotorique ne doit induire qu'une seule composante dans le spectre basse fréquence du courant statorique. Les autres composantes étant dues à l'interaction de la vitesse avec les champs tournants inverses présents dans l'entrefer de la machine. La rupture d'une portion d'anneau de court-circuit peut aussi être détectée en utilisant ces composantes car, tout comme la rupture d'une barre de la cage, ce défaut rotorique induit lui aussi un champ tournant inverse de fréquence gf dans l'entrefer de la machine asynchrone, produisant ainsi les mêmes composantes dans le spectre fréquentiel du courant statorique [OMA11].

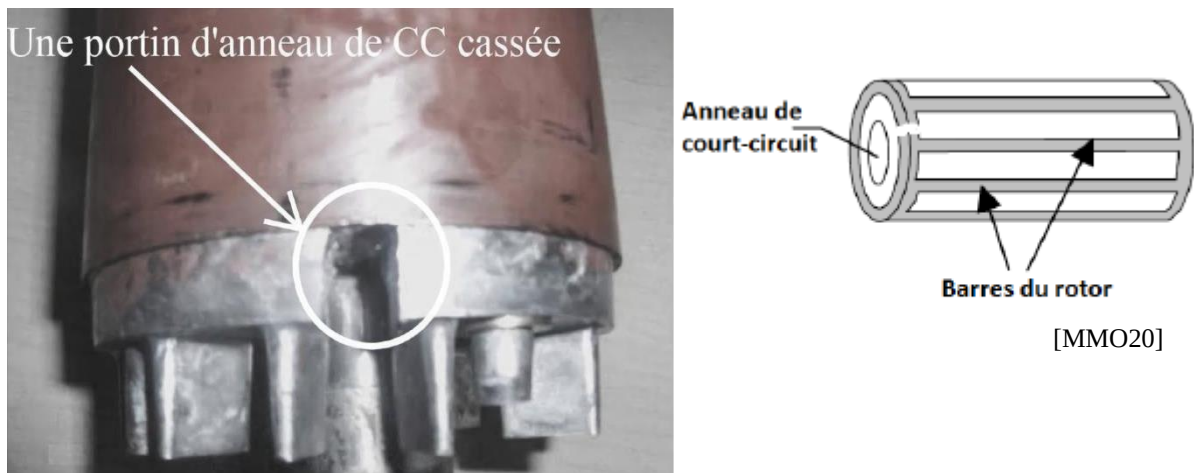


Figure I.17: Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit

I.7.5.3 Excentricité d'entrefer :

L'excentricité de la machine est le résultat du changement de l'épaisseur de l'entrefer. Ce défaut peut survenir suite à une flexion de l'arbre, ou un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator. Il existe trois types d'excentricités qui peuvent apparaître dans une machine électrique, excentricité statique, dynamique, mixte (combinée).

Les fréquences sont données par la relation [RAD07] :

$$f_{exc} = f \left[(kn \pm n_e) \frac{(1-g)}{p} \pm n_w \right] \quad (I.9)$$

- n : le nombre d'encoches rotoriques.
- $n_e = 0$ dans le cas d'une excentricité statique et $n_e = 1$, dans le cas d'une excentricité dynamique.
- $k = 1, 2, 3 \dots$ et $n_w = 1, 3, 5, 7 \dots$ (l'ordre de l'harmonique de la F.m.m du stator).

Une autre série d'harmoniques liés à l'excentricité mixte, apparaît de part et d'autre de la fondamentale à des fréquences données par [HAN19]:

$$f_{exc} = |f \pm k f_r| \quad (I.10)$$

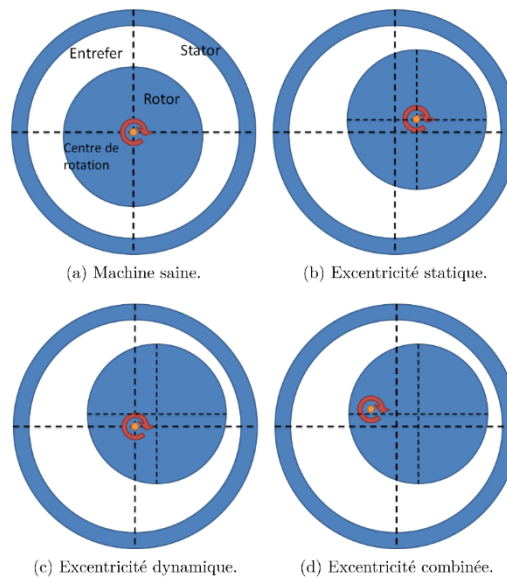


Figure I.18: Différents types d'excentricités

I.7.6 Défaits de roulements à billes :

Comme il est indiqué sur la (Figure I.11), la majorité des défauts dans les machines électriques concernent les défauts de roulements qui ont de nombreuses causes telles que l'écaillage de fatigue, la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou des causes électriques comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs [AND12]. Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants, cage ... etc. (FigureI.19).

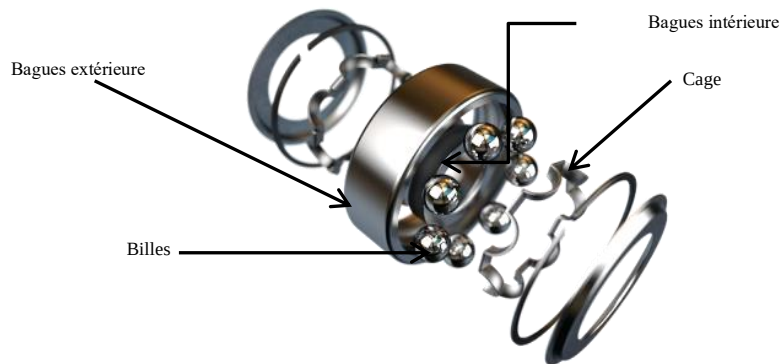


Figure I.19: Structure roulement à billes [SW14]



Figure I.20: Certains des défauts de roulement a billes [SW15],[SW16],[SW17],[SW18]

En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par des petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [RAD07].

$$f_{roul} = |f_s - kf_v| \quad (I.11)$$

d'où: $k = 1, 2, 3 \dots$, et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations. Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres du roulement. Les fréquences des vibrations qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont [RAD07] :

- **Défauts au niveau d'une bille**

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right)^2 \right] \quad (I.12)$$

- **Défauts sur la bague intérieure**

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (I.13)$$

- **Défauts sur la bague extérieure**

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (I.14)$$

- **Défauts dans la cage**

$$f_c = \frac{f_{rot}}{2} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (I.15)$$

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

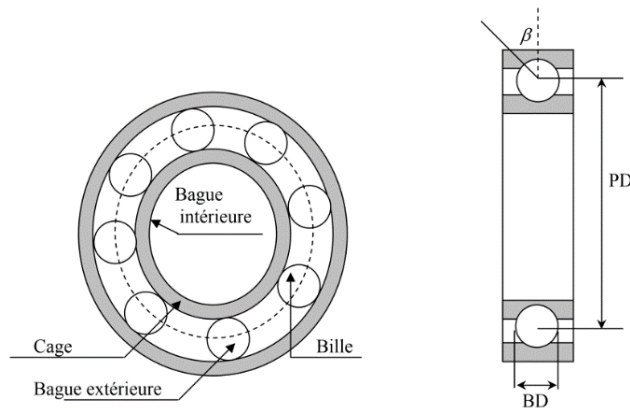


Figure I.21: Dimension du roulement à bille
[RAD07]

I.8 Techniques et méthodes de diagnostic :

Il existe différentes techniques de diagnostic et de test, certaines basées sur l'observation et la mesure (mesure du champ magnétique, mesure des vibrations, mesure du bruit, etc.), et d'autres basées sur la surveillance et la comparaison des propriétés électromagnétiques (courant stator, couple et vitesse de rotation) avec une machine saine [LAR05]:

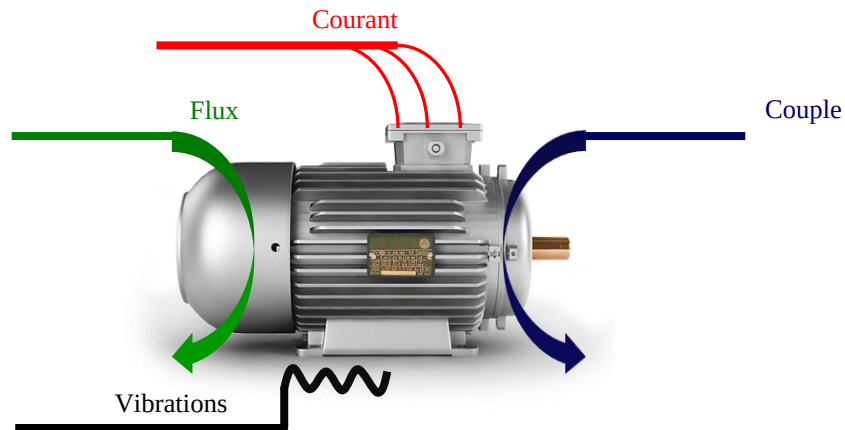


Figure I.22: Certains techniques de diagnostic [SW19]

I.8.1 Diagnostic par analyse de la température :

Toute partie défectueuse dans un moteur asynchrone dissipe une température anormale (augmentation de température due au défaut). Donc, il est très intéressant de suivre l'évolution de la caractéristique thermique du moteur dans ce cas. A cet effet, la technique de diagnostic par mesure de température est basée sur l'analyse de l'évolution de la température dans chaque partie du moteur afin de déterminer le dépassement au-delà du niveau normal qui indique l'existence d'un défaut (Figure I.24) illustre l'image thermique d'un moteur sain et d'un moteur avec un court-circuit de 26% et 40 % [KHO20].

