

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



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

Réf:.....

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

MASTER

Thème

*Modélisation Des Défauts Dans Les Systèmes
Électromagnétiques Par Calcul De Champ
Magnétique.*

Présenté par :

ZAIDI Khedidja

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

Mr.MIMOUNE.Souri.Mohamed

Pr.

Président

Mr. AllOUI Lotfi

Pr.

Encadreur

Mr. REZIG Mohamed

MCA

Examineur

Année universitaire: 2017 / 2018

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



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

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

MASTER

Thème

*Modélisation Des Défauts Dans Les Systèmes
Électromagnétiques Par Calcul De Champ
Magnétique*

Présenté par :

ZAIDI Khedidja

Avis favorable de l'encadreur :

Pr. ALLOUI Lotfi

Avis favorable du Président du Jury

Pr. MIMOUNE.Souri.Mohamed

Cachet et signature

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

A ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.

A tous mes frères et sœurs.

A mes meilleurs amis

A Tous ceux que j'aime et je respecte.

Khadija Zaidi

BOTANICAL BEAUTY

Remerciements

Je remercie tout d'abord notre Dieu qui m'a donné la force et la puissance pour terminer ce modeste travail.

Tous mes remerciements qui m'ont guidé à mon Encadreur M^r: ALLOUI Lotfi pour avoir accepté de suivre cette étude.

Je remercie aussi M^r: LAADJAL Khaled qui m'a aidé.

Je tiens aussi à remercier tous les enseignants de département gisement qui ont contribué de près ou de loin à ma formation durant tout le cursus universitaire :

Zaidi Khadija



Résumé

L'objectif de ce travail est le diagnostic des défauts des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil par un modèle de simulation basé sur la méthode des éléments finis 2D.

Dans cette logique, nous proposons une étude comparative entre le comportement de la machine saine et le comportement de la machine dotée de défaut rotorique et statorique, la technique d'analyse spectrale du courant statorique est la plus utilisée pour diagnostiquer les différents défauts dans les machines asynchrones, ce qui nous amène, à étudier l'impact du phénomène de la saturation magnétique dans la machine asynchrone sur le contenu spectral du courant statorique.

Mots clés : machine asynchrone, analyse spectrale, méthode des éléments finis 2D - diagnostic des défauts.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تشخيص عيوب محركات القفص غير المتزامنة ثلاثية الطور بواسطة نموذج محاكاة يعتمد على طريقة العناصر المنتهية.

في هذا المنطق نقترح دراسة مقارنة بين سلوك الآلة الصحية وسلوك الآلة مع عيب الدوار والجزء الثابت، وتقنية التحليل الطيفي للتيار الثابت هو الأكثر استخداماً لتشخيص العيوب المختلفة في الماكينات غير المتزامنة، والذي يقودنا إلى دراسة تأثير ظاهرة التشبع المغناطيسي في الجهاز غير المتزامن على المحتوى الطيفي للتيار الثابت.

الكلمات المفتاحية: الماكينات الكهربائية اللامتزامنة، التحليل الطيفي، تقنية العناصر المنتهية، تشخيص الخطأ.

Liste des figures

Chapitre I :

I.1	La machine à courant continu	5
I.2	Symbole du M.C.C	5
I.3	Constitution d'une machine à courant continu	6
I.4	Système Inducteur d'une machine à courant continu	6
I.5	Système de l'induit d'une machine à courant continu	6
I.6	Système de collecteur et balais d'une machine à courant continu	7
I.7	Structure d'une machine à 2 paires de pôles	8
I.8	Symbole du M.S	8
I.9	La machine Asynchrone	9
I.10	Symbole du MAS	10
I.11	Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	10
I.12	Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone	11
I.13	Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage.....	13

Chapitre II

II.1	Les défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	20
II.2	Proportion des défauts	21
II.3	Différents défauts au niveau de stator de la machine asynchrone	22
II.4	Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte	23
II.5	Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit	24
II.6	Défaut de rupture de barres	24
II.7	Représentation temporelle vers fréquentielle	28
II.8	Représentation temporelle vers ondelettes	30

Chapitre III

III.1	Construction d'un projet Flux (2D/3D).....	32
III.2	fonction d'interpolation d'un élément	36
III.3	Type de bobinage du stator	38
III.4	Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique	38
III.5	Répartition du maillage	39
III.6	Caractéristiques B(H) pour les parties ferromagnétiques.....	40
III.7	CIR_VOLTAGE circuit pour voltage source de simulations	41

III.8	La distribution des lignes du champ magnétique à vide	42
III.9	Induction magnétique à vide.....	43
III.10	Les tensions satatoriques à vide.....	43
III.11	Les courants satatoriques à vide	44
III.12	Vitesse de rotation à vide	44
III.13	Le courant dans la barre rotorique 1 à vide	44
III.14	Le couple électromagnétique à vide	45
III.15	l'induction B à vide	45
III.16	La distribution des lignes du champ magnétique en charge	46
III.17	Induction magnétique en charge	46
III.18	Vitesse de rotation en charge	47
III.19	Spectre (avec zoom) de la vitesse	47
III.20	Le courant dans la barre rotorique 1 en charge	47
III.21	Spectre de la barre 1 en charge	48
III.22	La tension statorique de la phase A en charge.....	48
III.23	Spectre de la tension en pleine charge	49
III.24	Le courant statorique de la phase A en charge	49
III.25	Spectre du courant statorique (avec zoom) de la machine saine en charge	49
III.26	Le couple électromagnétique en charge	50
III.27	Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine saine en charge	50

Chapitre IV :

IV.1	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'état.....	53
IV.2	Couple électromagnétique pour une machine asynchrone saine.....	54
IV.3	Couple électromagnétique pour une machine asynchrone avec défaut (3 barres cassées)..	54
IV.4	Forme d'onde du courant statorique de la phase avec défaut (3 barres cassées).....	55
IV.5	Le courant d'une barre à l'état sain.....	55
IV.6	Le courant d'une barre cassée (1).....	56
IV.7	Le courant d'une barre cassée (10).....	56
IV.8	Le courant d'une barre cassée (20).....	57
IV.9	La vitesse de rotation pour une machine asynchrone saine (a) et une machine asynchrone avec défaut (3 barres cassées) (b) (en pleine charge).....	57
IV.10	La vitesse de rotation pour une machine asynchrone saine (a) et une machine asynchrone avec défaut (3 barres cassées) (b) (en pleine charge) avec zoom.....	58
IV.11	Spectre (avec zoom) du courant statorique pour un défaut (3 barres cassées)	59

IV.12	Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée	59
IV.13	Spectre de vitesse de rotation pour une machine asynchrone saine (a) et une machine asynchrone avec défaut (3 barres cassées) (b) (en pleine charge) avec zoom.....	60
IV.14	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 5 (s).....	61
IV.15	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 5(s) ...	61
IV.16	La vitesse de rotation de la machine à l'état sain (avec zoom).....	62
IV.17	La vitesse de rotation de la machine pour la réduction des spires (avec zoom).....	62
IV.18	Formes d'onde des courants triphasés avec réduction des spires.....	63
IV.19	Forme du courant de phase A à l'état sain en charge (avec zoom).....	63
IV.20	Forme du courant de phase A avec réduction des spires en charge (avec zoom)	64
IV.21	Le régime permanent de courant statorique de phase A	66
IV.22	Forme de couple électromagnétique avec la réduction des spires en charge	65
IV.23	Forme de couple électromagnétique à l'état sain en charge	65
IV.24	Zoom du couple électromagnétique (a) l'état sain en charge et (b) réduction des spires..	66
IV.25	Spectre du courant statorique de la machine sain (avec zoom).....	67
IV.26	Spectre du courant statorique de la machine avec réduction des spires (avec zoom)....	68
IV.27	Spectre du couple électromagnétique à l'état sain en charge	68
IV.28	Spectre du couple électromagnétique pour réduction des spires	68
IV.29	Circuit électrique dans cas court circuit entre les spires.....	69
IV.30	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 5(s)....	69
IV.31	Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 5(s)	70
IV.32	La vitesse de rotation de la machine à l'état sain	70
IV.33	La vitesse de rotation de la machine avec court – circuit entre spires.....	71
IV.34	Le courant statorique de la machine avec court – circuit entre spires.....	72
IV.35	Forme de couple électromagnétique avec court-circuit.....	72
IV.36	Spectre de vitesse de rotation pour une machine asynchrone avec un court –circuit en pleine charge (avec zoom).....	73
IV.37	Spectre du couple électromagnétique avec court circuit (avec zoom).....	74
IV.38	Spectre du courant statorique de la machine avec court-circuit (avec zoom).....	74
IV.39	Spectre du courant statorique de la machine sain (avec zoom).....	75
IV.40	Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'état sain et la machine avec défaut (en pleine charge).....	76
IV.41	La vitesse de rotation de la machine à l'état sain (avec zoom).....	77

IV.42	La vitesse de rotation de la machine avec court-circuit (avec zoom).....	77
IV.43	La vitesse de rotation pour une machine asynchrone saine (a) et une machine asynchrone avec court – circuit (b) (en pleine charge) avec zoom.....	78
IV.44	Forme du courant de phase A avec court –circuit en charge (avec zoom).....	78
IV.45	Spectre du courant statorique de la machine sain (avec zoom).....	79
IV.46	Spectre du courant statorique de la machine avec court-circuit (avec zoom).....	80
IV.47	Forme du couple électromagnétique de la machine avec court circuit (avec zoom).....	81
IV.48	Forme du couple électromagnétique de la machine sain (avec zoom).....	81
IV.49	Spectre du couple électromagnétique de la machine avec court circuit (avec zoom).....	82
IV.50	Spectre du couple électromagnétique de la machine sain (avec zoom).....	82

Liste des symboles.

l	: La longueur du conducteur
V	: La vitesse du conducteur
B	: Induction magnétique
F_m	: La force mécanique
E_0	: Générateur de f.é.m.
R	: Résistance interne
I	: Le courant
F_e	: Force électromagnétique
E	: Force électromotrices (f.é.m.)
Ω	: Domaine surfacique.
A	: Potentiel magnétique.
Γ	: Frontière de domaine Ω .
μ_0	: Perméabilité magnétique de l'air.
μ_r	: La perméabilité relative du fer
ε	: Permittivité électrique.
μ	: Perméabilité magnétique.
J	: Densité de courant uniforme.
ρ	: Charges électriques.
σ	: conductivité électrique.
j	: unité imaginaire.
t	: Temps.
L_1, L_2, L_3	: 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.
$n_{\omega s}$: Ordre des harmoniques de temps de la FMM.
n_d	: Ordre de l'excentricité.
f_s	: Fréquence d'alimentation.
f_r	: Fréquence rotorique.
f_{he}	: Fréquence des harmoniques d'encoches rotoriques.
f_{roul}	: Fréquence de vibration relative aux défauts de roulements.

f_v	: Fréquence caractéristique de vibration.
f_{bille}	: Fréquence de vibration relative aux défauts de billes.
$f_{b.int}$: Fréquence de vibration relative au défaut de bague intérieure.
$f_{b.ext}$: Fréquence de vibration relative au défaut de bague extérieur.
f_b	: Fréquence caractéristique du défaut de barres.
f_{ecc}	: Fréquence d'ordre supérieur caractéristique du défaut d'excentricité.
f_{mix}	: Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte.
f_{st}	: Fréquence caractéristique du défaut statorique.
n_b	: Nombre d'éléments roulant du roulement.
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.
I_U, I_V, I_W	: Les courants des phases du modèle de la machine étudiée.
V_U, V_V, V_W	: Les tensions des phases du modèle de la machine étudiée.

Liste des tableaux

Chapitre II :

Tableau II.01 : Défaits des machines électriques selon leurs origines19

Chapitre III :

Tableau III.01: Paramètres globales de la machine.....37

Tableau III.2 : B(H) du matériau magnétique.....40

Sommaire

Liste des symboles utilisés.....	I
Liste des tableaux.....	II
Liste des figures.....	III
Introduction générale	1

Chapitre I : Etude sur les machines électriques tournante.

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique des machines électriques.....	3
I.3 Définition de la machine électrique.....	4
I.4 Type de la machines électriques.....	5
I.4.1 Machine à courant continu.....	5
I.4.1.1 Symbole.....	5
I.4.1.2 Constitution d'une machine à courant continu	5
I.4.2 Machine synchrone	7
I.4.2.1 Constitution.....	7
I.4.2.2 Symbole	7
I.4.2.3 Principe de fonctionnement.....	8
I.4.3 Machine asynchrone.....	9
I.4.3.1 Symboles.....	10
I.4.3.2 Constitution du moteur asynchrone.....	10
I.4.3.3 Utilisation.....	12
I.4.3.4 principe de fonctionnement.....	12
I.4.3.5 Démarrage d'un moteur asynchrone	13
I.4.3.6 Variation de vitesse d'un moteur asynchrone.....	14
I.5 Les avantages et les inconvénients des machines asynchrones	14
I.6 Conclusion	15

Chapitre II : Diagnostic de défaut de la machine Asynchrone

II.1 Introduction.....	16
II.2 La Maintenance	16

II.2.1 Maintenance Corrective	16
II.2.2 Maintenance Préventive.....	16
II.2.2 Maintenance Préventive.....	16
II.2.2.1 Maintenance préventive systématique.....	17
II.2.2.2 Maintenance préventive conditionnelle.....	17
II.3 Définition et objectif du diagnostic.....	17
II.3.1 Définition.....	17
II.3.2 Objectif du diagnostic.....	17
II.3.3 Terminologies et concepts	18
II.4 Défauts des machines électriques tournantes.....	18
II.5 Différents défauts dans la machine asynchrone.....	19
II.5.1 Défauts statoriques.....	21
II.5.2 Défauts rotoriques.....	23
II.6 Généralité sur le diagnostic	25
II.6.1 Etapes du diagnostic.....	25
II.7 Différents Méthodes de Diagnostic.....	26
I.7.1- Méthodes sans modèle.....	26
I.7.2- Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites	26
I.7.3- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique.....	27
I.7.4- Diagnostic par analyse du courant statorique.....	27
I.7.5- Diagnostic par analyse du vecteur de Park	27
I.7.6- Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle	27
I.8 Techniques de traitement de signal utilisé dans le diagnostic.....	28
I.8.1 Transformée de fourrier rapide (FFT)	28
I.8.2 Transformée on ondelette (TO)	29
II.9 Conclusion	30

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

III.1 Introduction.....	31
III.2 Historique	31
III.3 Méthode des éléments finis	31
III.4 Modèle employé.....	34
II.4.1 Mode magnétostatique.....	34
III.4.2 Mode magnétodynamique	35

III.4.3 Mode magnétique transitoire	35
III.5 Principe de la méthode des éléments finis.....	35
III.6 Présentation du logiciel Flux2D	36
III.7 Application à la simulation de la MAS.....	37
III.7.1 Matériaux conducteurs.....	39
III.7.2 Matériaux magnétiques	40
III.7.3 Circuit d'alimentation.....	41
III.8 Résultats de simulation par la magnétodynamique	41
III.9.Simulations des comportements dynamiques de la MAS	42
III.9.1.Fonctionnement à vide	42
III.9.2.Fonctionnement en charge	46
III.10 Conclusion.....	51
Chapitre IV : Simulation de la machine en présence des défauts	
IV.1. Introduction.....	51
IV.2. Simulation du défaut de cassure de barre Rotorique	51
IV.3. Simulation d'un court-circuit par réduction de spires.....	60
IV.4 Simulation du défaut de Court –circuit entre spires par la méthode des éléments finis (méthode 1).....	69
IV.5 Simulation du défaut de Court –circuit entre spires par la méthode des éléments finis (méthode 2).....	75
IV.6 Conclusion	83
BIBLIOGRAPHIE.....	84

Introduction générale

Le travail présenté dans cette thèse rentre dans le cadre général du diagnostic des défauts dans les machines électriques et spécialement le moteur asynchrone triphasé à cage. L'importance de ce type de machines revient au fait qu'il représente un élément clé de la plupart des équipements industriels, vu sa grande robustesse et son faible coût par rapport aux autres types de machines. Il est en effet, omniprésent dans les tous les secteurs de pointes, tels que l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,... [9].

Le développement de système de diagnostic automatique paraît une solution un peu plus coûteuse à l'investissement, mais elle s'amortit sur le long terme. Les signaux mesurables tels que les courants, les tensions, la vitesse, les vibrations ou bien encore la température peuvent fournir des informations significatives sur les défauts et ainsi servir à déterminer un ensemble de paramètres représentant les signatures de défauts du moteur. [13].

La considération du comportement électromagnétique local du moteur permet d'avoir une modélisation plus précise. La résolution numérique des équations de Maxwell régissant le comportement des champs électromagnétiques et la prise en considération des équations électriques représentant le circuit d'alimentation du moteur, permet de réduire les simplifications faites dans les modèles classiques et ainsi d'avoir un modèle plus proche de la machine électrique réelle, dans ce but nous orientons dans cette mémoire d'utiliser la méthode de calcul par éléments finis à travers de l'outil logiciel FLUX 2d, ce dernier qui nous permet d'utiliser la technique de circuits couplés c'est-à-dire le couplage entre le circuit magnétique et le circuit électrique [1].

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre présente la définition de la machine électrique. Après cela, nous allons citer les différents types des machines électriques .Puis, nous donnerons une comparaison entre les différents types des machines électrique.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation d'un ensemble de définitions de base concernant la maintenance et le diagnostic. Ensuite, nous terminons ce chapitre par une analyse des différentes techniques de diagnostic actuellement appliquée à la machine asynchrone.

Le troisième chapitre représente les résultats de la simulation du moteur asynchrone, dans les d

L'objectif du troisième chapitre sera la simulation du moteur asynchrone sous l'environnement du logiciel Flux-2D, avec les résultats obtenus, et, nous présenterons l'analyse spectral du courant statorique (à l'aide de la transformée de Fourier),a l'état saine, et l'influence de quelle que paramètre comme (le couple et la tension de calcul) sur l'analyse spectrale du courant statorique.

Le quatrième chapitre sera dédié l'analyse spectrale du courant statorique et le couple électromagnétique afin de mettre en évidence la présence des harmoniques caractérisant le défaut dans le stator.

Nous terminerons ainsi notre travail, par une conclusion pour montrer l'état d'avancement de notre travail.

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, on définit la machine électrique et les différents types des machines électriques et sont principaux constitution. Après ça en a rappeler pour les méthodes d'excitation pour la machine a courant continu et la méthode de démarrage pour la machine asynchrone.

I.2 Historique des machines électriques

En 1821, après la découverte du phénomène du lien entre électricité et magnétisme, l'électromagnétisme, par le chimiste danois Ørsted, le théorème d'Ampère et la loi de Biot et Savart, le physicien anglais Michael Faraday construit deux appareils pour produire ce qu'il appela une « rotation électromagnétique » : le mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil, en fait la démonstration du premier moteur électrique[1].

En 1822, Peter Barlow⁶ construit ce qui peut être considéré comme le premier moteur électrique de l'histoire : la « roue de Barlow » qui est un simple disque métallique découpé en étoile et dont les extrémités plongent dans un godet contenant du mercure qui assure le passage du courant. Elle ne produit cependant qu'une force juste capable de la faire tourner, ne lui permettant pas d'application pratique.

Le premier commutateur utilisable expérimentalement a été inventé en 1832 par William Sturgeon. Le premier moteur à courant continu fabriqué avec l'intention d'être commercialisé a été inventé par Thomas Davenport en 1834 puis breveté en 1837⁷. Ces moteurs n'ont pas connu de développement industriel à cause du coût des batteries à l'époque.

On doit la vérification pratique de la réversibilité des machines électriques au physicien italien Antonio Pacinotti en 1864.

En 1869, l'inventeur belge Zénobe Gramme rend possible la réalisation des génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Il améliore les premières versions archaïques d'alternateurs (1867) et devient célèbre en retrouvant le principe de l'induit en anneau de Pacinotti. En 1871, il présentera à l'Académie des sciences de Paris la première génératrice industrielle de courant continu, que l'on appela machine de Gramme [1].

En 1873, Hippolyte Fontaine, partenaire de Zénobe Gramme, réalise la première application industrielle de la transmission électrique des forces. Tout en démontrant à l'occasion de l'exposition de Vienne, la réversibilité de la machine de Gramme, il présente une expérience associant dynamo et moteur à courant continu, séparés par 2 km de fils électriques. Avant

cette expérience décisive, l'énergie mécanique des cours d'eau devait être utilisée sur place, car intransportable sur de longues distances[1].

Le physicien Nikola Tesla dépose un brevet de « machine électrique-dynamo » en 1886 (publié en 1887).

La paternité de la machine asynchrone est controversée entre trois inventeurs : en 1887, le physicien Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone (publié en 1888), puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888.

En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, 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[1].

I.3 Définition de la machine électrique

Une machine électrique est un dispositif électromagnétique basé sur l'électromagnétisme permettant la conversion d'énergie électrique en travail ou énergie mécanique. Ce processus est réversible et peut servir à produire de l'électricité :

Les machines électriques produisant de l'énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont communément appelées des génératrices, dynamos ou alternateurs suivant la technologie utilisée [1].

Les machines électriques produisent une énergie mécanique à partir d'une énergie électrique sont communément appelées des moteurs.

Cependant, toutes ces machines électriques étant réversibles et susceptibles de ce comportement soit en «moteur» soit en «générateur» dans les quatre quadrants du plan couple vitesse. la distinction moteur/générateur se fait «communément» par rapport à l'usage final de la machine [1].

Les moteurs rotatifs produisent une énergie correspondent au produit d'un couple par un déplacement angulaire (rotation) tandis que les moteurs linéaires produisent une énergie correspondent au produit d'une force par un déplacement linéaires.

En dehors des machines électriques fonctionnant grâce à l'électromagnétisme il existe aussi des machines électrostatiques et d'autres utilisant l'effet piézoélectrique.

Les transformateurs sont aussi classifiés comme des machines électriques. Ils permettent de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie

électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différents, mais de même fréquence et de même forme[1].

I.4 Type de la machines électriques

I.4.1 Machine à courant continu

La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans les deux cas un champ magnétique est nécessaire aux différentes conversions. Cette machine est donc un convertisseur électromécanique [2].

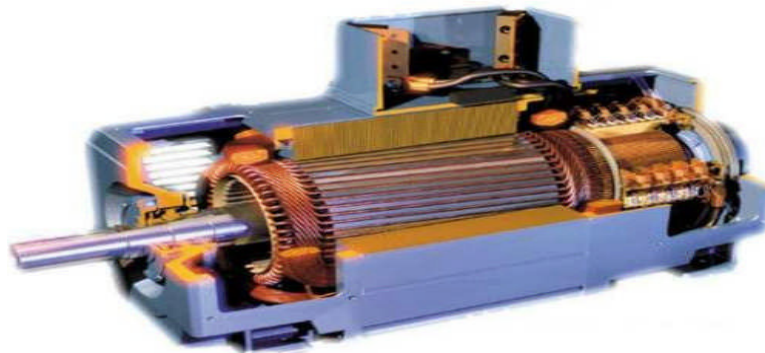


Fig. I.1:La machine à courant continu [2].

I.4.1.1 Symbole

Voici les différents symboles employés pour représenter la machine à courant continu, selon qu'elle fonctionne en génératrice (dynamo) ou en moteur et selon le type d'excitation employée [3].

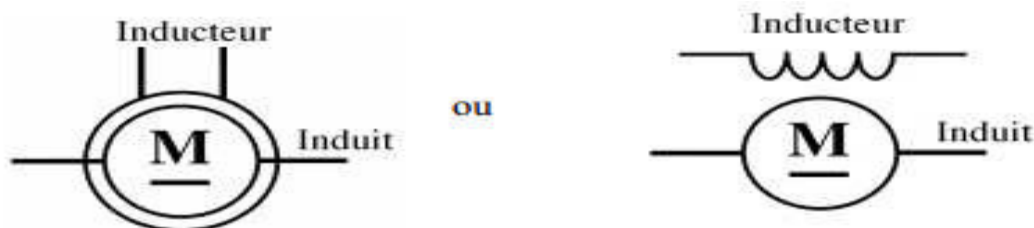


Figure I.2 :Symbole du M.C.C [2].

I.4.1.2 Constitution d'une machine à courant continu

Une machine à courant continu comprend quatre parties principales [2]:

- l'inducteur ;
- l'induit ;
- le collecteur ;
- les balais également appelés charbon.

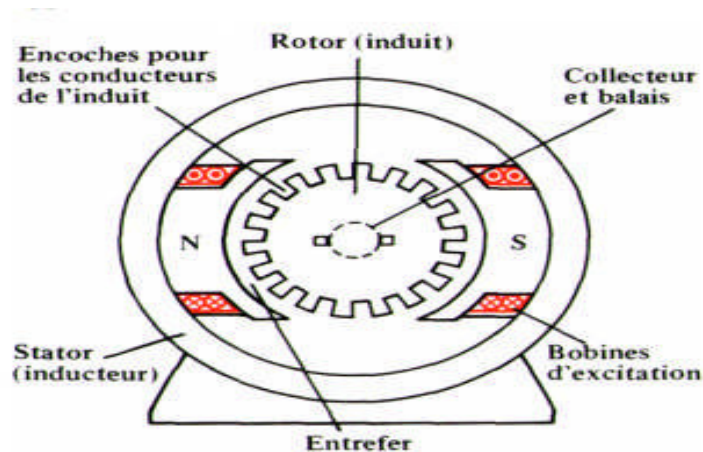


Figure. I.3 : Constitution d'une machine à courant continu [2].

a-L 'inducteur (ou circuit d'excitation)

Il est formé soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires. Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu, elles créent un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer, espace séparant la partie fixe et la partie mobile, où se situent les conducteurs [2].

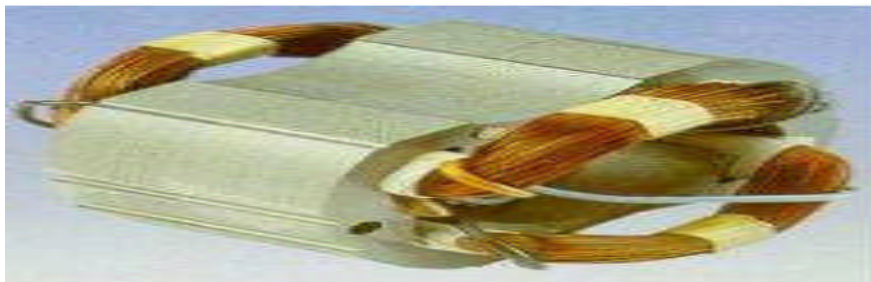


Fig. I.4: Système Inducteur d'une machine à courant continu[3].

b-L'induit (circuit de puissance)

L'induit est situé au rotor (partie tournante de la machine), c'est un bobinage parcouru par un courant continu I (courant d'induit)[3].

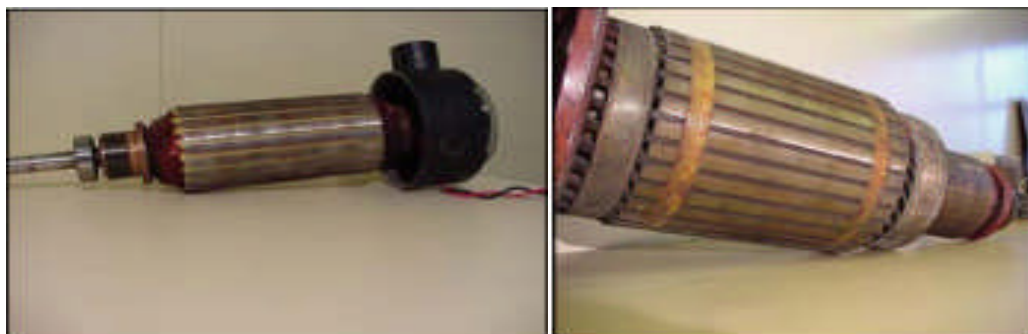


Fig. I.5 : système de l'induit d'une machine à courant continu [4].

c-Le collecteur et les balais

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit.

Les balais (ou charbons) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation.

Le dispositif collecteur / balais permet donc de faire circuler un courant dans l'induit [3].

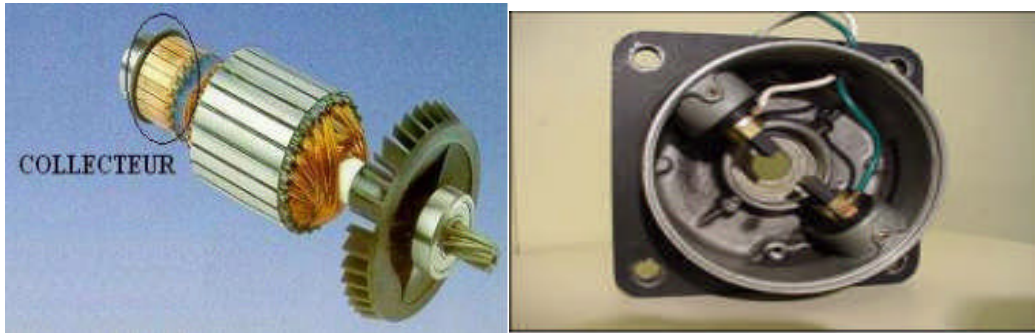


Fig. I.6 : système de collecteur et balais d'une machine à courant continu [3].

Modes d'excitation des machines à courant continu [3] :

- Excitation séparée.
- Excitation shunt.
- Excitation série.
- Excitation composée.

I.4.2 Machine synchrone

I.4.2.1 Constitution

Comme tout moteur, la machine synchrone est constituée d'une partie mobile : le rotor et d'une partie fixe : le stator [5].

a- Stator

Le stator est habituellement l'induit (siège de la transformation de puissance). Le stator est constitué d'un bobinage triphasé généralement couplé en étoile, découpé en p paire de pôles. Les bobinages sont insérés dans des encoches au sein de culasse en ferrite [5].

b- Rotor

De la même manière, l'inducteur est généralement le rotor. Suivant la technologie utilisée, le champ magnétique est créé par des bobinages ou des aimants permanents.

Lorsque que l'inducteur est bobiné, il est nécessaire de conserver des balais afin de l'alimenter (mais cette fois sans commutation) [5].

Cette année, seule la machine synchrone brushless (sans balai, donc à aimants permanents) est au programme. Cette structure réserve plusieurs avantages :

- Pas de pertes au rotor
- Pas besoin de bobinage et de balais au rotor
- Un rotor plus léger (car aimants plus légers que les bobinages) -> servomoteurs à faible inertie donc très réactifs
- Pour les faibles dimensions, induction plus importante.

Autrefois, cette technologie ne permettait pas de réaliser des machines de très fortes dimensions (cout trop important) mais avec les progrès réalisés sur les aimants, on observe une montée en puissance de ces moteurs.

Les aimants utilisés sont généralement soit des ferrites (faible induction mais bon marché) ou du Samarium cobalt (forte induction mais couteux) [5].

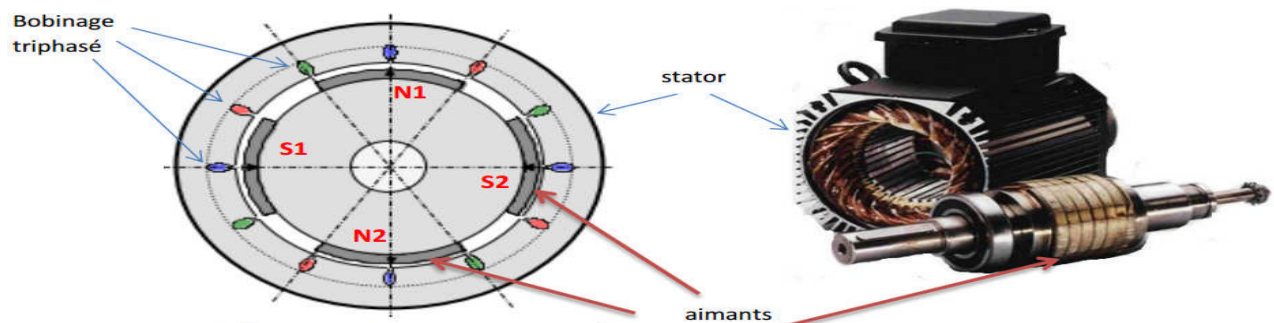


Fig. I.7 :Structure d'une machine à 2 paires de pôles [5].

I.4.2.2 Symbole



Fig. I.8 : Symbole du M.S [3].

