

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



FACULTÉ DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

**MÉMOIRE**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE**  
**MASTER EN ÉLECTROTECHNIQUE**  
SPÉCIALITÉ : MACHINE ÉLECTRIQUE

Présenté par

Mr Herroug Lyes

Mr Bouchemaa Amine

*Thème*

Étude et analyse des défaillances au rotor d'une  
machine asynchrone

Année Universitaire : 2020/2021

# *Remerciements*

*Je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage et la patience  
durant toute la période de réalisation de ce mémoire.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre  
encadreur madame **R. Abdelli** pour suivi continué tout le long de la  
réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils et  
remarques.*

*Enfin, je remercie également toute personne qui m'a donné de l'aide pendant  
cette phase de réalisation de ce mémoire et tous mes collègues de la promotion  
2020/2021.*

*Nos remerciements sont destinés aussi à toutes Nos familles, et tous Nos amis  
pour leur aide et leur soutien.*

# *Dédicaces*

## *Je dédie ce travail à mes chers parents*

*Qui ont œuvré pour ma réussite, par leurs amours Inestimables, leurs confiances, leurs soutiens, tous les sacrifices consentis et les valeurs qu'ils ont su m'inculquer. Je remercie dieu pour leurs permettre de Partager cette réussite qu'ils attendaient de moi. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Votre fierté est ma plus grande source de motivation.*

## *A mes chères sœurs Samia et Lynda et mon adorable frère Salah.*

*En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès.*

## *A ma chère Nawal avec laquelle j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur.*

*Que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous gardes.*

## *A toute ma grande famille.*

*En témoignage de mon attachement et de ma grande considération. Que ce travail vous apporte l'estime, et le respect que je porte à votre égard, et soit la preuve du désir que j'ai depuis toujours pour vous honorer.*

## *A mon binôme «LYES HERROUG » et à toute sa famille*

*Je le dédie aussi à tous mes amis qui m'ont soutenu durant cette dure épreuve : Larbi, Lyes, Ghilas, Sila, Tinhinane, Mahdi, Warda, El hadi, Farid, Melissa, Nadjat, Kahina et Fifi.*

*Qui ont fait de ce parcours de combattant une magnifique aventure.*

*A tous les membres de ma promotion. A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.*

# *Dédicaces*

## ***Je dédie ce travail à mes chers parents***

*Qui ont œuvré pour ma réussite, de par leurs amours Inestimables, leurs confiances, leurs soutiens, tous les sacrifices consentis et les valeurs qu'ils ont su m'inculquer. Je remercie dieu pour leurs permettre de Partager cette réussite qu'ils attendaient de moi. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Votre fierté est ma plus grande source de motivation.*

***A ma chère sœurs Sylia et sa fille Ellina et mes adorables frères Bouzid et Mourad.***

*En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès.  
Que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous gardes.*

## ***A toute ma grande famille.***

*En témoignage de mon attachement et de ma grande considération. Que ce travail vous apporte l'estime, et le respect que je porte à votre égard, et soit la preuve du désir que j'ai depuis toujours pour vous honorer.*

## ***A mon binôme «BOUCHEMAA AMINE » et à toute sa famille***

*Je le dédie aussi à tous mes amis qui m'ont soutenu durant cette dure épreuve : **Hani, Moussa, Lyes, Chafik, Nouh, Larbi, Mokrane, Nabil, Sabri, walid, Numidia, Dyhia, Amel, Nora, Melissa, Lydia, .***

*Qui ont fait de ce parcours de combattant une magnifique aventure.*

***A tous les membres de ma promotion. A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.***

# Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Introduction générale	1
<b>1 état de l'art de diagnostic des machines asynchrones</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction	3
1.2 La machine asynchrone :	3
1.3 Eléments constitutifs de la machine asynchrone :	4
1.3.1 Le stator :	5
1.3.2 Rotor :	6
1.3.2.1 Le rotor a cage :	7
1.3.3 Les organes mécaniques :	7
1.4 Principe de fonctionnement :	8
1.5 Présentation des différents défauts dans la machine asynchrone :	9
1.6 Étude statistique des défaillances de la machine asynchrone :	10
1.6.1 Quelques statistiques	11
1.6.2 Défaillances au stator	12
1.6.2.1 Défauts d'isolant dans un enroulement :	12
1.6.2.2 Court-circuit entre spires :	13
1.6.2.3 Court-circuit entre phases :	14
1.6.2.4 Court-circuit phase-bâti :	14
1.6.2.5 Défauts de circuit magnétique :	15

1.6.3	Défauts de rotor : . . . . .	15
1.6.3.1	Ruptures de barres : . . . . .	15
1.6.3.2	Ruptures d’anneaux : . . . . .	16
1.6.3.3	Excentricité statique et dynamique : . . . . .	16
1.6.3.4	Défaillances mécaniques : . . . . .	18
1.6.3.4.1	Défauts des roulements : . . . . .	18
1.6.3.5	Autres défaillances : . . . . .	19
1.7	Définition et objectif du diagnostic : . . . . .	19
1.7.1	Définition : . . . . .	19
1.7.2	Objectifs : . . . . .	19
1.7.3	Terminologies et concepts relatifs au diagnostic : . . . . .	19
1.7.4	Étapes du diagnostic de défaut : . . . . .	20
1.7.4.1	La Détection : . . . . .	20
1.7.4.2	La Localisation : . . . . .	20
1.7.4.3	L’identification : . . . . .	21
1.7.5	Intérêt du diagnostic : . . . . .	21
1.7.6	Méthodes de diagnostic de la MAS : . . . . .	21
1.7.6.1	Avec modèle analytique : . . . . .	21
1.7.6.1.1	Technique d’estimation d’état : . . . . .	21
1.7.6.1.2	Technique des générations des résidus : . . . . .	22
1.7.6.1.3	Techniques d’identification : . . . . .	22
1.7.6.1.4	Estimation paramétrique : . . . . .	23
1.7.6.1.5	Diagnostic à l’aide des observateurs : . . . . .	23
1.7.6.2	Sans modèle analytique : . . . . .	23
1.7.6.2.1	Méthode par traitement de signal : . . . . .	24
1.7.6.2.2	Diagnostic par mesure du courant statorique : . . . . .	24
1.7.6.2.3	Diagnostic par mesure du couple électromagnétique : . . . . .	24
1.7.6.2.4	Méthodes transformation de Parck : . . . . .	24
1.7.6.2.5	Diagnostic par analyse du vecteur de Park : . . . . .	25
1.8	Conclusion : . . . . .	25
<b>2</b>	<b>La modélisation et simulation de la MAS par la méthode des éléments finis</b>	<b>26</b>
2.1	Introduction . . . . .	26
2.2	Méthode des éléments finis : . . . . .	26

2.2.1	Principe de la méthode des éléments finis . . . . .	27
2.2.2	Le mode magnétique transitoire . . . . .	28
2.3	Logiciel de résolution . . . . .	29
2.3.1	Présentation de logiciel Flux 2D . . . . .	29
2.4	Application à la simulation de la machine asynchrone : . . . . .	31
2.4.1	Les matériaux conducteurs . . . . .	33
2.4.2	Couplage avec les équations de circuit : . . . . .	33
2.5	Résultats de simulation : . . . . .	33
2.6	Interprétation et analyses des résultats : . . . . .	35
2.7	Conclusion : . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Simulation et Diagnostic de la Machine Asynchrone avec Défauts</b>	<b>37</b>
3.1	Introduction . . . . .	37
3.2	Simulation de la machine asynchrone avec défauts : . . . . .	37
3.3	Résultats de simulation : . . . . .	38
3.3.1	Analyse des résultats magnétiques : . . . . .	38
3.3.2	Analyse des courants de phases : . . . . .	39
3.3.3	Analyse des courants rotoriques : . . . . .	41
3.3.4	Caractéristiques mécaniques : . . . . .	42
3.4	Diagnostic de la MAS saine et avec défauts : . . . . .	43
3.4.1	Analyse spectrale du courant d'une phase statorique : . . . . .	43
3.5	Conclusion . . . . .	46
	<b>Conclusion générale</b>	<b>47</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>49</b>
	.0.0.0.1 . . . . .	52
	.0.0.0.2 . . . . .	52

# Table des figures

1.1	La machine asynchrone . . . . .	4
1.2	Les Eléments constitutifs de MAS . . . . .	5
1.3	Vue schématiques en perspective du stator . . . . .	6
1.4	Le rotor à cage d'écureuil . . . . .	7
1.5	Principe de fonctionnement . . . . .	8
1.6	Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances. . . . .	11
1.7	(a)Thomson 1999 . . . . .	11
1.8	(b) Bonnet 2008 . . . . .	12
1.9	Court-circuit entre spire . . . . .	14
1.10	Ruptures de barres . . . . .	16
1.11	Excentricité statique et dynamique . . . . .	17
1.12	Déférentes défaillances des roulements à billes . . . . .	18
1.13	principe d'estimation d'Etat . . . . .	22
1.14	Principe des techniques des générations des résidus . . . . .	22
1.15	Principe des techniques d'identification . . . . .	23
2.1	Fonction d'interpolation d'un élément. . . . .	28
2.2	Démarche générale pour l'implémentation du modèle en Flux . . . . .	30
2.3	Géométrie de la machine étudiée . . . . .	32
2.4	Répartition du maillage . . . . .	32
2.5	Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie . . . . .	33
2.6	Distribution des lignes d'induction et du champ magnétique . . . . .	34
2.7	Les trois courants statoriques d'alimentation . . . . .	34
2.8	Les trois courants statoriques d'alimentation en régime permanant . . . . .	34
2.9	Le couple électromagnétique fournit par la machine . . . . .	35



2.10 Vitesse de rotation . . . . .	35
2.11 Le courant dans la première barre rotorique . . . . .	36
3.1 Distribution des lignes du champ . . . . .	38
3.2 Distribution du flux . . . . .	39
3.3 Machine saine . . . . .	40
3.4 Machine avec défauts ( 1 barre cassée) . . . . .	40
3.5 Machine avec défauts (5 barres cassée) . . . . .	40
3.6 . . . . .	41
3.7 . . . . .	41
3.8 Courants rotoriques . . . . .	42
3.9 la Vitesse de rotation pour la machine saine . . . . .	42
3.10 la Vitesse de rotation pour la machine avec défauts . . . . .	43
3.11 . . . . .	44
3.12 . . . . .	45
3.13 . . . . .	45
3.14 Analyse spectrale du courant de phase de 30 Hz à 90 Hz pour défaut de cassure des barres . . . . .	46

# Liste des tableaux

- 1.1 Les défaillances de la machine électrique . . . . . 10
- 1.2 Quelques termes et concepts souvent utilisés dans le diagnostic . . . . . 20
- 2.1 Caractéristique de la machine étudiée . . . . . 31



# Liste des Notations et Symboles

[H] MAS	Machine asynchrone.
CEMC	la Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.
CEMC-A	la Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés analytique.
MEF	Méthode des éléments Finis.
FFT	(Fast Fourier Transform).
BC	barre cassée.
exc	excentricité.
CC	court circuit.
$\vec{E}$	Vecteur champ électrique [v /m]
$\vec{H}$	Vecteur champ magnétique [A /m]
$\vec{B}$	Vecteur induction magnétique [T]
$\vec{D}$	Vecteur de déplacement électrique [ $C/m^2$ ]
$\rho$	Densité de charge volumique [ $C/m^3$ ]
$\vec{J}_c$	Vecteur de densité de courant de conduction [ $A/m^2$ ]
$\varepsilon$	Permittivité électrique [F/m]
$\mu$	Perméabilité magnétique [H/m]
$\sigma$	Conductivité électrique [S/m]
$\vec{J}$	Vecteur de densité de courant total [ $A/m^2$ ]
V	Potentiel scalaire magnétique [T.m]
m	Nombre de phases
q	Nombre des barres
$w_1$	Nombre de tours par phase
$R_1$	Résistance d'une phase statorique [ $\Omega$ ]
$L_1$	Inductance de fuite statorique [H]
Lm	Inductance de magnétisation [H]
Rm	Résistance correspondant aux pertes fer [ $\Omega$ ]
p	Nombre de pair de pole

# Introduction générale

Dans le domaine industriel des machines électriques sont les éléments principaux les plus fréquemment utilisés. La machine asynchrone, de par sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère du marché, l'utilisation croissante de cette dernière est essentiellement due à sa simplicité de construction et son faible coût d'achat. [3]

Le développement, qui ne cesse d'accroître, des moyens de production et les notions de qualité des produits ont nécessité la mise en place de plusieurs outils de maintenance moderne. Les études de fiabilité, de maintenabilité ou de disponibilité, les méthodes et techniques de maintenance, la gestion de la maintenance assistée par ordinateur et les outils modernes de prédiction, ont largement succédé à notre vieil entretien simple.[1]

Dans les conditions normales toutes les machines vibrent et ont donc une signature vibratoire particulière. Une première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle d'une panne, produit une modification dans cette signature. Par conséquent les images vibratoires des principaux défauts qui peuvent parvenir sur une machine ont été définies au long de ces dernières années. Ainsi est fondée cette approche qui, profitant du magnifique développement des techniques de traitement de signal, constitue aujourd'hui le moyen le plus efficace permettant la détection et le diagnostic des défauts. [3]

Dans le premier chapitre nous portons notre attention sur les éléments de construction de la machine asynchrone, à savoir : le stator, le rotor et Paliers, ainsi que Les différents défauts pouvant survenir dans cette machine. Nous nous intéresserons précisément aux défaillances des circuits électriques rotoriques (ruptures de barres rotoriques) et leur influence sur le signal statorique et ce, en utilisant des outils de base de détection des défauts.

Le second chapitre est consacré à la simulation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil dans un état sain, avec le logiciel Flux 2D qui utilise la méthode des éléments finis, et grâce aux résultats de simulation nous allons étudier les caractéristiques de la machine dans son état normal.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous simulerons notre machine saine en introduisant des défauts de cassures de barres rotoriques, et on va observer son comportement grâce aux résultats donnés par le logiciel aussi les comparés par rapport a l'état sain , en analyses temporelles et en analyse fréquentielles.

# état de l'art de diagnostic des machines asynchrones

## 1.1 Introduction

La machine asynchrone, connue également sous le terme anglo-saxon de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Comme les autres machines électriques (machine à courant continu, machine asynchrone), la machine asynchrone est un convertisseur électromécanique basé sur électromagnétisme permettant la conversion bidirectionnelle énergie entre une installation électrique parcourue par un courant électrique (ici alternatif) et un dispositif mécanique [1].

## 1.2 2 La machine asynchrone :

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieure à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible cout. Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur le processus industriel, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies [21].

