

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : électrotechnique
Option : Machine Electrique

Réf:

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

*Détection des défauts de roulement
et d'excentricité mixtes dans les
moteurs asynchrones triphasés.*

Présenté par :
Zioud Mohamed Thamer
Soutenu le : 01 Juin 2014

Devant le jury composé de :

Mr. CHRAYAT Ahemad
Mr. SAHRAOUI Mohamed
Mr. YAHAI Khalid

M.C.B
M.C.B
M.C.A

Président
Encadreur
Examinateur

Année universitaire : 2013 / 2014

جمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machine Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Détection le défaut de roulement par l'analyse du
courant statorique de MAS à cage**

Présenté par :

ZIOUD Mohamed Thamer

Avis favorable de l'encadreur :

SAHRAOUI Mohamed

Signature

Avis favorable du Président du Jury

CHARYAT Ahemad

Signature

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machine Electrique

Thème :

Détection le défaut de roulement par l'analyse du courant statorique de MAS à cage

Proposé par : ZIOUD Mohamed Thamer
Dirigé par : SAHRAOUI Mohamed

RESUMES (Français et Arabe)

Résumé

L'analyse des signaux du courant statorique du moteur asynchrone (MCSA) est devenue une technique très répandue pour apprécier l'état de santé du moteur asynchrone afin d'éviter la défaillance et n'intervenir qu'à bon escient et pendant des arrêts programmés de la chaîne de production.

Ce travail traite la détection des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. La technique utilisée est celle basée sur l'analyse spectrale du courant statorique (MCSA) qui appartient à l'approche signal. Cette approche suppose que chaque défaut laisse des signatures spectrales dans les spectres des signaux issus de la machine. La détection des défauts se fait généralement via la suivi des valeurs de certains indices définis en utilisant les amplitudes des harmonique caractérisant le défaut

Dans ce sens, une étude analytique a été développée afin d'identifier les différents harmoniques constituant le contenu spectral des courants statoriques à l'état sain et avec défaut. Ensuite, plusieurs indices ont été définis. Une étude expérimentale et comparative entre ces indices a été effectuée dont le but est de classer le ou les meilleurs indices qui peuvent donner une information sûre et claire sur l'état de santé de la machine.

ملخص

لقد أصبح تحليل إشارات التيار للعضو الساكن في المحرك غير متزامن بطريقة (MCSA) وهي تقنية تستخدم على نطاق واسع لتقييم الوضع الصحي للمحرك غير متزامن من أجل تجنب الأعطاب، والتدخل فقط عند الضرورة وخلال توقف برنامج الإنتاج.

وقد أثبتت التقنيات التقليدية لمعالجة الإشارات والكشف عن الأعطاب في الآلات الدوارة، على أساس تحليل Fourier محدوديتها من حيث التفريق الطيفي، والتي تتطلب استخدام تقنيات جديدة مما يعطي أكثر قوة في هذا العمل،

في هذا العمل، نطبق تقنيات معالجة الإشارات القائمة على التحليل الطيفي لتيار الجزء الثابت للمحرك غير متزامن، ثم تطبيق هذه الأساليب على إشارات حقيقية للمحرك اللاتزامني في حالة عدم وجود العطب، ثم في حالة وجود عطب في المدحرجات (défaut de roulement)

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sien du département de Génie Electrique d'Université Mohamed Khider Biskra.

J'adresse mes respectueux remerciements à :

- Monsieur SAHRAOUI Mohamed, notre Promoteur qui nous avoir confié ce projet et dirigé dans son élaboration jusqu'au bout.*
- Tous les membres de jury qui nous ont l'honneur de juger notre travail.*
- Tous les enseignants qui ont contribué à notre formation pendant les cinq années.*

DEDICACE (1)

Je dédie ce modeste travail à tout ceux qui ont contribué de près ou de loin a la réalisation de notre projet ainsi je le dédie à :

Celle qui m'a élevé, m'a nourrit, m'a bien éduqué, ma Mère, celui qui m'a toujours soutenu et aidé dans toute ma vie mon Père.

Je le dédie également à mes sœurs et mes frères.

Et à nos précieux et tendres poussins MOHAMED, ZAKI

Et a la petite HAITHAM et ILYES et AYOUB

Et mes chers frères RIDA, HASSA, SALAH, HAMZA et un dédicace spéciale à mon deux frères DIJIHAD et NADJIB.

A tous mes amis sons exceptions.

A tous ceux qui ont une bonne impression dans mon cœur, Comme signes d'amour et respect.

DÉDICACE (2)

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère mère source de tendresse

A mon très cher père, qui m'encourage

Dans les instants délicats

À mon cher frère

À mes chères sœurs

À mes oncles et tantes

A toute ma famille

A tous mes amis

THAMER

LISTE DES TABLEAUX

Tab. II.1. Les fréquences des harmoniques induits par l'onde directe de la FMM rotorique en présence d'un défaut de barres.

Tab. II.2. Les fréquences des harmoniques induits par l'onde inverse de la FMM rotorique en présence d'un défaut de barres.

Tab. III.1. La Caractéristiques de la machine utilisée.

Tab. III.2. Mesures prises pour différents essais à l'état sain.

Tab. III.3. Expressions et causes des harmoniques du courant statorique.

Tab. III.4. Les indicateurs de défaut du roulement.

LISTE DES FIGURES

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

Figure. I.2. Vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs d'encoches, tête de bobines). (Enroulement statorique d'une machine à 4 pôles).

Figure. I.3. Photo du stator d'une machine asynchrone.

Figure. I.4. Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit.

Figure. I.5. Photo du rotor d'une machine asynchrone.

Figure. I.6. Classification des défauts selon leurs origines.

Figure. I.7. Défaut cassure de barres dans le rotor à cage d'écureuil (1 barre cassée).

Figure. I.8. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.

Figure. I.9 : Répartition des contraintes mécaniques radiales et zones de charge au sein d'un roulement à bague externe fixe

Figure. I.10 : Dégradations de chemins de roulement dues à des surcharges mécaniques

Figure. I.11 : Dégradations de roulements dues à des défauts d'alignement et de montage

Figure. I.12: Criques de corrosion sur une piste de roulement.

Figure. I.13: Marques d'indentation d'un chemin de roulement dues à la présence de Contaminant

Figure. I.14: Mécanismes généraux d'usure en présence de contaminant

Figure. I.15: Dégradations provoquées par la détérioration du lubrifiant dans des Roulements

Figure. I.16. Proportion des défauts.

Figure. I.117. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.

Figure. I.18. Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances.

Figure. II.1. Etapes de calcul des inductions magnétiques dans un moteur asynchrone.

Figure. II.2. Dimensions d'un roulement à billes.

Figure. II.3. Schématisation de l'excentricité statique et dynamique

Figure. III.1. Le banc d'essai expérimental.

Figure. III.2. Roulement avec défaut de la bague extérieur.

Figure. III.3. Les allures temporelles des trois courants d'alimentation avec différentes charges (Etat sain).

Figure. III.4. Les allures temporelles des trois courants d'alimentation avec différentes charges (défaut de roulement).

Figure. III.5. Spectre du courant I_a à l'état sain en 85% de la charge nominale, avec les quatre familles des harmoniques (**a.** TH, **b.** RSH, **c.** EFH, **d.** RBFH et **e.** Fo).

Figure. III.6. Spectre du courant I_a pour 85% de la charge nominale à différents cas.

Figure. III.7. Spectre du courant I_a pour 50% de la charge nominale à différents cas.

Figure. III.8. Spectre du courant I_a pour 20% de la charge nominale à différents cas.

Figure. III.9. Sensibilité à l'apparition du défaut à vide.

Figure. III.10. Sensibilité à l'apparition du défaut 20% de la charge nominale.

Figure. III.11. Sensibilité à l'apparition du défaut 50% de la charge nominale.

Figure. III.12. Sensibilité à l'apparition du défaut 85% de la charge nominale.

Figure. III.13. Sensibilité au régime de fonctionnement avec bague extérieure.

Figure. III.14. Sensibilité au régime de fonctionnement avec excentricité mixte.

Figure. III.15. Courbes en trois dimensions d'indicateur **In2** pour différents l'essai.

Figure. III.16. Courbes en trois dimensions d'indicateur **In4** pour différents l'essai.

Figure. III.17. Courbes en trois dimensions d'indicateur **In2** pour différents l'essai.

Figure. III.18. Courbes en trois dimensions d'indicateur **In4** pour différents l'essai.

LISTE DES ABREVIATIONS

p : La perméance.

$i_A(t)$: Le courant statorique de la phase A.

F_{sA} : La (FMM : la force magnéto-motrice) de la phase A.

N_{eA} : La fonction d'enroulement de la phase A.

n_{dA} : Est la fonction de distribution de l'enroulement de la phase A.

B_s^h : L'induction magnétique statorique.

$s = g$: le glissement dû au fondamental.

Ω_r : La vitesse de rotation du rotor.

N_r : Nombre de barres rotorique de moteur asynchrone à cage.

N_b : Nombre de bill de roulement.

w_r : La pulsation rotorique.

w_s : La pulsation statorique.

s_h : Le glissement dû à la rotation du h^{ieme} harmonique de l'induction magnétique statorique.

\hat{I}_{rh} : L'amplitude des courants rotoriques induits par le h^{ieme} harmonique de l'induction magnétique statorique.

$N_{rw}^{maille\ i}$: La fonction d'enroulement de la i^{ieme} maille.

$n_{rd}^{maille\ i}(\theta_r)$: La valeur moyenne de la fonction de distribution de la i^{ieme} maille.

f_e : La fréquence d'échantillonnage.

T_a : Le temps d'acquisition.

N_e : Le nombre des échantillons.

Δf : La résolution fréquentielle.

f_{TH} : Les harmoniques du temps.

f_{RSH} : Les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH).

f_{EFH} : Eccentricity Fault Harmonics (EFH).

f_{RBFH} : Rotor Bar Fault Harmonics (RBFH).

f_s : Fréquence de courant statorique.

f_r : Fréquence de courant rotorique.

f_o : Fréquence de la bague extérieure

I_{ni} : L'indicateur.

$A(fs + fo)$: Amplitude de l'harmonique de fréquence($fs + fo$).

$A(fs - fo)$: Amplitude l'harmonique de fréquence($fs - fo$).

$A(fs + fr)$: Amplitude l'harmonique de fréquence($fs + fr$).

$A(fs - fr)$: Amplitude l'harmonique de fréquence($fs - fr$).

A_{f_s} : Amplitude l'harmonique fondamentale de fréquence fs .

A_{f_s} : Amplitude l'harmonique fondamentale de fréquence fs .

A_{dc} : La composante continue du module de vecteur de Park (dc_comp).

SOMMAIRE

Liste des Tableaux	I
Liste des figures	II
Liste des abréviations	IV
Sommaire	VI
Introduction générale	IX
CHPITRE I : ETAT DE L'ART	
I.1. INTRODUCTION	1
I.2. CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE	1
I.2.1. Moteur Asynchrone (MAS)	1
I.2.2. Le stator	2
I.2.3. Le rotor à cage	3
I.2.4. Les organes mécaniques	4
I.3. PRESENTATION DES DIFFERENTES DEFAILLANCES DU MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE D'ECUREUIL	5
I.3.1. Défaillances des machines électriques	7
A. Interne	7
A.1. Mécanique	7
A.2. Electrique	7
B. Externe	7
B.1. Mécanique	7
B.2. Electrique	7
B.3. Environnementale	7
I.3.2. Défaillances au rotor	8
I.3.2.1. Ruptures de barres	8
A. Causes des défauts rotorique	8
B. L'effet de cassures de barres.....	9
I.3.2.2. Ruptures d'anneaux	9
I.3.2.3. Excentricité statique et dynamique	10
I.3.2.4. Défaillances mécaniques (Défauts de roulements)	11
A. Défauts d'effets des contraintes mécaniques	11
B. Défauts de montage.....	13

C. Défauts de Corrosion	13
D. Défauts de Contamination du roulement	13
E. Défaut de lubrification	14
F. Défauts de Température de fonctionnement.....	15
I.3.3. Défaillances au stator	15
I.3.3.1. Court-circuit entre spires	16
I.3.3.3. Court-circuit entre phases	16
I.3.4. Autres défaillances mécaniques	16
I.4. ETUDES STATISTIQUES	17
I.5. LES METHODES DE DETECTION DES DEFAUTS DANS LES MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASES A CAGE	18
I.5.1. Approche signal	18
I.5.2. Méthodes basées sur un modèle	18
I.5.3. approche d'intelligence artificielle (IA)	19
1.6. CONCLUSION.....	19
 CHPITRE II : ETUDE ANALYTIQUE DU MOTEUR ASYNCHRONE A L'ETAT SAIN ET AVEC DEFAUT	
II.1. INTRODUCTION	20
II.2. ETUDE ANALYTIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A L'ETAT SAIN	20
II.2.1. Induction magnétique total dans l'entrefer	20
II.2.1.2. Induction Magnétique Rotorique	25
II.2.1.2.1. Fonction de distribution des circuits rotoriques	26
II.2.1.2.2. La force Magnétomotrice rotorique	26
II.2.1.3. Les FEM induites dans les enroulements statoriques	28
II.3.ETUDE ANALYTIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE AVEC DEFAUT DE ROULEMENT.....	30
II.4.LES HARMONIQUES LIES AUX DEFAUT D'EXCENTRICITE ET LES DEFAUTS DANS LA CAGE ROTORIQUE.....	32
II.4.1.Signatures des défauts dans la cage rotorique.....	32

II.4.1. Signatures des défauts d'excentricité.....	33
II.4. CONCLUSION.....	35
CHPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE DES INDICATEURS DU DEFAUT ROTORIQUE	
III.I. INTRODUCTION	36
III.2. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA MACHINE ASYNCHRONE	36
III.2.1. Description du banc d'essai	36
III.2.2. Les allures temporelles des courants statoriques pour différents états	38
III.3. ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE	39
III.3.1. La Transformée de Fourier Rapide	40
III.3.2. Applications de la FFT sur les courants statorique	40
III.4. ETUDE DE SPECTRE DU COURANT STATORIQUE AVEC DEFAUT DE ROULEMENT	43
III.5. LES INDICATEURS DES DEFAUTS DE ROULEMENT ET D'EXCENTRICITE	50
III.5.1. Influence du défaut rotorique sur les différents indicateurs	51
III.5.1.1. Tableau des indicateurs	51
III.5.1.2. Les courbes des indices	52
A. Sensibilité à l'apparition du défaut	52
B. Sensibilité au régime de fonctionnement (0%, 20%, 50%, 85%)	56
III.6. TEST DE FIDELITE.....	57
III.6.1. Sensibilité à la sévérité du défaut	57
III.6.2. Sensibilité au régime de fonctionnement	62
III.7. CONCLUSION	63
Conclusion générale	XI
Bibliographie	XII

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, l'utilisation des machines asynchrones dans les entraînements industriels est en pleine expansion, du fait de leurs qualités, leurs robustesses, leurs prix et la quasi-absence d'entretien. Elles dépassent les 80% des parts de marché du parc des machines électriques. C'est une composante clé de la plupart des équipements industriels comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie, ou encore le transport ferroviaire.

Notons aussi que les progrès réalisés en matière de contrôle dans le domaine de l'électronique de puissance ou de la microélectronique, ont rendu possible l'implantation de commandes performantes pour cette machine, faisant d'elle un concurrent certain dans les secteurs de la vitesse variable et du contrôle rapide de couple, détrônant ainsi le moteur à courant continu.

En plus de l'intérêt économique de traiter ce type d'actionneur, l'étude de la machine asynchrone présente un autre intérêt aussi important, c'est l'aspect scientifique. Car la nature de sa construction et de son fonctionnement engendre une multiplicité de modèles mathématiques qui lui sont associés, ces derniers qui ont pour but d'interpréter le comportement de la machine pour ses différents modes de fonctionnement sont caractérisés par la richesse et la complexité attachées essentiellement aux caractères non linéaires et aux différents couplages magnétiques entre les éléments constitutifs de cette machine. Ces modèles présentent donc un intérêt scientifique certain.

Toute proportion gardée, le moteur asynchrone n'est pas infaillible, comme tout système électrique, il n'est pas à l'abri d'un dysfonctionnement ou d'une panne intempestive, il peut subir diverses contraintes internes ou externes d'origine mécanique, électrique et/ou magnétique (surcharge, défauts d'alimentation, excentricité du rotor, usure des roulements à billes...) altérant la machine, et pouvant causer des détériorations et des chutes de performances affectant sa durée de vie.

Les techniques de traitement du signal spectrales du courant s'avèrent efficaces pour la surveillance et détection des défauts, la transformée de Fourier Rapide (FFT) est certainement l'outil universel dans l'analyse spectrale du courant statorique.

Le mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur le moteur asynchrone et les défauts qui l'affectent. Ensuite, on va présenter quelques méthodes de diagnostic, en insistant sur les techniques appartenant à l'approche signal. Ceci va nous permettre de prendre connaissance sur ce qu'il a été présenté dans la littérature et par conséquent de classer notre travail.

Le deuxième chapitre est consacré à une étude analytique détaillée sur la machine asynchrone afin d'interpréter le contenu harmonique du courant statorique pendant l'état sain et en présence des défauts.

Le dernier chapitre présente une étude expérimentale sur la machine asynchrone à l'état sain et en présence des défauts de roulement et d'excentricité. Dans ce chapitre, plusieurs indicateurs du défaut de roulement et d'excentricité seront définis puis une étude comparative entre eux sera effectuée dont le but est de sélectionner le ou les meilleurs indicateurs.

I.1. INTRODUCTION

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

L'apparition dans les années 1980 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc....).

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

I.2. CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

I.2.1. Moteur Asynchrone (MAS)

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous nous intéressant à la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la Figure I.1.

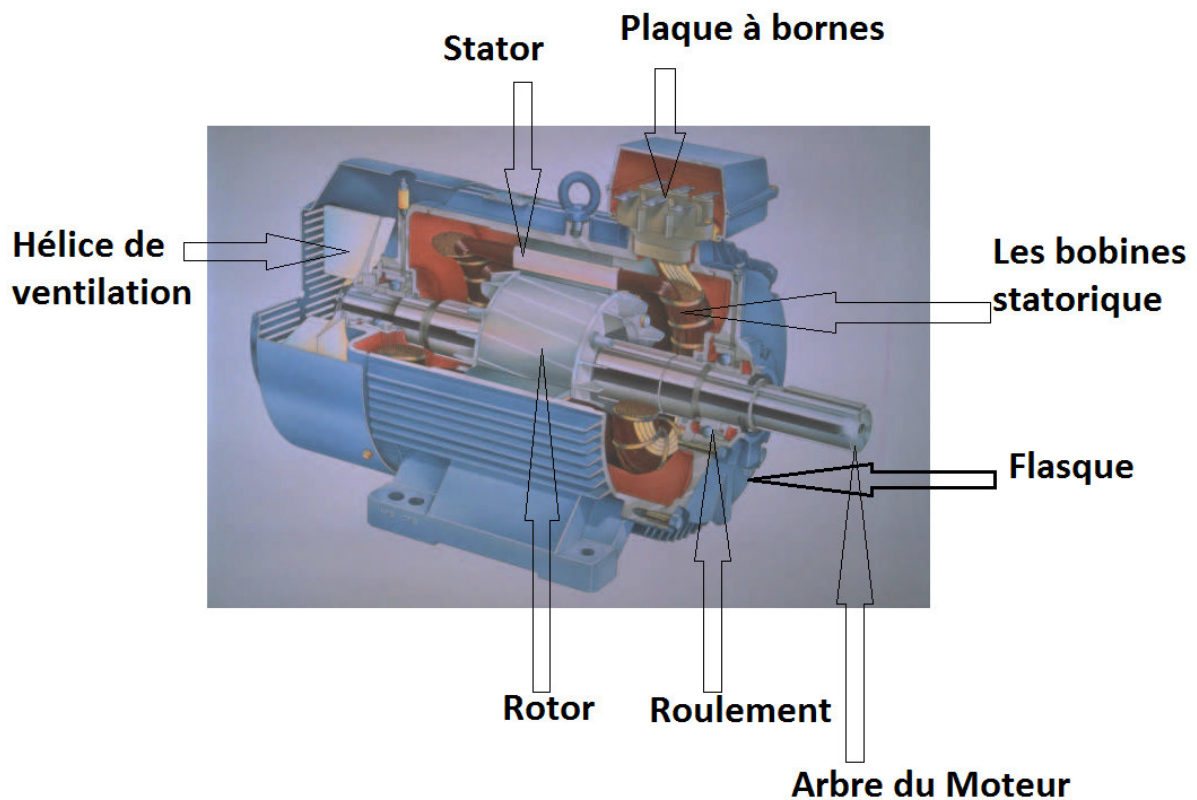


Figure. I.1. Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

I.2.2. Le stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine Figure I.2.

Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines.

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.

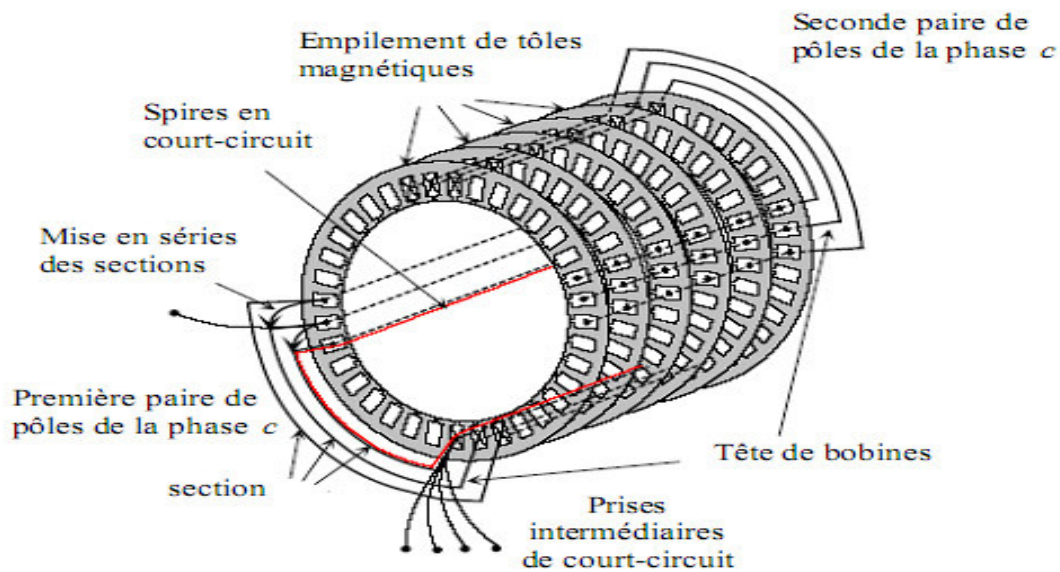


Figure. I.2. Vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs d'encoches, tête de bobines). (Enroulement statorique d'une machine à 4 pôles).

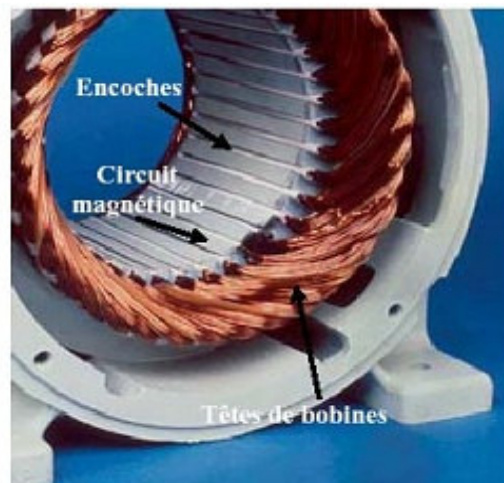


Figure. I.3. Photo du stator d'une machine asynchrone.

I.2.3. Le rotor à cage

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor Figure I.4 et Figure I.5. Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné [2].

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques,

mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre.

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

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).

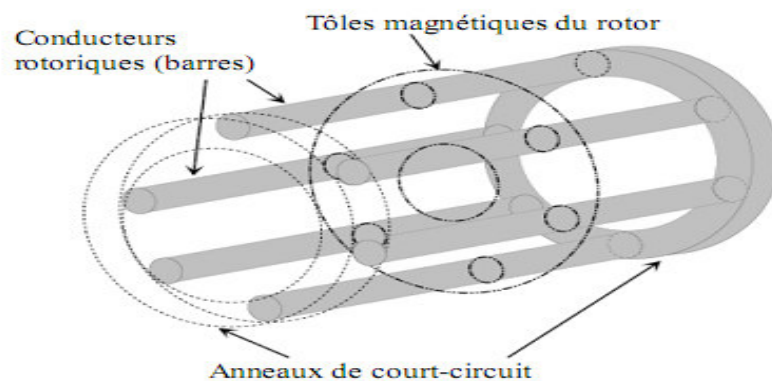


Figure. I.4. Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit.

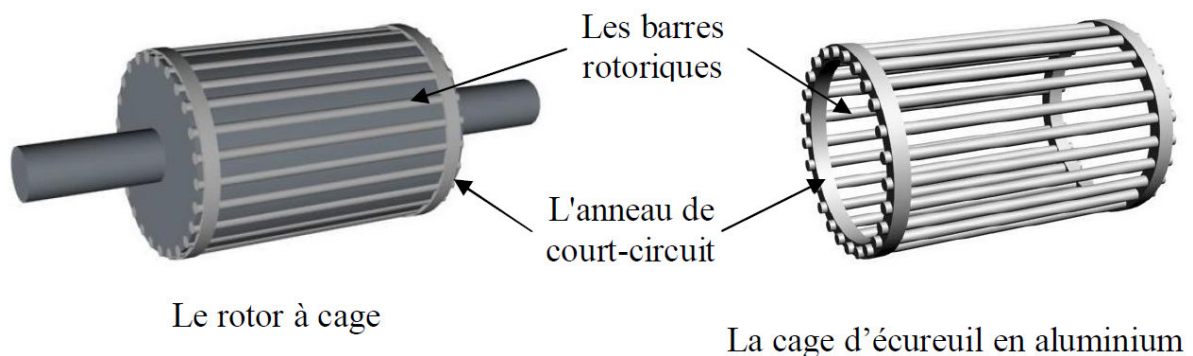


Figure. I.5. Photo du rotor d'une machine asynchrone.

I.2.4. Les organes mécaniques

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

radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire).

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

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

I.3. PRESENTATION DES DIFFERENTES DEFAILLANCES DU MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE D'ECUREUIL

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes :

- les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.
- les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Les machines électriques et les system d'entraînement sont soumis à de nombreux types de défauts. Ces derniers peuvent être classés selon leurs causes en deux grandes familles

Figure I.6 les défauts à causes internes et les défauts à causes externes.