I.4.2.3 Principe de fonctionnement

Le stator alimenté par un système de tensions triphasé crée un champ tournant dans l'entrefer. Ce champ magnétique tourne à la vitesse de $\frac{f}{p}$ tours par secondes avec f fréquence d'alimentation des bobinages statoriques, et p le nombre de paires de pôles.

Le rotor composé de p aimants permanents va alors s'aligner avec le champ tournant. Le rotor tourne ainsi à la même que le champ tournant. La vitesse de rotation du rotor est donc : $\Omega = \frac{\omega}{p}$

Le synchronisme des champs magnétiques induit et inducteur impose une procédure spécifique de démarrage (de couplage au réseau en mode alternateur).

- En mode moteur : un moteur synchrone ne peut démarrer directement à pleine tension depuis le réseau de fréquence 50Hz (Car le rotor a une vitesse nulle au démarrage $\Omega \neq \frac{\omega}{p}$).

Pour une alimentation directe en 50 Hz, il faudrait donc au préalable amener la charge à la vitesse nominale par un moteur auxiliaire puis connecter l'alimentation [5].

Pour les moteurs brushless, la solution consiste à utiliser un onduleur (système électronique recréant un système de tension triphasé de fréquence et d'amplitude voulu) . Autrefois, le rotor devait être lancé à la vitesse de synchronisme par un dispositif tierce et la variation de vitesse était impossible à réaliser.

- En mode alternateur (pour les machines à rotor bobiné essentiellement) : avant de connecter la machine synchrone au réseau, il faut lancer le rotor à la vitesse de synchronisme par un moteur annexe, puis en modulant le courant d'induction, amener la fem créée par l'alternateur à la même valeur que la tension du réseau [5].

I.4.3 Machine asynchrone

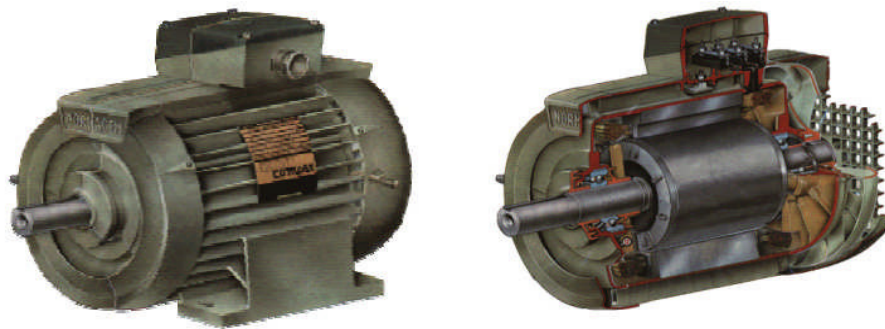


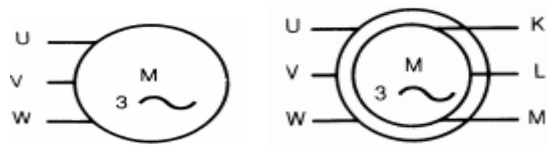
Fig. I.9 : La machine Asynchrone [6].

Les machines asynchrones sont très utilisées (on estime que 80% des moteurs de la planète sont des moteurs asynchrones) car leur coût est inférieur à celui des autres machines, de plus ces machines sont robustes. Comme les autres machines, la machine asynchrone est réversible et de très nombreuses génératrices asynchrones de puissance inférieure à quelques 5 MW fournissent un surplus d'énergie active aussi bien sur des réseaux terrestres qu'à bord des navires [6].

La gamme de puissance couverte par les machines asynchrones est très étendue : de quelques 5 W pour des moteurs asynchrones monophasés à bagues de déphasage, aux 36,8 MW des moteurs à cage d'écureuil [6].

I.4.3.1 Symboles

Voici les différents symboles employés pour représenter la machine asynchrone :



(a) Symbole du moteur (b) Symbole du moteur

asynchrone à cage d'écureuil. asynchrone à rotor bobiné.

Fig. I.10 : Symbole du MAS [6].

I.4.3.2 Constitution du moteur asynchrone

La machine asynchrone à cage est une machine électrique tournante assurant la tâche de la conversion d'énergie par induction électromagnétique [1].

Les parties constitutives de la machine asynchrone sont [1]:

- Le stator: partie fixe de la machine, constituée des disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- Le rotor: c'est la partie tournante où est constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement injecté,
- Les organes mécaniques: permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous ensembles.

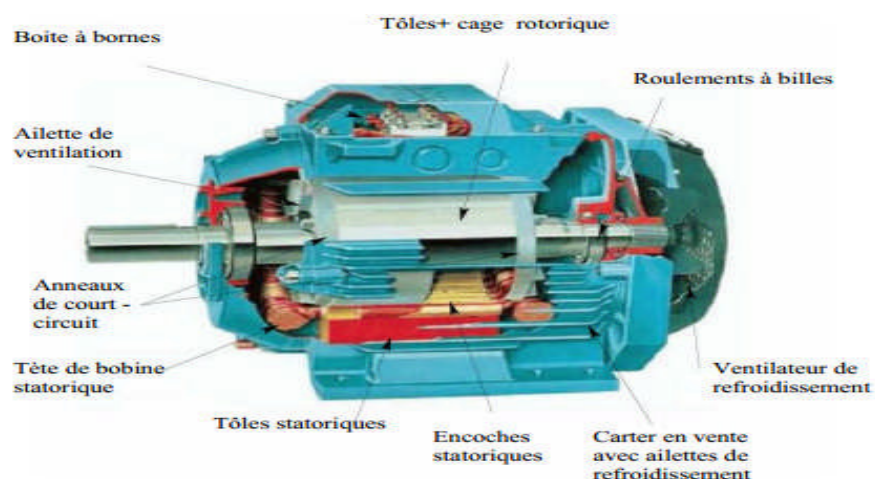
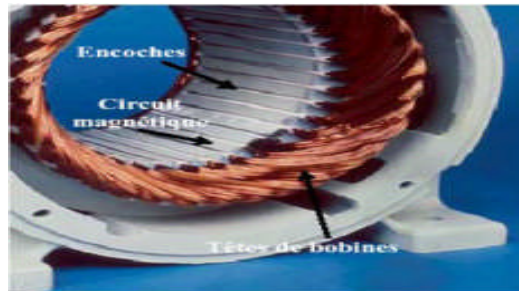


Fig. I.11: Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [7].

a- **Stator** : La carcasse statorique est feuilletée, ferromagnétique et porte des encoches dans les quelles prendront place les enroulements triphasés [6].



b- **Rotor**

1-Rotor à cage d'écureuil

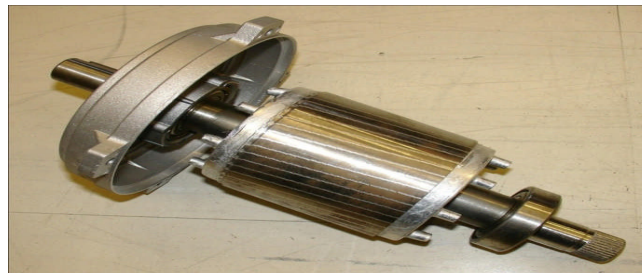
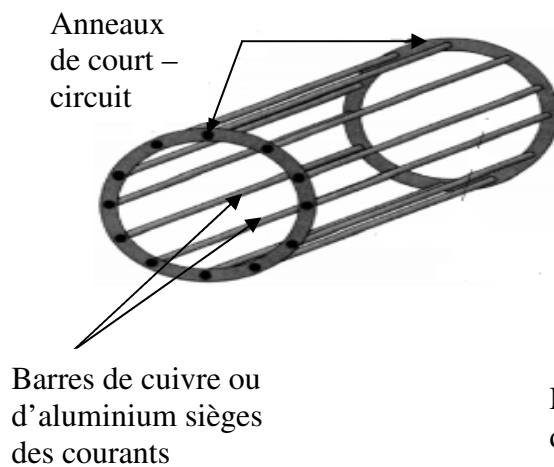


Figure I.12 : Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone [6].

Le rotor est constitué de barres conductrices court-circuitées par deux anneaux aux extrémités. Un empilement de tôles permet le maintien de cette cage d'écureuil [6]. Il n'existe aucun accès électrique à ce type de rotor.



Un moteur asynchrone à cage d'écureuil comporte 6 bornes correspondant aux trois bobines du stator. La représentation est la suivante [6] :

Moteur à cage d'écureuil :



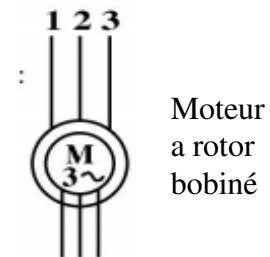
2-Rotor bobiné

Le rotor est constitué de tôles à encoches dans lesquelles on place des conducteurs (fils). Pour un moteur triphasé, ces conducteurs forment trois enroulements couplés en étoile [6].



Un système de trois bagues et de trois balais permet d'accéder à ces trois enroulements. Le point neutre de l'étoile n'est pas accessible.

Ce type de machine possède en tout neuf bornes (6 pour le stator et 3 pour le rotor)[6].



I.4.3.3 Utilisation

Moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est le moteur industriel par excellence, les moteurs asynchrones ont, pour leur grande majorité, un rotor à cage. Les progrès accomplis ces dernières années dans l'alimentation et la commande des machines n'ont fait que réduire la part des moteurs asynchrone à rotor bobiné par rapport à leurs homologues à cage d'écureuil [8].

Générateur asynchrone

Le générateur asynchrone est beaucoup plus rare que l'alternateur, mais on le trouve dans quelques applications de puissance limitée comme les microcentrales hydrauliques, il occupe surtout la plus grande part du marché des éoliennes, le plus souvent avec des machines à cage d'écureuil pour les puissances modestes, mais aussi avec des machines à rotor bobiné pour les installations plus importantes [8].

I.4.3.4 principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant (*Figure I.13*). De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur: le stator

étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant [8]:

$$n_1 = \frac{F \times 60}{P} \quad \text{I.1}$$

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone (sans collecteur) n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), c'est-à-dire, lorsque $n \neq n_1$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $n = n_1$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport :

$$g = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad \text{I.2}$$

Est appelé glissement d'une machine asynchrone [8].

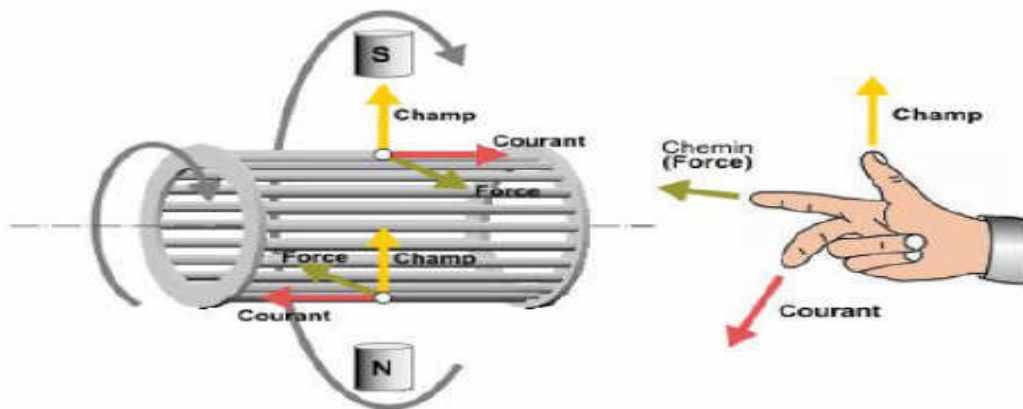


Fig.I.13 : Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage [8].

I.4.3.5 Démarrage d'un moteur asynchrone

Il faut que le couple de démarrage C_{emD} soit le plus grand possible.

Comme

$$C_{emD} = C_{em}(g = 1) = 3 \cdot \frac{V_1^2}{\Omega_s} \cdot \frac{R}{(R)^2 + (L\omega)^2} \quad \text{I.3}$$

C_{emD} augmente si la résistance R augmente, il faut donc que la résistance rotorique r_2 augmente. L'idéal est d'avoir le couple maximum au démarrage, pour cela on rajoute des résistances additionnelles en série au rotor lors du démarrage. Il faut que [6] :

$$R_{total} = L\omega \Rightarrow \boxed{\frac{r_2 + r_{add}}{m^2} = L\omega}$$

I.4

- pour un moteur à rotor bobiné : on rajoute un rhéostat de démarrage tel que les résistances additionnelles vérifient cette condition. On diminue progressivement radd lors du démarrage.
- Pour un moteur à cage d'écureuil : on utilise des encoches profondes qui ont pour effet de faire varier la résistance équivalente r2 en fonction de la vitesse (r2 plus grand au démarrage).

I.4.3.6 Variation de vitesse d'un moteur asynchrone

On sait que :

$$n = n_s(1 - g) = \frac{f}{p}(1 - g)$$

I.5

Trois paramètres peuvent faire varier la vitesse : p, g et f.

- Nombre de paires de pôles p : on peut par construction et à l'aide d'un commutateur passer de p = 1 à p = 2 sur un moteur asynchrone. Deux vitesses sont ainsi disponibles [6].
- Glissement g : Les pertes joules au rotor sont fonction du glissement : En récupérant ces pertes au rotor, on peut faire varier le glissement donc la vitesse (cascade hyposynchrone pour les très fortes puissances) [6].
- Fréquence f : on utilise un onduleur pour faire varier la fréquence, donc la vitesse. C'est aujourd'hui pratiquement la seule véritable variation de vitesse [6].

I.5 Les avantages et les inconvénients des machines asynchrones

a-Avantages

Il y a plusieurs avantages dans le moteur asynchrone [8]:

- Structure simple.

- Robuste et facile à construire.
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Il tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone.
- Il est utilisée pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement à vitesse.

b-Inconvénients

Parmi les inconvénients de la machine asynchrone [8]:

- Le couple de démarrage très élevé que les couples nominales.
- La vitesse dépend de la charge.
- Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse).
- La structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage.

I.6 Conclusion

Nous a vont exposer dans ce chapitre les machines électriques triphasées à courant alternatif .Ensuite, nous avons exploré les différents constituants des machines électriques tournantes. Enfin on a présente les avantages et les inconvénients de la machine Asynchrone.

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons commencer par présenter certaines notions de base concernant les activités de maintenance. Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies[13].

II.2 La Maintenance

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la disponibilité des systèmes industriels, c'est-à-dire, d'assurer que le système fonctionne lorsqu'on le sollicite. La responsabilité de cette tâche repose sur la maintenance. Selon l'association française de normalisation (AFNOR), la maintenance est « ensembles des activités destinées à maintenir ou à établir un bien dans un état pour accomplir une fonction requise ». Il y a deux grandes classes de la maintenance [9] :

- Maintenance corrective ;
- Maintenance préventive : - systématique ;
- conditionnelle

II.2.1 Maintenance Corrective

C'est un ensemble d'activités réalisées après la défaillance d'un bien. Autrement dit, la maintenance corrective est effectuée après la détection d'une panne : Elle devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines. Ce type de maintenance sera réservé aux matériels peu coûteux, non stratégiques pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité [9].

II.2.2 Maintenance Préventive

Ce type de maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des équipements au cours de l'utilisation. La mise en pratique de ce type de maintenance nécessite la décomposition des sous-systèmes en composants (roulement, circuit magnétique,etc.). Les buts de la maintenance préventive, sont [9] :

- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Diminuer le budget de la maintenance.
- Supprimer les causes des accidents graves.

On distingue deux types de la maintenance préventive :

II.2.2.1 Maintenance préventive systématique

La maintenance systématique est un type de maintenance planifiée dans le temps (graissage, lubrification, nettoyage, dépoussiérage, calibrage,...). Il s'agit là d'éviter les causes de défaillances et de vieillissement des composantes du système [9].

II.2.2.2 Maintenance préventive conditionnelle

C'est un type de maintenance déclenché suite à un symptôme observable (température, vibration, jeu excessif, ...) permettant de prédire une défaillance prochaine. Il s'agit là d'intervenir juste avant que la panne ne survienne. La maintenance préventive conditionnelle est réalisée dès lors qu'une mesure dépasse une valeur précise (seuil) d'une grandeur physique (température, pression...).

Les outils ou bien les signaux qui peuvent être utilisés par la maintenance préventive conditionnelle sont [9] :

- mesure de température, thermographie infrarouge (lignage, roulements, paliers)
- mesures de pression (paliers) ;
- mesure de débit (paliers) ;
- analyse d'huile (roulements, paliers, engrenages) ;
- mesure de vibration (déséquilibre, lignage, roulements, paliers, engrenages, jeux, etc.);
- mesure du courant statorique, du couple, de la vitesse ou de la puissance

II.3 Définition et objectif du diagnostic

II.3.1 Définition

La définition du diagnostic selon la norme AFNOR et CEI stipule que : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test» [10].

Cette définition résume les deux tâches essentielles du diagnostic [10]:

- Observer les symptômes de la défaillance ;
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur les observations.

II.3.2 Objectif du diagnostic

L'objectif d'un système de diagnostic est de prévoir l'apparition d'un défaut le plus rapidement possible et le plus précisément possible. Pour pouvoir expliquer ce principe avec plus de précision, nous allons tout d'abord définir ce que nous entendons par défaut, puis nous rappellerons les fonctions du diagnostic telles que la détection, la localisation, et l'identification des défauts [10].

II.3.3 Terminologies et concepts

Une anomalie : est une particularité non conforme à la loi naturelle ou logique

La panne : est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.

Un défaut : est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications.

Les défauts sont classifiés d'une façon similaire aux défaillances.

Une défaillance : est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.

Une perturbation : Consiste en tout phénomène conçu comme normal influençant un processus, non ou mal, représenté par un modèle de référence.

Un résidu : est un signal conçu pour être un indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales, nul en absence de défauts et non nul en leur présence.

Un symptôme : Est caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportemental anormal.

La surveillance : est une tâche continue, réalisée en temps réel, qui permet de déterminer l'état d'un système physique, elle consiste en l'enregistrement des informations ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication des anomalies du comportement.

La sensibilité : représente la capacité d'un système de diagnostic à générer des résidus sensibles aux défauts à détecter.

La supervision : est la surveillance d'un système physique et la prise de décision appropriée en vue de maintenir son opération lors de l'apparition de défauts [10].

II.4 Défauts des machines électriques tournantes

Dans ce paragraphe sont présentés différents défauts des machines électriques, leurs origines et leur classification.

Une défaillance de machine électrique représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement.

Les raisons de défaillances dans les machines tournantes électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, l'environnement de travail, nature de la charge et le calendrier de maintenance [11].

D'après, les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts

externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine.

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

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

Tableau II.1 : Défauts des machines électriques selon leurs origines [11].

II.5 Différents défauts dans la machine asynchrone

Bien que les MAS soient réputées robustes, elles peuvent parfois présenter différents types de défauts, qui peuvent être soit d'origine électrique ou mécanique.

Les sources des défauts du moteur peuvent être internes, externes ou dues à l'environnement, comme présenté à la figure II.1. Les défauts internes peuvent être classifiés selon leurs origines c'est-à-dire électriques et mécaniques. Habituellement, d'autres types de défauts de roulement et

de refroidissement se rapportent aux défauts du rotor parce qu'ils appartiennent aux pièces mobiles [12].

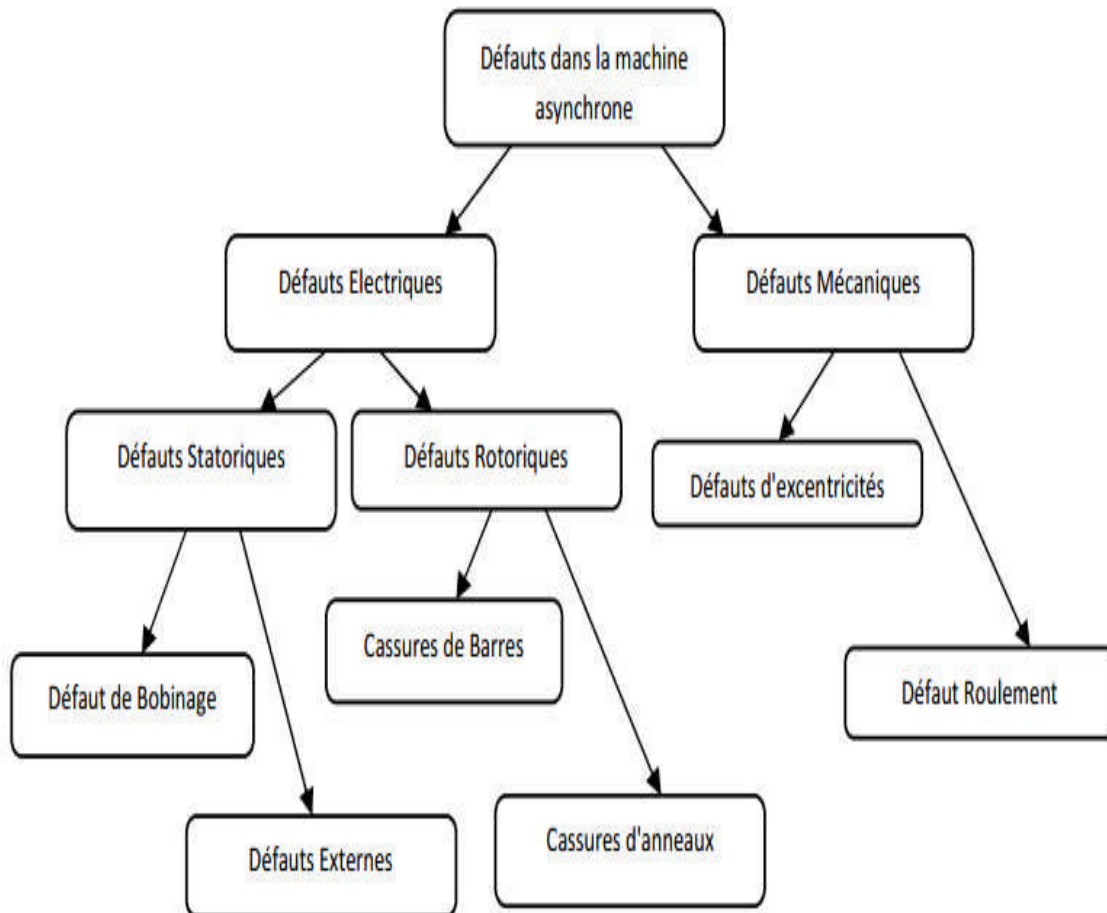


Figure II.1 : Les défauts de la machine asynchrone triphasée à cage [12].

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants (figure II.2) [13]:

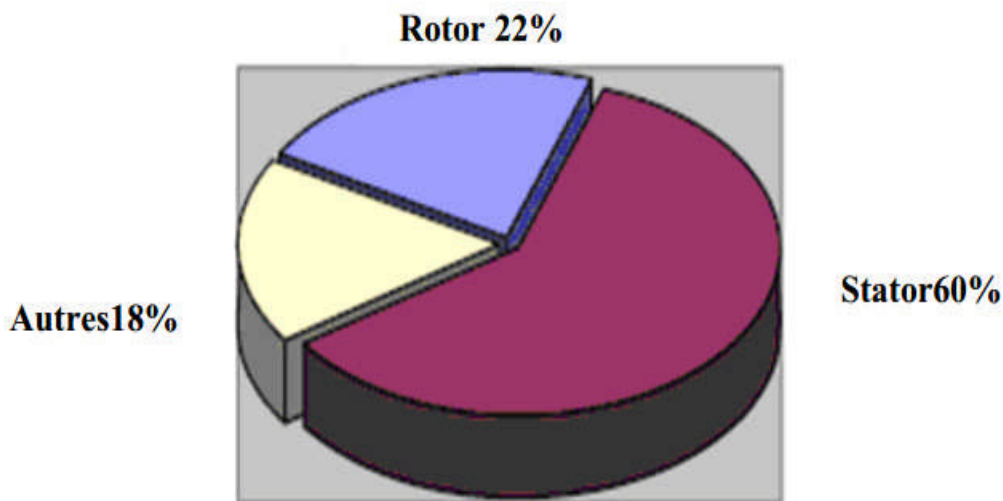


Figure II.2 : Proportion des défauts [13].

II.5.1 Défauts statoriques

Les défauts statoriques se manifestent sous la forme d'un court-circuit inter-spires, d'un court-circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse [14] (figures II.3). Il est schématisé par la connexion franche entre deux points du bobinage. Le court-circuit entre phases apparaît préférentiellement dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. Le court-circuit entre spires de la même phase peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement.

Un court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Cependant, un court-circuit entre une phase et le neutre (via la carcasse) ou entre spires d'une même phase. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui a une répercussion directe sur le couple. Ce type de défaut perturbe aussi sensiblement les commandes développées sur la base du modèle de Park (hypothèse d'un modèle équilibré) [14].

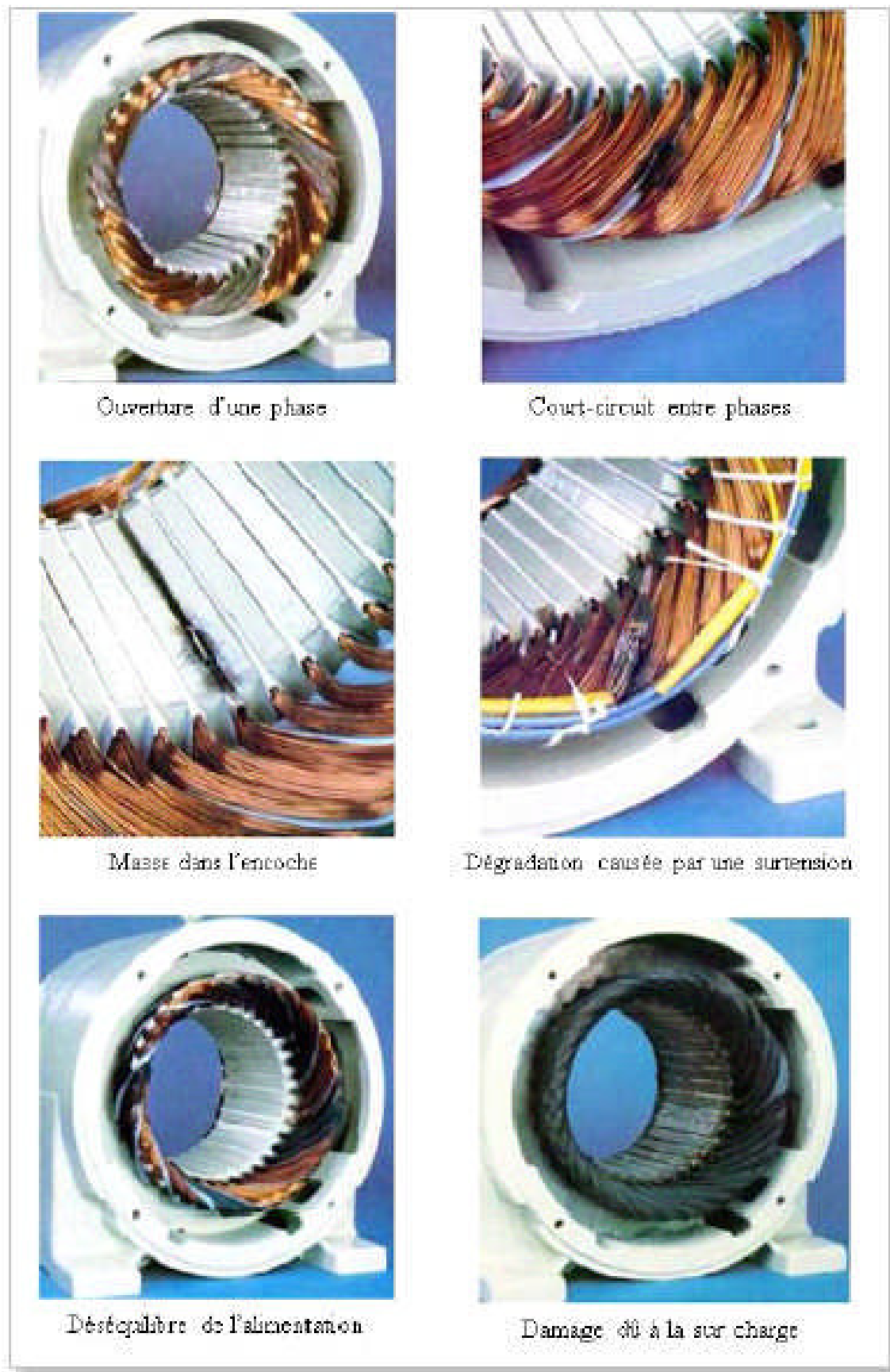


Figure II.3 : Différents défauts au niveau de stator de la machine asynchrone [14].

II.5.2 Défauts rotoriques

a-Excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer :

Par des défauts d'excentricité statique, dynamique [14] ou mixte :

- Le défaut d'excentricité statique est généralement dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator, dont la cause la plus fréquente est un défaut de centrage des asques.
- Le défaut d'excentricité dynamique peut être cause par une déformation du cylindre rotorique, ou la détérioration des roulements à billes.
- L'excentricité mixte, la plus fréquente, est la combinaison d'une excentricité statique et d'une excentricité dynamique.

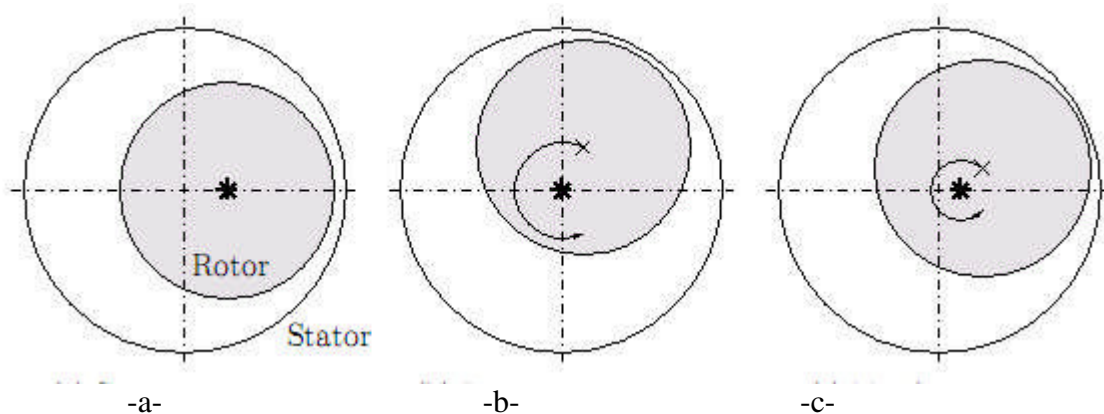


Figure II.4 : Types d'excentricité : (a) statique; (b) dynamique ; (c) mixte [11].

Une analyse vibratoire, une analyse par ultrasons, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permettent de détecter ces types de défaillance. Nous pouvons trouver dans la littérature des ouvrages très complets qui traitent ces divers problèmes

b. Défauts des roulements

La raison principale des défaillances des machines concerne les défauts des roulements à billes qui ont de nombreuses causes telles que la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou encore des causes électriques comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs à MLI.

Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations.

Il a et montre également que les défauts de roulements induisent des variations dans le couple de charge de la machine asynchrone [11].

c. Rupture de barre et d'anneau de court-circuit

Un rotor bobiné peut être affecté par les mêmes défauts que le stator. Pour un rotor à cage les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit (figure II.5).

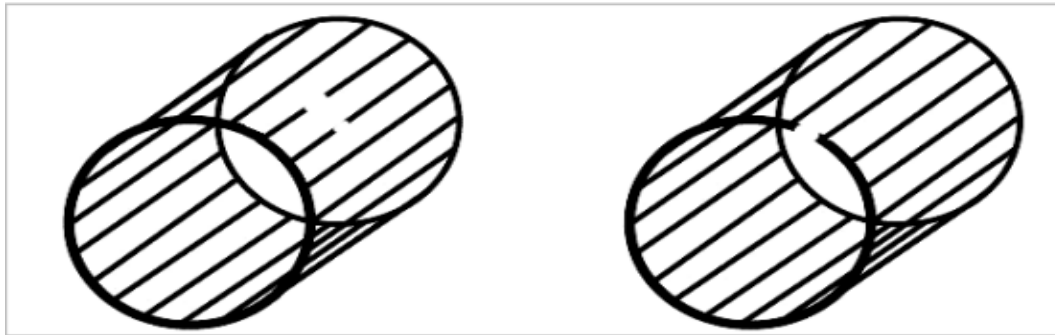


Figure II.5 : Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit [14].

