

**CBVCNCVNCVBNREPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE  
ET POPULAIRE MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE DE M'SILA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

**FILIERE : GENIE ELECTRIQUE**

**OPTION : ELECTROMECHANIQUE**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE  
SPECIALITE : ELECTROMECHANIQUE**

**Présenté par :**

- DJALAB ABDERAZAK**
- RIDA AHMED**

## **THEME**

**Contribution au diagnostic des machines  
asynchrones par l'analyse de flux de fuite**

**Soutenu devant le jury composé de :**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr ZORIG assam Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Encadreur
Dr HAMOUDA Noureddine centre de recherche Cheraga-Alger	co- Encadreur
RAHALI hilal Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur
BELHACHET khaled Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2023 / 2024**

# Remerciements

Ma gratitude doit d'abord être  
exprimée envers le bon Dieu « ﷻ »  
le tout puissant, qui m'a donné la  
sagesse, la patience, le courage et la  
volonté pour qu'on puisse terminer  
ce travail

Je tiens à remercier tous ceux  
qui ont contribué de près ou de loin,  
à la réalisation de ce travail, en  
Particulier Mr ZORIGE

Mes sincères remerciements  
S'adressent aussi aux membres de  
jury d'avoir accepté de juger mon travail.

je remercie aussi tous les  
enseignants, sans exception, car c'est  
grâce à eux que je suis arrivé à  
faire ce travail.

Sans oublier toute la  
famille mon père, ma mère,  
mes frères et sœurs et mes  
amis.

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, merci pour tous les sacrifices consentis afin de me permettre d'être ce que je suis ; Je leur exprime humblement ma profonde gratitude et mon attachement éternel.*

*ET à tout mes chères amies*

*Pour une sincérité si merveilleuse ....jamais oubliable, en leur souhaitant Tout le succès ...tout le bonheur*

*À toute la promotion 2024 de la spécialité electromecanique*

**DJALAB ABDERAZAK**

# Dédicasse

**Je dédie ce mémoire**

**Ma mère**, qui m'a encouragé à aller de l'avant et Qui m'a donné tout son amour pour reprendre mes études

**Pour** sa patience, sa amour, sa soutien et sa **Encouragement**

**Ma sœur**, qui m'a encouragé à aller de l'avant.

**A tout** ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé  
Ames frères

Je leur souhaite tout le succès... tout le bonheur

**A mes amis et mes camarades**

**Pour** une sincérité si merveilleuse ...jamais oubliable, en leur souhaitant  
Tout le succès ...tout le bonheur

**Sans oublier** tous les professeurs que ce soit du Primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

**A tout** personne Qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie

**RIDA Ahmed .**

# SOMMAIRE

# SOMMAIRE

Sommaire.....	I
Liste des figures.....	III
Liste de tableaux.....	VIII
Liste des Notations et Symboles.....	IX
<b>Introduction</b>	
<b>générale.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I L'état de l'art de diagnostic des machines asynchrones .....</b>	<b>2</b>
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>2</b>
<b>I.2 La machine asynchrone .....</b>	<b>2</b>
I.2.1 Constitution de la machine asynchrone .....	2
I.2.1.1 Stator .....	3
I.2.1.2 Rotor bobiné .....	3
I.2.1.3 Le rotor à cage d'écureuil.....	3
I.2.1.4 Les organes mécaniques.....	4
I.2.2 Principe de fonctionnement .....	5
<b>I.3 Analyse chiffrée des pannes de la machine asynchrone .....</b>	<b>6</b>
I.3.1 l'importance de la surveillance des machines électriques .....	6
I.3.2 Défaillances au stator.....	7
I.3.2.1 Défauts d'isolant dans un enroulement .....	7
I.3.2.2 Court-circuit entre spires .....	7
I.3.2.3 Court-circuit entre phases.....	8
I.3.2.4 Court-circuit phase/bâti .....	8
I.3.2.5. Défauts de circuit magnétique.....	9
I.3.3. Défaillances au rotor .....	9
I.3.3.1. Ruptures de barres .....	9
I.3.3.2. Ruptures d'anneaux.....	10
I.3.3.3. Excentricité statique et dynamique .....	10
<b>I.4. Méthodes de surveillance des grandeurs mesurables .....</b>	<b>10</b>
I.4.1. Surveillance thermique .....	11
I.4.2. Surveillance des vibrations .....	13
I.4.3. Surveillance du couple.....	14
I.4.4. Surveillance du bruit .....	15

I.4.5. surveillance des grandeurs électriques .....	15
I.4.5. 1. Analyse du courant statorique .....	16
I.4.5. 2. Analyse du vecteur de Park .....	18
I.4.5.3. Analyse de tension en neutre.....	18
I. 4.5.4. Analyse de la tension induite .....	18
I. 4.5.5. Analyse des puissances instantanées .....	19
I.4.6. Décharge partielle .....	19
I.4.7. Analyse de la signature de flux magnétique .....	20
I.4.7.2. Analyse de la signature de flux magnétique d'entrefer.....	21
<b>I.5 La modélisation des machines électriques.....</b>	<b>22</b>
I.5.1 Les modèles analytiques .....	23
I.5.2. Les modèles basés sur la méthode des éléments finis (MEF).....	24
I.5.3. Avantage de la simulation de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis.....	24
<b>I.6 Conclusion :.....</b>	<b>24</b>
<b>CHAPITRE II Modélisation de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis.....</b>	<b>33</b>
<b>II.1. INTRODUCTION : .....</b>	<b>33</b>
<b>II.2. Modélisation de la MAS par la méthode des éléments finis (MEF) .....</b>	<b>33</b>
<b>II.3. Couplage avec les équations de circuit : .....</b>	<b>35</b>
<b>II.4. Résultats de simulation :.....</b>	<b>36</b>
<b>.....</b>	<b>38</b>
Fig. II.13. Distribution du flux de fuite de la machine.	Error! Bookmark not defined.
<b>II.6. Analyse spectral de courant statorique :.....</b>	<b>40</b>
<b>II.7. Analyse spectral de flux de fuite :.....</b>	<b>42</b>
<b>II.8. CONCLUSION.....</b>	<b>43</b>
<b>CHAPITRE III diagnostic des défauts de la machine asynchrone double étoile .....</b>	<b>45</b>
<b>III.1. INTRODUCTION : .....</b>	<b>45</b>
<b>III.2. Diagnostic de rupture de barres dans la machine asynchrone .....</b>	<b>45</b>
<b>III.3. Résultats de la simulation : .....</b>	<b>46</b>
<b>III.4. Analyse des signatures des courant du moteur (MCSA) : .....</b>	<b>48</b>

III.5. Analyse des signatures des flux de fuite (SFSA) :.....	<b>49</b>
III.6. Diagnostic de défaut d'excentricité de rotor : .....	<b>51</b>
III.6.1. Résultats de simulation : .....	52
III.8. Analyse du spectre du courant stator : .....	55
III.9. diagnostic par l'analyse de champ de fuite :.....	<b>56</b>
III.10 Conclusion :.....	<b>59</b>

## **Conclusion générale**

## **References Bibliographies**

## **Résumé**



# LISTE DES FIGURES

## Liste de figure

Figure1	Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [2]	3
Figure2	Stator de la machine asynchrone triphasée à cage	3
Figure 3	Rotor à cage d'écureuil	4
Figure 4	Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage [5]	6
Figure 5	Court-circuit entre spire	8
Figure 6	Ruptures de barres [10]	10
Figure7	Excentricité statique et dynamique	10
Figure8	Le processus de diagnostic des pannes	11
Figure9	image infrarouge du moteur en régime permanent (a) moteur sain (b) moteur avec défaut de roulement.[19]	13
Figure10	Analyse vibratoire [24]	14
Figure11	Capteur de couple [26]	15
Figure12	banc d'essai avec en premier plan le microphone [28]	15
Figure13	Schéma fonctionnel montrant la technique d'analyse de signature par MCSA pour la détection de défauts.[32]	17
Figure14	Capteurs de courant pour le diagnostic des machines électriques	18
Figure15	Détecteur de décharge électrique	20
Figure16	exemples de capteur de flux d fuite utilise pour le diagnostic des machines asynchrone.[68,57]	21
Figure17	exemples de capteur de flux d'entrefer utilise pour le diagnostic des machines asynchrone [49][50]	22
Figure II 1	géométries de la machine	35
Figure II 2	Répartition du maillage	35
Figure II 3	Caractéristiques B(H) du matériau magnétique,	35
Figure II 4	Circuits électrique associé à la géométrie du moteur	36
Figure II 5	Circuit équivalent de la cage rotorique	36
Figure II 6	Répartition des lignes équiflux et l'induction magnétique pour le fonctionnement nominale	37
Figure II 7	Courants de phases en pleine charge	37
Figure II 8	Courants de bar en pleine charge	38
Figure II 9	Vitesse de rotation en pleine charge	38
Figure II 10	couple électromagnétique de la machine en pleine charge	39
Figure II 11	Model de la machine avec un capteur externe	39
Figure II 12	Distribution du flux de fuite de la machine	40
Figure II 13	Tension induite de capteur du flux de fuite	40
Figure II14	Spectre de courant dans l'intervalle de 0 Hz à 1250 Hz	42
Figure II15	Spectre de Flux de fuite dans l'intervalle de 0 Hz à 1250 Hz	43
figure III1	distribution de flux dans la machine , (a) machine saine, (b) une bar cassée, (c) deux bars cassés adjacentes (d) deux bars cases dans les pôles adjacentes(e) deux bars cassées dans les pôles opposé.	46

fugure III2 : courant statorique et le flux de fuite à pleine charge, (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacentes (d) deux bars cassés dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassés dans les pôles opposé.....	47
fugure III3 vitesse de rotation et couple électromagnétique de moteur (B) à pleine charge (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacentes (d) deux bars cassés dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassés dans les pôles opposé.....	47
fugure III4 vitesse de rotation et couple électromagnétique de moteur (B) à pleine charge (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacentes (d) deux bars cassés dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassés dans les pôles opposé.....	47
fugure III5 Spectres du courant statorique de moteur A et B a pleine charge (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacentes (d) deux bars cassés dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassés dans les pôles opposé.....	48
fugure III6 Spectres du courant statorique de moteur A et B a demi- charge(a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacentes (d) deux bars cassés dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassés dans les pôles opposé.....	49
fugure III7 Spectres du courant statorique de moteur vide (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacentes (d) deux bars cassés dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassés dans les pôles opposé.....	49
fugure III8 Spectres de flux de dispersion de moteur A et B à pleine charge(a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacentes (d) deux bars cassés dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassés dans les pôles opposé.....	50
fugure III9 Spectres de flux de dispersion de moteur A et B a demi-charge (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacentes (d) deux bars cassés dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassés dans les pôles opposé.....	50
fugure III10 Spectres de flux de fuite à vide (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacentes (d) deux bars cassés dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassés dans les pôles opposé. ....	51
fugure III11 Distribution des lignes de flux de la machine saine : (a) : l'intérieur de Machine, (b) : à l'extérieur de la machine. ....	53
fugure III12 Distribution des lignes de flux de la Machine avec 20% d'excentricité : (a) : l'intérieur de Machine, (b) : à l'extérieur de la machine. ....	54
fugure III13 Distribution des lignes de flux de la Machine avec 60% d'excentricité : (a) : l'intérieur de Machine, (b) : à l'extérieur de la machine ....	54
fugure III14 Spectres du courant statorique a la charge nominal (a) machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.....	55
fugure III15 Spectres du courant statorique a demi charge (a) machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.....	56
fugure III16 Spectres du courant statorique à vide (a) machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.....	56
fugure III17 Spectres du flux de dispersion a la charge nominal (a) machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.....	57
fugure III18 Spectres du flux de dispersion a demi-charge (a) machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.....	57
fugure III19 Spectres du flux de dispersion à vide (a) machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.....	58

# LISTE DES TABLEAUX

## LISTE DES TABLEAUX

Table II1 .Caractéristique de la machine étudiée.....	34
Table II2 .fréquences des harmoniques principal d’encoche rotorique .....	42
Table III1 . Amplitude des composantes de courant de la bande latérale à la fréquence $f_s \pm f_r$ pour un moteur sain et défectueux en dB.....	58
Table III2 Amplitude des composantes de la bande latérale à la fréquence $f_s \pm f_r$ pour un moteur sain et défectueux en dB .....	58

## **ABREVIATIONS ET SYMBOLES**

**MAS : Machine asynchrone.**

**CIE : le Modèle à circuits internes équivalents.**

**MEF : Méthode des éléments Finis.**

**FFT : (Fast Fourier Transform).**

**MCSA :**

**BC : barre cassée.**

**exc : excentricité.**

**CC : court circuit**

**g : glissement.**

$\vec{H}$                       **Champ magnétique    (A/m)**

$\vec{E}$                       **Champ électrique    (V/m),**

$\vec{B}$                       **Induction magnétique    (T)**

$\vec{B}_r$                       **Induction rémanente des aimants    (T)**

$\vec{J}$                       **Densité de courant totale    (A/m<sup>2</sup>)**

$\mu$	<b>Perméabilité magnétique</b>	<b>(H/m)</b>
$\sigma$	<b>Conductibilité électrique</b>	<b>(<math>\Omega^{-1}\text{m}^{-1}</math>)</b>

# INTRODUCTION GENERALE



## Introduction générale

Les systèmes électriques occupent désormais un vaste espace de la vie sociale, tant dans la vie professionnelle et industrielle, que dans la vie quotidienne et familiale. Les actionneurs électriques ont trouvé leurs premières places dans l'industrie : il fallait que des machines travaillent vite et bien. Si la première révolution industrielle a utilisé des machines hydrauliques et thermiques, la modernisation technologique s'est faite sous le signe de l'électrification. Les actionneurs électriques avaient un bon rendement ; ils faisaient moins de bruit, et surtout, ils pouvaient obéir avec rapidité et souplesse aux ordres venus des systèmes intelligents nés avec les premiers automates mécaniques, puis électromécaniques, puis électroniques, enfin informatiques.

Le moteur à cage d'écureuil asynchrone est souvent désigné comme le "workhorse" de l'industrie en raison de sa solidité et de sa polyvalence. Néanmoins, il présente ses limites, ce qui entraîne des défauts prématurés du stator ou du rotor.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la machine asynchrone à cage d'écureuil, constitution, principe de fonctionnement et analyse chiffrée des pannes de la machine asynchrone, méthodes de surveillance des grandeurs mesurables et La modélisation des machines électriques.

Dans le deuxième chapitre nous présentons la modélisation de la MAS par la méthode des éléments finis (MEF), Analyse spectral de courant statorique, puis Analyse spectral de flux de fuite.

Dans le troisième chapitre nous sommes intéressés Diagnostic de rupture de barres dans la machine asynchrone, puis nous avons présenté Analyse des signatures des courant du moteur (MCSA), et Diagnostic de défaut d'excentricité de rotor, diagnostic par l'analyse de champ de fuite à vide, à rotor bloqué et en charge et dans le cas d'une machine saine (sans défaut) et avec barre cassée.

De plus en plus, les industriels font face à la question de la sécurité du fonctionnement des outils de production. Les exigences de sécurité sont motivées par des exigences de production et sont actuellement en accord avec les exigences imposées par les industriels à leurs fournisseurs. Il ne s'agit plus uniquement du produit qui est proposé, mais plutôt de l'assurance d'une disponibilité garantie.

Le travail suggéré se concentre sur l'analyse des machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil. La popularité de ces machines électriques est principalement attribuable à leur facilité de construction, à leur faible coût d'achat et de fabrication, à leur solidité mécanique et à leur robustesse.

Le diagnostic des défaillances est essentiel dans la surveillance d'un dispositif : il implique de repérer un changement anormal dans le comportement ou l'état d'un système et de localiser sa cause. Il est possible de mettre en place des systèmes de surveillance et de diagnostic pendant l'exploitation (en ligne) ou pendant les périodes normales d'arrêt d'exploitation (hors ligne). Au cours de la mise en service, l'objectif est d'assurer la sécurité et la continuité du service, tout en enregistrant les événements nécessaires pour la maintenance curative. Au moment de l'arrêt d'exploitation, il est essentiel d'évaluer le niveau de vieillissement de certains éléments, de décider si une opération de maintenance préventive ou curative est nécessaire. [1]



# **CHAPITRE I**

## **L'état de l'art de diagnostic des machines asynchrone**

## **CHAPITRE I L'état de l'art de diagnostic des machines asynchrones**

### **I.1 Introduction**

Ce premier chapitre nous aide à confronter notre approche avec les autres recherches dans le domaine du diagnostic des machines asynchrones. Dans un premier temps, il évoque la structure de la machine asynchrone et les principaux défauts rencontrés. Par la suite, nous examinons les diverses méthodes de surveillance de ces machines, en mettant l'accent sur la particularité de ces méthodes en ce qui concerne leur précision et leur complexité de mise en œuvre. Ensuite, les techniques de modélisation les plus couramment employées sont exposées.

### **I.2 La machine asynchrone**

La machine asynchrone (MAS) est largement utilisée dans l'industrie en raison de nombreux avantages tels que sa puissance maximale, sa solidité, sa facilité d'utilisation, son faible coût, etc. Le développement des convertisseurs de fréquence permet de modifier la fréquence de rotation dans une large gamme, ce qui favorise la conception de nombreux procédés industriels qui combinent les convertisseurs statiques avec des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc....) [2].

Malgré sa solidité, la machine asynchrone peut être confrontée, comme toute autre machine électrique, à des problèmes électriques ou mécaniques. De cette manière, en raison des répercussions significatives et coûteuses que peut entraîner l'émergence d'un défaut sur les

Depuis les deux dernières décennies, le diagnostic des défauts suscite un intérêt croissant dans les processus industriels[2].

#### **I.2.1 Constitution de la machine asynchrone**

La compréhension des éléments constitutifs des machines asynchrones permet de saisir la manière dont le système est réalisé à l'échelle physique. Les machines asynchrones triphasées peuvent être désassemblées, sur le plan mécanique, en trois parties :

- ❖ Le stator est la partie fixe de la machine où l'alimentation électrique est connectée
- ❖ le rotor est la partie tournante qui permet de faire tourner la charge mécanique

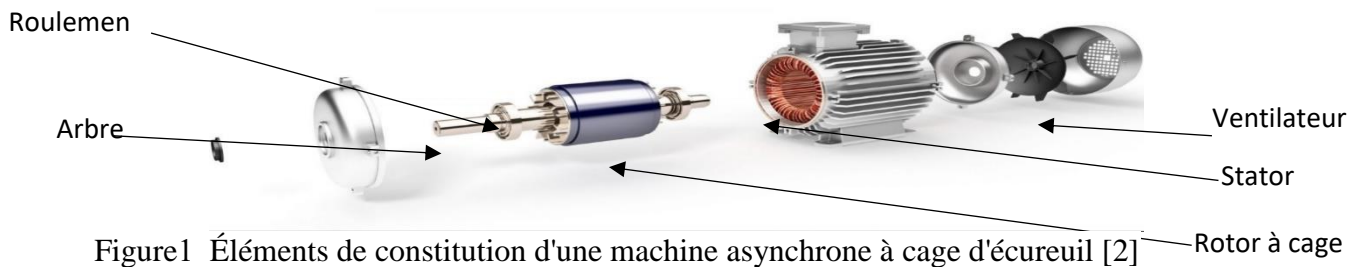


Figure1 Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [2]

❖ les paliers sont la partie mécanique qui permet de faire tourner l'arbre moteur.

### I.2.1.1 Stator

Les bobinages statoriques sont placés dans les tôles d'acier qui composent le stator de la machine asynchrone. Pour les petites machines, ces tôles sont coupées en une seule pièce tandis que pour les machines de puissance plus importante, elles sont coupées par sections. Sections. Elles sont généralement vernissées afin de réduire l'impact des courants de Foucault. Finalement, elles sont reliées entre elles à l'aide de boulons ou de soudures afin de créer le circuit magnétique statorique. [3].