Les défauts externes sont provoqués par les tensions d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine [3]. Les défauts internes sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques, bobinages du stator et du rotor, entrefer mécanique, cage rotorique, ...).

A titre d'exemple, nous pouvons citer d'une manière non exhaustive les défauts suivants :

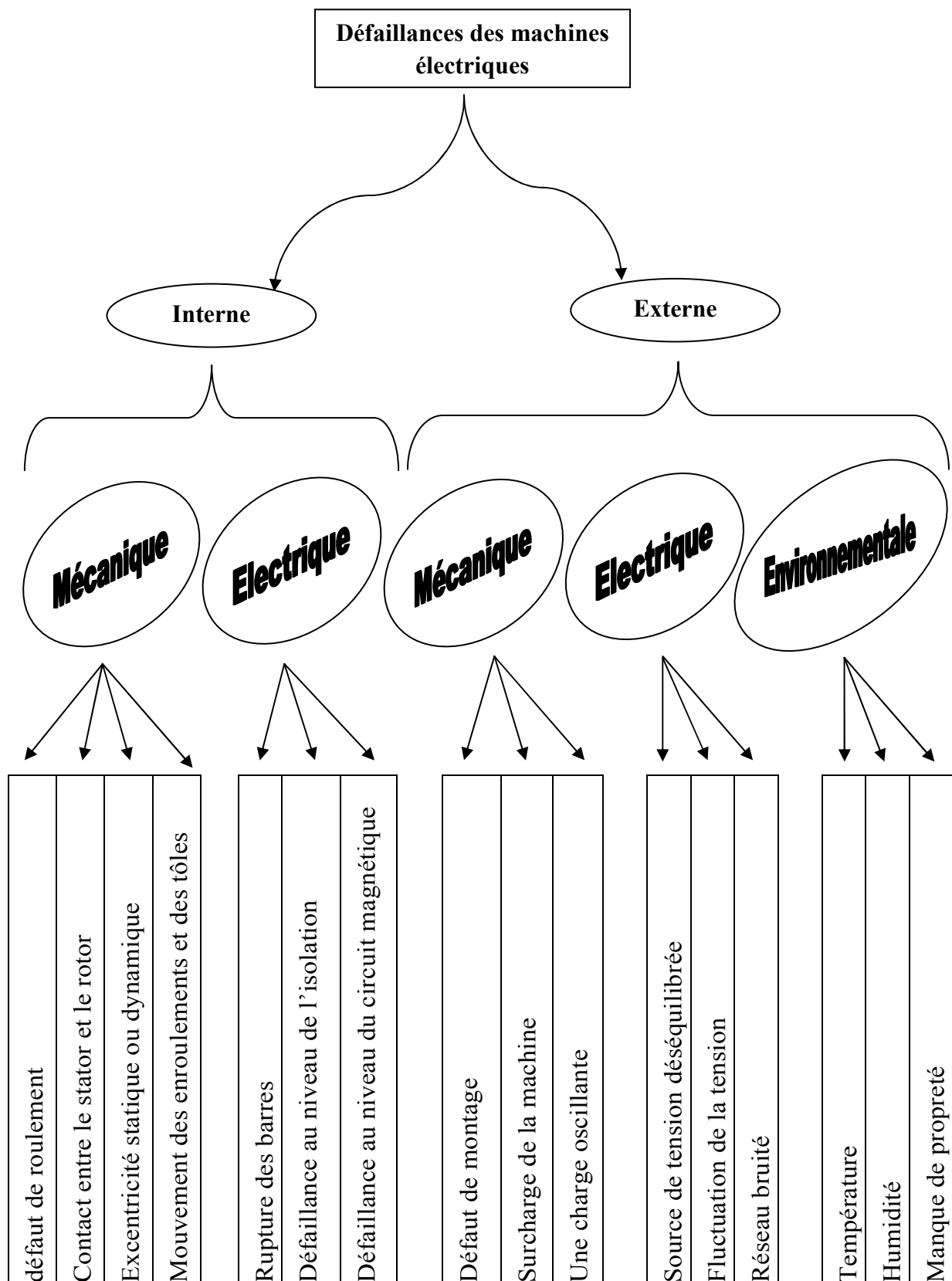


Figure. I.6. Classification des défauts selon leurs origines.

I.3.1. Défaillances des machines électriques

A. Interne

A.1. Mécanique

- défaut de roulement.
- Contact entre le stator et le rotor.
- Excentricité statique ou dynamique.
- Mouvement des enroulements et des tôles.

A.2. Electrique

- Rupture des barres.
- Défaillance au niveau de l'isolation.
- Défaillance au niveau du circuit magnétique.

B. Externe

B.1. Mécanique

- Défaut de montage.
- Surcharge de la machine.
- Une charge oscillante.

B.2. Electrique

- Source de tension déséquilibrée.
- Fluctuation de la tension.
- Réseau bruité.

B.3. Environnementale

- Température.
- Humidité.
- Manque de propreté.

I.3.2. Défaillances au rotor

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- thermique (surcharge,...).
- électromagnétique (force en $B^2(t)$,...).
- résiduel (déformation,...).
- dynamique (arbre de transmission,...).
- mécanique (roulement,...).
- environnemental (agression,...).

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

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

I.3.2.1. Ruptures de 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.

A. Causes des défauts rotorique

Comme pour le stator, les raisons pour les cassures des barres rotoriques et de rupture d'une portion d'anneau de court circuit sont nombreuses:

- Effort thermique due à l'échauffement de l'anneau du court-circuit et la différence de la température dans la barre pendant le démarrage (effet de peau).
- Effort dynamique du au couple de charge, aux forces centrifuges ainsi que les efforts cycliques.
- Effort environnementale causses par la contamination, l'abrasion des matériels rotoriques due aux particules chimiques.

B. L'effet de cassures de barres

La cassure de barres est un des défauts les plus fréquents au rotor. La détérioration des barres entraîne une augmentation de la résistance rotorique, diminution de la résistance statorique et réduction dans la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmentation d'amplitude des oscillations. L'effet de la cassure de barres croît rapidement avec le nombre de barres cassées. La grande amplitude des oscillations accélère la détérioration de la machine et des composants de la chaîne de traction.

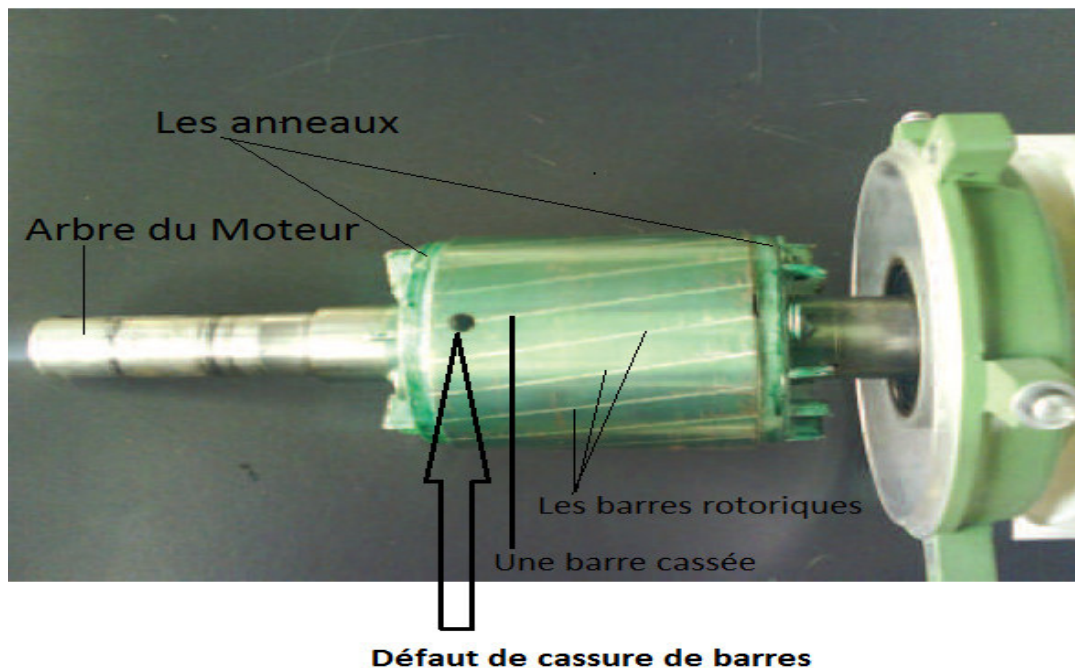


Figure. I.7. Défaut cassure de barres dans le rotor à cage d'écureuil (1 barre cassée).

I.3.2.2. Ruptures d'anneaux

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

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les

barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres.

I.3.2.3. Excentricité statique et dynamique

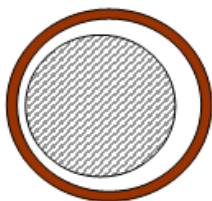
Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor).

Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) 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).

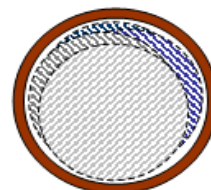
Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités.

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



Excentricité statique



Excentricité dynamique

(Plusieurs positions du rotor au cours de la rotation)

Figure. I.8. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.

Ce défaut modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

I.3.2.4. Défaillances mécaniques (Défauts de roulements)

A. Défauts d'effets des contraintes mécaniques

Lorsqu'un roulement est placé dans une machine, il subit des contraintes mécaniques radiales et axiales. Les contraintes axiales apparaissent plus particulièrement dans des machines entraînant un ventilateur ou lorsqu'il existe une pré charge axiale, c'est-à-dire un dispositif appliquant une poussée ou une traction dans l'axe de l'arbre de rotation. Les contraintes radiales, quant à elles, existent nécessairement du fait de la masse de l'arbre de rotation de la machine. Ces dernières s'exercent donc sur la bague interne du roulement qui les transmet à la bague externe par l'intermédiaire des billes. Ainsi, les contraintes radiales ne s'exercent pas en un seul point de la bague externe mais se répartissent dans la moitié inférieure de celle-ci, comme le schématise la Figure. I.9.a. Dans cet exemple, la contrainte radiale est unique et est symbolisée par la force F_r . Considérons le cas où la bague interne est rotative alors que la bague externe est fixe [3].

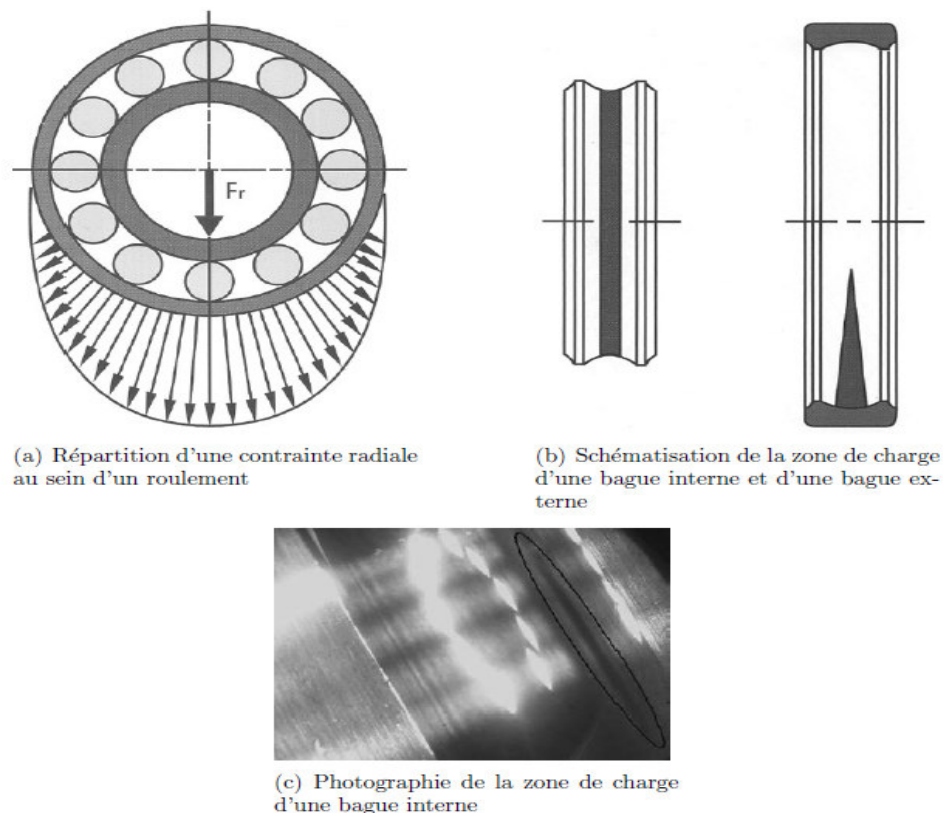


Figure. I.9. Répartition des contraintes mécaniques radiales et zones de charge au sein d'un roulement à bague externe fixe

Radiale est unique et est symbolisée par la force F_r . Considérons le cas où la bague interne est rotative alors que la bague externe est fixe. La zone de charge couvre alors un arc de la piste de roulement externe. Par ailleurs, de par la rotation de la bague interne, la zone de charge couvre la longueur totale de la piste de roulement interne Figure. I.9.b. La Figure. I.9.c permet d'identifier

clairement, par un chemin foncé dans le sens de la piste de roulement, la zone de charge sur une bague interne.

Par ailleurs, les efforts exercés au niveau des points de contact se répartissent au sein des matériaux en une contrainte de compression et une contrainte de cisaillement. La contrainte de compression est maximale au point de contact bille-bague et décroît avec la profondeur dans le matériau. La contrainte en cisaillement est très faible au point de contact, augmente, présente un maximum puis décroît avec la profondeur.

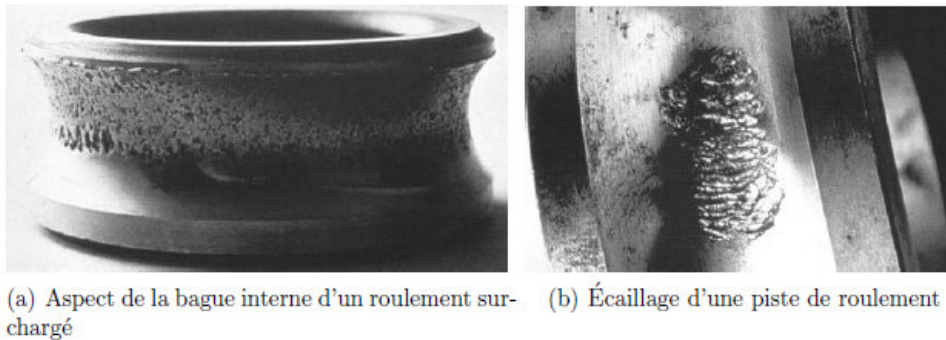


Figure. I.10. Dégradations de chemins de roulement dues à des surcharges mécaniques

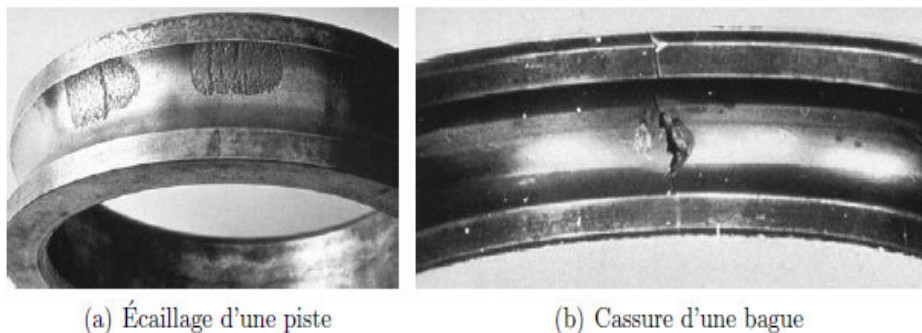


Figure. I.11. Dégradations de roulements dues à des défauts d'alignement et de montage

Lorsque les efforts exercés sont trop importants, il y a surcharge du roulement. La résistance des matériaux des bagues ou des billes est mise à mal et il se produit des criques et fissures internes, voire un écaillage des pistes de roulement ou des billes si les efforts sont cycliques. La dégradation du roulement est alors considérée comme mortelle. La Figure. I.10 montre les dégradations sévères que peuvent provoquer des surcharges mécaniques.

B. Défauts de montage

La mise en place d'un roulement sur l'arbre de la machine d'une part et dans son logement au niveau des paliers statoriques d'autre part, nécessite d'être effectuée avec soin.

Si les alignements ne sont pas respectés, des contraintes fortes sont exercées sur les bagues. Les mêmes effets que précédemment sont observés Figure. I.11.a. Les contraintes exercées peuvent également être très localisées, allant jusqu'à la rupture complète des bagues Figure. I.11.b.

C. Défauts de Corrosion

Des agents corrosifs, tels que des acides, sont susceptibles de s'introduire dans les roulements et de dégrader les matériaux métalliques les constituant. Des criques apparaissent alors sur les bagues et les billes, comme le montre la Figure. I.1. Sous l'effet de la corrosion et/ou d'autres facteurs, les criques évoluent en fissures entraînant des dégâts mortels pour le roulement [3].

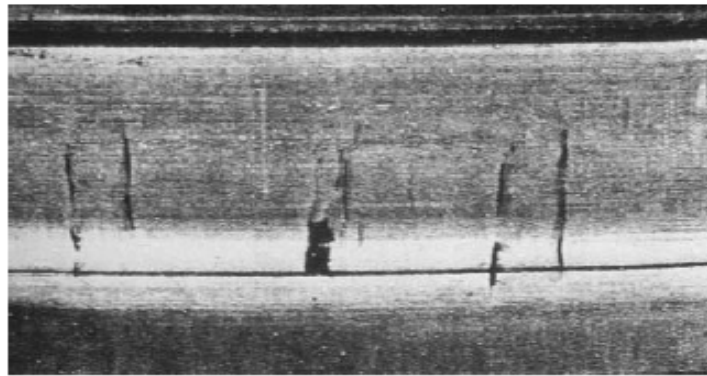


Figure. I.12. Criques de corrosion sur une piste de roulement

D. Défauts de Contamination du roulement

Les machines peuvent être installées dans des environnements poussiéreux ou en extérieur, là où les vents peuvent amener des sables ou des poussières. Pour les applications en milieux dits contaminés, les roulements sont de préférence étanches et le lubrifiant choisi est une huile circulant en circuit fermé. Ces systèmes de lubrification sont complexes et chers et ne sont donc pas toujours mis en œuvre.

Les roulements non étanches, utilisés en milieux contaminés, peuvent donc se trouver eux-mêmes contaminés, c'est-à-dire que des impuretés entrent dans le roulement et dégradent alors les surfaces de contact. Plusieurs mécanismes peuvent être mis en jeu. Lorsque les particules de contaminant s'insèrent au niveau du contact bille/bague, il peut se produire un phénomène d'abrasion à trois corps et/ou une indentation des particules dans les billes ou les pistes Figure. I.13. Ceci ne se produit que si les particules sont constituées d'un matériau plus dur que celui des organes internes du roulement. Les dégradations peuvent alors

S'intensifier et créer des fissures, voire un écaillage des constituants du roulement. Ces mécanismes sont résumés par la Figure. I.14.

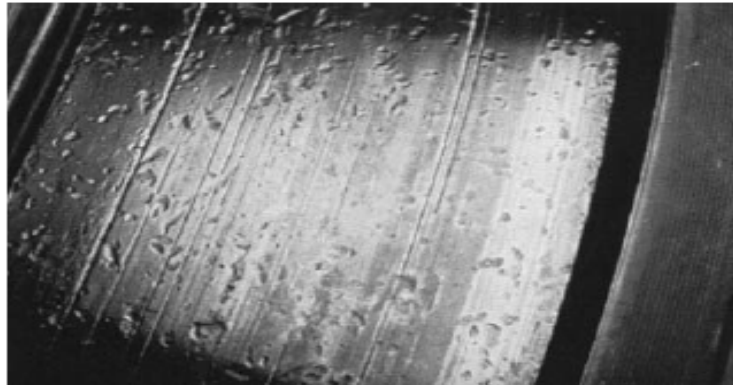


Figure. I.13. Marques d'indentation d'un chemin de roulement dues à la présence de Contaminant

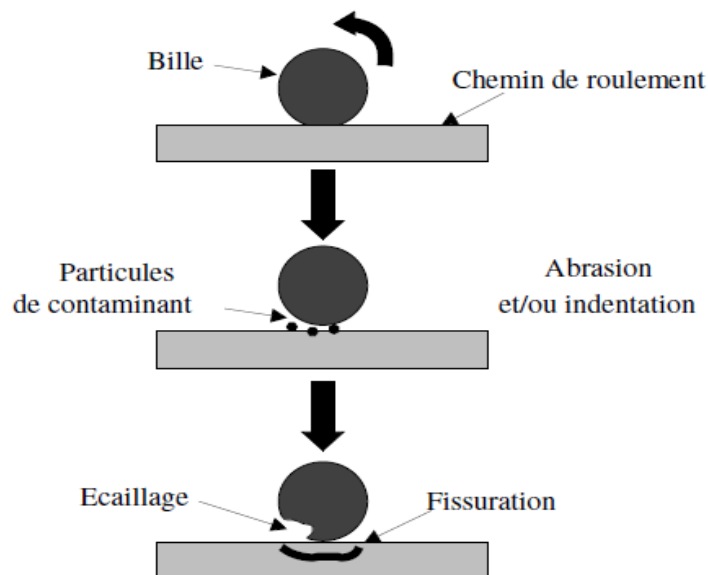


Figure. I.14. Mécanismes généraux d'usure en présence de contaminant

E. Défaut de lubrification

Le lubrifiant est un organe essentiel des roulements dans la mesure où il crée un film d'huile protecteur au niveau des contacts bille/bague permettant de protéger les surfaces. Deux types de défauts de lubrification principaux peuvent se présenter. Le premier est une dégradation des qualités lubrifiantes de la graisse ou de l'huile ou bien une absence de lubrifiant. En effet, en l'absence de lubrifiant, les surfaces métalliques se trouvent en contact direct, frictionnent et s'érodent rapidement, jus qu'à entraîner des écaillages des pistes, des éclatements des billes, un blocage et donc une destruction du roulement, comme le montre la Figure. I.15. Le second type de défaut de lubrification intervient dans les roulements par l'intermédiaire d'un sur graissage (la graisse occupe tout le volume libre interne au roulement). Dans ce cas, la viscosité de la graisse empêche la libre rotation de la cage et par conséquent des billes, ce qui entraîne un glissement de ces dernières au

niveau des points de contact. Les surfaces de contact se dégradent alors rapidement.

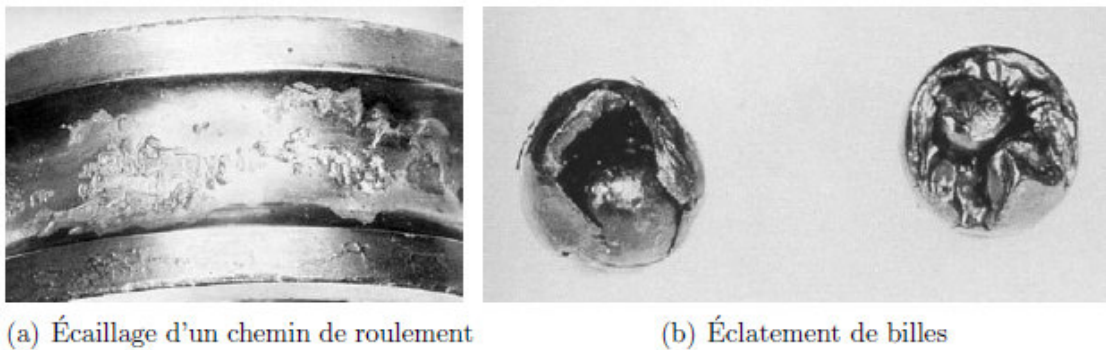


Figure. I.15. Dégradations provoquées par la détérioration du lubrifiant dans des Roulements

F. Défauts de Température de fonctionnement

En conditions normales d'utilisation, la température de fonctionnement d'un roulement est généralement comprise entre -20°C et $+120^{\circ}\text{C}$. La géométrie générale d'un roulement est dépendante de la température de fonctionnement de celui-ci.

En effet, les éléments métalliques se dilatent avec la température. Dans ce cas, le jeu naturel du roulement est compensé et le lubrifiant ne peut plus s'insérer au niveau des points de contacts bille/bague, ce qui entraîne les mêmes effets que ceux précédemment cités. Par ailleurs, la graisse est composée d'une huile lubrifiante et d'un savon liant. Lorsque la température de fonctionnement augmente, le savon se solidifie, la graisse perd ses propriétés lubrifiantes et la rotation de la cage est perturbée. Les billes glissent alors dans les chemins de roulement provoquant une usure rapide et prononcée.

I.3.3. Défaillances au stator

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

- thermique (surcharge,...).
- électrique (diélectrique,...).
- mécanique (bobinage,...).
- environnemental (agression,...).

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

- défaut d'isolant.
- court-circuit entre spires.
- court-circuit entre phases.
- court-circuit phase/bâti.

- déséquilibre d'alimentation.
- défaut de circuit magnétique.

I.3.3.1. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [4].

I.3.3.3. Court-circuit entre phases

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

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

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

I.3.4. Autres défaillances mécaniques

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc a priori pas de défaillances mécaniques.

Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs.

Environnemental.

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

I.4. ETUDES STATISTIQUES

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants Figure I.16:

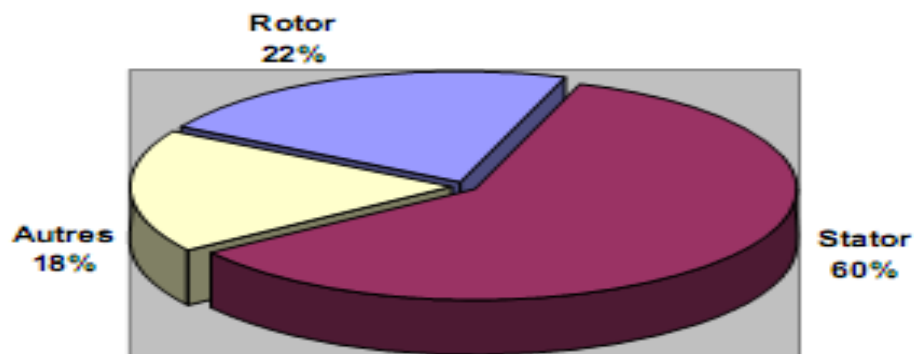


Figure. I.16. Proportion des défauts.