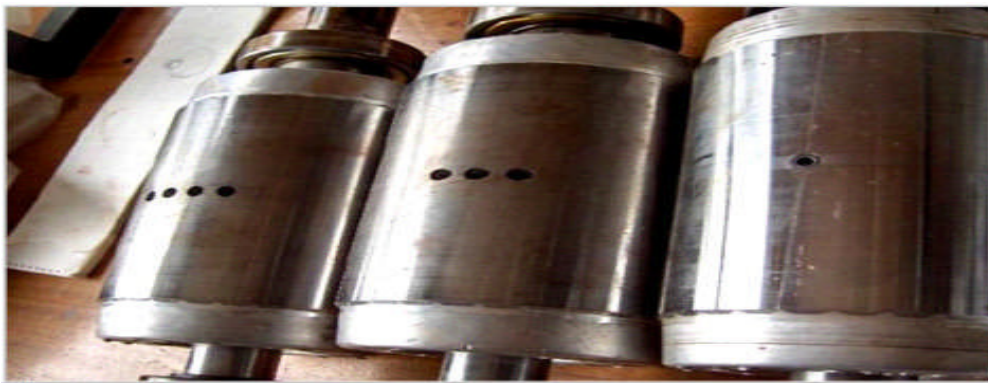


Figure II.6 : Défaut de rupture de barres [14].

Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, .), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures) [14]. Ce défaut fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante). Lorsque l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statorique.

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la

cassure de barres. En fait les cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotorique. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et donc des courants peuvent entraîner leur cassure [14].

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

Devant la multitude des défauts envisageables et les conséquences de leurs apparitions, les techniques de surveillance se sont rapidement imposées auprès des utilisateurs des machines électriques. Elles commencent également à intéresser les concepteurs [14].

d- Défaillances de l'arbre

A cause de l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction, l'arbre peut comprendre des micros – fissures; et avec le temps, ces fissures peuvent mener à une fracture de l'arbre provoquant ainsi un arrêt immédiat de la machine. La robustesse mécanique de l'arbre peut être affectée par des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement. Une excentricité statique et/ou dynamique ou un surdimensionnement de la charge mécanique peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire [9].

e- Défaillances du ventilateur

Si le ventilateur n'est pas correctement fixé sur l'arbre ou s'il comporte un nombre de pales casées, on aboutit à une augmentation anormale de la température de la machine [9].

II.6 Généralité sur le diagnostic

Le diagnostic est un ensemble des actions destinées à identifier les causes probables de la défaillance. Les deux principales tâches de diagnostic sont [12]:

- La détection et la localisation des défauts.
- La détection consiste à signaler l'existence du défaut, tandis que la localisation ait pour objet d'identifier le type de défaut.

II.6.1 Étapes du diagnostic

La sélection de la méthode de diagnostic la plus appropriée à un système industriel donné ne peut se faire qu'après un recensement des besoins et des connaissances disponibles.

L'inventaire des éléments à étudier est le suivant [12]:

- nature des causes de défaillances à localiser,

- connaissance des symptômes associés aux défaillances induites par les causes,
- maîtrise des moyens de mesure des symptômes,
- maîtrise des moyens de traitement des symptômes,
- connaissance des mécanismes physiques entre les causes et les effets,
- inventaire du retour d'expérience,
- recensement des expertises disponibles,
- définition du niveau de confiance dans le diagnostic,
- identification des utilisateurs finaux du diagnostic.

II.7 Différents Méthodes de Diagnostic

Afin de bien classer notre travail, il est très important de prendre une idée générale sur les différentes méthodes utilisées pour le diagnostic des anomalies dans les machines électriques. Puisque beaucoup des chercheurs travaillent sur cet axe depuis longtemps, il existe par conséquent, plusieurs approches et techniques qui sont présentées dans un très grand nombre des travaux. Dans cette partie, nous allons décrire seulement les méthodes les plus connues en citant également beaucoup de références pour bien orienter les lecteurs. Il est important de savoir que les différentes méthodes du diagnostic sont classées selon l'approche qu'ils l'appartiennent. En effet, il existe deux approches [12] :

- approches sans modèle,
- approches avec modèle.

I.7.1- Méthodes sans modèle

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal [14].

Les méthodes se basant sur l'analyse des signaux d'acquisition ont l'avantage d'être indépendante des fluctuations internes du système. Ainsi, l'information contenue dans les signaux n'est pas affectée par une éventuelle erreur de modélisation.

Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que : les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations,...etc [14].

I.7.2- Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statorique pendant la déconnexion de la machine du réseau.

En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que le non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées [14].

I.7.3- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

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

L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'Etat de santé de la machine [14].

I.7.4- Diagnostic par analyse du courant statorique

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (MoteurCurrent Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace) [14].

I.7.5- Diagnostic par analyse du vecteur de Park

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir :

La première utilise les grandeurs biphasées $i_{s\alpha}$ et $i_{s\beta}$, qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de Lissajous : $i_{s\beta} = f(i_{s\alpha})$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut.

La deuxième est appelée Vecteur de Park Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park. Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statorique ou rotorique et même les défauts de roulement [14].

I.7.6- Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle. Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisent un ensemble de règles et de faits

(données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance.

Parmi ces méthodes, on peut citer [14] :

- Logique floue,
- Réseaux neuronaux,
- Reconnaissance des formes
- Formes

I.8 Techniques de traitement de signal utilisé dans le diagnostic

I.8.1 Transformée de fourrier rapide (FFT)

Considérons le signal $X(t)$ à temps continu. Si X est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence f est la suivante [12] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi f t} dt$$

II.1

Son inverse est donnée par:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{-2\pi f t} df$$

II.2

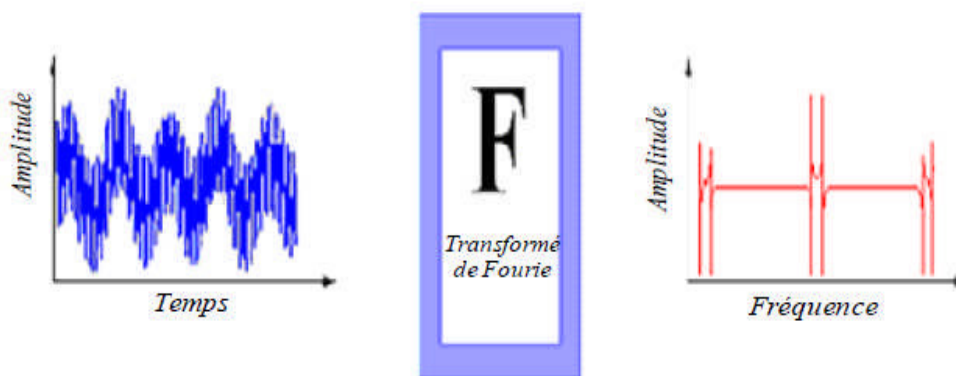


Figure II.7 : Représentation temporelle vers fréquentielle [12].

Sa transformée de Fourier discrète de N points avec une période d'échantillonnage T est donnée par:

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x(kT)e^{-\frac{2\pi kT}{NT}}$$

II.3

et sa relation inverse est donnée par:

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{-j\frac{2\pi kT}{NT}}$$

II.4

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier discrète. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la transformée de Fourier discrète, de $\log_2 N$. Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal $x(t)$. En effet, la FFT décompose le signal $x(t)$ sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux $\{ e^{j2\pi k t / NT} \}$ malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate [12].

Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence. Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps. Dans le cas de l'existence de sauts d'impulsions ou de changements de fréquence par exemple, la FFT ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent dans le signal. Ces phénomènes sont non stationnaires et du fait qu'ils sont brefs et souvent à caractère oscillatoire, leur contenu spectral est difficile à mettre en évidence.

Pour résoudre ce problème, GABOR (1964) a introduit la transformée de Fourier à court terme qui se base sur le fenêtrage (Windowing). Il s'agit de segmenter en tranche de temps fixes le signal à analyser et d'appliquer par la suite la Transformée de Fourier à chaque tranche. La suite logique pour la résolution de ce problème a été l'élaboration d'un puissant outil localisé en temps et en fréquences dénommé la transformée en Ondelettes.

I.8.2 Transformée on ondelette (TO)

La transformée en ondelette est outil récent de traitement de signal. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de fourrier. Cependant les ondelettes sont des fonctions oscillants au sens large. Rapidement amortie, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en

temps ou en fréquence. Ce qui les différencie principalement de l'analyse Temps-fréquence classique [15].



Figure 11.8 : Représentation temporelle vers ondelettes [15].

II.9 Conclusion

Nous avons, dans ce chapitre, nous rappelons les différents défauts sur la machine asynchrone à cage d'écureuil et quelques techniques de diagnostic pour la détection d'un défaut, qu'il soit mécanique ou électrique, s'effectue majoritairement par la surveillance de l'amplitude des composantes spécifiques dans le spectre fréquentiel d'une grandeur mesurable.

III.1 Introduction :

En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.)[17].

Concrètement, cela permet par exemple de calculer numériquement le comportement d'objets même très complexes, à condition qu'ils soient continus et décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire : mouvement d'une corde secouée par l'un de ses bouts, comportement d'un fluide arrivant à grande vitesse sur un obstacle, déformation d'une structure métallique, etc. [17].

III.2 Historique

La méthode des éléments finis est apparue avec l'analyse des structures, née vers 1850. Les premières études menées sur la résistance des matériaux dans des conditions de petites déformations, ce qui a permis d'obtenir des systèmes simples résolus « manuellement », notamment par Maxwell, Castigliano, Mohr. La formalisation, et le concept mathématique d'élément fini est apparu bien plus tard, vers 1940 et la définition est posée par Newmark, Hrenikoff, Mc Henry et Courant [17].

L'arrivée du calcul numérique et de méthodes de résolution performantes par ordinateur a permis de populariser la méthode [17].

III.3 Méthode des éléments finis

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

pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul (Logiciel) d'où une grande souplesse d'utilisation [18].

Pour analyser des dispositifs électriques, magnétiques et thermiques par la méthode des éléments finis dans le logiciel Flux (2D/3D), Cinq étapes essentielles pour la création et l'analyse des résultats du projet [17] :

- Construction géométrique
- Génération du maillage
- Propriétés physique
- Résolution
- Exploitation des résultats

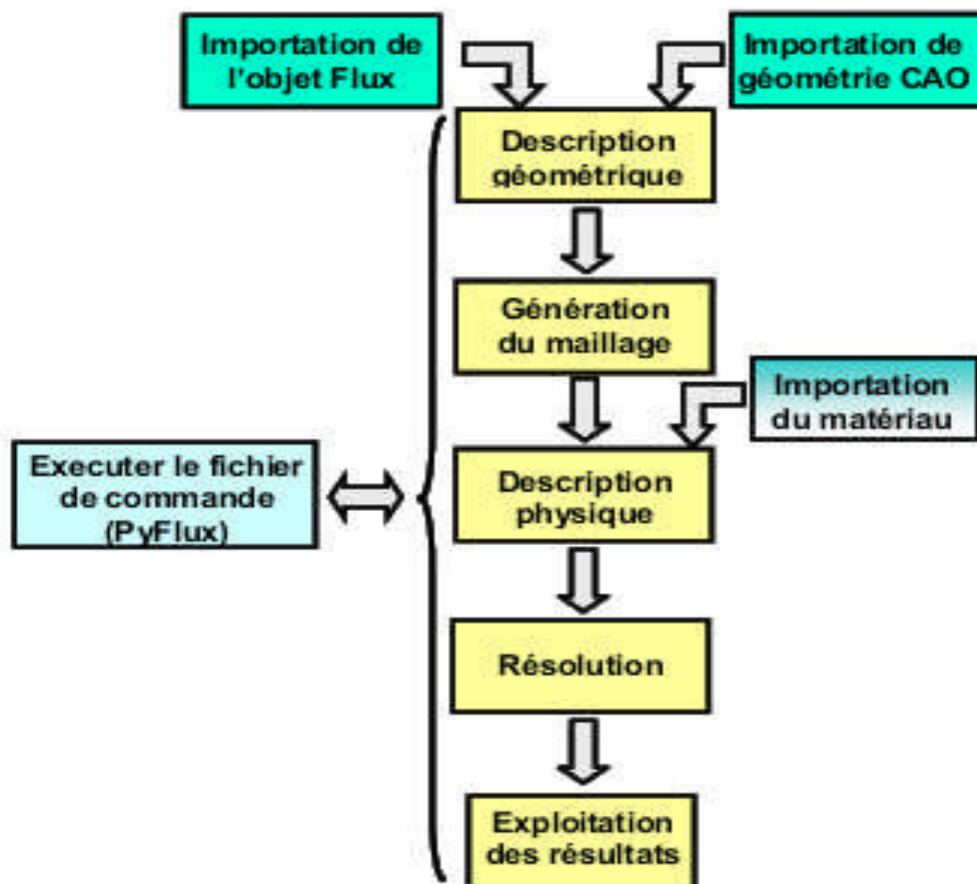


Figure. III.1 : Construction d'un projet Flux (2D/3D) [17].

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 définites comme suit [18] :

➤ Les relations de couplage électromagnétique.

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J} \quad (\text{III.1})$$

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

➤ Les relations de la conservation des flux.

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{III.3})$$

$$\text{div}\vec{E} = 0 \quad (\text{III.4})$$

➤ La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques

$$\vec{B} = \mu (\vec{H}) = \vec{B}_r \quad (\text{III.5})$$

➤ La relation de la loi d'Ohm

$$\vec{D} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{III.6})$$

Où,

\vec{H} : champ magnétique [A/m²],

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

III.4 Modèle employé

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

II.4.1 Mode magnétostatique

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courant induits) de la machine car il 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 [18].

Le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent [18] :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (III.7)$$

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

$$\vec{B} = \mu (\vec{H}) = \vec{B}_r \quad (III.9)$$

La condition (III.8) permet de définir une fonction en vecteur potentiel A telle que:

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (III.10)$$

Pour que A soit totalement définit, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition $div(A) = 0$ appelée jauge de Coulomb. Qui vérifiée automatiquement l'unicité de la solution [18].

Par la substitution de (III.10) et (III.9) dans (II.7) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant [18]:

$$\overrightarrow{rot} (v. \overrightarrow{rot} \vec{A}) = \vec{j} + \overrightarrow{rot} (v. \vec{B}_r) \quad (III.11)$$

Où

$v=1/\mu$: est la réflectivité magnétique.

III.4.2 Mode magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources du courant ou de la tension varient en fonction du temps.

Le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

Et qui suppose la densité de courant sinusoïdale, et simuler en régime permanent. Ce qui permet d'obtenir des valeurs convenables du courant efficace. Ce mode pourra être utilisé pour étudier un schéma équivalent de la machine.

Le système à résoudre est le suivant [18] :

$$\overrightarrow{rot} (v \cdot \overrightarrow{rot} \vec{A}) + j\omega \sigma \vec{A} = \vec{J} \quad (\text{III.12})$$

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

III.4.3 Mode magnétique transitoire

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

Donc le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{rot} (v \cdot \overrightarrow{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{rot} \vec{B}_r + \sigma \overrightarrow{grad} v = 0 \quad (\text{III.13})$$

III.5 Principe de la méthode des éléments finis

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, Le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être approchée par des

fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), dont l'expression varie d'un type à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [19].

Pour un élément triangulaire on a :

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

Pour les éléments quadrilatéraux on a :

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

Les constantes a b c 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 :

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

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 du potentiel de ses trois sommets (Figure. III.2)

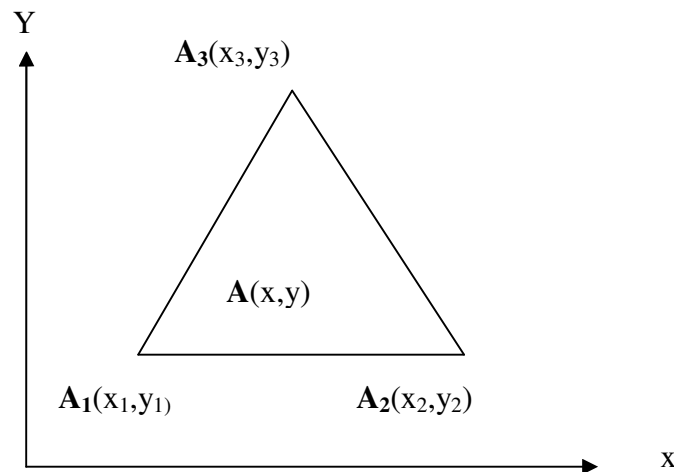


Figure.III.2 : fonction d'interpolation d'un élément [19].

III.6 Présentation du logiciel Flux2D

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétique et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Le logiciel permet de calculer 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 [19].

III.7 Application à la simulation de la MAS

Les caractéristiques de la machine asynchrone étudiées au tableau III.1

Partie	Paramètres	Valeurs
MACHINE	Puissance	7.5 KW
	Tension	380V
	Fréquence	50Hz
	Vitesse nominale	2900tr/min
	Nombre de paires pôles	2p=2
	Longueur du paquet de tôles	125mm
STATOR	Nombre d'encoches	24
	Nombre de spires par phase	208
	Connexion	Y
	Diamètre extérieur	212 mm
	Diamètre intérieur	120 mm
	Résistance par phase	0.9
ROTOR	Nombre d'encoche	20
	Diamètre extérieur	119mm
	Diamètre intérieur	40mm
ENTREFER	Epaisseur	0.5mm

Tbleau.III.1 : Paramètres globales de la machine

La figure III.3 illustre le répartition du bobinage dans les encoches statoriques qui a $W1 = 104$ tours par encoche

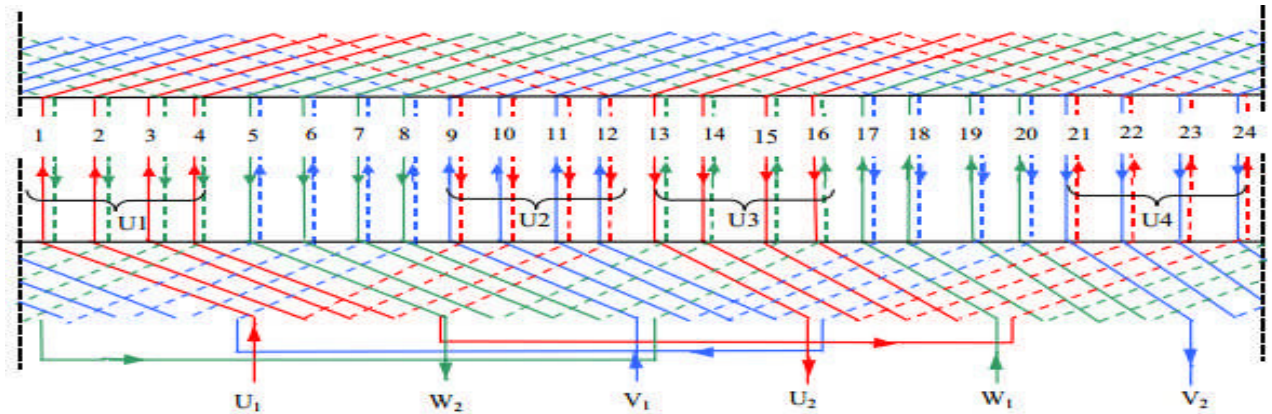


Figure.III.3 : Type de bobinage du stator

La figure III.4 définit le domaine de calcul du champ électromagnétique dans la machine.

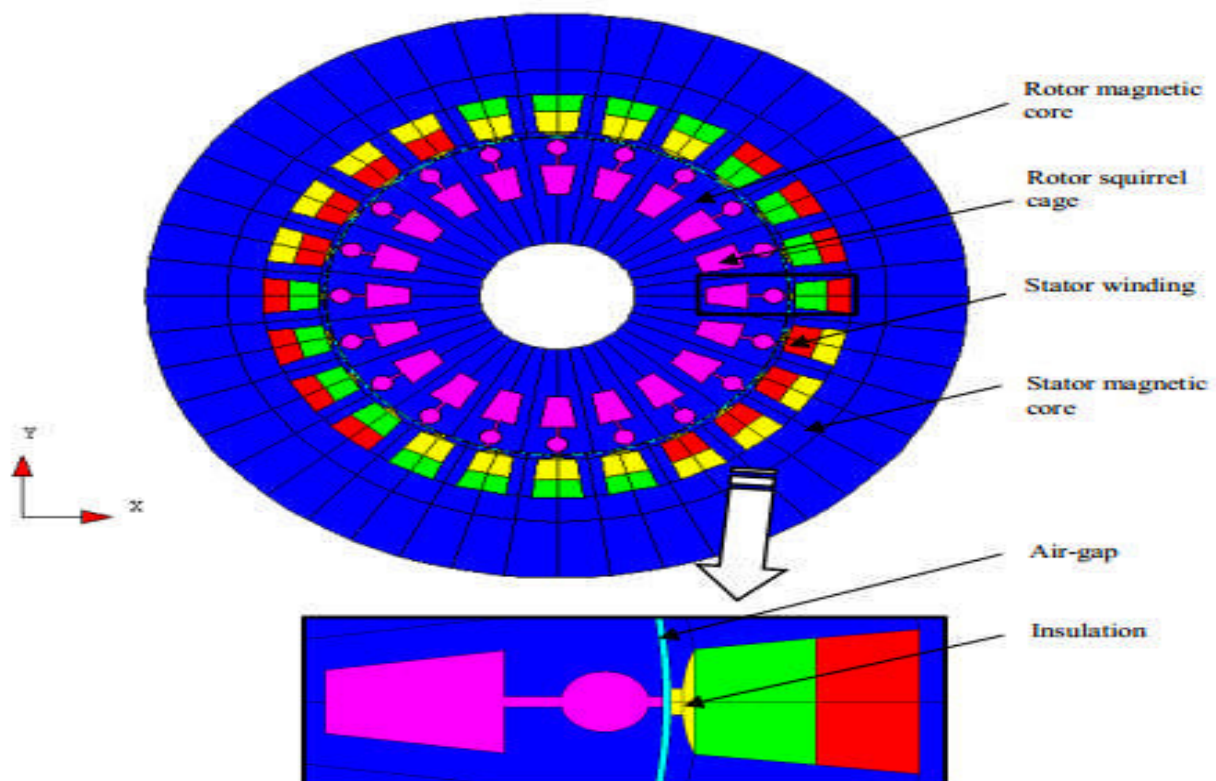


Figure.III.4 : Régions du domaine de calcul du champ électromagnétique.

La figure III.5 représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.

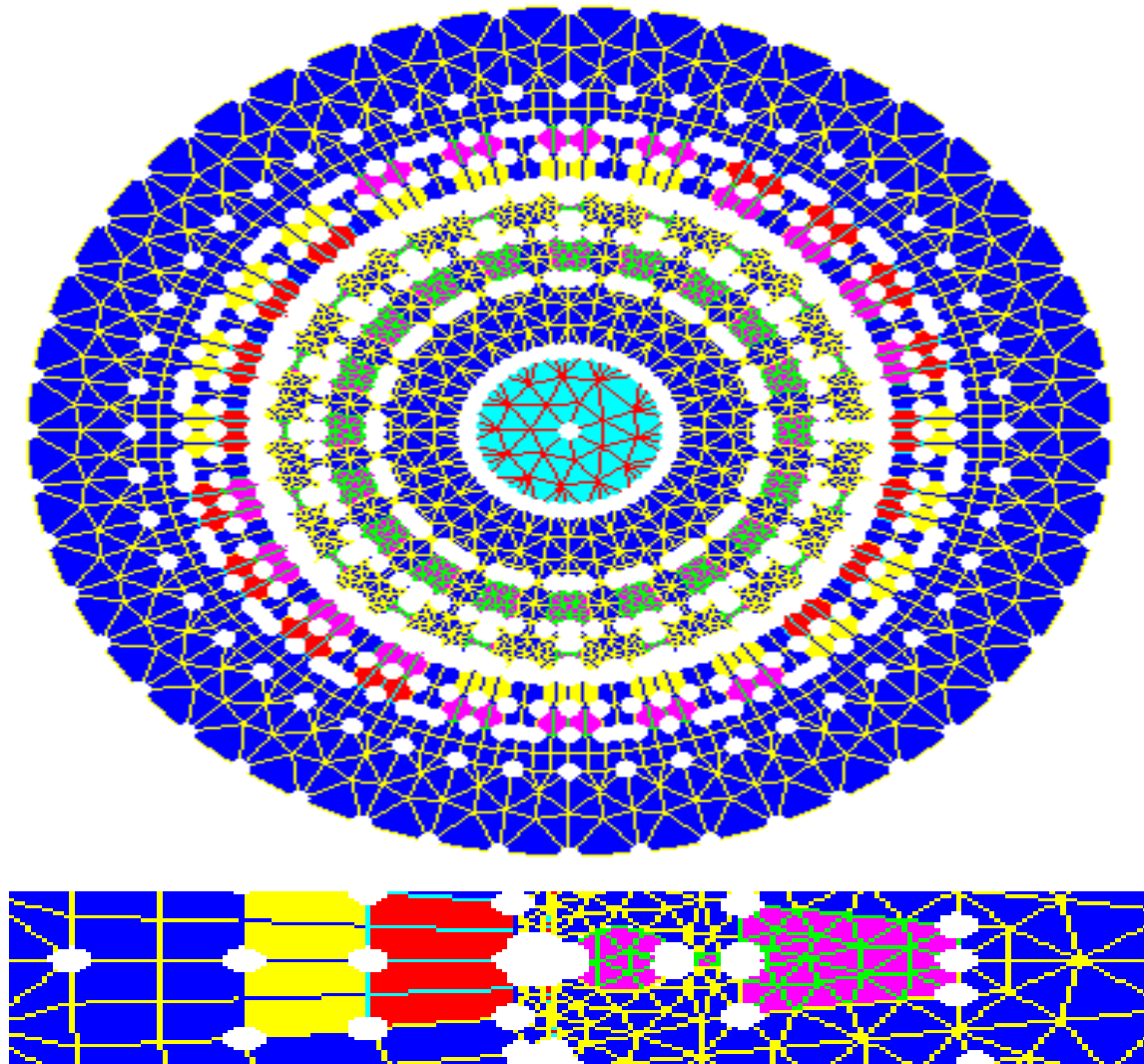


Figure.III.5 : Répartition du maillage.

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

III.7.1 .Matériaux conducteurs

Pour notre modèle on utilise trois types matériaux : MAGNETICOORE (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.

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

III.7.2 Matériaux magnétiques

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

H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]
0.	0.	2000	1.61	7000	1.83	40000	2.14
300	0.66	3000	1.69	8000	1.85	50000	2.16
500	1.09	4000	1.73	10000	1.89	60000	2.18
1000	1.45	5000	1.76	20000	2.04	70000	2.1925
1500	1.56	6000	1.79	30000	2.11		

Tableau III.2 : $B(H)$ du matériau magnétique

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

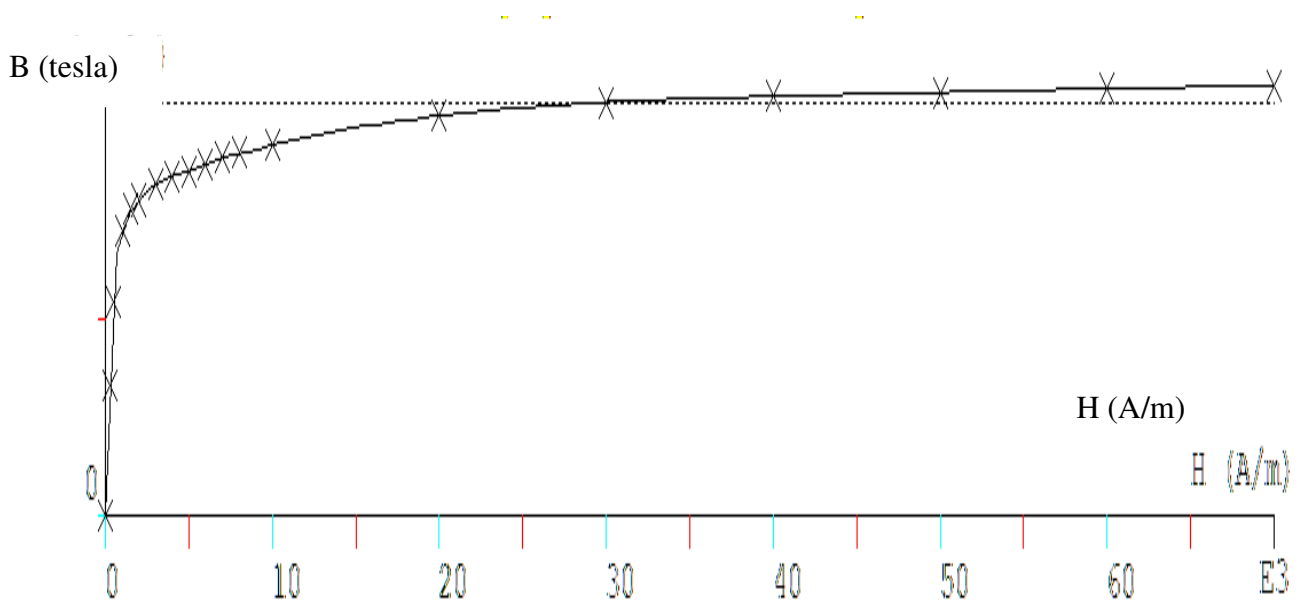


Figure .III.6 : Caractéristiques $B(H)$ pour les parties ferromagnétiques.

III.7.3 Circuit d'alimentation

Pour bien représenter le circuit électrique de la machine il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance et d'anneau de court – circuit)

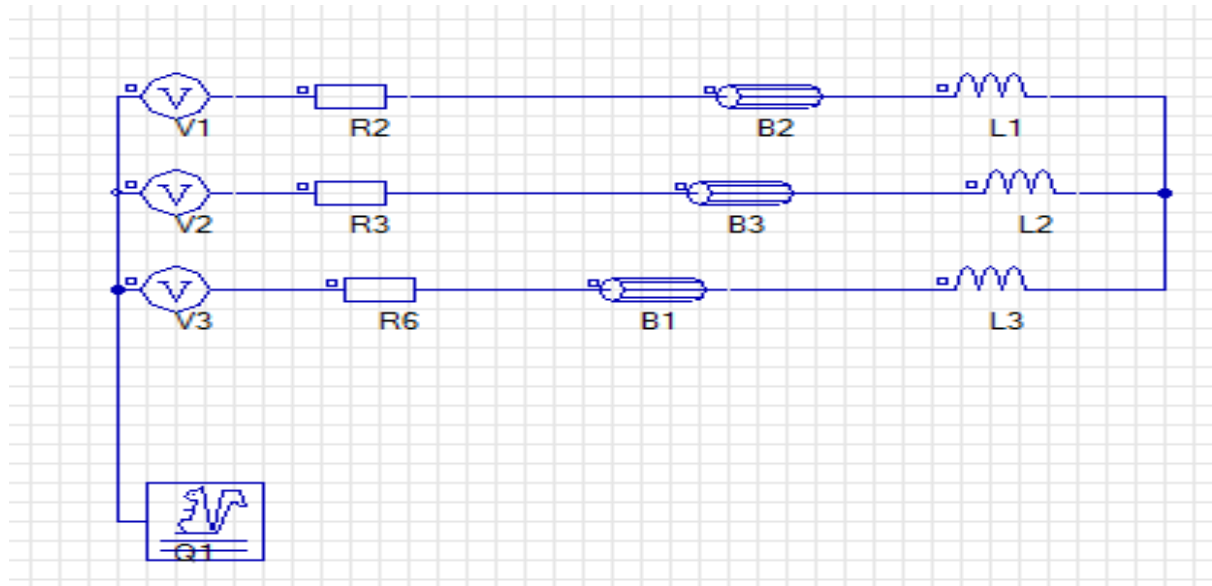


Figure. III.7 : CIR_VOLTAGE circuit pour voltage source de simulations

Le circuit électrique, (Fig. III.7), représentant : les sources de tension d'alimentation (V1, V2, V3), Les bobinages statoriques (B2 , B3, B1), les Inductances de fuite, (L1, L2, L3) , les résistances de chute de tension dans le réseaux (R2,R3,R6).

