



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Machine Electrique

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**Riguet abd elwahab**

Le : **dimanche 24 juin 2018**

## **Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par analyse spectrale des courants ( $i_d$ , $i_q$ ) de Park**

---

### **Jury :**

Dr. Megherbi Ahmed chaouki	MCA	Université d'appartenance	Président
Dr. Ghoggal Adel	MCA	Université d'appartenance	Examineur
Dr. Guedidi Salim	MCB	Université d'appartenance	Rapporteur

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



Université Mohamed Khider Biskra

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

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

**MASTER**

*Thème*

**Diagnostic de défauts de la machine  
asynchrone par analyse spectrale des  
courants ( $i_d$ ,  $i_q$ ) de Park**

Présenté par :

Riguet abd elwahab

Avis favorable de l'encadreur :

Dr . Guedidi Salim .

**Avis favorable du Président du Jury**

**Dr.Megherbi Ahmed chaouki**

Cachet et signature

## RESUME :

Ce travail rentre dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. La machine asynchrone à cage devient actuellement l'élément clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa robustesse et son faible coût. Malgré ces avantages, un certains nombres de contraintes de natures très différentes peuvent affecter la durée de vie de cette machine, en occasionnant des pertes économiques considérables. Ceci impose la mise en œuvre d'un système de surveillance.

Dans cette logique, nous proposons dans ce travail une étude comparative entre le comportement de la machine saine et le comportement de la machine doté de défaut rotorique.

Une analyse spectrale des courants statoriques ainsi que leur transformés a été présentée à l'aide de la transformée de Fourier afin de mettre en évidence la présence des harmoniques caractérisant le défaut de cassure de barre.

**Mots clés : machine asynchrone, méthode des éléments finis, diagnostic, analyse spectrale, FFT .**

ملخص:

ينضوي هذا العمل ضمن إطار تشخيص الأخطاء في الماكينات الكهربائية اللامتزامنة ذات القفص السنجاي ثلاثية الأطوار. حاليا، تعتبر الماكينة اللامتزامنة العنصر المفتاح في أغلب التجهيزات الصناعية بفضل صلابتها و ثمنها المنخفض نسبيا. بالرغم من هذه الإيجابيات، قد تتعرض هذه الماكينة إلي أعطال مختلفة تؤثر على أدائها و مدى حياتها الافتراضية، مما يؤدي إلى خسائر اقتصادية معتبرة للمتعامل الصناعي، و هذا ما يفرض وضع نظام مراقبة لتفادي هذه الخسائر. في خضم هذا العمل اقترحنا مقارنة للماكينة في الحالة العادية و في حالة وجود الأعطال، وهذا من خلال التحليل الطيفي لتيار الجزء المحرض في الماكينة و ذلك بمساعدة تحويل فورييه و الذي يبين وجود الشوائب و التشوهات من عدمه و معرفة ماهية العطل من خلال هذا التحليل. يتبنى هذا التحليل للتيار الكهربائي في الأطوار الثلاثة كوسيلة لاكتشاف الأخطاء من خلال مراقبة مختلف التوترات المتواجدة فيه و المعبرة عن الأخطاء.

الكلمات المفتاحية: الماكينات الكهربائية اللامتزامنة ذات القفص السنجاي ثلاثية الأطوار، التحليل الطيفي.

## Remerciements.

La première des pages qui reste la dernière à écrire. et voilà enfin le moment d'achever ces cinq années passées à l'Université Mohammed Khaider. Et avant tout, je remercie **ALLAH** tout puissant qui m'a donné la force de m'avoir permet d'arriver à ce stade là.

Au jour d'aujourd'hui, on se rappelle surtout des bons moments passés avec nos compagnons d'une certaine infortune.

A monsieur le **Dr Guedidi Salim**, pour le soutien qui nous a apporté pendant la période de réalisation de ce modeste travail ainsi pour ses conseils précieux et surtout pour la totale confiance qui nous a accordée.

Aux membres du jury, qui ont accepté de participer à la valorisation de ce travail.

Et en fin nous tenons vivement à remercier tous nos ami(e)s, chacun à son nom.

## *Dédicace*

*Merci à tous les membres de ma famille*

*En particulier mon grand-père, ma grand  
mère mon père ma mère ma tante et mes oncles  
et tout mes amis en particulier Chellouai*

*Nacereddine Mohammed*

## CHAPITRE I

## Etude sur la machines Asynchrone.

<b>Figure I.1</b>	Enroulements statoriques d'une phase d'une machine à 4 pôles.	2
<b>Figure I.2.</b>	Photo du stator d'une machine asynchrone.	2
<b>Figure I.3.</b>	Rotor à cage d'écureuil.	3
<b>Figure I.4.</b>	Photo du stator et Rotor d'une machine asynchrone.	3
<b>Figure I.5.</b>	Démarrage étoile-triangle d'une machine asynchrone.	4
<b>Figure I.6.</b>	Caractéristique mécanique lors d'un démarrage étoile-triangle.	5
<b>Figure I.7.</b>	Démarrage par insertion de résistances statoriques.	5
<b>Figure I.8.</b>	Démarrage en trois temps par insertion de résistances rotoriques.	6

## CHAPITRE II Défauts et méthodes de diagnostic et de détection dans la MAS.

<b>Figure II.1.</b>	statistiques des défauts de la machine asynchrone.	10
<b>Figure .II.2.</b>	Types de maintenance.	13
<b>Figure II.3.</b>	Les mesures utilisées pour la surveillance et le diagnostic des machines asynchrones.	17
<b>Figure II.4.</b>	Types d'excentricité.	21
<b>Figure I.5.</b>	Dimension du roulement à billes.	22

## CHAPITRE III Modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain

<b>Figure III.1.</b>	Fonction d'interpolation d'un élément	29
<b>Figure III.2.</b>	L'enchaînement des programmes de Flux 2D	30
<b>Figure III.3.</b>	Les dimensions de la machine	32
<b>Figure III.4.</b>	Dimensions des fontes	32
<b>Figure III.5.</b>	Bobinage statorique	33
<b>Figure III.6.</b>	Circuit magnétique de la MAS	33
<b>Figure III.7.</b>	Les points de maillage	35
<b>Figure III.8.</b>	Répartition du maillage	35
<b>Figure III.9.</b>	La courbe d'aimantation B (H) du matériau ferromagnétique	36
<b>Figure III.10.</b>	Le circuit électrique d'alimentation	36
<b>Figure III.11.</b>	Circuit équivalent de la cage rotorique	37
<b>Figure III.12.</b>	Les tensions d'alimentation $V_U$ , $V_V$ et $V_W$	37
<b>Figure.III.13.</b>	. la distribution des lignes du flux à vide (a) au démarrage ;(b) en régime permanent	38-39
<b>Figure.III.14</b>	l'induction B à vide(a) au démarrage ;(b) en régime permanent.	39-40

<b>Figure.III.15.</b>	la distribution des lignes du flux en charge (a) au démarrage ;(b) en régime permanent	40-41
<b>Figure.III.16.</b>	l'induction B en charge (a) au démarrage ;(b) en régime permanent.	41-42
<b>Figure.III.17.</b>	Forme d'onde du courant statorique (a) phase V_U, (b) Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V_U.	43
<b>Figure.III.18.</b>	Vitesse de rotation de la machine a l'état sain (a) auid, (b) Couple électromagnétique de la machine sain à vide.	43
<b>Figure.III.19.</b>	Le courant des barres a l'état sain, a vide la barre (1).	43
<b>Figure.III.20.</b>	Vitesse de rotation de la machine a l'état sain en charge 75%.	44
<b>Figure.III.21.</b>	Couple électromagnétique de la machine saine en charge 75%.	44
<b>Figure.III.22.</b>	Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine saine en charge 75%.	44

### CHAPITRE IV Modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage avec défauts

<b>Figure. IV.1.</b>	la distribution des lignes du flux au démarrage (a) machine saine ;(b) avec une barre	50
<b>Figure. IV.2.</b>	l'induction magnétique (a) avec une barres cassées ;(b) avec deux barres cassées (c) avec trois barres cassées	52
<b>Figure. IV.3.</b>	le courant dans la barre cassées ib1	52
<b>Figure. IV.4.</b>	le courant dans la barre adjacente aux barres cassées ;(a) avec une barre cassée ;(b) avec deux barres cassées ;(c) avec trois barres cassées	53
<b>Figure. IV.5.</b>	la courant de phase et zoom avec Une barre cassée.	54
<b>Figure. IV.6.</b>	Avec deux barres cassées la courant de phase et zoom	54
<b>Figure. IV.7.</b>	la courant de phase et zoom avec trois barres cassées.	54
<b>Figure. IV.8.</b>	la vitesse de rotation et zoom avec une barre cassée	55
<b>Figure. IV.9.</b>	la vitesse de rotation et zoom avec deux barres cassées	55
<b>Figure. IV.10.</b>	la vitesse de rotation et zoom avec trois barres cassées	55
<b>Figure. IV.11.</b>	le couple électromagnétique et zoom avec une barre cassée.	56
<b>Figure. IV.12.</b>	le couple électromagnétique et zoom avec deux barres cassées.	56
<b>Figure. IV.13.</b>	le couple électromagnétique et zoom avec trois barres cassées.	56
<b>Figure. IV.14.</b>	Spectre (avec zoom) du courant de phase état cassure une barre avec différente charge	57
<b>Figure. IV.15.</b>	Spectre (avec zoom) du courant de phase état cassure une deux barre avec différente charge.	57
<b>Figure. IV.16.</b>	Spectre (avec zoom) du courant de phase état cassure une trois barre avec différente charge.	58

<b>Figure. IV.17.</b>	Spectre (avec zoom) du courant de phase état cassure une trois barre différentes en charges 50%.	58
<b>Figure. IV.18.</b>	Spectre (avec zoom) du courant de phase état cassure une trois barre différentes en charges 75%	59
<b>Figure. IV.19.</b>	Spectre (avec zoom) du courant de phase id iq état cassure une deux barre en charges 50%	59
<b>Figure. IV.20.</b>	Spectre (avec zoom) du courant de phase id iq (a) en hautes fréquences et (b) en basses fréquences état cassure une deux barre en charges 50%	60
<b>Figure. IV.21.</b>	Spectre (avec zoom) du courant de phase id iq état cassure une trois barre en charges 50%	60
<b>Figure. IV.22.</b>	Spectre (avec zoom) du courant de phase id iq (a) en hautes fréquences et (b) en basses fréquences état cassure une trois barre en charges 50%	60

### **CHAPITRE III Modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain**

<b>Tableau III.1.</b>	Les paramètres et son valeurs la machine asynchrone étudiée.	31
-----------------------	--	----

### Liste des symboles.

$l$	: La longueur du conducteur
$V$	: La vitesse du conducteur
$B$	: Induction magnétique
$F_m$	: La force mécanique
$E_0$	: Générateur de f.é.m.
$R$	: Résistance interne
$I$	: Le courant
$F_e$	: Force électromagnétique
$E$	: Force électromotrices (f.é.m.)
$\Omega$	: Domaine surfacique.
$A$	: Potentiel magnétique.
$\Gamma$	: Frontière de domaine $\Omega$ .
$\mu_0$	: Perméabilité magnétique de l'air.
$\mu_r$	: La perméabilité relative du fer
$\varepsilon$	: Permittivité électrique.
$\mu$	: Perméabilité magnétique.
$J$	: Densité de courant uniforme.
$\rho$	: Charges électriques.
$\sigma$	: conductivité électrique.
$j$	: unité imaginaire.
$t$	: Temps.
$L_1, L_2, L_3$	: Inductances de fuite des têtes des bobines statorique.
$g$	: Glissement.
$\omega_s$	: Pulsation statorique.
$p$	: Nombre de paires de pôles.
$N_b$	: Nombre de barres rotoriques.
$n_{\omega s}$	: Ordre des harmoniques de temps de la FMM.
$n_d$	: Ordre de l'excentricité.
$f_s$	: Fréquence d'alimentation.
$f_r$	: Fréquence rotorique.
$f_{he}$	: Fréquence des harmoniques d'encoches rotoriques.
$f_{roul}$	: Fréquence de vibration relative aux défauts de roulements.

$f_v$	: Fréquence caractéristique de vibration.
$f_{bille}$	: Fréquence de vibration relative aux défauts de billes.
$f_{b.int}$	: Fréquence de vibration relative au défaut de bague intérieure.
$f_{b.ext}$	: Fréquence de vibration relative au défaut de bague extérieur.
$f_b$	: Fréquence caractéristique du défaut de barres.
$f_{ecc}$	: Fréquence d'ordre supérieur caractéristique du défaut d'excentricité.
$f_{mix}$	: Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte.
$f_{st}$	: Fréquence caractéristique du défaut statorique.
$n_b$	: Nombre d'éléments roulant du roulement.
$\theta$	: L'angle de contact des bielles avec les bagues du roulement.
$Db$	: Le diamètre d'un élément roulant.
$Dc$	: La distance entre les centres des billes diamétralement opposées.
$I_U, I_V, I_W$	: Les courants des phases du modèle de la machine étudiée.
$V_U, V_V, V_W$	: Les tensions des phases du modèle de la machine étudiée.

---

**Sommaire**

Liste des symboles utilisés.....	iv
Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures.....	vii
Introduction générale .....	I
Conclusion générale .....	II

**Chapitre I : Etude sur la machines Asynchrone.**

I.1 Introduction.....	1
I.2 Constitution de la machine asynchrone.....	1
I.2.1 Le stator .....	1
I.2.2 le rotor.....	2
I.2.3 Organes mécanique .....	4
I.3 Démarrage du moteur asynchrone .....	4
I.3.1 Démarrage direct .....	4
I.3.2 Démarrage étoile-triangle.....	4
I.3.3 Démarrage par impédances statoriques .....	5
I.3.3.4 Démarrage par résistances rotoriques .....	6
I.4. Les défaillances de la machine asynchrone .....	6
I.4.1. Défaillances d'ordre mécanique.....	6
I.4.2. Défaillances d'ordre roulements .....	7
I.4.3. Défaillances du flasque.....	7
I.4.4. Défaillances de l'arbre.....	7
I.4.5. Défaillances d'ordre électrique.....	7
I.4.6. Défaillances des circuits électriques statoriques.....	8
I.4.7. Défaillances des circuits électriques rotoriques.....	8
I.5 Conclusion.....	9

**Chapitre II : Défauts et méthodes de diagnostic et de détection dans la MAS.**

II.1 Introduction : .....	10
II.2. Les défauts de la machine asynchrone :.....	10
II-2. Différent types des défauts :.....	11
II.2.1 Les défauts rotoriques.....	11
II.2.2 Les défauts de roulements.....	11

II.2.3 Les défauts statoriques.....	12
II. 3 Définition de la maintenance :.....	12
II.3.1 But de la maintenance.....	12
II.3.1 .1 Objectifs financiers.....	13
II.3.1.2 Objectifs opérationnels.....	13
II.3.2 Types de la maintenance.....	13
II.3.2.1 Maintenance corrective.....	13
a. Les avantages.....	13
b. Les inconvénients.....	14
II.3.2.2 Maintenance préventive.....	14
a. Les avantages.....	14
b. Les inconvénients.....	14
II.3.2.3 La maintenance préventive conditionnelle.....	14
a. Les avantages.....	14
b. Les inconvénients.....	15
II.3.2.4 Maintenance prévisionnelle.....	15
II.4 Méthodes de diagnostic des machines asynchrones .....	15
II.4.1 L'estimation de paramètres physiques.....	15
II.4.2 L'estimation d'état.....	15
II.4.3 Traitement de signaux.....	16
a. Analyse spectrale.....	16
b. Analyse cepstrale.....	16
c. Les méthodes de détection de fréquences connues.....	16
d. Méthodes temps fréquence.....	16
e. Méthode temps-échelle.....	17
II.5. Paramètres indicateurs de défaut .....	17
II.5.1 Le flux magnétique axial de fuite.....	17
II.5.2 Le courant statorique.....	17
II.5.3 Les vibrations.....	17
II.5.4 Le couple .....	18
II.5.5 La température .....	18
II.6 Signatures spectrales pour révéler le défaut :.....	19
II.6.1 Les harmoniques de la fmm dans la machine asynchrone.....	19
II.6.2 Les défauts statoriques.....	19

II.6.3 Défaut de court-circuit .....	20
II.6.4 Les défauts des barres rotoriques.....	20
II.6.5 Les défauts d'excentricité.....	21
I.6.6 Les défauts de roulements.....	22
II .7.Conclusion :.....	23
 <b>Chapitre III : Modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain</b> 	
III.1 INTRODUCTION :.....	24
III.2. Méthodes de modélisation de la machine asynchrone .....	24
III.2.1. Méthode des réseaux de perméance.....	25
III.2.2 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.....	25
III.2.3 Méthode des éléments finis .....	26
III.3 Modèle éléments finis de la machine asynchrone .....	26
III.3.1 Formulations.....	26
III.3.2 Le modèle employé.....	28
a. Le mode magnétostatique.....	28
b. Le mode magnétodynamique.....	29
c. Le mode magnétique transitoire.....	29
III.3.3 Le principe de la MEF.....	29
III.4 Présentation du logiciel FLUX2D .....	30
a. Module Construction (Preflux) .....	30
b. Module Solving Process.....	31
c. Module Analysis.....	31
III.5 Construction du modèle de la machine asynchrone .....	31
III.5.1 Les données de la machine étudiée.....	32
III.5.2 Procédure de construction du modèle par FLUX2D.....	35
III.5.3 Génération du maillage .....	35
III.5.4 Création des matériaux.....	37
III.5.5 Le circuit électrique.....	37
III.5.6 Les propriétés physiques et régions .....	38
III.6. Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain .....	40
III.7.Conclusion .....	46

**Chapitre IV : Modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage avec défauts**

IV.1. INTRODUCTION .....	47
IV.2. Modélisation de la machine AS à cage avec défaut de cassure de barres .....	47
IV.2.1 Cas de cassure d'une seule barre .....	47
IV.2.1.1 Résultats de la simulation de cassure d'une seule barre.....	47
IV.2.2 Cas de cassure des deux barres .....	48
IV.2.2.1 Résultats de simulation de cassure de deux barres.....	48
IV.2.3 Cas de cassure des trois barres .....	49
IV.2.3.1 Résultats de la simulation de cassure des deux barres.....	49
IV.3.1.Effet du nombre de barres cassure sur la carte du champ de la machine .....	49
IV.4.1. Résultats de la simulation de cassure d'une seule barre .....	52
IV.4.2. Résultats de simulation des barres ib20, ib2 et ib3 adjacentes à la barre cassées ....	53
IV.4.3 Effet du nombre de barres cassées sur les performances de la machine .....	53
IV.5.1.Spectre du courant pour une barre cassée et pour différentes charges .....	57
IV.5.2.Spectre du courant pour deux barres cassées avec différentes charges .....	57
IV.5.3.Spectre du courant pour trois barres cassées avec différentes charges .....	58
IV.5.4.Spectre du courant pour trois barres cassées différentes en même charges 50% .....	58
IV.5.5.Spectre du courant pour trois barres cassées différentes en même charges 75% .....	59
IV.6 Spectre du courant id et iq pour trois barres cassées pour une charge 50% .....	59
IV.5. Conclusion.....	61

# *Introduction*

## *générale*

## Introduction générale

Les machines asynchrones à cage d'écureuil sont largement répandues dans l'industrie en raison de leur fiabilité et construction simple. Elles sont utilisées dans la majorité des secteurs industriels et commerciaux. Cependant, elles sont sujettes à de nombreux défauts comme les barres cassées ou l'excentricité au niveau du rotor ou encore les courts-circuits entre spires au stator. La surveillance et le diagnostic des machines électriques représentent un enjeu scientifique et économique. Le diagnostic nécessite la connaissance d'une terminologie variée comme par exemple, la sûreté de fonctionnement qui peut être définie par l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Elle est scientifiquement caractérisée par l'étude statique et dynamique des systèmes du point de vue prévisionnel, opérationnel et expérimental, en tenant compte des aspects de probabilités et de conséquences liées aux défaillances.

La surveillance est un moyen de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui a pour objectif de trouver la cause des dysfonctionnements. Multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques et leurs causes sont très variées.

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche, que ce soit dans le but de dimensionnement, de la commande ou du diagnostic. La diversité des objectifs a fait apparaître plusieurs techniques de modélisation et d'outils de simulation, dont chaque type de modélisation est plus ou moins adapté à un domaine plus que les autres.

L'objectif de notre travail est la modélisation de la machine asynchrone, pour la simulation de la rupture de barres. Pour cela, le mémoire a été organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous rappelons les principaux défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone à cage, et leurs origines.

Le deuxième chapitre est consacré à la, présentation des différents types de défauts et les types de techniques de diagnostic des machines asynchrones.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du modèle éléments finis de la machine asynchrone triphasée à cage. Nous montrerons dans un premier temps les résultats de la simulation du moteur asynchrone, dans les différentes conditions de fonctionnement, sans défauts.

## Introduction générale

---

Dans le quatrième chapitre, nous avons simulé la machine asynchrone dans les états défaillants afin de simuler les ruptures de barres, d'une, de deux et de trois barres cassées et sous plusieurs charges. Les résultats sont conformes à ceux de la littérature. Nous présenterons l'analyse spectrale avec la transformation de Park (à l'aide de la transformée de Fourier rapide) afin de mettre en évidence la présence des harmoniques caractérisant le défaut de barres. Nous montrerons par la suite l'influence du nombre de barres cassées ainsi que la charge sur ces harmoniques et sur la carte du champ de la machine.

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

# *CHAPITRE I*

*Etude sur la machines*

*Asynchrone.*

**I.1 INTRODUCTION:**

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts. Ceci, parce-qu' il présente de nombreux avantages tels que sa puissance, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre et son faible coût, etc. L'apparition des variateurs dans les années 1980 permettent de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme, a grandement favorisé le développement du moteur asynchrone. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, levage, pompage, etc.).

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies. [01]

**I.2.Constitution de la machine asynchrone :**

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction, comprend un stator et un rotor, constitué de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux mêmes en permanence, on définit deux types de rotor: bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous nous intéressons à la machine asynchrone à cage d'écureuil. [02]

**I.2.1.Le stator :**

Le circuit magnétique est un empilement de tôles fines d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. On utilise des tôles minces dont l'épaisseur varie entre 0.35 et 0.50mm pour minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique est constitué de deux parties (Fig. I.1) : 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 leur circulation,

l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique. [03]

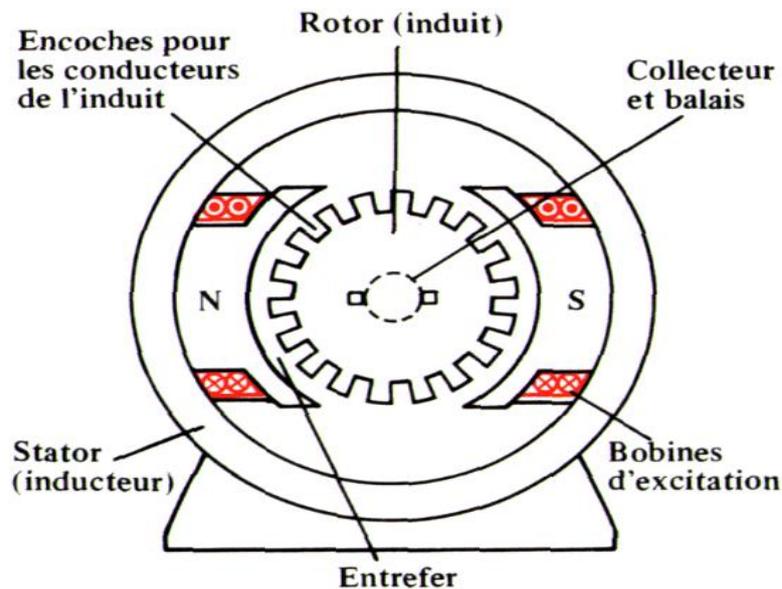


Figure.I.1 Enroulements statoriques d'une phase d'une machine à 4 pôles



Figure. I.2 Photo du stator d'une machine asynchrone.

### I.2.2.Le rotor :

Le rotor est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement de même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu.

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les encoches peuvent être semi-ouvertes ou fermées.

Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées par un anneau terminal placé à chaque extrémité du rotor. Les conducteurs sont généralement réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre ou, à l'occasion, en laiton préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques. Leur résistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre. [04]



Figure. I.3 Rotor à cage d'écureuil

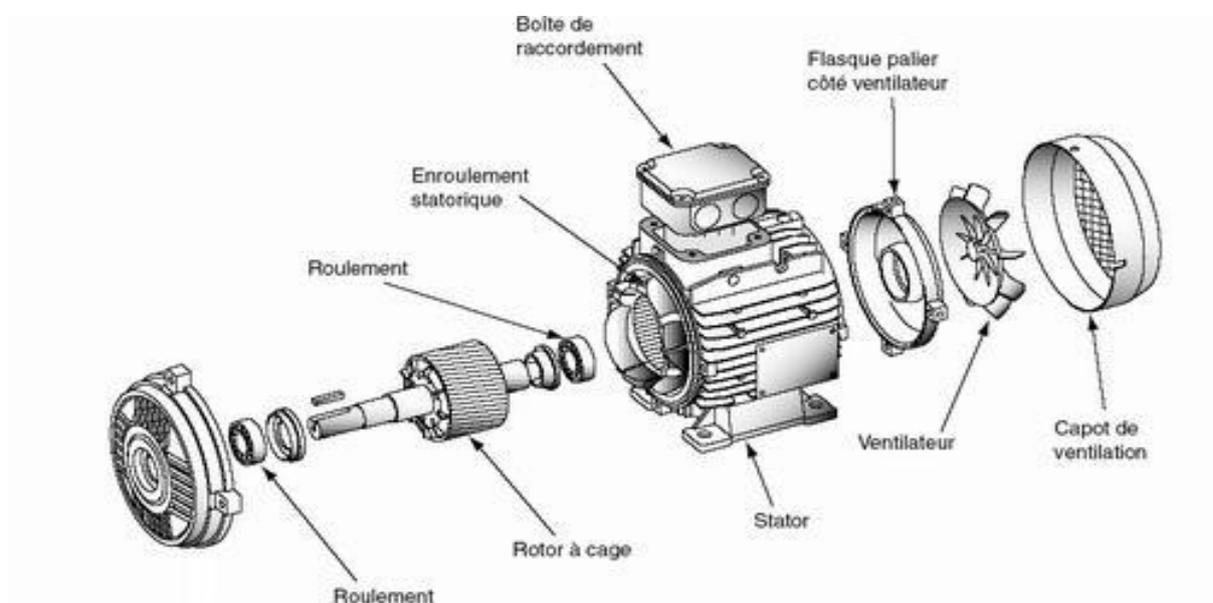


Figure. I. 4 Photo du stator et Rotor d'une machine asynchrone.

### I.2.3.Organes mécanique :

De chaque côté, un flasque est monté sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements à billes ou à rouleaux, à cause de cette raison on dit que le stator est autoporteur.

Pour assurer le refroidissement de la machine, un ventilateur est placé en bout d'arbre sur le rotor. Il peut être remplacé par une ventilation forcée motorisée pour le refroidissement aux vitesses lentes.

### I.3.Démarrage du moteur asynchrone :

#### I.3.1.Démarrage direct

Si le réseau le permet, on peut démarrer un moteur en le branchant directement à l'aide d'un contacteur sur le réseau. Le courant de pointe au démarrage,  $I_D$ , est alors de 6 à 7 fois le courant nominal. Sur des réseaux où l'absorption d'un tel courant de démarrage peut entraîner un creux de tension préjudiciable (réseau peu « puissant » du type de ceux des navires) il est nécessaire de prévoir des dispositifs de démarrage dont le but est de réduire le courant absorbé lors du démarrage [05].

#### I.3.2.Démarrage étoile-triangle

On utilise un moteur qui doit être normalement couplé en triangle sur le réseau. Un commutateur permet de brancher, pendant le démarrage, le stator en étoile. Chaque enroulement, placé sous la tension  $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$  absorbe un courant divisé par  $\sqrt{3}$ . Du fait du couplage, le courant de ligne est divisé par 3 par rapport au cas précédent. [05]

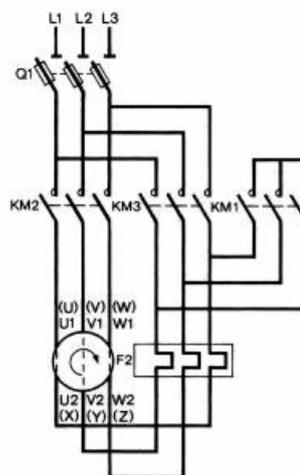


Figure .1.5. Démarrage étoile-triangle d'une machine asynchrone.

Comme la tension aux bornes d'un enroulement est divisée par  $\sqrt{3}$ , le couple est lui aussi divisé par 3. Il faut donc que le couple obtenu au démarrage reste supérieur au couple résistant.

A la fin du démarrage en étoile, on obtient la vitesse  $N_y$  ; on commute les enroulements en triangle et la vitesse tend vers  $N_d$ . Ce mode de démarrage est très simple mais conduit à un faible couple au démarrage et à un brutal régime transitoire lors du passage d'étoile à triangle. [05]

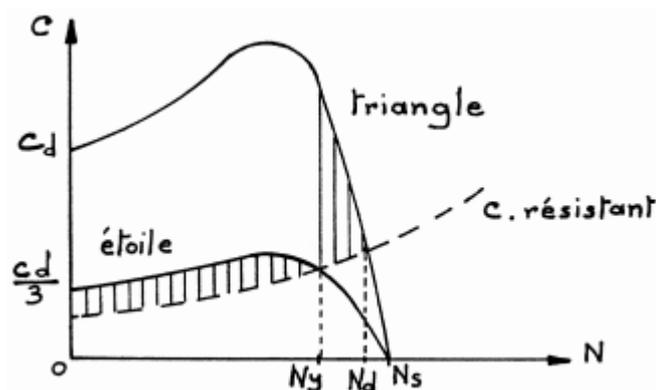


Figure. I.6. Caractéristique mécanique lors d'un démarrage étoile-triangle.

### I.3.3. Démarrage par impédances statoriques

On réduit la tension stator en insérant, lors du démarrage, des résistances ou des inductances en série avec les enroulements du stator comme le montre la Figure I.18. Le couple au démarrage est réduit dans un rapport réglable. Ce mode de démarrage est plus souple : on peut fractionner les impédances et les court-circuiter progressivement. [05]

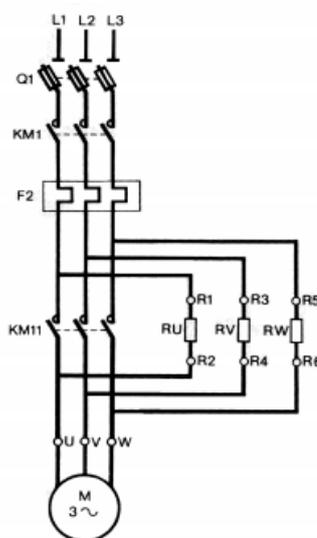


Figure .I.7. Démarrage par insertion de résistances statoriques.

### I.3.4. Démarrage par résistances rotoriques

Les procédés précédents étaient utilisables, que le moteur soit à cage ou à rotor bobiné. Dans ce dernier cas, on peut utiliser un rhéostat rotorique qui agit sur le glissement : si R2 augmente, on peut alors augmenter le couple au démarrage et réduire l'appel du courant. [05]

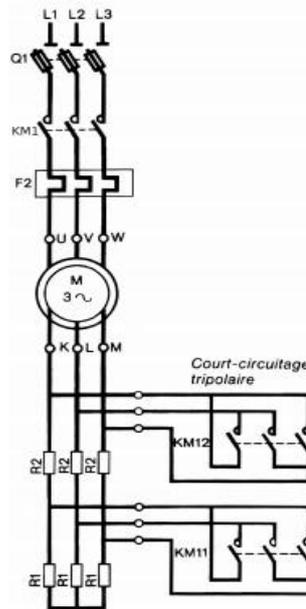


Figure I.8. Démarrage en trois temps par insertion de résistances rotoriques.

## I.4. Les défaillances de la machine asynchrone :

Bien que la machine asynchrone à cage d'écureuil soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique. Un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut tout comme une utilisation non conforme de la machine. Certaines fois, nous pouvons aussi incriminer le milieu dans lequel la machine est utilisée (milieux corrosifs et/ou chimiques hostiles).

### I.4.1. Défaillances d'ordre mécanique

Les défaillances d'ordre mécaniques sont, en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur. Nous énumérons, dans la suite du document, certains de ces défauts sans pour autant en donner les détails. Nous pouvons trouver dans la littérature des ouvrages très complets qui traitent de ces divers problèmes [6] [7] [8].

**I.4.2.Défaillances des roulements**

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce type de défaillances.

**I.4.3.Défaillances du flasque**

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.

**I.4.4.Défaillances de l'arbre**

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance.

**I.4.5.Défaillances d'ordre électrique**

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défaillances qui apparaissent au niveau

des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques [09].

#### **I.4.6. Défaillances des circuits électriques statoriques**

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, par exemple, les défauts de type courts-circuits inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défaut peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. Nous pouvons citer aussi les courts-circuits apparaissant entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou encore entre deux phases statoriques. Ces défauts ont le plus souvent une origine mécanique. En effet, des vibrations excessives peuvent mener à un desserrement des boulons de la plaque à bornes de la machine créant ainsi le court-circuit. Une cosse mal serrée à la jonction du câble d'alimentation et des bornes de la machine peut être à l'origine d'une ouverture de phase. Le défaut le plus couramment rencontré reste encore la fusion d'un fusible de protection. Ces défauts peuvent être détectés par une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.

#### **I.4.7. Défaillances des circuits électriques rotoriques**

Deux types de défaillances peuvent apparaître au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. La cage étant composée de barres et d'anneaux de court-circuit d'aluminium ou de cuivre, une rupture partielle ou totale d'un de ces composants peut être considérée comme un défaut électrique rotorique. L'apparition de ce type de défaut peut être d'origine diverse. En effet, la rupture d'une barre ou d'un segment d'anneau de court-circuit peut être due à plusieurs phénomènes qui sont souvent indépendants les uns des autres. Nous pouvons citer par exemple une mauvaise utilisation de la machine asynchrone (charge trop importante) ou encore l'environnement hostile dans lequel elle fonctionne. Parmi les causes premières, nous pouvons énumérer [10] :

- \_ des contraintes mécaniques causées par des forces électromagnétiques ou des vibrations mécaniques excessives.
- \_ des démarrages trop fréquents induisant des courants élevés dans les barres ou dans les segments d'anneaux.
- \_ des contraintes environnementales causées par une contamination ou une abrasion de la cage rotorique (industrie chimique par exemple).

Une défaillance au niveau de la cage rotorique se situe généralement à la jointure entre une barre et un anneau de court-circuit. En effet, les barres rotoriques et les anneaux de court-circuit ne pouvant pas être construits d'un seul bloc (sauf pour les machines de petites puissances), une soudure est pratiquée aux extrémités de chaque barre pour relier ces dernières aux deux anneaux de court-circuit. La fragilité de ces soudures, par rapport aux barres et aux anneaux fabriqués d'un seul bloc, provoque, à ces endroits précis, une fragilité de la cage d'écureuil. Tout comme les défauts statoriques, les défauts rotoriques peuvent être détectés par une analyse harmonique des courants statoriques. Une analyse vibratoire de la machine asynchrone permet aussi détecter ce type de défaillances. Comme la détection de la majorité des défauts d'une machine asynchrone repose sur une analyse vibratoire de la machine ou sur une analyse harmonique des courants absorbés au stator, la partie suivante est dédiée aux différents outils nécessaires à l'analyse fréquentielle des signaux révélateurs d'un défaut mécanique et/ou électrique.

**I.5.Conclusion :**

L'objectif de ce chapitre était de présenter de manière générale la constitution de la machine asynchrone en citant premièrement les différentes parties essentielles qui la composent : stator et rotor, ensuite nous avons présenté les principaux défauts qui peuvent gêner le fonctionnement normal de la machine ainsi que les causes probables, nous avons distingué les défauts électriques et mécaniques.

Dans le chapitre prochain, nous allons parler sur les types des défauts de la machine asynchrone et leurs techniques de diagnostic.

# *CHAPITRE II*

*Défauts et méthodes de  
diagnostic et de détection dans  
la MAS.*

## II.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous rappelons les différents défauts de la machine asynchrone, et, ensuite les diverses techniques de traitement pouvant être utilisées pour la détection d'un défaut électrique ou mécanique. Après cela, nous discutons les méthodes de diagnostic actuellement appliquées à la machine asynchrone.

## II.2. Les défauts de la machine asynchrone :

Les défauts dans les entraînements électriques se répartissent en deux catégories : les défauts qui se produisent dans la machine électrique (défauts des roulements, inclinaison de l'axe) et ceux qui se produisent dans la chaîne d'entraînements à l'extérieur de la machine (défauts dans la boîte de vitesse mécanique ....) notre étude est restreinte aux problèmes électriques qui se développent dans la machine asynchrone [11].

Une variété d'études statistiques par différents auteurs tels que [IEEE85, Thorsen95, Thorsen99] offrent une synthèse des défauts qui peuvent affecter la machine. Ces études sont présentées à la figure II.1 [12], ces études statistiques démontrent que certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres ce qui nous amène à axer notre étude sur les types de défauts les plus fréquents.

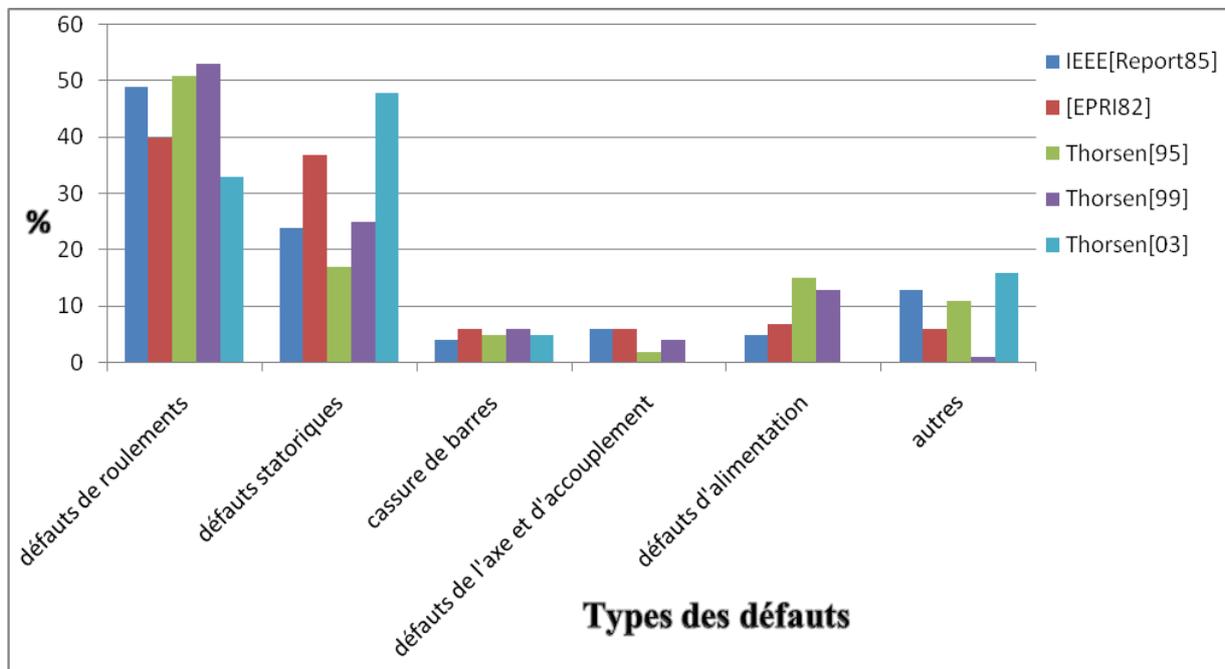


Figure.II.1 statistiques des défauts de la machine asynchrone.

**II-2. Différent types des défauts :**

Les défauts rencontrés dans la machine suivant leurs localisations sont :

**II.2.1 Les défauts rotoriques**

Les cassures de barres et de portion d'anneaux des cages sont très fréquentes, la détection de ces défaillances est rendue difficile par le fait que lors de leurs apparitions, la machine continue de fonctionner. Ces défauts ont par ailleurs un effet cumulatif. Le courant que conduisait une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor et conduisent à de fortes oscillations dans le couple et la vitesse. Ceci va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques [13].

- Rupture de barreaux.
- Cassure d'une portion d'anneau.
- Excentricité statique et dynamique.
- Défaut du circuit magnétique (rupture de tôles).

**II.2.2 Les défauts de roulements**

Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériaux à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements, peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce type de défaillances [14].

- Trous dans les gorges déroulements intérieurs et extérieurs.
- Ondulation de la surface de roulement.
- Attaque des billes.
- Corrosion due à l'eau.
- Défaut de graissage, problème dû à la température.
- Décollement, effritement- de surface, provoquée par une surcharge.

### **II.2.3 Les défauts statoriques**

Les courts-circuits entre spires ou bobines sont les défauts les plus nuisibles et les plus rencontrés au niveau du stator. Ils proviennent souvent d'une dégradation du matériau isolant recouvrant les conducteurs. Cette dégradation est due principalement à un échauffement anormal dans le bobinage. Le courant, dans les spires court-circuitées, atteint des valeurs énormes et l'augmentation de la température qui en suit entraîne la destruction de tous les isolants et par conséquent la défaillance complète de la machine. [14]

- Court-circuit dans les spires d'une même phase.
- Court-circuit entre phases.
- Coupure d'une phase.
- Défaut du circuit magnétique (rupture de tôles).
- Défaut de l'isolation masse au niveau du bobinage suite à un vieillissement prématuré du au milieu de fonctionnement hostile ou non et à la façon dont est alimenté le moteur.
- Défaut d'alignement prononcé par une irrégularité de l'entrefer qui introduirait des frottements, donc des préjudices sur le bobinage du stator.
- Ouverture d'une phase.

Ces défauts produisent un ou plusieurs des symptômes suivants :

- Déséquilibre des tensions et des courants.
- Balancement de l'entrefer.
- Augmentation du couple pulsatoire et diminution du couple moyen.
- Augmentation des pertes et diminution du rendement.
- Echauffement et vibration excessifs.

Avec l'avancée en technologie numérique ces dernières années, la capacité informatique est maintenant disponible pour surveiller et diagnostiquer les défauts de la machine pour une variété d'anomalies sur une base en temps réel.

## **II. 3 Définition de la maintenance :**

La maintenance c'est un ensemble des activités destinées à maintenir, à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise [15].

### **II.3.1 But de la maintenance**

Les objectifs de la maintenance peuvent être classés en deux types :

---

### II.3.1 .1 Objectifs financiers

- Réduire au minimum les dépenses de maintenance
- Assurer le service de maintenance dans les limites d'un budget.

### II.3.1.2 Objectifs opérationnels

- Maintenir l'équipement dans les meilleures conditions possibles.
- Assurer la disponibilité maximale de l'équipement à un prix minimum
- Augmenter la durée de vie des équipements

### II.3.2 Types de la maintenance

Nous distinguons plusieurs types de maintenance (fig. II.2)

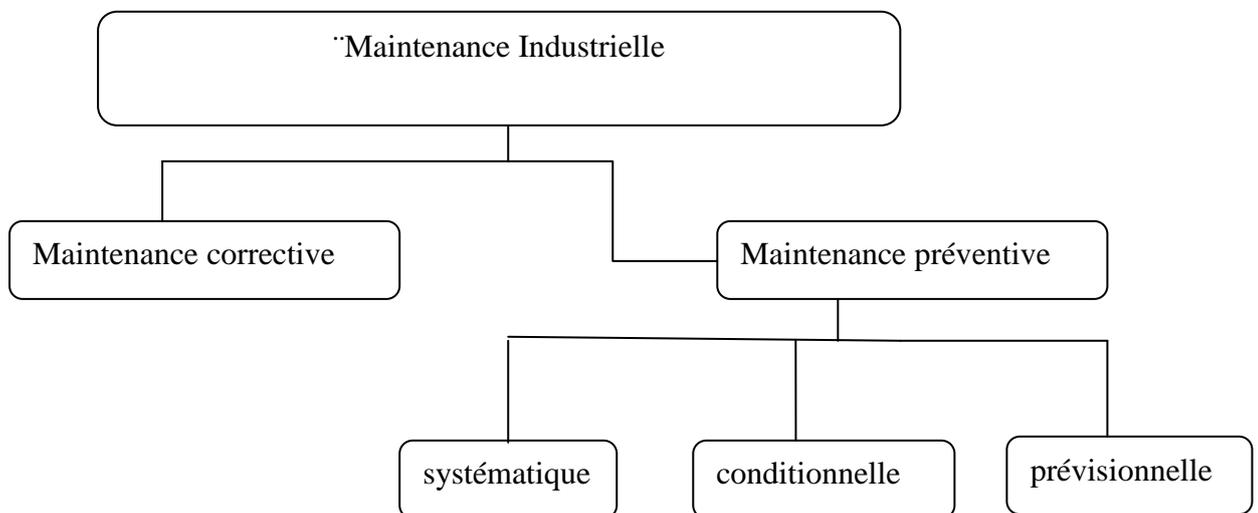


Figure II.2 Types de maintenance. [16]

#### II.3.2.1 Maintenance corrective

Qui vise à intervenir à la suite de pannes, cela ne veut pas dire que toutes ces pannes n'ont pas été prévisibles, ce type de maintenance sera facilité par une bonne maintenabilité (aptitudes à maintenir ou à rétablir un dispositif, dans un état, lui permettant d'accomplir sa fonction), il pourra permettre d'améliorer la fiabilité globale en analysant les problèmes rencontrés en contrôle techniques ou cercles de qualité ou avec les constructeurs. [16]

##### a. Les avantages

- Pas d'investissement en contrôle.

**b. Les inconvénients**

- Dommages conséquents
- Coût de réparation élevé
- Pas de planification
- Pertes de production si la machine est critique

**II.3.2.2 Maintenance préventive**

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien.

C'est une politique qui s'adresse aux éléments provoquant une perte de production ou des coûts d'arrêts imprévisibles, mais importants.

- **Les avantages**
- Planification des arrêts d'entretien
- Optimisation de l'intervention (préparation).
- Limite les risques de panne.

**b. Les inconvénients**

- Coût de maintenance élevé.
- Approche statistique.
- Risque induit par une intervention parfois non nécessaire. [17]

**II.3.2.3 La maintenance préventive conditionnelle**

Définition d'après la Norme NF X 60010, la maintenance préventive conditionnelle définit comme « une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, Mesure d'une usure, révélateur de l'état de dégradation du bien) ».[15]

**a. Les avantages**

- Optimisation de la durée de fonctionnement.
- Optimisation de l'intervention (préparation).
- Evaluation réelle de l'état de la machine
- Evite les pertes de production.

**b. Les inconvénients**

- Coût de l'investissement (homme / matériel).

**II.3.2.4 Maintenance prévisionnelle**

Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien (EN 13306). [15]

**II.4 Méthodes de diagnostic des machines asynchrones :**

Il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts. On présente dans ce qui suit quelques-unes qui concernent la détection des défauts machine.

**II.4.1 L'estimation de paramètres physiques**

La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique consistent à identifier les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance, puis d'extraire le paramètre physique du système à partir des lois de connaissance. Le point essentiel du diagnostic par identification paramétrique est le choix du modèle. De ce choix dépend le type de défaut que l'on pourra détecter sur la machine. En effet pour détecter et localiser un défaut au stator ou au rotor, il faut que ce dysfonctionnement puisse être discriminé au niveau des paramètres physique estimés.

**II.4.2 L'estimation d'état**

La détection de défauts par estimation d'état a surtout été étudiée avec le modèle de PARK. Les techniques de détection de défauts les plus répandues en automatique reposent sur la génération de résidus à partir d'un modèle de fonctionnement sain. Différentes approches, que l'on peut classer sous le terme générique d'estimation d'état, ont été étudiées et évaluées par plusieurs méthodes :

- Banc d'observateur à entrées inconnues avec découplage non linéaire, sur la base du modèle de Park.
- Observateur d'état à mode glissant.
- Génération de résidus par projection des équations du modèle de Park dans l'espace de parité.

En diagnostic, l'objectif est d'estimer les variables d'état du système à partir d'un modèle de comportement parallèle rebouclé de façon à s'affranchir essentiellement des

problèmes d'initialisation des grandeurs d'état. Ces grandeurs estimées sont comparées aux grandeurs mesurées afin de détecter le dysfonctionnement dans le système surveillé.

