

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande Electriques

Réf:.....

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

MASTER

Thème

**La modélisation des cassures des barres de
la machine asynchrone par flux 2D**

Présenté par :

BOUSSAGGAMA Hichem

Soutenu le : 29 mai 2016

Devant le Jury compose de :

Mr : ZOUZOU Salah Eddine

Mr : MIMOUNE.Souri.Mohamed

Mr : REZIG Mohamed

Professeur

Professeur

MAA

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire: 2015/ 2016.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande Electriques

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

MASTER

Thème

La modélisation des cassures des barres de la
machine asynchrone par flux 2D

Présenté par :

BOUSSAGGAMA Hichem.

Avis favorable de l'encadreur :

Pr. MIMOUNE.Souri.Mohamed.

Avis favorable du Préside du Jury

ZOUZOU.Salah.Eddine

Cachet et signature

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



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande Electriques

Thème :

La modélisation des cassures des barres de la machine asynchrone par flux 2D

Proposé par : BOUSSAGGAMA Hichem

Dirigé par : Pr. MIMOUNE.Souri.Mohamed

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. La machine asynchrone à cage devient actuellement l'élément clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa robustesse et son faible coût. Malgré ces avantages, un certains nombres de contraintes de natures très différentes peuvent affecter la durée de vie de cette machine, en occasionnant des pertes économiques considérables. Ceci impose la mise en œuvre d'un système de surveillance. La surveillance est un moyen pour garantir le bon fonctionnement d'une installation industrielle. Le diagnostic qui est une partie de la surveillance, a pour objectif de détecter et de localiser un défaut, d'une façon précoce, avant qu'il ne conduise à une défaillance totale de l'installation industrielle. La compréhension du fonctionnement avec et sans défaut, ainsi que la vérification des algorithmes de détection des défauts, nécessite la synthèse d'un modèle décrivant le comportement de la machine d'une façon la plus fine possible. Dans cette logique, nous proposons un modèle éléments finis, ce qui permettra la prise en compte du

circuit magnétique dans le modèle de la machine et pour que nous adoptons une grandeur mesurable comme outil de détection des défauts rotoriques, une analyse spectrale du courant statorique a été présentée à l'aide de la transformée de Fourier rapide afin de mettre en évidence la présence des harmoniques caractérisant le défaut de barres.

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

ملخص:

ينصوي هذا العمل تحت إطار تشخيص الأخطاء في الماكينات الكهربائية اللامتزامنة. حالياً، تعتبر الماكينة اللامتزامنة العنصر المفتاح في أغلب التجهيزات الصناعية بفضل صلابتها و ثمنها المنخفض نسبياً. بالرغم من هذه الإيجابيات، قد تتعرض هذه الماكينة إلى إجهادات مختلفة تؤثر على أدائها و مدة حياتها الافتراضية، مما يؤدي إلى خسائر اقتصادية معتبرة، و هذا ما يفرض وضع نظام مراقبة لتفادي هذه الخسائر.

المراقبة هي وسيلة لضمان السير الحسن للتجهيزات الصناعية و التشخيص يمثل جزءاً منها، الغاية منه اكتشاف و تحديد الخطأ قبل أن يؤدي إلى عطل السلسلة الإنتاجية كلية. لأجل هذا كان لزاماً إيجاد تمثيل يصف أداء الماكينة بأدق شكل ممكن. في هذا العمل نقترح تمثيل الماكينة بطريقة العناصر المنتهية التي تتيح لنا أن نأخذ بعين الاعتبار الدارة المغناطيسية للماكينة. و كذا تبني التيار الكهربائي في الأطوار الثلاثة كوسيلة لاكتشاف الأخطاء من خلال مراقبة مختلف التواترات المتواجدة فيه و المعبرة عن الأخطاء

الكلمات المفتاحية: الماكينة اللامتزامنة، طريقة العناصر المنتهية، التشخيص، تحليل طيفي

Abstract

This work is part of the diagnosis of faults in three-phase cage induction motors. The cage induction machine is currently the key element of most industrial facilities, because of its robustness and low cost. Despite these advantages, a certain constraints numbers of very different natures can affect the life of the machine, resulting in significant economic losses. This requires the implementation of a monitoring system. Monitoring is a way to ensure the proper functioning of an industrial plant. Diagnosis is part of the monitoring, aims to detect and locate a fault, an early, before they lead to a total failure of the industrial plant. Functioning comprehension with or without flaw and verification of defect detection algorithms, requires the synthesis of a model describing the behavior of the machine of the finest possible way. In this logic, we propose a finite element model, which will take account of the magnetic circuit in the machine model and we adopt a measurable quantity such as defect detection tool rotor, a spectral analysis of the stator current has been presented using the fast Fourier transform in order to highlight the presence of harmonics characterizing the bars default.

Keywords: induction machine, finite element method, diagnosis, spectral analysis, FFT, PSH bar breakage.

Je dédie ce mémoire

*A mes parents pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien
leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer*

A mes amis pour leur douceur et leur gentillesse.

*A mes sœurs ainsi qu'à mes beaux-frères pour leur tendresse, leur
complicité et leur présence malgré la distance qui nous sépare*

*A mes oncles pour toute l'affection qu'ils m'ont donnée et pour leurs
précieux encouragements*

A toute ma famille ainsi qu'à mes amis

Remerciement

*Avant tout, je remercie **Dieu** tout puissant qui m'a donné la force de m'avoir permet
d'arriver à ce stade là.*

*Je remercie mes parents d'avoir été très proches de moi tout au long de la préparation de
ce diplôme.*

*Je tiens à remercier particulièrement mon encadreur, **Mr : MIMOUNE Sourî Mohamed**
(Professeur à l'université de Biskra), qui n'a ménagé aucun effort et qui travail sans lever
avec moi, sa disponibilité, sont aide efficace, les précieux conseils et les réflexions avisées
qu'il m'a apportées. Il restera un modèle de rigueur scientifiques et un exemple d'intégrité.*

*Je remercie **Mr : ZO'ZO' Salah Eddine** (Professeur à l'université de Biskra) d'avoir
accepté de présider ma soutenance de master, Je remercie également **Mr : REZIG Mohamed**
(enseignant à l'université de Biskra), d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Un remerciement sincère à mes amis **LAADJAL Khaled, MECHIGHEL Khaled.***

*J'exprime vivement ma gratitude et reconnaissance **Mr Ghouggal Adel**, dont
les conseils furent un guide vers la voie de la réussite.*

*Finalement, je saisis cette occasion pour témoigner ma grande reconnaissance à tous ceux qui
m'aide de près ou de loin à la réalisation de ce projet.*

List de Figures

Chapitre 1 : Problématique

Figure I.1 :	Structure de la machine asynchrone triphasée à cage.....	04
Figure I.2 :	Statistiques des défauts de la machine asynchrone	06
Figure I.3 :	Structure d'un roulement à billes.....	07
Figure I.4 :	Les mesures utilisées pour la surveillance et le diagnostic des machines asynchrones.....	14
Figure I.5 :	Défaut de l'excentricité du rotor.....	19
Figure I.6 :	Dimension du roulement à billes.....	20

Chapitre II : Modèle éléments finis de la machine asynchrone

Figure II.1 :	Fonction d'interpolation d'un élément.....	26
Figure II.2 :	L'enchaînement des programmes de Flux 2D.....	28
Figure II.3 :	Les dimensions de la machine.....	29
Figure II.4 :	Bobinage statorique.....	30
Figure II.5 :	Circuit magnétique de la MAS.....	31
Figure II.6 :	Les points de maillage.....	33
Figure II.7 :	Répartition du maillage.....	33
Figure II.8 :	La courbe d'aimantation B (H) du matériau ferromagnétique.....	34
Figure II.9 :	Le circuit électrique d'alimentation.....	35
Figure II.10 :	Circuit équivalent de la cage rotorique.....	35
Figure II.11 :	Les tensions d'alimentation V_a, V_b et V_c	36

Chapitre III : Simulation de la machine asynchrone à l'état sain

Figure III.1 :	La distribution des lignes du flux à vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.....	38
Figure III.2 :	L'induction B à vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.....	39
Figure III.3 :	Le courant statorique de la phase à vide.....	40
Figure III.4 :	Le courant dans la barre rotorique 1 à vide.....	41
Figure III.5 :	Le couple électromagnétique à vide.....	41
Figure III.6 :	La vitesse de rotation à vide.....	42
Figure III.7 :	La distribution des lignes du flux en charge au (a) démarrage ; (b) en régime permanent.....	43
Figure III.8 :	L'induction B en charge au démarrage (a) et en régime permanent (b).....	44

Figure III.9 :	Le courant dans la barre 1 rotorique.....	45
Figure III.10:	Le courant statorique de la phase A en charge	45
Figure III.11:	La vitesse de rotation en charge.....	46
Figure III.12:	Le couple électromagnétique en charge.....	46
Figure III.13:	Spectre du courant statorique.....	47
Chapitre 4 : Simulation de la machine asynchrone en présence des défauts		
Figure IV.1:	La vitesse de rotation à l'état sain.....	49
Figure IV.2 :	(a) La vitesse de rotation, (b) zoom au régime permanent. avec une barre cassé.....	50
Figure IV.3 :	(a) La vitesse de rotation, (b) zoom au régime permanent avec deux barres cassées.....	51
Figure IV.4 :	(a) La vitesse de rotation, (b) zoom au régime permanent ; avec une et deux barres cassées	52
Figure IV.5 :	(a)Le couple électromagnétique à vide,(b) zoom sur le régime permanent.....	53
Figure IV.6 :	a)Le couple électromagnétique, (b) zoom sur le régime permanent avec deux barres cassées.....	54
Figure IV.7 :	La distribution des lignes du flux machine saine.....	55
Figure IV.8 :	La distribution des lignes du flux machine avec une barre cassée.....	56
Figure IV.9 :	La distribution des lignes du flux machine avec deux barres cassée.....	56
Figure IV.10:	La distribution des lignes du flux machine saine.....	57
Figure IV.11:	La distribution des lignes du flux machine avec une barre cassée.....	58
Figure IV.12:	La distribution des lignes du flux machine avec deux barres cassées.....	58
Figure IV.13:	L'induction magnétique (a) avec une barre cassée; (b) avec deux barres cassées	59
Figure IV.14:	L'induction magnétique (a) avec une barre cassée; (b) avec deux barres cassées.....	60
Figure IV.15:	Le courant dans barre rotorique 4 à l'état sain.....	61
Figure IV.16:	Le courant dans la barre adjacente à la barre cassée (barre 3).....	62
Figure IV.17:	Le courant dans la barre cassée(4).....	62
Figure IV.18	<i>Spectre du courant statorique</i>	63
Figure IV.19	<i>Spectre du courant statorique pour une marge de 35 à 65Hz</i>	63
Figure IV.20	<i>Spectre du courant statorique pour une marge de 100 à 500Hz</i>	64

Figure IV.21	<i>Spectre du courant statorique pour une marge de 500 à 1200Hz.....</i>	64
--------------	--------------------------------------------------------------------------	----

List de tableaux

Chapitre 2 **Modèle éléments finis de la machine asynchrone**

Tableau2.1:	Les caractéristiques de la machine.....	30
Tableau2.2:	La taille des éléments du maillage	32

Liste des Symboles

Ω	: Domaine surfacique.
Γ	: Frontière de domaine Ω .
A	: Potentiel magnétique.
μ_0	: Perméabilité magnétique de l'air.
H	: Champ magnétique.
B	: Induction magnétique.
B_r	: Induction radiale dans l'entrefer.
E	: Champ électrique.
D	: Induction électrique.
ε	: Permittivité électrique.
μ	: Perméabilité magnétique.
J	: Densité de courant uniforme.
ρ	: Charges électriques.
σ	: conductivité électrique.
j	: unité imaginaire.
t	: Temps.
MRID	: Maillage de diamètre intérieur du rotor.
MRBOT	: Maillage de bas des barres.
MRTOP	: Maillage de têtes des barres.
MAIRGAP	: Maillage de deux limites de l'entrefer.
MSTOP	: Maillage de têtes des encoches.
MSOD	: Maillage de diamètre extérieur du stator.
L_a, L_b, L_c	: Inductances de fuite des têtes des bobines statorique.
g	: Glissement.
ω_s	: Pulsation statorique.
p	: Nombre de paires de pôles.
N_b	: Nombre de barres rotoriques.
n_{os}	: Ordre des harmoniques de temps de la FMM.
n_d	: Ordre de l'excentricité.
f_s	: Fréquence d'alimentation.
f_r	: Fréquence rotorique.

f_{he}	: Fréquence des harmoniques d'encoches rotoriques.
f_{roul}	: Fréquence de vibration relative aux défauts de roulements.
f_v	: Fréquence caractéristique de vibration.
f_{bille}	: Fréquence de vibration relative aux défauts de billes.
$f_{b.int}$: Fréquence de vibration relative au défaut de bague intérieure.
$f_{b.ext}$: Fréquence de vibration relative au défaut de bague extérieur.
f_b	: Fréquence caractéristique du défaut de barres.
f_{ecc}	: Fréquence d'ordre supérieur caractéristique du défaut d'excentricité.
f_{mix}	: Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte.
f_{st}	: Fréquence caractéristique du défaut statorique.
n_b	: Nombre d'éléments roulant du roulement.
θ	: L'angle de contact des bielles avec les bagues du roulement.
Db	: Le diamètre d'un élément roulant.
Dc	: La distance entre les centres des billes diamétralement opposées.
PSH	: Principal slots harmonics (Harmoniques d'encoches principales).
RSH	: Rotor slots harmonics (Harmoniques d'encoches rotoriques).
TH	: Time harmonics (Harmoniques de temps).

SOMMAIRE

Liste de figures et tableaux.....	I
Liste des symboles.....	IV
INTRODUCTION GENERALE	1
<i>CHAPITRE-I- Problématique</i>	
I.1 INTRODUCTION	3
I.2 CONSTITUTION DU MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE A CAGE.....	3
I.2.1.stator.....	4
I.2.2.rotor.....	4
I.3 DEFINITION DE QUELQUES TERMES LIES AU DIAGNOSTIC	5
I.4 LES DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE.....	6
I.3.1 Les défauts de roulements.....	6
I.3.2 Les défauts statoriques.....	8
I.3.3 Les défauts rotoriques.....	9
I.5 PROBLEMATIQUE DU DIAGNOSTIC DES MACHINES ELECTRIQUES.....	9
I.6 METHODES DE MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE.....	10
1.4.1 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC).....	10
1.4.2 Méthode des réseaux de perméances.....	11
1.4.3 Méthode des éléments finis.....	12
I.7 METHODES DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES.....	12
I.6.1 L'estimation de paramètres physiques	12
I.6.2 L'estimation d'état	13
I.6.3 Traitement de signaux	13
I.8 PARAMETRES INDICATEURS DE DEFAUT	14
1.8.1 Le flux magnétique axial de fuite.....	15
1.8.2 Le courant statorique.....	15
1.8.3 Les vibrations.....	15
1.8.4 Le couple.....	16
1.8.5 La température.....	16
I.9 SIGNATURES SPECTRALES POUR REVELER LE DEFAUT.....	16
I.9.1 Les harmoniques de la fmm dans la machine asynchrone	16

I.9.2 Les signatures spectrales pour révéler les défauts.....	17
I.9.2.1 Les défauts statoriques	17
I.9.2.2 Les défauts des barres rotoriques	17
I.9.2.3 Les défauts d'excentricité	18
I.9.2.4 Les défauts de roulements.....	20
I.10.CONCLUSION.....	21

CHAPITRE-II Modèle éléments finis de la machine asynchrone

II.1 INTRODUCTION.....	22
II.2 LA METHODE DES ELEMENTS FINIS.....	22
II.2.1 Formulations.....	22
II.2.1.1.Le modèle employé.....	24
II.3 LE PRINCIPE DE LA MEF.....	26
II.4 PRESENTATION DU LOGICIEL FLUX2D.....	27
II.5CONSTRUCTION DU MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE.....	28
II.5.1 Les données de la machine étudiée	29
II.5.2 Procédure de construction du modèle par FLUX2D.....	31
II.6CONCLUSION.....	37

CHAPITRE III Simulation de la machine asynchrone à l'état sain

III.1 INTRODUCTION	38
III.2 COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A VIDE	38
III.3 COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE EN CHARGE	43
III.4 ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE.....	47
III.5 CONCLUSION.....	48

CHAPITRE IV Simulation de la machine asynchrone en présence des défauts

IV.1 INTRODUCTION.....	49
IV.2 EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LES PERFORMANCES DE LA MACHINE.....	49

IV.3 EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LA CARTE DU CHAMP DE LA MACHINE AU DÉMARRAGE	55
IV.4 EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LA CARTE DU CHAMP DE LA MACHINE AU RÉGIME PERMANANT.....	57
IV.5. EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LA L'INDUCTION MAGNETIQUE DE LA MACHINE AU DEMARRAGE	59
IV.6. EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LA L'INDUCTION MAGNETIQUE DE LA MACHINE AU DEMARRAGE	60
IV.7. EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LES COURANTS ROTORIQUES	61
IV.8.DETECTION DES DEFAUTS ROTORIQUES PAR L'ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE.....	63
IV.6 COCLUSION.....	64
<i>COCLUSION GENERALE</i>	64
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	65

Introduction générale

Dans tous les secteurs industriels, la sécurité des personnes, du matériel, de l'environnement du travail, la qualité de service et la rentabilité des installations imposent des contraintes sévères de fiabilité et de sûreté de fonctionnement. [SAM 12]

La maintenance industrielle, qui a pour vocation d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est une fonction stratégique dans les entreprises. Intimement liée au remarquable développement technologique, à l'apparition de nouveaux modes de gestion, à la nécessité de réduire les coûts de production, elle est en constante évolution. Elle n'a plus aujourd'hui comme seul objectif de réparer l'outil de travail mais aussi de prévoir et éviter les dysfonctionnements.[GHO 05]

La machine asynchrone triphasée a été depuis son invention fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance. L'avènement de l'électronique de puissance renversa la tendance et la rend de plus en plus utilisée. Sa prédominance résulte de la standardisation réussie dans le "process" industriel, à sa grande robustesse et à ses coûts d'achat et d'entretien relativement plus faibles. En fait, Actuellement, la plupart des équipements industriels sont à base de machines asynchrones triphasées comme l'aéronautique, le nucléaire, les industries pétroliers, chimiques, dans le transport (métro, trains, propulsion de véhicule et des navires, les ascenseurs), dans l'industrie (machines-outils, treuils) et dans l'électroménager. A l'origine, elle était uniquement utilisée comme moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée comme génératrice, c'est par exemple le cas des éoliennes dont la production de part le monde a connu un essor considérables. Cependant, et en dépit de toutes ces qualités, les machines asynchrones triphasées restent sensibles a de multiples perturbations de l'environnement. Les défauts dans les machines électriques peuvent être d'origine mécanique (excentricités du rotor, défaut sur les accouplements, corrosion des roulements,...), électrique (court-circuit du bobinage statorique, rupture de barres rotoriques ou d'anneau,...) ou magnétique (défaut d'isolement entre les tôles statoriques). Les grandeurs mesurables tel que le courant statorique, les tensions, la vitesse ou bien encore la température et la densité de flux magnétique, peuvent fournir des informations significatives sur les défauts et servir ainsi à déterminer un ensemble de paramètres représentant les signatures de défauts du moteur.[HAL 15]

dans ce travail la modélisation de la machine asynchrone saine et avec défaut sera réalisée par la méthode d'éléments finis pas à pas dans le temps, d'une part pour étudier le comportement précis des différentes grandeurs de machine asynchrone triphasée saine, et d'autre part pour valider les modèles plus simples de type circuits électriques.

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

Le premier chapitre présente des notions de bases reliées à l'action de diagnostic, suivi d'une présentation de 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 présentation du modèle éléments finis de la machine asynchrone triphasée à cage, afin de simuler le cassure de barres, objectif de notre travail.

Le troisième chapitre est réservé à montrer dans un premier temps les résultats de la simulation du moteur asynchrone, dans les différentes conditions de fonctionnement, sans défauts. Dans un second temps, à fin d'adopter une grandeur mesurable comme outil de détection des défauts rotoriques une analyse spectrale du courant statorique sera présentée.

Le quatrième chapitre est essentiellement consacré à présenter la repartition de champ au régime transitoire et au régime permanent. L'analyse spectral du courant statorique (à l'aide de la transformée de Fourier rapide) afin de mettre en évidence la présence des harmoniques caractérisant le défaut de barres.

Une conclusion générale s'impose à la fin de ce mémoire, pour montrer l'état d'avancement de notre travail et les perspectives d'avenir pour répondre aux problèmes posés, afin d'accomplir notre tâche de maintenance préventive

I.1 INTRODUCTION

Ce premier chapitre est consacré à la présentation des notions de bases reliées à l'action de diagnostic. Il sera suivi d'une présentation succincte de la constitution du dispositif à étudier où nous exposons les différents défauts qui peuvent apparaître dans une machine asynchrone triphasée. Ainsi nous montrons les différentes approches destinées au diagnostic de la machine asynchrone triphasée. Nous nous limiterons à la présentation des techniques basées sur l'analyse des signaux, ces dernières constituent l'essentiel de notre étude.

Enfin, c'est dans le contexte diagnostic des défauts et du choix de l'approche de modélisation que nous comptons mettre en œuvre pour appliquer la technique d'analyse des signaux à des fins de détection et de diagnostic. L'aspect modélisation et son impact sur la tâche de diagnostic sera inclus dans ce premier chapitre, suivi par une synthèse sur les travaux antérieurs. Un regard particulier sera porté sur les travaux concernant le diagnostic des machines asynchrones triphasées par la méthode des éléments finis utilisant la technique d'analyse des signaux.[HAL 15]

I.2 CONSTITUTION DU MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE A CAGE

Bien que la paternité des machines asynchrones soit attribuée à plusieurs chercheurs, il est admis cependant qu'en 1889, Mikhaïl Dolivo Dobrovolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891. Il existe cependant plusieurs types de machines. Progressivement ces machines prennent de l'ampleur du fait de leur simplicité d'utilisation et d'entretien, de leurs robustesses et leurs faibles prix de revient. Notre étude porte sur un type de machines en l'occurrence la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. La machine asynchrone triphasée souvent appelée moteur à induction est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor. Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Le rotor est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation. Comme illustré dans la figure I.1.

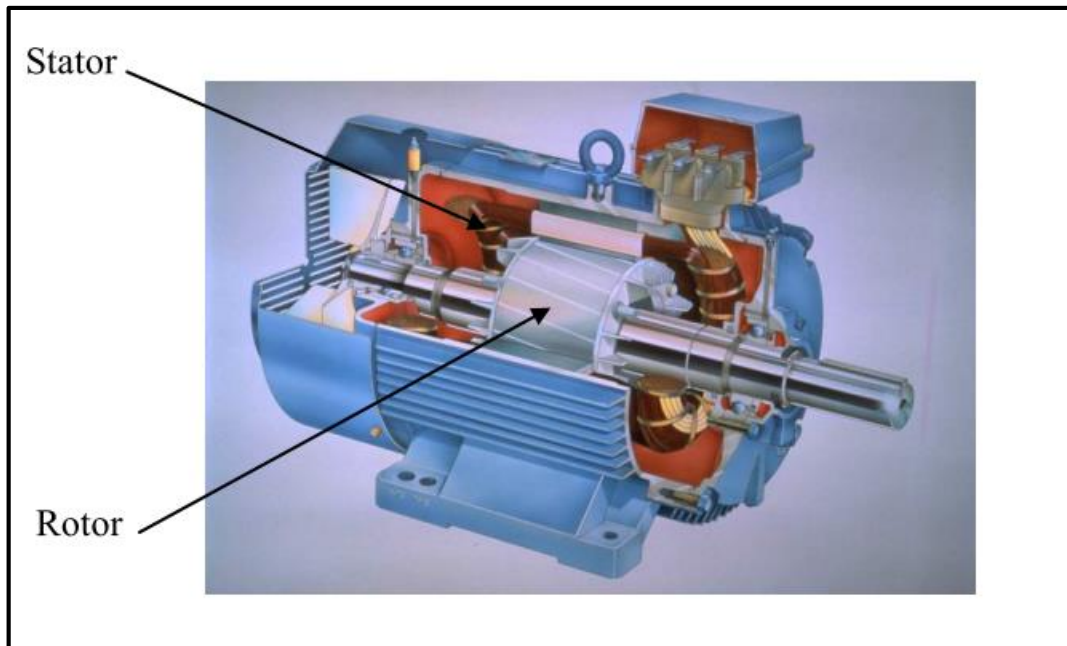


Figure I.1. Structure de la machine asynchrone triphasée à cage.