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 contient des barres rotoriques.

III.8 Résultats de simulation par la magnétodynamique

On rappelle les avantages et les inconvénients de la magnétodynamique [18] :

➤Avantage :

- Simplicité de mise en œuvre.
- Gain de temps et d'espace mémoire par rapport à la résolution évolutive

- la prise en compte des courants induits.

➤ Inconvénients :

- Utilisation possible uniquement pour le régime permanent.
- Toutes les grandeurs sont supposées sinusoïdales dans le temps et à même fréquence.
- Le mouvement du rotor n'est pas «physiquement» pris en compte. Cela aboutit à des courants statoriques parfois déséquilibrés car les harmoniques des espaces ne sont pas prises en compte.

III.9. Simulations des comportements dynamiques de la MAS

III.9.1. Fonctionnement à vide

A vide, sous la tension nominale de 380 V, nous avons présenté sur les Figures III.8 à III.15, l'évolution des grandeurs locales (les lignes du champ magnétique, l'induction magnétique) et les grandeurs globales (Les courants, le couple électromagnétique, la vitesse, les tensions, l'induction).

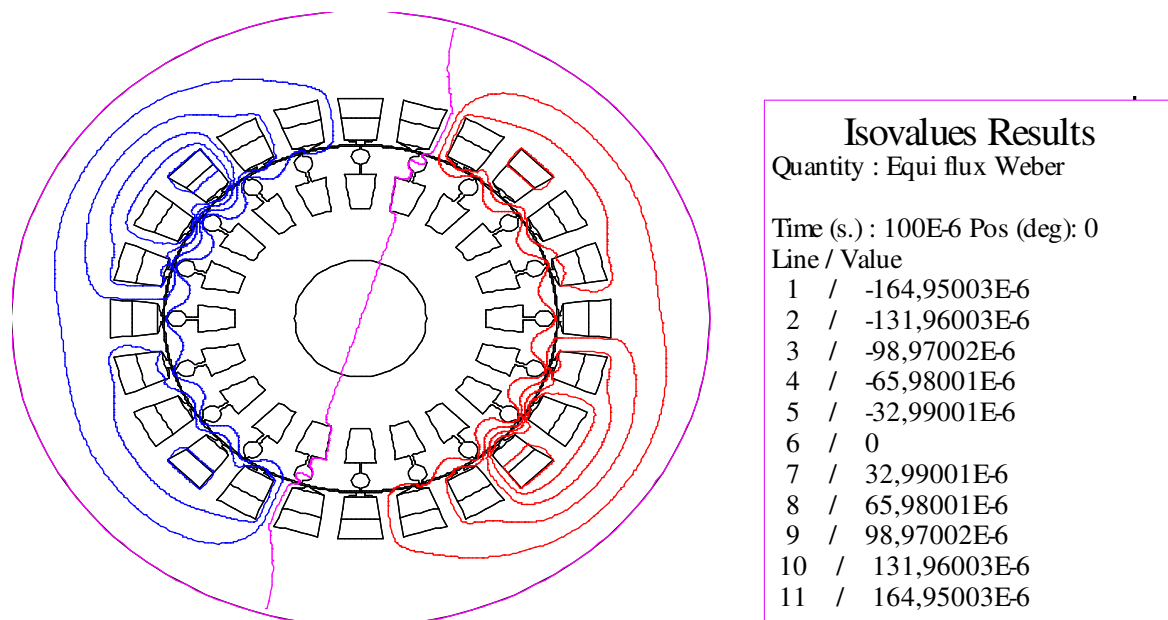


Figure. III.8 : La distribution des lignes du champ magnétique à vide

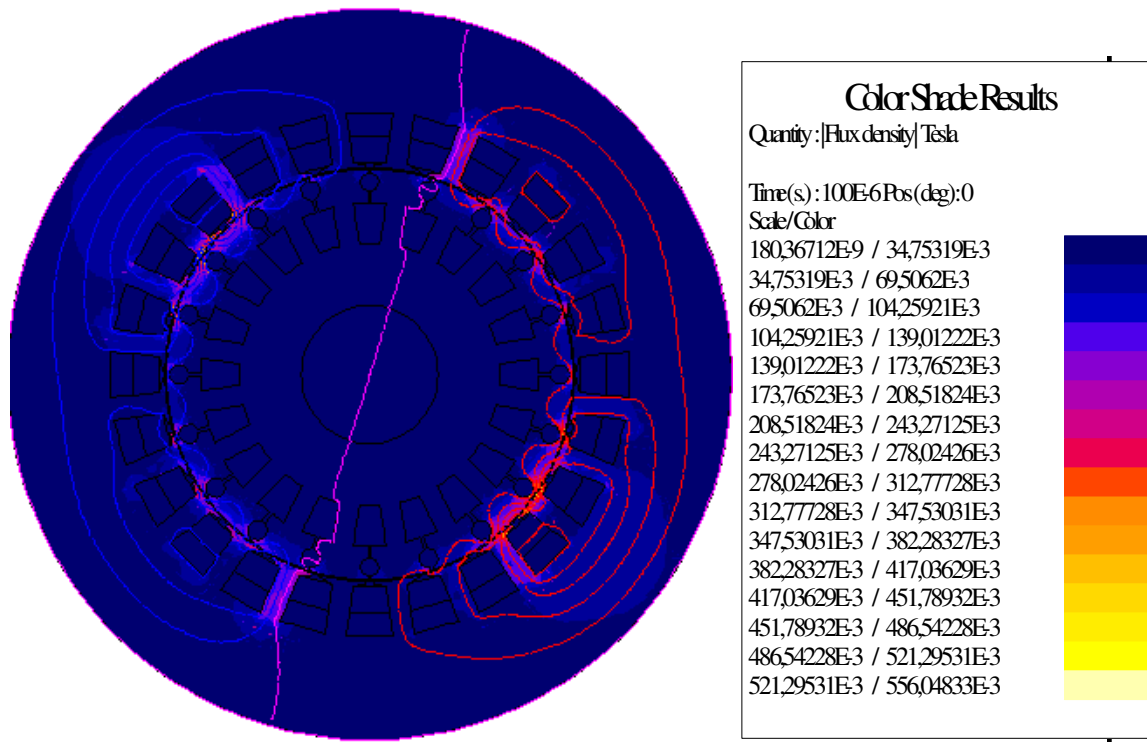


Figure.III.9 .Induction magnétique à vide

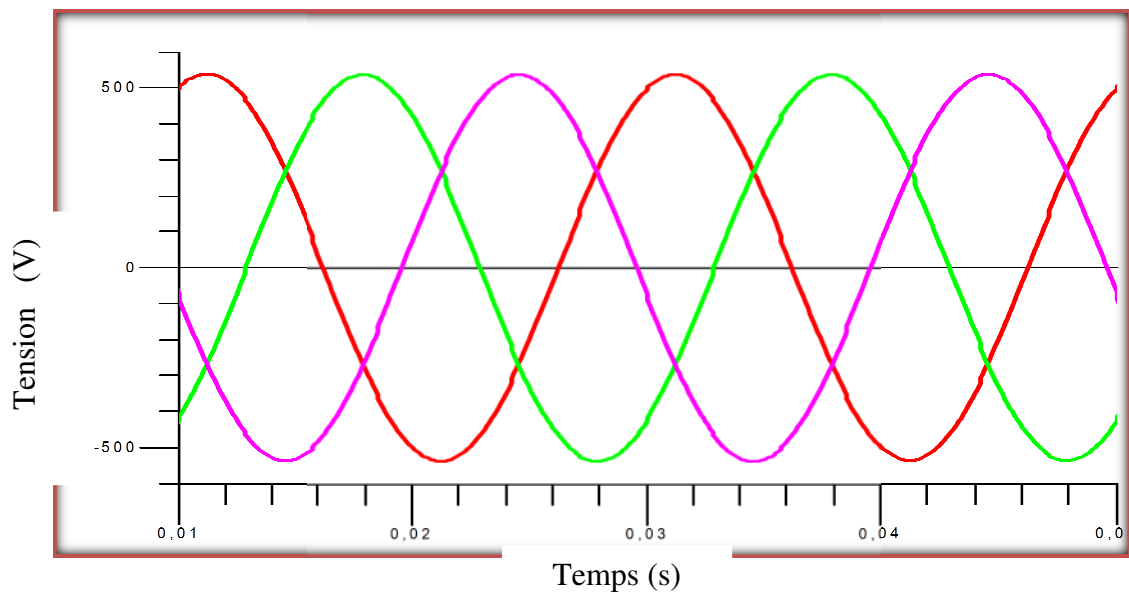


Figure.III.10 : Les tensions satatoriques à vide

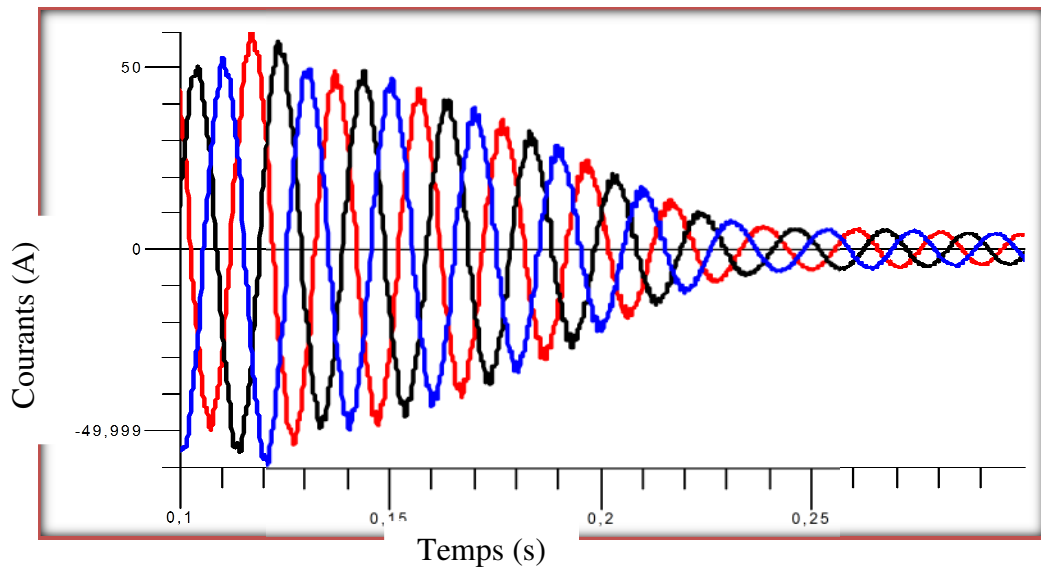


Figure.III.11. Les courants satatoriques à vide

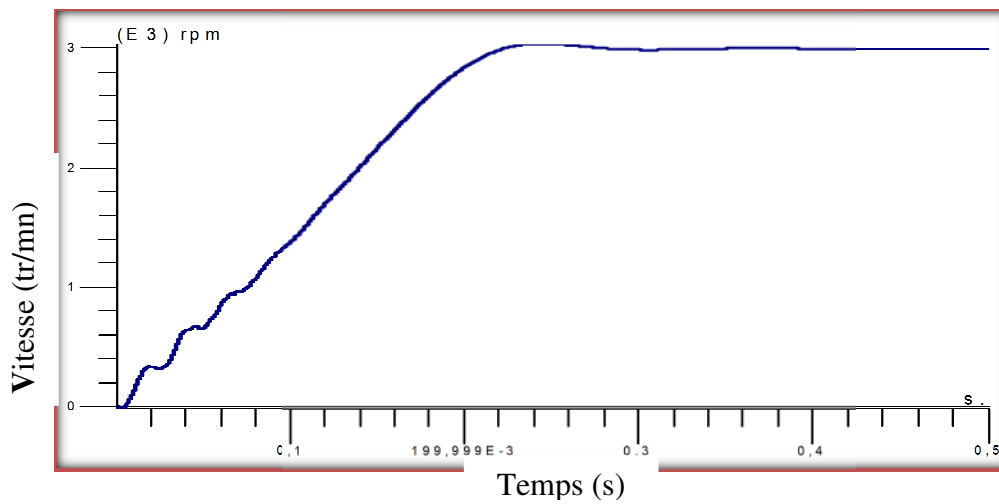


Figure.III.12. Vitesse de rotation à vide

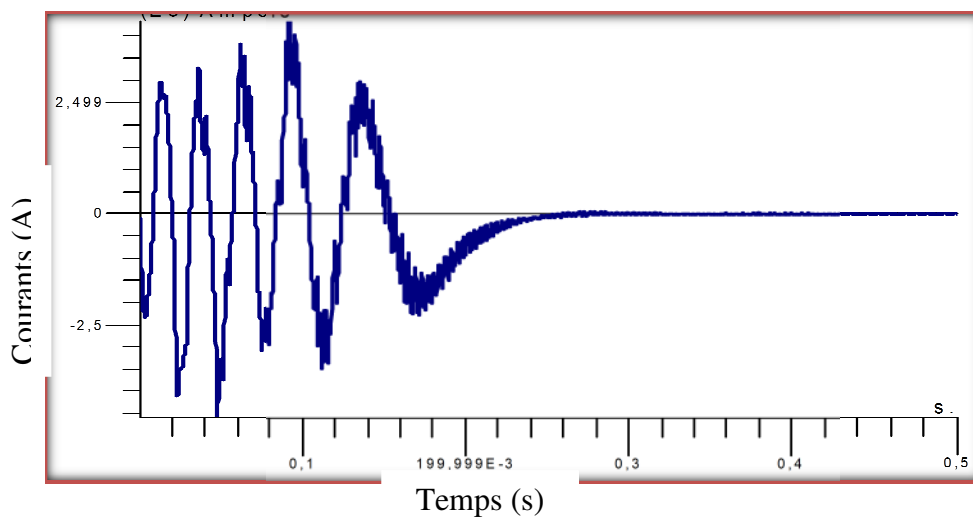


Figure.III.13. Le courant dans la barre rotorique 1 à vide.

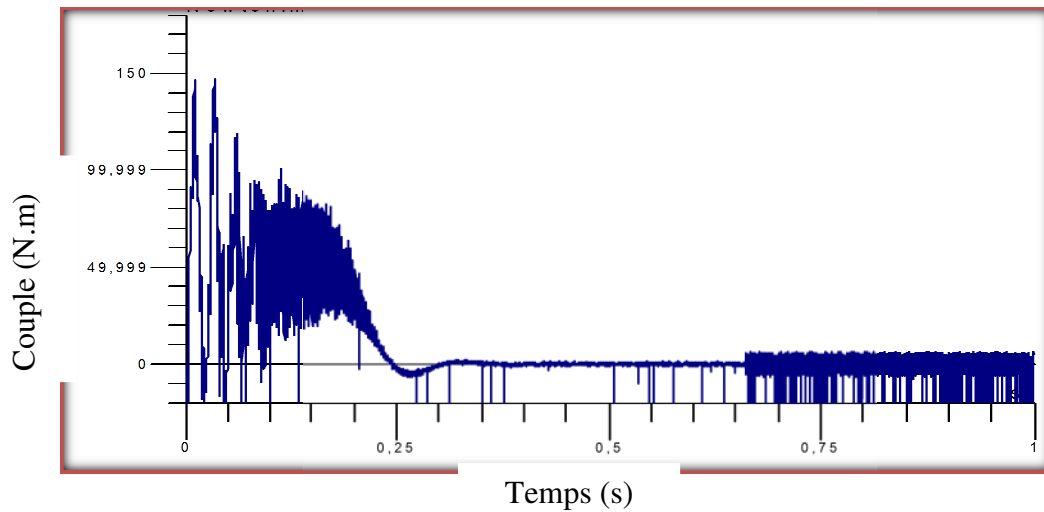


Figure.III.14. Le couple électromagnétique à vide

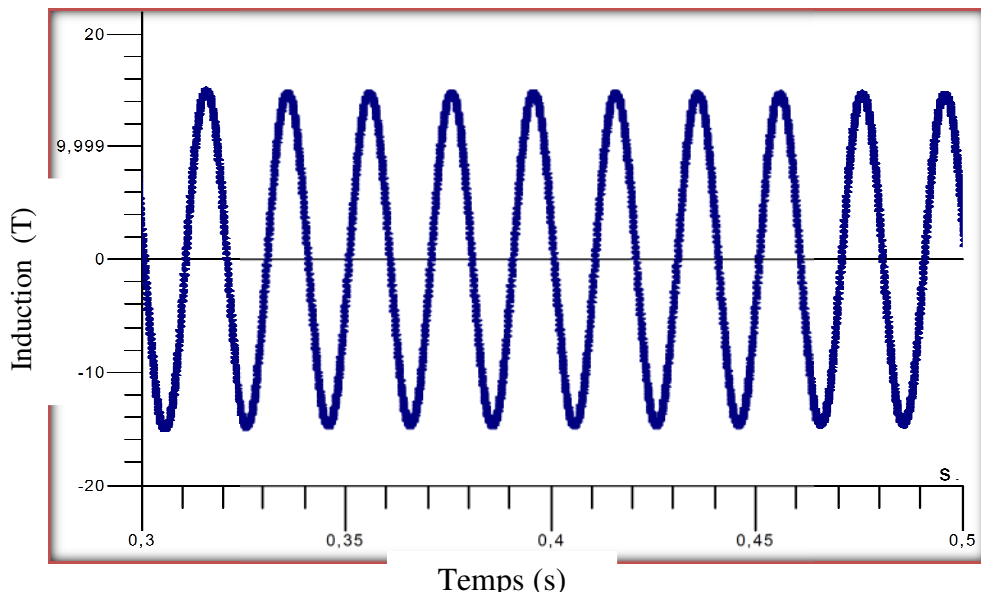


Figure.III.15. l'induction B à vide

Après un régime transitoire d'environ 0.3s, (Fig. III.11), durant lequel la machine se magnétise, les courants au stator atteignent le régime permanent avec une valeur efficace de 5,1 A. Les trois courants d'une étoile sont bien déphasés entre eux de 120° électriquement donc, nous retrouvons bien le comportement équilibré de la machine, Mais à une forme d'onde qui n'est pas tout à fait sinusoïdale, Le couple électromagnétique, à vide, est pratiquement nul en régime permanent, (Fig. III.14). La vitesse atteint une valeur de 29000tr/mn.

II.9.2.Fonctionnement en charge

Sous la même tension (380v), nous avons présenté sur les Figures II.16 à II.27, les caractéristiques de la machine en régime nominal.

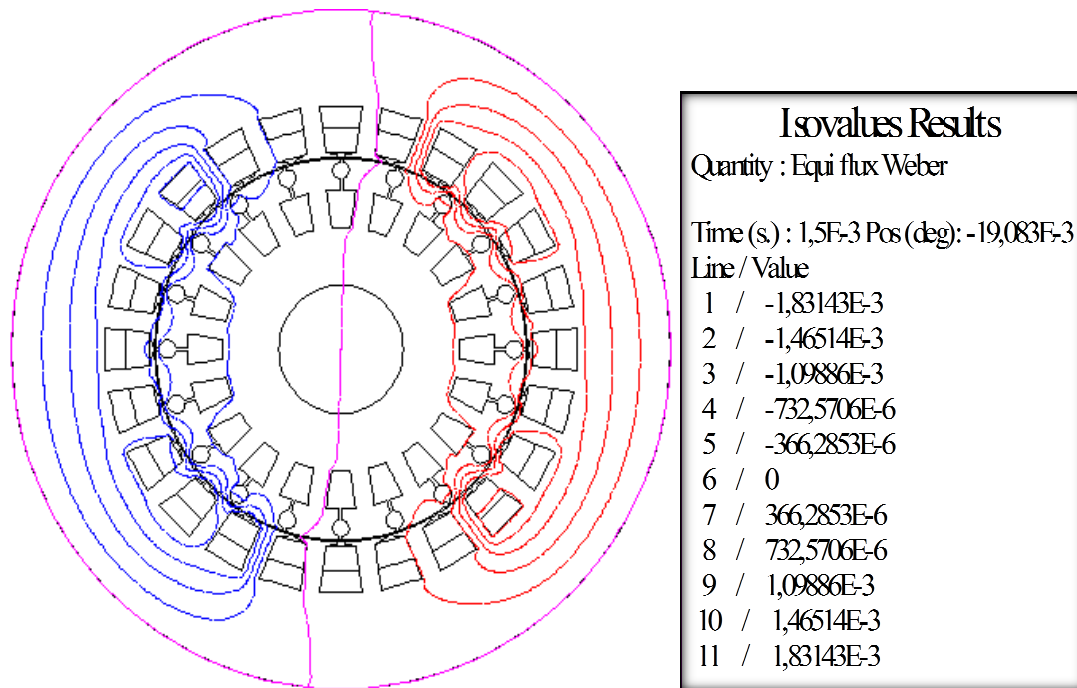


Figure. III.16 La distribution des lignes du champ magnétique en charge

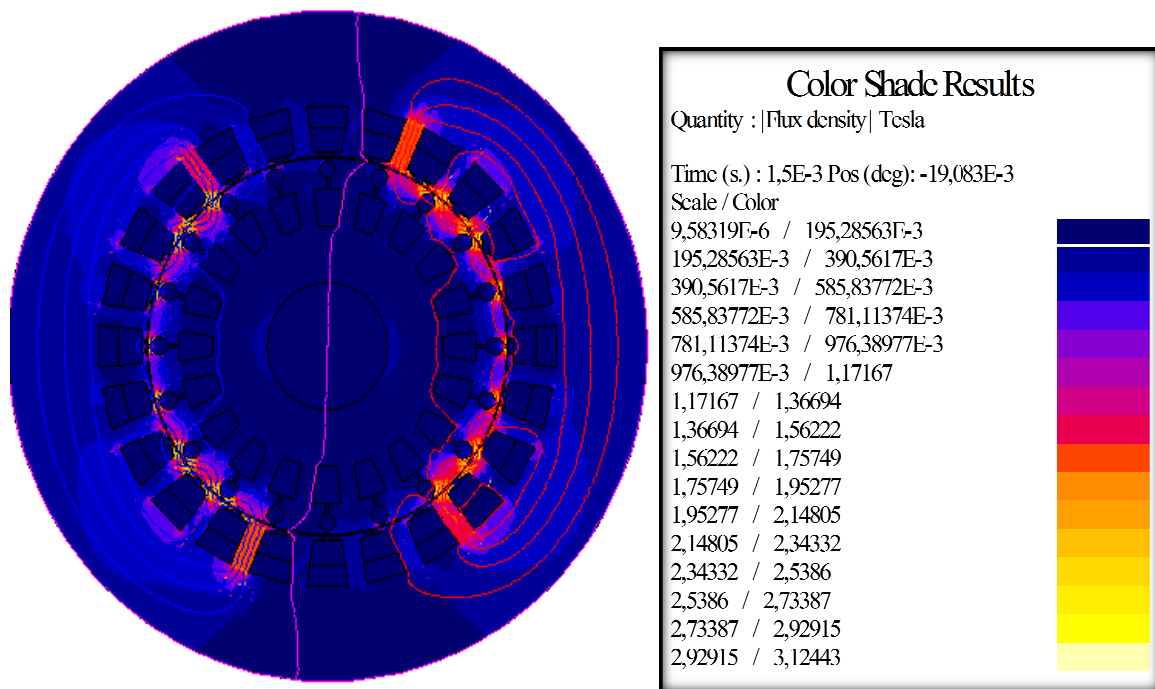


Figure.III.17 .Induction magnétique en charge

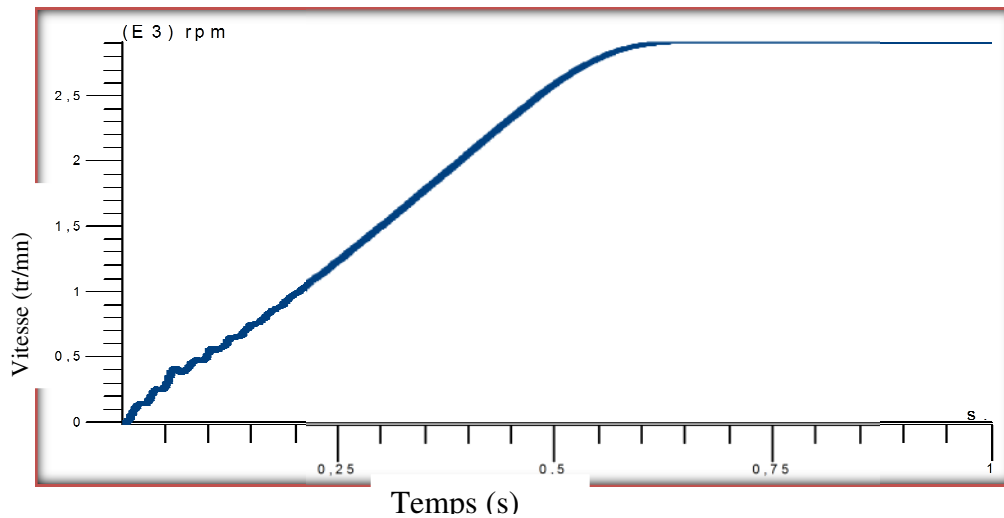


Figure.III.18. Vitesse de rotation en charge

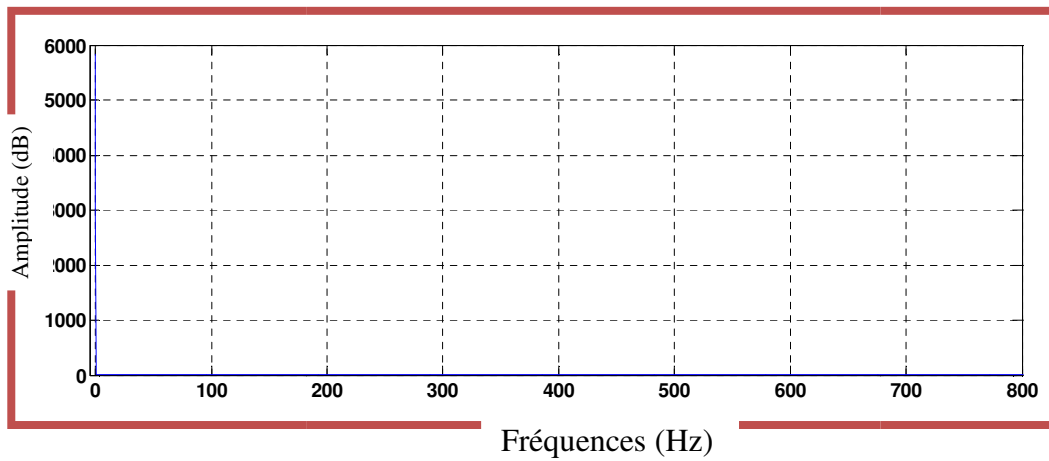


Figure. III.19. Spectre (avec zoom) de la vitesse.

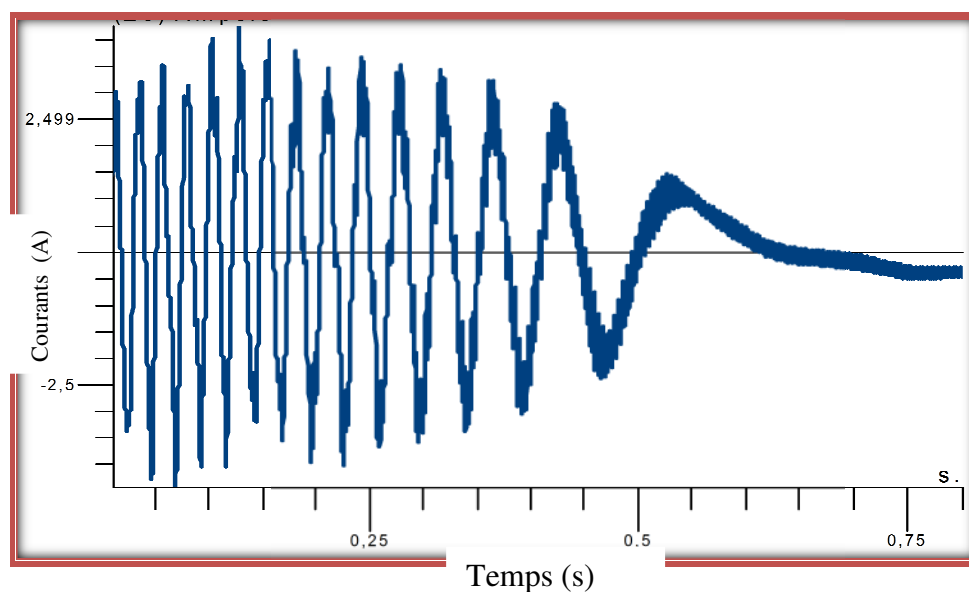


Figure.III.20. Le courant dans la barre rotorique 1 en charge

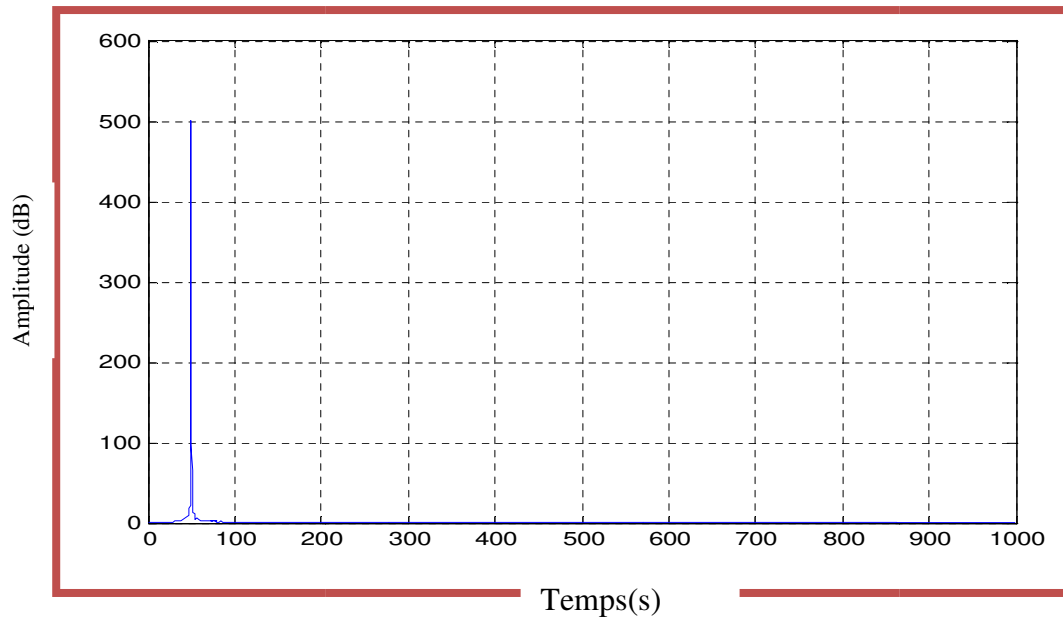


Figure.III.21.Spectre de la barre 1 en charge.

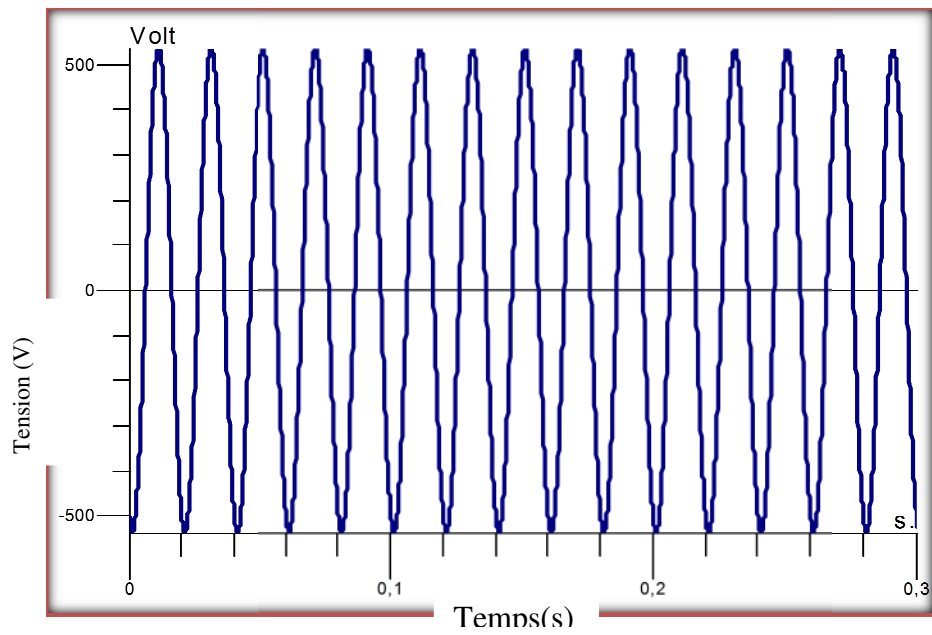


Figure. III.22. La tension statorique de la phase A en charge.