### **II.4.3 Traitement de signaux**

Pour effectuer le diagnostic d'une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de symptômes tels que le bruit, la température, les vibrations,...etc.

En s'appuyant sur leur expérience. Ces symptômes ne sont que la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables.

Toutes les méthodes de traitements de signal disponibles pour le diagnostic des machines tournantes peuvent être classées dans cinq groupes différents :

#### **✓ Analyse spectrale**

L'analyse spectrale est certainement la méthode la plus naturelle pour le diagnostic des barres cassées. En règle générale, 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.

#### **✓ Analyse cepstrale**

Le cepstre est une anagramme du mot 'spectre' la raison de ce choix tient à ce qu'on obtient le cepstrum en effectuant une analyse spectrale supplémentaire sur le spectre fréquentiel du signal observé. Le cepstre est plus particulièrement utilisé dans les analyses vibratoires des machines tournantes. Les principales applications concernent la détection des défauts dans les roulements, les turbines ou encore les engrenages. [18]

#### **✓ Les méthodes de détection de fréquences connues**

Ces méthodes reposent sur le principe que les défauts se caractérisent par l'apparition ou le renforcement d'une raie à une fréquence fixe ou proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine.

#### **✓ Méthodes temps–fréquence**

Les méthodes d'analyse temps –fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non-stationnaires. Plus généralement elles s'appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques évoluent au cours du temps. Pour décrire cette évolution temporelle il faut réaliser une analyse spectrale évolutive.

### ✓ Méthode temps-échelle

Ce mode de représentation est utilisé pour détecter des phénomènes qui se déroulent sur des échelles de fréquence différentes rencontrées dans un signal.

## II.5. Paramètres indicateurs de défaut :

Parmi les signaux qui contiennent les informations jugées pertinentes par les spécialistes du domaine et considérées comme paramètres indicateurs de défauts on a :

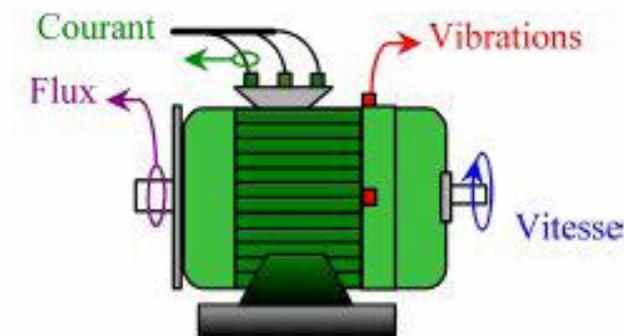


Figure. II.3. Les mesures utilisées pour la surveillance et le diagnostic des machines asynchrones.

### II.5.1 Le flux magnétique axial de fuite

Les circuits électriques et magnétiques de la machine ne sont jamais parfaits à causes des tolérances et des défauts de fabrication parmi d'autres, et présentent souvent quelques degrés d'asymétrie permettant la génération des flux de fuite dont le contenu spectral est lié directement aux harmoniques contenus dans les courants statoriques et rotoriques. [19]

### II.5.2 Le courant statorique

Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA 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).

### II.5.3 Les vibrations

Le diagnostic par l'analyse vibratoire fait partie des techniques mécaniques qui sont employées pour déceler des défauts au niveau des machines électriques. Une vibration est souvent accompagnée d'un bruit sonore qui peut être élevé même pour des faibles amplitudes

de vibration. Le diagnostic des défauts en utilisant l'analyse vibratoire est la méthode la plus connue dans la pratique [19]. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique. [20]

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la Fmm et de la perméance (P), la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques, rotoriques et l'excentricité). Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode. [20]

#### **II.5.4 Le couple**

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, 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. L'analyse spectrale de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient major de cette méthode [20].

#### **II.5.5 La température**

Grâce à des dispositifs à infrarouge, on perçoit les zones chaudes dont les températures dépassent les températures limites prédéterminées. Pour ce faire, un balayage systématique de l'ensemble de l'installation électrique, et notamment du moteur asynchrone, est effectué. Les systèmes examinés étant en fonctionnement, les éléments qui composent l'installation électrique sont en charge normale. En fait, ils vont nous apparaître, sur l'image infrarouge plus ou moins rayonnant suivant leur rôle, leur conception, leur charge et leur matériau. L'opérateur fait la part des choses entre les températures normales de fonctionnement et les anomalies. [19]

## II.6 Signatures spectrales pour révéler le défaut :

### II.6.1 Les harmoniques de la fmm dans la machine asynchrone

Dans l'étude de la machine asynchrone, des hypothèses simplificatrices sont supposées, par exemple : la tension d'alimentation est purement sinusoïdale, l'entrefer est lisse, la perméabilité du fer est infinie et la FMM (ou bien l'induction B) dans l'entrefer est sinusoïdale....etc. Ces hypothèses simplificatrices sont acceptées pour étudier le principe de fonctionnement de la MAS, cependant, elles ne sont pas applicables pour les problèmes de diagnostic où se trouve une dissymétrie.

En réalité, l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est fonction de différents paramètres, tel que les composantes fréquentielles apparaissent dans les tensions d'alimentation ces composantes dites harmoniques de temps et la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage. A cause de cette structure, Il a été démontré qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique d'autres harmoniques dites harmoniques d'espace (harmoniques d'encoches rotoriques) ayant pour fréquences [19] :

$$f_{ns} = \left[ \frac{kN_b}{p} (1 - g) \pm n_{\omega_s} \right] \cdot fs \quad (\text{II.1})$$

Avec  $fs$  la fréquence de tension d'alimentation, ( $n_{\omega_s} = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ ),  $p$  le nombre de paires de pôles,  $N_b$  le nombre de barres rotoriques,  $n_{\omega_s}$  l'ordre des harmoniques de temps de la tension, et  $k$  un entier positif. Pour  $k=1$  et  $n_{\omega_s}=1$  on définit ce qui sont appelés 'harmoniques d'encoches principales' (PSH).

### II.6.2 Les défauts statoriques

Pour déceler les défauts de court-circuit, plusieurs approches ont été mises en œuvre, à savoir l'utilisation d'une bobine concentrique placée autour de l'arbre de la machine afin de capter puis analyser le flux axial de la machine. Ce type de défauts entraîne l'apparition d'une série d'harmoniques dans le spectre du flux axial donnée par [19,21] :

$$f_{st} = fs \cdot \left[ k + \frac{n(1-g)}{p} \right] \quad (\text{II.2})$$

Avec  $k=1,3$  et  $n=1, 2,3, \dots (2p-1)$ .

Le diagnostic des courts-circuits statoriques peut être effectué via la MCSA, et est basé sur la détection des composantes fréquentielles données par l'expression (II.2), du fait que

cette onde de flux tournant sera l'origine des composantes de courant équivalentes dans l'enroulement statorique [19,21].

Les harmoniques 150Hz, 250Hz apparaissent en cas de court-circuit entre spires, mais sont souvent présents à cause de la saturation et de n'importe quel défaut susceptible d'entraîner un déséquilibre d'impédance, tel que le déséquilibre de tension. Aussi, il a été démontré que les harmoniques d'encoches rotoriques et de saturation subissent des variations en cas de défauts statoriques [19].

### II.6.3 Défaut de court-circuit

La signature fréquentielle de ce défaut se manifeste par l'apparition d'harmonique aux fréquences  $f=n.f_s$  avec  $n = \{1, 2, 3, \dots\}$  et  $f_s$  la fréquence d'alimentation.

- ✓ La variation des paramètres se fait comme suit :
- ✓ La résistance statorique augmente.
- ✓ La résistance rotorique diminue.
- ✓ L'inductance rotorique diminue.
- ✓ L'inductance de magnétisation diminue.

### II.6.4 Les défauts des barres rotoriques

Un défaut dans le rotor va engendrer une sorte d'asymétrie qui, dans le cas d'une alimentation par un système de tensions triphasées symétrique, va être à l'origine d'un champ magnétique inverse de fréquence  $-g f_s$  dans le circuit rotorique. Cela va engendrer des courants circulant dans le circuit statorique à une fréquence de  $(1-2g)f_s$ . Une autre composante apparaît aussi dans le spectre du courant statorique à une fréquence de  $(1+2g)f_s$ . Cette composante est due aux fluctuations de la vitesse provoquées par les oscillations du couple. Il a été démontré qu'un processus répétitif donne naissance à une série d'harmoniques dont les fréquences sont données par [21] :

$$f_b = (1 \pm 2kg)f_s \quad (\text{II.3})$$

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

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

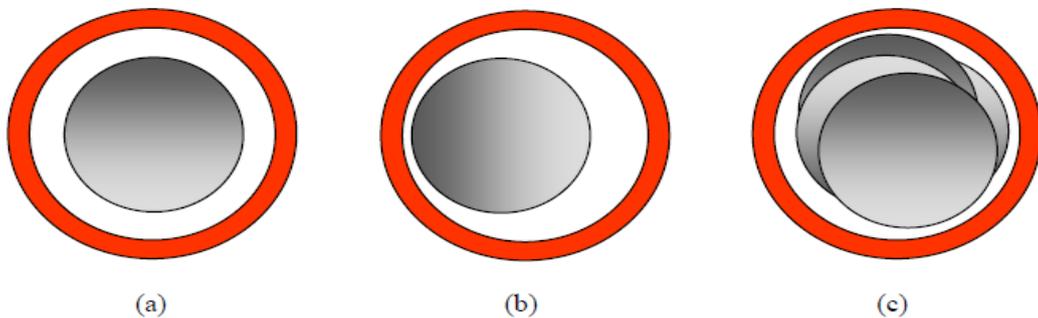
$$f_b = \left[ \frac{k}{p/2} (1 - g) \pm g \right] \cdot f_s \quad (\text{II.4})$$

$$\text{Avec } \frac{k}{p/2} = 1,3,5,7,\dots$$

Les défauts de cassure de barres génèrent également dans les signaux du couple et de vitesse des composantes de fréquences  $2gf_s$  et  $4gf_s \dots$ [21].

### II.6.5 Les défauts d'excentricité

L'excentricité se répartit en deux catégories : statique et dynamique (voir la figure II.4). L'excentricité statique se distingue par le fait que le centre du rotor n'est pas égal à celui du stator. L'excentricité dynamique est caractérisée par le fait que le centre du rotor tourne autour du centre du stator [22].



**Figure.II.4.** Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique.

Même à l'état sain, la machine présente toujours un certain degré d'excentricité statique résiduelle dû aux inévitables erreurs de fabrication [19]. La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant à des fréquences  $f_{ecc}$  données par :

$$f_{ecc} = \left[ \left( \frac{kN_b \pm n_d}{p} \right) (1 - g) \pm n_{\omega_s} \right] \cdot f_s \quad (\text{II.5})$$

Avec  $k$  un entier et  $n_{\omega_s} = 1,2,3,\dots$  l'ordre de l'excentricité  $n_d$  est égal à 0 pour l'excentricité statique, et 1, 2,3,....pour l'excentricité dynamique.

Une autre série d'harmoniques liés à la coexistence des deux types d'excentricité en même temps (excentricité mixte), apparaît de part et d'autre de la fondamentale à des fréquences données par [19,21] :

$$f_{mix} = |f_s \pm kf_r| \quad (\text{II.6})$$

Tel que  $k$  est un entier positif. Il n'est pas besoin avec cette expression de connaître les paramètres de la machine tel que  $N_b$ , et c'est ce qui la rend parfois avantageuse.

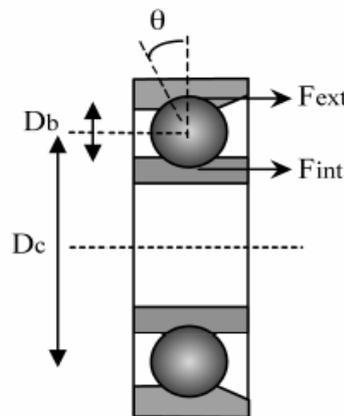
Les défauts d'excentricité peuvent également être décelés par une analyse vibratoire, sachant que des composantes de hautes fréquences de vibration générées par l'excentricité sont données par une formule similaire à (II.5).

### I.6.6 Les défauts de roulements

Parce que les éléments roulants du roulement supportent le rotor, quelque soient les défauts dans les roulements, ils vont produire des mouvements radiaux entre le rotor et le stator dans la machine. Par conséquent, des variations d'entrefer génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [19,21] :

$$f_{roul} = |f_s - kf_v| \tag{II.7}$$

Avec  $k=1,2,\dots$  et  $f_v$  est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations, soit  $f_{bille}$ ,  $f_{b.int}$  ou  $f_{b.ext}$  (fig.II.5).



Figuer.II.5.Dimension du roulement à billes.

- Défaut au niveau d'une bille :

$$f_{bille} = \frac{Dc}{Db} f_r \left[ 1 - \left( \frac{Db}{Dc} \cos \theta \right)^2 \right] \tag{II.8}$$

- Défaut sur la bague intérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_r \left[ 1 + \frac{Db}{Dc} \cos \theta \right] \tag{II.9}$$

➤ Défaut sur la bague extérieure :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_r \left[ 1 - \frac{Db}{Dc} \cos \theta \right] \quad (\text{II.10})$$

Tel que  $n_b$ , le nombre d'éléments roulants,  $Db$  le diamètre d'un élément roulant,  $Dc$  la distance entre les centres des billes diamétralement opposées et  $\theta$  l'angle de contact des billes avec les bagues du roulement.

### II .7.Conclusion :

Ce chapitre a été, essentiellement dédié à l'état de l'art des méthodes de surveillance et de diagnostic des machines électriques et plus particulièrement la machine asynchrone à cage d'écureuil. Différents types de défauts qui peuvent affecter la machine et leurs origines ont été présentés. Enfin, un panorama sur les méthodes internes et externes utilisées dans le diagnostic des défauts de la machine a été présenté. L'étude détaillée des divers défauts affectant le fonctionnement de la machine nécessite l'élaboration de modèle de la machine en défaut, ce qui fera l'objet du chapitre suivant

# *CHAPITRE III*

*Modélisation de la machine  
asynchrone triphasée à cage à  
l'état sain.*

### **III.1 INTRODUCTION :**

La modélisation par la méthode des éléments finis "Finite Elément Méthode" (FEM), retenue parmi toutes les méthodes de modélisation utilisée pour la détection des différents défauts dans la machine asynchrone, offre un espace d'harmonique plus proche de celui de la machine réelle. Ceci permet une application fiable de la technique d'analyse des différents signaux de la machine. Une grande partie de ce chapitre sera consacré à cette modélisation avec une présentation détaillée des étapes nécessaires pour construire un modèle des éléments finis de la machine asynchrone triphasée à cage.

Dans notre travail, la détection des défauts dans la machine sera effectuée à travers la technique d'analyse des signatures du courant statorique "Motor Current Signature Analysis" (MCSA). Selon Joksimovic [23-24] la technique d'analyse spectrale du courant statorique ou bien d'un autre signal dans la machine à diagnostiquée nécessite une connaissance précoce très forte et sûre du contenu spectral de ces signaux à l'état sain, d'ailleurs cette technique par principe compare le contenu spectral du signal choisi à l'état sain avec le contenu spectral du signal à l'état défaillant.

Par analogie, le sang dans le corps humain joue le rôle du courant statorique dans la machine, alors dans la majorité des cas la détection des anomalies dans le corps humain s'effectue à partir de l'analyse sanguine, et la détection se fait soit par l'injection des nouvelles composantes dans le contenu du sang ou bien par la modification dans les composantes du sang. Cette opération nécessite néanmoins une connaissance parfaite des normes et un bilan sanguin à l'état sain, ainsi que les conditions de vie et le régime alimentaire lors de la prise du sang. Pour le courant statorique, la détection du défaut se fait soit par l'injection de nouveaux harmoniques qui caractérisent le défaut, ou bien par la perturbation d'anciens harmoniques dans le spectre. Tout comme dans l'homéostasie du corps humain où l'alimentation et le style de vie influencent les équilibres vitaux; les conditions de fonctionnement de la machine tel que l'effet de la charge, et le type de circuit d'alimentation influent fortement sur le contenu spectrale du courant statorique.

### **III.2. Méthodes de modélisation de la machine asynchrone :**

A ce jour, les modèles qui décrivent le fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil peuvent être décomposés en deux parties bien distinctes :

- les modèles dits "physiques" ;
- les modèles dits "comportementaux".

En ce qui concerne les modèles physiques, ce sont les lois régissant l'électromagnétisme qui sont utilisées pour décrire le fonctionnement de la machine asynchrone. Ces modèles sont divers et peuvent varier en complexité et/ou en précision selon la méthode de modélisation utilisée [25]. Nous ne les citerons pas tous mais nous pouvons énoncer les plus populaires dont ceux basés sur :

- la méthode des éléments finis.
- la méthode des réseaux de perméance.
- la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.

Les modèles comportementaux, quant à eux, reprennent les modèles physiques en y incluant des paramètres supplémentaires. Ces paramètres permettent la détection, et pour certains d'entre eux, la localisation du défaut observé. Nous introduisons alors une description exhaustive de ces différentes méthodes de modélisation pour permettre une compréhension adéquate des problèmes propres à chacune d'entre elles.

### **III.2.1. Méthode des réseaux de perméance**

La méthode des réseaux de perméance est basée sur la décomposition en tubes de flux élémentaires du circuit magnétique de la machine asynchrone. Chaque tube ainsi obtenu est caractérisé par sa perméance suivant qu'il se trouve dans le fer ou dans l'air. A partir de cette décomposition, on construit un réseau dit de perméance. Ces réseaux peuvent être assimilés à un circuit électrique habituel à la différence près que ce sont les flux et les différences de potentiels magnétiques qui entrent en jeu à la place des courants et des différences de potentiels électriques. Cette approche permet de prendre en compte les caractéristiques du fer utilisé pour la construction de la machine asynchrone. En effet, le calcul des différentes perméances ne peut se faire qu'en fixant une valeur précise pour la perméabilité relative du fer  $\mu_r$ . Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméances d'entrefer variables selon la position du rotor de la machine.

### **III.2.2 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés**

Les inductances propres et mutuelles entre le stator et le rotor de la machine prennent une place importante dans cette méthode de modélisation car elles contiennent la signature des différents phénomènes pouvant apparaître au sein de la machine asynchrone. Une modélisation précise de ces inductances mènera à un apport d'informations supplémentaires sur les signaux tels que le courant statorique ou encore la vitesse rotorique. Cette approche offre un bon compromis en termes de précision du modèle et de temps de calcul. De plus, ce type de

modélisation permet de prendre en compte un certain nombre de défauts d'origine électromagnétique tels que les défauts de court-circuit entre spires statoriques, les défauts de type rupture de barre rotorique et/ou de portion d'anneau de court-circuit. Nous pouvons aussi intégrer à ce type de modèle les défauts d'excentricité statique et dynamique.

### III.2.3 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une approche qui requiert un temps de calcul important. Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de dimension faible pour permettre de considérer le matériau magnétique linéaire sur les surfaces correspondantes. L'utilisation des équations de Maxwell, à partir des formes locales, permet de résoudre le problème. La résolution analytique correspondante est complexe et ne permet de traiter le phénomène de saturation que de façon approchée [26]. De nombreux logiciels ont vu le jour pour permettre d'aborder cette approche difficile. Nous pouvons citer Flux 2D, Flux 3D ou encore Maxwell. Le but principal de ces logiciels est, rappelons le, de déterminer la cartographie du champ magnétique présents dans les machines électriques dans l'objectif d'optimiser le dimensionnement de ces dernières.

### III.3 Modèle éléments finis de la machine asynchrone :

#### III.3.1 Formulations

Considérons un certain domaine ( $\Omega$ ) dans lequel un champ  $A$ , scalaire ou vectoriel, est la solution de l'équation aux dérivées partielles suivante [26] :

$$\checkmark D(A) = F \quad (\text{III.1})$$

Où  $D$  est un opérateur différentiel et  $F$  est une fonction connue, appelée terme de source.

Pour spécifier entièrement le champ  $A$ , il faut tenir compte des conditions aux limites  $\Gamma$  du domaine ( $\Omega$ )

$$L(A) = G \frac{\partial A}{\partial t} + HA \quad (\text{III.2})$$

Dans cette équation  $G$  et  $H$  sont des fonctions connues sur les frontières  $\Gamma$ . Il en est donc de même de la fonction  $L$ . On peut distinguer deux cas particuliers importants :

- 1- Si la fonction  $G$  est nulle, on aura une condition de Dirichlet imposant la valeur du champ  $A$  sur la frontière  $\Gamma$  :

$$L(A) = HA \quad (\text{III.3})$$

- 2- Si la fonction H est nulle, on aura une condition de Neumann imposant la valeur de la dérivée du champ A par rapport à la normale extérieure à la frontière  $\Gamma$  :

$$L(A) = G \frac{\partial A}{\partial t} \quad \text{(III.4)}$$

La solution de l'équation (III.1) compte tenu des conditions aux limites (III.2) peut être obtenue par une méthode de résolution numérique. La résolution numérique basée sur la méthode des éléments finis consiste à associer à celle-là un découpage du domaine  $\Omega$  en sous domaines élémentaire  $\Omega_e$  dans lesquels le champ A est, habituellement, approximé par une fonction polynomiale. Cela va se traduire par une transformation des équations différentielles en un système d'équations algébriques dont la résolution nous permet de déterminer la distribution du champ A dans le domaine  $\Omega$ .

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 :

- ✓ Les relations de couplage électromagnétique :

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \dots\text{(III.5)}$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \dots\text{(III.6)}$$

- ✓ Les relations de la conservation des flux :

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad \dots\text{(III.7)}$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad \dots\text{(III.8)}$$

- ✓ la relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad \dots\text{(III.9)}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \dots\text{(III.10)}$$

- ✓ La relation de la loi d'Ohm :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \dots\text{(III.11)}$$

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 ( $\Omega^{-1}m^{-1}$ )

### III.3.2 Le modèle employé

Selon les résultats escomptés et le temps de simulation dont on dispose, trois modes de résolutions peuvent être employé :

#### ✓ Le mode magnétostatique

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courant induits) de la machine car il imposée connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. On s'en servira essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les

sources sont indépendantes du temps. Le terme  $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{III.12})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{III.13})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{III.14})$$

La condition (II.9) permet de définir une fonction en vecteur potentiel A telle que:

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (\text{III.15})$$

Pour que A soit totalement définit, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition  $\text{div}(A)=0$  appelée jauge de Coulomb. Qui vérifiée automatiquement l'unicité de la solution.

Par la substitution de (III.15) et (III.14) dans (III.12) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \vec{A}) = \vec{J} + \text{rot}(\nu \vec{B}_r) \quad (\text{III.16})$$

Où

$\nu = 1/\mu$  : est la rélectivité magnétique.

### ✓ Le mode magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources du courant ou de la tension variant en fonction du temps, Le terme  $\frac{\partial B}{\partial t}$  n'est pas nul .Et qui suppose la densité de courant sinusoïdale, et simule en régime permanent. Ce qui permet d'obtenir des valeurs convenables du courant efficace. Ce mode pourra être utilisé pour étudier un schéma équivalent de la machine. Le système à résoudre est le suivant :

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \vec{A}) + j\omega\sigma \vec{A} = \vec{J} \quad (\text{III.17})$$

$\omega = 2\pi f$  : pulsation électrique ( $rad.s^{-1}$ ),  $j$  : unité imaginaire ( $j^2 = -1$ )

### ✓ Le mode magnétique transitoire

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

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{rot} \vec{B}_r + \sigma \text{grad} V = 0 \quad (\text{III.18})$$

### III.3.3 Le principe de la MEF

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 assurées la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [21].

Pour un élément triangulaire on a :

$$Ae(x, y) = a + bx + cy \quad (\text{III.19})$$

Pour les éléments quadrilatéraux on a:

$$Ae(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (\text{III.20})$$

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 :

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{n_e} A_e(x, y) \quad (\text{III.21})$$

$e$  : Numéro d'élément.

$n_e$  : 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 (Figure. III.1).