Figure2 Stator de la machine asynchrone triphasée à cage

### I.2.1.2 Rotor bobiné

Ces plaques de rotor ont des fissures pour les conducteurs qui forment les joints à recouvrement. Trois anneaux et trois balais donnent accès à ces rouleaux. Cet appareil vous permet de changer les qualités électromécaniques du moteur. [4]

### I.2.1.3 Le rotor à cage d'écureuil

Le rotor en forme de cage d'écureuil diffère du rotor en forme de bobine. La principale distinction réside dans l'économie, la simplicité et la résistance du rotor à cage d'écureuil par

rapport au rotor bobiné. En outre, si on connecte un rotor à cage d'écureuil à une fréquence constante et à une tension constante, cela entraîne une vitesse constante. Il peut donc être utilisé avec le système de variateur de vitesse statique [2]. En revanche, plusieurs secteurs nécessitent une vitesse réglable ou des vitesses variées pour les applications de produits. Par ailleurs, il convient de se poser la question de savoir pourquoi les moteurs à induction à cage d'écureuil sont privilégiés dans la plupart des secteurs par rapport aux moteurs à courant continu.

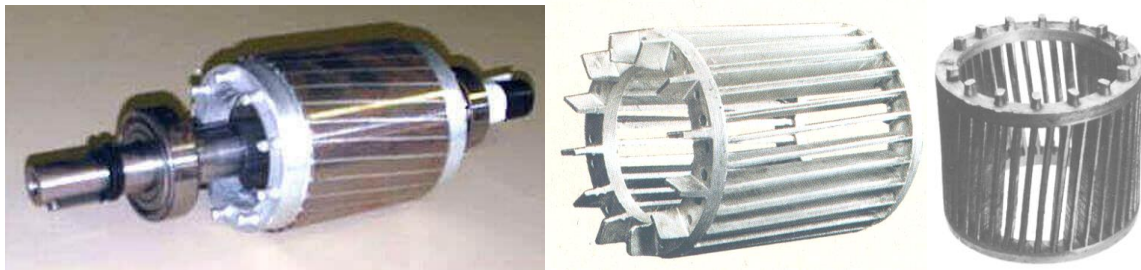


Figure 3 Rotor à cage d'écureuil

En plus des deux parties principales ci-dessus du moteur à induction, il existe d'autres parties qui sont:

- a) **Roulements** : deux roulements ont été utilisés pour supporter le rotor à chaque extrémité afin de faire tourner l'arbre.
- b) **flasques** : deux flasques sont placées aux deux extrémités du moteur à induction pour supporter les roulements.
- c) **Arbre** : est utilisé pour transmettre le couple généré à la charge

#### I.2.1.4 Les organes mécaniques

Les organes mécaniques I.2.1.3. La carcasse joue un rôle de support, d'enveloppe et de protection contre l'environnement extérieur. L'arbre joue un rôle de médiateur. Il est composé d'un corps central qui constitue le support du rotor et d'un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. En général, il est fabriqué à partir d'acier moulé ou forgé. Sa taille

Il dépend des forces de flexion (force centrifuge qui l'agite, attraction magnétique radiale, etc.), des forces radiales et tangentielles causées par les forces centrifuges, ainsi que

des forces de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire) [4].

### I.2.2 Principe de fonctionnement

Le moteur asynchrone fonctionne grâce à l'interaction électromagnétique entre le champ tournant, généré par le courant triphasé fourni par un réseau triphasé équilibré de pulsation aux enroulements statoriques, et les courants envoyés dans l'enroulement.

Les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ magnétique tournant, ce qui entraîne une rotorie (loi de LENZ). Il est impossible d'obtenir cette interaction électromagnétique entre les deux parties de la machine lorsque la vitesse du champ tournant est différente de celle du rotor [5].

Dans la MAS, l'onde du champ tournant se déplace dans l'entrefer de la machine avec une vitesse de rotation nommée vitesse de synchronisme  $\Omega_s$ . Elle est liée à la fréquence d'alimentation par l'expression suivante :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = 60 * \frac{f_s}{p} \text{ (tr/min)}$$

(I.1)

$\omega_s$  : taux de variation des tensions triphasées du réseau d'alimentation [HZ].

$p$  : Le nombre de paires de pôles.

Les courants traverseront un rotor en court-circuit, qui est balayé par ce champ tournant. Les forces électromagnétiques de Laplace sont induites par le courant de Foucault, ce qui le soumet à ces forces. Un couple moteur est formé par l'ensemble de ces forces, ce qui entraînera la rotation du rotor (voir figure I.4). Le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant, mais sa vitesse de rotation est légèrement inférieure à celle du champ tournant ( $\Omega < \Omega_s$ ). [5]

En effet, Il existe donc toujours une différence de vitesse entre le stator et le rotor. Cette différence s'appelle le glissement ( $g$ ) qui est une caractéristique particulière de la MAS. Il est défini comme étant l'écart de vitesse entre la vitesse de synchronisme ( $\Omega_s$ ) et la vitesse de rotation du rotor ( $\Omega$ ). Le glissement ( $g$ ) est alors donné par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

(I.2)

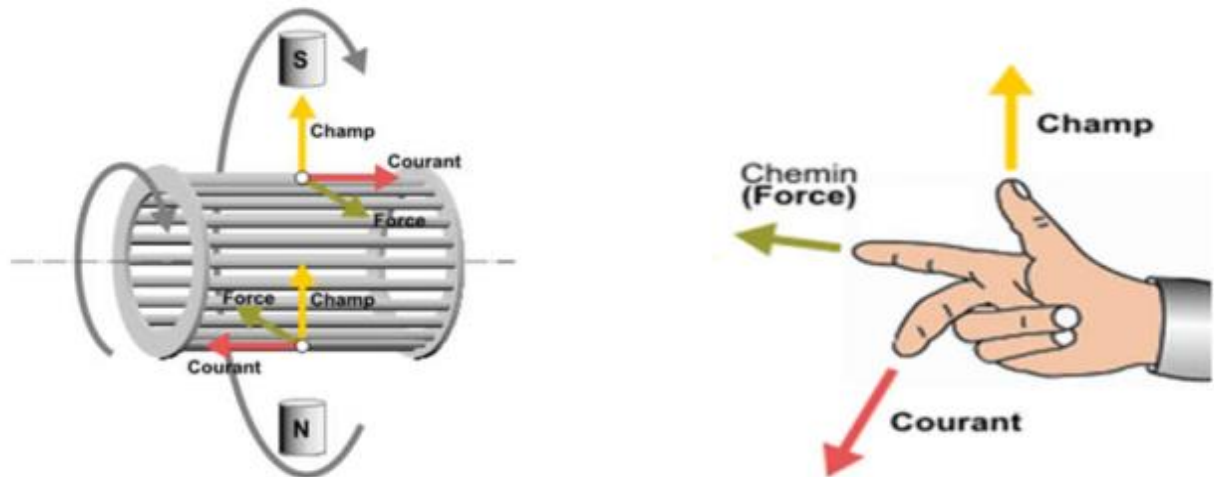


Figure 4 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage [5].

### I.3 Analyse chiffrée des pannes de la machine asynchrone

Les pannes peuvent avoir différentes origines, qu'elles soient électriques, mécaniques ou magnétiques. Leurs origines sont variées et peuvent être réparties en trois catégories [6] :

- les causes de pannes ou responsables des problèmes : Un moteur surchauffe, un défaut problèmes électriques tels que des courts-circuits, des surtensions d'alimentation, des problèmes d'isolation électrique, l'usure des éléments mécaniques tels que les roulements à billes, la rupture de fixations, etc. La surcharge fréquente, les vibrations mécaniques, l'environnement humide, l'échauffement permanent, le mauvais graissage, le vieillissement, etc. sont des amplificateurs de défauts.

Les défauts de fabrication et les erreurs commises par les personnes : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadéquates, dimensionnement incorrect de la machine, etc. Une étude statistique réalisée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande spécialisée dans les systèmes industriels [7] a révélé les résultats suivants concernant les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance de 50kW à 200kW.

#### I.3.1 l'importance de la surveillance des machines électriques

La surveillance est définie comme l'évaluation continue de l'état de l'équipement tout au long de sa durée de vie. Il est important de pouvoir détecter les défauts pendant qu'ils se développent encore. C'est ce qu'on appelle la détection de défaillance au stade initial [8].

La détection naissante des pannes des machines électriques fournit également un environnement de fonctionnement assuré. En utilisant la surveillance d'état, il est possible de fournir un avertissement adéquat d'une défaillance. De plus, il est également possible de



programmer de futurs travaux de maintenance préventive et de réparation. Cela peut entraîner des temps d'arrêt minimum et des calendriers de maintenance optimaux [9].

Le système de surveillance de l'état et de diagnostic des pannes permet à l'opérateur de la machine de disposer des pièces de rechange nécessaires avant que la machine ne soit démontée, réduisant ainsi les temps d'arrêt. Par conséquent, une surveillance efficace de l'état des machines électriques est essentielle pour améliorer la fiabilité, la sécurité et la productivité.

### **I.3.2 Défaillances au stator**

Dans le cas du stator, les pannes sont principalement causées par un souci :

- Échauffement (surcharge,...)
- électrique (diélectricité,...).
- Technique (bobinage,...)
- Contextuel (agression,...)

Les défauts les plus fréquents, situés au niveau du stator, peuvent être décrits de la manière suivante :

#### **I.3.2.1 Défauts d'isolant dans un enroulement**

Les isolants dégradés dans les enroulements peuvent entraîner des courts circuits. Effectivement, les diverses pertes (comme le joule, le fer, la mécanique, etc.) provoquent des phénomènes thermiques qui se manifestent par une hausse de la température des différents éléments du corps.

moteur. Cependant, les matériaux d'isolation présentent des contraintes de température, de tension et mécanique.

Par conséquent, lorsque l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse l'une de ces limites, il se dégrade prématurément ou rapidement, ce qui entraîne une perte de sa fonction. Les diverses raisons de ce genre de défaut incluent :

- détérioration de l'isolant lors de la production.
- L'enroulement présente une tension supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- mouvements mécaniques.

L'enroulement présente un courant élevé en raison d'un court-circuit, d'un défaut du convertisseur ou d'une surcharge. Cela concerne

#### **I.3.2.2 Court-circuit entre spires**

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statorique 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.



Figure 5 Court-circuit entre spire

### **I.3.2.3 Court-circuit entre phases**

Ce genre de problème peut survenir à n'importe quel endroit du bobinage, mais il est important d'analyser l'impact de ce défaut sur le système. La présence d'un court-circuit près de l'alimentation entre les phases pourrait entraîner ce problème.

Les courants extrêmement élevés pourraient entraîner la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou la disjonction par les protections. Par ailleurs, une courte phase proche du neutre entre deux phases entraîne un déséquilibre sans entraîner la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques présentent un déséquilibre total et ce déséquilibre est proportionnel à la présence d'un défaut. Les fluctuations dans les barres et les anneaux sont accrus lorsque ce défaut se manifeste. Ce genre de défaut peut être détecté en se basant sur le déséquilibre des courants de phases.

### **I.3.2.4 Court-circuit phase/bâti**

En général, le bâti possède un potentiel flottant, cependant, pour des raisons mécaniques, il est souvent associé à la masse.

Dans le cas où le potentiel est réversible, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'impact matériel, à l'exception des effets. En utilisant des capacités, le bâti absorbe ainsi le potentiel de l'enroulement à l'emplacement du court-circuit.

En revanche, en ce qui concerne la sécurité des individus, ce genre de défaut peut présenter des risques considérables et il est donc essentiel de mettre en œuvre des mesures de protection (comme des disjoncteurs différentiels).

En cas de ce genre de défaillance, la tension de la phase en question reste inchangée. Toutefois, le flux de courant dans cette étape augmente lorsque la résistance et l'inductance diminuent. Celui-ci

### **I.3.2.5. Défauts de circuit magnétique**

### **I.3.3. Défaillances au rotor**

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

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

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être

Définis comme suit :

#### **I.3.3.1. Ruptures de barres**

La rupture ou la cassure de la barre est l'un des problèmes les plus courants sur le rotor. Son encoche peut être soit au niveau de son extrémité, soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau. Lorsque les barres se dégradent, la valeur moyenne du couple électromagnétique diminue et l'amplitude des oscillations augmente, ce qui entraîne des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui entraîne des vibrations mécaniques et donc un fonctionnement anormal de la machine. Les oscillations avec une amplitude élevée accélèrent la dégradation de la machine, ce qui entraîne une diminution significative du couple avec le nombre de barres cassées, ce qui entraîne un effet cumulatif de la défaillance. Le nombre de barres cassées augmente rapidement l'impact d'une cassure de barre [10], [11].



Figure 6 Ruptures de barres [10].

### I.3.3.2. Ruptures d'anneaux

Le défaut de rupture de portion d'anneau est aussi courant que la cassure de barres. Il est possible que ces ruptures soient causées par des bulles de coulées ou par des dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Étant donné la difficulté de le repérer [12], ce

La rupture de barres est souvent associée, voire confondue, à un défaut dans les études statistiques. Ces segments d'anneaux de court-circuit transportent des flux plus considérables que ceux des barres en forme de rotor. Par conséquent, un dimensionnement incorrect des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants peuvent causer 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 statorique similaire à celui provoqué par la cassure de barres.

### I.3.3.3. Excentricité statique et dynamique



Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se

Excentricité statique

Excentricité dynamique

(plusieurs positions du rotor au cours de la rotation)

Figure7 Excentricité statique et dynamique.

## I.4. Méthodes de surveillance des grandeurs mesurables

Cette recherche est axée sur la surveillance de l'état et le diagnostic des pannes des machines électriques. Le diagnostic de défaut est une détermination d'un défaut spécifique qui s'est produit dans le système. Un processus typique de surveillance de l'état et de diagnostic des pannes se compose généralement de quatre phases .

La surveillance de l'état a une grande importance dans l'environnement des affaires pour les raisons suivantes [8]

- Pour réduire les coûts de maintenance ;
- Pour prévoir la panne de l'équipement ;
- Améliorer la fiabilité des équipements et des composants ;
- Pour optimiser les performances de l'équipement ;
- Pour améliorer la précision de la prédiction des pannes.

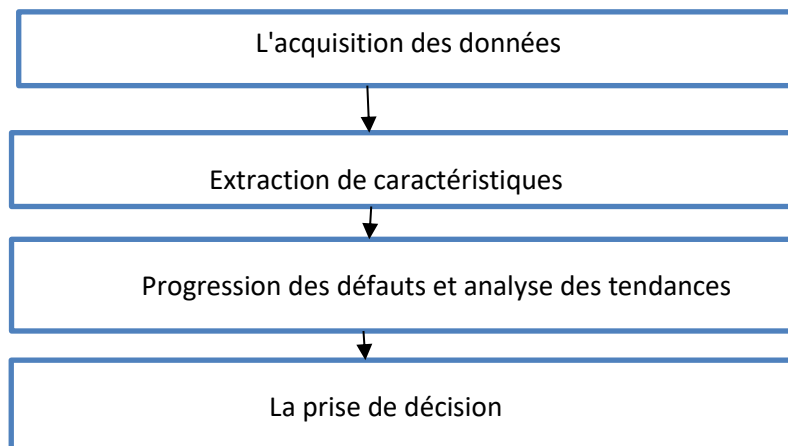


Figure8 Le processus de diagnostic des pannes.

La surveillance de l'état des équipements électriques et mécaniques est utilisée depuis longtemps. Plusieurs méthodes ont évolué au fil du temps, mais les techniques les plus importantes sont la surveillance thermique, la surveillance des vibrations et la surveillance électrique, la surveillance du bruit, surveillance du couple et la surveillance du flux magnétique.

### I.4.1. Surveillance thermique

Au cours des dernières décennies, il y a eu de nombreuses approches pour surveiller le fonctionnement des moteurs à induction par une technique de protection thermique en utilisant par exemple des relais, des thermocouples, la thermographie (caméras thermiques) et

autres, qui conviennent aux applications à faible coût. Fournissant une protection thermique pour les machines à induction, différents types de relais ont déjà été développés pour la surcharge et la surveillance thermique [13].

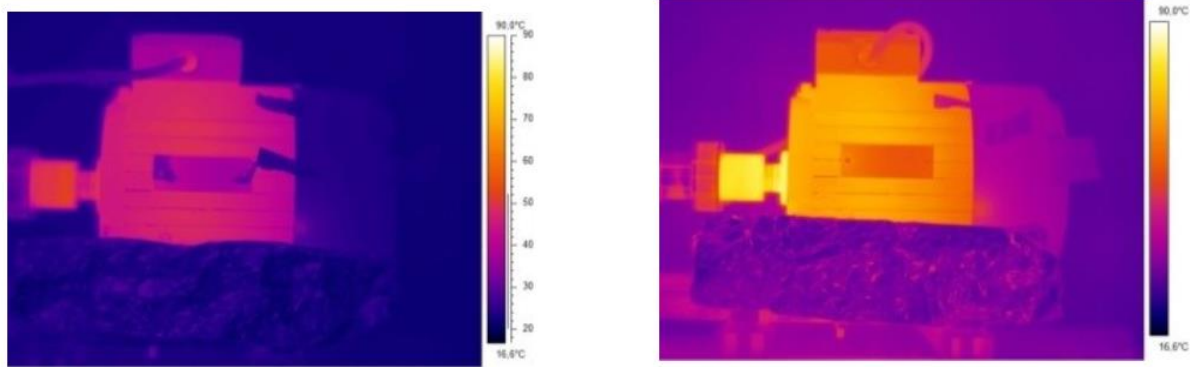
La surveillance thermique des machines électriques s'effectue soit par la mesure des températures locales ou de bloc moteur, ou par l'estimation de paramètres. Un défaut de courant de stator génère une chaleur excessive dans les spires en court-circuit, et la chaleur promulgue la gravité du défaut jusqu'à ce qu'il atteigne un stade destructeur. Par conséquent, certains chercheurs ont développé un modèle thermique de moteurs électriques. Généralement, les modèles thermiques des machines électriques sont classés en deux catégories [14] :

- Modèle basé sur l'analyse par la méthode des éléments finis(MEF).
- Modèles thermiques à paramètres localisés.

Les modèles basés sur MEF sont plus précis, cependant, est une approche qui requiert un temps de calcul important. Un modèle thermique à paramètres localisés équivaut à un réseau thermique composé de résistances thermiques, de capacités et des pertes de puissance correspondantes. La précision du modèle dépend généralement du nombre de corps thermiquement homogènes utilisés dans le modèle [15-16].

Les paramètres du modèle à paramètres localisés sont généralement déterminés de deux manières. La première consiste à utiliser une connaissance approfondie des moteurs, des dimensions physiques et des matériaux de construction. La seconde consiste à identifier les paramètres à partir de mesures de température approfondies à différents endroits du moteur. Même si une machine électrique est constituée de divers matériaux ayant des caractéristiques différentes, on peut supposer que la machine est constituée de plusieurs corps thermiquement homogènes [17-18].

La surveillance thermique peut, en général, être utilisée comme méthode indirecte pour détecter certains défauts de stator et les défauts de roulement. Dans un défaut de court-circuit entre-spire, la température augmente dans la région du défaut, mais cela peut être trop lent pour détecter le défaut naissant avant qu'il ne se transforme en un défaut phase à phase ou phase à neutre plus grave. Dans le cas de la détection de défauts de roulements, l'usure dans les roulements augmente le frottement et la température dans cette zone de la machine. Cette augmentation de température du moteur peut être détectée par la surveillance thermique.