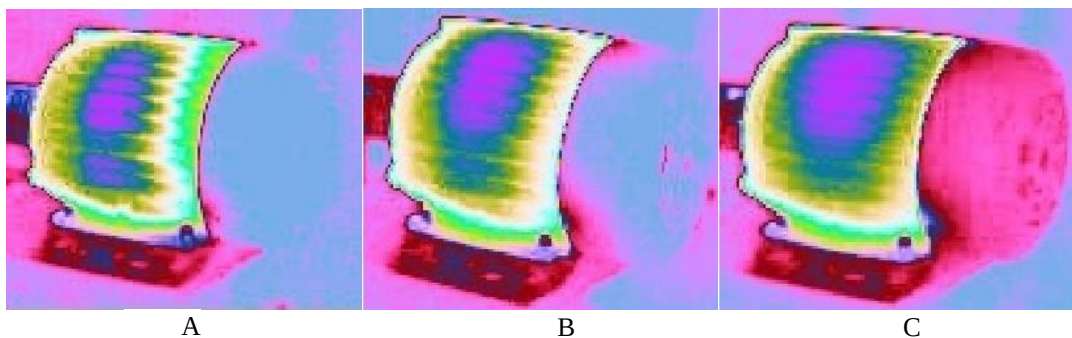


Figure I.24: Image thermique d'un moteur, A) sain, B) court-circuit de 26% et court-circuit de 40% [MEF]

I.8.2 Diagnostic par analyse du couple électromagnétique :

Quel que soit le type de défaut mécanique ou électrique une oscillation au niveau du couple électromagnétique est toujours présente. Pour cela, il est très important d'analyser le couple électromagnétique. C'est une technique de diagnostic très efficace pour la détection des défauts surtout les défauts de type mécanique comme : le défaut d'excentricité et le défaut de roulement... etc. En plus, cette technique d'analyse du couple est très intéressante car la signature des défauts est indépendante de l'harmonique du fondamental comparativement à l'analyse du courant statorique (Figure I.24) [KHO20].

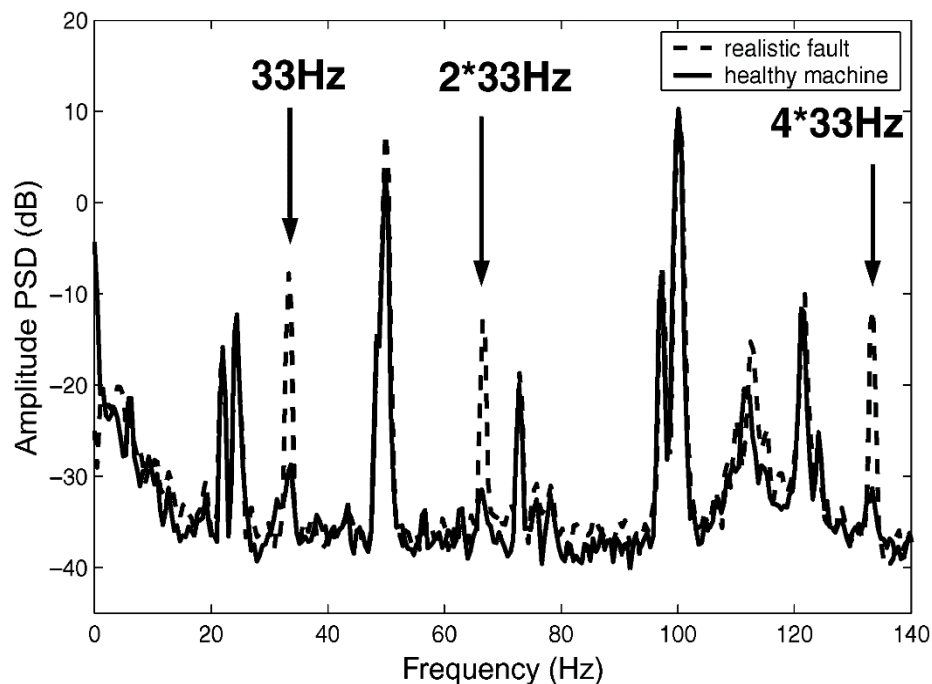


Figure I.24: Spectre du couple électromagnétique avec défaut de roulement [MAR08]

I.8.3 Diagnostic par analyse du flux :

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'utiliser 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 [KHO20].

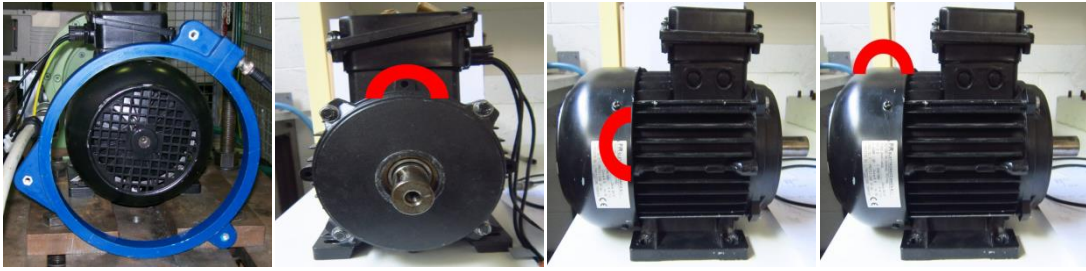


Figure I.25: Positions of the flux probes for measuring different fluxes [CIP]

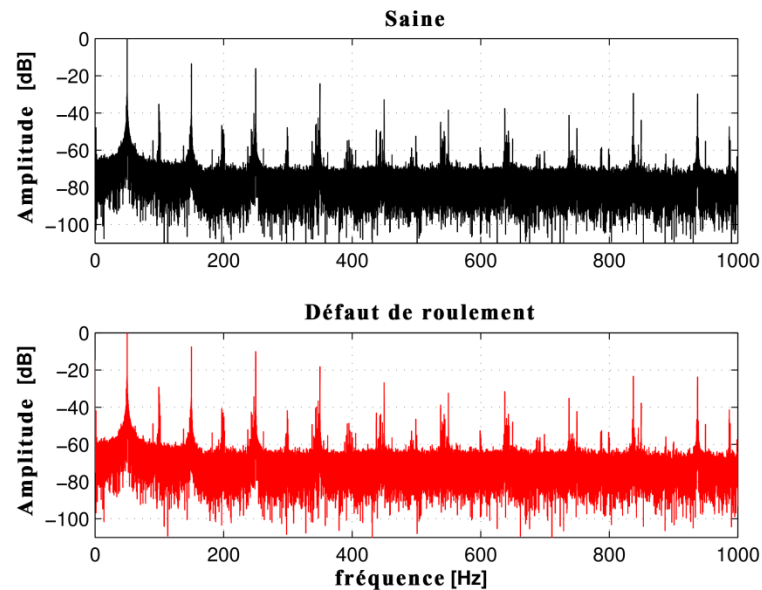


Figure I.26: Spectre du flux en cas sain et avec défaut de roulement [CIP]

I.8.4. Diagnostic par analyse vibratoire :

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



Figure I.27: Montage du capteur du vibratoire sur le moteur asynchrone [IFM][SW21]

mécaniques surtout pour le diagnostic de défaut de roulement et certains défauts électriques [CIP].

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 [KHA09].

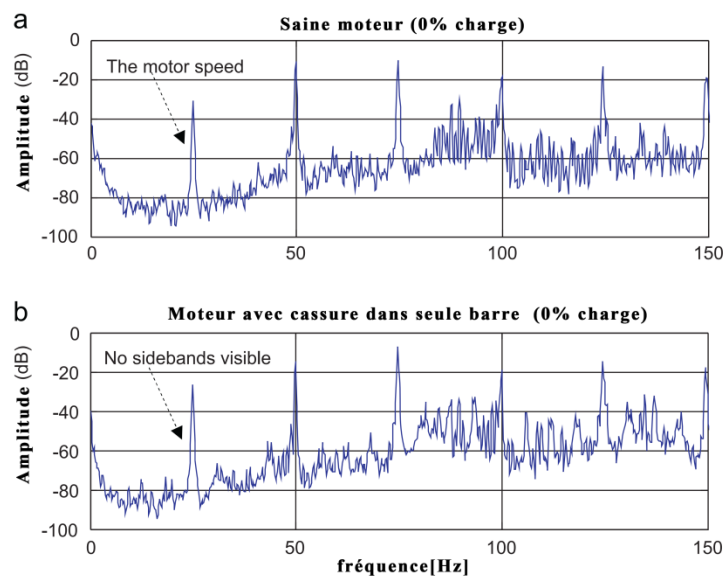


Figure I.28: Les spectres de puissance vibratoire d'une machine sans et avec défaut de barre de rotor cassé sous une charge de 0% [BLI13]

I.8.5 Diagnostic par analyse des courants statoriques :

Il est un peu difficile d'analyser directement les résultats précédents pour détecter un défaut, et tout particulièrement quand il s'agit d'une barre cassée ou portion d'anneau. Seules des méthodes plus utiles comme l'analyse spectrale des signaux offrent un issu pour le diagnostic de ce type de défaut. L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts qui pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone (Figure I.29) [KHA09]. De plus l'avantage majeur de cette technique est l'emplacement du capteur à n'importe quel point entre l'alimentation et le moteur [KHO20].

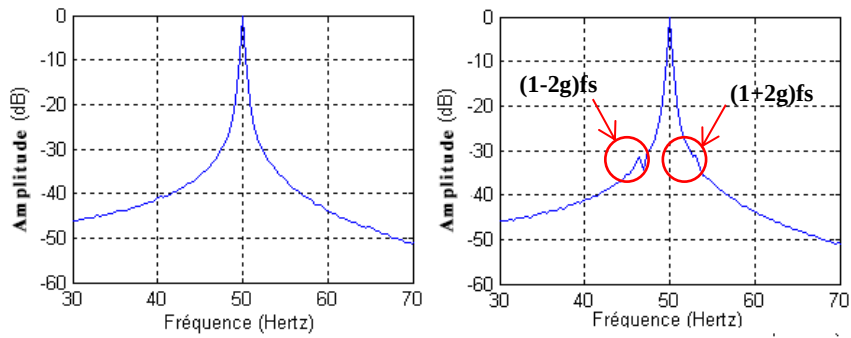


Figure I.29: Spectre du courant statorique d'un moteur sain et avec une barre cassée en charge [KHA09]

I.8.6 Diagnostic par réseaux de neurones artificiels :

Quand la connaissance sur le procédé à surveiller n'est pas suffisante et que le développement d'un modèle de connaissance du procédé est impossible, l'utilisation de modèle dit « boîte noire » peut être envisagée. Pour cela des réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été utilisés. Un RNA est en fait un système informatique constitué d'un nombre de processeurs élémentaires (ou nœuds) interconnectés entre eux qui traite -de façon dynamique l'information qui lui arrive à partir des signaux extérieurs [DIA]. On distingue deux catégories de réseau de neurone : les réseaux statiques et les réseaux dynamiques [KHA09].