I.2.1 Stator

Le circuit magnétique du stator est réalisé par un assemblage de tôles ferromagnétiques fines et découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. L'utilisation des tôles minces permet de minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique. [ADE, BAC]

I.2.2 Rotor

Le rotor est constitué comme le stator des tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur

un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu. Dans le rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont des barres obtenues par injection d'un alliage d'aluminium ou préformées en cuivre et introduites dans les tôles du rotor, il n'y a généralement pas ou très peu d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment forte pour que les courants ne circulent pratiquement pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [BAC].

I.3 DEFINITION DE QUELQUES TERMES LIES AU DIAGNOSTIC [FAT 14]

• Diagnostic :

Le diagnostic consiste à détecter, à localiser et éventuellement à identifier les défaillances et/ou les défauts qui affectent un système. Le diagnostic s'intègre dans le cadre plus générale de la surveillance et de la supervision.

• Disponibilité :

Faculté d'un matériel ou d'un système à pouvoir fonctionner chaque fois que cela est nécessaire et chaque fois qu'on le sollicite; on assure ainsi une fiabilité totale pendant les phases de fonctionnement. La disponibilité nécessite des opérations de maintenance préventive afin de prévoir tout vieillissement ou défaillance.

• Fiabilité :

Capacité d'un système à fonctionner pendant un certain temps sans panne, elle se caractérise par le temps moyen de bon fonctionnement.

• Maintenance et maintenabilité :

La maintenance est l'action de mise en état du matériel; elle peut être préventive afin d'augmenter la fiabilité du système ou bien curative consécutivement au diagnostic d'un défaut. La maintenabilité caractérise la facilité de maintenance du procédé, elle peut être largement augmentée par la mise en œuvre d'un système de diagnostic.

• Sécurité :

Ce terme regroupe les caractéristiques concernant l'utilisation du procédé et ses dangers potentiels pour l'utilisateur ou pour le matériel.

• Sûreté :

La sûreté regroupe les notions de disponibilité, fiabilité, maintenabilité et sécurité du système; elle caractérise la confiance que l'on peut apporter au fonctionnement.

I.4 LES DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Les défauts dans les entraînements électriques se répartissent en deux catégories, les défauts qui se produisent dans la machine électrique (défauts des roulements, inclinaison de l'axe) et ceux qui se produisent dans la chaîne d'entraînements à l'extérieur de la machine (défauts dans la boîte de vitesse mécanique ...), notre étude est restreinte aux problèmes électriques qui se développent dans la machine asynchrone. [Bou 01]

Une variété d'études statistiques par différents auteurs tels que [IEEE85, Thorsen95, Thorsen99] offrent une synthèse des défauts qui peuvent affecter la machine. Ces études sont présentées par la figure I.1 [SPR 07].

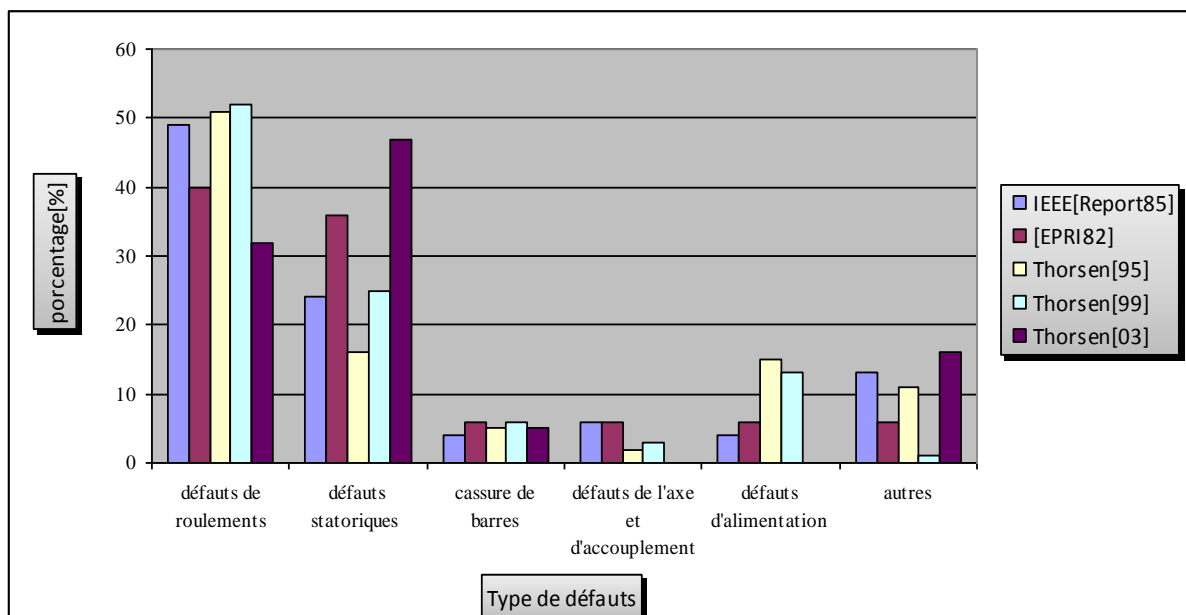


Figure I.2. Statistiques des défauts de la machine asynchrone

Ces études statistiques démontrent que certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres ce qui nous amène à axer notre étude sur les types de défauts les plus fréquents [SAM 12].

I.4.1 Les défauts de roulements [IBR 09]

Le roulement à billes est un organe de base dans la machine asynchrone qui joue le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En plus, il représente l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor. La majorité des machines

électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance-prix

Le roulement est composé des éléments suivants :

- Deux bagues concentriques en acier, appelés bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles "roulent" les corps roulants).
- Des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal.
- Une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine).

La figure I.2 montre la construction typique d'un roulement à billes.

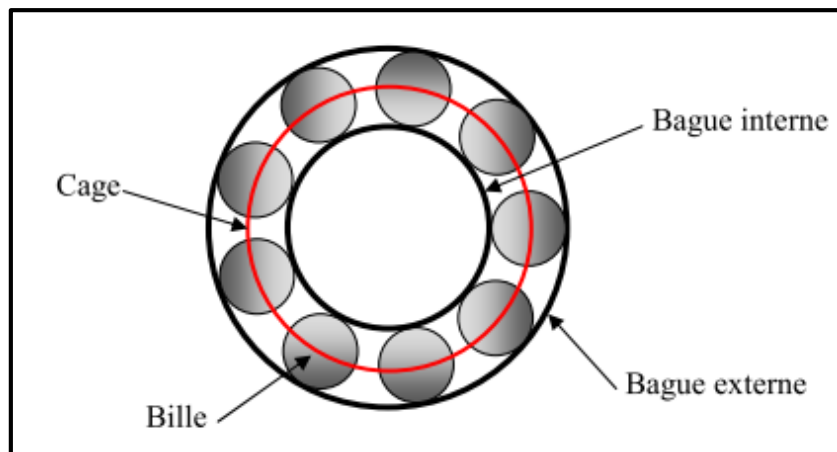


Figure I.3. Structure d'un roulement à billes.

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts suivants :

- Défaut de bague extérieure.
- Défaut de bague intérieure.
- Défaut de billes.

D'après des études statistiques, les défauts de roulement représente à eux seuls entre 40% et 50% des défauts des machines asynchrones triphasées. Ils constituent donc les défauts les plus fréquents sur les machines asynchrones notamment les machines de fortes puissances.

Les roulements peuvent être endommagés par les causes suivantes : [VAS 09]

- Contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, etc.
- Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, ...
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement.
- Mauvais alignement du rotor.
- Une température de fonctionnement élevée.
- Courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques.
- Installation inexacte du roulement ; en forçant incorrectement le roulement sur l'arbre du rotor ou dans les flasques (dû au désalignement), des entailles seront formées sur les chemins de roulement.

Conséquemment, le traitement de ce type de défaut prend une place prépondérante et constitue une piste privilégiée dans le domaine de diagnostic des défauts de la machine asynchrone.

I.4.2 Les défauts statoriques [HAL 15]

Les défauts au stator représentent environ de 60% des défauts des machines à induction. La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants. L'enroulement statorique d'une machine électrique est soumis à des efforts induits par une variété de facteurs, parmi les plus importants, une surcharge thermique, les vibrations mécaniques, les pics de tension provoqués par le réglage de fréquence, etc. Les causes les plus fréquentes des défauts d'enroulement statorique sont :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Échauffement excessif du noyau et des enroulements du stator.
- Fissures dans la tôle, de fixation, et des jonctions.
- Mauvaise connexion des têtes des enroulements.
- Fonctionnement dans un environnement sévère, contamination provoquée par l'humidité et la saleté.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- Décharges électriques.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.

- Fuites dans les systèmes de refroidissement.
- Vieillessement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader.

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit: défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et armature, déséquilibre d'alimentation, défaut de circuit magnétique.

I.4.3 Les défauts rotoriques

Dans les machines asynchrones à cage, les défauts qui peuvent atteindre le rotor sont considérées comme plus variées et plus complexes que celles affectant le stator. Ces défauts contribuent à 20% du total des défauts de la machine. Ceci est particulièrement vérifié pour les machines de faible à moyenne puissance.[HAL 15]

Plusieurs facteurs manifestent à l'apparition des défaillances au niveau du rotor de la machine asynchrone, parmi eux on cite :[VAS 09]

- Thermique (surchage,...)
- Electromagnétique (force en $B^2(t)$...)
- Résiduel (déformation,...)
- Dynamique (arbre de transmission,...)

Les défauts qui sont les plus répétitifs, localisés au niveau du rotor sont : l'excentricité statique et dynamique, la rupture de barres rotoriques et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.

I.5 PROBLEMATIQUE DU DIAGNOSTIC DES MACHINES ELECTRIQUES

Le problème du diagnostic revient essentiellement à un problème de connaissance sur le modèle déterministe entre la cause et l'effet ; plus précisément il faut trouver les variables déterministes des défauts, et puis on choisit les signatures qui indiquent « caractérisent » mieux ces défauts par le traitement du signal de ces variables. En outre, le diagnostic qu'il soit médical ou bien industriel est toujours basé sur la comparaison entre le comportement du procédé défaillant et du comportement sain (ou de son modèle) [KHO 07].

La comparaison nécessite des indicateurs, des symptômes révélateurs qui, une fois analysés, permettent d'abord de détecter le comportement défaillant, d'en déduire la fonction ou

l'élément en dysfonctionnement (localiser), puis d'en déterminer la cause et enfin, si possible, d'y remédier. [ROS 97]

Par ailleurs, le concept hautement stratégique de maintenance prédictive nécessite la connaissance des grandeurs significatives à mesurer pour avoir une image aussi proche que possible de l'état de la machine. Le système de suivi de la machine devrait pouvoir [ZWI 95] :

- Interférer le moins possible avec le système (les grandeurs peuvent-elles être mesurées en temps réel " on-line " ?, problème de sécurité, etc.).
- Etre capable de suivre plusieurs grandeurs.
- Etre évolutif.
- Etre pilotable à distance.
- Stocker les données pour permettre une analyse tendancielle.

Quant à la stratégie générale adoptée pour le diagnostic, elle consiste à [ZWI 95] :

- Recenser les défauts et les pannes pouvant se produire ;
- Trouver les grandeurs mesurables liées à ces défauts (grandeurs indicatrices) ;
- Choisir la méthode la plus proche des critères définis ci-dessus ;
- Définir les seuils "d'alarme " à partir desquels il faudra intervenir.

De ce qui précède, le problème à résoudre en terme de diagnostic consiste en la connaissance du comportement caractéristique du système en cas de défaut, au choix des méthodes de diagnostic adéquates à leur application pour le cas étudié, l'identification des valeurs indicatrices, et la conception de l'architecture du système de diagnostic et son implémentation [KHO 07].

I.6 METHODES DE MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

1.6.1 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC)

Dans l'approche de modélisation par les équations des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC), les enroulements constituant le stator et/ou le rotor, sont représentés par un circuit électrique équivalent, formé par une inductance en série avec une résistance [BAS 09].

Les inductances propres et mutuelles entre le stator et le rotor de la machine prennent une place importante dans cette méthode de modélisation car elles contiennent la signature des différents phénomènes pouvant apparaître au sein de la machine asynchrone. Ces

inductances peuvent être calculées soit en utilisant les fonctions de bobinage, sachant que cela impose une connaissance précise de la forme du bobinage de la machine, soit en utilisant une décomposition en séries de Fourier de l'induction dans l'entrefer. Ce type de modélisation permet donc de prendre en compte les harmoniques d'espace. Les harmoniques de temps créés par un réseau d'alimentation triphasé ou par un convertisseur statique ont été incorporés dans la modélisation de l'alimentation de la machine asynchrone. [DED 04]

Les hypothèses de cette approche sont : la linéarité du circuit magnétique (perméabilité relative du fer très grande devant 1), l'effet de peau est négligé, les barres rotoriques sont isolées les unes des autres ce qui permet d'éliminer les courants inter-barres et leurs effets au sein même de la cage rotorique. De plus, les pertes fer de la machine, les effets capacitifs et les effets thermiques sont négligés.

1.6.2 Méthode des réseaux de perméance [BAS 09, DED 04]

Le principe de la méthode des réseaux de perméance est la décomposition en tubes de flux élémentaires du circuit magnétique de la machine. Un circuit de perméance représentant la géométrie de la machine est réalisé, dont chaque perméance est calculée à partir d'un tube de flux. Ce circuit peut être assimilé à un circuit électrique habituel à la différence près que ce sont les flux et les différences de potentiels magnétiques qui entrent en jeu à la place des courants et des différences de potentiels électriques. Cette approche permet de prendre en compte les caractéristiques du fer utilisé pour la construction de la machine asynchrone. En effet, le calcul des différentes perméances ne peut se faire qu'en fixant une valeur précise pour la perméabilité relative du fer. Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméances d'entrefer variables selon la position angulaire du rotor.

C'est une représentation moins fine que les éléments finis, mais plus détaillée que la modélisation analytique. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet une résolution numérique rapide. Son inconvénient est que, si la paramétrisation des perméances des armatures statoriques et rotoriques est facile, la détermination de certaines perméances peut nécessiter une étude et un développement particulier, l'utilisation de la méthode des éléments finis par exemple, ce qui est notamment le cas des perméances d'entrefer.

1.6.3 Méthode des éléments finis [BAS 09, DED 04]

Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de dimension suffisamment faible pour que le matériau magnétique puisse être considéré linéaire sur les surfaces correspondantes. 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. 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 à savoir un échauffement local excessif dû à l'augmentation des courants circulant dans les barres voisines aux barres cassées et une forte sollicitation électrodynamique de ces mêmes barres voisines pouvant conduire à la propagation du défaut. De mêmes, la méthode des éléments finis sert à appréhender les impacts magnétique et thermique locaux du défaut de court-circuit inter-spores dans les phases statoriques. 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 d'avoir un modèle plus proche de la machine électrique réelle.

I.7 METHODES DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES

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

I.7.1 L'estimation de paramètres physiques

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

I.7.2 L'estimation d'état

La détection de défauts par estimation d'état a surtout été étudiée avec le modèle de PARK.

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

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

En diagnostic, l'objectif est d'estimer les variables d'état du système à partir d'un modèle de comportement parallèle rebouclé de façon à s'affranchir essentiellement des problèmes d'initialisation des grandeurs d'état. Ces grandeurs estimées sont comparées aux grandeurs Mesurées afin de détecter le dysfonctionnement dans le système surveillé.

I.7.3 Traitement de signaux

Pour effectuer le diagnostic d'une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de symptômes tels que le bruit, la température, les vibrations,...etc. En s'appuyant sur leur expérience. Ces symptômes ne sont que la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables. Toutes les méthodes de traitements de signal disponibles pour le diagnostic des machines tournantes peuvent être classées dans cinq groupes différents :

a)- Analyse spectrale

L'analyse spectrale est certainement la méthode la plus naturelle pour le diagnostic des barres cassées. En règle générale, la seule grandeur intéressante accessible au stator est le courant et l'intérêt de son analyse spectrale est de pouvoir détecter et identifier l'élément défectueux en fonction de sa fréquence.

b)- Analyse cepstrale

Le cepstre est un anagramme du mot 'spectre' la raison de ce choix tient à ce qu'on obtient le cepstrum en effectuant une analyse spectrale supplémentaire sur le spectre fréquentiel du signal

observé. Le cepstre est plus particulièrement utilisé dans les analyses vibratoires des machines tournantes. Les principales applications concernent la détection des défauts dans les roulements, les turbines ou encore les engrenages. [DED 04]

c)- Les méthodes de détection de fréquences connues

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

d)- Méthodes temps –fréquence

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

e)- Méthode temps-échelle

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

I.8 PARAMETRES INDECATEURS DE DEFAUT

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

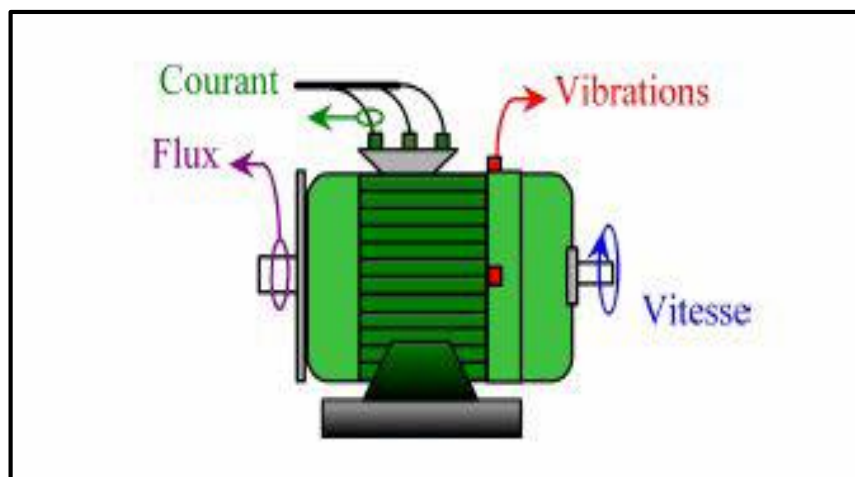


Figure I.4. Les mesures utilisées pour la surveillance et le diagnostic des machines asynchrones

1.8.1 Le flux magnétique axial de fuite

Les circuits électriques et magnétiques de la machine ne sont jamais parfaits à causes des tolérances et des défauts de fabrication parmi d'autres, et présentent souvent quelques degrés d'asymétrie permettant la génération des flux de fuite dont le contenu spectral est lié directement aux harmoniques contenus dans les courants statoriques et rotoriques. [GHO 05]

1.8.2 Le courant statorique

Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace).[SAM 12]

1.8.3 Les vibrations

Le diagnostic par l'analyse vibratoire fait partie des techniques mécaniques qui sont employées pour déceler des défauts au niveau des machines électriques. Une vibration est souvent accompagnée d'un bruit sonore qui peut être élevé même pour des faibles amplitudes de vibration. Le diagnostic des défauts en utilisant l'analyse vibratoire est la méthode la plus connue dans la pratique [GHO 05]. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [SAH 10].

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la Fmm et de la perméance (P), la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques, rotoriques et l'excentricité). Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode [SAH 10].

1.8.4 Le couple

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient major de cette méthode [SAH 10].

1.8.5 La température

Grâce à des dispositifs à infrarouge, on perçoit les zones chaudes dont les températures dépassent les températures limites prédéterminées. Pour ce faire, un balayage systématique de l'ensemble de l'installation électrique, et notamment du moteur asynchrone, est effectué. Les systèmes examinés étant en fonctionnement, les éléments qui composent l'installation électrique sont en charge normale. En fait, ils vont nous apparaître, sur l'image infrarouge plus ou moins rayonnant suivant leur rôle, leur conception, leur charge et leur matériau. L'opérateur fait la part des choses entre les températures normales de fonctionnement et les anomalies [GHO 05]

I.9 SIGNATURES SPECTRALES POUR REVELER LE DEFAUT

I.9.1 Les harmoniques de la fmm dans la machine asynchrone

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

En réalité, l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est fonction de différents paramètres, tel que les composantes fréquentielles apparaissent dans les tensions d'alimentation ces composantes dites harmoniques de temps et la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage. A cause de cette structure, Il a été démontré qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique d'autres harmoniques dites harmoniques d'espace (harmoniques d'encoches rotoriques) ayant pour fréquences [GHO 05].

$$f_{he} = \left[\frac{kN_b}{p} (1-g) \pm n_{os} \right] \cdot f_s \quad (\text{I.1})$$

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

I.9.2 Les signatures spectrales pour révéler les défauts

I.9.2.1 Les défauts statoriques

Pour déceler les défauts de court-circuit, plusieurs approches ont été mises en œuvre, à savoir l'utilisation d'une bobine concentrique placée autour de l'arbre de la machine afin de capter puis analyser le flux axial de la machine. Ce type de défauts entraîne l'apparition d'une série d'harmoniques dans le spectre du flux axial donnée par [GHO 05 , PEN 94] :

$$f_{st} = f_s \cdot \left(k \pm \frac{n(1-g)}{p} \right) \quad (\text{I.2})$$

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

Le diagnostic des courts-circuits statoriques peut être effectué via la MCSA, et est basé sur la détection des composantes fréquentielles données par l'expression (I.2), du fait que cette onde de flux tournant sera l'origine des composantes de courant équivalentes dans l'enroulement statorique [GHO 05, THO 01].

Les harmoniques 150Hz, 250Hz...apparaissent en cas de court-circuit entre spires, mais sont souvent présents à cause de la saturation et de n'importe quel défaut susceptible d'entraîner un déséquilibre d'impédance, tel que le déséquilibre de tension. Aussi, il a été démontré que les harmoniques d'encoches rotoriques et de saturation subissent des variations en cas de défauts statoriques [GHO 05].

I.9.2.2 Les défauts des barres rotoriques

Un défaut dans le rotor va engendrer une sorte d'asymétrie qui, dans le cas d'une alimentation par un système de tensions triphasées symétrique, va être à l'origine d'un champ

magnétique inverse de fréquence $-gf_s$ dans le circuit rotorique. Cela va engendrer des courants circulant dans le circuit statorique à une fréquence de $(1-2g)f_s$. Une autre composante apparaît aussi dans le spectre du courant statorique à une fréquence de $(1+2g)f_s$. Cette composante est due aux fluctuations de la vitesse provoquées par les oscillations du couple [THO 01, DOR 96]. Il a été démontré qu'un processus répétitif donne naissance à une série d'harmoniques dont les fréquences sont données par :

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

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

D'autres composantes spectrales peuvent apparaître dans le spectre du courant statorique à des fréquences données par l'expression suivante [BEB 99] :

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

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

Les défauts de cassure de barres génèrent également dans les signaux du couple et de vitesse des composantes de fréquences $2gf_s$ et $4gf_s \dots$ [THO 01].

I.8.2.3 Les défauts d'excentricité

L'excentricité se répartit en deux catégories : statique et dynamique (voir la figure.I.3). L'excentricité statique se distingue par le fait que le centre du rotor n'est pas égal à celui du stator. L'excentricité dynamique est caractérisée par le fait que le centre du rotor tourne autour du centre du stator [KHO 07].