(a)

(b)

Figure9 image infrarouge du moteur en régime permanent (a) moteur sain (b) moteur avec défaut de roulement.[19]

#### I.4.2. Surveillance des vibrations

Toutes les machines électriques génèrent du bruit et des vibrations, et l'analyse du bruit et des vibrations produits peut être utilisée pour donner des informations sur l'état de la machine. Même une très petite amplitude de vibration du châssis de la machine peut produire un bruit élevé. Le bruit et les vibrations dans les machines électriques sont causés par des forces d'origine magnétique, mécanique et aérodynamique [20]. Les principales sources de vibrations et de bruit dans les machines électriques sont les forces radiales dues au champ d'entrefer. Étant donné que la distribution de la densité de flux de l'entrefer est le produit des harmoniques de M.M.F. et les harmoniques de perméance totale. Le résultat M.M.F. contient également l'effet d'éventuelles asymétries du rotor ou du stator, et l'onde de perméance dépend également de la variation de l'entrefer, les forces magnétiques et les vibrations résultantes dépendent également de ces asymétries. Ainsi en analysant le signal vibratoire d'une machine électrique, il est possible de détecter différents types de défauts et d'asymétries [21]. Les défauts de roulement, les excentricités du rotor, les défauts d'engrenage et les rotors déséquilibrés sont les meilleurs candidats pour les diagnostics basés sur les vibrations. La surveillance des vibrations des machines électriques est réalisée grâce à l'utilisation d'une analyse à large bande, à bande étroite ou spectrale (signature) de l'énergie de vibration mesurée de la machine. Le diagnostic basé sur les vibrations est la meilleure méthode de diagnostic des pannes, mais nécessite des accéléromètres coûteux et le câblage associé. Cela limite son utilisation dans plusieurs applications, en particulier dans les petites machines où le



coût joue un rôle majeur dans le choix de la méthode de surveillance de l'état.. Par exemple, un capteur de vibrations ordinaire coûte plusieurs centaines de dollars. Un autre inconvénient de la surveillance des vibrations est qu'elle nécessite un accès à la machine. Pour des mesures précises, les capteurs doivent être montés fermement sur les machines électriques, et une expertise est requise pour le montage [22-23] De plus, les capteurs eux-mêmes peuvent tomber en panne.

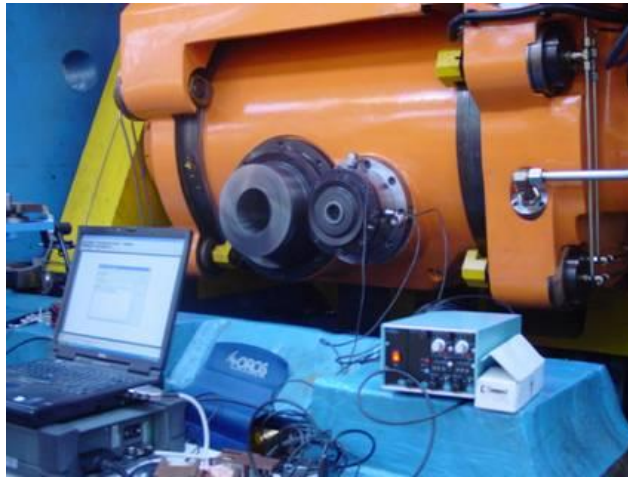


Figure10 Analyse vibratoire [24]

### I.4.3. Surveillance du couple

Tous les types de défauts du moteur produisent des bandes latérales à des fréquences particulières dans le couple de l'entrefer. Cependant, il n'est pas possible de mesurer directement le couple d'entrefer. La différence entre les couples estimés à partir du modèle donne une indication de l'existence de barres cassées. A partir des bornes d'entrée, la puissance instantanée comprend l'énergie de charge et de décharge dans les enroulements. Par conséquent, la puissance instantanée ne peut pas représenter le couple instantané. Depuis les bornes de sortie, le rotor, l'arbre et la charge mécanique d'une machine tournante constituent un système de ressort de torsion qui a sa propre fréquence propre. Les atténuations des composantes du couple d'entrefer transmises à travers le système de ressort de torsion sont différentes pour différents ordres harmoniques des composantes de couple [25].





Figure11 Capteur de couple [26]

#### I.4.4. Surveillance du bruit

La surveillance du bruit se fait en mesurant et en analysant le spectre du bruit acoustique. Le bruit acoustique provenant de l'excentricité de l'entrefer dans les moteurs à induction peut être utilisé pour la détection des défauts. Cependant, l'application des mesures de bruit dans une usine n'est pas pratique en raison du bruit de fond des autres machines fonctionnant à proximité. Ce bruit réduit la précision de la détection des défauts à l'aide de cette méthode. Dans [27] ont détecté l'excentricité de l'entrefer en utilisant cette méthode. Ils ont vérifié à partir d'un test effectué que les harmoniques des encoches dans les spectres de bruit acoustique d'un moteur à induction de petite puissance étaient des fonctions de l'excentricité statique.

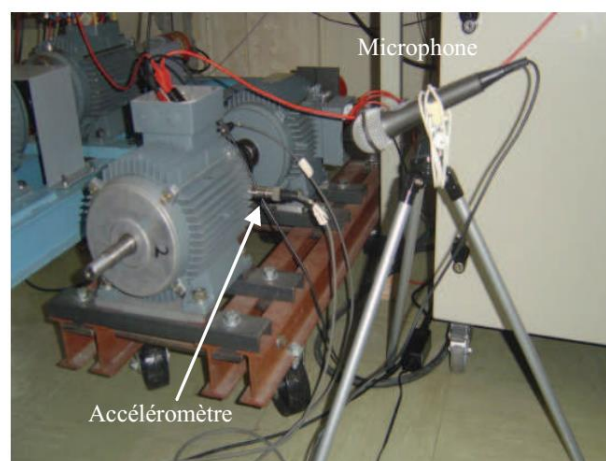


Figure12 banc d'essai avec en premier plan le microphone [28]

### **I.4.5. surveillance des grandeurs électriques**

De nombreuses méthodes surveillance, y compris l'analyse thermique, la surveillance acoustique et la surveillance des vibrations, sont coûteuses et nécessitent des outils spéciaux [29, 30]. Les coûts élevés de mise en œuvre et d'exploitation de telles méthodes sont souvent limités à une utilisation dans les machines critiques de l'usine de fabrication. Alors que le suivi de la tension, courant et du puissance n'a pas besoin des instruments supplémentaires en raison du volume électrique principal avec des installations de système comprenant à la fois la tension et le courant, cela peut être plus facilement mesuré par les transformateurs de tension et de courant actuels qui sont souvent installés comme partie principale des systèmes de protection [31]. Par conséquent, la surveillance des grandeurs électriques pourrait offrir une évaluation du fonctionnement des équipements électriques et pourrait localiser plusieurs défauts mécaniques et électriques. Les grandeurs électriques accessibles d'une machine asynchrone peuvent être .

- Le Courant : Courants statorique absorbés, Courant de composante homopolaire et inverse ;
- La tension : tension d'alimentation, tension de neutre, tension induite ;
- La Puissance instantanée.

#### **I.4.5. 1. Analyse du courant statorique**

Dans la méthode d'analyse du courant statorique du moteur (MCSA), la détection peut être mise en œuvre sans aucun matériel supplémentaire. Le courant du stator peut être mesuré en ligne, ce qui signifie que les données de la technique d'analyse du courant sont accessibles à tout moment lorsque le moteur est en marche. Pour ces raisons, la signature de courant est devenue un paramètre pratique pour détecter les défauts du moteur à induction à cage d'écureuil.[32]

La plupart des défauts mécaniques et électriques pouvant survenir dans un moteur à induction sont détectables par cette technique d'analyse de courant. La technique d'analyse de signature actuelle comporte principalement trois étapes , où chacune des étapes est représentée sous forme de bloc. Les étapes sont (i) l'acquisition de données, (ii) l'extraction de caractéristiques et (iii) l'évaluation des défauts

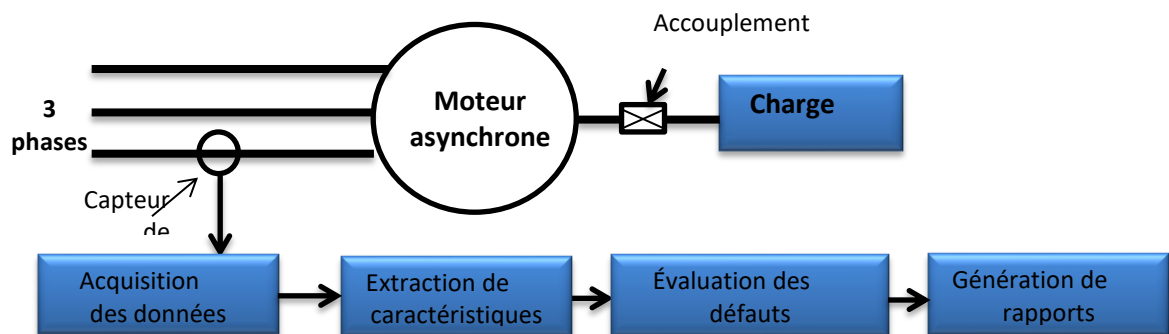


Figure13 Schéma fonctionnel montrant la technique d'analyse de signature par MCSA pour la détection de défauts.[32]

La technique MCSA est applicable pour la détection d'un certain nombre de défauts tels que le défaut de barre cassée du rotor, l'excentricité de l'entrefer et le défaut d'enroulement du stator. L'analyse du courant statorique est une technique non invasive, précise, peu coûteuse, simple et efficace. Elle peut fournir des informations comme peut en fournir l'analyse vibratoire [33]. De plus, le capteur requis pour toutes les autres techniques d'analyse étant plus coûteux, ce MCSA gagne en importance et les recherches à ce sujet se développent rapidement.[34] [35]. Cependant, cette approche présente des inconvénients bien connus lors de l'analyse des défauts dans certaines circonstances ; par exemple, ils ne sont pas à l'abri de fausses indications causées par la présence d'oscillations de couple de charge ou de fluctuations de tension d'alimentation, car des composantes spectrales spécifiques qui ne sont pas liées aux défauts électromécaniques peuvent apparaître aux mêmes endroits que celles liées aux défauts électromécaniques. Certains des inconvénients mentionnés ci-dessus ont été enrôlés et discutés par certains travaux [36-37]. En raison de ces particularités, la fiabilité du diagnostic final peut être détériorée, provoquant de fausses indications, une situation qui a conduit les chercheurs à explorer des sources d'information alternatives pour surmonter certains des problèmes susmentionnés [38].



Figure14 Capteurs de courant pour le diagnostic des machines électriques.

### I.4.5. 2. Analyse du vecteur de Park

Une autre technique de surveillance électrique importante est le vecteur de Courant Park. L'idée de base du vecteur de Park actuel est que dans les moteurs à induction triphasés, la connexion aux enroulements du stator n'utilise généralement pas de neutre. Pour un moteur à induction à connexion en Y, le courant du stator n'a pas de composante homopolaire. Une représentation bidimensionnelle des courants triphasés, appelée vecteur de Park du courant, peut alors être considérée comme une description des conditions du moteur. Dans des conditions idéales, des courants triphasés équilibrés conduisent à un vecteur de Park qui est un motif circulaire centré à l'origine des coordonnées. Par conséquent, en surveillant l'écart du vecteur de parc actuel, l'état du moteur peut être prédit et la présence d'un défaut peut être détectée [39].

### I.4.5.3. Analyse de tension en neutre

Cette méthode consiste à analyser la tension entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre de la machine asynchrone (machine couplée en étoile sur l'alimentation) pour détecter des courts-circuits entre spires dans le bobinage statorique. Une analyse similaire a été effectuée dans le but de détecter un défaut rotorique dans les machines asynchrones où il montre que l'information donnée par la tension présente entre les deux neutres était pertinente pour le diagnostic des défauts rotoriques, De plus, l'acquisition de ce signal reste aussi simple que le courant statorique. Cependant, il est préférable que le neutre de la source d'alimentation ne doive pas être trop éloigné de celui de la machine. [28, 40-41]

### I. 4.5.4. Analyse de la tension induite

En analysant la tension induite dans l'arbre d'une machine, un défaut peut être identifié. Cette tension est induite en raison de la dégradation de l'isolation de l'enroulement du stator. Normalement, cette tension induite est très faible et mesurable lorsqu'une quantité importante de dommages dans l'enroulement du stator se produit. Pour cette raison, la technique de tension induite n'est pas largement utilisée. [32]

#### **I. 4.5.5. Analyse des puissances instantanées**

Les puissances instantanées sont la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Le niveau d'informations apporté par ces grandeurs est donc plus grand que celui apporté par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres. Cette méthode est utilisée pour la détection des défauts mécaniques et électriques. [41].

#### **I.4.6. Décharge partielle**

En raison de la dégradation de l'isolation de l'enroulement, une petite décharge électrique se produit - c'est ce qu'on appelle une décharge partielle. Une isolation détériorée de l'enroulement peut avoir une activité de décharge partielle de 30 fois ou plus qu'un enroulement en bon état [42]. Pour détecter les pannes motrices, un certain nombre de travaux de recherche [43–46] ont été réalisés en analysant cette décharge partielle. En fait, dans une machine à haute tension, le temps nécessaire à la défaillance étant très faible, la surveillance en ligne des décharges partielles est utilisée pour évaluer la santé de l'isolation de l'enroulement du stator. Il a été prouvé par les chercheurs [43, 44] que l'analyse des décharges partielles peut identifier la dégradation de l'isolation avant le claquage complet dans une machine à haute tension. Cette technique est largement utilisée dans l'industrie et sa validité a été vérifiée dans [45] par Stone et al. La maintenance de l'enroulement du stator peut être surveillée à l'aide d'un test d'analyseur de décharge partielle (PDA) en ligne [46].



Figure15 Détecteur de décharge électrique.

#### **I.4.7. Analyse de la signature de flux magnétique**

L'analyse du flux magnétique est une technique de surveillance qui suscite l'intérêt de nombreux chercheurs et fabricants des machines électriques. Les grandes améliorations et la réduction des coûts et des dimensions des capteurs requis, le développement de techniques avancées de traitement du signal adaptées à l'analyse des données de flux, ainsi que d'autres avantages inhérents fournis par cette technologie sont des aspects pertinents qui ont permis le développement de cette technique.

L'analyse du flux magnétique a attiré l'attention de nombreux chercheurs dans ce domaine ainsi que de certains constructeurs de moteurs qui ont décidé d'installer des capteurs magnétiques embarqués dans leurs machines dans le but de fournir des capacités d'autodiagnostic intégrées [47-48] .

Cette tendance claire est en partie due aux divers avantages et avantages offerts par l'analyse des données de flux par rapport aux autres techniques conventionnelles. Pour expliquer ces avantages,

Cette tendance claire est en partie due aux divers avantages et les bienfaits offerts par l'analyse des données de flux par rapport aux autres techniques conventionnelles. Afin d'expliquer ces avantages, il convient de noter que les méthodologies basées sur les flux magnétiques peuvent être divisées en deux groupes principaux : celles basées sur l'analyse des flux de fuite (qui est l'étude du flux magnétique qui rayonne à l'extérieur de de la machine), et des techniques basées sur l'analyse du flux d'entrefer (qui est l'évaluation du flux interne présent dans l'entrefer).



flux de fuite dans la machine asynchrone est créé par différents éléments de la machine. La répartition de lignes de champ est donnée dans la Figure I.22. [49]

- 1) Il s'est avéré efficace et fiable dans les cas où les techniques conventionnelles produisent de fausses indications (conduits d'air axiaux du rotor, anisotropie magnétique du rotor, oscillations de charge à basse fréquence, etc.) [50],
- 2) son caractère non invasif et simplicité dans la mise en œuvre [51].
- 3) Des capteurs à très faible coût sont nécessaires [52].
- 4) Flexibilité et simplicité d'installation des capteurs [53].

Malgré ses grands avantages, comme toute technique, l'analyse des flux de fuite présente ses propres contraintes. Certains des travaux de recherche en cours visent à apporter des solutions fiables à certains de ces inconvénients qui, selon la littérature disponible, sont les suivants :

- 1) la difficulté de modéliser le champ magnétique qui dépend fortement du comportement électromagnétique de la culasse du stator et de la carcasse du moteur, qui ont un effet de blindage important [54].
- 2) influence de la position du capteur sur les résultats [55-56].



Figure16 exemples de capteur de flux d fuite utilise pour le diagnostic des machines asynchrone.[68,57]

#### **I.4.7.2. Analyse de la signature de flux magnétique d'entrefer**

Un schéma de surveillance du flux d'entrefer au moyen de bobines de recherche est présenté dans la figure I.17 [58]. Une bobine de recherche est un capteur qui mesure la variation du flux magnétique. Habituellement, un certain nombre de fils isolés sont enroulés ensemble pour former une bobine de quelques tours, qui est placée autour de la dent du stator du moteur pour mesurer la variation du flux d'entrefer principal. La sortie d'une telle bobine de recherche est la tension induite à cause de la variation du flux. la figure I.17, montre un moteur à induction avec des bobines de recherche enroulées autour de chaque dent du stator. Les bobines sont montées dans des fentes de stator et verrouillées par des cales de stator. Cette option d'instrumentation ne nécessite aucun espace supplémentaire dans l'entrefer. Cependant, L'inconvénient major de la méthode d'analyse de flux d'entrefer est l'exigence d'installation d'un capteur à l'intérieur de la machine. Ce qui en fait une méthode invasive ;

La détection des différents défauts dans la machine asynchrone basée sur la surveillance du flux d'entrefer est présentée dans [58-59]



Figure17 exemples de capteur de flux d'entrefer utilise pour le diagnostic des machines asynchrone [49][50].

## I.5 La modélisation des machines électriques

Pour une conception fiable d'une machine électrique, l'importance de son modèle mathématique ne peut être ignorée. Il en va de même pour les techniques avancées de diagnostic de pannes dépendant du modèle. Ces techniques peuvent inclure l'estimation des paramètres de conception de diverses manières, le matériel dans la boucle, la théorie des



problèmes inverses et d'autres algorithmes basés sur l'itération. L'importance des modèles mathématiques devient multiple pour des systèmes d'entraînement fiables et des observateurs d'état. La grande variété de techniques de modélisation disponibles dans la littérature peut être largement classée en analytique et numérique.

### **I.5.1 Les modèles analytiques**

Dans les modèles analytiques, les machines sont représentées par des équations différentielles. La technique analytique la plus courante est celle des modèles basés sur la théorie à deux axes (d-q), où les trois phases sont transformées en deux phases orthogonales équivalentes. De plus, l'entrefer est supprimé en se ramenant les paramètres côté rotor au stator ou les paramètres du stator au rotor. Cette approche réduit la complexité et le nombre d'équations. Les lecteurs et les observateurs d'état dépendent de ces modèles car ils sont plus simples et plus complets. Le plus gros inconvénient de ces modèles est qu'ils sont basés sur des approximations. Il est difficile d'inclure certains aspects pratiques, tels que la distribution non sinusoïdale des enroulements, l'entrefer pratique avec des effets de fente, les non-linéarités matérielles, la non-symétrie, etc. Bien que ces modèles aient prouvé leur importance dans le domaine de la motorisation, ils sont moins adaptés aux algorithmes de conception et de diagnostic de pannes. Cependant, certains auteurs ont utilisé ces modèles pour simuler des défauts mais au prix de modifications compliquées du circuit équivalent du moteur.

Les modèles basés sur des circuits couplés multiples (The multiple coupled circuit (MCC)) gagnent en popularité dans le diagnostic des défauts de nos jours. Les types courants comprennent l'analyse de la fonction d'enroulement (winding function analysis (WFA)) et les modèles basés sur l'analyse de la fonction d'enroulement modifiée (modified winding function analysis MWFA). En utilisant ces techniques, les aspects les plus pratiques, tels que l'entrefer non uniforme, les fonctions réelles d'enroulement du stator et du rotor, et presque tous les types de défauts, y compris l'effet de saturation, peuvent être simulés.

Les modèles basés sur la réluctance magnétique peuvent également être vus dans la littérature, donnant des résultats similaires à ceux du MCC mais au prix d'une complexité élevée. En effet, toute la géométrie doit être représentée avec des reluctances, qui aboutissent à des matrices de grandes dimensions. Cette complexité ne peut être évitée par la symétrie car la machine n'est plus symétrique pour le diagnostic des pannes.