Les avantages des réseaux de neurones sont [MDA12] :

- **Rapidité** : Très utile lorsque le diagnostic doit être conduit en ligne.
- **Robustesse** : Un réseau de neurones est robuste surtout vis-à-vis du bruit.

Cette technologie est inspirée du fonctionnement du système nerveux de notre cerveau (Figure I.30) [SW22].

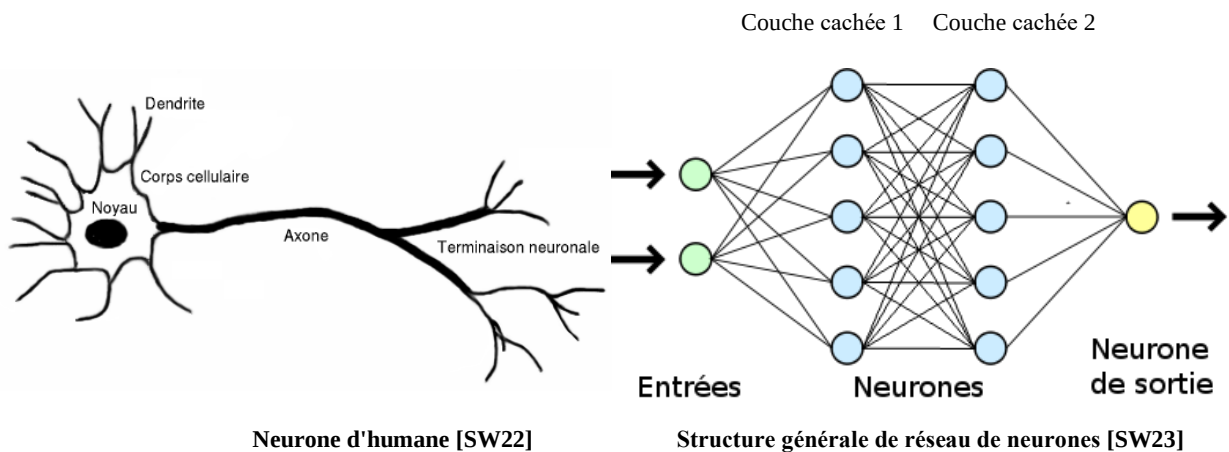


Figure I.30: Aperçu sur réseau de neurone artificiel

I.8.7 Diagnostic par analyse du vecteur de Park :

Cette technique consiste à visualiser le module des vecteurs des courants statorique de Park « en se basant sur les trois courants de phases (i_a , i_b , i_c) » dans le domaine fréquentiel décrivant le phénomène des moteurs asynchrones en deux dimensions (i_d , i_q). Grâce à l'analyse spectrale fréquentiel, nous observons des harmoniques supplémentaires par rapport à l'état sain, qui varient en fonction du type de défaut (Figure II.3) [KOU11].

I.9 Conclusion :

Ce chapitre était essentiellement consacré aux généralités sur de la machine asynchrone à cage d'écureuil par son des éléments de base qui la composent, et principe fonctionnement. De plus nous avons présenté les différents types de maintenance et la terminologie utilisée dans le diagnostic, Nous avons étudié les différents types de défauts pouvant apparaître sur cette machine, Nous avons remarqué que le défaut de roulement est le défaut le plus fréquent. Ces défauts peuvent provenir de diverses origines : électriques, mécaniques ou environnementale.

Nous terminons ce chapitre par une aperçue sur certains les différentes techniques de diagnostic actuellement appliquée à la machine asynchrone à cage d'écureuil.

CHAPITRE II

APERÇU DETAILLE SUR LE DEFAUT DU ROULEMENT DANS LES MAS

II.1 Introduction :

Dans le premier chapitre, nous avons vu de nombreux défauts qui pourraient frapper les machines électriques. Comme l'ont montré des études statistiques, les défauts de roulements sont répandus dans le domaine industriel et représentent 40% des défaillances. Par conséquent, d'un point de vue industriel et scientifique, les efforts sont axés sur la détection et le diagnostic des défauts de roulement. Si nous mentionnons les défauts des roulements, nous sommes obligés parler de défaut excentricité de ce qui se chevauche en termes d'origine, de causes et de conséquences. Les méthodes et techniques de diagnostic diffèrent, dans cette thèse nous nous appuyerons sur la technique analyse du vecteur de Park [TRA09].

II.2 Défauts de roulement :

II.2.1 Présentation du roulement à billes :

Notre étude porte sur les roulements à une rangée de billes à contact radial. Ces roulements permettent la rotation des éléments tournants qui constituent la partie arbre par rapport à un élément fixe de la machine appelé le logement et qui est fabriqué le plus souvent en acier inoxydable. Et comme nous le savions plus tôt, les roulements sont constitués de bague extérieure, bague intérieure, billes et cage (Figure I.20). Chaque élément remplit une fonction bien définie : la bague extérieure à une forme cylindrique sur le côté externe. Sur le côté interne on retrouve une gorge creusée appelée piste de roulement ou chemin de roulement et dans laquelle les billes se déplacent. La cage permet de maintenir les billes en position les unes par rapport aux autres et entre les deux bagues. Les billes sont les éléments qui servent à transmettre l'effort entre la bague intérieure et la bague extérieure ; elles roulent sur le chemin de roulement. La bague intérieure avec l'autre élément qui sert à guider forment la partie mobile, appelée arbre. Afin d'atténuer les frottements et prolonger la durée de vie du roulement, entre les deux bagues la cage et les billes on dispose d'une lubrification à la graisse ou à l'huile afin de réduire les frottements et l'usure. Ce type de roulement est couramment employé dans les systèmes mécaniques. Il supporte essentiellement les charges radiales et dispose d'une légère mobilité en rotation [DAB19].

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

Généralement, lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Les causes possibles sont [MOH], [MDA], [ABL] :

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

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- Des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- L'ondulation de leur surface de roulement.
- L'attaque des billes.
- La corrosion due à l'eau.
- Défaut de graissage, problème dû à la température.
- Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge.

II.2.1.2 Durée de vie des roulements :

La durée de vie théorique des roulements est donnée par la formule suivante [DAB19], [DJA17] :

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (\text{II. 01})$$

L_{10} = durée de vie en 10⁶ tours.

C : charge nominale (donnée constructeur).

P : charge dynamique appliquée au roulement.

$p = 3$ pour les roulements à billes, 3.33 pour les roulements à rouleaux.

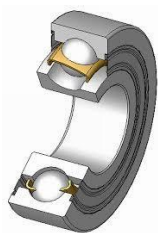
II.2.1.3 Différents types de roulements :

Selon la taille, la qualité, la fonction et la procédure de fabrication du roulement, les roulements peuvent être classés de plusieurs manières nous en mentionnerons quelques-uns. Mais avant cela, nous apprenons à connaître les normes pour de choix des roulements [KHO]:

- La nature, la direction ainsi que l'intensité de la charge que doit support le roulement.
- La vitesse de rotation du roulement.
- La durée de vie souhaitée (demandée).
- La température à laquelle le roulement va travailler.
- La précision de fonctionnement afin de permettre fixé le jeu interne de chaque roulement.
- Il faut tenir en compte le mode de la lubrification, ainsi que le type de lubrifiant.
- La nature de la machine pour faire le choix du type de montage du roulement.
- La matière de l'arbre et du logement qui pourrait permettre de calculer le jeu résiduel (fonctionnel) du roulement.
- L'encombrement (l'espace) réservé au roulement.

II.2.1.3.1 Roulements à Billes :

a- Roulements à billes à contact oblique :



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

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



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

II.2.1.3.2 Roulements à Rouleaux :

a- Roulement à une seule rangée de rouleaux cylindriques :

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



b- Roulements à rotule sur deux rangées de rouleaux :

Les roulements à rotules sur deux rangées de rouleaux comportent deux chemins usinés sur la bague intérieure et séparés par un épaulement à fin d'assurer un bon guidage. La bague extérieure possède un chemin de forme sphérique. Ce type de roulement est utilisé pour compenser les défauts d'alignement, ou la flexion de l'arbre due à l'action d'une charge importante. Cette construction permet le déplacement libre de l'ensemble (bague intérieure-cage-rouleaux) à l'intérieur de la bague extérieure, à cet effet et en plus des charges radiales, le roulement peut admettre aussi des charges axiales [29].



II.2.1.4 Différents dommages aux roulements :

Lorsqu'un roulement est placé dans une machine, il subit des contraintes mécaniques, électrique, défauts de montage ... éct, que ce soit radiales ou axiales nous en mentionnons quelques-uns [SW25],[SW26],[SW27],[SW28] :

Usure : L'usure est une détérioration de surface causée par un frottement par glissement à la surface du chemin de roulement, des éléments roulants, des faces des rouleaux, de la face de l'épaulement, des poches de cage, etc (Figure II.1).

Causes :

- Entrée de débris.
- Apparition de rouille et corrosion électrique.
- Lubrification insuffisante.

- Glissement dû à un mouvement irrégulier des éléments roulants.

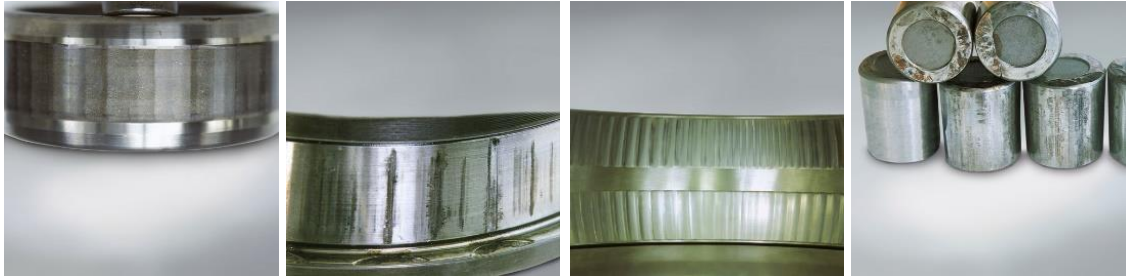


Figure II.10: Dommage usure par type de roulement

Écaillage : L'écaillage se produit lorsque de petites particules de matériau du roulement se détachent de la surface du chemin de roulement ou des éléments du roulement en raison de la fatigue par laminage, créant alors des zones à la texture grossière et rugueuse (Figure II.2).

