

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

*Etude comparative des indicateurs
des défauts rotoriques dans les MAS
à cage.*

Présenté par :
ACHOUR Houssam
Soutenu le : 05 Juin 2014

Devant le jury composé de :

Mr. GHOGGAL Adel
Mr. SAHRAOUI Mohamed
Mr. DERGHAL Hamid

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

Président
Encadreur
Examinateur

Année universitaire : 2013 / 2014

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

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

MASTER

Thème

**Etude comparative des indicateurs des défauts rotoriques
dans les MAS à cage**

Présenté par :

ACHOUR Houssam

Avis favorable de l'encadreur :

SAHRAOUI Mohamed

Signature

Avis favorable du Président du Jury

GHOGGAL Adel

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 :

Etude comparative des indicateurs des défauts rotoriques dans les MAS à cage

Proposé par : ACHOUR Houssam

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

ملخص :

أصبح التحليل الموجي من الجزء الثابت الحالي للمحرك اللامتزامن (MCSA) هو أسلوب يستخدم على نطاق واسع لتقييم الوضع الصحي للمحرك غير متزامن من أجل تجنب الأعطاب والتدخل فقط عند الضرورة وأثناء إغلاق من خط الإنتاج . يتناول هذا العمل الكشف عن الأخطاء الجزء الدوار في قفص المحركات الغير متزامنة .وتستند هذه التقنية المستخدمة في التحليل الطيفي من الجزء الثابت للمحرك اللاتزامني الحالي (MCSA)الذي ينتمي إلى نهج الإشارة. هذا النهج يفترض أن كل خطأ يترك بصمات طيفية في أطراف إشارات من المحرك. ويتم الكشف عن العيوب عموماً عبر رصد قيم بعض المؤشرات تعرف باستخدام سعة التوافقي للتمييز العطب. في هذا المعنى، وقد وضعت دراسة تحليلية لتحديد التوافقيات المختلفة التي تشكل محتوى الطيفية للتيارات الموالي في حالة الصحية وحالة وجود العطب ثم، تم تحديد عدة مؤشرات. تم إجراء دراسة تجريبية والمقارنة بين المؤشرات بهدف تصنيفها و استنتاج أفضلها الذي يمكن أن يعطي معلومات متأكدة و واضحة على الحالة الصحية للآلة.

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

Je dédie ce projet à :

En signe de respect et de reconnaissance aux

Personnes les chères

Mon père et Ma mère

A mon frère: Walid.

A mes sœurs :Nadjet, Hanane, Amal et Hadjer

A toute la famille Achour.

A tous mes amis.

A tous mes collègues surtout étudiants Master 2 Machine électrique.

Houssam

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. Les harmoniques du courant statorique.

Tab. III.4. Les indicateurs.

Tab. III.3. Les indicateurs de défaut du cassure du barres rotoriques.

LISTE DES FIGURES

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

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

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

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

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

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

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

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

Fig. I.9. Proportion des défauts.

Fig. I.10. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.

Fig. I.11. Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances.

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

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

Fig. III.2. Rotors utilisés pour les différents essais.

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

Fig. III.4. Les allures temporelles des trois courants d'alimentation avec différentes charges (2 Barres cassés).

Fig. 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 et **d.** RBFH).

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

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

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

Fig. III.9. Sensibilité à l'apparition du défaut 20% de la charge nominale.

Fig. III.10. Sensibilité à l'apparition du défaut 50% de la charge nominale.

Fig. III.11. Sensibilité à l'apparition du défaut 85% de la charge nominale.

Fig. III.12. Sensibilité au régime de fonctionnement à l'état sain.

Fig. III.13. Sensibilité au régime de fonctionnement avec 1 barre cassé.

Fig. III.14. Sensibilité au régime de fonctionnement avec 2 barres cassés.

Fig. III.15. Sensibilité au régime de fonctionnement avec 3 barres cassés.

Fig. III.16. Courbes en trois dimensions d'indicateur **In2** pour différents l'essai.

Fig. III.17. Courbes en trois dimensions d'indicateur **In7** pour différents l'essai.

Fig. III.18. Courbes en trois dimensions d'indicateur **In1** pour différents l'essai.

Fig. III.19. Courbes en trois dimensions d'indicateur **In2** 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.

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

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.

Ta : Le temps d'acquisition.

Ne : 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.

I_{ni} : L'indicateur.

$A_{(1-2g).fs}$ = Amplitude la harmonique de fréquence $(1-2g)fs$.

$A_{(1+2g).fs}$ = Amplitude la harmonique de fréquence $(1+2g)fs$.

$A_{(5-4g).fs}$ = Amplitude la harmonique de fréquence $(5-4g)fs$.

$A_{(7-2g).fs}$ = Amplitude la harmonique de fréquence $(7-2g)fs$.

A_{fs} : Amplitude la harmonique fondamentale de fréquence fs .

A_{fs5} = Amplitude la harmonique de fréquence $5fs$.

A_{2gfs} = Amplitude la harmonique de fréquence $2g.fs$.

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

Sommnalüre

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
I.3.3. Défaillances au stator	12
I.3.3.1. Court-circuit entre spires	12

I.3.3.3. Court-circuit entre phases	12
I.3.4. Autres défaillances mécaniques	13
I.4. ETUDES STATISTIQUES	13
I.5. LES METHODES DE DETECTION DES DEFAUTS DANS LES MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASES A CAGE	15
I.5.1. Approche signal	15
a) L'analyse des vibrations mécaniques	15
b) L'analyse des flux	15
c) L'analyse du couple électromagnétique	15
d) L'analyse des courants statoriques	15
e) L'analyse de la puissance instantanée	16
f) l'analyse de vecteur de Park	16
I.5.2. Méthodes basées sur un modèle	16
I.5.3. approche d'intelligence artificielle (IA)	17
1.6. CONCLUSION.....	17

CHPITRE II : ETUDE ANALYTIQUE DU MOTEUR ASYNCHRONE A L'ETAT SAIN ET AVEC DEFAUT

II.1. INTRODUCTION	18
II.2. ETUDE ANALYTIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A L'ETAT SAIN	18
II.2.1. Induction magnétique total dans l'entrefer	18
II.2.1.2. Induction Magnétique Rotorique	23
II.2.1.2.1. Fonction de distribution des circuits rotoriques	24
II.2.1.2.2. La force Magnétomotrice rotorique	24
II.2.1.3. Les FEM induites dans les enroulements statoriques	27
II.3.ETUDE ANALYTIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE AVEC DEFAUT	28
II.3.1.Cassures de barres rotoriques	28
II.3.1.1. FMM résultante d'un moteur avec une barre cassée	28
II.4. CONCLUSION.....	31

CHPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE DES INDICATEURS DU DEFAUT ROTORIQUE

III.1. INTRODUCTION	32
III.2. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA MACHINE ASYNCHRONE	32
III.2.1. Description du banc d'essai	32
III.2.2. Les allures temporelles des courants statoriques pour différents états	34
III.3. ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE	35
III.3.1. La Transformée de Fourier Rapide	36
III.3.2. Applications de la FFT sur les courants statorique	37
III.4. ETUDE DE SPECTRE DU COURANT STATORIQUE AVEC DEFAUT DE BARRES ROTORIQUES	39
III.5. LES INDICATEURS DES DEFAUTS ROTORIQUES	46
III.5.1. Influence du défaut rotorique sur les différents indicateurs	47
III.5.1.1. Tableau des indicateurs	47
III.5.1.2. Les courbes des indices	49
A. Sensibilité à la naissance et sévérité du défaut	49
B. Sensibilité au régime de fonctionnement (0%, 20%, 50%, 85%)	51
III.6. TEST DE FIDELITE.....	54
III.6.1. Sensibilité à la sévérité du défaut	54
III.6.2. Sensibilité au régime de fonctionnement	58
III.7. CONCLUSION	59
Conclusion générale	XI
Bibliographie	XII

Introduction

générale

INTRODUCTION GENERALE

La machine asynchrone joue un rôle primordial dans l'industrie. Elle est la plus demandée dans le domaine de la conversion électromécanique d'énergie à cause de ses qualités de robustesse et de sa simplicité et de son faible coût.

Ainsi la prévention des dégâts des machines a pour chaque entreprise une grande signification économique. Continuité dans la production, maintien de l'outil, respect de l'environnement et succès économiques ne peuvent être garantis dans le temps qu'à l'aide d'une maintenance qui prévient efficacement les dégâts et les pannes, et qui utilise de façon optimale le potentiel des machines. Ces deux conditions ne peuvent être remplies que par la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle. L'objectif principal d'une bonne surveillance est de détecter les anomalies de fonctionnement de la machine d'une façon précoce. Pour assurer cette surveillance, on dispose d'informations représentatives (symptômes) des défauts à surveiller. Ces informations sont évidemment celles qui sont accessibles à la mesure: courant électrique, températures, pressions,... etc. La surveillance par l'acquisition du courant de la machine peut se révéler une méthode efficace pour parvenir aux résultats, et parfois à moindre frais. Ce dernier point qui représente l'aspect économique de la surveillance n'est pas négligeable pour un industriel.

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 d'un défaut majeurs (cassures de barres rotoriques).

Le dernier chapitre présente une étude expérimentale sur la machine asynchrone à l'état sain et en présence d'un défaut de barres rotoriques. Dans ce chapitre, plusieurs indicateurs de défaut

rotorique seront définis et un étude comparative entre eux sera effectuée dont le but est de sélectionner le ou les meilleurs indicateurs.

Chapitre II

État de l'art

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 [5].

I.2. CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE [5]

I.2.1. Moteur Asynchrone (MAS) [5]

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.

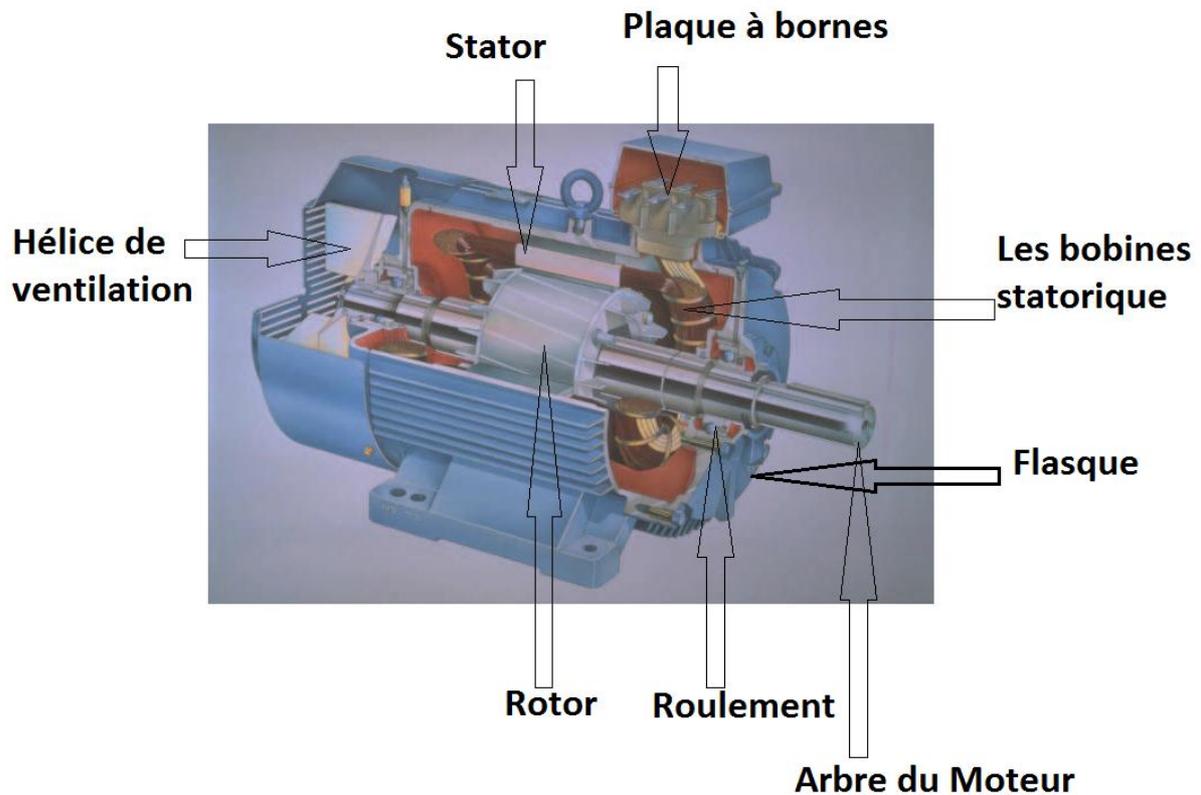


Fig. I.1. Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [2].

I.2.2. Le stator [5]

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.

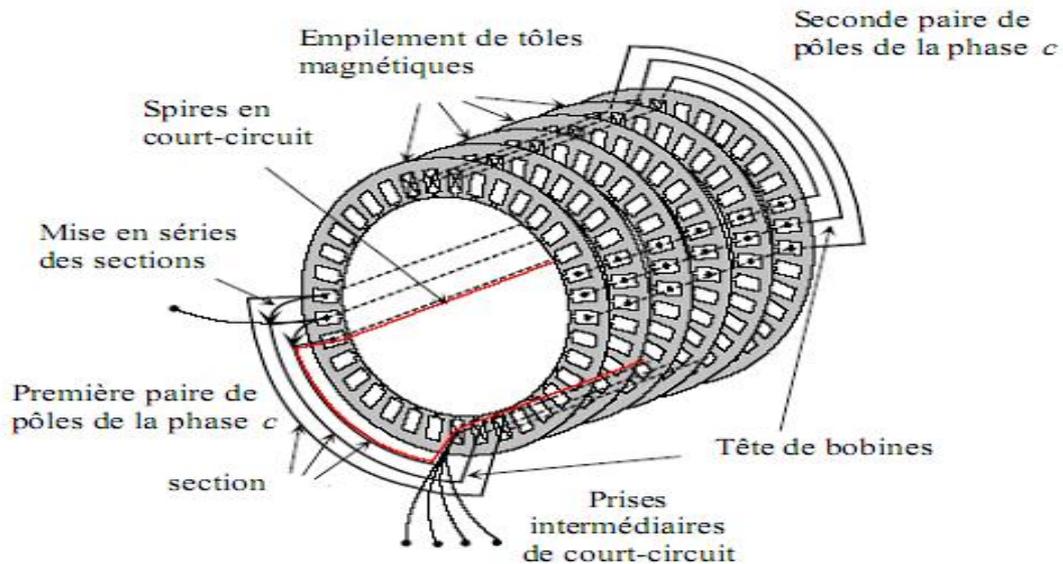


Fig. I.2. Vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs d'encoches, tête de bobines). (Enroulement statorique d'une machine à 4 pôles) [5].

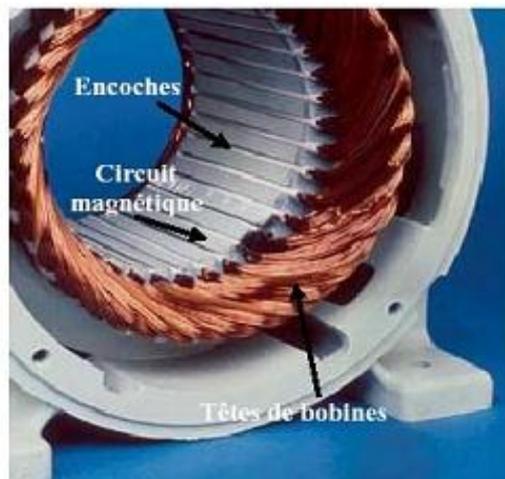


Fig. I.3. Photo du stator d'une machine asynchrone [5].

I.2.3. Le rotor à cage [5]

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.

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 frettés 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).

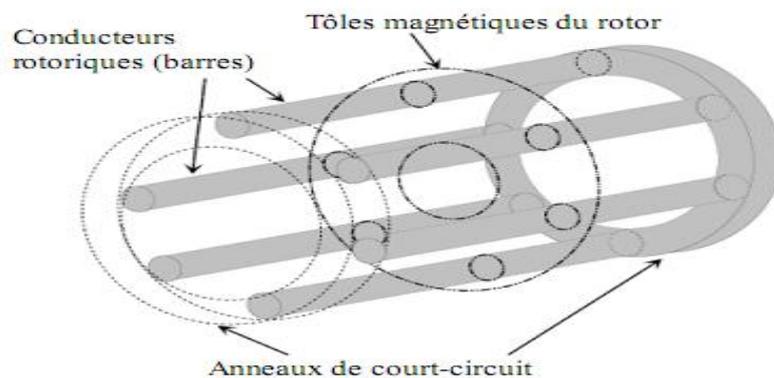


Fig. I.4. Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit.

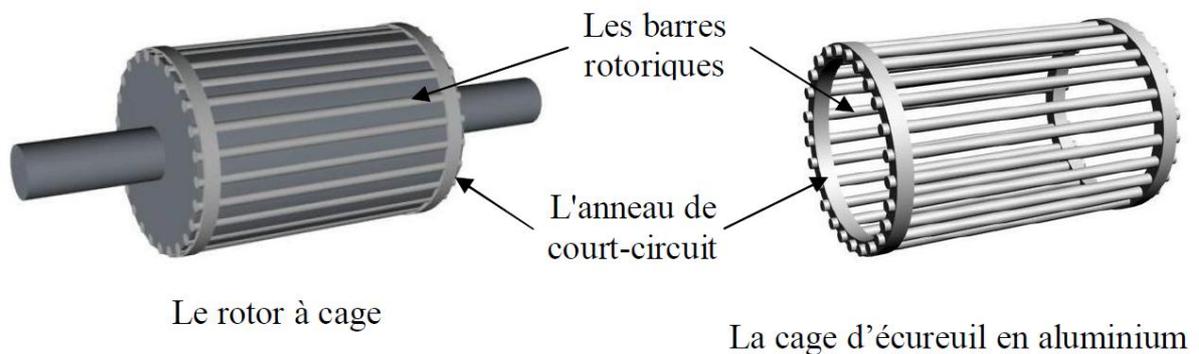


Fig. I.5. Photo du rotor d'une machine asynchrone [4].