D'autre part, les mêmes études montrent qu'entre 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 sur cette période. La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est la suivante [2]:

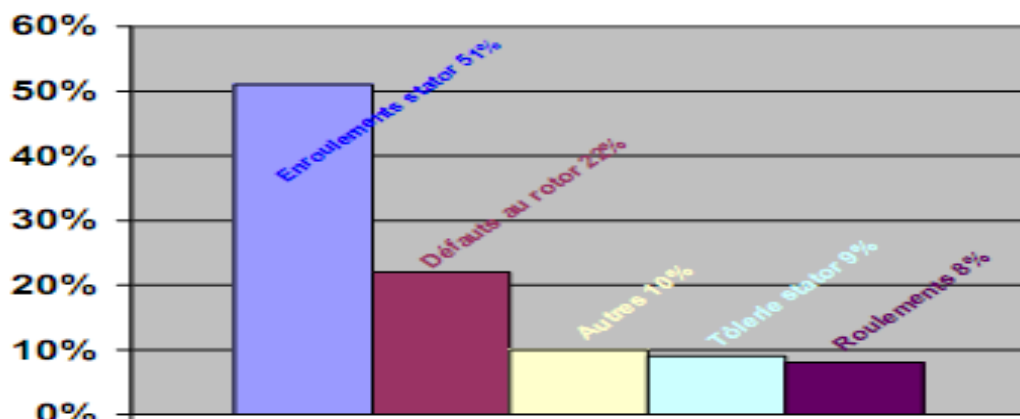


Figure. I.17. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne les résultats suivants :

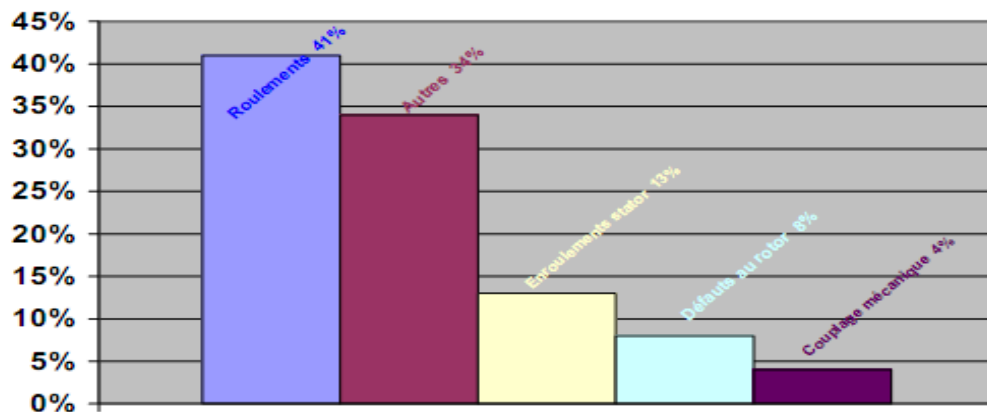


Figure. I.18. Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances.

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue.

I.5. LES METHODES DE DETECTION DES DEFAUTS DANS LES MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASES A CAGE

Il existe plusieurs méthode de détection ou de diagnostic parce que le diagnostic il a pour objectif de détecter d'une manière précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance.

Généralement il existe trois approches : l'approche signal, approche modèle et approche de l'intelligence artificielle.

I.5.1. Approche signal

Il faut analyser un certain nombre de signaux issus de la machine est le contenu spectral de ces signaux peuvent être exploité pour détecter les défauts de la machine, les principale technique utilisé dans cette méthode est comme suit :

- L'analyse des vibrations mécaniques
- L'analyse des flux
- L'analyse du couple électromagnétique
- L'analyse des courants statoriques
- L'analyse de la puissance instantanée
- l'analyse de vecteur de Park

I.5.2. Méthodes basées sur un modèle

Le concept de cette méthode repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à surveiller. Pour cette raison, les méthodes utilisant la redondance analytique pour la surveillance

sont appelées méthodes à base de modèle. Le principe de la surveillance utilisant un modèle peut être séparé en deux étapes principales la génération de résidus et la localisation des défauts. La première étape consiste à mettre au point un modèle du système. Une fois le modèle validé, la procédure de diagnostic en elle-même comporte trois phases:

- La génération de résidus, grandeurs sensibles aux défauts.
- La détection de défauts éventuellement présents, par l'analyse des résidus.
- La localisation et l'identification du type de défaillance.

1.5.3. approche d'intelligence artificielle (IA)

L'intelligence artificielle (IA) est une branche de l'informatique qui traite la reproduction par la machine de certains aspects de l'intelligence humaine tels qu'apprendre à partir d'une expérience passée à reconnaître des formes complexes et à effectuer des déductions.

Cette méthode présente plusieurs avantages parmi ces avantages :

- La simplicité dans la mise en œuvre, une fois préparées les règles d'expert.
- La robustesse face aux perturbations.
- La non nécessité de modélisation.
- l'insertion automatique des symptômes et la mémorisation de chaque nouvel acte.

Il y a plusieurs techniques dans cette méthode parmi ces techniques nous pouvons citer

- Logique floue.
- Reconnaissances des formes (RDF).
- Réseaux de neurones artificiels.

1.6. CONCLUSION.

Dans ce chapitre nous avons présentés des notions très importantes en diagnostic, Dans un premier temps, après avoir rappelé succinctement la constitution du moteur asynchrone et représentations les différentes défaillances de le Moteur Asynchrone triphasés, Notre travail est consacré à l'étude (les causes et l'effet de cassures de barres) le défaut de cassure de barres dans la cage rotorique d'un moteur asynchrone.

Ensuite, nous avons exploré rapidement les différents techniques de diagnostic ont été brièvement présentées en se concentrant sur celles appartenant à l'approche signal (Analyse Spectrale du Courant Statorique, à l'utilisation d'une méthode basée sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT)). Il est à noter qu'il existe d'autres approches différentes à celles traitées dans ce chapitre, telle que les approches d'intelligence artificielle...

II.1. INTRODUCTION

Puisque la méthode de diagnostic traitée dans cette mémoire est basée sur le signal du courant statorique, il est préférable de faire une étude analytique détaillée sur la machine asynchrone afin d'interpréter le contenu harmonique de courant statorique pendant l'état sain et en présence d'un défaut majeurs (roulement) pour une bonne connaissance des signatures des défauts.

II.2. ETUDE ANALYTIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A L'ETAT SAIN

II.2.1. Induction magnétique total dans l'entrefer

Notre étude analytique est basée sur l'approche **FMM – Perméance** qui considère l'induction magnétique dans l'entrefer comme la somme des champs harmoniques obtenus par le produit de la perméance de l'entrefer et les Forces Magnétomotrices statoriques et rotoriques [1].

La structure générale de cette étude est basée sur les étapes représentées dans la figure ci-dessous:

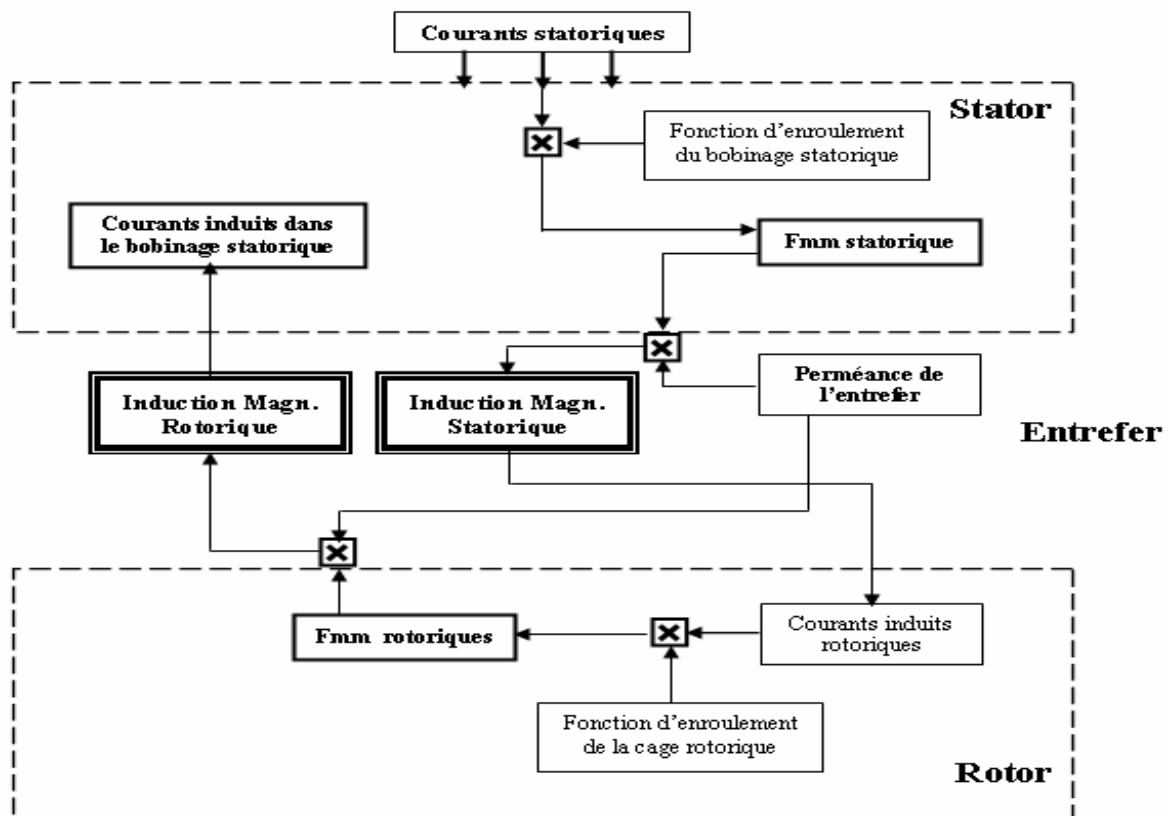


Figure II.1 : Etapes de calcul des inductions magnétiques dans un moteur asynchrone.

Nous avons mentionné que l'induction magnétique statorique est obtenue par le produit entre la perméance d'entrefer et la force magnétomotrice statorique. Dans le cas d'une machine à l'état sain et en tenant compte de toutes les hypothèses simplificatrices citées précédemment, la perméance de l'entrefer est constante :

$$p(t, \theta) = p_0 \tag{II.1}$$

Avec : $p0 = \frac{\mu 0}{e}$; où e est l'épaisseur de l'entrefer.

Les courants statoriques :

$$\begin{cases} i_A(t) = i_m \sin(\omega_s t) \\ i_B(t) = i_m \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_C(t) = i_m \sin(\omega_s t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.2)$$

La FMM de la phase A est définie par :

$$F_{sA}(t, \theta) = N_{eA}(\theta) \cdot i_A(t) \quad (II.3)$$

Avec $N_{eA}(\theta)$: la fonction d'enroulement de la phase A qui est définie par :

$$N_{eA} = n_{dA}(\theta) - \langle n_{dA}(\theta) \rangle \quad (II.4)$$

$n_{dA}(\theta)$: est la fonction de distribution de l'enroulement de la phase A

$\langle n_{dA}(\theta) \rangle$: est la valeur moyenne.

La FMM de la phase A est définie par :

$$\text{donc: } F_{sA}(t, \theta) = \left(\sum_{k=0}^{\infty} \hat{F}_{s(2k+1)} \cos[(2k+1)p\theta] \right) \sin(\omega_s t) \quad (II.5)$$

Avec : $\hat{F}_{s(2k+1)} = \pm \frac{2\omega_s \cdot i_m}{(2k+1)\pi}$: est l'amplitude de l'harmonique $(2k+1)$ de la FMM d'une phase statorique.

On

obtient :

$$F_{sA}(t, \theta) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\hat{F}_{s(2k+1)}}{2} [\sin(\omega_s t - (2k+1)p\theta) + \sin(\omega_s t + (2k+1)p\theta)] \quad (II.6)$$

Selon l'équation (II.6), on constate que la FMM créée par une phase parcourue par un courant sinusoïdal de fréquence fs est une **onde pulsante** qui se décompose en deux ondes tournantes (Théorème de Leblanc), l'une directe et l'autre inverse [1]. Chaque onde comporte $(2k+1)$ harmoniques d'espace caractérisés par une fréquence temporelle de fs et tournant à une vitesse spatiale de $+\frac{2\omega_s \cdot i_m}{(2k+1)p}$ pour l'onde directe et de $-\frac{2\omega_s \cdot i_m}{(2k+1)p}$ pour l'onde inverse. Les harmoniques d'espace statoriques sont dus à la distribution discrète des conducteurs actifs dans les encoches statoriques.

Après l'obtention de la FMM de la phase A (Eq. II.5), il est facile d'écrire l'expression de la FMM de la phase B ainsi que celle de la phase C . Posons $h=2k+1$, on obtient :

$$\begin{cases} F_{SA}^h(t, \theta) = \left[\sum_{h=1} \hat{F}_{sh} \cos h(p\theta) \right] \sin(w_s t) \\ F_{SB}^h(t, \theta) = \left[\sum_{h=1} \hat{F}_{sh} \cos h\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \sin\left(w_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ F_{SC}^h(t, \theta) = \left[\sum_{h=1} \hat{F}_{sh} \cos h\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \sin\left(w_s t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II. 7})$$

Ce système d'équation est équivalent à :

$$\begin{cases} F_{SA}^h(t, \theta) = [\hat{F}_{s1} \cos(p\theta) + \hat{F}_{s3} \cos 3(p\theta) + \dots \hat{F}_{sh} \cos h(p\theta) + \dots] \sin(w_s t) \\ F_{SB}^h(t, \theta) = \left[\hat{F}_{s1} \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \hat{F}_{s3} \cos 3\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \dots \hat{F}_{sh} \cos h\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \dots \right] \sin\left(w_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ F_{SC}^h(t, \theta) = \left[\hat{F}_{s1} \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) + \hat{F}_{s3} \cos 3\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) + \dots \hat{F}_{sh} \cos h\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) + \dots \right] \sin\left(w_s t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II. 8})$$

La FMM résultante de ce bobinage est obtenue par l'addition des FMM de trois phases [1]. La sommation se fait par rang harmonique, par exemple :

➤ **Pour le fondamental (h = 1) :**

$$\begin{cases} F_{SA}^1(t, \theta) = [\hat{F}_{s1} \cos(p\theta)] \sin(w_s t) \\ F_{SB}^1(t, \theta) = \left[\hat{F}_{s1} \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \sin\left(w_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ F_{SC}^1(t, \theta) = \left[\hat{F}_{s1} \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \sin\left(w_s t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II. 9})$$

En utilisant la relation trigonométrique, $\sin(a) \cdot \cos(b) = \frac{1}{2} [\sin(a+b) + \sin(a-b)]$

On obtient :

$$\begin{cases} F_{SA}^1(t, \theta) = \frac{1}{2} \hat{F}_{s1} \sin(w_s t - p\theta) + \frac{1}{2} \hat{F}_{s1} \sin(w_s t + p\theta) \\ F_{SB}^1(t, \theta) = \frac{1}{2} \hat{F}_{s1} \sin(w_s t - p\theta) + \frac{1}{2} \hat{F}_{s1} \sin\left(w_s t + p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ F_{SC}^1(t, \theta) = \frac{1}{2} \hat{F}_{s1} \sin(w_s t - p\theta) + \frac{1}{2} \hat{F}_{s1} \sin\left(w_s t + p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II. 10})$$

On obtient finalement la FMM statorique résultante due à la contribution du fondamental de chaque phase :

$$F_s^1(t, \theta) = F_{SA}^1(t, \theta) + F_{SB}^1(t, \theta) + F_{SC}^1(t, \theta) = \frac{3}{2} \hat{F}_{s1} \sin(w_s t - p\theta) \quad (\text{II. 11})$$

$$\text{Car : } \frac{1}{2} \hat{F}_{s1} \sin(w_s t + p\theta) + \frac{1}{2} \hat{F}_{s1} \sin\left(w_s t + p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \hat{F}_{s1} \sin\left(w_s t + p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) = 0$$

On constate que l'harmonique fondamental $F_s^1(t, \theta)$ de la FMM résultante d'un enroulement triphasé ne représente plus une onde pulsante mais une onde tournante qui se déplace à une vitesse

égale à : $\frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega_s}{p}$ le long de la circonférence du stator. L'amplitude de cette onde est 3 fois plus grande que celle d'un bobinage monophasé :

➤ **Pour l'harmonique l'ordre ($h = 3$) :**

$$\begin{cases} F_{sA}^3(t, \theta) = [\hat{F}_{s3} \cos(3p\theta)] \sin(\omega_s t) \\ F_{sB}^3(t, \theta) = \left[\hat{F}_{s3} \cos 3 \left(p\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \sin \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ F_{sC}^3(t, \theta) = \left[\hat{F}_{s3} \cos 3 \left(p\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \sin \left(\omega_s t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (\text{II. 12})$$

En utilisant les relations trigonométriques, on obtient :

$$\begin{cases} F_{sA}^3(t, \theta) = \frac{1}{2} \hat{F}_{s3} \sin(\omega_s t - 3p\theta) + \frac{1}{2} \hat{F}_{s3} \sin(\omega_s t + 3p\theta) \\ F_{sB}^3(t, \theta) = \frac{1}{2} \hat{F}_{s3} \sin \left(\omega_s t - 3p\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{1}{2} \hat{F}_{s3} \sin \left(\omega_s t + 3p\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ F_{sC}^3(t, \theta) = \frac{1}{2} \hat{F}_{s3} \sin \left(\omega_s t - 3p\theta - \frac{4\pi}{3} \right) + \frac{1}{2} \hat{F}_{s3} \sin \left(\omega_s t + 3p\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (\text{II. 13})$$

On remarque que la FMM statorique résultante, due à la contribution de l'harmonique 3 de chaque phase, est nulle :

$$F_s^3(t, \theta) = F_{sA}^3(t, \theta) + F_{sB}^3(t, \theta) + F_{sC}^3(t, \theta) = 0 \quad (\text{II. 14})$$

➤ **Pour l'harmonique l'ordre ($h = 5$) :**

$$\begin{cases} F_{sA}^5(t, \theta) = [\hat{F}_{s5} \cos(5p\theta)] \sin(\omega_s t) \\ F_{sB}^5(t, \theta) = \left[\hat{F}_{s5} \cos 5 \left(p\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \sin \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ F_{sC}^5(t, \theta) = \left[\hat{F}_{s5} \cos 5 \left(p\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \sin \left(\omega_s t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (\text{II. 15})$$

En utilisant les relations trigonométriques, on obtient :

$$\begin{cases} F_{sA}^5(t, \theta) = \frac{1}{2} \hat{F}_{s5} \sin(\omega_s t + 5p\theta) + \frac{1}{2} \hat{F}_{s5} \sin(\omega_s t - 5p\theta) \\ F_{sB}^5(t, \theta) = \frac{1}{2} \hat{F}_{s5} \sin(\omega_s t + 5p\theta) + \frac{1}{2} \hat{F}_{s5} \sin \left(\omega_s t - 5p\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ F_{sC}^5(t, \theta) = \frac{1}{2} \hat{F}_{s5} \sin(\omega_s t + 5p\theta) + \frac{1}{2} \hat{F}_{s5} \sin \left(\omega_s t - 5p\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (\text{II. 16})$$

On obtient ainsi la FMM statorique résultante de la contribution de l'harmonique 5 de la FMM de chaque phase :

$$F_s^5(t, \theta) = F_{sA}^5(t, \theta) + F_{sB}^5(t, \theta) + F_{sC}^5(t, \theta) = \frac{3}{2} \hat{F}_{s5} \sin(\omega_s t + 5p\theta) \quad (\text{II. 17})$$

Donc, l'harmonique 5 est une onde qui se déplace le long de la circonférence du stator à une vitesse égale à : $\frac{d\theta}{dt} = -\frac{w_s}{5p}$ dans le sens inverse que le fondamentale.

De la même façon, on retrouve :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_s^7(t, \theta) = \frac{3}{2} \hat{F}_{s7} \sin(w_s t - 7p\theta) \\ F_s^{11}(t, \theta) = \frac{3}{2} \hat{F}_{s11} \sin(w_s t + 11p\theta) \\ F_s^{13}(t, \theta) = \frac{3}{2} \hat{F}_{s13} \sin(w_s t - 13p\theta) \\ \dots\dots\dots \\ F_s^{(6k\pm 1)}(t, \theta) = \frac{3}{2} \hat{F}_{s(6k\pm 1)} \sin(w_s t \pm (6k \pm 1)p\theta) \end{array} \right. \quad (\text{II. 18})$$

Donc l'expression du terme générale, de la FMM statorique résultante, générée par ce type de bobinage peut être écrite sous la forme suivante :

$$F_s^h(t, \theta) = \frac{3}{2} \hat{F}_{sh} \sin(w_s t \pm hp\theta), \quad \text{Ou directement :}$$

$$F_s^h(t, \theta) = \hat{F}_{sh} \sin(w_s t \pm hp\theta) \quad (\text{II. 19})$$

Où h est le rang des harmoniques d'espace statoriques, il est égal à $(6k\pm 1)$ dans le cas où les enroulements statoriques sont identiques et parcourus par un système de courants triphasés équilibrés. Avec un entrefer uniforme [1], l'induction magnétique statorique dans l'entrefer sera proportionnelle à la FMM. En multipliant (II.19) par (II.1), on obtient l'expression du terme général de l'induction magnétique statorique :

$$B_s^h(t, \theta) = \hat{B}_{sh} \sin(w_s t \pm hp\theta) \quad (\text{II. 20})$$

$$\text{Avec : } B_s^h = F_s^h \cdot p0 \quad (\text{II. 21})$$

Constatations :

- La FMM résultante, d'un bobinage triphasé alimenté par un système de courants équilibrés comporte seulement des harmoniques d'espace d'ordre $h=6k\pm 1$, les harmoniques multiples de 3 disparaissent donc ils ne contribuent pas à la création de la FMM.
- Vu que tous les harmoniques d'espace de la FMM sont créés par des courants statoriques purement sinusoïdaux de fréquence temporelle f_s , ils possèdent donc, la même fréquence fondamentale f_s .
- Le fondamental de la FMM résultante tourne à une vitesse : $w_1 = \frac{w_s}{p}$ par conséquent l'harmonique de rang h tourne à une vitesse : $w_h = \frac{w_s}{hp}$
- Tous les harmoniques d'ordre $h=6k+1$ tournent dans le même sens que celui du fondamental. Donc, ils s'ajoutent au champ tournant direct.

➤ Tous les harmoniques d'ordre $h=6k-1$ tournent dans le même sens opposé que celui du fondamental. Donc, ils s'ajoutent au champ tournant inverse.

II.2.1.2. Induction Magnétique Rotorique

L'induction magnétique rotorique est égale aussi au produit entre la perméance d'entrefer et la force magnétomotrice rotorique. Dans le cas d'une machine à l'état sain, la fonction de perméance de l'entrefer est toujours donnée par l'équation (II.1). Donc, on doit trouver l'expression de la FMM rotorique résultante.

Dans le cas général, les stators des moteurs asynchrones triphasés sont caractérisés par un nombre p de paires de pôles et par conséquent, leurs rotors sont aussi caractérisés par le même nombre de paires de pôles.

Pour un moteur asynchrone à cage de N_r barres, le rotor peut être vu comme un ensemble de N_r mailles espacées régulièrement d'un angle électrique de: $p \frac{2\pi}{N_r}$, où chaque maille a une ouverture d'un pas polaire $\frac{\pi}{p}$, c'est-à-dire que le courant rotorique passe par une barre et revient par la barre situé après q barres (avec $q = \frac{N_r}{2p}$).

Les harmoniques (de rang h) de l'induction magnétique statorique vont créer des FEM et par conséquent des courants dans les mailles rotoriques. Ces courants induits sont caractérisés par des pulsations données par :

$$w_{rh} = w_s \cdot s_h \tag{II.22}$$

Où s_h : est le glissement dû à la rotation du h^{ieme} harmonique de l'induction magnétique statorique, il est défini par :

$$s_h = \frac{w_h - \Omega_r}{w_h} = 1 - \frac{\frac{w_s(1-s)}{p}}{\frac{w_s}{hp}}$$

Avec : s : le glissement dû au fondamental

Ω_r : La vitesse de rotation du rotor.

On obtient finalement : $s_h = 1 - h(1 - s)$ (II.23)

Puisque on a N_r mailles rotoriques, chaque harmonique h crée un système de courants induits

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{rh}^{maille1}(t) = \hat{I}_{rh} \cos(s_h w_s t) \\ I_{rh}^{maille2}(t) = \hat{I}_{rh} \cos\left(s_h w_s t - hp \frac{2\pi}{N_r}\right) \\ I_{rh}^{maille3}(t) = \hat{I}_{rh} \cos\left(s_h w_s t - 2hp \frac{2\pi}{N_r}\right) \\ \dots\dots\dots \\ I_{rh}^{mailleN_r}(t) = \hat{I}_{rh} \cos\left(s_h w_s t - (N_r - 1)hp \frac{2\pi}{N_r}\right) \end{array} \right. \tag{II.24}$$

Avec \hat{I}_{rh} : l'amplitude des courants rotoriques induits par le h^{ieme} harmonique de l'induction magnétique statorique.

II.2.1.2.1. Fonction de distribution des circuits rotoriques

Chaque maille rotorique peut être considérée comme un enroulement d'une seule spire ($w_r = 1$) et d'ouverture: $\alpha = q \frac{2\pi}{N_r}$. Si on prend, comme origine des coordonnées l'axe de cette maille, sa fonction de distribution $n_{rd,maille1}(\theta r)$.

Avec θr : angle mécanique par rapport au rotor.

On obtient [sah10] :

$$n_{rd}^{maille1}(\theta r) = \frac{1}{2} + \sum_{\eta=1}^2 \frac{2}{\eta\pi} \sin\left(\eta \frac{\pi}{2}\right) \cos(\eta p \theta r) \tag{II. 25}$$

On note que η représente le rang des harmoniques d'espace rotoriques dus à la distribution discrète des barres dans les encoches rotoriques; il doit être impaire ($\eta=2k+1$) si non, A_η devient nul.

II.2.1.2.2. La force Magnétomotrice rotorique

Les courants induits qui circulent dans les mailles rotoriques produisent une FMM résultante dans l'entrefer; pour analyser celle-ci, on doit étudier d'abord les FMM de chaque maille.

Puisque l'entrefer est constant et on néglige toute asymétrie axiale, l'expression de la FMM dans chaque maille est [1] :

$$F_{rh}^{maille i}(t, \theta r) = N_{rw}^{maille i}(\theta r) . I_{rh}^{maille i}(t) \tag{II. 26}$$

Avec : $i=1, 2, 3, \dots, N_r$.