Causes :

Charge excessive, montage incorrect (mauvais alignement), couple, entrée de débris étrangers, entrée d'eau, lubrification insuffisante, jeu de roulement inapproprié, précision incorrecte de l'arbre ou du logement, rigidité inégale du logement, flexion importante de l'arbre, apparition de rouille, piqûres de corrosion, taches, indentations (effet « Brinell »).



Figure II.11: Dommage écaillage par type de roulement

Grippage : En cas de surchauffe subite en cours de rotation le roulement ternit ou change de couleur. Puis les bagues de chemin de roulement, les éléments roulants et la cage se ramollissent, fondent et se déforment en fonction de l'évolution des dommages (Figure II.3).

Causes :

- Lubrification insuffisante.
- Charge excessive (précontrainte excessive).

- Vitesse de rotation excessive.
- Jeu interne trop faible.
- Entrée d'eau et de débris.
- Précision insuffisante de l'arbre et du logement.
- Flexion excessive de l'arbre.



Figure II.12: Dommage Grippage par type de roulement

Rouillé et Corrosion : La rouille et la corrosion d'un roulement se manifestent par des piqûres à la surface des bagues et des billes et peuvent se produire au niveau des éléments roulants sur les bagues ou sur l'ensemble des surfaces du roulement (Figure II.4).

Causes :

- Formation de gouttes d'eau causée par la condensation de l'humidité.
- Température et humidité élevée à l'arrêt.
- Entrée de gaz corrosif ou d'eau.
- Conditions de stockage incorrectes.

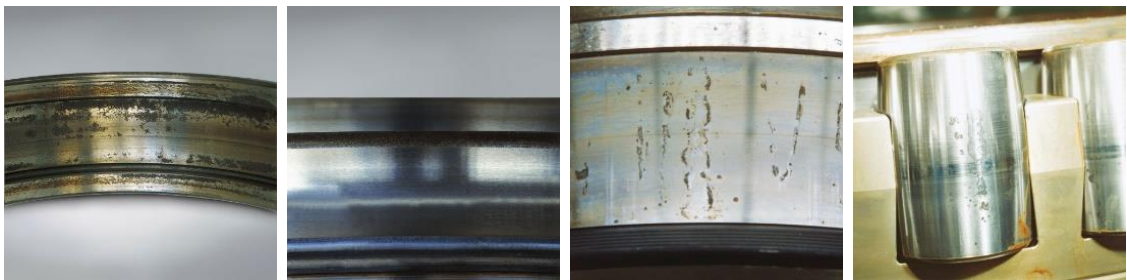


Figure II.13: Dommage Rouillé et Corrosion par type de roulement

II.3 Défaits d'excentricité d'entrefer :

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique, mixte) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). Ceux-ci provoquent la variation de l'entrefer dans le moteur, la répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant. La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries d'ordre naturel. Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer (Figure II.5) à savoir [OMA11] :

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

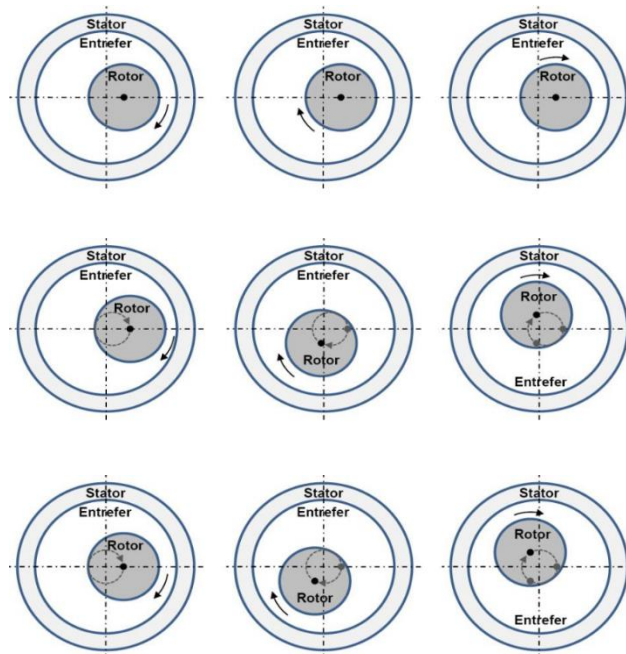


Figure II.5: Différents types d'excentricités

II.3.1 Déséquilibre le champ magnétique :

Le déséquilibre du rotor dans l'entrefer entraîne un déséquilibre dans la répartition des champs magnétiques dans la MAS. La distribution de densité de flux magnétique pour une machine saine et défectueuse est illustrée à la (Figure II.6). L'asymétrie de la distribution de densité de flux magnétique due au défaut peut être facilement reconnue. D'après la distribution asymétrique, nous notons que le rotor a été déplacé vers la droite, et le pôle droit à une densité de flux magnétique nettement plus élevée que les trois autres [KNG19].

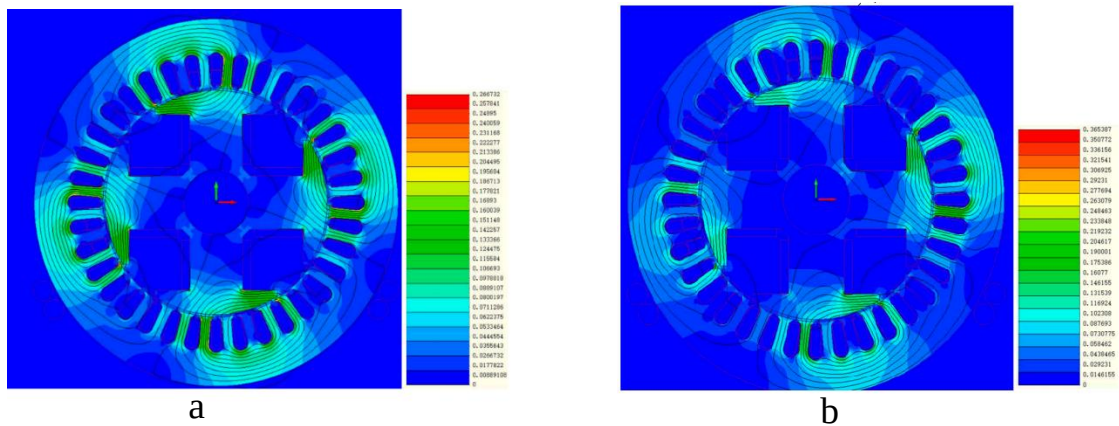


Figure II.6: Distribution spatiale de la densité de flux magnétique de la machine : (a) saine (b) avec excentricité [KNG19]

Dans un cas similaire, comme le montre la (Figure II.7), l'amplitude de l'induction magnétique diminue avec la déviation centrale, ce qui indique que l'entrefer du côté où l'induction magnétique a été mesurée est grand par rapport aux autres côtés de la machine [MRS12].

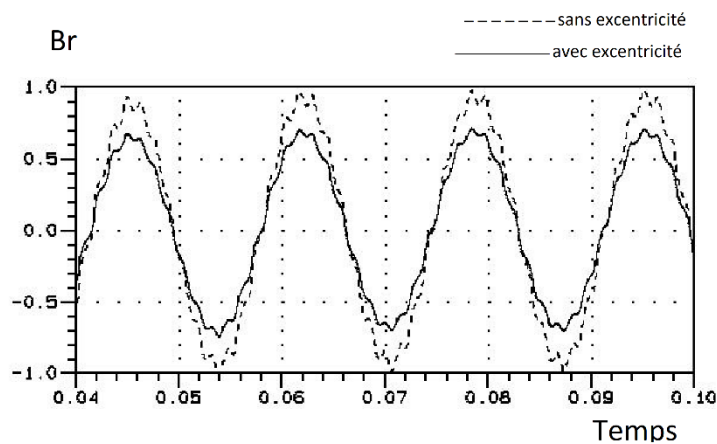


Figure II.7: Densité de l'induction magnétique B_r du l'entrefer dans un certain côté de la circonférence de la machine [MRS12]

II.4 Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park :

II.4.1 Transformation de Park :

La transformation de Park permet de changer la base triphasée (a,b,c) à la base biphasée (d,q) c'est-à-dire de remplacer les enroulements triphasés par deux enroulements l'un sur l'axe direct (d) et l'autre sur l'axe quadrature (q) [BRA10] (Figure II.8). Le système des grandeurs triphasées est tel que la somme instantanée des grandeurs est nulle. Ceci permet d'annuler la composante homopolaire par conséquent, le repère (a, b, c) peut être réduit à un repère biphasé (d,q) [LBL19].

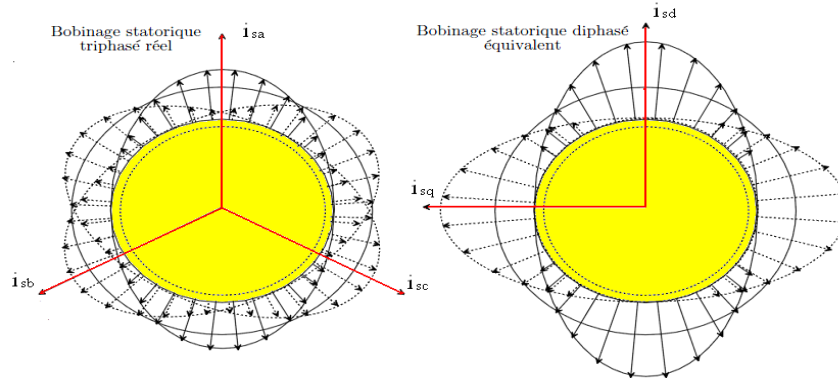


Figure II.8: Transformation de PARK (a, b, c) à (d, q)

$i_{sa}(t)$, $i_{sb}(t)$ et $i_{sc}(t)$ sont les courants statoriques des phases a, b et c :

$$i_{sa}(t) = \sqrt{2}I \cos(\theta(t)) \quad (\text{II.2})$$

$$i_{sb}(t) = \sqrt{2}I \cos(\theta(t) - \frac{2}{3}\pi) \quad (\text{II.3})$$

$$i_{sc}(t) = \sqrt{2}I \cos(\theta(t) + \frac{2}{3}\pi) \quad (\text{II.4})$$

Après transformé de Park, ces courants peuvent être s'écrire grâce aux deux relations suivantes ($i_{sd}(t)$, $i_{sq}(t)$) :

$$i_{sd}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}i_{sa}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}}i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}}i_{sc}(t) \quad (\text{II.5})$$

$$i_{sq}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{2}}i_{sc}(t) \quad (\text{II.6})$$

II.4.2 Technique d'analyse du vecteur de Park :

Deux versions d'analyse par cette technique à savoir : La première utilise les grandeurs biphasées i_d et i_q , pour l'obtention de la courbe de Lissajous : $i_q = f(i_d)$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut (Figure II.9).