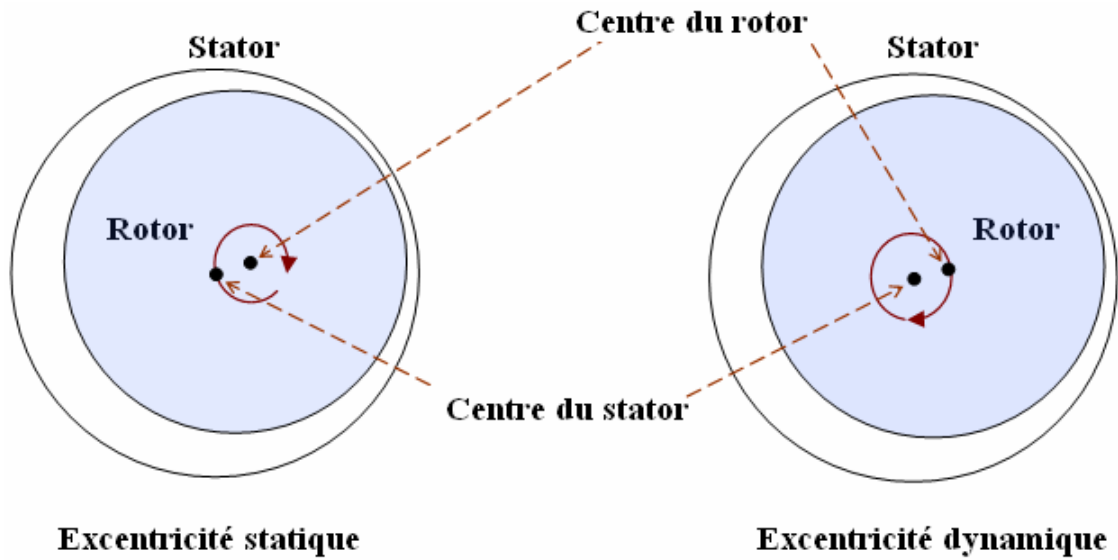


Figure 1.5. Défaut de l'excentricité du rotor

Même à l'état sain, la machine présente toujours un certain degré d'excentricité statique résiduelle dû aux inévitables erreurs de fabrication [KHO 05]. La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant à des fréquences f_{ecc} données par [SAM 12] :

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

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

Une autre série d'harmoniques liés à la coexistence des deux types d'excentricité en même temps (excentricité mixte), apparaît de part et d'autre de la fondamentale à des fréquences données par [1,23] :

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

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

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

I.8.2.4 Les défauts de roulements

Parce que les éléments roulants du roulement supportent le rotor, quelque soient les défauts dans les roulements, ils vont produire des mouvements radiales entre le rotor et le stator dans la machine. Par conséquent, des variations d'entrefer génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [GHO 05, BEN 99] :

$$f_{roul} = |f_s - kf_v| \quad (I.7)$$

Avec $k=1,2,\dots$ et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations, soit f_{bille} , $f_{b.int}$ ou $f_{b.ext}$ (figure I.4).

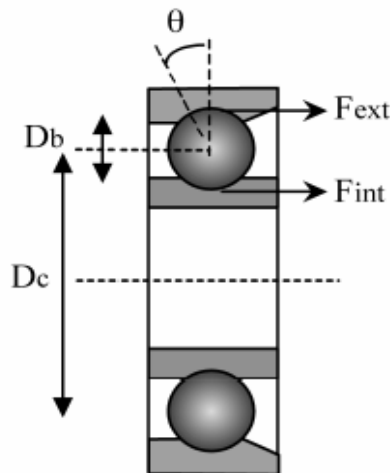


Figure I.6. Dimension du roulement à billes

a) -Défaut au niveau d'une bille :

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

b) -Défaut sur la bague intérieure :

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

c) -Défaut sur la bague extérieure :

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

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

I.9 CONCLUSION

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, nous nous sommes attardés sur une synthèse de différentes méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone en présence de défauts. En affectant à chaque défaut une signature spectrale qui lui est propre, la méthode de l'analyse des courants connue sous l'abréviation MCSA constitue un moyen performant susceptible de prévoir un défaut majeur et contribuant ainsi à promouvoir ce qui est appelé actuellement 'la maintenance prédictive' ou 'proactive'.

Il est également intéressant de remarquer que les modes de défaillances précédemment présentés impliquent toujours une modification de la topologie de la machine, pour ce faire, le développement d'un modèle dynamique, flexible et prenant en considération la topologie de la machine a dû être envisagée. Sa description fait l'objet du chapitre suivant.

II.1 INTRODUCTION

Il y a quelques années, les programmes de simulation faisaient intervenir la transformation de Clarke ou celle de Park pour pouvoir effectuer une simulation de la machine asynchrone dans un temps relativement court. A ce jour, grâce à l'évolution des technologies informatiques et des processeurs en particulier, nous pouvons passer de ces transformations, ce qui permet dans le cas de la machine asynchrone à cage d'écureuil, de calculer tous les courants de barres rotoriques et d'anneaux de court-circuit [DED 04].

En effet, Pour étudier ces machines à induction et développer un modèle qui tient compte de la structure du rotor on fait appel soit à la théorie du champ électromagnétique (équations de Maxwell), ou à la théorie des circuits électriques (lois de Kirchhoff); ou bien à la méthode mixte combinant la théorie du champ électromagnétique et la théorie des circuits électriques [KHO 07].

Parmi les méthodes qui sont basées sur la théorie du champ électromagnétique on trouve la méthode des éléments finis. Cette dernière sera notre outil pour élaborer un modèle qui tient compte de la topologie, des dimensions ainsi que de la composition de la machine asynchrone.

Cette méthode est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation 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 et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul d'où une grande souplesse d'utilisation [SAM 12].

II.2 LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

II.2.1 Formulations

Considérons un certain domaine (Ω) dans lequel un champ A , scalaire ou vectoriel, est la solution de l'équation aux dérivées partielles suivante [SAM 12] :

$$D(A) = F \tag{II.1}$$

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

Pour spécifier entièrement le champ A , il faut tenir compte des conditions aux limites Γ du domaine (Ω)

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

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

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

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

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

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

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

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 : [SAM 12]

- Les relations de couplage électromagnétique :

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

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

- Les relations de la conservation des flux :

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

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.8})$$

- La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

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

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

- La relation de la loi d'Ohm :

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

Où

\vec{H} : Champ magnétique (A/m)

\vec{E} : Champ électrique (V/m)

\vec{B} : Induction magnétique (T)

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

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

μ : Perméabilité magnétique (H/m)

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

II.2.2 Le modèle employé

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

- **Le mode magnétostatique**

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans 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 :

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

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

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

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

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

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

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

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

où

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

- **Le mode magnétodynamique**

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

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

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

- **Le mode magnétique transitoire**

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

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

II.3 LE PRINCIPE DE LA MEF

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, Le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être approchée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), dont l'expression varie d'un type à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurées la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [SAM 12].

Pour un élément triangulaire on a :

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

Pour les éléments quadrilatéraux on a:

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

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 :

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

e : Numéro d'élément.

n_e : 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 (Figure. II.1).

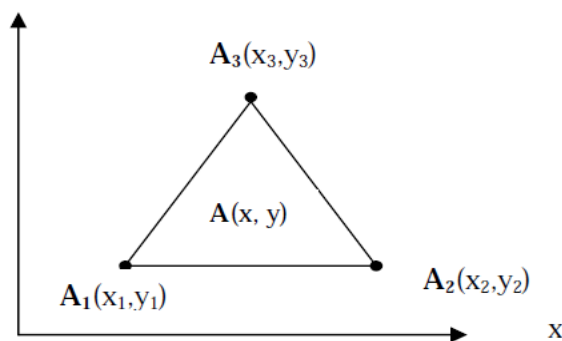


Figure II.1 Fonction d'interpolation d'un élément.

II.4 PRESENTATION DU LOGICIEL FLUX2D

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

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

_ (**geometry & physics**) ; permet de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier, de déterminer le type du problème (magnétostatique, magnétodynamique ou transitoire) et associer des matériaux et des propriétés (magnétiques et électriques) à chaque élément de la géométrie.

_ (**Circuit**) définit le schéma et les données du circuit électrique.

_ (**Materials database**) permet de choisir et de construire une banque de matériaux.

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

- Module **Solving Process**

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

- Module **Analysis**

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc.

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

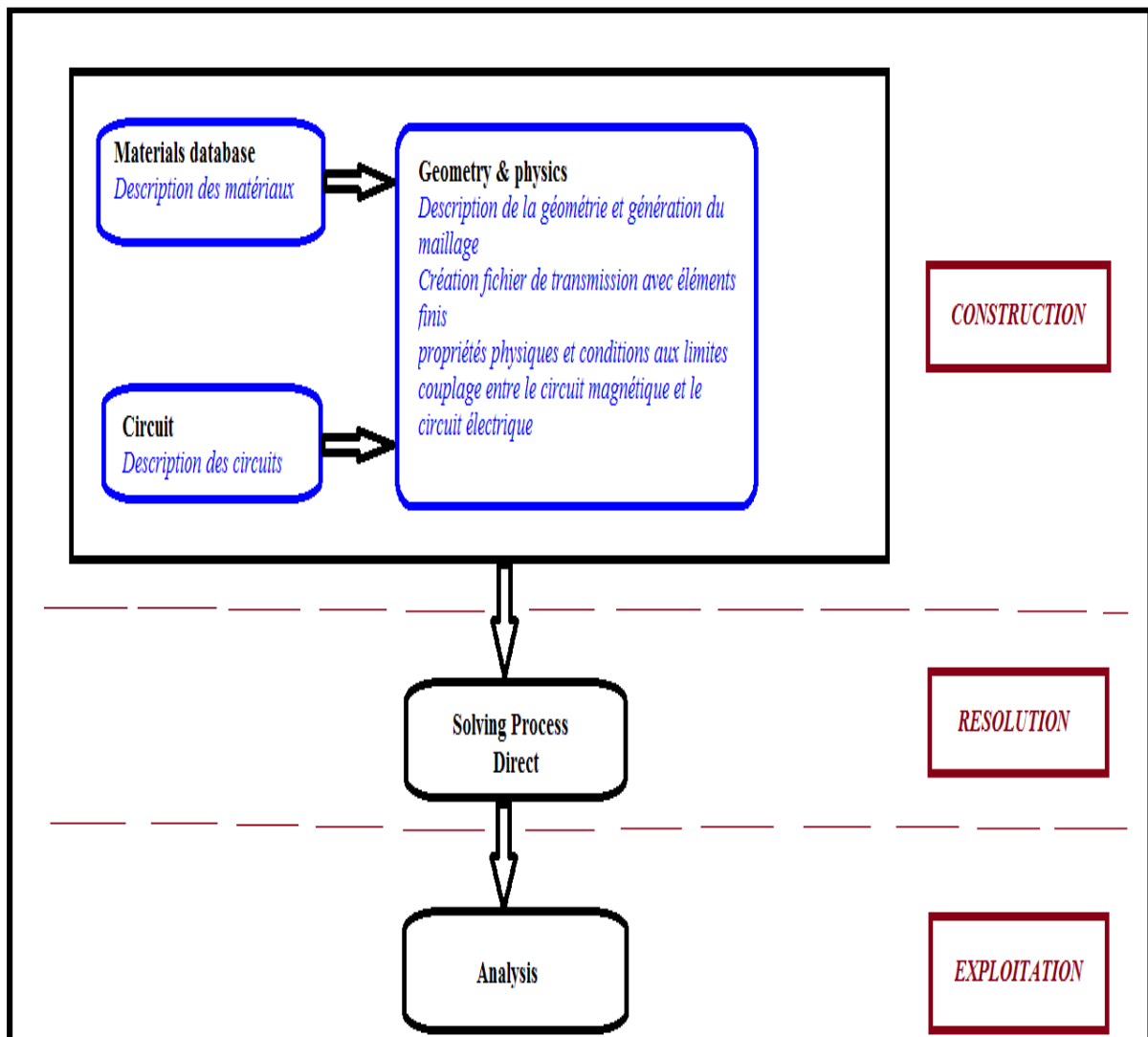


Figure II.2 L'enchaînement des programmes de Flux 2D.

II.5 CONSTRUCTION DU MODELE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

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

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

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

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

II.5.1 Les données de la machine étudiée

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

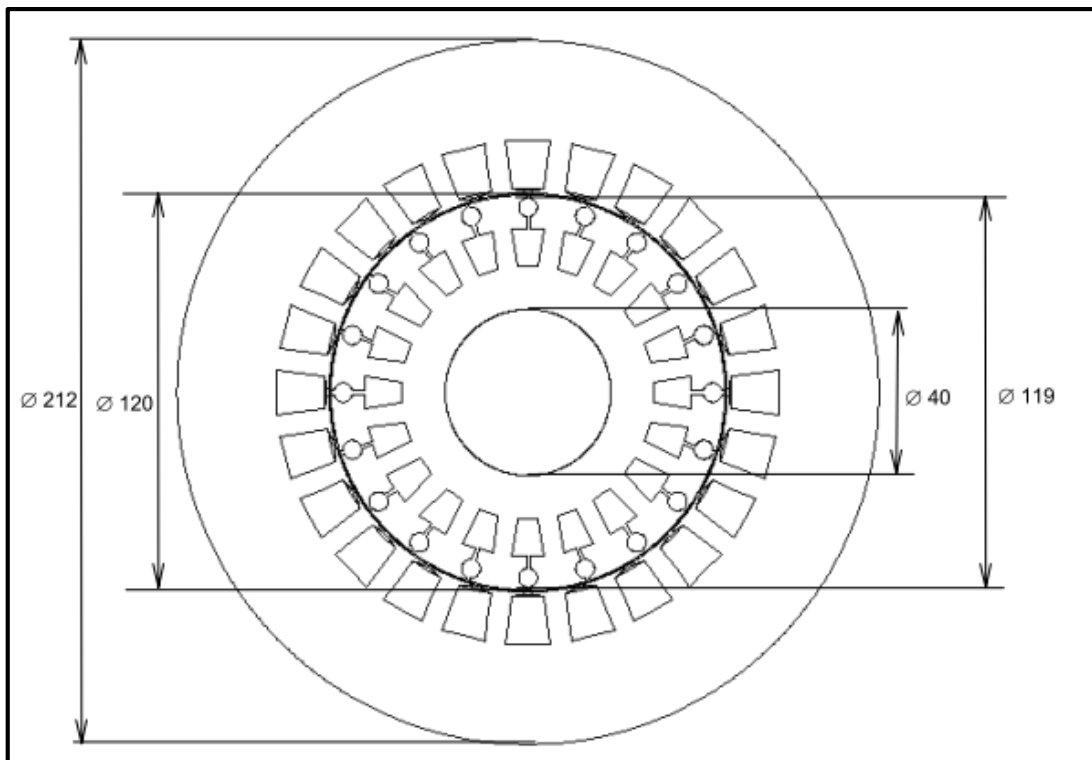


Figure II.3 Les dimensions de la machine.

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

Tableau II.1. Les caractéristiques de la machine.

Paramètres		Valeurs
MACHINE	Puissance	7.5kW
	Tension nominal	380V
	Fréquence	50Hz
	Nombre de paires de pôles	2
STATOR	Nombre d'encoches	24
	Diamètre extérieur	212mm
	Diamètre intérieur	120mm
	Résistance par phase	9.5Ω
ROTOR	Nombre d'encoches	20
	Diamètre extérieur	119mm
	Diamètre intérieur	40mm
ENTREFER	Épaisseur	0.5mm

La figure II.4 illustre la répartition du bobinage dans les encoches statoriques, qui a $w_1=208$ tours par encoche.

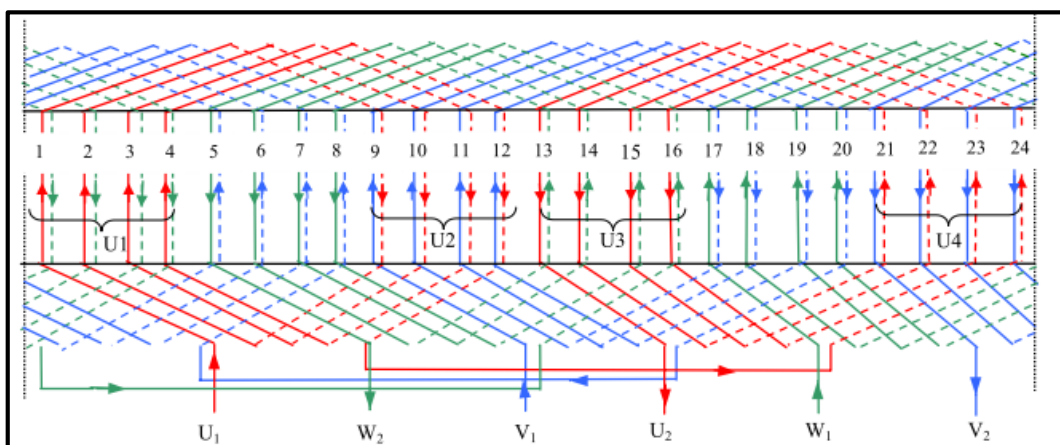


Figure II.4 Bobinage statorique.

La figure II.5 présente le circuit magnétique de la machine asynchrone et la répartition de ces trois phases d'alimentation sur les encoches statoriques.

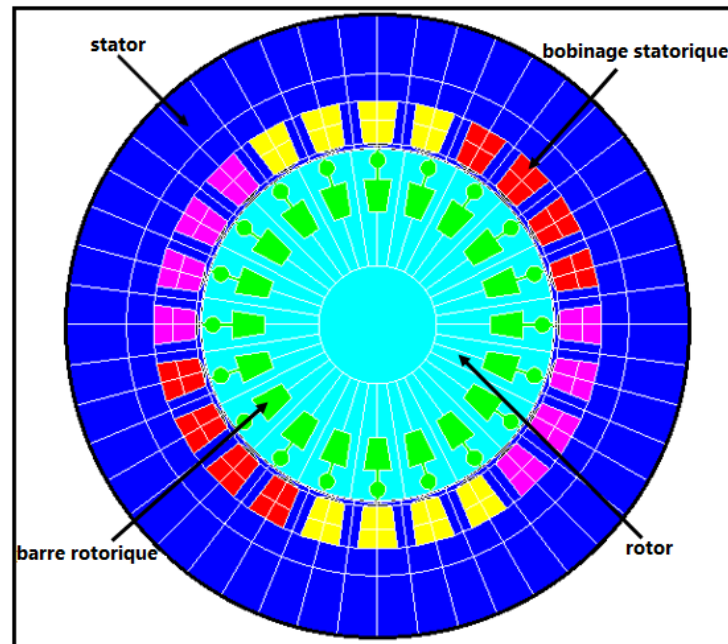


Figure II.5 Circuit magnétique de la MAS.

II.5.2 Procédure de construction du modèle par FLUX2D

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

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

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

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

Génération du maillage

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

Le tableau suivant présente la taille des éléments qu'on a choisis :

Tableau II.2 la taille des éléments du maillage

Les points de maillage	La taille	Associés à
MRID	40mm	Diamètre intérieur du rotor
MRBOT	2mm	bas des barres
MRTOP	1.2mm	Têtes des barres
MAIRGAP	0.5mm	Deux limites de l'entrefer
MSTOP	2mm	Têtes des encoches
MSOD	8mm	Diamètre extérieur du stator

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

La figure ci-dessous présente la géométrie avec les points du maillage.

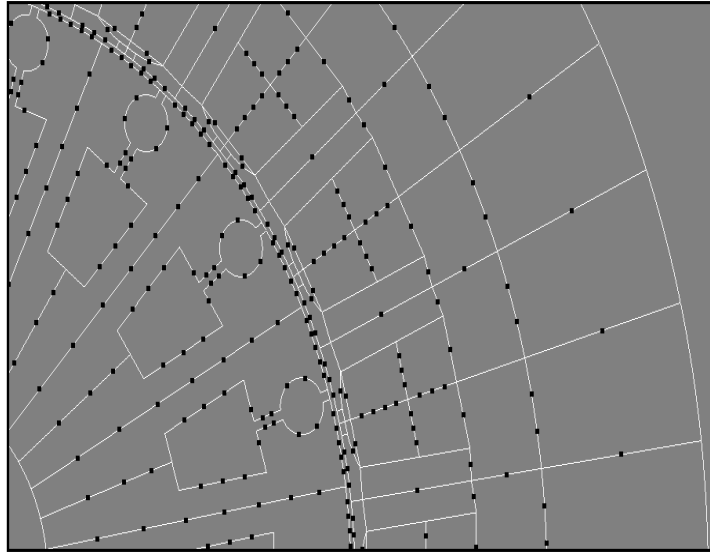


Figure II.6 Les points de maillage.

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

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

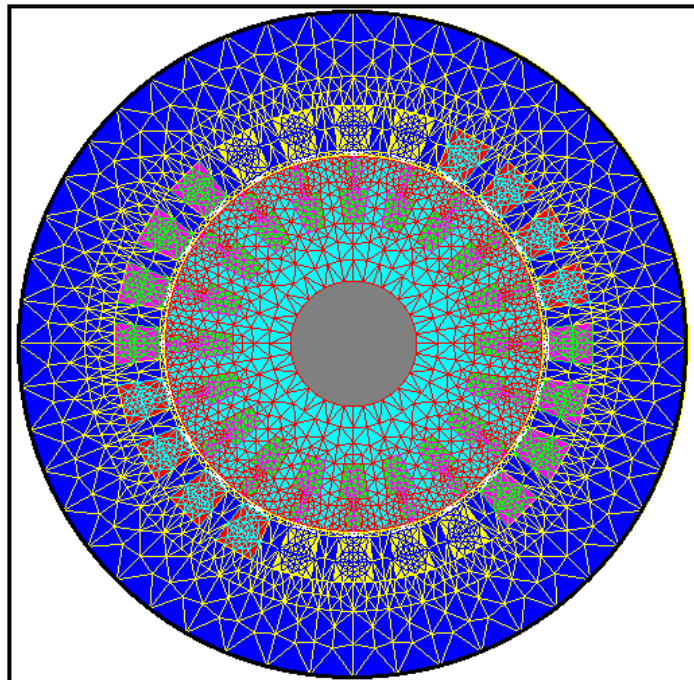


Figure II.7 Répartition du maillage.

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger le temps de calcul sans perte sensible d'information. La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre, lors de nos simulations nous appliquons la condition de Dirichlet sur tout le contour de la machine avec un potentiel vecteur nul [SAM 12].

Création des matériaux

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

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

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

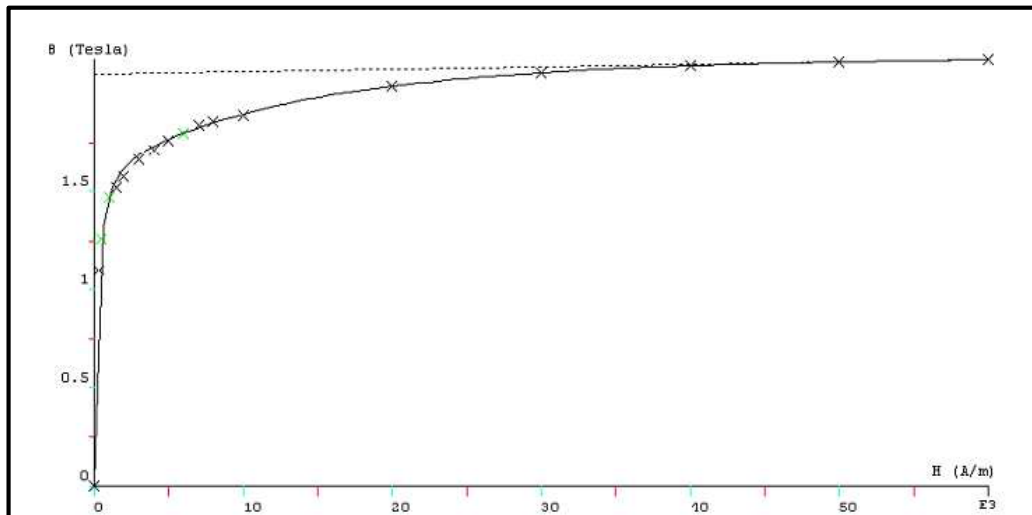


Figure II.8 La courbe d'aimantation $B(H)$ du matériau ferromagnétique.

Le circuit électrique

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

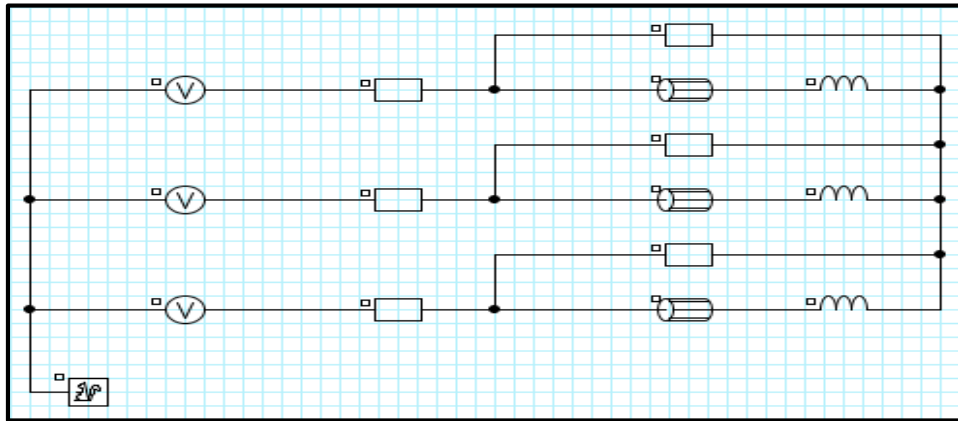


Figure II.9 Le circuit électrique d'alimentation.