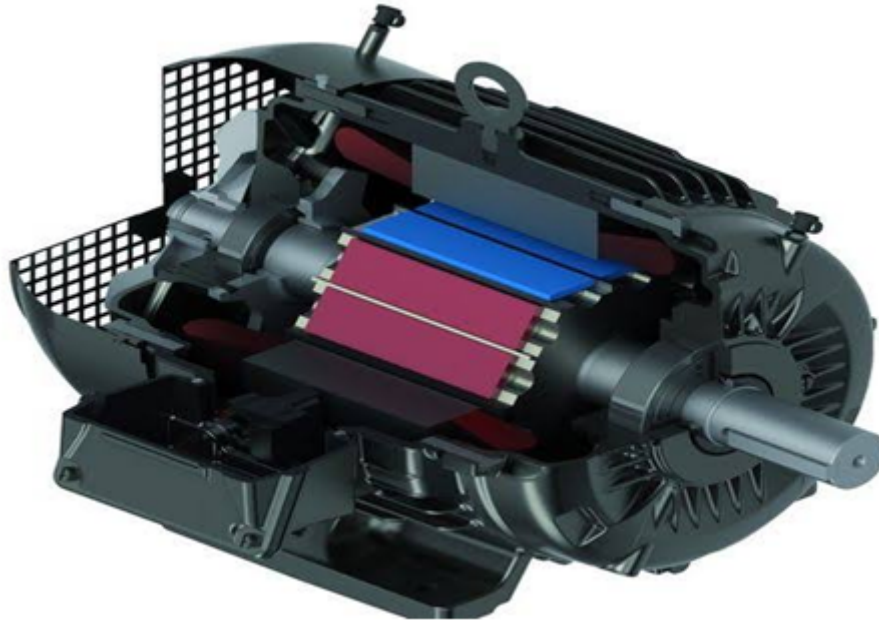


FIGURE 1.1 – La machine asynchrone

### 1.3 Eléments constitutifs de la machine asynchrone :

Le sujet de notre étude est basé sur la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. La connaissance de ses éléments de constitution permet de voir de quelle façon le système est réalisé, et de quelle manière ses défaillances sont parvenues. Du point de vue mécanique, la machine asynchrone se décompose en trois parties distinctes tel que [21] :

- Le stator : partie fixe, connectée au réseau d'alimentation.
- Le rotor : partie mobile entraînant la charge mécanique.
- Les paliers : ils permettent la mise en rotation de l'arbre moteur.



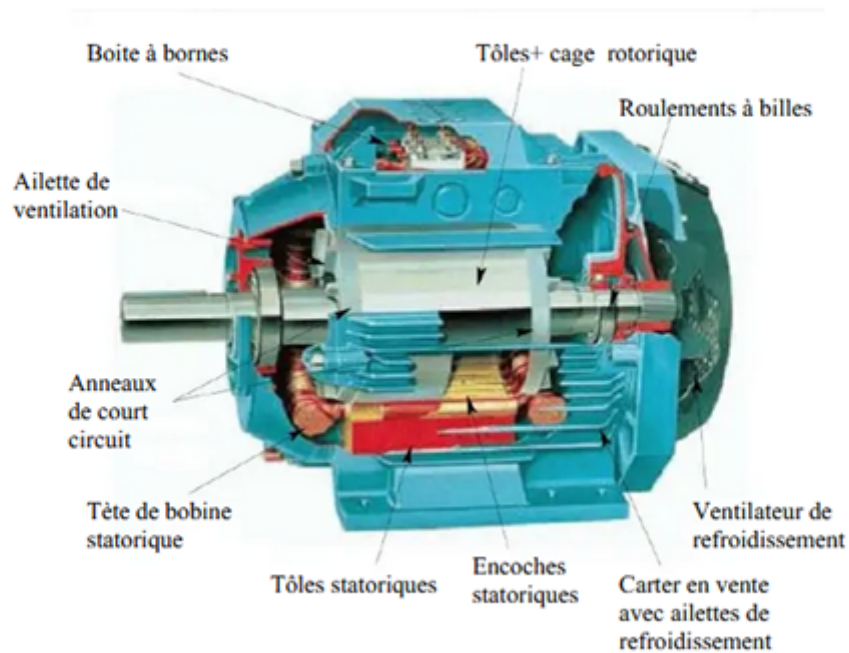


FIGURE 1.2 – Les Eléments constitutifs de MAS

### 1.3.1 Le stator :

Également appelé l'inducteur Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine la (figure 1.2). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique Une fois cette d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues cet effet. Ces enroulements peuvent être insert de manière imbriquée, onduler ou encore concentrique [3] .

L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insères directement dans les encoches. Les isolations

entre l'enroulement électrique et les tôles d'acier s'effectuent à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation asynchrone. Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Nous représentons sur la (figure 1.2). Les différentes parties de constitution du stator d'une machine asynchrone. Nous pouvons visualiser la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge [3].

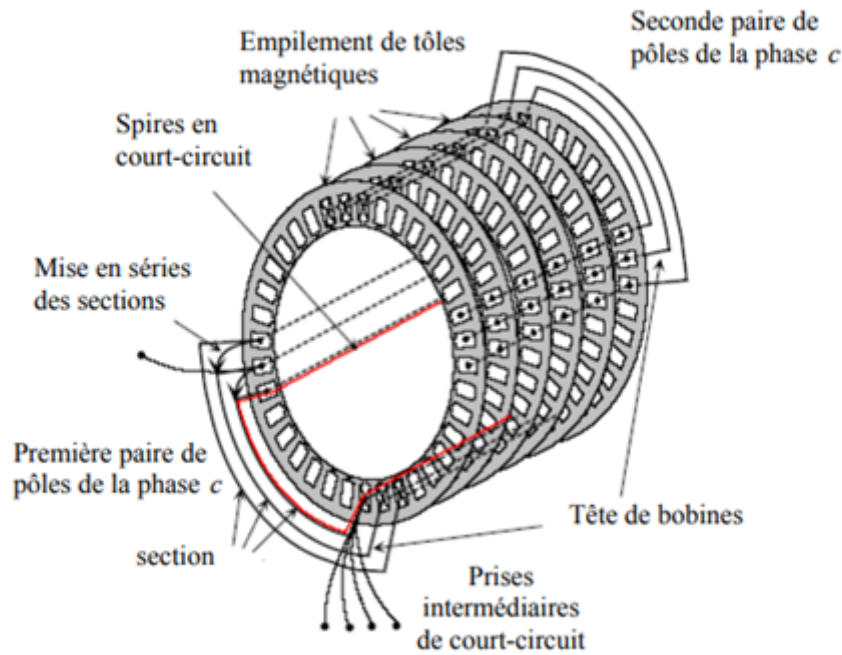


FIGURE 1.3 – Vue schématiques en perspective du stator

### 1.3.2 Rotor :

Le rotor, également appelé l'induit, le circuit magnétique rotorique, Est constitué de tôles d'acier qui sont, en générale, de même origine que celles utiliser pour la construction du stator. Les rotors des machines asynchrones peuvent être deux types : bobiné ou à cage d'écureuil.

Le rotor bobiné est construit de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotorique). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bague balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres en cuivre pour les gros moteurs ou en aluminium pour les petits moteurs. Ces barres sont en court-circuitée à chaque extrémité par deux anneaux dits « de court-circuit », eux aussi fabriqué en cuivre ou en aluminium [3].

### 1.3.2.1 Le rotor a cage :

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor figure. Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. comme le montre la (figure 1.4) [17].

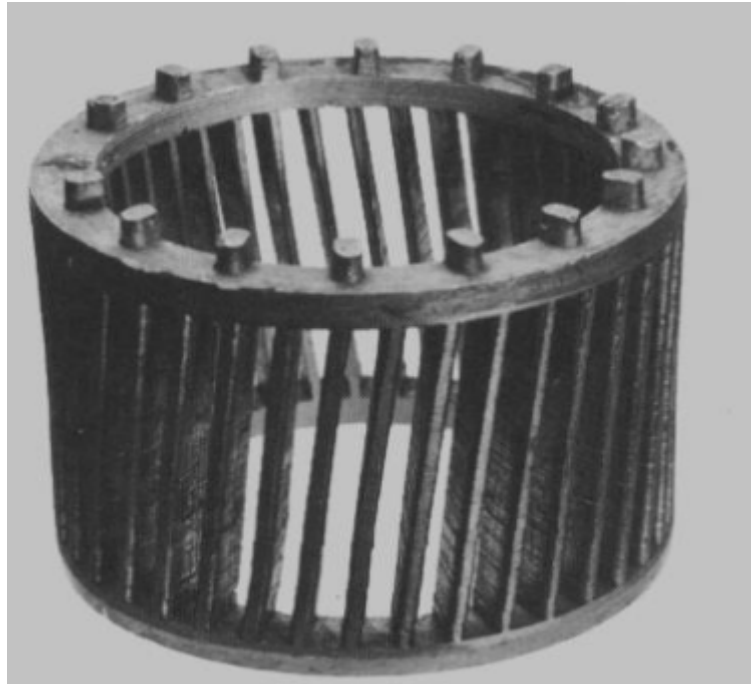


FIGURE 1.4 – Le rotor à cage d'écureuil

### 1.3.3 Les organes mécaniques :

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire) [10].

## 1.4 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni par un réseau triphasé équilibré de pulsation aux enroulements statoriques, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ magnétique tournant (loi de LENZ). Cette interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor [14].



FIGURE 1.5 – Principe de fonctionnement

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  $f_s$  par l'expression suivante.

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{\rho} = \frac{f}{\rho} \times 60 [tr / min]$$

$f_s$  : fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation  $Hz$

$\rho$  : Le nombre de paires de pôles.

Un rotor en court-circuit, balayé par ce champ tournant, sera traversé par des courants induits (courant de Foucault), ce qui soumet ce dernier à des forces électromagnétiques de Laplace. L'ensemble de ces forces crée un couple moteur qui mettra le rotor en rotation (voir figure 1.5). Le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant, sa vitesse de rotation est légèrement inférieure à celle du champ tournant ( $\Omega < \omega_s$ ).

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 :

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

## 1.5 Présentation des différents défauts dans la machine asynchrone :

Dans ce paragraphe sont présentés différents défauts des machines électriques, leurs origines et leur classification. Une défaillance de machine électrique représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement.

Les raisons de défaillances dans les machines tournantes électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, l'environnement de travail, nature de la charge et le calendrier de maintenance.

Les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : «Interne et externe». Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine [1].

**Défauts à cause externes :** Sont causé par les tensions d'alimentation, charge mécanique et par l'environnement d'utilisation de la machine.

**Défauts à cause internes :** Sont causé par les constituants de la machine (circuit magnétique, électriques, entrefer et la cage rotorique). Les défauts des machines sont sensibles aux conditions d'utilisation de ces derniers. Tous ces défauts produisent des symptômes qui peuvent être :

- Déséquilibres des courants de ligne, et de tension.
- Une augmentation des oscillations du couple.
- Une diminution du couple moyen.
- Une augmentation des pertes et donc une réduction de l'efficacité énergétique.
- Un échauffement excessif et donc vieillissement accéléré.

De ce fait, on peut classer les défauts dans les machines asynchrones en deux catégories les défauts qui se produisent dans la chaîne d'entraînement à l'extérieur (externe) de la machine et les problèmes qui se développent à l'intérieur (interne) de la machine [21].

Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines. Ce tableau ci-dessous résume les types de défauts avec les origines.

TABLE 1.1 – Les défaillances de la machine électrique

Les défaillances des machines électriques	Internes	Electrique	Exemple	Défaillance au niveau de l'isolation
				Rupture des barres
				Défaillances au niveau du circuit magnétique
		Mécanique	Exemple	Contacte entre le stator et le rotor
				Excentricité
				Mouvement des enroulements et des tôles
				Défaut de roulements
	Externes	Electrique	Exemple	Fluctuation de tension
				Sources de tension déséquilibré
				Réseau bruité
		Mécanique	Exemple	Surcharge de la machine
				Défaut de montage
				Charge oscillante
Environnementale	Exemple	Humidité et Poussière		
	Exemple	Température		

## 1.6 Étude statistique des défaillances de la machine asynchrone :

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes.[3]

- **les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts :** Surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survolage d'alimentation, problème d'isolation électrique, mesure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- **les amplificateurs de défauts :** Surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais, graissage, vieillissement, etc.
- **les vices de fabrication et les erreurs humaines :** Défauts de fabrication, composants défectueux protections inadaptées mauvais dimensionnement de la machine etc. Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels.[3]

### 1.6.1 Quelques statistiques

Sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance de (50kW à200kW) a donné les résultats suivants figure 1.6 [17]

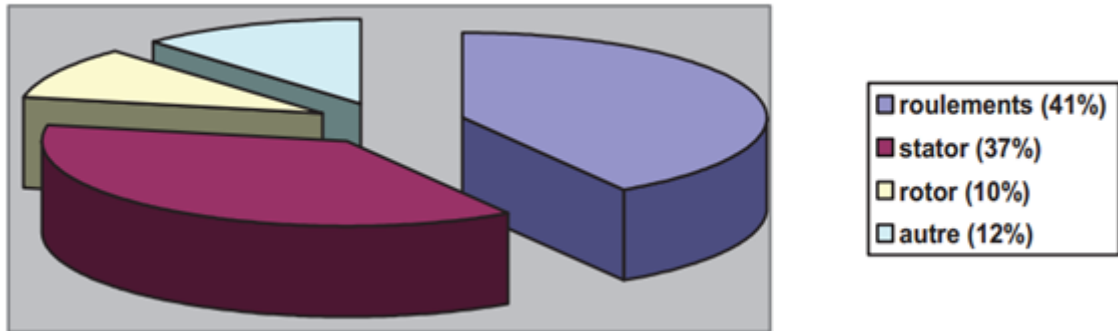


FIGURE 1.6 – Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.

Beaucoup d'études statistiques ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'au jour-là sur les machines, toutes ces statistiques mentionnées dans les figures suivantes, concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie. Dans les années 90 des études ont été effectuées par Thorsen mentionnées après par Thomson sur les machines asynchrones à grande puissance (de 100 KW à 1 MW), ont montré que cette gamme de puissance certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres et les pannes les plus fréquentes sont du type mécanique (voir les deux figures). La majorité d'entre elles se situent sur les roulements 41% et le stator 37%. Les moins fréquentes sont les pannes au rotor 10% et les autres types constituent 12%. [17] [25]

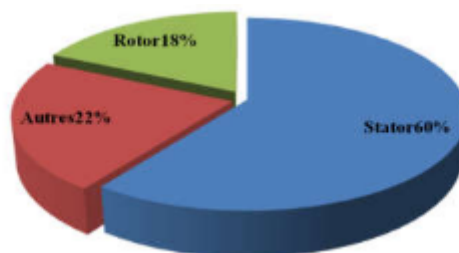


FIGURE 1.7 – (a) Thomson 1999

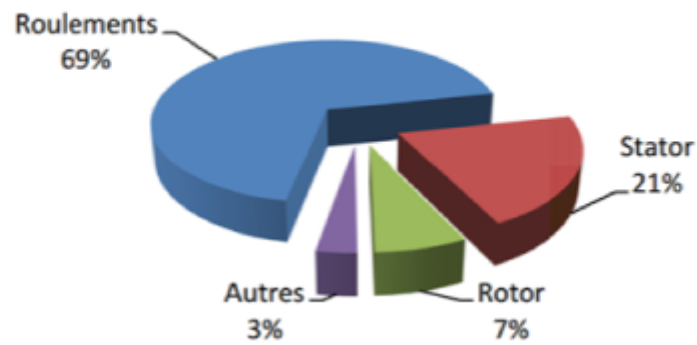


FIGURE 1.8 – (b) Bonnet 2008

D'après une étude récente qui est faite en 2008 par Bonnett sur les machines asynchrones de grande puissance, qui sont généralement exploités dans l'industrie pétrochimique, montre que 69% de pannes se situent sur les roulements, suivie par un pourcentage de 21% au niveau du stator, 7% au rotor et les 3% qui restent pour les autres régions de la machine (voir la figure 1.8). [8] Comme on a déjà vu mentionné cela dans l'étude (Thomson), la répartition présentée dans (Bonnett) confirme que les défauts des machines à grande puissance proviennent principalement des roulements et du bobinage statorique (voir les deux figures 1.7 , 1.8). [8] D'autre part, ces études montrent que pendant une décennie la répartition du pourcentage de ces défauts a changé, les défauts de roulement sont passés de 69% à 41%, les défauts au stator sont passés de 37% à 21% et celles au rotor de 10% à 7% on constate que les défauts dans le stator et le rotor sont de moins fréquents. Cela est dû à l'amélioration de la technique de fabrication de machine électrique (par exemple : l'amélioration des isolants). La principale source de défaillance reste les roulements. [8]

## 1.6.2 Défaillances au stator

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème thermique (surcharge), électrique (diélectrique), mécanique (bobinage,) et environnemental (agression ...etc). Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit : [18]

### 1.6.2.1 Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des court-cuits . En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique.) engendrent des phénomènes thermiques se



traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or, les matériaux d'isolation ont une limite thermique, électrique et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce dernier se dégrade de manière prématurée ou accélérée, jusqu'au à la cassure totale. Les différentes causes pour ce type de défaut sont.[2]

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Vibrations mécaniques.
- Courant élever dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, ou à une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- Vieillessement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Fonctionnement dans un environnement sévère.