La deuxième est appelée Vecteur de Park Étendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park $\sqrt{i_d^2(t) + i_q^2(t)}$. Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement (Figure II.10) [ZOU15], [SAD15].

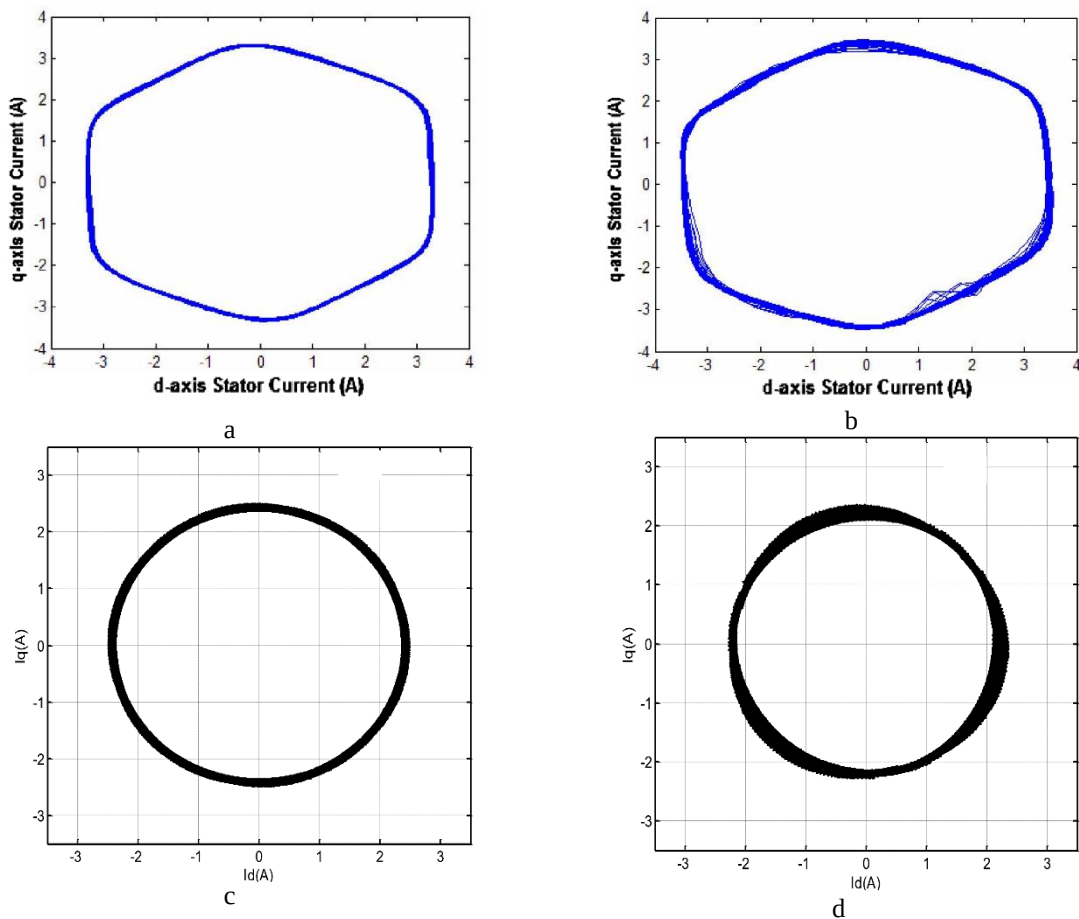


Figure II.9: Forme Lissajous du courant statorique de vecteur de Park : (a) cas sain (b) cas de défaut trou unique de 1 mm sur la bague intérieure et (c) cas sain (d) cas de défaut d'excentricité dynamique [JAZ18], [SLA]

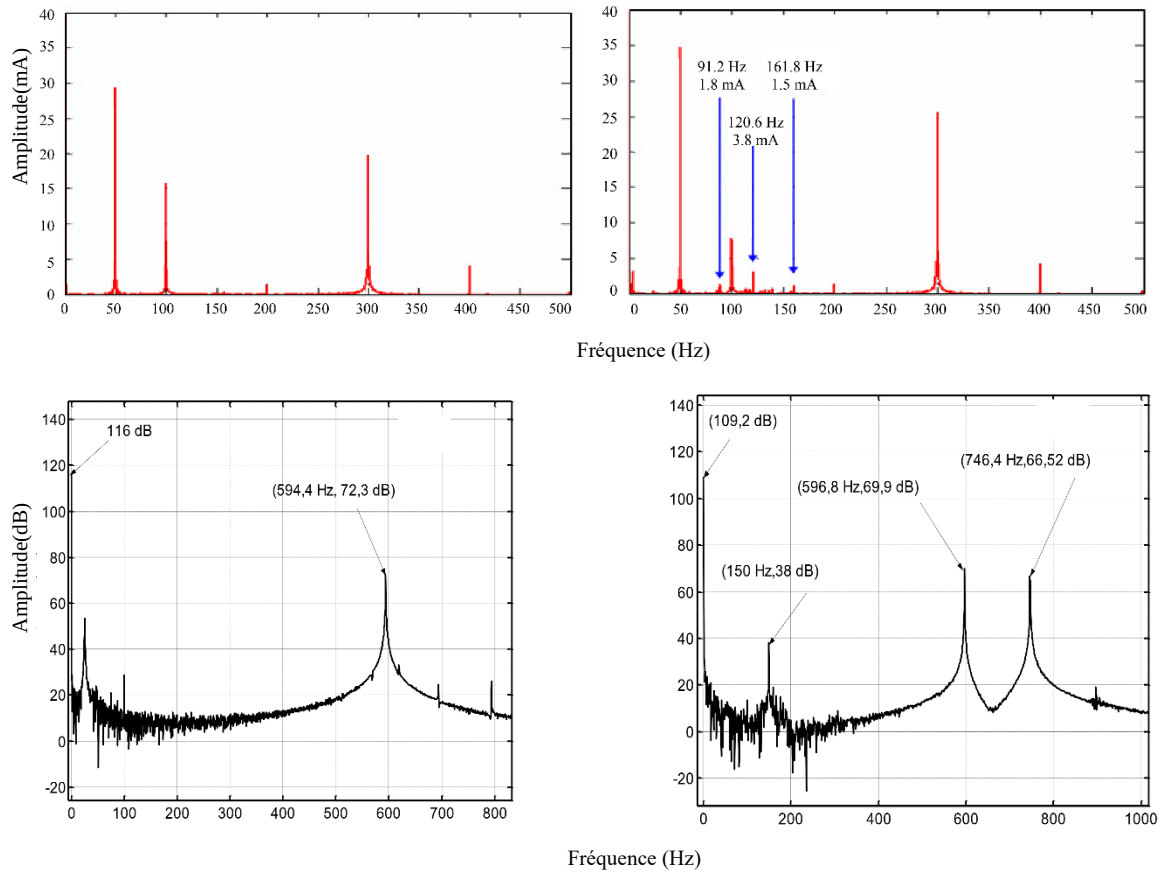


Figure II.10: Spectre du courant statorique de vecteur de Park : (a) cas sain (b) cas de défaut trou unique de 8 mm sur la bague extérieure et (c) cas sain (d) cas de défaut d'excentricité dynamique [JLS],[SLA]

Remarques :

Lors du test du machine avec une roulement défectueux, nous remarquons que l'épaisseur des courbes de Lissajous est plus large qu'elle ne l'était lors d'un test avec une roulement sans défaut. Et dans spectre des courant statorique, nous remarquons aussi l'émergence de nouveaux harmoniques par rapport au cas sain.

II.5 Conclusion:

Nous avons consacré ce chapitre à en savoir plus sur les défauts des roulements et certains de leurs types et les dommages qui peuvent leur être causés pendant leur période de travail. Nous avons également étudié le défaut de l'excentricité du rotor en termes de répartition des champs magnétiques et de changement de la densité de l'induction autour des pôles du stator et dans l'entrefer. Et comme nouvelle approche, nous nous appuyons sur l'analyse des résultats des courants de Park statorique I_q , I_d , par ce qu'ils se caractérisent par la facilité de suivi des données. Nous avons vu le changement évident des courants de Park dans l'état défectueux par rapport à l'état sain.

CHAPITRE III

DETECTION DES DEFAUTS DES ROULEMENTS PAR ANALYSE DES VECTEURS DE PARK

III.1 Introduction :

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

Dans ce chapitre, nous chercherons à fournir un bon diagnostic pour incarner la technique d'analyse des courants de Park en forme Lissajous par un système de simulation de machine asynchrone (MATLAB) et l'utiliser pour détecter les défauts des roulements (bague intérieure, bague extérieure). Et utilisez ensuite l'analyse du spectre des courants de Park pour déterminer les erreurs le plus précisément possible.

III.2 Courbes de Lissajous :

Courbes formées par en combinant deux mouvements harmoniques simples mutuellement perpendiculaires, couramment présentés par l'oscilloscope ou systèmes des simulations, et utilisés dans l'étude des relations de fréquence, d'amplitude et de phase des variables harmoniques et il a plusieurs des formes. Sa représentation dans notre cas est ($i_q=f(i_d)$) a une forme circulaire, centrée au milieu [SW30].