Q1 : est un macro-circuit (un dispositif du logiciel Flux 2D) utilisé pour modéliser la cage d'écureuil de la machine, c'est un circuit fermé qui contient des barres rotorique, des résistances et des inductances de fuite correspondent aux régions d'inter-barre d'anneaux de court-circuit (arcs entre deux barres adjacentes), figure II.10. V_a , V_b et V_c sont les sources de tension d'alimentation (voir figure II.11). Ba1, Ba2,Bc4 représentant le bobinage statorique. Ra, Rb, et Rc sont les résistances de chute de tension dans le réseau. Rsa, Rsb, et Rsc représentent les résistances des voltmètres pour mesurer les tensions statoriques. La, Lb et Lc sont les Inductances de fuite des têtes de bobines, elles sont calculées analytiquement.

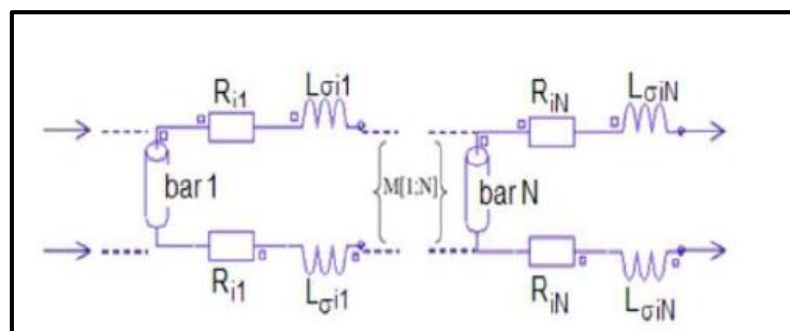


Figure II.10. Circuit équivalent de la cage rotorique.

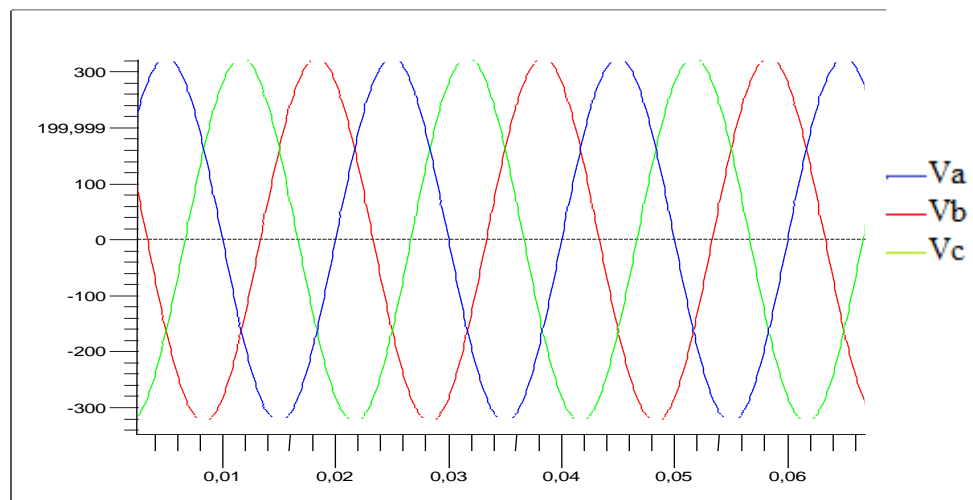


Figure II.11. Les tensions d'alimentation V_a , V_b et V_c .

Les propriétés physiques et régions

Le problème étant défini par une application magnétique de 2D en magnéto-transitoire (pas à pas dans le temps), auquel, le circuit électrique et les matériaux créés précédemment sont importés. Les valeurs des résistances, des inductances, et des tensions d'alimentation, sont définies aussi ici. La prise en considération de mouvement (soit rotation ou translation) nécessite l'existence des ensembles mécaniques, ces derniers sont de trois types :

Fixé : définit les parties fixes du modèle.

En mouvement : définit les parties du modèle qui sont en mouvement.

Compressible : définit les régions entre les parties fixes et celles en mouvement.

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

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

La rotation est réalisée par la considération d'une bande de mouvement. A chaque instant le rotor est déplacé par un certain angle. La seule partie de la géométrie qui sera remaillé est la

bande de mouvement qui couple les éléments du rotor avec ceux de stator. Dans notre cas la bande de mouvement est constituée par la région de l'entrefer.

II.6 CONCLUSION

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

A la fin de ce chapitre on a cité la méthode de réalisation de ce modèle et du couplage de circuit magnétique avec le circuit électrique extérieur d'alimentation.

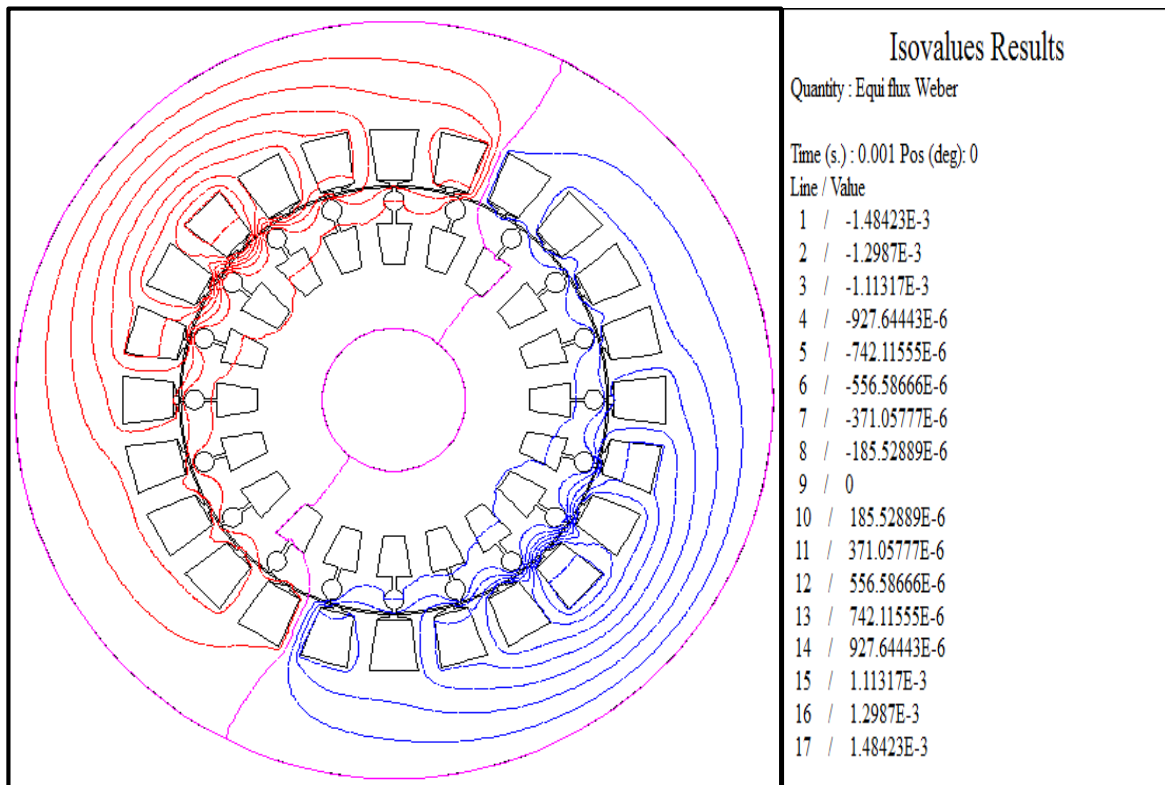
III.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré au traitement du fonctionnement de la machine asynchrone à cage dans son état sain. Le mode qu'on a utilisé est le magnéto-transitoire (pas à pas dans le temps), Avec ce mode de simulation, le mouvement du rotor par rapport au stator est pris en considération. Premièrement, on va présenter la simulation du régime transitoire électrique de la machine asynchrone à une vitesse constante, puis nous introduisons l'équation mécanique pour calculer les régimes transitoires mécaniques à vide et en charge.

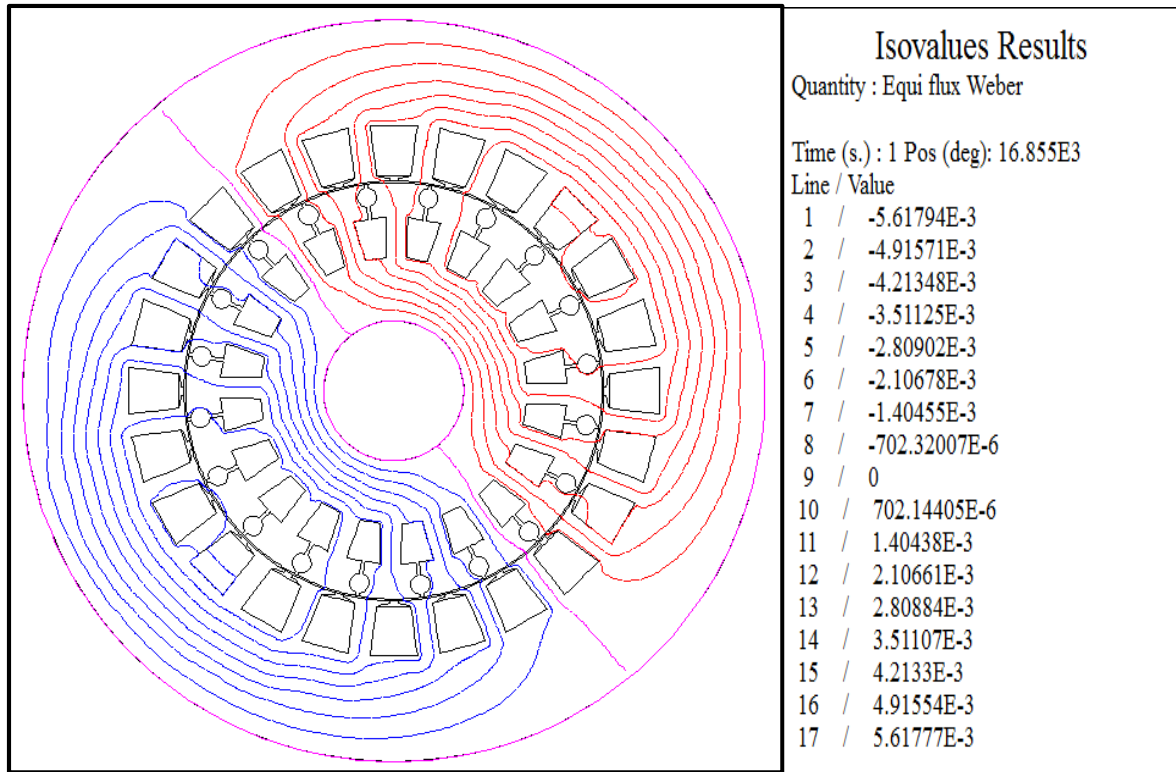
Dans la suite du chapitre, nous présentons l'analyse spectrale du courant statorique à l'aide de la transformée de Fourier rapide (FFT).

III.2. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A VIDE

A vide, sous la tension nominale de 380 V, nous avons présenté sur les Figures. III. 6a II.11, l'évolution des grandeurs locales (les lignes des équiflux, l'induction électromagnétique) et les grandeurs globales (Les courants, le couple électromagnétique, la vitesse).

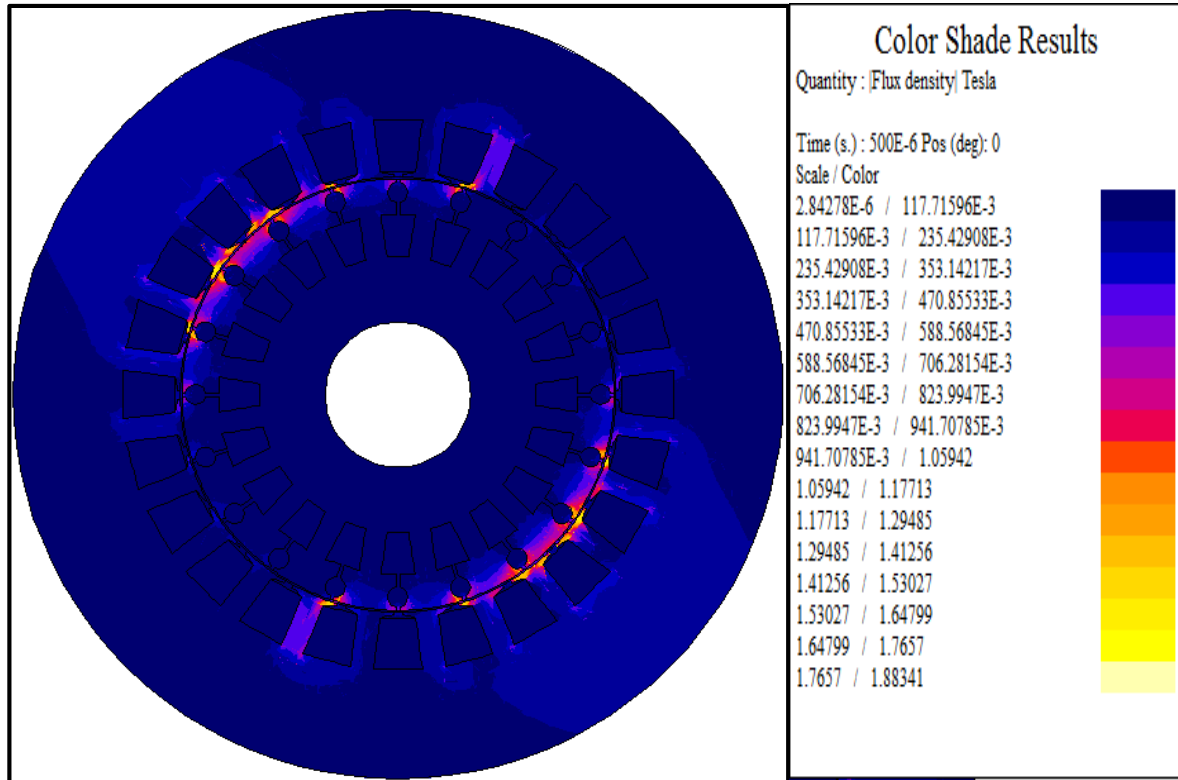


(a)

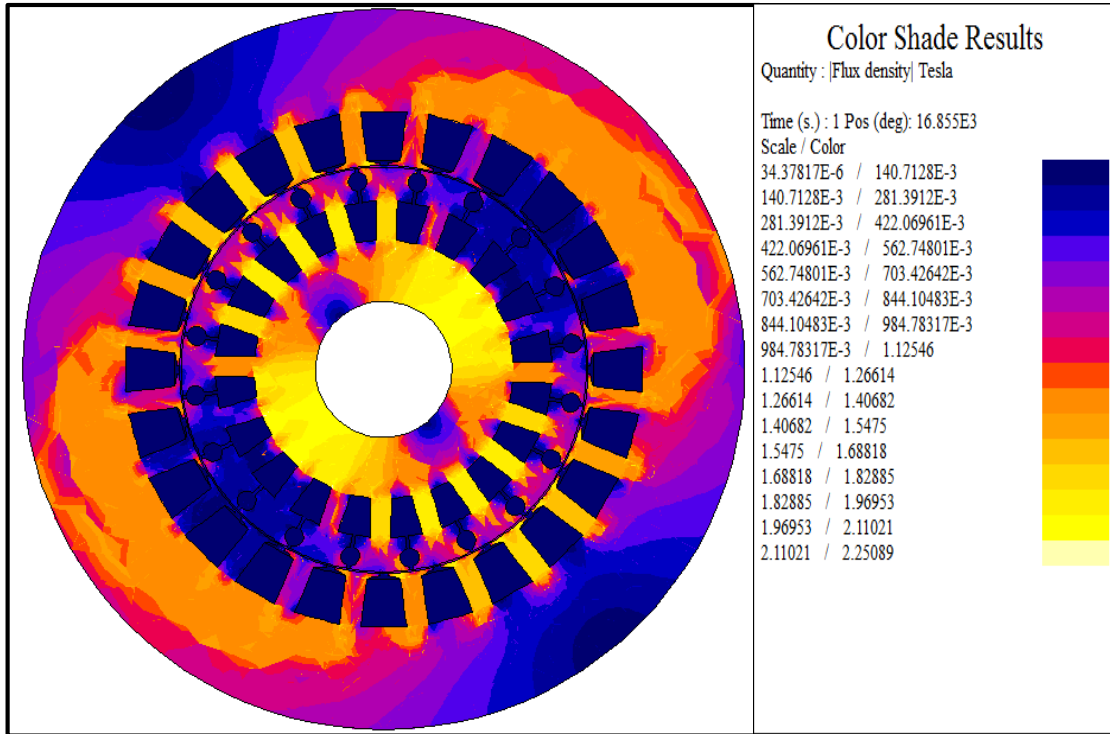


(b)

Figure III.1 la distribution des lignes du flux à vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent



(a)



(b)

Figure III.2 l'induction B à vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.