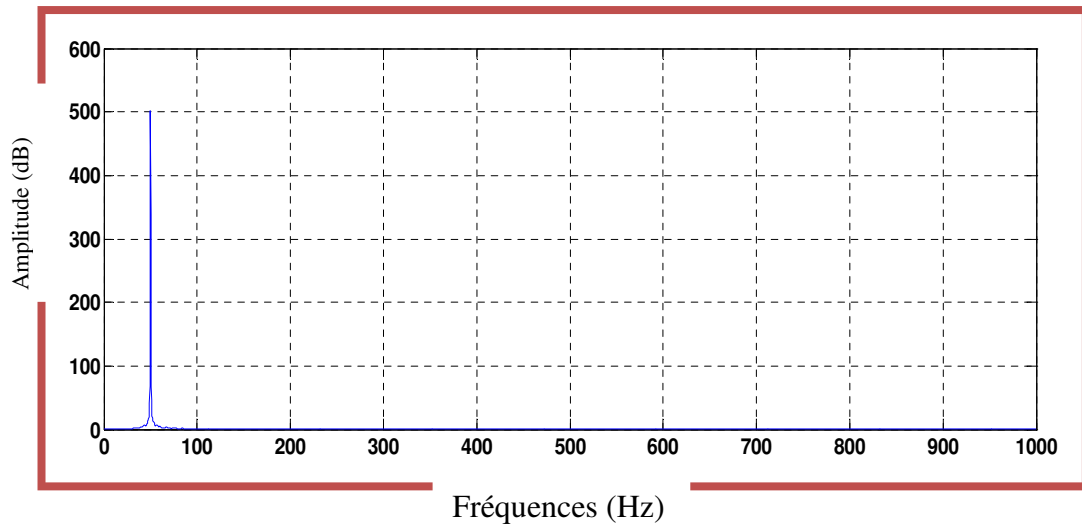


Figure.III.23.Spectre de la tension en pleine charge

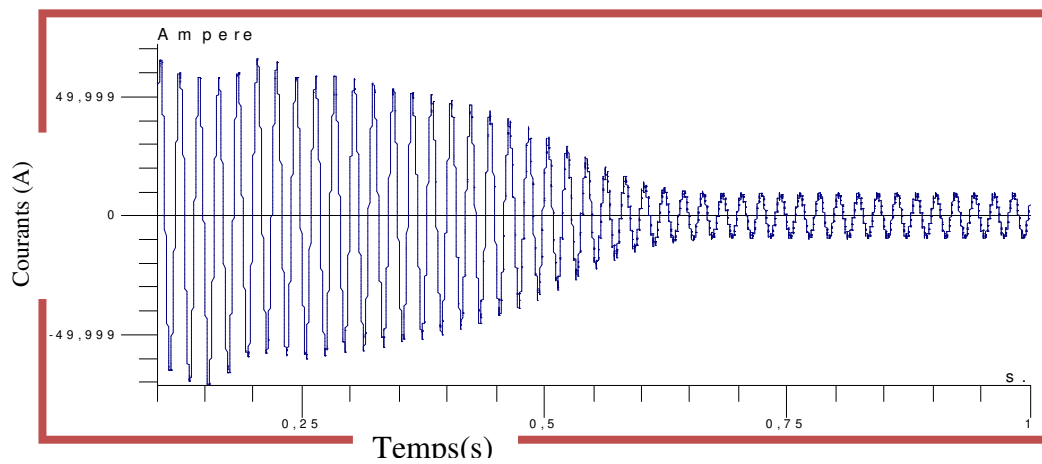


Figure. III.24. Le courant statorique de la phase A en charge

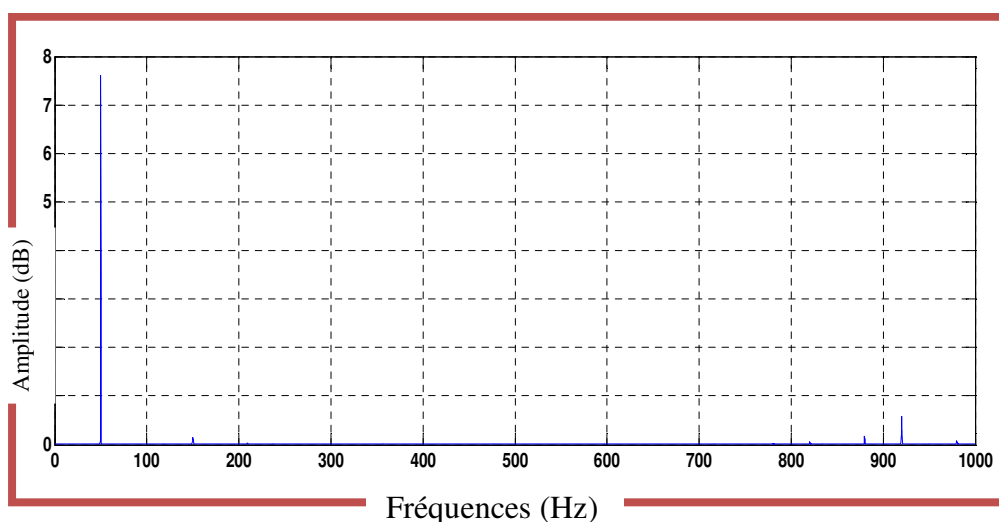


Figure.III.25.Spectre du courant statorique (avec zoom) de la machine saine en charge.

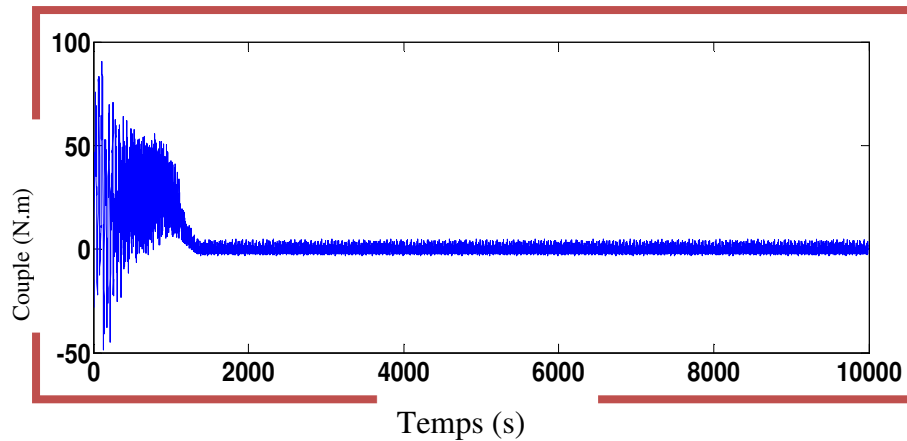


Figure.III.26. Le couple électromagnétique en charge

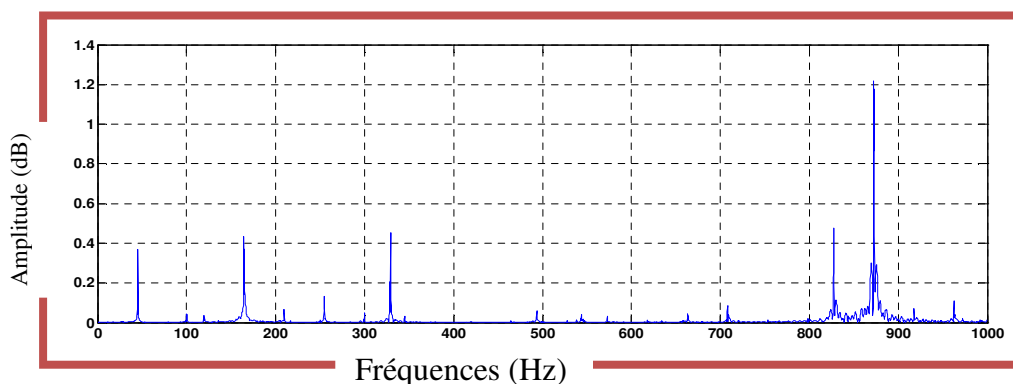


Figure.III.27. Spectre du Couple électromagnétique (avec zoom) de la machine saine en charge

Pendant le régime transitoire du calcul, le couple (Fig. III.26) part de zéro et arrive à la valeur nominale de 6 N.m. Durant le régime nominal, le couple se stabilise autour de la valeur nominale avec de présence des ondulations. Les courants aux stators atteignent le régime permanent avec une valeur efficace de 10A.

III.10 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté un modèle numérique de la machine asynchrone à basé sur la méthode des éléments finis, sous l'environnement de logiciel Flux 2D.

Nous avons simulé la MAS en 2 dimensions (2D). Et nous avons visualisé la répartition des lignes du champ magnétique et l'induction magnétique, Par la suite, nous avons passé à la simulation en régime transitoire, nous avons abordé à la simulation des comportements dynamiques de la MASDE (simulation de fonctionnement à vide et en charge)

IV.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des simulations du comportement de la MASY, ces résultats sont obtenus à partir de la simulation du comportement électromagnétique et mécanique de la MASY. La modélisation est obtenue à partir du logiciel FLUX-2D où nous adoptons une simulation bidimensionnel de la MASY. Dans les résultats présentés, nous présentons le comportement de la MASY saine et les résultats de la MASY ayant un défaut bien précis dans le but de voir l'influence du défaut sur le comportement de la MASY sur le spectre de certains grandeurs, électrique, magnétique voir mécanique. Ceci permet de prévoir le type de défaut provoqué à partir de l'analyse spectrale du signa de ces grandeurs.

IV.2. Simulation du défaut de cassure de barre Rotorique

Pour modéliser le comportement de la MASY ayant un défaut qui se présente dans sa conception, dans ce cas, nous essayons de simulé le défaut de la MASY ayant une barre rotorique cassé. Dans le modèle adopté, ou nous essayons d'exploiter FLUX-2D comme moyen de modélisation. Ce comportement de la machine est modélisé soit par augmentation de la résistance rotorique, soit par la suppression du conducteur associé à la barre dans le circuit électrique. La surface représentant la barre cassée dans le circuit magnétique est remplie par un matériau amagnétique. Ainsi la barre cassée ne véhicule pas de courant, mais a un effet sur la répartition des lignes de champs.

La figure IV.1 représente la répartition des lignes de flux à l'intérieur de la MASY, pour les deux cas, pour le cas où la machine, est dans un état sain et dans le cas ou la machine présenta un défaut rotorique. Ces figures sont présentés pour un fonctionnement en plain charge, aux instants, du démarrage de la machine à l'instant 0.03 s (régime transitoire) et au régime permanent de la MASY, comme exemple, nous avons pris l'instant $t = 3.84$ s (régime permanent).

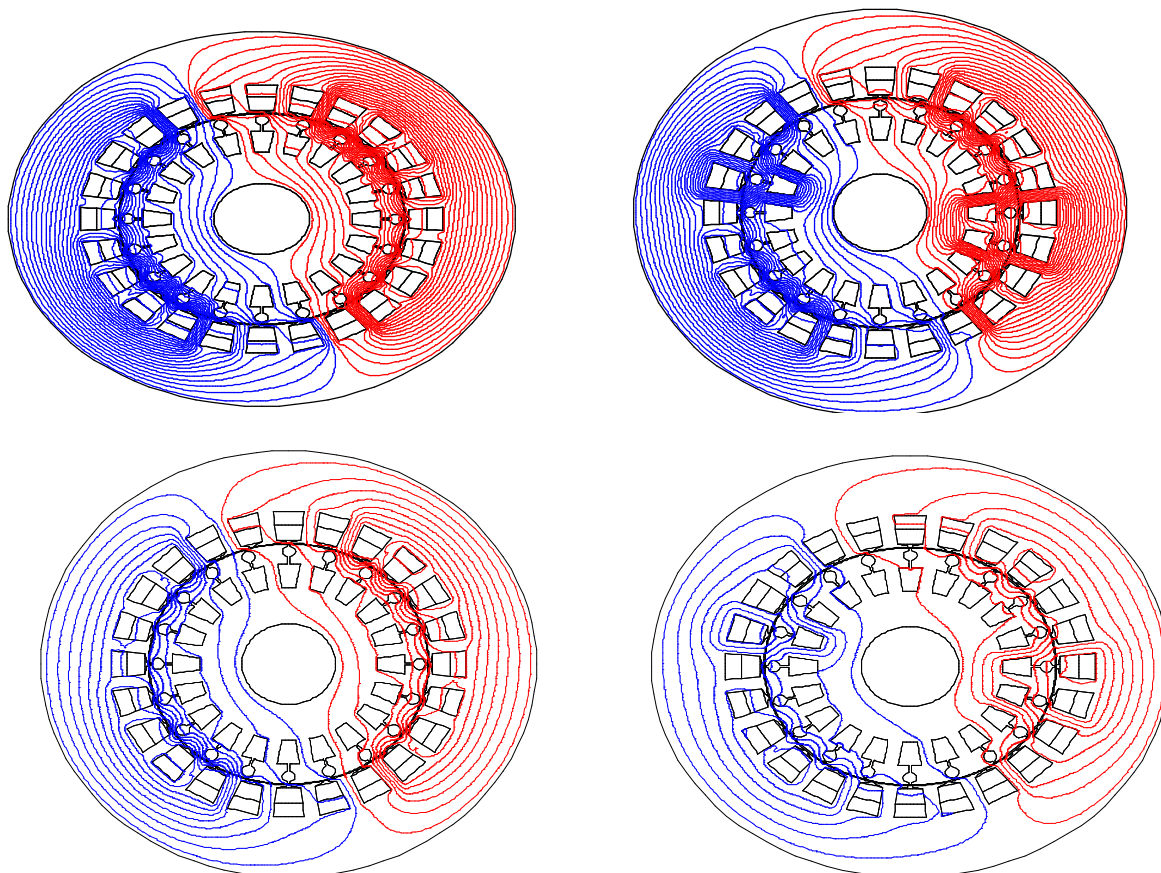
Selon les résultats présentés, on peut dire que pour une machine saine, les courants dans la circulation des courants dans les barres rotoriques est parfaitement symétriques, entraînant ainsi, une répartition parfaitement symétrique des lignes de flux ou du champ magnétique. L'absence de courants dans les barres cassées annule leur participation à la création du flux, ainsi, la répartition du champ magnétique ne sera pas présentée d'une manière symétrique.

La figure IV.5 et la figure IV.6 représentent l'allure du courant rotorique au sain d'un barre affecté par la défaut. Selon les résultats présenté, on constate une faible valeur du courant, de

l'ordre des milli-ampères, ceci est due à l'augmentation de la valeur de la résistance provoqué par une fissure au sain de la barre, celle-ci a diminué considérablement la valeur de courant rotorique.

La figure IV.9 représente l'évolution temporelle de la vitesse de rotation de la MASY du démarrage jusqu'au régime permanent. Dans notre simulation, nous avons pris l'instant $t = 1,6$ s, considéré comme un temps suffisant pour représenter le régime permanent de la MASY. Selon les résultats présentés, on peut dire qu'avec le défaut de la barre cassé, la machine présente des oscillations considérables où la vitesse oscille entre un 2900 et 2918 tr/m, ces oscillations sont négligeables dans le cas d'une machine saine.

Pour étudier l'influence du défaut de la MASY sur le comportement de la machine nous avons présentés dans les Figure, IV.11 et IV.13 le spectre du courant statorique et le spectre de la vitesse de rotation de la machine pour les deux cas, le cas où la machine ne présente pas un défaut et le cas ou la machine présenté un défaut rotorique. Les résultats présentes indiquent que pour le cas de défaut dans la machine, le spectre montrent la présence d'harmoniques autour de la fondamentale.

Rotor sain $t=0.03$ s3 Barre cassées $t=0.03$ s

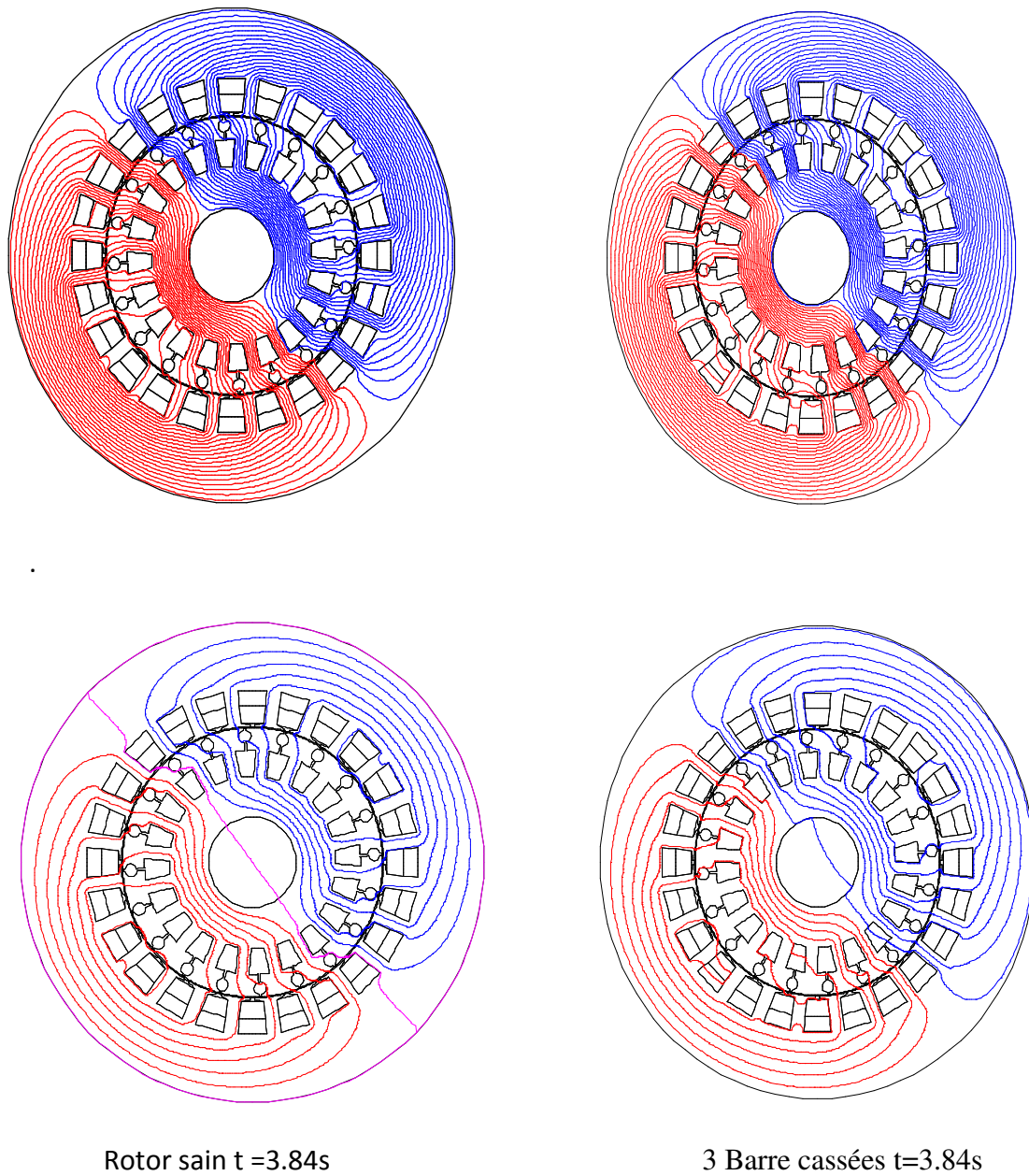


Figure IV.1 Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'état sain et la machine avec défaut (en pleine charge)

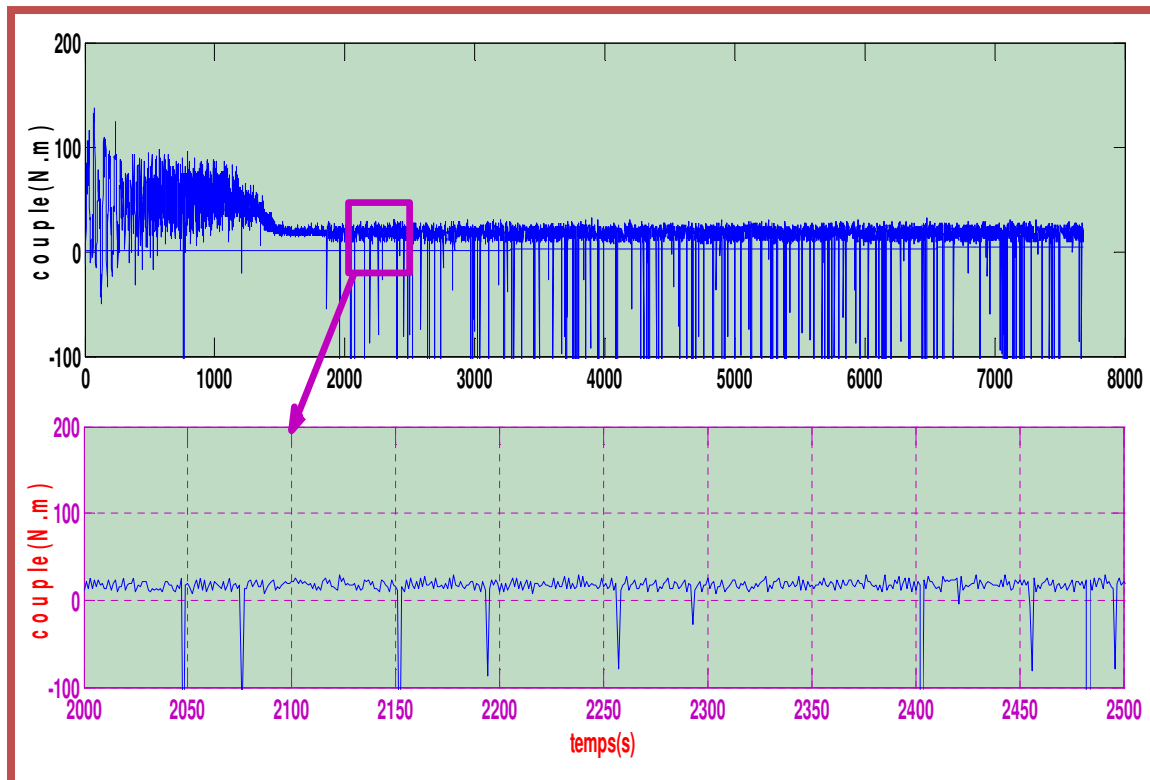


Fig. IV.2 Couple électromagnétique pour une machine asynchrone sain.

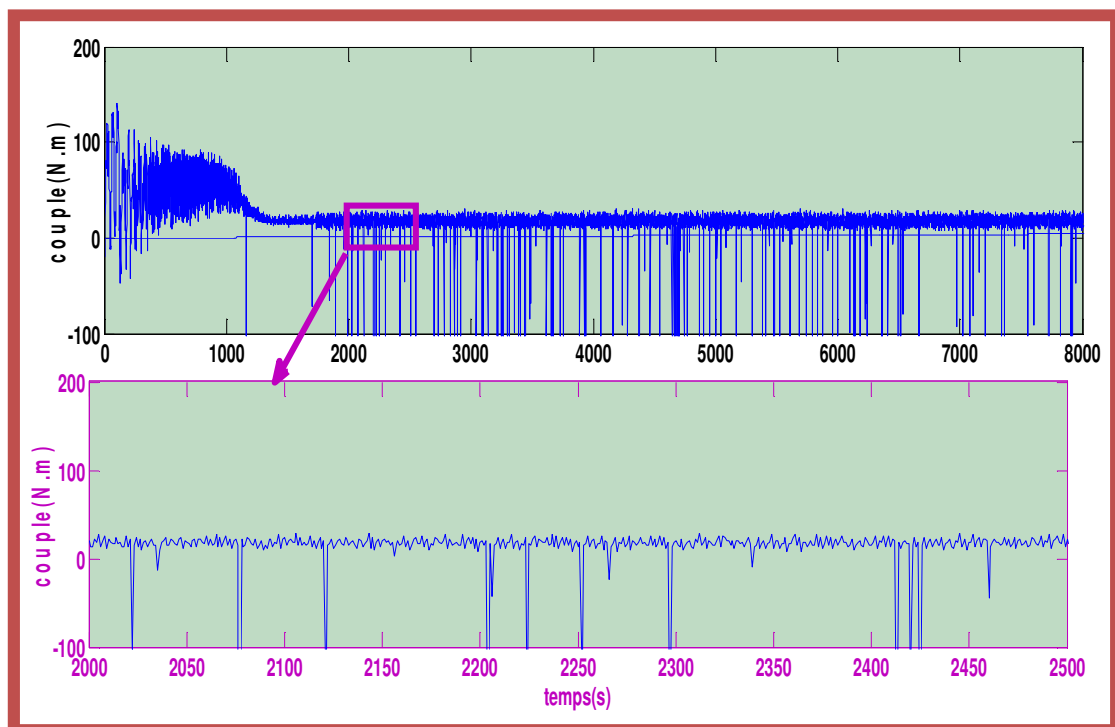


Fig. IV.3 Couple électromagnétique pour une machine asynchrone avec défaut (3 barres cassées)

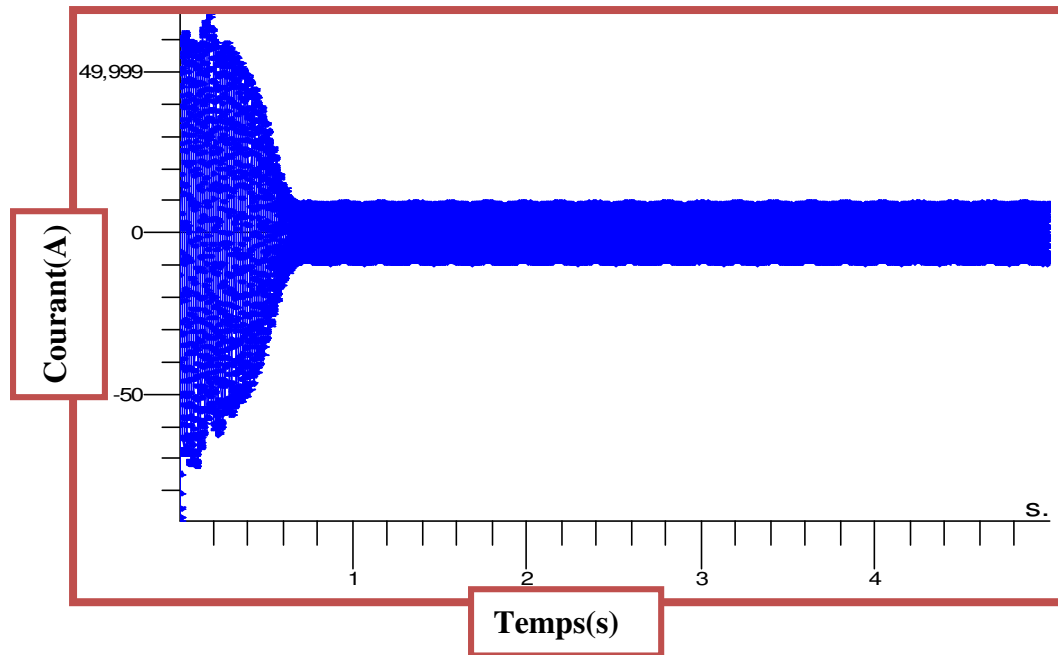


Figure. IV.4 Forme d'onde du courant statorique de la phase avec défaut (3 barres cassées).

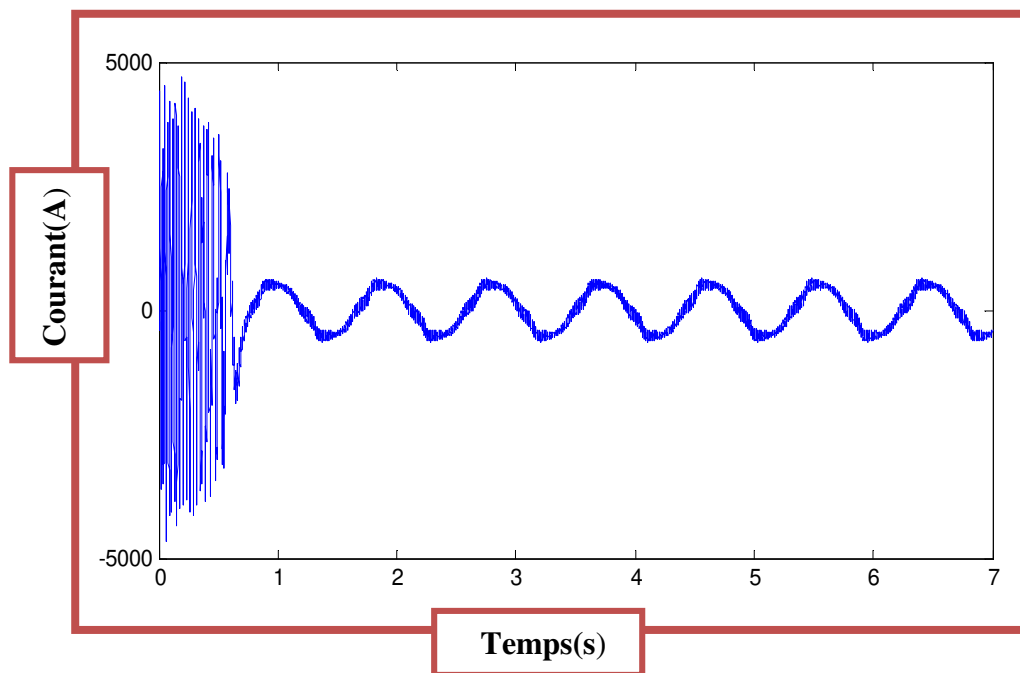


Figure. IV.5 Le courant d'une barre à l'état sain

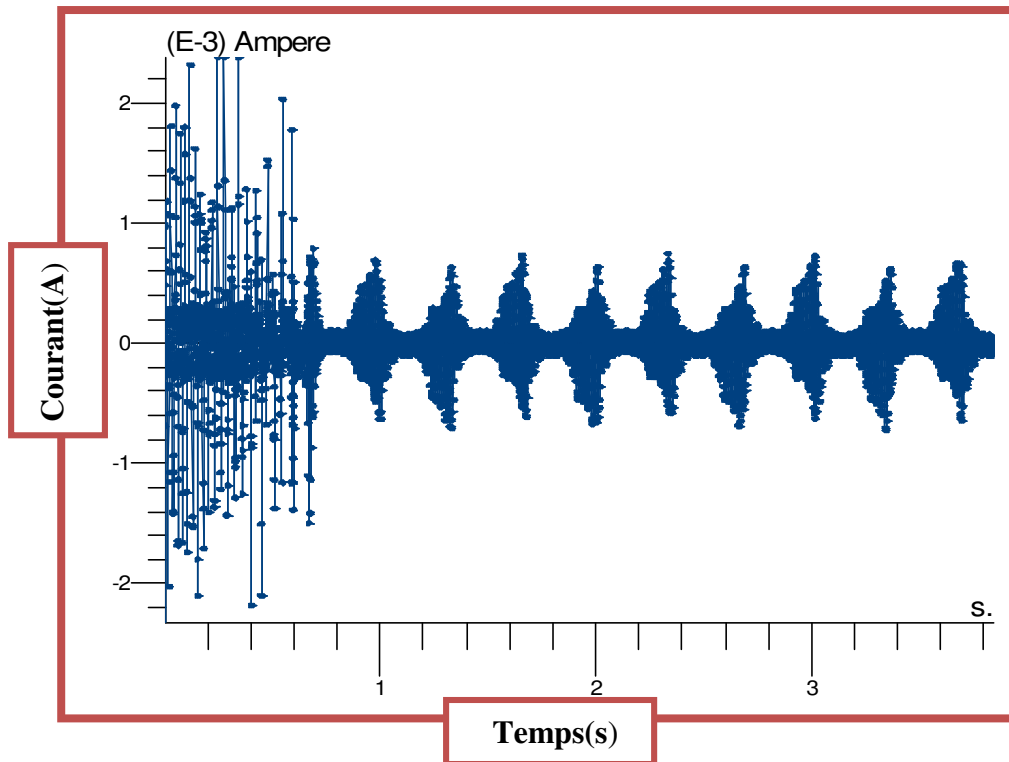


Figure. IV.6 Le courant d'une barre cassée (1).