III.3 Détection du défaut du roulement :

Cet essai a été simulée sur le programme Matlab. Nous avons mené trois essais sur la MAS avec un charge (essai l'état sain, avec défaut dans bague extérieure et défaut a la bague intérieure), ces tests ont conduit à l'émergence de bons résultats.

La figure III.1 représente les courants d'alimentation à l'état sain de la MAS avec charge 20 N.m :

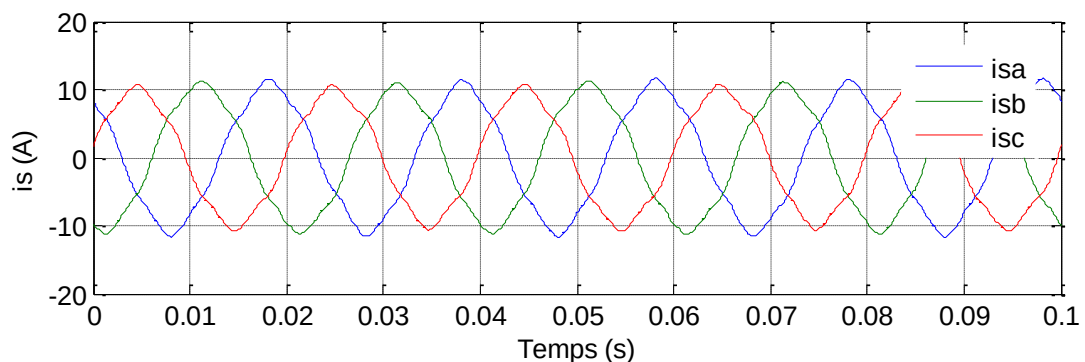


Figure III.14: Les courant statoriques de la machine sain ia, ib, ic.

La figure III.2 montre la courbe de Lissajous des courants de Park avec un charge 20 N.m, construites en utilisant les expressions (II.4, II.5) en état sain :

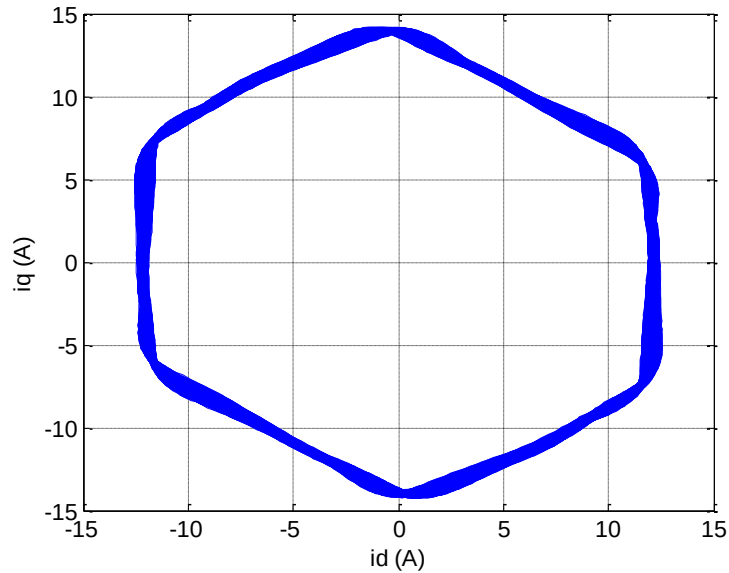


Figure III.15: Vecteurs de Park pour un MAS sain en pleine charge (20Nm).

On s'attend à ce que cette courbe devait avoir une forme circulaire, mais nous avons vu une courbe qui différait du cas idéal. Cette contradiction est due à plusieurs raisons, notamment : à plusieurs raisons, notamment : toutes les sources de tension (triphases) contiennent un certain degré d'asymétrie d'une alternance à l'autre, ou soit la position du rotor dans l'entrefer n'est pas idéale comme elle devrait l'être du fabricant d'origine, c'est-à-dire que l'excentricité du rotor est trop faible pour affecter le fonctionnement de la machine [ZAR].

III.3.1 Détection du défaut dans la bague extérieure et intérieur :

III.3.1.1 Détection du défaut dans la Bague Extérieure (BE) :

La figure III.3 montre le courbe de Lissajous des courants de Park avec défaut dans la bague extérieur el défaut à la bague intérieure du roulement de charge 20 N.m.

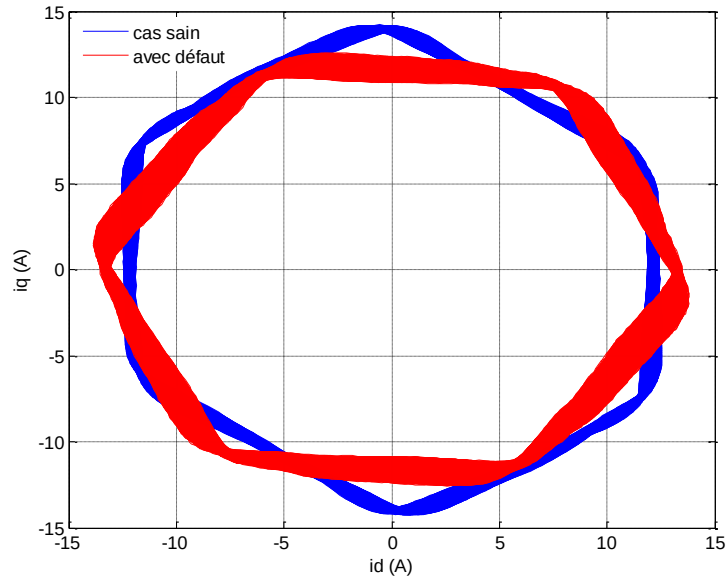


Figure III.16: Vecteurs de Park pour un MAS en pleine charge (BE).

D'après la figure ci-dessus, les courbes présentées en rouge et en bleue montrent clairement la différence entre les courants de Park $i_q=f(i_d)$ sous les deux conditions du MAS (état sain et état défectueux).

III.3.1.2 Détection du défaut dans la Bague Intérieure (BI) :

La figure ci-dessous représente les vecteurs de Park des courants statoriques pour un MAS en pleine charge dans les deux cas du MAS (Sain et avec défaut dans le BI). Le moteur asynchrone sa fonctionne sous une charge nominale est égale à 20 N.m.

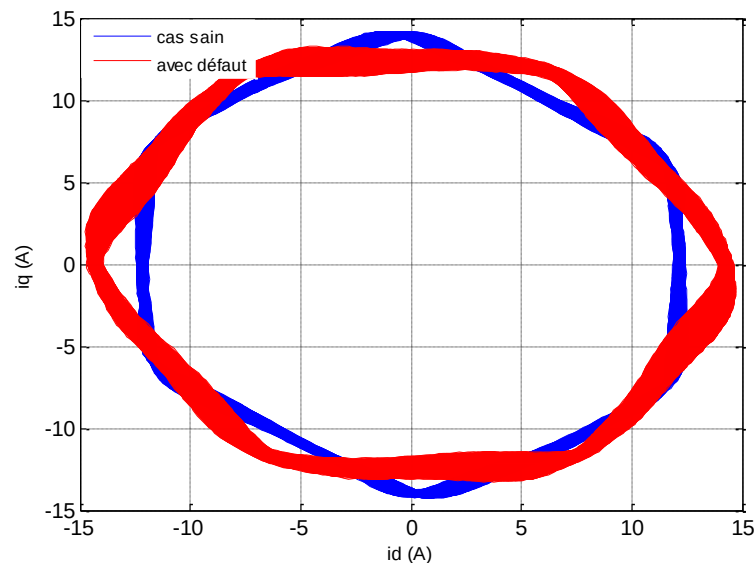


Figure III.17: Vecteurs de Park pour un MAS en pleine charge (BI).

On voit clairement que les courbes présentés dans la figure (III.4) la différence entre les courants $i_q=f(i_d)$ dans l'état sain de la MAS et l'état défectueuse de celle-ci.

III.4 Résulta and discussion :

Les figures III.3 et III.4 montrent les courants de Park sous un défaut dans la bague externe et dans la bague interne du MAS respectivement. Il est clair que la forme des courants de l'état défectueux diffère que l'état sain de la MAS. Cela est considéré comme un indicateur du défaut. Précisément, les modifications ont été au niveau de la bande pour $i_q=f(i_d)$ (l'épaisseur) de sorte qu'elles sont devenues plus large. Ces modifications ont l'influence sur les vecteurs de Park que ce soit dans le cas du défaut de la bague extérieure et/ou du défaut de la bague intérieure lorsqu'on les compare avec l'état sain de la MAS. Tout cela est dû à la présence des harmoniques résultantes dans les courants statoriques à cause du défaut.

III.5 Analyse spectrale du courant statorique (MCSA) :

Il convient de noter que les défauts des roulements être détectés par la méthode du vecteur de Park. Les courbes de Lissajous ne permettent, en général, que l'analyse de l'état général de la machine, mais un suivi et un diagnostic détaillés nécessitent une analyse spectrale des courants statorique.

III.5.1. Analyse spectrale du vecteur de Park dans l'intervalle 0-100Hz :

Après avoir extrait les courants du Park i_d et i_q dans chaque cas (sain, BI, BE). Une transformée de Fourier Rapide (TFR ou FFT en Anglais) est effectuée pour analyser les données.

Cette partie va représenter les spectres des courants de Park afin d'avoir des informations supplémentaires sur l'état de MAS.

Les figures ci-dessous montrent clairement les spectres des courants sous un défaut dans la BE et la BI pour des bandes fréquentielles différentes. Comme nous avons comparé les signatures fréquentielles pour des fréquences additionnelles.

Le spectre est riche en information qui nous a permet de prendre une bonne décision sur l'état de la MAS.

