



UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF- M'SILA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER EN
GENIE ELECTRIQUE

OPTION : INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUES

THEME

METHODE GLOBALE DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES A CAGE D'ECUREUIL

Proposé et encadré par :

Mr. ZORIG Assam

Réalisé par :

AIT MIHOUB Mohamed oulhocine.

Année Universitaire : 2015/2016

Remerciements

Nous remercions en premier lieu notre Dieu de Nous donner La santé et la patience pour avoir Terminer ce travail.

nous tenons évidemment à débiter ces remerciements notre encadreur Monsieur ZORIG aAssam qui a bien voulu nous encadrer et pour ses conseils précieux, sa disponibilité et sa patience.

nous remercions également tous les membres de jury d'avoir accepter de jugé.

nous tenons également à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes très chers parents

pour leur soutien moral et matériel pour leurs encouragements et les sacrifices

qu'ils ont endurés dans les moments les plus ardues.

*a mon frère **IDIR***

*a mon cousin **OMAR***

a ma sœur.

*A mon encadreur Monsieur **ZORIG Assam***

*A mes Chers amis *****Amar ben makhloufi** *****Ousama abu ibaid******

et à tous mes amis

SOMMAIRE

Liste de figure	III
Liste de tableaux	VI
Listes des Acronymes et Symboles.....	VII
Introduction générale	1
Chapitre I : Constitution et défauts de la machine asynchrone tournante.....	3
I.1 Introduction	3
I.2 Les Machines asynchrones	3
I.2.1 Principe de fonctionnement	3
I.2.2 Constitution du moteur asynchrone à cage.....	4
I.2.3 Les avantages et les Inconvénients de la machine asynchrone.....	7
I.3 Présentation des différents défauts dans la machine asynchrone	8
I.3.1 Etude statistique des défauts.....	9
I.3.2 Les causes des défauts au stator et au rotor	11
I.3.3 Les différents défauts	12
I.5 Présentation des différentes méthodes de diagnostic	15
I.5.1 Approche modèle.....	16
I.5.2 Approche signal	18
I.6 Modélisation de la machine asynchrone.....	19
I.6.1 Méthodes de modélisation des machines asynchrones.....	19
I.7 Conclusion	26
Chapitre II : Modalisation et simulation du mas par la méthode des éléments finis	27
II.1 Introduction	27
II.2 METHODE DES ELEMENTS FINIS	27
II.2.1. Le modèle employé	28
II.2.3 Logiciel de résolution.....	31
II.2.4 Structure du FLUX 2D	31
II.3. Application à la simulation de la machine asynchrone	34

II.4 Résultats de simulation par la magnétodynamique (machine saine).....	38
II.4.1 Caractéristique de simulation	38
II.4.2 Résultats graphiques.....	38
II.4.3 Caractéristiques de la machine en fonction de glissement	41
II.5 Simulation de la machine asynchrone en défaut (cassure des barres rotoriques)	42
II.6 Conclusion.....	52
Chapitre III : Analyse des défauts de la machine en régime transitoire	53
III.1 Introduction.....	53
III.2 Simulation des défauts en régime transitoire	53
III.2.1 Fonctionnement à vide	53
III.2.2 Fonctionnement en charge	58
III.3.4 Diagnostic des défauts par le suivi des grandeurs mesurables	67
III.4 Conclusion	69
Conclusion générale.....	70
Références.....	71

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1: Eléments de constitution d'une machine asynchrone	4
Figure I. 2: Stator de la machine asynchrone à cage.....	6
Figure I. 3: rotor à cage d'écureuil.....	7
Figure I. 4: Causes internes de défauts de la machine asynchrone	9
Figure I. 5: Causes externes de défauts de la machine asynchrone.	9
Figure I. 6: Évolution du pourcentage des défauts pendant une décennie.....	10
Figure I. 7: Types d'excentricité.....	13
Figure I. 8: Défaut d'un rotor à cage d'écureuil.....	14
Figure I. 9: Méthodes analytiques de diagnostic des défauts.....	16
Figure I. 10 : Méthodes de diagnostic par les observateurs.....	17
Figure I. 11 : Organigramme de différentes méthodes de modélisation de la MAS19	
Figure I. 12 : Schéma électrique équivalente de la cage rotorique, [10].....	20
Figure I. 13 : Réseau de perméances élémentaire autour d'une encoche statorique	22
Figure I. 14: Circuit magnétique d'une machine asynchrone.....	24

Chapitre II

Figure II. 1: Fonction d'interpolation d'un élément.	31
Figure II. 2 : Schéma des différents modules du logiciel Flux-2.....	33
Figure II. 3 : Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique.....	35
Figure II. 4 : Répartition du maillage.....	35
Figure II. 5 : Caractéristiques B(H) du matériau magnétique.....	36
Figure II. 6 : Circuits représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie	37
Figure II. 7 : Circuit équivalent de la cage rotorique.	37
Figure II. 8 : Répartition des lignes équiflux pour le fonctionnement nominale .	39
Figure II. 9 : L'induction magnétique pour le fonctionnement nominale.	39
Figure II. 10 : Densité du courant dans les barres lors de démarrage du moteur (40
Figure II. 11 : Densité du courant dans les barres en fonctionnement nominale, .	40

Figure II. 12 : Le couple en fonction de glissement.	41
Figure II. 13 : Le courant en fonction de glissement.	41
Figure II. 14: Répartition des lignes équiflux dans le circuit magnétique	43
Figure II. 15 : : Répartition de l'induction dans le circuit magnétique	47
Figure II. 16 : Répartition du courant dans les barres	50
Figure II. 17 : Couple en fonction de glissement. (Cas adjacents).	51
Figure II. 18 : Couple en fonction de glissement (Cas séparées).....	52

Chapitre III

Figure III. 1 : Lignes du champ magnétique à vide à $t = 0.65s$	53
Figure III. 2 : L'induction magnétique à vide à $t = 0.65s$	54
Figure III. 3 : Courants de trois phases statoriques à vide (avec zoom).	55
Figure III. 4 : Courants à vide d'une phase statoriques.	55
Figure III. 5 : Couple électromagnétique.	56
Figure III. 6 : Vitesse de rotation.	56
Figure III. 7 7 : Courants rotoriques à vide (avec zoom).....	57
Figure III. 8 : Caractéristique mécanique du moteur (Couple - Vitesse) à vide. ..	58
Figure III. 9 : Lignes du champ magnétique en charge à $t = 0.65 s$	58
Figure III. 10 : l'induction magnétique en charge à $t = 0.65 s$	59
Figure III. 11 : Courants de trois phases absorbés par la machine. (avec zoom)..	60
Figure III. 12 : Courants d'une phase statorique machine saine en charge	61
Figure III. 13 : Courants d'une phase statorique avec une barre cassée	61
Figure III. 14 : Courants d'une phase statorique avec trois barres cassées	62
Figure III. 15 : Courants d'une phase statorique avec six barres cassées	63
Figure III. 16 : Courant dans la barre 2.....	63
Figure III. 17 : Courant dans la barre 4.....	64
Figure III. 18 : Courant dans la barre 7.....	64
Figure III. 19 : Vitesse de rotation en charge (avec un zoom).....	65
Figure III. 20 : Couple électromagnétique en charge (avec un zoom).....	66
Figure III. 21: Spectre de la vitesse.....	67

Figure III. 22 : Spectre du courant statorique 68

Liste de tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1: Défauts des machines électriques selon leurs origines..... 8

Tableau I. 2 : Comparaison des méthodes de modélisation de la machine asynchrone en présence de défaut..... 26

Tableau I. 3: Comparaison des méthodes de modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts. 26

Chapitre II

Tableau II. 1 : Caractéristique de la machine étudiée..... 34

Tableau II. 2 : B(H) du matériau magnétique 36

Listes des Acronymes et Symboles

MAS : Machine asynchrone.

CEMC : la Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.

CEMC-A : CEMC analytique.

RNM : la méthode des réseaux de permanées.

CIE : le Modèle à circuits internes équivalents.

MEF : Méthode des éléments Finis.

Ω_s : La vitesse de synchronisme.

Ω_r : La vitesse mécanique [Tr /s]

Ω_m : Vitesse correspond au glissement critique

g: glissement.

f.m.m : la force magnétomotrice.

f.e. m La force électromotrice

$[V_r]$: est le tenseur de réflectivité magnétique du milieu.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide (en H/m).

\vec{A} : est le potentiel vecteur magnétique (en Weber/m).

\vec{H}_c : est le champ magnétique coercitif (en A/m).

$[\sigma]$: est le tenseur de conductivité électrique du milieu (en 1/ .m).

V : est le potentiel scalaire électrique (en V) .

t : Temps (en s).

\vec{E} : Vecteur champ électrique [V /m].

\vec{H} : Vecteur champ magnétique [A /m].

\vec{B} : Vecteur induction magnétique [T].

\vec{D} : Vecteur de déplacement électrique [C /m²].

ρ : Densité de charge volumique [C /m³].

\vec{J}_c : Vecteur de densité de courant de conduction [A /m²].

ε : Permittivité électrique [F/m].

μ : Perméabilité magnétique [H/m].

σ : Conductibilité électrique [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$].

\vec{J} : Vecteur de densité de courant total [A /m²].

ε_0 : Permittivité dans le vide [F/m].

μ_r : Perméabilité relative.

μ_0 : Perméabilité du vide [H/m].

\vec{B}_r : Induction rémanente des aimants [T].

$v = \frac{1}{\mu}$: Est la réflectivité magnétique [H /m]⁻¹.

\vec{A}_e : Vecteur potentiel magnétique dans un élément [T. m].

R_1 : Résistance d'une phase statorique [Ω]

$L_{\sigma 1}$: Inductance de fuite statorique [H]

L_m : Inductance de magnétisation [H]

R_f : Résistance correspondant aux pertes fer [Ω]

L_2 : Inductance de fuite rotorique [H]

R_2 : Résistance rotorique [Ω]

m : Nombre de phases

q : Nombre des barres

w_1 : Nombre de tours par phase

I_{n} : Courant nominale du moteur [A]

P : Nombre de pair de pole

N_n : La vitesse nominale du moteur [Tr /min]

P_n : Puissance utile nominale du moteur [W]

Q_1 : Puissance réactive absorbé par le moteur [W]

C_{em} : Est le potentiel scalaire électrique [V]

e : le nombre total des éléments du domaine

e_1 : numéro d'élément

n_e : le nombre total des éléments du domaine

N_r : Nombre de barres rotoriques

λ : Permittivité de l'entrefer

R_s : Résistance d'un enroulement statorique

R_b : Résistance d'une barre rotorique

R_e : Résistance d'un anneau de court-circuit au rotor

R_r : Résistance rotorique équivalente (ramenée au stator)

Introduction générale

Les machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil sont les plus fréquemment utilisées dans tous les secteurs industriels en raison de leurs robustesses, de leurs simplicités de construction et de leurs bas coûts. Néanmoins, celles-ci subissent au cours de leurs durées de vie un certain nombre de sollicitations externes ou internes qui peuvent les rendre défaillantes.

Grâce à sa grande flexibilité, la simulation est devenue l'outil privilégié pour évaluer les performances et le comportement des systèmes sous des conditions extrêmes ou en mode de défaillance. Il faut noter que la simulation ne peut exister sans modélisation, en effet, la simulation n'est autre que la mise en application d'un modèle bien déterminé. En outre, l'un des objectifs les plus importants, dans le cadre du diagnostic [1], concerne la mise au point des modèles de simulation les plus fiables possibles, représentant le fonctionnement défaillant de la machine. L'étape de la modélisation s'avère donc indispensable pour la caractérisation et la maîtrise des phénomènes qui peuvent y apparaître.

Les modèles décrivant le fonctionnement de la machine asynchrone en présence de défauts peuvent être divisés en deux groupes : les modèles comportementaux et les modèles physiques.

Les modèles comportementaux, modifient les modèles issus de la physique en y introduisant des paramètres supplémentaires qui permettent la détection et, dans certains cas, la localisation des défauts observés [29,30]. Ces modèles comportementaux peuvent être directement utilisés dans la procédure de diagnostic.

Dans les modèles physiques, nous utilisons les lois de l'électromagnétisme pour décrire le fonctionnement de la machine. Ces modèles varient en complexité et en précision selon la méthode de la modélisation utilisée. Nous pouvons citer les méthodes les plus utilisées en suivant un ordre de complexité croissant : la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC) [7-12], la méthode du circuit interne équivalent(CIE) [31,7], la méthode des réseaux de reluctances (RNM) [14], et la méthode des éléments finis (FEM) [32].

Dans le domaine du diagnostic de la machine asynchrone, la méthode des éléments finis est utilisée dans le but de comprendre et de quantifier les conséquences locales d'un défaut sur les différentes parties de la machine. A titre d'exemple, la méthode des éléments finis permet l'étude des effets locaux du défaut de rupture de barres de la cage rotorique [19,21,22] à savoir un échauffement local excessif dû à l'augmentation des courants circulant dans les barres voisines et une forte sollicitation électrodynamique de ces mêmes barres voisines pouvant conduire à la propagation du défaut.

L'objectif de notre travail est le diagnostic de la machine asynchrone par une méthode globale. Qui est basé sur la méthode des éléments finis sous logiciel flux 2D[®], pour cela notre mémoire est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les principaux défauts pouvant modifier le bon fonctionnement de la machine asynchrone, leurs origines, ainsi que leurs signatures spectrales sur le courant statoriques. Nous présenterons par la suite, les différentes techniques utilisées pour La détection des défauts, ainsi que les approches utilisées pour la modélisation de la machine asynchrone.

Le deuxième chapitre est consacré à la simulation de la machine asynchrone triphasée à cage par la méthode des éléments finis saine et avec défauts des ruptures des barres, et nous allons étudier l'influence de position de cassure des barres sur la machine.

Dans le troisième chapitre, nous montrerons dans un premier temps les résultats de simulation de la machine saine et défectueuse en régime transitoire Dans un second temps, à fin d'adopter une grandeur mesurable comme outil de détection des défauts rotoriques une analyse spectrale sera présentée.

Chapitre I : Constitution et défauts de la machine asynchrone tournante

I.1 Introduction

Ce chapitre présente dans un premier lieu un aperçu des différents défauts dans les machines électriques tournantes, leur classification et leurs origines. Puis, les méthodes de diagnostic les plus fréquemment utilisées sont décrites.

I.2 Les Machines asynchrones

Les machines asynchrones sont des machines employées le plus fréquemment dans l'industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevé, entretien facile, son faible encombrement, son bon rendement et de son excellente fiabilité. Ils possèdent un inconvénient de consommation l'énergie réactive, toujours utilisée pour magnétiser l'entrefer.

Les moteurs asynchrones sont reliés au réseau électrique à fréquence fixe, représentant la grande majorité des applications ; supplantant les machines monophasées aux performances bien moindres et au couple de démarrage nul sans artifice.

C'est un moteur facile à construire, économique. Pour la vitesse variable, parmi les solutions techniques permirent d'obtenir une variation de vitesse en faisant davantage « glisser » le moteur. Actuellement, ce sont les alimentations électroniques de puissance à fréquence variable qui sont amplement utilisées pour obtenir cette variation de vitesse, certes prix d'une certaine complexité des alimentations et des commandes associées.

Le moteur asynchrone (parfois appelé moteur d'induction) comprend deux parties : le stator (fixe) et le rotor (tournant). Le stator comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure, L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage. Le rotor se compose d'un cylindre de tôles poinçonnées à leur périphérie extérieure pour former les encoches destinées à recevoir des conducteurs

I.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone est basé sur l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statique par le réseau et des courants induit dans le champ tournant le fonctionnement d'un moteur asynchrone est équivalent à celui d'un transformateur à vide, le stator étant comparable à

l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire, qui peut dans le cas générale tourné. Deux vitesses distinguées

- Vitesse de synchronisme ou vitesse du champ tournant :

$$n_s = \frac{2\pi f}{p} \quad (\text{I.1})$$

- L'écart entre les deux vitesses caractérise le glissement qui a pour expression :

$$g = 1 - \left(\frac{n_r}{n_s} \right) \quad (\text{I.2})$$

n_s : rad/s

P : nombre de pair de pôles

I.2.2 Constitution du moteur asynchrone à cage

On se propose, dans cette partie, de donner quelques précisions sur les éléments de constitution des machines asynchrones. Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement, comme monter la figure (I.1).

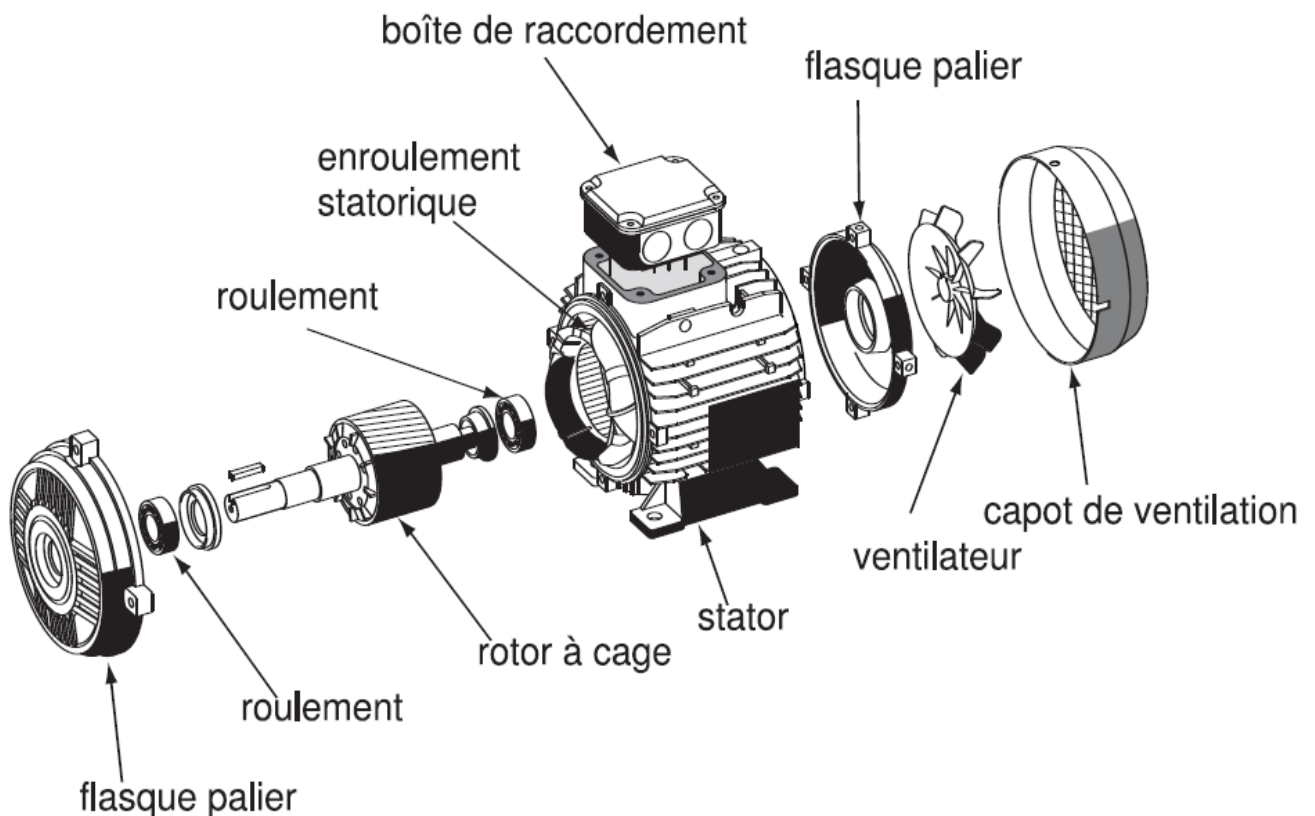


Figure I. 1: Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. [2]

Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

- ✓ **Le stator** : partie fixe de la machine ou est connectée à l'alimentation électrique.
- ✓ **Le rotor** : partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- ✓ **Les paliers** : partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.

I.2.2.1 Stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importantes, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manières imbriquées, ondulées ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui en charge peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone.

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. La (figure I.2) représente les différentes parties qui constituent le stator d'une machine asynchrone. Nous pouvons visualiser la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement de la machine lorsque celle-ci fonctionne [3]

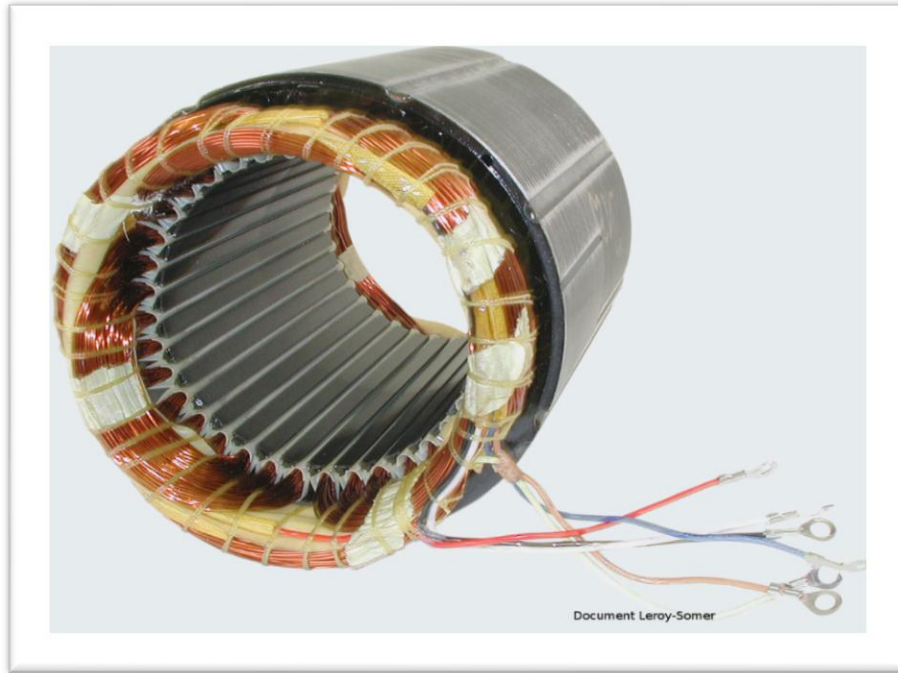


Figure I. 2: Stator de la machine asynchrone à cage.

I.2.2.2 Rotor

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées, pour la construction du stator. Les rotors de machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil. Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dits "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium.

Il existe différentes structures de rotor à cage qui dépendent principalement de la taille du moteur et de l'application qu'il en sera fait.

Nous donnons à la (figure I.3) ci-dessus les différents éléments de constitution d'un rotor à cage d'écureuil. Nous pouvons visualiser l'arbre sur lequel les tôles sont empilées, les deux anneaux de court-circuit ainsi que les barres d'aluminium formant la cage d'écureuil. Très souvent, ces barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone. L'isolation des bâfrés avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune

d'entre elles. De plus, la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre. Le rotor de la machine

Asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible comme le montre la (figure. I.3). [3].

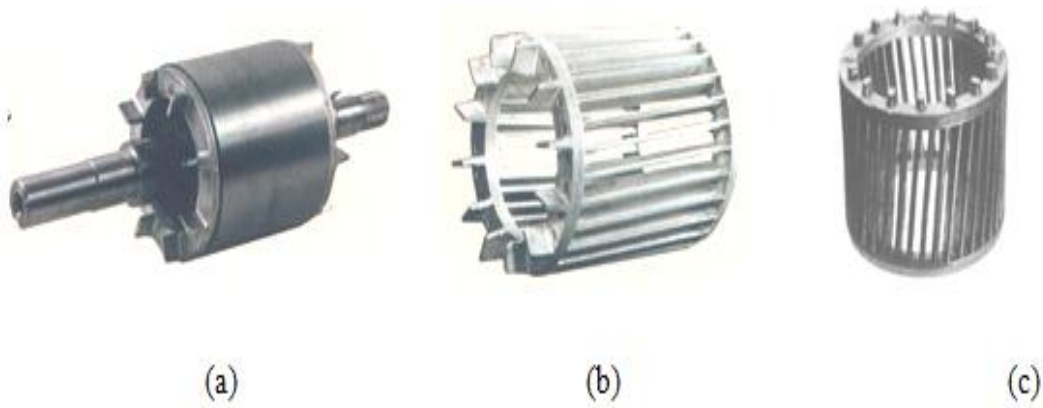


Figure I. 3: rotor à cage d'écureuil.

I.2.2.3 Les paliers

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et des roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage comme nous pouvons le visualiser sur la figure I.1. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil.

I.2.3 Les avantages et les Inconvénients de la machine asynchrone

I.2.3.1 Avantages de la machine asynchrone

Parmi les avantages de la machine asynchrone et notamment en fonctionnement moteur, on peut citer

- Sa robustesse mécanique,
- Son faible coût et sa très grande standardisation,
- L'absence d'entretien constant.

I.2.3.2 Inconvénients de la machine asynchrone

L'inconvénient majeur du moteur asynchrone est relié à l'absorption du réactif qu'il faut parfois compenser, à des pertes de glissement et surtout à la nécessité de fonctionner pratiquement au voisinage de la vitesse de synchronisme

I.3 Présentation des différents défauts dans la machine asynchrone

Lorsqu'on parle des défaillances de la machine asynchrone, il est important de noter que cette machine ne constitue qu'un seul composant du système global et que plusieurs facteurs qui affectent le système affectent également le moteur et vice versa.

De ce fait, on peut classer les défauts dans les entraînements électriques en deux catégories : les défauts qui se produisent dans la chaîne d'entraînement à l'extérieur (externe) de la machine et les problèmes qui se développent dans la machine asynchrone à cage d'écureuil (interne), notre étude sera restreinte à cette deuxième catégorie.

Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le Tableau (I.1).

Défaillances des Machines Électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le stator et rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
			Mouvement des enroulements et des tôles
		Électrique	Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
	Défaillance au niveau du circuit magnétique		
	Externe	Mécanique	Charge oscillante
			Surcharge de la machine
			Défaut de montage
		Environnementale	Humidité
			Température
			Propreté
		Électrique	Fluctuation de la tension
			Sources de tensions déséquilibrées
Réseau bruité			

Tableau I. 1: Défauts des machines électriques selon leurs origines.

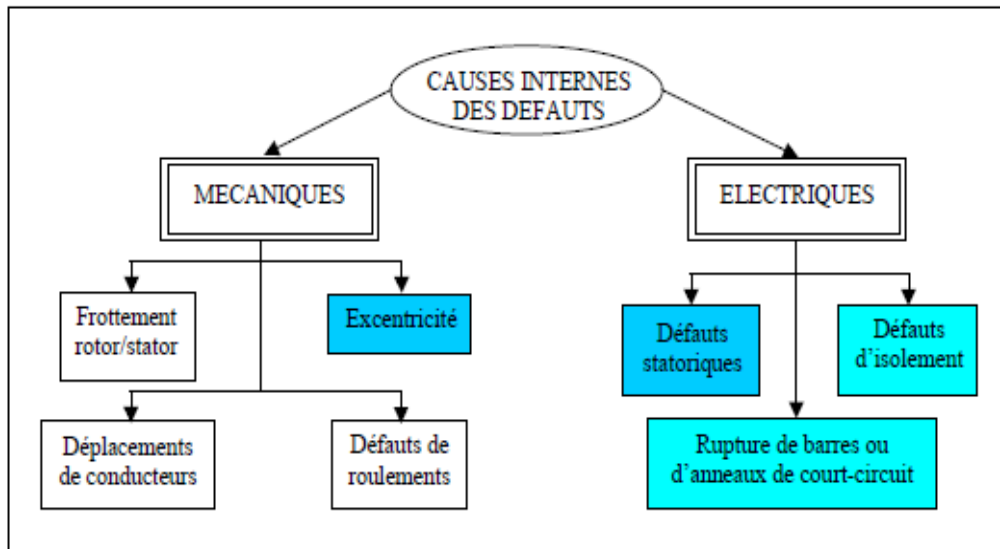


Figure I. 4: Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

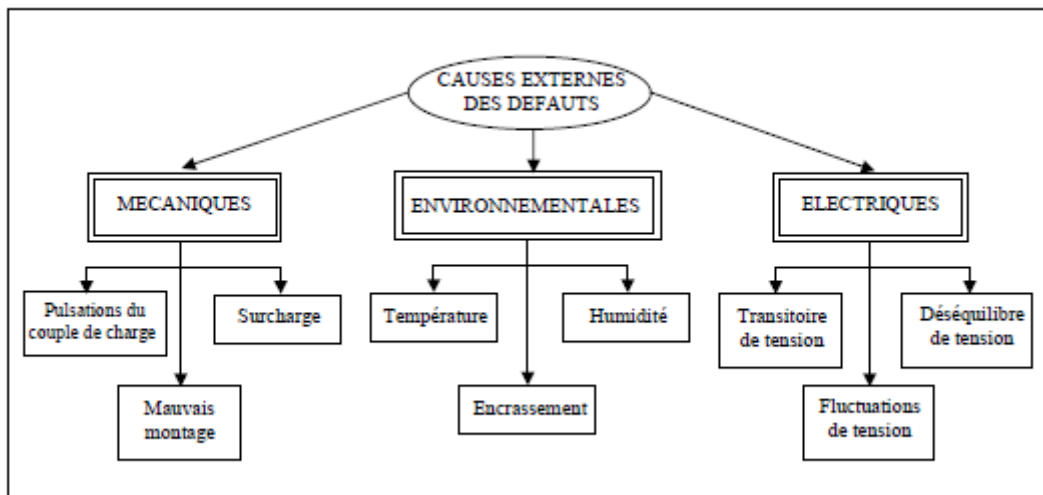


Figure I. 5: Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

I.3.1 Etude statistique des défauts

Statistiquement, il est difficile de donner une répartition exacte des défaillances de machines électriques puisque le recensement des pannes et défauts n'est pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance.

Des multiples études statistiques sur des machines ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'à présent. Toutes ces statistiques mentionnées dans concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie.

Les études effectuées sur des machines asynchrones de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) dans les années 90 par Thomsen, mentionnées après par Thomson, ont montré que sur cette gamme de puissance certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres et les pannes le plus fréquentes sont du type

mécanique (voir Figure I.6(a)). La majorité d'entre elles se situent sur les roulements (41 %) et le stator (37 %), Les moins fréquentes sont les pannes au rotor (10 %) et les autres types constituent 12 %.