#### 1.6.2.2 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 statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude sur les autres phases modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage. De ce fait, une dégradation accélérée des isolants, peut provoquer, ainsi, un défaut en cascade (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 [2].



FIGURE 1.9 – Court-circuit entre spire

### 1.6.2.3 Court-circuit entre phases :

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage. Cependant, les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. L'apparition d'un court-circuit figure 1.9, proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre 2 phases engendrer déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont, totalement, déséquilibrés. Ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [18]

### 1.6.2.4 Court-circuit phase-bâti :

Le bâti a généralement un potentiel flottant. Mais, pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel. A l'exception des effets capacités, le bâti prend, alors, le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux. Il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas [18].

Cependant, le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la

température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, ce type de défaillance va générer une composante homo polaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [18].

#### 1.6.2.5 Défauts de circuit magnétique :

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc... [3].

### 1.6.3 Défauts de rotor :

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie rotorique au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer des problèmes tels que :

- Thermique (surcharge),
- Électromagnétique (excentricité),
- Résiduel (déformation),
- Dynamique (arbre de transmission)
- Mécanique (roulement).

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit : [2].

#### 1.6.3.1 Ruptures de barres :

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine, Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [23], [12]



FIGURE 1.10 – Ruptures de barres

### 1.6.3.2 Ruptures d'anneaux :

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter [3].

Ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études Statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une sur charge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statorique similaire à celui provoqué par la cassure de barres.

### 1.6.3.3 Excentricité statique et dynamique :

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décintrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor [18].

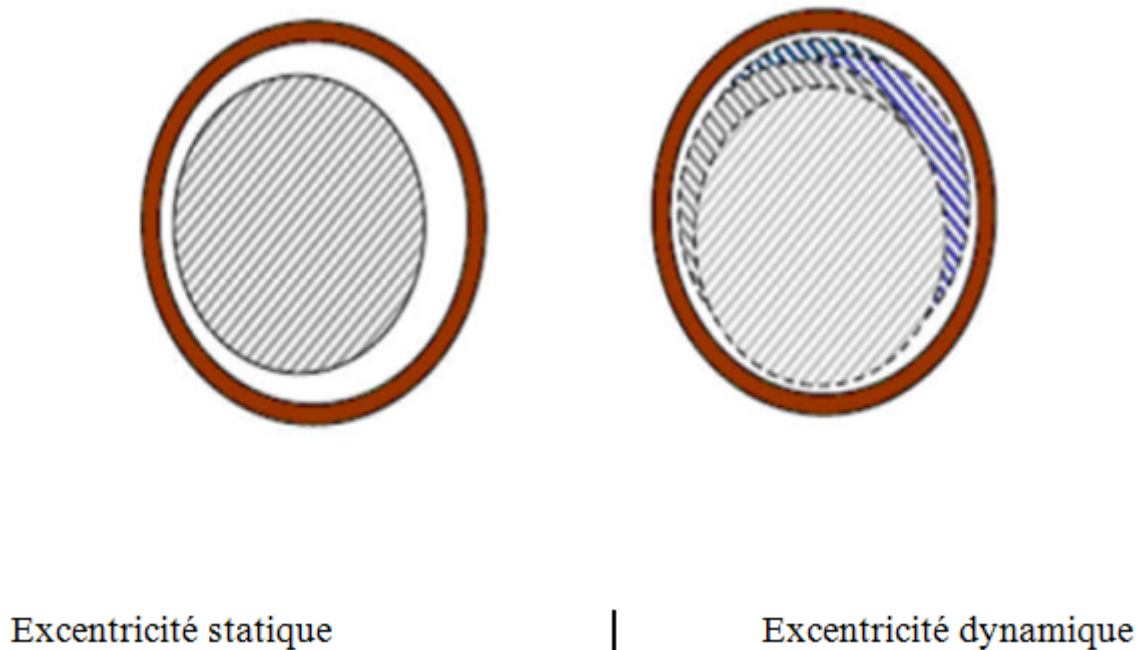


FIGURE 1.11 – Excentricité statique et dynamique

**(Plusieurs positions du rotor au cours de la rotation)**

Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). Trois cas d'excentricité sont, généralement, distingués [18].

**Excentricité statique :** Le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.

**Excentricité dynamique :** Le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.

**L'excentricité mixte :** Il caractérise les 2 cas, précédemment, cités. Ce défaut d'excentricité modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine.

En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant. Ceci engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [16].

### 1.6.3.4 Défaillances mécaniques :

#### 1.6.3.4.1 Défauts des roulements :

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. la plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement. Comme, il a été présenté, précédemment, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est, généralement, lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Les causes possibles sont [6].

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



FIGURE 1.12 – Différentes défaillances des roulements à billes

**Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :**

- Des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- L'ondulation de leur surface de roulement.
- L'attaque des billes.
- La corrosion due à l'eau.

- Défaut de graissage, problème dû à la température.
- Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge.

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas, le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur [6].

### 1.6.3.5 Autres défaillances :

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc à priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs.

## 1.7 Définition et objectif du diagnostic :

### 1.7.1 Définition :

La norme AFNOR et CEI définit le diagnostic par : « L'identification de la cause probable de défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test » [4]. Suivant cette définition, on définit deux tâches essentielles du diagnostic :

- Observer les symptômes de la défaillance.
- Localiser et identifier la cause de défaillance à l'aide d'un raisonnement logique.

### 1.7.2 Objectifs :

La raison d'existence du diagnostic est la défaillance. Sa finalité n'est autre que la nécessité des systèmes efficaces, sûrs, fiables et robustes face aux diverses contraintes qu'ils subissent.

### 1.7.3 Terminologies et concepts relatifs au diagnostic :

Le tableau suivant montre la définition normalisée de quelques termes couramment utilisés dans le diagnostic [24].

TABLE 1.2 – Quelques termes et concepts souvent utilisés dans le diagnostic

TERMES	DEFINITIONS
<b>UN DEFAUT</b>	Est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications. Les défauts sont classifiés d'une façon similaire aux défaillances.
<b>UNE DEFAILLANCE</b>	Est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.
<b>LA PANNE</b>	Est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.
<b>UN SYMPTOME</b>	Est caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportemental anormal.
<b>LA SENSIBILITE</b>	Représente la capacité d'un système de diagnostic à générer des résidus sensibles aux défauts à détecter.
<b>LA SURVEILLANCE</b>	Est une tâche continue, réalisée en temps réel, qui permet de déterminer l'état d'un système physique, elle consiste en l'enregistrement des informations ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication des anomalies du comportement.
<b>UN RESIDU</b>	Est un signal conçu pour être un indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales, nul en absence de défauts et non nul en leur présence.

#### 1.7.4 Étapes du diagnostic de défaut :

Souvent Le diagnostic est une phase très importante de la maintenance corrective, son lancement sur un équipement, nécessite le suivi d'une chaîne d'étapes successives que se soient :

##### 1.7.4.1 La Détection :

Cette étape nous permet de décider si le système est en fonctionnement normal ou non. Probabilité de fausse détection : conduit à des arrêts ou des reconfigurations inutiles. Probabilité de non détection : peut conduire à une panne intolérable dans les systèmes à haute niveau de sécurité (aéronautique, nucléaire, ...etc.)[24].

##### 1.7.4.2 La Localisation :

Dans cette opération on va identifier l'élément qui a causé le défaut. Parfois il est impossible de localiser les interactions entre les composants du système et l'instrumentation. La solution est d'isoler un sous-système comportant des composants susceptibles de contenir le ou les défauts[24].



### 1.7.4.3 L'identification :

C'est une étape dont son objectif est de caractériser plus finement le défaut et déterminer les causes qui ont engendré la défaillance constatée [19].

### 1.7.5 Intérêt du diagnostic :

Pendant leurs fonctionnements, les moteurs peuvent être exposés à différents environnements hostiles ou avoir des défauts de fabrications. Les différents défauts internes du moteur (par exemple, court-circuit des fils de moteur, les courts circuits entre spires, roulements cassés, excentricité du rotor, ruptures de barres au rotor), et les différents défauts externes du moteur (par exemple, coupure de phase, surcharge mécanique, rotor bloqué, surcharge électrique) peuvent se produire tôt ou tard. En outre, la grande variété des environnements et conditions auxquels sont exposés les moteurs accélère leur vieillissement et les assujettit aux défauts prématurés et évolutifs. Ces types de défauts se rapportent habituellement à la détérioration progressive de la machine qui peut mener à l'arrêt de celle-ci s'ils ne sont pas détectés au moment opportun. [19]

### 1.7.6 Méthodes de diagnostic de la MAS :

Ils existent deux méthodes de diagnostics pour la machine asynchrone, avec modèle analytiques qui nécessite la connaissance du système. Et sans modèle analytique qui ne nécessite pas forcément le modèle précis du système mais juste la reconnaissance de signature.

#### 1.7.6.1 Avec modèle analytique :

##### 1.7.6.1.1 Technique d'estimation d'état :

Les modèles analytiques font intervenir un nombre fini de variables, appelés aussi variable d'état. En générale ils ne sont pas mesurables pour des raisons d'inaccessibilités, voilà pourquoi on a recours à des techniques d'estimations. Le principe d'estimation d'état partir des grandeurs mesurées (signaux d'entrée et de sortie des systèmes) la figure (1.13).

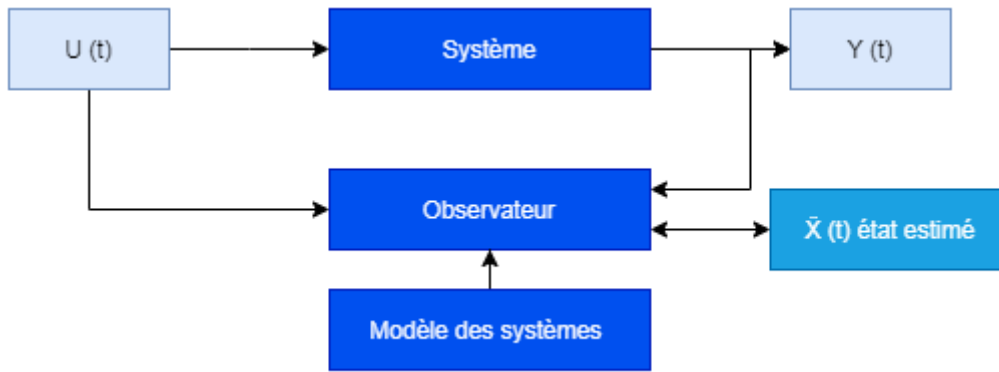


FIGURE 1.13 – principe d'estimation d'Etat

### 1.7.6.1.2 Technique des générations des résidus :

Les résidus sont des signaux qui reflètent l'écart entre un modèle et le système à surveiller. En mode saint ces résidus doivent s'approcher de zéro. la figure (1.14).

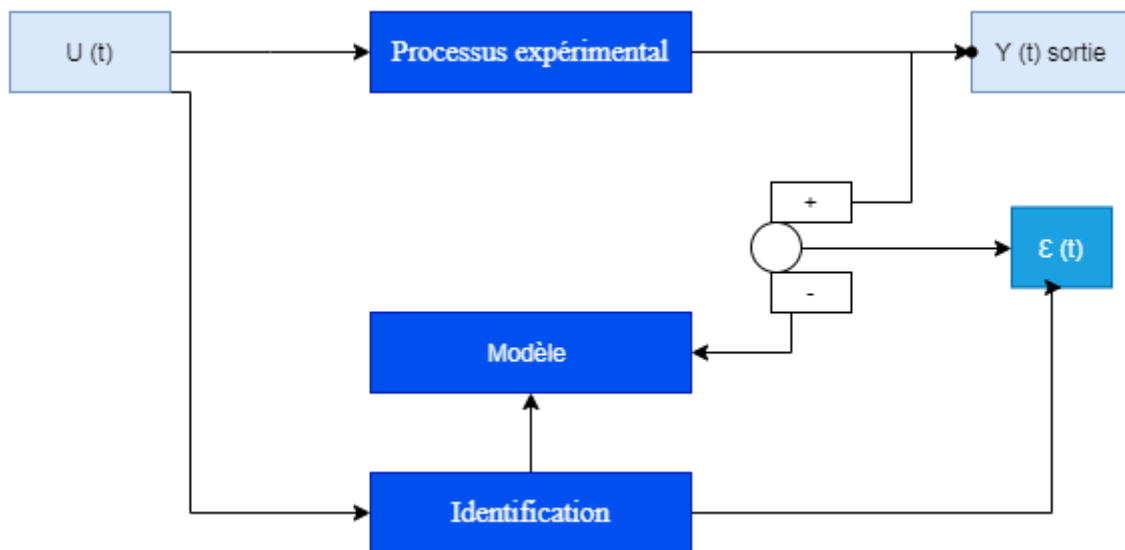


FIGURE 1.14 – Principe des techniques des générations des résidus

### 1.7.6.1.3 Techniques d'identification :

Les techniques d'identification ont pour but de déterminer un modèle dynamique des systèmes à surveiller à partir des mesures expérimentales, entrée et de sortie. L'estimation des paramètres du modèle est garantie par un algorithme de minimisation de l'erreur entre la sortie du modèle et celle de la machine la figure (1.15).