I.2.4. Les organes mécaniques [5]

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 [5]

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. 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 :

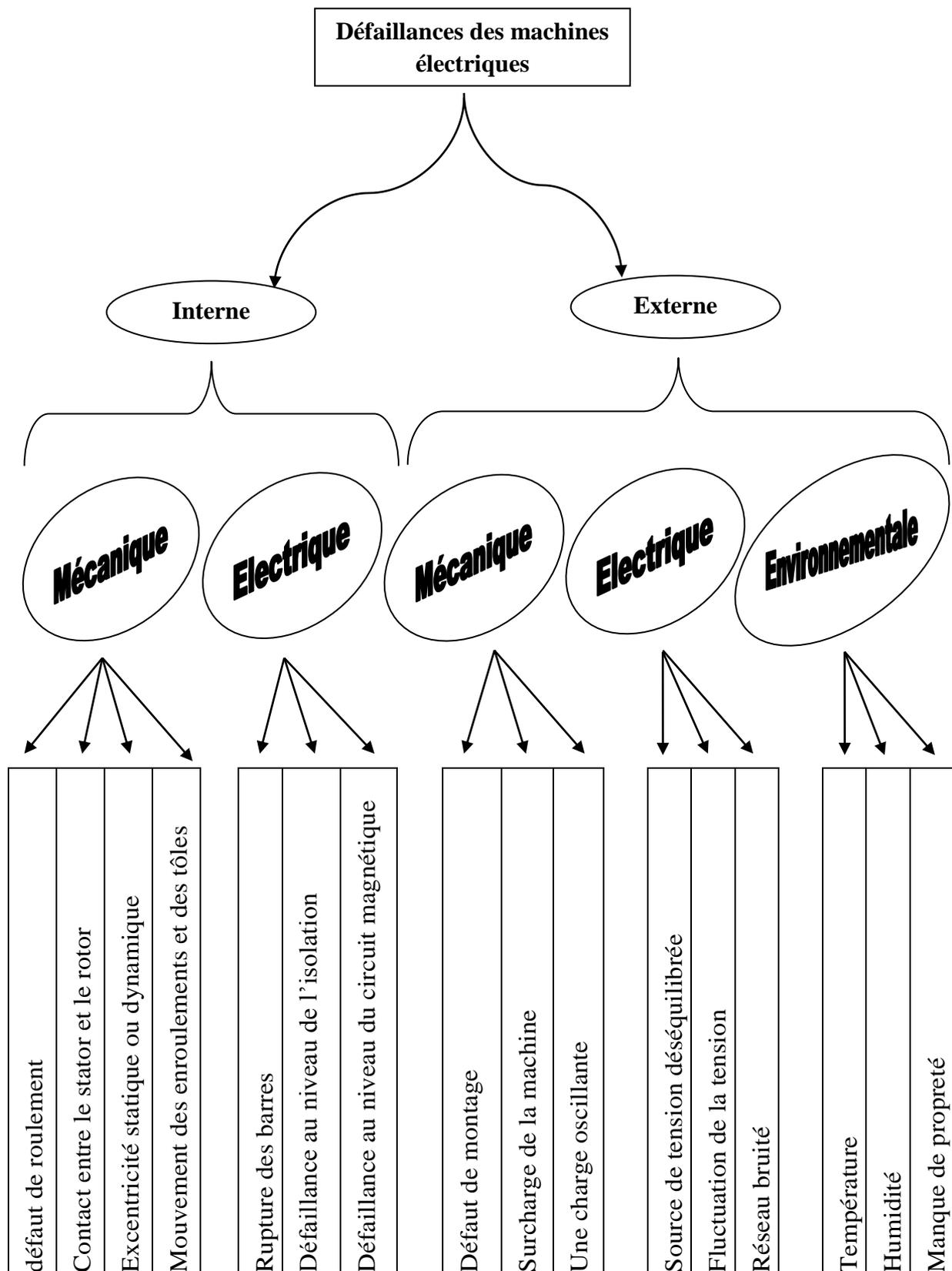


Fig. I.6. Classification des défauts selon leurs origines [5].

I.3.1. Défaillances des machines électriques [5]

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 [5]

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 [5]

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.

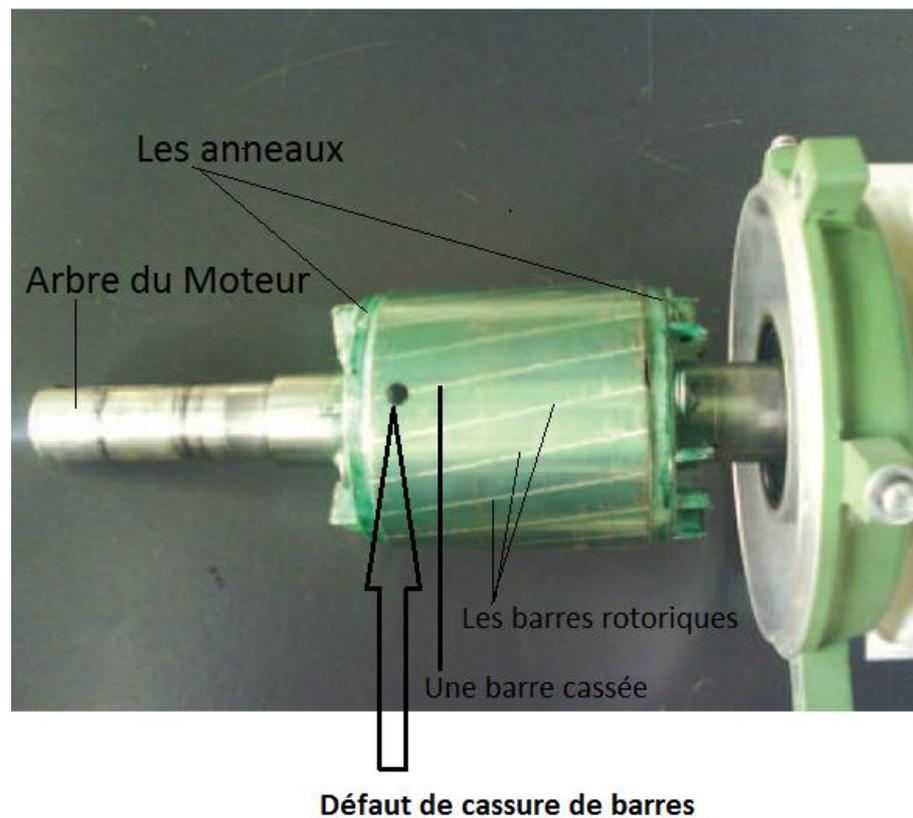


Fig. I.7. Défaut cassure de barres dans le rotor à cage d'écureuil (1 barre cassée) [2].

I.3.2.2. Ruptures d'anneaux [5]

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 rotatives. 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 [5]

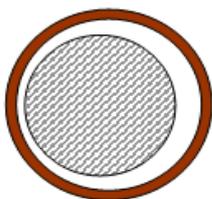
Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor).

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).

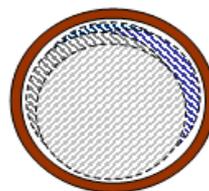
Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

- 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)

Fig. 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) [5]

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. Dans l'article, l'auteur présente la plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement.

Comme il a été présenté précédemment, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles sont :

- l'usure due au vieillissement.
- la température de fonctionnement élevée.
- la perte de lubrification.
- l'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement).
- le défaut de montage.
- les courants d'arbres (Shaft Current).
- Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :
- des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- l'ondulation de leur surface de roulement.
- l'attaque des billes.
- la corrosion due à l'eau.
- défaut de graissage, problème dû à la température.
- décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge.

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, ne apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur.

I.3.3. Défaillances au stator [5]

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 [5]

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.

I.3.3.3. Court-circuit entre phases [5]

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 [5]

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 [5]

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.9:

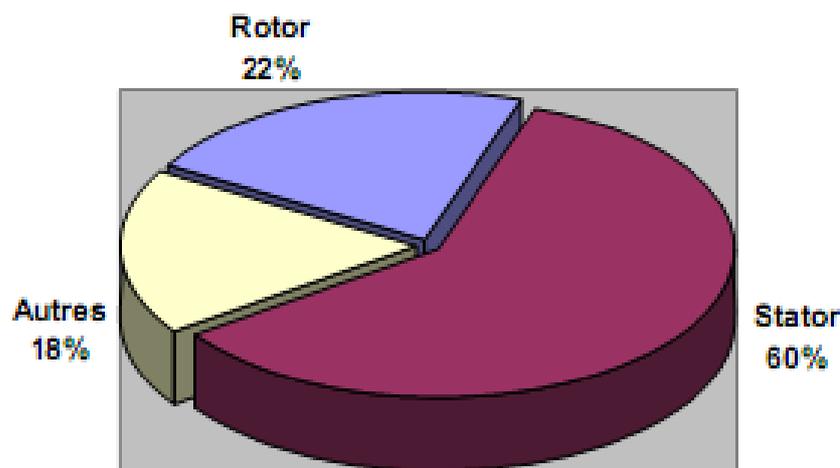


Fig. I.9. Proportion des défauts.

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:

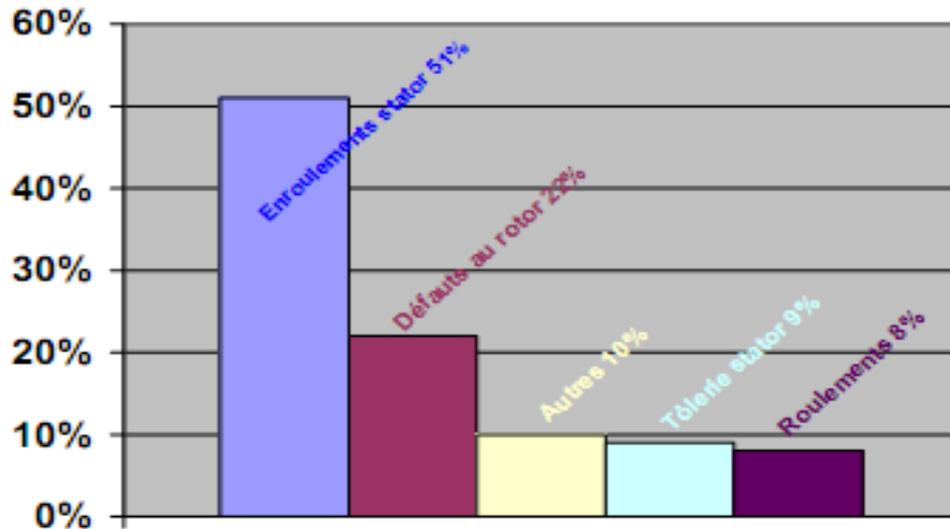


Fig. I.10. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.

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

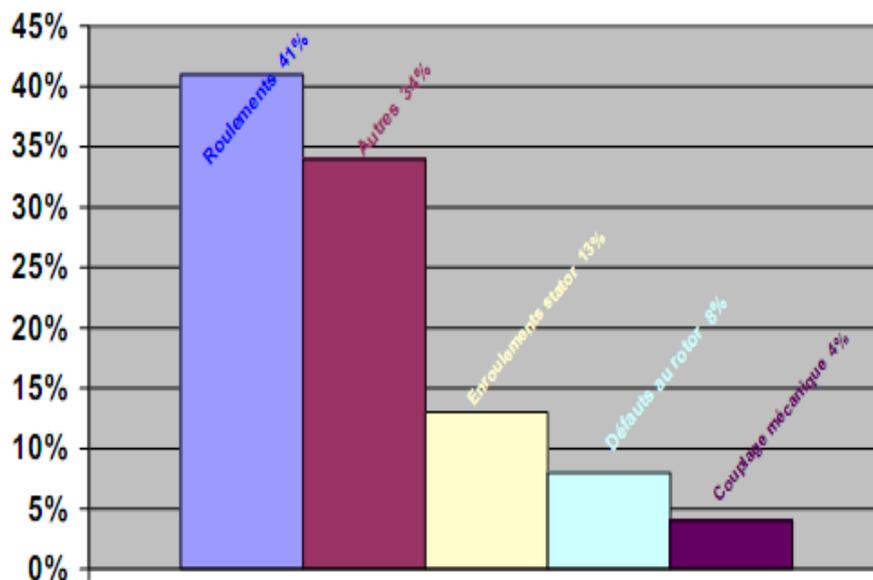


Fig. I.11. Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances.

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 [1]

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 [1]

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 :

a) L'analyse des vibrations mécaniques [1]

Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts fréquemment rencontrés, notamment ceux mécaniques, malgré analyses vibratoires comportent certains inconvénients comme, le problème d'accessibilité, difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut. De plus, le coût de ces capteurs reste élevé, il reste la méthode la plus utilisé dans la pratique.

b) L'analyse des flux [1]

Le flux d'entrefer et par-là même l'induction magnétique dans cet entrefer, le flux embrassé dans les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés. L'étude des variations de flux peut donc être une solution pour détecter et localiser un défaut.

c) L'analyse du couple électromagnétique [1]

L'analyse spectrale de signale du couple (mesuré ou estimé), donne beaucoup d'information sur l'état du moteur parce que le couple est provient de l'interaction entre le champ statorique et rotorique.

d) L'analyse des courants statoriques [1]

Cette technique a été largement utilisée dans les dernières années et connu sous le nom de MCSA (Motor Current Signature Analysis). Les recherches ont été particulièrement dirigées vers le spectre des courants statoriques pour deux raisons : Les courants sont faciles à mesurer, ils fournissent des informations sur de nombreux défauts. L'apparition ou la modification de

l'amplitude des raies du spectre représente des défauts de la machine. Cette méthode ne s'applique actuellement qu'en régime permanent.

e) L'analyse de la puissance instantanée [1]

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet des nombreux travaux. Car la puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase (oscillations plus importantes et plus visibles). Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres.

f) l'analyse de vecteur de Park [1]

Il y a deux versions de cette méthode ; la première, utilise les grandeurs biphasées i_{ds} et i_{qs} , qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de Lissajou : $i_q=f(i_d)$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut.

La deuxième version de cette technique est appelée l'Approche Etendue du Vecteur de Park, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park $\left(\sqrt{i_d^2(t) + i_q^2(t)}\right)$ Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement.

I.5.2. Méthodes basées sur un modèle [1]

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.

I.5.3. approche d'intelligence artificielle (IA) [1]

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...

Chapitre III

Étude analytique du Moteur

Asynchrone à l'état sain et

avec défaut

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 (cassures de barres rotoriques) pour une bonne connaissance des signatures des défauts.

II.2. ETUDE ANALYTIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A L'ETAT SAIN [1]

II.2.1. Induction magnétique total dans l'entrefer [1]

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 .

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

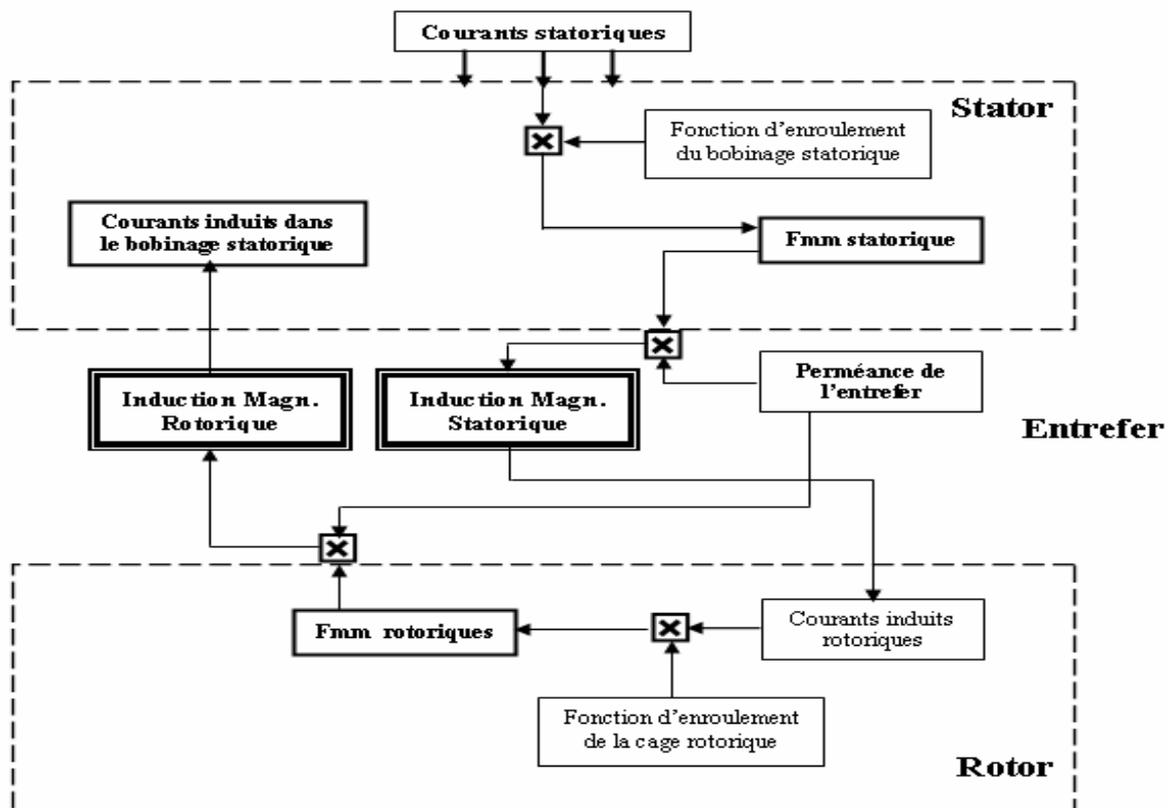


Fig. II.1. Etapes de calcul des inductions magnétiques dans un moteur asynchrone [1].

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 :

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

Avec : $p_0 = \frac{\mu_0}{e}$; où e est l'épaisseur de l'entrefer.

Les courants statoriques :

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

La FMM de la phase A est définie par :

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

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

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

$n_{dA}(\theta)$: 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 [sah10]:

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

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 :

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

Selon l'équation (II.6), on constate que la FMM créée par une phase parcourue par un courant sinusoïdal de fréquence f_s est une **onde pulsante** qui se décompose en deux ondes tournantes (Théorème de Leblanc), l'une directe et l'autre inverse. Chaque onde comporte $(2k+1)$ harmoniques d'espace caractérisés par une fréquence temporelle de f_s 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 : (II.8)

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

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

➤ **Pour le fondamental ($h = 1$) :**

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

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 : $\frac{d\theta}{dt} = \frac{w_s}{p}$ 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 ($h = 3$) :**

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

En utilisant les relations trigonométriques, on obtient :

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

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 ($h = 5$) :**

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

En utilisant les relations trigonométriques, on obtient :

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

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 : $\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\omega_s}{5p}$ dans le sens inverse que le fondamentale.