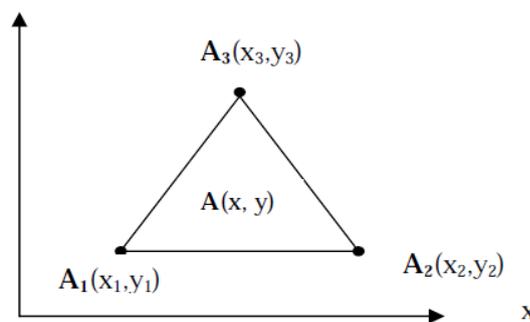


Figure.III.1.Fonction d'interpolation d'un élément

### III.4 Présentation du logiciel FLUX2D :

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite " bande de roulement " pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage. La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés :

✓ **Module Construction (Preflux)** Il contient trois fonctions :

- **(geometry & physics)** ; permet de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier, de déterminer le type du problème (magnétostatique, magnétodynamique ou

transitoire) et associer des matériaux et des propriétés (magnétiques et électriques) à chaque élément de la géométrie.

- **(Circuit)** définit le schéma et les données du circuit électrique.
- **(Materials data base)** permet de choisir et de construire une banque de matériaux.

Ce module assure aussi le couplage entre le circuit magnétique et le circuit électrique d'alimentation.

### ✓ **Module Solving Process**

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (Direct) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

### ✓ **Module Analysis**

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 prédéfini. 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.

L'enchaînement de ces modules de Flux 2D est schématisé par la figure III.2.

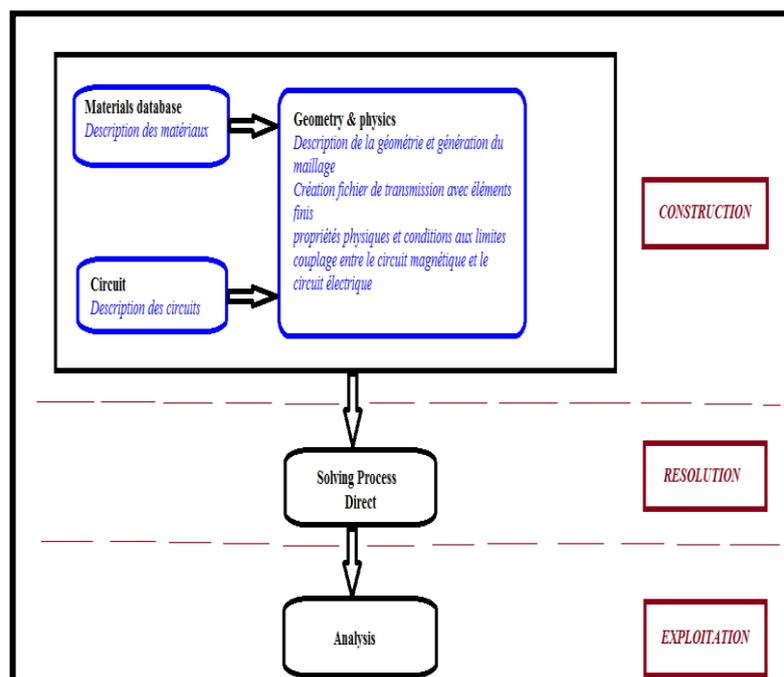


Figure.III.2. L'enchaînement des programmes de Flux 2D.

### III.5 Construction du modèle de la machine asynchrone :

On utilisera le logiciel flux sous sa forme 2D bien que l'inclinaison des encoches ainsi que les effets d'extrémités nécessiteraient pour une étude précise une présentation 3D. Les raisons de ce choix sont simples :

- Le temps de simulation est bien plus long encore en 3D qu'en 2D.
- L'influence de l'inclinaison des encoches n'est pas le but principal de notre étude.
- Les effets d'extrémités sont modélisés par des inductances et résistances calculées de façon analytique.

Les autres hypothèses qu'on a considéré dans le développement de notre modèle sont :

- L'hystérésis et les pertes fer sont négligées. l'alimentation est purement sinusoïdale.
- Les courants entre-barres sont négligés.
- L'air autour de la machine et l'arbre ne sont pas modélisés pour cela la condition de *Dirichlet* ( $A=0$ ) est appliqué sur les nœuds extérieurs du stator et celles intérieurs du rotor, ce qui force les lignes de flux à être tangentiels à ces deux surfaces.

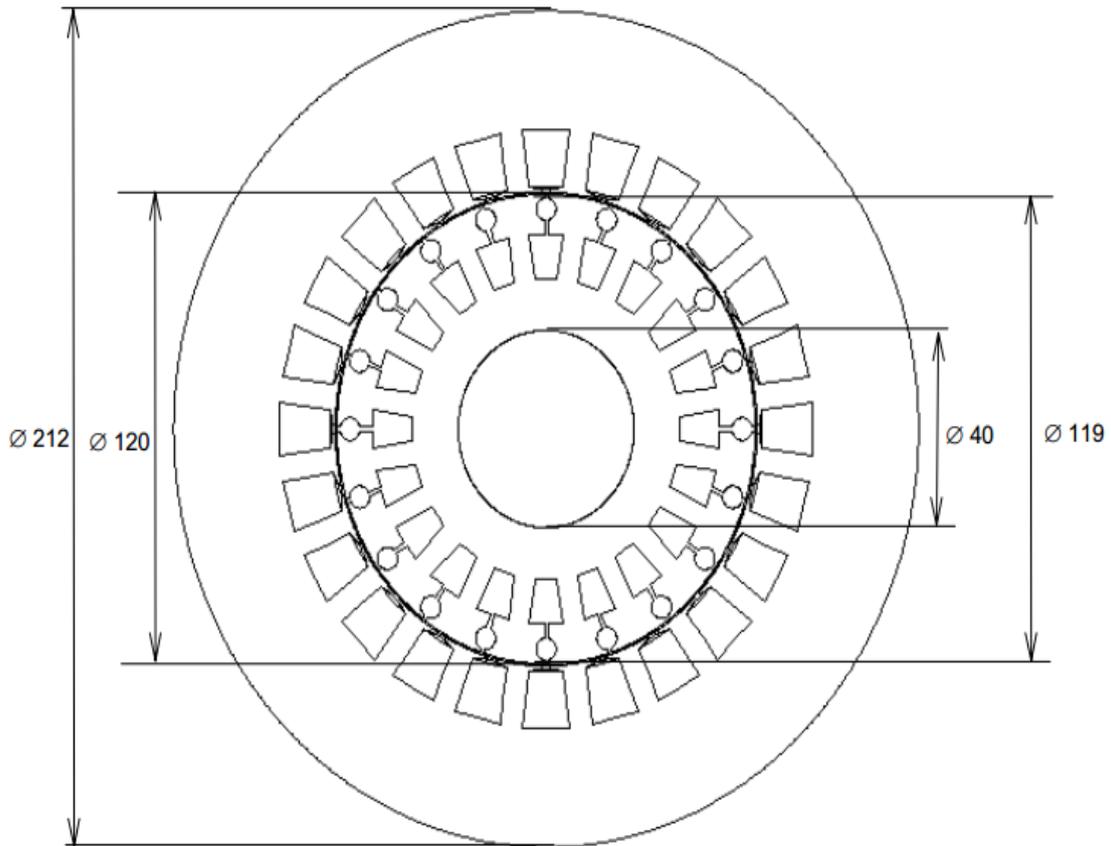
#### III.5.1 Les données de la machine étudiée

Les caractéristiques de la machine asynchrone étudiée sont données au tableau III.1.

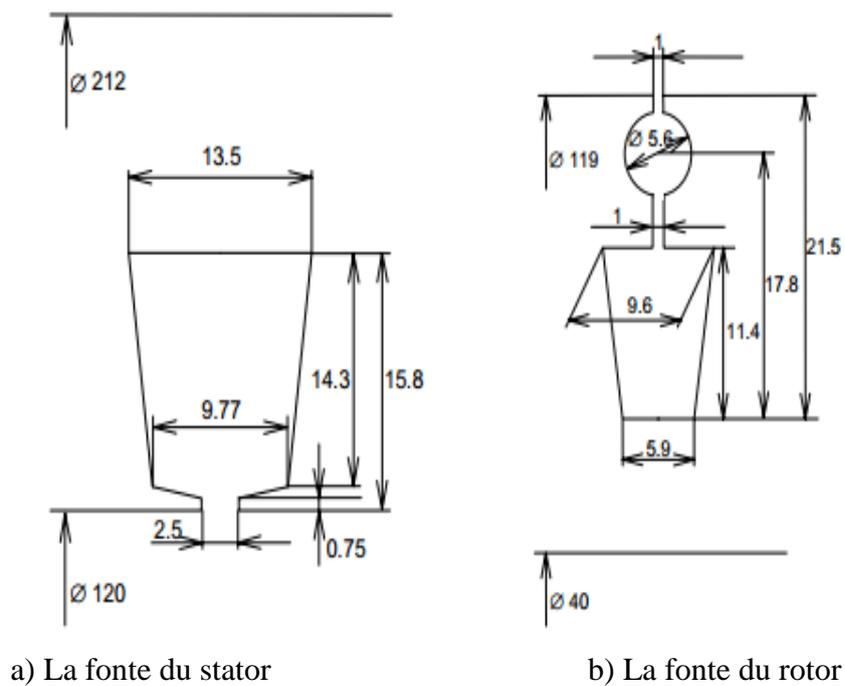
	Paramètres	Valeurs
MACHINE	Puissance	7.5kW
	Courant	8.89 A
	Tension	380V
	Fréquence	50Hz
	Vitesse nominale	2925tr/min
	Nombre de paires de pôles	2
	Longueur du paquet de tôles	125mm
STATOR	Nombre d'encoches	48
	Nombre de spires par phase	208
	Connexion	Y
	Diamètre extérieur	120mm
	Diamètre intérieur	90.4mm
	Résistance par phase	1.54Ω
ROTOR	Nombre d'encoches	20
	Diamètre extérieur	119mm
	Diamètre intérieur	40mm
ENTREFER	Epaisseur	0.5mm

Tableau.III.1. Les paramètres et son valeurs la machine asynchrone étudiée.

La figure III.3 et III.4 présente la géométrie de la machine étudiée et ses dimensions.



**Figure.III.3.** Les dimensions de la machine



**Figure.III.4.** Dimensions des fontes.

L'enroulement du stator est un enroulement de cuivre à deux couches, Figure 2-4, avec une étape raccourcie de 8/12 et  $w_1 = 208$  tours par phase.

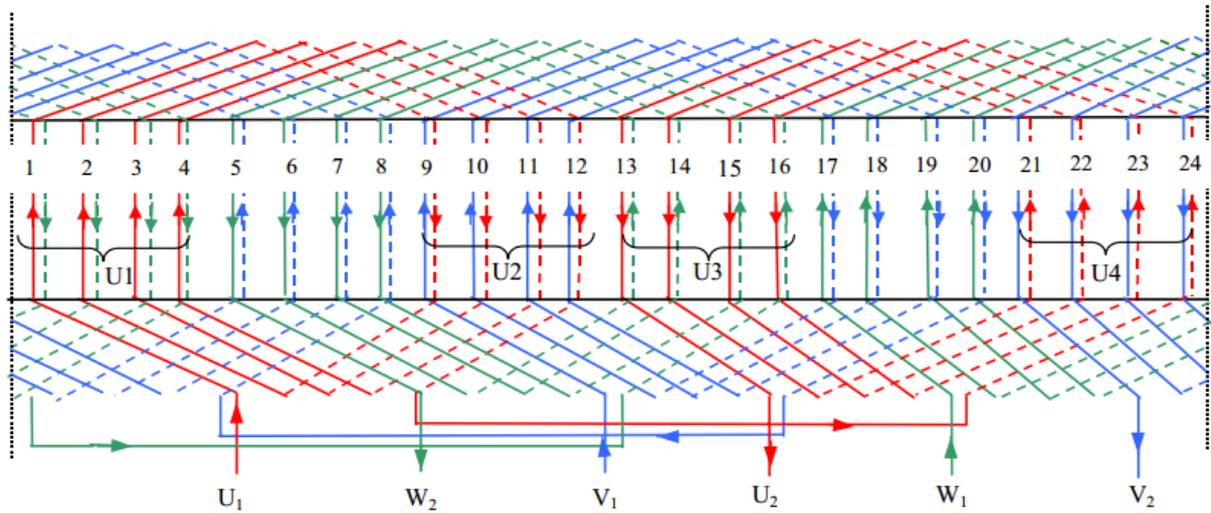


Figure.III.5. Bobinage statorique.

La figure III.6 présente le circuit magnétique de la machine asynchrone et la répartition de ces trois phases d'alimentation sur les encoches statoriques.

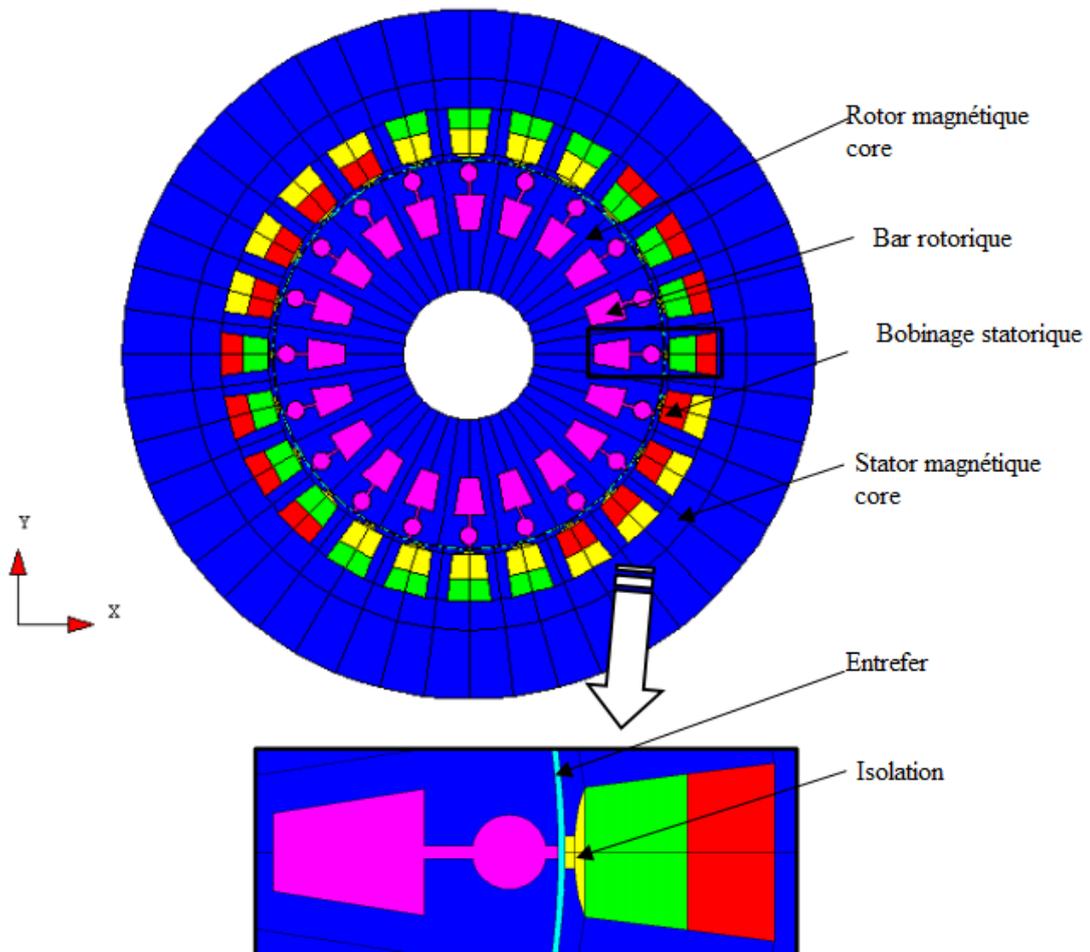


Figure.III.6. Circuit magnétique de la MAS.

### III.5.2 Procédure de construction du modèle par FLUX2D

Pratiquement, il suffit pour une machine saine de considérer un seul pôle grâce à la symétrie électrique et magnétique de la machine par rapport à son axe de rotation, mais ce n'est pas le cas pour une machine avec défaut où elle perd sa symétrie. Il faut donc réaliser la géométrie complète de la machine pour étudier son comportement avec défaut. [21]

Pour simplifier la méthode de construction, on commence par faire entrer des paramètres et des systèmes de coordonnées pour le modèle puis schématiser la première encoche statorique et la première barre rotorique. Le reste de la géométrie et du maillage est créé par propagation.

Les paramètres à entrer représentent les dimensions des différentes parties de la machine, mais sont indépendants d'aucune unité de mesure. L'intérêt de ces paramètres est qu'ils simplifient l'entrée du problème et les modifications dans la géométrie par définition des coordonnées des points en fonction de ces paramètres, par exemple, on définit le diamètre intérieur de stator comme (DIS) et si on veut le changer il suffit de changer son paramètre, Flux2D va automatiquement mettre à jour les points et les lignes correspondant à ce paramètre et le maillage. Sans ce paramètre il faut redéfinir les coordonnées de chaque point et chaque ligne cités à cette distance ainsi que le maillage.

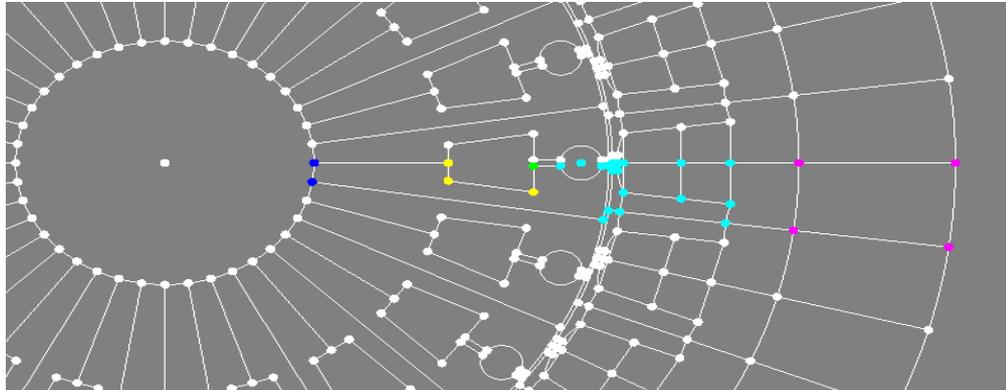
Lorsque on entre les points de l'encoche statorique et de celle rotorique et relie entre eux par des lignes et des arcs, les surfaces des régions sont automatiquement construits par ces lignes. Puis on construit les deux lignes intérieure et extérieure du rotor et celle extérieure de stator.

### III.5.3 Génération du maillage

Les éléments du découpage sont générés automatiquement par un générateur de maillage dans le module Preflux, mais le size du maillage peut être contrôlé par création des points et des lignes du maillage puis l'association de ces derniers aux points de la géométrie. Preflux donne l'avantage de propagation des surfaces et leur maillage au même temps.

Pour compléter la géométrie facilement on ajoute des transformations qui doublent rapidement les surfaces et les lignes : pour le rotor, la transformation est une rotation autour d'un point, définie par les coordonnées de ce point et l'angle de rotation. Dans notre cas le point est  $(0,0)$ , l'angle égal à  $360/20$ . Pour le stator on définit une transformation du même type avec un angle égale à  $360/24$ . On applique la première à la surface qui représente la barre rotorique 19 fois et la deuxième à la surface de l'encoche statorique 23 fois avec le choix de commande **Add Faces and associated Linked Mesh Generator** pour doubler les surfaces avec la prise en

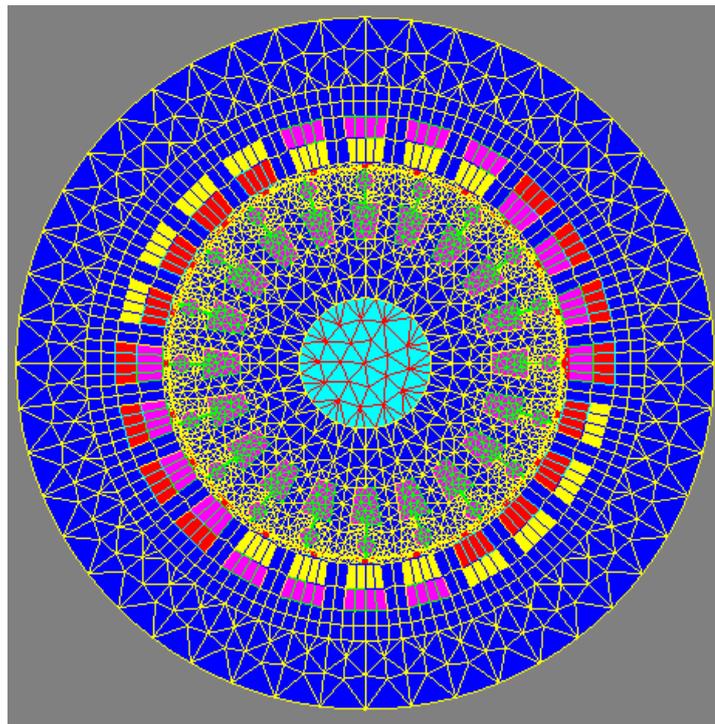
compte de leur maillage. Il reste le diamètre intérieur de stator, pour le compléter on relie entre deux encoches par un arc puis double cet arc 23 fois en appliquant la même transformation de l'encoche statorique. Finalement on choisit la commande **Build Faces** pour créer le reste des surfaces. La figure ci-dessous présente la géométrie avec les points du maillage.



**Figure.III.7.** Les points de maillage .

Jusqu'à ici le maillage n'est pas effectué, pour mailler la géométrie on choisit la commande **Mesh lines** puis la commande **Mesh faces** et le maillage sera schématisé.

La figure II.7 représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.



**Figure.III.8.** 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 le temps de calcul sans perte sensible d'information. La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre, lors de nos

simulations nous appliquons la condition de Dirichlet sur tout le contour de la machine avec un potentiel vecteur nul.

### III.5.4 Création des matériaux

Pour notre modèle on utilise trois types de matériaux : STEEL\_NLIN (défini comme un matériau ferromagnétique non linéaire), l'Aluminium et l'air.

L'aluminium est défini comme un matériau linéaire par une résistivité et une perméabilité relative constante. Il n'est pas nécessaire d'ajouter d'autres propriétés (propriétés thermiques par exemple) parce qu'ils ne sont pas prises en compte pour notre cas (analyse magnétique).

Le matériau ferromagnétique STEEL\_NLIN est caractérisé par la courbe d'aimantation  $B$  ( $H$ ), qui est non linéaire, pour tenir en compte de la saturation du circuit magnétique.

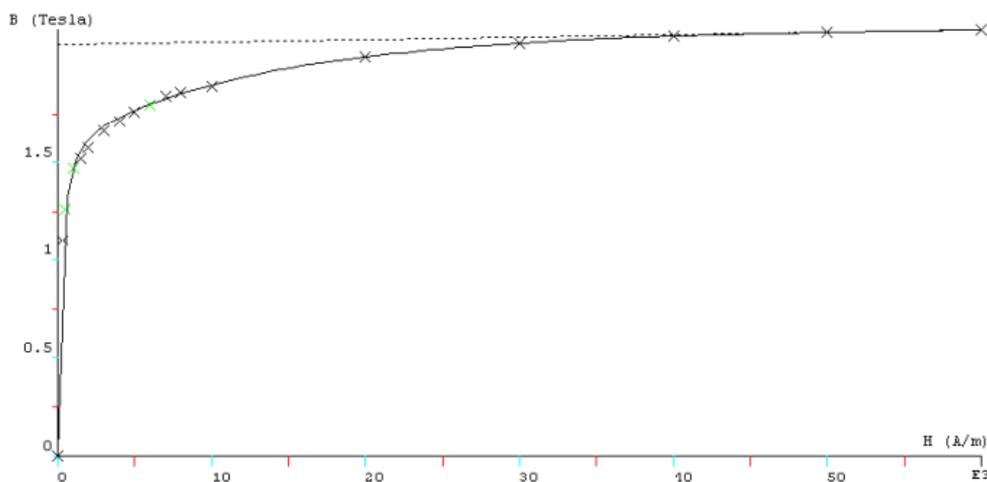


Figure .III.9. La courbe d'aimantation  $B$  ( $H$ ) du matériau ferromagnétique.

### III.5.5 Le circuit électrique

Pour bien représenter le circuit électrique de la machine il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court-circuit), figure II.9.