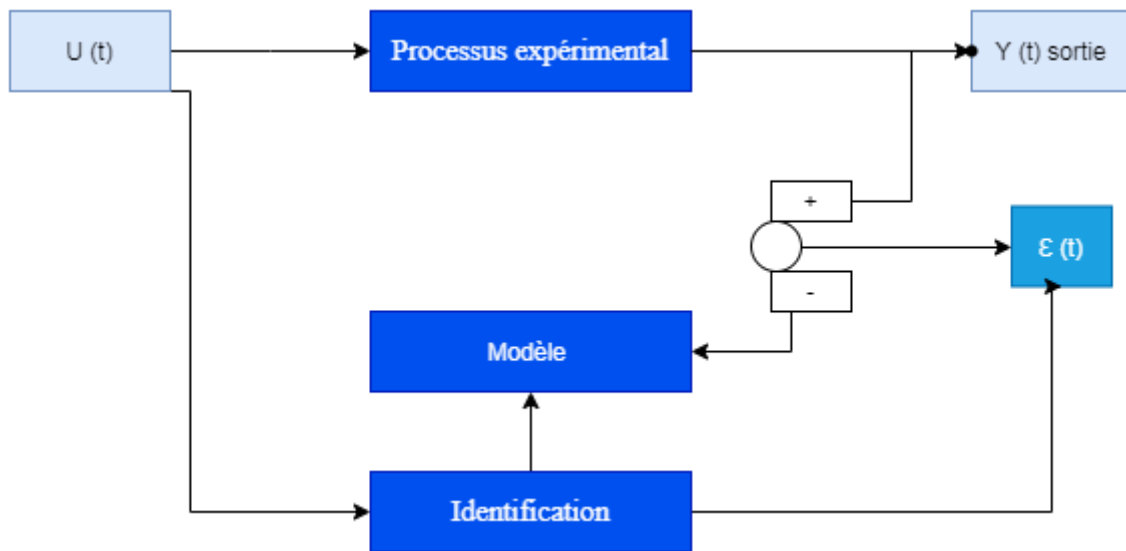


FIGURE 1.15 – Principe des techniques d'identification

#### 1.7.6.1.4 Estimation paramétrique :

Ce modèle est essentiellement basé sur l'hypothèse qu'un défaut se traduit par la variation de l'état paramétrique de la machine. Le suivi de l'évolution de ces paramètres caractéristiques donne une image sur la nature du comportement de la machine. Cette méthode est alors un bon moyen pour surveiller le système et d'alerter en cas de fonctionnement hors normes. La première étape est donc, l'élaboration d'un modèle mathématique de complexité raisonnable pour caractériser la machine en fonctionnement sain et dégradé. Le type de défaut que l'on pourra détecter dépend du choix du modèle. En effet, les défauts statoriques ou rotoriques doivent être discriminés au niveau des paramètres physiques estimés, pour qu'on puisse les détecter et les localiser [22]

#### 1.7.6.1.5 Diagnostic à l'aide des observateurs :

Le principe de cette méthode est d'utiliser les erreurs d'estimation sur les sorties comme résidus. L'objectif est de construire des résidus structurés c'est-à-dire menant à la localisation des défauts. Dans certains cas l'utilisation de plusieurs observateurs, mis en batterie, peut être nécessaire pour garantir la localisation des défauts .

#### 1.7.6.2 Sans modèle analytique :

Les méthodes sans modèle supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine acquise par apprentissage, ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux que fournit la machine lors de

son fonctionnement.

#### 1.7.6.2.1 Méthode par traitement de signal :

Cette approche repose sur les connaissances du comportement du système sain, elle est ensuite comparée avec des signaux mesurés.

#### 1.7.6.2.2 Diagnostic par mesure du courant statorique :

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace)[13].

#### 1.7.6.2.3 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique développé dans la machine, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique [13].

#### 1.7.6.2.4 Méthodes transformation de Park :

C'est la transformation des enroulements de phase a, b, c de la machine originelle en des enroulements disposés selon deux axes appelés d et q et équivalents du point de vue électrique et magnétique. Une matrice unique de transformation est définie pour les courants, les tensions et les flux :

$$[T] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin \theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}$$

ansi :

$$[i_s, rdq_0] = [T][i_s, abc]$$

$$[V_s, rdq_0] = [T][V_s, abc]$$

$$[Q_s, rdq_0] = [T][Q_s, abc]$$

$\theta_s$  est l'angle électrique entre le stator et l'axe d. L'indice 0 désigne les composantes homopolaires (ces composantes sont égales à zéro dans le cas d'un système triphasé équilibré). Si  $\theta_s$  est nul alors on obtient la matrice  $[C]$ , appelée matrice de Concordia telle que :

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Dans ce cas les axes d et q sont appelés  $\alpha$  et  $\beta$ .

Le coefficient  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  est lié au changement de base et la puissance est conservée lors de cette transformation.

#### 1.7.6.2.5 Diagnostic par analyse du vecteur de Park :

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir : La première utilise les grandeurs biphasées  $I_{s\alpha}$  et  $I_{s\beta}$ , qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de Lissajous :  $I_{s\beta} = f(I_{s\alpha})$ . Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut. La deuxième est appelée Vecteur de Park Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park. Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statorique ou rotorique et même les défauts de roulement.[11] [9]

## 1.8 Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons montré que les principaux éléments de la constitution d'une machine asynchrone triphasée peuvent présenter des défaillances qui peuvent induisent un arrêt intempestif de la machine, aussi des études statistiques ont été présentées pour illustrer l'impact de ces défauts dans le domaine industriel, et dans le deuxième partie différentes méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone triphasée ont été présentées. La connaissance des éléments de construction de la machine asynchrone permet de trouver un modèle dédié à la simulation donnant ainsi une image approximative de l'état de la machine lors de ses régimes de fonctionnement sain et avec défaut, L'objectif de chapitre suivant est la modélisation simulation de la machine asynchrone saine et avec différents défauts par la méthode des éléments finis.

# La modélisation et simulation de la MAS par la méthode des éléments finis

## 2.1 Introduction

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone a fait l'objet de nombreux travaux, que ce soit dans le but de conception, de la commande ou le diagnostic. La diversité des objectifs a fait parître plusieurs techniques de la modélisation et des outils de la simulation selon le domaine étudié. Mais ces outils sont souvent trop spécifiques à une topologie ou à une machine bien déterminée. Il serait, cependant, intéressant de disposer d'un outil simple et générique, pouvant servir comme un banc d'essai pour les machines électriques, que ce soit en mode sain ou en présence de défaut d'excentricité et casseur de barre rotorique. Dans ce chapitre nous présenterons la simulation des défauts dans la machine asynchrone, par la méthode des éléments finis, sous logiciel Flux 2D.

## 2.2 Méthode des éléments finis :

Cette méthode est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation sont d'une grande précision et elles nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques, lorsque le problème est correctement posé (géométrie, physique, lien avec les équations de circuit) et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnéto-statique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme

du calcul(Logiciel) d'où une grande souplesse d'utilisation. Dans les machines électriques les équations qui régissent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré. On les définit comme suit. Présenter Brièvement la méthode de conception choisie [20].

**Les relations de couplage électromagnétique :**

$$\begin{aligned} \vec{R}\vec{O}H\vec{H} &= \vec{j}c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \vec{R}\vec{O}H\vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \end{aligned}$$

**Les relations de la conservation des flux :**

$$\begin{aligned} \text{Div}\vec{D} &= \rho \\ \text{Div}\vec{D} &= 0 \end{aligned}$$

**La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :**

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} \end{aligned}$$

**La relation de la loi d'Ohm :**

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

Ou :

$\vec{H}$  : Le champ magnétique (A/m)

$\vec{E}$  : Le champ électrique (V/m)

$\vec{B}$  : L'induction magnétique (T)

$\vec{J}$  : La densité du courant total (A/m<sup>2</sup>)

$\mu$  : Perméabilité magnétique (H/m)

### 2.2.1 Principe de la méthode des éléments finis

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, Le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être approchée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), dont l'expression varie d'un type à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [5].

Pour élément triangulaire on a :

$$Ae(x, y) = a + bx + cy$$

Pour l'élément quadrilatéral on a :

$$Ae(x, y) = a + bx + cy + dxy$$

Les constantes a,b, c et d sont à déterminer. Le potentiel Ae est en générale non nul dans l'élément et nul ailleurs. La valeur approchée du potentiel dans un point du domaine ( $\Omega$ ) de résolution est donnée par :

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{n_e} Ae(x, y)$$

e : Numéro d'élément.

ne : Le nombre totale des éléments du domaine ( $\Omega$ ).

Le potentiel en tous points d'un élément ainsi que la densité de courant sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets la figure (2.1).

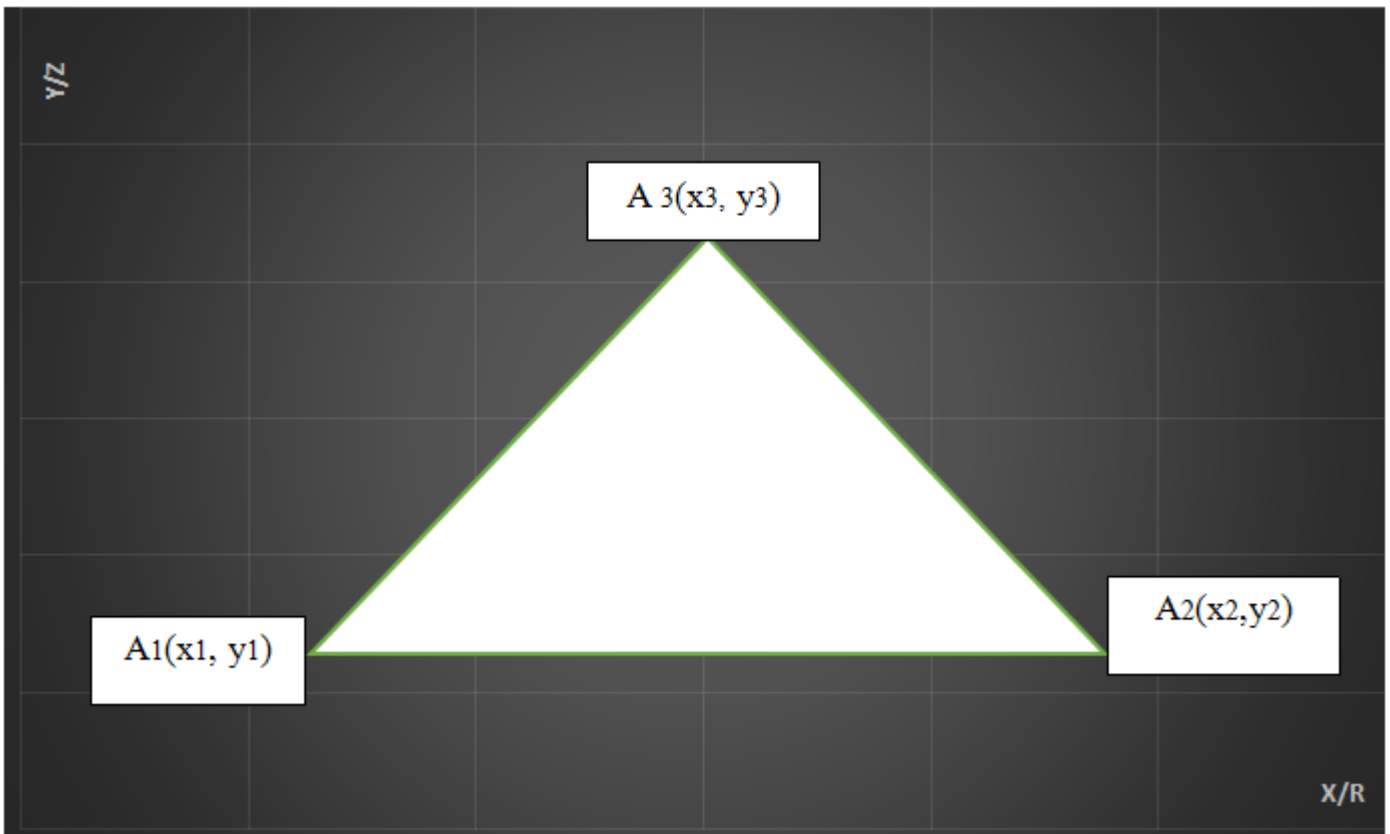


FIGURE 2.1 – Fonction d'interpolation d'un élément.

## 2.2.2 Le mode magnétique transitoire

Est le plus complet, il traduit fidèlement la rotation du moteur. Dans ce cas l'alimentation est en courant transitoire, le traitement du système précédent des équations caractéristiques, nécessite une discrétisation pas à pas dans le temps. Donc le système à résoudre est le suivant :



$$\vec{rot}(v, \vec{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{rot} \vec{Br} + \sigma \vec{grad} V = 0$$

$\vec{Br}$  : Induction rémanente des aimants (T)

## 2.3 Logiciel de résolution

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution : introduction des données géométriques et des propriétés physiques ; maillage ; résolution ; exploitation des résultats sont séquentiellement exécutées [5].

Toutefois, en utilisant une méthode des éléments finis conventionnelle, il serait difficile de calculer les performances de la machine tenant compte à la fois des courants de Foucault induits dans les conducteurs massifs, des non-linéarités des matériaux magnétiques et des sources externes. C'est dans cette perspective que nous avons opté pour une nouvelle formulation, mieux adaptée pour notre problème : il s'agit d'une méthode dite directe permettant de résoudre simultanément les équations couplées du champ magnétique et des circuits électriques. Cette formulation est implantée dans le logiciel d'éléments finis Flux 2D que nous allons présenter dans ce qui va suivre. [5]

### 2.3.1 Présentation de logiciel Flux 2D

Méthode des éléments finis. Il permet le calcul des états magnétiques, électriques et thermiques des dispositifs en régimes permanents et transitoires ou harmoniques, avec des fonctionnalités d'analyse multi-paramétrique étendues, les couplages circuit et cinématique.

Le Flux 2/3D est développé (en collaboration avec le G2ELab, fusion du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, du Laboratoire d'Électrostatique et Matériaux Diélectrique et du Laboratoire de Magnétisme du Navire) et distribué en France par la société CEDRAT S.A. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits, [15]. Les principaux modules permettant la simulation de tous systèmes physiques à l'aide de FLUX 2D sont présentés :

**Module préprocesseur :** Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie du dispositif à étudier (PREFLU), de choisir et/ou de construire une banque de matériaux (CLSMAT), d'affecter les propriétés physiques aux différentes régions géométriques prédéfinie (PROPHY) et de définir le schéma et/ou les données du circuit électrique (CIRFLU). Il permet également un maillage automatique d'une géométrie 2D prédéfinie (PREFLU).