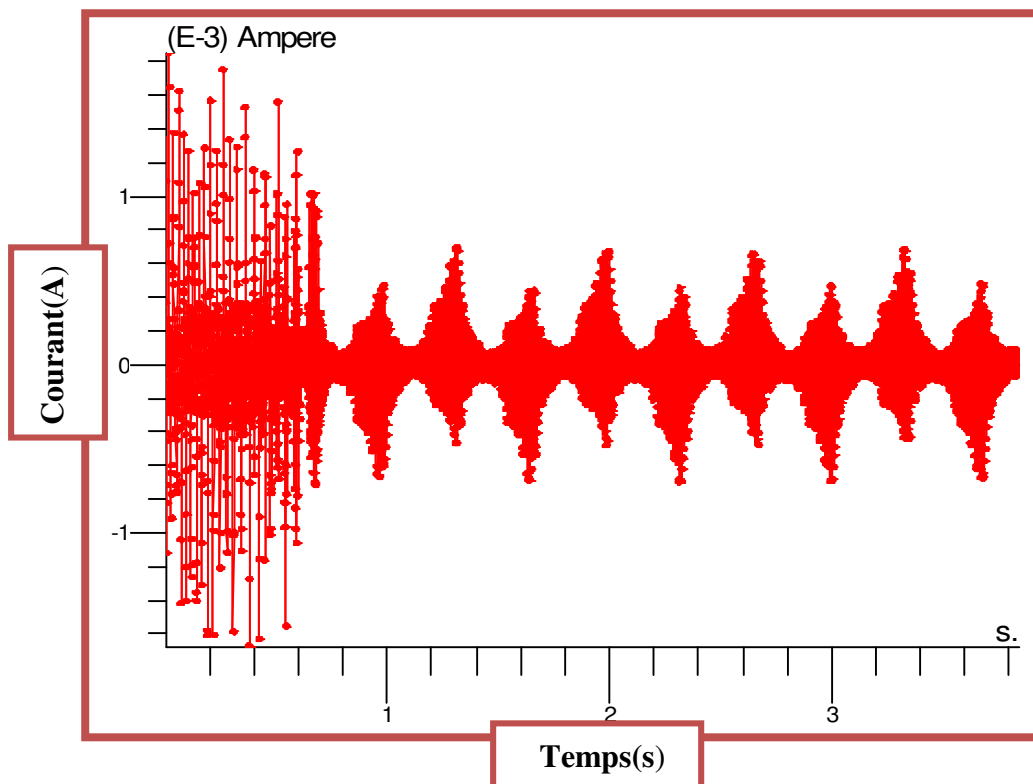


Figure. IV.7 Le courant d'une barre cassée (10).

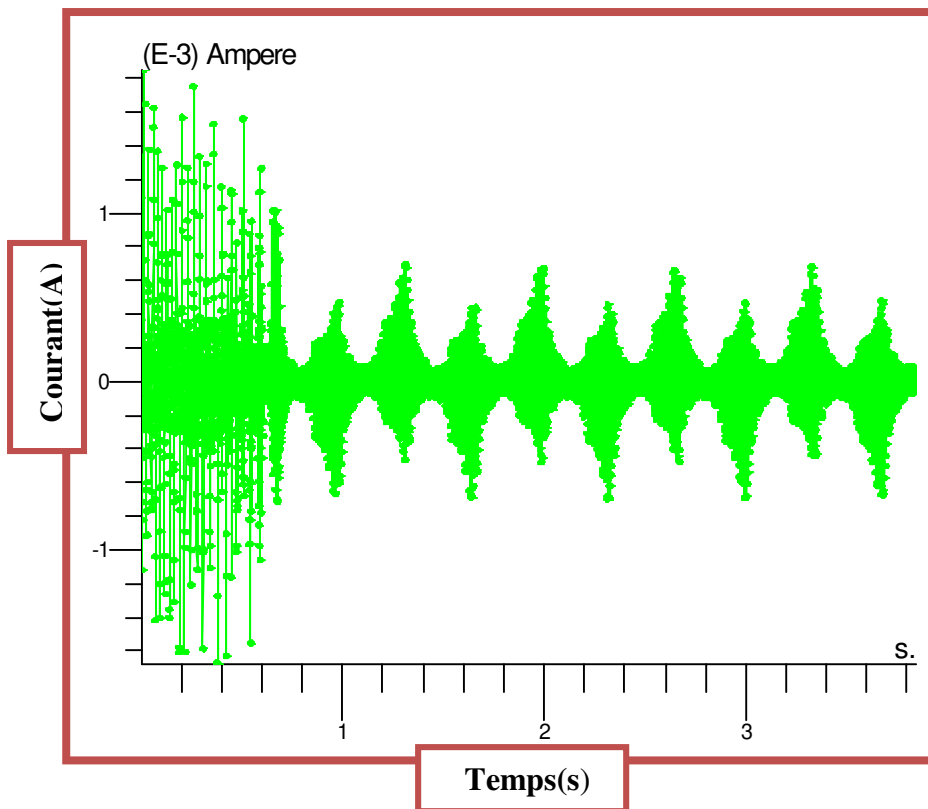


Figure. IV.8 Le courant d'une barre cassée (20).

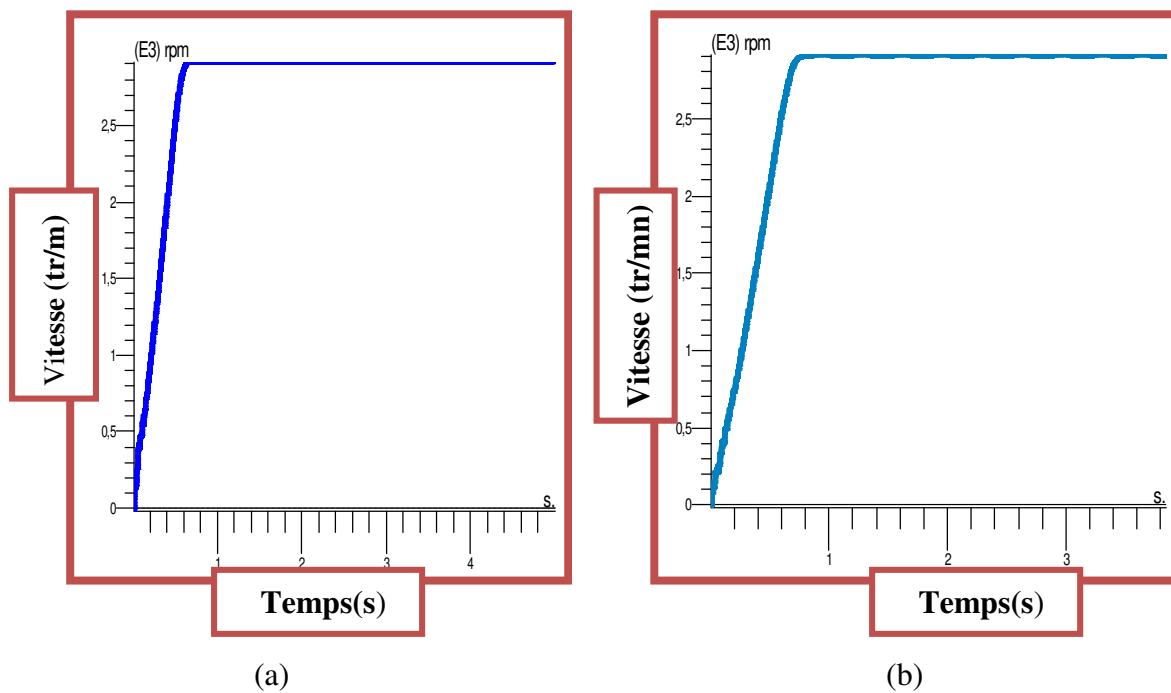


Figure. IV.9 La vitesse de rotation pour une machine asynchrone saine (a) et une machine asynchrone avec défaut (3 barres cassées) (b) (en pleine charge)

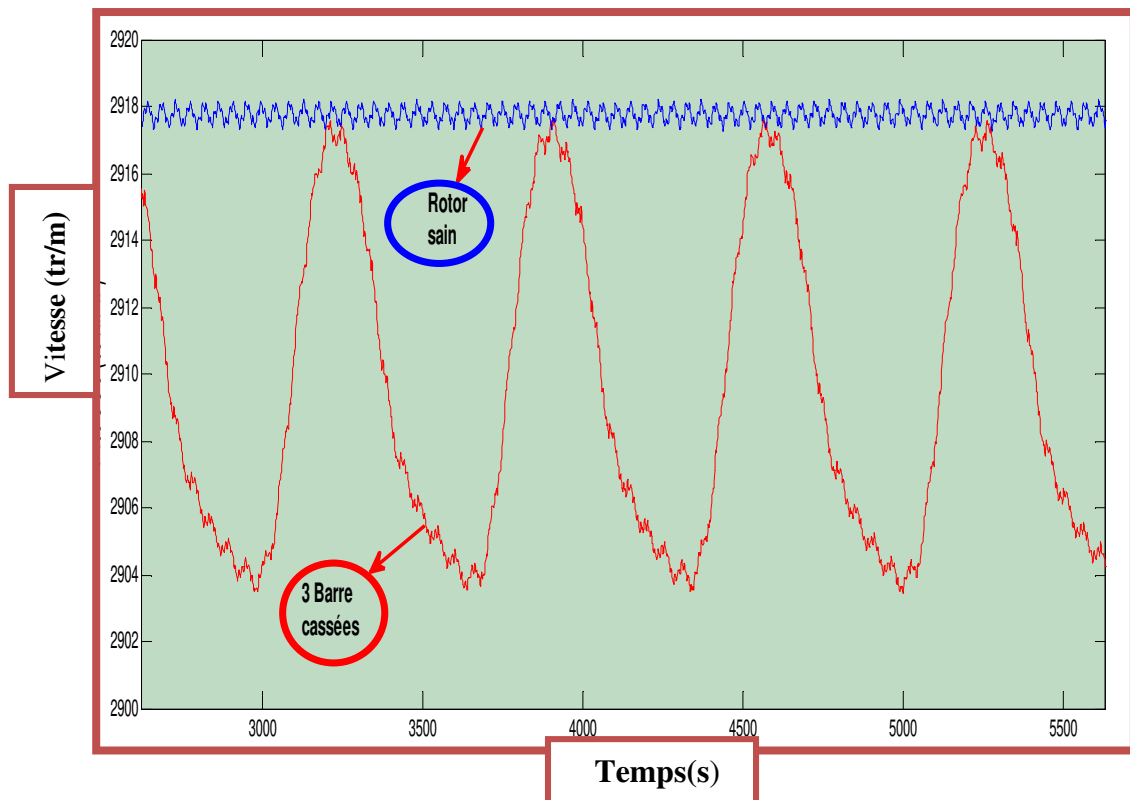
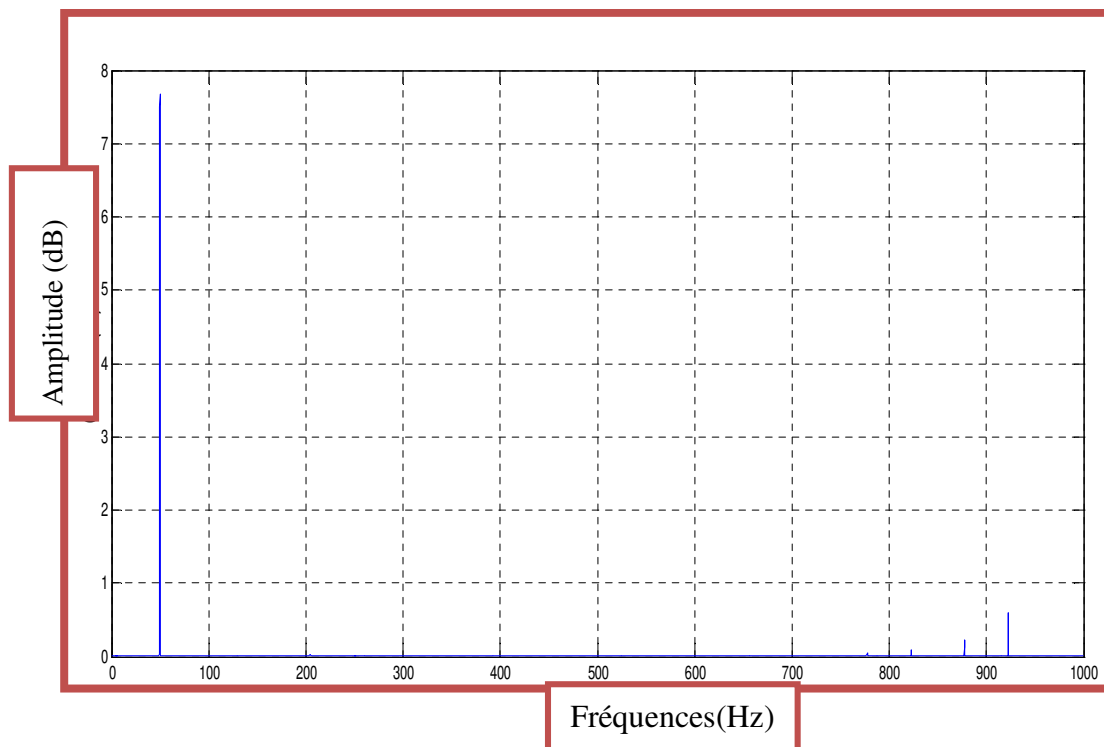


Figure. IV.10 La vitesse de rotation pour une machine asynchrone saine (a) et une machine asynchrone avec défaut (3 barres cassées) (b) (en pleine charge) avec zoom.



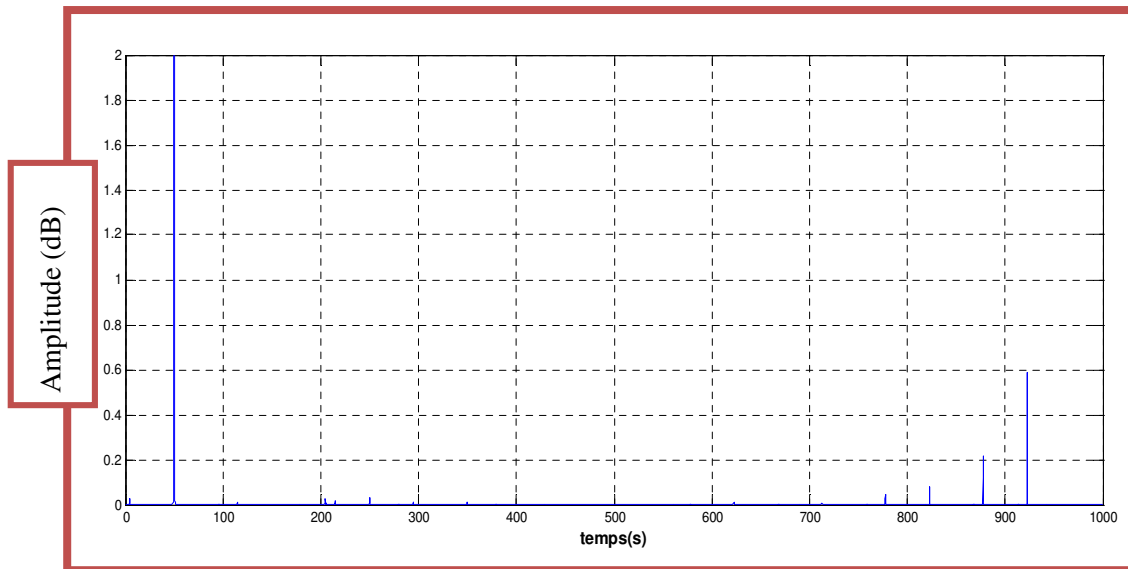


Figure. IV.11 Spectre (avec zoom) du courant statorique pour un défaut (3 barres cassées).

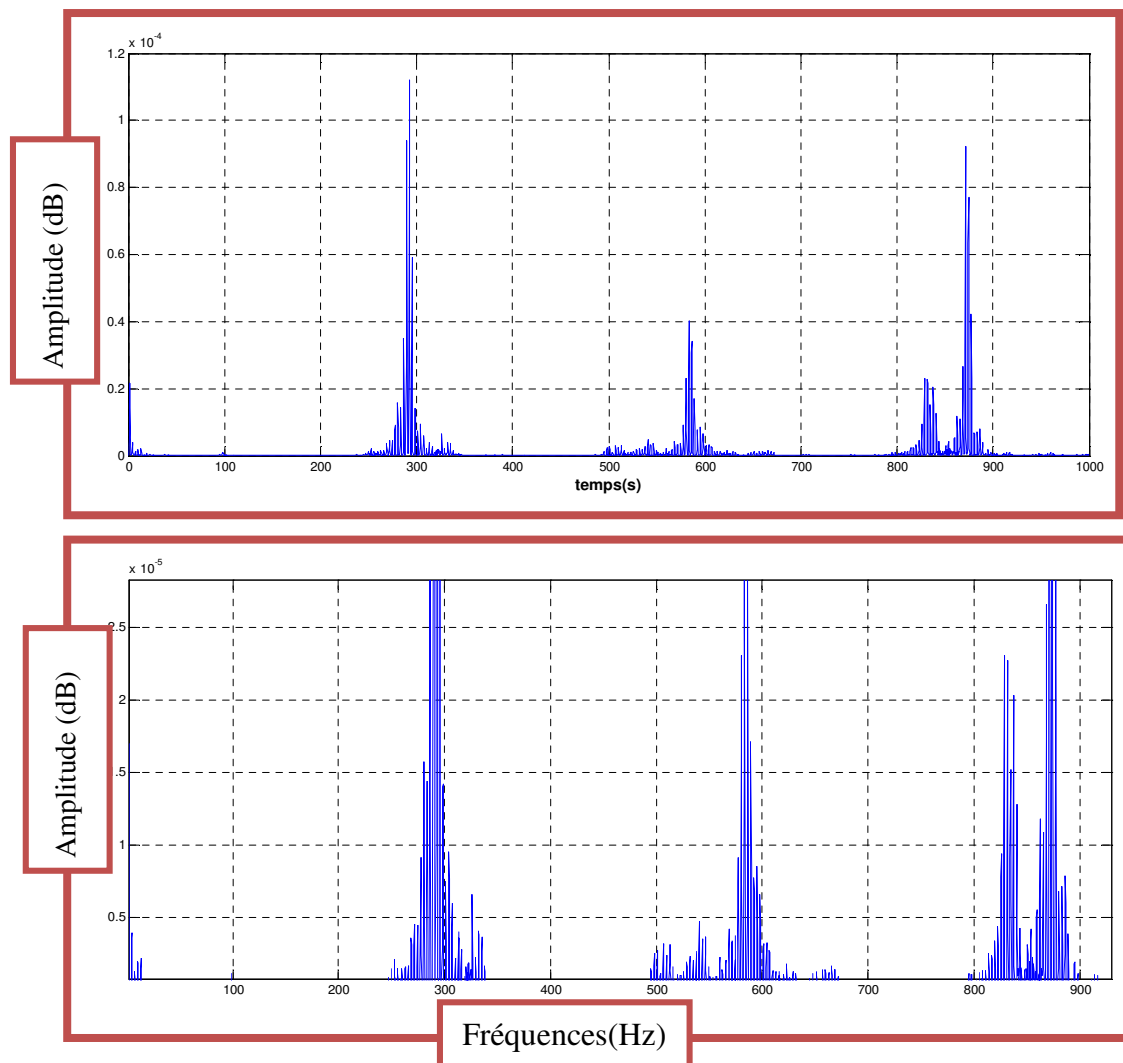


Figure. IV.12 Spectre (avec zoom) du courant d'une barre cassée.

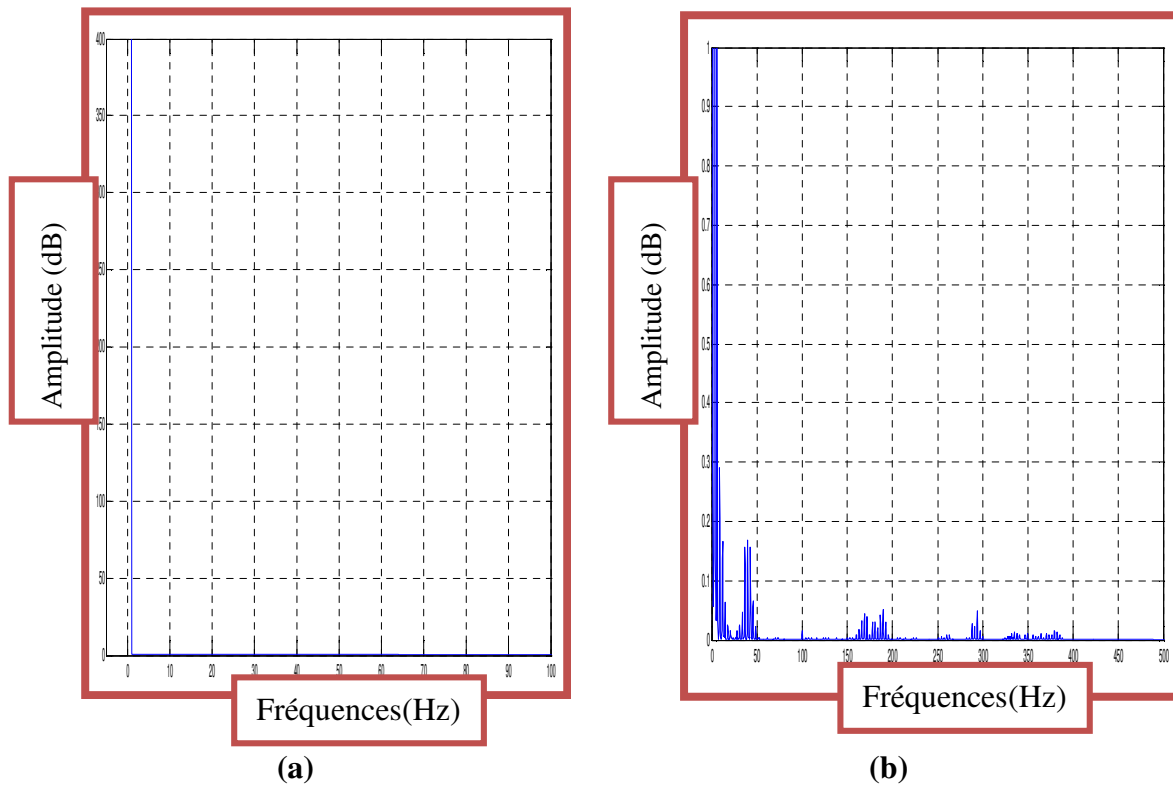


Figure. IV.13 Spectre de vitesse de rotation pour une machine asynchrone saine (a) et une machine asynchrone avec défaut (3 barres cassées) (b) (en pleine charge) avec zoom.

Dans les autres paragraphes, nous présentons les résultats des simulations de la même machine mais avec la présence d'autres défauts qui sont dus par exemple au court-circuit.

IV.3. Simulation d'un court-circuit par réduction de spires

Nous présentons dans cette partie les résultats des simulations de la MASY obtenus par réduction du nombre de spires, les résultats concernent la présentation des grandeurs, électriques, magnétiques et mécaniques. Les résultats indiqués montrent bien que le court-circuit entre spires a provoqué l'augmentation des courants statoriques, dans son spectre, des harmoniques apparaissent.

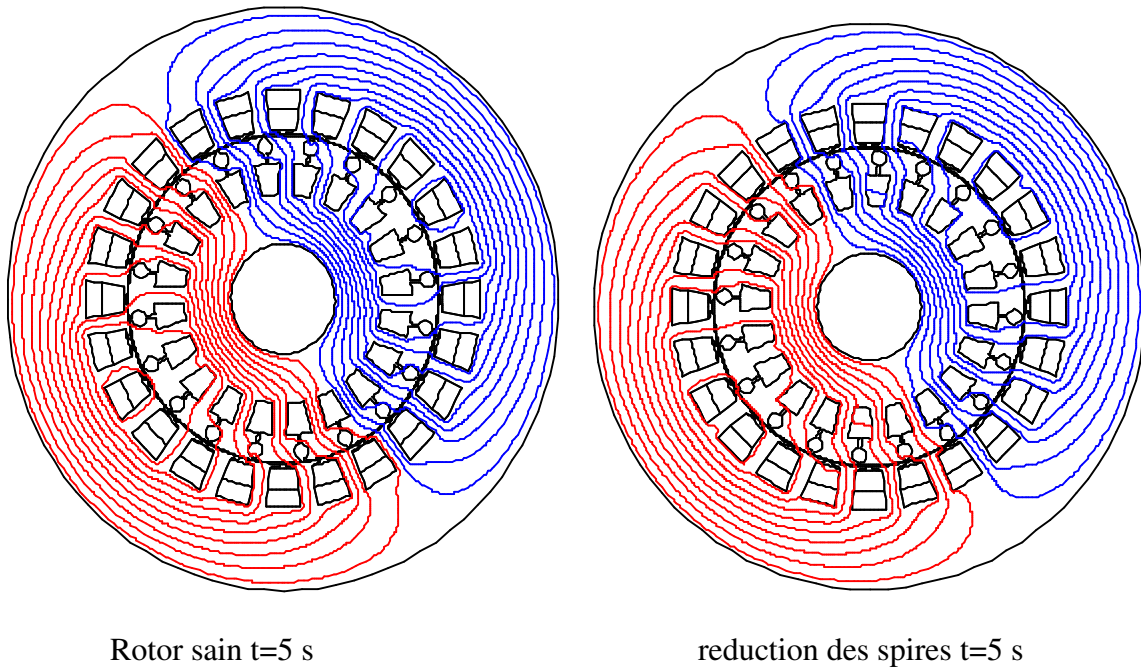


Figure. IV.14 Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 5 (s).

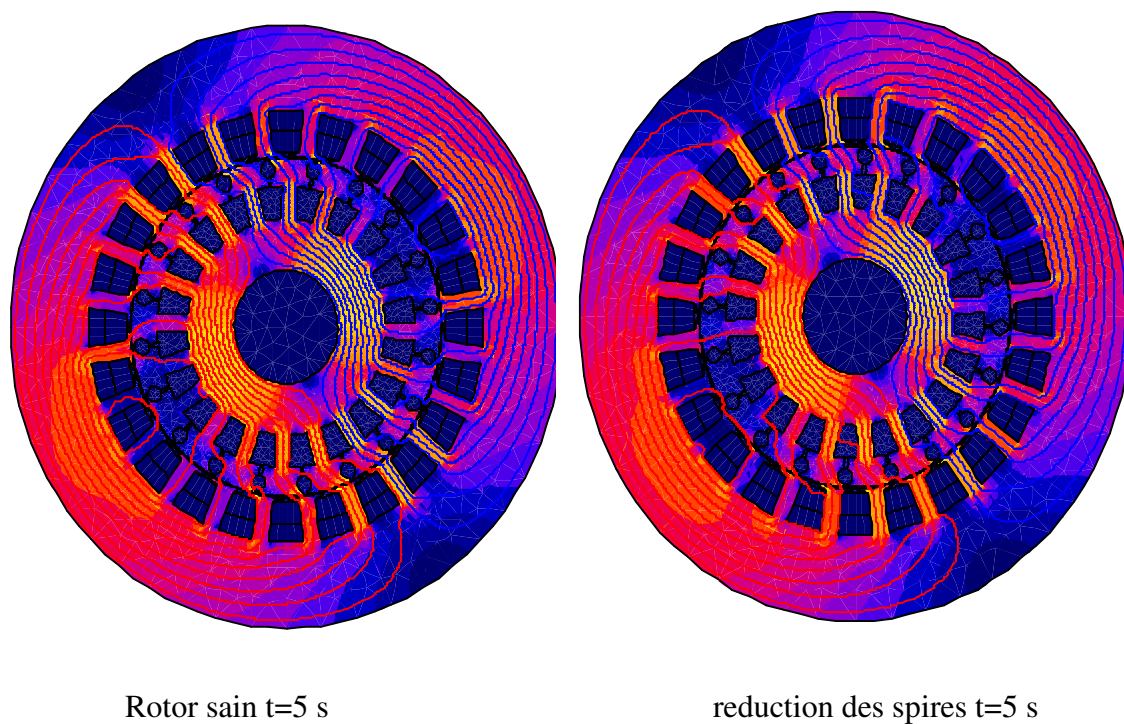


Figure. IV.15 Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 5(s)

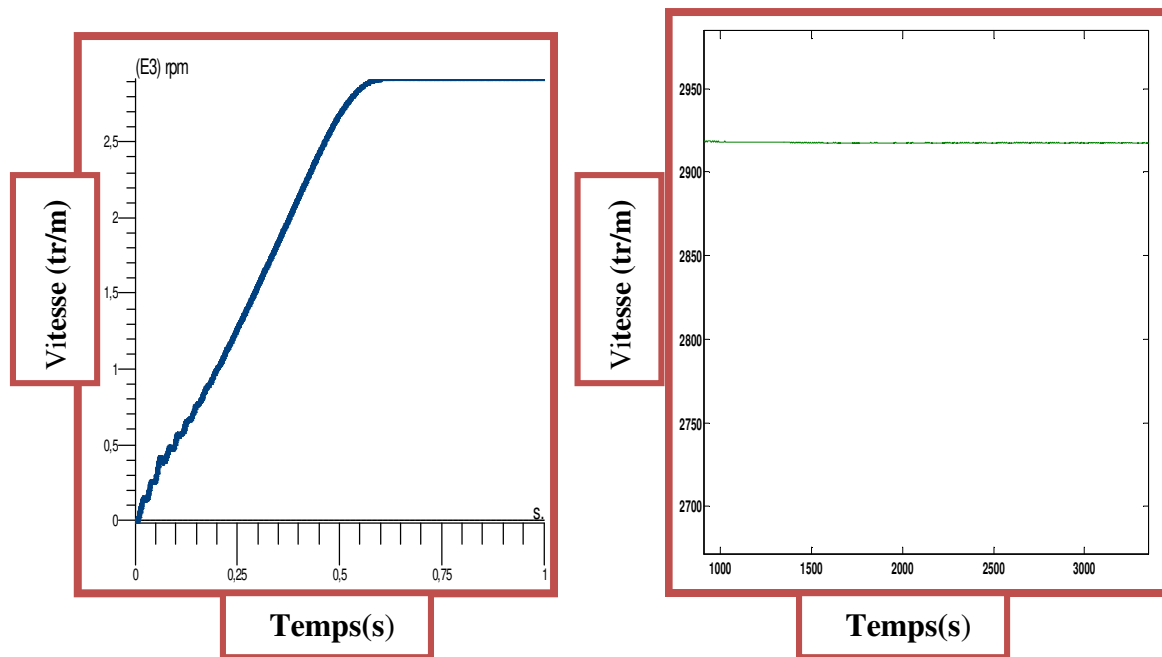


Figure. IV.16 La vitesse de rotation de la machine à l'état sain (avec zoom).