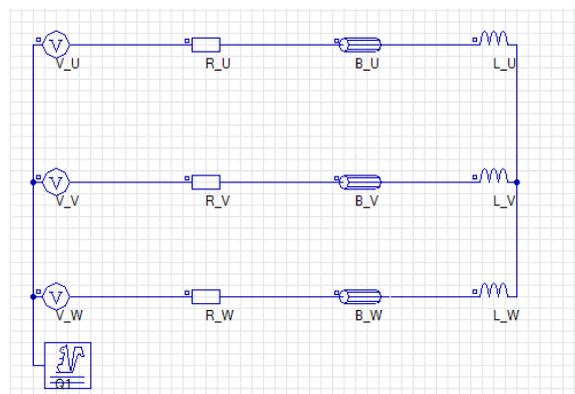


Figure.III.10. Le circuit électrique d'alimentation .

Q1 : est un macro-circuit (un dispositif du logiciel Flux 2D) utilisé pour modéliser la cage d'écuriel de la machine, c'est un circuit fermé qui contient des barres rotorique, des résistances et des inductances de fuite correspondent aux régions d'inter-barre d'anneaux de court-circuit (arcs entre deux barres adjacentes), figure III.12. V-U , V-V et V-W sont les sources de tension d'alimentation (voir figure II.12). B\_U, B\_V, B\_W représentant le bobinage statorique .R\_U, R\_V, et R\_W sont les résistances de chute de tension dans le réseau. L\_U, L\_V et L\_W sont les Inductances de fuite des têtes de bobines, elles sont calculées analytiquement.

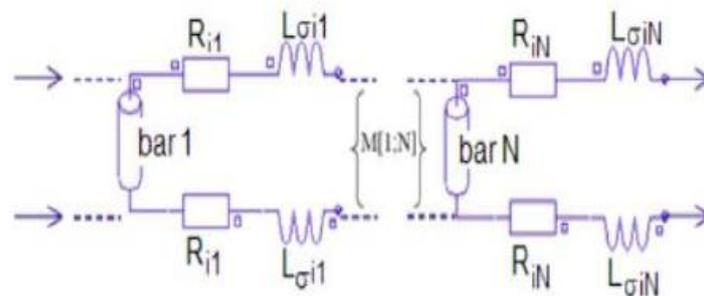


Figure.III.11. Circuit équivalent de la cage rotorique.

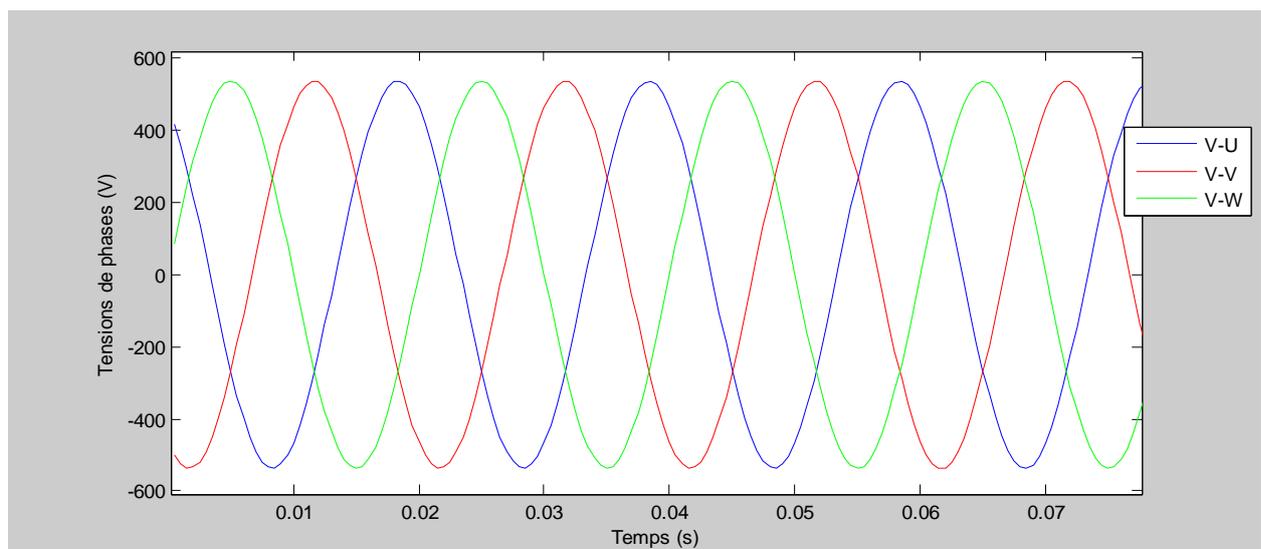


Figure.III.12. Les tensions d'alimentation  $V_U$ ,  $V_V$  et  $V_W$ .

### III.5.6 Les propriétés physiques et régions

Le problème étant défini par une application magnétique de 2D en magnéto transitoire (pas à pas dans le temps), auquel, le circuit électrique et les matériaux créés précédemment sont importés. Les valeurs des résistances, des inductances, et des tensions d'alimentation, sont

définies aussi ici. La prise en considération de mouvement (soit rotation ou translation) nécessite l'existence des ensembles mécaniques, ces derniers sont de trois types :

- Fixé : définit les parties fixes du modèle.
- En mouvement : définit les parties du modèle qui sont en mouvement.
- Compressible : définit les régions entre les parties fixes et celles en mouvement.

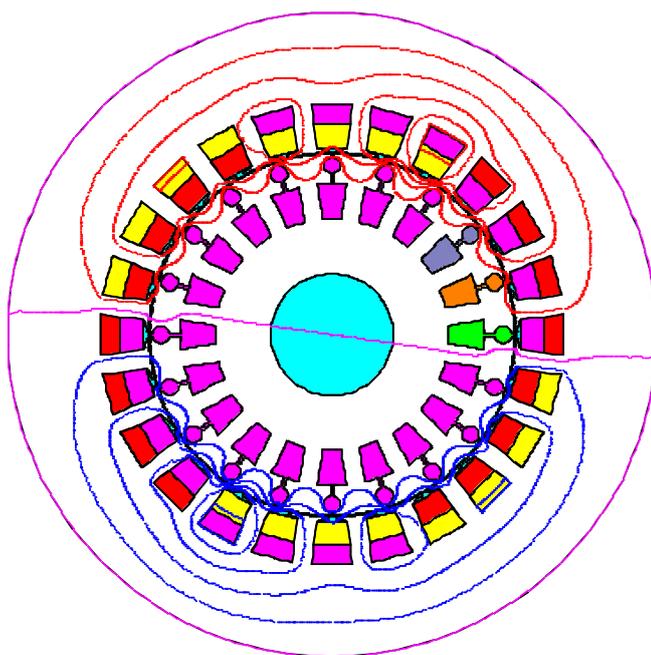
Dans notre modèle les trois types existent, le stator présente la partie fixe, le rotor est en mouvement (rotation suivant un axe parallèle à Oz) et l'entrefer est compressible.

Le couplage entre la géométrie du modèle et le circuit d'alimentation est effectué par la création des régions surfaciques, chacune de ces régions est défini par son nom, son type, matériel, l'élément électrique correspondant dans le circuit, le sens du courant et l'ensemble mécanique. Puis ces régions sont associées aux surfaces de la géométrie par la commande (**assign regions to faces**).

La rotation est réalisée par la considération d'une bande de mouvement. A chaque instant le rotor est déplacé par un certain angle. La seule partie de la géométrie qui sera remaillé est la bande de mouvement qui couple les éléments du rotor avec ceux de stator. Dans notre cas la bande de mouvement est constituée par la région de l'entrefer.

#### III.6. Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain :

##### Résultat de simulation :



(a)

Résultats isovaleurs	
Grandeur : Equi flux Weber	
Temps (s.) : 100E-6 Pos (deg): 0	
Ligne / Valeur	
1 /	-157,92852E-6
2 /	-126,34281E-6
3 /	-94,75711E-6
4 /	-63,17141E-6
5 /	-31,5857E-6
6 /	0
7 /	31,5857E-6
8 /	63,17141E-6
9 /	94,75711E-6
10 /	126,34281E-6
11 /	157,92852E-6

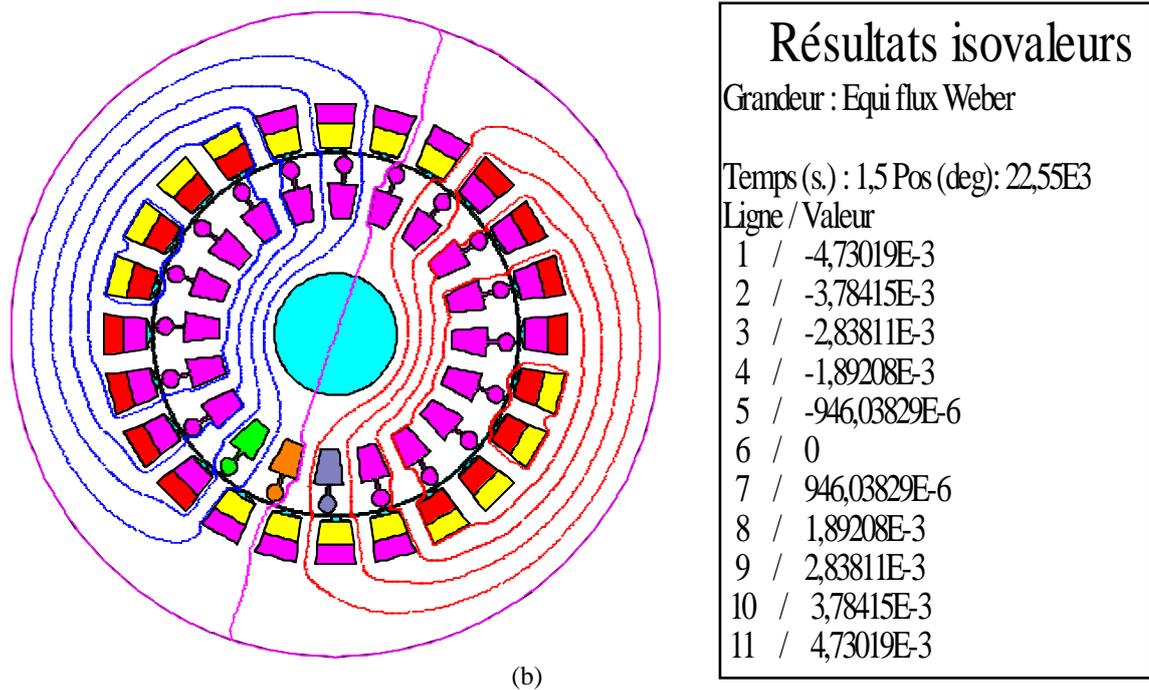
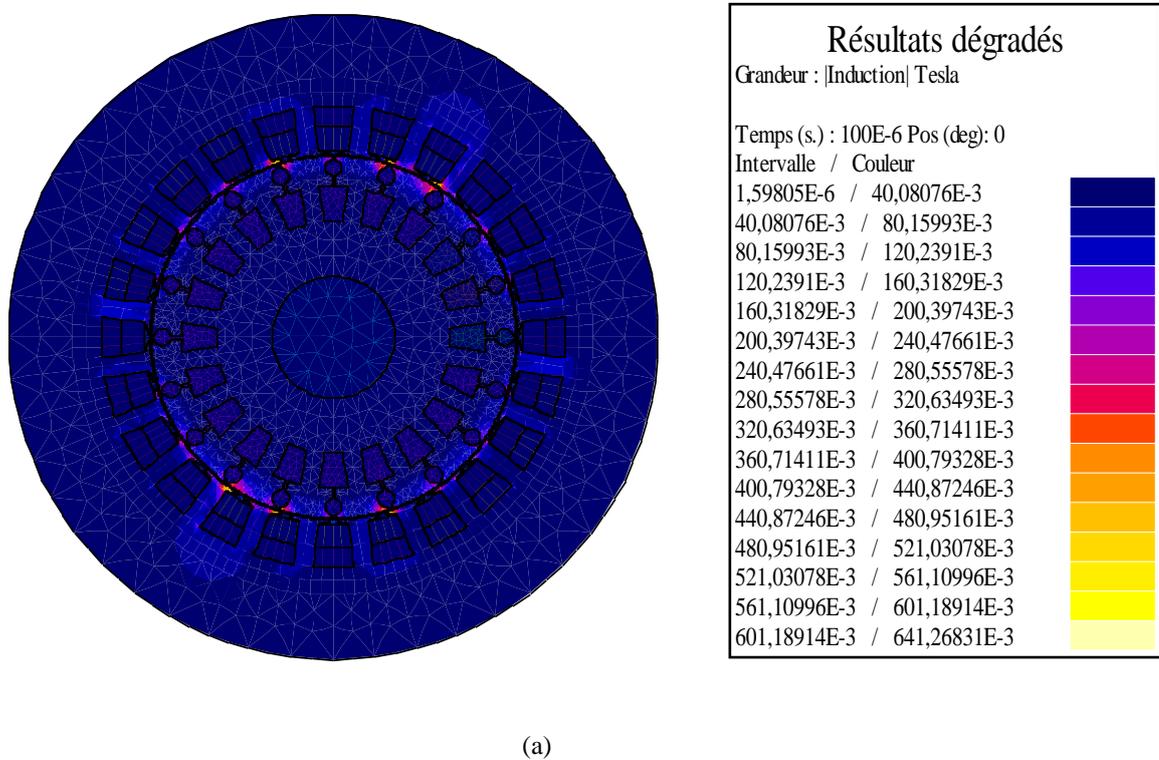
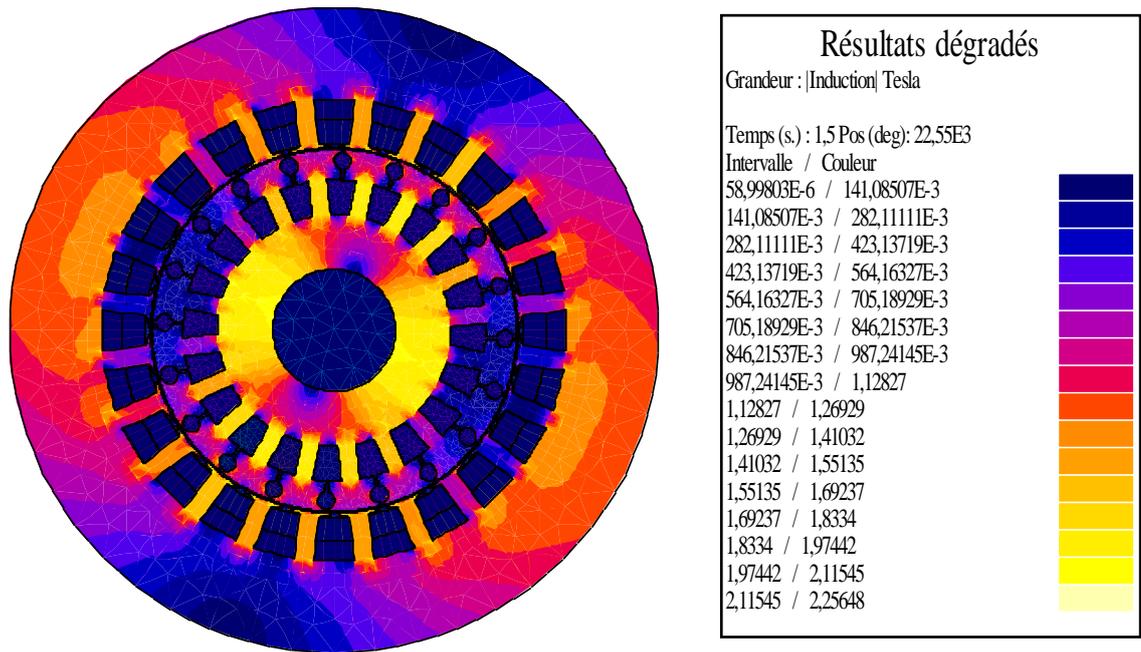


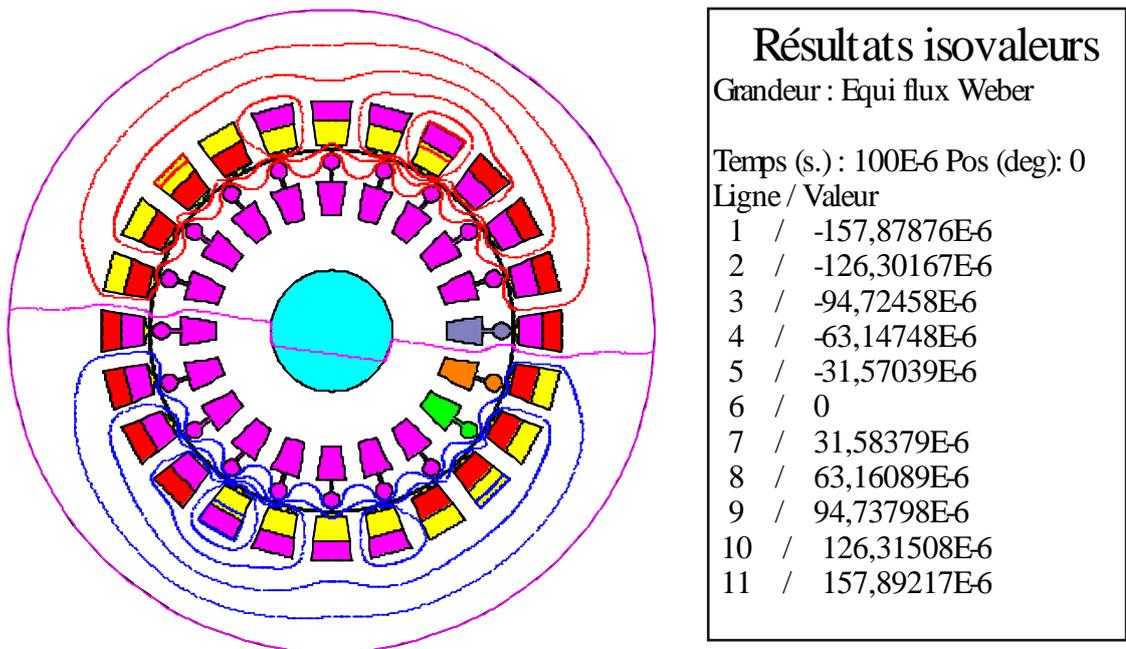
Figure II.13. la distribution des lignes du flux à vide (a) au démarrage ;(b) en régime permanent





(b)

Figure II .14.l'induction B à vide(a) au démarrage ;(b) en régime permanent.



(a)

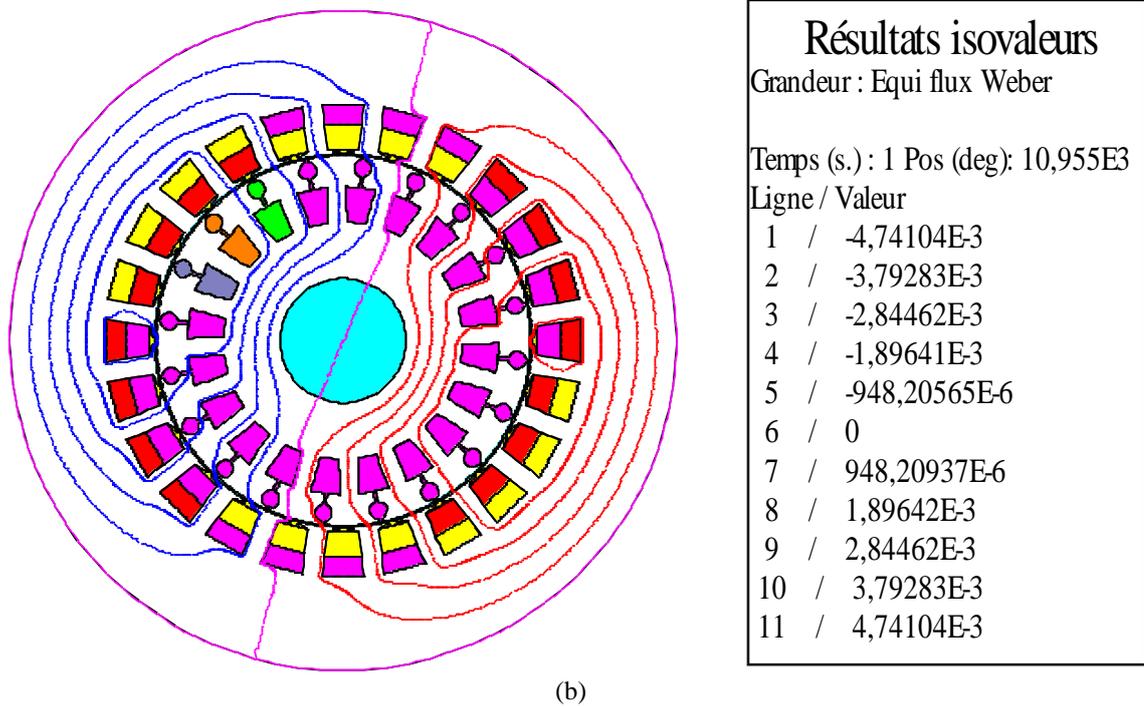
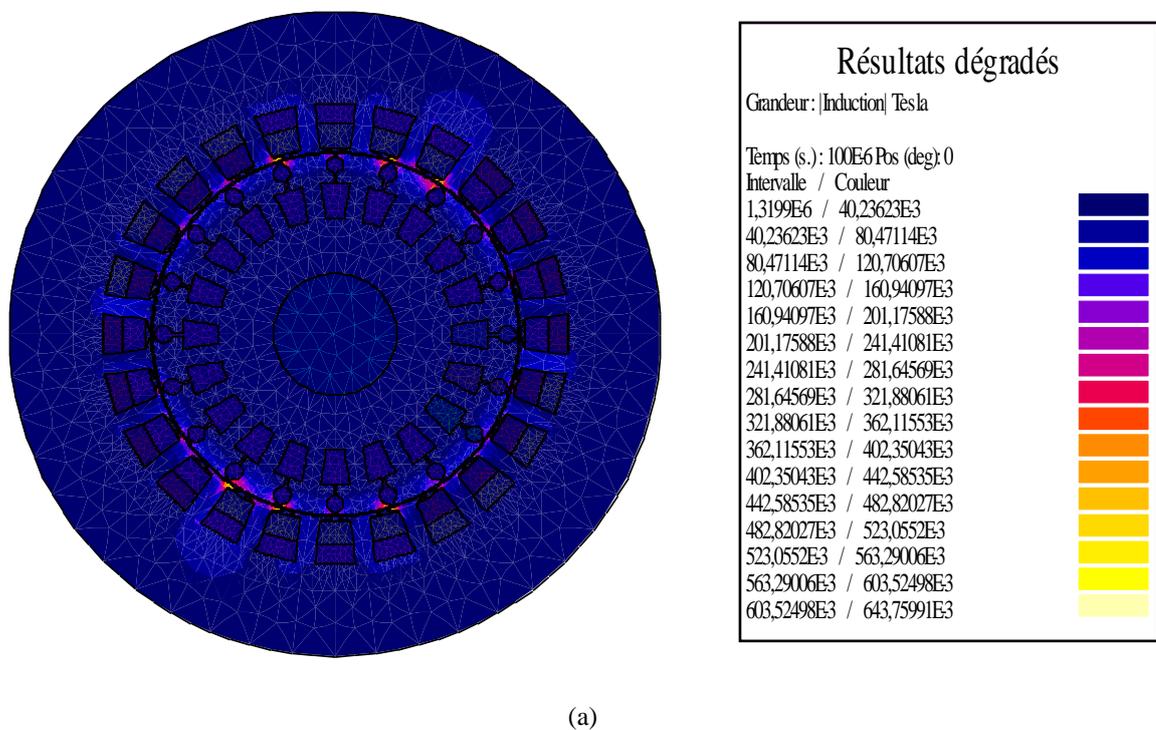
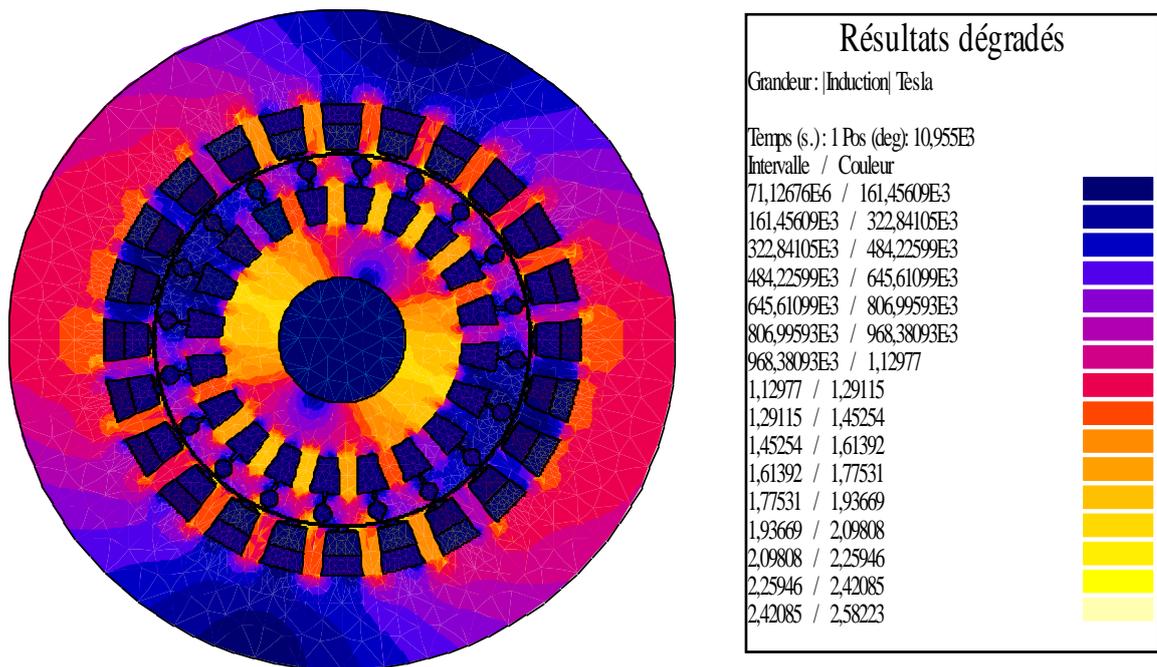