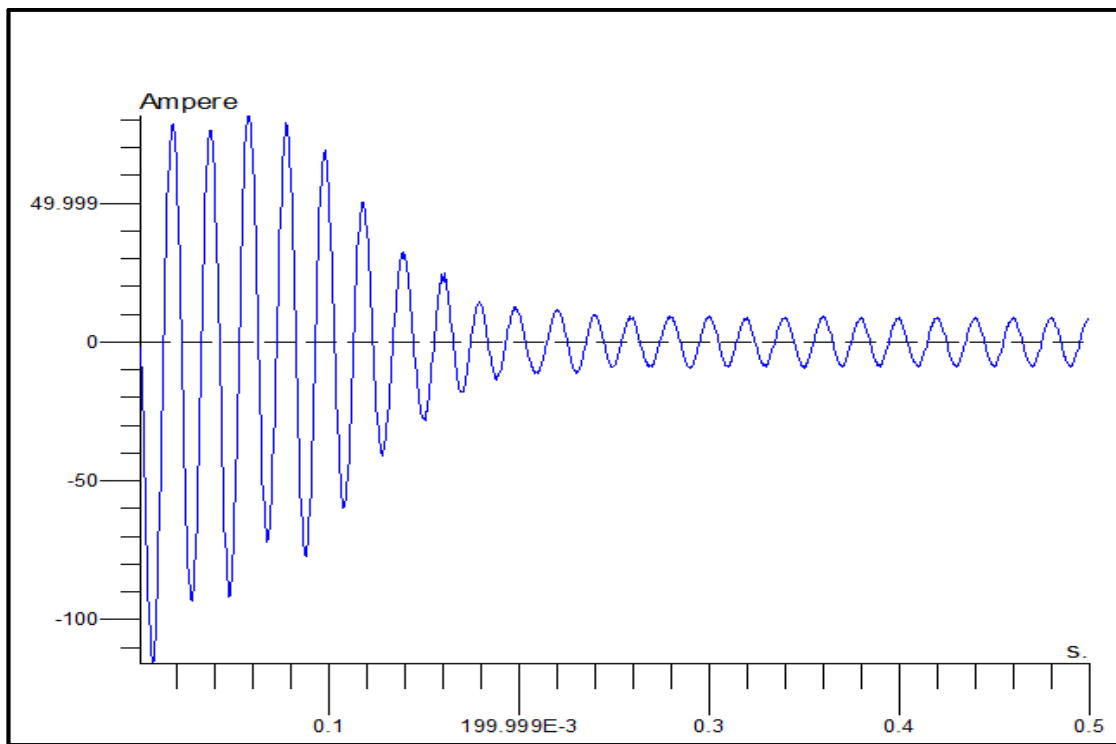


Figure III.3 le courant statorique de la phase à vide

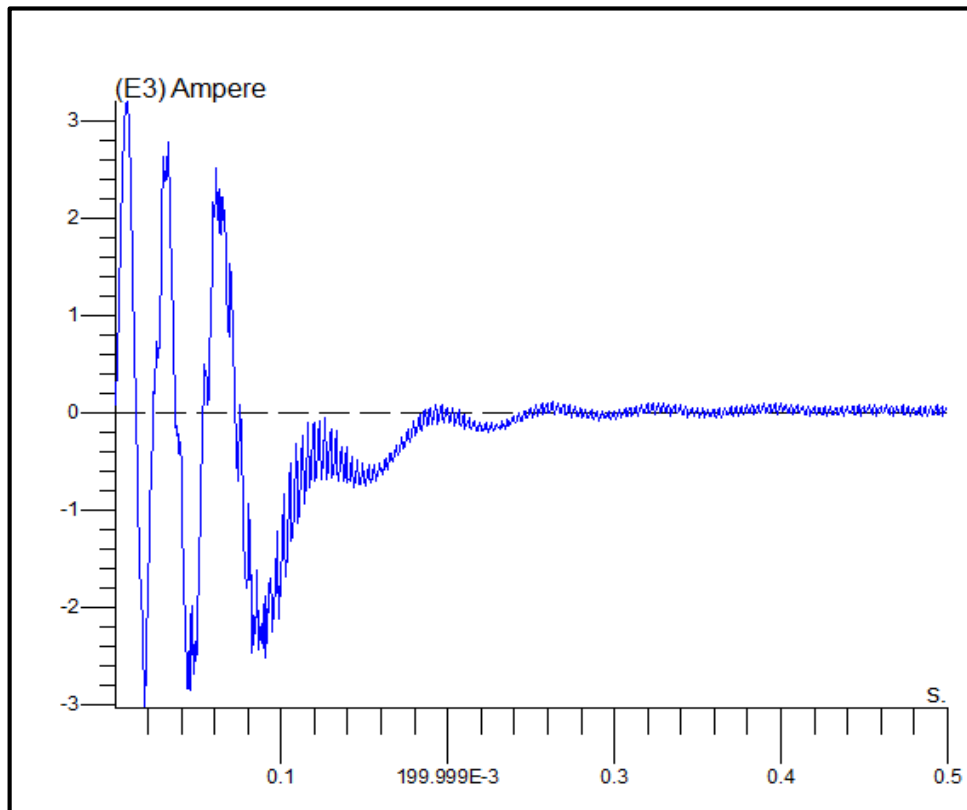


Figure III.4 le courant dans la barre rotorique 1 à vide

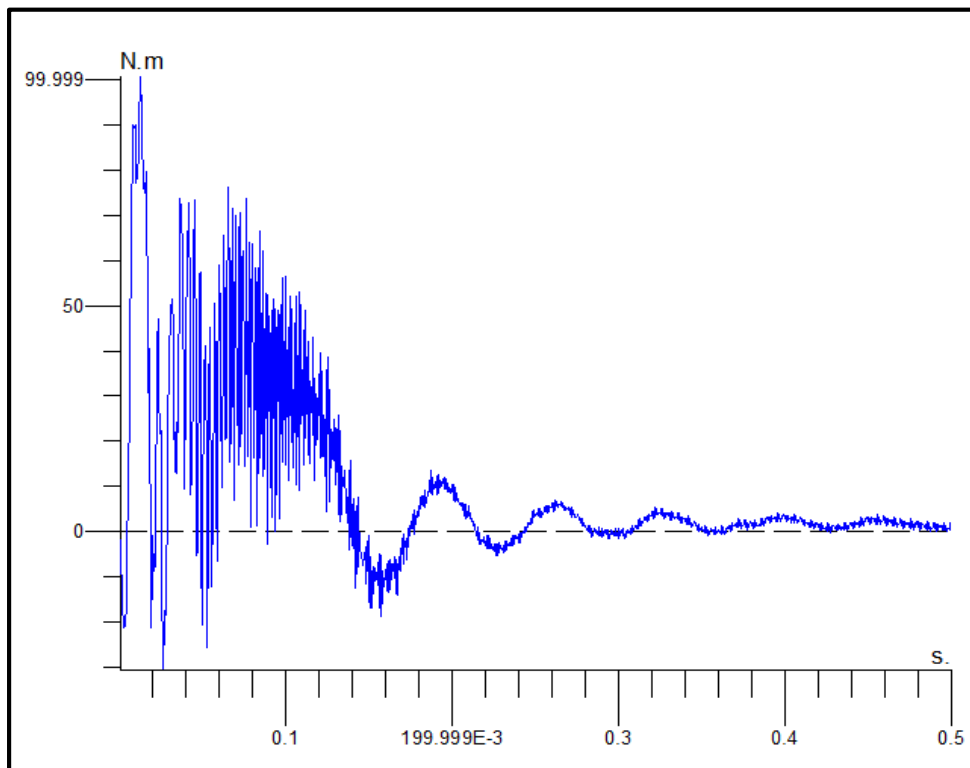


Figure III.5 le couple électromagnétique à vide

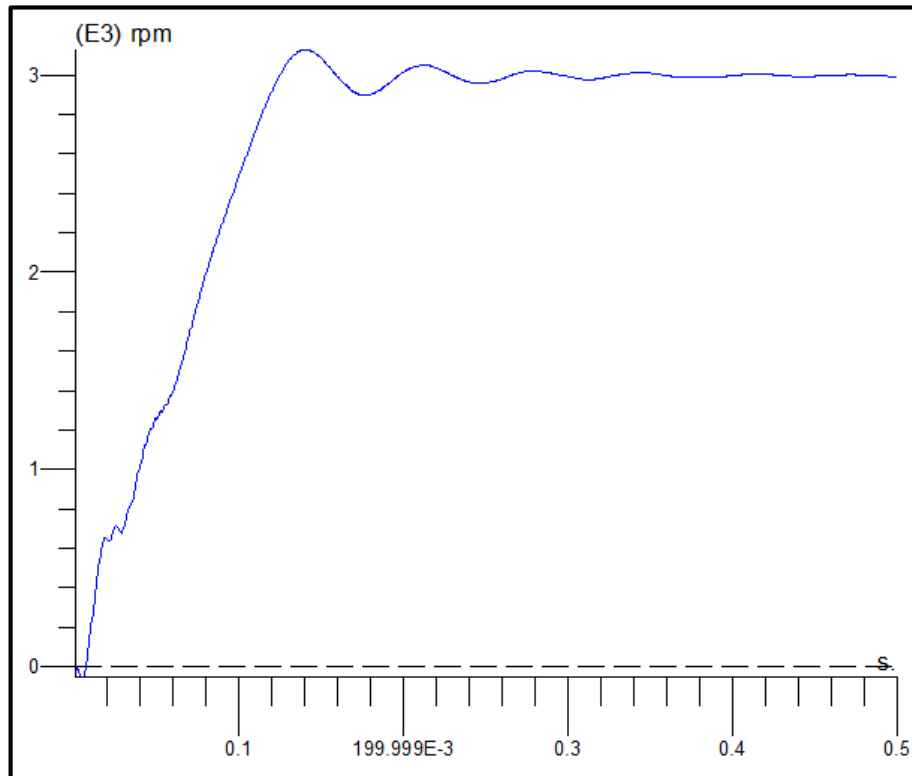
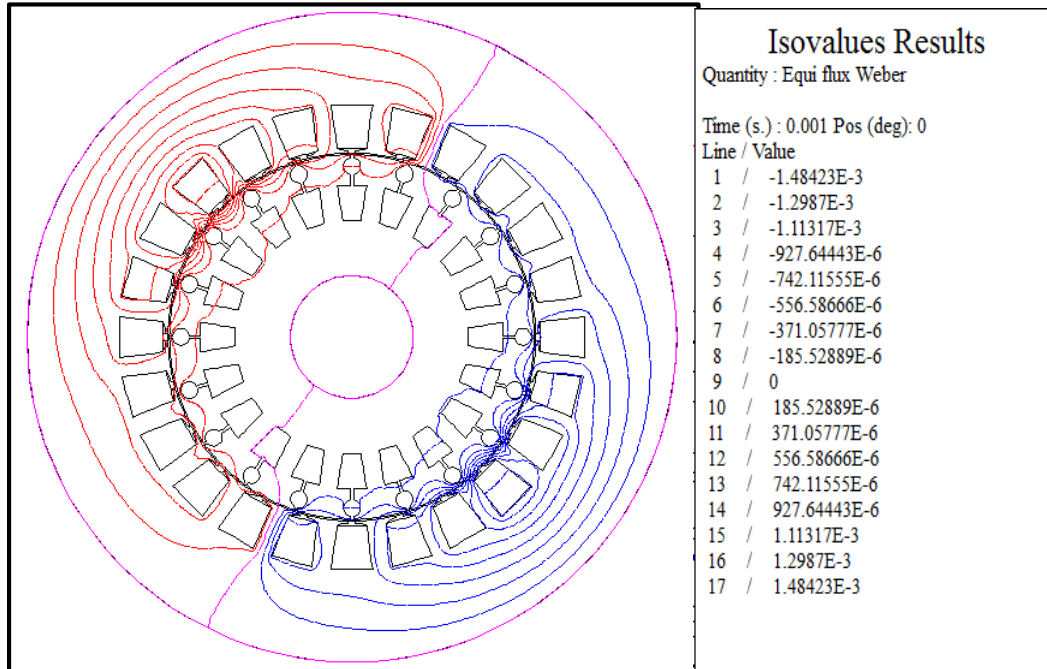


Figure III.6 vitesse de rotation à vide

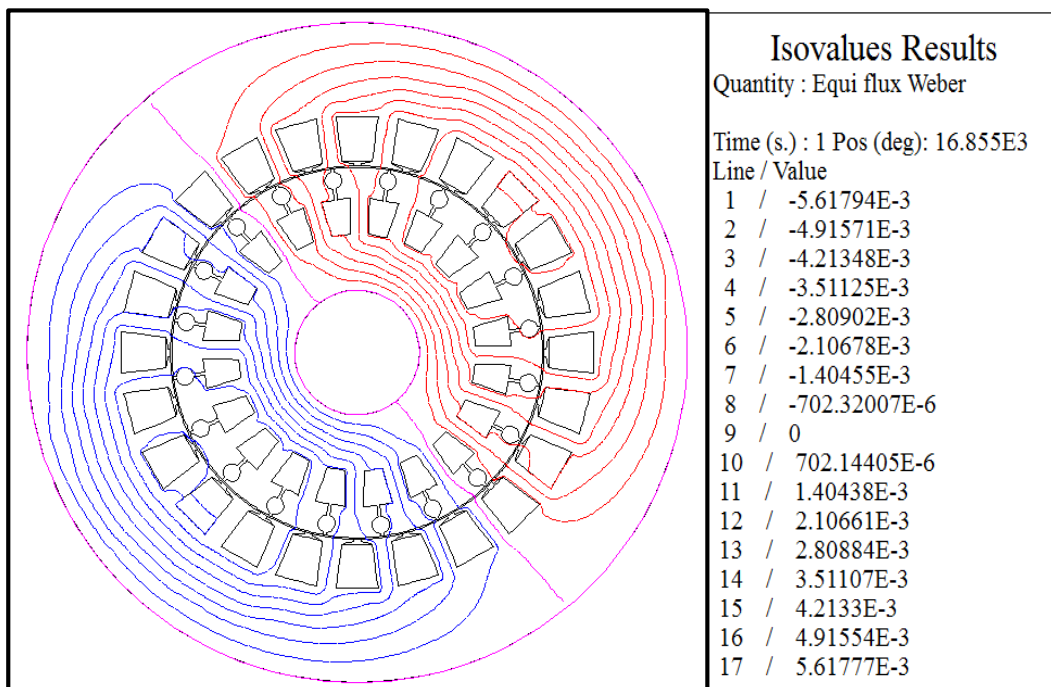
Après un régime transitoire d'environ 0.2s durant lequel la machine se magnétise, les courants au stator atteignent le régime permanent avec une valeur efficace de 6 A. Les trois courants de phase sont bien déphasés entre eux de 120° électriques, donc, nous retrouvons bien le comportement équilibré de la machine, Mais à une forme d'onde qui n'est pas tout à fait sinusoïdale. Cela est dû essentiellement à l'effet de la saturation de la machine. Le couple électromagnétique, à vide, est pratiquement nul en régime permanent. La vitesse atteint une valeur de 2997 tr/mn donc la machine fonctionne avec un glissement très faible qui égale à 0.2%.

III.3. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DE LA MAS EN CHARGE

Sous la même tension 380V, nous avons présenté sur les figures III.12 à III.17 les grandeurs locales et globales de la machine en charge.

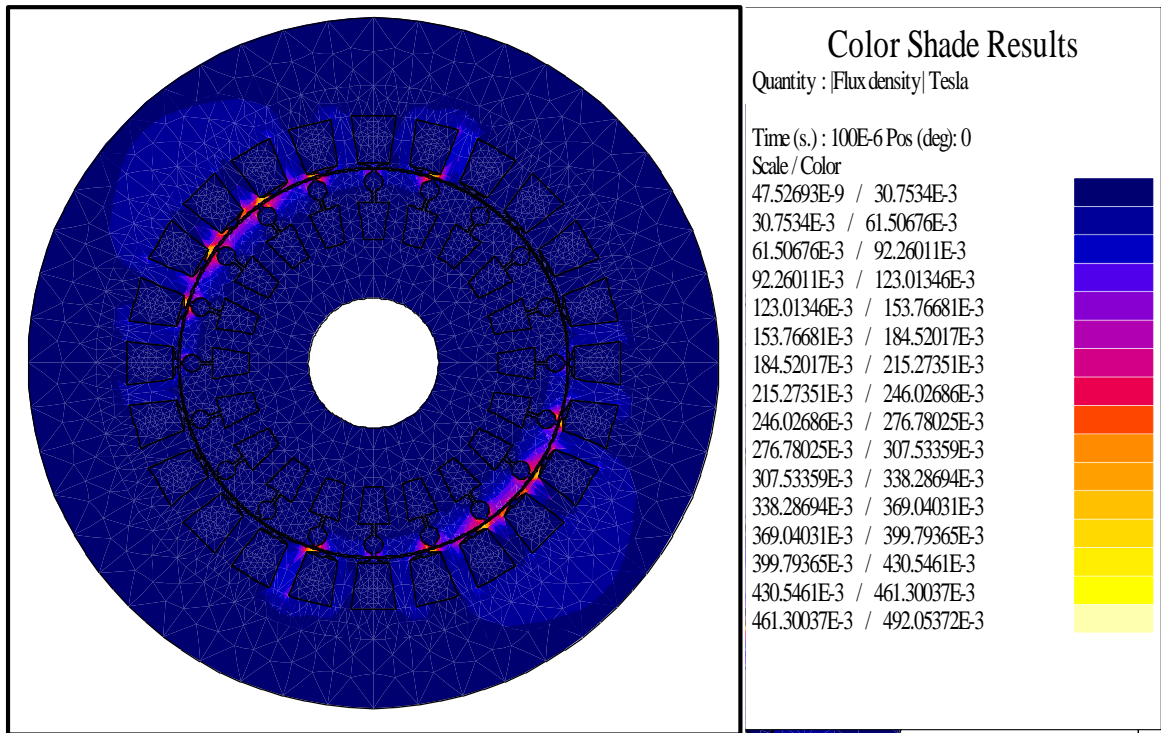


(a)

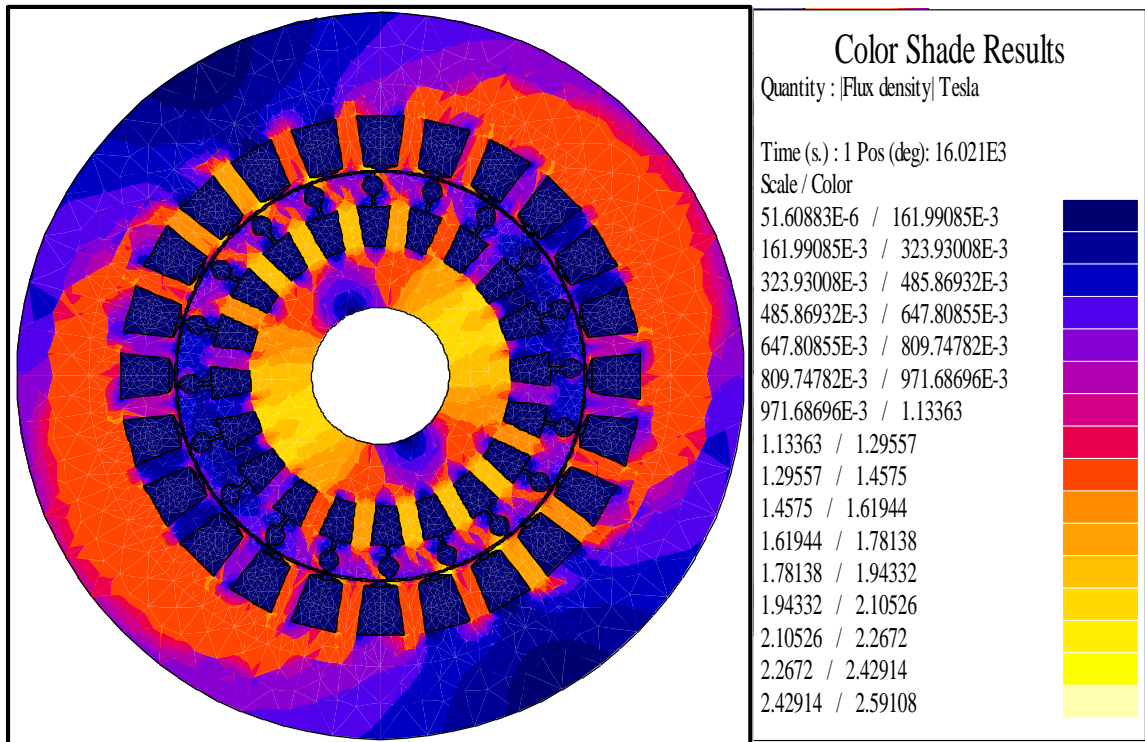


(b)

Figure III.7 la distribution des lignes du flux en charge au (a) démarrage ; (b) en régime permanent



(a)



(b)

Figure III.8 L'induction B en charge au démarrage (a) et en régime permanent (b)

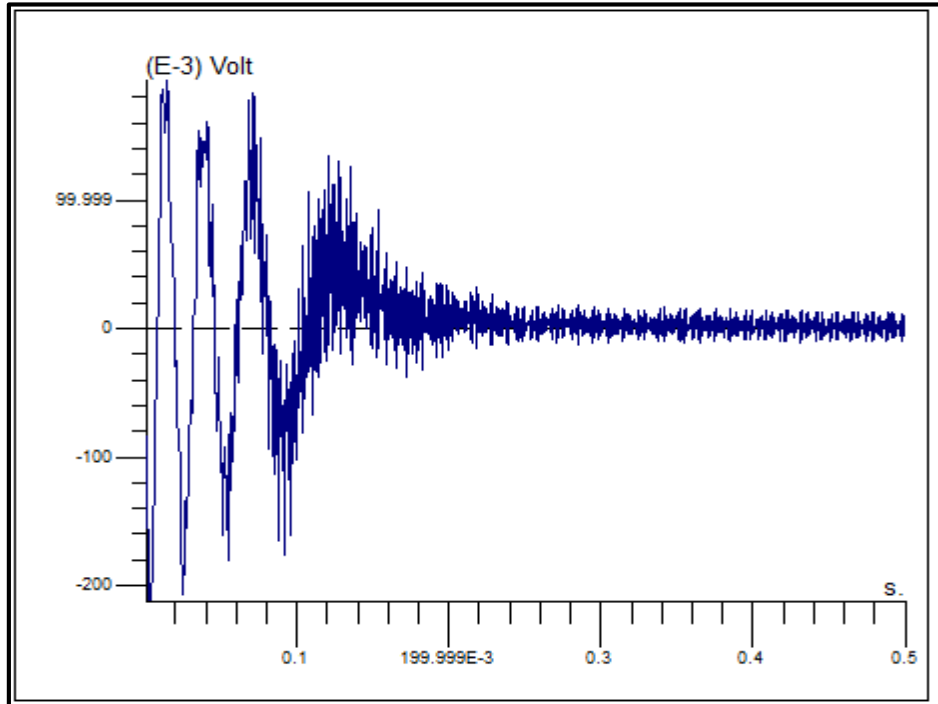


Figure III.9 le courant dans la barre 1 rotorique

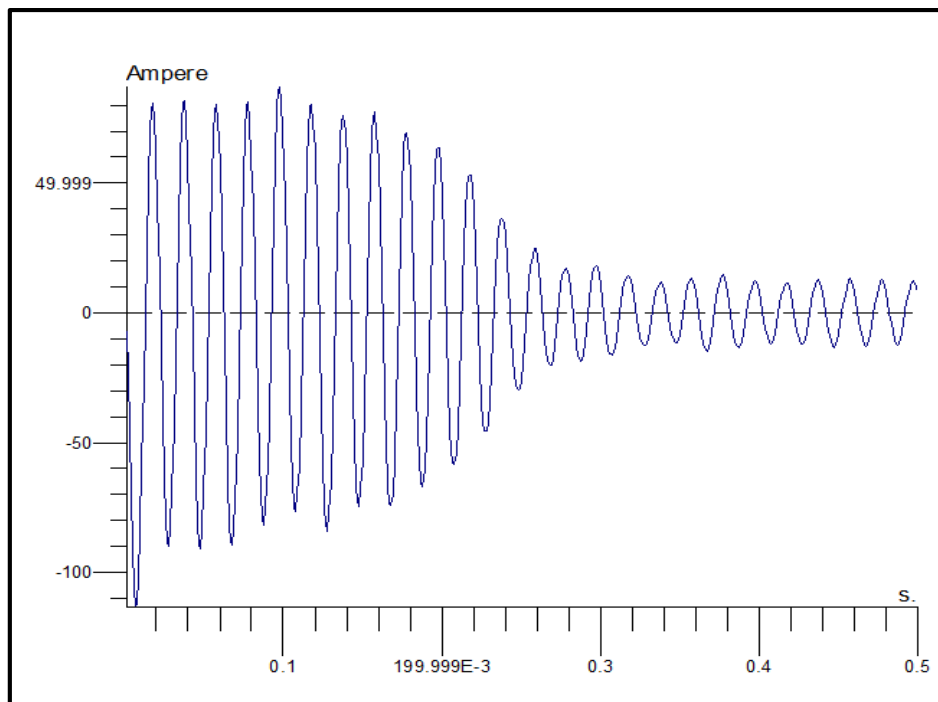


Figure III.10 le courant statorique de la phase A en charge

Après un régime transitoire d'environ 0.3s durant lequel la machine se magnétise, les courants au stator atteignent le régime permanent avec une valeur efficace de 10 A, le couple électromagnétique atteint sa valeur de 18 N.m avec des harmoniques de faibles amplitudes.

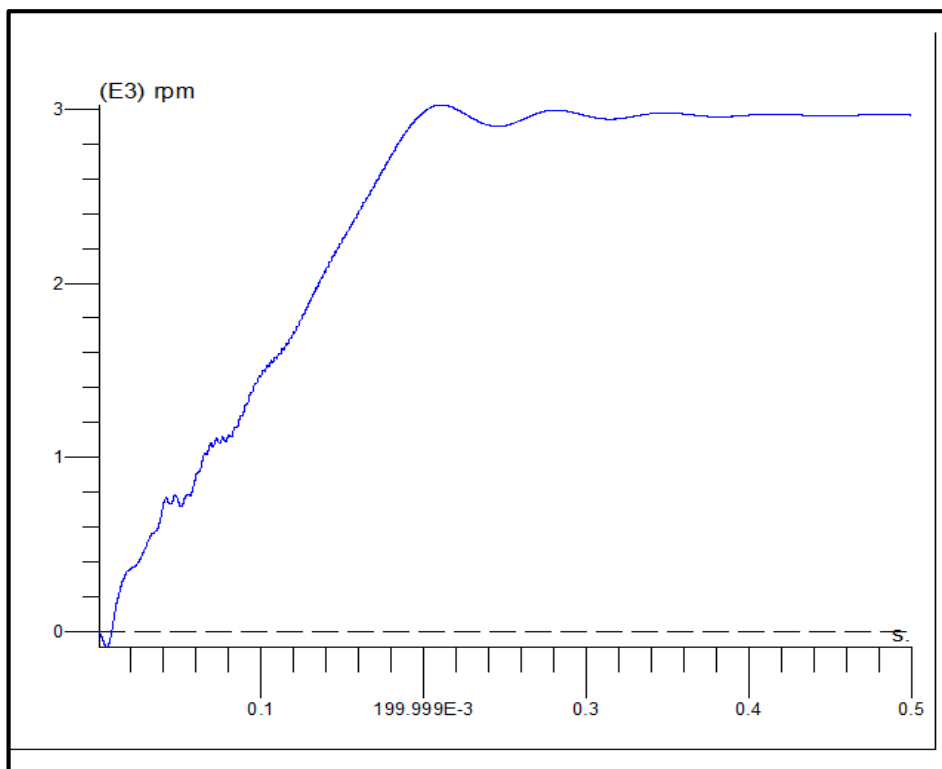


Figure III.11 la vitesse de rotation en charge

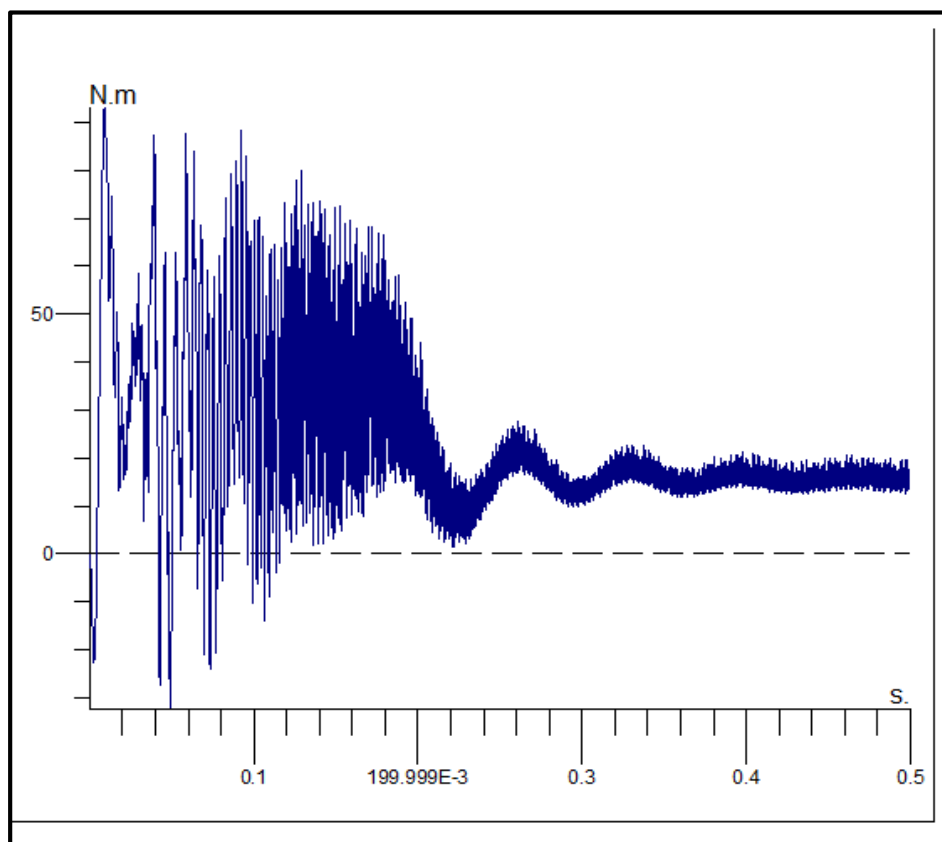


Figure III.12 le couple électromagnétique en charge

III.4. ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE

Il est bien connu que dans une machine asynchrone, on ne peut avoir directement accès aux mesures des grandeurs rotoriques. Ceci a conduit naturellement les chercheurs à mettre au point des méthodes consistant à isoler, analyser et si possible quantifier, l'influence des défauts rotoriques sur des grandeurs observables et mesurables de l'extérieur. Ces méthodes sont essentiellement au nombre de trois, qui concernent l'observation des harmoniques, de courants statoriques, de puissance consommée, ou encore de couple.

Seule la représentation fréquentielle du signal, donne des renseignements précieux sur sa composition. Pour mieux discerner les bandes latérales, il faudrait que l'acquisition du signal ainsi que son analyse, soient faite sous certaines conditions qui sont nécessaires. La résolution fréquentielle souhaitée est déterminée par la fréquence d'échantillonnage F_e ainsi que la durée de

l'acquisition (nombre des points N) $\Delta f = \frac{F_e}{N}$.