**Module processeur** : Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER 2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

**Module post-processeur** : c'est une module (Post-Pro 2D) permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfinie. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc. Les développements informatiques de ce travail ont tous été réalisés en utilisant FLUX 2D, logiciel de calcul des champs par éléments finis. Ces développements à consistes à implanter les formulations présentées dans le chapitre précédent et à intégrer les lois de comportements. La figure ) présente la démarche générale utilisée pour implémenter le modèle éléments finis à l'aide de FLUX 2D. Cette démarche est détaillée dans l'étape suivante :

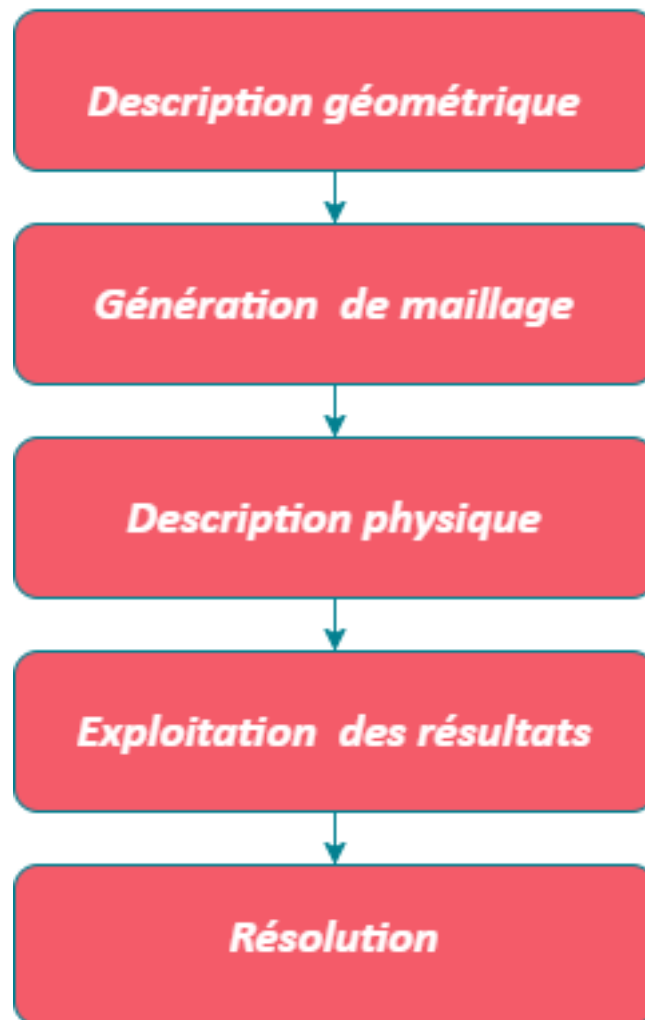


FIGURE 2.2 – Démarche générale pour l'implémentation du modèle en Flux

## 2.4 Application à la simulation de la machine asynchrone :

Les caractéristiques de la machine asynchrone étudiée sont données dans le tableau 2.1

TABLE 2.1 – Caractéristique de la machine étudiée

<b>Partie</b>	<b>parametres</b>	<b>Valeur</b>	<b>Unité</b>
<b>Machine</b>	Puissance nominale	2.2	KW
	Tension nominale	220	V
	Vitesse nominale	1440	Tr/min
	Nombre de pôles	4	
	Fréquence	50	Hz
	Longueur active	98	mm
<b>Rotor</b>	Nombre de phases	3	
	Type de connexion	Y	
	Nombre d'encoches	36	
	Diamètre interne	99	mm
	Diamètre externe	173	mm
<b>stator</b>	Diamètre externe	98.67	mm
	Diamètre interne	34	mm
	L'épaisseur de l'entrefer	0.33	mm
	Nombre de barres	28	mm

La figure 2.3 représenté la géométrie de la machine étudiée et les Régions du domaine de

calcul du champ électromagnétique.

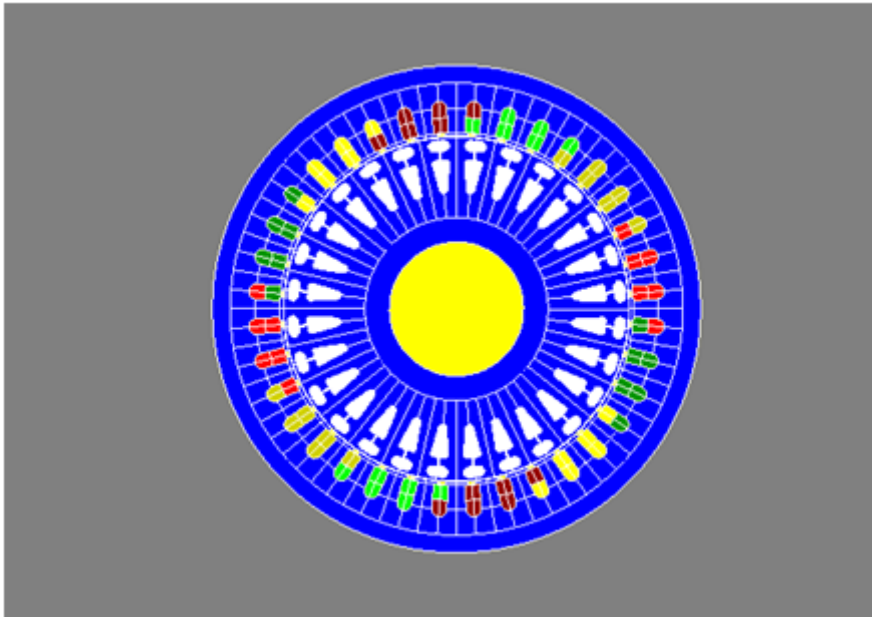


FIGURE 2.3 – Géométrie de la machine étudiée

La figure 2.4 représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.

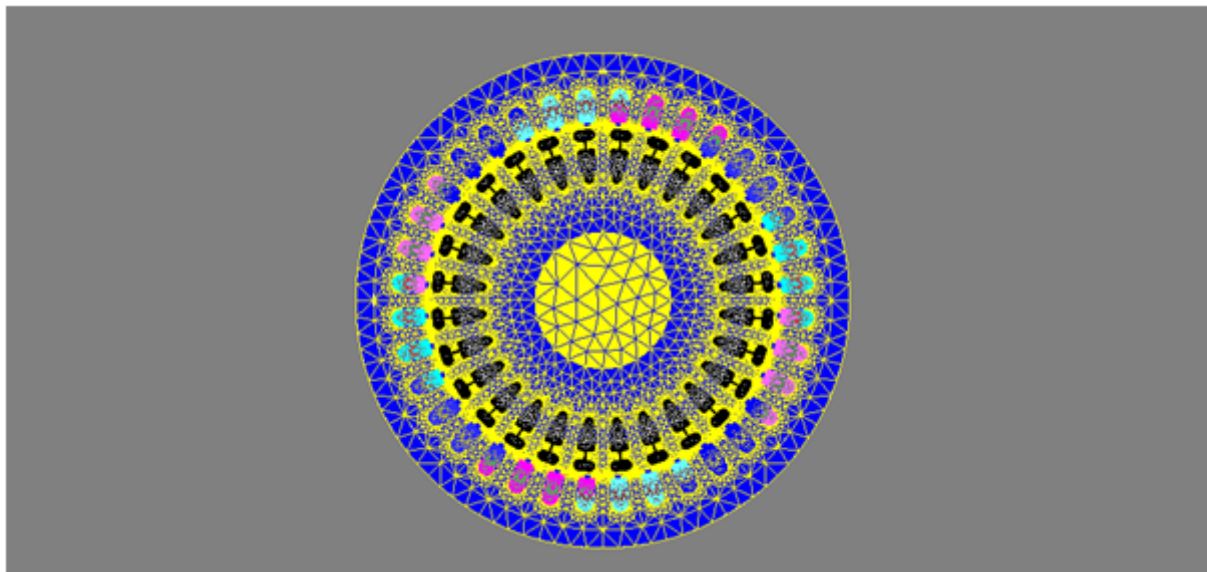


FIGURE 2.4 – Répartition du maillage

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger les temps de calcul sans perte sensible d'information.

### 2.4.1 Les matériaux conducteurs

Pour les conducteurs statorique, on supposera qu'ils se répartissent de façon uniforme dans les encoches, on affectera à cette région la résistivité du cuivre pour une température donnée des enroulements, le foisonnement et le nombre de spires par encoche. Au niveau de rotor, nous utiliserons la résistivité de l'aluminium à température fixe.

### 2.4.2 Couplage avec les équations de circuit :

Pour représenter fidèlement le moteur, il faut tenir compte des effets d'extrémité (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court-circuit). Le circuit électrique Figure 2.5 représentant :

- Une source de tension triphasée d'alimentation : (V-U, V-V, V-W)
- Le bobinage statorique : (B-U, B-V, B-W)
- Les inductances de fuite : (L-U, L-V, L-W)

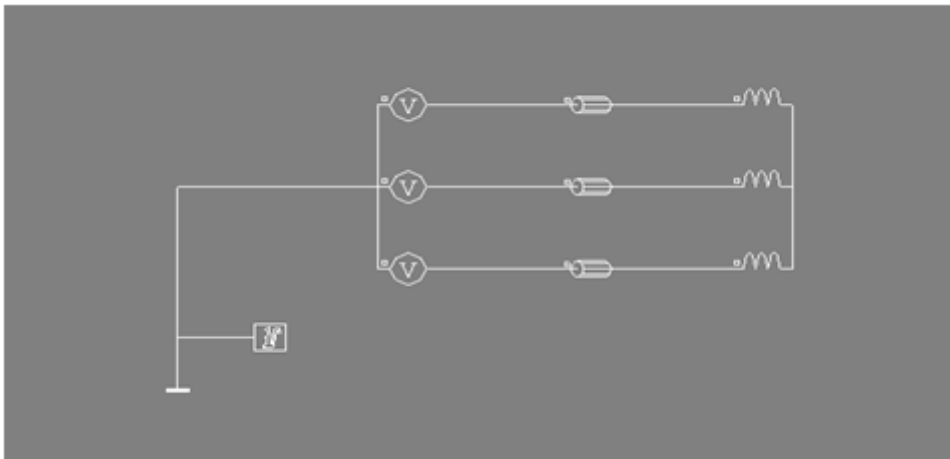


FIGURE 2.5 – Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie

## 2.5 Résultats de simulation :

La machine est initialement couplée à une charge sous tension efficace de 220V après une simulation de deux secondes du fonctionnement de la machine sans défauts, on a obtenu les résultats présentés ci-dessous :