### **I.5.2. Les modèles basés sur la méthode des éléments finis (MEF)**

La méthode des éléments finis est une méthode numérique utilisée pour résoudre des équations aux dérivées partielles ou des problèmes aux limites. Cette technique est largement utilisée pour résoudre des problèmes d'ingénierie importants liés au flux de chaleur, à la dynamique des fluides, à l'analyse structurelle, à l'analyse électromagnétique, au transport de masse, etc. Dans cette méthode, la géométrie de tout système est divisée en petits éléments représentés par des nœuds formant un maillage. Les équations aux dérivées partielles sont résolues pour chaque nœud pour obtenir la réponse finale. Bien que ces techniques soient beaucoup plus précises que les méthodes analytiques et puissent gérer presque toutes sortes d'aspects pratiques de la machine, mais au prix d'une complexité élevée. Cette complexité se traduit par un nombre d'équations nécessitant plus de puissance de traitement et de mémoire pour sauvegarder les résultats intermédiaires. C'est le plus gros inconvénient de ces techniques. Cependant, les chercheurs tentent de réduire le temps de simulation en utilisant plusieurs méthodes approximatives telles que la réduction de l'ordre du modèle, l'exploitation de la symétrie et les modèles hybrides analytiques-FEM.

### **I.5.3. Avantage de la simulation de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis**

La motivation derrière l'utilisation de MEF dans cette thèse est que ce type de simulation offre des résultats réalistes tout en tenant compte de :

- La géométrie exacte de la machine;
- Les caractéristiques B-H non linéaires du circuit magnétique du rotor et du stator ;
- L'effet la peau et des effets de proximité ;
- La symétrie de machine tandis que l'alimentation est équilibrée ;
- Aucune asymétrie inhérente ou défaut de fabrication n'est pris en compte ;
- les effets des harmoniques d'espaces ;

Ces caractéristiques font du MEF un outil précieux pour l'analyse théorique de l'impact du défaut sur la machine asynchrone et pour acquérir les connaissances nécessaires sur le comportement électromagnétique pour affronter et comprendre de manière fiable les tests expérimentaux.

## **I.6 Conclusion :**

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons montré que les principaux éléments de la constitution d'une machine asynchrone triphasé, et de la machine synchrone en général peuvent présenter des défauts les plus fréquents, et dans la deuxième partie différentes méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone triphasée. En fin nous avons terminé notre chapitre par l'avantage de la simulation de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis.

L'objectif du deuxième chapitre est la modélisation et la simulation de la machine asynchrone double stator saine et avec différents défauts par la méthode des éléments finis.

# **CHAPITRE II**

## **Simulation de la MAS par la méthode des éléments finis**

## CHAPITRE II Modélisation de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis

### II.1. INTRODUCTION :

La modélisation et la simulation des machines asynchrone à l'état sain jouent un rôle important dans les systèmes de surveillance et de détection de défauts. Grâce à l'analyse de l'état sain de la machine, les caractéristiques problématiques d'un moteur asynchrone peuvent être détectées.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons, alors, à l'élaboration d'un modèle qui tient compte de la topologie, des dimensions ainsi que de la composition de la machine asynchrone, basée sur la méthode des éléments finis.

### II.2. Modélisation de la MAS par la méthode des éléments finis (MEF)

- Les relations de couplage électromagnétique :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = \frac{-\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

- Les relations de la conservation des flux :

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.3})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.4})$$

- la relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.6})$$

- la relation de la loi d'Ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

Où,

$\vec{H}$  : Champ magnétique (A/m),  $\vec{E}$  : Champ électrique (V/m),  $\vec{B}$  : Induction magnétique (T)  
 $\vec{B}_r$  : Induction rémanente des aimants (T),  $\vec{J}$  : Densité de courant totale (A/m<sup>2</sup>),  $\mu$  :  
 Perméabilité magnétique (H/m),  $\sigma$  : Conductibilité électrique (Ω<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>).

Dans la simulation en fonction de temps, L'alimentation est en tension transitoire, le traitement du système précédent des équations caractéristiques, nécessite une discrétisation pas à pas dans le temps. Dans ce cas le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{rot}(v.\overrightarrow{rot}\vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{rot}\vec{B}_r + \sigma \overrightarrow{grad}V = 0 \quad (\text{II. 8})$$

Où  $v = 1/\mu$  : est la réflectivité magnétique. (II.9)

Le modèle de la MAS a été construit en utilisant le logiciel Flux2 D.

Les modèles des deux moteurs sont illustrés à la Fig.II.1. Il y a quatre étapes impliquées dans l'analyse par éléments finis.

- Définition des paramètres géométriques et construction d'un modèle 2D.
- Définition des paramètres physiques tels que les régions, matériaux etc...
- Construction d'un modèle de circuit électrique.
- Maillage du domaine d'étude et résolution de problème.

Les caractéristiques de la machine asynchrone étudiée dans cette thèse sont données dans le tableau II.1,

Caractéristiques	Moteur
Fréquence d'alimentation $f_s$	50 Hz
Connexion de Stator	Y
Puissance	7.5 Kw
Tension nominal	380 V
Courant nominal	8.2 A
Nombre de pôles	2
Vitesse nominal	2920 tr/min
Nombre des encoches statorique	24
Nombre des encoches rotorique	20

Table II1 .Caractéristique de la machine étudiée

La figure (II.1) représenté la géométrie de la machines étudiée avec la distribution de bobinage.

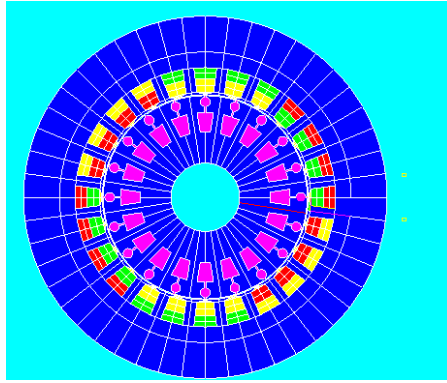


Figure II 1 géométries de la machine

La figure (II.2) représente le maillage effectué sur les régions de la machine.

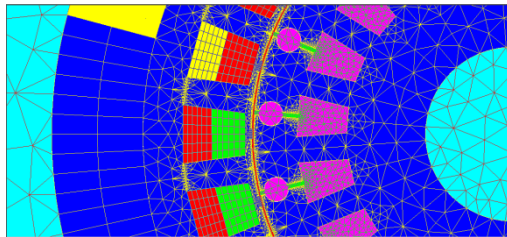
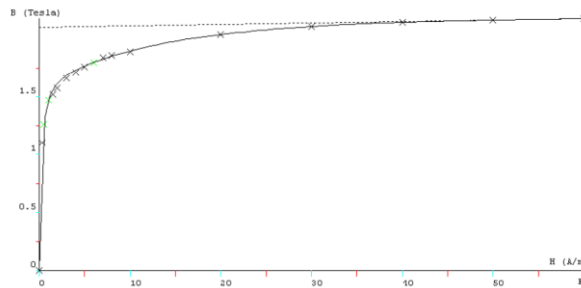


Figure II 2 Répartition du maillage.

Pour ce qui est des propriétés magnétique des matériaux ferreux, on prendra en compte la non-linéarité des caractéristiques  $B(H)$ , les courbes  $B(H)$  du circuit magnétique de moteurs sont représentée ci-dessous.

Figure II 3 Caractéristiques  $B(H)$  du matériau magnétique,

### II.3. Couplage avec les équations de circuit :

Le modèle de simulation comprend également un circuit électrique. Le circuit du modèle caractérise les différents éléments de la géométrie à travers un modèle de couplage/circuit. Par exemple, les encoches du stator sont représentées par des conducteurs bobiné avec un nombre de spire une résistance spécifiques. Le circuit de rotor est présenté par une macro circuit comme illustre dans la figure II.4, le circuit électrique contient aussi les inductances de tête bobine afin de tenir en compte les effets d'extrémités.

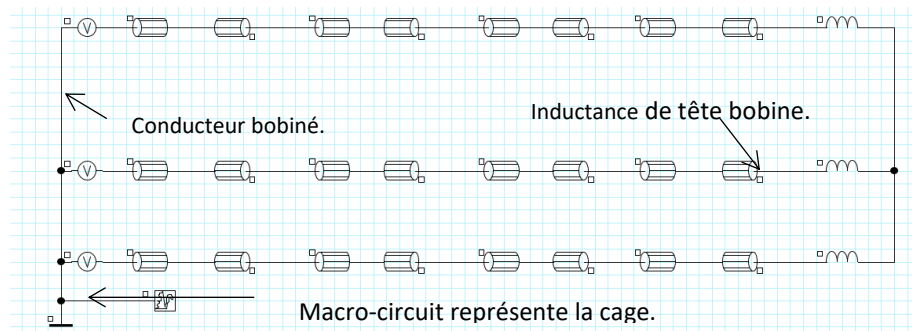


Figure II 4 Circuits électrique associé à la géométrie du moteur.

Q1 : est un macro-circuit (un dispositif du logiciel Flux 2D<sup>®</sup>) utilisé pour modéliser la cage d'écureuil de la machine, c'est un circuit fermé contient des barres rotorique (Fig. II 5) (Barre k), résistances ( $R_{ik}$ ) inductances de fuite ( $L_{\sigma ik}$ ), correspondent aux régions d'inter-barre d'anneaux de court-circuit (arcs entre deux barres adjacentes).

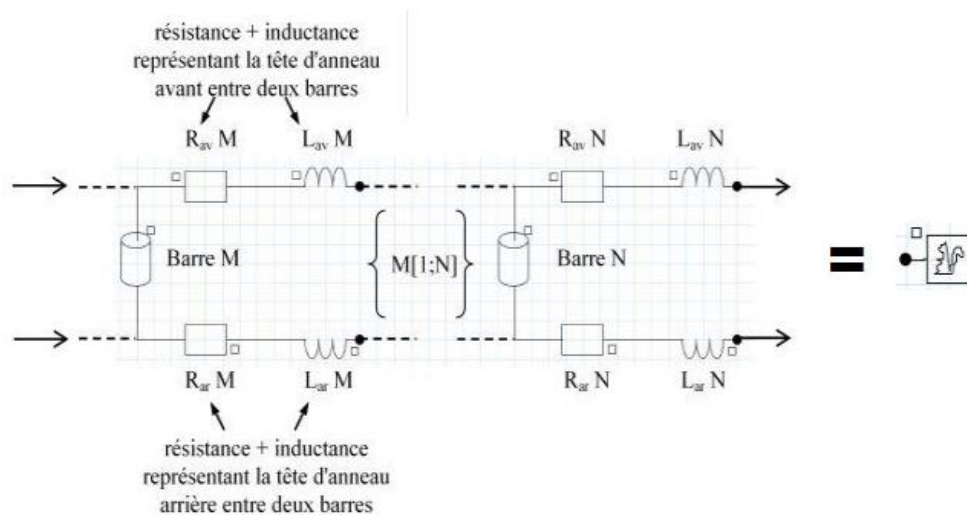


Figure II 5 Circuit équivalent de la cage rotorique

Ce lien est utilisé car les simulations envisagées visent à reproduire les variations du moteur lors d'un fonctionnement en charge. Les courants induits au rotor ne pourront donc plus être négligés comme c'était le cas à vide, il est donc indispensable de modéliser les courts-circuits de la cage. De plus, cette méthode permet d'alimenter directement le moteur en tension et non pas en courant comme il faudrait le faire sans ce couplage [60].

#### II.4. Résultats de simulation :

Le résultat de simulation ci-dessous représente la distribution des lignes équiflux et l'induction dans la machine pour le fonctionnement nominal pour les deux machines. On constate que la distribution des lignes équiflux et l'induction est quasi symétrique par rapport à l'axe de symétrie des pôles de la machine.



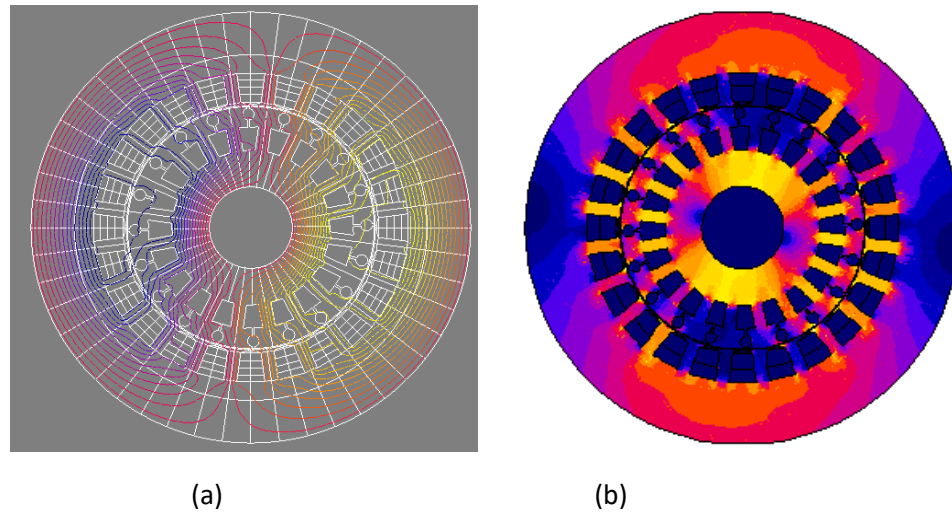


Figure II 6 Répartition des lignes équipotentielle et l'induction magnétique pour le fonctionnement nominale.

La figure II 7 montre la réponse dynamique du courant du stator en régime permanent. Le courant n'est pas sinusoïdal pur mais contient les harmoniques d'enroulement et spatiales.

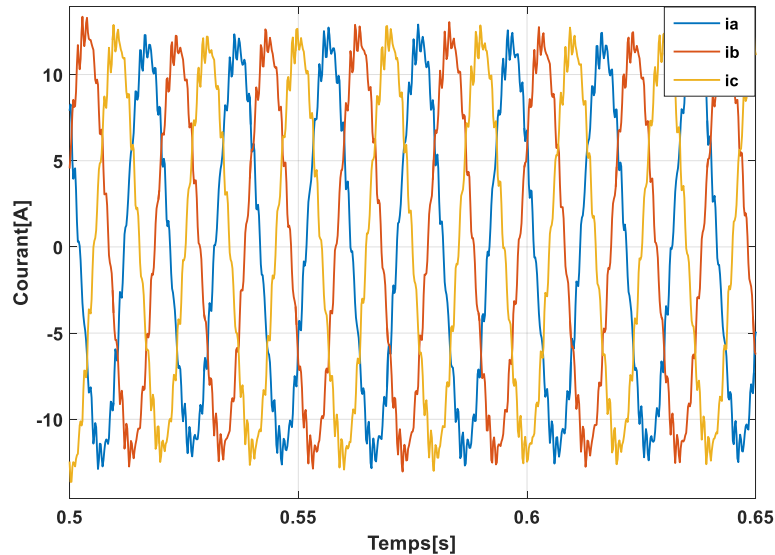


Figure II 7 Courants de phases en pleine charge

Selon le principe de fonctionnement fondamental du moteur à induction, la tension et le courant générés dans les barres du rotor dépendent de l'évolution de la liaison de flux. Ce taux de changement de flux dépend du glissement, qui est fonction de la charge. La (figure II.8) (a) illustre la dépendance de l'amplitude et de la fréquence du courant rotorique à la charge. L'amplitude du courant augmente considérablement lors de l'application de la charge avec l'augmentation de la fréquence *gfs*.

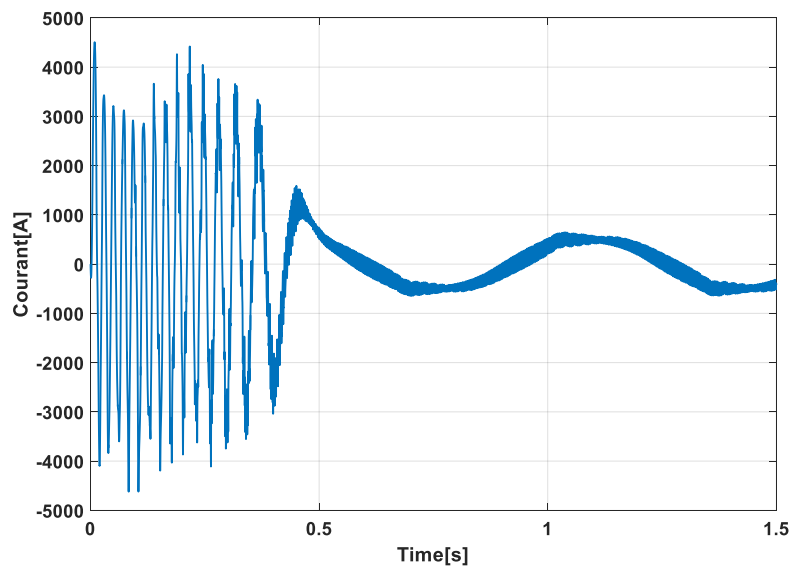


Figure II 8 Courants de bar en pleine charge

La vitesse du rotor et le couple généré en régime permanent et en régime transitoire sont illustrés respectivement à la Figure II.9 et à la Figure II.10. L'effet des harmoniques spatiales est significatif dans des conditions de charge. Cela est dû à la relation entre les composantes de fréquence de glissement et d'encoche.

Dans des conditions en charge, l'augmentation du glissement est visible sous la forme d'une différence entre la vitesse synchrone et la vitesse du rotor sur la Figure II.9. Cette augmentation du glissement augmente l'amplitude des fréquences du rotor avec une augmentation résultante des ondulations de couple et de vitesse.

La vitesse de rotation est de 2898 tr/min en pleine charge (voir figure II.9). Après le régime transitoire le couple électromagnétique se stabilise autour de sa valeur nominale 7 N.m, pour le moteur A et 24 Nm pour le moteur B respectivement comme l'illustre la figure II.10.

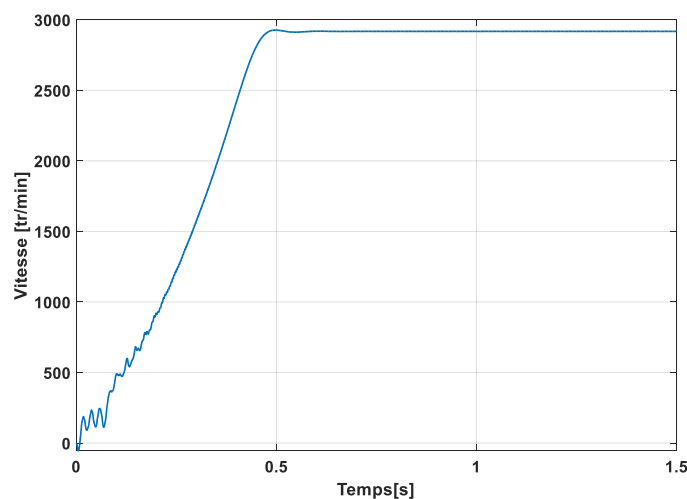


Figure II 9 Vitesse de rotation en pleine charge

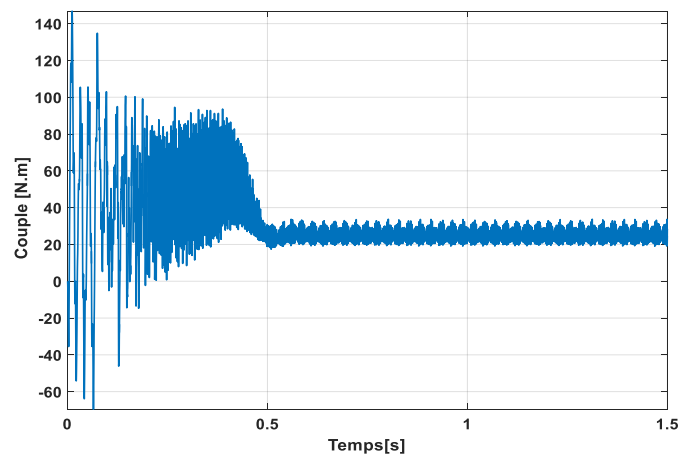


Figure II 10 couple électromagnétique de la machine en pleine charge

### II.5. Modélisation de champs de fuite dans la machine asynchrone :

Dans la machine asynchrone, le flux de fuite est créé par différents éléments de la machine. La figure II.11. montré le model de la machine en 2D avec le capteur externe, le capteur externe est de type bobiné qui contient 1200 spires positionner au voisinage de la machine.