$N_{rw}^{maille i}(\theta r)$: La fonction d'enroulement de la i^{ieme} maille. Elle est définie par :

$$N_{rw}^{maille i}(\theta r) = n_{rd}^{maille i}(\theta r) - \langle n_{rd}^{maille i}(\theta r) \rangle. \tag{II. 27}$$

Avec : $\langle n_{rd}^{maille i}(\theta r) \rangle$ la valeur moyenne de la fonction de distribution de la i^{ieme} maille.

On peut finalement écrire :

$$\begin{cases} N_{rw}^{maille 1}(\theta r) = \sum_{\eta=1}^2 \frac{2}{\eta\pi} \sin\left(\eta \frac{\pi}{2}\right) \cos\left[\eta p \left(\theta r - (i - 1) \frac{2\pi}{N_r}\right)\right] \\ N_{rw}^{maille Nr}(\theta r) = \sum_{\eta=1}^2 \frac{2}{\eta\pi} \sin\left(\eta \frac{\pi}{2}\right) \cos\left[\eta p \left(\theta r (Nr - 1) \frac{2\pi}{N_r}\right)\right] \end{cases} \tag{II. 28}$$

En multipliant le système d'équations (II.24) par celui (II.28), on obtient les' expressions des FMM générées par chaque maille rotorique :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 F_{rh}^{\text{maille } 1}(t, \theta r) = \sum_{\eta=1} \hat{F}_{rh}^{\eta} \{ \cos(s_h w_s t + \eta p \theta r) + \cos(s_h w_s t - \eta p \theta r) \} \\
 F_{rh}^{\text{maille } 2}(t, \theta r) = \sum_{\eta=1} \hat{F}_{rh}^{\eta} \left\{ \cos\left(s_h w_s t + \eta p \theta r - (\eta + h) \frac{2p\pi}{Nr}\right) + \cos\left(s_h w_s t - \eta p \theta r + (\eta - h) \frac{2p\pi}{Nr}\right) \right\} \\
 \dots\dots\dots \\
 F_{rh}^{\text{maille } Nr}(t, \theta r) = \sum_{\eta=1} \hat{F}_{rh}^{\eta} \left\{ \cos\left(s_h w_s t + \eta p \theta r - (Nr - 1)(\eta + h) \frac{2p\pi}{Nr}\right) \right. \\
 \left. + \cos\left(s_h w_s t - \eta p \theta r + (Nr - 1)(\eta - h) \frac{2p\pi}{Nr}\right) \right\}
 \end{array} \right. \quad (\text{II. 29})$$

Avec : $\hat{F}_{rh}^{\eta} = \frac{2\hat{I}_{rh}}{\eta\pi} \sin\left(\eta \frac{\pi}{2}\right)$ (II. 30)

Maintenant, pour chaque harmonique de rang h de l'induction statorique, la FMM rotorique résultante est égale à la somme des contributions de toutes les mailles rotoriques. On peut écrire :

$$F_{rh}(t, \theta r) = \sum_{i=1}^{Nr} F_{rh}^i(t, \theta r) \quad (\text{II. 31})$$

$$\begin{aligned}
 F_{rh}(t, \theta r) = \sum_{i=1}^{Nr} \sum_{\eta=1} \hat{F}_{rh}^{\eta} \left\{ \cos\left(s_h w_s t + \eta p \theta r - (i - 1)(\eta + h) \frac{2p\pi}{Nr}\right) \right. \\
 \left. + \cos\left(s_h w_s t - \eta p \theta r + (i - 1)(\eta - h) \frac{2p\pi}{Nr}\right) \right\}
 \end{aligned} \quad (\text{II. 32})$$

Observons bien l'équation (II. 32). Il est clair qu'elle représente la somme de i ondes sinusoïdales espacées régulièrement d'un angle de $(\eta \pm h) p \frac{2\pi}{Nr}$. Il est évident que la somme de ces i ondes est nulle pour toute valeur de η , sauf trois cas, lorsque $\eta = \pm h$ ou $(\eta + h) = k Nr$ ou $(\eta - h) = k Nr$ avec $k=1, 2, 3, \dots$. Et puisque η est un entier impair et positif, on constate que la FMM rotorique n'existe que pour [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 |h| \\
 \left| \frac{kNr}{p} - h \right| \\
 \left| \frac{kNr}{p} + h \right|
 \end{array} \right. \quad (\text{II. 33})$$

Alors, dans un **repère lié au rotor**, le terme générale de la FMM rotorique sera donné par :

$$\begin{aligned}
 F_{rh}(t, \theta r) = \hat{F}_{rh} \cos(s_h w_s t \pm \eta p \theta r) + \hat{F}_{rh.SH1} \cos\left(s_h w_s t + \left(\frac{kNr}{p} - h\right) p \theta r\right) \\
 + \hat{F}_{rh.SH2} \cos\left(s_h w_s t - \left(\frac{kNr}{p} + h\right) p \theta r\right)
 \end{aligned} \quad (\text{II. 34})$$

Puisque la perméance d'entrefer est constante (équation II.1), on peut directement trouver l'expression du terme général de l'induction magnétique rotorique :

$$B_{rh}^{p0}(t, \theta r) = \hat{B}_{rh}^{p0} \cos(s_h w_s t \pm \eta p \theta r) + \hat{B}_{rh.SH1} \cos\left(s_h w_s t + \left(\frac{kNr}{p} - h\right) p \theta r\right) + \hat{B}_{rh.SH2} \cos\left(s_h w_s t - \left(\frac{kNr}{p} + h\right) p \theta r\right) \quad (\text{II.35})$$

Constatations

-L'équation (II.29) montre que chaque maille rotorique produit une FMM comportant η harmoniques d'espace rotorique.

-Toutes les mailles rotoriques produisent des FMM de même amplitude et même fréquence, mais décalées entre elles d'un angle électrique de $(\eta \pm h) p \frac{2\pi}{Nr}$. La somme de ces FMM est toujours nulle sauf pour les valeurs de η indiquées dans la formule (II.33).

-L'équation (II.35) montre que chaque harmonique d'espace de rang de l'induction statorique crée une série d'harmoniques d'espace de l'induction rotorique de rang $\eta = \left(\frac{kNr}{p} - h\right)$

Ils sont rigidement liés au nombre d'encoches rotoriques Nr . C'est pour cette raison qu'ils sont appelés souvent *les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH)*.

-Pour $k = 1$ et $h = 1$ on obtient ce qu'on appelle *les harmoniques principaux d'encoches rotoriques (PSH)*.

II.2.1.3. Les FEM induites dans les enroulements statoriques

Afin de trouver les fréquences des FEM induites dans le bobinage statorique, dues au champ rotorique, on va d'abord réécrire l'équation (II.35) dans un repère fixe lié au stator. Pour cela, il suffit d'utiliser le changement de variable suivant :

$$\theta r = \theta - \Omega_r t = \theta - (1 - s) \frac{w_s}{p} t \quad (\text{II.36})$$

Alors, on obtient :

$$B_{rh}^{p0}(t, \theta) = \hat{B}_{rh}^{p0} \cos(w_s t \pm h p \theta) + \hat{B}_{rh.SH1} \cos\left(\left(1 - \frac{kNr}{p} (1 - s)\right) w_s t + \left(\frac{kNr}{p} - h\right) p \theta\right) + \hat{B}_{rh.SH2} \cos\left(\left(1 + \frac{kNr}{p} (1 - s)\right) w_s t - \left(\frac{kNr}{p} + h\right) p \theta\right) \quad (\text{II.37})$$

-L'équation (II.37) montre clairement que l'induction magnétique rotorique comporte deux types d'ondes :

Le premier type est caractérisé par une fréquence temporelle f_s et un nombre de paires de pôle égal à hp . Il est capable d'induire des FEM de fréquences f_s dans les enroulements statoriques.

Le deuxième type est caractérisé par une fréquence temporelle: $f_{RSH} = \left| \left(1 \pm \frac{kNr}{p} (1 - s) \right) f_s \right|$ et un nombre de paires de pôles égale à $(kNr \pm hp)$ Il est capable d'induire des FEM de fréquences : $f_{RSH} = \left| \left(1 \pm \frac{kNr}{p} (1 - s) \right) f_s \right|$ dans les enroulements statoriques

Remarque

Pour un bobinage statorique formé de trois bobines identiques et alimenté par un système de tensions équilibré, on doit trouver seulement les courants (induits par induction) dont le rang est impaire et non multiple de trois (égale à $(6k \pm 1)$). Par contre et en pratique, il existe toujours un certain niveau de déséquilibre statorique de différentes origines (problèmes dans les tensions d'alimentation ou dans les enroulements ou connexion de neutre) dans ce cas, tous les harmoniques mêmes ceux ayant un rang multiple de trois seront présents dans le spectre du courant statorique.

A la fin de cette partie, on peut constater que, pendant le fonctionnement sain, les courants statoriques du moteur asynchrone à cage comportent deux séries d'harmoniques :

1. Une série d'harmoniques du temps (TH) de fréquence : $f_{TH} = v \cdot f_s$ (II. 38)

2. Une série d'harmoniques d'encoches rotoriques (RSH) de fréquence :

$$f_{RSH} = \left| \left(v \pm \frac{kNr}{p} (1 - s) \right) f_s \right| \quad (\text{II. 39})$$

Où v est le rang des harmoniques du temps. Il reste maintenant à vérifier ces résultats théoriques par des essais expérimentaux qui seront l'objet de la partie suivante.

II.3. ETUDE ANALYTIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE AVEC DEFAUT DE ROULEMENT

À l'interface entre le rotor et le stator, le roulement à billes présente aussi un vieillissement relativement rapide. Classiquement ce type de défaut est diagnostiqué à partir du spectre d'une mesure acoustique ou vibratoire. En partant du principe que l'entrefer n'est plus constant lors d'une défectuosité du roulement. Cette information est aussi présente dans le spectre du courant, puisque n'importe quelle excentricité produit des anomalies dans la distribution du champ dans l'entrefer. Dans son article, il a explicité l'expression analytique des fréquences liées aux défauts du roulement en fonction de ses paramètres mécaniques (nombre de billes de roulement, vitesse mécanique du rotor, l'angle de contact des billes avec les bagues), et donne la relation suivante :

$$f_{bng} = |f_s \pm mf_v| \tag{II.40}$$

Où $m = 1, 2, 3, \dots$ et $f_v e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$, $-\infty < x < \infty$ est une fréquence caractéristique de vibration.

Les expressions pour les trois types de défaut sont :

$$\text{Défaut de bague extérieure : } f = |f_s \pm mfo| \tag{II.41}$$

$$\text{Défaut de bague intérieure : } f = |f_s \pm mfi| \tag{II.42}$$

$$\text{Défaut de la cage : } f = |f_s \pm mfcag| \tag{II.43}$$

Les fréquences caractéristiques de vibration seront calculées sur la base des dimensions du roulement :

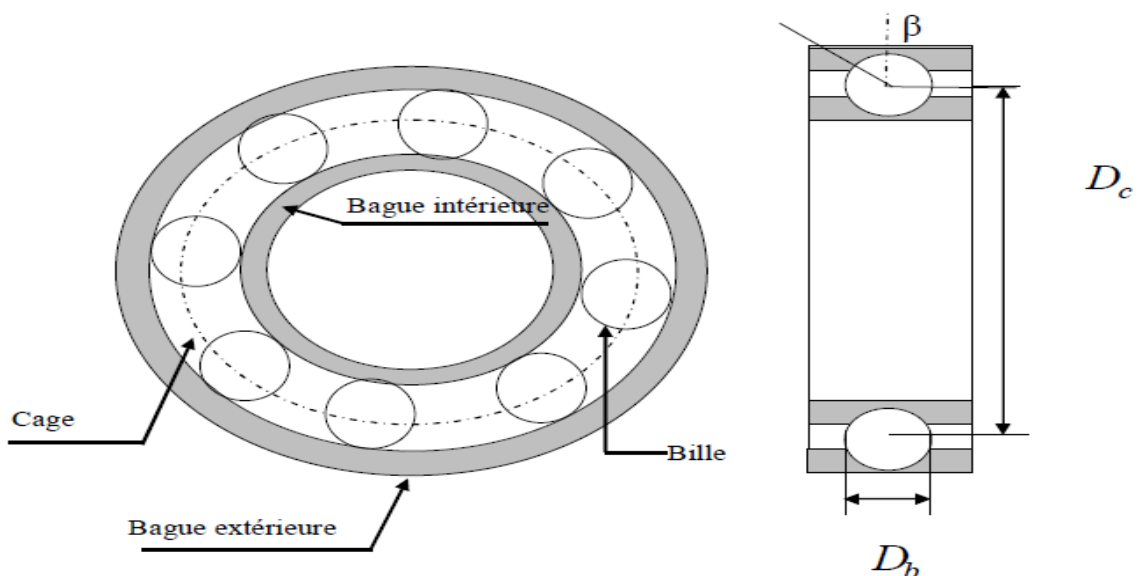


Figure. II.2. Dimensions d'un roulement à billes.

Les fréquences de défaut de roulement incluent la fréquence de la bague extérieure f_o , la fréquence de la bague intérieure f_i , la fréquence des billes f_b , ainsi que la fréquence de la cage f_{cag} :

$$f_i = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \cos \beta\right) \quad (\text{II.44})$$

$$f_o = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cos \beta\right) \quad (\text{II.45})$$

$$f_b = \frac{Pd}{Bd} f_r \left[1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \cos \beta\right)^2\right] \quad (\text{II.46})$$

$$f_{cage} = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cos \beta\right) \quad (\text{II.47})$$

Les cinq paramètres qui doivent être connus pour calculer les fréquences de défaut de roulement sont, le diamètre de la bille Bd , le diamètre moyen ou diamètre de la cage Pd , le nombre de billes N_b , l'angle de contact β en radians et la fréquence de rotation f_r .

Les composants défectueux du roulement produisent une fréquence unique par rapport à la dynamique du mouvement de roulement et les vibrations mécaniques produites sont fonction des vitesses de rotation de chaque composant [2].

Cependant, si les dimensions géométriques des roulements installés dans la machine asynchrone ne sont pas connues, les fréquences de vibration peuvent être rapprochées pour la plupart des roulements entre 6 et 12 billes par les formules suivantes:

$$f_o = 0.4N_b f_r ; \quad f_i = 0.6N_b f_r \quad ; \quad f_{cage} = 0.4f_r \quad (\text{II.48})$$

Ces approximations ne sont valables que pour les roulements à une rangée de billes de la série 6200.

Un mal fonctionnement d'un roulement peut être dû à un défaut dans leurs constituants,

II.4. LES HARMONIQUES LIES AUX DEFAUT D'EXCENTRICITE ET LES DEFAUTS DANS LA CAGE ROTORIQUE

Il est très important de noter que le spectre du courant statorique d'un moteur asynchrone à cage comporte aussi deux autres familles des harmoniques. la présence de ces harmoniques est due principalement à l'existence des défauts d'excentricité ou des défauts dans la cage rotorique.

II.4.1. Signatures des défauts dans la cage rotorique

La présence d'une barre cassée dans la cage rotorique provoque une asymétrie géométrique ainsi qu'un déséquilibre magnétique dans le moteur. Ce défaut n'affecte pas la structure du stator et ses enroulements, par conséquent, la FMM statorique résultante reste la même comme pour un moteur sain. Par contre, la FMM rotorique doit être recalculée en tenant compte des modifications provoquées par ce défaut.

Il a été démontré que ce type de défaut induit une série d'harmoniques dans les courant statoriques. Ces harmoniques sont appelés **RBFH (Rotor Bar Fault Harmonics)**. Ils ont une expression générale donnée par :

$$[v - (h \pm \eta')(1 - s)]f_s \tag{II. 49}$$

$$(v \pm 2ks)f_s \tag{II. 50}$$

Avec : $v = 1, 2, 3, \dots$ est le rang des harmoniques du temps.

Dans les deux tableaux ci-dessous, on a résumé les fréquences des harmoniques induits dans les courants statoriques suite à un défaut de barres. Ces fréquences sont déduites de la formule (II. 49) pour $h=1$ et différentes valeurs de η'' et v .

η''	$[v - (1 - \eta'')(1 - s)]f_s$			
	v			
	1	3	5	7...
1	f_s	$3f_s$	$5f_s$	$7f_s$
3	$(3 - 2s)f_s$	$(5 - 2s)f_s$	$(7 - 2s)f_s$	$(9 - 2s)f_s$
5	$(5 - 4s)f_s$	$(7 - 4s)f_s$	$(9 - 4s)f_s$	$(11 - 4s)f_s$
7	$(7 - 6s)f_s$	$(9 - 6s)f_s$	$(11 - 6s)f_s$	$(13 - 6s)f_s$
9	$(9 - 8s)f_s$	$(11 - 8s)f_s$	$(13 - 8s)f_s$	$(15 - 8s)f_s$
...				
$N_r/p - 1$	$\left \left[1 - \frac{N_r}{p}(1 - s) - 2s \right] f_s \right $	$\left \left[1 + \frac{N_r}{p}(1 - s) + 2s \right] f_s \right $	$\left \left[3 + \frac{N_r}{p}(1 - s) + 2s \right] f_s \right $	$\left \left[5 + \frac{N_r}{p}(1 - s) + 2s \right] f_s \right $
$N_r/p + 1$	$\left \left[1 + \frac{N_r}{p}(1 - s) \right] f_s \right $	$\left \left[3 + \frac{N_r}{p}(1 - s) \right] f_s \right $	$\left \left[5 + \frac{N_r}{p}(1 - s) \right] f_s \right $	$\left \left[7 + \frac{N_r}{p}(1 - s) \right] f_s \right $

Tableau II.1. Les fréquences des harmoniques induits par l'onde directe de la FMM rotorique en présence d'un défaut de barres.

η^n	$[\nu - (1 + \eta^n)(1 - s)]f_s$			
	ν			
	1	3	5	7
1	$(1 - 2s)f_s$	$(1 + 2s)f_s$	$(3 + 2s)f_s$	$(5 + 2s)f_s$
3	$(3 - 4s)f_s$	$(1 - 4s)f_s$	$(1 + 4s)f_s$	$(3 + 4s)f_s$
5	$(5 - 6s)f_s$	$(3 - 6s)f_s$	$(1 - 6s)f_s$	$(1 + 6s)f_s$
7	$(7 - 8s)f_s$	$(5 - 8s)f_s$	$(3 - 8s)f_s$	$(1 - 8s)f_s$
9	$(9 - 10s)f_s$	$(7 - 10s)f_s$	$(5 - 10s)f_s$	$(3 - 10s)f_s$
...				
$N_r/p - 1$	$\left \left[1 - \frac{N_r}{p}(1 - s) \right] f_s \right $	$\left \left[3 - \frac{N_r}{p}(1 - s) \right] f_s \right $	$\left \left[5 - \frac{N_r}{p}(1 - s) \right] f_s \right $	$\left \left[7 - \frac{N_r}{p}(1 - s) \right] f_s \right $
$N_r/p + 1$	$\left \left[1 + \frac{N_r}{p}(1 - s) - 2s \right] f_s \right $	$\left \left[1 - \frac{N_r}{p}(1 - s) + 2s \right] f_s \right $	$\left \left[3 - \frac{N_r}{p}(1 - s) + 2s \right] f_s \right $	$\left \left[5 - \frac{N_r}{p}(1 - s) + 2s \right] f_s \right $

Tableau II.2. Les fréquences des harmoniques induits par l'onde inverse de la FMM rotorique en présence d'un défaut de barres.

On remarque que les fréquences déduites de la formule (Eq. II.49) peuvent être déduites aussi de la formule (Eq. II.50). Mais, il faut bien noter que les composantes spectrales, données par (Eq. II.49), sont dues à la présence des harmoniques d'espace statoriques et rotoriques. Par contre, les composantes de (Eq. II.50) reflètent l'interaction entre les harmoniques du temps et les oscillations de la vitesse.

II.4.1. Signatures des défauts d'excentricité

Le défaut d'excentricité est parmi les défauts majeurs très rencontrés dans la pratique ; sa présence est traduite par le non uniformité de l'entrefer. Il existe trois types d'excentricité : statique, dynamique et mixte.

Dans le cas d'une excentricité statique le centre du rotor n'est pas confondu avec celui du stator mais l'épaisseur minimale de l'entrefer reste fixe.

L'excentricité dynamique fait que le centre du rotor tourne autour du centre du stator. Dans ce type d'excentricité, l'épaisseur minimale de l'entrefer est fonction de la position du rotor.

Il est à noter qu'en pratique, ces deux types d'excentricité se manifestent en même temps, ce qui donne naissance à ce qui est appelé excentricité mixte [1].

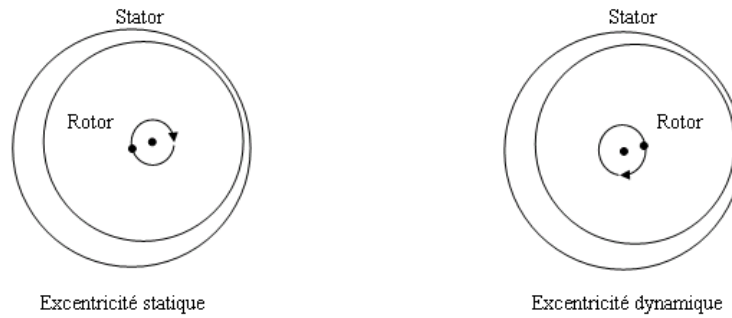


Figure. II.3. Schématisation de l'excentricité statique et dynamique

D'une manière générale et en tenant compte des harmoniques de temps, on peut confirmer les résultats suivants :

- ❖ L'excentricité statique n'a pas des signatures propres. Ce défaut influe seulement sur les amplitudes des harmoniques RSH
- ❖ L'excentricité dynamique est caractérisée par les signatures suivantes :

$$f_{ED} = |\nu f_s \pm 2k f_r| \tag{II.51}$$

$$f_{ED} = |\nu f_s \pm (KN_r \pm 2k) f_r| \tag{II.52}$$

Avec $k = 1, 2, 3, \dots$ un entier

- ❖ L'excentricité mixte est caractérisée par les signatures suivantes :

$$f_{EM} = |\nu f_s \pm k f_r| \tag{II.53}$$

$$f_{EM} = |\nu f_s \pm (KN_r \pm k) f_r| \tag{II.54}$$

Avec $k = 1, 2, 3, \dots$ un entier

Remarque

- Il est évident que tous les moteurs, même à l'état sain, présentent un petit niveau d'excentricité mixte. Pour cela, il est presque impossible de réaliser une excentricité purement statique ou purement dynamique. Cela signifie qu'on ne peut pas étudier expérimentalement l'excentricité statique séparément à celle dynamique ; seule la simulation, via un modèle fiable, qui peut confirmer ces résultats [1].

- En pratique, on parle toujours de l'excentricité mixte car les deux types d'excentricité existent simultanément. Les harmoniques de fréquences $|\nu f_s \pm k f_r|$ sont les signatures principales de ce défaut et on va les désigner par **EFH** (*Eccentricity Fault Harmonics*).

V. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons étudié analytiquement et expérimentalement le moteur asynchrone triphasé à cage en présence d'un défaut de cassure de barres rotoriques, défaut d'excentricité et défaut de roulement. Cette étude a permis d'identifier plusieurs familles d'harmoniques qui ont liés aux signatures du différent type de défauts qui peuvent affecter le bon fonctionnement de la MAS.

III.1. INTRODUCTION

Après le développement analytique, qui nous a permis de comprendre les phénomènes électromagnétiques prenant naissance pendant le fonctionnement sain et dégradé des moteurs asynchrones triphasés à cage, il s'est avéré important d'étudier expérimentalement la machine asynchrone à l'état sain et en présence d'un défaut de roulement. Nous allons valider les résultats obtenus par l'étude analytique et voir les contenus spectrales du courant ainsi que ses allures temporelles. De plus, nous allons définir certains indicateurs des défauts dédiés principalement à la détection des anomalies dans le roulement. Ce chapitre contient aussi une étude comparative entre ses indicateurs des défauts dont le but est de sélectionner le ou les meilleurs indicateurs.

III.2. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

III.2.1. Description du banc d'essai

Les essais expérimentaux ont été effectués au sein du Laboratoire de Génie Electrique de Biskra (LGEB). Le moteur triphasé asynchrone à cage utilisé dans nos expérimentations est un moteur tétra polaire de 3 kW fabriqué par *Leroy sommaire*. Le stator est constitué de 48 encoches alors que le rotor se compose de 28 barres en Aluminium. Notre moteur est alimenté directement par une source triphasée variable et il est accouplé à un frein à poudre permettant la variation du régime de fonctionnement. Le banc d'essai est équipé par un ensemble d'instruments de mesure, des capteurs de tension, de courant et de couple. L'acquisition des signaux est effectuée par l'intermédiaire d'une carte *dSpace* 1104 (Figure. III.1).

Les caractéristiques de moteur sont présentées sur le (tab. III.1).

Caractéristiques	Moteur asynchrone triphasés
La puissance	3 Kw
La vitesse nominale	1430 tr/min
La tension nominale	380 V
Le courant nominale	6.40 A
Nombre de barres rotoriques	28

Tab. III.1. La Caractéristiques de la machine utilisée

Dans un premier temps, on a effectué quatre essais où le moteur à l'état sain et fonctionnait à : a vide, à 20% de la charge, à 50% de la charge et à 85% de la charge, en suite on a répété les

mêmes essais mais avec un moteur possédant un défaut de roulement, puis le défaut d'excentricité mixte.