De la même façon, on retrouve :

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

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

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

$$F_s^h(t, \theta) = \hat{F}_{sh} \sin(\omega_s t \pm hp\theta) \quad (\text{II. 18})$$

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, l'induction magnétique statorique dans l'entrefer sera proportionnelle à la FMM. En multipliant (II.18) par (II.1), on obtient l'expression du terme général de l'induction magnétique statorique :

$$B_s^h(t, \theta) = \hat{B}_{sh} \sin(\omega_s t \pm hp\theta) \quad (\text{II. 19})$$

$$\text{Avec : } B_s^h = F_s^h \cdot p_0 \quad (\text{II. 20})$$

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 [1]

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 Nr barres, le rotor peut être vu comme un ensemble de Nr mailles espacées régulièrement d'un angle électrique de: $p \frac{2\pi}{Nr}$, 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 $q = \frac{Nr}{2p}$).

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 :

$$w_{rh} = w_s \cdot s_h \quad (\text{II.21})$$

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

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

Avec : s : le glissement dû au fondamental

Ω_r : La vitesse de rotation du rotor.

$$\text{On obtient finalement:} \quad s_h = 1 - h(1 - s) \quad (\text{II.22})$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{rh}^{\text{maille1}}(t) = \hat{I}_{rh} \cos(s_h w_s t) \\ I_{rh}^{\text{maille2}}(t) = \hat{I}_{rh} \cos\left(s_h w_s t - hp \frac{2\pi}{N_r}\right) \\ I_{rh}^{\text{maille3}}(t) = \hat{I}_{rh} \cos\left(s_h w_s t - 2hp \frac{2\pi}{N_r}\right) \\ \dots\dots\dots \\ I_{rh}^{\text{maille}N_r}(t) = \hat{I}_{rh} \cos\left(s_h w_s t - (N_r - 1)hp \frac{2\pi}{N_r}\right) \end{array} \right. \quad (\text{II.23})$$

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

II.2.1.2.1. Fonction de distribution des circuits rotoriques [1]

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 $n_{rd.\text{maille}1}(\theta_r)$.

Avec θ_r : angle mécanique par rapport au rotor.

On obtient :

$$n_{rd}^{\text{maille}1}(\theta_r) = \frac{1}{2} + \sum_{\eta=1} \frac{2}{\eta\pi} \sin\left(\eta \frac{\pi}{2}\right) \cos(\eta p \theta_r) \quad (\text{II. 24})$$

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 [1]

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 :

$$F_{rh}^{\text{maille}i}(t, \theta_r) = N_{rw}^{\text{maille}i}(\theta_r) \cdot I_{rh}^{\text{maille}i}(t) \quad (\text{II. 25})$$

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

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

$$N_{rw}^{\text{maille}i}(\theta_r) = n_{rd}^{\text{maille}i}(\theta_r) - \langle n_{rd}^{\text{maille}i}(\theta_r) \rangle. \quad (\text{II. 26})$$

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

On peut finalement écrire :

$$\begin{cases} N_{rw}^{\text{maille } 1}(\theta r) = \sum_{\eta=1}^2 \frac{2}{\eta\pi} \sin\left(\eta \frac{\pi}{2}\right) \cos\left[\eta p \left(\theta r - (i-1) \frac{2\pi}{N_r}\right)\right] \\ N_{rw}^{\text{maille } Nr}(\theta r) = \sum_{\eta=1}^2 \frac{2}{\eta\pi} \sin\left(\eta \frac{\pi}{2}\right) \cos\left[\eta p \left(\theta r (Nr-1) \frac{2\pi}{N_r}\right)\right] \end{cases} \quad (\text{II. 27})$$

En multipliant le système d'équations (II.23) par celui (II.27), on obtient les' expressions des FMM générées par chaque maille rotorique :

$$\begin{cases} F_{rh}^{\text{maille } 1}(t, \theta r) = \sum_{\eta=1}^2 \hat{F}_{rh}^{\eta} \{ \cos(s_h w_s t + \eta p \theta r) + \cos(s_h w_s t - \eta p \theta r) \} \\ F_{rh}^{\text{maille } 2}(t, \theta r) \\ = \sum_{\eta=1}^2 \hat{F}_{rh}^{\eta} \left\{ \cos\left(s_h w_s t + \eta p \theta r - (\eta + h) \frac{2p\pi}{N_r}\right) \right. \\ \left. + \cos\left(s_h w_s t - \eta p \theta r + (\eta - h) \frac{2p\pi}{N_r}\right) \right\} \\ \dots \\ F_{rh}^{\text{maille } Nr}(t, \theta r) \\ = \sum_{\eta=1}^2 \hat{F}_{rh}^{\eta} \left\{ \cos\left(s_h w_s t + \eta p \theta r - (Nr-1)(\eta + h) \frac{2p\pi}{N_r}\right) \right. \\ \left. + \cos\left(s_h w_s t - \eta p \theta r + (Nr-1)(\eta - h) \frac{2p\pi}{N_r}\right) \right\} \end{cases} \quad (\text{II. 28})$$

$$\text{Avec : } \hat{F}_{rh}^{\eta} = \frac{2\hat{I}_{rh}}{\eta\pi} \sin\left(\eta \frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{II. 29})$$

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 :

$$F_{rh}(t, \theta r) = \sum_{i=1}^{Nr} F_{rh}^i(t, \theta r) \quad (\text{II. 30})$$

$$\begin{aligned} F_{rh}(t, \theta r) = \sum_{i=1}^{Nr} \sum_{\eta=1}^2 \hat{F}_{rh}^{\eta} \left\{ \cos\left(s_h w_s t + \eta p \theta r - (i-1)(\eta + h) \frac{2p\pi}{N_r}\right) \right. \\ \left. + \cos\left(s_h w_s t - \eta p \theta r + (i-1)(\eta - h) \frac{2p\pi}{N_r}\right) \right\} \end{aligned} \quad (\text{II. 31})$$

Observons bien l'équation (II. 31). 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 $(\eta + h) = kNr$ ou $(\eta - h) = kNr$ avec $k=1, 2, 3, \dots$. Et puisque η est un entier impaire et positif, on constate que la FMM rotorique n'existe que pour:

$$\begin{cases} |h| \\ \left| \frac{kNr}{p} - h \right| \\ \left| \frac{kNr}{p} + h \right| \end{cases} \quad (\text{II. 32})$$

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

$$\begin{aligned} F_{rh}(t, \theta r) = & \hat{F}_{rh} \cos(s_h w_s t \pm \eta p \theta r) + \hat{F}_{rh.SH1} \cos\left(s_h w_s t + \left(\frac{kNr}{p} - h\right) p \theta r\right) \\ & + \hat{F}_{rh.SH2} \cos\left(s_h w_s t - \left(\frac{kNr}{p} + h\right) p \theta r\right) \end{aligned} \quad (\text{II. 33})$$

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

$$\begin{aligned} B_{rh}^{p0}(t, \theta r) = & \hat{B}_{rh}^{p0} \cos(s_h w_s t \pm \eta p \theta r) + \hat{B}_{rh.SH1} \cos\left(s_h w_s t + \left(\frac{kNr}{p} - h\right) p \theta r\right) \\ & + \hat{B}_{rh.SH2} \cos\left(s_h w_s t - \left(\frac{kNr}{p} + h\right) p \theta r\right) \end{aligned} \quad (\text{II. 34})$$

Constatations :

L'équation (II.28) 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.32).

L'équation (II.34) 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 [1]

Afin de trouver les fréquences des FEM induites dans le bobinage statorique, dues au champ rotorique, on va d'abord réécrire l'équation (II.34) dans un repère fixe lié au stator. Pour cela, il suffit d'utiliser le changement de variable suivant :

$$\theta_r = \theta - \Omega_r t = \theta - (1 - s) \frac{\omega_s}{p} t \quad (\text{II. 35})$$

Alors, on obtient :

$$\begin{aligned} B_{rh}^{p0}(t, \theta) = & \hat{B}_{rh}^{p0} \cos(\omega_s t \pm hp\theta) + \hat{B}_{rh.SH1}^{p0} \cos\left(\left(1 - \frac{kNr}{p}(1 - s)\right)\omega_s t + \left(\frac{kNr}{p} - h\right)p\theta\right) \\ & + \hat{B}_{rh.SH2}^{p0} \cos\left(\left(1 + \frac{kNr}{p}(1 - s)\right)\omega_s t - \left(\frac{kNr}{p} + h\right)p\theta\right) \end{aligned} \quad (\text{II. 36})$$

L'équation (II.36) montre clairement que l'induction magnétique rotorique comporte deux types d'ondes :

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

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

$$f_{RSH} = \left| \left(1 \pm \frac{kNr}{p}(1 - s)\right) fs \right| \text{ dans les enroulements statoriques.}$$

Remarques :

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 : $f_{TH} = v \cdot fs$ (II. 37)

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

$$f_{RSH} = \left| \left(v \pm \frac{kNr}{p}(1 - s) \right) fs \right| \quad (\text{II. 38})$$

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 [1]

II.3.1. Cassures de barres rotoriques [1]

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.

II.3.1.1. FMM résultante d'un moteur avec une barre cassée [1]

L'approche utilisée pour étudier ce type de défauts suppose que la rupture d'une barre rotorique peut être traduite par l'élimination d'une maille rotorique ; ce qui altère la FMM résultante due à l'ensemble des mailles rotoriques et produit, par conséquence, des FMM rotoriques additionnelles directes et inverses qui vont induire des courants (caractérisés par des fréquences particulières) dans le bobinage statorique. Selon cette approche, un moteur asynchrone avec une barre cassée aura $(Nr - 1)$ mailles rotoriques au lieu de Nr . Il est important de noter que cette approche est moins précise dans le sens d'évaluation des amplitudes des courants induits par ce défaut ; parce qu'en réalité, le courant dans la barre cassée n'est pas nul à cause des courants inters barres. Mais, puisque notre objectif est d'analyser seulement les signatures fréquentielles du défaut de barres, l'approche présentée reste valide et peut être utilisée sans aucun doute. En effet, la nouvelle expression de la FMM rotorique (en présence d'une barre cassée) peut être obtenue en soustrayant la FMM produite par la maille absente de la FMM rotorique créée à l'état sain.

De ce raisonnement, La FMM rotorique résultante d'un moteur avec défaut de barres sera donnée par:

$$F_{rh\dot{\eta}}(t, \theta r) = F_{rh}(t, \theta r) - \sum_{i=1}^{nb} F_{rh\dot{\eta}_i}(t, \theta r) \quad (\text{II. 39})$$

Avec: $F_{rh\dot{\eta}}(t, \theta r)$ la FMM rotorique résultante à l'état sain donnée par l'équation (II.39).

Et $F_{rh\dot{\eta}_i}(t, \theta r)$ la FMM produite par $i^{\text{ième}}$ maille rotorique absente et nb représente le nombre de barres cassées.

Par exemple, si on a une seule barre rompue (la barre N°1) on aura une maille absente (la maille N°1), l'expression (II.39) devient :

$$F_{rh\dot{\eta}}(t, \theta r) = F_{rh}(t, \theta r) - F_{rh\dot{\eta}_{\text{maille.1}}}(t, \theta r) \quad (\text{II. 40})$$

Selon le système d'équation (II.28), la FMM créée par la maille absente peut être donnée par

(dans un repère lié au rotor) :

$$F_{rh\ \dot{\eta}maille.1}(t, \theta r) = \sum_{\dot{\eta}=1} \hat{F}_{rh\dot{\eta}} \{ \cos(s_h w_s t - \dot{\eta} p \theta r) + \cos(s_h w_s t + \dot{\eta} p \theta r) \} \quad (\text{II. 41})$$

Avec $\dot{\eta} = 1, 2, 3 \dots$ représente le rang des harmoniques d'espace dus à la disposition des barres constituant la maille rotorique N° i .

Maintenant, on doit réécrire l'expression (II.40) dans un repère lié au stator en utilisant l'équation (II.35), on obtient :

$$\begin{aligned} F_{rh\dot{\eta}}(t, \theta) &= \hat{F}_{rh} \cos(w_s t \pm h p \theta) \\ &+ \hat{F}_{r h s H1} \cos \left[\left(1 - \frac{k N r}{p} (1 - s) \right) w_s t + \left(\left(\frac{k N r}{p} - h \right) p \theta \right) \right] \\ &+ \hat{F}_{r h s H2} \cos \left[\left(1 + \frac{k N r}{p} (1 - s) \right) w_s t - \left(\left(\frac{k N r}{p} + h \right) p \theta \right) \right] \\ &- \sum_{\dot{\eta}=1} \hat{F}_{rh\dot{\eta}} [\cos \{ [1 - (h - \dot{\eta})(1 - s)] w_s t - \dot{\eta} p \theta \} + \cos \{ [1 - (h + \dot{\eta})(1 - s)] w_s t + \dot{\eta} p \theta \}] \end{aligned} \quad (\text{II. 42})$$

Selon l'expression (II.42), il est clair que le défaut de cassures de barres engendre deux séries de FMM additionnelles : directs et inverses. Ces FMM additionnelles vont induire des courants dans le bobinage statorique si leurs nombre de paire de pôles appartient à l'ensemble définie par $\{hp\}$, avec h est l'ordre des harmoniques d'espace statoriques. Ces courants induits seront caractérisés par des fréquences données par la formule générale suivante :

$$[1 - (h \pm \dot{\eta})(1 - s)] f s \quad (\text{II. 43})$$

Remarque :

Notre étude exposée ci-dessus illustre l'effet électromagnétique du défaut de barres. Mais, il ne faut pas oublier que ce défaut ait aussi un effet mécanique. En fait, la présence d'une barre rompue dans la cage rotorique, un courant de fréquence $(1 - 2s)f s$ sera induit dans les circuits statoriques, accompagné par une composante oscillatoire de fréquence dans le couple électromagnétique et la vitesse de rotation ce qui donne naissance à de nouvelles composantes de courant aux fréquences $(1 \pm 2s)f s$ circulant dans les enroulements statoriques. Et par un processus identique, on obtient une série d'harmoniques de fréquences données par :

$$(1 \pm 2ks) f s \quad \text{avec: } k = 1, 2, 3 \dots \dots \dots \quad (\text{II. 44})$$

En tenant en compte des harmoniques du temps qui sont toujours présents dans les tensions d'alimentation, on peut aboutir aux formules générales suivantes :

$$[v - (h \pm \dot{\eta})(1 - s)] f s \quad (\text{II. 45})$$

$$(v \pm 2ks) f s \quad (\text{II. 46})$$

Avec : $\nu = 1, 2, 3, \dots$ 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. 45) pour $h=1$ et différentes valeurs de η'' et ν .

η''	$[\nu - (1 - \eta'')(1 - s)]f_s$			
	ν			
	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 $

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

η''	$[\nu - (1 + \eta'')(1 - s)]f_s$			
	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 $

Tab. II.2. Les fréquences des harmoniques induits par l'onde inverse de la FMM rotorique en présence d'un défaut de barres[1].

On remarque que les fréquences déduites de la formule (II.45) peuvent être déduites aussi de la formule (II.46). Mais, il faut bien noter que les composantes spectrales, données par (II.45), sont dues à la présence des harmoniques d'espace statoriques et rotoriques. Par contre, les composantes de (II.46) reflètent l'interaction entre les harmoniques du temps et les oscillations de la vitesse.

A partir de là, nous allons désigner par **RBFH (Rotor Bar Faut Harmonics)** les harmoniques représentant les signatures d'un défaut de cassure de barres.

II.4. CONCLUSION

L'étude présentée dans cette chapitre avons étudié analytiquement le moteur asynchrone triphasé à cage a l'état sain et en présence d'un défaut de cassure de barres rotoriques, permis et comprendre les phénomènes qui apparaissent au niveau des grandeurs magnétiques de la machine asynchrone. Cette étude nous a conduits à identifier seulement trois types d'harmoniques: les TH et les RSH lors d'un fonctionnement sain. Et les harmoniques **RBFH** lors d'une présence d'un défaut de barres rotoriques, dont le but est de compléter l'identification des autres types d'harmoniques. C'est-à-dire, le type RBFH de fréquence $(\nu \pm 2ks)fs$

Chapitre III

Étude expérimentale des
indicateurs du défaut

rotorique

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 barres rotoriques. 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 la cage rotorique. 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 présentée sur le Tableau 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 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, en suite on a répété les mêmes essais mais avec un moteur possédant une barre cassée, puis deux barres cassées est finalement trois barres cassées. Le défaut de barres a été réalisé en

perçant deux barres adjacentes à la jointure entre la barre et l'anneau de court-circuit Figure III.2

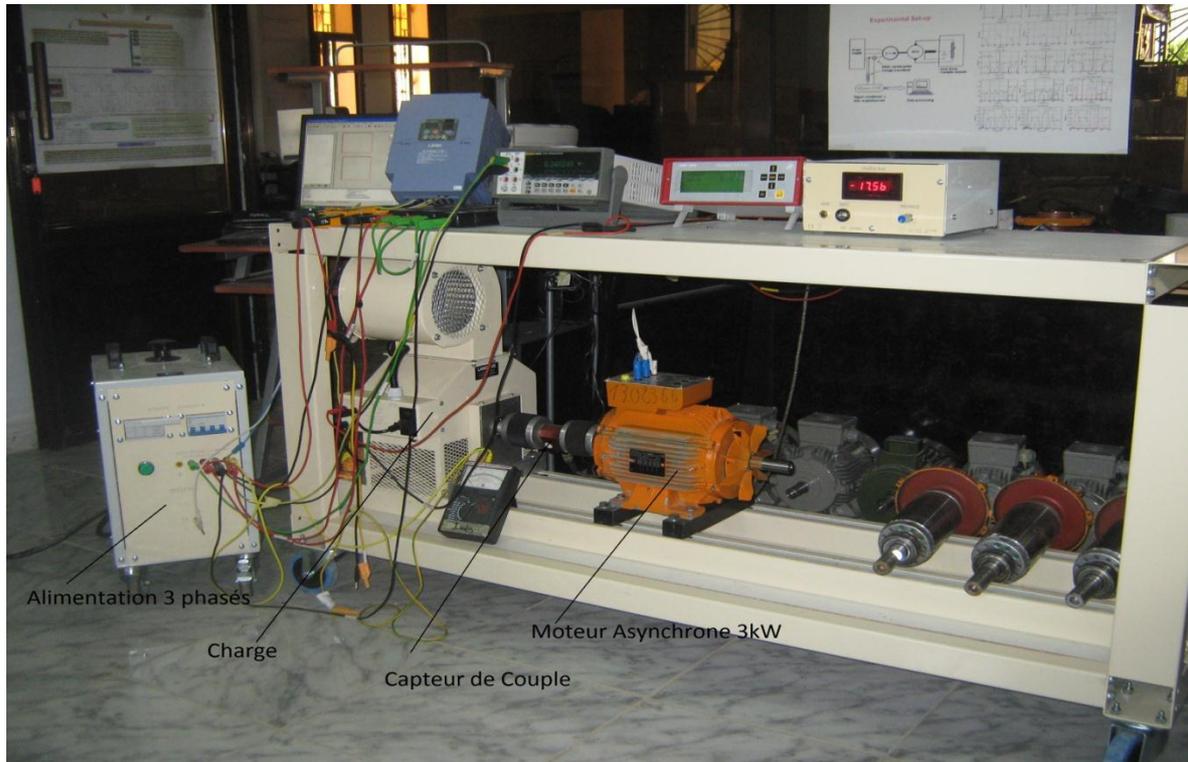


Fig. III.1. Le banc d'essai expérimental.