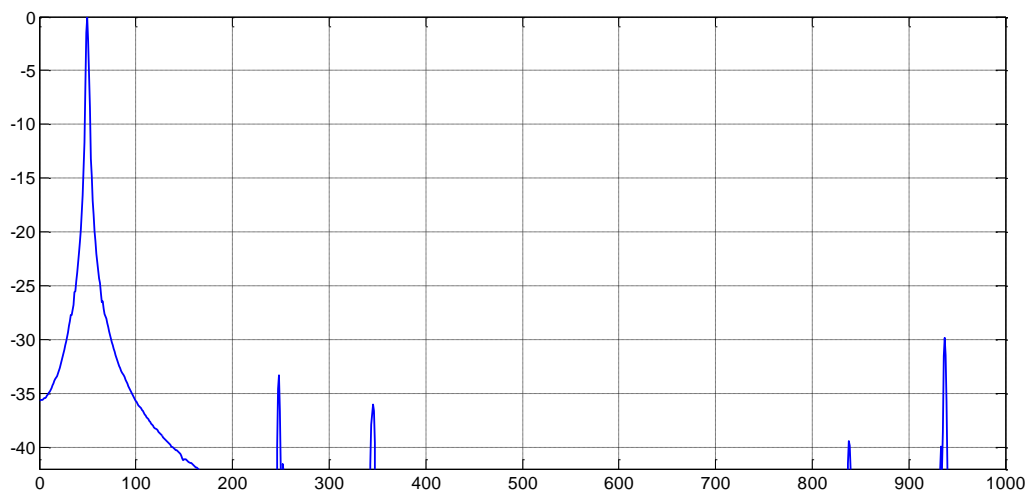


Figure III.13 spectre du courant statorique.

III.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons simulé le modèle éléments finis de la machine asynchrone, créé précédemment, sous l'environnement Flux 2D® en 2 dimensions (2D). Et nous avons visualisé la répartition des lignes équiflux et l'induction électromagnétique. Par la suite, nous avons passé à la simulation en régime 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).

A la fin de ce chapitre nous avons effectué l'analyse spectrale d'une grandeur mesurable qui est le courant des phases statoriques. Cette analyse spectrale est la répartition de champ, l'induction seront notre outils pour la détection des défauts dans le chapitre suivant.

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation de la machine asynchrone, en prenant en considération les défauts rotoriques. Le modèle élaboré précédemment dans le deuxième chapitre sera utilisé pour la modélisation des défauts considérés.

La technique de détection des défauts par l'analyse spectrale du courant statorique (MCSA) est utilisée, parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, où la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère.

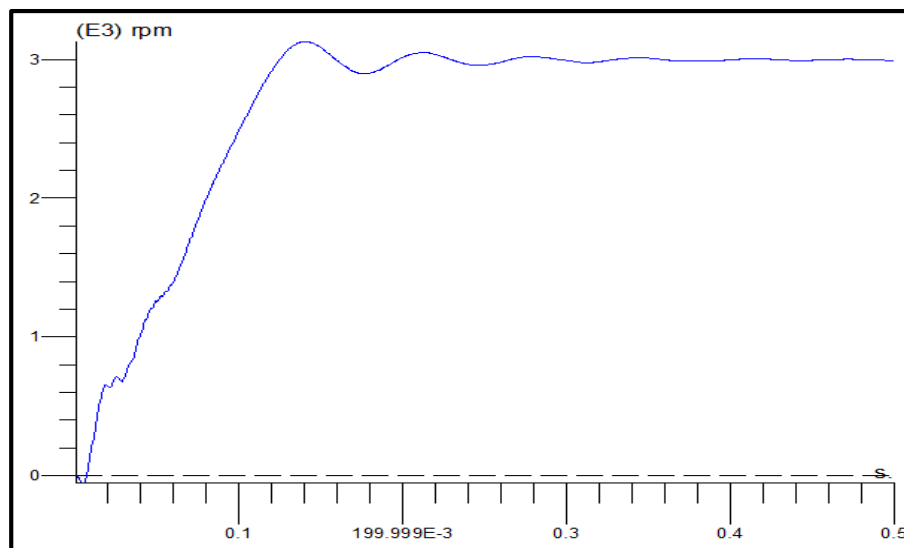
La rupture de la barre peut être effectuée par l'augmentation de la résistance de la barre incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible de zéro en régime permanent.

- 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.

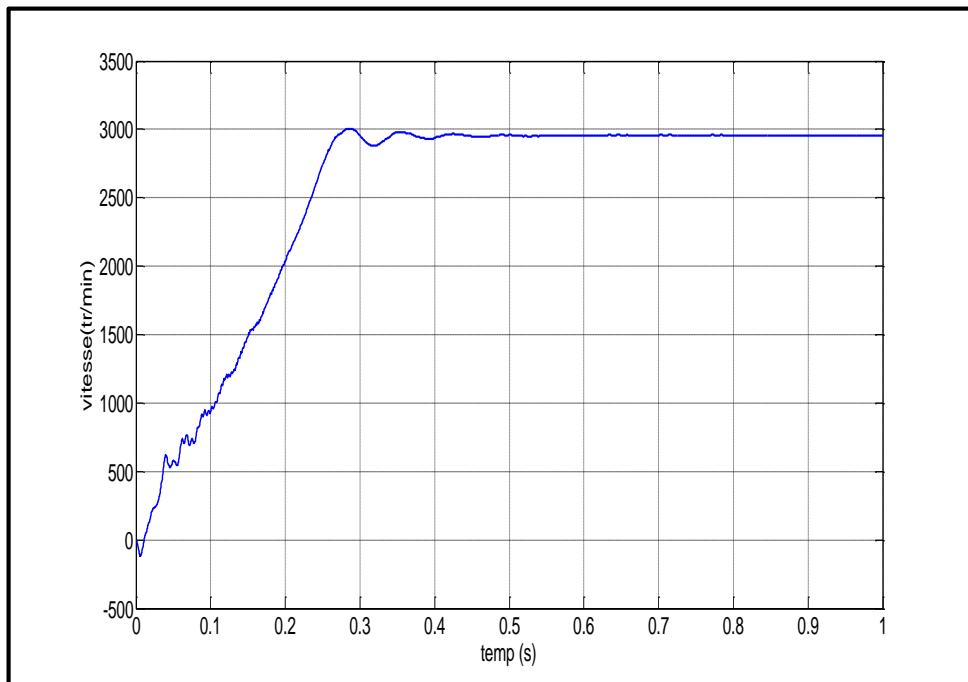
Dans notre travail, nous avons utilisé cette dernière méthode qui présente la cassure totale de la barre rotorique.

IV.2 EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LES PERFORMANCES MECANIQUE DE LA MACHINE

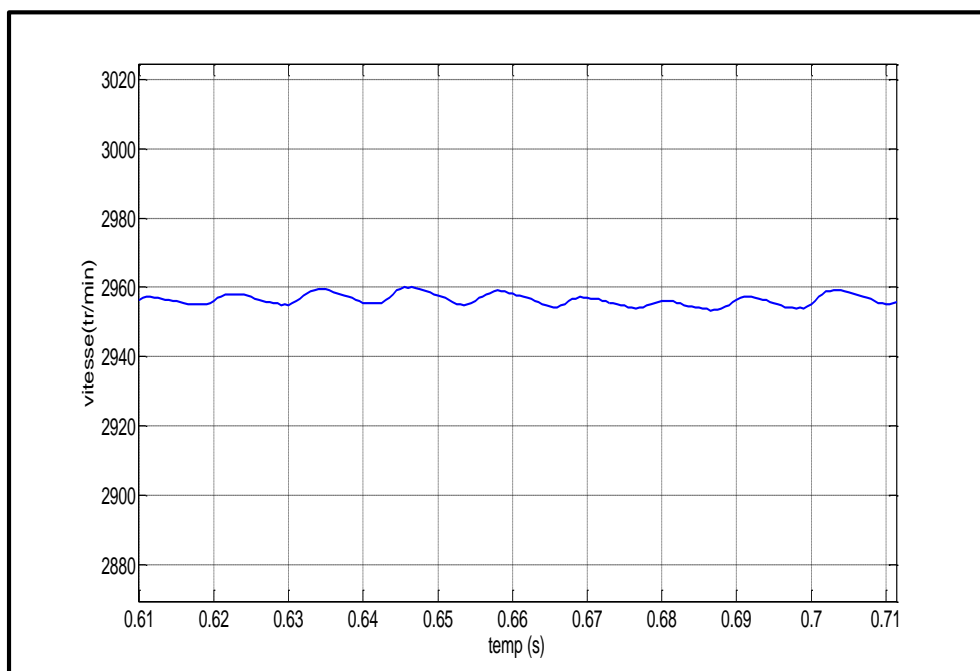
Les figures de IV.1 à IV.6 illustrent le démarrage de la machine en pleine charge sans et avec défauts de barres.



La FigureIV.1 La vitesse de rotation à l'état sain

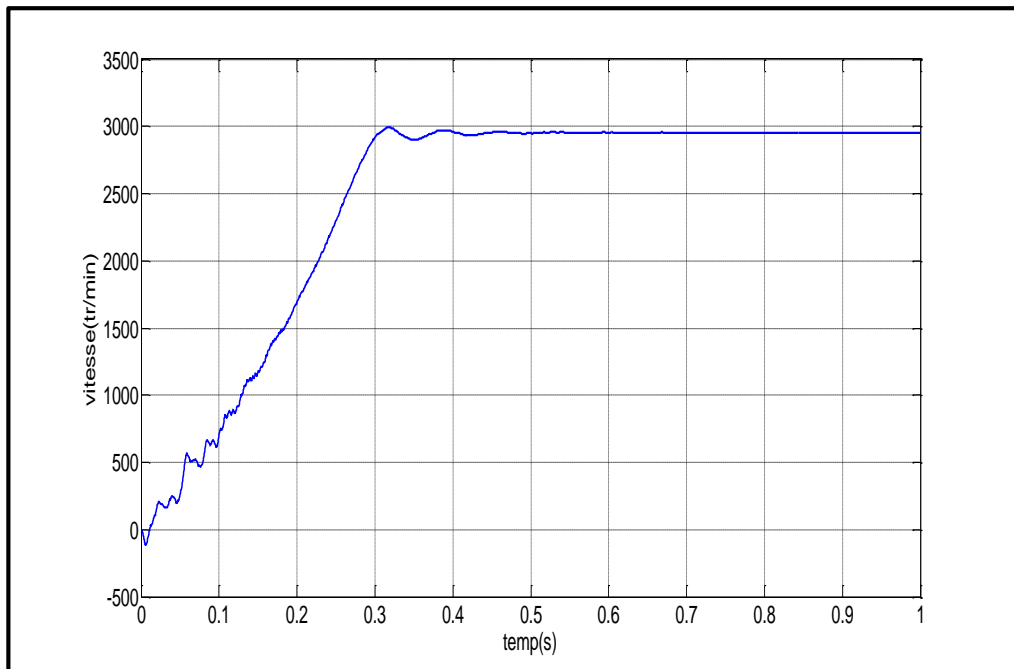


(a)

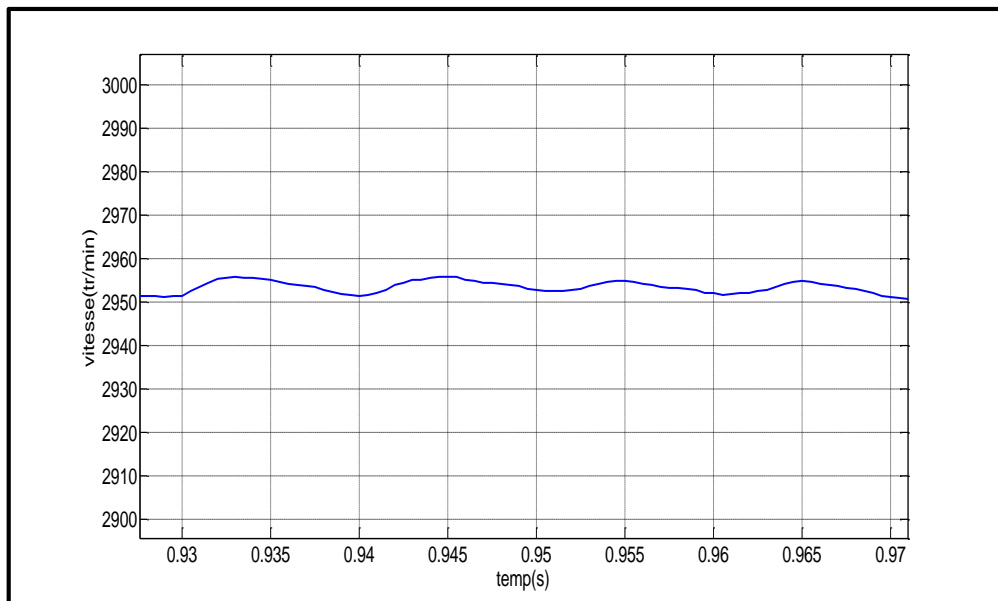


(b)

Figure IV.2 (a) La vitesse de rotation, (b) zoom au régime permanent ; Avec une barre cassé.

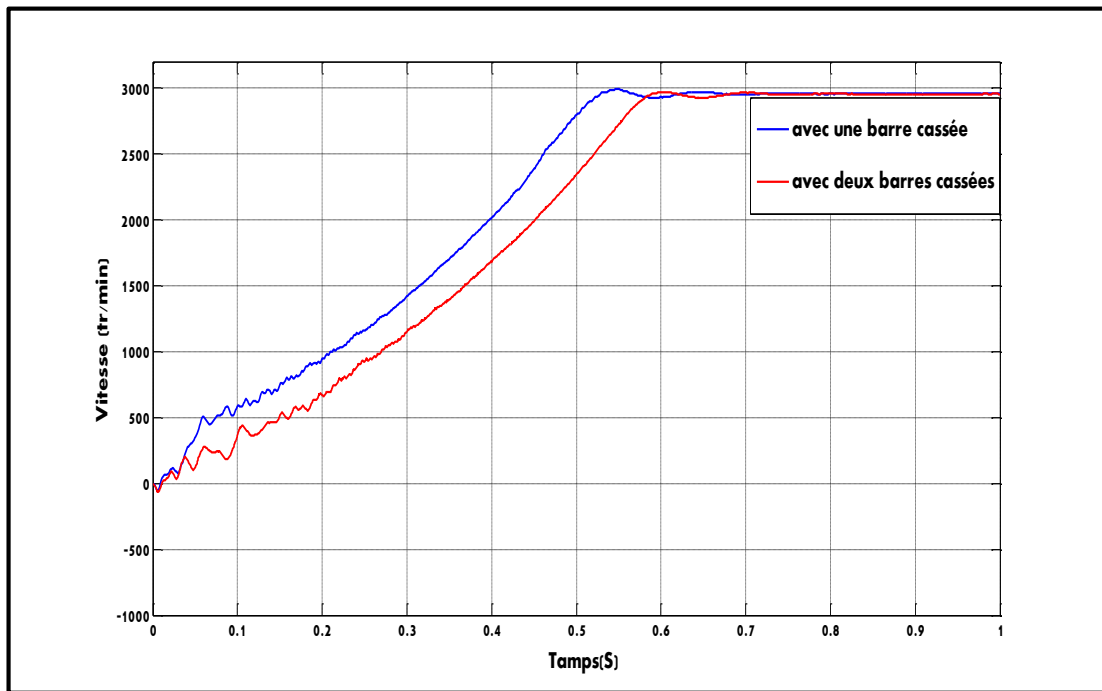


(a)

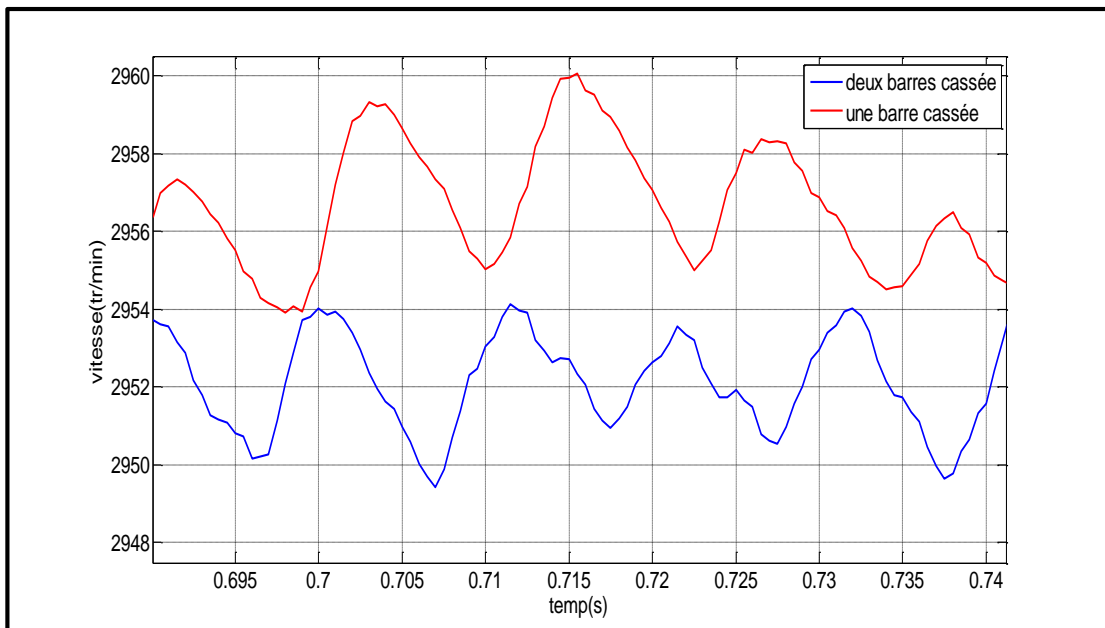


(b)

Figure IV.3 (a) La vitesse de rotation, (b) zoom au régime permanent ; Avec deux barres cassées.

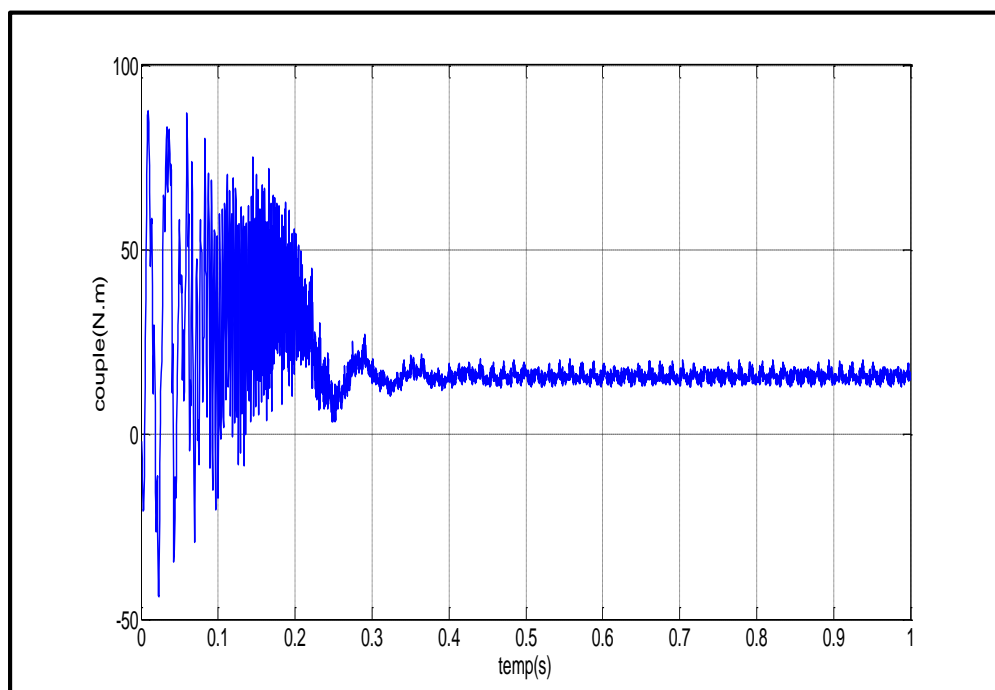


c
(a)

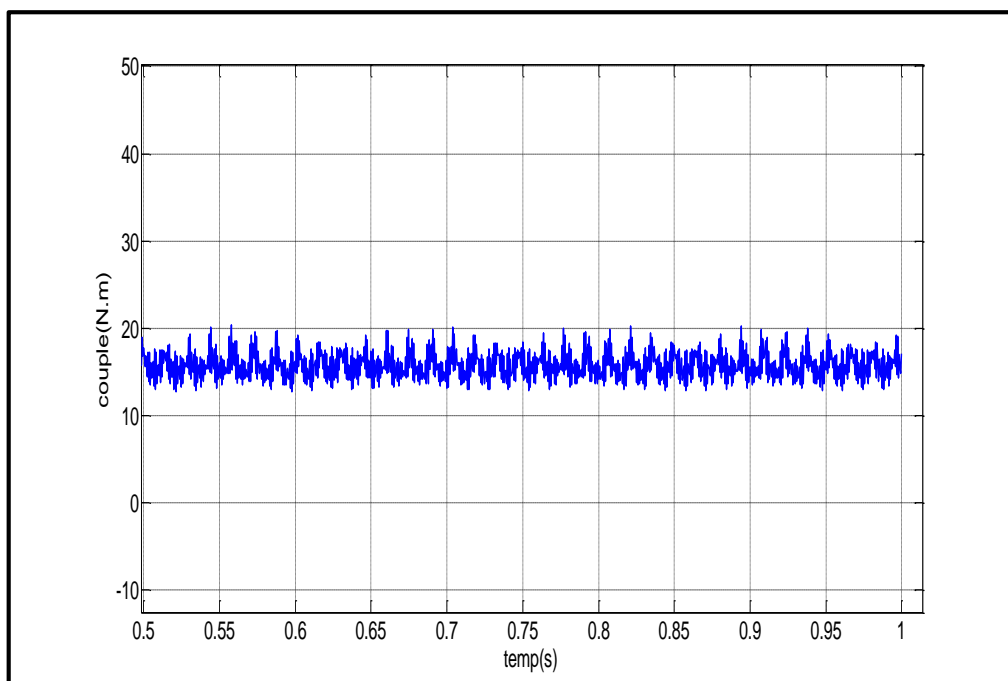


(b)

Figure IV.4. (a) La vitesse de rotation, (b) zoom au régime permanent ; avec une et deux barres cassées

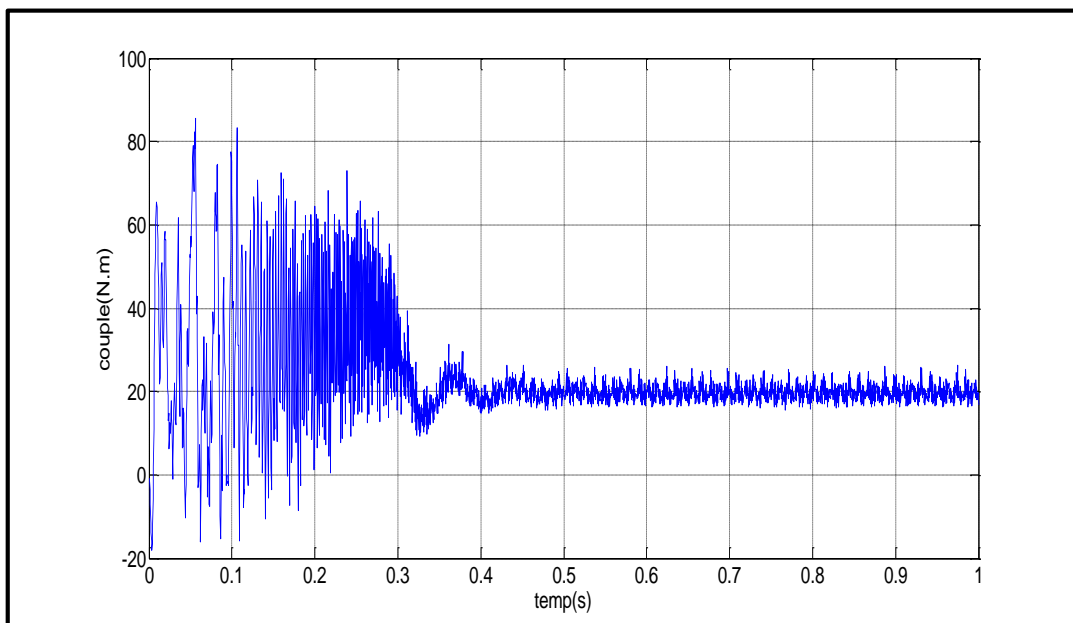


(a)

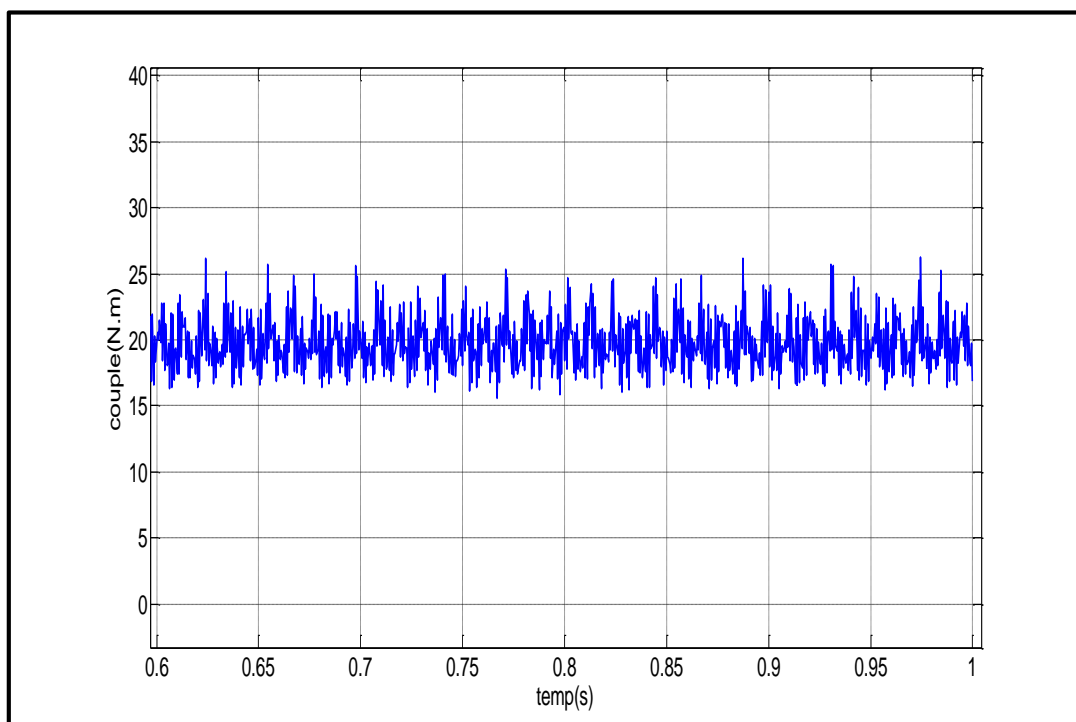


(b)

Figure IV.5. (a) Le couple électromagnétique à vide, (b) zoom sur le régime permanent



(a)



(b)

Figure IV.6. (a) Le couple électromagnétique, (b) zoom sur le régime permanent avec deux barres cassées.