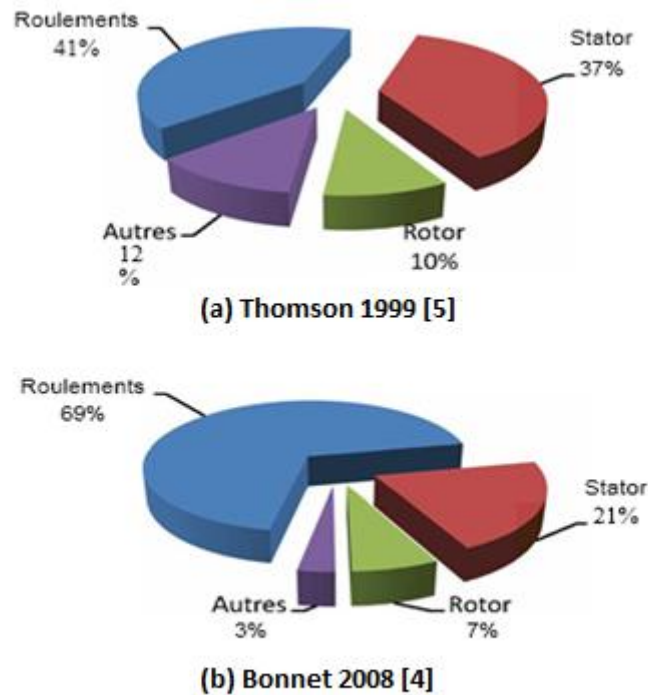


Figure I. 6: Évolution du pourcentage des défauts pendant une décennie.

Une étude statistique récente faite par Bonnet [4] sur les machines asynchrones de grande puissance, exploitées dans l'industrie pétrochimique, montre que 69 % de pannes se situent sur les roulements, 21 % au stator, 7 % au rotor et 3 % dans les autres régions de la machine (voir Figure I.6(b)).

Comme cela a été déjà mentionné dans l'étude [5], la répartition présentée dans [4.5] confirme que les défauts des machines de grande puissance proviennent principalement de roulements et du bobinage statoriques (voir Figure I.6(a), (b)).

D'autre part, ces études montrent que pendant une décennie la répartition du pourcentage de ces défauts a changé, les défauts de roulements sont passés de 41 % à 69%, les défauts au stator sont passés de 37% à 21 % et celles au rotor de 10% à 7%. On constate que les défauts dans le stator et le rotor sont de moins en moins fréquents. Cela est dû à l'amélioration de la technique de fabrication de machines électriques (par exemple, l'amélioration des isolants). La principale source de défaillance reste les roulements.

Il est à noter que les techniques d'alimentation des machines électriques provoquent aussi des défaillances, par exemple, les enroulements sont excités par des tensions comprenant des fronts raides ce qui accélère le vieillissement de l'isolation du bobinage statorique.

I.3.2 Les causes des défauts au stator et au rotor

Sont multiples les plus fréquentes d'entre eux sont énumérées ci-dessous [6] :

I.3.2.1 Défauts statoriques

- **Court-circuit entre spires** : surtension, température excessive, vibration, humidité.
- **Court-circuit entre phases** : haute température, alimentation déséquilibrée, défaut d'installation.
- **Défaut d'isolation** : démarrage fréquent, décharge partielle, condition, température et humidité extrême.
- **Défaut entre le stator et carcasse** : cycle thermique, abrasion de l'isolant, encrassement des spires par la carcasse, présence des points anguleux dans les encoches, choc.
- **Déplacement des conducteurs** : démarrage fréquent, vibration de tête de bobines.
- **Défaillance des connecteurs** : vibration excessive.
- **Vibration de la carcasse** : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, déséquilibre d'alimentation, surcharge, mouvement des enroulements, contact avec le rotor.

I.3.2.2 Défauts rotoriques

- **Défaut de roulements** : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, haute température, perte de lubrifiant, charge déséquilibrée, corrosion ;
- **Rupture de barres** : cycle thermique, régime transitoire à longue durée. Déséquilibre magnétique.
- **Rupture d'une portion d'anneau** : cycle thermique.
- **Excentricité** : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défauts des roulements.
- **Désalignement des roulements** : défaut de couplage, mauvaise installation, surcharge
- **Défaut du circuit magnétique** : défaut de fabrication, surcharge, cycle thermique.
- **Déséquilibre mécanique** : mauvais alignement, mouvement des anneaux de court-circuit. Une description succincte de défauts les plus courants est donnée dans les paragraphes suivants.

I.3.3 Les différents défauts

I.3.3.1 Défauts statoriques

La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants qui se manifestent sous la forme d'un court-circuit entre spires, d'un court-circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse.

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement. D'autre part, il entraîne aussi une augmentation des courants statoriques [1,6] dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases et dans le cas des machines asynchrones, il amplifie les courants dans le circuit rotorique. La contrainte thermique amenée par le courant de court-circuit risque d'entraîner la propagation du défaut à d'autres spires, ce qui peut conduire au déclenchement des protections électriques dans l'alimentation.

Un court-circuit entre phases peut arriver en tout point du bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs. L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage.

I.3.3.2 Défauts rotoriques

I.3.3.2.1 Défauts de roulements

Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Ce type de défaut induit également des variations

(oscillations) dans le couple de charge de la machine asynchrone. Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor [27]

I.2.3.2 Excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator. Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité. La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement. Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine ; en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine.

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées :

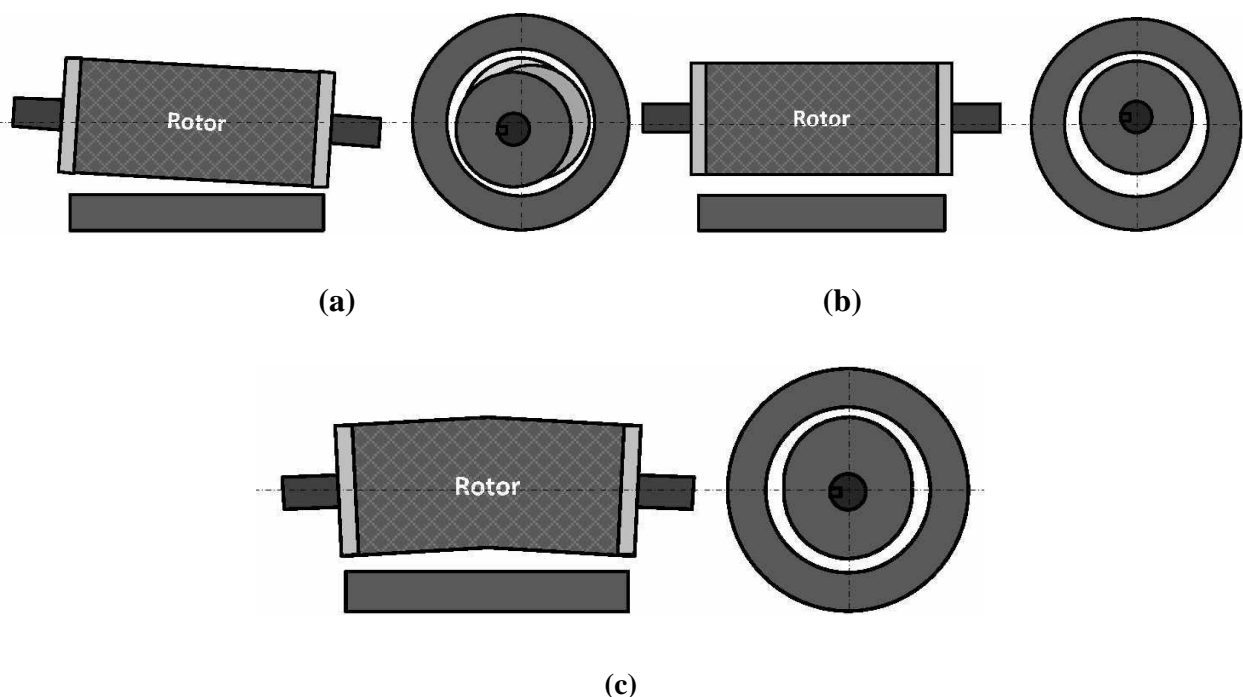


Figure I. 7: Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.

- L'excentricité statique (Figure I.7(a)) - généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.
- L'excentricité dynamique (Figure I.7(b)) - correspond, elle à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotoriques, une déformation du cylindre statoriques ou la détérioration des roulements à billes.
- L'excentricité mixte (Figure I.7(c)) - la somme des deux cas présentés ci-avant.

I.2.3.2.3 Défauts de rupture de barres et d'anneau de court-circuit :

Les mêmes défauts qu'au stator peuvent se retrouver dans un rotor bobiné. Pour une machine asynchrone avec un rotor à cage d'écurueil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit (Figure 1.8).

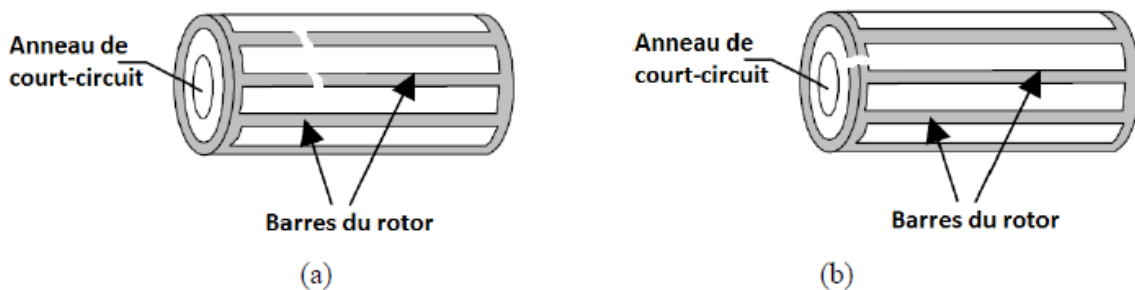


Figure I. 8: Défaut d'un rotor à cage d'écurueil : (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit

Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures). Cela fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante).

Si inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statoriques.

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres dans une machine asynchrone à cage. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Il convient de mentionner, qu'un mauvais dimensionnement des anneaux, conduit à une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et, donc, à des courants pouvant entraîner leur cassure.

L'apparition d'un défaut de rupture de barres n'induit pas à un arrêt de la machine, du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes, Ces barres sont alors surchargées, et les contraintes thermiques et électromécaniques engendrées peuvent conduire à leur rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine.

Devant la multitude des défauts envisageables et les conséquences de leurs apparitions, les techniques de surveillance se sont rapidement imposées auprès des utilisateurs des machines électriques. Elles commencent également à intéresser les concepteurs. [7]

I.5 Présentation des différentes méthodes de diagnostic

Un système de diagnostic de défauts consiste en trois étapes :

- La détection (décider que le système est en défaut ou non) ;
- La localisation (déterminer quelle partie du système est affectée)
- L'identification (estimer l'ampleur et le type des défauts).

L'approche traditionnelle consiste 'à ajouter des capteurs pour obtenir des informations supplémentaires sur l'état du système : c'est la redondance matérielle. L'inconvénient principal est le coût additionnel en équipement et en maintenance. Par opposition la redondance analytique consiste à développer des algorithmes de détection et localisation des défauts en utilisant les mesures disponibles sur le système. Ces algorithmes peuvent être ou non basés sur un modèle du système. Ils doivent bien sûr tenir compte des variations normales du comportement du système, des bruits de mesures, des perturbations externes. Ainsi que des erreurs de modélisation, pour éviter les fausses alarmes ou les manques à la détection, [8].

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées car elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés. Sur un problème un peu complexe, il n'est d'ailleurs pas rare de devoir utiliser plusieurs méthodes qu'on peut classer selon le schéma de la figure (I.9) :

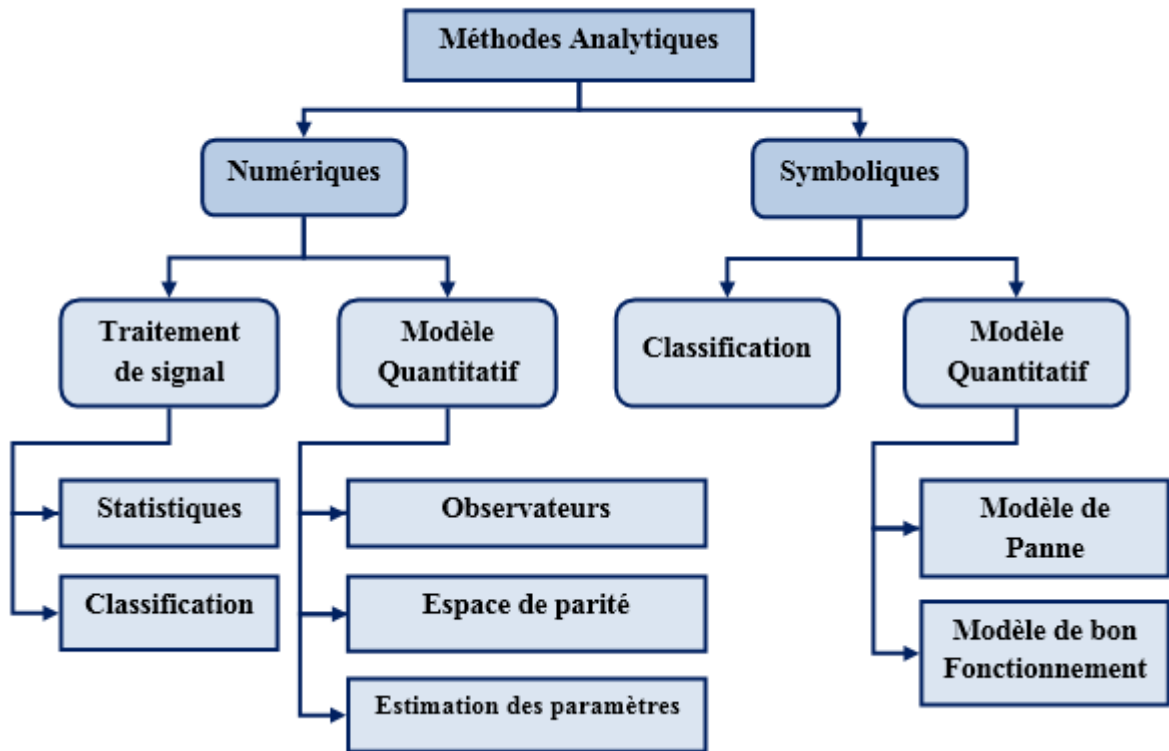


Figure I. 9: Méthodes analytiques de diagnostic des défauts, [8].

I.5.1 Approche modèle

Cette méthode est basée sur l'estimation des signaux non mesurables ou sur le suivi des paramètres durant le fonctionnement. Elles supposent une connaissance approfondie du procédé sous forme de modèle numérique. Dans le cas de la machine asynchrone, une modélisation dans le référentiel triphasé ou biphasé équivalent est nécessaire, [3]. Des paramètres (mécaniques ou électriques) de ces modèles sont relevés et utilisés pour avoir une signature des défauts. On teste la cohérence entre les mesures et les calculs des modèles par des grandeurs caractéristiques de l'état du procédé, appelées résidus. Le vecteur des résidus, nul en fonctionnement normal, est comparé en ligne aux signatures de pannes.

Selon ce mécanisme de diagnostic, on distingue :

- Le diagnostic par les observateurs ;
- Le diagnostic par redondance analytique (espace de parité) ;
- Le diagnostic par estimation paramétrique.

I.5.1.1 Diagnostic à l'aide des observateurs

Le principe de cette méthode est d'utiliser les erreurs d'estimation sur les sorties comme résidus. L'objectif est de construire des résidus structurés c'est-à-dire menant à la localisation des défauts. Dans

certain cas l'utilisation de plusieurs observateurs, mis en batterie, peut être nécessaire pour garantir la localisation des défauts, [9]

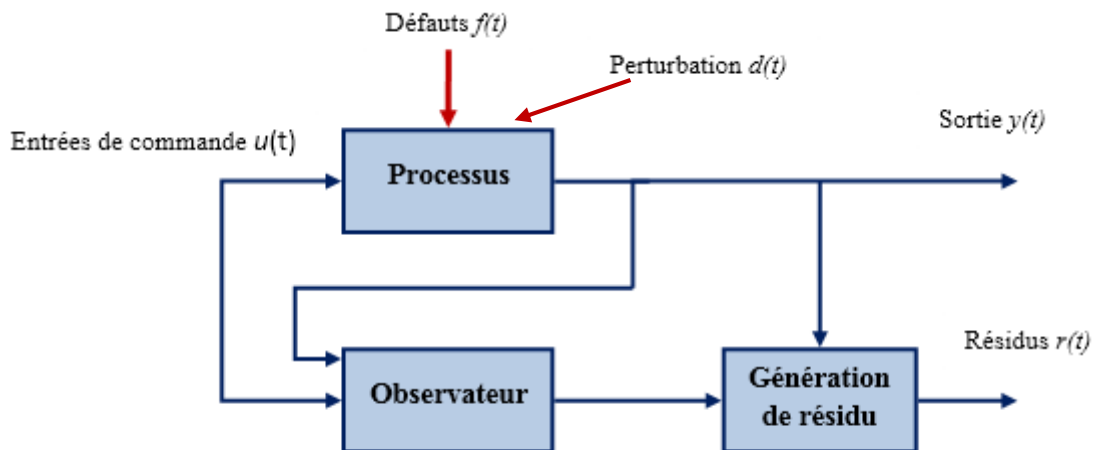


Figure I. 10 : Méthodes de diagnostic par les observateurs, [10].

I.5.1.2 Diagnostic par redondance analytique (espace de parité)

Comme pour les observateurs, la redondance analytique et la projection dans l'espace de parité sont basées sur l'exploitation des résidus issus du modèle de bon fonctionnement.

La philosophie de cette approche est d'exploiter la redondance analytique existant dans les équations d'état lorsque celles-ci sont écrites sur un horizon d'observation.

Le vecteur de résidus est alors généré en projetant les mesures observées sur cet horizon dans un espace appelé espace de parité, [11].

I.5.1.3 Diagnostic par estimation paramétrique

Cette méthode de diagnostic utilise les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance et extrait par la suite les paramètres du système à partir des lois de connaissance pour détecter et localiser les défaillances. Le point essentiel dans l'efficacité de cette méthode est le choix du modèle de connaissance. En effet, le type de défaut que l'on voudra détecter sera fonction du modèle utilisé.

Les premiers travaux relatant de l'estimation de paramètre ont débuté avec des modèles relativement simples (modèle de Park par exemple) utilisés depuis plusieurs années pour la commande des machines électriques. Ces modèles n'ont besoin que de quatre paramètres pour effectuer le diagnostic de défaut ce qui, dans certain cas, ne permet pas de localiser avec précision la défaillance. L'étape suivante est donc nécessairement le passage à un modèle de connaissance plus fin de la machine, tout en gardant la possibilité d'identifier les paramètres souhaités. Ces modèles peuvent être des modèles triphasés, qui s'affranchissent de l'hypothèse d'une machine magnétiquement équilibrée, ou encore des

modèles à n phases, capable de refléter le fonctionnement de la machine sur une large bande de fréquences.

Des algorithmes spécifiques ont été élaborés pour l'estimation séquentielle de paramètres. Le filtre de Kalman apparaît comme le plus adéquat de tous mais aussi le plus délicat à mettre en œuvre. Tout d'abord, en tant qu'algorithme d'identification en temps réel, le filtre de Kalman étendu délivre un modèle adaptatif, capable de prendre en compte les évolutions normales des paramètres de la machine telles que la variation des résistances (en fonction de la température) ou encore la variation des inductances (en fonction du niveau de saturation). Par ailleurs, les paramètres estimés, eux-mêmes, permettent une première analyse des conditions de fonctionnement de la machine. Par exemple, une augmentation anormale de la valeur des résistances statoriques peut signifier un échauffement excessif et donc une dégradation progressive des enroulements, [12,27].

I.5.2 Approche signal

Le principe des méthodes d'analyse des signaux repose sur l'existence de caractéristiques propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé.

L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement et les vibrations. Ces symptômes sont la manifestation apparente d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques, [13].

Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone pouvant être utilisées pour le diagnostic sont :

- Les courants absorbés ;
- Le flux de dispersion ;
- Les tensions d'alimentation ;
- La tension du neutre (neutre alimentation - neutre machine) ; le couple électromagnétique
- La vitesse rotorique, les vibrations ;
- Appel à des méthodes statistiques (change- ment de moyenne, rupture de modèle,

Analyse spectrale, analyse temps-fréquence ondelettes) ou bien à des méthodes de reconnaissance de formes qui permettent de classer les signatures de défauts, il faut dans ce cas disposer de suffisamment d'expériences pour pouvoir constituer une base d'apprentissage. C'est dans ce cadre qu'entrent les réseaux de neurones.

Les approches de classification se retrouvent également si l'on caractérise les situations avec des attributs symboliques.

I.6 Modélisation de la machine asynchrone

Les modèles décrivant le fonctionnement de la machine asynchrone en présence de défauts peuvent être groupés en modèles physiques et en modèles comportementaux :

Les modèles physiques se basent sur les lois de l'électromagnétisme pour décrire le fonctionnement de la machine. Ces modèles peuvent varier en complexité et/ou en précision selon la méthode de modélisation utilisée.

Les modèles comportementaux quant à eux, modifient les modèles issus de la physique en y introduisant des paramètres supplémentaires qui permettent la détection et, dans certains cas, la localisation du défaut observé. [14].

Ces modèles comportementaux peuvent être directement utilisés dans les procédures de diagnostic,

I.6.1 Méthodes de modélisation des machines asynchrones

Nous exposons les principales méthodes de modélisation fine de la machine asynchrone à cage défectueuse comme la méthode des réseaux de perméances (RNM), la Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC), la Modélisation analytique par CEMC (CEMC-A), le Modèle à circuits internes équivalents (CIE), et la méthode des éléments finis.

Nous allons, dans ce qui suit, commencer par décrire chacune des méthodes de modélisation fine de la machine asynchrone défectueuse, [15].

L'organigramme ci-dessus et représenté les différents méthodes de diagnostic de la MAS.

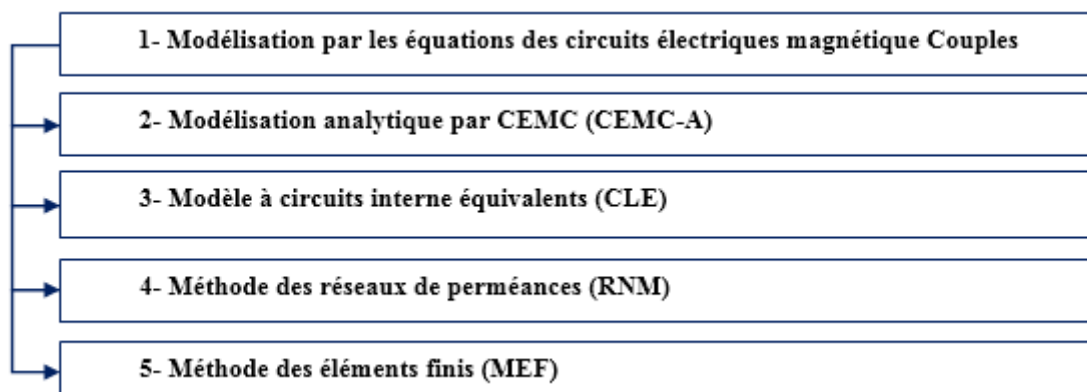


Figure I. 11 : Organigramme de différentes méthodes de modélisation de la MAS

I.6.1.1 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC)

Dans la modélisation par les équations des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC), les enroulements constituant le stator et le rotor sont représentés par un circuit électrique équivalent, forme par une inductance en série avec une résistance.

Par ailleurs, même si la méthode des CEMC ne permet pas la prise en compte de certains phénomènes complexes (saturation, effet de peau, etc.), il est possible de corriger le modèle par le biais de coefficients globaux pouvant renseigner sur leur influence sur les grandeurs globales, [07].

Ainsi, malgré ses faiblesses, l'approche de modélisation par CEMC offre un bon compromis en termes de précision, de temps de calcul et d'adaptation à la modélisation de la plupart des défauts d'origine électromagnétique de la machine asynchrone.

Le rotor est représenté par un circuit électrique comportant des mailles magnétiquement couplées comme le montre la figure (I.12).

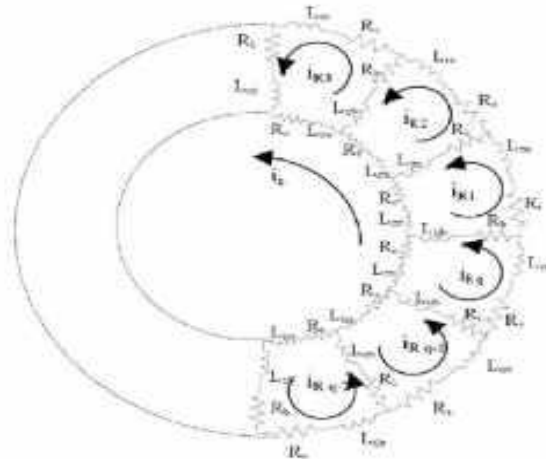


Figure I. 12 : Schéma électrique équivalente de la cage rotorique, [10].

L'écriture du modèle triphasé de la machine asynchrone par l'approche des CEMC est basée sur un certain nombre d'hypothèses dont les principales sont les suivantes :

- Le fer (les tôles) est de perméabilité infinie ;
- Les pertes par courants de Foucault sont négligeables ;
- Les courants inter-bars sont négligeables (tôles magnétiques rotoriques isolées des barres et des anneaux de la cage).

La première hypothèse peut cependant être partiellement contournée par l'introduction de l'onde fondamentale de saturation dans l'expression de la perméances de l'entrefer permettant ainsi la prise en compte de la chute de tension magnétique (f.m.m.) dans le fer. Quant à la troisième hypothèse, il faut dire qu'elle est partagée par toutes les méthodes de modélisation tant les courants inter-bars sont difficiles à prendre en compte de façon locale.

I.6.1.2 Modélisation analytique par CEMC (CEMC-A)

Dans cette méthode, les inductances sont calculées analytiquement, Cette approche permet de prendre en compte les harmoniques d'espace les plus importants tout en réduisant le temps de calcul, les inductances n'étant plus calculées par intégration numérique. La prise en compte de ces harmoniques d'espace est effectuée grâce à un développement en série de Fourier de l'induction dans l'entrefer de la machine. Il en résulte une écriture en série de Fourier des expressions des inductances propres et mutuelles. Ces quelques harmoniques

D'espace pris en compte dans l'expression des inductances induisent des harmoniques d'espace équivalents dans les courants de phases et dont l'analyse apporte une information pertinente pour le diagnostic des barres cassées au rotor de la machine asynchrone, [14].

I.6.1.3 Modèle à circuits internes équivalents (CIE)

Cette méthode de modélisation est basée sur la représentation de la machine en fonction des éléments d'un circuit électrique avec des résistances, des bobines, des condensateurs et des sources de tension ou de courant. La représentation discrète des caractéristiques électriques d'un enroulement statorique ou d'une barre rotorique est étroitement liée à l'estimation des paramètres résistifs et inductifs. L'effet d'isolement entre spires est associé à l'effet capacitif que nous négligerons compte tenu du domaine de fréquence étudié. La modélisation du stator par un circuit électrique équivalent peut-être obtenue à partir de la représentation de chaque spire du bobinage de manière indépendante. Pour ce faire, les paramètres tels que la résistance, l'inductance propre, l'inductance mutuelle par rapport aux autres spires du stator, l'inductance mutuelle par rapport aux mailles du rotor peuvent être obtenus en appliquant les lois élémentaires sur les circuits magnétiques. La représentation de la cage rotorique peut être obtenue à partir du modèle associé à chaque maille formée par deux barres et les segments d'anneau de court-circuit correspondants, [07]. [31]

I.6.1.4 Méthode des réseaux de perméances (RNM)

La méthode des réseaux de perméances est basée sur la décomposition du circuit magnétique étudié en tubes de flux, chaque tube étant caractérisé par sa perméance. A partir de cette décomposition, on construit un réseau de perméances, similaire à un circuit électrique, où les grandeurs mises en jeu sont le flux et les différences de potentiels magnétiques. Les sources de forces magnétomotrices (f.m.m) sont obtenues par la modélisation des couplages avec les circuits électriques externes. Dans le cas particulier de la machine asynchrone, les sources de f.m.m sont placées dans les dents statoriques et rotoriques et leurs valeurs dépendent directement du courant dans les bobinages concernés.

Ainsi, la machine asynchrone peut être décomposée en une association de circuits élémentaires, composés d'une dent, d'une encoche et de la portion de culasse concernée. Un circuit élémentaire est

modélisé par trois perméances (perméance de dent, perméance de culasse et perméance de fuite de pied d'encoche) et une source de (f.m.m) figure (I.13).

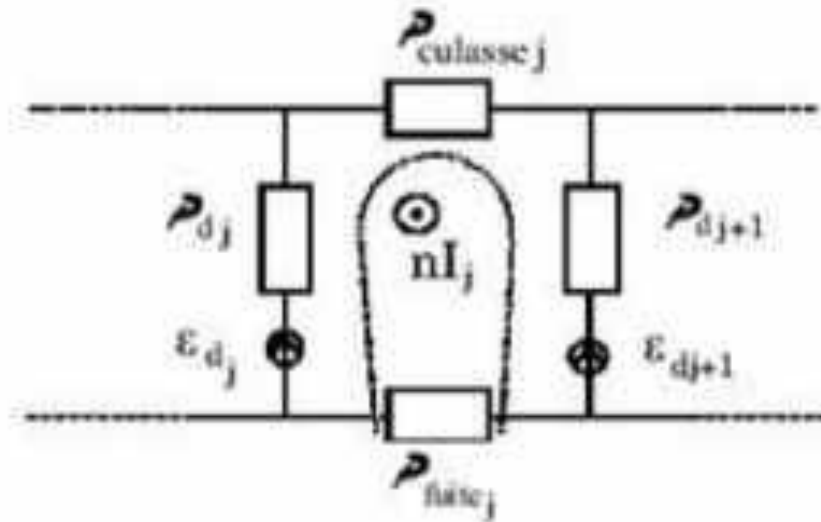


Figure I. 13 : Réseau de perméances élémentaire autour d'une encoche statorique, [15].