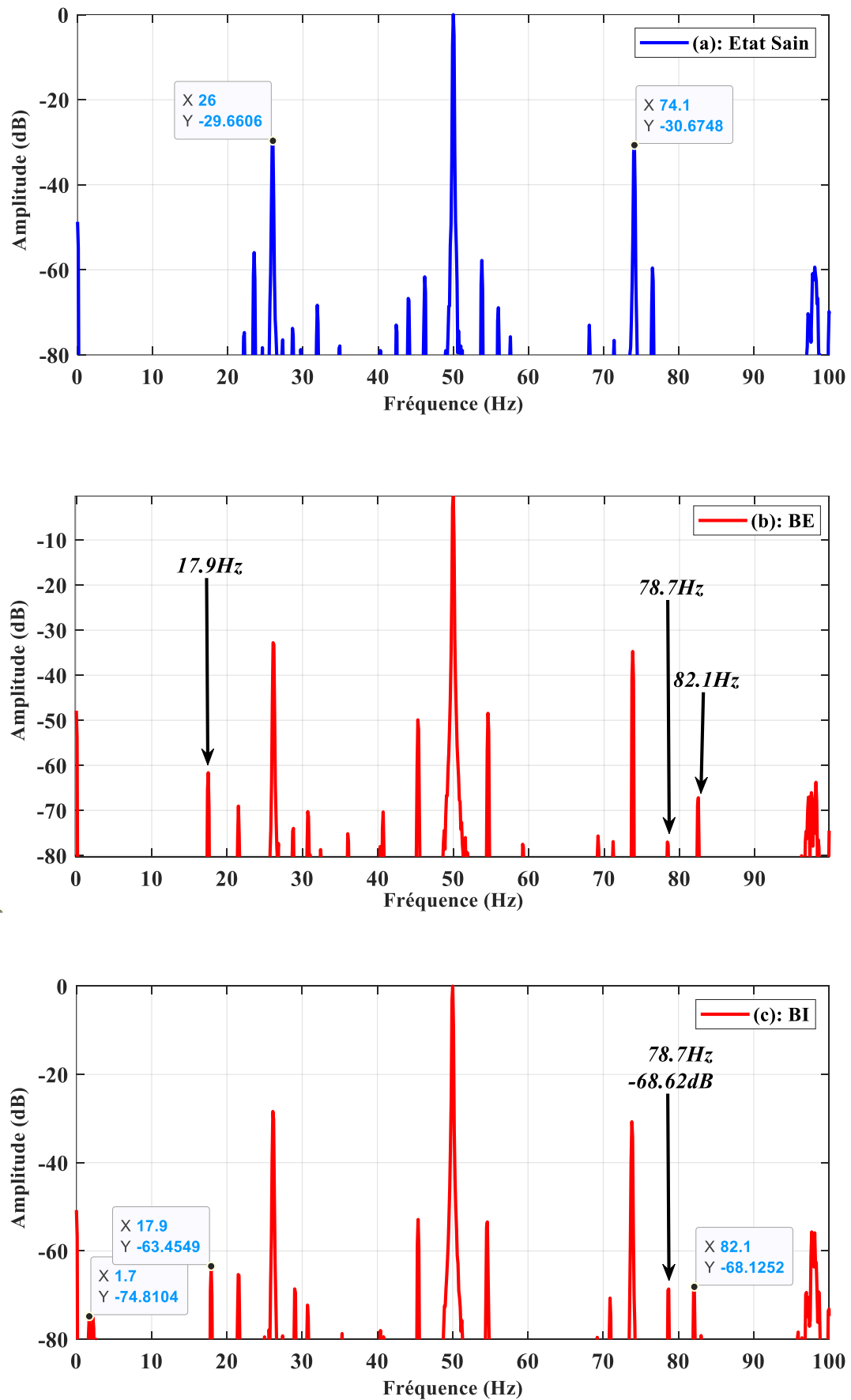


Figure III.5: Spectre des vecteurs de Park (id) sous différentes conditions (a, b, c) : 0-100Hz

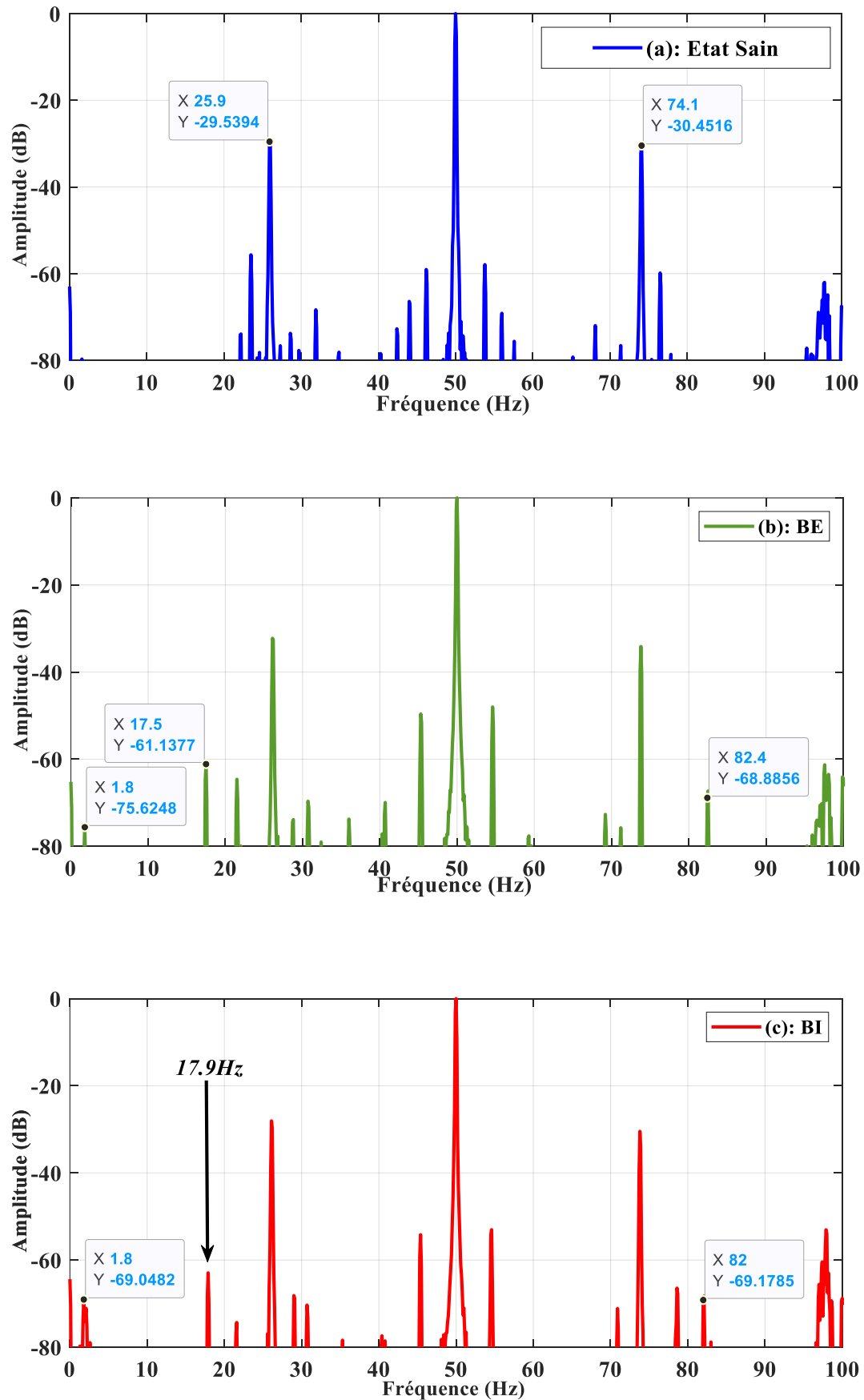


Figure III.6: Spectre des vecteurs de Park (iq) sous différentes conditions (a, b, c) : 0-100Hz

Les fréquences apparaissant des états défectueux (BE, BI) des courants (i_d , i_q) ont été extraites de la comparaison avec l'état sain comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau III 2: Fréquences additionnelles dans le spectre du courant i_d et i_q (0-100Hz).

	Fréquences Détectées (Hz)	Défaut dans la BE	Défauts dans la BI
i_d	1.7	N'existe pas	Existe
	17.9	Existe	Existe
	78.7	Existe	Existe
	82.1	Existe	Existe
i_q	1.8	Existe	Existe
	17.5	Existe	Existe
	82	Existe	Existe

III.6 Résulta and discussion :

Notez que le défaut dans les deux cas (BE, BI) provoque des oscillations dans le courant et à partir de là l'émergence de nouveaux harmoniques dans des fréquences d'amplitudes variables, et à travers ces indicateurs peuvent détecter les défauts.

On voit deux pics importants autour de la fréquences fondamentale $f_s=50\text{Hz}$. Ces harmoniques sont dus à l'excentricité mixte qui est existé dans toutes les conditions (sain et avec défaut). Ces fréquences ont la formule suivante :

$$f_{mix} = |f_s \pm f_r| \quad (\text{III. 01})$$

Avec :

$$f_r = \frac{(1 - g)}{p} f_s \quad (\text{III. 02})$$

et

p : est le nombre de paires de pôles égale à 2

g : est le glissement qui a la valeur 0.04.

$$f_{mix1} = 74Hz$$

$$f_{mix2} = 24Hz$$

III.7 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons extraire les courants du moteur asynchrone triphasé à cage, sous différentes conditions de fonctionnement (sain et défaut dans la bague intérieure et dans la bague extérieure).

On voit qu'un changement de forme de Lissajous prouve que la machine est dans un état anormal (défectueux). Nous avons également prouvé que la technique d'analyse des vecteurs des courants de Park comme nous l'avons vue est une technique fiable pour diagnostiquer d'éventuels les défauts des roulements dans les MAS.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté est basé sur le diagnostic des défauts des roulements en raison de leur importance dans les composants des machines asynchrones, et parce qu'ils représentent 40 % du total des défauts de la machine, ce qui en fait l'un des défauts les plus courants et les plus importants dans le domaine industriel.

Dans notre mémoire, nous nous sommes concentrés sur l'étude de l'un des éléments les plus importants des systèmes électriques, les machines triphasées à cage d'écureuil, pour deux raisons principales, leur force de performance et leur faible coût.

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

Le deuxième chapitre, où nous avons étudié en profondeur le défaut des roulements en termes de causes qui conduisent à leur endommagement et nous nous sommes familiarisés avec certains de leurs types. Étant donné que la structure de la MAS est intégrée les unes aux autres, l'excentricité du rotor est un résultat inévitable des défauts des roulements, nous avons donc observé les changements électriques qui se produisent à l'intérieur.

Pour atteindre notre objectif, nous nous sommes appuyés sur la technique d'analyse de courant Park pour diagnostiquer les défauts de roulement pour un accès facile au courant statorique de l'extérieur, contrairement à certaines autres techniques.