Les figures citées précédemment montrent l'influence des barres cassées sur la durée du régime transitoire de la vitesse. On remarque nettement que la durée de temps de réponse la vitesse nominale augmente avec le nombre de barres cassées. On note également l'augmentation de l'amplitude des ondulations dans l'allure du couple et dans celle de la vitesse dans la machine avec des barres cassées.

IV.3 EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LA CARTE DU CHAMP DE LA MACHINE AU DEMARAGE :

Dans le défaut rotorique, on a augmenté la résistivité de la barre rotorique à la valeur $R_{b4}=1$ e $8 \Omega.m$ pour montrer le défaut rotorique et pour prendre en compte la résistance et l'inductance entre deux barres qui sont très importants.

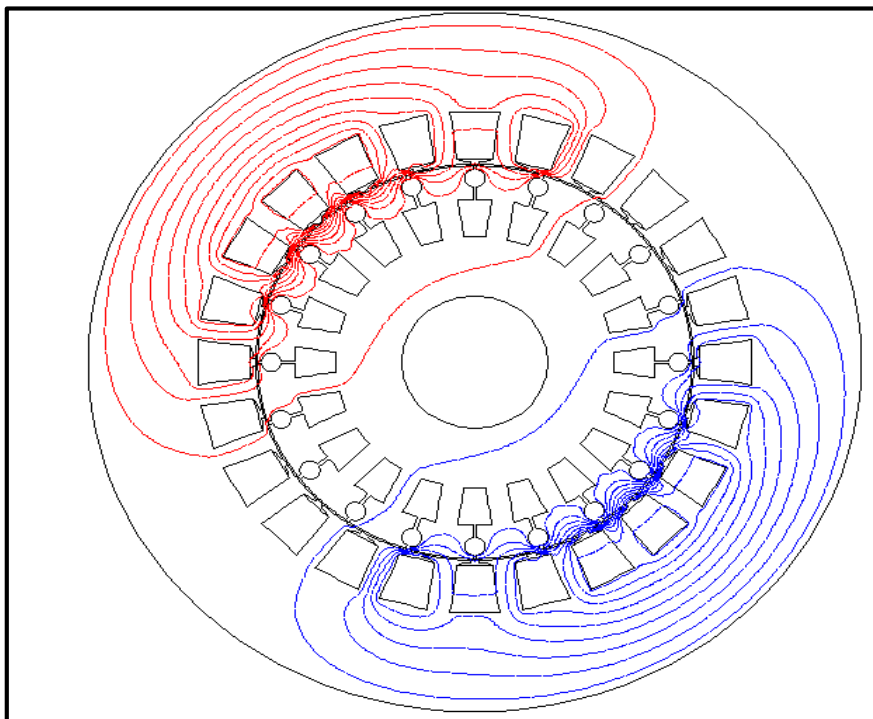


Figure IV.7. La distribution des lignes du flux machine saine

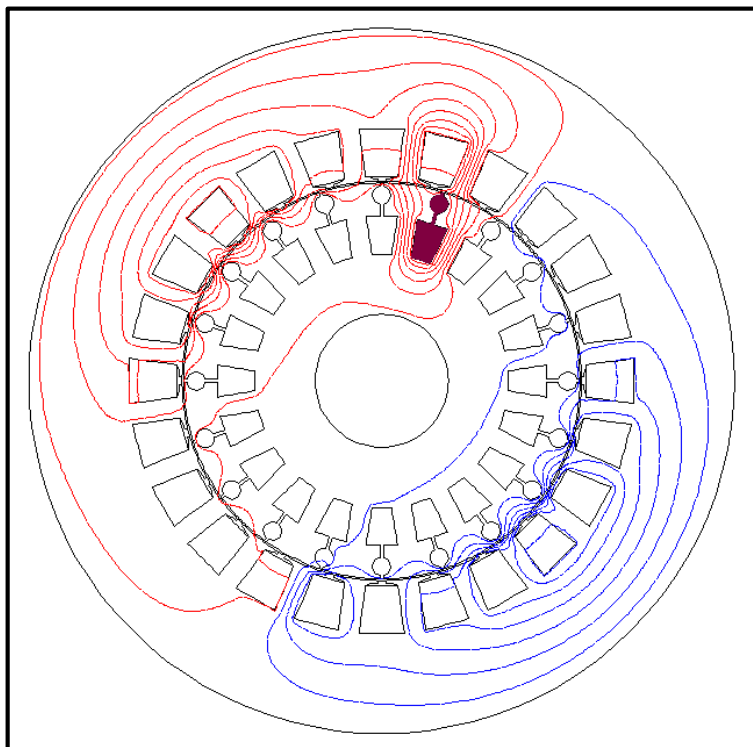


Figure IV.8 La distribution des lignes du flux machine avec une barre cassée.

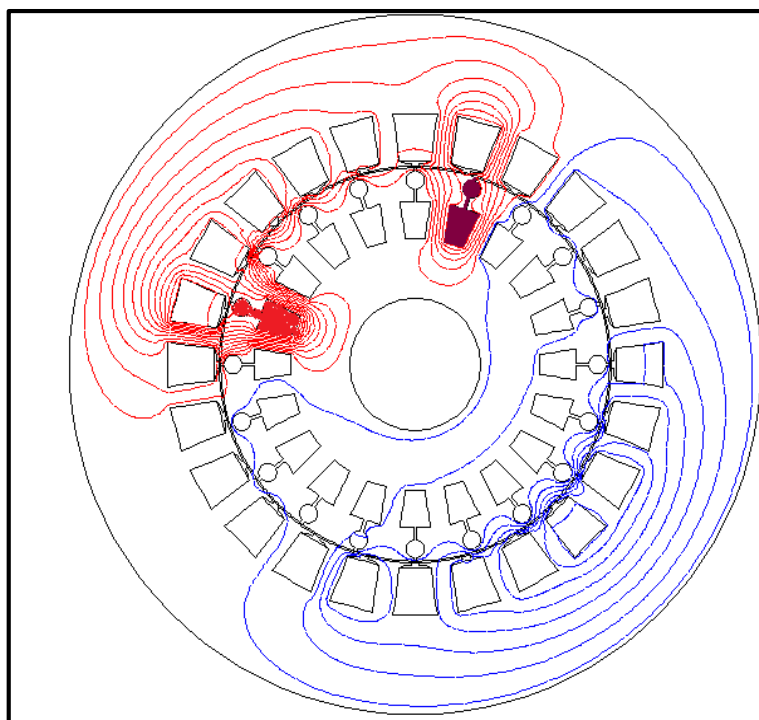


Figure IV.9 La distribution des lignes du flux machine avec deux barres cassée.

Les figures IV.(8 et 9) représentent la distribution des lignes de flux dans la machine au démarrage qui fait apparaître un déséquilibre spatial des lignes de flux provoqué par la barre cassée au niveau rotorique qu'au niveau statorique. Cette déformation de flux est produite au démarrage uniquement car le flux électromagnétique est plus rapide que la vitesse de rotation du rotor. Dans ce cas le glissement est important et cela expliquerait qu'il y aurait une possibilité de détection de la barre cassée au démarrage. Cela est très apparent pourvu qu'une utilisation d'un traitement spécial de la FFT. Pour un moteur sain, les courants dans les barres entraînent une répartition symétrique des lignes de flux autour de chaque pôle. L'absence des courants dans les barres cassées annule leurs participations à la création du flux, ce qui explique le resserrement des lignes de flux autour de ces barres.

IV.4. EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LA CARTE DU CHAMP DE LA MACHINE AU REGIME PERMANANT :

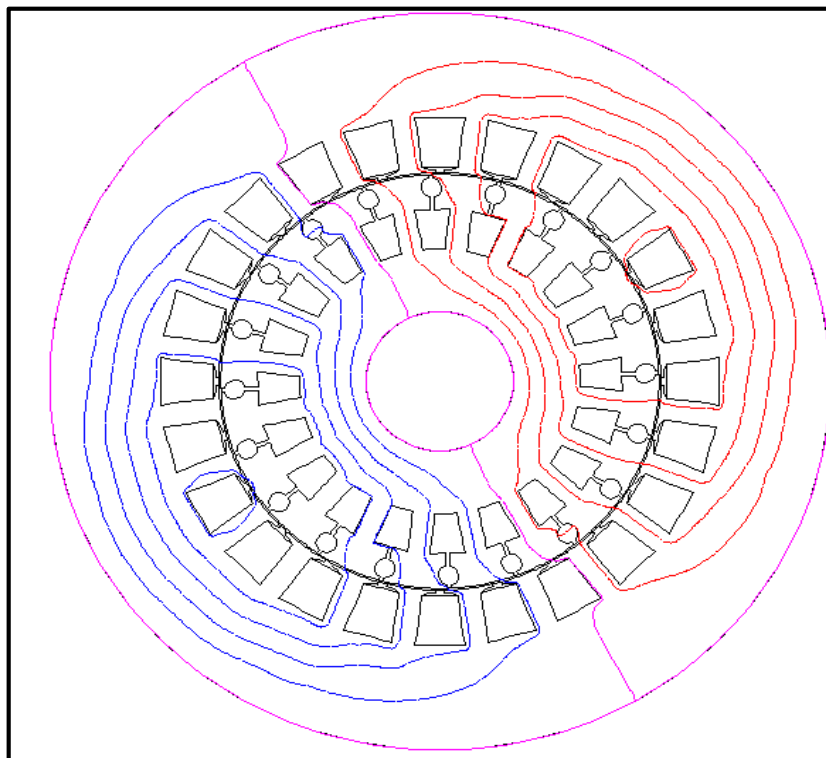


Figure IV.10 La distribution des lignes du flux machine saine

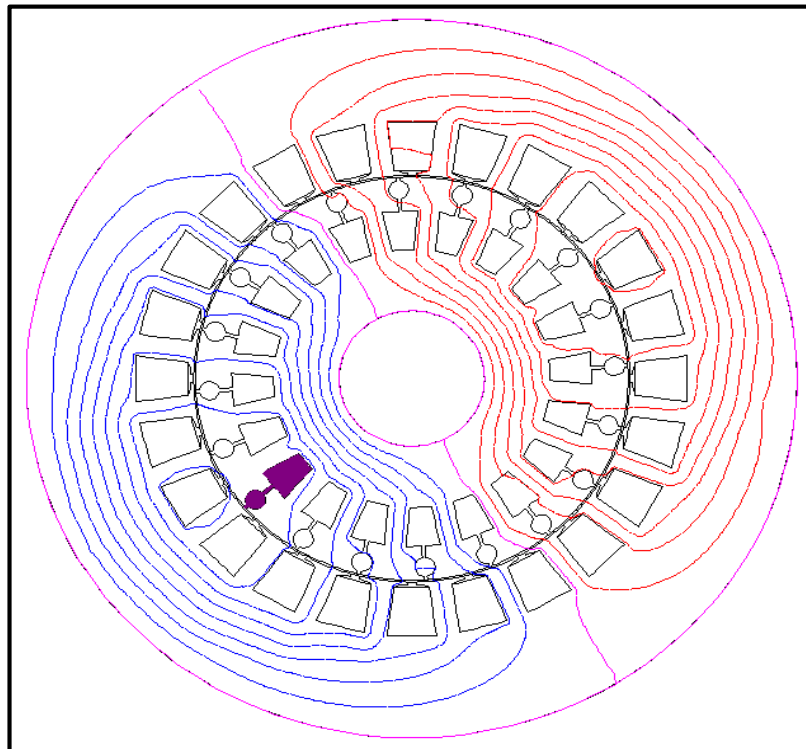


Figure IV.11. La distribution des lignes du flux machine avec une barre cassée

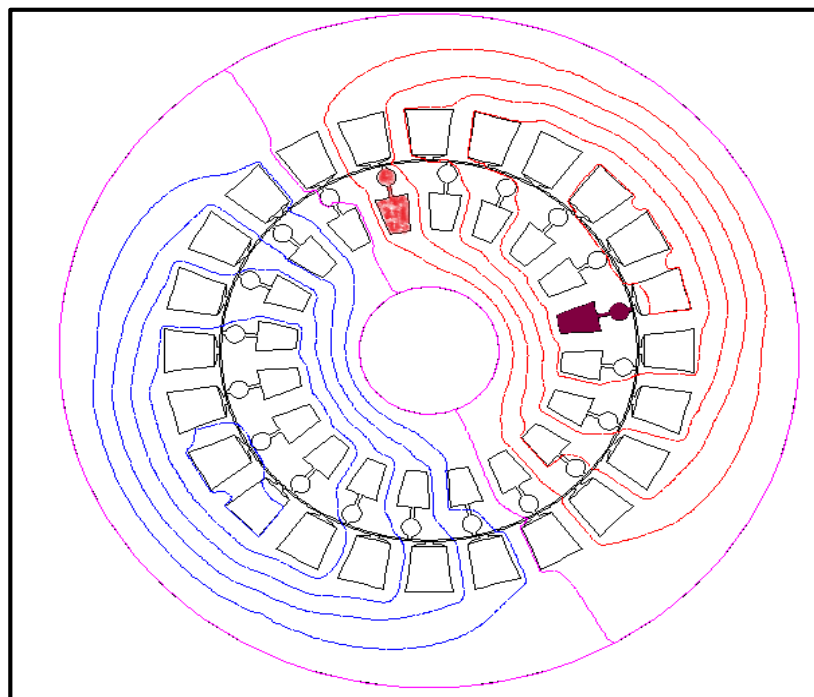
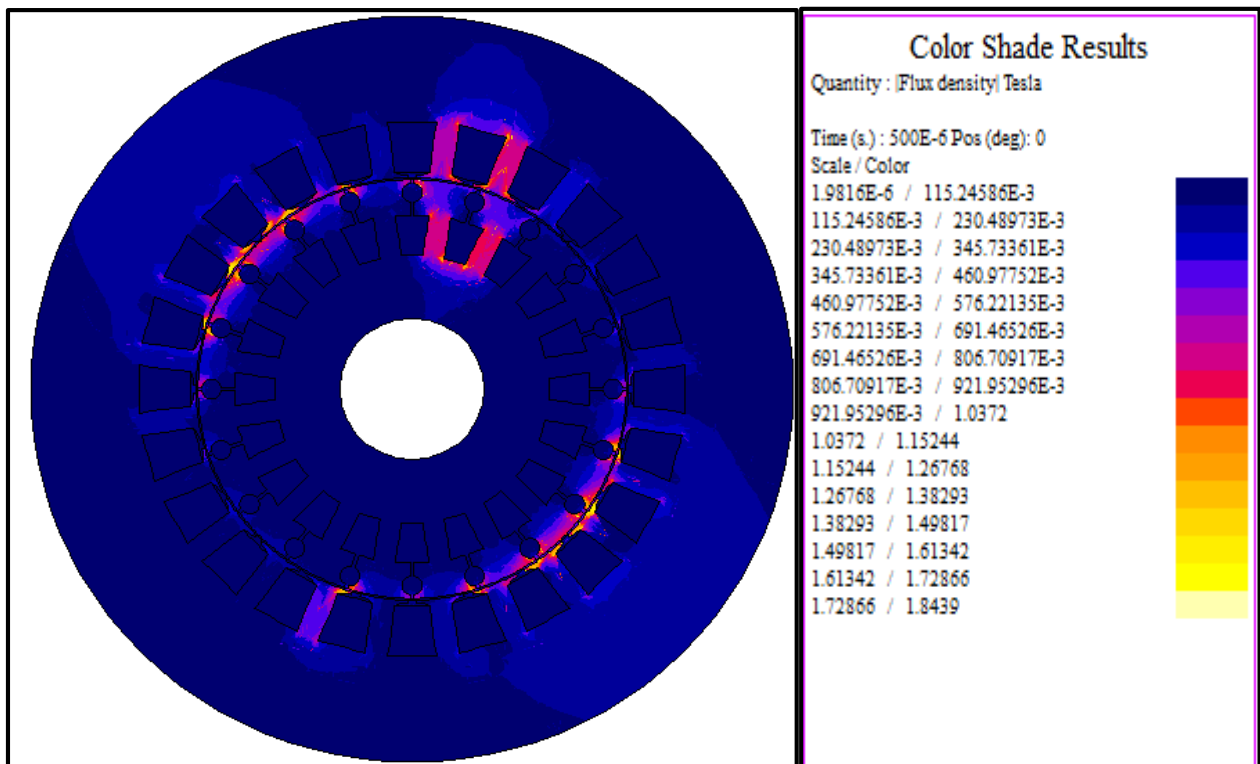


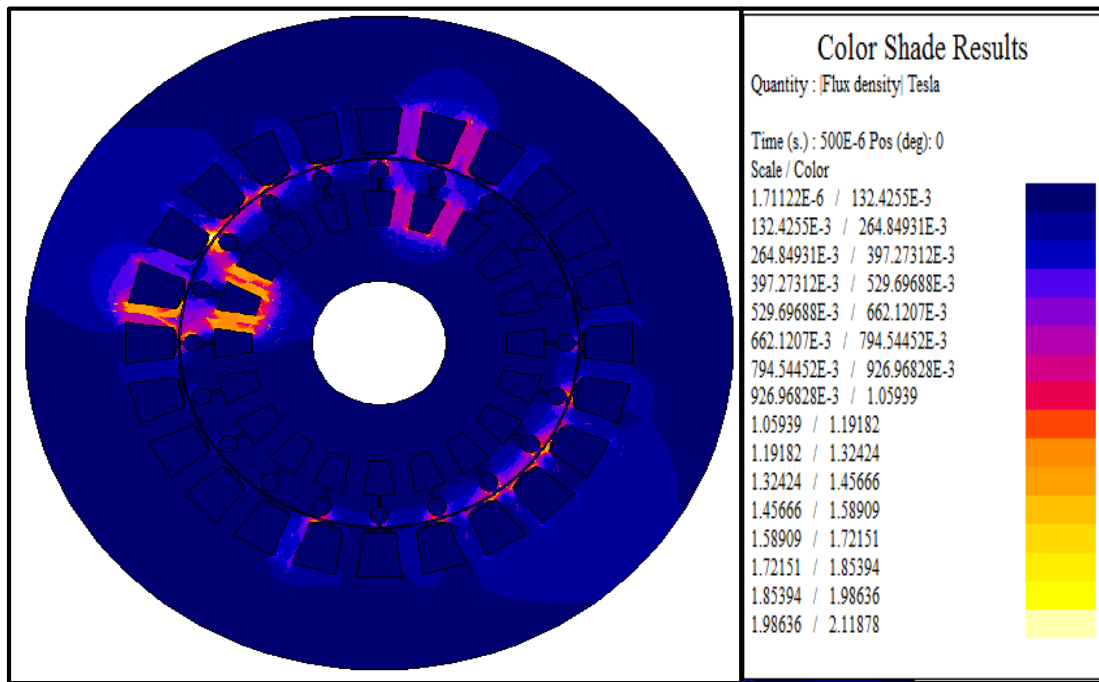
Figure IV.12. La distribution des lignes du flux machine avec deux barres cassées

Les figures IV.(10,11 et 12) représentent la distribution des lignes de flux dans la machine au régime permanent avec une barre cassée (la barre 4) qui montre que la barre cassée dans le régime permanent est dans la position où le champ est très faible par contre dans le régime transitoire les lignes du champs existe autour de la barre cassée. La barre cassée donc n'a pas un effet important en régime permanent. Sa détection est possible sauf pour une durée très importante pour que les petites manifestations de la barre soient cumulées. Cela montre qu'il y'a une possibilité de détection du défaut au régime transitoire.

IV.5. EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR L'INDUCTION MAGNETIQUE DE LA MACHINE AU DEMARRAGE :



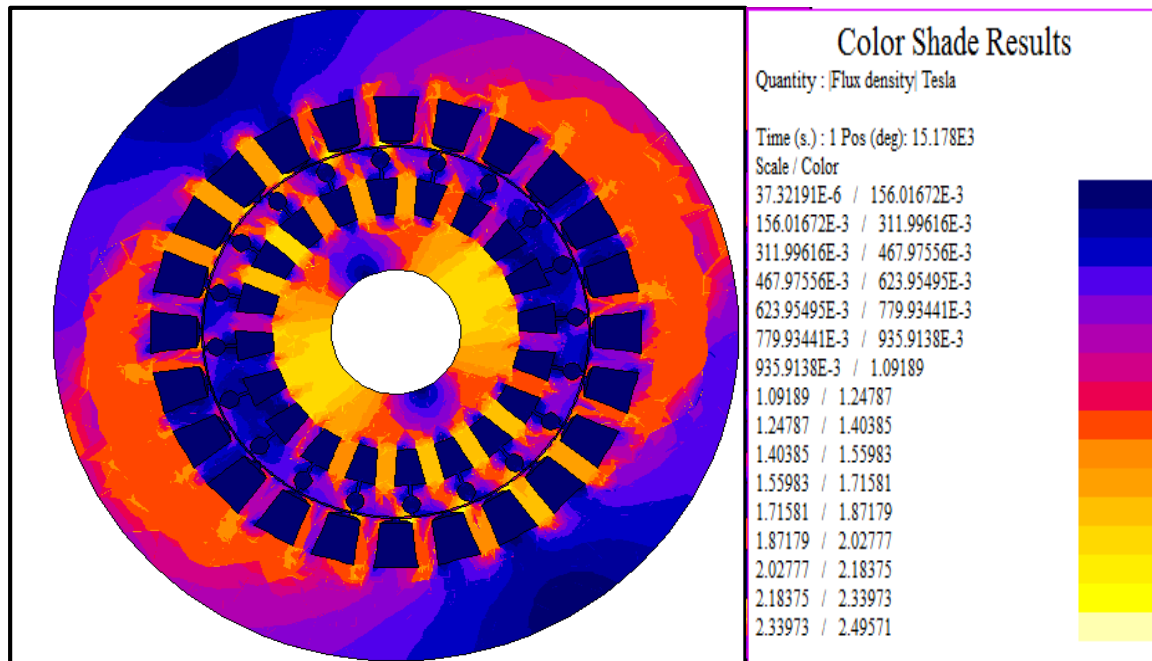
(a)



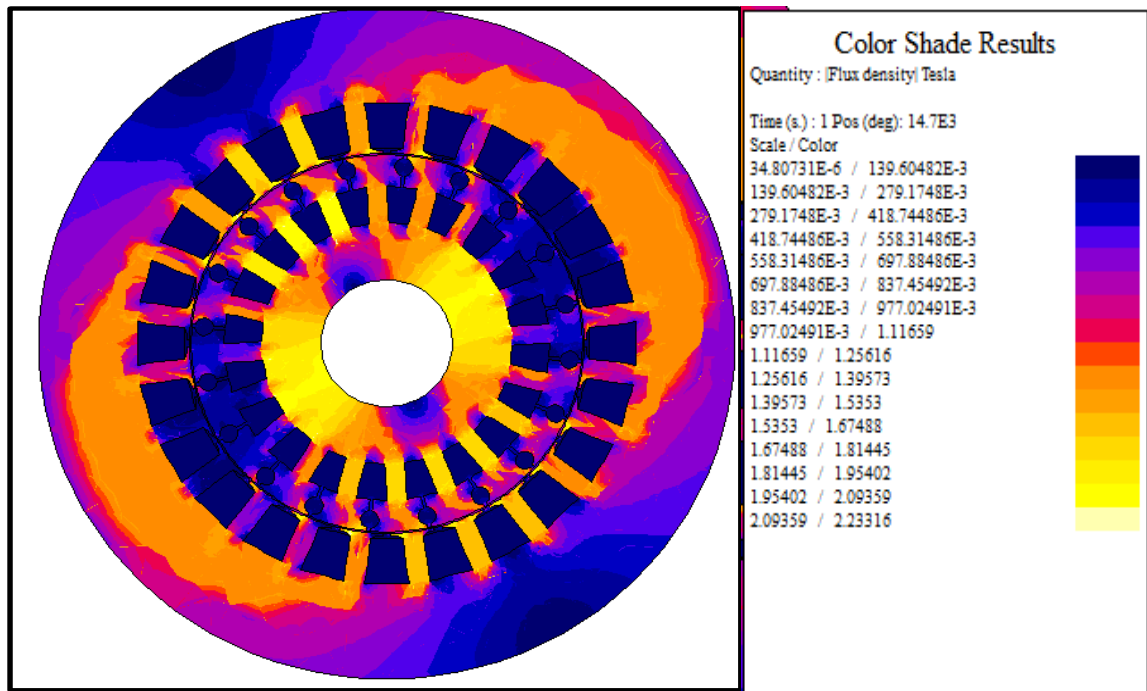
(b)

Figure IV.13 L'induction magnétique (a) avec une barre cassée ; (b) avec deux barres cassées.