Toutes les valeurs de perméances sont calculées par le biais d'une simulation avec la méthode des éléments finis en magnéto-statique et il est possible de prendre en compte la saturation magnétique. La mise en équations, l'obtention et la résolution du système d'équations différentielles non linéaires qui décrit le comportement électromagnétique et dynamique du système, [14].

I.6.1.5 Méthode des éléments finis

Si la méthode des réseaux de perméances permet d'introduire la saturation des matériaux magnétiques dans la modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts augmentant du coup la précision du modèle par rapport à la méthode CEMC, la méthode des éléments finis, quant à elle, nous affranchit de la plupart des hypothèses simplificatrices habituelles lors de la modélisation des machines électriques tournantes.

Dans la méthode des éléments finis [32] 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.

Dans le domaine du diagnostic de la machine asynchrone, la méthode des éléments finis est utilisée dans le but de comprendre et de quantifier les conséquences locales d'un défaut sur les différentes parties de la machine, [13].

A titre d'exemple, la méthode des éléments finis permet l'étude des effets locaux du défaut de rupture de barres de la cage rotorique à savoir un échauffement local excessif dû à sollicitation électrodynamique de ces mêmes barres voisines pouvant conduire à la propagation du défaut. De même, la méthode des éléments finis sert à appréhender les impacts magnétiques et l'augmentation des courants circulant dans les barres voisines et une forte thermique locaux du défaut de court-circuit inter-spores dans les phases statoriques.

L'analyse des phénomènes électromagnétiques est basée sur la résolution des équations de Maxwell. On distingue deux techniques principales de résolution des équations des champs électromagnétiques :

Différences finies : le maillage est un quadrillage rectangulaire sur les nœuds pour lesquels est effectuée la discrétisation spatiale de l'équation différentielle, associée à la décomposition en série de Taylor du potentiel scalaire.

Éléments finis : le principe fondamental réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, le potentiel est approché par un polynôme de degré faible.

La résolution se ramène alors à la minimisation d'une fonction liée à l'énergie emmagasinée dans les éléments.

L'utilisation de méthode de calcul par éléments finis prend en compte la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques.

Les équations qui régissent le champ électromagnétique dans les systèmes électromagnétiques sont les équations de Maxwell, accompagnées des relations constitutives du milieu considéré. Actuellement, des logiciels éléments finis, permettant de résoudre des problèmes magnétiques, sont proposés couramment sur le marché. Ils se répartissent principalement en trois catégories :

- Les logiciels bidimensionnels statiques (Opera2D, Flux2D, Maxwell, ...)
 - Ou l'équation magnétique est résolue seule.
- Les logiciels bidimensionnels dynamiques (Flux2D, ...) ou les équations magnétiques et électriques sont résolus simultanément afin de tenir compte du mouvement.
- Les logiciels tridimensionnels (Flux3D, TOSCA, ELECTRA, ...) permettent de prendre en compte les effets de bord ou de calculer des structures complexes.

Prenons le cas de logiciel Flux2D il permet de réaliser le schéma du circuit magnétique en un plan de coupe perpendiculaire à l'axe de rotation de la machine.

Ce logiciel résout l'équation suivante :

$$\overline{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} [\nu_r] \overline{rot}(A) - \overline{H}_c \right) + [\sigma] \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \overline{grad}(V) \right) = 0 \quad (I.3)$$

Avec :

$[\nu_r]$: est le tenseur de réflectivité magnétique du milieu.

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide (en H/m).

\vec{A} : est le potentiel vecteur magnétique (en Weber/m).

\vec{H}_c : est le champ magnétique coercitif (en A/m).

$[\sigma]$: est le tenseur de conductivité électrique du milieu (en 1/ .m).

V : est le potentiel scalaire électrique (en V) ;

t : Temps (en s).

La figure (1.14) représente le circuit magnétique d'un moteur asynchrone.

L'utilisation de la bande de roulement permet de prendre en compte la rotation du rotor en magnéto-évolutif sans pour autant effectuer un nouveau maillage de la machine à chaque nouvelle position du rotor.

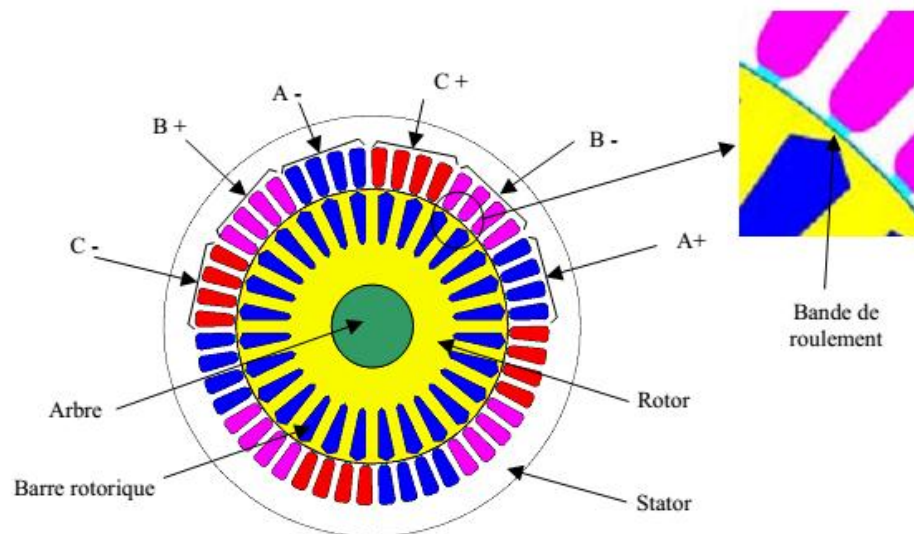


Figure I. 14: Circuit magnétique d'une machine asynchrone (à $p=2,4$ encoches/ pole/ phase et 28 barres), [13].

La considération du comportement électromagnétique local permet d'avoir une modélisation plus fine du moteur. La résolution numérique des équations de Maxwell régissant le comportement des champs électromagnétiques et la prise en considération des équations électriques, permet de réduire les simplifications faites dans les modèles classiques et ainsi : l'avoir un modèle plus proche de la machine électrique réelle. Certes, Cette technique de modélisation est plus rigoureuse mais présente plusieurs handicaps :

- Elle est très liée aux dimensions de la machine et ne représente qu'une machine bien précise ;
- Elle manque de flexibilité : il faut modifier la saisie de la machine pour chaque topologie de bobinage de la machine ;
- Complexité des logiciels à éléments finis ;
- Elle est couteuse en temps de calcul et en ressources logicielles

I.6.1.6 Comparaison des méthodes de modélisation

Au fil des paragraphes précédents, il apparaît que la méthode des éléments finis est celle qui offre la plus grande quantité d'information aussi bien au niveau local qu'au niveau des grandeurs globales en termes de précision. Ainsi, avec la MEF, il est possible d'obtenir une signature de défaut simulée assez proche des signaux réels. Cependant, ce niveau de précision doit être grandement modéré par des temps de calcul qui s'avèrent excessifs surtout dans le cas de l'étude de certains inter-harmoniques nécessitant des simulations sur des fenêtres temporelles assez longues. Tout en gardant les mêmes hypothèses que la MEF (même si le calcul de la perméance de l'entrefer doublement encoché reste peu précis), la méthode des réseaux de perméances apporte une amélioration en termes de temps de calcul par rapport à la MEF, [15].

Cependant, la mise en œuvre de la RNM reste assez fastidieuse et le calcul des perméances du réseau doit être adapté (si ce n'est pas refait) pour chaque machine étudiée.

Si les méthodes basées sur les circuits électriques à constantes réparties manquent de précision à cause de certaines hypothèses fortes (perméabilité infinie, etc.), elles nécessitent des temps de calcul sensiblement plus courts que la RNM et la MEF.

Elles sont donc bien adaptées à l'étude et la simulation de la manifestation d'un défaut et ce, surtout quand ladite manifestation se traduit par l'apparition ou la disparition de certaines raies du spectre.

A ce stade, il faut noter que la méthode des CIE et la méthode des CEMC-A sont plus rapides que la méthode CEMC, mais elles nécessitent le calcul analytique des inductances, ce dernier pouvant changer selon l'arrangement géométrique des constituants de la machine. Quant à la CEMC, le calcul numérique des inductances par le biais de la théorie des fonctions de bobinage et de distribution donne à cette méthode une assez grande souplesse d'utilisation avec une définition minimale des arrangements géométriques des constituants de la machine à étudier. Enfin, les méthodes de type « circuits » peuvent être améliorées par l'utilisation de la MEF pour le calcul préalable de certains paramètres. En guise de synthèse, le tableau (1.2) résume les hypothèses des différentes méthodes.

Méthode	Hypothèse
Circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC)	Sans saturation, avec détails de la géométrie Sans saturation, avec détails de la géométrie
CEMC analytique (CEMC-A)	Sans saturation, sans détails de la géométrie
Circuit internes équivalents (CIE)	Sans saturation, sans détails de la géométrie
Réseaux de perméances (RNM)	Avec saturation locale Avec détails de la géométrie
Eléments Finis 2D(MEF)	Avec saturation locale et avec détails de la Géométrie

Tableau I. 2 : Comparaison des méthodes de modélisation de la machine asynchrone en présence de défaut

I.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre Après quelques rappels sur les défaillances pouvant affecter la machine asynchrone dont les conséquences varient selon le type et le degré de sévérité du problème, ainsi que les principaux défauts qui peuvent gêner leur fonctionnement et les différentes causes probables, nous sommes attardés sur une synthèse de différentes méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone triphasée en présence de défauts.

Chapitre II : Modélisation et simulation du MAS par la méthode des éléments finis

II.1 Introduction

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, la vérification sur le prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défauts et elles apportent également la possibilité de construire des bases des données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Parmi les approches de modélisations existantes, nous allons baser sur la méthode des éléments finis, [10,20]

Dans ce chapitre nous allons présenter la simulation de par la méthode des éléments finis (MEF) dans le régime magnéto dynamique sous logiciel Flux 2D® [26] de la machine asynchrone saine et avec des défauts de rupture des barres au rotor. La simulation de la rupture d'une barre, dans notre modèle consiste, La rupture de la barre peut être effectuée par deux méthodes différentes :

- La première consiste à augmenter la valeur de la résistance de la barre incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible de zéro en régime permanent.
- La seconde consiste à supprimer le conducteur associé à la barre dans le circuit électrique et la surface correspondante dans la géométrie est remplie par l'air.

Dans notre travail, nous avons utilisé cette dernière méthode qui présente la cassure totale de la barre rotorique.

II.2 METHODE DES ELEMENTS FINIS

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

Dans les machines électriques les équations qui régissent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré. On les définit comme suit, [16] :

- Les relations de couplage électromagnétique :

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

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

- Les relations de la conservation des flux :

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

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

- La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

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

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

- La relation de la loi d'Ohm :

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

Où,

\vec{H} : Champ magnétique (A/m)

\vec{E} : Champ électrique (V/m)

\vec{B} : Induction magnétique (T)

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

\vec{J} : Densité de courant totale (A/m²)

μ : Perméabilité magnétique (H/m)

σ : Conductibilité électrique (Ω⁻¹m⁻¹)

II.2.1. Le modèle employé

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

II.2.1.1 Le mode magnétostatique

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courants induits) de la machine car il impose de 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 :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.8})$$

$$div \vec{B} = 0 \quad (\text{II.9})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.10})$$

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

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot} \vec{A} \quad (\text{II.11})$$

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

Par la substitution de (I.11) et (I.10) dans (I.8) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

$$\overrightarrow{rot}(v \cdot \overrightarrow{rot} \vec{A}) = \vec{J} + \overrightarrow{rot}(v \cdot \vec{B}_r) \quad (\text{II.12})$$

Où

$v = \frac{1}{\mu}$: est la réflectivité magnétique.

II.2.1.2 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 simuler 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 :

$$\overrightarrow{rot}(v.\overrightarrow{rot}\overrightarrow{A}) + j\omega \sigma \overrightarrow{A} = \overrightarrow{J} \quad (\text{II.13})$$

$\omega = 2\pi f$: pulsation électrique (rad. s⁻¹), j : unité imaginaire (i² = -1)

II. 2.1.3 Le mode magnétique transitoire

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

Donc le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{rot}(v.\overrightarrow{rot}\overrightarrow{A}) + \sigma \frac{\partial \overrightarrow{A}}{\partial t} - \overrightarrow{rot}\overrightarrow{B}_r + \sigma \overrightarrow{grad}V = 0 \quad (\text{II. 14})$$

II.2.2 Principe de la méthode des éléments finis

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, Le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être approchée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), dont l'expression varie d'un type à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [10].

Pour élément triangulaire on a :

$$A_e(x, y) = a + bx + cy \quad (\text{II.15})$$

Pour les éléments quadrilatéraux on a:

$$A_e(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (\text{II.16})$$

Les constantes a b c et d sont à déterminer. Le potentiel A_e est en générale non nul dans l'élément et nul ailleurs.

La valeur approchée du potentiel dans un point du domaine (Ω) de résolution est donnée par :

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{ne} A_e(x, y) \quad (\text{II.17})$$

e : Numéro d'élément.

ne : Le nombre totale des éléments du domaine (Ω).

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 (Fig. II-1).

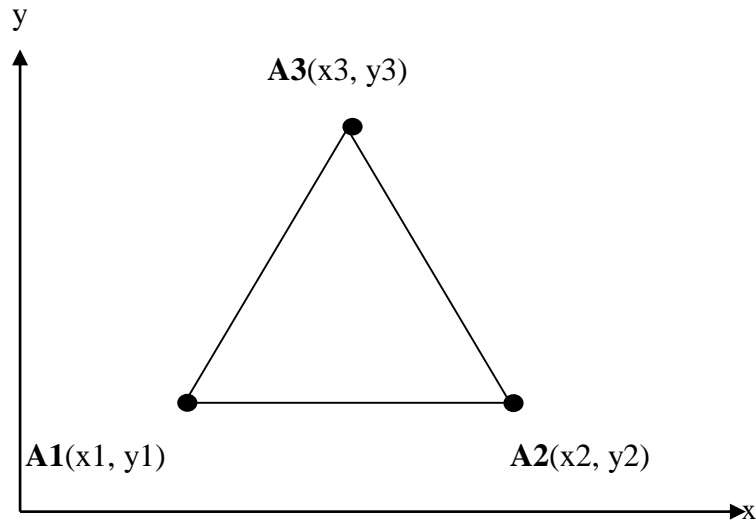


Figure II. 1: Fonction d'interpolation d'un élément.

II.2.3 Logiciel de résolution

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

Toutefois, en utilisant une méthode des éléments finis conventionnelle, il serait difficile de calculer les performances de la machine tenant compte à la fois des courants de Foucault induits dans les conducteurs massifs, des non-linéarités des matériaux magnétiques et des sources externes.

C'est dans cette perspective que nous avons opté pour une nouvelle formulation, mieux adaptée pour notre problème : il s'agit d'une méthode dite directe permettant de résoudre simultanément les équations couplées du champ magnétique et des circuits électriques. Cette formulation est implantée dans le logiciel d'éléments finis Flux 2D que nous allons présenter dans ce qui va suivre.

II.2.4 Structure du FLUX 2D

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. Nous ne détaillerons pas son fonctionnement car des tutoriaux sont très bien conçus et ce n'est pas le propos.

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 [17] :

II.2.4.1 Construction

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier (geometry & physics), de choisir et de construire une banque de matériaux (Materials database) et de définir le schéma et les données du circuit électrique (Circuit).

II.2.4.2 Module Solving Process

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

II.2.4.3 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.

II.2.5 Enchaînement de base dans FLUX2D

De façon générale, l'enchaînement des programmes de Flux 2D, doté d'une interface schématisée par la figure (II.2).

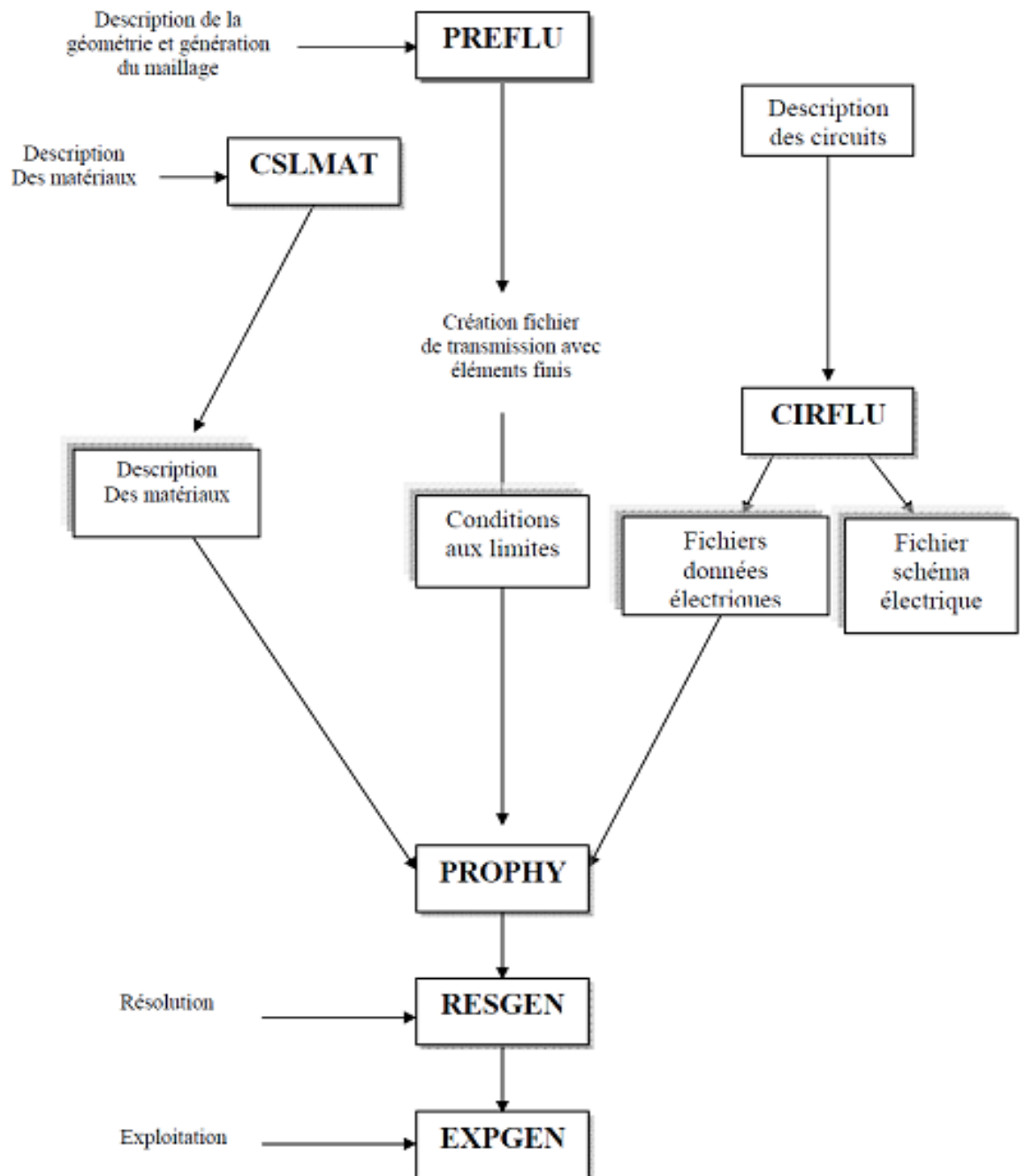


Figure II. 2 : Schéma des différents modules du logiciel Flux-2

II.3. Application à la simulation de la machine asynchrone

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

Partie	Paramètre	Valeur1	Unité
Machine	Puissance nominale	2.2	KW
	Tension nominale	220	V
	Vitesse nominale	1440	tr/min
	Nombre de pôles	4	
	Fréquence	50	Hz
	Longueur active	0.097	mm
Stator	Nombre de phases	3	
	Type de connexion	Y	
	Nombre d'encoches	36	
	Diamètre interne	99	mm
	Diamètre externe	172.9	mm
rotor	Diamètre externe	98.34	mm
	Diamètre interne	34.08	mm
	L'épaisseur de l'entrefer	0.33	mm
	Nombre de barres	48	

Tableau II. 2 : Caractéristique de la machine étudiée.

La figure (II-3) représenté la géométrie de la machine étudiée et les Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique.

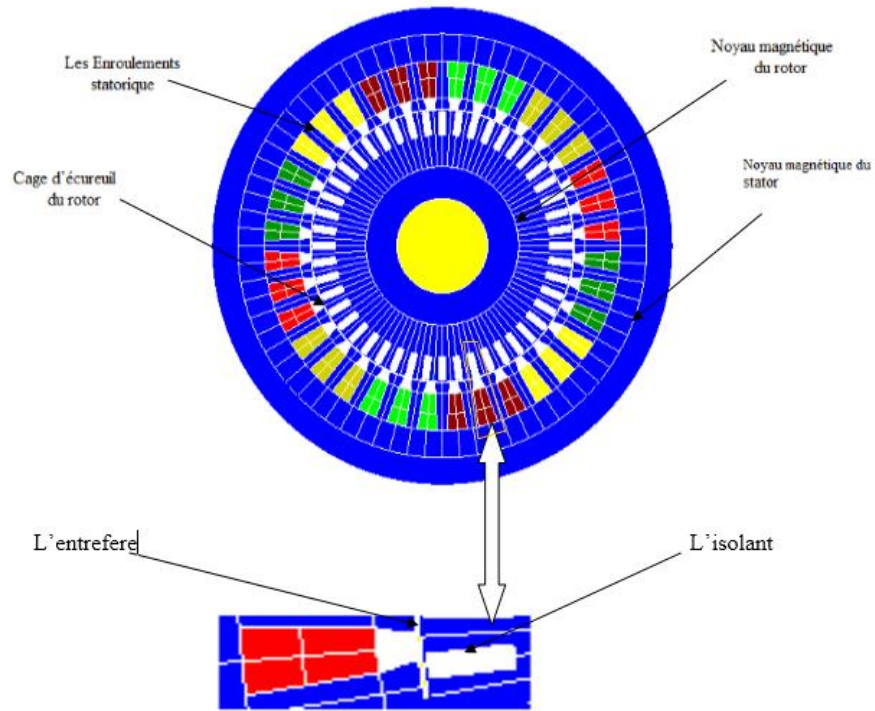


Figure II. 3 : Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique.

La figure (II-4) représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine

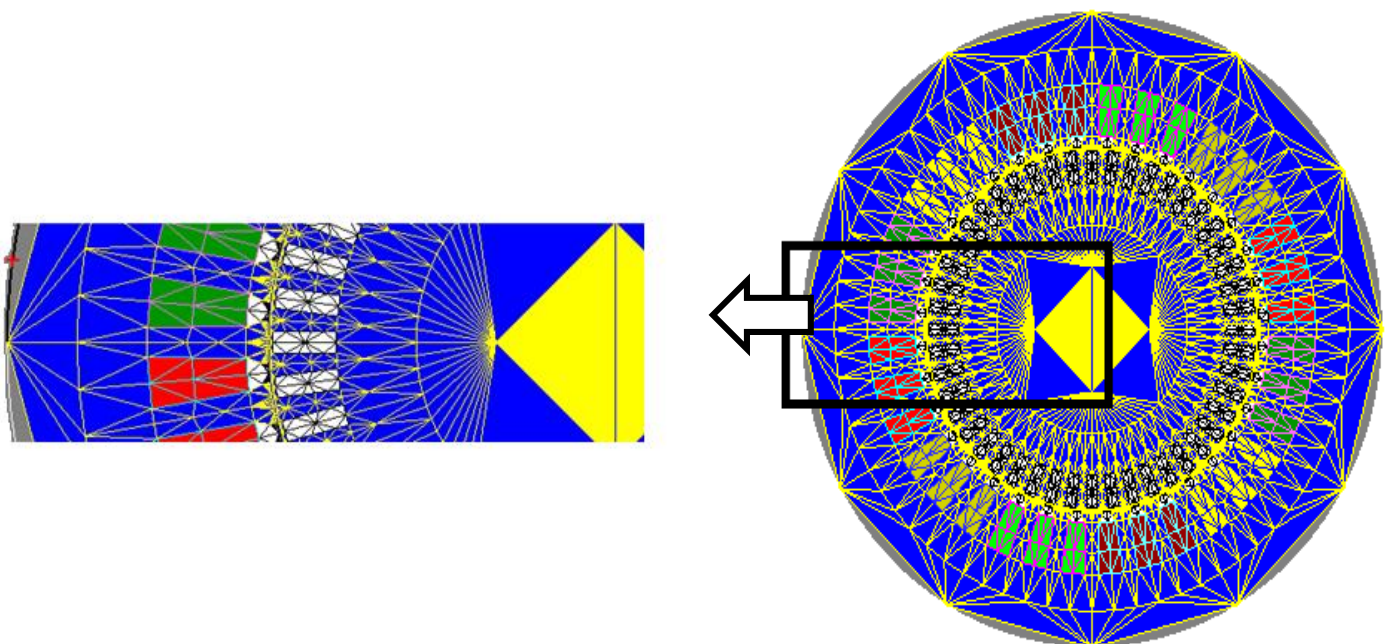


Figure II. 4 : Répartition du maillage

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

II. 3.1 Les matériaux conducteurs

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

Au niveau de rotor, nous utiliserons la résistivité de l'aluminium à température fixe.

II. 3.2 Les matériaux magnétiques

Pour ce qui est des propriétés magnétiques des matériaux ferreux, on prendra en compte la non-linéarité des caractéristiques B(H) (Tableau II.2)

H [A /m]	B [T]	H [A /m]	B [T]	H [A /m]	B [T]	H [A /m]	B [T]
0	0	2000	1.61	7000	1.83	40000	2.14
300	0.66	3000	1.69	8000	1.85	50000	2.16
500	1.09	4000	1.73	10000	1.89	60000	2.18
1000	1.45	5000	1.76	20000	2.04	70000	2.192
1500	1.56	6000	1.79	30000	2.11	-	-

Tableau II. 3 : B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN [34].

La courbe B(H) du circuit magnétique est représentées ci-dessous.

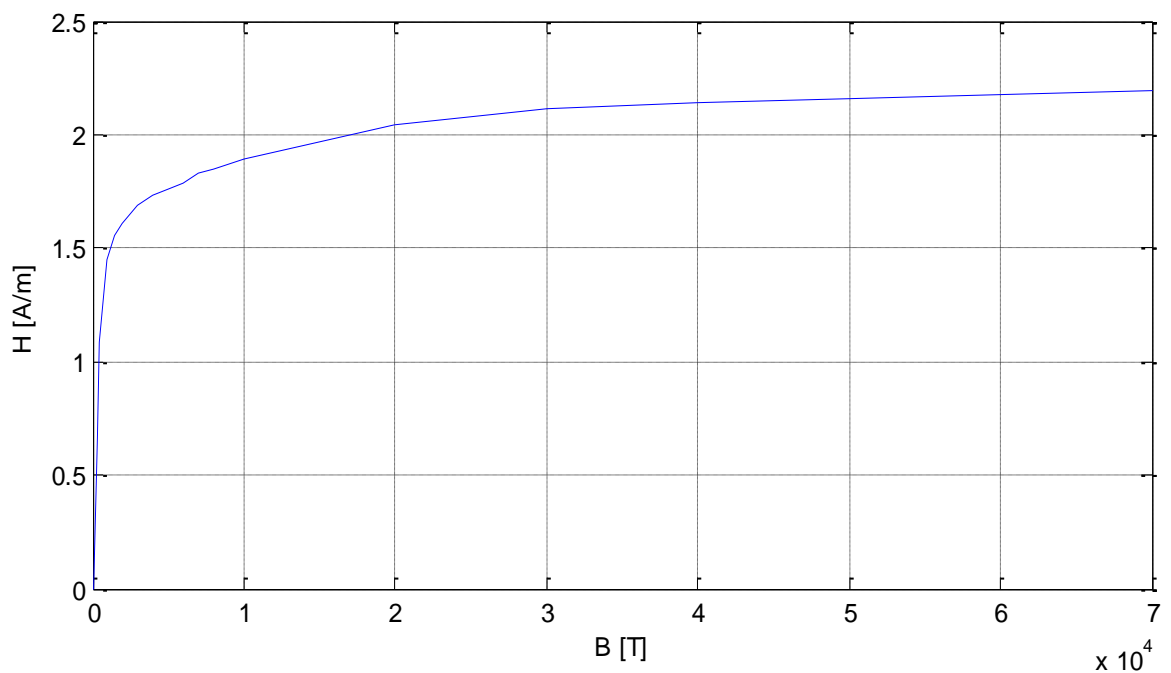


Figure II. 5 : Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.

II.3.3 Couplage avec les équations de circuit

Pour représenter fidèlement le moteur, il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court-circuit) Le circuit électrique figure (II.6).