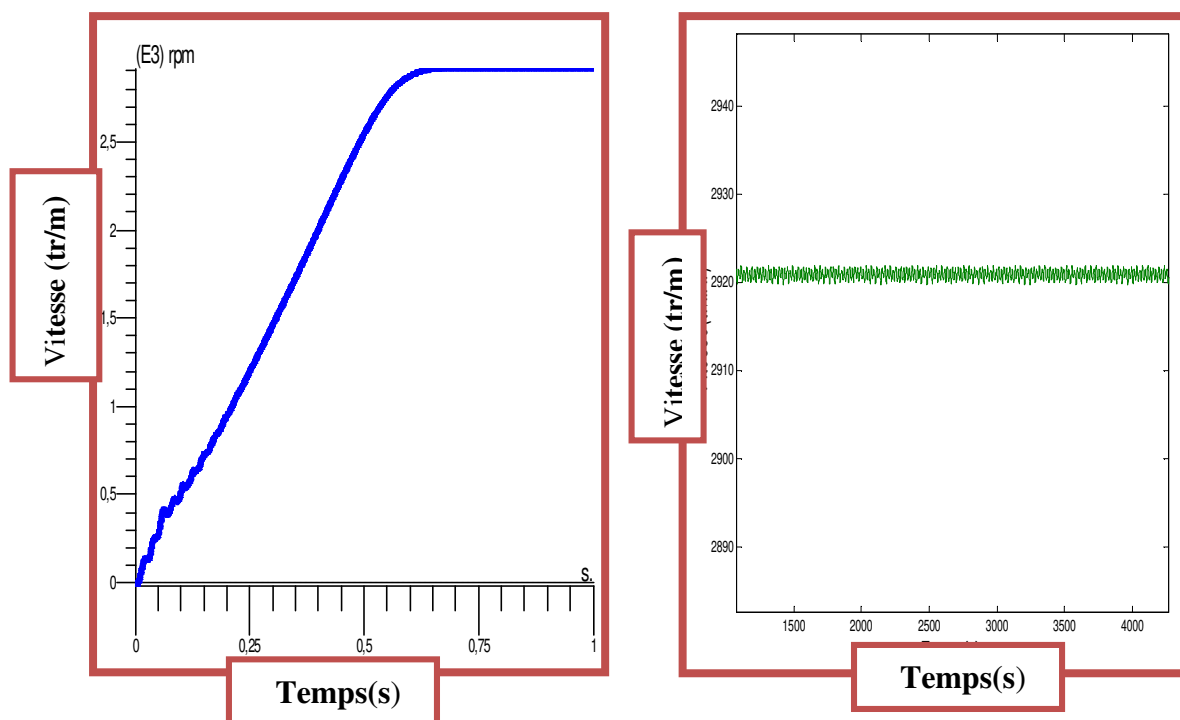


Figure. IV.17 La vitesse de rotation de la machine pour la réduction des spires (avec

zoom

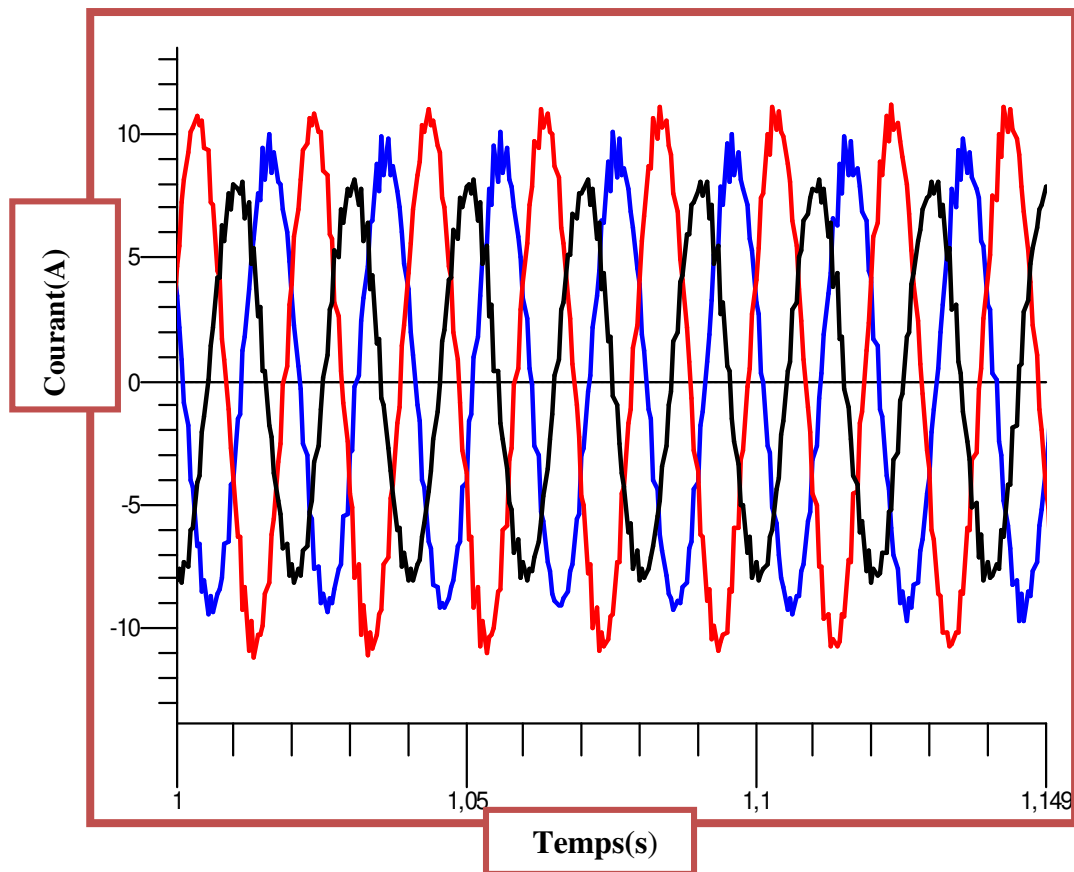


Figure. IV.18 Formes d'onde des courants triphasés avec réduction des spires.

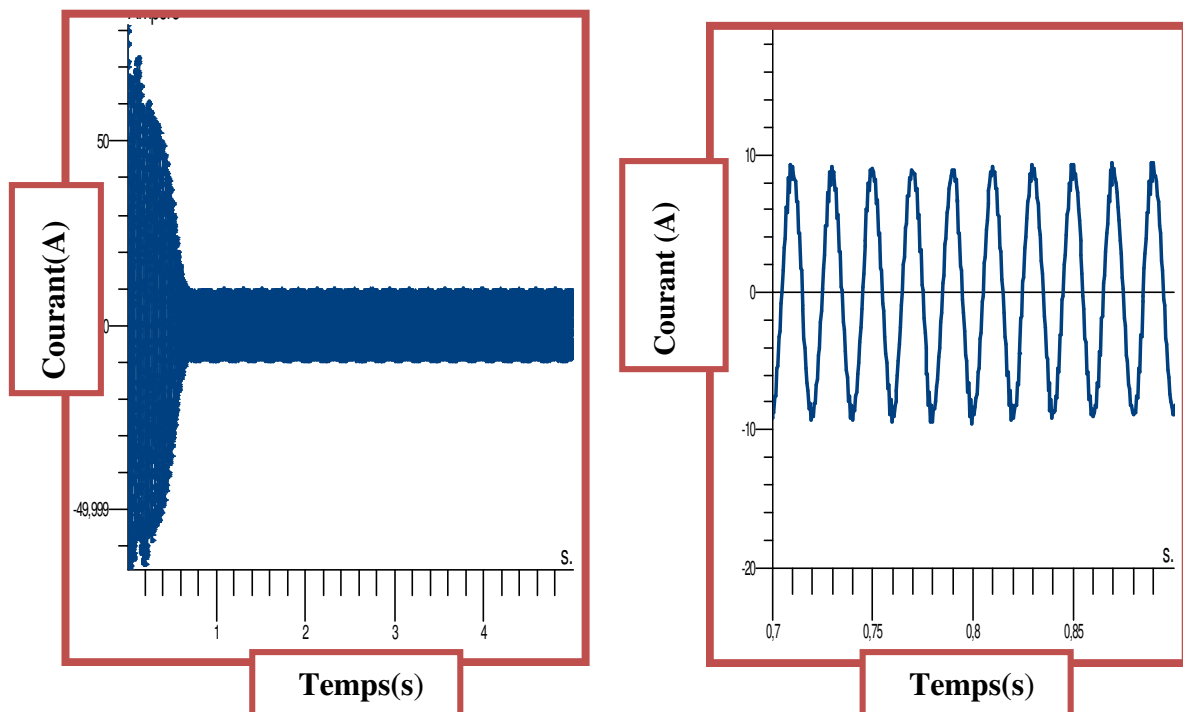


Figure. IV.19 Forme du courant de phase A à l'état sain en charge (avec zoom).

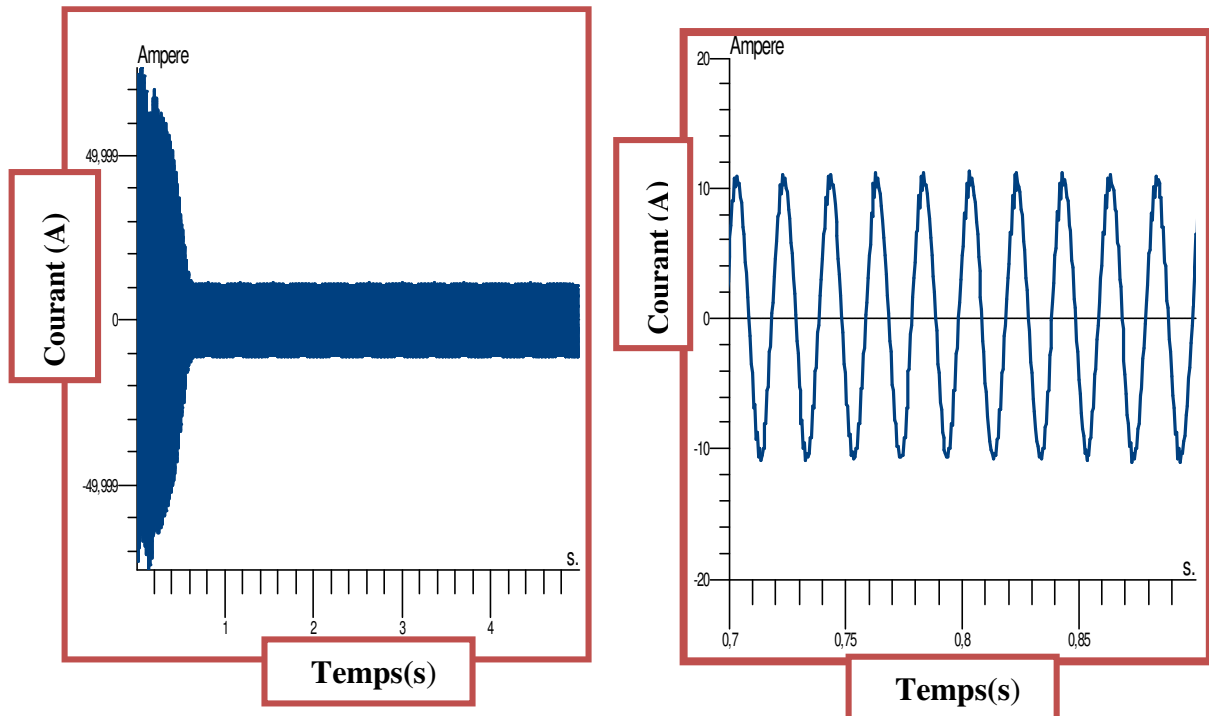


Figure. IV.20 Forme du courant de phase A avec réduction des spires en charge
(avec zoom).

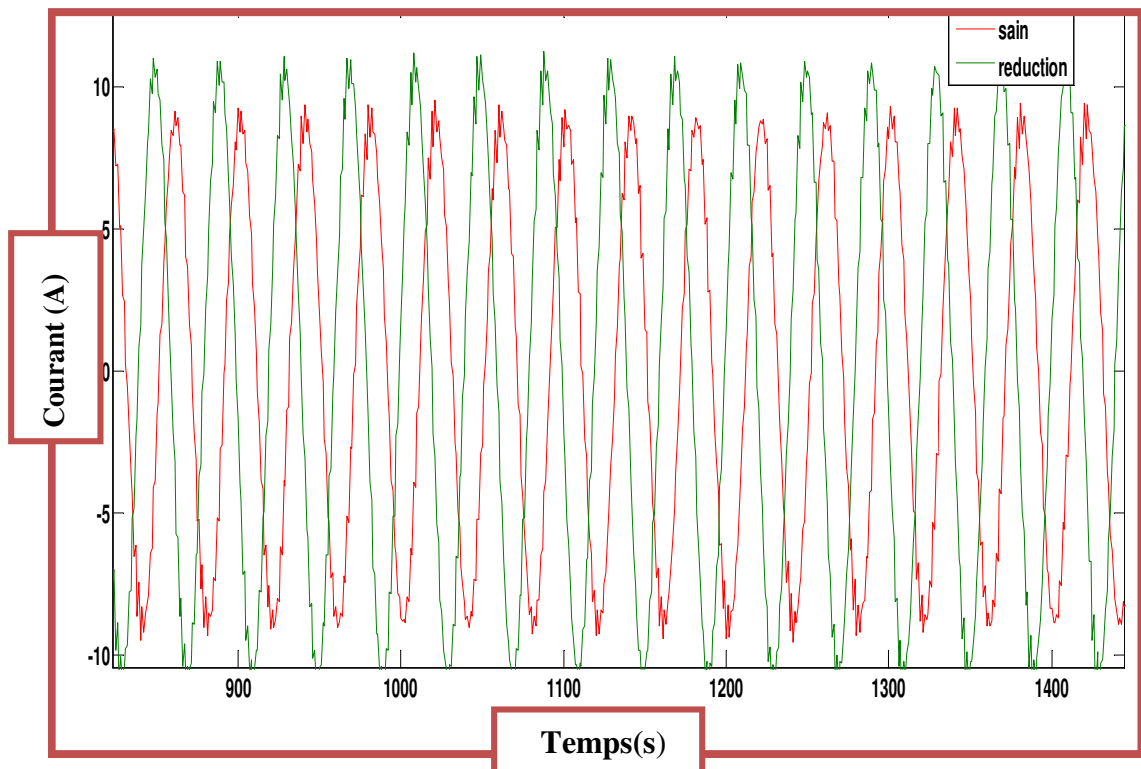


Figure. IV.21 Le régime permanent de courant statorique de phase A.

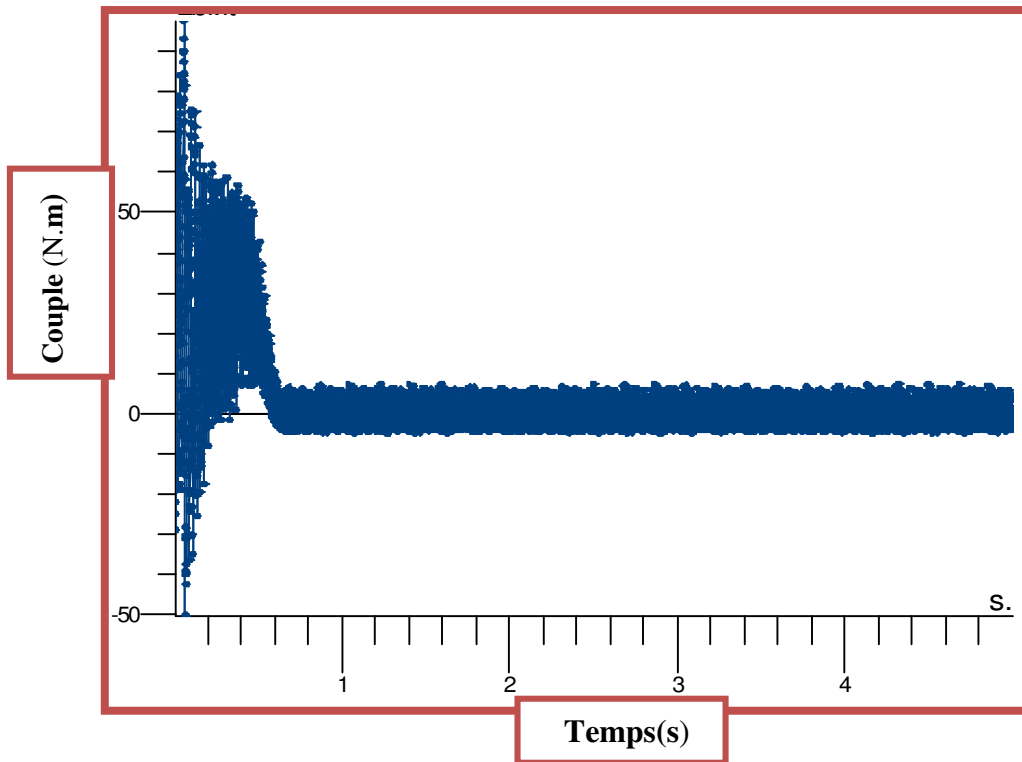


Figure. IV.22 Forme de couple électromagnétique avec la réduction des spires en charge

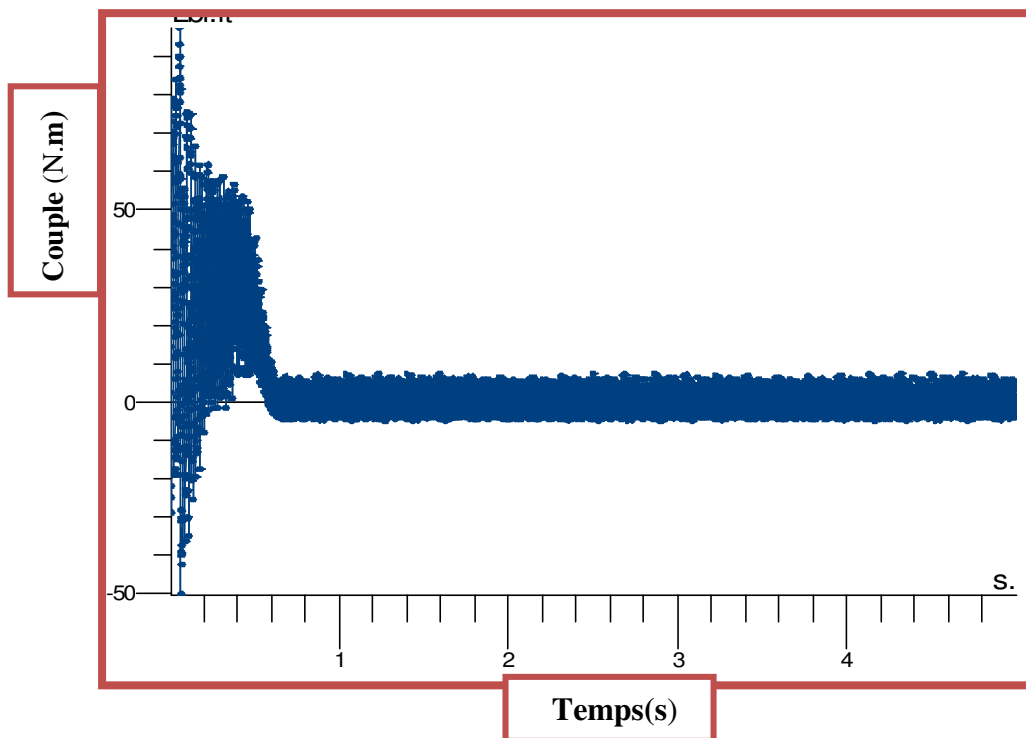


Figure. IV.23 Forme de couple électromagnétique à l'état sain en charge

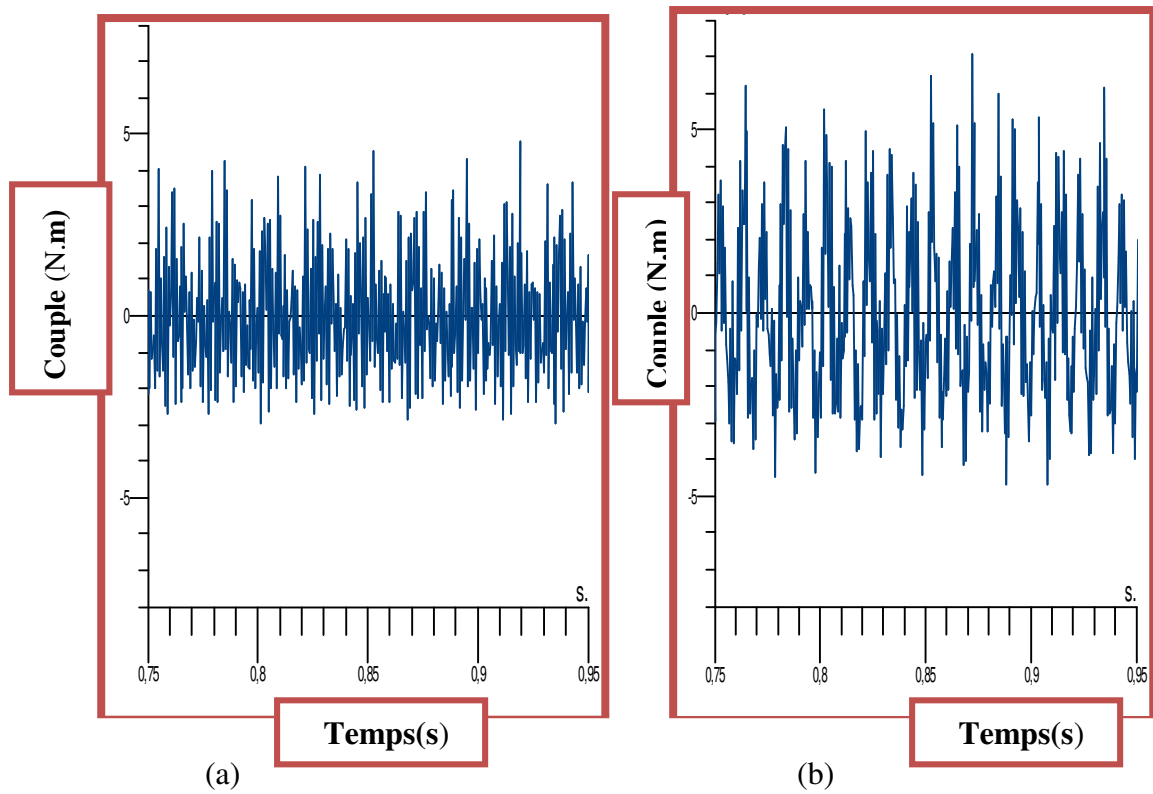
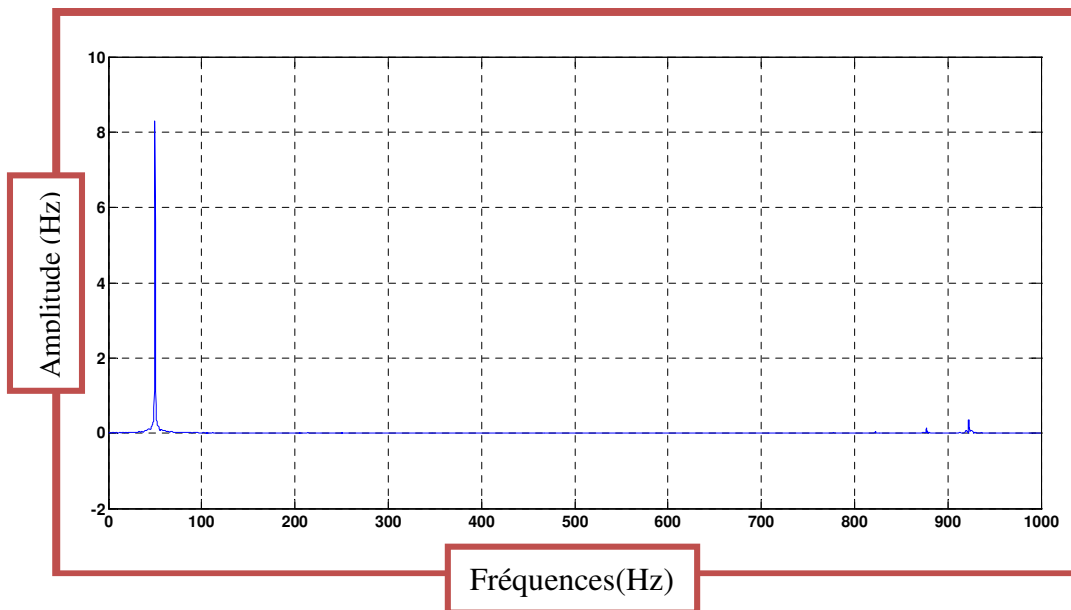


Figure. IV.24 Zoom du couple électromagnétique (a) l'état sain en charge et (b) réduction des spires.



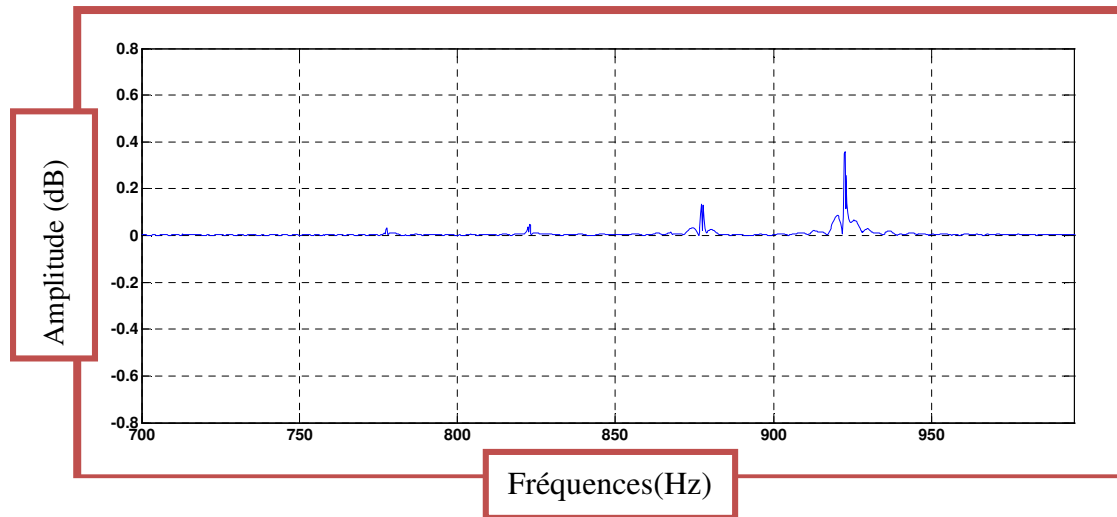


Figure. IV.25 Spectre du courant statorique de la machine saine (avec zoom).

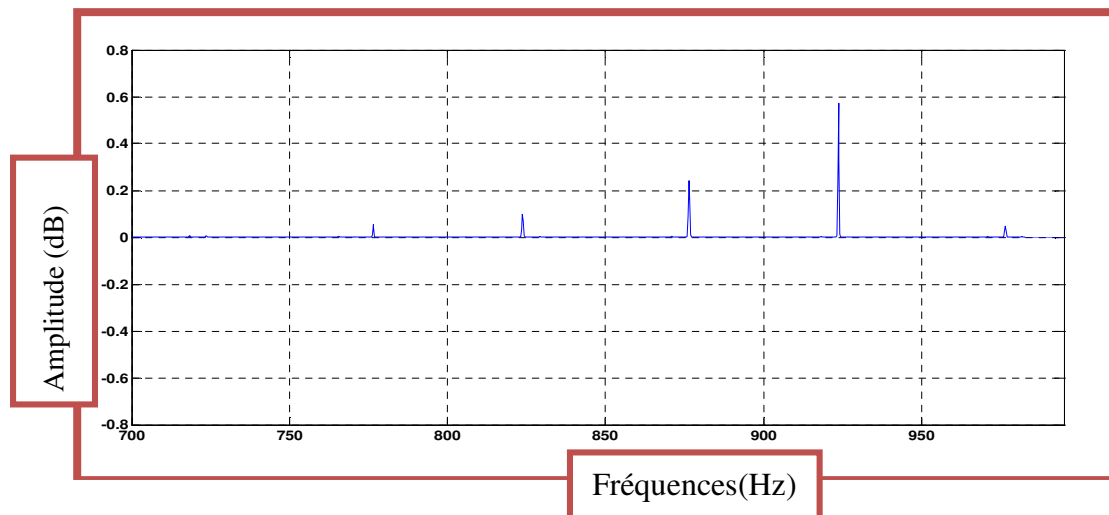
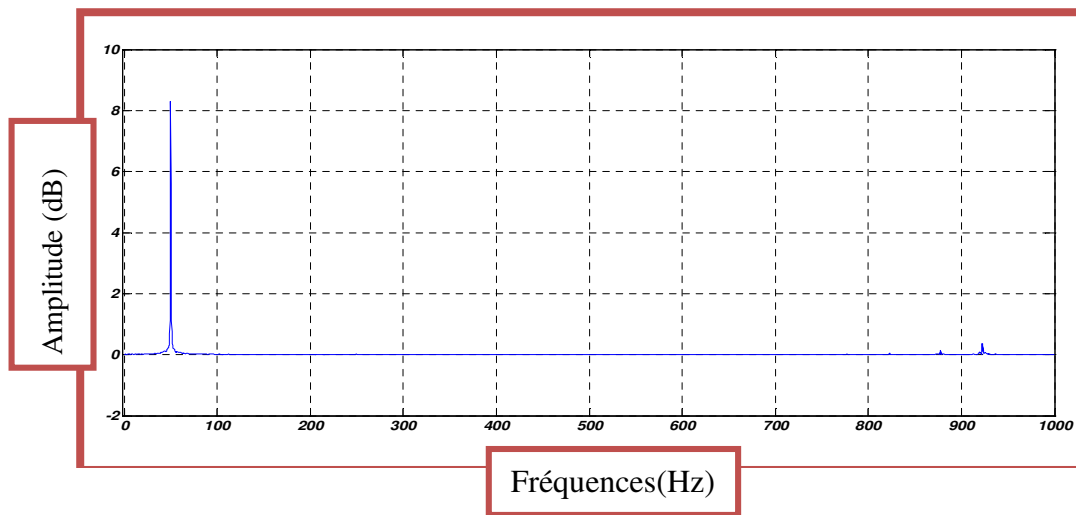


Figure. IV.26 Spectre du courant statorique de la machine avec réduction des spires (avec zoom).

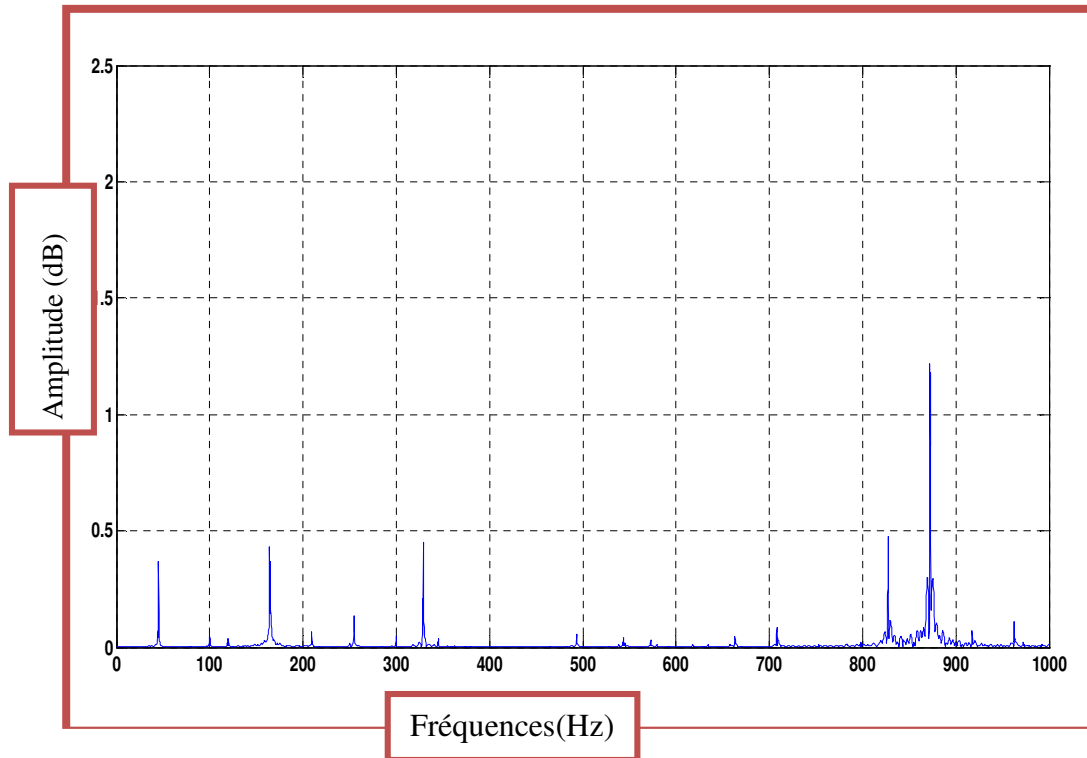


Figure. IV.27 Spectre du couple électromagnétique à l'état sain en charge.