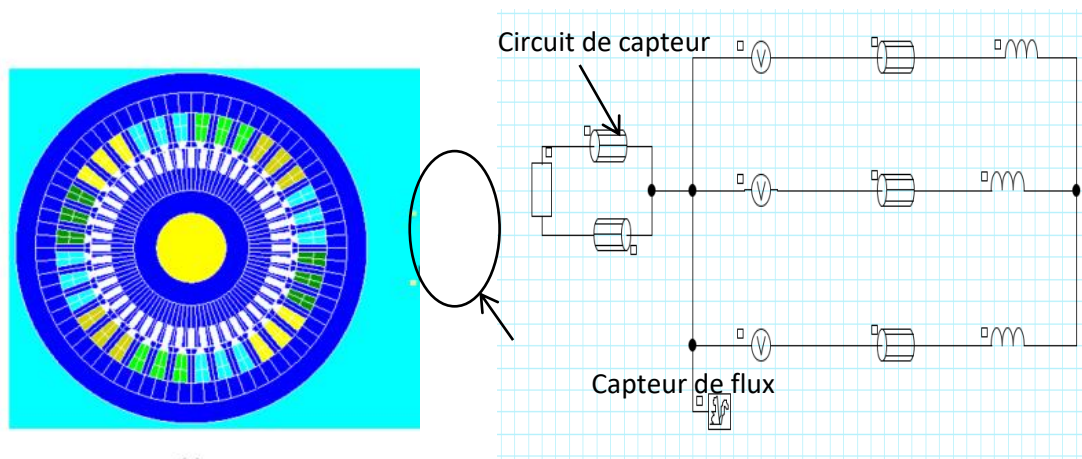


Figure II 11 Model de la machine avec un capteur externe.

La figure II.12 représente la distribution de ligne de champs à l'extérieur de la machine étudiées, en remarque la distribution uniforme de ligne de champs et la présence de pair de pôle pour la machine.

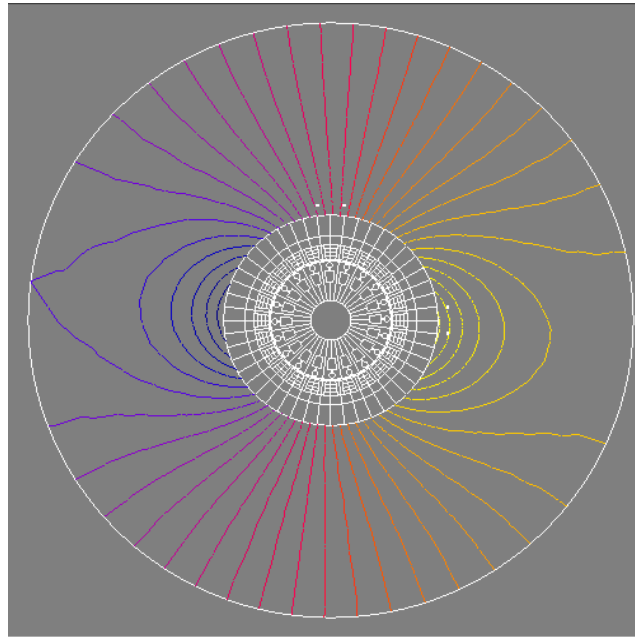


Figure II 12 Distribution du flux de fuite de la machine

La forme d'onde des tensions induites aux capteurs de flux de fuite à l'extérieur de la machine sont donnée à la figure II.13, la forme des tensions n'est pas sinusoïdale pure à cause des harmoniques d'espace et la distribution de bobinage dans la machine, dans la section suivante nous allons présenter l'analyse fréquentiel des courants et des tensions induite pour montrer les différentes harmoniques qui influent sur la forme de ces grandeurs.

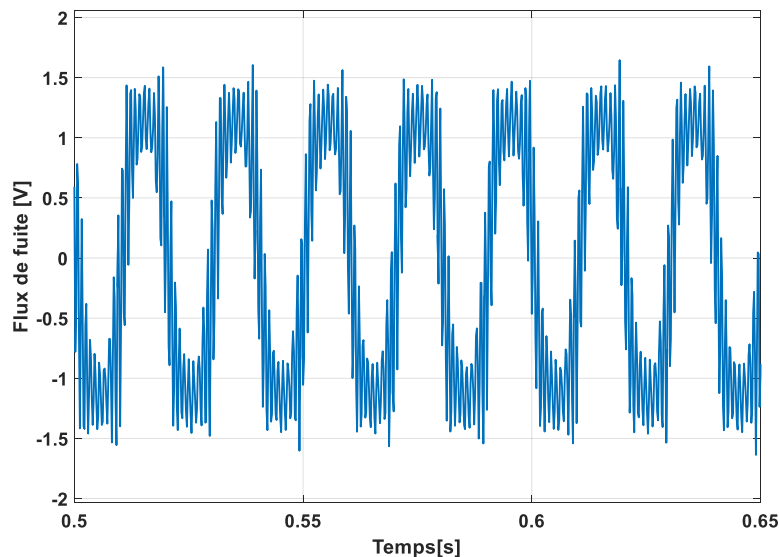


Figure II 13 Tension induite de capteur du flux de fuite

## II.6. Analyse spectral de courant statorique :

Contrairement aux modèles des machines à induction idéales, où les enroulements du stator et du rotor sont censés être distribués de manière sinusoïdale, cela n'est pas valable dans les

machines réelles et aux modèles à éléments finis. Il existe différents types de configurations d'enroulement de stator ainsi que différentes structure de cage du rotor. Les ouvertures des encoches de stator et de rotor sont une autre cause d'harmoniques. Cela se produit parce que l'entrefer ne reste pas uniforme mais devient en fonction de la position du rotor.

Ces raisons donnent lieu à des harmoniques appelées harmoniques de bobinage et spatiales. Les harmoniques spatiales les plus importantes sont les harmoniques principales d'encoche. Bien que ces harmoniques présentent des inconvénients car ils augmentent les ondulations de vitesse et de couple, ils peuvent être utilisés de manière constructive pour le diagnostic des défauts. L'analyse fréquentiel de courant pour le moteur dans les figure II.14 montre diverses autres harmoniques dans le spectre avec la composante fondamentale. Ces harmoniques sont classés comme suivant:

- Les harmoniques dus à la saturation qui sont donné par la formule :

$$3 k f_s \quad (II.10)$$

Avec k impaire.

Dans notre étude l'analyse fréquentiel effectué jusqu'au 2500 Hz, les fréquences des harmoniques de saturation sont : 150 Hz, 450 Hz, et 750 Hz, 1050 Hz, 1350 Hz, 1650 Hz 1950 Hz et 2250 Hz.

- Les harmoniques de la force magnétomotrice (fmm) qui sont donné par la formule :

$$(6 k \pm 1) f_s \quad (II.10)$$

Avec k =1, 2, 3....

Ces harmoniques dus aux courant qui traverse le bobinage statorique et donc c'est une conséquence de la nature discrète des enroulements statoriques. les fréquences de de ces harmoniques sont : 250 Hz, et 350 Hz, 550 Hz, 650 Hz, ...etc.

Les harmoniques des encoches résultent du placement des conducteurs d'enroulement dans les encoches du noyau et leurs fréquences de courant statorique sont définies en fonction des paramètres opérationnels et de conception par [61] :

$$f_{SH} = |\{ kR (1 - g)/p \pm v \} f_s| \quad (II.11)$$

Les harmoniques d'encoche principal (PSH) sont les deux harmoniques d'encoches les plus importants dans le spectre et leurs fréquences pour un ordre d'harmonique d'alimentation donné, v, peuvent être calculées en remplaçant k=1 dans l'équation (II.11) :

$$f_{PSH} = |\{ R (1 - g)/p \pm v \} f_s| \quad (II.12)$$

Les valeurs des fréquences des harmoniques principaux d'encoches rotoriques au fonctionnement nominale de la machine, sont données dans au tableau II.2.

		U-PSH	L-PSH
Moteur	0.027, P=1, R=20	1023 Hz	923 Hz

Table II2 .fréquences des harmoniques principal d'encoche rotorique

La figure II.14 montre les harmoniques de saturation t les harmoniques de FMM et les harmoniques principaux d'encoche dans le spectre de courant pour le Moteur pour l'intervalle de 0Hz à 1250Hz.

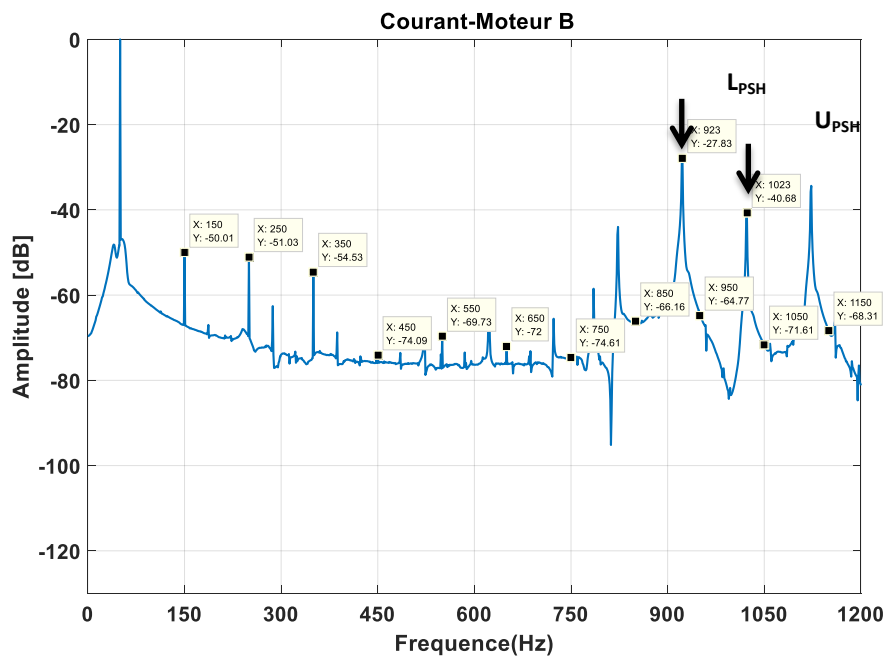


Figure II14 Spectre de courant dans l'intervalle de 0 Hz à 1250 Hz

## II.7.Analyse spectral de flux de fuite :

La figure.II.15 présentent l'analyse fréquentiel de flux fuite pour les deux moteurs, les résultats montre que le flux de fuite donne le même contenu spectrale que le courant, on remarque bien la présence des harmoniques de saturation et de FMM, ainsi que les harmonique des encoche rotorique.

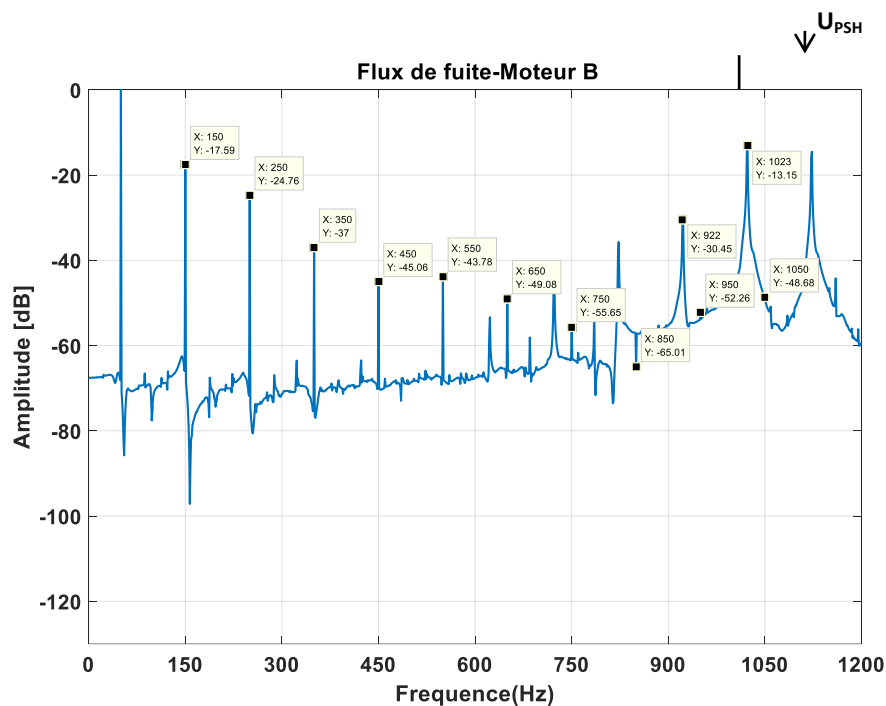


Figure II15 Spectre de Flux de fuite dans l'intervalle de 0 Hz à 1250 Hz

## II.8. CONCLUSION

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté un modèle numérique de la machine asynchrone, basé sur la méthode des éléments finis, sous l'environnement Flux 2D<sup>®</sup>.

La modélisation par la MEF en 2D de la machine nous a permis de prendre en compte des phénomènes magnétiques ou électriques. Ce modèle nous a permis de visualiser les différentes grandeurs locales et globales de la machine.

A la fin de ce chapitre nous avons simulé le champ magnétique de fuite à l'extérieur de la machine, les résultats obtenus sont comparés avec ceux obtenus par le courant dans le domaine temporel et fréquentiel.

L'objectif du chapitre suivant est l'utilisation de cette technique pour détecter les défauts dans la machine asynchrone.

# **CHAPITRE III**

## **diagnostic des défauts au rotor**



## CHAPITRE III diagnostic des défauts au rotor

### III.1. INTRODUCTION :

La nécessité de la détection des défauts du rotor à un stade plus précoce, afin que la maintenance puisse être planifiée à l'avance, a poussé au développement de méthodes de surveillance avec une sensibilité et une immunité au bruit croissantes. Les barres de rotor cassées et l'excentricité de rotor peuvent être un problème sérieux avec certains moteurs à induction en raison de cycles de service difficiles. L'objectif de ce chapitre est de démontrer par simulation les effets d'un défaut de rotor de moteur à induction sur les grandeurs aux bornes du moteur (courant, flux de fuite) en utilisant la méthode d'analyse fréquentielle (FFT). L'effet de la position de bar cassée sur le spectre de ces grandeurs est également étudié.

### III.2. Diagnostic de rupture de barres dans la machine asynchrone

Bien que plusieurs études aient proposé l'utilisation du flux parasite pour le diagnostic de défaut de barre cassée du rotor, la plupart de ces travaux reposent sur l'évaluation des composantes de l'équation (1) autour de la composante fréquentielle principale dans le spectre du signal en régime permanent [ 62- 63],

$$k_1 f_s + 2s f_s \quad \text{III.1}$$

Où  $f_s$ : fréquence d'alimentation,  $k_1=1 ; 3 ; 5$  ; et  $s$ : glissement.

Dans ces travaux les bris de barre rotor sont effectivement diagnostiqués par le flux de fuite capté par des capteurs à bobine répartis sur le bâti de la machine. D'après ces travaux, l'efficacité de cette technique était comparable à celle des analyses actuelles. Cependant, comme il existe généralement un chevauchement entre les harmoniques amplifiées induites par la panne et la fréquence fondamentale dans des conditions de faible charge, la fiabilité de celles-ci peut être réduite. [64]

Dans ce chapitre nous allons proposer l'utilisation de signatures mécaniques de flux magnétique de fuite en régime permanent. Nos principaux résultats ont montré qu'un simple capteur de flux installé sur la surface du SCIM peut fournir une détection sensible des défauts du rotor. Il est également montré que les harmoniques associés à la fréquence mécanique dans le flux de fuite de l'équation (2) en plus des harmoniques de l'équation (1) sont une bonne indication des défauts de barres cassées du rotor et cette méthode de détection n'est pas affectée par le changement de la charge moteur et avec la position de barre cassée [65-66].

$$k_2 f_r \pm s f_s \quad \text{III.2}$$

où  $f_r$ : fréquence de rotation du rotor  $f_r = \frac{(1-s)}{p} f_s$ ,  $k_2=1 ; 2 ; 3$  ; et  $p$ : paires de pôles.

Pour évaluer la validité de la méthode proposée, la simulation numérique par la méthode des éléments finis est réalisée pour une machine à induction à cage d'écureuil de 7.5 kW.

### III.3. Résultats de la simulation :

La figure III.1 représente la distribution des lignes de flux magnétique dans le cas saine et défectueuses. On peut observer que cette distribution est symétrique dans le cas sain. Néanmoins, il existe de nettes distorsions dans la distribution en cas de défaut de barre cassées. De même, il est illustré sur la figure III.2 que la distribution du champ magnétique extérieur est symétrique alors qu'il s'agit d'une distorsion dans le cas d'un défaut de cassure de barres.

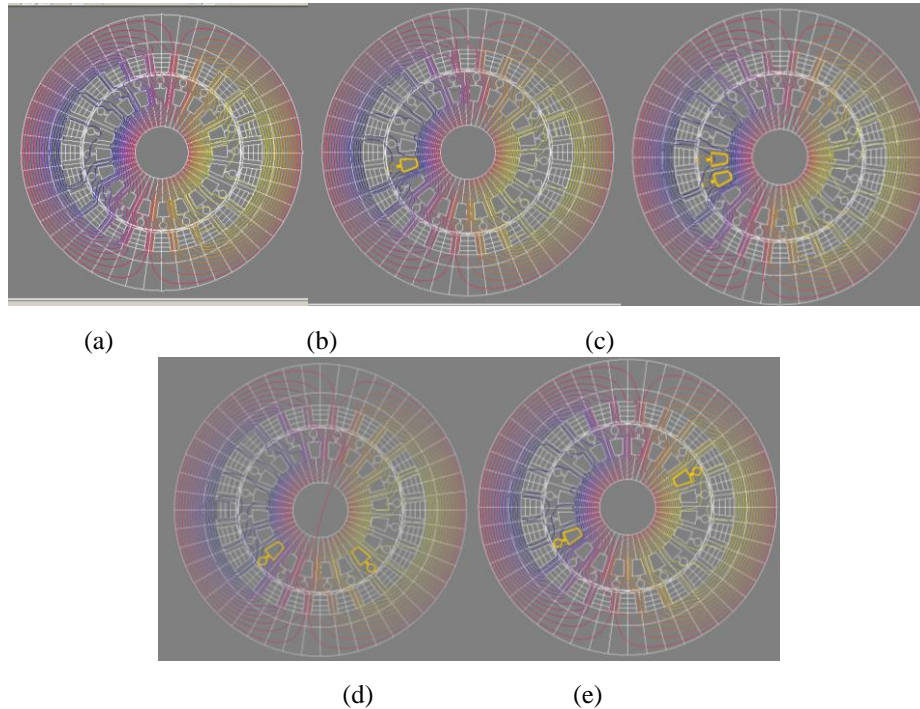


figure III1 distribution de flux dans la machine , (a) machine saine, (b) une bar cassée, (c) deux bars cassés adjacents (d) deux bars cases dans les pôles adjacentes(e) deux bars cassées dans les pôles opposé.

La figure (III.2) montre la variation temporelle du courant stator et du capteur de flux de fuite dans les cas sains et défectueux respectivement, on peut remarquer les fluctuations dans le temps par rapport à celles dans la cage saine. De plus, le flux de fuite est plus infecté par le défaut des barres cassées que par le courant du stator.