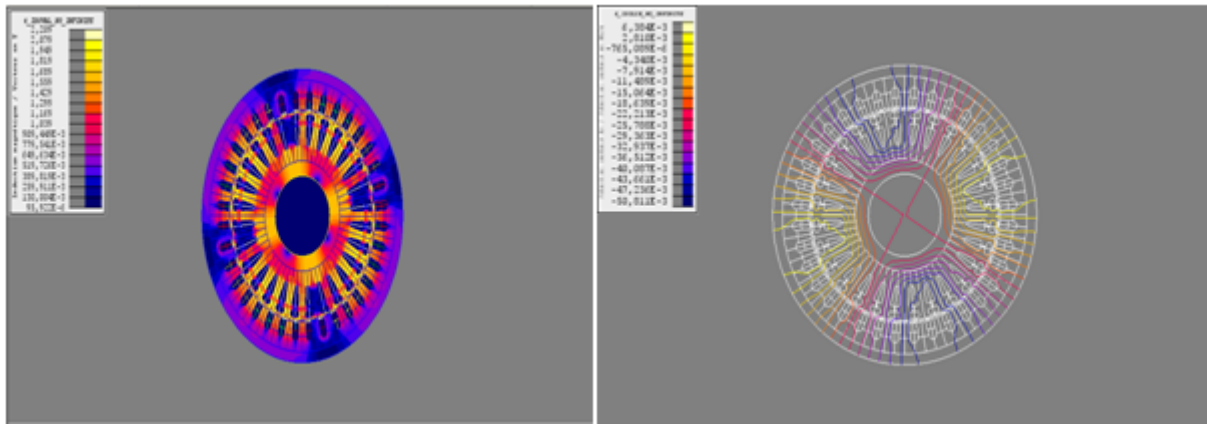


FIGURE 2.6 – Distribution des lignes d'induction et du champ magnétique

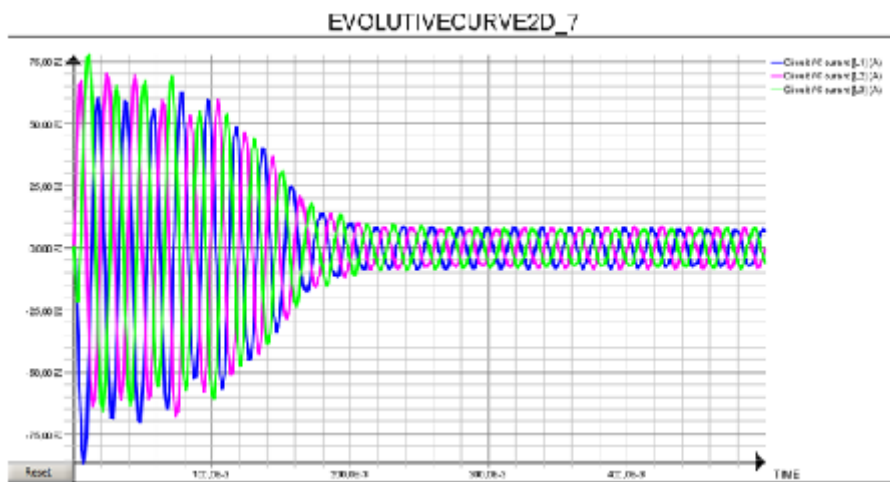


FIGURE 2.7 – Les trois courants statoriques d'alimentation

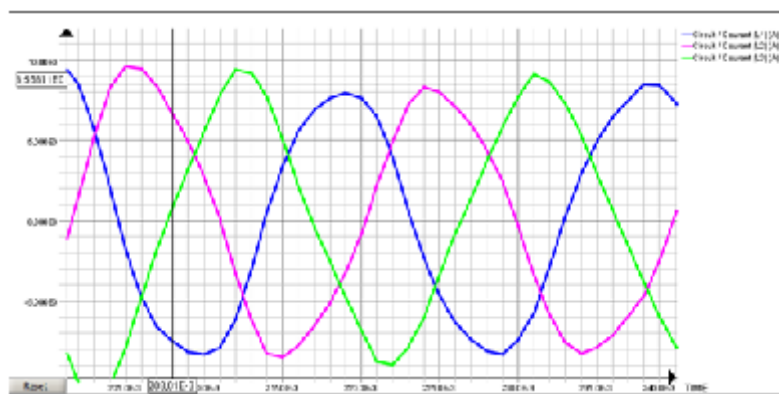


FIGURE 2.8 – Les trois courants statoriques d'alimentation en régime permanent

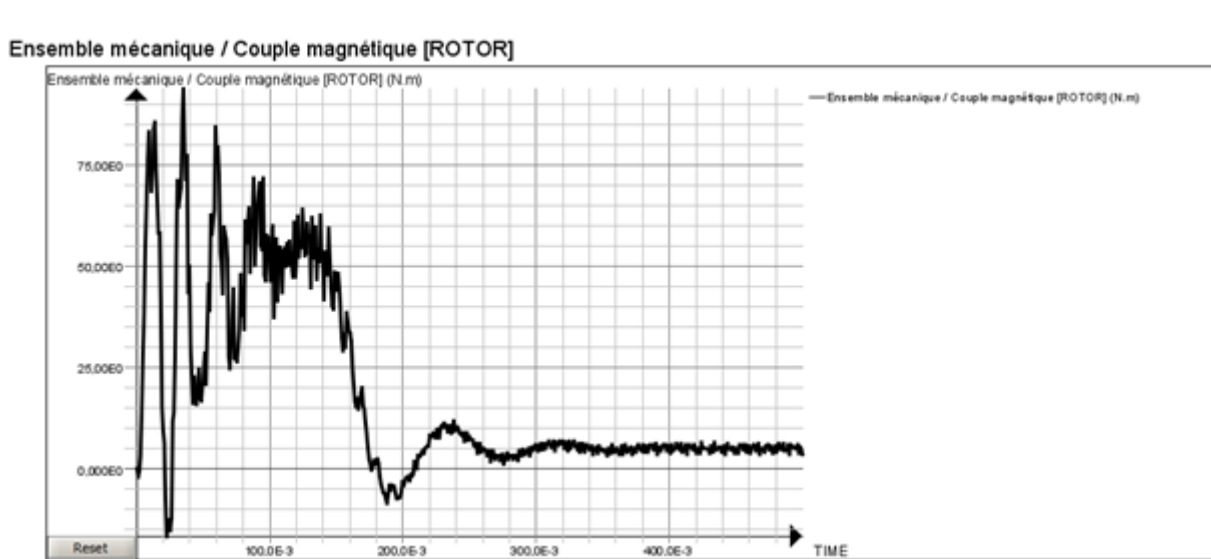


FIGURE 2.9 – Le couple électromagnétique fournit par la machine

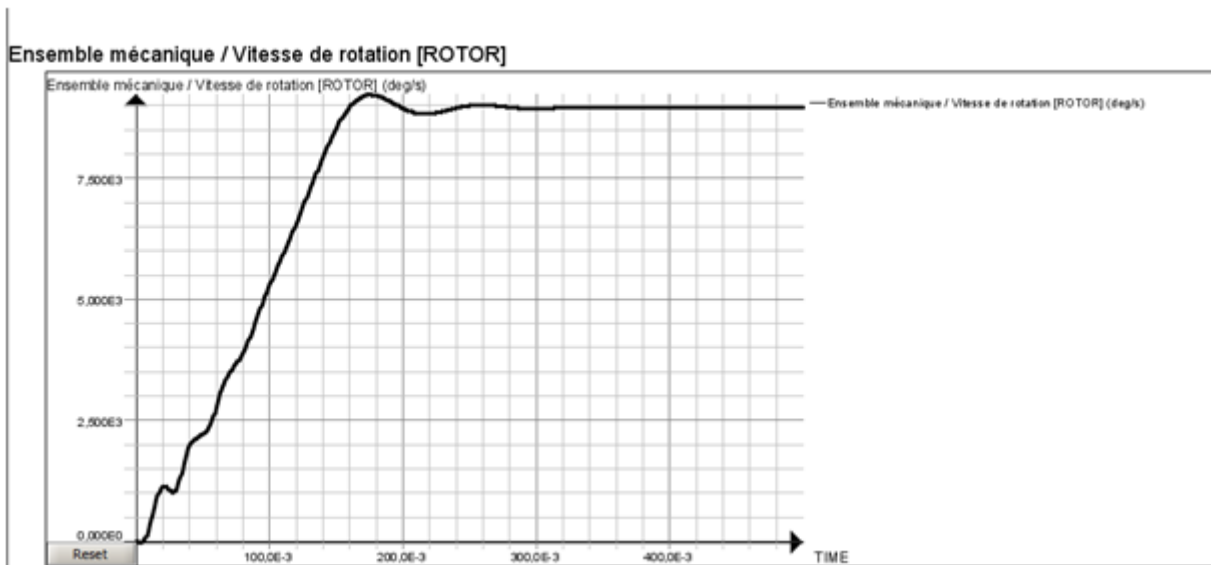


FIGURE 2.10 – Vitesse de rotation

## 2.6 Interprétation et analyses des résultats :

La figure 2.6 nous montre la distribution des lignes d'induction et du champ magnétique, on remarque que la répartition des lignes sont quasi symétriques aux axes des pôles de la machine.

Après un régime transitoire de 0.20 second, les courants d'alimentation triphasé atteignent le regime permanant, avec une valeur efficace de 6.02A comme les figures ( 2.7 et 2.8) le montrent, les courants sont déphasé entre eux de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre, et aucune ondulation n'est y apparait, on constat que la machine est en fonctionnement normal.

La figure (2.9 et 2.10) présentent le couple et la vitesse de rotation. Le couple prend des valeurs très importantes avec des fortes ondulations pondant le régime transitoir, et se stabeliseà la valeur de 6.432 N.m en régime permanant. Des ondulations de vitesse qui apparait lors du démarrage causées par la charge entrainé, et se stabilise à 8980 deg/s.

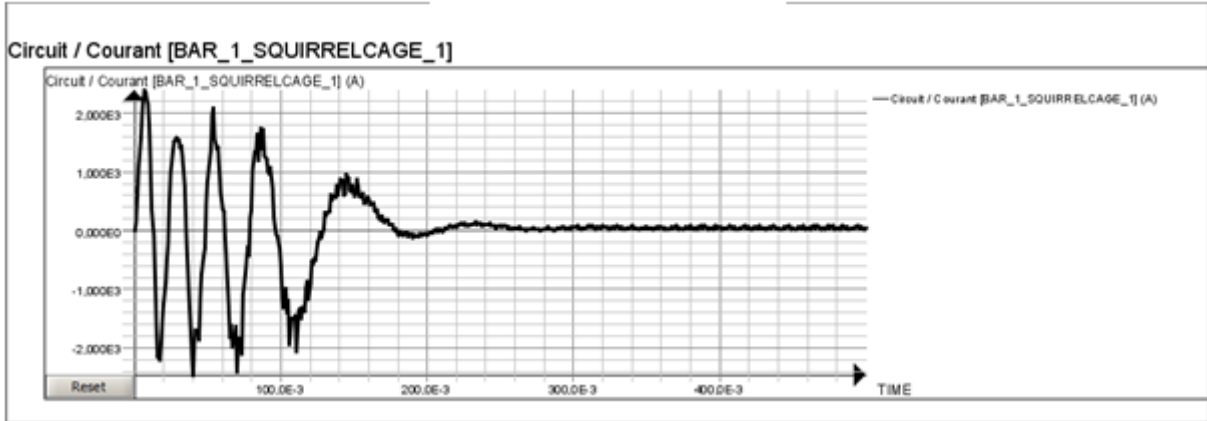


FIGURE 2.11 – Le courant dans la première barre rotorique

La figure(2.11 montre le courant induit circulant sur la barre 1 de la cage, d'une valeur efficace de 142 A, et de fréquence qui vaut g.fs. Dans notre cas, le glissement est de 1.3% et la fréquence des courants rotoriques est de 0.665 Hz.

## 2.7 Conclusion :

L'utilisation du logiciel flux 2D nous a permis d'établir un modèle en éléments finis décrivant le fonctionnement réel de la machine asynchrone, grâce à ça on a pu étudier dans ce chapitre le modèle sain de cette machine, et a partir des résolutions numériques et des différentes représentations, on a réussi à observer les caractéristiques et les performances d'une MAS dans un état normal qu'on pourra comparer avec un modèle avec défaut dans le chapitre suivant.



# Simulation et Diagnostic de la Machine Asynchrone avec Défauts

## 3.1 Introduction

La surveillance et le diagnostic des défauts de fonctionnement de tout système sont devenus incontournables en raison des contraintes croissantes imposées par les exploitants.

Ces défauts sont essentiellement dus aux échauffements excessifs, à une fatigue causée par les forces électromagnétiques et les contraintes de l'environnement par exemple la poussière que doit subir la machine asynchrone pendant son usage.

Les procédés de détection de ces défauts a fait une révolution dans les milieux industriels pour prévoir et apercevoir les moindres signes de défaillances, ce qui renvoie des intérêts économiques congédiables.

## 3.2 Simulation de la machine asynchrone avec défauts :

Parmi les défauts les plus répandus et le plus connu dans les machines asynchrones, on cite les défauts de cassure des barres rotorique de la cage d'écureuil. Puisque ces barres sont des éléments essentiel de la construction de la machine, il est clair que leur rupture implique un fonctionnement anormal du système. La simulation de ce défaut nous permet d'identifier les signatures de ces défauts et de prévoir les détériorations générées dans la machine. La simulation est faite sur une machine saine et avec des barres cassées d'une jusqu'à cinq barres adjacentes.

### 3.3 Résultats de simulation :

Pour illustrer les cassures des barres dans le modèle de la machine, on vas augmenté jusqu'à l'infinie la résistance du matériau dont les barres sont construites. Les résultats prélevés sur le modèle défectueux sont : Les courants statoriques, courants rotoriques, la vitesse de rotation, et les lignes du champ magnétique.

#### 3.3.1 Analyse des résultats magnétiques :

La figure (3.1) montre la distribution des lignes du champ magnétique, et la figure (3.2) .montre la propagation du flux à l'intérieur de la machine dans le cas sain et avec défaut de cassure des barres.

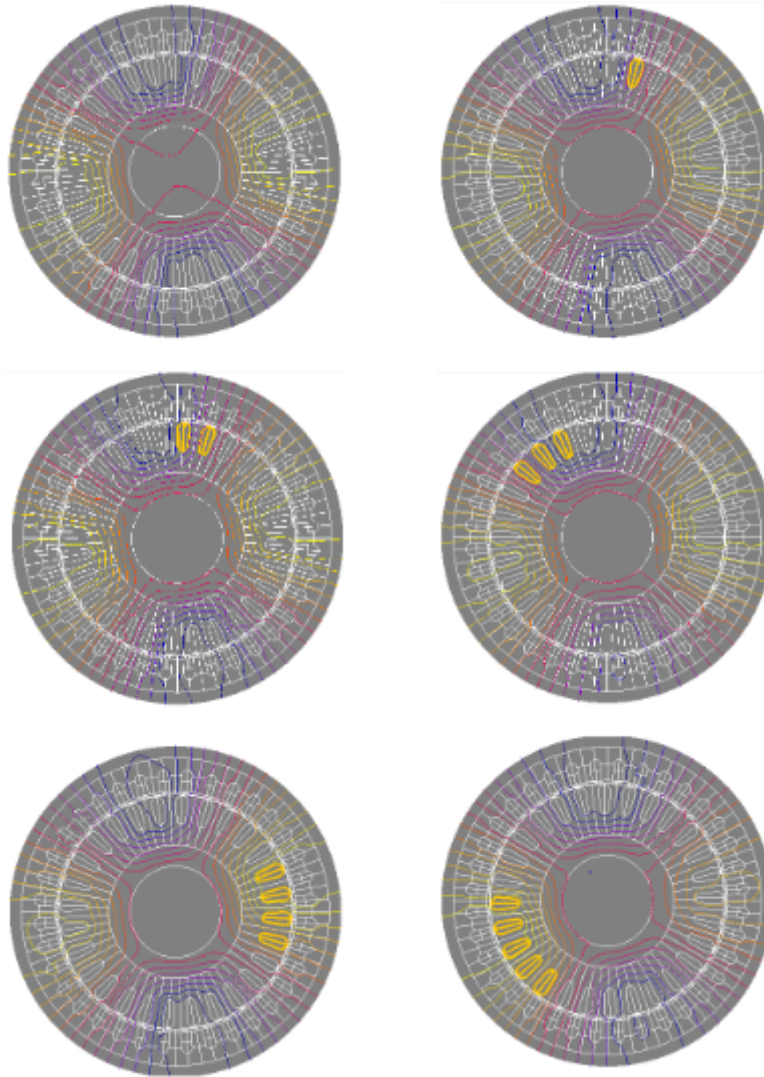


FIGURE 3.1 – Distribution des lignes du champ

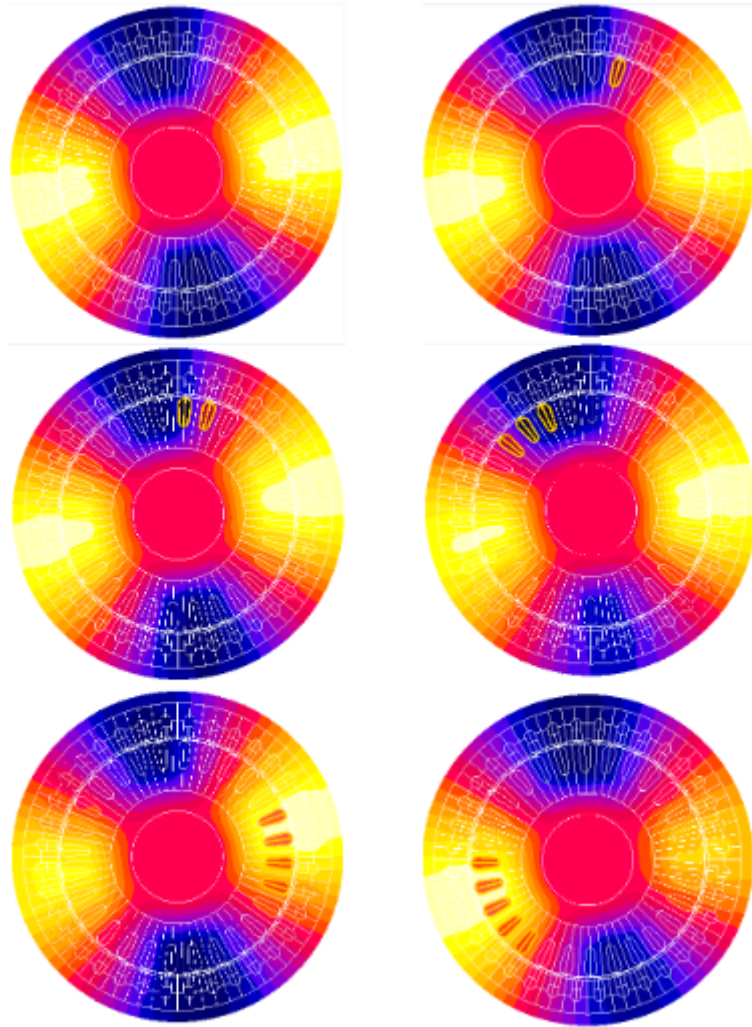


FIGURE 3.2 – Distribution du flux

Dans les figures précédentes, on peut remarquer et constater que dans le cas sain la répartition des lignes de champs sont homogènes et symétriques, cependant que dans le cas d'une cassure d'une barre ou plusieurs barres rotoriques, on observe une concentration du flux dans la région concerné par le défaut.

### 3.3.2 Analyse des courants de phases :

Les ruptures de barres ont des marques dans les signaux des courants statoriques. Elle se manifeste par l'injection des harmoniques dans le signal du courant d'alimentation de la machine. Les figures suivantes (3.3)(3.4)(3.5) garanti les différentes formes des courants statoriques enregistrés en régime permanent pour le cas sain et en défaut.