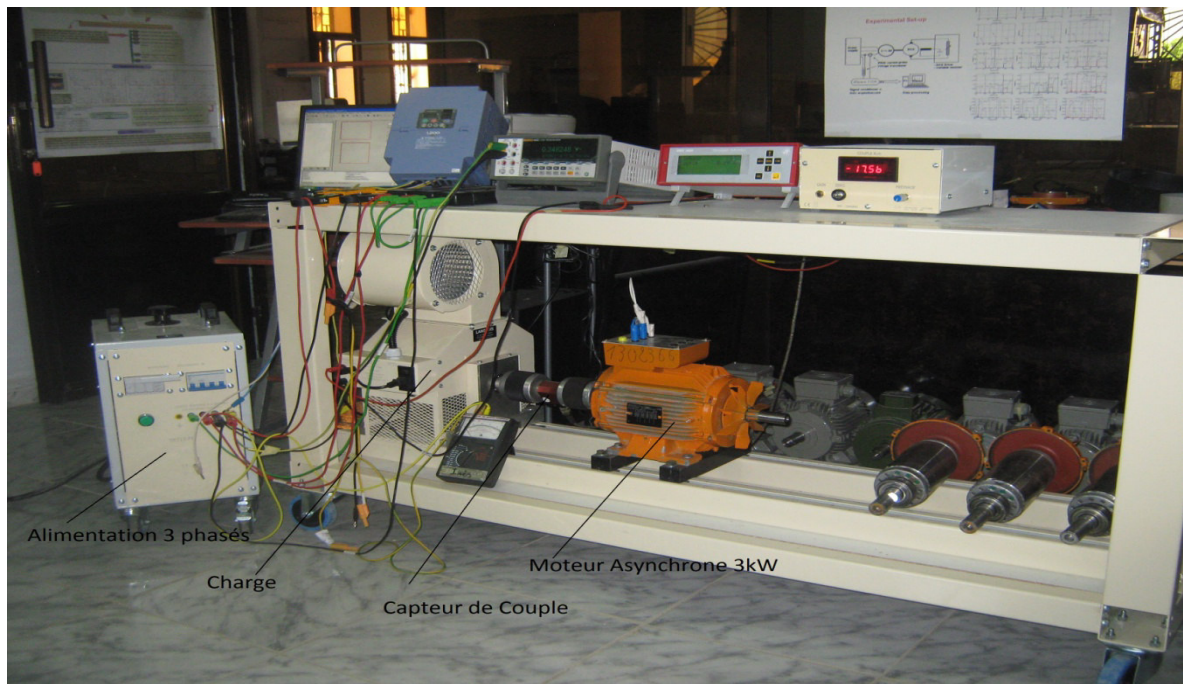


Figure. III.1. Le banc d'essai expérimental



Figure. III.2. Roulement avec défaut de la bague extérieure.

III.2.2. Les allures temporelles des courants statoriques pour différents états

Dans un premier temps, on a effectué quatre essais où le moteur a été couplé en étoile sans neutre et fonctionnait à vide, à 20% de la charge, à 50% de la charge et à 85% de la charge. Les mesures des essais sont regroupées dans le tableau suivant :

Charge en (%) de la valeur nominale 3kW	Courant statorique (A)	Couple électromagn. (Nm)	Vitesse de rotation (tr/mn)
0 %	2.70	0.57	1494
20%	2.92	4.10	1482
50%	3.95	10.53	1470
85%	5.40	16.97	1446

Tab. III.2. Mesures prises pour différents essais à l'état sain.

La figure (III.3) montre les allures des trois courants d'alimentation pour les différents régimes de charge à l'état sain. Il est clair que ces allures aient des formes sinusoïdales déformées à cause de plusieurs phénomènes tels que : l'asymétrie résiduelle du moteur au niveau du stator et du rotor, un certain déséquilibre dans les tensions d'alimentation, l'effet de la saturation et la présence des harmoniques du temps dans les courants d'alimentation ainsi que l'effet de la structure naturelle du stator et du rotor (présence des encoches).

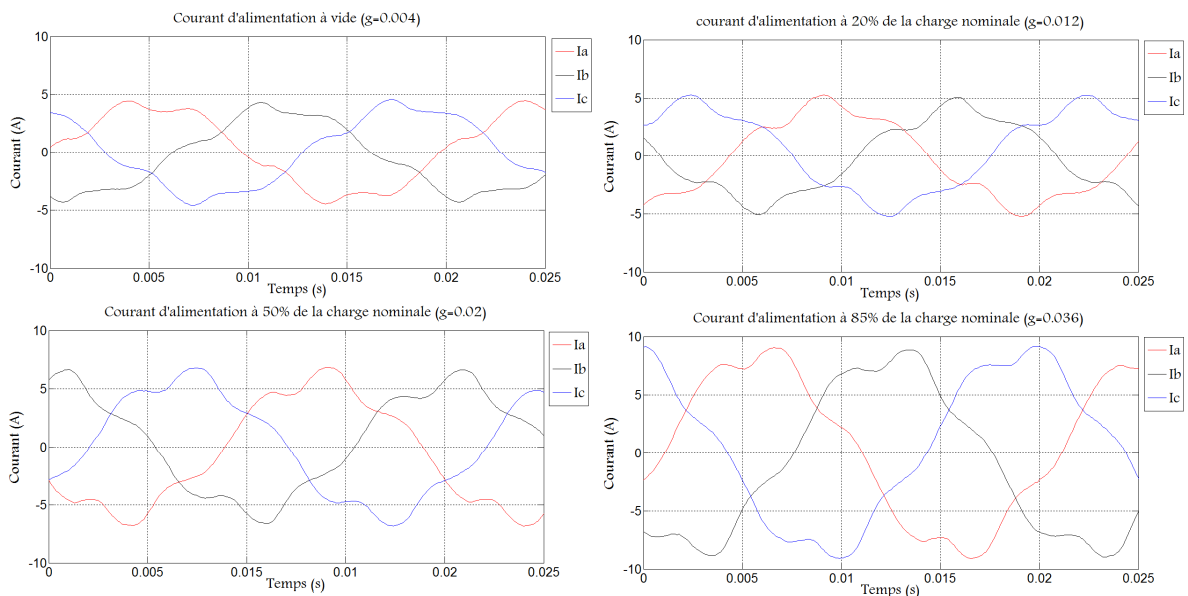


Figure. III.3. L'évolution temporelle des trois courants d'alimentation avec différentes charges (Etat sain)

Dans les Figures (III.4), on a présenté les allures temporelles des courants statoriques pour un moteur avec défaut de roulement.

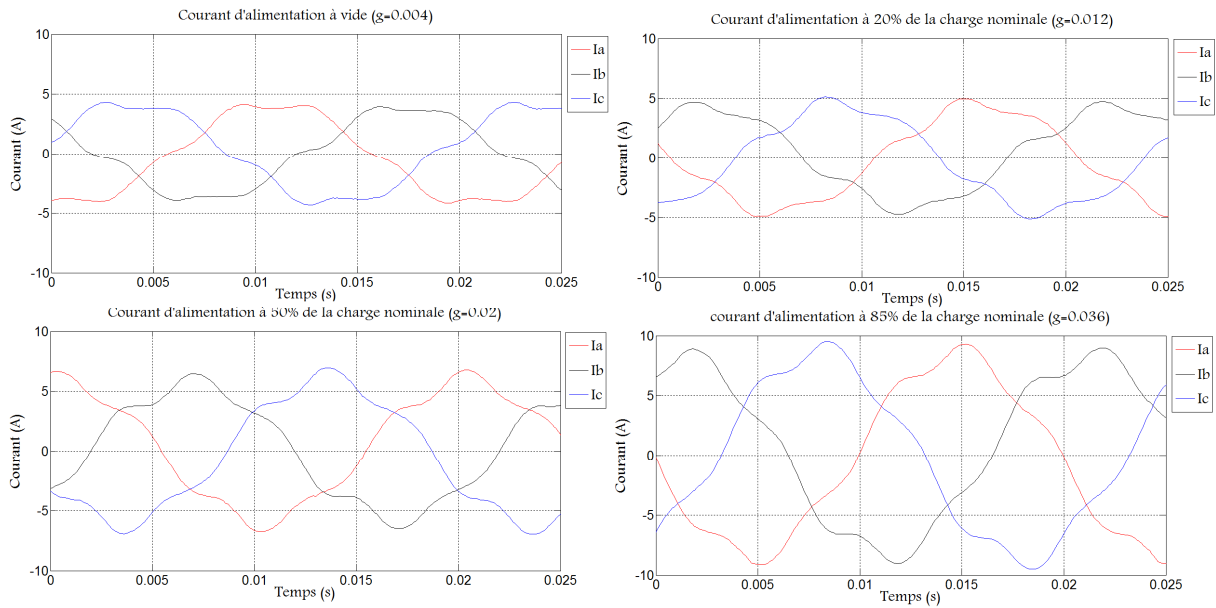


Figure III.4. L'évolution temporelle des trois courants d'alimentation avec différentes charges (défaut de roulement)

Comme on le voit, les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations sur l'état de la machine, alors il faut choisir une autre technique pour analyser ce signal. Il y a plusieurs méthodes pour effectuer l'analyse des courants, la plus utilisée est la Transformée de Fourier Rapide (FFT) qui permet une analyse fréquentiel de ce signal temporel.

III.3. ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE

Comme nous l'avons vu précédemment, plusieurs phénomènes entrent en jeu pendant le fonctionnement du moteur asynchrone à cage et affectent essentiellement les courants d'alimentation en modifiant leurs formes.

Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations, on est obligé d'aller vers les méthodes de traitement de signal. Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que : le couple, la vitesse, les courants, le flux, les vibrations,...

Dans ce travail, on s'intéresse à l'utilisation d'une méthode basée sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT) (outil mathématique très utilisé); qui permet de décrire n'importe quel signal par son spectre de fréquence ; ceci s'adapte parfaitement à notre application dans la mesure où de nombreux phénomènes associés aux défauts se traduisent par l'apparition de nouvelles fréquences liées directement au glissement ou à la modification des amplitudes des harmoniques qui existaient dans le spectre.

III.3.1. La Transformée de Fourier Rapide

On rappelle que la transformée de Fourier Rapide $x(f)$ d'un signal continu dans le temps est donnée par :

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (\text{III. 1})$$

L'analyse par FFT est utilisée principalement pour décrire un signal temporel dans le domaine fréquentiel avec une résolution fréquentielle constante sur une échelle linéaire de fréquence. Généralement, pour analyser un signal par la technique FFT, on doit prendre en compte les paramètres suivants :

- La fréquence d'échantillonnage : $f_e = 10000 \text{ Hz}$
- Le temps d'acquisition : $T_a = 10 \text{ sec}$
- Le nombre des échantillons : $N_e = \frac{T_a}{T_e} = f_e * T_a = 100000 \text{ échantillons}$
- La résolution fréquentielle : $\Delta f = \frac{1}{T_a} = \frac{1}{10} = 0.1 \text{ Hz}$

Avec un ordinateur, il est impossible de calculer la FFT $x(f)$ pour une valeur quelconque de la fréquence f . Donc, on ne calcule la FFT que pour des multiples Δf . C'est la notion de la Transformée de Fourier Discrète (DFT). En conséquence, la DFT $x(n)$ d'un signal échantillonné est donnée par [1]:

$$x(n) = \sum_{k=1}^{N_e} x(k)e^{-j2\pi k \frac{n}{N_e}} \quad \text{avec } n = 1, 2, 3, \dots, N_e. \quad (\text{III. 2})$$

III.3.2. Applications de la FFT sur les courants statorique

Étude analytique sur la machine asynchrone afin d'interpréter le contenu harmonique des courants statoriques pendant l'état sain. Notre étude théorique a été vérifiée par des essais expérimentaux (sur un moteur de 3kW) réalisés au niveau du laboratoire LGE de Biskra. Les résultats obtenus mettent en évidence la richesse en harmoniques du courant statorique. Jusqu'à maintenant, on a identifié quatre types d'harmoniques qui sont toujours présents dans le spectre du courant statorique même à l'état sain.

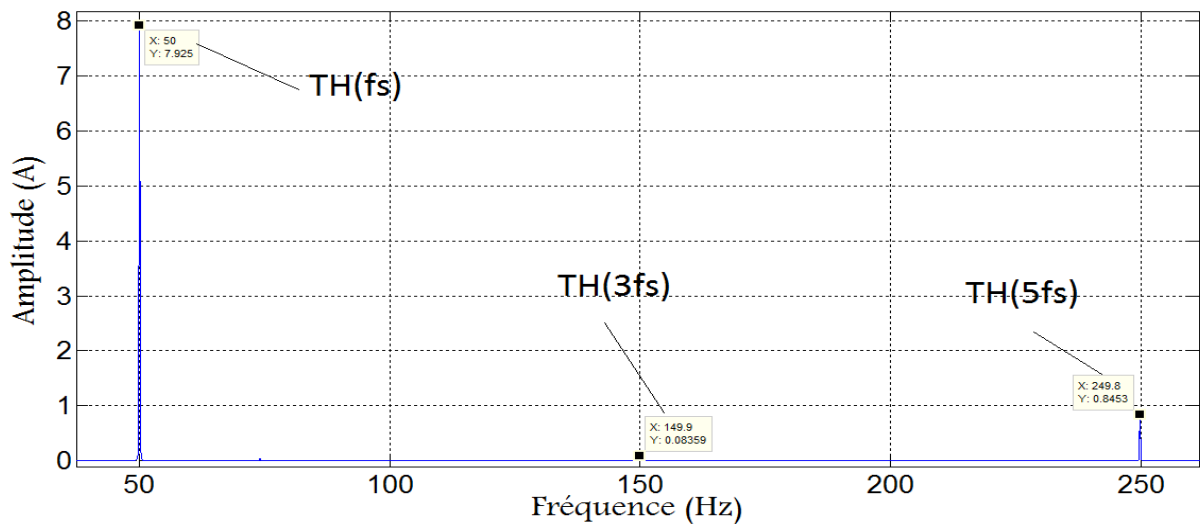
De plus, on a identifié trois nouveaux types d'harmoniques qui sont liées aux défauts de roulements. Le tableau ci-dessous résume ces différents types d'harmoniques :

Les différents harmoniques	les formules globales	Les causes
Les harmoniques du temps : TH	$(2*k+1)fs$	Les harmoniques du temps imposés par la source.
Les harmoniques d'encoches rotoriques : RSH	$(2*k+1)fs \pm N_r * fr$	la distribution discrète des encoches rotoriques.
Rotor Bar Fault Harmonics : RBFH	$((2*k+1) \pm 2*g)fs$	l'asymétrie résiduelle du moteur au niveau du rotor
Eccentricity Fault Harmonics : EFH	$(2*k+1)fs \pm fr$	Excentricité mixte.
Bague extérieur : $f_0=0.4*N_b*fr$	$fs \pm k*f_0$	Spécialisés uniquement sur les défauts de roulements.
Bague intérieur : $f_i=0.6*N_b*fr$	$fs \pm k*f_i$	
Cage : $f_c=0.4*fr$	$fs \pm k*f_c$	

Tab. III.3. Expressions et causes des harmoniques du courant statorique.

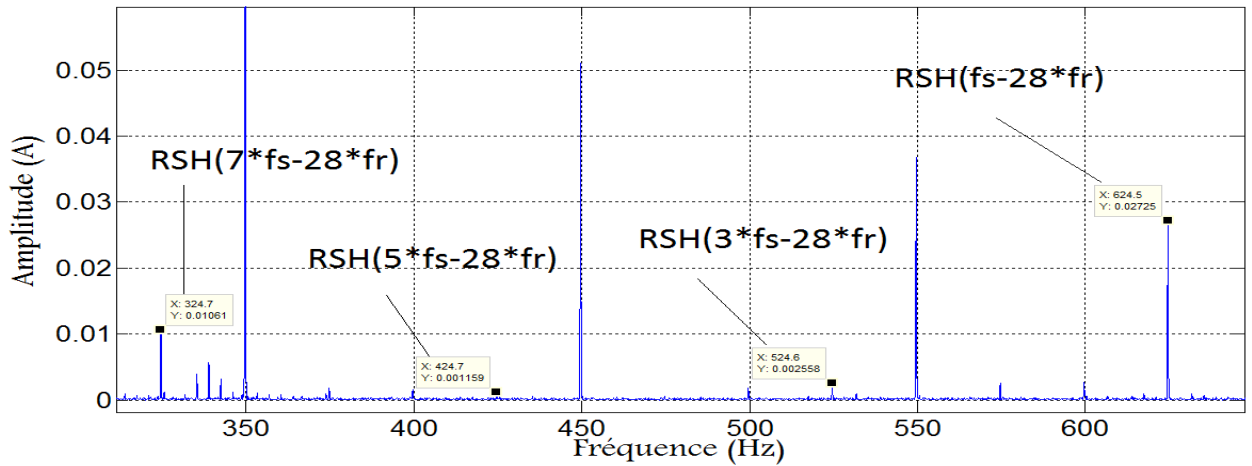
Nous exposons sur la figure (III.5) le spectre du courant statorique pour un fonctionnement à 85% de la charge nominale ($g = 0.036$) avec la représentation les familles des harmoniques (TH, RSH, EFH, RBFH et Fo).

Spectre du courant I_a (moteur 3kW) à l'état sain en 85% de la charge nominale



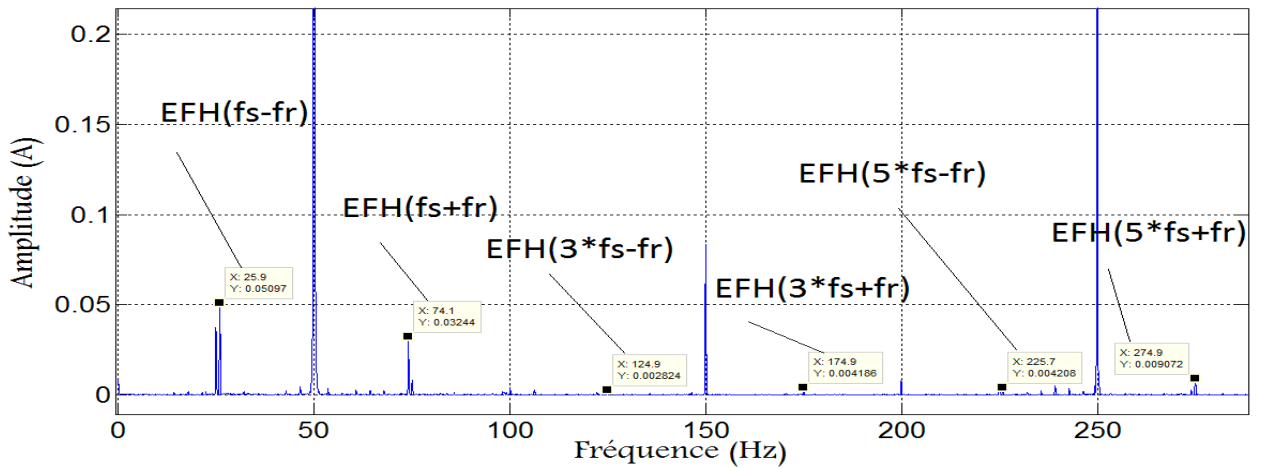
a. Les harmoniques TH

Spectre du courant I_a (moteur 3kW) à l'état sain en 85% de la charge nominale



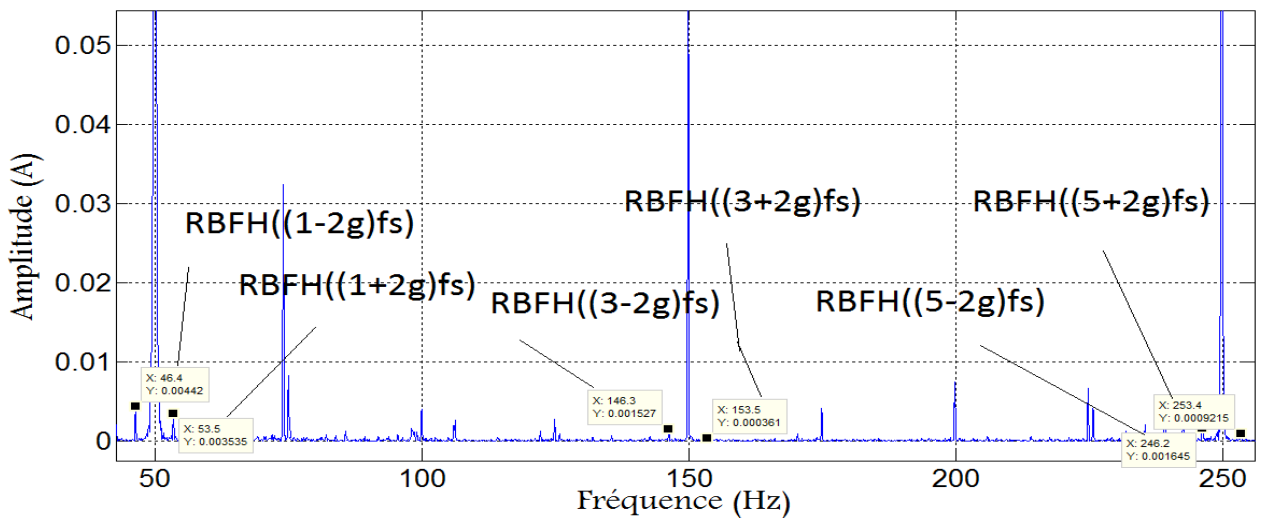
b. Les harmoniques RSH

Spectre du courant I_a (moteur 3kW) à l'état sain en 85% de la charge nominale



c. Les harmoniques EFH

Spectre du courant I_a (moteur 3kW) à l'état sain en 85% de la charge nominale



d. Les harmoniques $RBFH$

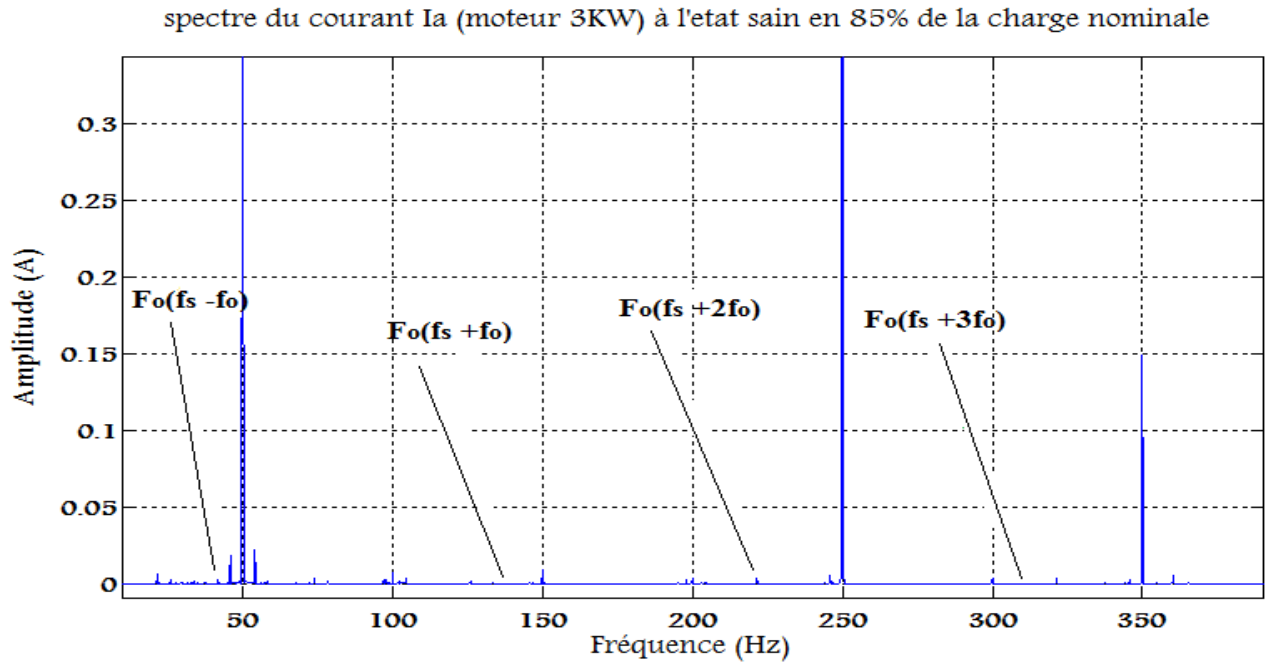


Figure. III.5. Spectre du courant I_a à l'état sain en 85% de la charge nominale, avec les quatre familles des harmoniques (**a.** TH, **b.** RSH, **c.** EFH, **d.** RBFH et **e.** fo).

On remarque que le spectre de courant d'une phase statorique est toujours riche en harmoniques même à l'état sain. Ceci est dû à l'asymétrie résiduelle de la machine ainsi que l'existence de certain niveau de déséquilibre dans les tensions l'alimentation.

III.4. ETUDE DE SPECTRE DU COURANT STATORIQUE AVEC DEFECT ROULEMENT

Le même banc d'essai d'écrit précédemment a été utilisé pour étudier expérimentalement le défaut roulement. Pour chaque essai, on a enregistré les trois courants d'alimentation selon les états suivants :

La figure (III.6) : 85% de la charge nominale pour différents état (Es, déf. Roul, déf. Exc. mixte).

La figure (III.7) : 50% de la charge nominale pour différents état (Es, déf. Roul, déf. Exc. mixte).

La figure (III.8) : 20% de la charge nominale pour différents état (Es, déf. Roul, déf. Exc. mixte).

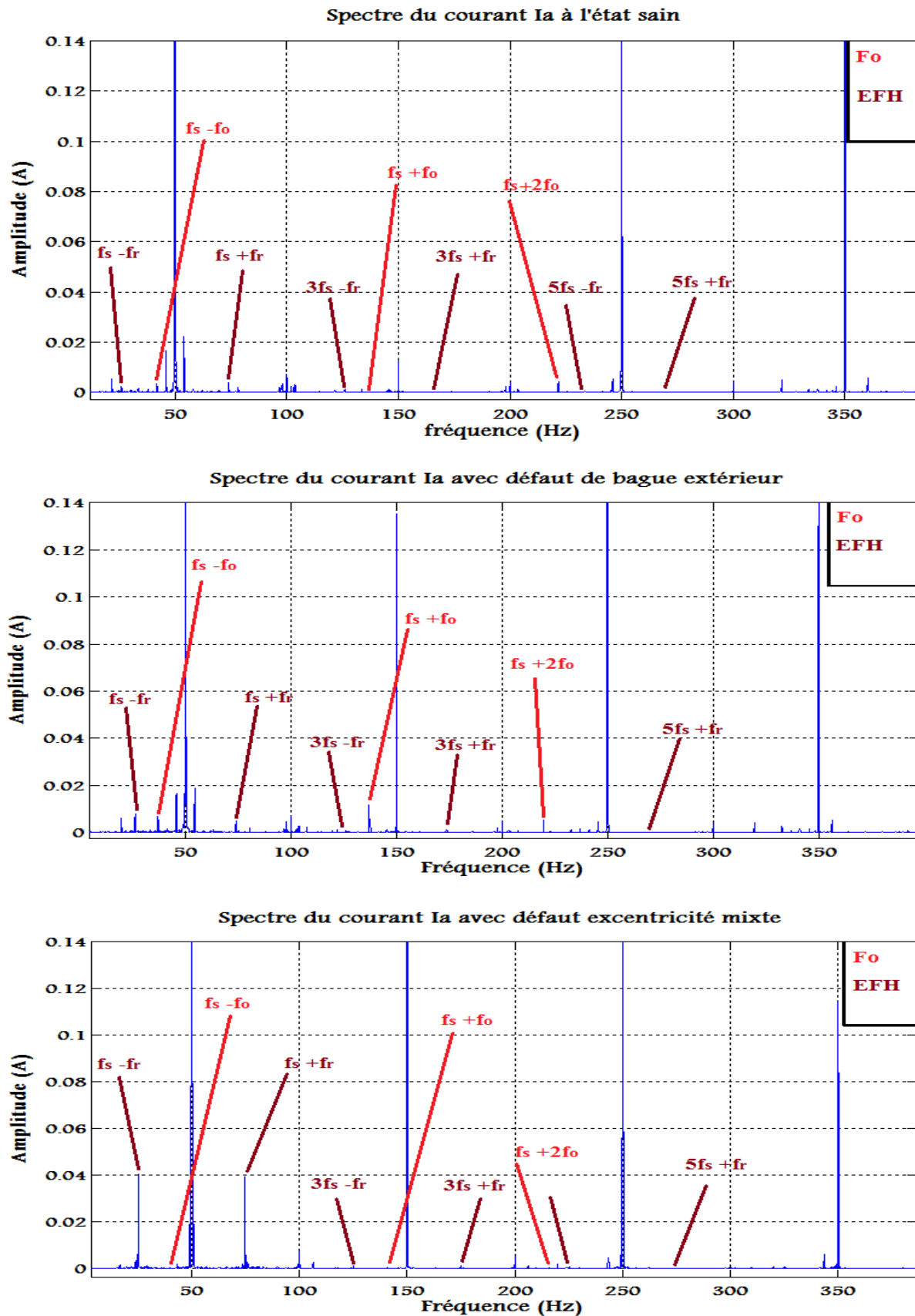


Figure. III.6. Spectre du courant I_a pour 85% de la charge nominale à différents cas.