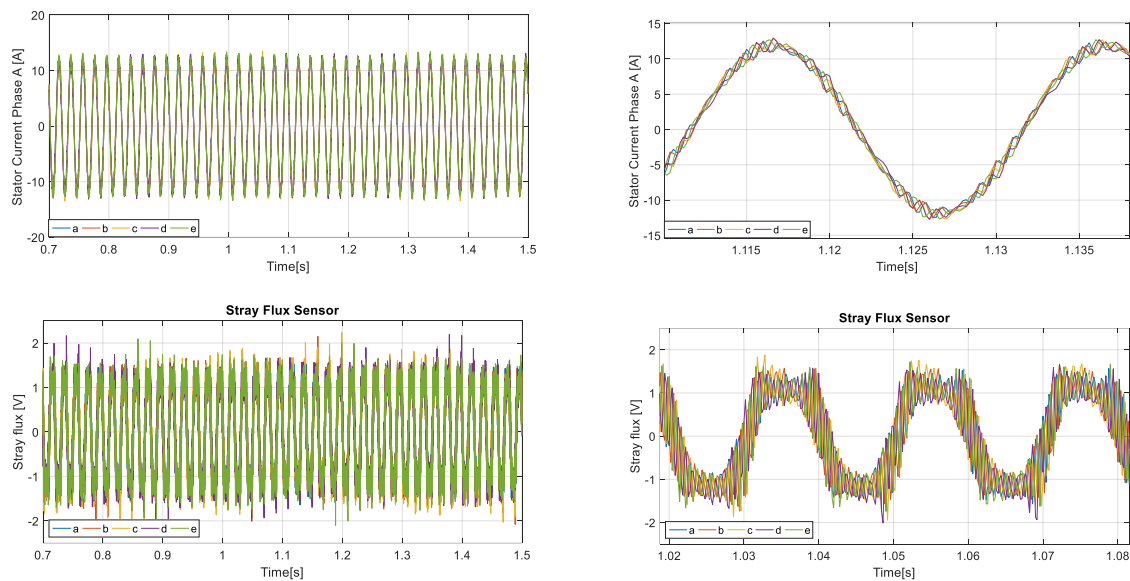


figure III.2 : courant statorique et le flux de fuite à pleine charge, (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacentes (d) deux bars cassés dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassés dans les pôles opposés

Les figures (III.3) montrent la variation temporelle de la vitesse du rotor et du couple électromagnétique, à pleine charge, on peut observer que le défaut génère des oscillations de vitesse, ces variations dues aux fluctuations de couple. On trouve une période correspondant à

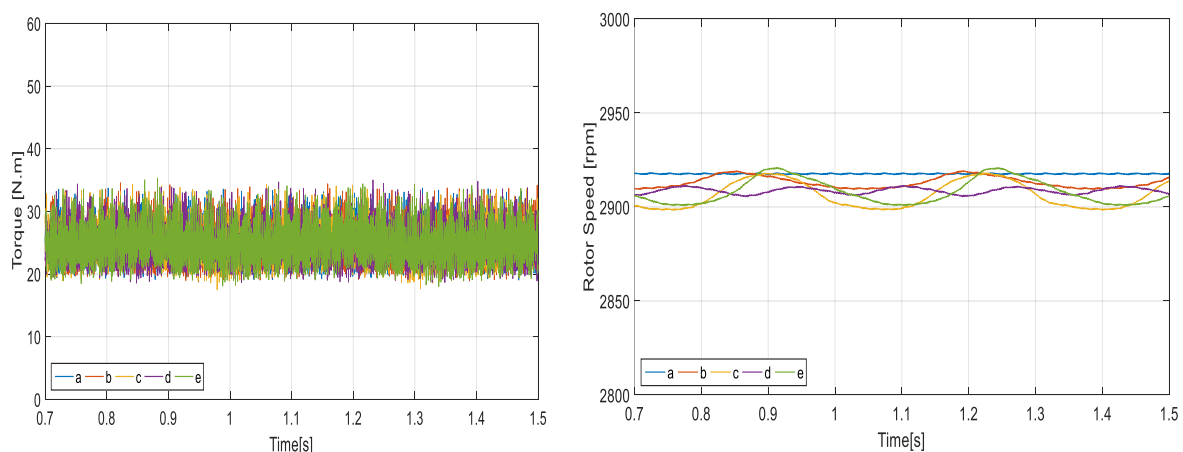


figure III.3 vitesse de rotation et couple électromagnétique de moteur (B) à pleine charge (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacentes (d) deux bars cassés dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassés dans les pôles opposés.

la fréquence 2gf. Aussi, nous pouvons voir que ces oscillations sont beaucoup plus influencées par la barre cassée. .

#### III.4. Analyse des signatures des courant du moteur (MCSA) :

Dans les sections suivantes, l'analyse harmonique du courant du stator pour la machine saine et défectueuse sera présentée. Les Fig. 5 à 7 rapportent le spectre du courant stator à pleine charge, à demi-charge et à vide respectivement. Bien que les résultats montrent l'apparition des composants bien connus liés au défaut  $(1 \pm 2ks)fs$  autour des fréquences  $fs$ ,  $3fs$ ,  $5fs$  et  $7fs$  à pleine et demi-charge ; cependant ces harmoniques sont difficiles à détecter dans le cas a vide (figure 7). Un inconvénient connu du MCSA traditionnel est qu'il n'est pas fiable à vide ou à faible charge car une fréquence de signature de défaut de barre de rotor cassée dépend du glissement, et lorsque le glissement est proche de zéro, cette harmonique est difficile à détecter.

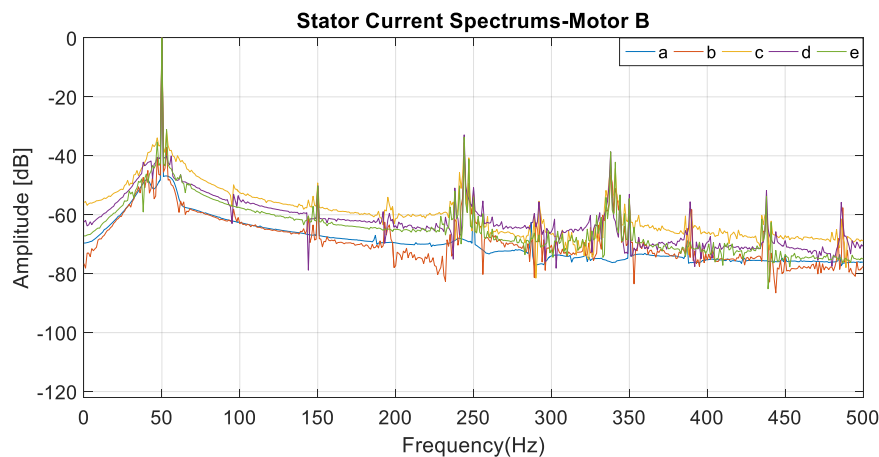


figure III.5 Spectres du courant statorique de moteur A et B a pleine charge (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacentes (d) deux bars cassées dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassées dans les pôles opposé.

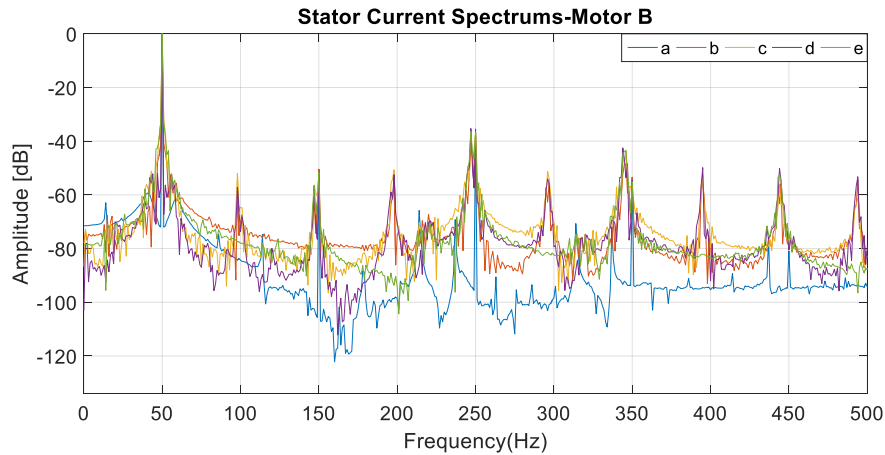


figure III6 Spectres du courant statorique de moteur A et B a demi- charge(a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacents (d) deux bars cassées dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassées dans les pôles opposé

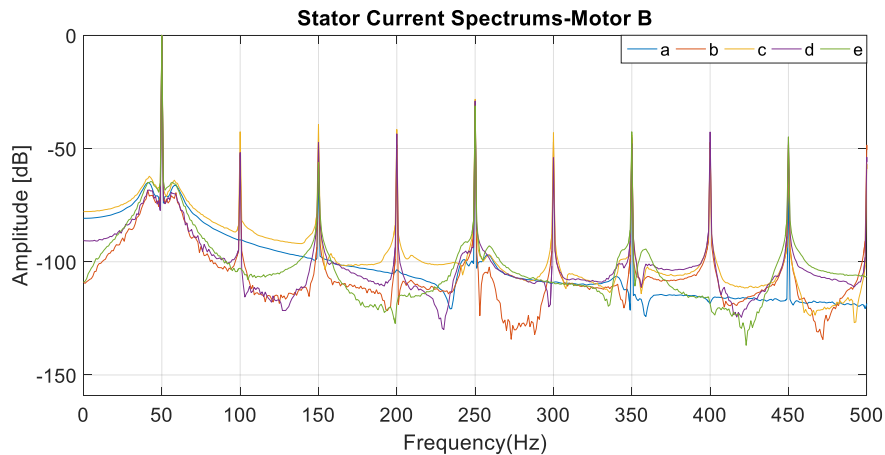


figure III7 Spectres du courant statorique de moteur vide (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacents (d) deux bars cassées dans les pôles adjacentes (e) deux bars cassées dans les pôles opposé

Les composants liés au défaut  $(1 \pm 2k1s)fs$  autour des fréquences  $fs$ ,  $3fs$ ,  $5fs$  et  $7fs$  du courant du stator à pleine charge sont présentés à la Fig.13.

### III.5. Analyse des signatures des flux de fuite (SFSA) :

Dans la section suivante, l'analyse des harmoniques du flux de dispersion sera mise en évidence. Les figures 8 à 10 présentent le spectre de flux de fuite pour le moteur sain et avec un défaut de barres rotoriques cassées. Il existe une distinction significative entre le flux de fuite et le courant statorique. On peut observer que le spectre du flux de fuite est plus riche en harmoniques que dans le courant stator et surtout les harmoniques de fréquences mécaniques situées au rang  $k2fr \pm sfs$  and  $fs + fr \pm 2sfs$  en plus de  $k1fs + 2sfs$  De

plus , contrairement au courant du stator, à vide ( fig.10), les résultats ont montré une plus grande sensibilité que le MCSA classique.

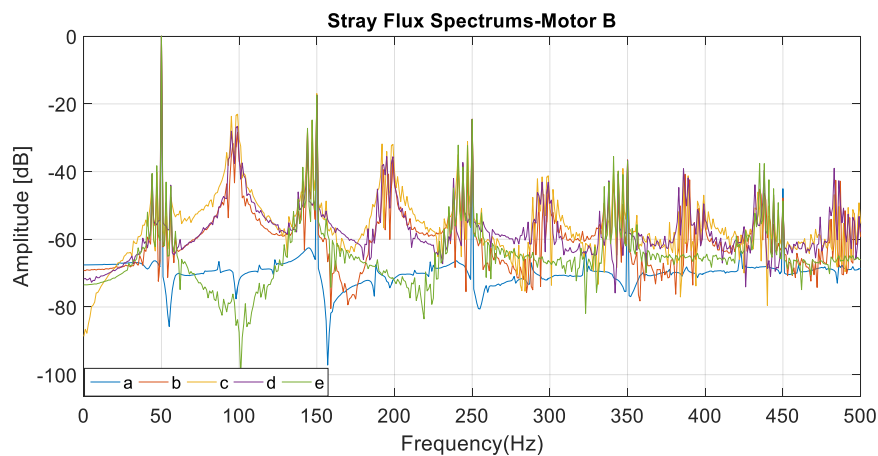


figure III8 Spectres de flux de dispersion de moteur A et B à pleine charge (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacents (d) deux bars cassées dans les pôles adjacents (e) deux bars cassées dans les pôles opposé

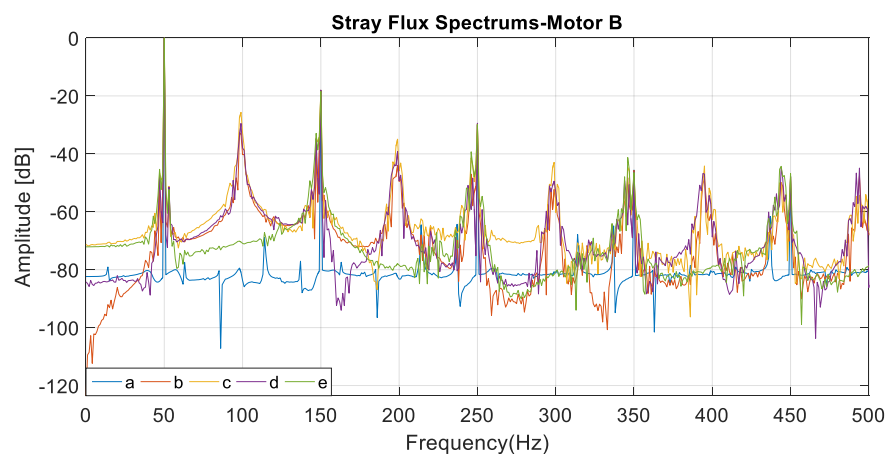


figure III9 Spectres de flux de dispersion de moteur A et B a demi-charge (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacents (d) deux bars cassées dans les pôles adjacents (e) deux bars cassées dans les pôles opposé.

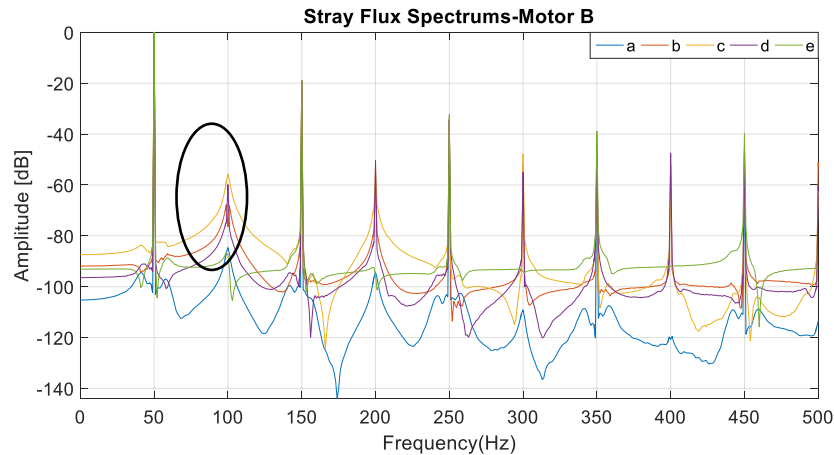


figure III10 Spectres de flux de fuite à vide (a) machine saine, (b) un bar cassée, (c) deux bars cassés adjacents (d) deux bars cassés dans les pôles adjacents (e) deux bars cassés dans les pôles opposés.

En remarque une augmentation de l'amplitude des signatures de rang  $kfs \pm 2sfs$  et  $k2fr \pm sfs$  de flux de fuite en fonction des barres cassées du rotor, de plus, les signatures mécanique de rang

### III.6. Diagnostic de défaut d'excentricité de rotor :

L'excentricité de l'entrefer dans les machines électriques peut se produire sous forme d'excentricité statique ou dynamique. Les effets de l'excentricité de l'entrefer produisent des modèles spectraux uniques et peuvent être identifiés dans le spectre actuel. L'analyse est basée sur l'approche des ondes tournantes dans laquelle les ondes de flux magnétique dans l'entrefer sont considérées comme le produit des ondes de perméance et de force magnétomotrice (MMF). L'équation de fréquence pour déterminer les caractéristiques de l'entrefer [67- 68] est la suivante :

$$f_{exc} = \{ (n_{rt} R \pm n_d) ((1 - s))/p \pm n_{ws} \} f_s \quad \text{III.2}$$

Où :  $f_{exc}$  = composantes de fréquence dans un spectre de courant dues à l'encoche du rotor et à l'entrefer excentricité, Hz

$n_{rt}$  = tout entier, 0, 1, 2, 3, ...

$R$  = nombre de barres de rotor

$n_d$  = numéro d'ordre d'excentricité ; tout entier, 0, 1, 2, 3, ...

$n_d = 0$  pour l'excentricité statique (harmoniques de la fente principale)

$n_d = 1, 2, 3, \dots$  pour l'excentricité dynamique,  $s$  = le glissement.

$p$  = paires de pôles, soit la moitié du nombre de pôles ( $P$ ), c'est-à-dire  $p = P/2$

$n_{ws}$  = numéro d'ordre de l'harmonique de temps MMF du stator ou de l'harmonique de temps du courant du stator ; entier impair, 1, 3, 5, ...

$f_s$  = fréquence d'alimentation.



En général, cette équation peut être utilisée pour prédire le contenu fréquentiel du signal de courant. Il y a trois  $n$  dans l'équation et, par conséquent, trois ensembles d'harmoniques :  $n_{rt}$  est lié au rotor,  $n_{ws}$  lié au stator et  $n_d$  lié à l'excentricité. Pour les variations d'excentricité statiques  $n_d = 0$  et pour les variations d'excentricité dynamiques  $n_d = 1, 2, 3, \dots$

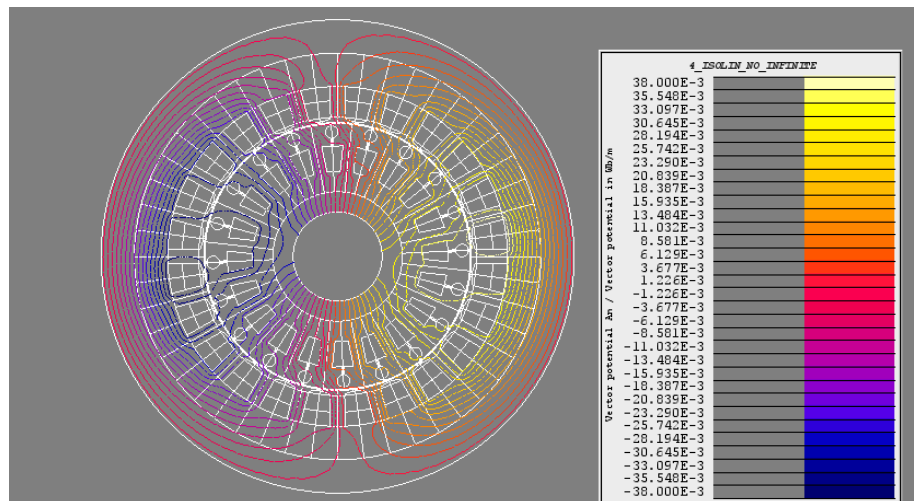
L'excentricité dynamique peut être exprimée en pourcentage (%) d'excentricité dynamique et définie par :

$$\% \text{ dynamic eccentricity} = (\text{Nominal gap} - \text{Actual gap}) / (\text{Nominal gap}) * 100$$

Où : Entrefer nominal = Entrefer total/2.

### III.6.1. Résultats de simulation :

La figure (III.11) présente la distribution des lignes de flux dans le moteur à induction sain et défectueux au régime permanent. Comme le montre la figure III.11- (a), la raison de la distribution asymétrique du flux est due aux changements rapides du glissement au démarrage et également au courant de Foucault dans les barres du rotor. Lorsque le moteur approche du mode de régime permanent, la distribution du flux devient symétrique, comme illustré à la Fig III.11-b. La Fig.III 12-a présente la distribution du flux au sein du moteur défaillant. Il existe également une asymétrie due au défaut (Fig.III.12-b) dans le fonctionnement en régime permanent. Lorsque l'excentricité se produit, le champ d'entrefer qui se compose de la composante fondamentale, des harmoniques mmf du stator et du rotor et des perméances des fentes du stator et du rotor, aura de nouvelles composantes harmoniques dues au défaut. Par conséquent, la distribution de flux dans un moteur défectueux sous excentricité statique est déformée. Ce fait a été montré dans la FigIII.13-a Fig.III.13-b. Outre les causes évoquées ci-dessus d'asymétrie de répartition du flux dans le moteur sain, l'excentricité injecte des courants harmoniques dans le courant du moteur défaillant.