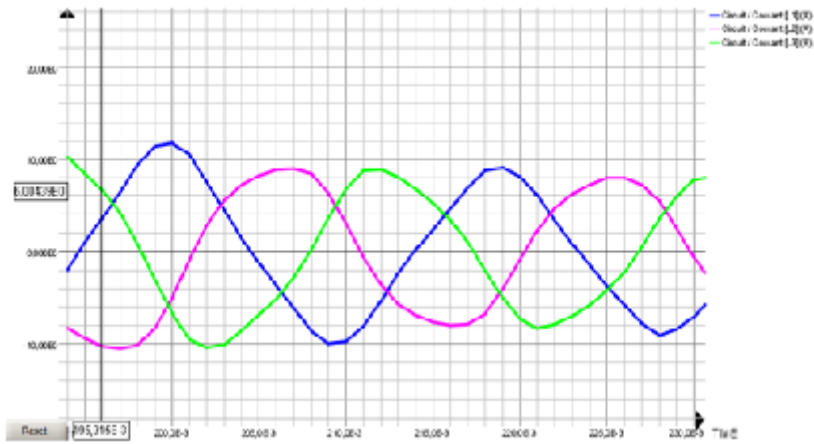


FIGURE 3.3 – Machine saine

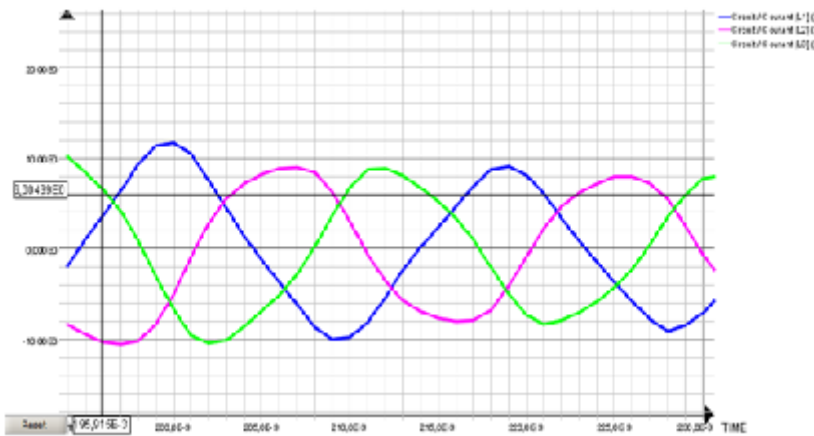


FIGURE 3.4 – Machine avec défauts ( 1 barre cassée)

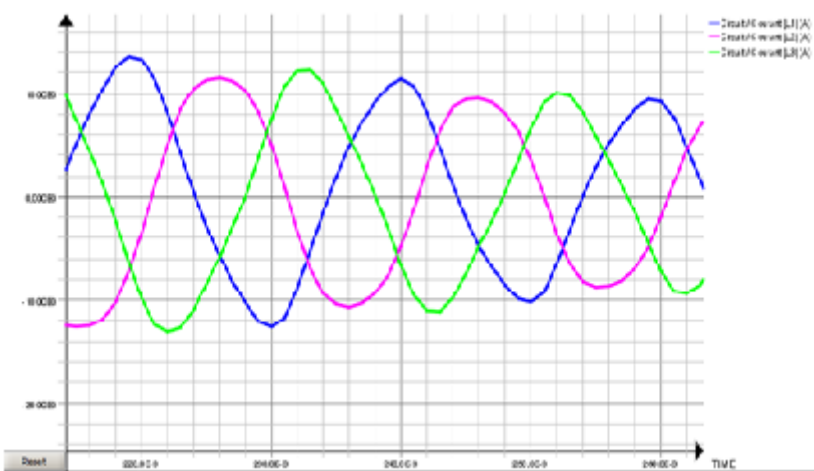


FIGURE 3.5 – Machine avec défauts (5 barres cassées)

On Remarque que Dans le cas sain, le signal des courants statoriques est parfaitement équilibré, contrairement avec les ruptures des barres rotoriques, des modulations d'amplitude

induites causées par le défaut. Cette modulation est importante quand le nombre de barres cassées est grand( exp :1barre .2.3...).

### 3.3.3 Analyse des courants rotoriques :

L'une des particularités et avantage de la méthode des éléments finis réside dans la possibilité d'accéder et de calculer les courants circulant dans n'importe quelle barre. La figure 3.8 représente l'évolution du courant dans les barres rotoriques qui se trouvent autour des barres cassées, dans notre cas, nous avons calculé les courants dans les quatre barres gauches et quatre barres à droite.

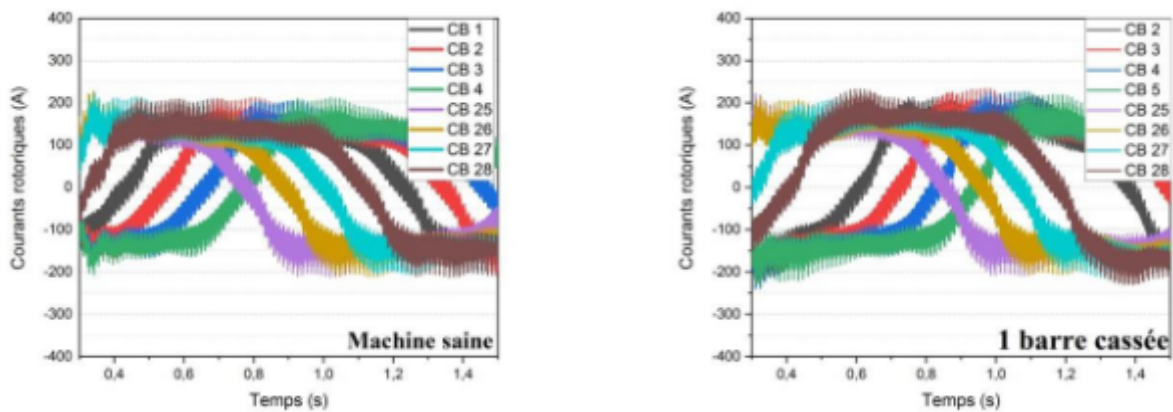


FIGURE 3.6 –

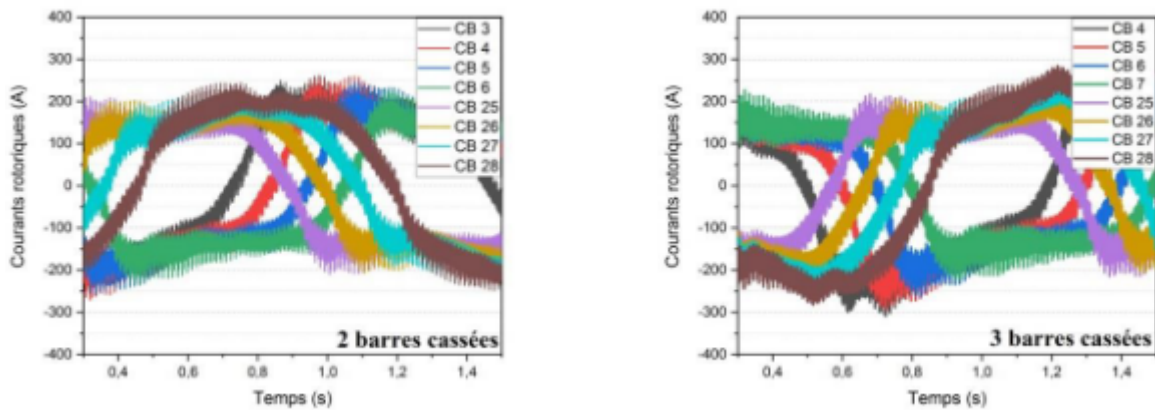


FIGURE 3.7 –

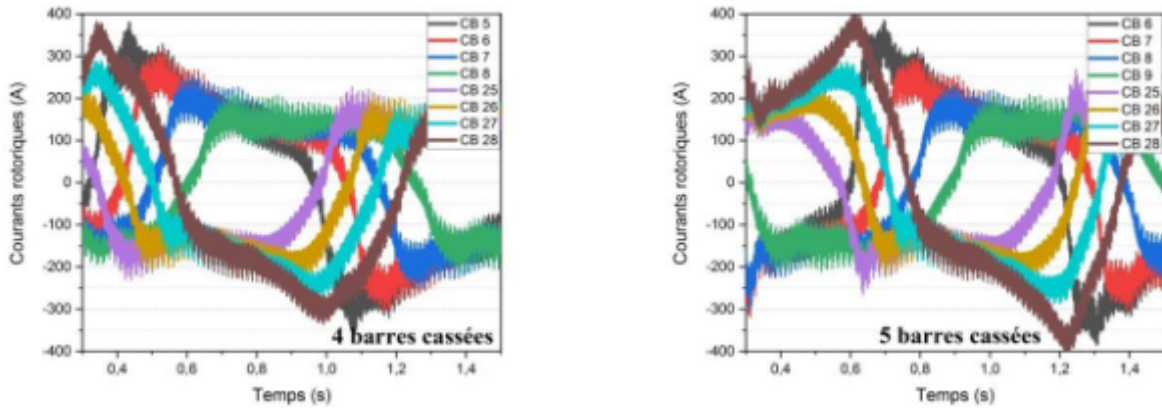


FIGURE 3.8 – Courants rotoriques

On peut remarquer dans les figures ci-dessus par comparaison des cas de ruptures de barres rotoriques entre eux et le cas sain, une augmentation du courant traversant les barres adjacentes, et plus le nombre de barres cassées augmente, plus la circulation du courant dans ces barres adjacentes deviens forte, c'est le courant qui circule dans les barres cassées qui est partagé sur les barres adjacentes, donc les barres adjacentes aux barres cassées sont plus susceptible d'être défaillantes, ce qui peut conduire à un échauffement local et emmener à une nouvelle rupture.

### 3.3.4 Caractéristiques mécaniques :

L'impact du défaut de cassure des barres n'est pas seulement sur les courants statoriques et rotoriques de la machine, mais il infecte aussi la vitesse de rotation. La figure(3.9et 3.10) donne un aperçu sur la vitesse de chaque cas étudié.

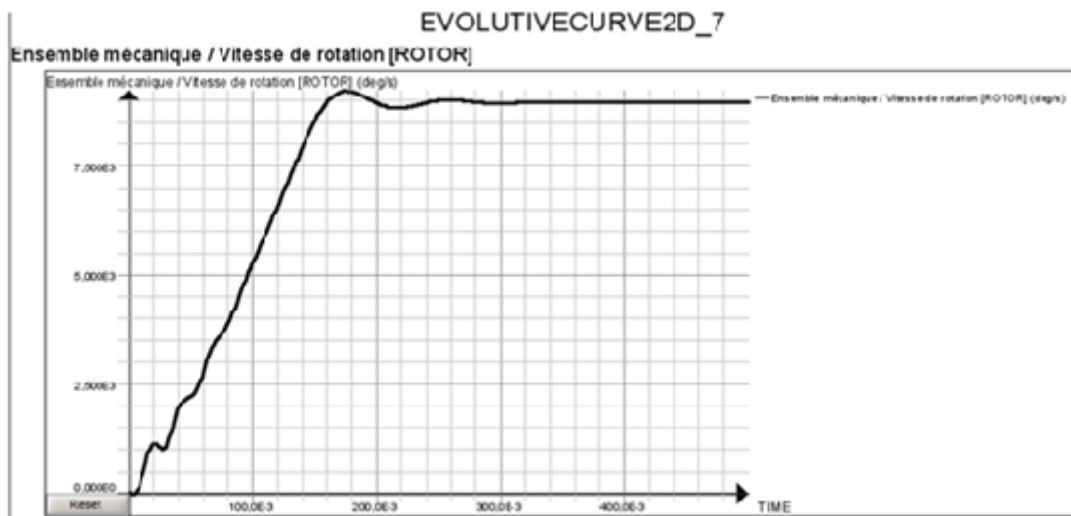


FIGURE 3.9 – la Vitesse de rotation pour la machine saine

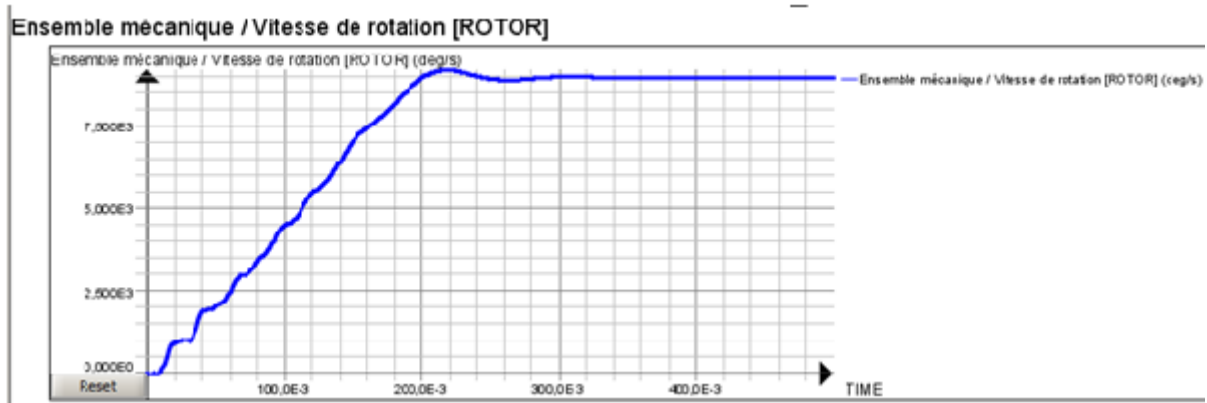


FIGURE 3.10 – la Vitesse de rotation pour la machine avec défauts

D'après les figures on peut observer que le défaut de rupture des barres rotoriques génère des oscillations de vitesse. Ces variations dues aux fluctuations de couple sont de faible fréquence. On constate que ces oscillations deviennent plus visibles lorsque le nombre de barre cassée augmente.

### 3.4 Diagnostic de la MAS saine et avec défauts :

Les techniques de détection des défauts par l'analyse temporelle des signaux n'est pas assez précise, et donnent peu d'informations sur l'existence d'anomalie et sur l'identification de type de défaut. La surveillance du comportement des machines tournantes aujourd'hui a largement développé des méthodes simple et efficace, dont on cite l'analyse du spectre du courant statorique (MCSA).

L'analyse du spectre du courant statorique (MCSA) est une méthode très efficace pour le diagnostic des défauts, comme la seule grandeur intéressante accessible au stator est le courant et l'intérêt de son analyse spectrale est de pouvoir détecter et identifier l'élément défectueux en fonction de sa fréquence caractéristique. L'analyse spectrale du courant statorique par la technique de la transformée de Fourier rapide FFT nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la cassure des barres.

#### 3.4.1 Analyse spectrale du courant d'une phase statorique :

C'est bien connu que la rupture de barres induit des forces électromotrices (f.é.m) dans les enroulements statoriques à des fréquences  $(1-2g).f_s$  aux alentours du fondamental de courant statorique. Ces f.é.m engendrent une modulation du courant statorique. Les forces électromotrices dues au défaut sont alors de fréquences  $(1\pm 2g)*f_s$ . Les champs créés par les courants vont

induire, par conséquent, au rotor des courants directs et inverses de fréquences  $\pm 3gfs$ . Ainsi, au stator, des courants de fréquence  $(1\pm 4g)*fs$  sont générés selon le même processus. Par conséquent, des composantes de fréquences  $(1\pm 2kg)*fs$  où  $k$  est un entier positif, se retrouvent dans les courants absorbés par la machine. Dans cette étude, on veut étudier les manifestations de rupture de barres sur le courant statorique lors d'une alimentation idéale. Pour cela, nous avons pris le signal du courant d'une phase statorique pour faire une analyse spectrale pour chaque cas, soit une machine saine et avec défaut de cassures de barres. La figure ci-dessous présente les spectres du courant d'alimentation d'une machine saine et avec défaut de cassures de barres allant d'une barre à cinq.