Figure II.15 la distribution des lignes du flux en charge (a) au démarrage ;(b) en régime permanent





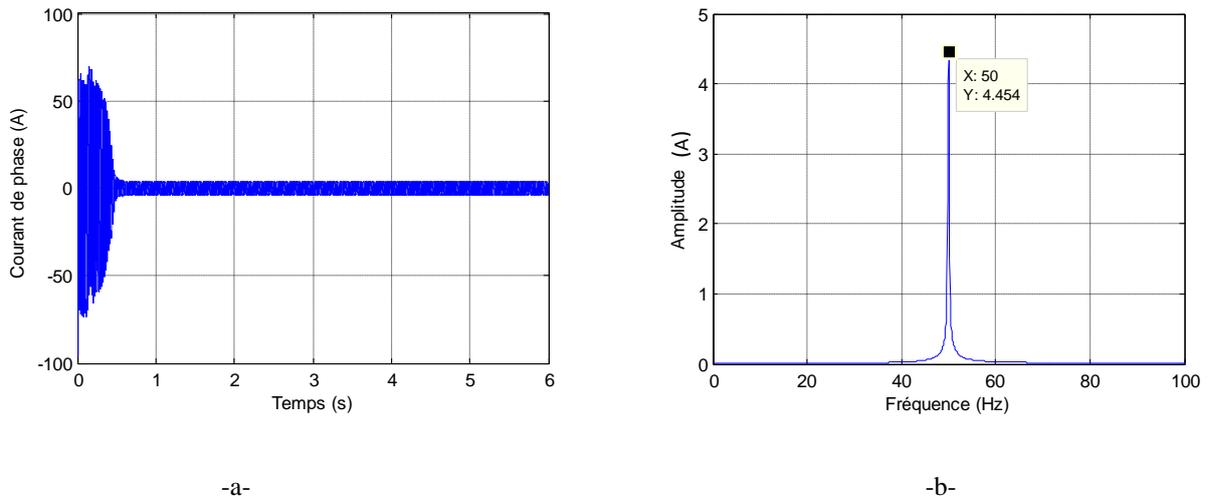
(b)

**Figure II.16** l'induction B en charge (a) au démarrage ;(b) en régime permanent.

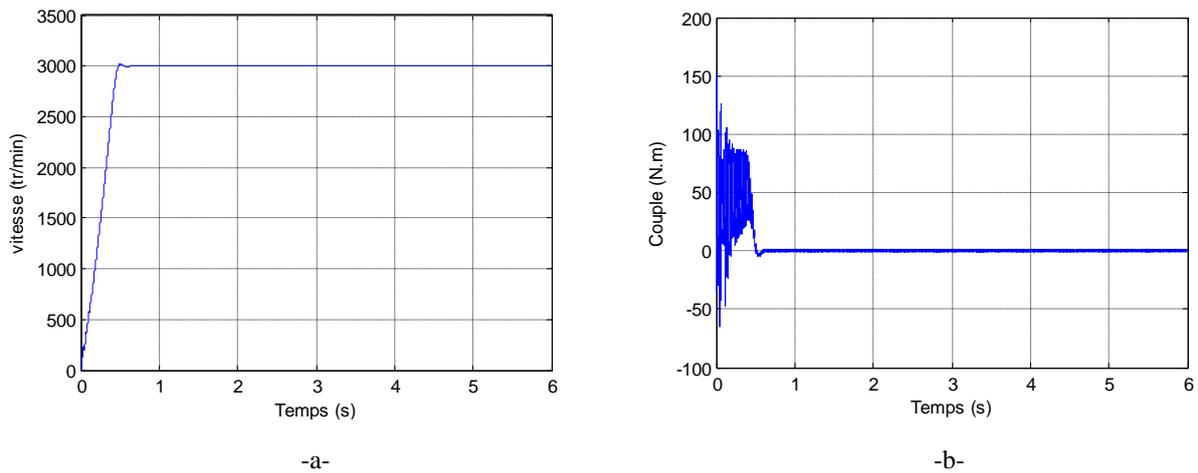
Le modèle de la machine asynchrone à l'état sain a été simulé à vide sous une alimentation triphasée nominale et équilibrée dont les résultats sont présentés à la figure (III.20) pour un premier essai. Comme deuxième essai, le moteur démarre avec une charge de 75% de la valeur nominale, les résultats sont présentés à la figure (III.21).

La figure III.20 (a) présente le courant d'une phase statorique, qui après un régime transitoire atteint son régime permanent convenable. La figure (b) montre son spectre correspondant qui ne contient aucun harmonique signature de défaut nous informant ainsi sur son état sain.

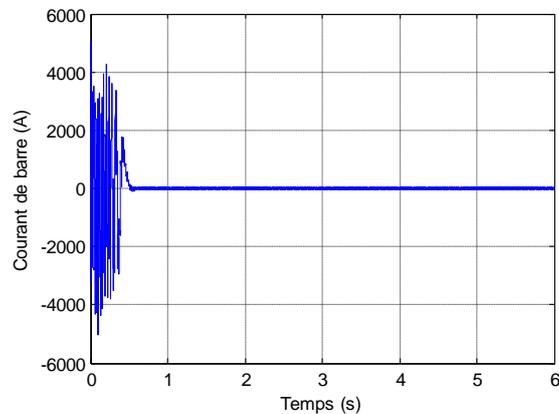
De même la figure III.21 montre le couple électromagnétique qui passe par un état transitoire et atteint le régime permanent. On n'observe aucune ondulation caractéristique de défaut. Il en est de même pour la vitesse qui ne présente aucune ondulation signe que le moteur est sain.



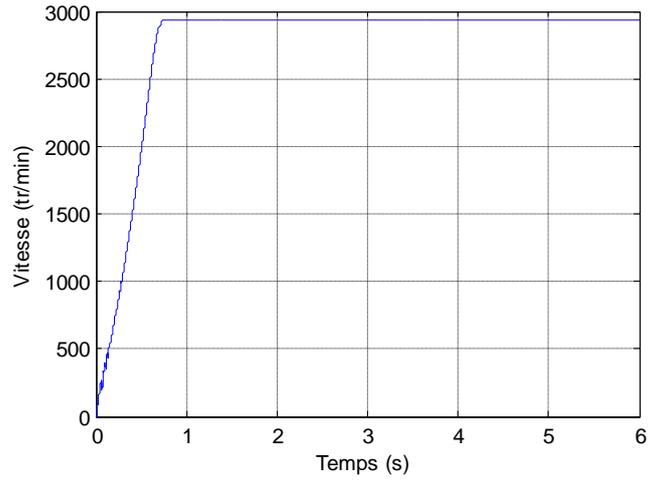
**Figure.III.17.**Forme d'onde du courant statorique (a) phase V\_U, (b) Spectre (avec zoom) du courant statorique phase V\_U.



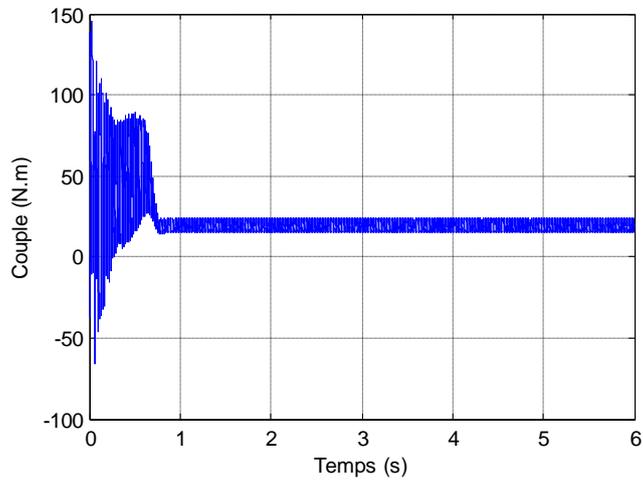
**Figure.III.18.** Vitesse de rotation de la machine a l'état sain (a) a vide, (b) Couple électromagnétique de la machine sain à vide.



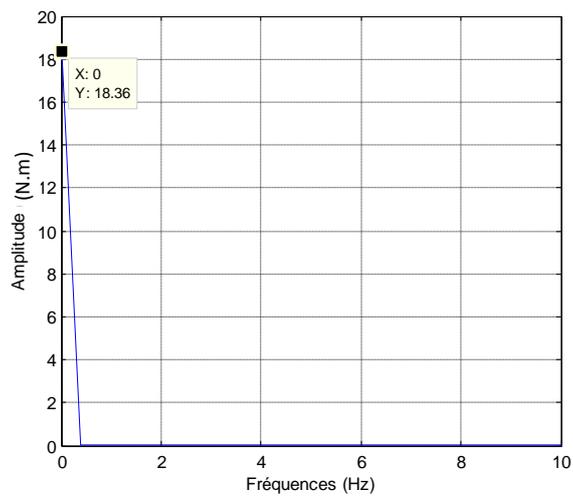
**Figure.III.19.**Le courant des barres a l'état sain, a vide la barre (1).



**Figure.III.20.** Vitesse de rotation de la machine a l'état sain en charge 75%.



**Figure.III.21.** Couple électromagnétique de la machine saine en charge 75%.



**Figure.III.22.** Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine saine en charge 75%.

### **III.7.Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle numérique de la machine asynchrone, basé sur la méthode des éléments finis. On a commencé par la représentation de la méthode de calcul de champ par les éléments finis en citant les équations qui régissent le champ électromagnétique dans les machines électriques qui sont les équations de Maxwell. Puis on est passé à la description du principe de calcul du logiciel utilisé.

A la fin de ce chapitre on a présenté les résultats de simulation de la modélisation de la machine étudiée pour l'état sain à vide et en charge de 75% de la charge nominale.

# *CHAPITRE IV*

*Modélisation de la machine*

*asynchrone triphasée à cage avec*

*défauts.*

## **IV.1. INTRODUCTION:**

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de simulation d'une machine asynchrone (MASY) dans le cas de la présence de défaut, principalement la rupture de barres. Les simulations sont réalisées à partir d'un Logiciel dédié dans son origine à l'étude des machines électriques dans le cas général où la méthode des éléments finis est adoptée pour résoudre les problèmes électromagnétique et mécanique régis par des équations aux dérivées partielles caractéristiques aux phénomènes physiques à traiter dans certains cas de nos simulations. L'effet d'encoche et de la saturation magnétique des parties ferromagnétiques de la machine sont pris en compte. Cette étude a pour but de vérifier l'impact de localisation des défauts de la MASY, principalement un défaut rotorique qui est dû à la cassure d'une ou de plusieurs barres.

## **IV.2. Modélisation de la machine AS à cage avec défaut de cassure de barres :**

Comme il a été déjà mentionné précédemment, selon les études menées sur les différents modes de défaillance dans les machines à cage d'écureuil, que les défauts liés au rotor contribuent à 20% du total des défaillances, notamment le défaut de la rupture de barres rotoriques. Ce défaut sera donc abordé en détail dans ce chapitre. Cependant, ce pourcentage minimise la part de ce défaut dans l'ensemble des atteintes de la machine car, les défauts de cassure de barres ou ceux des portions d'anneaux de court-circuit, sont difficiles à diagnostiquer en raison de l'inaccessibilité au rotor de manière directe. En outre, ce type de défaut s'il n'est pas détecté pendant son stade primaire peut se propager aux barres voisines conduisant à une panne soudaine.

Dans le cadre de notre travail et à partir du logiciel Flux 2D, nous avons pu simuler le comportement de la machine dans le cas d'un défaut rotorique qui peut apparaître dans une MASY. Ce dernier sera simulé par l'augmentation de la résistance rotorique d'une barre où le défaut peut être localisé. Les paramètres physiques et géométriques de chaque partie de la MASY sont accessibles via des fenêtres implémentées sous Flux 2D qui permettent facilement d'agir sur le comportement des matériaux utilisés dans la conception de la machine.

### **IV.2.1 Cas de cassure d'une seule barre :**

#### **IV.2.1.1 Résultats de la simulation de cassure d'une seule barre.**

Les résultats des simulations du comportement électromagnétique et mécanique de la MASY sont largement présentés dans le cas de la présence d'un défaut rotoriques. Dans un premier temps nous avons présentés la répartition bidimensionnelle du champ magnétique au

sein de la MASY aux instants choisis respectivement au début du régime transitoire ( $t = 0$  s), à la fin du régime transitoire ( $t = 0.8$ s) et enfin au régime permanent de la MASY. Aussi nous avons présentés le comportement électrique et mécanique de la MASY dans le cas de la présence d'un défaut rotorique qui est dans ce cas, la rupture d'une seule barre rotorique.

L'outil de simulation utilisé est Flux-2D. Ce dernier possède une base de données de chaque matériau qui rentre dans la conception de la machine. Pour pouvoir modéliser le défaut de la machine qui est du à une rupture d'une barre rotorique nous avons augmenté la valeur de la résistance rotorique jusqu'à ce que le défaut sera perceptible.

Selon les résultats des simulations présentées, nous pouvons dire que la présence de la rupture d'une seule barre a légèrement affecté le comportement magnétique (probablement du au pas de calcul assez grand  $T_e=1e-4$ s car le préférable serait  $1e-6$ s) de la machine. En effet, selon les résultats présentés, la répartition des lignes de champ magnétique est presque symétrique, cependant l'analyse temporelle des courants statorique montre l'existence d'ondulations d'amplitude et leur impact sur son spectre grâce à l'apparition de certains harmoniques autour du fondamental, signe que le défaut existe.

### IV.2.2 Cas de cassure des deux barres :

#### IV.2.2.1 Résultats de simulation de cassure de deux barres.

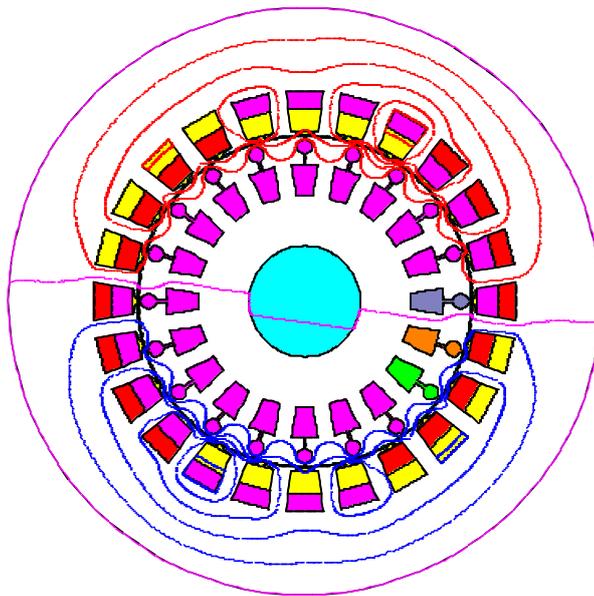
Les résultats ci-dessous présentent les résultats des simulations du comportement électrique, magnétique et mécanique d'une machine asynchrone ayant un défaut rotorique. Dans cette partie, nous avons augmenté le nombre de barres cassées en deux. Ceci peut être produit dans une machine réelle. De même, comme le cas précédent, ce type de défaut est modélisé par augmentation de la résistance de la barre rotorique concerné par le défaut. Les résultats présentés ci-dessous montrent une répartition asymétrique des lignes de champ magnétique. Aussi, la cassure de deux barres a influencé considérablement le comportement mécanique de la machine par l'apparition des oscillations au niveau du couple ainsi que sur la vitesse de rotation de la machine ceci d'une part, d'autre part l'effet est bien évident sur le courant de phase par les ondulations de l'amplitude et les harmoniques de part et d'autre dans le spectre du fondamental.

IV.2.3 Cas de cassure des trois barres :

IV.2.3.1 Résultats de la simulation de cassure des deux barres.

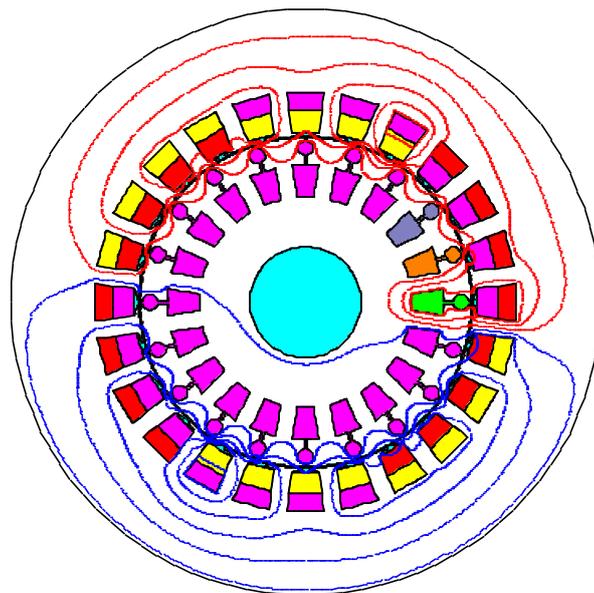
Dans la partie ci-dessous nous présentons les résultats des simulations du comportement de la machine dotée cette fois-ci de trois barres cassées. Avec l'augmentation du nombre de barres cassées, la sévérité du défaut sur le comportement de la machine augmente. On peut dire alors que la rupture d'une des barres rotoriques influe sur le comportement de la machine, cette influence augmente avec l'augmentation du nombre de barres affectées par le défaut.

IV.3.1.Effet du nombre de barres cassure sur la carte du champ de la machine :



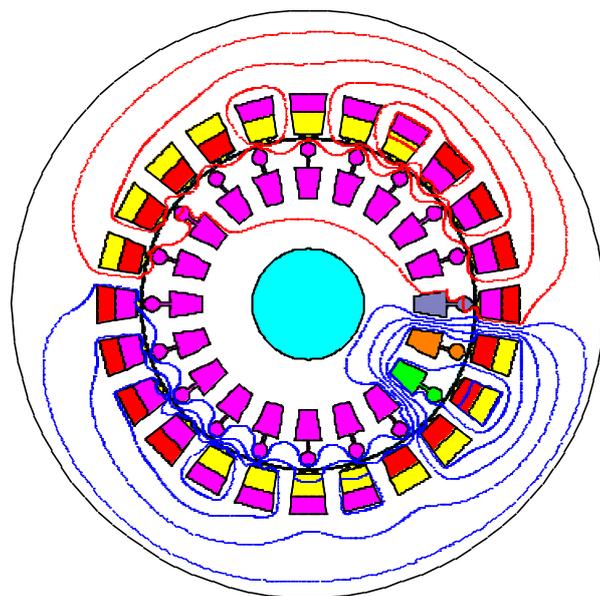
(a)

Résultats isovaleurs	
Grandeur : Equi flux Weber	
Temps (s.) : 100E-6 Pos (deg): 0	
Ligne / Valeur	
1 /	-157,87876E-6
2 /	-126,30167E-6
3 /	-94,72458E-6
4 /	-63,14748E-6
5 /	-31,57039E-6
6 /	0
7 /	31,58379E-6
8 /	63,16089E-6
9 /	94,73798E-6
10 /	126,31508E-6
11 /	157,89217E-6



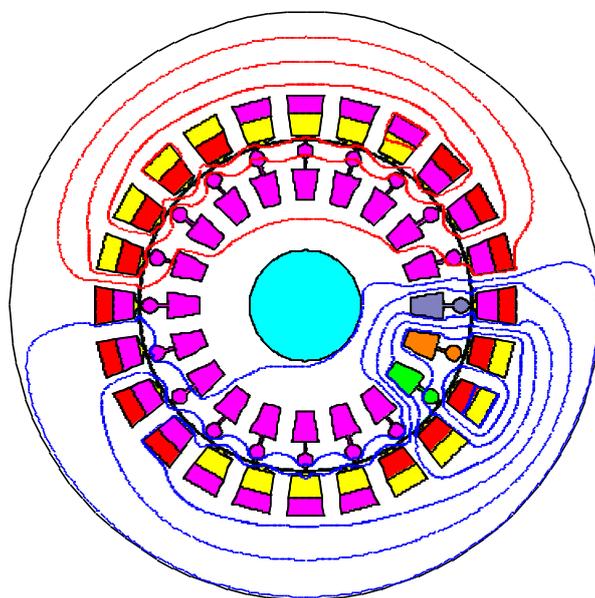
(b)

Résultats isovaleurs	
Grandeur : Equi flux Weber	
Temps (s.) : 100E-6 Pos (deg): 0	
Ligne / Valeur	
1 /	-157,78057E-6
2 /	-127,21319E-6
3 /	-96,64582E-6
4 /	-66,07844E-6
5 /	-35,51107E-6
6 /	-4,9437E-6
7 /	25,62367E-6
8 /	56,19105E-6
9 /	86,75842E-6
10 /	117,32579E-6
11 /	147,89317E-6



Résultats isovaleurs	
Grandeur : Equi flux Weber	
Temps (s.) : 100E-6 Pos (deg): 0	
Ligne / Valeur	
1 /	-184,20615E-6
2 /	-149,66809E-6
3 /	-115,13003E-6
4 /	-80,59198E-6
5 /	-46,05392E-6
6 /	-11,51587E-6
7 /	23,02218E-6
8 /	57,56024E-6
9 /	92,09829E-6
10 /	126,63635E-6
11 /	161,17441E-6

(c)

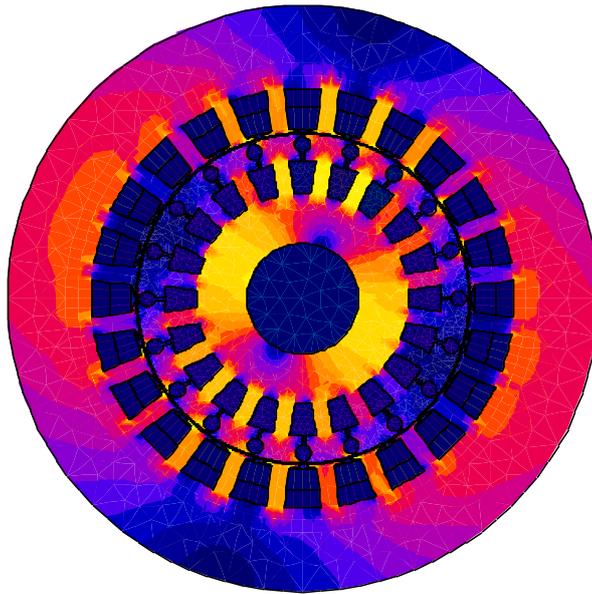


Résultats isovaleurs	
Grandeur : Equi flux Weber	
Temps (s.) : 0,002 Pos (deg): -36,003E-3	
Ligne / Valeur	
1 /	-3,45811E-3
2 /	-2,88702E-3
3 /	-2,31593E-3
4 /	-1,74484E-3
5 /	-1,17375E-3
6 /	-602,65709E-6
7 /	-31,56585E-6
8 /	539,52535E-6
9 /	1,11062E-3
10 /	1,68171E-3
11 /	2,2528E-3

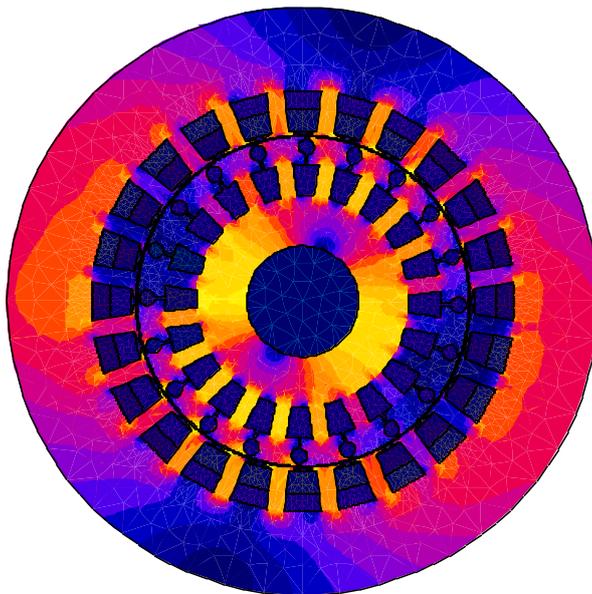
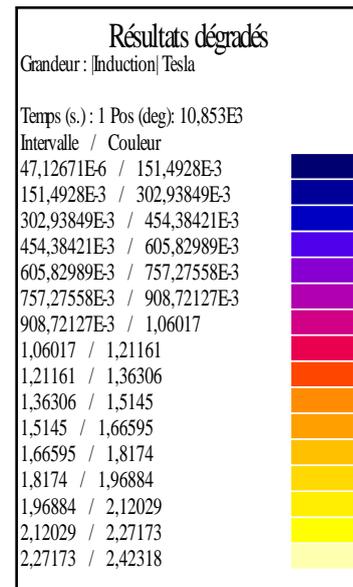
(d)

Figure IV.1. la distribution des lignes du flux au démarrage (a) machine saine ;(b) avec une barre cassée ;(c) avec deux barres cassées ;(d) avec trois barres cassées.