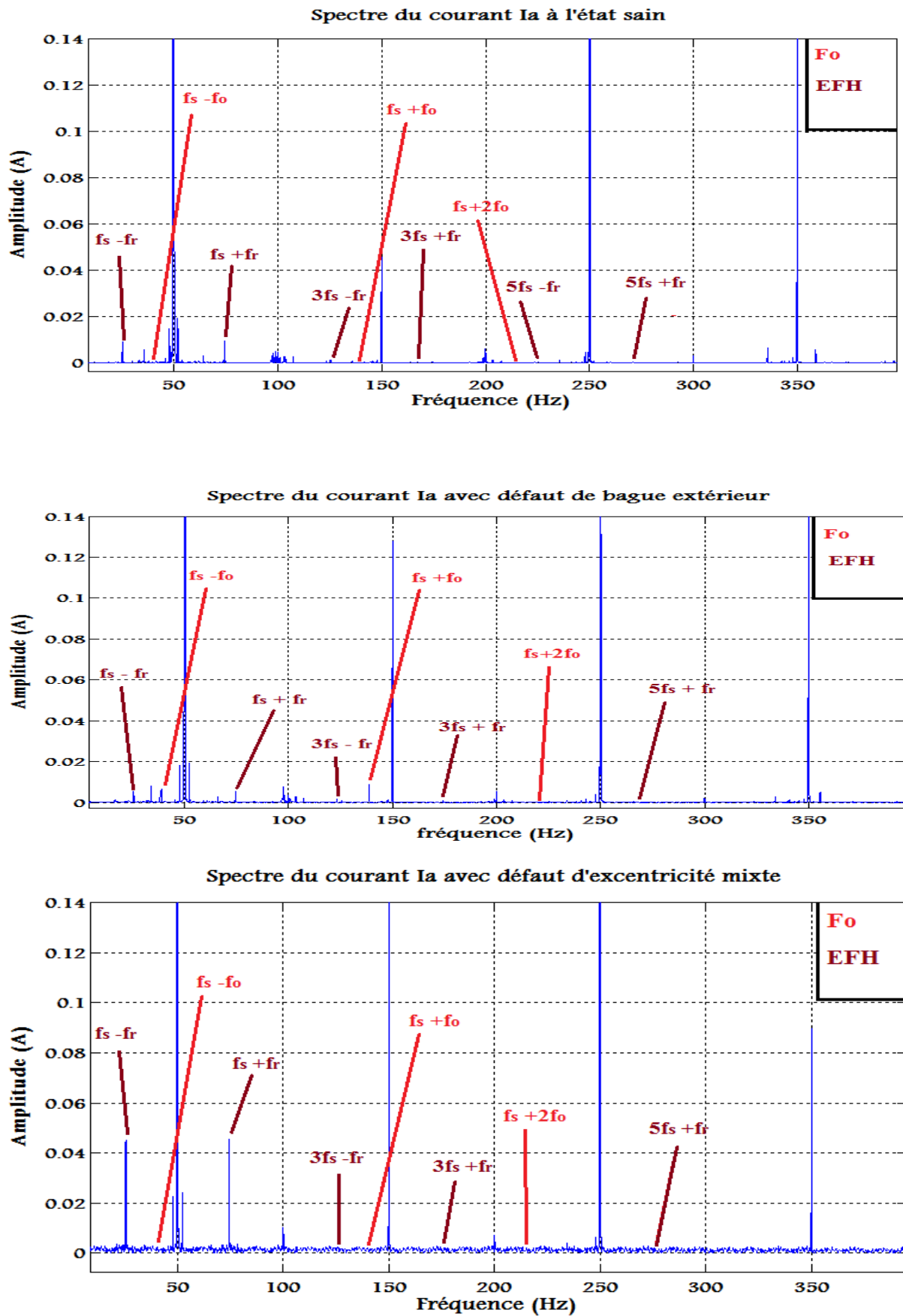


Figure. III.7. Spectre du courant I_a pour 50% de la charge nominale à différents cas

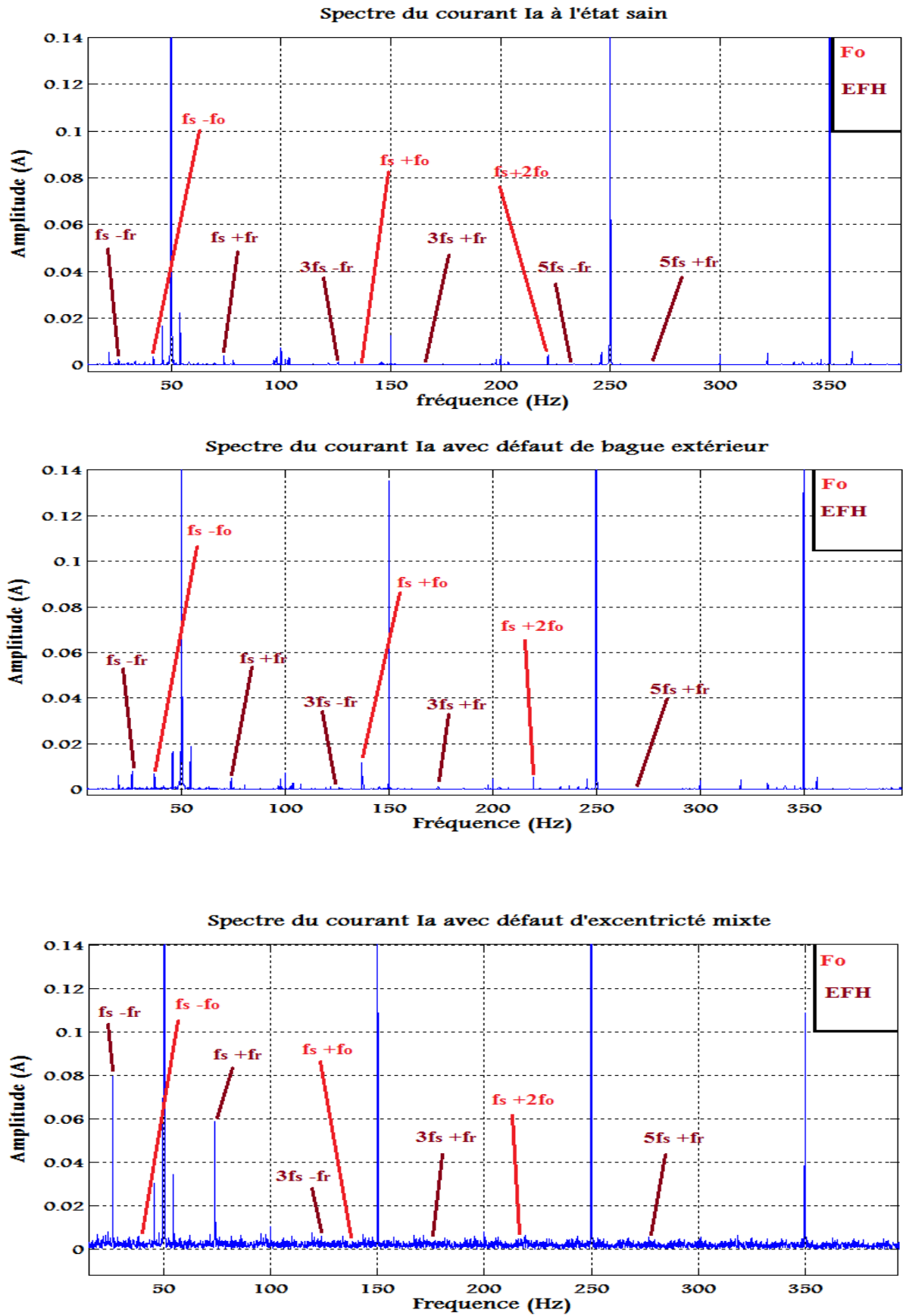


Figure. III.8. Spectre du courant I_a pour 20% de la charge nominale à différents cas

Les tableaux suivants résument l'influence des défauts de roulement et l'excentricité mixte sur les cinq familles des harmoniques (TH, RSH, EFH, RBFH et Fo).

1/ $f_{TH} = (2k + 1)f_s$

50% de la charge, fs= 50, g = 0.02							
	Fréquence théorique	Fréquence			Amplitude		
		Etat sain	Def BE	Déf EM	Etat sain	Def BE	Déf EM
1*fs	50	50	50	50	8.38	8.34	7.8
3*fs	150	150	150	150	0.037	0.13	0.156

La charge 85% fr = 24.1 ,g = 0.036							
	Fréquence théorique	Fréquence			Amplitude		
		Etat sain	Def BE	Déf EM	Etat sain	Def BE	Déf EM
1*fs	50	50	50	50	10.18	10.09	9.32
3*fs	150	150	150	150	0.009	0.13	0.123

2/ $f_{RSH} = (2k + 1)f_s \pm N_r + f$

50% fr=24.5 ,g=0.02 , Nr=28 barres							
	Fréquence théorique	Fréquence			Amplitudes		
		Etat sain	Def BE	Déf EM	Etat sain	Def BE	Déf EM
1*fs+Nr*fr	736	735.4	733.8	734.6	0.038	0.0342	0.0527
1*fs-Nr*fr	636	635.4	633.8	634.6	0.0606	0.0736	0.0572
3*fs+Nr*fr	836	835.3	833.8	834.5	0.0706	0.0517	0.0633
3*fs-Nr*fr	536	535.5	533.9	534.6	0.030	0.085	0.0315

La charge 85% fr=24.1 ,g=0.036							
	Fréquence théorique	Fréquence			Amplitude		
		Etat sain	Def BE	Déf EM	Etat sain	Def BE	Déf EM
1*fs+Nr*fr	719.4	717.4	719.5	718.7	0.026	0.0348	0.055
1*fs-Nr*fr	619.4	617.4	619.6	618.7	0.148	0.141	0.146
3*fs+Nr*fr	819.4	817.3	819.5	818.7	0.129	0.1112	0.126
3*fs-Nr*fr	519.4	517.6	519.6	518.7	0.046	0.0402	0.055

3/ $f_{EFH} = (2k + 1)f_s \pm f_r$

La charge 50% fr=24.5 ,g=0.02							
	Fréquence théorique	Fréquence			Amplitude		
		Etat sain	Def BE	Déf EM	Etat sain	Def BE	Déf EM
1*fs+fr	74.4	74.4	74.4	74.4	0.027	0.005	0.034
1*fs-fr	25.6	25.5	25.6	25.5	0.032	0.005	0.042
3*fs+fr	174.4	174.4	174.5	174.2	0.0003	0.001	0.0007
3*fs-fr	125.6	124.3	125.6	124.3	0.008	0.001	0.0005

La charge 85% fr = 24.1 ,g = 0.036							
	Fréquence théorique	Fréquence			Amplitude		
		Etat sain	Def BE	Déf EM	Etat sain	Def BE	Déf EM
1*fs+fr	73.8	73.8	73.9	73.8	0.071	0.004	0.070
1*fs-fr	26.2	26.1	26.1	26.1	0.096	0.008	0.096
3*fs+fr	173.8	173.7	173.9	173.7	0.001	0.001	0.0004
3*fs-fr	126.2	126	126.1	126	0.0004	0.001	0.0001

$$4/ f_{RBFH} = ((2k + 1) + 2g)f_s$$

La charge 50% ,fr=24.5 ,g=0.02							
	Fréquence théorique	Fréquence			Amplitude		
		Etat sain	Def BE	Déf EM	Etat sain	Def BE	Déf EM
(1+2g)fs	52	52	52.3	52.4	0.017	0.02	0.002
(1-2g)fs	48	48	47.7	48.2	0.012	0.01	0.0013
(3+2g)fs	152	152	152.1	151.8	0.0001	0.0001	0.0001
(3-2g)fs	148	148	147.7	147.6	0.0005	0.001	0.005

La charge 85% fr=24.1 ,g=0.036							
	Fréquence théorique	Fréquence			Amplitude		
		Etat sain	Def BE	Déf EM	Etat sain	Def BE	Déf EM
(1+2g)fs	54	54.1	54.4	54.2	0.022	0.01	0.012
(1-2g)fs	46	45.9	45.6	45.8	0.018	0.01	0.145
(3+2g)fs	154	154.1	154.2	154.3	0.0003	0.0002	0.0003
(3-2g)fs	146	145.9	145.7	145.4	0.0012	0.0009	0.0004

$$5/ f_o = (f_s \pm k * f_o) \quad ; \quad f_o = 0.4N_b f_r$$

La charge 50% ,fr=24.5 ,g=0.02 , Nb =9					
	Fréquence théorique	Fréquence		Défaut bague extérieur	
		Etat sain	Amplitude	Fréquence	Amplitude
fs + fo	137.12	137.2	0.0001	137.9	0.0109
fs - fo	37.12	37	0.0003	37.9	0.008
fs + 2fo	224.24	224.6	0.0003	224.7	0.0001
fs - 2fo	124.24	125.7	0.001	125.8	0.001

La charge 85% fr=24.1 ,g=0.036					
	Fréquence théorique	Fréquence		Défaut bague extérieur	
		Etat sain	Amplitude	Fréquence	Amplitude
fs + fo	136.04	136.3	0.0003	136.9	0.011
fs - fo	36.04	36.3	0.0002	36.9	0.006
fs + 2fo	222.08	221.7	0.004	219.6	0.005
fs - 2fo	122.08	122	0.0004	121.7	0.001

Avec : $k = 0, 1, 2, 3, \dots$; $f_s = 50\text{Hz}$; $N_r = 28$ barres ; g : le glissement ; f_r : fréquence de rotation

Ces tableaux montrent clairement que les amplitudes de certains harmoniques appartenant à la famille **Fo** augmentent sensiblement suite à la présence d'un défaut dans le roulement (bague extérieure). La même remarque pour les harmoniques EFH qui s'avèrent très sensibles à l'apparition d'un défaut d'excentricité mixte. Ceci confirme et valide les résultats théoriques obtenus par l'étude analytique.

III.5. LES INDICATEURS DES DEFAUTS DE ROULEMENT ET D'EXCENTRICITE

Comme nous l'avons dit précédemment, les méthodes de diagnostic appartenant à l'approche signal suppose que la présence d'un défaut ou une anomalie dans une partie de la machine asynchrone fait créer ou modifier les amplitudes de certains harmoniques dans le spectre des signaux tels que le courant statorique, le couple, le flux axial,....

Pour prendre une décision sur l'état d'une machine asynchrone à cage, l'opérateur de diagnostic doit suivre l'évolution de certains indicateurs de défauts. Un indicateur est un quantificateur issu d'un signal dont l'acquisition est possible lors du fonctionnement. Il doit caractériser l'état et les performances de la machine surveillée. Généralement les indicateurs des défauts ont une relation directe avec les signatures du défaut concerné [5].

Dans notre cas, on a étudié les défauts de roulement et d'excentricité mixte. Notre étude analytique a montrée clairement que ces défauts sont caractérisés par une famille des signatures spectrales appelée respectivement : **Fo** et **EFH**. Comme il existe une infinité des signatures pour ce défaut, il est possible également de définir une infinité des indicateurs pour ces défauts, mais on va limiter cette étude seulement sur les indicateurs les plus connus et les plus utilisés. Via une recherche bibliographique étendue, on a arrivé à définir deux indicateurs pour le défaut de roulement et trois indicateurs pour le défaut d'excentricité :

➤ Les indicateurs de défaut la bague extérieure

$$I_{n1} = \frac{A(fs+fo)}{A_{fs}} \quad ; \quad I_{n2} = \frac{A(fs+fo)_{Act} - A(fs+fo)_{Réf}}{A(fs+fo)_{Réf}}$$

➤ Les indicateurs de défaut d'excentricité mixte

$$I_{n3} = \frac{A(fs+fr)_{Act} - A(fs+fr)_{réf}}{A(fs+fr)_{Réf}} ;$$

$$I_{n4} = \frac{A(fs-fr)_{Act} - A(fs-fr)_{réf}}{A(fs-fr)_{Réf}} ;$$

$$I_{n5} = \frac{\sum A(fs\pm fr)_{Act} - \sum A(fs\pm fr)_{réf}}{\sum A(fs\pm fr)_{réf}}$$

Avec :

A(fs + fo) : Amplitude de l'harmonique de fréquence(**fs + fo**).

A(fs – fo) : Amplitude l'harmonique de fréquence(**fs – fo**).

A(fs + fr). : Amplitude l'harmonique de fréquence(**fs + fr**).

A(fs – fr) : Amplitude l'harmonique de fréquence(**fs – fr**).

A_{fs} = amplitude l'harmonique fondamentale de fréquence fs.

III.5.1. Influence du défaut rotorique sur les différents indicateurs

III.5.1.1. Tableau des indicateurs

Les inducteurs	La charge		Etat sain	Défaut bague extérieure
$I_{n1} = \frac{A(fs+fr)}{A_{fs}} * 100\%$ <p>A_{In1} : Amplitude des indices (I_{n1}) Δ_{In1} : Le taux de variation sur l'indice (I_{n1})</p>	0%	A_{In1}	5.082*10 ⁻³	0.064
		Δ_{In1}	0	12493.46
	20%	A_{In1}	3.579*10 ⁻³	0.095
		Δ_{In1}	0	26443.72
	50%	A_{In1}	1.086*10 ⁻³	0.119
		Δ_{In1}	0	109476.42
	85%	A_{In1}	2.946*10 ⁻³	0.109
		Δ_{In1}	0	36974.82
$I_{n2} = \frac{A(fs+fo)_{Act} - A(fs+fo)_{réf}}{A(fs+fo)_{Réf}} * 100$	0 %		0	1125
	20%		0	2566.66
	50%		0	10800
	85%		0	3566.66

Les inducteurs	La charge	Etat sain	Défaut excentricité mixte
$I_{n3} = \frac{A(fs+fr)_{Act} - A(fs+fr)_{réf}}{A(fs+fr)_{Réf}} * 100$	0%	0	180.76
	20%	0	71.42
	50%	0	2.32
	85%	0	15.27
$I_{n4} = \frac{A(fs-fr)_{Act} - A(fs-fr)_{réf}}{A(fs-fr)_{Réf}} * 100$	0%	0	140.66
	20%	0	90.47
	50%	0	40
	85%	0	19.82
$I_{n5} = \frac{\sum A(fs\pm fr)_{Act} - \sum A(fs\pm fr)_{réf}}{\sum A(fs\pm fr)_{réf}} * 100$	0%	0	133.33
	20%	0	9.19
	50%	0	50.84
	85%	0	17.96

Tab. III.4. Les indicateurs de défaut du roulement.

Le tableau ci-dessus montre que la présence d'un défaut dans le roulement influe d'une manière différente sur tous les indices définis précédemment. Il est clair que les variations dans les amplitudes de ces indices dépendent de plusieurs facteurs tels que : l'apparition du défaut et le régime de fonctionnement.

En conséquence et vue le grand nombre des indicateurs du défaut de roulement, une question importante se pose ici :

Quel est le (ou les) meilleur indicateur qui peut donner une information exacte sur l'état de la machine ?

Pour répondre à cette question, on est obligé de faire une étude comparative entre les indicateurs définis précédemment. Une bonne étude comparative nécessite de définir plusieurs critères de comparaison; pour cela, on a défini trois critères :

- Sensibilité à l'apparition du défaut.

- Sensibilité au régime de fonctionnement.

III.5.12. Les courbes des indices

A. Sensibilité à l'apparition du défaut

- A vide :

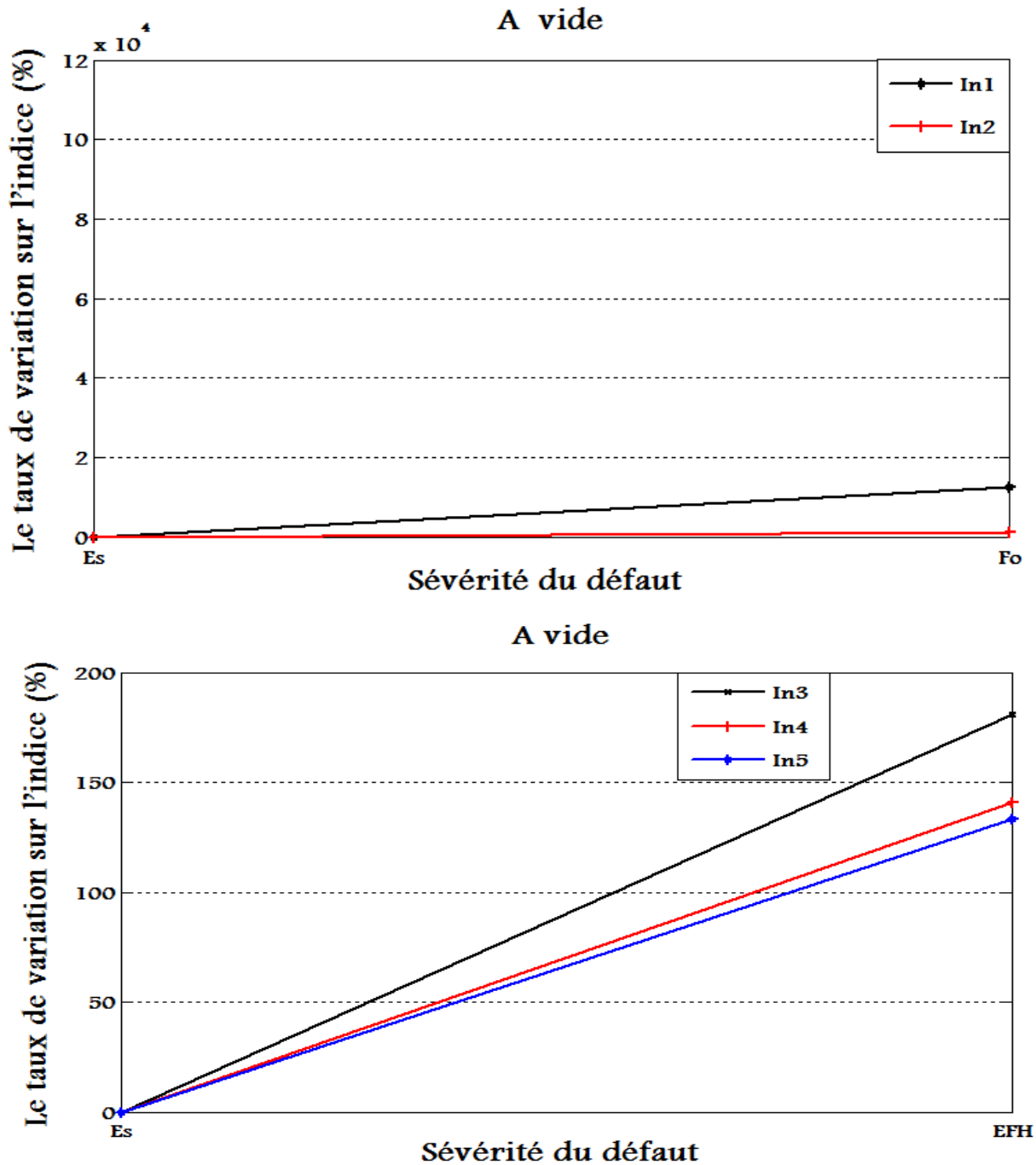


Figure. III.9. Sensibilité à l'apparition du défaut à vide.