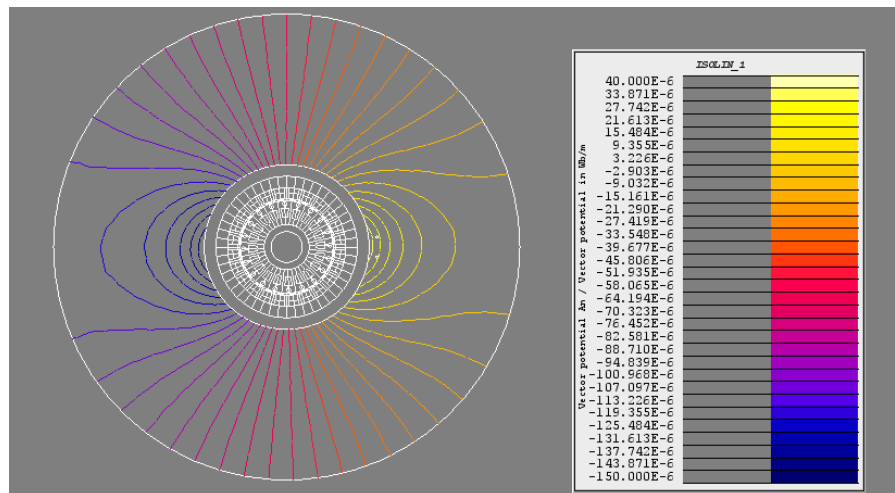
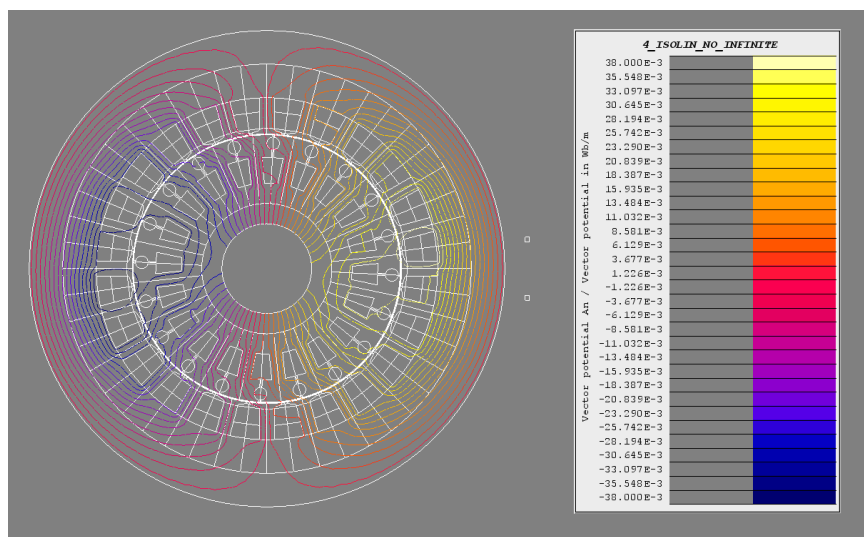
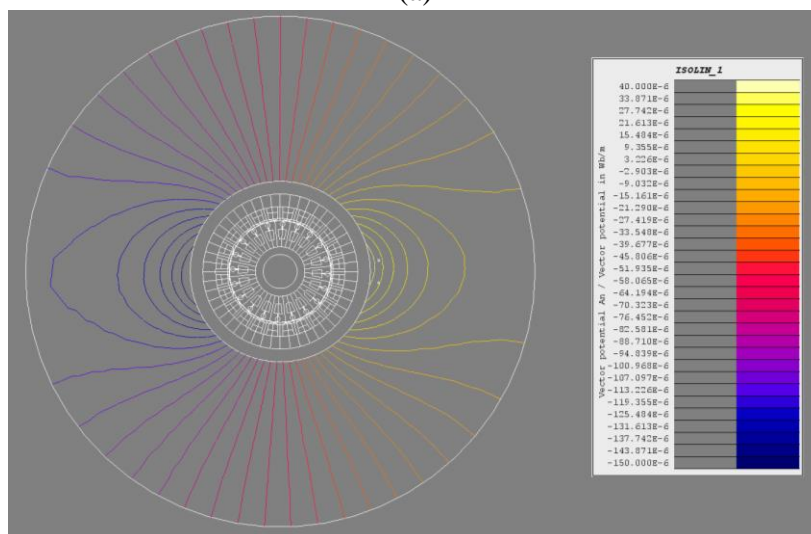


figure III11 Distribution des lignes de flux de la machine saine : (a) : l'intérieur de Machine, (b) : à l'extérieur de la machine.



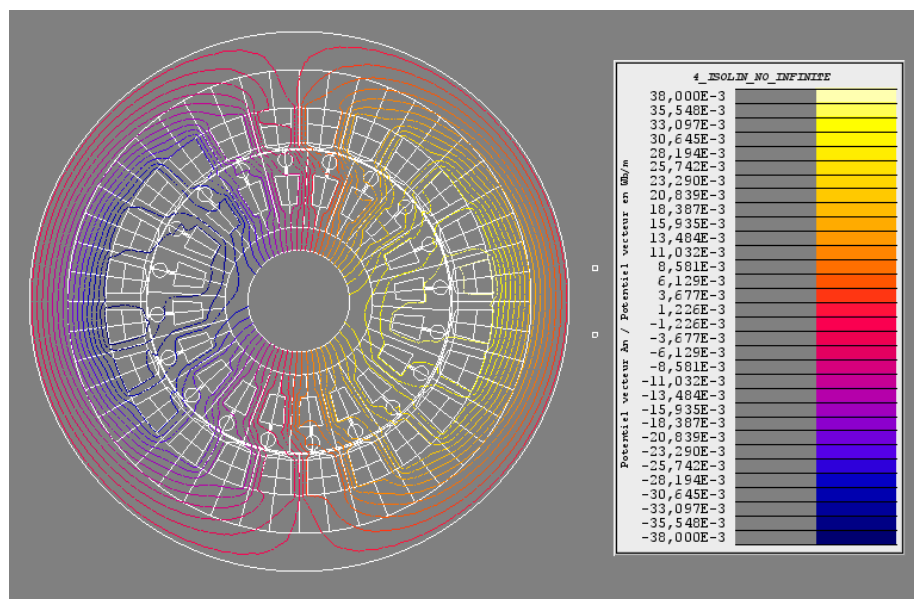
(a)



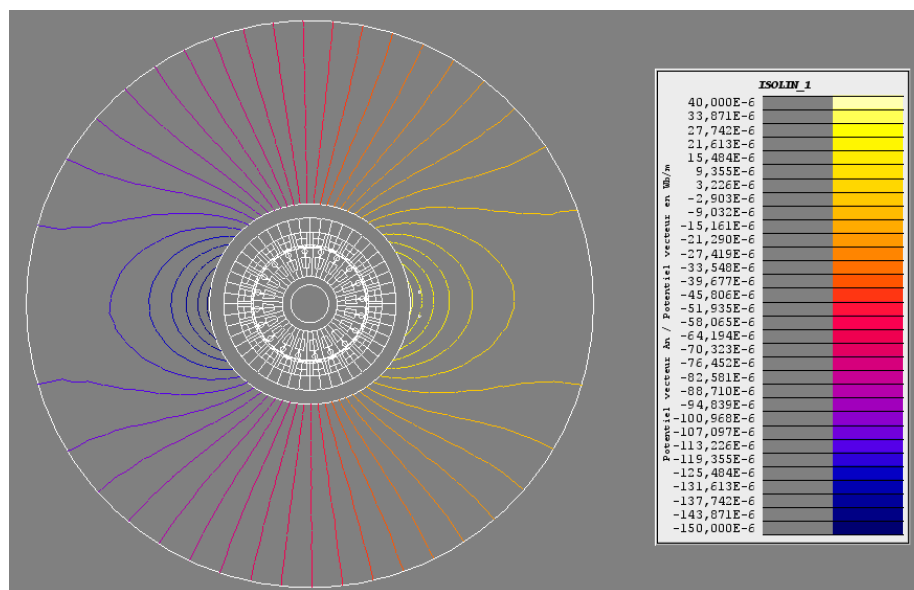
(b)

figure III12 Distribution des lignes de flux de la Machine avec 20% d'excentricité :

(a) : l'intérieur de Machine, (b) : à l'extérieur de la machine.



(a)



(b)

figure III13 Distribution des lignes de flux de la Machine avec 60% d'excentricité :

(a) : l'intérieur de Machine, (b) : à l'extérieur de la machine

### III.8. Analyse du spectre du courant stator :

Sous excentricité statique, de nombreuses harmoniques sont injectées dans le courant du stator et les amplitudes des composantes harmoniques sont augmentées par incrément de défaut. Par conséquent, pour le traitement du signal du courant stator du moteur sain et défectueux, une analyse spectrale du signal de courant stator est nécessaire. Analyse du spectre du courant stator pour le diagnostic de l'excentricité statique à l'aide de composantes harmoniques autour de la composante fondamentale, harmoniques existantes de la fente les harmoniques, appelées harmoniques de fente de principe (PSH), sont nécessaires pour le diagnostic des défauts d'excentricité. Généralement, l'équation due à l'harmonique fondamentale de la fente et aux harmoniques liées aux excentricités statiques et dynamiques de l'équation (III.1), si  $n_d = 1$ ,  $K = 0$  et  $\eta = 1$ , (V.1) devient comme suit :

$$f_{eccentricity} = fs \pm kfr, \text{ avec } k = \pm 1 \pm 2 \pm 3, \dots$$

Ces harmoniques, situées autour de la fréquence fondamentale du réseau sont dues à l'excentricité mixte. Par conséquent, l'excentricité mixte injecte des composantes harmoniques avec un motif  $fs \pm Kfr$  dans le courant du stator. L'harmonique fondamentale est obtenue pour  $K = 1$ . Ces harmoniques doivent être recherchées autour de la composante de fréquence fondamentale. Les figures III.14(a) et III.14(b) montrent le spectre de fréquence simulé et testé du courant statorique pour un moteur sain. Selon ces figures, les amplitudes des composantes harmoniques  $fs - fr$  et  $fs + fr$  sont respectivement de  $-78$  dB et  $-79$  dB. En se référant aux Fig. III.15(a) et III.15(b) confirme qu'une excentricité statique de 20,60% augmente les amplitudes des harmoniques  $fs - fr$  et  $fs + fr$  à  $-55$  dB et  $-57$  dB respectivement, ce qui peut être utilisé pour diagnostiquer le défaut d'excentricité statique. Sous défaut d'excentricité statique, le champ d'entrefer, qui comprend les composants fondamentaux du flux du stator et du rotor, la perméance des encoches du stator et du rotor produit plus de composants harmoniques en raison des défauts ; par conséquent, les harmoniques fondamentales de la fente dans le courant de phase par rapport à l'asymétrie de l'entrefer augmentent, de sorte que les contenus harmoniques dans les courants de phases du stator seront augmentés. Le tableau 2 résume les composantes de la bande latérale à la fréquence  $fs \pm kfr$  pour le moteur sain et défectueux sous différents degrés d'excentricité statique.

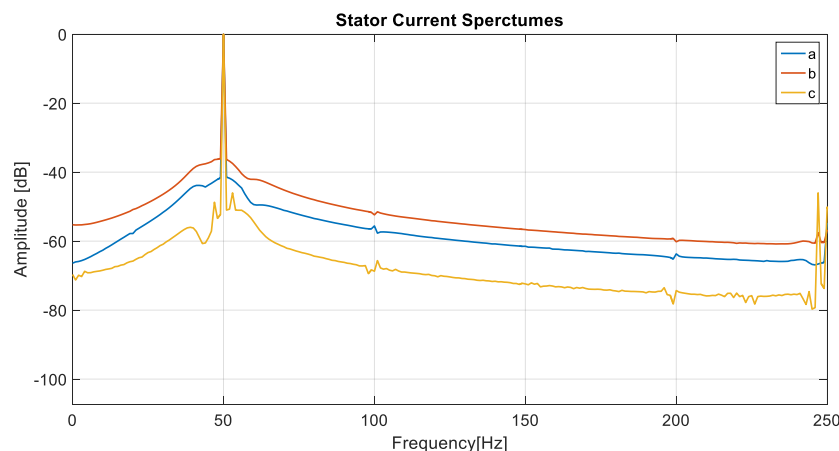


figure III14 Spectres du courant statorique a la charge nominal (a) machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité

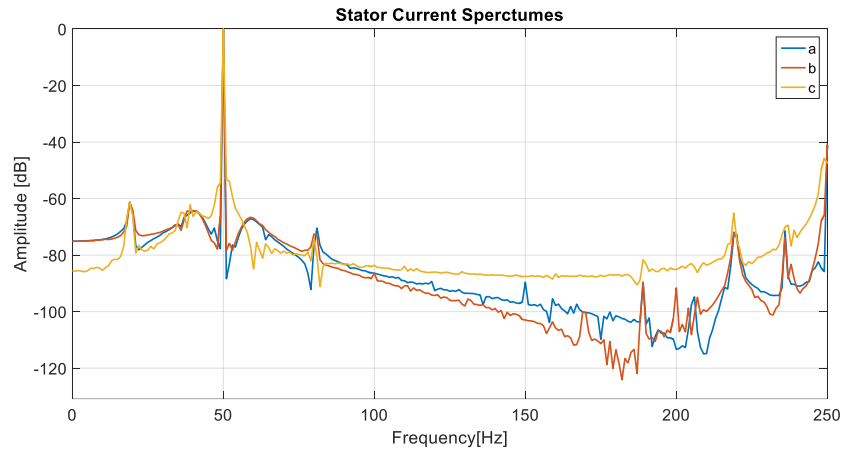


figure III.15 Spectres du courant statorique a demi charge (a) machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.

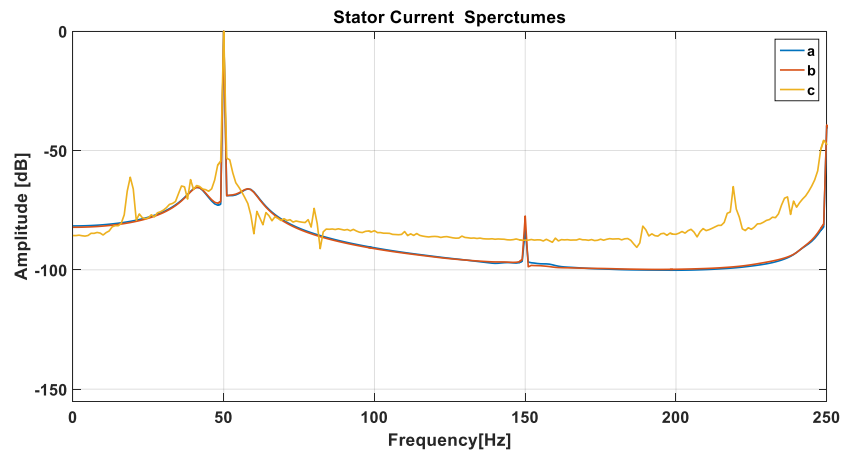


figure III.16 Spectres du courant statorique à vide (a) machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.

### III.9. diagnostic par l'analyse de champ de fuite :

Le moteur défectueux a été testé pour une excentricité statique de 20 % et 60% une excentricité statique. Pour détecter l'excentricité de l'entrefer, le courant du stator a été analysé pour identifier les composantes du courant entre les fréquences de  $f_s + f_r$  Hz. La figure III.18 montre le spectre de puissance d'un moteur sain. Dans ce spectre, les fréquences de défaut n'apparaissent pas, il n'y a donc pas de niveau anormal d'excentricité statique et dynamique dans le moteur à induction.

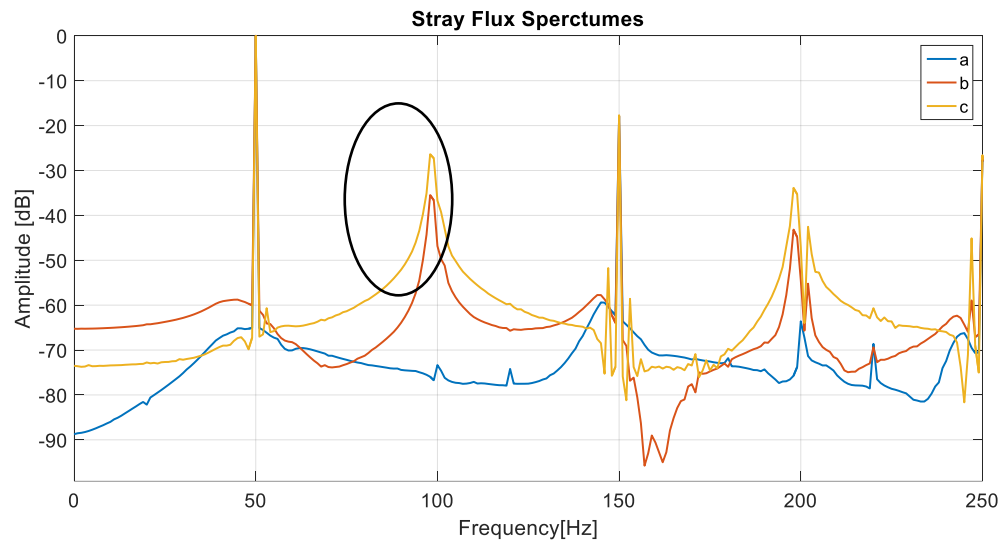


figure III17 Spectres du flux de dispersion a la charge nominal (a) machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.

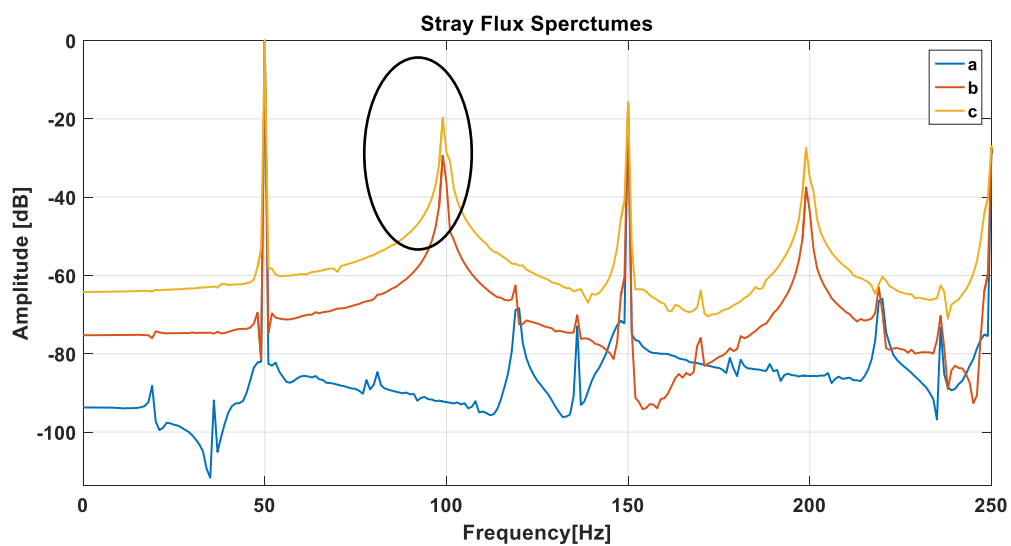


figure III18 Spectres du flux de dispersion a demi-charge (a) machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.

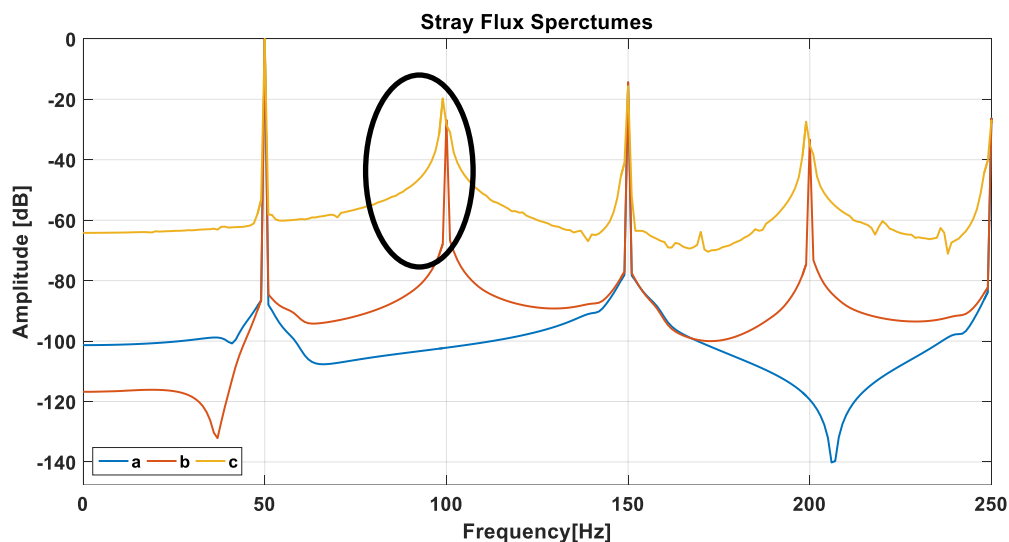


figure III19 Spectres du flux de dispersion à vide (a) machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité

Degré d'excentricité	$fs - fr$	$fs + fr$
machine saine	-90	-85
Machine 20% excentricite	-75	-65
Machine avec 60% excentricité	-67	-64

Table III1 . Amplitude des composantes de courant de la bande latérale à la fréquence  $fs \pm fr$  pour un moteur sain et défectueux en dB.