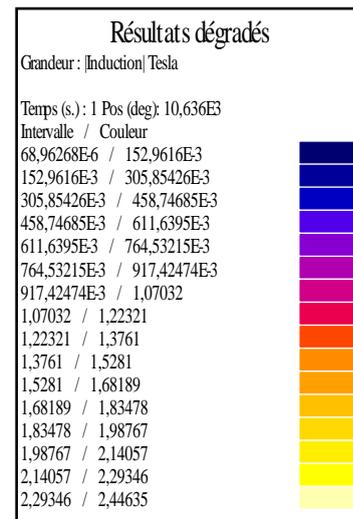
La figure IV.1 représente la distribution des lignes de flux dans la machine qui fait apparaître le déséquilibre provoqué par la rupture de barres. Pour un moteur sain, les courants dans les barres entraînent une répartition symétrique des lignes de flux autour de chaque pôle. L'absence des courants dans les barres cassées annule leurs participations à la création du flux, ce qui explique le resserrement des lignes de flux autour de ces barres. On remarque aussi que le déséquilibre de répartition des lignes de flux augmente en fonction du nombre des barres cassées.

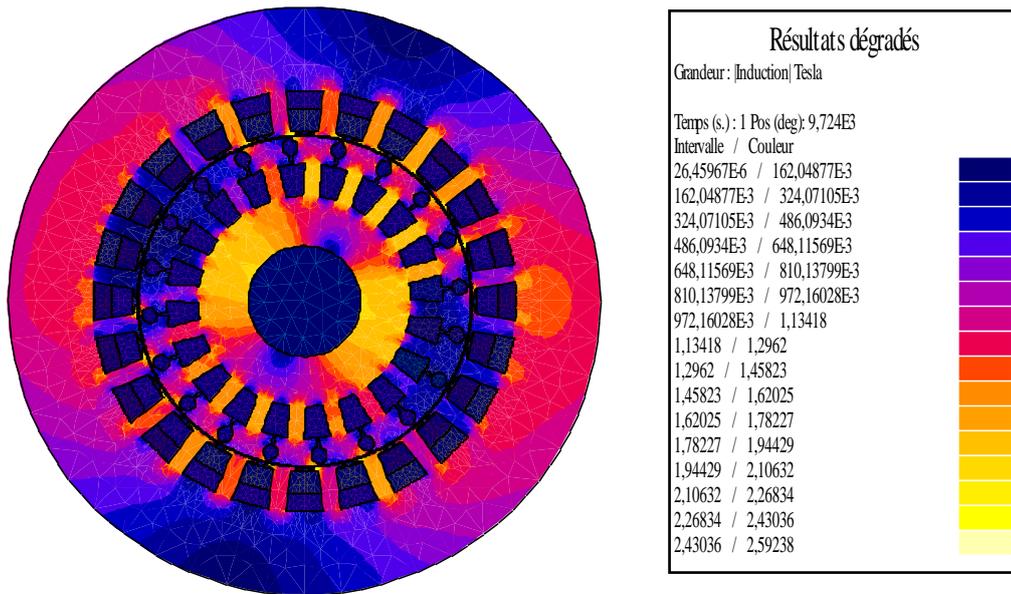


(a)



(b)





(c)

Figure IV.2 l'induction magnétique (a) avec une barres cassées ;(b) avec deux barres cassées (c) avec trois barres cassées.

Les distributions de l'induction montrent aussi l'accentuation du déséquilibre lors de l'apparition des défauts. Nous remarquons qu'autour du défaut, l'induction est relativement élevée, ainsi que la saturation des dents autour des barres cassées faite à l'absence de la réaction magnétique démagnétisant, due à l'absence du courant induit dans les barres cassées. Ce qui provoque des pertes fer dans le stator et le rotor, localisées autour des barres cassées.

#### IV.4.1. Résultats de la simulation de cassure d'une seule barre :

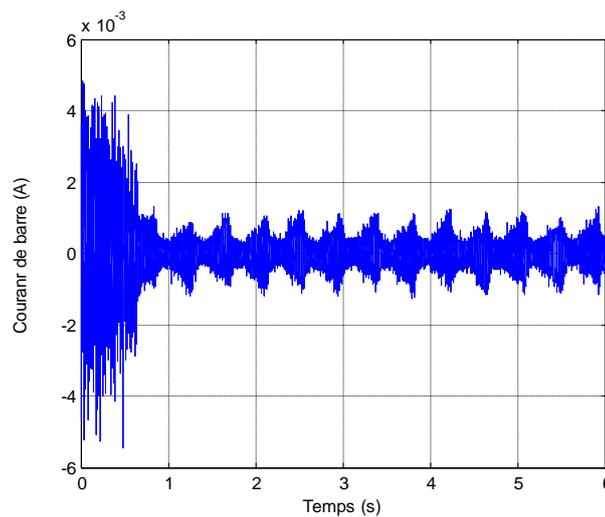
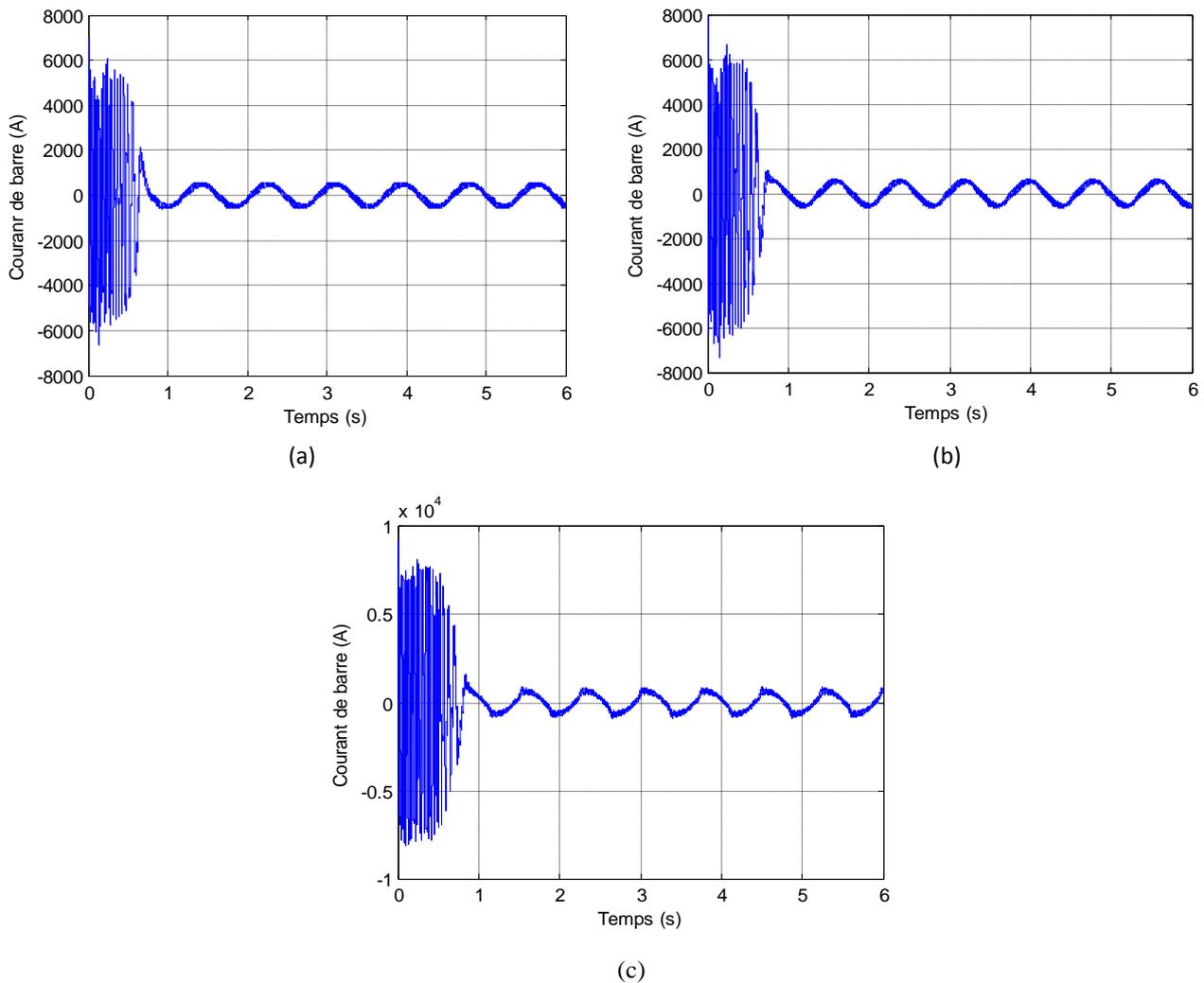


Figure IV.3. le courant dans la barre cassées ib1.

IV.4.2. Résultats de simulation des barres ib20, ib2 et ib3 adjacentes à la barre cassées :

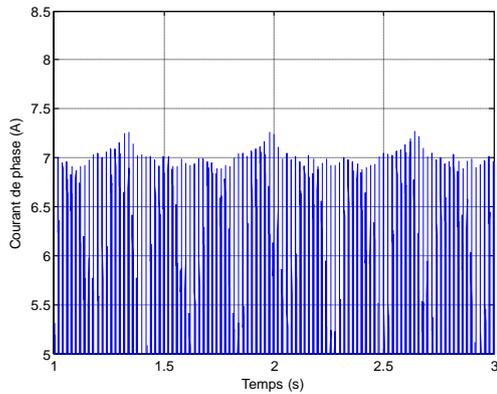


**Figure IV.4.** le courant dans la barre adjacente aux barres cassées ;(a) avec une barre cassée ;(b) avec deux barres cassées ;(c) avec trois barres cassées

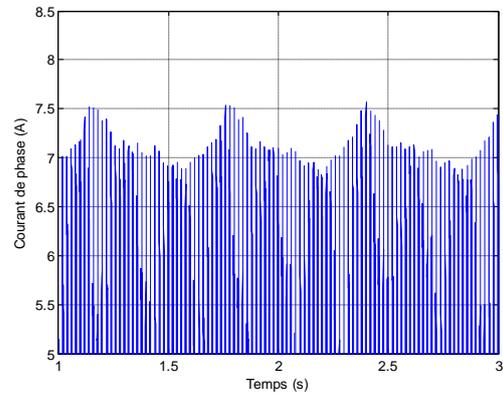
La rupture des barres provoque un déséquilibre du courant entre les barres du rotor et une augmentation de l'amplitude du courant dans les barres adjacentes aux barres cassées, Cette amplitude augmente avec le nombre de barres cassées, ce qui peut être constaté visiblement dans la répartition de la densité du courant dans les barres rotoriques. Notons que l'amplitude des oscillations est proportionnelle aussi au nombre de barres cassées.

**IV.4.3 Effet du nombre de barres cassées sur les performances de la machine :**

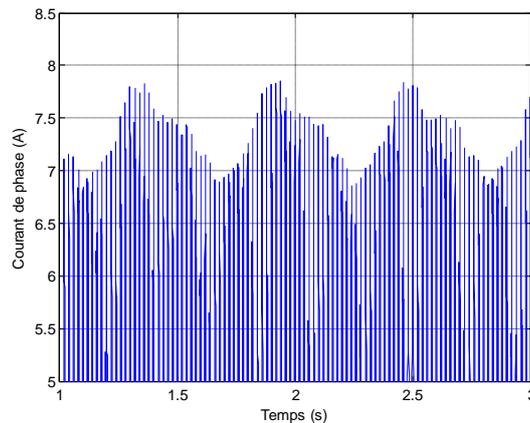
La procédure consiste à montrer l'effet de l'augmentation du nombre de barres cassées sur les grandeurs courant, courants  $i_d$ ,  $i_q$ , vitesse et couple.

**\* Courant**

**Figure.VI.5.**la courant de phase et zoom avec Une barre cassée.



**Figure.VI.6.**la courant de phase et zoom Avec deux barres cassées.



**Figure.IV.7.**la courant de phase et zoom avec trois barres cassées.

Les figures de IV.5 à IV.7 illustrent le courant de phase en état de cassure d'une, de et deux et de trois barres, en charge de 50%.

Les figures de. IV.8 à IV.13 illustrent la vitesse et le couple de la machine ceci pour les cas d'une, de deux et de trois barres cassées pour une charge de 75% de la charge nominale.

\* vitesse

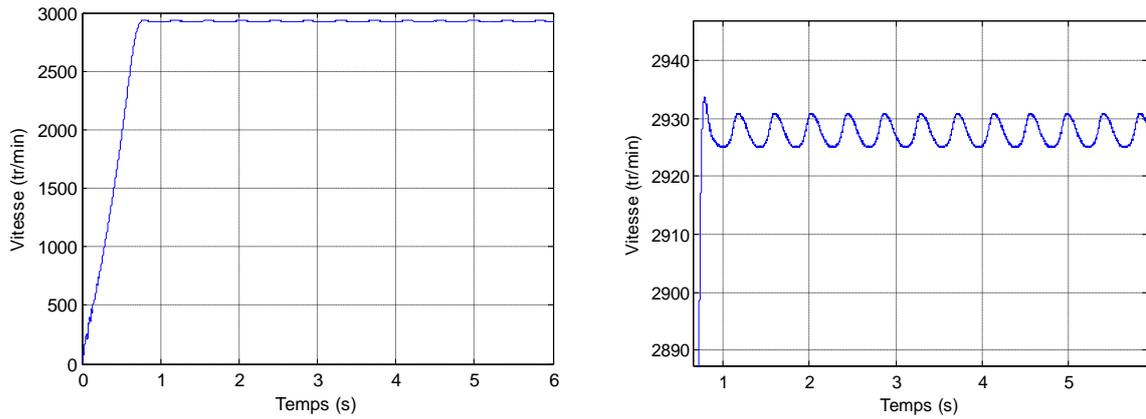


Figure.IV.8.la vitesse de rotation et zoom avec une barre cassée

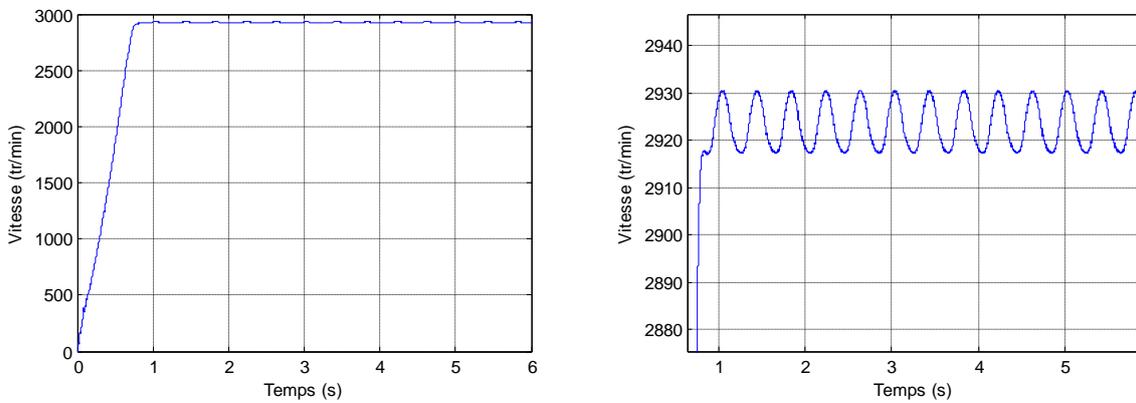


Figure.IV.9.la vitesse de rotation et zoom avec deux barres cassées

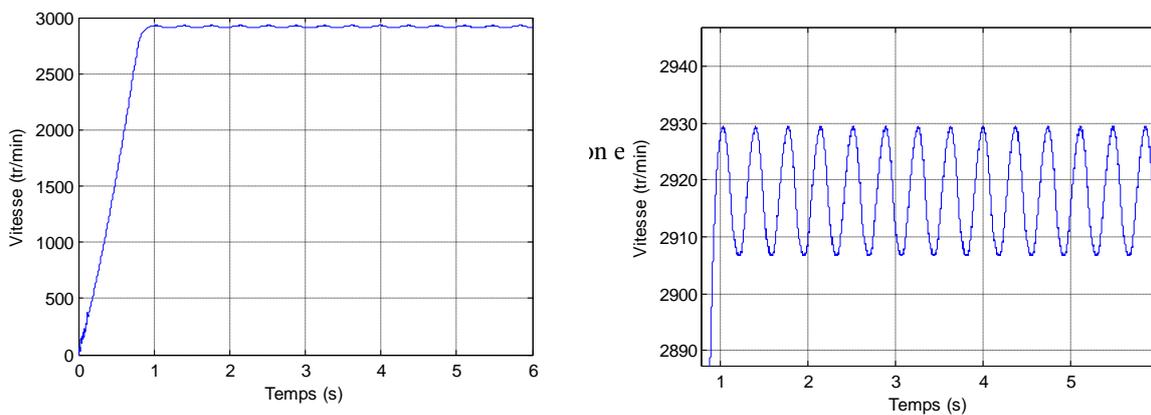


Figure.IV.10.la vitesse de rotation et zoom avec trois barres cassées

En observant Les figures de. IV.8 à IV.10 représentant les vitesses on a constaté que la vitesse diminue lorsque le nombre de barres cassées augmente, autrement c'est comme s'il y a eu augmentation de la charge. Aussi les figures citées précédemment montrent l'influence du nombre des barres cassées sur la durée du régime transitoire de la vitesse. On remarque nettement que la durée pour atteindre la vitesse nominale augmente avec le nombre de barres rompues.

\* Couple

On note également l'augmentation de l'amplitude des ondulations dans l'allure du couple avec l'augmentation du nombre des barres cassées. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique.

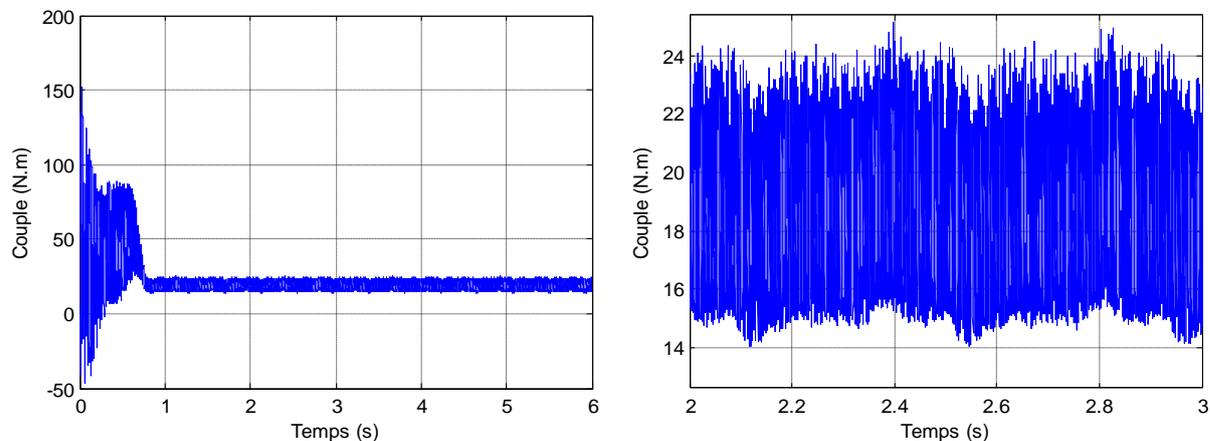


Figure. IV.11. le couple électromagnétique et zoom avec une barre cassée.

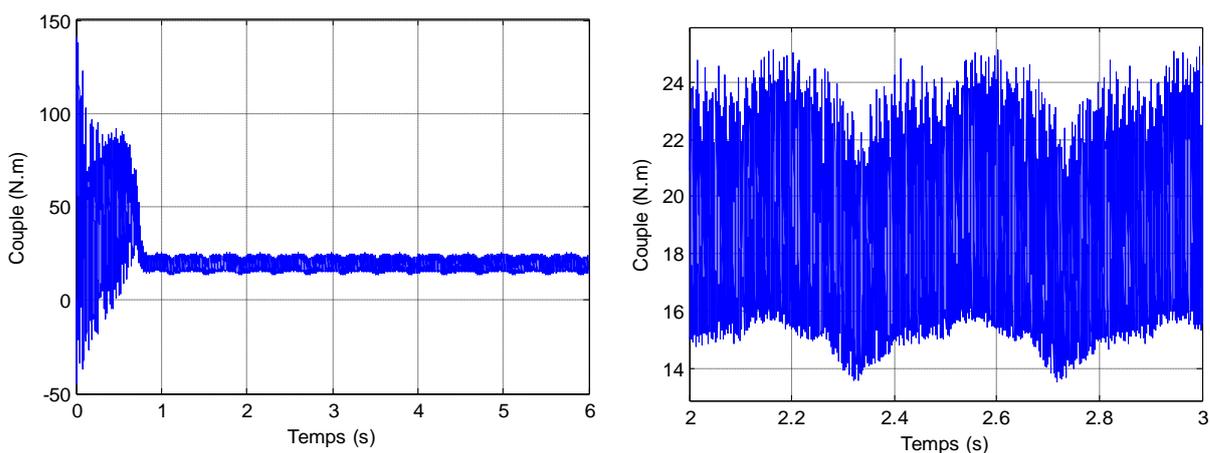


Figure. IV.12. le couple électromagnétique et zoom avec deux barres cassées.

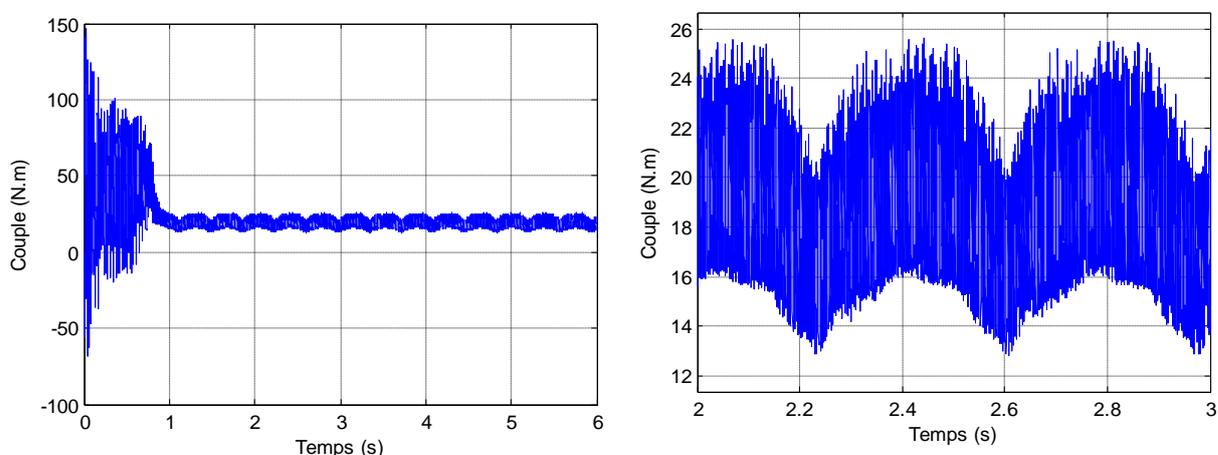


Figure. IV.13. le couple électromagnétique et zoom avec trois barres cassées.