Fig. III.2. Rotors utilisés pour les différents essais.

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 électromagnétique (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%	5.90	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).

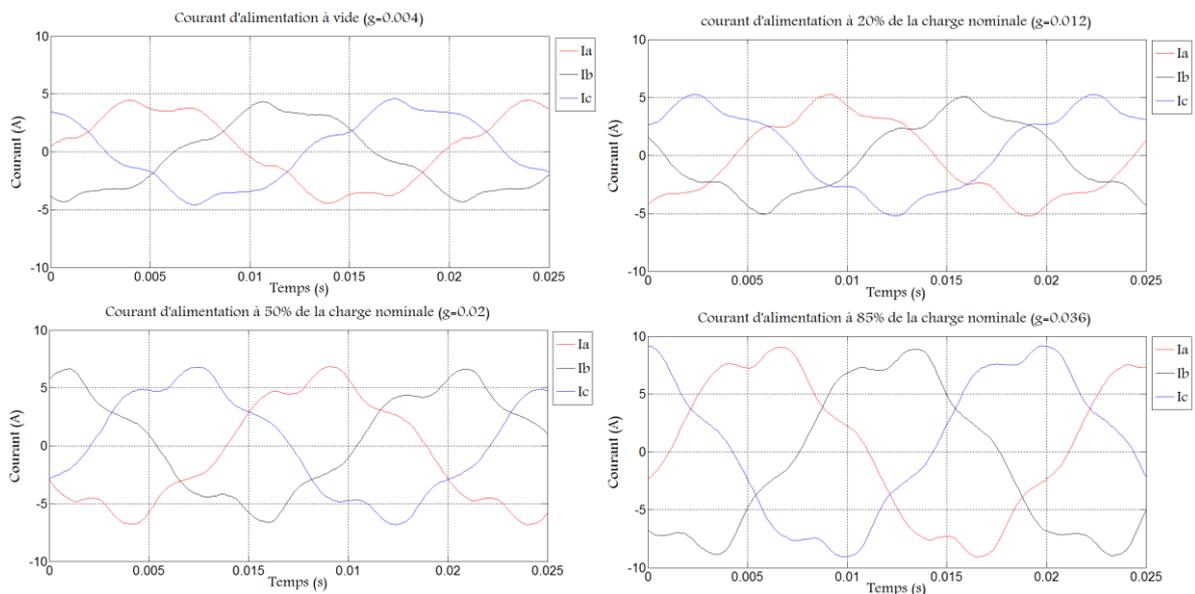


Fig. III.3. Les allures temporelles des trois courants d'alimentation avec différentes charges (Etat sain).

Dans les figures III.4, on a présenté les allures temporelles des courants statoriques pour un moteur ayant deux barres cassées.

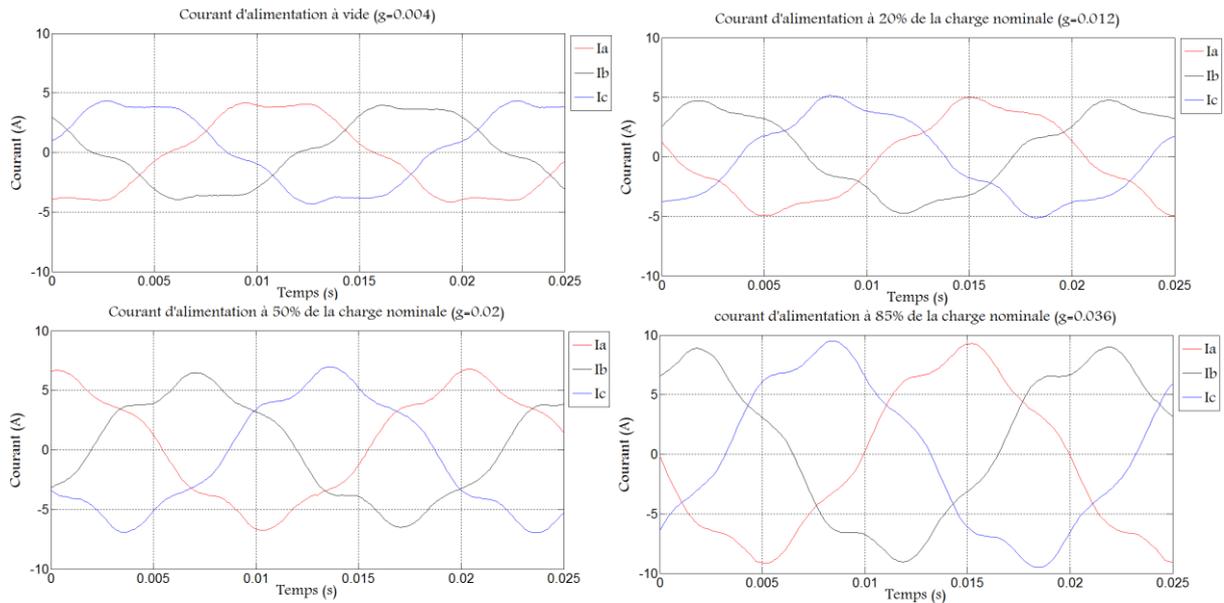


Fig. III.4. Les allures temporelles des trois courants d'alimentation avec différentes charges (2 Barres cassés).

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 les signaux temporels par leurs 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

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 :

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

Il est important de noter que la résolution fréquentielle joue un rôle primordial quant à la clarté du spectre, elle doit être de faible valeur pour qu'on puisse séparer les harmoniques proches.

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

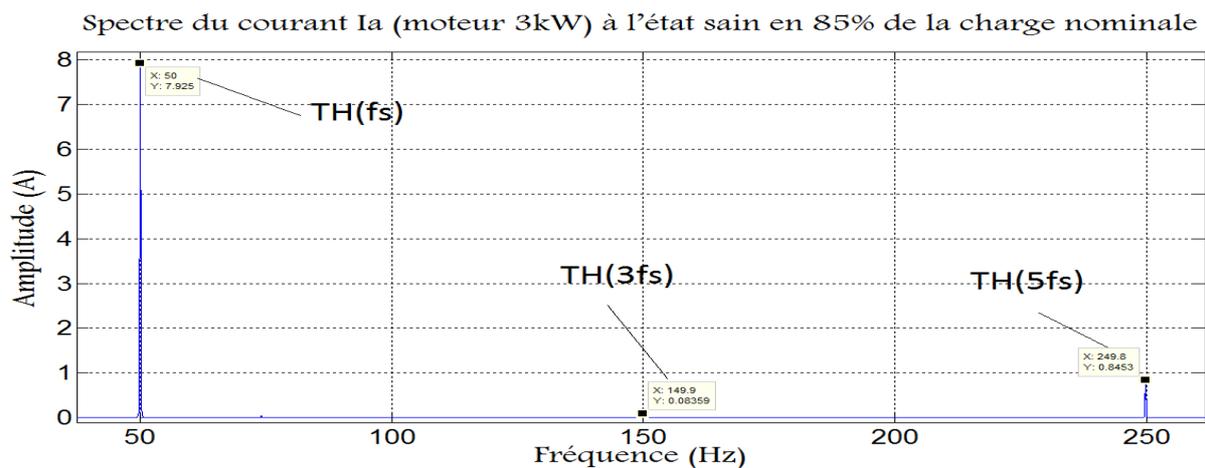
Etude analytique sur la machine asynchrone afin d'interpréter le contenu harmonique des courants statoriques pendant l'état sain. Notre étude théorique a été vérifiée par des essais expérimentaux (sur un moteur de 3kW) réalisés au niveau du laboratoire LGE de Biskra. Les résultats obtenus mettent en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

Les différents harmoniques	Les formules globales	Les causes principales
Les harmoniques du temps (TH)	$f_{TH} = (2k + 1)f_s$	Ce type d'harmonique est imposé par la source .
Les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH)	$f_{RSH} = (2k + 1)f_s \pm N_r + f_r$	De la structure naturelle de la machine asynchrone à cage (la distribution discrète des encoches rotoriques).
Eccentricity Fault Harmonics (EFH)	$f_{EFH} = (2k + 1)f_s + f_r$	Excentricité mixte .
Rotor Bar Fault Harmonics (RBFH)	$f_{RBFH} = ((2k + 1) + 2g)f_s$	L'asymétrie résiduelle du moteur au niveau du rotor.

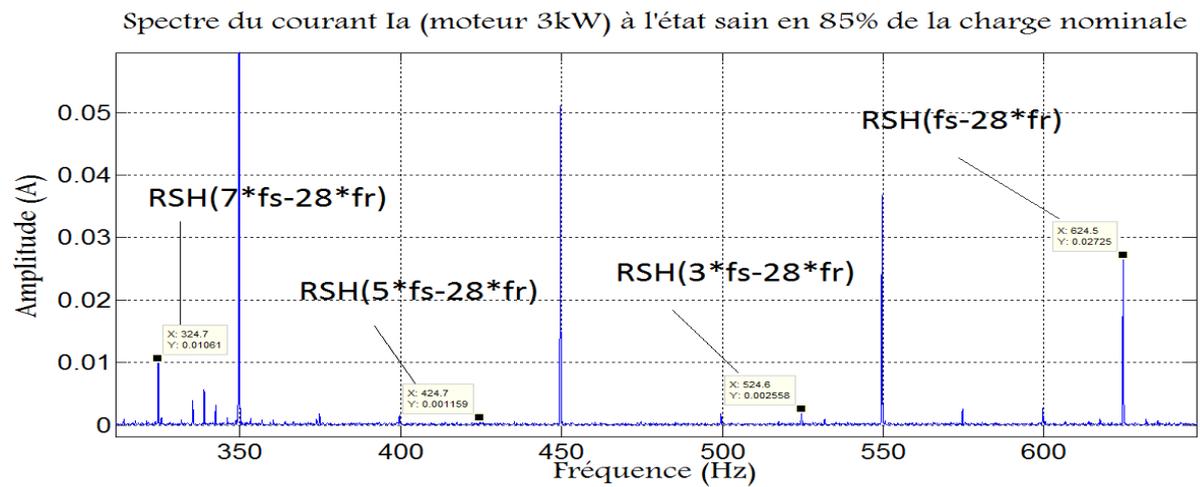
Tab. III.3. Les harmoniques du courant statorique.

Avec : $k = 0,1,3,\dots$; $f_s = 50$ Hz ; $N_r = 28$ barres .

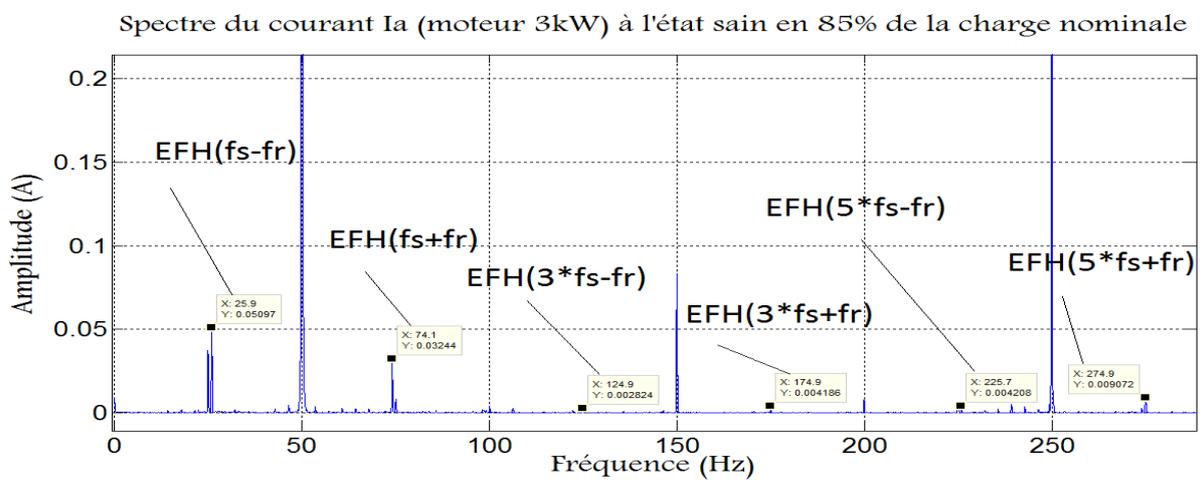
Nous exposons sur la figure (III-5) le spectre du courant statorique pour un fonctionnement à 85% de la charge nominale ($g = 0.036$) avec la représentation les quatre familles des harmoniques (a. TH, b. RSH, c. EFH et d. RBFH).



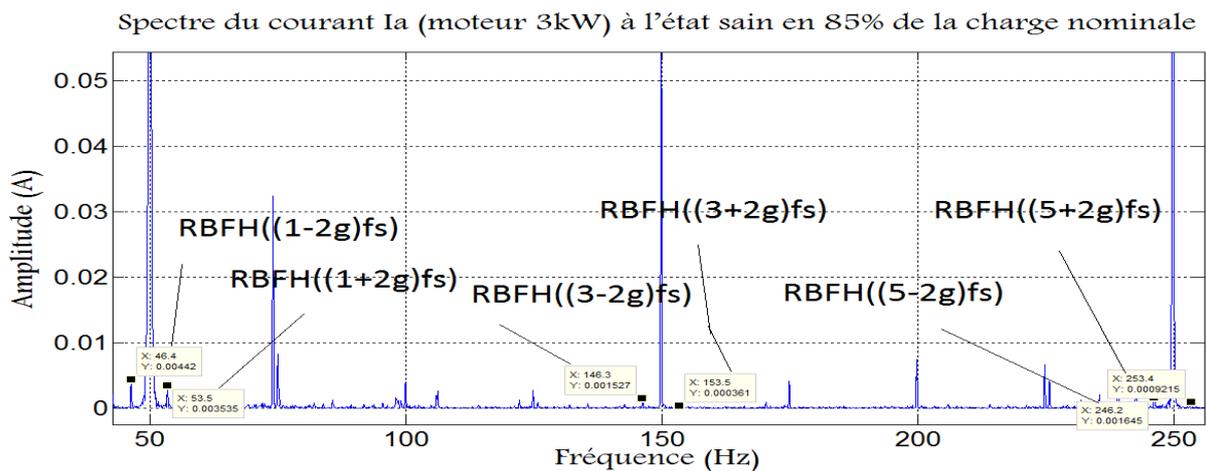
a. Les harmoniques *TH*



b. Les harmoniques RSH



c. Les harmoniques EFH



d. Les harmoniques $RBFH$

Fig. 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 et d. RBFH).

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 DEFAUT DE BARRES ROTORIQUES

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

La figure III.6 pour 85% de la charge nominale à différents cas (Es ,1Bc ,2 Bc et 3Bc).

La figure III.7 pour 50% de la charge nominale à différents cas (Es ,1Bc ,2 Bc et 3Bc).

La figure III.8 pour 20% de la charge nominale à différents cas (Es ,1Bc ,2 Bc et 3Bc).

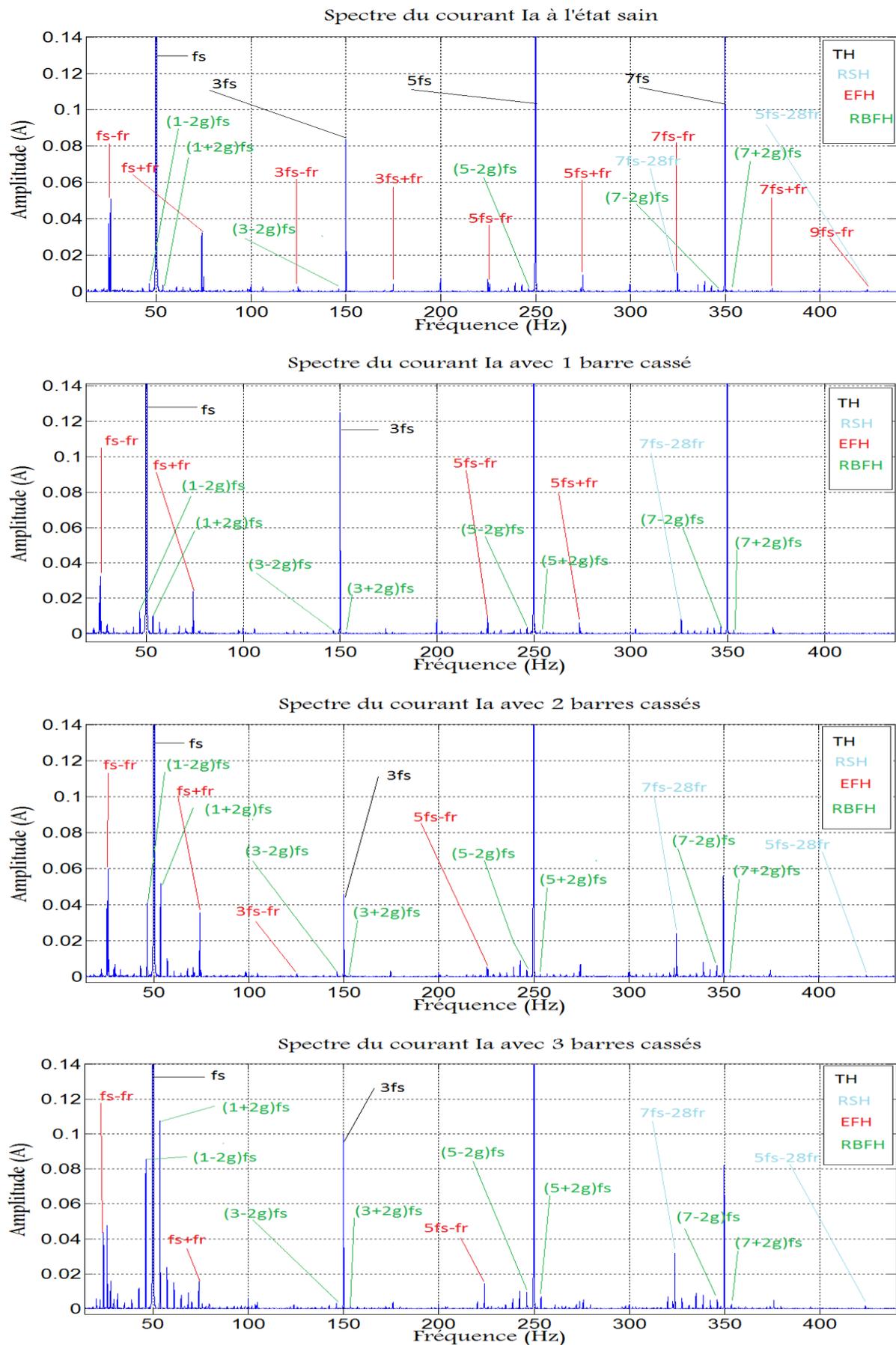


Fig. III.6. Spectre du courant Ia pour 85% de la charge nominale à différents cas.