Degré d'excentricité	$fs - fr$	$fs + fr$
machine saine	-80	-72
Machine 20% excentricité	-35	-30
Machine avec 60% excentricité	-21	-20

Table III2 Amplitude des composantes de la bande latérale à la fréquence  $fs \pm fr$  pour un moteur sain et défectueux en dB

### III.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, les signatures mécaniques du flux magnétique de fuite ont été utilisées pour détecter le défaut de barre de rotor cassé et l'excentricité dans la MAS. Le modèle de la MAS, par la méthode des éléments finis, est un outil puissant pour analyser le comportement de la machine. Les signatures de défaut de barre cassée à  $k2 fr \pm sfs$  et à  $k1fs + 2s fs$  du flux de fuite ont été examinées ainsi que la composante des bandes latérales à  $fs + fr \pm 2sfs$ . La méthode proposée détecte le défaut de barre cassée même dans le cas d'un défaut de barre cassée non adjacente. De plus, le courant du stator et le flux de fuite ont été comparés pour montrer l'avantage de l'analyse du flux de fuite pour le système de surveillance. Il a été montré qu'il existe des signatures mécaniques importantes dans le flux de fuite telles que  $k2 fr \pm sfs$  et  $fs + fr \pm 2sfs$  qui sont plus fiables pour détecter le défaut de barres cassées dans le cas d'un défaut de barres cassées adjacentes et non adjacentes.

La détection de défaut l'excentricité dans la MAS est abordée dans ce chapitre. L'approche non invasive basée sur la surveillance des courants statorique et le flux de fuite a été utilisé. Les résultats de simulation obtenus en utilisant la méthode des éléments finis produisant des défauts démontrent l'efficacité de la technique proposée. Les résultats montrent qu'il est possible de détecter la présence d'excentricité dans le fonctionnement d'un moteur à induction triphasé en surveillant le flux de fuite et le courant du stator. Des informations qualitatives sur la gravité du défaut peuvent être obtenues en utilisant la FFT.

Enfin, la méthode de flux de fuite montre son efficacité pour la détection des défauts au rotor dans les machines asynchrone.

# CONCLUSION GENERALE



### Conclusion générale

Les machines asynchrones sont très importante dans le industrie, en raison de leursimple construction, robustesse, faible cout et de fiabilité, en plus, les machines multiphasées présentent plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées, tels que :

segmentation de puissance, minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques,réduction des courants harmoniques, grandefiabilité et forte puissance.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affecter le fonctionnement de la machine asynchrone, ainsi que les méthodes de diagnostic et de modélisation.

Ensuite nous avons présentélelogiciel de simulation et nous avons fourni la modélisation d'une machine asynchrone à l'aide du logiciel Flux 2D,Ce modèle, conduit à un gain notable en description d'une des méthodes de diagnostic cela permet d'identifier un problème de rotation du dispositif basé sur la présentation du modèle et la simulation de cette procédure, qui dépend de la méthode des élément finis.

Pour analyser le comportement de la machine avec des défauts, nous avons modélisé les performances du dispositif à l'état saine et comparé avec celui en présence des défauts de cassure de barres, l'effet de la position de bar cassé est étudiier dans ce travail.A la fin de ce travail, nous nous sommes appuyés sur une méthode de surveillance d'une machine asynchrone,basé sur l'analyse spectrale des courant statorique par la technique de FFT,cette méthode nous permet d'identifier les défauts qui se sont produits dans le rotor de la machine.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

### References Bibliographies

- [1]. modélisation de la machine électrique en vue de leur commande -jean paul louise 2004.
- [2] **M. Ammar**, "Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones" Thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, 2012
- [3] **E. Schaeffer**, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outil paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999
- [4] **Baba Fatima**, « Contribution à la Modélisation et à La Commande de la Machine Asynchrone :Application au diagnostic des défauts statoriques », thèse de doctorat, Université Constantine 1,Algérie, Juin 2014.
- [5] **Y. Laamari**, "Diagnostic des défaillances dans les systèmes électromécaniques" Thèse de doctorat, Université badji mokhtar annaba, 2016.
- [6] **P. O'Donnell**, "Report of large reliability survey of industrial and commercial installations, Part 1", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA 21, N°4, July/august 1985 pp 853 – 864.
- [7] "Présentation des avaries. Machines électriques tournantes" cahier des préventions. CP2, Allianz, 1988.
- [8] **Peter Vas**, "*Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines*", Clarendon Press Oxford., 1993.
- [9] **Mehala, N.** (2010). Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using motor current signature analysis. A Ph. D Thesis submitted to the Electrical Engineering Department, National Institute of Technology, Kurushetra, India.
- [10] **G. Barakat** « Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone à cage en présence de défauts ». Article de synthèse des travaux de huit laboratoires dans l'opération " Détection de Défauts et Diagnostic des Actionneurs" du thème "Sûreté - Fiabilité", p3, 2005.
- [11] **P. Zhang, Y. Du**, T. G. Habetler, and B. Lu, "A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, no. 1, pp. 34–46, Jan. 2011.
- [12] **M. E. H. Benbouzid**, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 47, no. 5, pp. 984–993, 2000
- [13] **G. Fox**, "Overload Protection For Medium Voltage Motors Controlled By Switchgear Starters," in *Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, pp. 82–86, 1990.
- [14] **Al-Musawi, A.** (2019). The development of new artificial intelligence based hybrid techniques combining bees algorithm, data mining and genetic algorithm for detection, classification and prediction of faults in induction motors (Doctoral dissertation, Cardiff University).

- [15] **P. H. Mellor**, D. Roberts, and D. R. Turner, "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design," *IEEE Pro. Electric Power Application*, Vol. 138, pp. 205-218, 1991.
- [16] **O. I. Okoro**, "Steady and transient states thermal analysis of a 7.5-kW squirrel-cage induction machine at rated-load operation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 4, pp. 730-736, December, 2005
- [17] **Z. Gao, T. G. Habetler, and R. G. Harley**, "An online adaptive stator winding temperature estimator based on a hybrid thermal model for induction machines," in Conf. Rec. IEEE IEMDC'05, pp. 754-761, San Antonio, Texas, USA, May, 2005.
- [18] **P. Milanfar and J. H. Lang**, "Monitoring the thermal condition of permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 32, No. 4, pp. 1421-1429, October, 1996.
- [19] **Chaturvedi, D. K., Iqbal, M. S., & Singh, M. P.** (2015, March). Intelligent health monitoring system for three phase induction motor using infrared thermal image. In 2015 international conference on energy economics and environment (ICEEE) (pp. 1-6). IEEE.
- [20] **Dorrell, D. G. and Smith, A. C.**, "Calculation and measurements of unbalance magnetic pull in cage induction motors with eccentric rotors, part 2: experimental investigation", *IEEE Proceedings Electric Power Applications*, Vol. 143, No. 3, May, pp. 202-210, 1996.
- [21] **Belahcen, A., Arkkio, A., Klinge, P., Linjama, J., Voutilainen and V., Westerlund, J.,** 1999, "Radial forces calculation in a synchronous generator for noise analysis", *Proceeding of the Third Chinese International Conference on Electrical Machines*, Xi'an, China, pp. 199-122, August 1999.
- [22] **Dorrell, D. G., Thomson W. T., and Roach, S.,** "Analysis of air-gap flux, current, and vibration signals as function of a combination of static and dynamic eccentricity in 3-phase induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 33, Jan./Feb., pp. 24-34, 1997.
- [23] **Wu, S., and Chow, T. W. S.** "Induction machine fault detection using SOM-based RBF neural networks", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 1, February, pp. 183-194, 2004.
- [24] **NOUREDDINE, L.** (2019). ( Defects Diagnosis of Renewable Energy System Based on Fuzzy Techniques ) thesis of doctorate in sciences (Doctoral dissertation, Djelfa University).
- [25] **John S. Hsu**, "Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 5, pp.1016- 1021, 1995.
- [26] **Taleb 2007**, "Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 5, pp.1016- 1021, 1995.
- [27] **A. J. Ellison and S. J. Yang**, "Effects of rotor eccentricity on acoustic noise from induction machines," *Proceedings of IEE*, 118, (1), pp. 174-184, 1971.
- [28] **Oumaamar, M. E. K.** (2012). Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).

- [29] **Rgeai, M.N.**, *Helical gearbox fault detection using motor current signature analysis(Phd Thesis)*, in *Mechanical, Aerospace and Civil Engineering*. 2007, University of Manchester: School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering
- [30] **Shaeboub, A.**, *The Monitoring of Induction Machines Using Electrical Signals from the Variable Speed Drive(PhD Thesis)*. 2018, University of Huddersfield.
- [31] **Seera, M.**, et al., *Fault detection and diagnosis of induction motors using motor current signature analysis and a hybrid FMM–CART model*. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2012. 23(1): p. 97-108.
- [32] **S. Karmakar**, S. Chattopadhyay, M. Mitra, S. Sengupta, Induction motor fault diagnosis approach through current signature analysis, 2016
- [33] **Benbouzid MEH** (2000) A review of induction motor signature analysis as a medium for fault detection. IEEE Trans Industr Electron 47(5):984–993
- [34]. **Thomson WT**, Gilmore RJ (2003) Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives-fundamentals, data interpretation, and industrial case histories. In: Proceedings of the thirty-second turbomachinery symposium, pp 145–156
- [35] **Yang, C.; Kang, T.J.**; Lee, S.B.; Yoo, J.Y.; Bellini, A.; Zarri, L.; Filippetti, F. Screening of false induction motor fault alarms produced by axial air ducts based on the space-harmonic-induced current components. IEEE Trans. Ind. Electron. 2014, 62, 1803–1813.
- [36]. **Antonino-Daviu, J.**; Climente-Alarcon, V.; López, A.Q.; Hornsey, S. Reporting false indications of startup analysis when diagnosing damper damages in synchronous motors. In Proceedings of the IEEE 14<sup>th</sup> International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Poitiers, France, 19–21 July 2016; pp. 434–438.
- [37]. **ZAMUDIO-RAMÍREZ**, Israel, **OSORNIO-RÍOS**, Roque Alfredo, **ANTONINO-DAVIU**, Jose Alfonso, et al. Smart-sensor for the automatic detection of electromechanical faults in induction motors based on the transient stray flux analysis. Sensors, 2020, vol. 20, no 5, p. 1477.
- [38]. **CRUZ, Sergio MA** et **CARDOSO**, AJ Marques. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach. IEEE Transactions on industry applications, 2001, vol. 37, no 5, p. 1227-1233.
- [39] **M. A. Cash**, T. G. Habetler, G. B. Kliman, “Insulation Failure Prediction in AC Machines Using Line-Neutral Voltages,” IEEE Trans. Ind. Applications, vol. 34, no. 6, pp. 1234–1239, November/December 1998.
- [40] **P. García**, F. Briz, M. W. Degner, A. B.Diez, “Diagnostics of Induction Machines Using the Zero Sequence Voltage” 2004 IEE
- [41]. **Bonnett AH**, Soukup GC (1992) Cause and analysis of stator and rotor failures in three phase squirrel-cage induction motors. IEEE Trans Ind Appl 28(4):921–937
- [42]. **Edwards DG** (1994) Planned maintenance of high voltage rotating machine insulation based upon information derived from on-line discharge measurements. Proc IEE Int Conf Life Manage Power Plants 401:101–107
- [43]. **Stone GC**, Floyd BA, Campbell SR, Shedding HG (1997) Development of automatic, continuous partial discharge monitoring systems to detect motor and generator partial discharges. Proceedings IEEE, IEMDC’97, pp MA2-3.1–MA2-3.3

- [44].. **Stone GC**, Sedding HG, Costello MJ (1996) Application of partial discharge testing to motor and generator stator winding maintenance. *IEEE Trans Ind Appl* 32(2):459–464
- [45].. **Tetrault SM**, Stone GC, Sedding HG (1999) Monitoring partial discharges on 4KV motor windings. *IEEE Trans Ind Appl* 35(3):682–688
- [46] **G. C. Stone**, I. Culbert, E. A. Boulter, and H. Dhirani, “Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair: Second Edition,” *Electr. Insul. Rotating Mach. Des. Eval. Aging, Testing, Repair Second Ed.*, vol. 9781118057, pp. 1–643, 2014, doi: 10.1002/9781118886663.
- [47] **ABB Motors**, “ABB Ability TM Smart Sensor,” 2017. [https://new.abb.com/motors-generators/service/advancedservices/smart %0Asensor/smart-sensor-for-motors](https://new.abb.com/motors-generators/service/advancedservices/smart%0Asensor/smart-sensor-for-motors).
- [48] **CEBAN**, Andrian. Méthode globale de diagnostic des machines électriques. 2012. Thèse de doctorat. Artois.
- [49] **Y. Park et al.**, “Stray flux monitoring for reliable detection of rotor faults under the influence of rotor axial air ducts,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 10, pp. 7561–7570, 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2880670.
- [50] **S.-B. Lee**, J. Shin, Y. Park, H. Kim, and J. Kim, “Reliable Flux based Detection of Induction Motor Rotor Faults from the 5th Rotor Rotational Frequency Sideband,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 0046, no. c, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/tie.2020.3016241.
- [51] **A. Ceban**, R. Pusca, and R. Romary, “Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 5, pp. 2082–2093, 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2163285.
- [52] **C. Jiang**, S. Li, and T. G. Habetler, “A review of condition monitoring of induction motors based on stray flux,” 2017 *IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 5424–5430, 2017, doi: 10.1109/ECCE.2017.8096907.
- [53] **I. Zamudio-Ramírez**, R. A. Osornio-Ríos, J. A. Antonino-Daviu, and A. Quijano-Lopez, “Smart-sensor for the automatic detection of electromechanical faults in induction motors based on the transient stray flux analysis,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 5, 2020, doi: 10.3390/s20051477.
- [54] **R. Romary**, R. Pusca, J. P. Lecoite, and J. F. Brudny, “Electrical machines fault diagnosis by stray flux analysis,” in *Proceedings - 2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, WEMDCD 2013*, 2013, pp. 247–256, doi: 10.1109/WEMDCD.2013.6525184.
- [55] **I. Zamudio-Ramírez**, J. A. Antonino-Daviu, R. A. Osornio-Rios, R. De Jesus Romero-Troncoso, and H. Razik, “Detection of Winding Asymmetries in Wound-Rotor Induction Motors via Transient Analysis of the External Magnetic Field,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 6, pp. 5050–5059, 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2931274.
- [56] **T. Goktas**, **M. Zafarani**, K. W. Lee, B. Akin, and T. Sculley, “Comprehensive Analysis of Magnet Defect Fault Monitoring Through Leakage Flux,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 4, 2017.
- [57] **Kokko**, V., 2003. Condition Monitoring of Squirrel-cage Motors by Axial Magnetic Flux Measurements. *Acta Universitatis Ouluensis: Technica*, University of Oulu. URL: <https://books.google.fr/books?id=gS4OMwAACAAJ>.

- [58] **G. Mirzaeva and K. Saad**, “Advanced diagnosis of rotor faults and eccentricity in induction motors based on internal flux measurement,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 3, pp. 2981–2991, May/Jun. 2018.
- [59] **Y. Park, H. Choi, S. Bin Lee, and K. N. Gyftakis**, “Search CoilBased Detection of Nonadjacent Rotor Bar Damage in Squirrel Cage Induction Motors,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 5, pp. 4748–4757, 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3000461
- [60] **ZORIG, Assam.** ‘Identification des machines asynchrones en vue de leurs diagnostiques’. Mémoire de magister. Université de Sétif, 2010.
- [61] **ZORIG, Assam, KIA, Shahin Hedayati, CHOUDER, Aissa, et al.** A comparative study for stator winding inter-turn short-circuit fault detection based on harmonic analysis of induction machine signatures. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2022, vol. 196, p. 273-288.
- [62] **Wu, Yucai, and Qingfei An.** "Online diagnosis of broken rotor bar fault of squirrel-cage induction motor using a magnetic field measuring coil." *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 15.2 (2020): 291-303.
- [63]. **Concari, Carlo, Giovanni Franceschini, and Carla Tassoni.** "Differential diagnosis based on multivariable monitoring to assess induction machine rotor conditions." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55.12 (2008): 4156-4166.
- [64]. **Gyftakis, Konstantinos N., Panagiotis A. Panagiotou, and Sang Bin Lee.** "Generation of mechanical frequency related harmonics in the stray flux spectra of induction motors suffering from rotor electrical faults." *IEEE Transactions on Industry Applications* 56.5 (2020): 4796-4803.
- [65] **P. J. Tavner and J. Penman**, “Condition monitoring of electrical machines”. Hertfordshire, England: Research Studies Press Ltd, ISBN: 0863800610, 1987.
- [66] **W.T. Thomson and R.J. Gilmore**, “Motor current signature analysis to detect faults in induction motor derives-Fundamentals, data interpretation, and industrial case histories’, proceedings of 32nd Turbomachinery symposium, Texas, A&M university, USA, 2003.
- [67] **Benbouzid, M. E. H.**, “A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, October, No.5, pp. 984-993, 2000.
- [68] **W. T. Thomson, D. Rankin, and D. G. Dorrell**, “On-line current monitoring to diagnose airgap eccentricity-an industrial case history of a large high-voltage three-phase induction motors,” *Electric Machines and Drives Conference Record*, pp.MA2/4.1-MA2/4.3, 1997.

# RESUME



### ملخص:

كان تشخيص العيوب في الآلات الكهربائية موضوع العديد من الأبحاث والاهتمام الصناعي لسنوات عديدة الهدف من هذا العمل هو تطوير نموذج العناصر المحدود باستخدام برنامج Flux2D®، مما يجعل من الممكن محاكاة الأخطاء المختلفة في الآلة غير المتزامنة في هذا العمل، تم استخدام طريقتين تشخيصيتين (تحليل طيفي للتيارات الساكنة، وتحليل حقول التسرب) للكشف عن التوقعات الافتراضية تشير النتائج التي تم الحصول عليها بوضوح إلى أن توقعات هذه العيوب تظهر في طيف التيار الثابت. والفلطية المستحثة لمجال التثتت

كلمات البحث: آلة غير متزامنة، العناصر المنتهية، تدفق ثنائي الأبعاد، مجالات التثتت، التشخيص

### Résumé

Le diagnostic des défauts dans les machines électriques a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches et d'intérêt industriel depuis de nombreuses années. L'objectif du présent travail est l'élaboration d'un modèle des éléments finis, à l'aide du Logiciel Flux2D®, qui permet de simuler les différents défauts dans la machine asynchrone. Dans ce travail on a appliqué deux techniques de diagnostic (analyse spectrale des courants statorique, l'analyse de champs de fuite) pour détecter les signatures de défaut. Les résultats obtenus indiquent clairement que les signatures de ces défauts apparaissent dans le spectre du courant statorique et la tension induite de champs de dispersion. Mots clés : Machine Asynchrone, Eléments finis, Flux 2D, champs de dispersion, Diagnostic.

### Abstract

The diagnosis of defects in electrical machines has been the subject of several researches and industrial interest for many years. The objective of this work is the development of a finite element model, using the Flux2D® Software, which makes it possible to simulate the various faults in the asynchronous machine. In this work, two diagnostic techniques (spectral analysis of the stator currents, the analysis of leakage fields) were used to detect the default signatures. The results obtained clearly indicate that the signatures of these defects appear in the spectrum of the stator current and the induced voltage of dispersion fields. Key words: Asynchronous machine, Finite elements, 2D flow, dispersion fields, Diagnosis