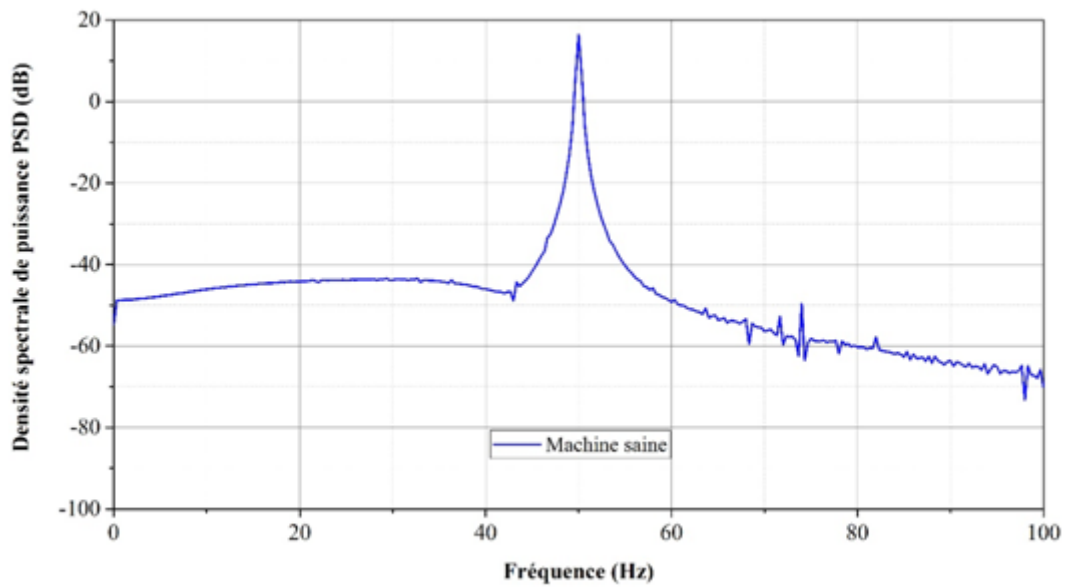


FIGURE 3.11 –



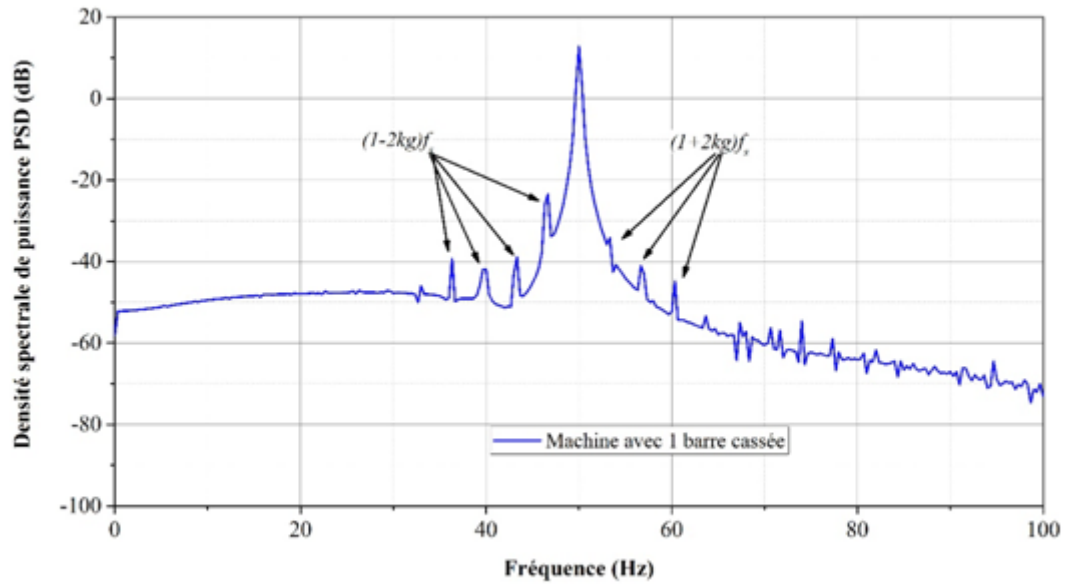


FIGURE 3.12 –

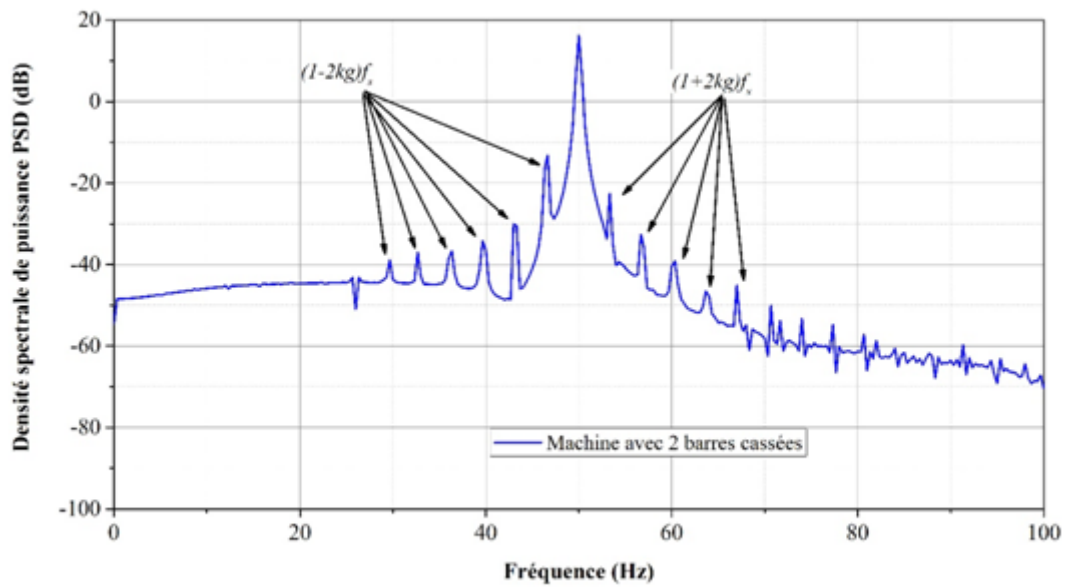


FIGURE 3.13 –

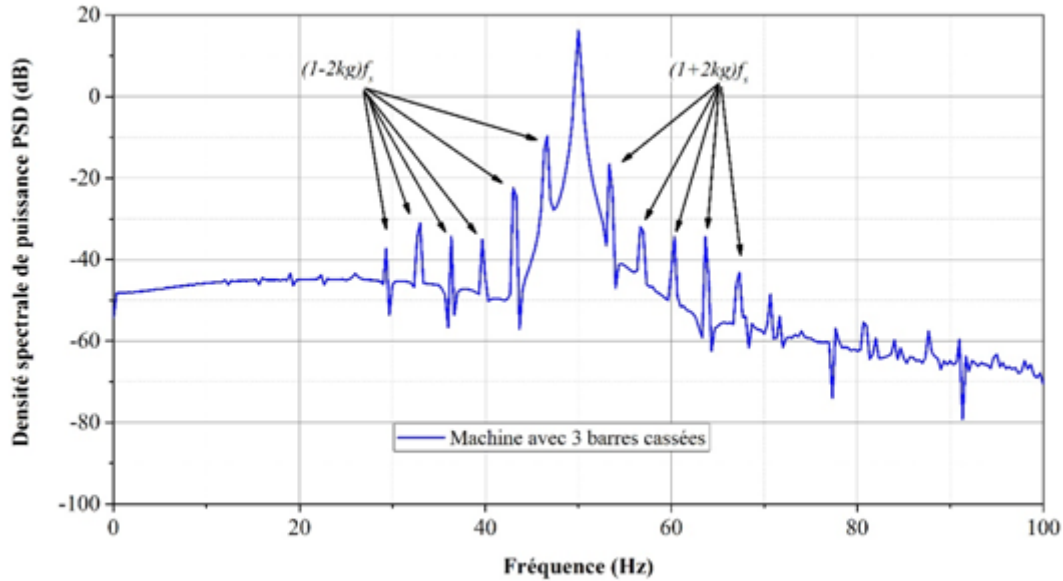


FIGURE 3.14 – Analyse spectrale du courant de phase de 30 Hz à 90 Hz pour défaut de cassure des bars

On remarque que le défaut de rupture de barres induit des pics dans le spectre du vecteur d'espace du courant statorique. Le nombre de ces pics est proportionnel au nombre de barres cassées. Ces pics apparaissent aux alentours du fondamental  $f_s$  et de sa composante symétrique inverse  $-f_s$ .

### 3.5 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil par la méthode des éléments finis dans son état sain et avec le défaut de cassures des barres. Les résultats de simulation nous donnent une image claire sur son comportement lors de fonctionnement normal et en cas de défaut, et les conséquences renvoyées par ce dernier sur les caractéristiques électromagnétiques et mécaniques de la machine.

L'analyse du spectre du courant statorique (MCSA) est une méthode de diagnostic très utilisée dans la détection des défauts, son application sur le courant statorique de notre machine saine et défectueuse nous a permis de mettre en évidence toutes les bandes latérales relatives au défaut. Une détection précoce est possible à partir des raies localisées aux alentours des fréquences du fondamental  $f_s$ , et de sa composante inverse  $-f_s$ .

# Conclusion générale

L'évolution croissante des machines asynchrones dans le secteur industriel, et leur taux élevé d'utilisation met en évidence l'impératif de se prémunir contre l'apparition de tout défaut qui provoque le plus souvent un arrêt de la machine ce qui revient par des dommages matériels et financiers pour l'utilisateur.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic de défauts au sein des machines asynchrones à cage d'écurie triphasés. Plus particulièrement, le défaut traité est la rupture de barres.

Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur la constitution de la machine asynchrone triphasés à cage d'écurie, puis on a montré que la machine asynchrone peut être affectée par différents défauts qui peut la touchée que ce soit au niveau du rotor ou du stator, Ces derniers peuvent crée de graves défaillances sur la machine elle-même et sur le système. Pour remédier à ça, plusieurs méthodes de diagnostic sont mises en oeuvres.

En ce qui concerne la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écurie, on a choisi la méthode d'éléments finis on utilisant le logiciel Flux 2D qui est basé sur la résolution numérique des équations de Maxwell avec le mode magnéto-transitoire. Nous avons montré la géométrie de la machine avec son maillage, ainsi les résultats magnétiques et mécaniques de la machine saine sans défauts.

Nous avons modélisé la machine asynchrone avec l'intégration du défaut de cassure de barres rotoriques. La simulation de la machine est déroulée selon six cas : état sain et avec défaut de cassure d'une barre jusqu'à cinq barres adjacentes ou plus. On a prélevé les résultats graphiques de l'état magnétique et mécanique de la machine.

Par titre de comparaison entre une machine saine et une machine avec défauts, une grande différence dans les résultats, comme l'ondulation de la vitesse et les courants d'alimentation. L'analyse temporelle des résultats obtenus ne permet pas de discerner l'effet de ce défaut sur la machine avec facilité, et même pas d'identifier le type de défaut. Pour cela, on a fait appel

à la l'analyse fréquentielle, plus riche en informations et plus simple à interpréter. L'analyse spectrale du courant de phase de la machine par la transformée de Fourier rapide FFT sur chaque cas étudié a apporté de nouvelles informations, par rapport aux résultats de l'analyse temporelle. L'exploitation de ce spectre a permis de déterminer les composantes  $(1 \pm 2) \text{ kg} \cdot \text{s}$  caractéristiques du défaut de barres rotoriques qui donne une identité sur le défaut.

En termes de perspectives, on peut dire que ce travail est une initiation à. Étudier l'influence sur le modèle par les autres défauts possibles, validation expérimentale et diagnostic des autres types des machines.

Nous voulons faire aussi une simulation et Diagnostic de la machine asynchrone avec Défaut l'excentricité mais on a choisir depuis le début que ça sera juste avec le diagnostic des ruptures des bars. Nous voulons voir, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit comment augmenter les forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant.

# Bibliographie

- [1] ABLABOUGUERNE». *diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchron.* PhD thesis, université Mentouri Constantine, 2009.
- [2] AMMAR, M. «*SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES MACHINES ELECTRIQUES : APPLICATIONS AUX MOTEURS ASYNCHRONES*». PhD thesis, Université du 20 Août 1955-Skikda, 2012.
- [3] BABECHE YACINE, B. S. «*Diagnostic des machines électriques par la méthode des éléments finis*». PhD thesis, université Mohamed Boudhief M’sila, 2018.
- [4] BELAID, A. «*Diagnostic de la MAS par la méthode d’identification paramétrique*». PhD thesis, université de M’sila, 2012.
- [5] .BELATEL, M. « *Contribution a la conception assistée par ordinateur des machines électriques* ». PhD thesis, université Mentouri, Constantine, 2004.
- [6] BONNETT, A. H. Cause and analysis of anti-friction bearing failures in ac induction motors. *Conference Record of 1993 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference* (1993), 36–46.
- [7] BOUMEGOURA, T. Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine synchrone et synthèse d’observateurs en vue du diagnostic.
- [8] CEBAN, A. Méthode globale de diagnostic des machines électriques.
- [9] CHAHMI, A. Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic.
- [10] DIDIER, G. *modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances.* PhD thesis, université Henri Poincaré, Nancy-1, 2004.
- [11] EDDINE, C. R. C. S. «*Détection et diagnostic de défauts statorique externe d’un moteur asynchrone triphasé à l’aide de la carte ARDUINO MEGA 2560*». PhD thesis, université Kasdi Merbah Ouargla, 2016.

- [12] ELKASABGY, N. M., EASTHAM, A. R., AND DAWSON, G. E. The detection of broken bars in the cage rotor of an induction machine. *Conference Record of the 1988 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (1988), 181–187 vol.1.
- [13] HAKIMA, C. « *Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes* ». PhD thesis, université Mouhamed Khider-Biskra, 2014.
- [14] KERSZENBAUM, I., AND LANDY, C. The existence of large inter-bar currents in three phase squirrel cage motors with rotor-bar and/or end-ring faults. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-103* (1984), 1854–1862.
- [15] M. MOSTEFAL, H. R. « *Maintenance du logiciel FLUX* ». PhD thesis, Université Ferhat Abbas De Sétif, octobre 2008.
- [16] METATLA, A., BAHI, T., HADJADJ, I., AND MEDOUED, A. Failure detection of eccentricity in asynchronous machine. *2008 International Conference on Computer Engineering & Systems* (2008), 315–318.
- [17] O'DONNELL, P. Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part i. *IEEE Transactions on Industry Applications IA-21*, 4 (1985), 853–864.
- [18] ONDEL, O. Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur - machine asynchrone. (diagnosis by pattern recognition : application on a set inverter - induction machine).
- [19] OUMAAMAR, M. E. K. Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée.
- [20] RADJELI, H. « *Contribution à l'amélioration des modèles mathématiques des machines synchrones* ». PhD thesis, Université de Sétif, 2007.
- [21] REDA, R. « *detection et diagnostic des défauts des moteur asynchrones* ». PhD thesis, université badji mokhtar annaba, 2009.
- [22] SAAD, B. « *Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différentes techniques de commande* ». PhD thesis, université Mouhamed Khider-Biskra, 2014.
- [23] SAID, M. S. N., BENBOUZID, M. E. H., AND BENCHAIIB, A. Detection of broken bars in induction motors using an extended kalman filter for rotor resistance sensorless estimation. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 15 (2000), 66–70.

- 
- [24] SAKHARA, S. «*diagnostic des defauts d'un entrainement electrique par latechnique ondelette*». PhD thesis, université BadjiMokhtar Annaba, 2017.
- [25] THORSEN, O., AND DALVA, M. A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries. *IEEE Transactions on Industry Applications* 31, 5 (1995), 1186–1196.

# 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®<sup>®</sup>, 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.

**.0.0.0.1 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®<sup>®</sup> 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.

**.0.0.0.2 Key words :** Asynchronous machine, Finite elements, 2D flow, dispersion fields, Diagnosis. . . .