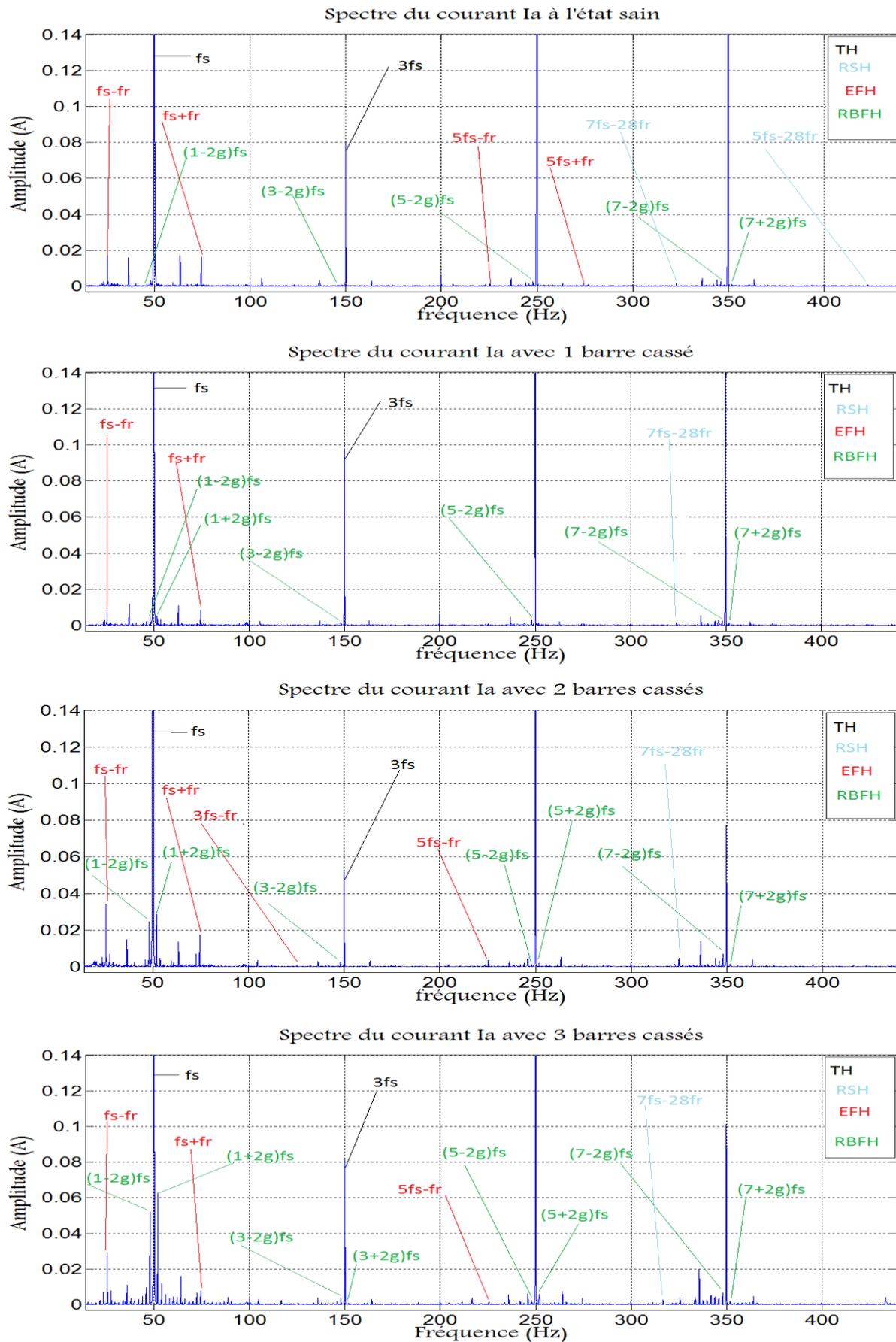


Fig. III.7. Spectre du courant I_a pour 50% de la charge nominale à différents cas.

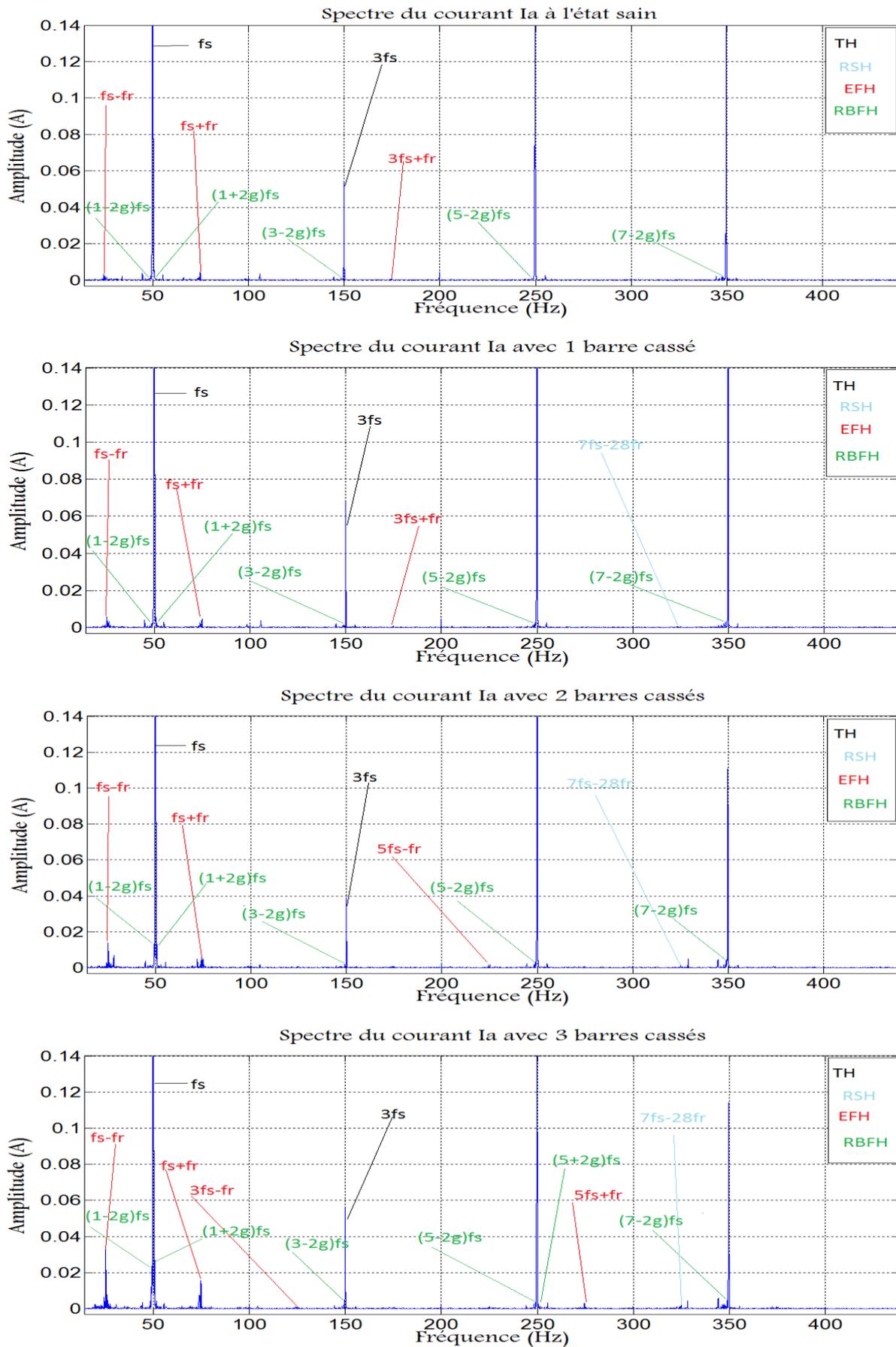


Fig. III.8. Spectre du courant I_a pour 20% de la charge nominale à différents cas.

Les tableaux suivants résumant l'influences du défauts de barres sur les quatre familles des harmoniques (TH ,RSH ,EFH et RBFH).

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

La charge 50% ,fr = 24.5 ,g = 0.02									
Les formules	Fréquence Théorique	Fréquence réel				Amplitude			
		Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés	Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés
1*fs	50	50	50	50	50	5.569	5.168	5.553	5.86
3*fs	150	149.9	149.9	149.9	149.9	0.080	0.097	0.051	0.081
5*fs	250	249.8	249.8	249.8	249.9	0.743	0.793	0.647	0.697
7*fs	350	349.8	349.7	349.8	349.8	0.194	0.190	0.077	0.101

La charge 85% fr = 24.1 ,g = 0.036									
Les formules	Fréquence théorique	Fréquence réel				Amplitude			
		Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés	Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés
1*fs	50	50	50	50	50	7.925	7.988	7.989	8.22
3*fs	150	149.9	149.9	149.9	149.9	0.083	0.125	0.045	0.098
5*fs	250	249.8	249.9	249.9	249.9	0.845	0.921	0.711	0.799
7*fs	350	349.8	349.8	349.8	349.9	0.213	0.207	0.055	0.082

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

La charge 50% fr=24.5 ,g=0.02 , Nr=28 barres									
Les formules	Fréquence Théorique	Fréquence réel				Amplitude			
		Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés	Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés
1*fs+Nr*fr	736	735	736.5	736	735.5	0.0023	0.0013	0.0017	0.0015
1*fs-Nr*fr	636	636	636.6	636.1	635.5	0.0149	0.0100	0.0101	0.0051
3*fs+Nr*fr	836	835.9	836.4	835.9	835.5	0.0064	0.0059	0.0069	0.0058
3*fs-Nr*fr	536	536.1	536.7	536.1	535.6	0.0005	0.0017	0.0012	0.0027
5*fs+Nr*fr	936	935.8	936.3	935.9	935.4	0.0069	0.0055	0.0059	0.0065
5*fs-Nr*fr	436	436.1	436.7	436.2	435.7	0.0001	0.0007	0.0004	0.0006
7*fs+Nr*fr	1036	1036	1036	1036	1035	0.0008	0.0007	0.0010	0.0007
7*fs-Nr*fr	336	336.2	336.8	336.3	335.7	0.0044	0.0055	0.0137	0.0200

La charge 85% fr=24.1 ,g=0.036									
Les formules	Fréquence Théorique	Fréquence réel				Amplitude			
		Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés	Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés
1*fs+Nr*fr	724.8	724.5	725.9	724.9	723.6	0.0023	0.0022	0.0017	0.0015
1*fs-Nr*fr	624.8	624.5	626	624.9	623.7	0.0272	0.0219	0.0208	0.0137
3*fs+Nr*fr	824.8	824.4	825.9	824.8	823.6	0.0063	0.0064	0.0075	0.0068
3*fs-Nr*fr	524.8	524.6	526.1	525	523.7	0.0025	0.0024	0.0038	0.0060
5*fs+Nr*fr	924.8	924.3	925.8	924.8	923.5	0.0119	0.0104	0.0099	0.0117
5*fs-Nr*fr	424.8	424.7	425.2	425.1	423.8	0.0011	0.0004	0.0007	0.0016
7*fs+Nr*fr	1024.8	1024	1026	1025	1024	0.0008	0.0005	0.0003	0.0004
7*fs-Nr*fr	324.8	324.7	326.1	325.1	323.9	0.0106	0.0081	0.0241	0.0316

$$3/ f_{EFH} = (2k + 1)f_s + f$$

La charge 50% fr=24.5 ,g=0.02									
Les formules	Fréquence théorique	Fréquence réel				Amplitude			
		Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés	Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés
1*fs+fr	74.5	74.5	74.5	74.5	74.5	0.0163	0.0084	0.0174	0.0077
1*fs-fr	25.5	25.4	25.4	25.5	25.5	0.0169	0.0083	0.0341	0.0291
3*fs+fr	174.5	174.4	174.4	174.4	174.4	0.0005	0.0001	0.0004	0.0009
3*fs-fr	125.5	125.4	125.4	125.4	125.5	0.0006	0.0002	0.0008	0.0009
5*fs+fr	274.5	274.3	274.3	274.3	274.4	0.0017	0.0010	0.0015	0.0034
5*fs-fr	225.5	225.2	225.2	225.3	225.4	0.0016	0.0009	0.0034	0.0014
7*fs+fr	374.5	374.2	374.2	374.3	374.3	0.0003	0.0009	0.0010	0.0007
7*fs-fr	325.5	324.4	325.4	325.3	325.5	0.0003	0.0002	0.0017	0.0040

La charge 85% fr=24.1 ,g=0.036									
Les formules	Fréquence théorique	Fréquence réel				Amplitude			
		Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés	Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés
1*fs+fr	74.1	74.1	74.1	74.1	74	0.0324	0.0239	0.0354	0.0156
1*fs-fr	25.9	25.9	25.8	25.9	25.9	0.0509	0.0273	0.0598	0.0475
3*fs+fr	174.1	174.9	173.6	174.6	173.9	0.0041	0.0031	0.0032	0.0008
3*fs-fr	125.9	125.7	126.2	125.2	125.9	0.0010	0.0016	0.0019	0.0010
5*fs+fr	274.1	274.9	274	274.6	273.9	0.0090	0.0022	0.0068	0.0044
5*fs-fr	225.9	225.7	225.7	225.8	225.8	0.0042	0.0029	0.0042	0.0011
7*fs+fr	374.1	374.8	374	374.5	373.9	0.0018	0.0012	0.0037	0.0015
7*fs-fr	325.9	325.7	326.1	325.1	325.8	0.0011	0.0081	0.0241	0.0004

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

La charge 50% ,fr=24.5 ,g=0.02									
Les formules	Fréquence théorique	Fréquence réel				Amplitude			
		Etat sain	1 barre Cassé	2 barres cassés	3 barres cassés	Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés
(1+2g)fs	52	51.9	51.8	51.9	52	0.0013	0.0052	0.0286	0.0627
(1-2g)fs	48	48	48.1	48	48	0.0031	0.0045	0.0246	0.0521
(3+2g)fs	152	152	152	152	152	0.0001	0.0003	2.6 e-5	0.0008
(3-2g)fs	148	148	148	148	147.9	0.0006	0.0015	0.0026	0.0037
(5+2g)fs	252	251.8	251.6	251.8	251.9	0.0005	0.0013	0.0020	0.0056
(5-2g)fs	248	247.9	248	247.9	247.9	0.0025	0.0031	0.0014	0.0023
(7+2g)fs	352	351.7	351.5	351.7	351.9	0.0013	0.0015	0.0014	0.0014
(7-2g)fs	348	347.8	347.9	347.8	347.8	0.0009	0.0025	0.0070	0.0067

La charge 85% fr=24.1 ,g=0.036									
Les formules	Fréquence théorique	Fréquence réel				Amplitude			
		Etat sain	1 barre Cassé	2 barres cassés	3 barres cassés	Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés
(1+2g)fs	53.6	53.5	53.4	53.5	53	0.0035	0.0103	0.0518	0.1075
(1-2g)fs	46.4	46.4	46.6	46.4	46.3	0.0044	0.0123	0.0410	0.0854
(3+2g)fs	153.6	153.6	153.3	153.4	153.6	0.0003	0.0010	0.0007	0.0013
(3-2g)fs	146.4	146.3	146.5	146.4	146.2	0.0015	0.0018	0.0029	0.0031
(5+2g)fs	253.6	253.4	253.3	253.4	253.6	0.0009	0.0016	0.0013	0.0069
(5-2g)fs	246.4	246.3	246.5	246.3	246.2	0.0018	0.0034	0.0038	0.0095
(7+2g)fs	353.6	353.4	353.2	353.3	353.5	0.0010	0.0019	0.0010	0.0027
(7-2g)fs	346.4	346.2	346.4	346.3	346.1	0.0012	0.0039	0.0063	0.0051

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 RBFH augmentent sensiblement suite à la présence d'un défaut dans la cage rotorique (rupture de barres). Ceci confirme et valide les résultats théoriques obtenus par l'étude analytique.

Il faut bien remarquer que certains harmoniques appartenant aux autres familles (EFH, TH et RSH) sont également affectés par la présence de ce type de défaut. Ceci peut être expliqué par le fait que la rupture d'une barre rotorique déclenche un processus très compliqué des phénomènes physiques accompagnées par des oscillations dans la vitesse ce qui peut être la cause des changements observés sur ces harmoniques.

III.5. LES INDICATEURS DES DEFAUTS ROTORIQUES [8]

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.