- 20% de la charge nominale :

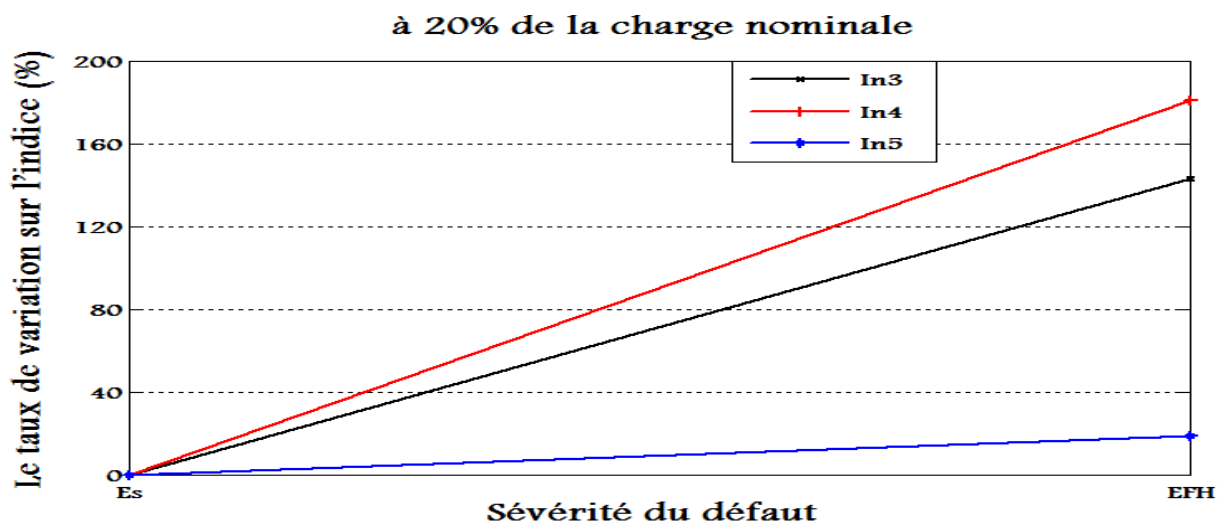
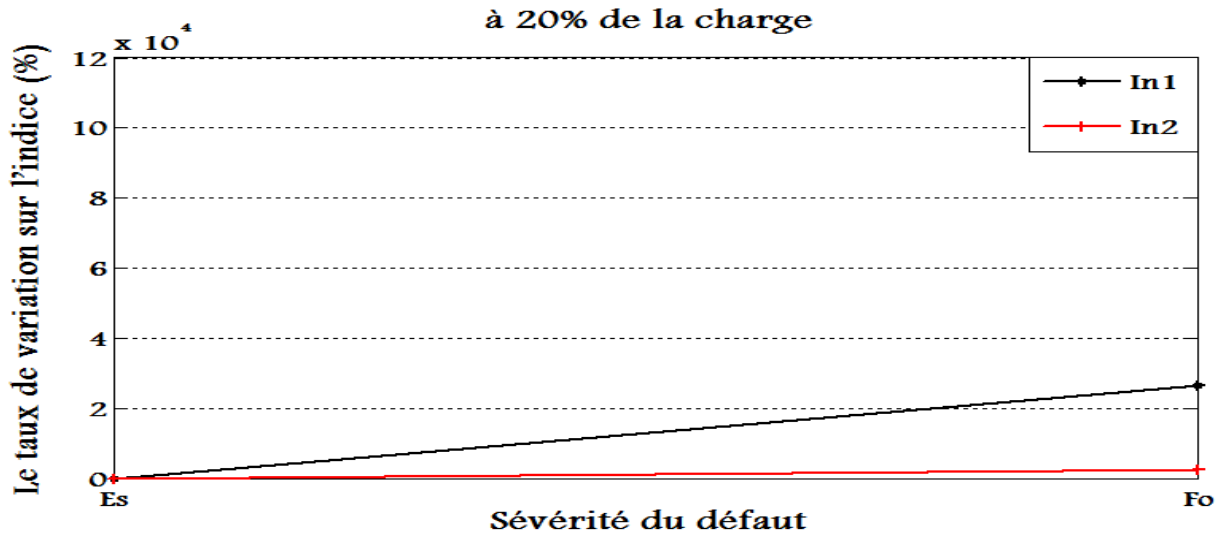
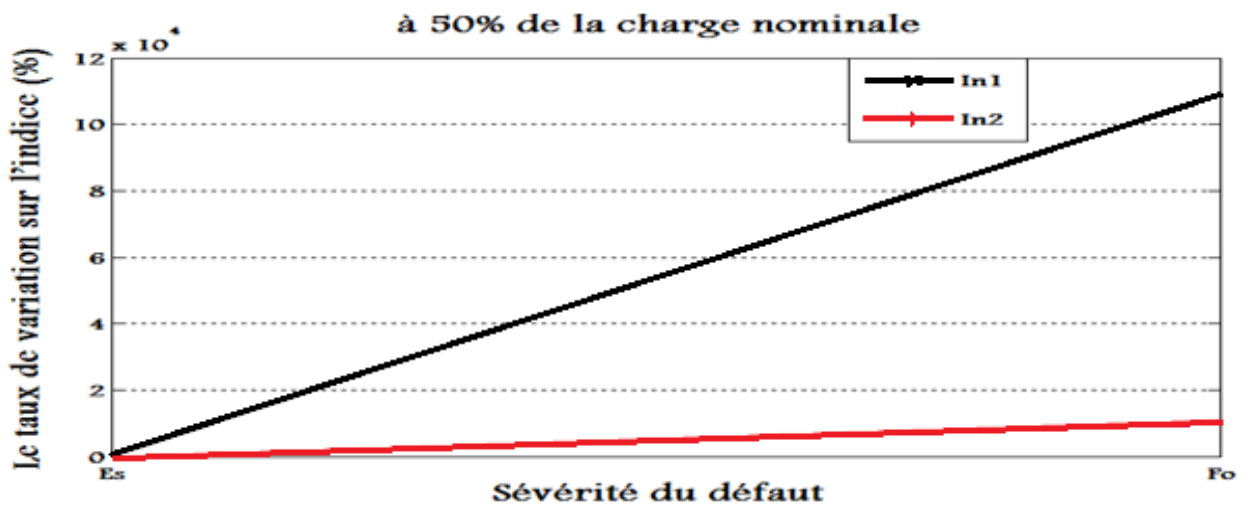


Figure. III.10. Sensibilité à l'apparition du défaut 20% de la charge nominale.

■ 50% de la charge nominale :



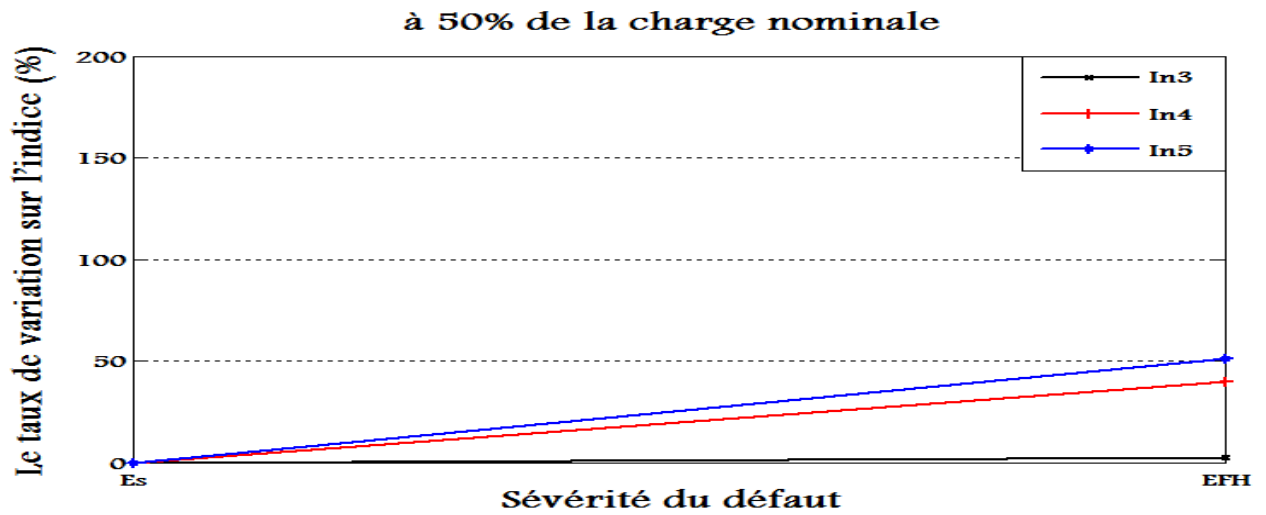


Figure. III.11. Sensibilité à l'apparition du défaut 50% de la charge nominale.

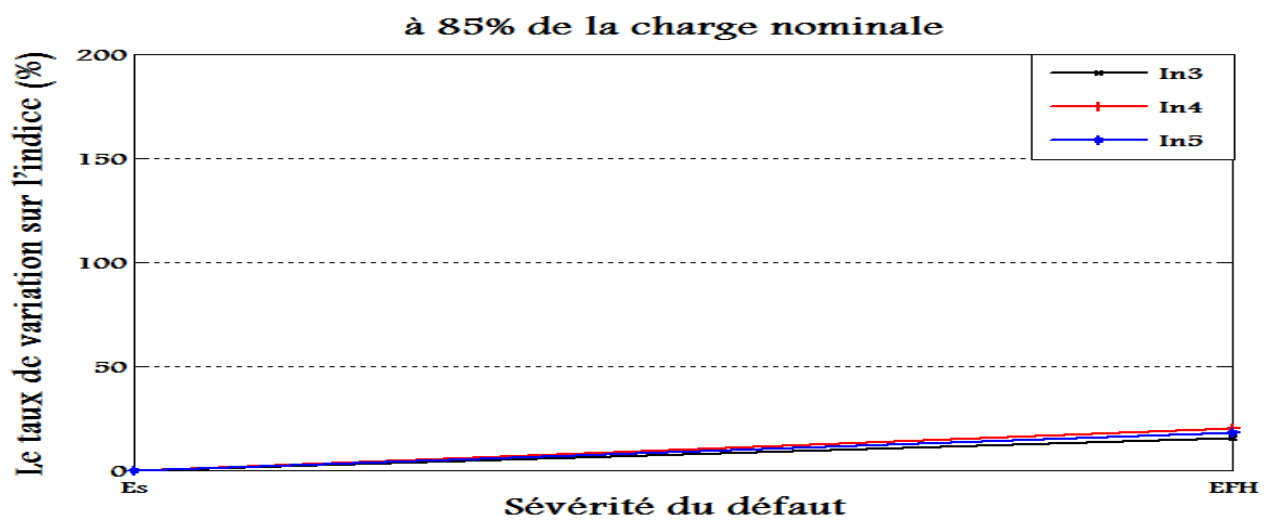
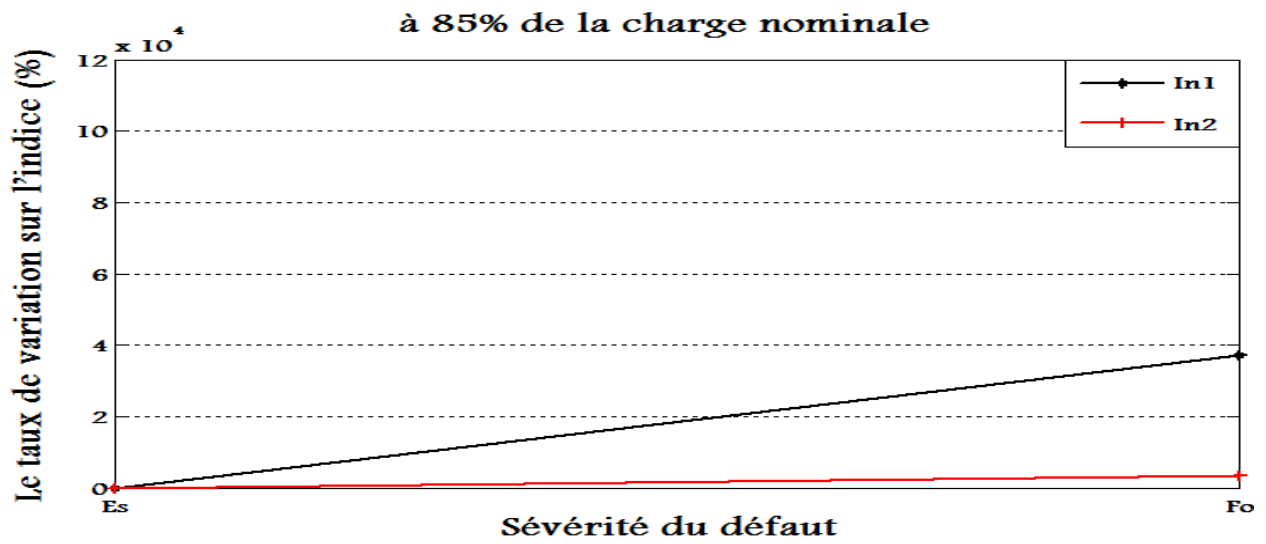


Figure. III.12. Sensibilité à l'apparition du défaut 85% de la charge nominale.

Les figures III.9-12 montrent une comparaison entre les indicateurs définis précédemment du point de vue sensibilité à l'apparition du défaut de roulement. Ce premier critère de comparaison a une importance cruciale, puisque il répond aux besoins des opérateurs du diagnostic que veulent toujours détecter n'importe quelle anomalie dès sa naissance. Un bon indice c'est celui qui augmente rapidement et sensiblement juste à l'apparition d'un défaut.

D'une manière globale, on peut remarquer que la plupart des indicateurs réagissent sensiblement dès la présence d'un problème dans le roulement ou l'EM est ceci pour les trois régimes de fonctionnement étudiés. Cependant, une vérification fine de ces courbes permet de confirmer que l'indice In5 est le moins sensible à la présence du défaut pour tous les régimes de fonctionnement. Les figures précédentes montrent aussi que les taux d'augmentations des indices In1 et In4 sont les plus grands par rapport aux autres, ce qui confirme leur supériorité du point de vue sensibilité à la présence des défauts.

B. Sensibilité au régime de fonctionnement (0%, 20%, 50%, 85%)

▪ Défaut de la bague extérieure

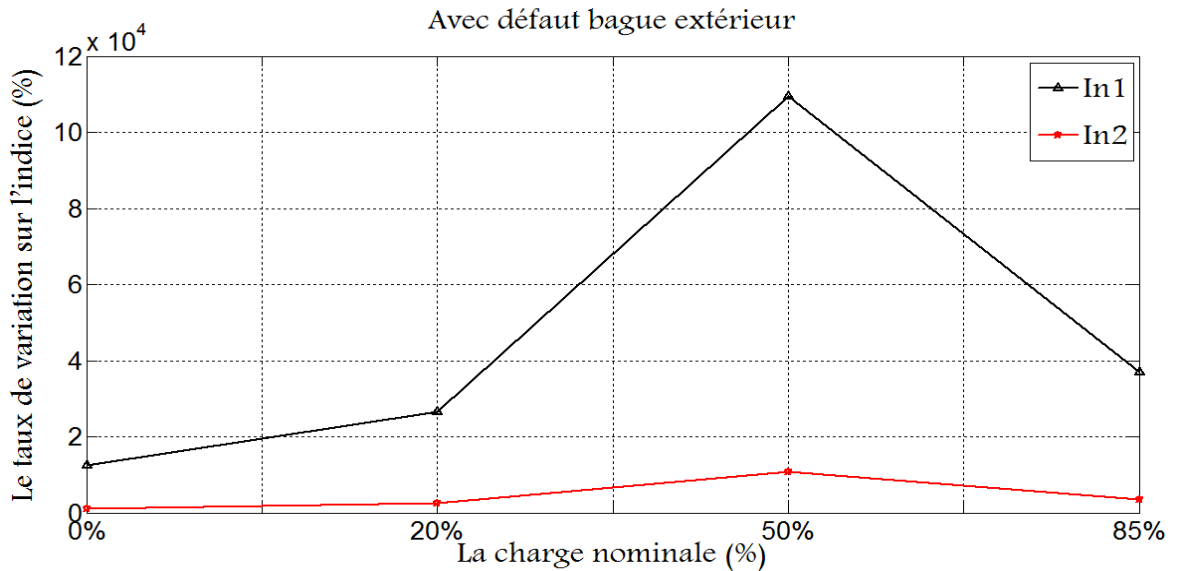


Figure. III.13. Sensibilité au régime de fonctionnement avec bague extérieure.

- Excentricité mixte

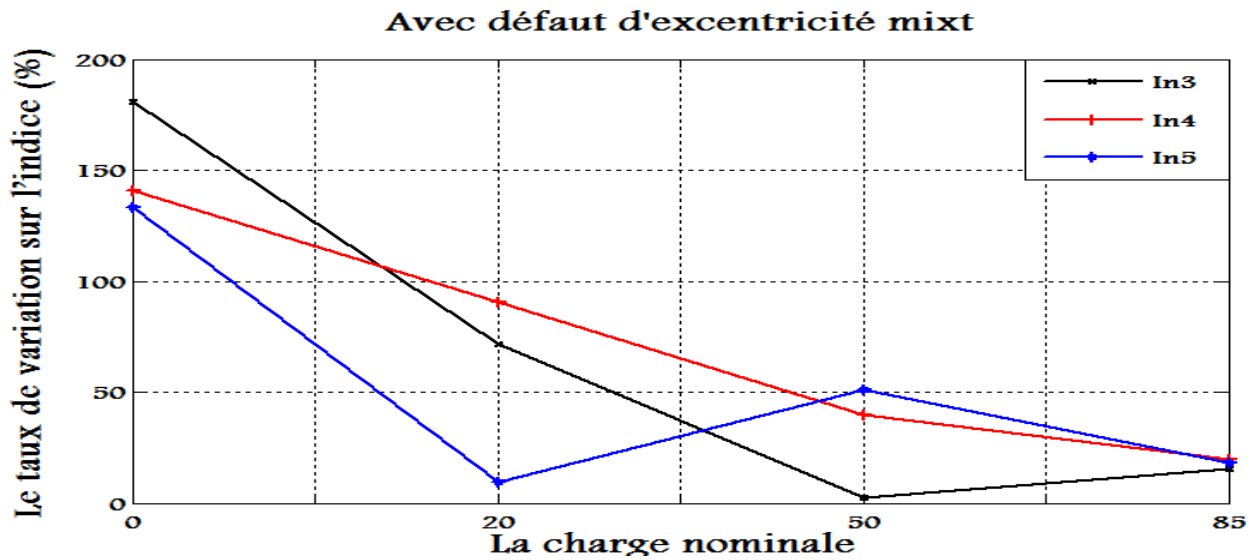


Figure. III.14. Sensibilité au régime de fonctionnement avec excentricité mixte.

Le deuxième critère de comparaison est un critère complémentaire, il permet de tester la fiabilité de l'indice lorsque le régime varie. Un bon indicateur est celui qui dépend légèrement à la variation de régime de fonctionnement.

Les figures III.13-14 montrent l'évolution des indicateurs étudiés pour différentes charges (20% ,50% ,85% du couple nominal) lorsque le moteur comporte un défaut de roulement. On remarque que In4 et In2 sont les indices les plus stables lorsqu'on passe d'un régime à un autre. Par contre, les indices In1, In3 et In5 s'avèrent très dépendant à la variation du régime du fonctionnement.

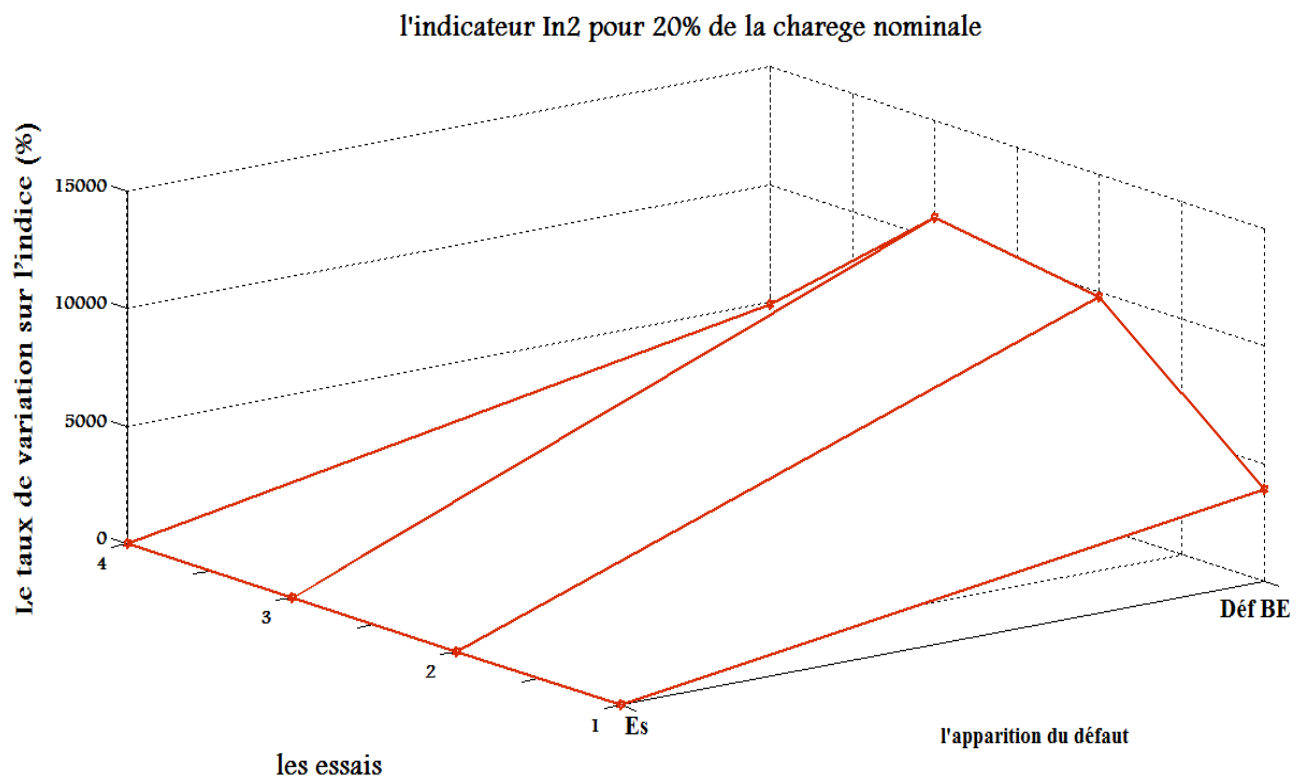
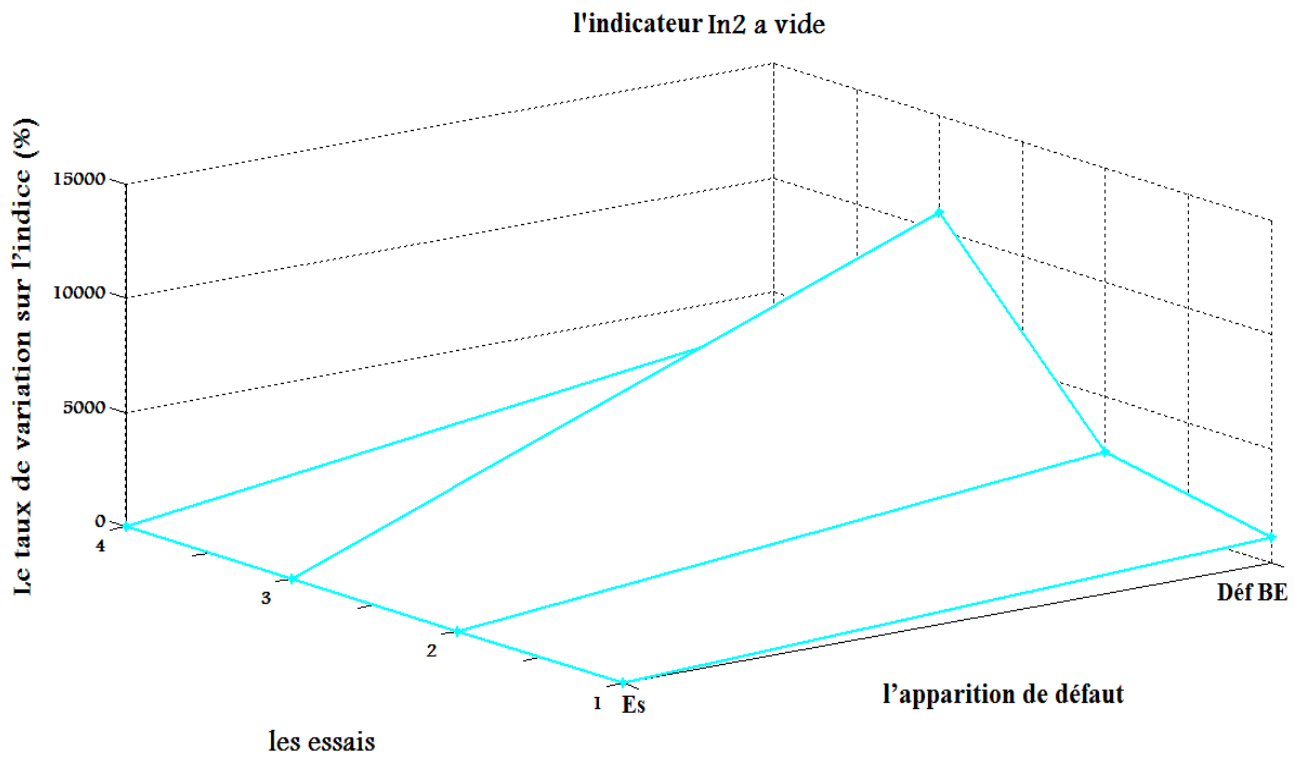
A la fin de cette étude comparative, on peut constater qu'il n'existe pas un indicateur qui satisfait tous les critères d'une façon parfaite, mais on doit faire un compromis pour sélectionner les meilleurs. Donc :

- Le meilleur indicateur pour le défaut de roulement est : **In2**
- Le meilleur indicateur pour le défaut d'excentricité mixte est : **In4**

III.6. TEST DE FIDELITE

A fin de confirmer nos résultats concernant les meilleurs indices sélectionnés, nous avons répété les différents testes plusieurs fois (cinq essais). Les figures III. 15-18, montrent l'évolution de ces indices en trois dimensions. Les résultats obtenus sont en bonnes concordances avec ce qu'on a prévu par l'étude comparative.