IV.5.1.Spectre du courant pour une barre cassée et pour différentes charges :

Les figures de. IV.14 à IV.18 représente la superposition de trois spectres de courant pour trois charges différentes avec un défaut d'une barre. On remarque que l'amplitude de l'harmonique de défaut augmente lorsque la charge augmente et s'écarte du fondamental.

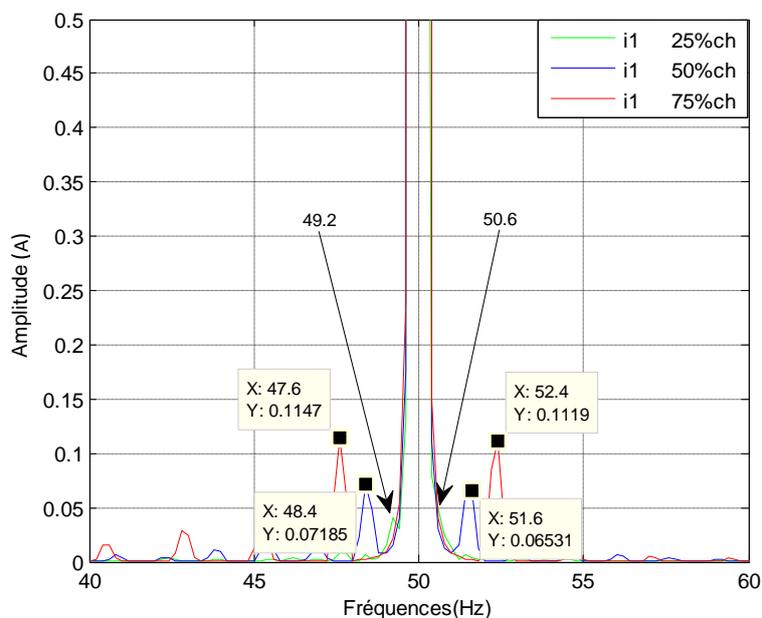


Figure. IV.14.Spectre (avec zoom) du courant de phase état cassure une barre avec différente charge.

IV.5.2.Spectre du courant pour deux barres cassées avec différentes charges :

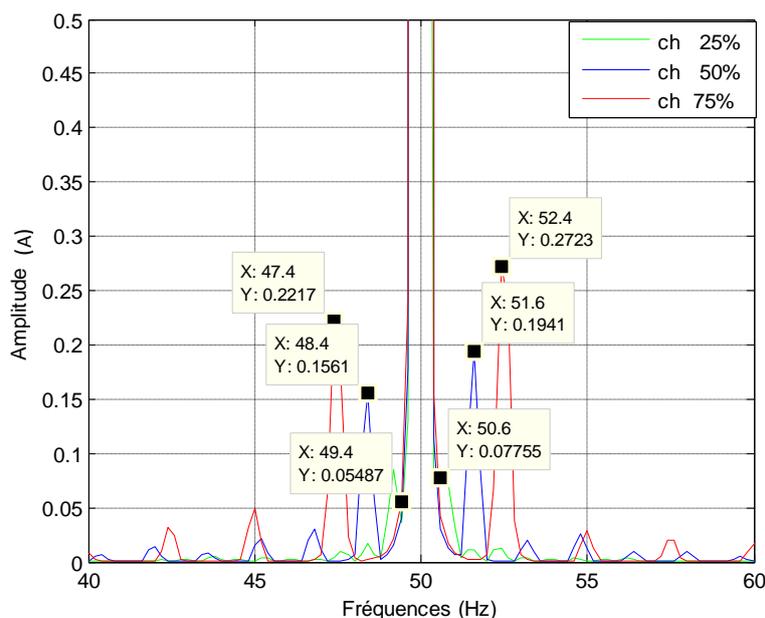


Figure. IV.15.Spectre (avec zoom) du courant de phase état cassure une deux barre avec différente charge.

IV.5.3. Spectre du courant pour trois barres cassées avec différentes charges :

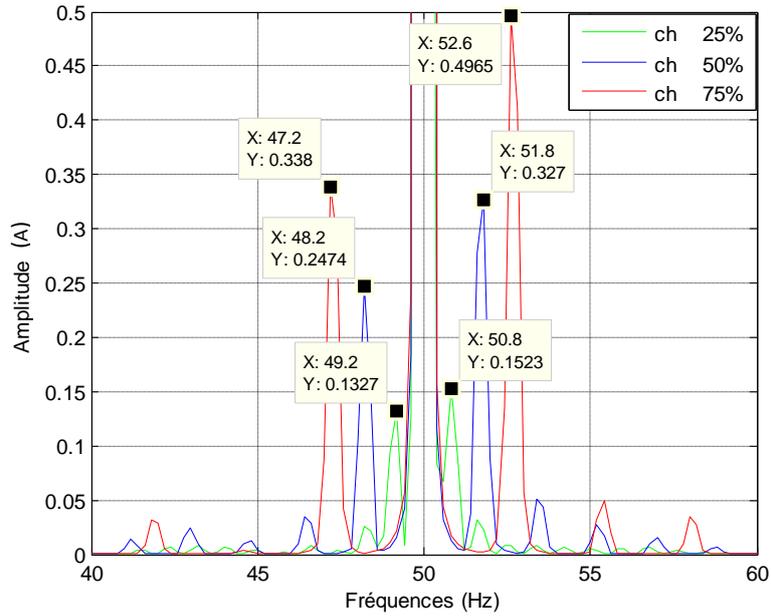


Figure. IV.16. Spectre (avec zoom) du courant de phase état cassure une trois barre avec différente charge.

La figure (14-16) montre la superposition des trois courbes précédentes ou l'on observe de manière remarquable l'effet de la charge sur l'augmentation des amplitudes des amplitudes des harmoniques de défaut ainsi que leur éloignement du fondamental.

IV.5.4. Spectre de courant pour une, deux et trois barres cassées pour une même charge 50%

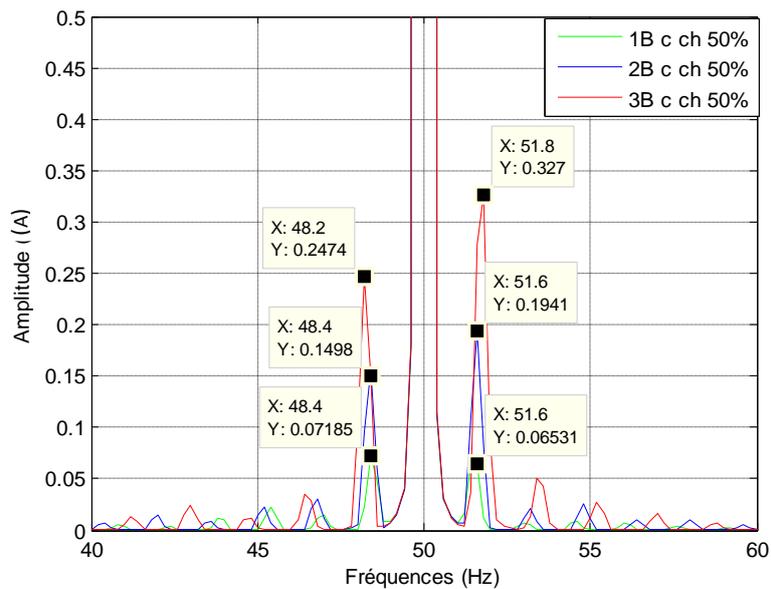


Figure. IV.17. Spectre (avec zoom) du courant de phase état cassure une trois barre différentes en charges 50%.

IV.5.5. Spectre du courant pour une, deux et trois barres cassées pour une même charge 75%

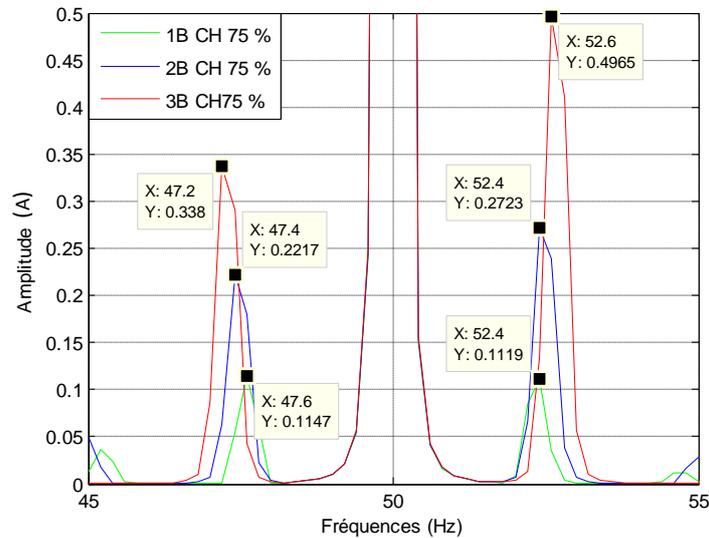


Figure. IV.18. Spectre (avec zoom) du courant de phase état cassure une trois barre différentes en charges 75%

La figure (16-18) montre la superposition des trois courbes précédentes ou l'on observe de manière remarquable l'effet de l'augmentation du nombre de barres cassées sur l'augmentation de l'amplitude de l'harmonique de défaut.

IV.6 Spectre du courant  $i_d$  et  $i_q$  pour deux et trois barres cassées pour une charge 50% :

Le passage aux grandeurs  $dq$  a favorisé le transfert du spectre vers les hautes fréquences ainsi que vers les basses fréquences où les harmoniques de défaut seraient faciles à détecter comme le montre les figures suivantes.

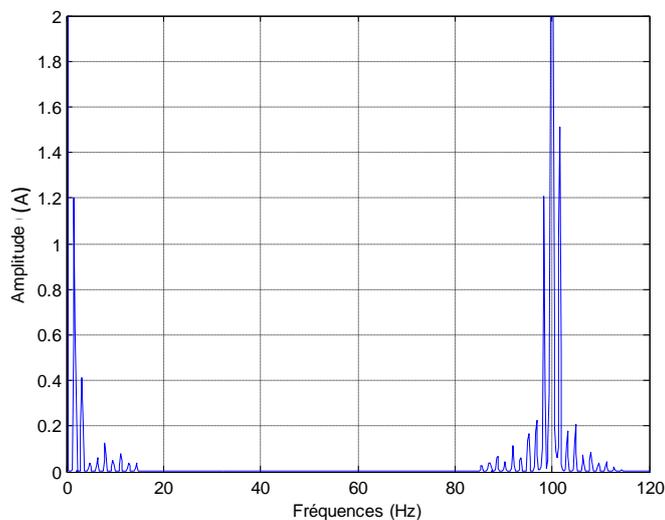


Figure. IV.19. Spectre (avec zoom) du courant de phase  $i_d$ ,  $i_q$  pour une cassure de deux barres avec charge de 50%

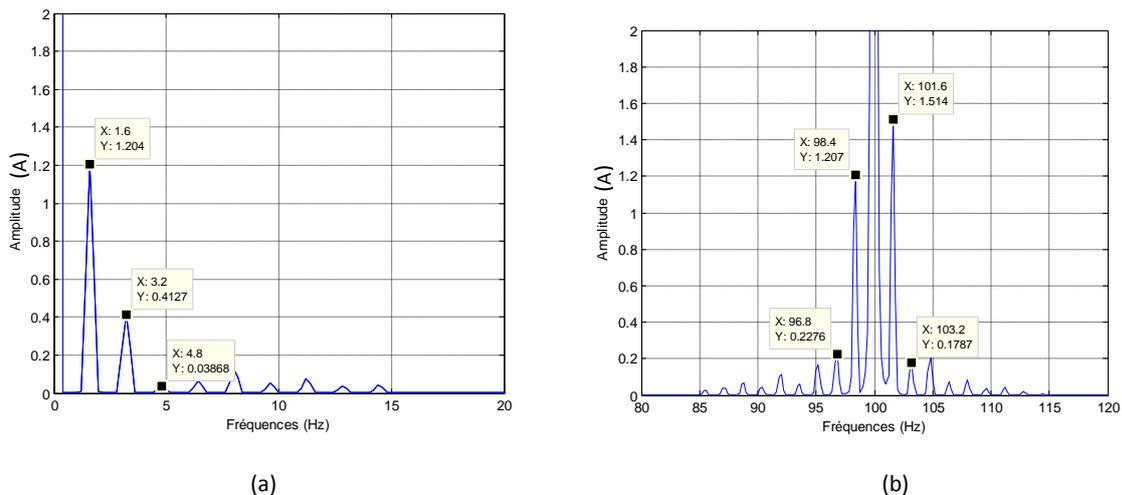


Figure. IV.20 Spectre (avec zoom) du courant de phase  $i_d$   $i_q$  (a) en basses fréquences et (b) en hautes fréquences pour une cassure de deux barres avec charges de 50%

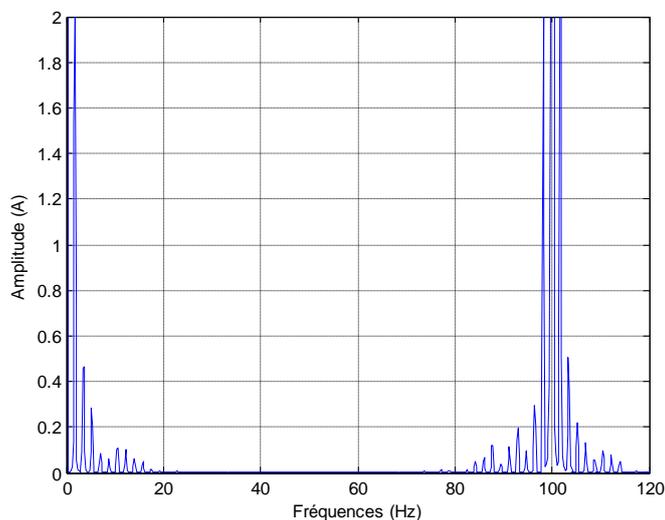


Figure. IV.21.Spectre (avec zoom) du courant de phase  $i_d$   $i_q$  état cassure une trois barres en charges 50%

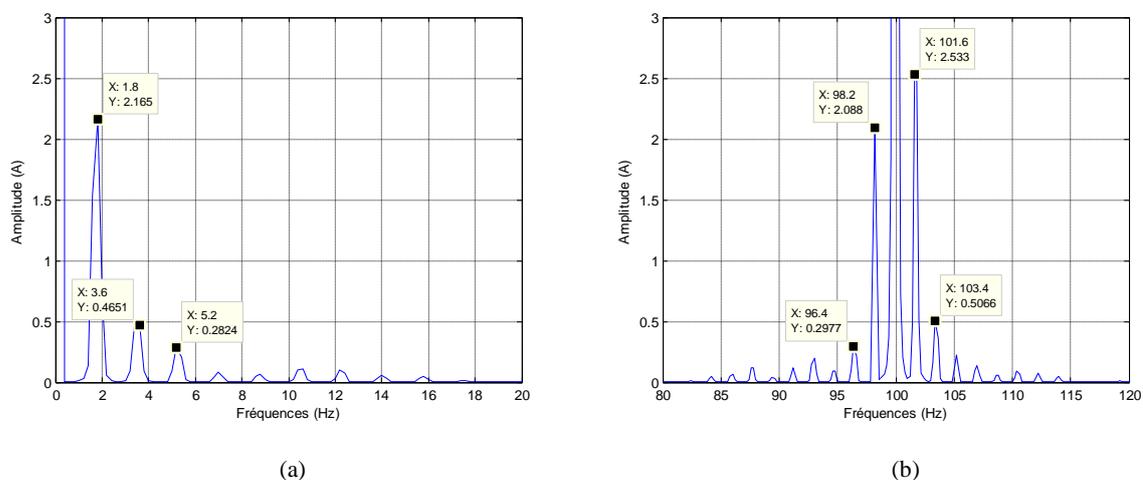


Figure. IV.22.Spectre (avec zoom) du courant de phase  $i_d$   $i_q$  (a) en basses fréquences et (b) en hautes fréquences état cassure une trois barres en charges 50%

### **IV.5. Conclusion**

Dans ce chapitre on a construit un modèle de la machine asynchrone à cage basé sur la méthode des éléments finis où nous pouvons inclure les défauts au rotor. La simulation nous a permis d'étudier l'influence des défauts sur la distribution des lignes de champs et l'induction magnétique ainsi que sur les autres grandeurs.

Les barres saines adjacentes au défaut sont plus sollicitées et vieillissent prématurément. La cassure des barres fait apparaître des oscillations sur les courants, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique. Une analyse des harmoniques des courants statoriques permet de voir une corrélation entre le défaut et les amplitudes des composantes harmoniques  $(1 \pm 2g)f_s$ . Enfin l'analyse présentée par la méthode des éléments finis montre que c'est une méthode efficace et peu coûteuse pour étudier l'influence des défauts rotorique sur le comportement des machines asynchrones, et nous a permis de comprendre et de quantifier les conséquences locales des défauts au rotor. Par contre, le seul inconvénient de cette méthode (éléments finis-Flux 2D) reste le temps de calcul qui est très long et qui demande un ordinateur très puissant, élément non disponible en notre possession.

*Conclusion*

*Générale*

### Conclusion Générale

Le travail qui a été présenté dans cette thèse s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil. Nous avons montré que les principaux éléments de la machine asynchrone peuvent présenter des défaillances totales ou partielles provoquant un arrêt inattendu, qui conduit à des pertes économiques considérables. Pour éviter ces problèmes, il est impératif de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats.

Le début de ce mémoire a été marqué par un rappel des différents défauts qui peuvent affecter le bon fonctionnement des machines asynchrones triphasées à cage, ainsi que leurs causes et leurs signatures spectrales. Selon la littérature et la brève présentation des diverses méthodes du diagnostic, nous avons constaté que l'analyse du courant statorique est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité et son efficacité de prévoir un défaut dès lors que ses premiers signes commencent à apparaître, ce qui nous a incité à adopter les signaux idq de Park dont le spectre contient les hautes et les faibles fréquences.

Afin de représenter le comportement de la machine lors d'un fonctionnement normal (sans défaut) et dégradé (avec défaut), nous avons créé un modèle par les éléments finis qui tient compte de la topologie et de dimensions de la machine. Ce modèle présente l'avantage qu'il prend en considération le circuit magnétique de fer, cela conduit à introduire la courbe B(H) avec saturation dans les calculs.

Les résultats trouvés sont très satisfaisants et sont conformes avec ceux de la littérature. Nous avons pu observer les ondulations sur les grandeurs courant, puissance, couple et vitesse ainsi que leur accroissement lors de l'augmentation de la charge et du nombre de barres cassées.

Nous avons utilisé le programme de la transformée de Fourier rapide du "Toolbox Matlab", pour exploiter le contenu spectral des courants statoriques et de leurs transformés et par conséquent de déterminer les composantes  $(1 \pm 2kg)f_s$  caractérisant le défaut de barres rotoriques. Ensuite, nous avons montré l'influence du nombre de barres cassées sur ces composantes. Nous avons trouvé que l'amplitude de ces harmoniques augmente avec le nombre de barres cassées. Ceci, donne une indication sur la sévérité du défaut.

L'inconvénient de cette méthode (éléments finis-Flux 2D) reste le temps de calcul qui est très très long et qui demande un calculateur très puissant, élément non disponible dans notre possession.

## **Conclusion général**

---

Comme perspectives, nous proposons à court terme d'étudier l'impact de la rupture des barres ainsi que les oscillations de charge lorsque le nombre de barres cassées augmente. Enfin, il nous semble intéressant d'avoir une analyse continue du courant afin de surveiller le fonctionnement de la machine en ligne, et d'assurer ainsi une maintenance préventive.

# Bibliographie

## Bibliographie

[01]	H.Achour , «Etude comparative des indicateurs des défauts rotoriques dans les MAS à cage. » thèse de master, Université de Mohammed Khaidher Biskra 2014
[02]	B.Chermat, «Diagnostic des défauts de MAS par les méthodes paramétriques de traitement du signal » thèse de master, Université de Mohammed Khaidher Biskra 2012
[03]	N. Halem, «Modélisation des Machines Asynchrones en vue du Diagnostic par Eléments Finis» thèse de doctorat, Université de Mohammed Khaidher Biskra 2014.
[04]	K.Laadjal, «modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts par flux 2D» thèse de master, Université de Mohammed Khaidher Biskra 2015
[05]	Claude CHEVASSU " <i>Machines électriques : cours et problèmes</i> ", Techniques de l'Ingénieur, juillet 2012.
[06]	R. Bigret and J. L. Féron. Diagnostic - maintenance - disponibilité des machines tournantes. Masson, 1995.
[07]	A. H. Bonnett. Understanding motor shaft failures. IEEE Applications Magazine, pages 25_41, September/October 1999.
[08]	A. H. Bonnett. Root cause ac motor failure analysis with a focus on shaft failures. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36(5) :1435_1448, September/October 2000.
[09]	A. H. Bonnett and G. C. Soukup. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28(4) :921_937, July/August 1992.
[10]	A. H. Bonnett and G. C. Soukup. Analysis of rotor failures in squirrel-cage induction motors. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24(6) :1124_1130, November/December 1988.
[11]	KHELIF Samia ,«Modélisation Des Machines Asynchrones en Vue du Diagnostic Prise en Compte Adéquate du Circuit Magnétique»
[12]	J.Sprooten, « <i>Finite element and electrical circuit modeling of faulty induction machines - study of internal effects and fault detection techniques</i> » thèse de doctorat, Université libre de Bruxelles 2007
[13]	T. Boumegoura « <i>Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic</i> » thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon 2001
[14]	M.BENBORDI Bachir ,« DIAGNOSTIC DE DEFAUTS AU ROTOR PAR L'ANALYSE DE LA SIGNATURE DU COURANT MOTEUR» thèse de 2005 .
[15]	N. Halem, «Modélisation des Machines Asynchrones en vue du Diagnostic par Eléments

	Finis» thèse de doctorat, Université de Mohammed Khaidher Biskra 2014.
[16]	A. Ghouggal, «Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : modèle dédié à la détection des défauts» mémoire de magister, Université de Batna 2005
[17]	B.Chermat, «Diagnostic des défauts de MAS par les méthodes paramétriques de traitement du signal » thèse de master, Université de Mohammed Khaidher Biskra 2012
[18]	G.Dedier, « <i>Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances</i> » thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, 2004.
[19]	A. Ghouggal, « <i>Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : modèle dédié à la détection des défauts</i> » mémoire de magister, Université de Batna 2005.
[20]	S. Mohamed, "Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones ", Thèse de Doctorat, UNV Mohamed KHIDER Biskra ,2010.
[21]	S. Khelif, « <i>Modélisation de la machine asynchrone en vue diagnostic prise en compte adéquate du circuit magnétique</i> », mémoire de magistère, Electrotechnique Université de Mohammed Khaider Biskra, 2012
[22]	D.E. Khoudja, « <i>Elaboration d'un système intelligent de surveillance et de diagnostic automatique en temps réel des défaillances des moteurs à induction</i> »thèse de doctorat, Université de Boumerdès 2007.
[23]	Gojko M. Joksimovic, J. Riger, T. M. Wolbank, Nedjeljko Peric, Mario Vasak " <i>Stator-Current Spectrum Signature of Healthy Cage Rotor Induction Machines</i> ", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, N°9, PP. 4025-4033, 2013.
[24]	J. C. Sabonnadière, J. L. Coulomb " <i>Calcul des Champs Electromagnétiques</i> ", Techniques de l'Ingénieur, D3020.
[25]	R. Casimir, E. Bouteleux, H. Yahoui, G. Clerc, H. Henao, C. Delmotte, G. A. Capolino, G. Rostaing, J. P. Rognon, E. Foulon, L. Loron, H. Razik, G. Didier, G. Houdouin, G. Barakat, B. Dakyo, S. Bachir, S. Tnani, G. Champenois, J. C. Trigeassou, V. Devanneaux , B. Dagues, and J. Faucher.Comparaison de plusieurs méthodes de modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts. <i>Electrotechnique du Futur</i> , Décembre 2003 .
[26]	E. Schaeffer. <i>Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts</i> . Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.