Dans notre cas, on a étudié le défaut des ruptures de barres ou les anneaux de court-circuit dans la cage rotorique. Notre étude analytique a montrée clairement que ce type de défaut est caractérisé par une famille des signatures spectrales appelée **RBFH**, gouvernée par la relation (II.45). Comme il existe une infinité des signatures pour ce défaut, il est possible également de définir une infinité des indicateurs pour ce 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 neuf indicateurs de défauts rotoriques :

Les indicateurs	Les formules
I_{n1}	$\frac{A_{(1-2g)} \cdot fs}{A_{fs}}$
I_{n2}	$\frac{A_{(1-2g)} \cdot fs + A_{(1+2g)} \cdot fs}{A_{fs}}$
I_{n3}	$\frac{A_{(5-4g)} \cdot fs}{A_{fs}}$
I_{n4}	$\frac{A_{(7-2g)} \cdot fs}{A_{fs(5)}}$
I_{n5}	$\frac{A_{(1-2g)} \cdot fs \text{ (Actuel)} - A_{(1-2g)} \cdot fs \text{ (Référence)}}{A_{(1-2g)} \cdot fs \text{ (Référence)}}$
I_{n6}	$\frac{A_{(1+2g)} \cdot fs \text{ (Actuel)} - A_{(1+2g)} \cdot fs \text{ (Référence)}}{A_{(1+2g)} \cdot fs \text{ (Référence)}}$
I_{n7}	$\frac{\sum A_{(1+2g)} \cdot fs \text{ (Act)} - \sum A_{(1+2g)} \cdot fs \text{ (Réf)}}{\sum A_{(1+2g)} \cdot fs \text{ (Réf)}}$
I_{n8}	$\frac{A_{2g \cdot fs}}{A_{dc}}$

I_{n9}	$\frac{A_{2g.fs} (Act) - A_{2g.fs} (Réf)}{A_{2g.fs} (Réf)}$
----------	---

Tab. III.4. Les indicateurs [8].

Avec :

$A_{(1-2g).fs}$ = Amplitude la harmonique de fréquence (1-2g)fs.

$A_{(1+2g).fs}$ = Amplitude la harmonique de fréquence (1+2g)fs.

$A_{(5-4g).fs}$ = Amplitude la harmonique de fréquence (5-4g)fs.

$A_{(7-2g).fs}$ = Amplitude la harmonique de fréquence (7-2g)fs.

A_{fs} : Amplitude la harmonique fondamentale de fréquence fs.

A_{fs5} = Amplitude la harmonique de fréquence 5fs.

A_{2gfs} = Amplitude la harmonique de fréquence 2g.fs .

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

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

III.5.1.1. Tableau des indicateurs

Les indicateurs	La charge	Etat sain	1 barre cassé	2 barres cassés	3 barres cassés	
$I_{n1} = \frac{A_{(1-2g).fs}}{A_{fs}}$ *100% A_{In1} : Amplitude des indices (I_{n1}) Δ_{In1} : Le taux de variation sur l'indice (I_{n1})	0%	/	/	/	/	
	20%	A_{In1}	0.031	0.085	0.285	0.563
		Δ_{In1}	0	174.19	819.35	1716.12
	50%	A_{In1}	0.055	0.087	0.443	0.889
		Δ_{In1}	0	58.18	705.45	1516.36
	85%	A_{In1}	0.055	0.153	0.513	1.038
		Δ_{In1}	0	178.18	832.72	1787.27
	$I_{n2} = \frac{A_{(1-2g).fs} + A_{(1+2g).fs}}{A_{fs}}$ *100% A_{In2} : Amplitude des indices (I_{n2}) Δ_{In2} : Le taux de variation sur l'indice (I_{n2})	0%	/	/	/	/
20%		A_{In2}	0.067	0.133	0.580	1.209
		Δ_{In2}	0	98.50	765.67	1704.47
50%		A_{In2}	0.079	0.187	0.958	1.959
		Δ_{In2}	0	136.70	1112.65	2379.74
85%		A_{In2}	0.099	0.282	1.161	2.346
		Δ_{In2}	0	184.84	1072.72	2269.69
$I_{n3} = \frac{A_{(5-4g).fs}}{A_{fs}}$ *100% A_{In3} : Amplitude des indices (I_{n3}) Δ_{In3} : Le taux de variation sur l'indice (I_{n3})		0%	/	/	/	/
	20%	A_{In3}	0.010	0.029	0.043	0.057
		Δ_{In3}	0	190	330	470
	50%	A_{In3}	0.028	0.027	0.095	0.105
		Δ_{In3}	0	-3.57	239.28	275

	85%	A_{In3}	0.042	0.030	0.113	0.131
		Δ_{In3}	0	-28.57	169.04	211.90
$I_{n4} = \frac{A_{(7-2g).fs}}{A_{fs(5)}}$ *100% A_{In4} : Amplitude des indices (I_{n4}) Δ_{In4} : Le taux de variation sur l'indice (I_{n4})	0%		/	/	/	/
	20%	A_{In4}	0.202	0.504	0.957	0.920
		Δ_{In4}	0	149.50	373.76	355.44
	50%	A_{In4}	0.121	0.315	1.081	0.961
		Δ_{In4}	0	160.33	793.38	694.21
	85%	A_{In4}	0.142	0.423	0.886	0.638
	Δ_{In4}	0	197.88	523.94	349.29	
$I_{n5} = \frac{A_{(1-2g).fs} (Actuel) - A_{(1-2g).fs} (Référence)}{A_{(1-2g).fs} (Référence)}$ *100%	0%		/	/	/	/
	20%		0	41.66	891.66	1883.33
	50%		0	45.16	693.54	1580.64
	85%		0	179.54	831.81	1840.90
$I_{n6} = \frac{A_{(1+2g).fs} (Actuel) - A_{(1+2g).fs} (Référence)}{A_{(1+2g).fs} (Référence)}$ *100%	0%		/	/	/	/
	20%		0	46.15	938.46	1969.23
	50%		0	300	2100	4723.07
	85%		0	194.28	1380	2971.42
$I_{n7} = \frac{\sum A_{(1\pm 2g).fs} (Act) - \sum A_{(1\pm 2g).fs} (Réf)}{\sum A_{(1\pm 2g).fs} (Réf)}$ *100%	0%		/	/	/	/
	20%		0	44	916	1928
	50%		0	120.45	1109.09	2509.09
	85%		0	186.07	1074.68	2341.77
$I_{n8} = \frac{A_{2g.fs}}{A_{dc}}$ *100% A_{In8} : Amplitude des indices (I_{n8}) Δ_{In8} : Le taux de variation sur l'indice (I_{n8})	0%		/	/	/	/
	20%	A_{In8}	0.011	0.054	0.061	0.154
		Δ_{In8}	0	390.90	454.54	1300
	50%	A_{In8}	0.065	0.119	0.644	1.467
		Δ_{In8}	0	83.07	890.76	2156.92
	85%	A_{In8}	0.074	0.125	0.643	1.424
	Δ_{In8}	0	68.91	768.91	1824.32	
$I_{n9} = \frac{A_{2g.fs} (Act) - A_{2g.fs} (Réf)}{A_{2g.fs} (Réf)}$ *100%	0%		/	/	/	/
	20%		0	383.33	466.66	1333.33
	50%		0	77.08	887.50	2179.16
	85%		0	64.10	760.25	1832.05

Tab. III.3. Les indicateurs de défaut du cassure du barres rotoriques.

Le tableau ci-dessus montre que la présence d'un défaut dans la cage rotorique 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 : la sévérité du défaut et le régime de fonctionnement.

En conséquence et vue le grand nombre des indicateurs de défaut rotorique, 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 à la sévérité du défaut ;
- Sensibilité au régime de fonctionnement.

III.5.1.2. Les courbes des indices

A. Sensibilité à la naissance et sévérité du défaut

■ 20% de la charge nominale :

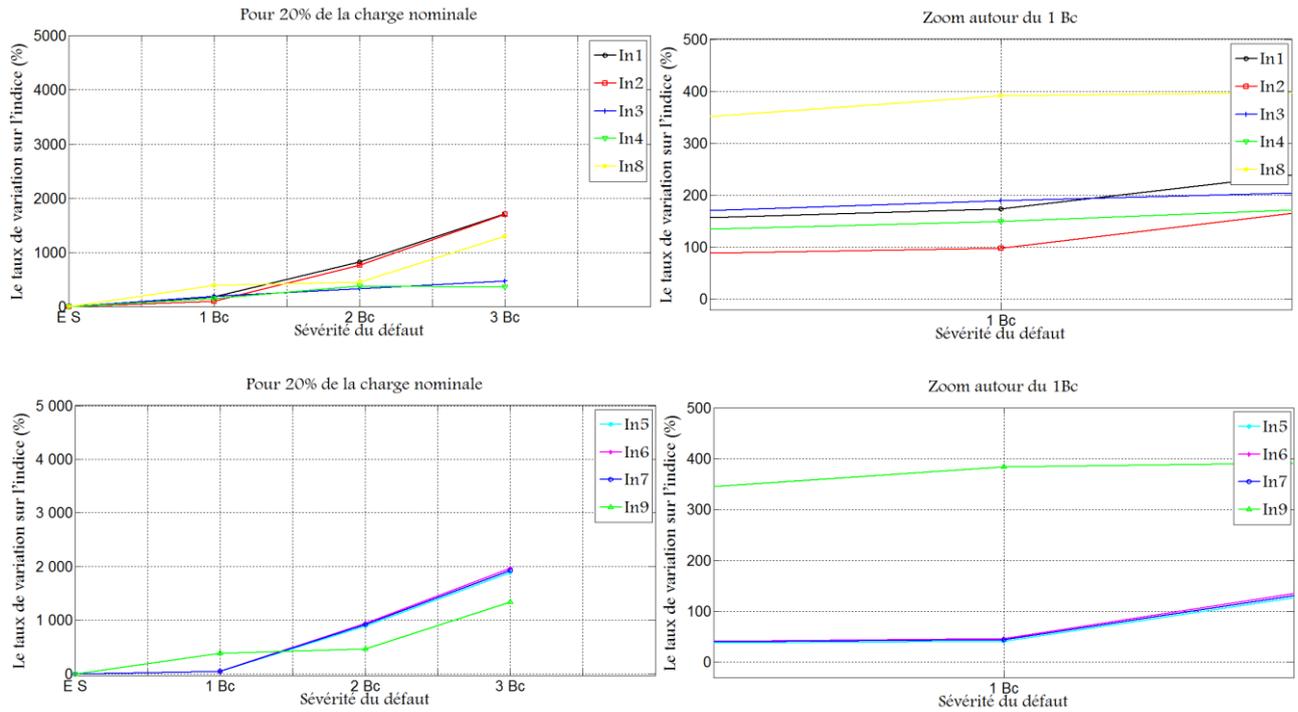
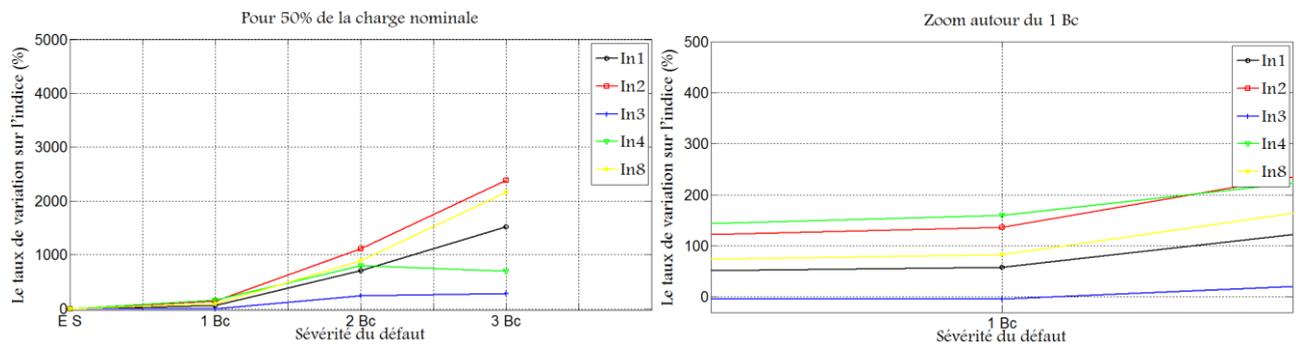


Fig. III.9. Sensibilité à l'apparition du défaut 20% de la charge nominale.

■ 50% de la charge nominale :



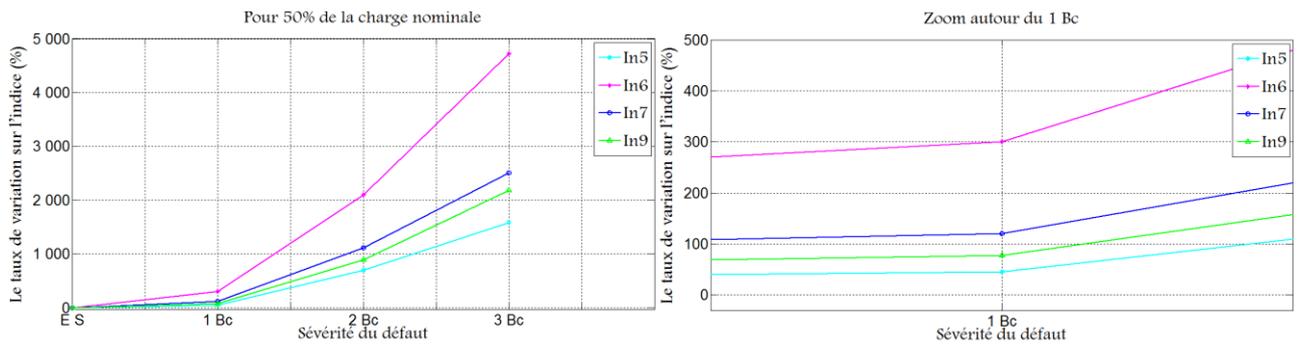


Fig. III.10. Sensibilité à l'apparition du défaut 50% de la charge nominale.

■ 85% de la charge nominale :

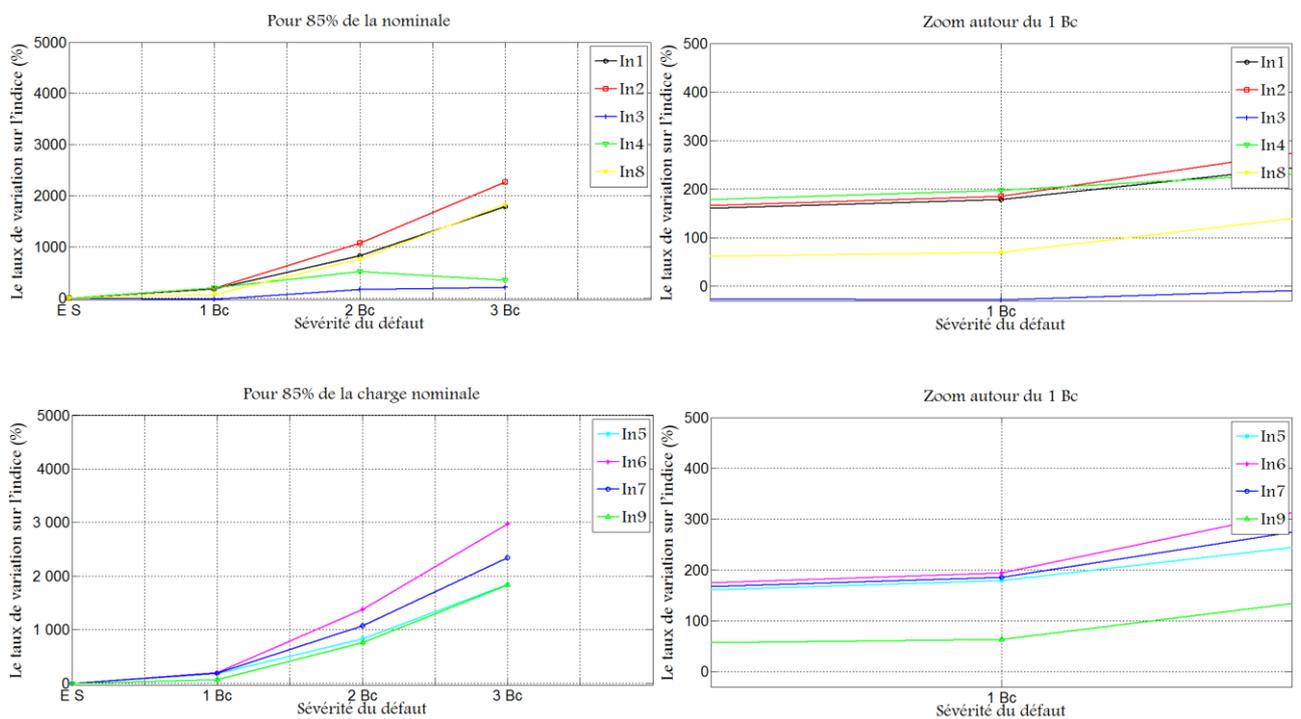


Fig. III.11. Sensibilité à l'apparition du défaut 85% de la charge nominale.

Les figures III.9-11 montrent une comparaison entre les indicateurs définis précédemment du point de vue sensibilité à l'apparition et la sévérité du défaut rotorique.

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.

Le deuxième critère de comparaison permet de quantifier la sévérité des défauts. Un bon indicateur est celui qui augmente sensiblement lorsque le défaut devient plus grave. Ceci permet aux opérateurs du diagnostic de prendre des décisions rapides quant à la planification des arrêts pour les systèmes surveillés.

Par conséquent, ces deux critères nous permettront de faire une présélection et d'éliminer ainsi certains indices qui ne satisfassent pas ces critères.

D'une manière globale, on peut remarquer que la plupart des indicateurs réagissent sensiblement dès la présence d'un problème dans la cage rotorique est ceci pour les trois régimes de fonctionnement étudiés. Cependant, une vérification fine de ces courbes permet de confirmer que les indices **In3** et **In4** sont les moins sensibles à la présence du défaut pour tous les régimes de fonctionnement. De plus, ils ont une réaction très faibles en fonction de la sévérité du défaut. Donc, il est déconseillé d'utiliser ces indicateurs.

Les figures III.9-11 montrent aussi que les indices **In1**, **In2**, **In6** et **In7** augmentent sensiblement est d'une manière régulière en fonction de la sévérité de défaut pour tous les régimes de fonctionnement. On remarque que les valeurs des **In2** et **In6** sont les plus grandes par rapport aux autres ce qui confirme leur supériorité. On remarque aussi que les valeurs des indices **In8** et **In9** varient d'une façon aléatoire non explicable pour les faibles charges ; donc on peut pas les considérés comme des bons indicateurs de défauts. Concernant l'indices **In5**, les figures montrent qu'il évolue aussi en fonction de la sévérité du défaut mais son taux d'augmentation est inférieur à ceux correspondant aux autres indicateurs (**In2** et **In6**).