IV.6. EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LA L'INDUCTION MAGNETIQUE DE LA MACHINE AU REGIME PERMANAT :



(a)



(b)

Figure IV.14. L'induction magnétique (a) avec une barre cassée ;(b) avec deux barres cassées

IV.7. EFFET DU NOMBRE DE BARRES CASSEES SUR LES COURANTS ROTORIQUES :

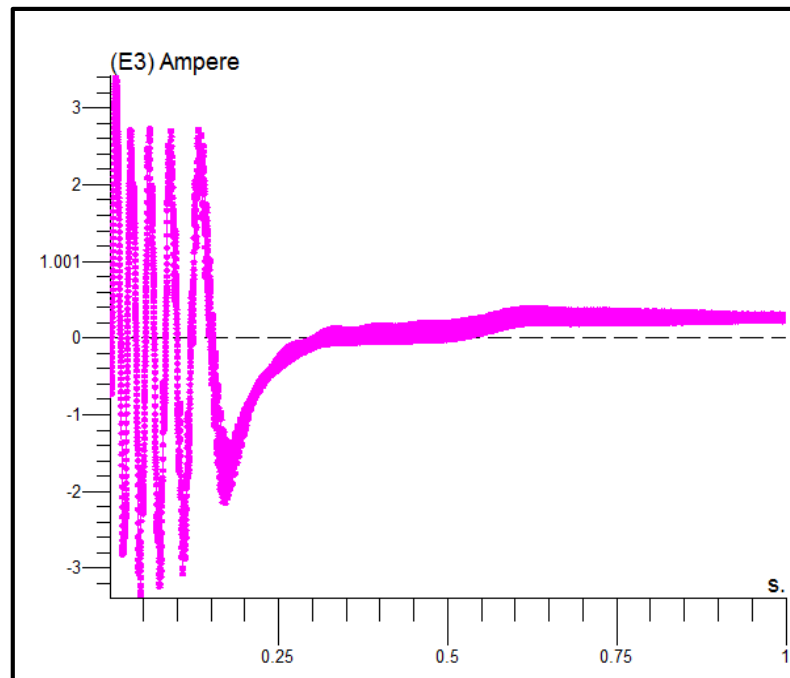


Figure IV.15.

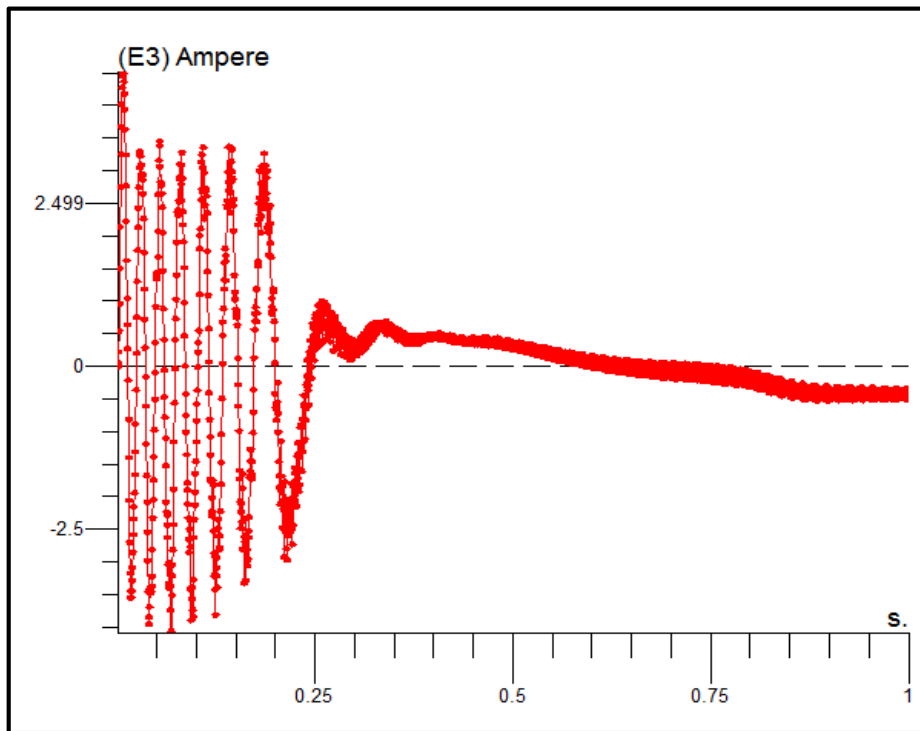


Figure IV.16. Le courant dans la barre adjacente à la barre cassée (barre 3).

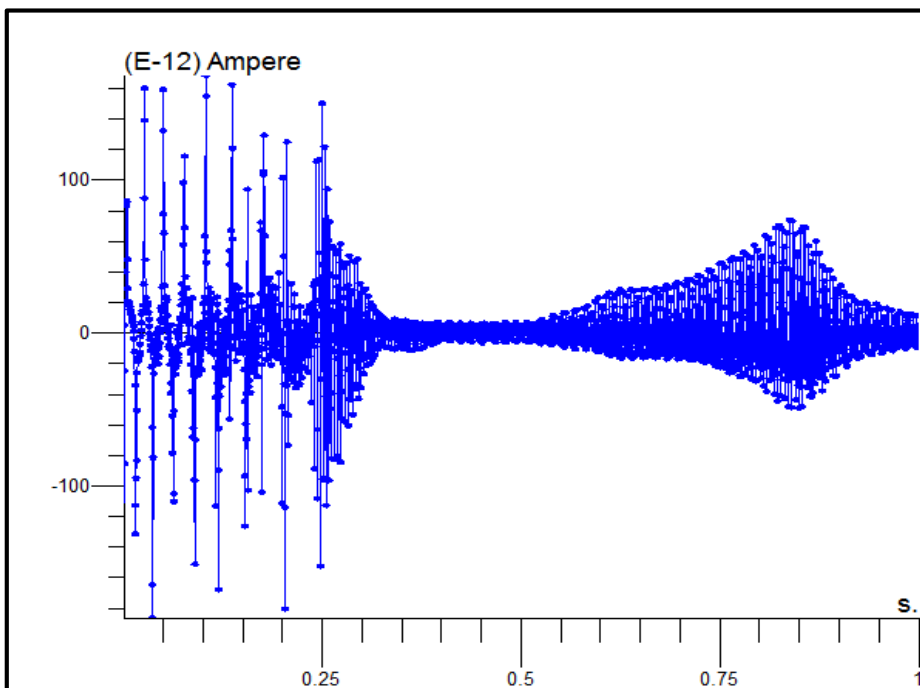


Figure IV.17 Le courant dans la barre 4 cassée.

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

IV.8. DETECTION DES DEFAUTS ROTORIQUES PAR L'ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE :

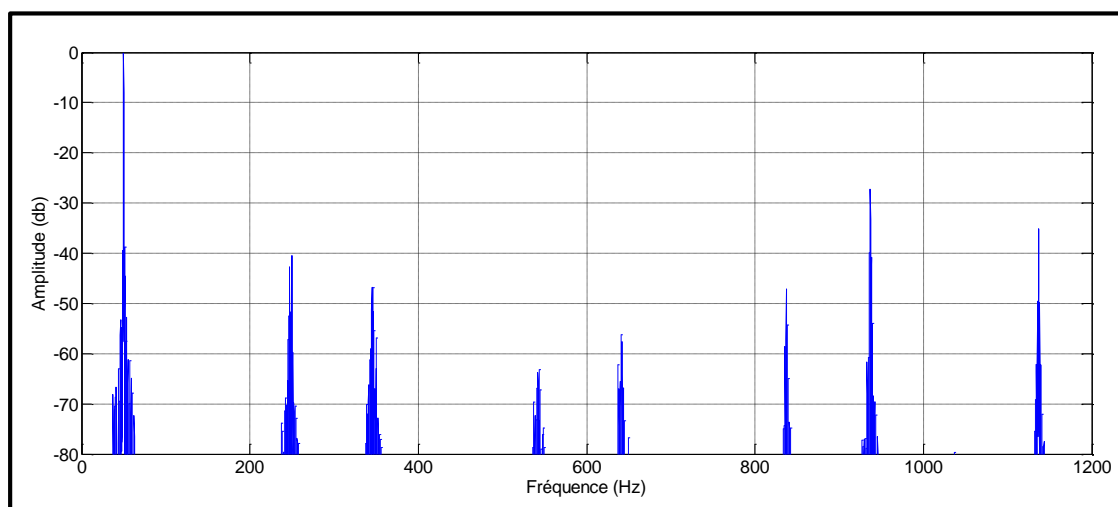


Figure.IV.18. Spectre du courant statorique.

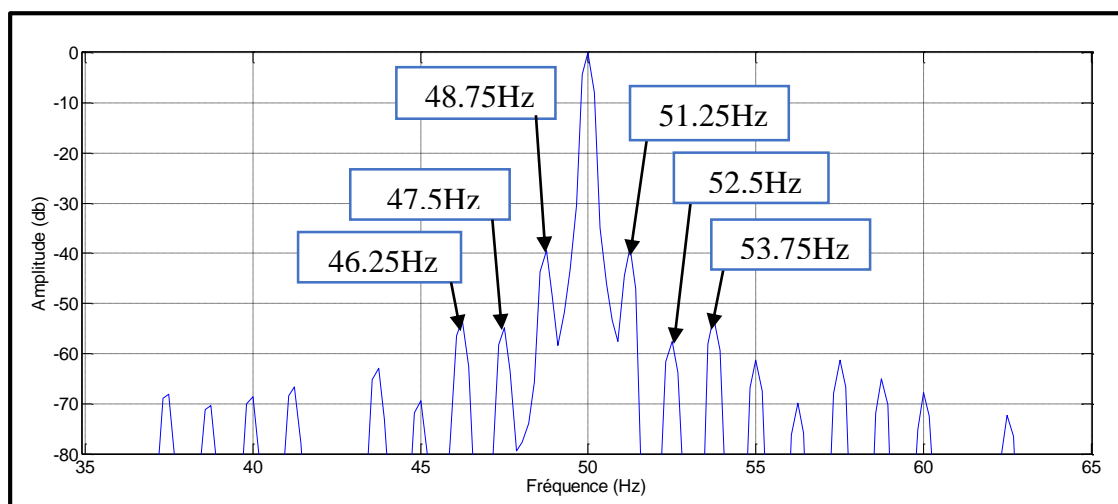


Figure.IV.19. Spectre du courant statorique pour une marge de 35 à 65Hz.

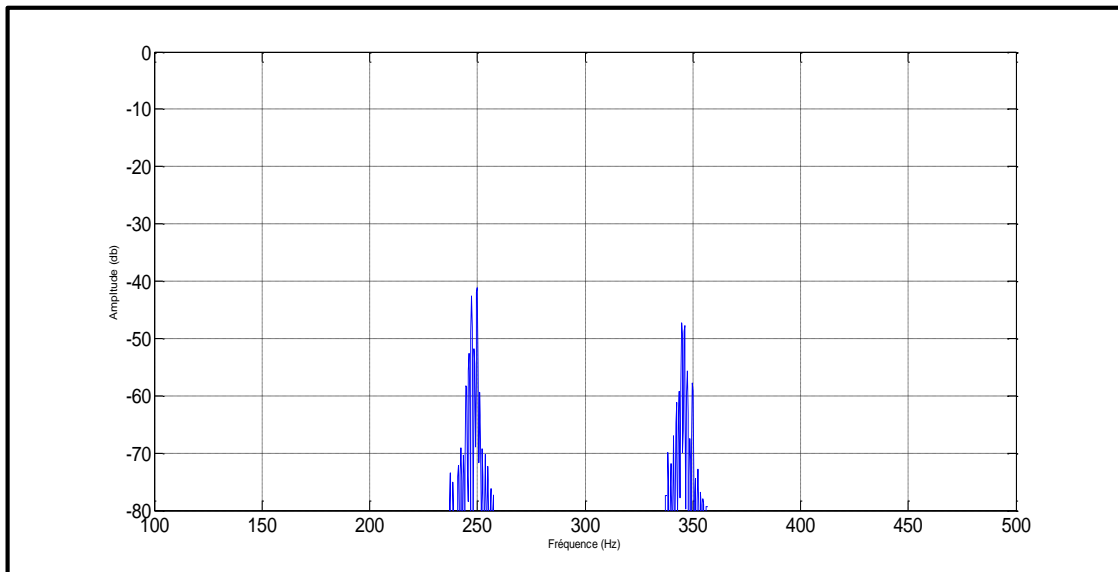


Figure IV.20. Spectre du courant statorique pour une marge de 100 à 500Hz.

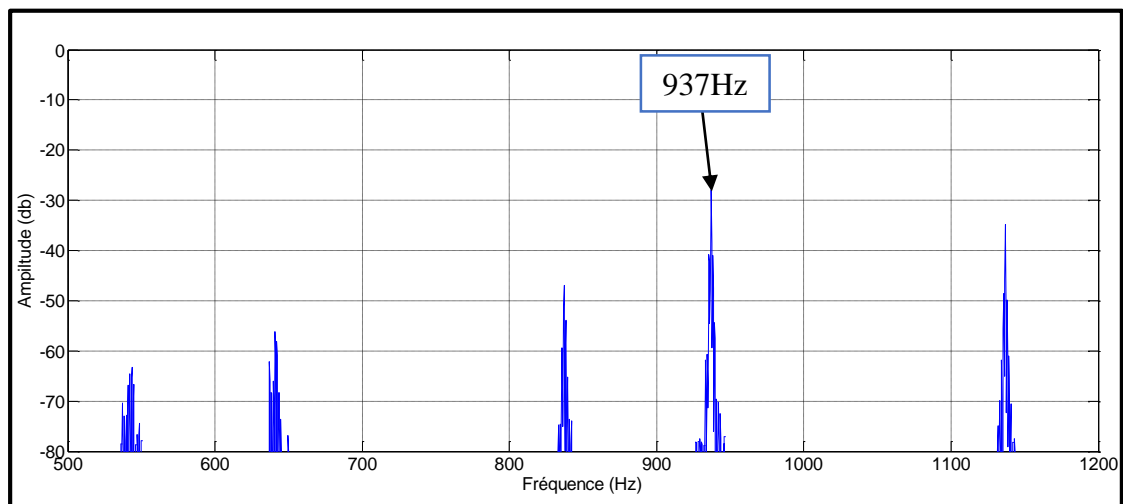


Figure IV.21 Spectre du courant statorique pour une marge de 500 à 1200Hz

Il est clairement visible que ce spectre est très riche en harmoniques. Notre objectif primaire est de vérifier la présence des harmoniques PSH dont les fréquences sont données par l'expression (I.1). Afin d'améliorer la représentation, on a tracé les spectres du courant dans trois bandes fréquentielles (0—100Hz, 100—500Hz, 500—1200Hz) et on ne considérant que les amplitudes supérieures à (-80dB). La figure IV.21.

montre nettement l'existence des harmoniques PSH ce qui est en bonne concordance avec notre étude théorique.

$$f_{L-PSH} = \left[\frac{kN_b}{p} (1-g) \pm n_{os} \right] \cdot f_s = \left[\frac{1 \times 20}{1} (1-0.0129) - 1 \right] \times 50 = 937 \text{ Hz}$$

$$f_{U-PSH} = \left[\frac{kN_b}{p} (1-g) \pm n_{os} \right] \cdot f_s = \left[\frac{1 \times 20}{1} (1-0.0129) + 1 \right] \times 50 = 1037 \text{ Hz}$$

Une analyse harmonique des courants statoriques permet de voir une corrélation entre le défaut et les amplitudes des composantes harmoniques $(1 \pm 2kg) f_s$.

- Les harmoniques :

$$f_1 = (1 \pm 2kg) \times f_s = (1 - 2 \times 1 \times 0.0129) \times 50 = 48.7 \text{ Hz}$$

$$f_2 = (1 \pm 2kg) \times f_s = (1 + 2 \times 1 \times 0.0129) \times 50 = 51.3 \text{ Hz}$$

$$f_3 = (1 \pm 2kg) \times f_s = (1 - 2 \times 2 \times 0.0129) \times 50 = 47.4 \text{ Hz}$$

$$f_4 = (1 \pm 2kg) \times f_s = (1 + 2 \times 2 \times 0.0129) \times 50 = 52.6 \text{ Hz}$$

$$f_5 = (1 \pm 2kg) \times f_s = (1 - 2 \times 3 \times 0.0129) \times 50 = 46.1 \text{ Hz}$$

$$f_6 = (1 \pm 2kg) \times f_s = (1 + 2 \times 3 \times 0.0129) \times 50 = 53.9 \text{ Hz}$$

D'après la figure IV.19, la manifestation des raies $(1 \pm 2kg) f_s$ est un signe de l'existence de cassures de barres, de plus leur amplitude est une meilleur indication du degré de sévérité du défaut.

On peut affirmer, que l'analyse du courant statorique est la méthode la plus fiable pour la détection des cassures de barres.

IV.9. CONCLUSION :

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

La simulation nous a permis d'étudier l'influence des défauts sur la distribution des lignes de champs et l'induction magnétique.

Nous avons montré aussi, en régime transitoire, le fonctionnement du moteur asynchrone devient fortement altéré à partir de la cassure des barres rotorique. Les barres saines adjacentes

au défaut sont plus sollicitées et vieillissent prématurément. La cassure des barres fait apparaître des oscillations sur les courants, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique.

L'analyse spectrale du courant statorique nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la cassure des barres de la cage rotorique.

Enfin l'analyse présentée par la méthode des éléments finis montre que c'est une méthode efficace et peu coûteuse pour étudier les comportements des machines asynchrones, et nous a permis de comprendre et de mesurer les conséquences locales des défauts au rotor. Par contre, le seul inconvénient de cette méthode est le temps de calcul qui est très long avec un ordinateur de 24G de RAM et µp. Intel i7 de 2.3GHz. A noter aussi que la mémoire à réserver dans le disque dur est très grande.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en vue du diagnostic des défauts rotoriques. La cassure des barres a été l'objet de notre étude.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les principaux éléments constituant de la machine asynchrone à cage d'écureuil, les différents défauts de cette machine avec leurs causes ainsi que les différentes méthodes de détection de défauts. Selon la littérature et la brève présentation des diverses méthodes du diagnostic, nous avons constaté que l'analyse du courant statorique est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité et son efficacité de prévoir un défaut dès lors que ses premiers signes commencent à apparaître, ce qui nous a incité à adopter cette technique.

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

Nous avons utilisé le programme de la transformée de Fourier rapide du "Toolbox Matlab", pour exploiter le contenu spectrale du courant statorique.

De plus que l'analyse spectrale du courant des phases statoriques, notre modèle qui prend en compte l'effet de peau dans les barres rotoriques, et de donner plus d'informations sur la répartition des lignes du champ, de l'induction et de densité du courant dans la machine. Il appréhende aussi les impacts magnétiques et thermiques locaux de ces défauts. L'inconvénient de cette méthode est le temps de calcul qui est très long.

Bibliographie :

- [HAL 15] N. Halem, «Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis» mémoire de doctorat, Electrotechnique Université de Mohammed Khaider Biskra, 2015.
- [ABE 02] A. Abed, "Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002.
- [BAC] S. Bachir, "Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique", Thèse de Doctorat, Université de Poitier, France, 2003.
- [IBR] A. Ibrahim, "Contribution au Diagnostic de Machines Electromécaniques: Exploitation des Signaux Electriques et de la Vitesse Instantanée", Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, France, 2009.
- [VAS] B. Vaseghi, "Contribution à l'Etude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut", Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009.
- [CAS 03] R. Casimir, «Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes», Thèse de doctorat, l'école doctorale d'électronique, d'électrotechnique et d'automatique de Lyon, Décembre 2003.
- [KHO 07] D.E. Khoudja, «Elaboration d'un système intelligent de surveillance et de diagnostic automatique en temps réel des défaillances des moteurs à induction» thèse de doctorat, Université de Boumerdès 2007.
- [FAT 14] BABAA FATIMA. « Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : "Application au diagnostic des défauts statoriques». Doctorat en sciences En électrotechnique, Université de Constantine 1- Juin 2014.

- [BOU 01] T. Boumegoura «Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic» thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon 2001.
- [SPR 07] J.Sprooten, «Finite element and electrical circuit modeling of faulty induction machines - study of internal effects and fault detection techniques» thèse de doctorat, Université libre de Bruxelles 2007.
- [SAM 12] Samia. Khelif, «Modélisation de la machine asynchrone en vue diagnostic prise en compte adéquate du circuit magnétique», mémoire de magistère, Electrotechnique Université de Mohammed Khaider Biskra, 2012.
- [ROS 97] G.Rostaing, « Diagnostic de défauts dans les entraînements électriques», Thèse de Doctorat, laboratoire d'électrotechnique de Grenoble, 1997.
- [ZWI 95] G.Zwinnelsten, « Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels », Ed. Hermès Paris. 1995.
- [BAZ 09] S.Bazine, «Conception et implémentation d'un méta-modèle de machines asynchrones en défauts» thèse de doctorat, Université de Poitiers 2009.
- [DED 04] G.Dedier, «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances» thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, 2004.
- [GHO 05] A. Ghouggal, «Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : modèle dédié à la détection des défauts» mémoire de magister, Université de Batna 2005.
- [SAH 10] M. Sahraoui, «Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones» thèse de doctorat, Université de Biskra 2010.

- [PEN 94] J. Penman, J. Sedding, H.G. Lloyed, B.A. Fink, «Detection and localisation of interturn short circuits in the stator winding of operating motors» IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 9, no. 4, December 1994, pp. 652-658.
- [THO 99] O. V. Thorsen & M. Dalva. "Failure identification and analysis for high-voltage induction motors in the petrochemical industry". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, no. 4, pages 810 {818, July - Aug. 1999.
- [DOR 96] D.G. Dorrell, N.C. Paterson, and J.F. Watson, «The causes and contification of sideband currents for use in rotor fault detection systems for cage induction motors» in Proceeding of ICEM, vol.2, Vigo-Spain, 1996, pp. 414-119.
- [NEN 99] M. H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys, «Induction motors faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques» IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 14, no. 1, January 1999, pp. 14-22.