Les sources de tension d'alimentation (V_U, V_V, V_W), Le bobinage statorique (B_U, B_V, B_W), les Inductances de fuite, (L_U, L_V, L_W),

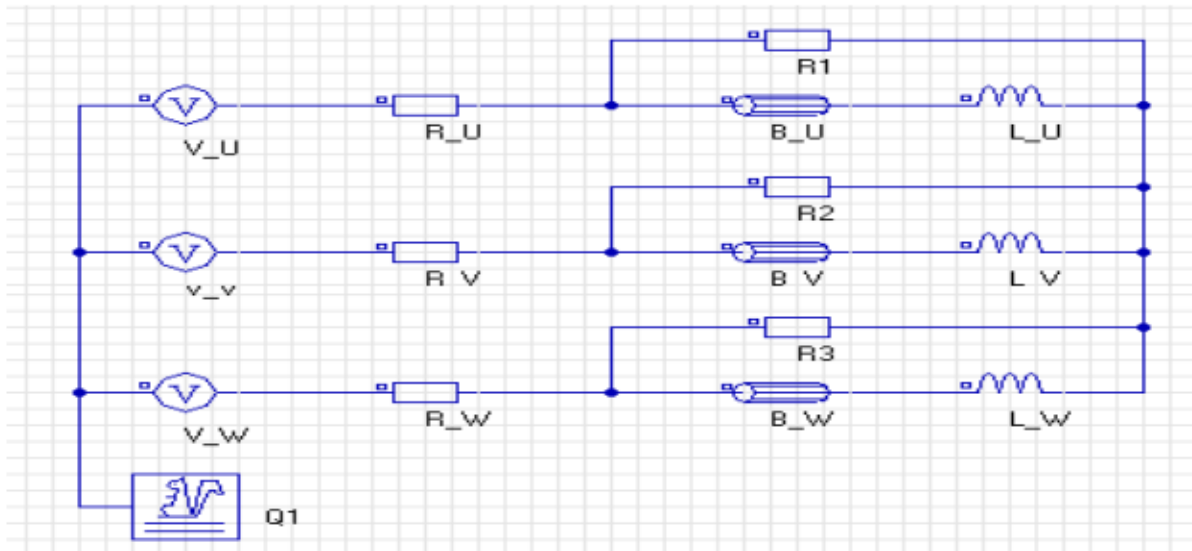


Figure II. 6 : Circuits représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie

Les Résistances de chute de tension dans les réseaux (R_U, R_V, R_W), $R1, R2, R3$: représentent les résistances des voltmètres pour mesurer la tension statoriques, [TOU 09]. Avec:

$Q1$: est un macro-circuit (un dispositif du logiciel Flux 2D®) utilisé pour modéliser la cage d'écurueil de la machine, c'est un circuit fermé contient des barres rotor rotoriques figure (11.7) (Barre k), résistances (R_{ik}) inductances de fuite ($L_{\sigma ik}$), correspondant aux régions d'inter-barre d'anneaux de court-circuit (arcs entre deux barres adjacentes).

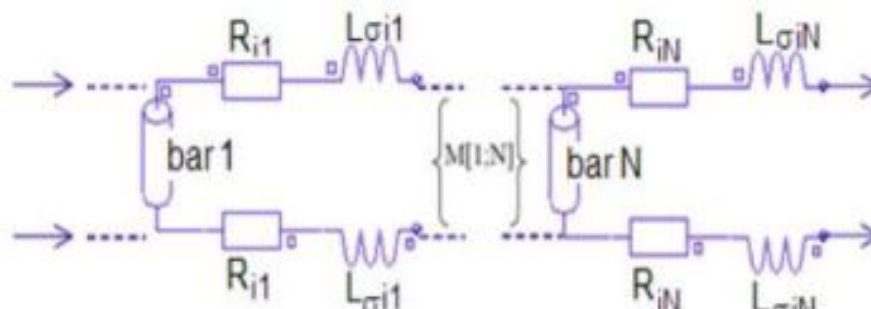


Figure II. 7 : Circuit équivalent de la cage rotorique.

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

II.4 Résultats de simulation par la magnétodynamique (machine saine)

II.4.1 Caractéristique de simulation

Dans ce mode de fonctionnement, il faut déterminer les valeurs de la fréquence d'alimentation et du glissement. On utilisera le couplage avec les équations de circuit qui permettent de simuler les courts-circuits de la cage. On rappelle les avantages et les limites de la magnétodynamique, [17].

II.4.1.1 Avantage

- Simplicité de mise en œuvre ;
- . Gain de temps et d'espace mémoire par rapport à la résolution évolutive ;
- La prise en compte des courants induits.

II.4.1.2 Inconvénients

- Utilisation possible uniquement pour le régime permanent ;
- Toutes les grandeurs sont supposées sinusoïdales dans le temps et à même fréquence.

Le mouvement du rotor n'est pas « physiquement » pris en compte. Cela aboutit à des courants statorique parfois déséquilibrés car les harmoniques des espaces ne sont pas prises en compte. Les simulations magnéto-harmoniques de Flux2D® de la machine asynchrone sont effectuées pour des valeurs constantes de glissement (valeurs constantes de vitesse rotoriques).

II.4.2 Résultats graphiques

Le résultat de simulation ci-dessous représente :la Répartition des lignes équiflux figure (II. 8) et l'induction dans le circuit magnétique figure (II.9).et les figures (II.10 et II.11) représentent respectivement La densité de courant dans les barres de rotor lors de démarrage du moteur, et pour le fonctionnement nominal.

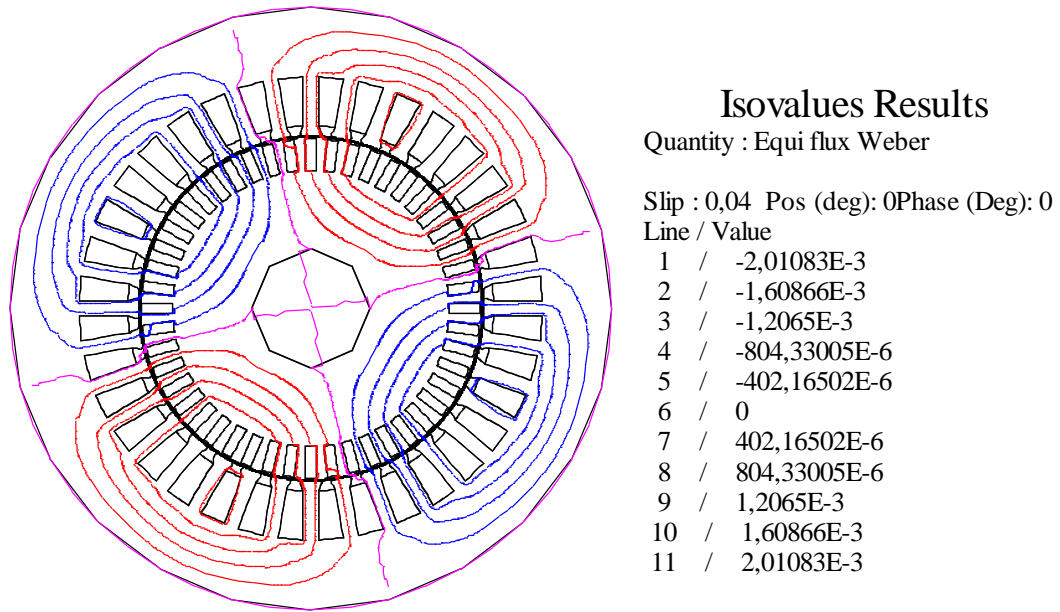


Figure II. 8 : Répartition des lignes équiflux pour le fonctionnement nominale (g=0.04)

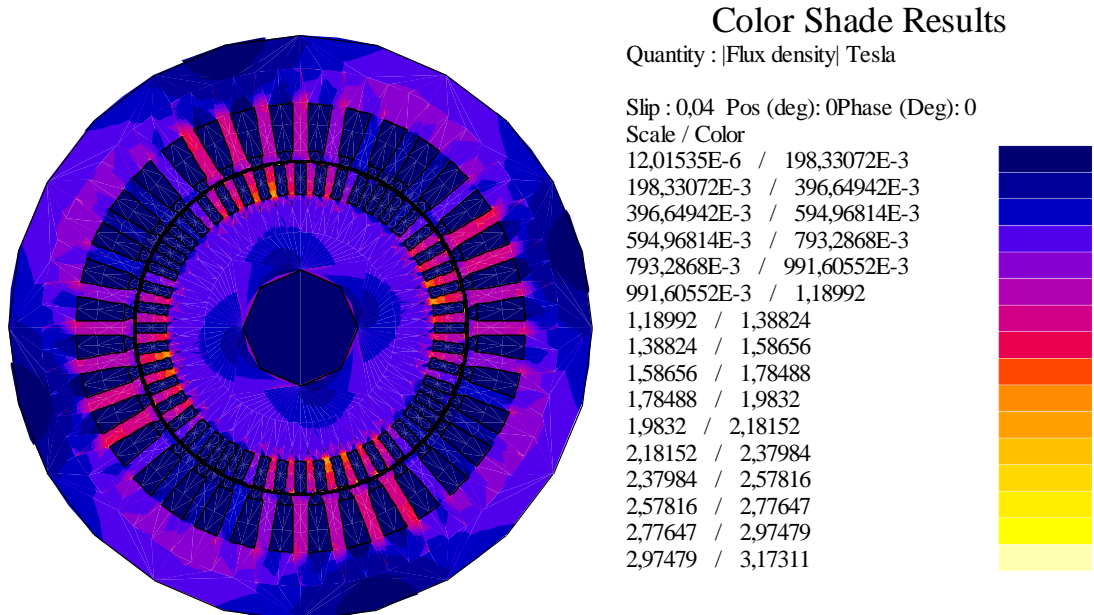


Figure II. 9 : L'induction magnétique pour le fonctionnement nominale.

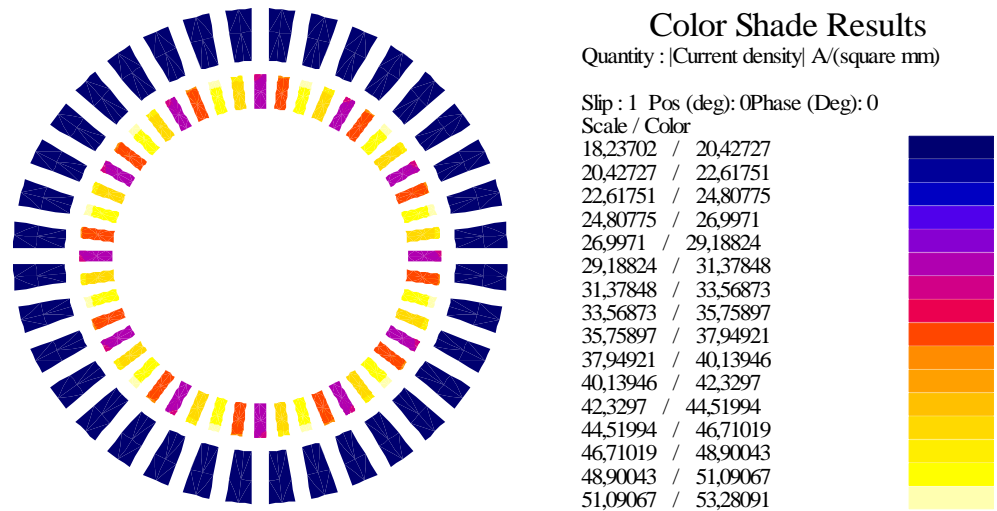


Figure II. 10 : Densité du courant dans les barres de démarrage du moteur (g=1).

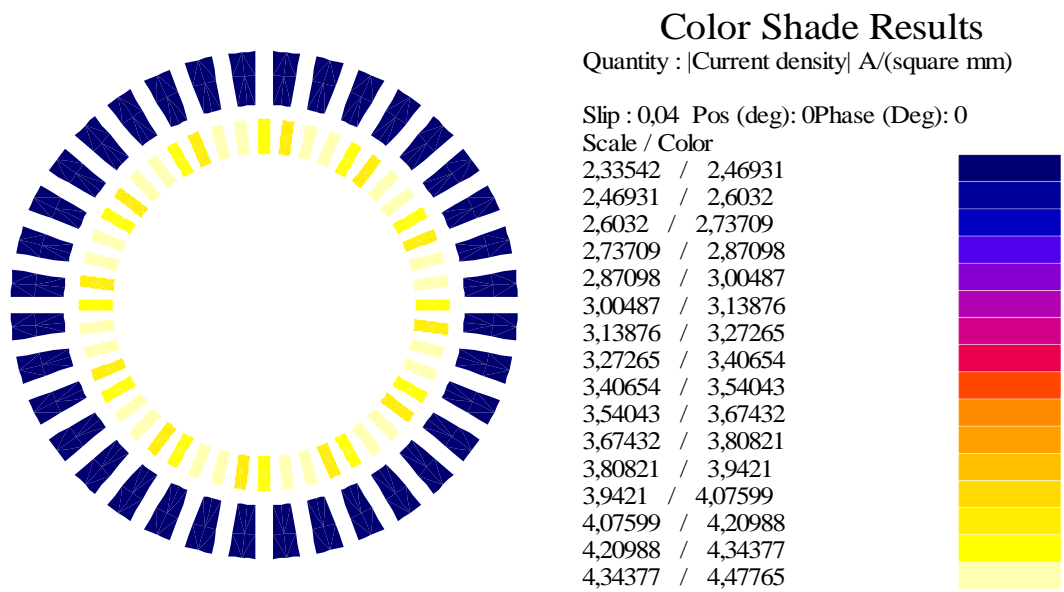


Figure II. 11 : Densité du courant dans les barres en fonctionnement nominal,

Nous remarquons bien la présence deux paires de pôles, La distribution des lignes est quasi symétrique par rapport aux axes des pôles. Les lignes de flux entre le stator et le rotor sont Légèrement déviés dans le sens de rotation du rotor. La répartition de l'induction est, elle aussi, quasi-symétrique, nous remarquons que le courant dans les barres au démarrage est plus grand a celui au fonctionnement nominal.

II.4.3 Caractéristiques de la machine en fonction de glissement

Les résultats ci-dessous représentent une analyse magnétodynamique pour de couple et du courant en fonction de glissement.

Dans le régime permanent le couple sous stabilise autour de valeur nominale avec des harmonique de très faibles amplitudes, les courant au stator atteignent le régime permanent avec une valeur efficace de 27.30 A.

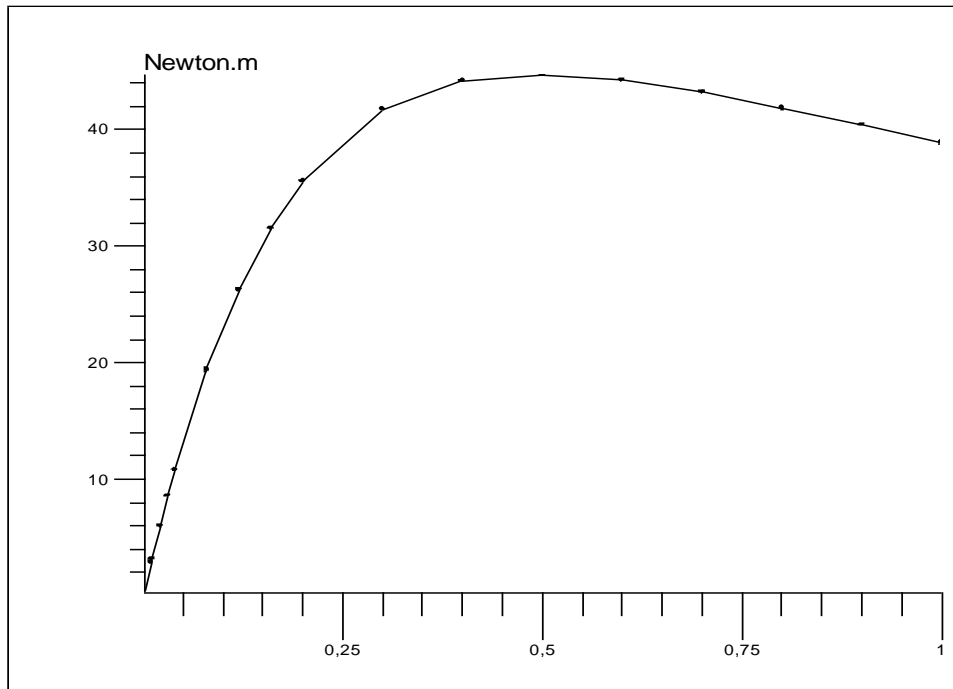


Figure II. 12 : Le couple en fonction de glissement.

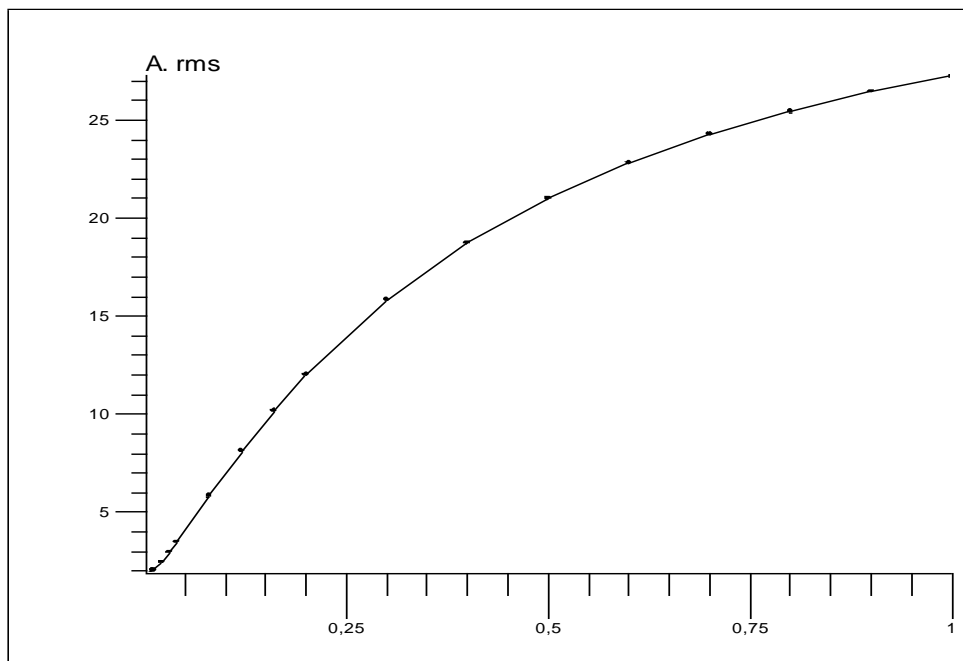


Figure II. 13 : Le courant en fonction de glissement.

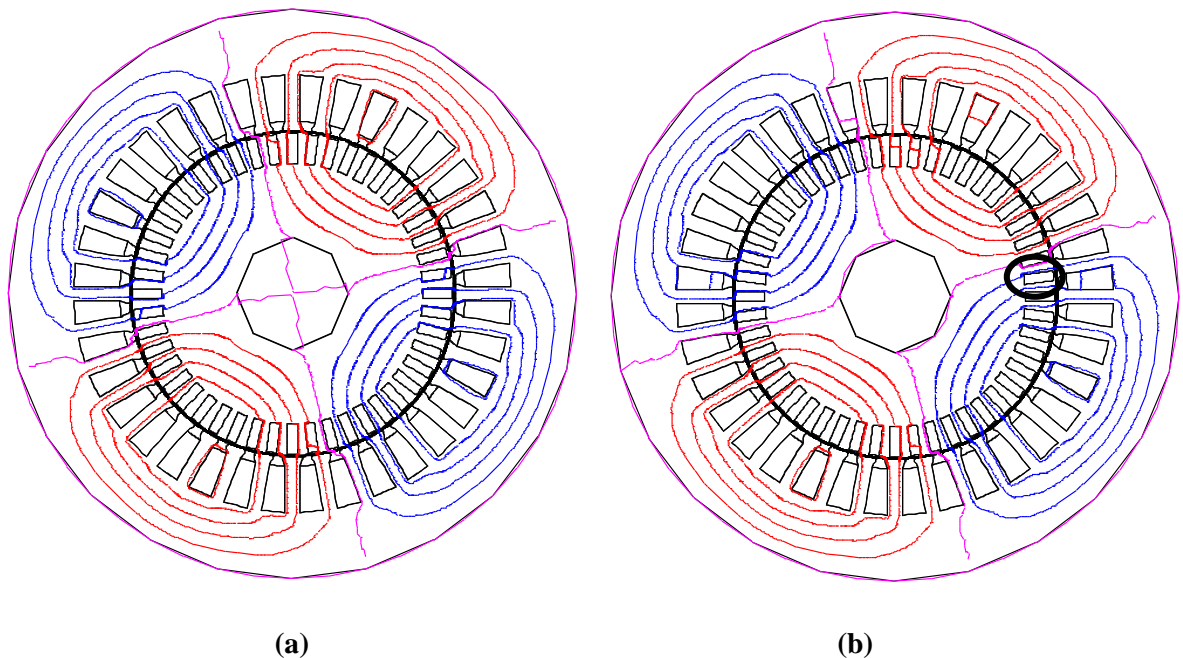
II.5 Simulation de la machine asynchrone en défaut (cassure des barres rotoriques)

Les cassures des barres sont les défauts les plus fréquents au rotor. Leurs simulations permettent d'identifier les signatures de ces défauts et de prévoir les détériorations générées dans la machine. Pour illustrer le défaut de cassure des barres, nous avons effectué la simulation du moteur dans les différents cas :

La figure (II-14) 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

Alors L'absence de courants dans les barres cassées annule leur, participation à la création du flux, ce qui explique le resserrement des lignes de flux autour de ces barres. Plus il y aura de barres cassées plus le déséquilibre de répartition des lignes de flux S'accentuera.



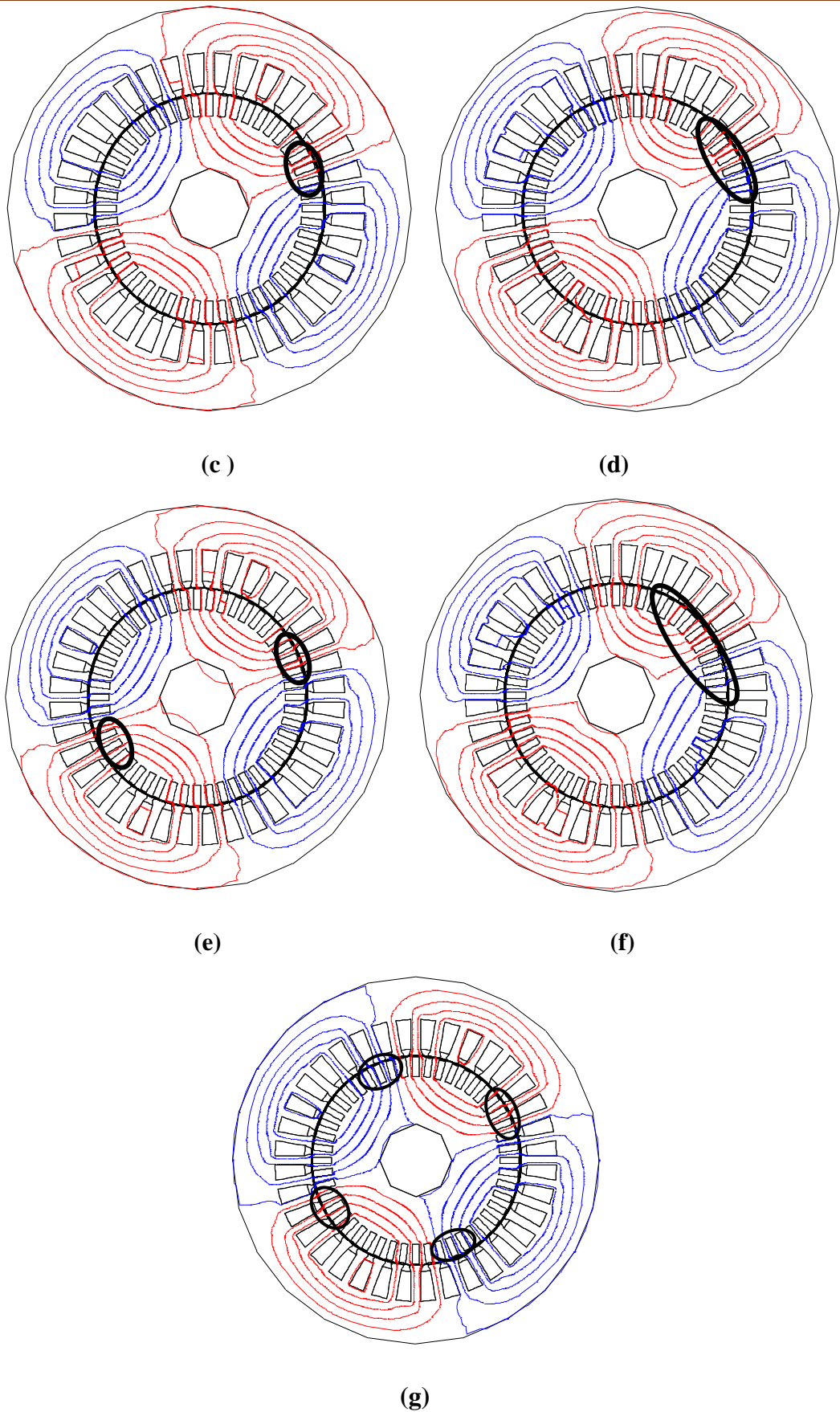
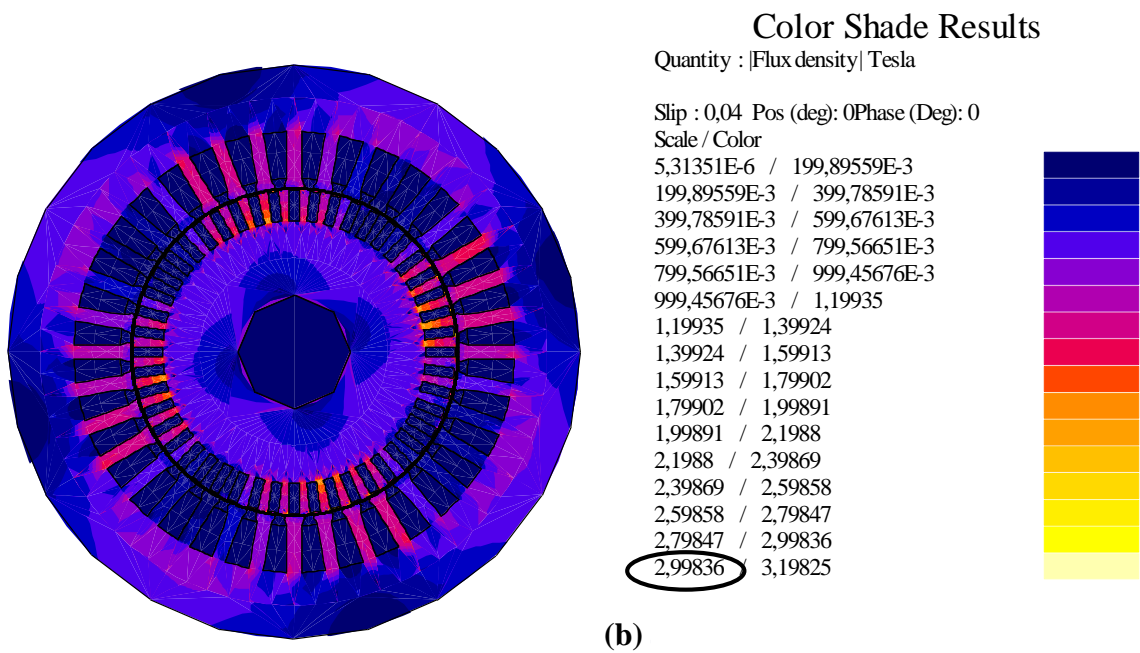
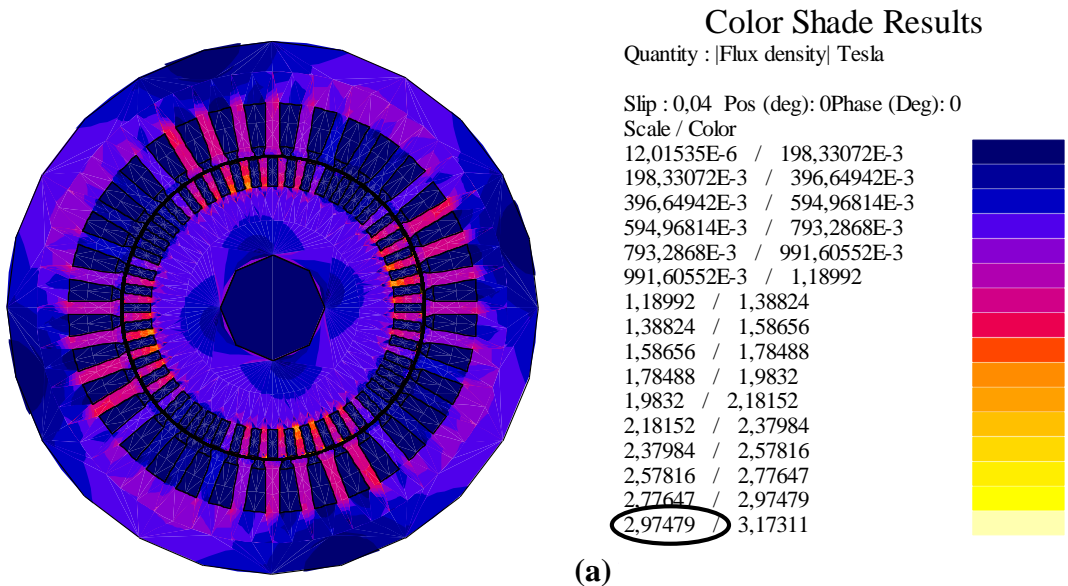
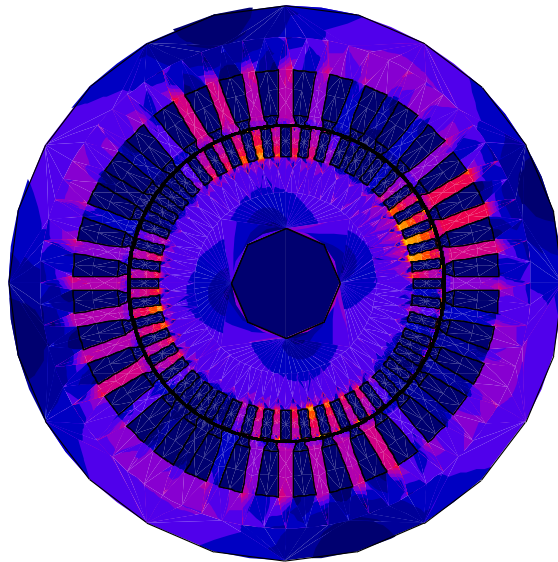


Figure II. 14: Répartition des lignes équipotentiels dans le circuit magnétique: (a) machine saine, (b) une barre cassée, (c) trois barres cassées adjacents, (d) six barres cassées adjacents, (e) six barres cassées séparées (e) huit barres cassées adjacents, (f) huit barres cassées séparées

Les distributions (Fig. II-15) 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. Au stator, l'induction est totalement déséquilibrée entre les pôles de la machine ce qui explique les distorsions sur les courants d'alimentation et sur le couple électromagnétique.