III.6.1. Sensibilité à l'apparition du défaut



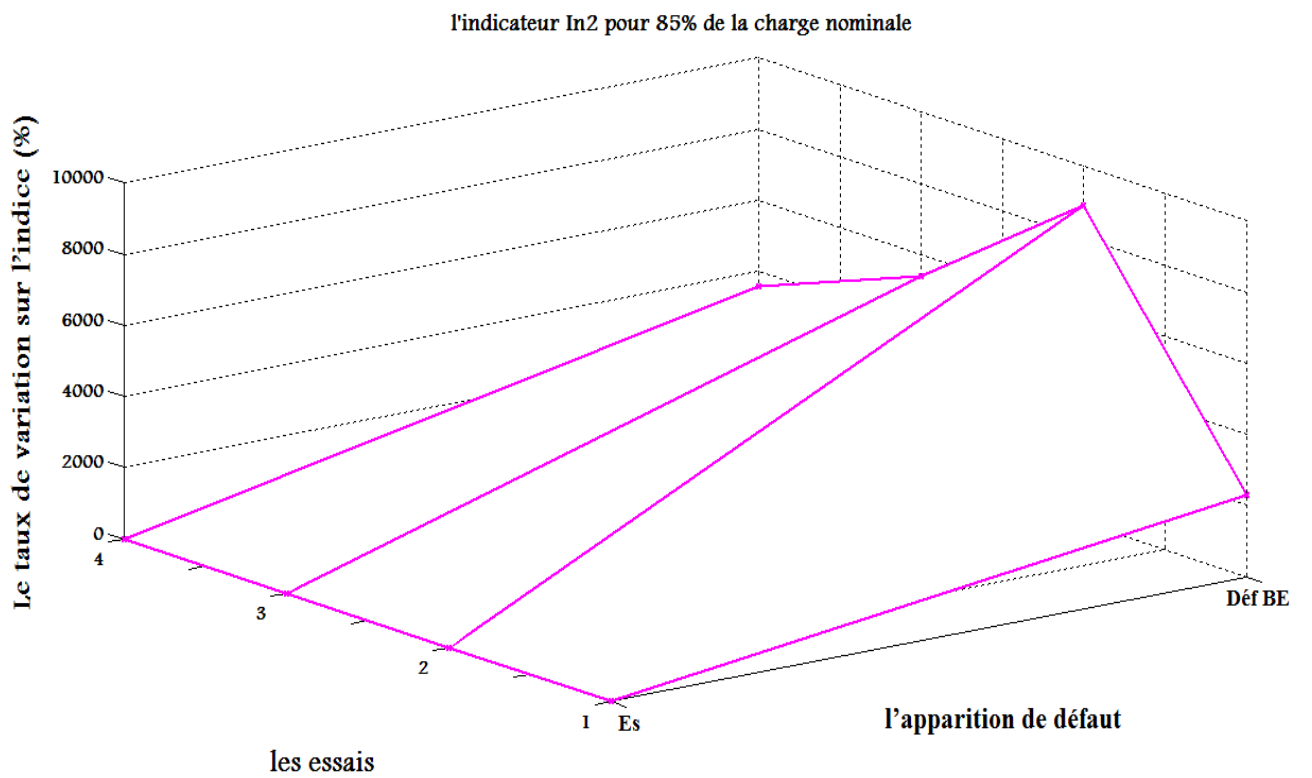
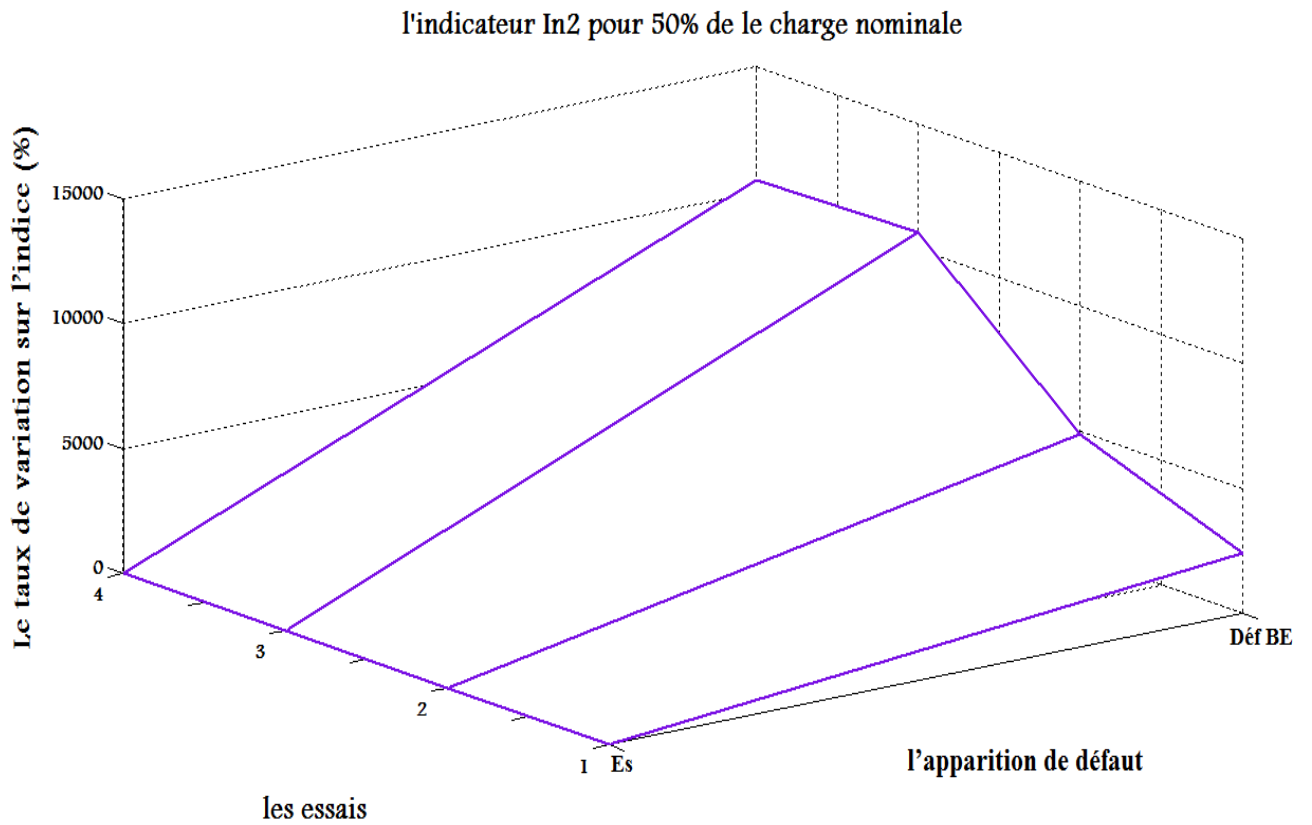
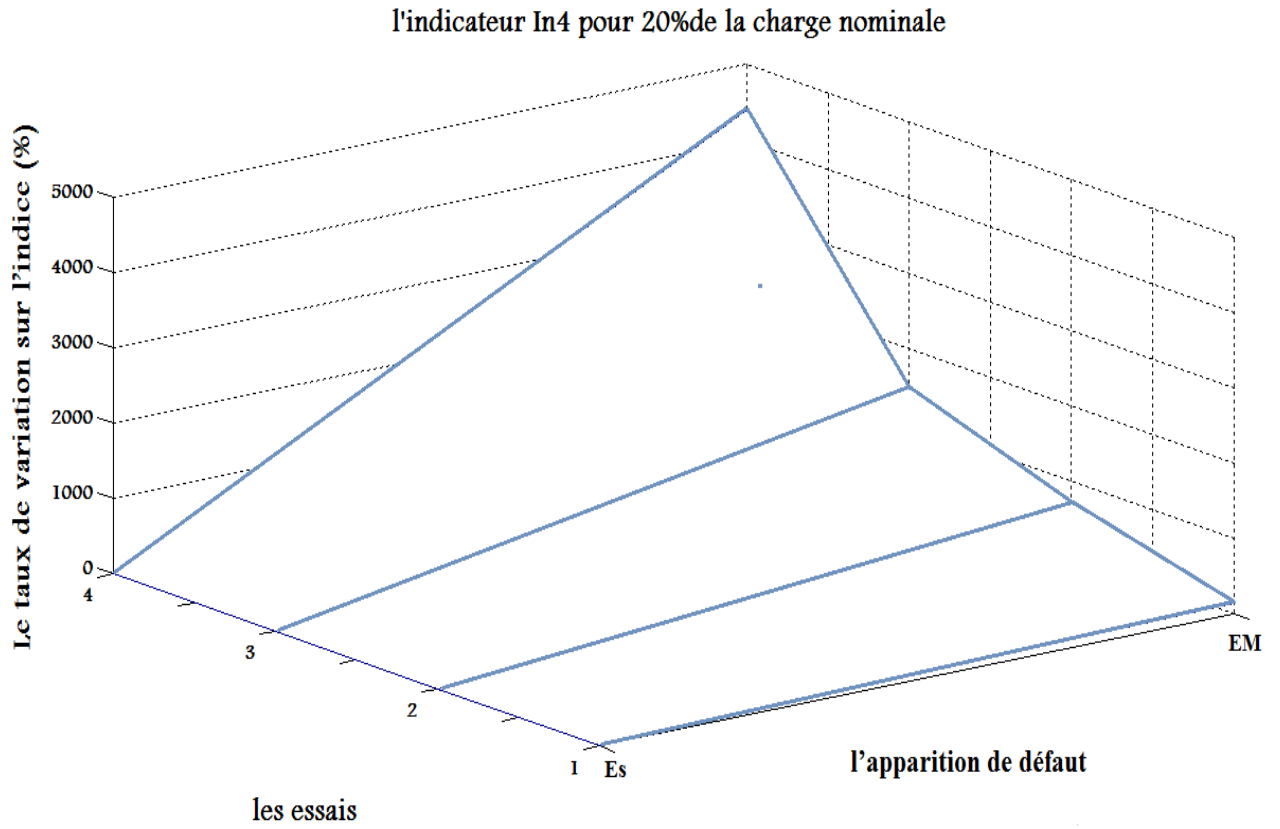
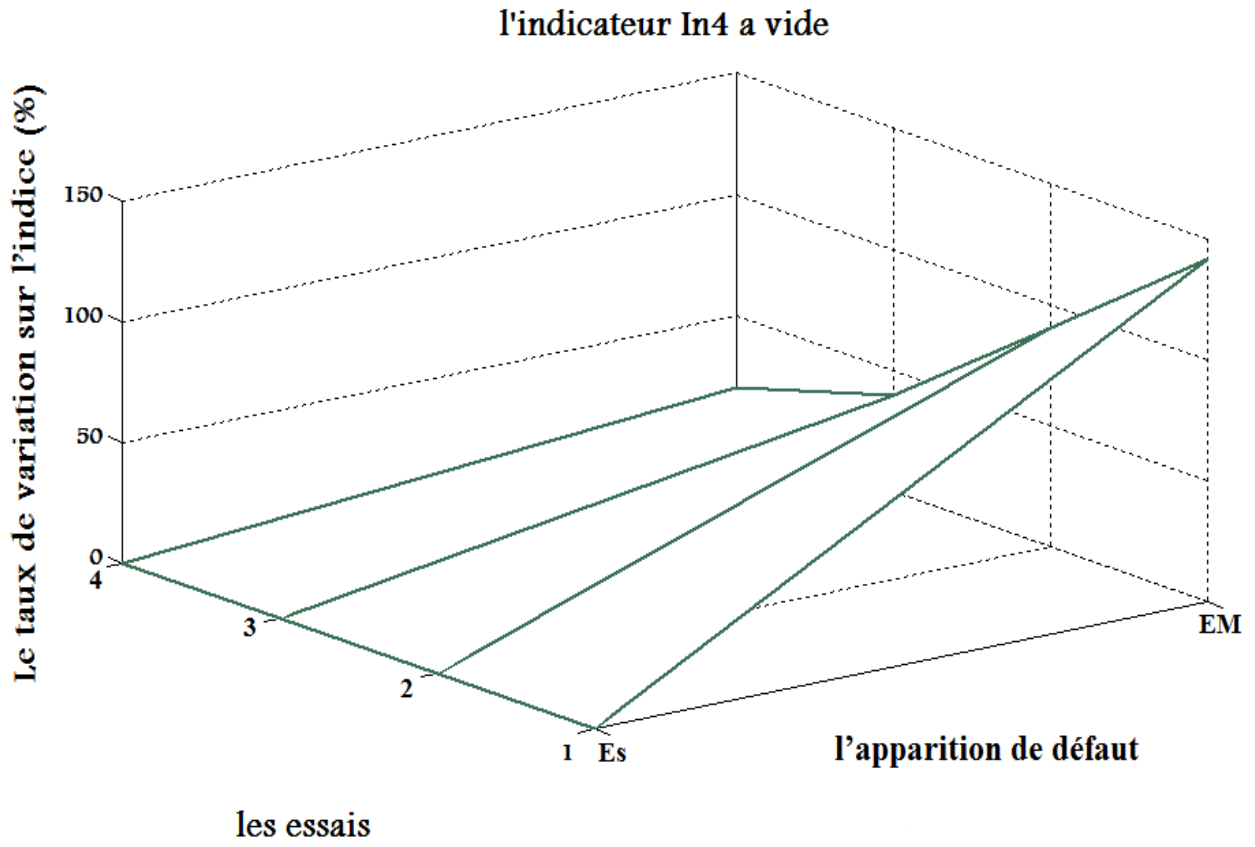


Figure. III.15. Courbes en trois dimensions d'indicateur **In2** pour différents l'essai.



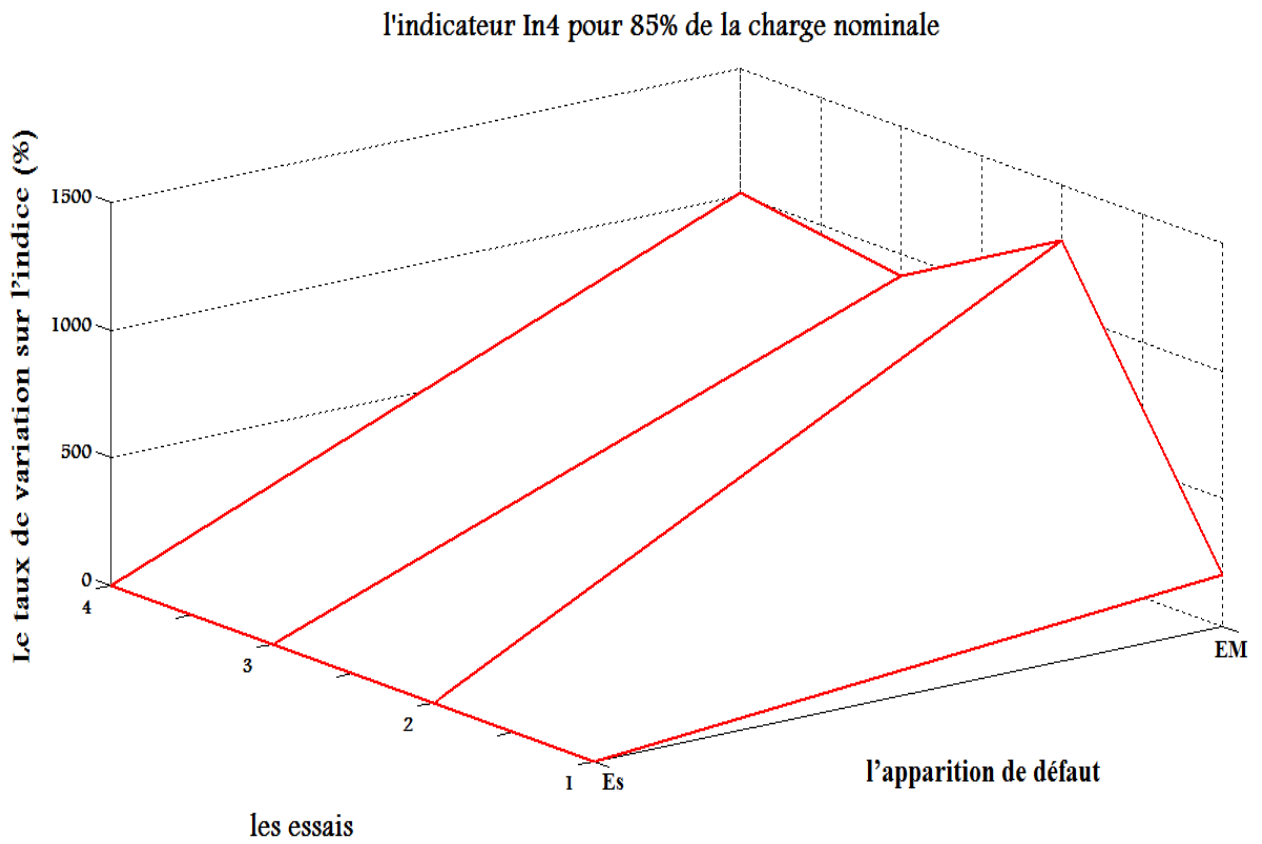
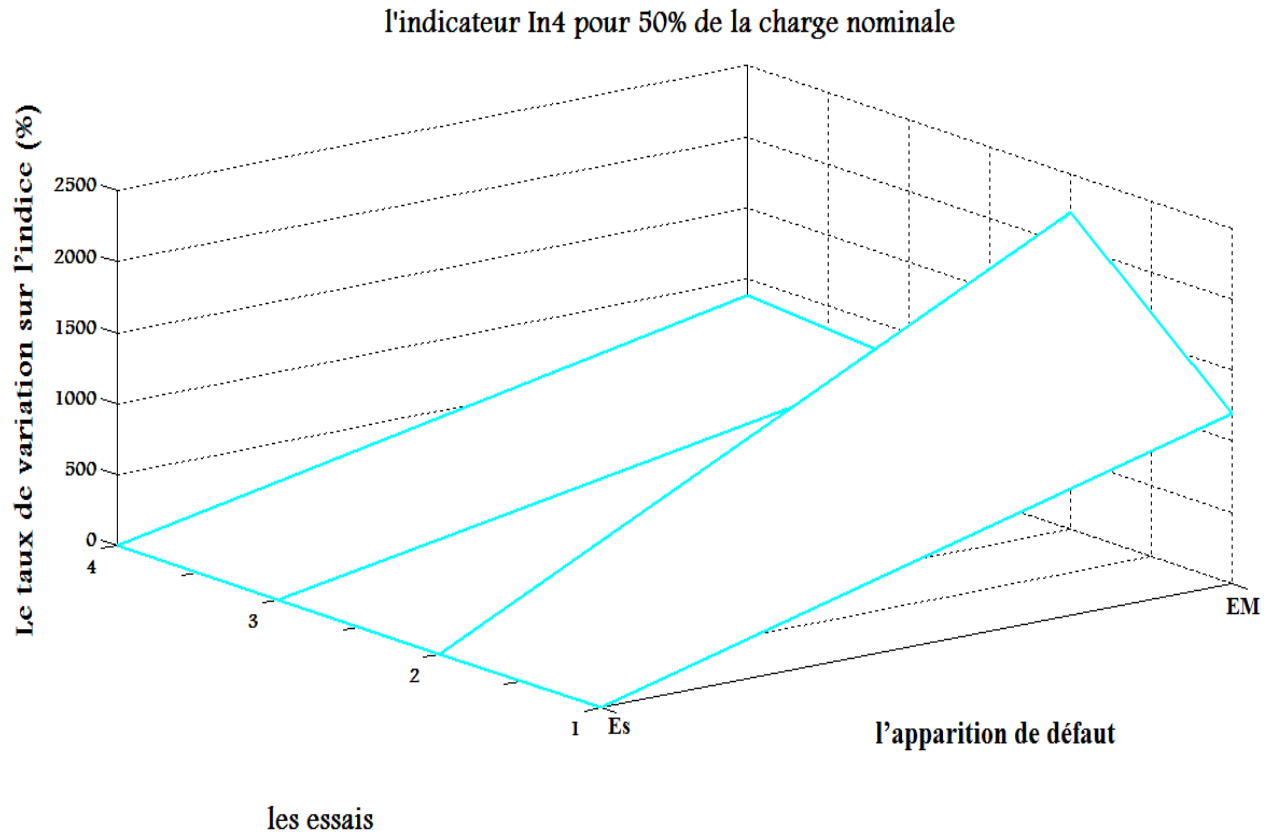


Figure. III.16. Courbes en trois dimensions d'indicateur In4 pour différents l'essai.

III.6.2. Sensibilité au régime de fonctionnement

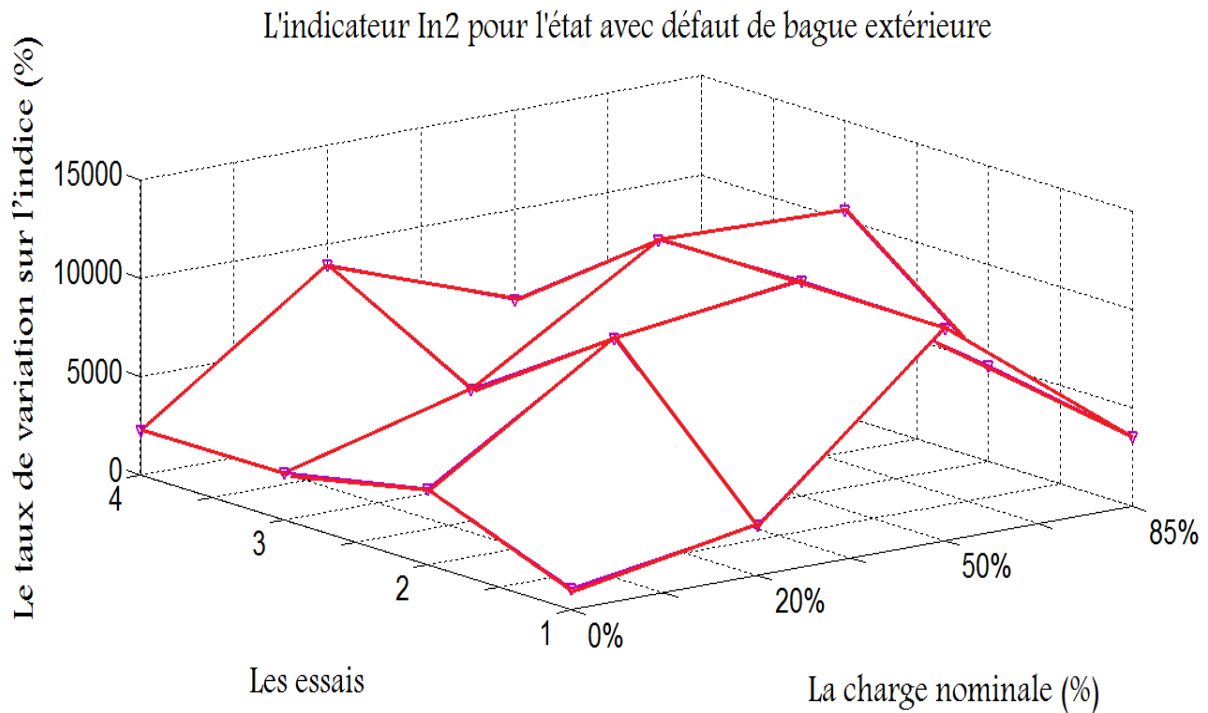


Figure. III.17. Courbes en trois dimensions d'indicateur In2 pour différents l'essai.

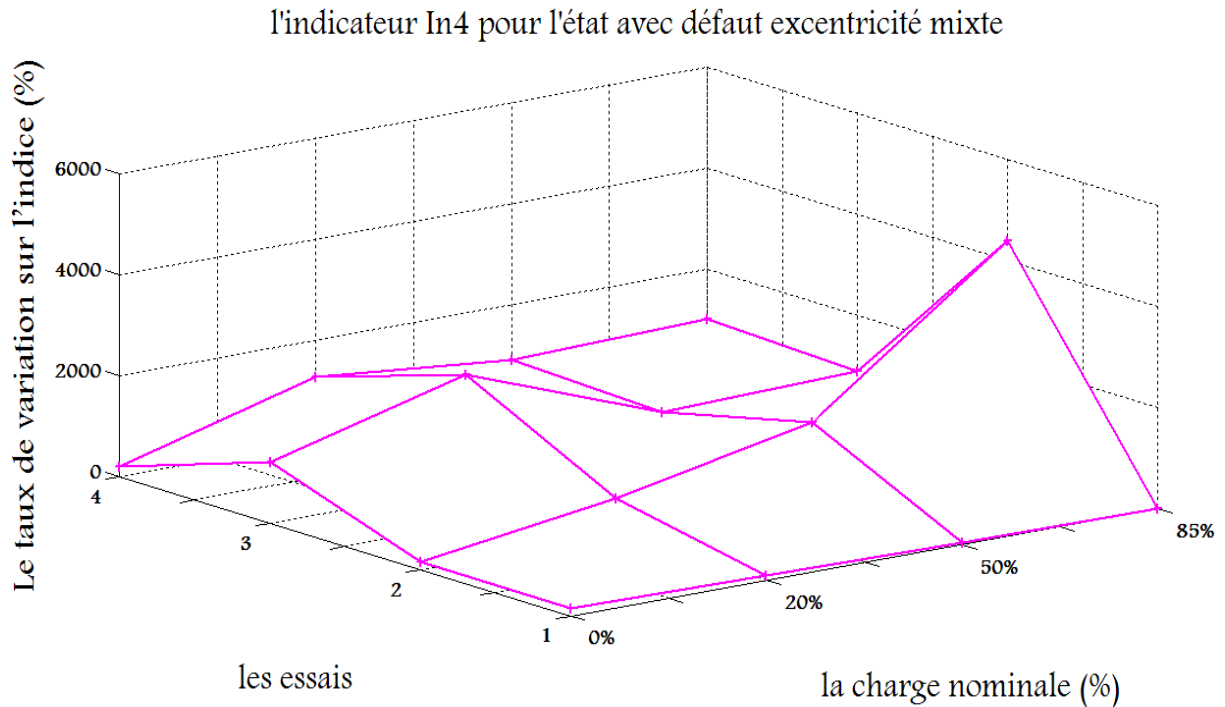


Figure. III.18. Courbes en trois dimensions d'indicateur In4 pour différents l'essai.

III.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a fait une l'étude expérimentale au niveau de laboratoire LGE de Biskra, les résultats ont prouvé ce que nous avons vu dans l'étude analytique, la richesse du spectre du courant statorique en harmoniques à la présence de défaut et même à l'état sain. De plus, on a définie Cinque indicateurs de défauts sur lesquels on a effectué une étude comparative dont le but est de sélectionner les meilleurs indicateurs donnant la bonne information sur l'état de la machine.

CONCLUSION GENERALE

Après avoir dressé un état de l'art sur les défauts, causes, effets et statistiques, nous avons scindé les différentes méthodes de diagnostic de ces défauts, Concernant l'approche signal, la détection des défauts en ligne à partir du courant statorique présente un avantage pratique très intéressant.

Nous avons, dans un premier chapitre, rappelé les éléments de constitution de la machine et de préciser les différents défauts pouvant survenir sur ceux-ci, afin de préciser les différents méthodes de diagnostic des défauts.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié analytiquement le moteur asynchrone triphasé à cage a l'état sain et en présence d'un défaut de roulement, Cette étude nous a conduits à identifier seulement cinq types d'harmoniques: les TH et les RSH et les RBFH lors d'un fonctionnement sain. Et les harmoniques **EFH** et les **Fo** lors d'une présence d'un défaut de roulement.

Nous avons présenté dans le troisième chapitre de l'étude expérimentale au niveau de laboratoire LGE de Biskra, De plus, on a définie cinq indicateurs de défauts sur lesquels on a effectué une étude comparative dont le but est de sélectionner les meilleurs indicateurs donnant la bonne information sur l'état de la machine.

BIBLIOGRAPHIE

[1] : M. SAHRAOUI, " Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones", Thèse de Doctorat, Université Mohamed KHIDER Biskra, 2010.

[2] : Djebala, N.Ouella, N.Hamzaoui et S.Guenfoud, " Application de la transformée en Ondelettes Discrète Dans la Détection des défaut de roulements", Laboratoire de Mécanique et Structures, UNIVERSITE DE GUELMA, B.P. 401 GUELMA, 2007.

[3] : Baptiste TRAJIN, " Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones (Application à la surveillance des roulements à billes)", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 1 Décembre 2009.

[4] : Mohamed El Kamel OUMAAMAR, " Surveillance et Diagnostic des Défauts Rotoriques et Mécaniques de la Machine Asynchrone avec Alimentation Equilibrée ou Déséquilibrée", Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, Nancy-France, 19 Mars 2012.

[5] : F. BENABIDA , M. OUADAH, " Diagnostic de défauts au stator et au rotor par estimation paramétrique de la machine asynchrone à cage d'écureuil", Mémoire de D'Ingénieur d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassan Badi, El-Harrach, Algérie, Juin 2006.