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

■ Etat Sain :

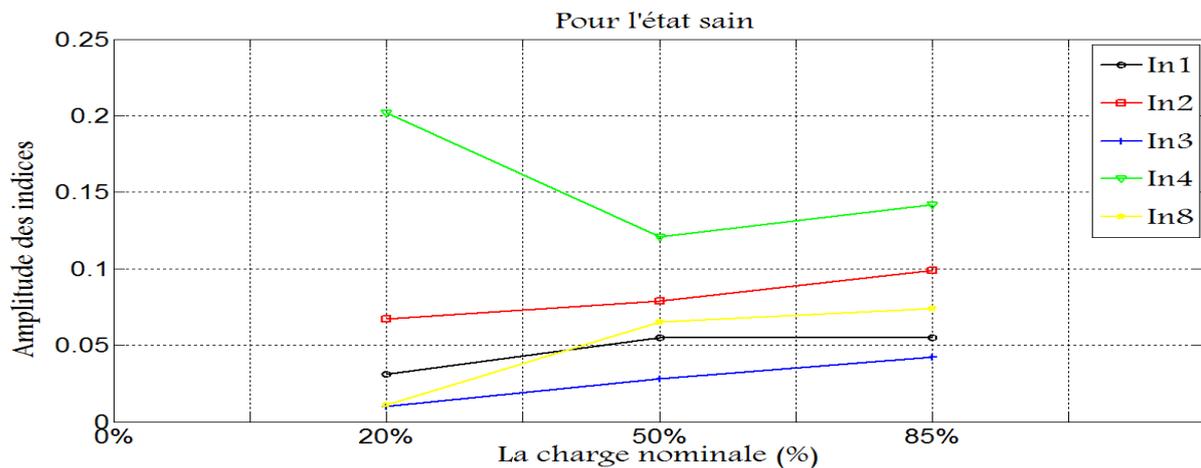


Fig. III.12. Sensibilité au régime de fonctionnement à l'état sain.

■ 1 Barre cassé :

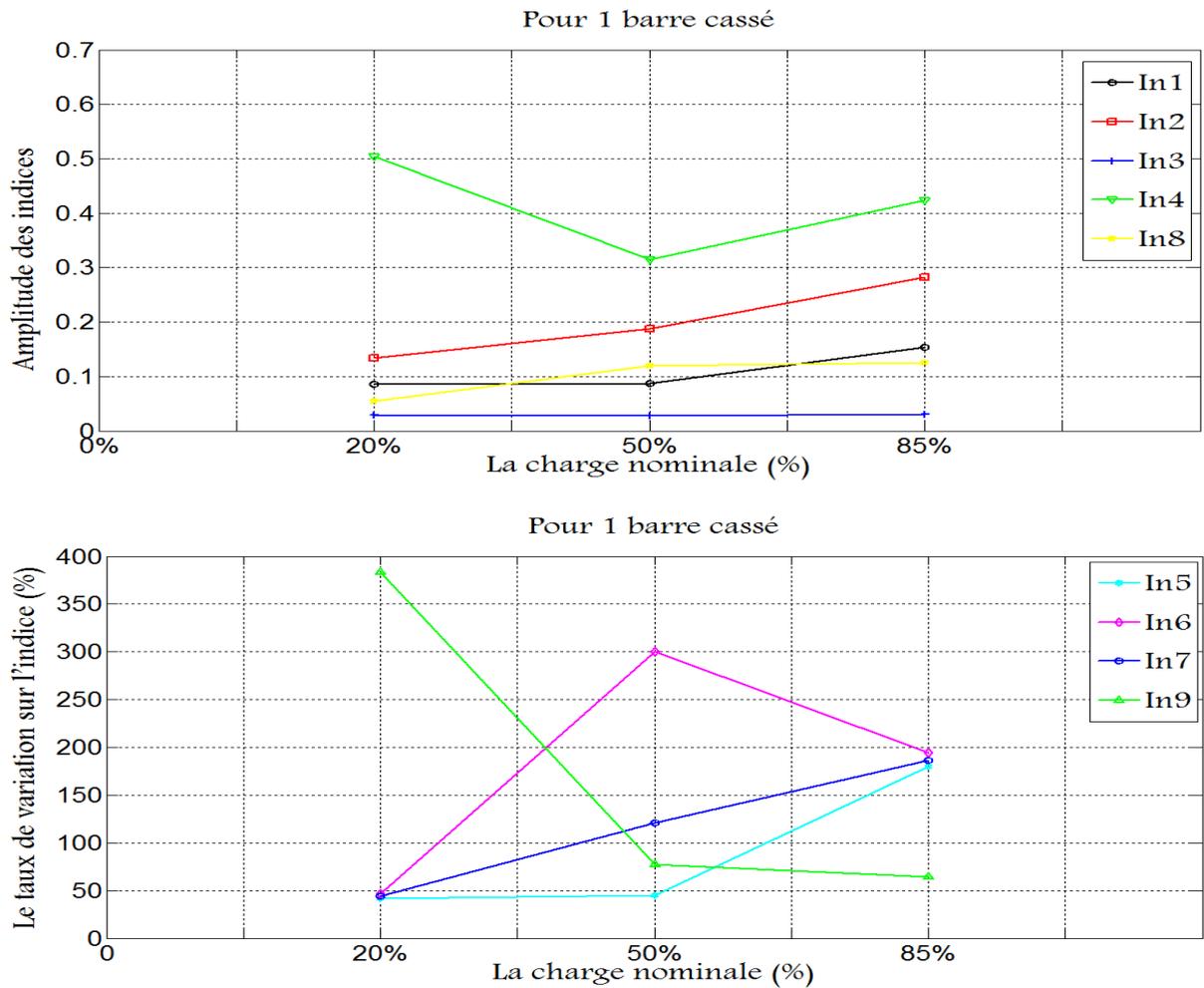
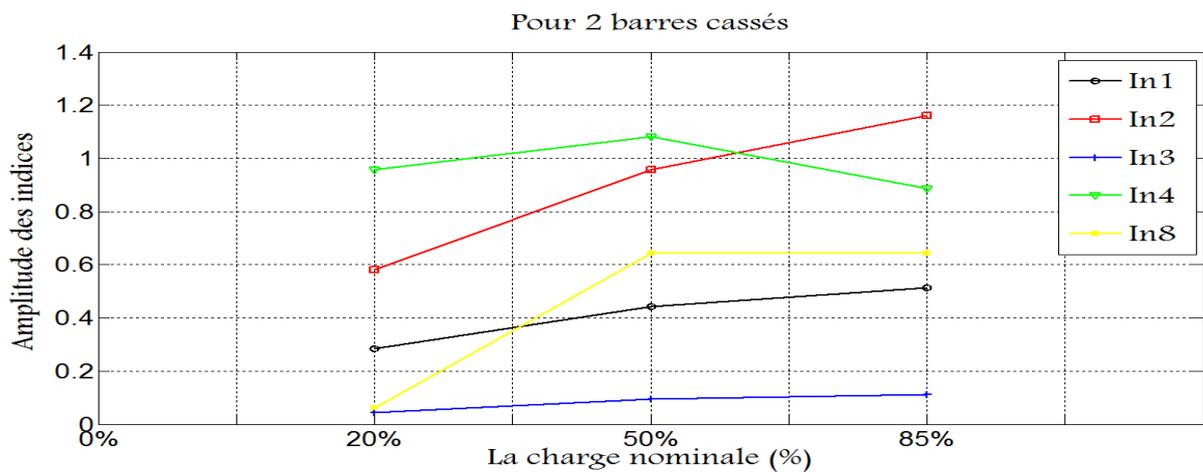


Fig. III.13. Sensibilité au régime de fonctionnement avec 1 barre cassé.

■ 2 Barres cassés :



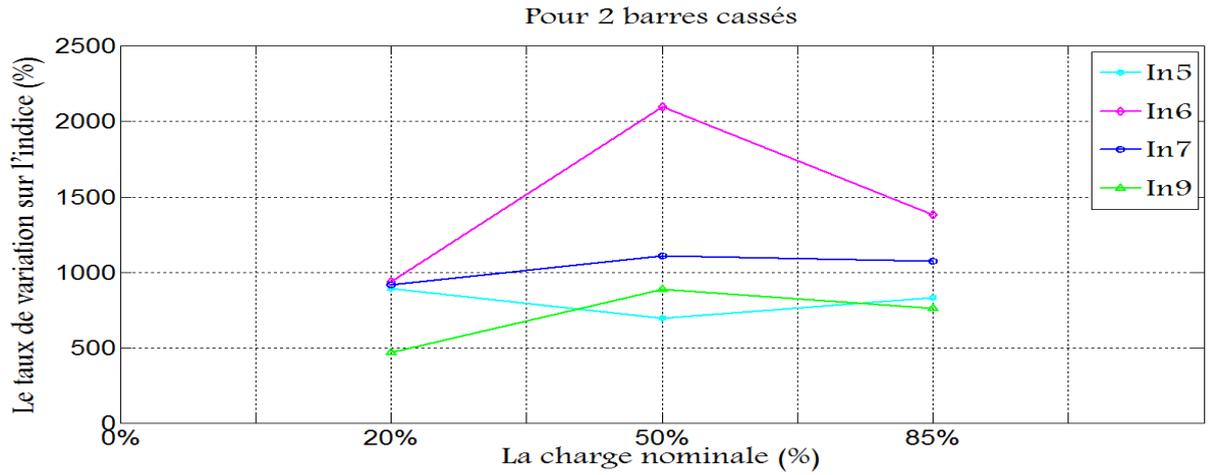


Fig. III.14. Sensibilité au régime de fonctionnement avec 2 barres cassés.

■ 3 Barres cassés :

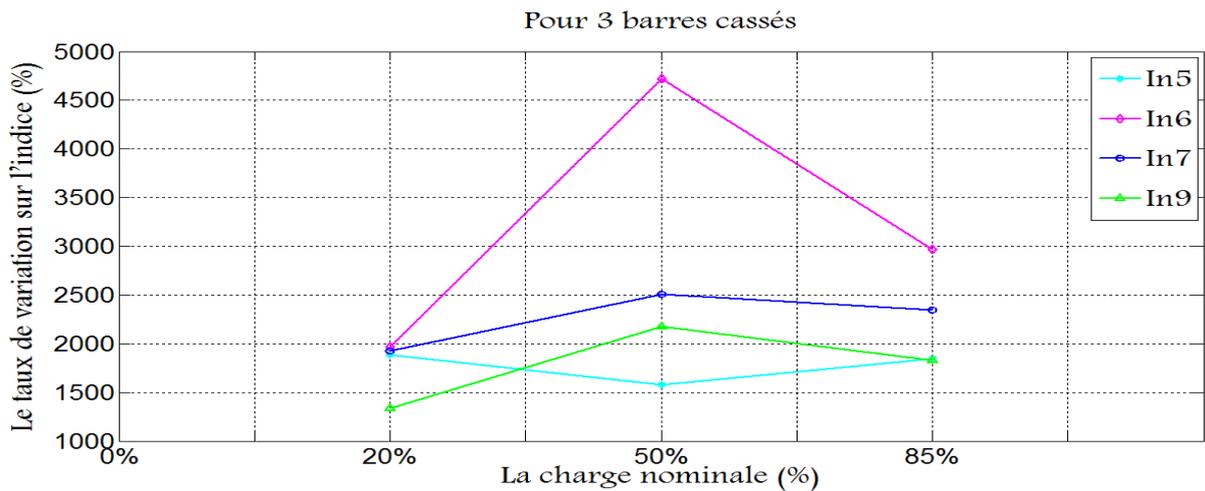
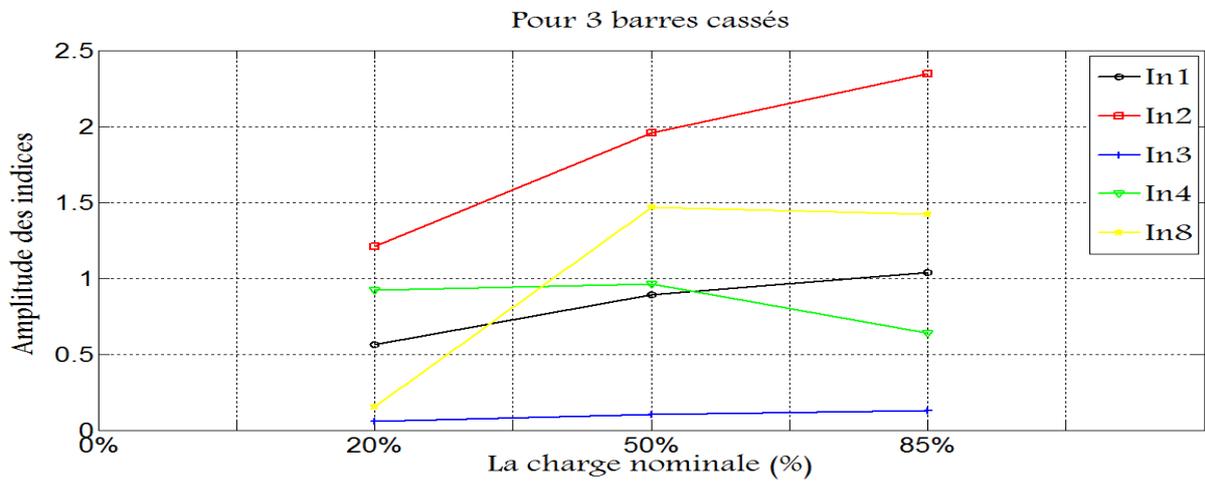
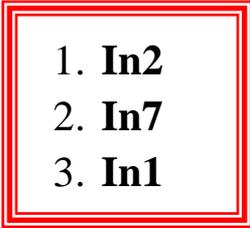


Fig. III.15. Sensibilité au régime de fonctionnement avec 3 barres cassés.

Le troisième 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.12-15 montrent l'évolution des indicateurs étudiés pour différentes charges (20% ,50% ,85% du couple nominal) lorsque le moteur comporte un défaut de cassure de barres. On remarque que **In1**, **In2** et **In7** sont les indices les plus stables lorsqu'on passe d'un régime à un autre. Par contre, les indices **In6** et **In8** 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, les trois meilleurs indicateurs des défauts dans la cage rotorique peuvent être classés selon l'ordre suivant :

- 
1. **In2**
 2. **In7**
 3. **In1**

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. 17, III.18, III.19 et III.20, 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 la sévérité du défaut

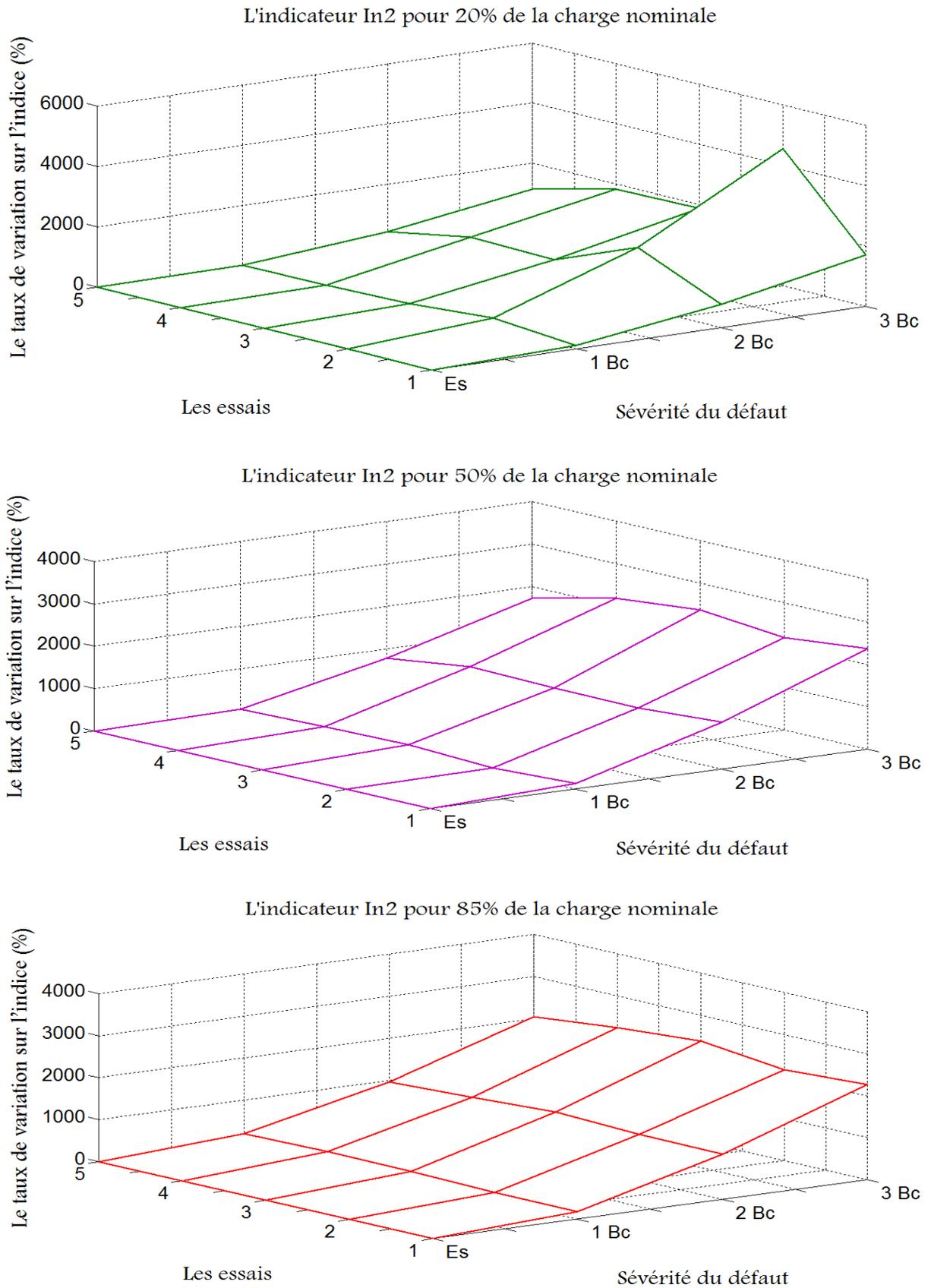


Fig. III.16. Courbes en trois dimensions d'indicateur **In2** pour différents l'essai.