Color Shade Results

Quantity : |Flux density| Tesla

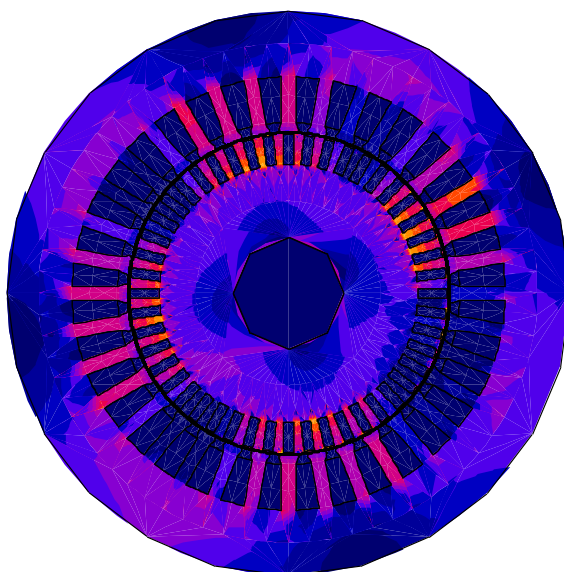
Slip : 0,04 Pos (deg): 0Phase (Deg): 0

Scale / Color

13,95575E-6	/	200,90422E-3
200,90422E-3	/	401,79452E-3
401,79452E-3	/	602,68474E-3
602,68474E-3	/	803,57504E-3
803,57504E-3	/	1,00447
1,00447	/	1,20536
1,20536	/	1,40625
1,40625	/	1,60714
1,60714	/	1,80803
1,80803	/	2,00892
2,00892	/	2,20981
2,20981	/	2,4107
2,4107	/	2,61159
2,61159	/	2,81248
2,81248	/	3,01337
3,01337	/	3,21426



(c)



Color Shade Results

Quantity : |Flux density| Tesla

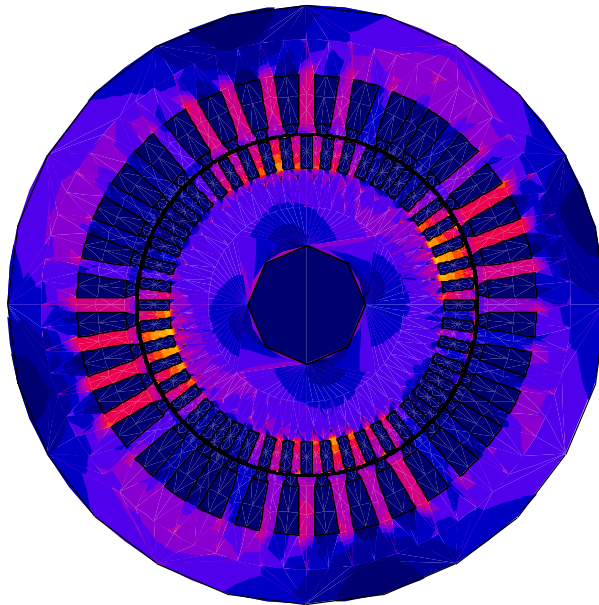
Slip : 0,04 Pos (deg): 0Phase (Deg): 0

Scale / Color

18,58518E-6	/	197,72248E-3
197,72248E-3	/	395,42633E-3
395,42633E-3	/	593,13023E-3
593,13023E-3	/	790,83413E-3
790,83413E-3	/	988,53797E-3
988,53797E-3	/	1,18624
1,18624	/	1,38395
1,38395	/	1,58165
1,58165	/	1,77935
1,77935	/	1,97706
1,97706	/	2,17476
2,17476	/	2,37247
2,37247	/	2,57017
2,57017	/	2,76787
2,76787	/	2,96558
2,96558	/	3,16328



(d)



Color Shade Results

Quantity : |Flux density| Tesla

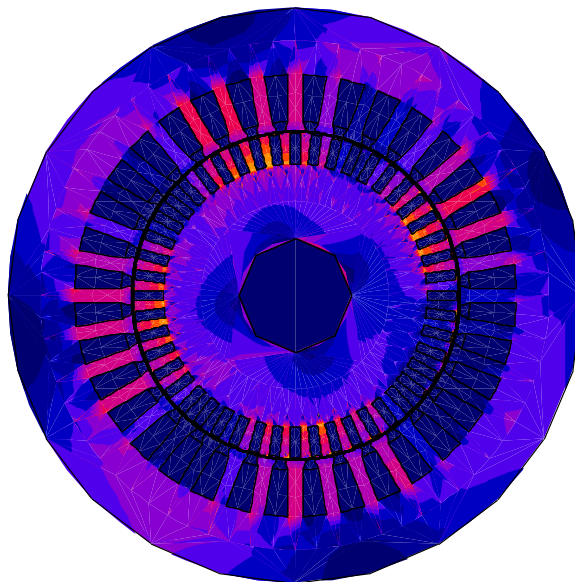
Slip : 0,04 Pos (deg): 0Phase (Deg): 0

Scale / Color

2,6829E-6	/	193,41914E-3
193,41914E-3	/	386,83558E-3
386,83558E-3	/	580,25205E-3
580,25205E-3	/	773,66853E-3
773,66853E-3	/	967,085E-3
967,085E-3	/	1,1605
1,1605	/	1,35392
1,35392	/	1,54733
1,54733	/	1,74075
1,74075	/	1,93417
1,93417	/	2,12758
2,12758	/	2,321
2,321	/	2,51442
2,51442	/	2,70783
2,70783	/	2,90125
2,90125	/	3,09467



(e)



Color Shade Results

Quantity : |Flux density| Tesla

Slip : 0,04 Pos (deg): 0Phase (Deg): 0

Scale / Color

17,50112E-6	/	200,35474E-3
200,35474E-3	/	400,69199E-3
400,69199E-3	/	601,02928E-3
601,02928E-3	/	801,36651E-3
801,36651E-3	/	1,0017
1,0017	/	1,20204
1,20204	/	1,40238
1,40238	/	1,60272
1,60272	/	1,80305
1,80305	/	2,00339
2,00339	/	2,20373
2,20373	/	2,40406
2,40406	/	2,6044
2,6044	/	2,80474
2,80474	/	3,00508
3,00508	/	3,20541



(f)

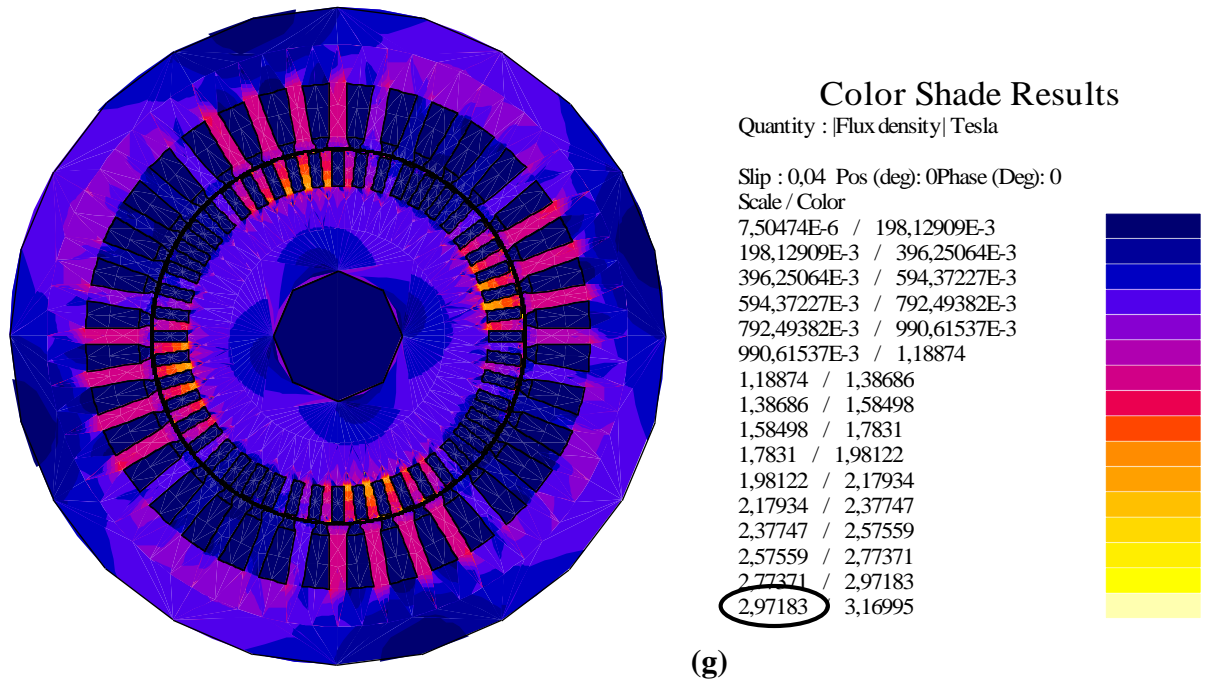
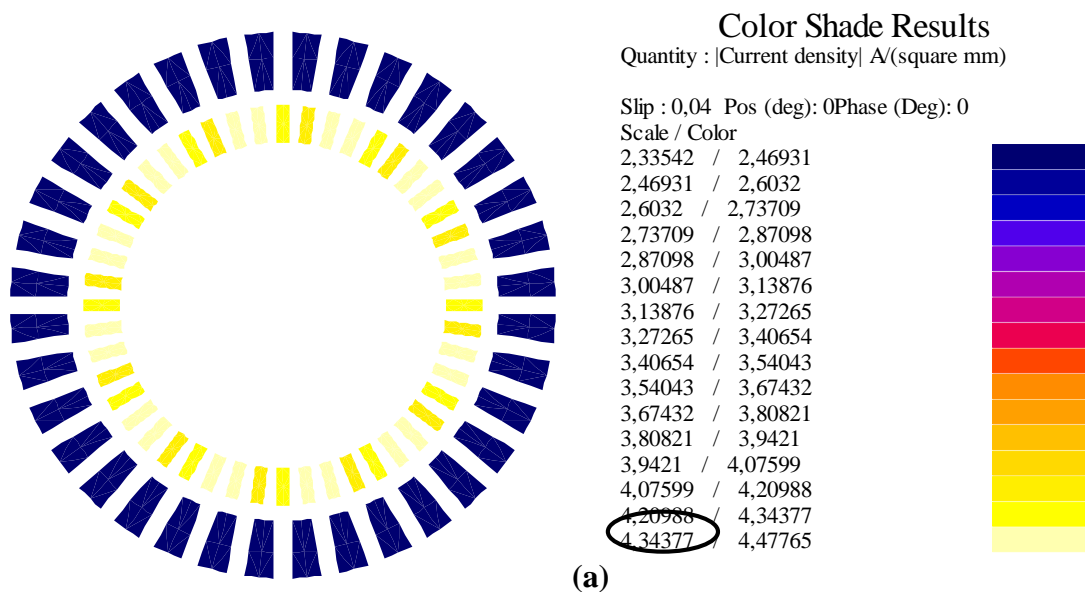
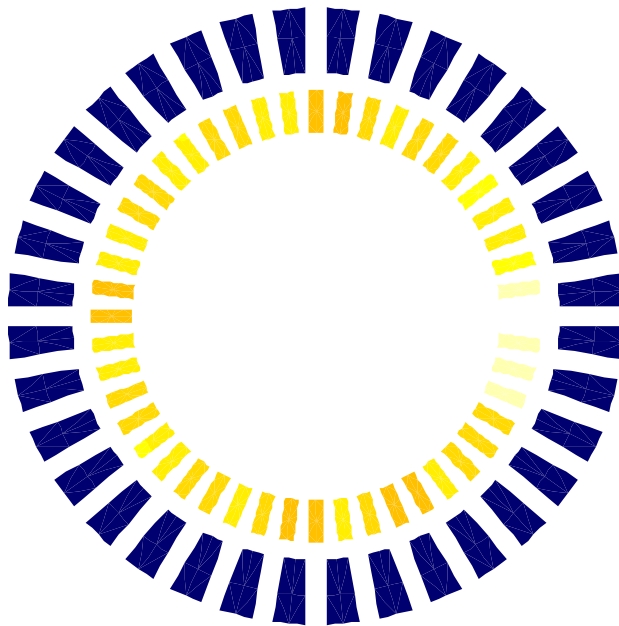


Figure II. 15 : : Répartition de l'induction dans le circuit magnétique:(a) machine saine,

(b) une barre cassée, (c) trois barres cassées adjacents, (d) six barres cassées adjacents, (e)six barres cassées non adjacents (e) huit barres cassées adjacents, (f) huit barres cassées non adjacents

La figure (II-16) représente la répartition du courant dans les barres rotoriques en fonctionnement nominale pour la machine saine et avec rotor infecté. On remarque l'augmentation du courant rotorique lors de l'apparition des défauts, surtout dans les barres adjacentes aux barres cassées.





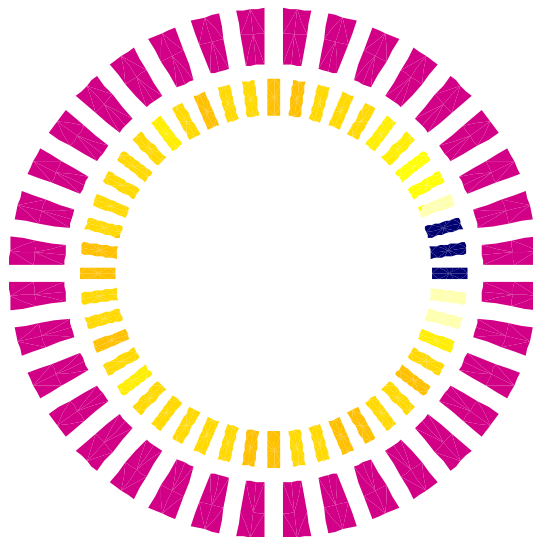
Color Shade Results
Quantity : |Current density| A/(square mm)

Slip : 0,04 Pos (deg): 0Phase (Deg): 0
Scale / Color

2,28637	/	2,44541
2,44541	/	2,60446
2,60446	/	2,76351
2,76351	/	2,92256
2,92256	/	3,08161
3,08161	/	3,24066
3,24066	/	3,39971
3,39971	/	3,55876
3,55876	/	3,7178
3,7178	/	3,87685
3,87685	/	4,0359
4,0359	/	4,19495
4,19495	/	4,3531
4,3531	/	4,51305
4,51305	/	4,6721
4,6721	/	4,83115



(b)



Color Shade Results

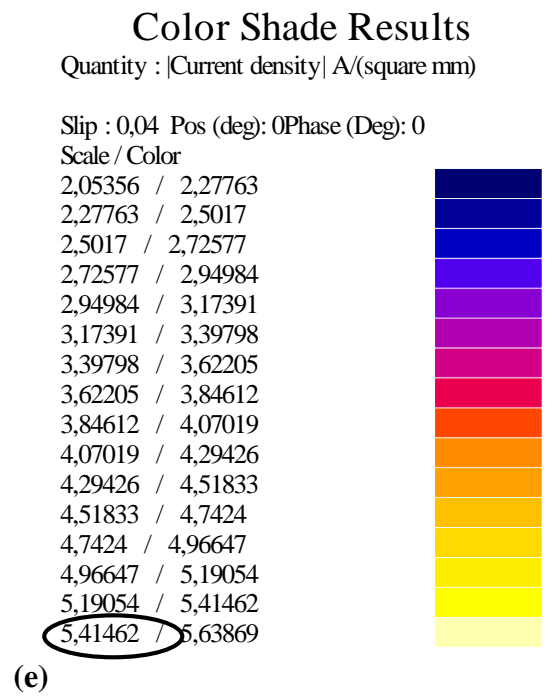
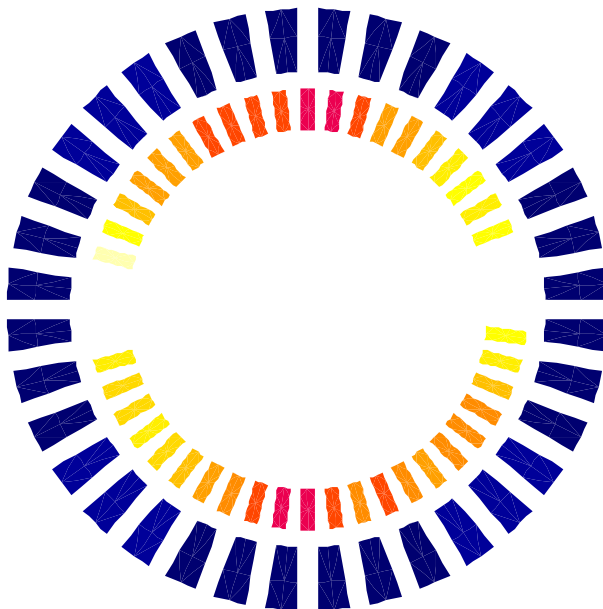
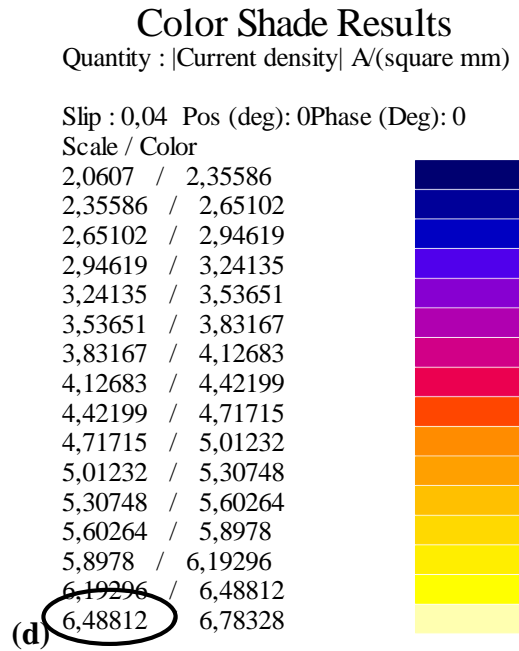
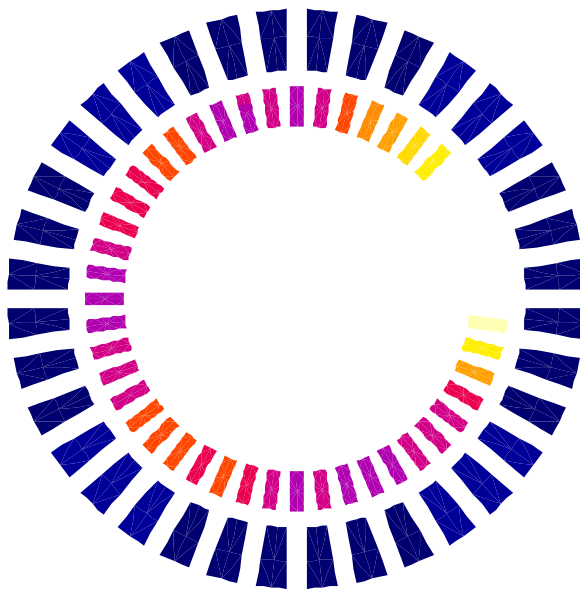
Quantity : |Current density| A/(square mm)

Slip : 0,04 Pos (deg): 0Phase (Deg): 0
Scale / Color

41,33586E-9	/	344,38074E-3
344,38074E-3	/	688,76141E-3
688,76141E-3	/	1,03314
1,03314	/	1,37752
1,37752	/	1,7219
1,7219	/	2,06628
2,06628	/	2,41066
2,41066	/	2,75505
2,75505	/	3,09943
3,09943	/	3,44381
3,44381	/	3,78819
3,78819	/	4,13257
4,13257	/	4,47695
4,47695	/	4,82133
4,82133	/	5,16571
5,16571	/	5,51009



(c)



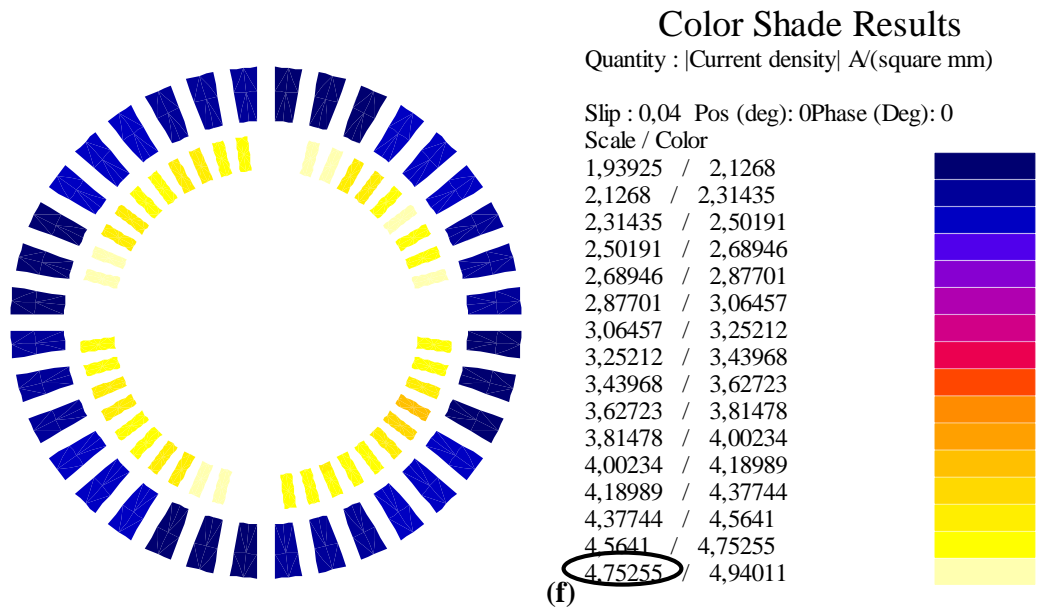
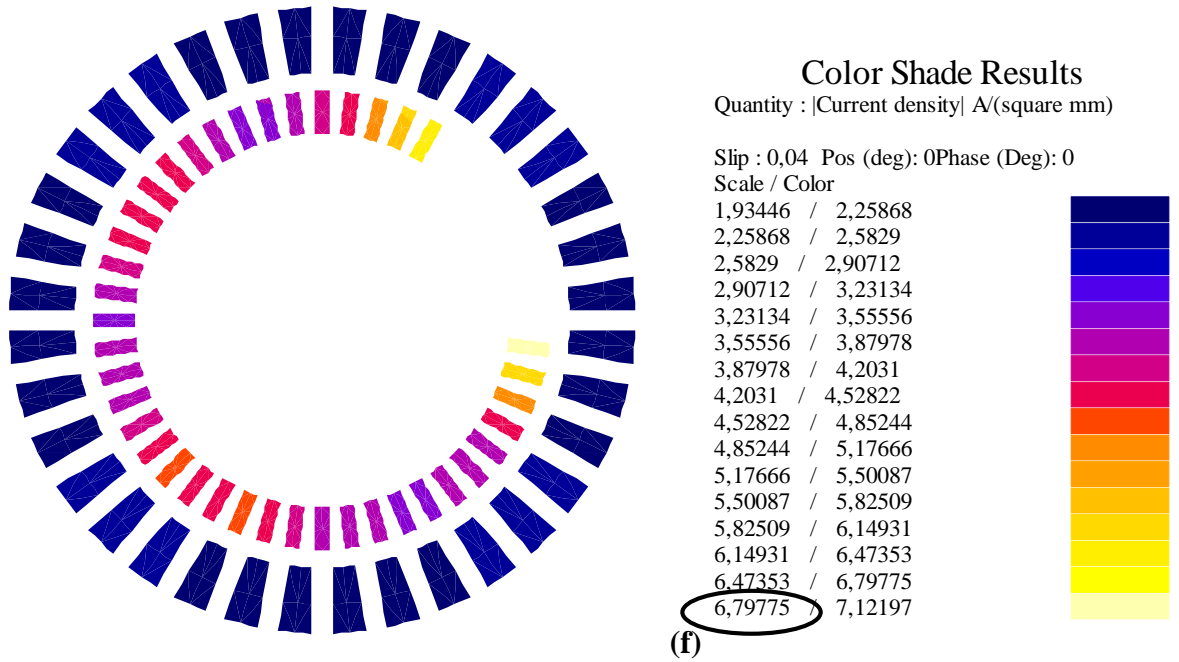


Figure II. 16 : Répartition du courant dans les barres : (a) machine saine, (b) une barre cassée, (c) trois barres cassées adjacents, (d) six barres cassées adjacents, (e) six barres cassées non adjacents (f) huit barres cassées adjacents, (g) huit barres cassées non adjacents

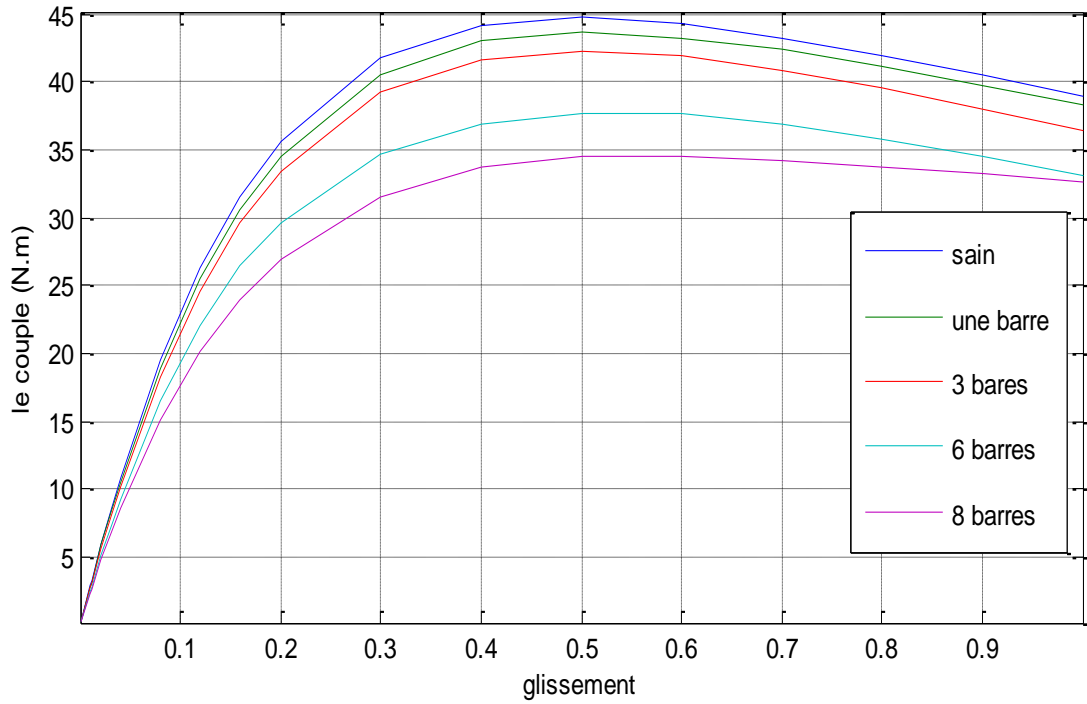
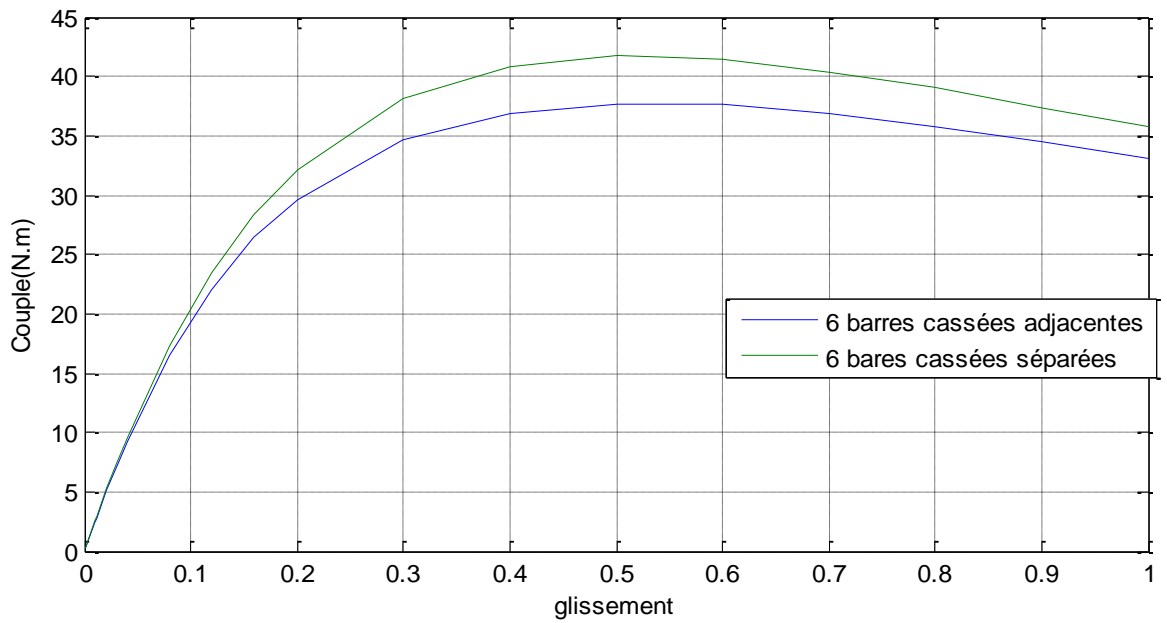
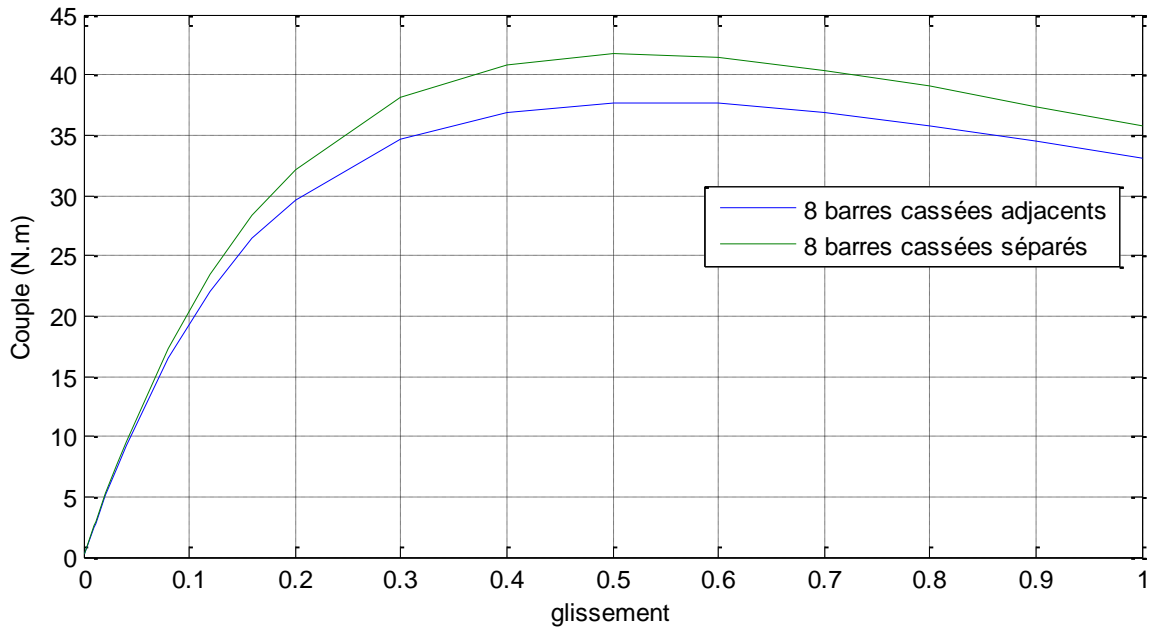


Figure II. 17 : Couple en fonction de glissement. Cas adjacents.