Enfin, nous avons analysé le défaut de roulement en exploitant les courants statoriques vers une transformation de Park afin d'avoir les vecteurs de celui-ci. Cela nous a permis de distinguer l'état de la MAS si elle est en bon état ou défectueuse. Pour avoir plus d'information sur les défauts, il a fallu procéder à une analyse spectrale de ces courants par la méthode de la Transformée de Fourier Rapide (TFR), où l'on a constaté l'apparition de nouveaux harmoniques dans les roulements défectueux. Cela nous a fourni une information suffisante sur l'état de la MAS par rapport à la condition saine dans un intervalle de fréquences spécifique.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUES

Référence Bibliographiques

[YAS09] : YASSA Nacera "Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter spires et des cassures de barres et d'anneaux", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2009.

[MOH17] : MOURAD Hellal, Salim RAMDANE, "Etude des Performances de la Machine Asynchrone sous Défauts", Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2017.

[SAN17] : SANOUN Djaffar MOUZAOUI Jugurtha, "Calcul des performances électromagnétique de la machine asynchrone à cage" Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2017.

[RAD07] : Radouane BOUSSEKSOU "Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic", Magister, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2007.

[BAP10] : Bapio BAYALA, "LA MACHINE ASYNCHRONE", 2010.

[HAM18] : HAMMI Sami, BENARABI Adel, "Contribution au diagnostic des défauts rotoriques dans les machines asynchrones à cage d'écureuil par la méthode de la (MCSA)", Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, Algérie, 2018.

[LEG21] : Legma Mohsen Berrik Yahia, "Classification des Défauts d'un Moteur Par Réseau de Nourone Artificiel", Master, Université Mohamed Boudiaf – M'sila, Algérie, 2021.

[HEN20] : Abedallah Henka, Mostefa Ghenbazi, Kamel Benali, "Commande scalaire d'une Machine Asynchrone Triphasée" Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, Algérie, 2020.

[KOV09] : Makara KHOV, "Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents : Détection des courts-circuits par suivi paramétrique", Doctorat de L'université de Toulouse, France, 2009.

[KAD16] : KADRINE Abderrahmane, "Utilisation du Courant Statorique pour la Détection Des Défauts dans les Machines Electriques" , Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, Algérie, 2016.

[LAR05] : LARIBI Souad, " Synthèse des Méthodes de Diagnostic Appliquées à la Détection des Défauts dans les Machines Asynchrones", Magister, Université d'Oran Mohamed BOUDIAF, Algérie, 2005.

[ABL09] : Abba Bouguerne, "Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones", Magister, Université Mentouri – Constantine, Algérie, 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", Magister, Université d'Oran Mohamed BOUDIAF, Algérie, 2009.

[BES17] : BESSOUS Noureddine, "Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation", Doctorat, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, Algérie, 2017.

[OMA11] : Omar SID, "Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par les réseaux de neurones", Magister, Université Houari Boumediene, Algérie, 2011.

[KOU11] : KOUADRIA Mohamed, "Modélisation des moteurs asynchrones par l'approche de la fonction d'enroulement. Application à la détection des défauts statoriques", Magister, Université d'Oran Mohamed BOUDIAF, Algérie, 2011.

[HON13] : Hong-yu Zhu, "Practical Aspects of Broken Rotor Bars Detection in PWM Voltage-Source Inverter-Fed Squirrel-Cage Induction Motors", Article ID 128368, 2013.

[MHD16] : Mohammed Obaid Mustafa, "Detecting broken rotor bars in induction motors with model-based support vector classifiers", Article, 2016.

[HAN19] : HANAFI Fayçal MEHAOUA Salim, "Contribution à l'étude de l'excentricité dans la machine asynchrone triphasée", Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, Algérie, 2019.

[MMO20] : Dr. M. Mohammedi, "Diagnostic des défaillances des systèmes de commande", 2020.

[AND12] : Andrian Ceban, "Méthode Globale de Diagnostic des Machines Electriques", Doctorat, Université Lille de Nord de France, 2012.

[KHO20] : KHODJA Mohammed-El-Amine, "Suivi de la sévérité des défauts de roulements d'un moteur asynchrone alimenté par onduleur", Doctart, Université d'Oran Mohamed BOUDIAF, Algérie,2020.

[MAR08] : Martin Blödt, "Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring", Article, 2008.

[CIP] : Ciprian Harlișca, "Bearing Faults Detection in Induction Machines Based on Statistical Processing of the Stray Fluxes Measurements".

[IFM] : Ifm.com "Installation instructions Vibration sensor" 2019.

[KHA09] : KHATIR Abdelfatah, "Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts", Magister, Universite Ferhat Abbas Setif, Algérie,2009.

[BLI13] : B. Liang "Application of power spectrum, cepstrum, higher order spectrum and neural network analyses for induction motor fault diagnosis", Article, 2013.

[DIA] : Pr L.H. Mouss, staff.univ-batna2.dz, "Chapitre 4 Problématique des Méthodes de surveillance" sup-gi-4-20-21.pdf.

[MDA12] : Medoued Ammar, " Surveillance et Diagnostic des Defauts des Machines Electriques : Applications aux Moteurs Asynchrones", Doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, Algérie, 2012.

[NAS14] : M. Nasser, " Cours d'Electrotechnique 2ème partie", Ecole des Hautes Etudes D'ingenieur, 2014

[MEF] : M. Eftekhari, "Review of Induction Motor Testing and Monitoring Methods for Inter-turn Stator Winding Faults", Article, IEEE.

[GAE04] : Gaëtan DIDIER, "Modélisation et Diagnostic De La Machine Asynchrone En Présence De Défaillances", Doctorat, L'Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2004.

[TRA09] : Baptiste Trajin, "Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones", Doctorat, Université de Toulouse, France, 2009.

[DAB19] : Dalila BELMILOUD, " Contribution A L'étude de L'endommagement des Matériaux, Constituants de Machines Tournantes, en Fonction des Paramètres Température et Fréquence de Rotation. Application Aux Roulements", Doctorat, Université De Reims Champagne-Ardenne, France, 2019.

[DJA17] : Djebaili Abdelaziz, "Diagnostic Des Defauts Des Roulements Par L'analyse De Vibration", Master, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 2017.

[KNG19] : Konstantinos N. Gyftakis, "Diagnosis of Static Eccentricity in 3-Phase Synchronous Machines using a Pseudo Zero-Sequence Current", School of Engineering, The University of Edinburgh, Edinburgh, 2019, Article.

[MRS12] : M. Rigoni, N. Sadowski, "Detection and Analysis of Rotor Faults in Induction Motors by the Measurement of the Stray Magnetic Flux", Article.

[BRA10] : BOURAIYOU Ahmed, " Diagnostic de Defauts Par Logique Floue", Magister, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 2010.

[LBL19] : Labiod Laid, " Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones (Résultats expérimentaux et de simulation)", Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, Algérie, 2019.

[ZOU15] : ZOUZOU sara, " Détection des défauts statoriques dans la machine synchrone à aimants permanents par les techniques avancées", Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2015.

[SAD15] : SADKI Nour elhouda, " Simulation Des Défauts Statorique D'un Moteur A Asynchrone", Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2015.

[JAZ08] : Jafar Zarei, "An Advanced Park's Vectors Approach for Bearing Fault Detection", Department of Electrical Engineering Iran University of Science & Technology, Article, 2008.

[SLA] : Souad.Laribi, " Détection des Défauts d'Excentricité dans les Moteurs Asynchrones à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de l'Analyse Spectrale des Vecteurs de Courant de PARK ", Article, USTO Oran, Algérie.

[JLS] : José L. H. Silva, " Bearing Failures Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach ", Department of Mechanical Engineering Campus Politécnico de Repeses, Article.

[ZAR] : Jafar Zarei , Javad Poshtan "An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection" Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran, Iran, 2009.

[SW1]: <https://www.freepng.es/png-wc105h/>

[SW2]: <https://www.alamy.com>

[SW3]:<https://www.istockphoto.com/>

[SW4]:<https://www.istockphoto.com/>

[SW5]:http://keysan.me/presentations/ee564_basic_machine_design2.html#75

[SW6]:<https://ronixtools.com/en/blog/electric-motors-and-how-do-they-work/>

[SW7]:<https://temoignagefiscal.com/comprendre-lelectricite-5eme-partie/>

[SW8]:<https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-asynchrone/>

[SW9]:<https://tutormate.in/cbse-class-10-physics/force-on-current-carrying-conductor-and-flemings-rule/>

[SW10]:<https://www.industrie-techno.com/>

[SW11]:<http://www.qualiteonline.com/>

[SW12]: <https://www.easa.com/resources/failures-in-three-phase-stator-windings>

[SW13]: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/5/1319/htm>

[SW14]: <https://pixabay.com/illustrations/ball-bearing-roller-bearing-1705889/>

[SW15]:https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ecaillage_severe_sur_une_bague_de_roulement.jpg

[SW16]: <https://www.bearing-news.com/bearing-failure-rca-cage-damage/>

[SW17]:<https://www.nskeurope.it/it/bearings/services/troubleshooting/damage-by-type/flaking.html>

-
- [SW18]: <https://www.mybusyretiredlife.com/installing-bearings-without-damage/>
- [SW19]: <https://www.ww-99.xyz/ProductDetail.aspx?iid=93844957&pr=34.96>
- [SW20]: <https://www.semanticscholar.org>
- [SW21]: <https://ludeca.com/>
- [SW22]: <https://larevueia.fr/comprendre-les-reseaux-de-neurones/>
- [SW23]: <https://www.juripredis.com>
- [SW24]: <https://shop.eriks.lu/fr/>
- [SW25]: <https://www.nskeurope.fr/fr/bearings/services/troubleshooting/damage-by-type/wear.html>
- [SW26]: <https://www.nskeurope.fr/fr/bearings/services/troubleshooting/damage->
- [SW27]: <https://www.nskeurope.fr/fr/bearings/services/troubleshooting/damage->
- [SW28]: <https://www.nskeurope.fr/fr/bearings/services/troubleshooting/damage->
- [SW29]: <https://shop.eriks.lu/fr/>
- [SW30]: <https://www.merriam-webster.com>