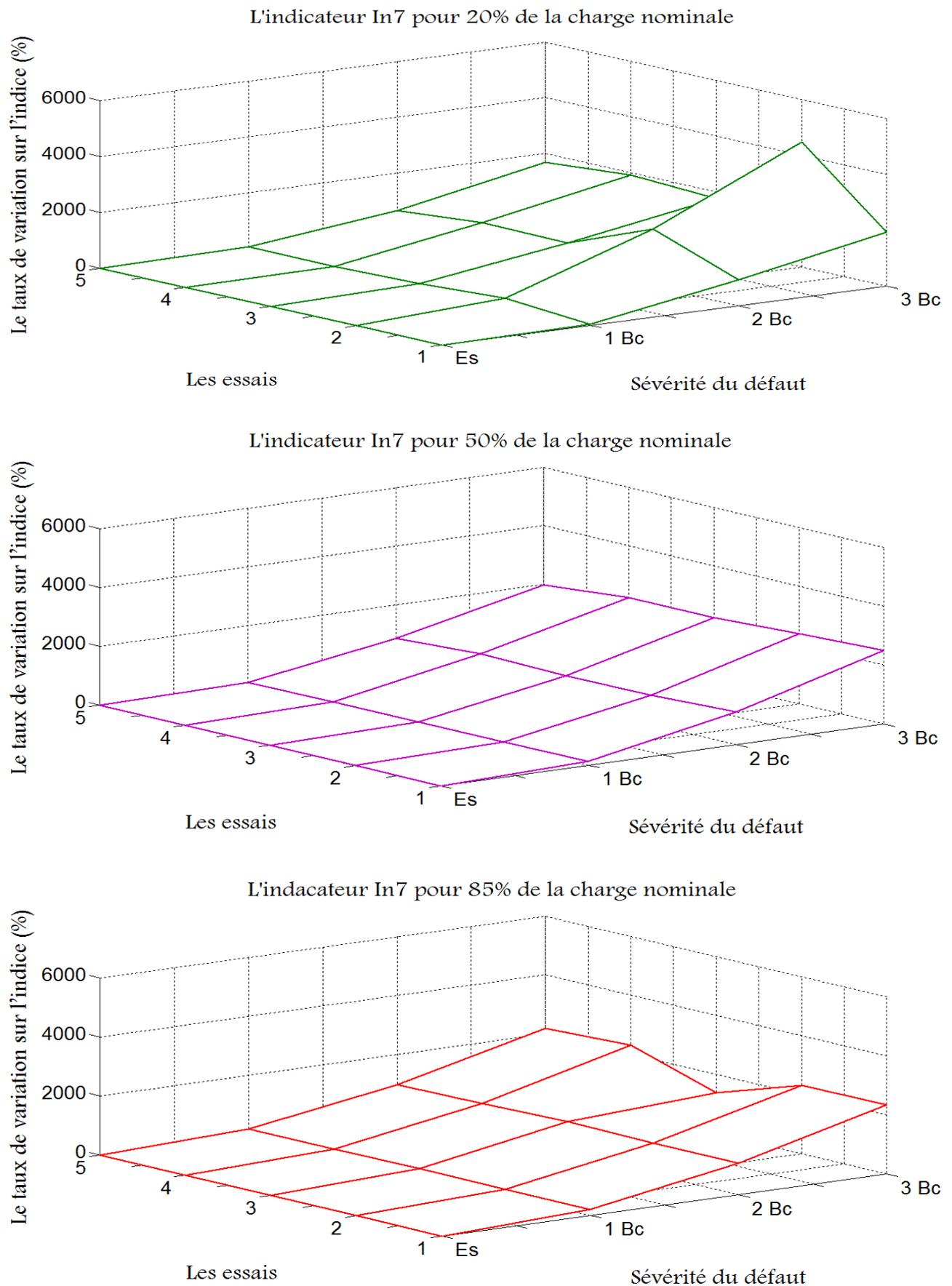


Fig. III.17. Courbes en trois dimensions d'indicateur In7 pour différents l'essai.

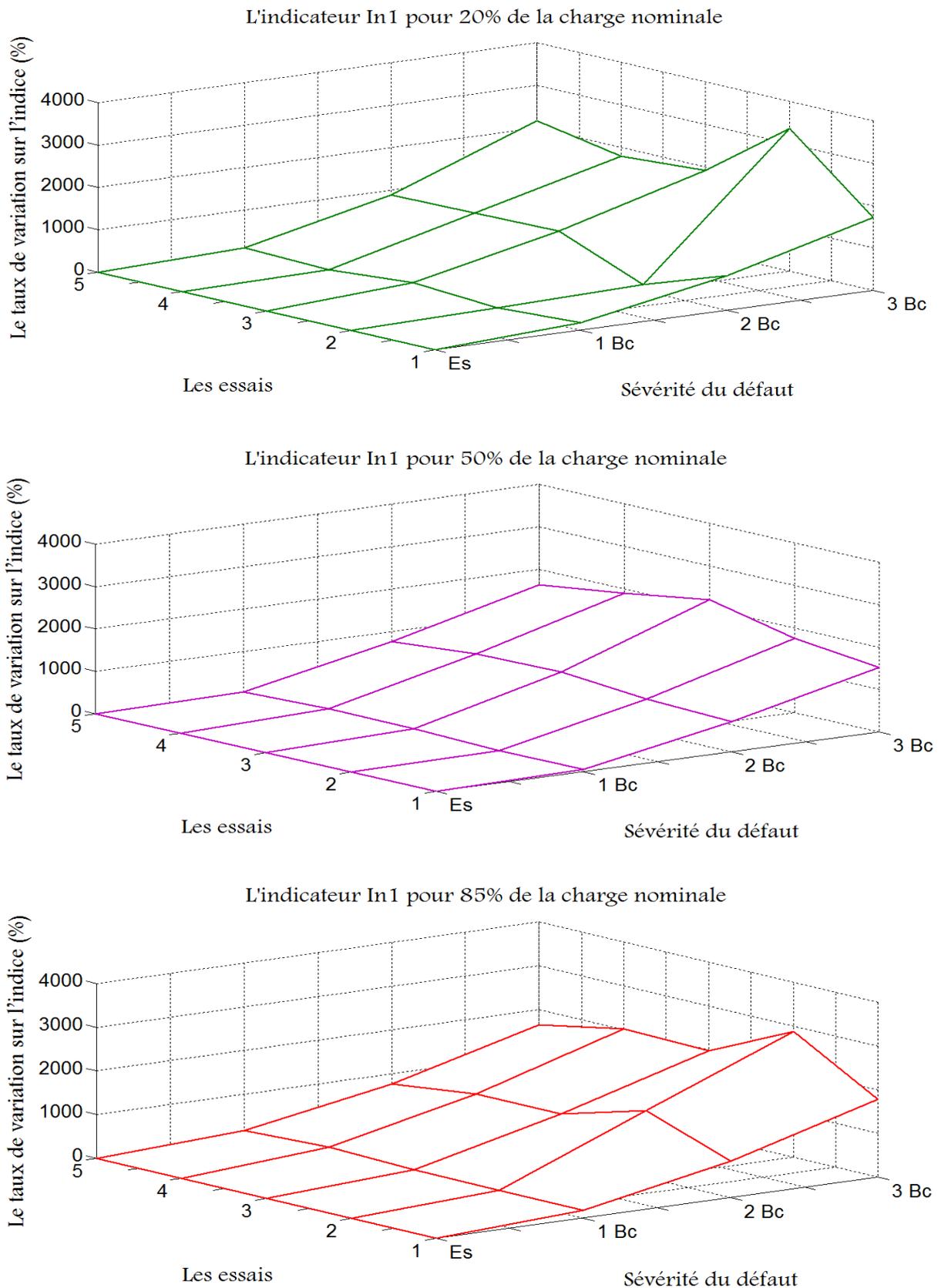
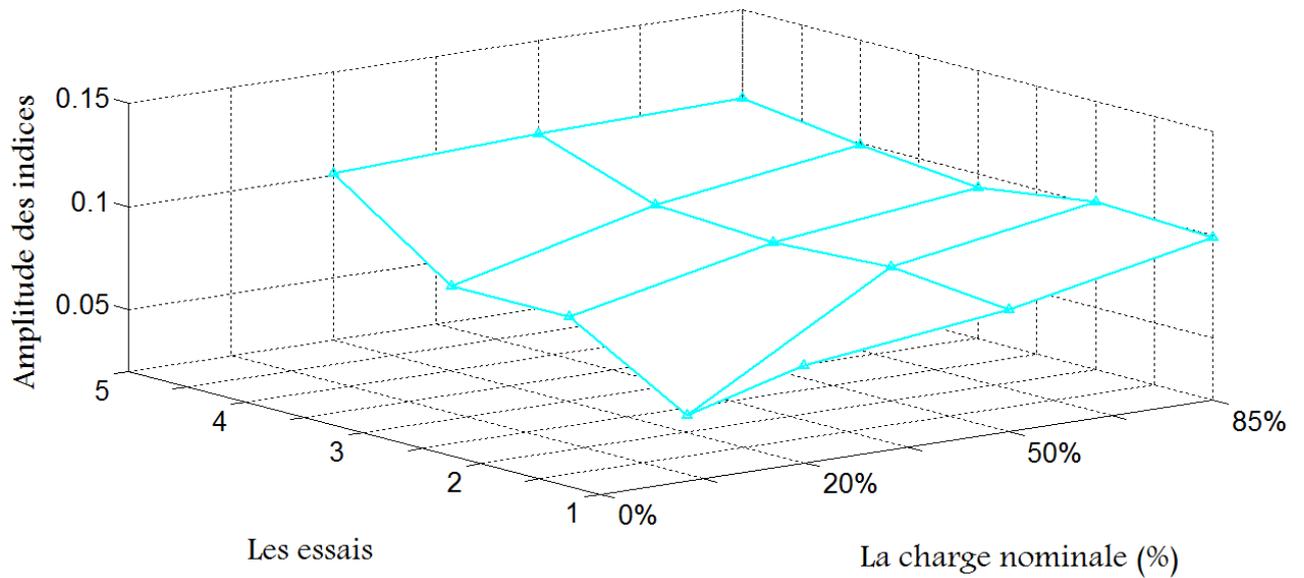


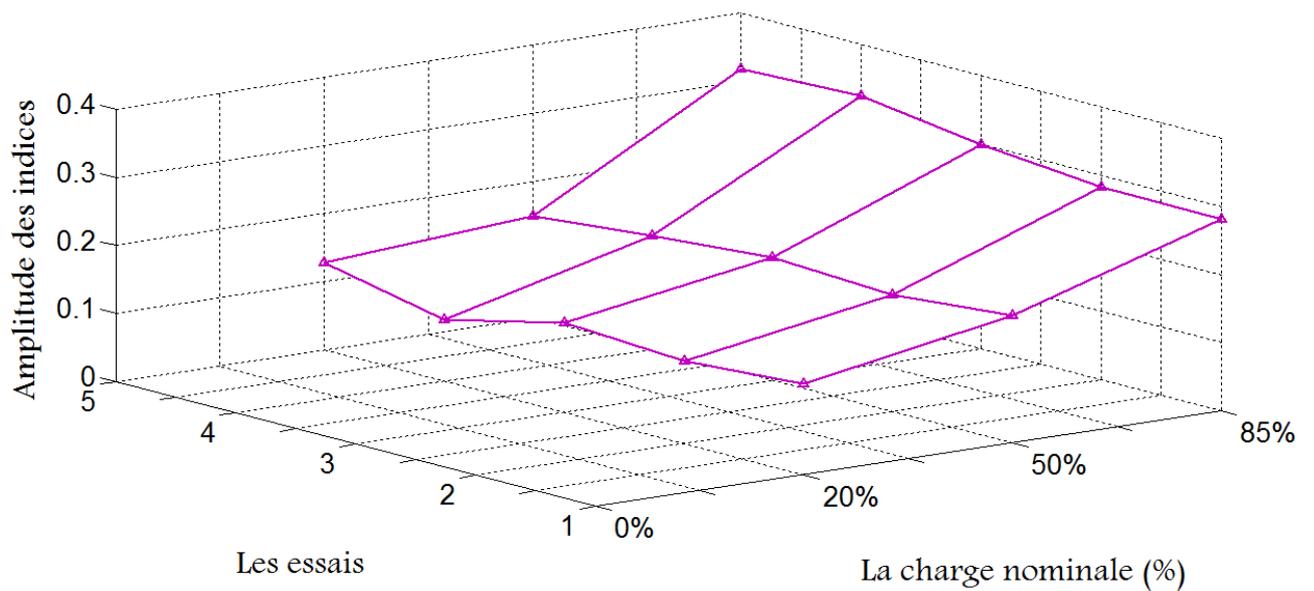
Fig. III.18. Courbes en trois dimensions d'indicateur In1 pour différents l'essai.

III.6.2. Sensibilité au régime de fonctionnement

L'indicateur In2 pour l'état sain



L'indicateur In2 avec 1 barre cassé



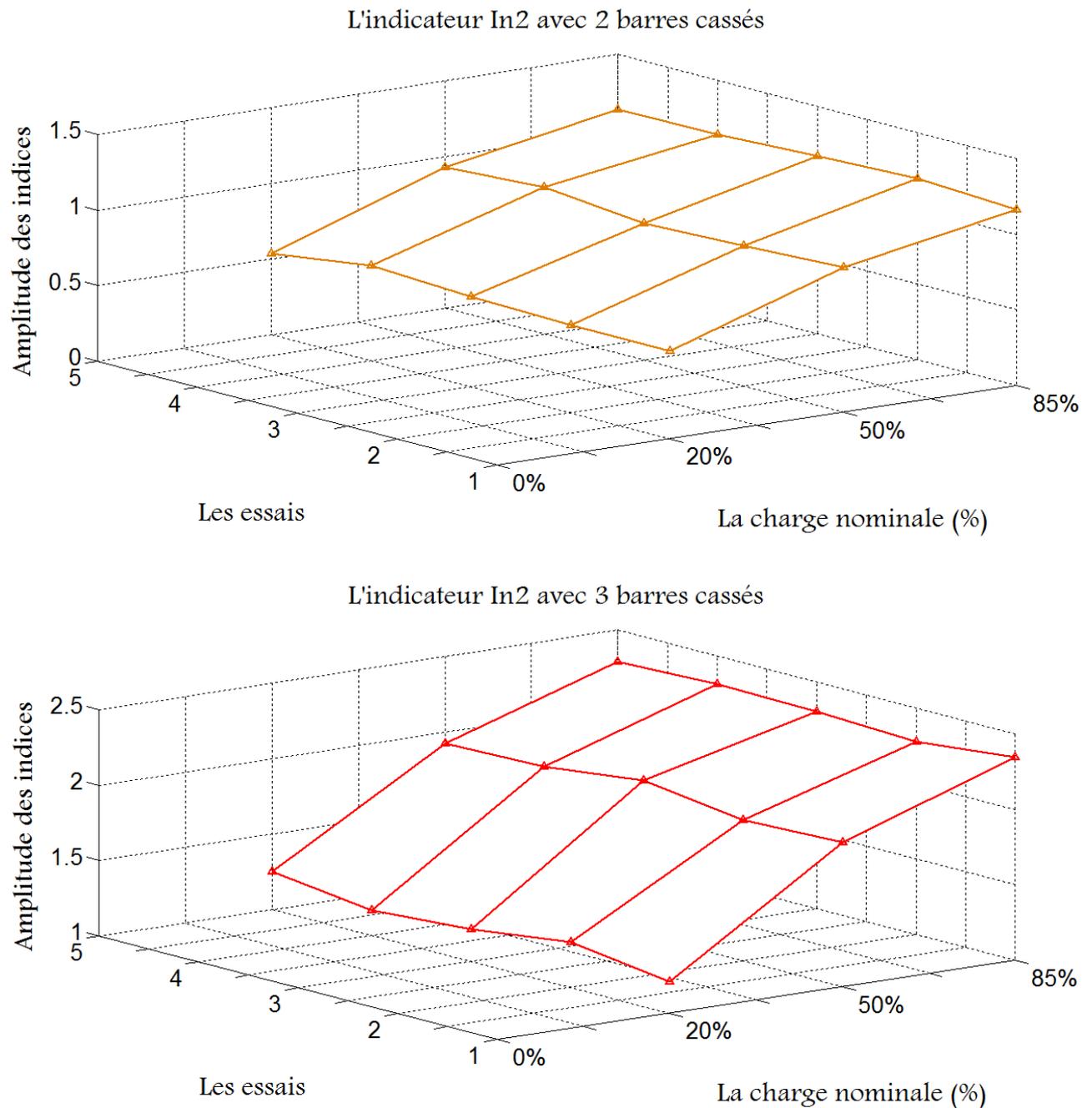


Fig. III.19. Courbes en trois dimensions d'indicateur **In2** pour différents l'essai.

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 neuf 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

générale

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 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 cassure de barres rotoriques, Cette étude nous a conduits à identifier seulement trois types d'harmoniques: les TH et les RSH lors d'un fonctionnement sain. Et les harmoniques **RBFH** lors d'une présence d'un défaut de barres rotoriques.

Nous avons présenté dans le troisième chapitre de l'étude expérimentale au niveau de laboratoire LGE de Biskra, De plus, on a définie neuf 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.

Nous avons 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, les trois meilleurs indicateurs des défauts dans la cage rotorique peuvent être classés selon l'ordre suivant :

1/ In2

2/ In7

3/ In1

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : M. SAHRAOUI, " Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones", Thèse de Doctorat, Université Mohamed KHIDER Biskra, 2010.
- [2] : 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.
- [3] : Babak VASEGHI, "Contribution à L'étude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-Spires", Thèse de Doctorat, Nancy Université-Institut National Polytechnique de Lorraine-France, 3 décembre 2009.
- [4] : Mohammed GAOUAOUI, "Diagnostic par Reconnaissance des Formes Application à la Machine asynchrone", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 02-2012-22.
- [5] : Badreddine CHERMAT, "Diagnostic des défauts de MAS par les méthodes paramétriques de traitement du signal", Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 06 Juin 2012.
- [6] : 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.
- [7] : Samir BOUKHERCHA, Zoheir *DILMI*, "Diagnostic de défauts de la MAS à Rotor à Cage d'écureuil ", Mémoire de D'Ingénieur d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassan Badi, El-Harrach, Algérie, Juin 2006.
- [8] : Claudio Bruzzese, "Analysis and application of Particular Current Signatures (Symptoms) for Cage Monitoring in Nonsinusoidally Fed Motors With High Rejection to Drive Load, Inertia, and Frequency Variations", IEEE Transactions on industrial electronics, VOL. 55, No. 12, December 2008 pp4137-4155.