(a)



(b)

Figure II. 18 : Couple en fonction de glissement (Cas séparées) :(a) 6 barres, (b) 8 barres

La comparaison de la caractéristique du couple en fonction du glissement d'une machine saine et avec les caractéristiques de la machine en présence des cassures d'une et de plusieurs barres, (Fig.II-17). On remarque que sur la partie montante (au voisinage du point de fonctionnement), le couple est nettement diminué en fonction du nombre des barres cassées.

D'après la fig. (Fig.II-18 a et b) on remarque aussi que le couple diminue dans le cas de rupture de barres adjacentes beaucoup plus que les barres cassées sont séparées.

II.6 Conclusion

Nous avons développé dans ce chapitre un modèle à base de la méthode des éléments finis et nous avons inclure les défauts au rotor.

La simulation en magnétodynamique permis d'étudier l'influence des défauts sur la distribution des lignes de champs et l'induction magnétique de la machine, ainsi que le courant dans les barres rotoriques.

Le modelé développé permet de déduire la caractéristique du couple en fonction de glissement, en conclure que la dégradation des grandeurs de la machine (couple, courant) sont importants si les barres cassées sont adjacentes par rapports le cas où les barres cassées sont séparées.

Chapitre III : Analyse des défauts de la machine en régime transitoire

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on considère la simulation du modèle méthode des éléments finis (MEF) en régime transitoire, permettant de représenter les différentes grandeurs telle que les courant statoriques et dans les barres rotoriques, le couple et la vitesse de rotation ainsi que la caractéristique mécanique du moteur.

La simulation est effectuée dans différentes conditions de fonctionnement (à vide et en charge) et l'état sain et avec défaut. Ensuite, en présente une analyse détaillée sur les Effets de la cassure des barres rotoriques. Cette analyse a pour objectif d'analyser les phénomènes observés sur les performances du moteur.

III.2 Simulation des défauts en régime transitoire

III.2.1 Fonctionnement à vide

A vide, sous la tension nominale de 220 V, nous avons présenté sur les Figures (III.1 a III.8), l'évolution des grandeurs locaux (les lignes du champ magnétique, l'induction magnétique) et les grandeurs globales (Les courants, le couple électromagnétique, la vitesse)

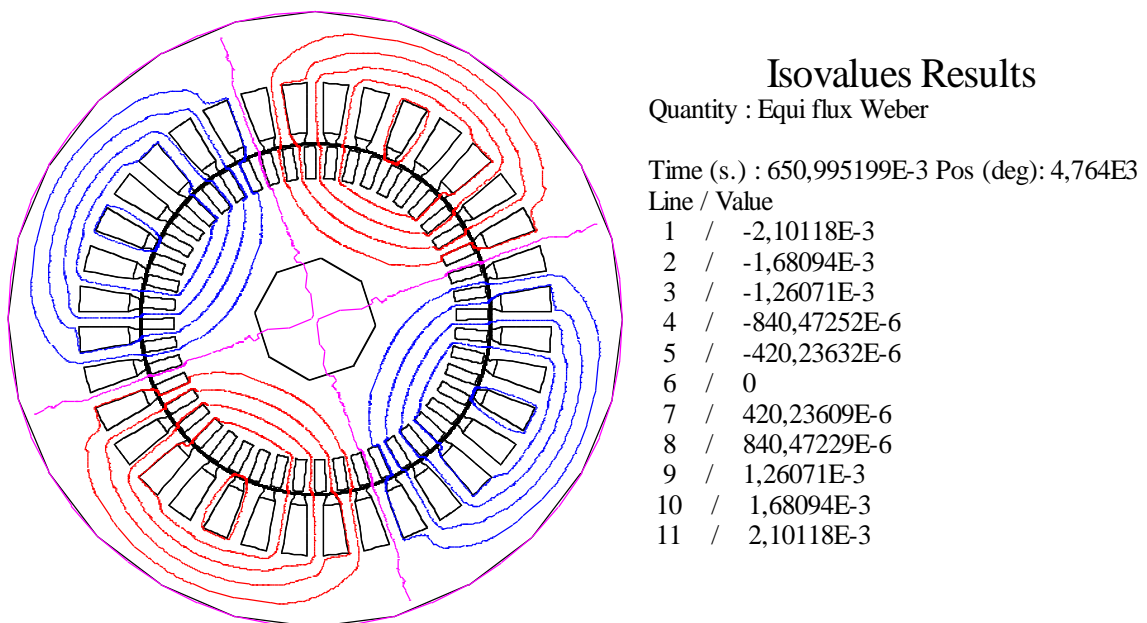


Figure III. 1 : Lignes du champ magnétique à vide à $t = 0.65s$.

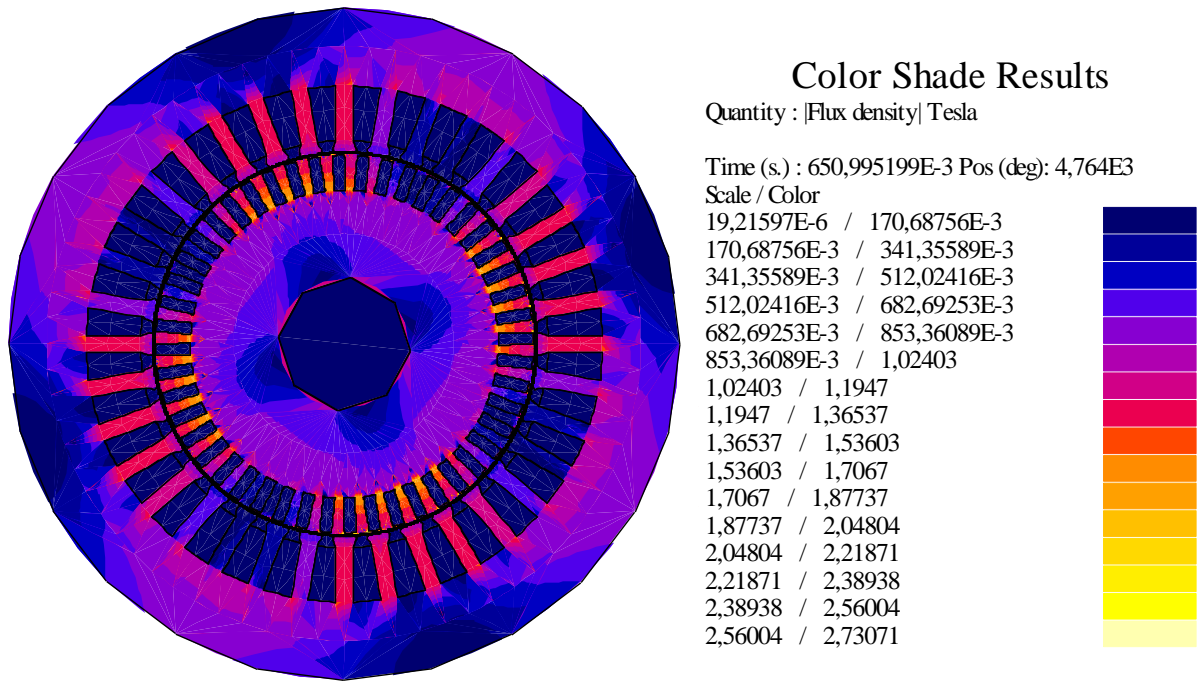
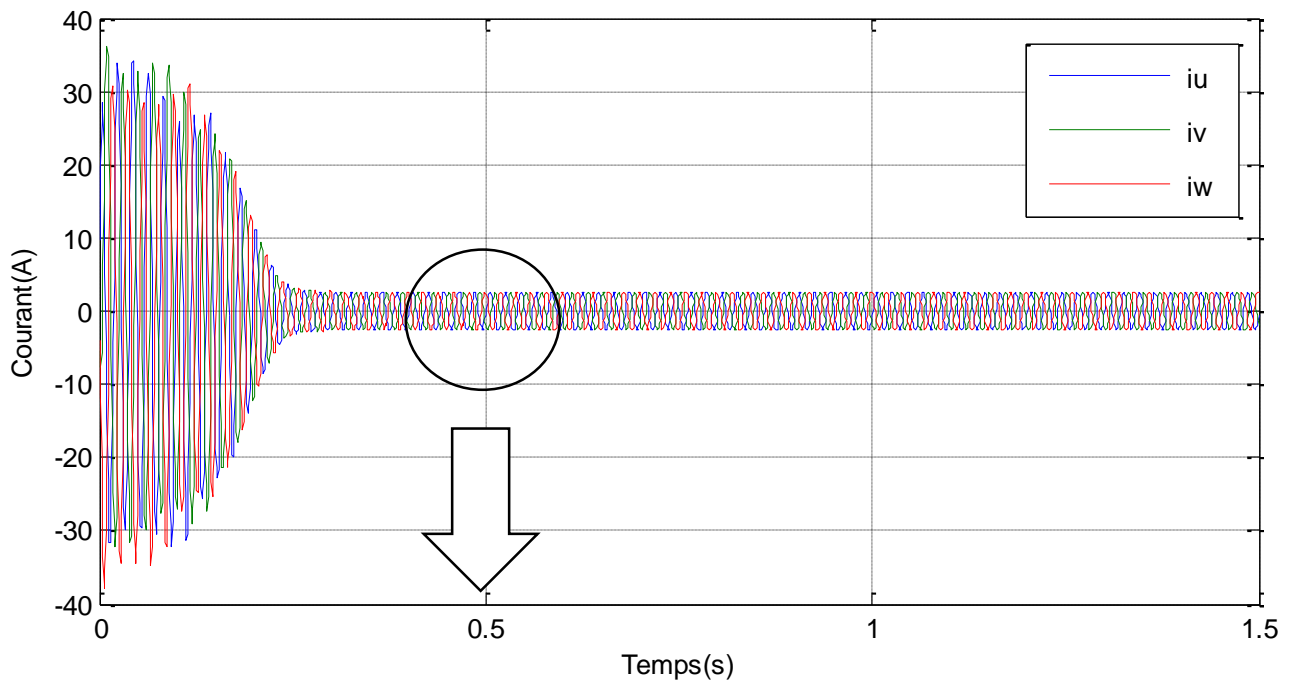


Figure III. 2 : L'induction magnétique à vide à t = 0.65s.



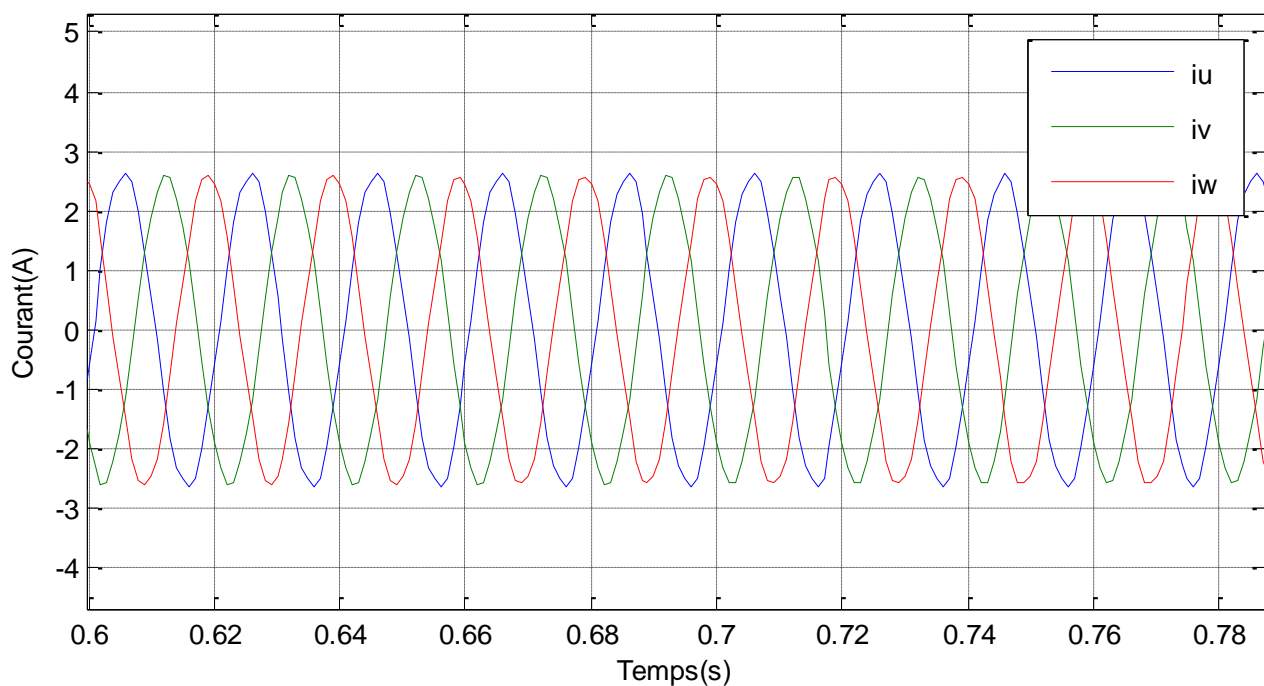


Figure III. 3 : Courants de trois phases statoriques à vide (avec zoom).

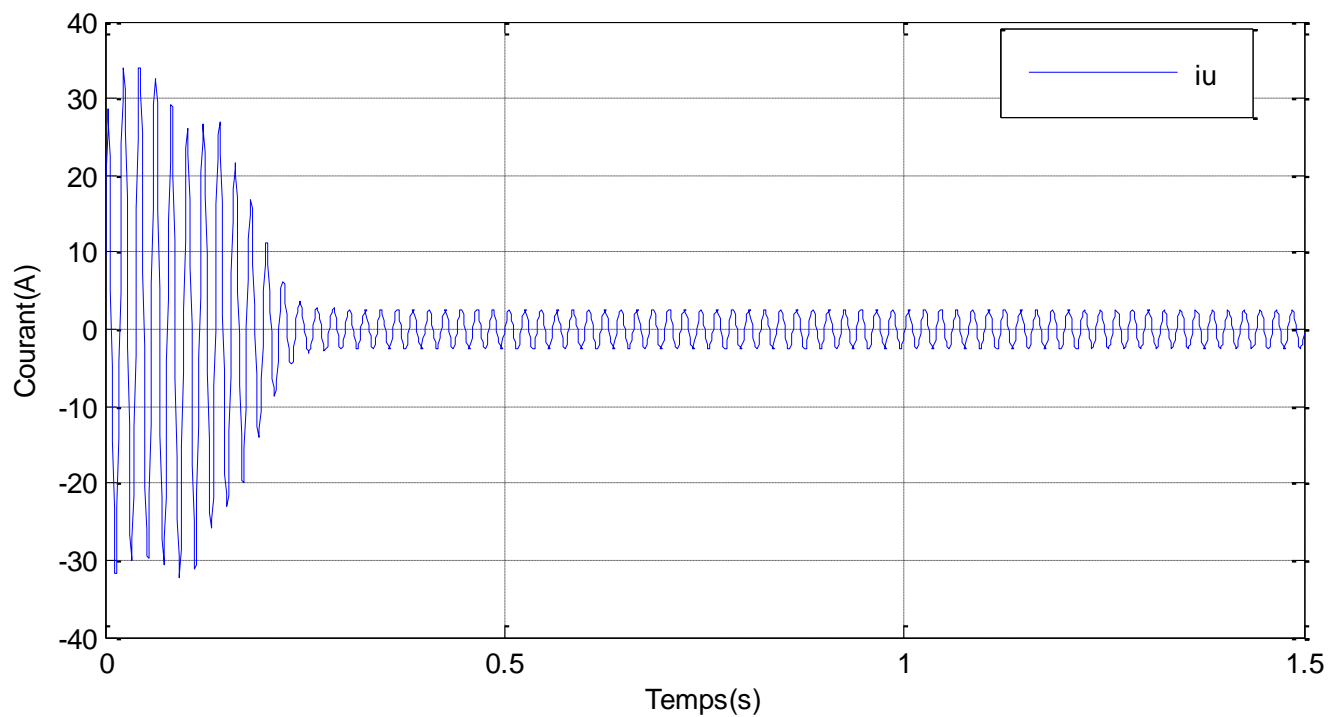


Figure III. 4 : Courants à vide d'une phase statoriques.

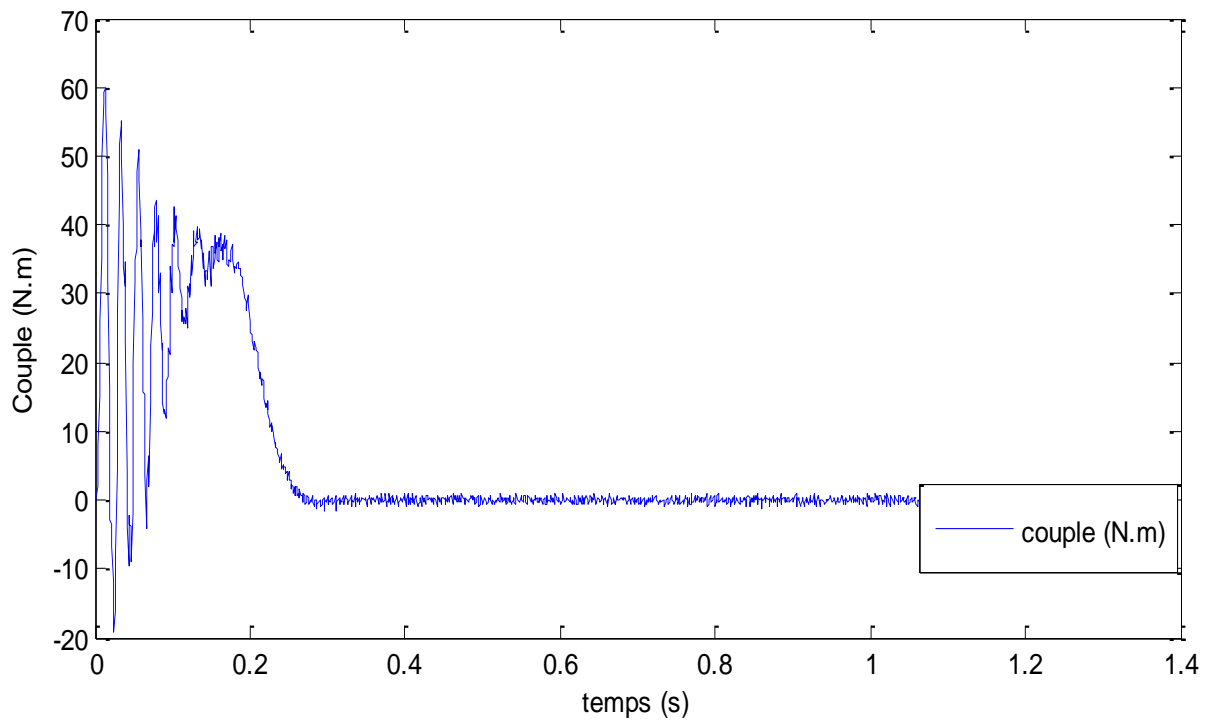


Figure III. 5 : Couple électromagnétique.

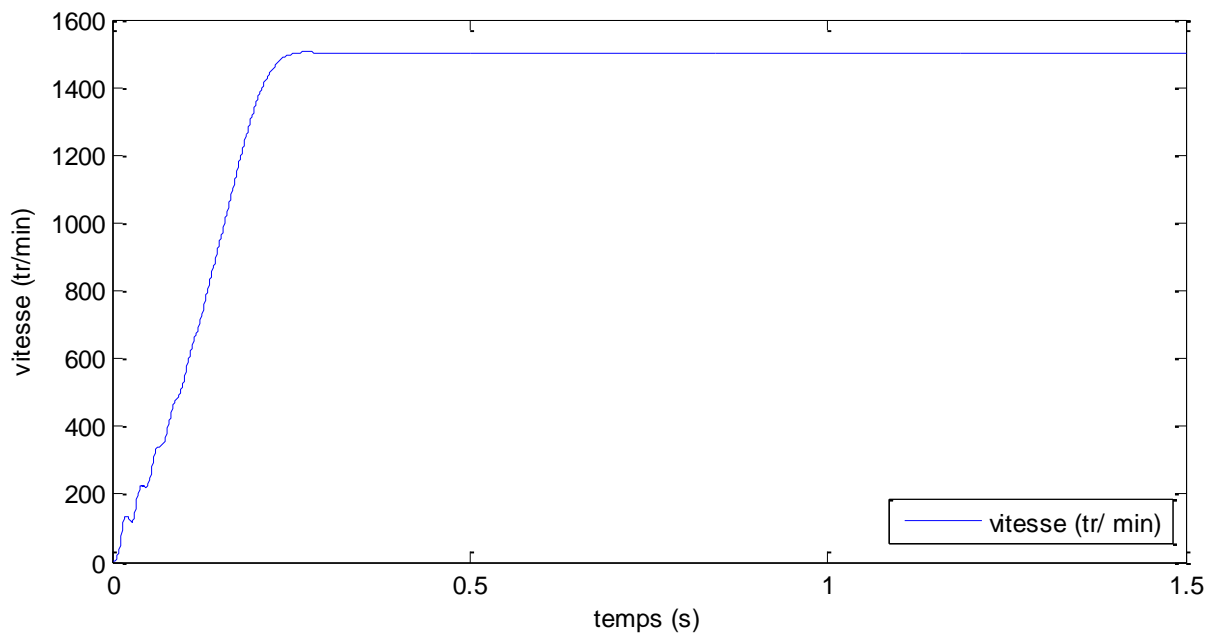


Figure III. 6 : Vitesse de rotation.

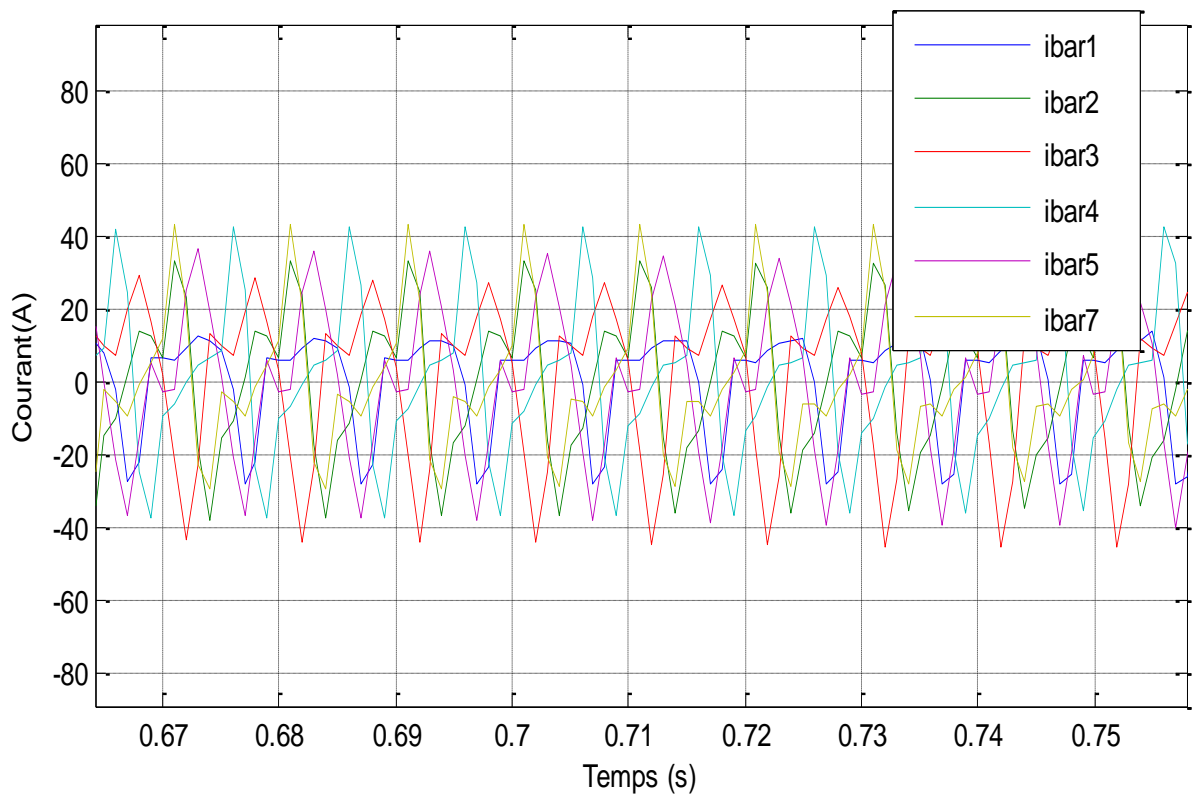
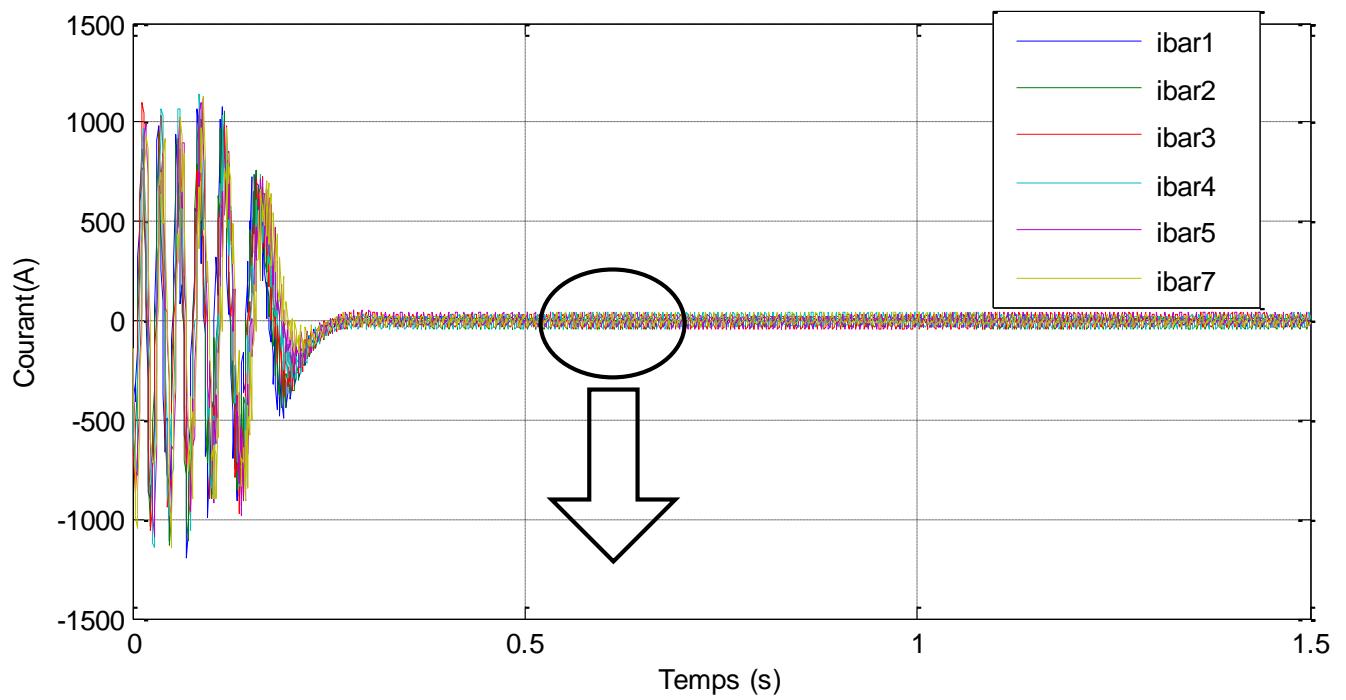


Figure III. 77 : Courants rotoriques à vide (avec zoom).

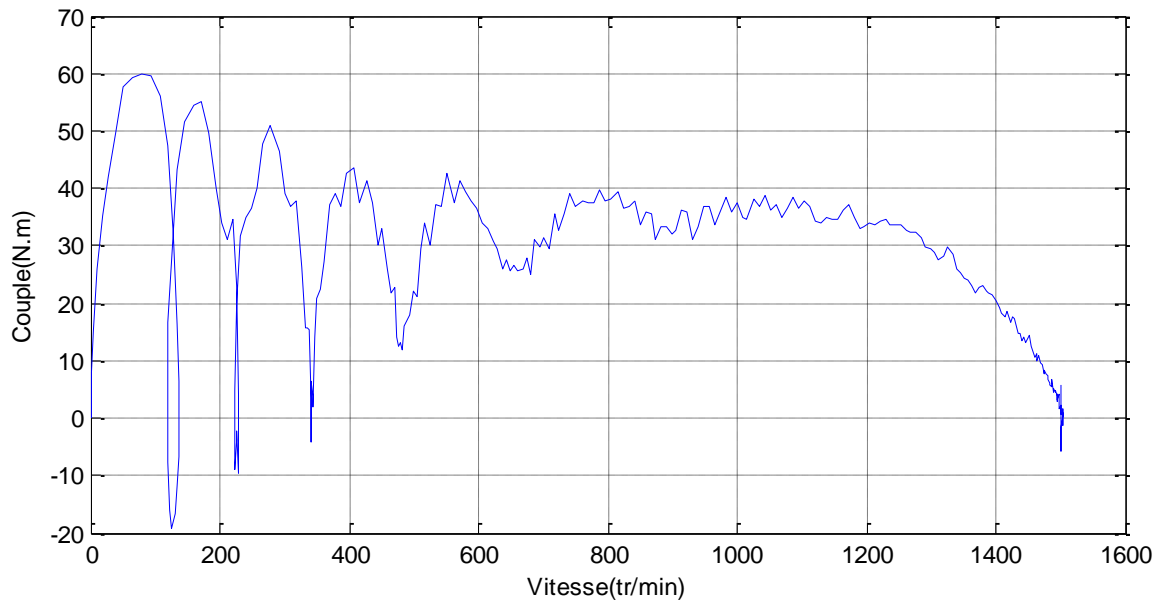


Figure III. 8 : Caractéristique mécanique du moteur (Couple - Vitesse) à vide.

III.2.2 Fonctionnement en charge

Sous la même tension (220 v), nous avons présenté sur les Figures III.9 à III.11, les caractéristiques de la machine en régime nominal avec une charge de 14.26 N.m

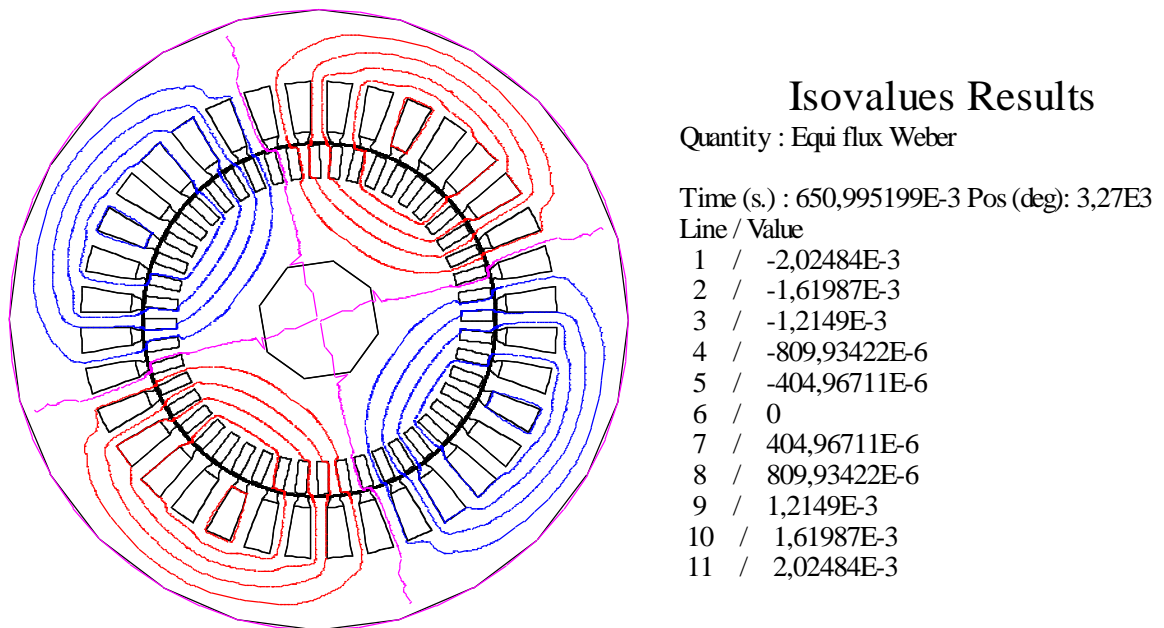


Figure III. 9 : Lignes du champ magnétique en charge à t = 0.65 s.

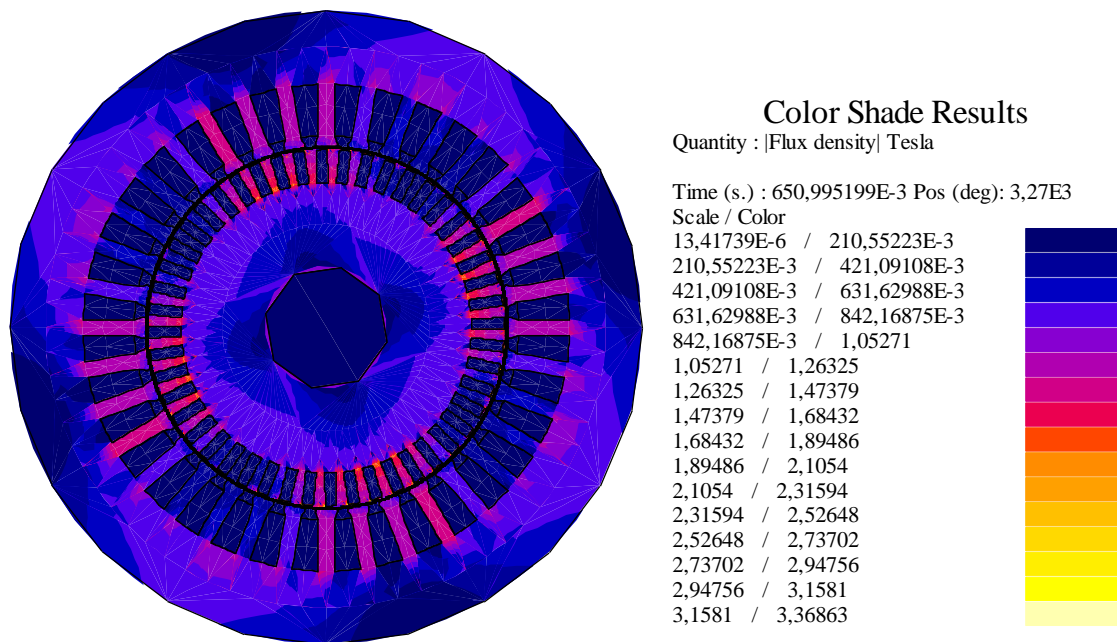
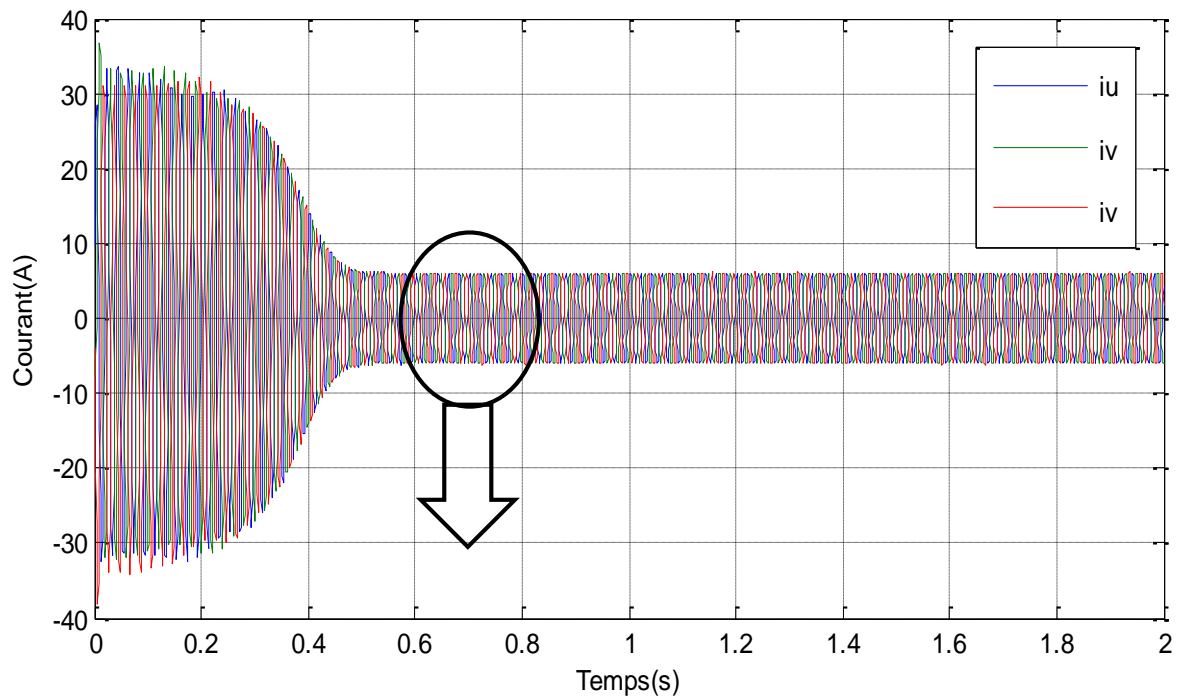


Figure III. 10 : l'induction magnétique en charge à $t = 0.65$ s



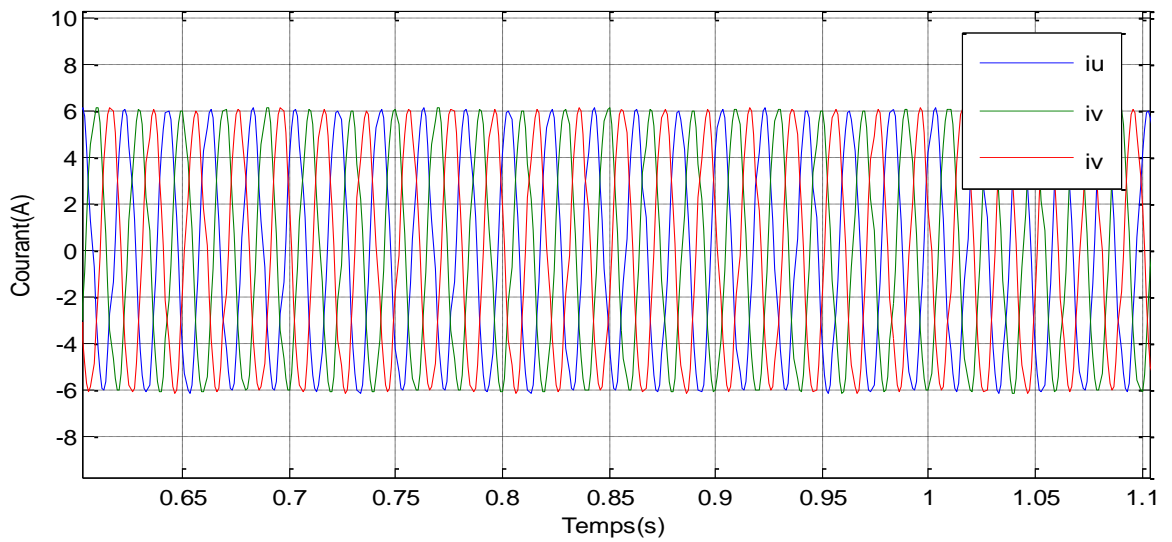


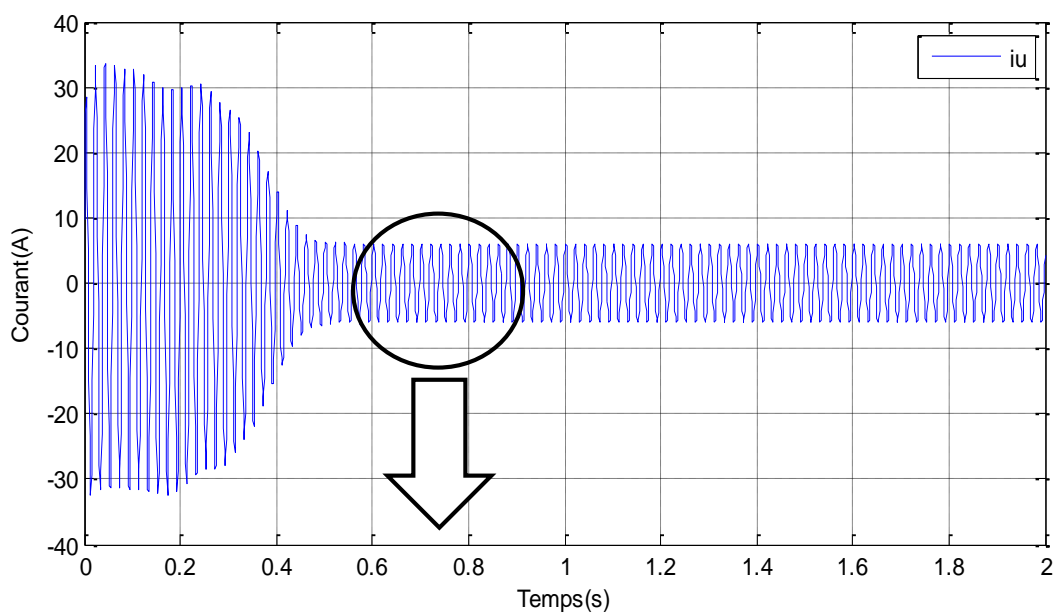
Figure III. 11 : Courants de trois phases absorbés par la machine. (Avec zoom)

Après un régime transitoire (Fig.III.11) d'environ 0.65s durant lequel la machine se magnétise, Les courants au stator atteignent le régime permanent avec une valeur efficace de 6 A.

Les trois courants de phase sont bien déphasés entre eux de 120° électriques, donc, nous retrouvons bien le comportement équilibré de la machine.

III.2.2.1 Influence de cassure sur les courants (statoriques et rotorique)

Les figures (III.12, 13, 14) représentent l'influence de cassure des barres sur une phase absorbés par la machine.



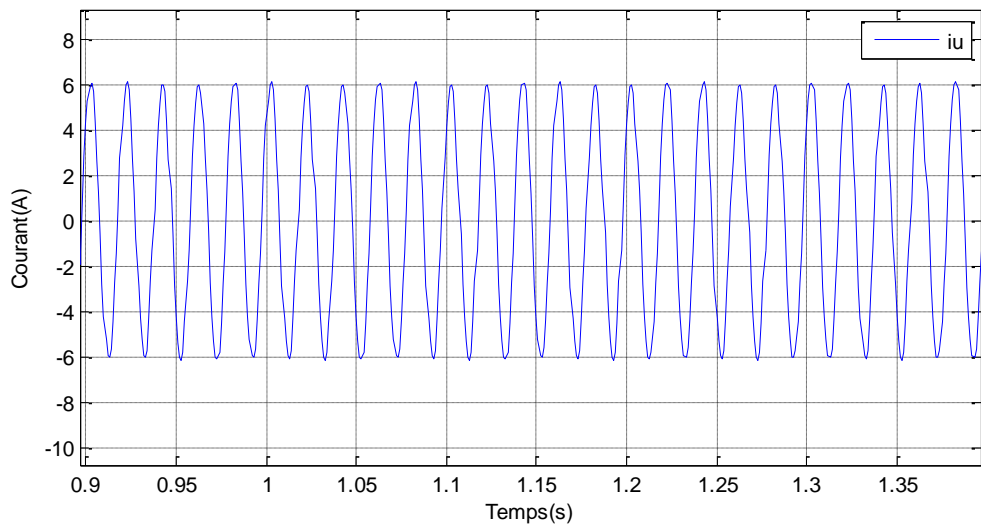


Figure III. 12 : Courants d’une phase statorique machine saine en charge (avec zoom).

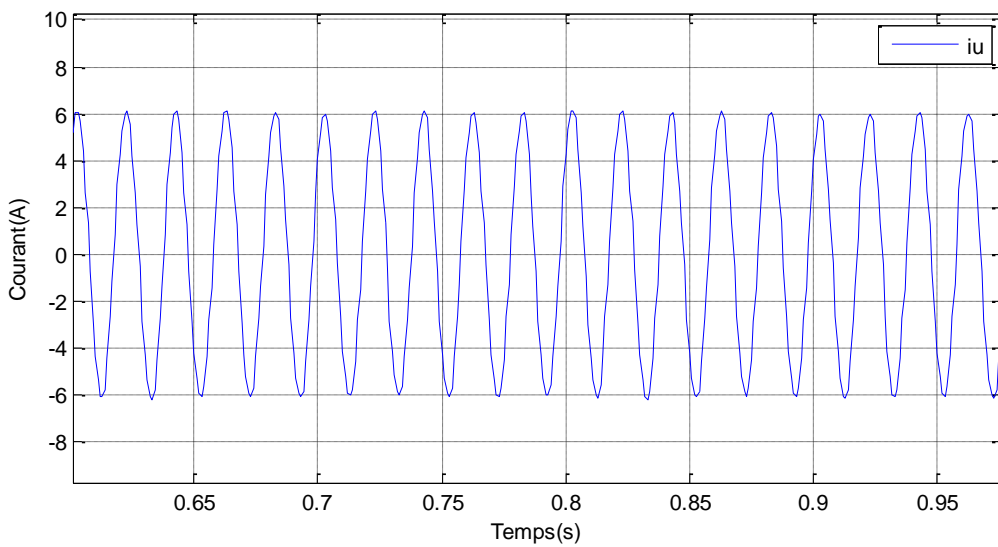
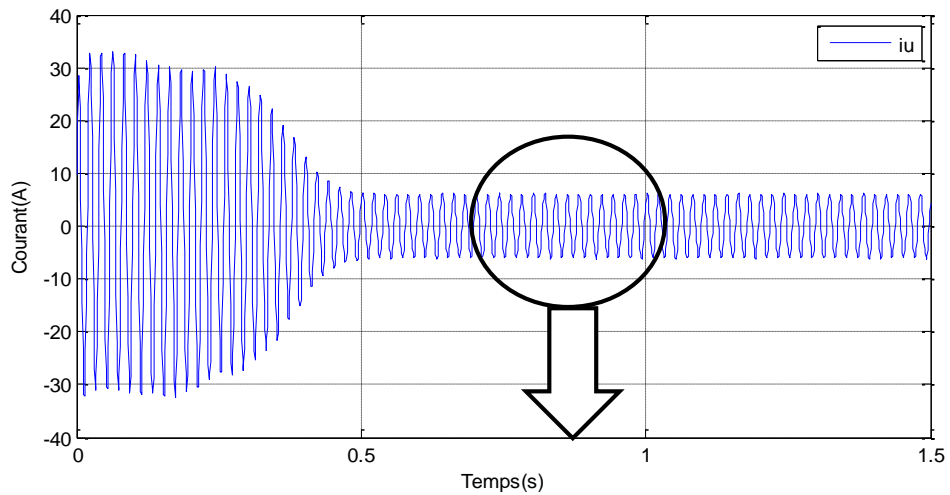


Figure III. 13 : Courants d’une phase statorique avec une barre cassée (avec zoom).

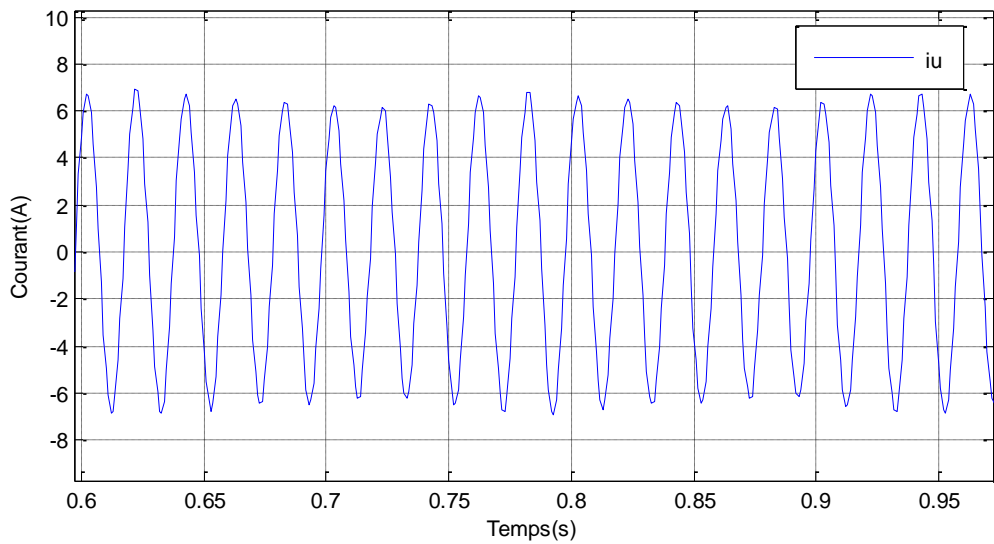
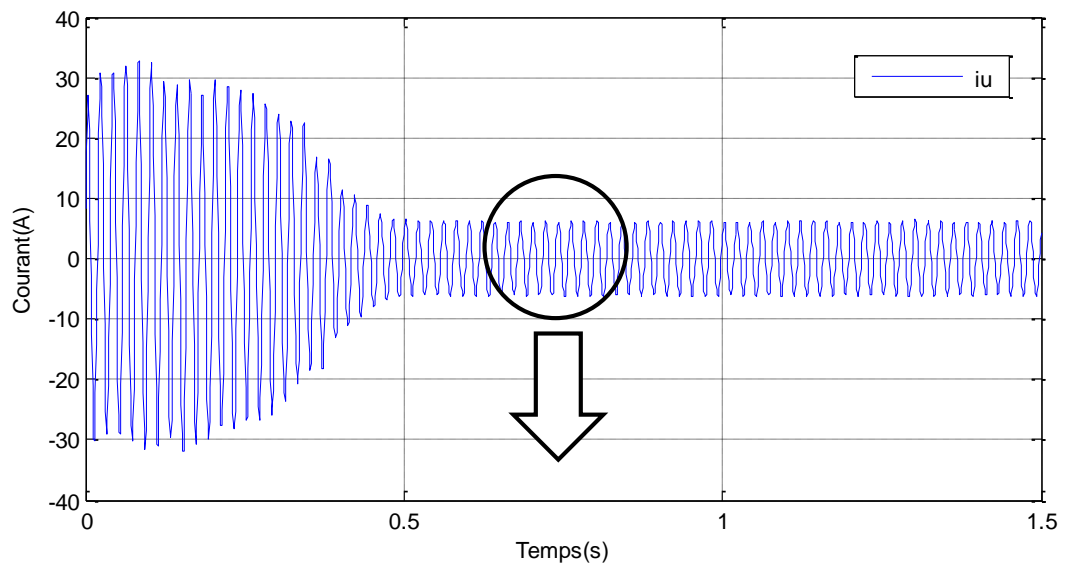
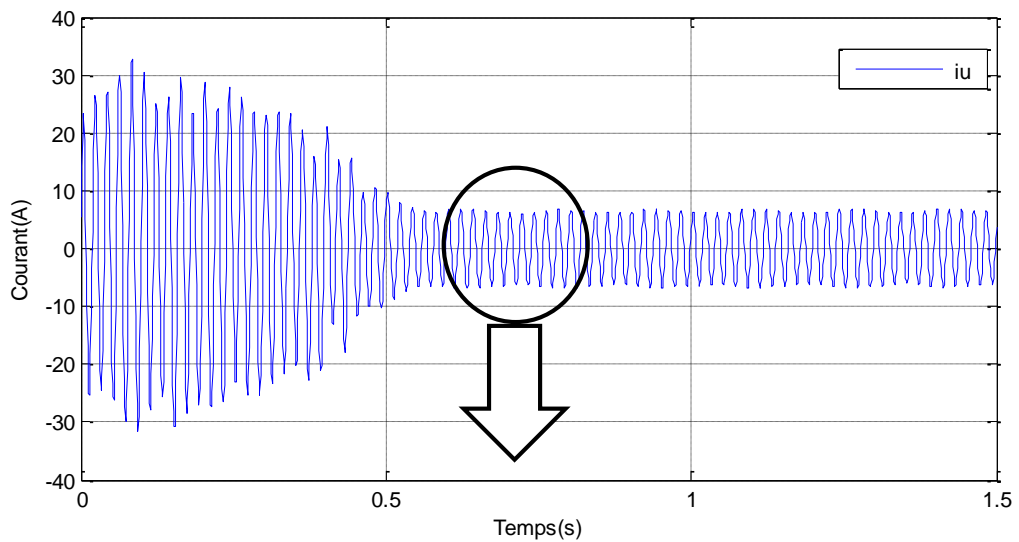


Figure III. 14 : Courants d'une phase statorique avec trois barres cassées (avec zoom).



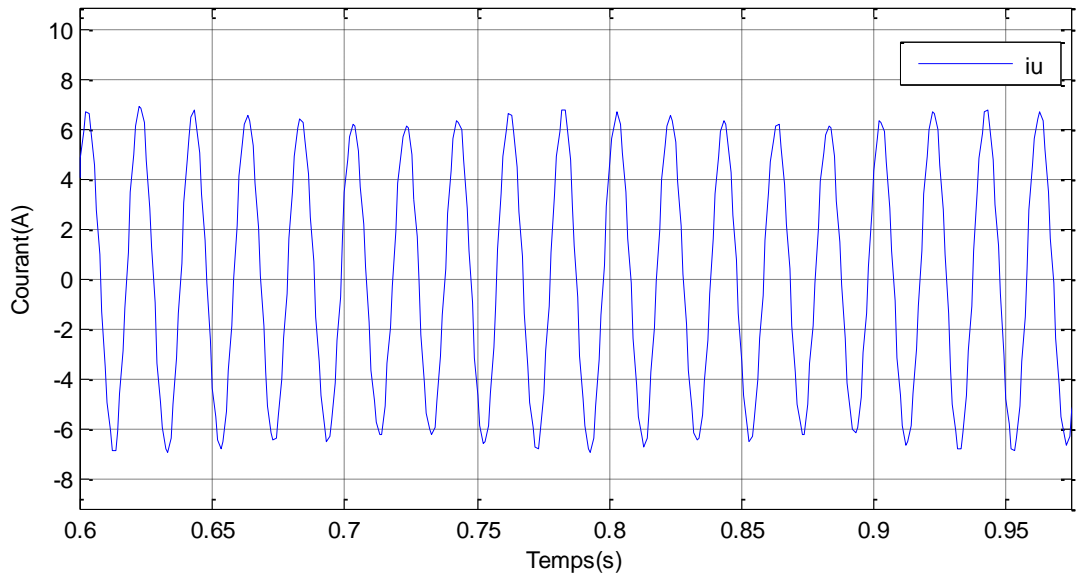


Figure III. 15 : Courants d’une phase statorique avec six barres cassées (avec zoom).

Les courants des phases statoriques sont toujours déphasés entre eux de 120° , cependant une ondulation de l’amplitude des courants apparaît avec la cassure des barres. L’amplitude de cette oscillation est proportionnelle au nombre de barres cassées. Les courbes suivantes illustrent cette dépendance.

Les figures (III-16 a III-18) représentent le courant dans la barre adjacente aux barres cassées dans le cas sain et avec défaut.

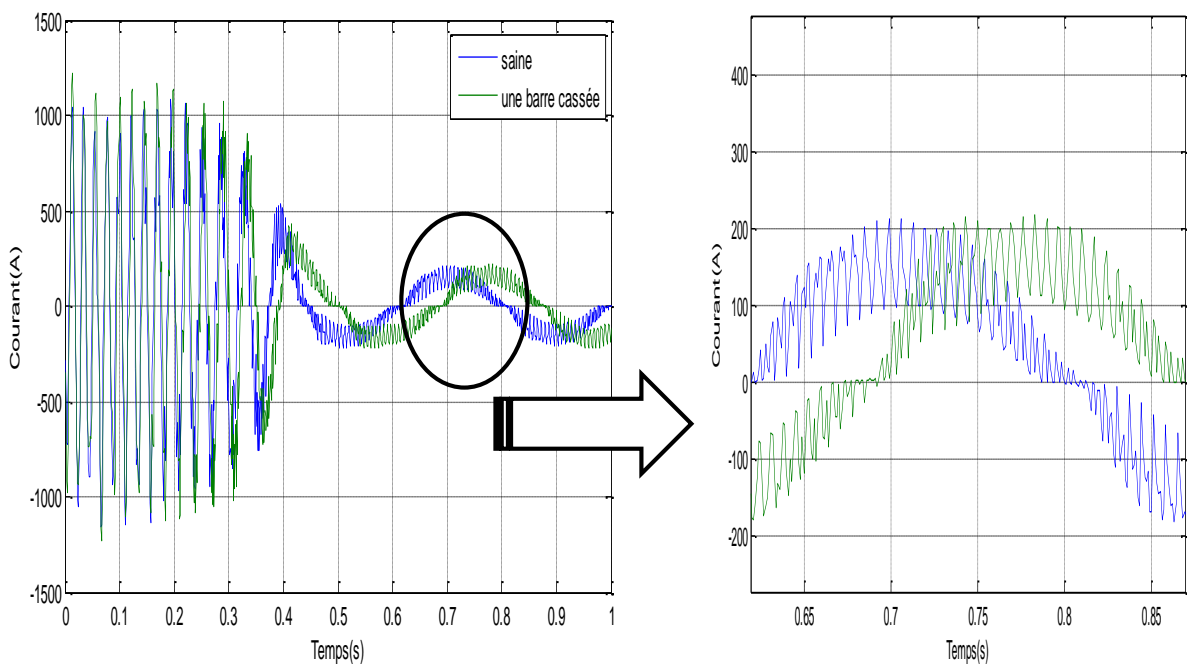


Figure III. 16 : Courant dans la barre 2.

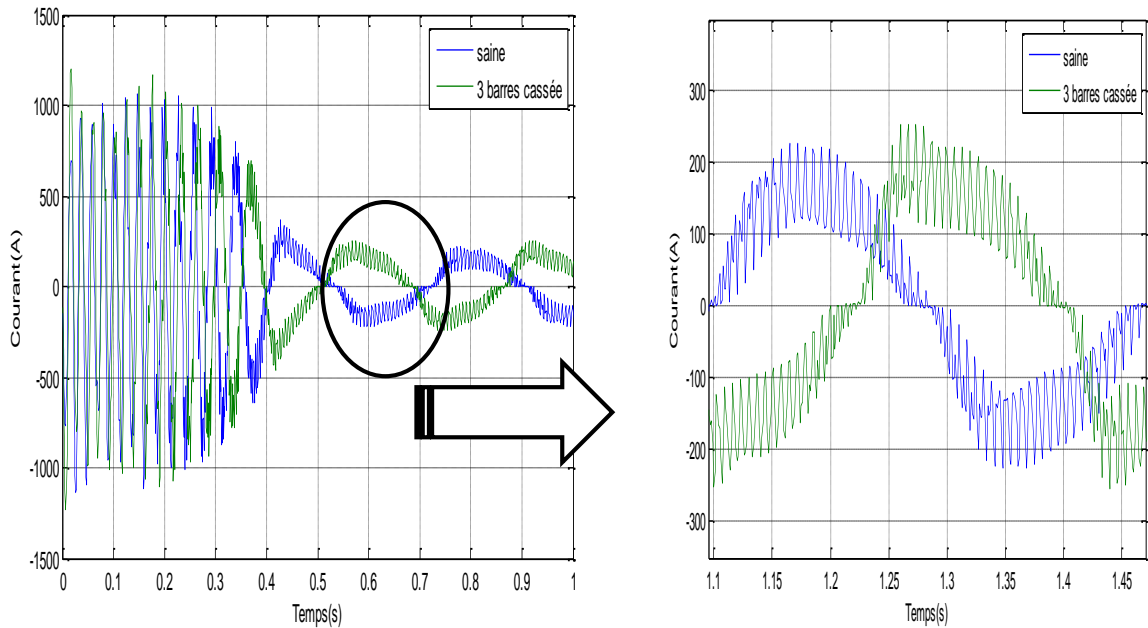


Figure III. 17 : Courant dans la barre 4

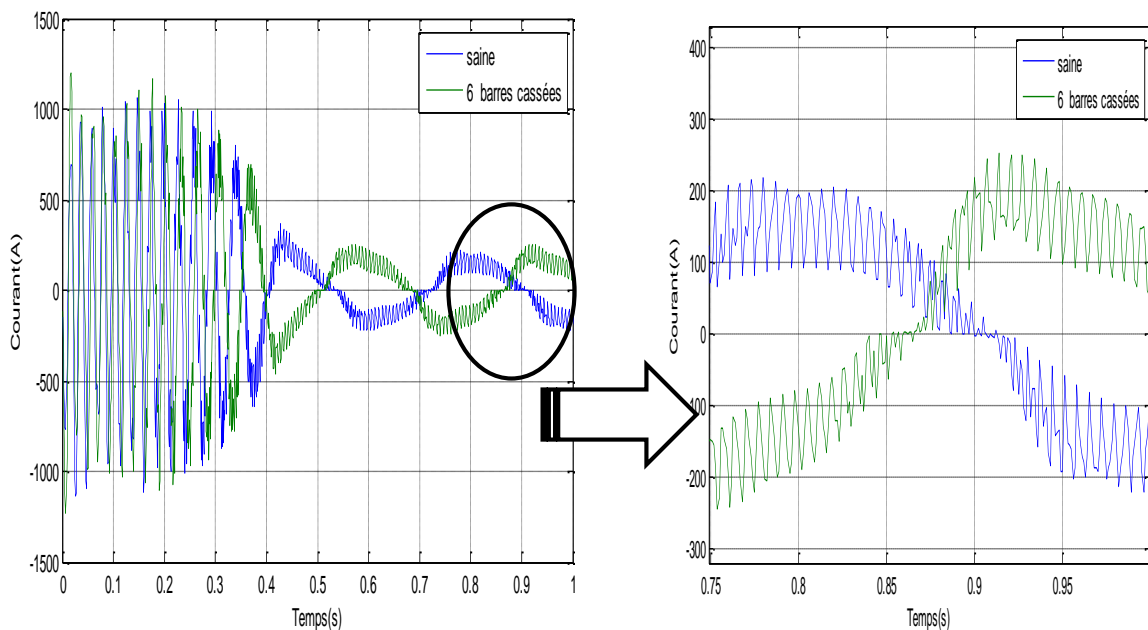


Figure III. 18 : Courant dans la barre 7

La figure ci-dessus présente la répartition des courants dans les barres de la machine, la rupture des barres provoque un déséquilibre du courant entre les barres du rotor et une augmentation de l'amplitude du courant, Cette amplitude augmente avec le nombre de barres cassées. Notons que l'amplitude des oscillations est proportionnelle aussi à ce nombre.

Le fait que les barres adjacentes conduisent plus de courant entraîne une surchauffe de ces barres qui provoque un vieillissement accéléré et explique l'effet cumulatif sur la rupture des barres.

III.2.2.2 Effet de la cassure des barres sur le temps de démarrage du moteur

On peut montrer l'influence du nombre des barres cassées sur la durée du régime transitoire, ce phénomène peut être mieux évalué et plus concrétisé avec l'utilisation de la courbe de vitesse au démarrage

Figure III.19. Nous avons vu que le temps du régime transitoire est modifié dans le cas d'une cassure des barres rotoriques, la comparaison entre une machine à l'état saine et à l'état en défaut, On remarque que la durée de démarrage s'augmente avec le nombre des barres rompues.

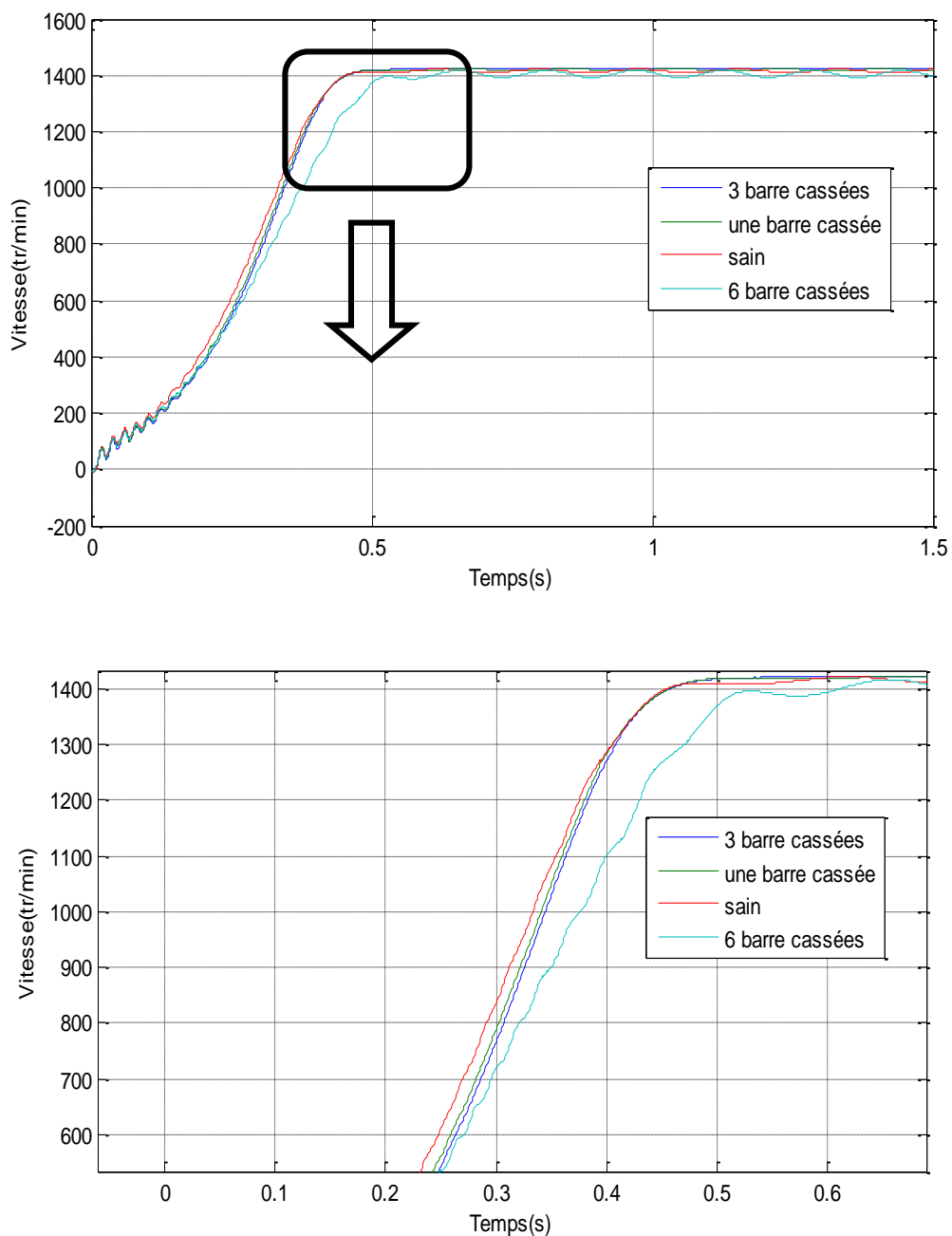


Figure III. 19 : Vitesse de rotation en charge (avec un zoom).

III.2.2.3 Effet de la cassure des barres sur le couple

La figure (III-20), on peut remarquer qu'il est difficile d'observer l'effet de défaut en régime permanent, quand la machine n'est pas chargée. Cependant, nous avons trouvé que la caractéristique mécanique en régime transitoire, donne des informations sur l'état du moteur,

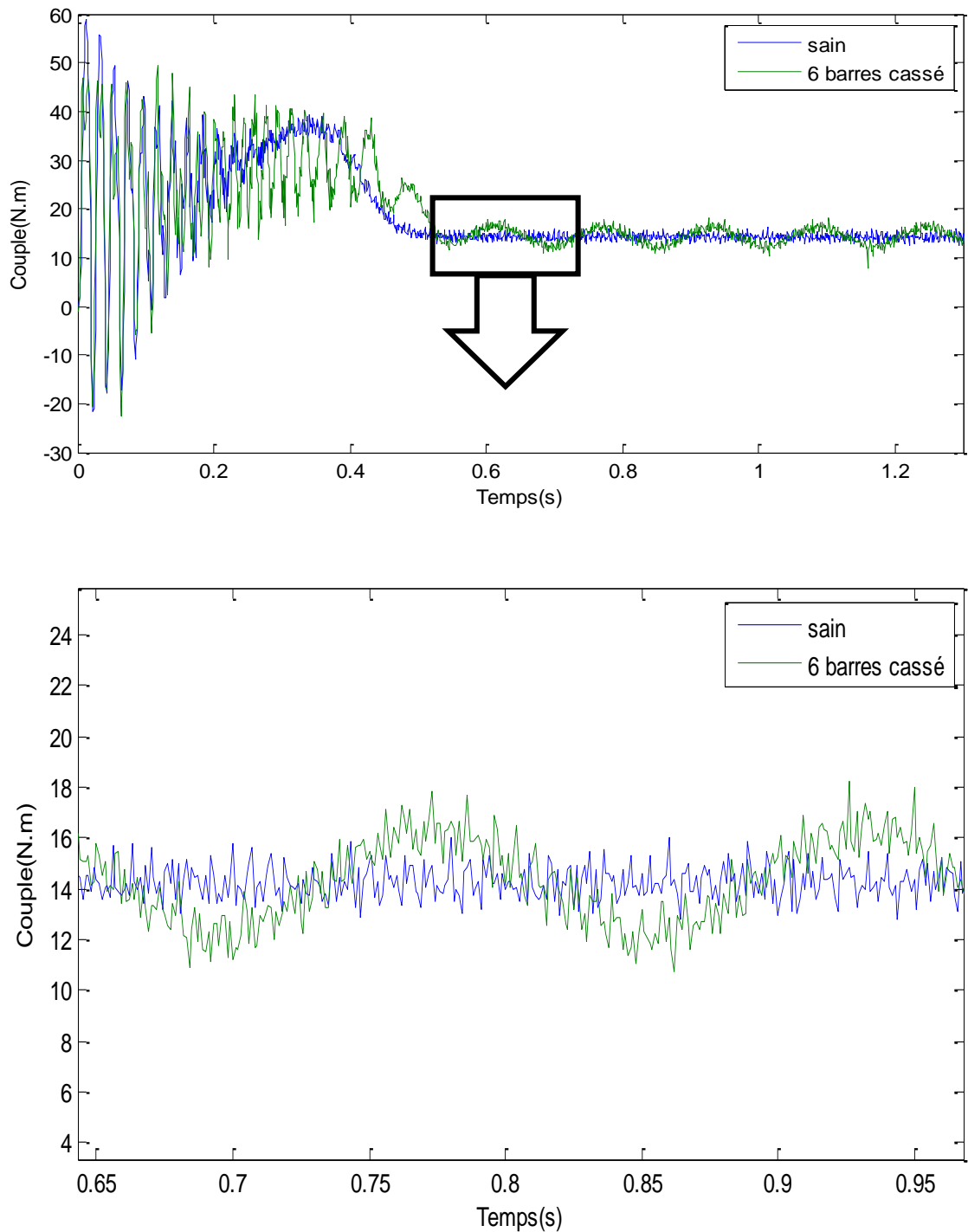


Figure III. 20 : Couple électromagnétique en charge (avec un zoom).

La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations (Fig. III-20). L'effet de la cassure de barre croît rapidement avec le nombre des barres cassées. La grande amplitude des oscillations accélère la détérioration de la machine et des composants de la chaîne de traction.

III.3.4 Diagnostic des défauts par le suivi des grandeurs mesurables

L'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables c'est le plus souvent utilisée pour le diagnostic des défauts rotoriques, [12,23]. Nous présentons sur les figures III.21 le spectre fréquentiel des grandeurs temporelles de la machine asynchrone saine, et lorsque celle-ci fonctionne avec trois barres rotorique cassées. Il est clairement visible que les spectres présentés dans le cas d'un rotor défilant sont beaucoup plus riches en harmoniques que ceux issus de l'analyse avec un rotor sain. [12]

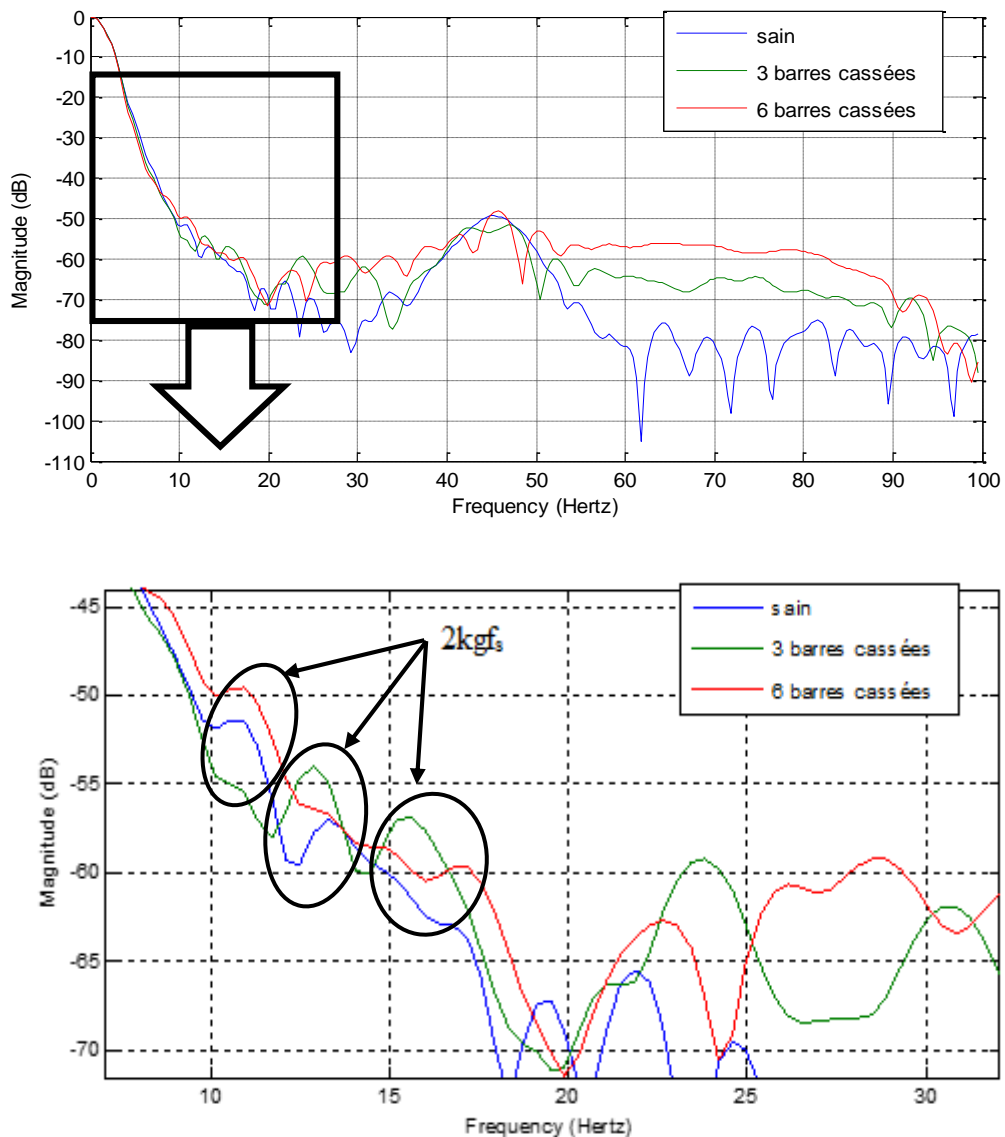


Figure III. 21: Spectre de la vitesse. (a) sain, (b) 3 barres cassées, (c) 6 barres cassées (avec un zoom).

Lorsque les ruptures des barres apparaissent, les spectres fréquentiels de la vitesse rotorique laissent paraître des composantes supplémentaires situées aux fréquences $2kf_s$,

L'analyse des courants statoriques (Fig.III-22) dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone.

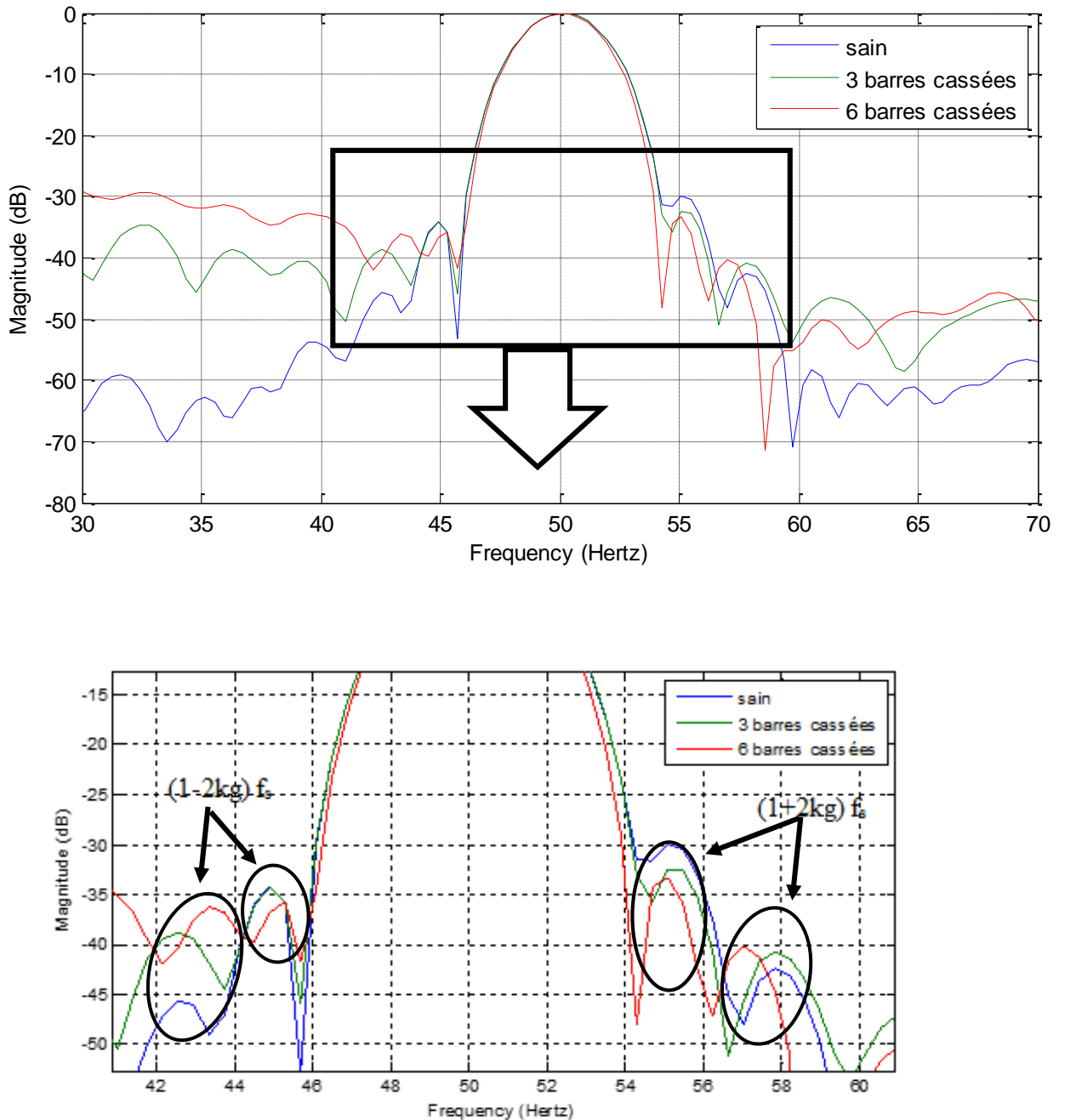


Figure III. 22 : Spectre du courant statorique (avec un Zoom) : (a)sain, (b) 3 barres cassées, (c)6 barres cassées

Nous savons que le suivi de l'amplitude des composantes caractéristiques de fréquence $(1\pm 2k) f_s$ dans le spectre du courant permet de se renseigner sur l'état de la cage rotorique. Nous présentons sur la figure (III-22) le spectre du courant statorique lorsque la machine fonctionne avec un rotor sain et un rotor défaillant (trois et six barres cassées). Nous apercevons une nette augmentation de l'amplitude de ces composantes, ce qui traduit la présence d'un défaut au sein de la cage d'écureuil.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé la machine en formulation magnéto transitoire avec l'introduction de l'équation mécanique, où nous avons abordé la simulation des comportements dynamiques de la machine (simulation de fonctionnement à vide et en charge).

Nous avons montré aussi, en régime transitoire, le fonctionnement du moteur asynchrone devient fortement altéré à partir de la rupture de six barres consécutives au rotor. Ce défaut connaît un effet cumulatif lors de la rupture des barres. Les barres saines adjacentes au défaut sont plus sollicitées et vieillissent prématurément.

A la fin de ce chapitre nous avons effectué l'analyse spectrale d'une grandeur mesurable qui est le courant des phases statoriques en représentant l'influence de la saturation, du pas du calcul et de la fluctuation de vitesse rotorique sur le spectre. Cette analyse spectrale sera notre outil pour la détection des défauts dans le chapitre suivant.

Alors 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 rotoriques sur le comportement des machines asynchrones, et nous a permis de comprendre et de quantifier les conséquences locales des défauts au rotor.

Conclusion générale

La machine asynchrone est l'élément le plus utilisé et l'un des plus importants dans les systèmes électriques, sa surveillance et son diagnostic ont fait et font toujours l'objet de plusieurs études.

Dans ce mémoire nous sommes basé sur la détection des défauts de la machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil, par l'utilisation de l'identification paramétrique qui permet d'estimer les paramètres physiques de la machine. Nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone triphasée à cage, ainsi que ses origines. Contrairement à la plupart des études analytiques de diagnostic nous avons développé un modèle à base d'éléments finis, sous logiciel Flux 2D®, permettant de représenter différents défauts pouvant survenir lors d'un fonctionnement normal.

Pour atteindre l'objectif de notre travail, nous avons pris en considération la présence de défaut de rupture des barres rotoriques.

Comme résultat ; Nous avons constaté que les barres adjacentes aux barres cassées sont les plus sollicitées ainsi que la dégradation du couple électromagnétique. Aussi on a conclu que l'effet des cassures des barres adjacentes est plus que les barres cassées séparés

Cette analyse a permis de voir le comportement de la machine défaillant, d'en déduire des signatures caractéristiques des défauts, ainsi elle nous a permet de synthétiser des méthodes de diagnostic adaptées, et constitue une matière première pour la détection des défauts.

En fin nous avons développés un modèle de la machine qui permet d'étudier les phénomènes répercutés sur les performances de la machine. L'analyse spectrale ayant recours à la procédure de la transformée de Fourier rapide (FFT), l'analyse spectrale de ces performances a permis de détecter et de quantifier la valeur des défauts survenue sur la partie rotorique de la machine.

Références

- [1] : **M. E. H. Ben Bouzid.** « Bibliography on Induction Motors Faults Detection and Diagnosis», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 14 n°4, pp 1065-1074, Dec 1999.
- [2] : **M. E. H. Benbouzid, G. B. Kliman.** « What Stator Current Processing Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis? », IEEE, Transaction on Energy Conversion, VOL 18 n°2, pp. 238-244, Jun 2003.
- [3] : **S. Bachir.** « Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique », Thèse de Doctorat en Automatique, Ecole Doctorale des Sciences pour l'ingénieur, 2002.
- [4]: **A. H. Bonnett and C. Yung,** "Increased Efficiency Versus Increased Reliability," Industry Applications Magazine, IEEE, vol. 14, pp. 29-36, 2008
- [5]: **W. T. Thomson,** "A review of on-line condition monitoring techniques for three-phases squirrel-cage induction motors—past, present and future," in 2nd IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives -SDEMPED '99, Gijon, Spain, 1999, pp. 3-17.
- [6]: **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, pp. 921-937, 1992.
- [7] : **E. Schaeffer,** "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts," Thèse de doctorat, Institut de Recherche en Cybernétique de Nantes, École Centrale de Nantes, Nantes, France, 1999
- [8] : **C. Capdessus.** Aide au diagnostic des machines tournantes par traitement du signal.
- [9]: **NEGREA.M. D;** (Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines); Doctoral dissertation; Helsinki University of Technology; Année 2006.
- [10] : **BELAIDE Ammar** ; (diagnostic de la machine asynchrone par la méthode d'identification paramétrique) ; Université de M'silla ; diplôme d'ingénieur d'état ; Année 2012.
- [11] : **MERABET. S et D. HOUSSINE** ; (Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil par la méthode de reconnaissance des formes) ; Thèse d'ingénieur ; Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ; Année Juin 2007
- [12] : **DIDIER Gaétan** ; (Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances) ; Université de U.F.R science et techniques : S.T.M.I.A) ; Thèse de Doctorat ; Année 2004.
- [13] : **T. BOUMEGORA** ;(Recherche des signatures électromagnétiques des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic) ; Thèse de doctorat ; Ecole centrale de Lyon ; Année 2001
- [14] : **BAZINE Sadok** ; (Conception et implémentation d'un méta-modèle de machines asynchrones en défaut) ; thèse de doctorat ; Université de Poitiers ; Année 2009.

- [15] : **BOUSBIA Salah Mohamed, DJERIBIAI Ayoub, BOUAZIZ Salim** ;(Identification des machines asynchrones par la méthode SSFR vue de leur diagnostic) ; diplôme d'ingénieur d'état ; Université de M'silla ; Année 2011/2012
- [16] : **Radjeai Hammoud** ; (contribution à l'amélioration des modèles Mathématiques des machines asynchrones) ; Université de Ferhat Abbas –Sétif ; Thèse de Doctorat ; Année 2007.
- [17] : **D. Bendittis** ; (étude et modèle électromagnétique de machine asynchrone pour l'alternateur-démarrateur) : Thèse de doctorat ; Institut national polytechnique de Grenoble ; Année 2002.
- [18]: **T. Tudorache Et L. McLees**; (FEM optimal design of energy efficient induction machines); Advances in Electrical and Computer Engineering; Volume 9; annex 2009.
- [19]: **Ondel O, Boutleux E, Clerc G.** A method to detect broken bars in induction machine pattern recognition techniques. IEEE Trans Ind Appl2006;
- [20] **Jawad faiz**, University of Tehran Locating rotor broken bars in induction motors using finite element method, ARTICLE in ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT, JANUARY 2009
- [21] : **J. Faiz, Bashir Mahdi Ebrahimi.** A new pattern for detection of broken rotor bars in induction motors during start-up. Trans Magn 2008.
- [22]: **J. Faiz, Bashir Mahdi Ebrahimi, H.A. Taliyah, W.S. Abu- Elhaida.** Mixed-fault diagnosis in induction motors considering varying load and broken bars location. Energy Conversion and Management.2010.
- [23]: **T. Tudorache, L. Melcescu and V. Petre:** FEM optimal design of energy efficient induction machines; Advances in Electrical and Computer Engineering Volume 9, Number 2, 2009.
- [25]: **Izzet Yilmaz Onel and Mohamed El Hachemi Benbouzid** «induction motor bearing failure detection and diagnosis: park and concordia transform approaches comparative study» iee/asme transactions on mechatronics, vol. 13, no. 2, april 2008.
- [26] : **M. Mostefai, H. Radjeai,** Maintenance du logiciel FLUX Université Ferhat Abbas De Sétif, Cedrat, octobre 2008.
- [27]: **Smail Bachir, Slim Tnani, Jean-Claude Trigeassou, and Gérard Champenois,** Diagnosis by Parameter Estimation of Stator and Rotor Faults Occurring in Induction Machines, article 2006
- [28] : **G. Lacombe,** « Définition et réalisation d'une nouvelle génération de logiciel pour la conception des moteurs du futur », Thèse de doctorat, Université du Grenoble, 2007.
- [29]: **Yahoui H., Grellet.G,** « Detection of an end-ring fault in asynchronous machines by spectrum analysis of the observed electromagnetic torque », J. Phys. III, vol. 6, pp. 443-448, Apr. 1996.
- [30]: **Tnani S., Bachir S., Champenois G.,** « Squirrel cage rotor modeling for broken bars detection. Diagnosis by parameter estimation », Proc. ICEM'2002, Bruges, Belgium, 25-28 August, 2002.

[31]: Delmotte-Delforge C., Hénao H., Ekwe G., Brochet P., Capolino G.-A., « Comparison of two modeling methods for induction machine study: application to diagnosis », Int. Journal for Computation and Maths. in Electrical and Electronic Eng. (COMPEL), Vol.22, n°4, 2003, pp.891-908.

[32]: T. Tudorache, L. Melcescu and V. Petre: FEM optimal design of energy efficient induction machines; Advances in Electrical and Computer Engineering, Number 2, 2009.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER
EN GENIE ELECTRIQUE

OPTION : INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUES

Proposé et dirigé par : **Mr : ZORIG Assam**

Présenté par : **AIT MIHOUB Mohamed oulhocine**

Thème

**METHODE GLOBALE DE DIAGNOSTIC DES
MACHINES ASYNCHRONES A CAGE
D'ECUREUIL**

Résume :

Les machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil sont les plus fréquemment utilisées dans tous les secteurs industriels en raison de leurs robustesses, de leurs simplicités de construction et de leurs bas coûts.

La détection des défauts dans les machines électriques a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches et d'intérêt industriel depuis de nombreuses années.

L'objectif du présent travail est l'élaboration d'un modèle des éléments finis, à l'aide du Logiciel Flux2D®, qui permet de simuler en magnétodynamique et magnéto-transitoire, tous les défauts qui peuvent être apparaissent dans les circuits électriques et magnétiques de la machine asynchrone.

Mots clés :

Machine asynchrone, modélisation, éléments finis, Diagnostic