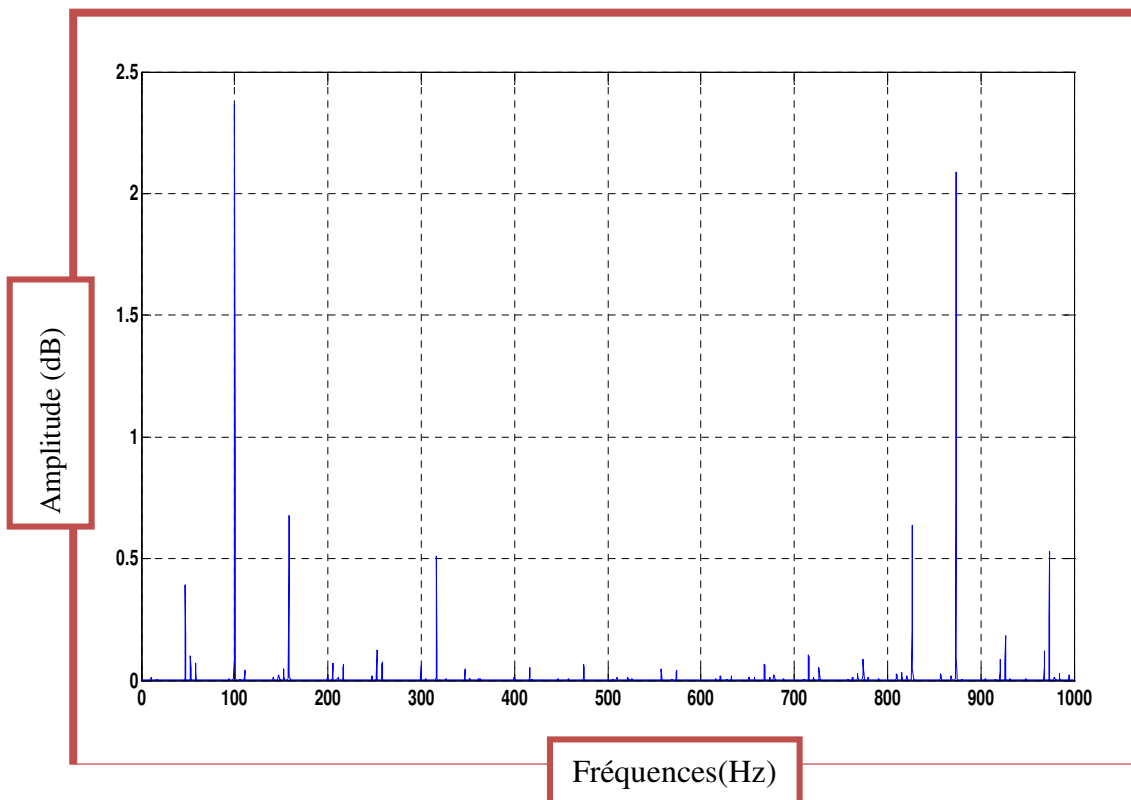


Figure. IV.28 Spectre du couple électromagnétique pour réduction des spires.

IV.4 Simulation du défaut de Court –circuit entre spires par la méthode des éléments finis (méthode 1)

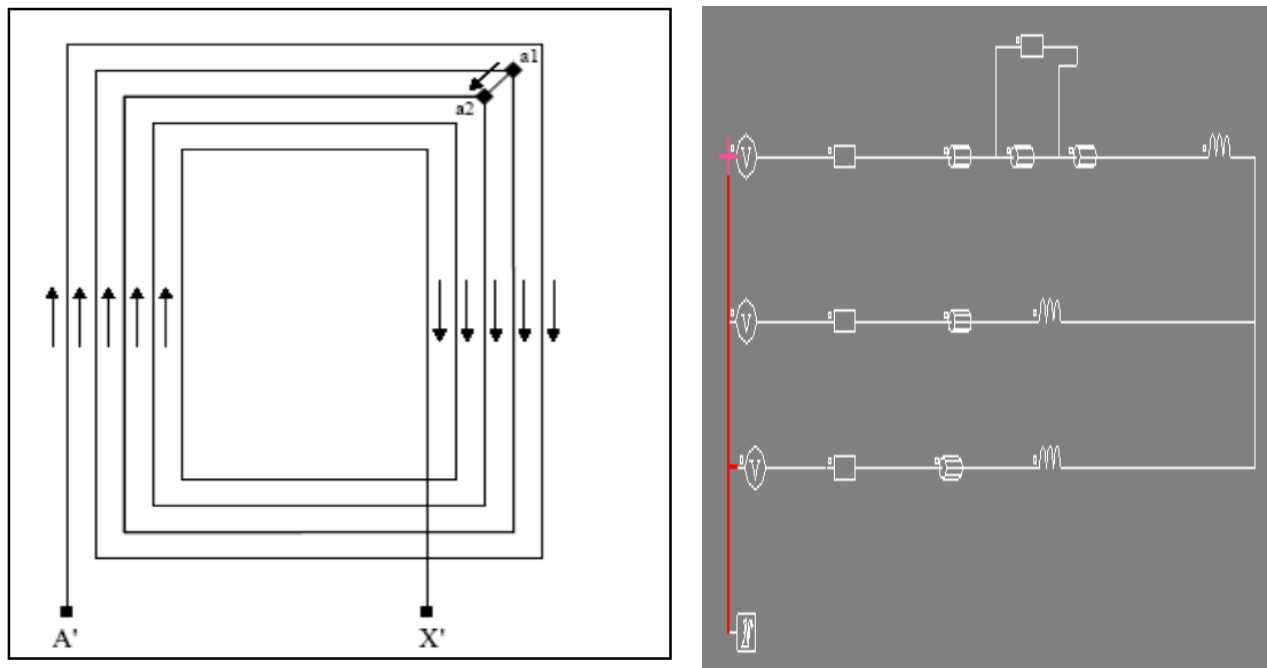
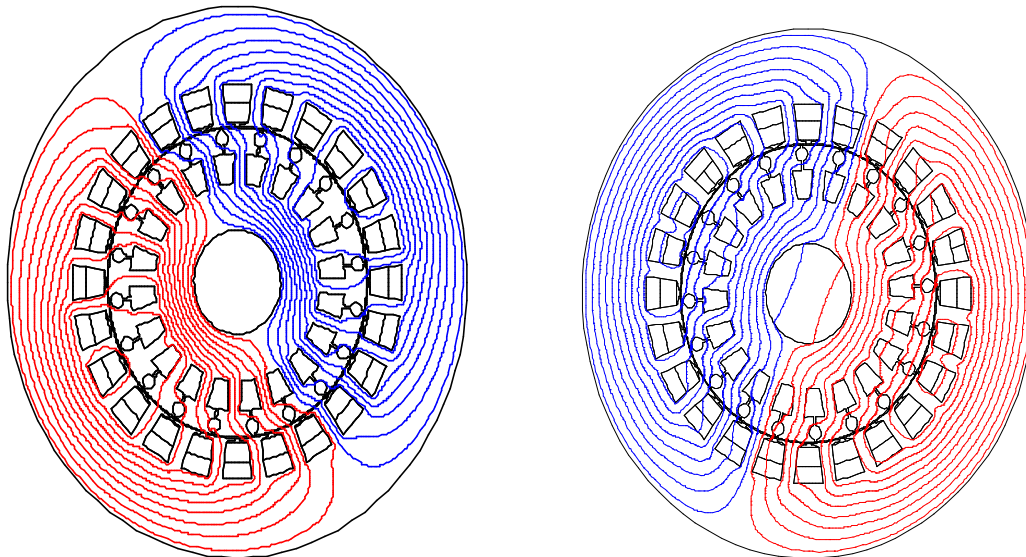


Figure IV.29 Circuit électrique dans cas court circuit entre les spires.



Rotor sain $t=5$ s

Court –circuit entre spires $t=5$ s

Figure. IV.30 Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'instant 5 (s).

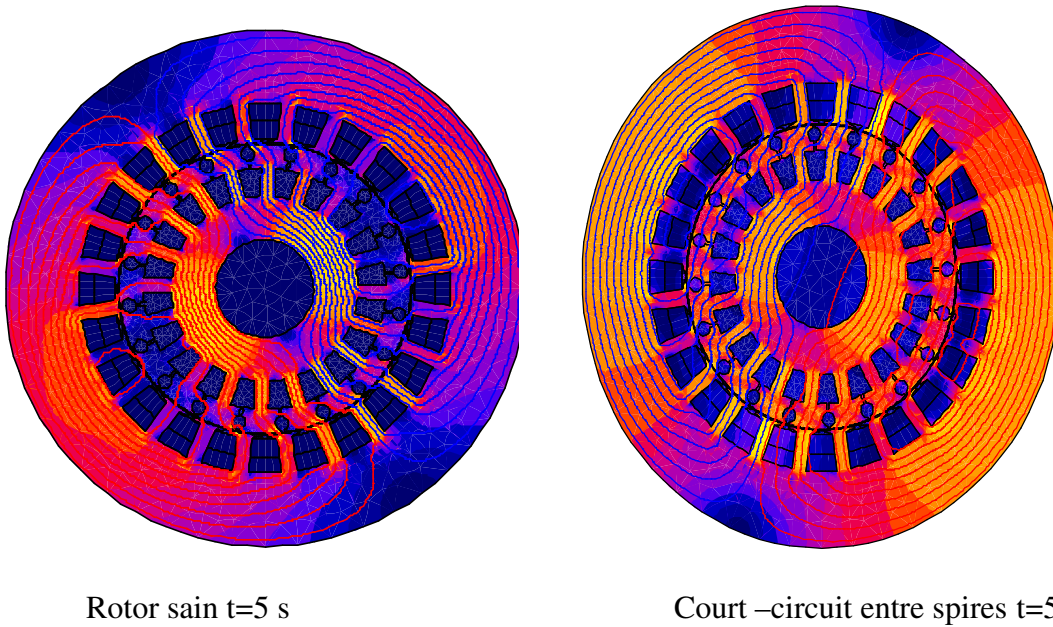


Figure. IV.31 Répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique à l'instant 5(s)

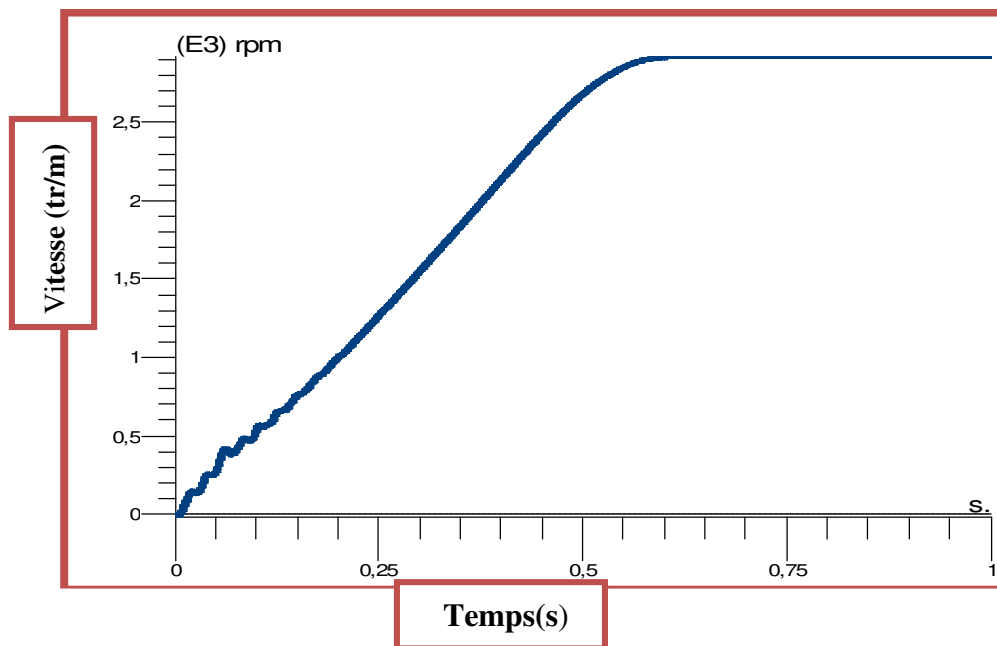


Figure. IV.32 La vitesse de rotation de la machine à l'état sain

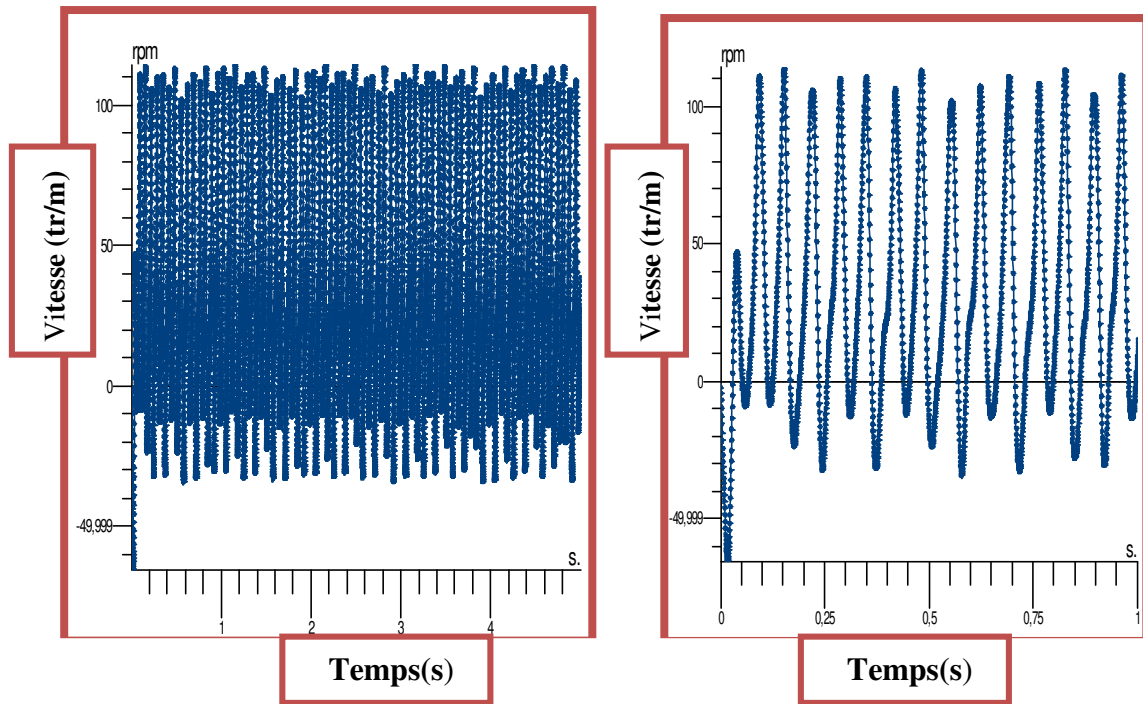


Figure. IV.33 La vitesse de rotation de la machine avec court – circuit entres spires.

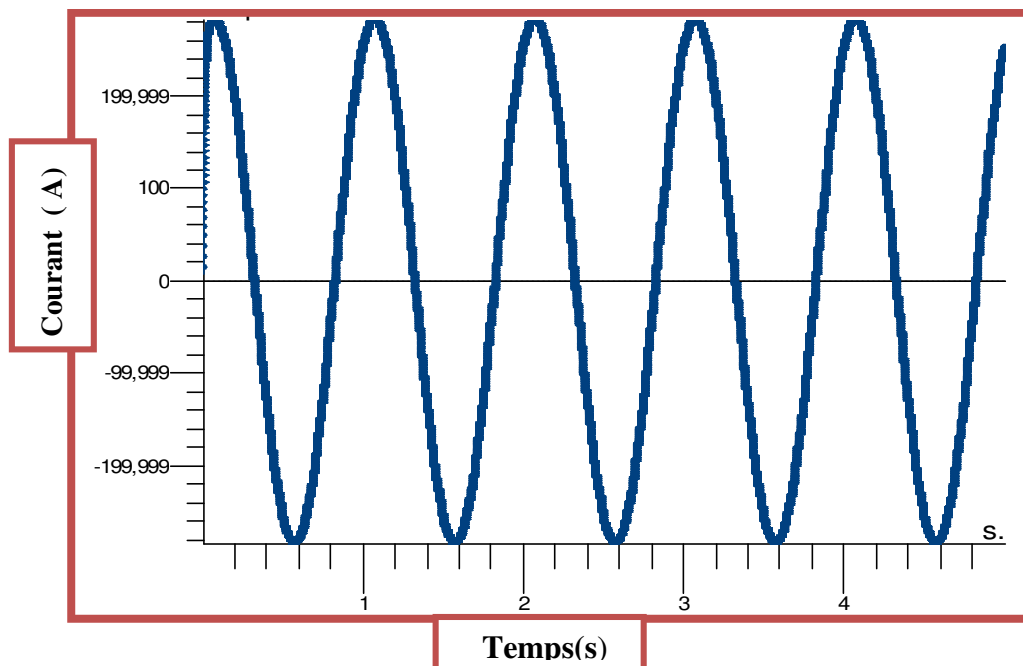


Figure. IV.34 Le courant statorique de la machine avec court – circuit entres spires.

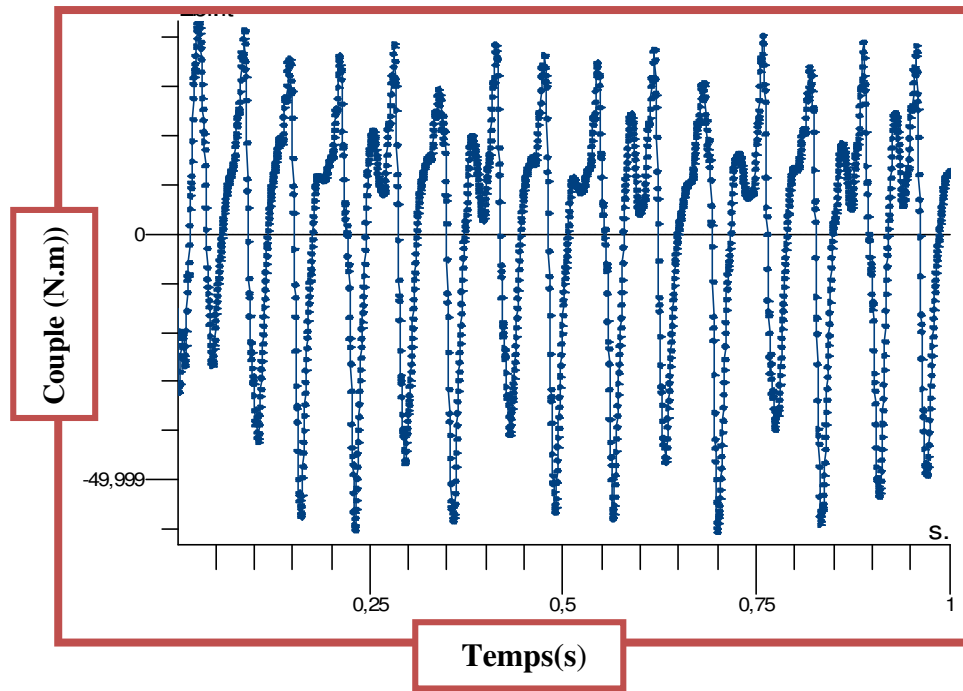
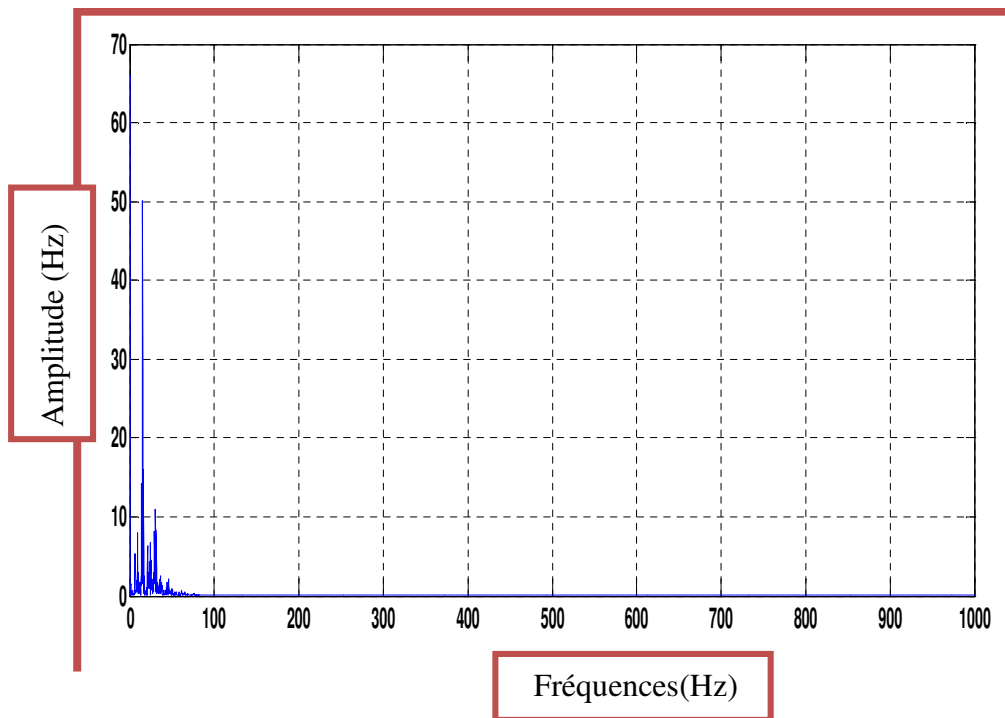


Figure. IV.35 Forme de couple électromagnétique avec court-circuit



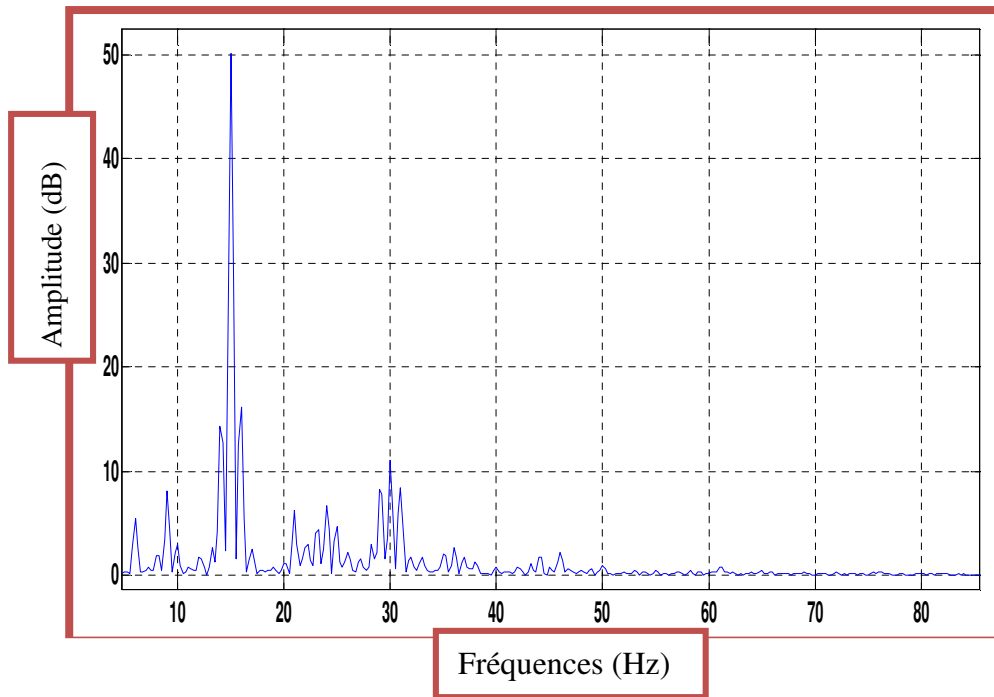
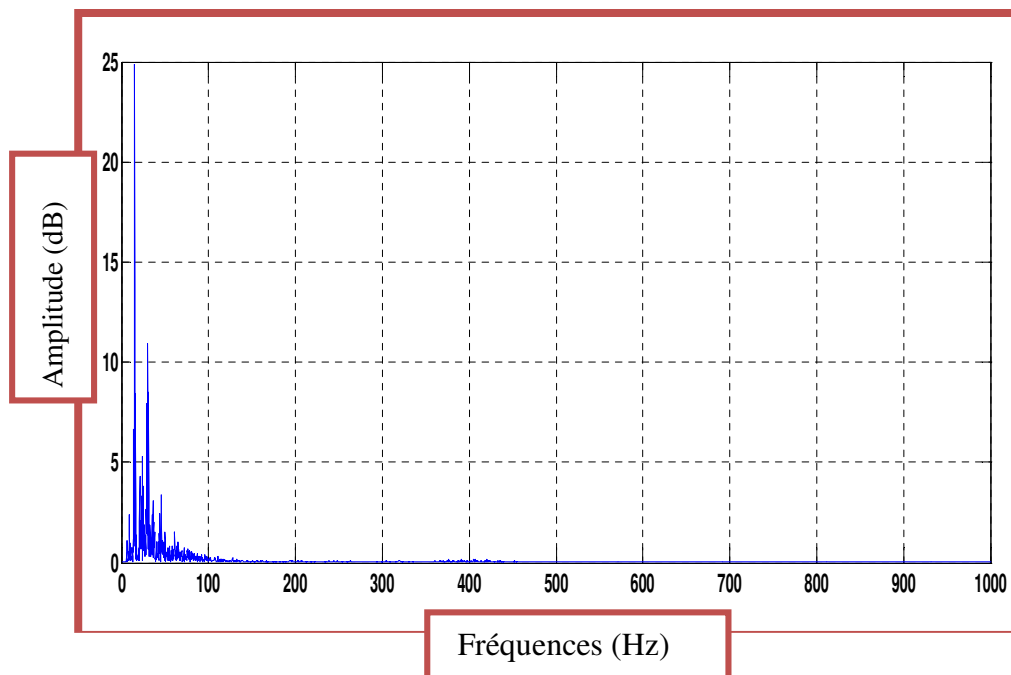


Figure. IV.36 Spectre de vitesse de rotation pour une machine asynchrone avec un court – circuit en pleine charge (avec zoom).



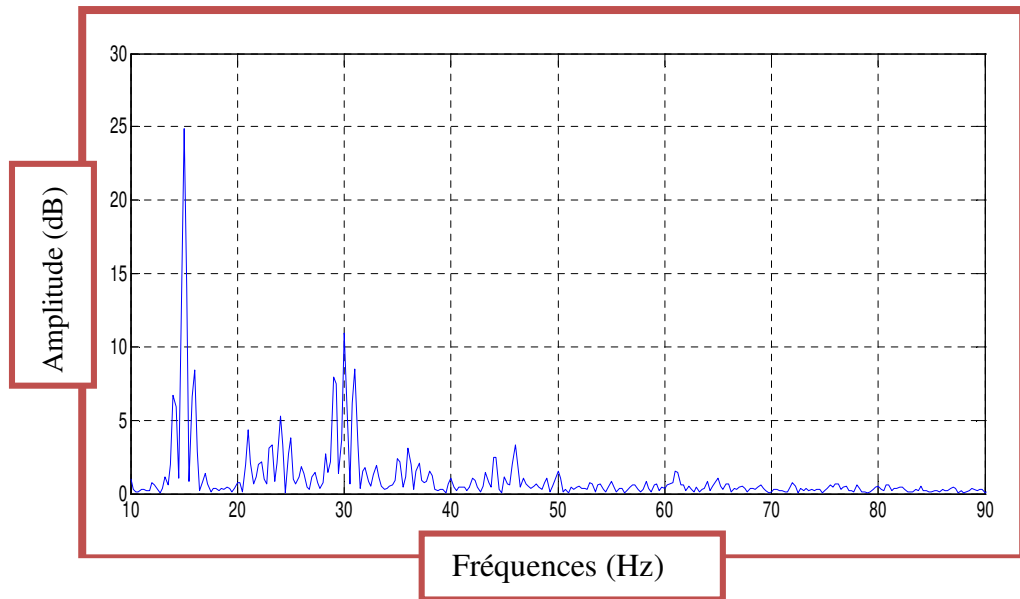


Figure. IV.37 Spectre du couple électromagnétique avec court circuit (avec zoom).

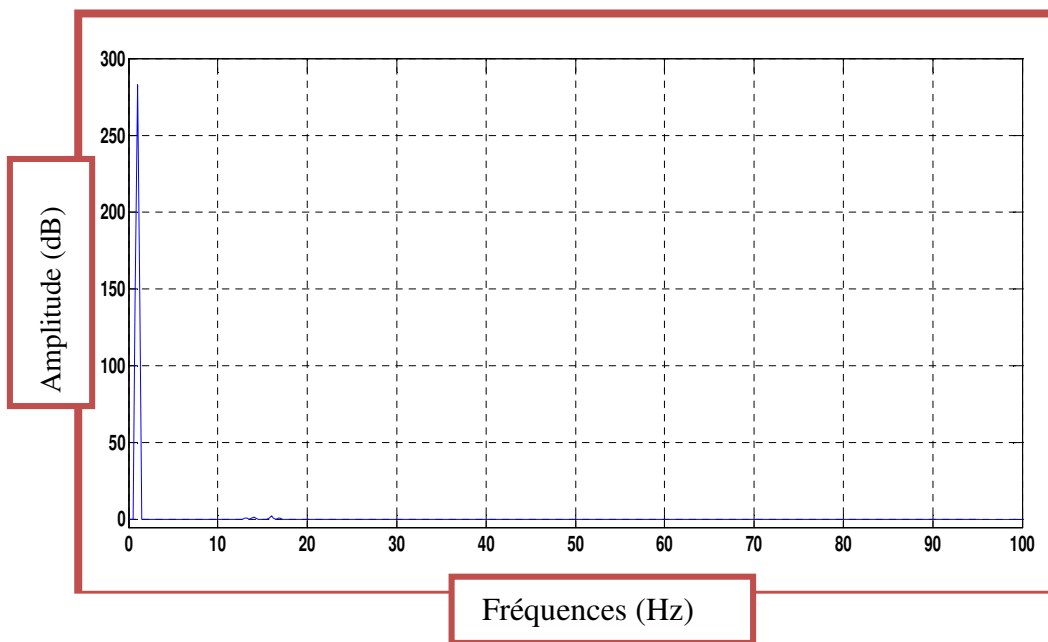


Figure. IV.38 Spectre du courant statorique de la machine avec court-circuit (avec zoom).

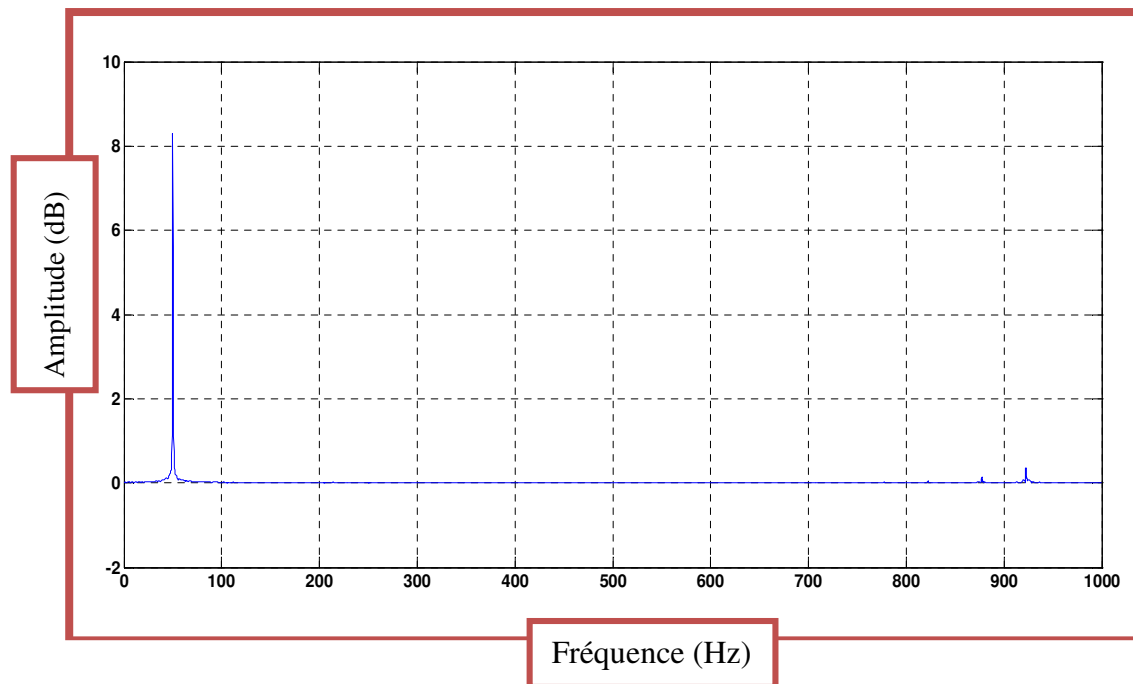
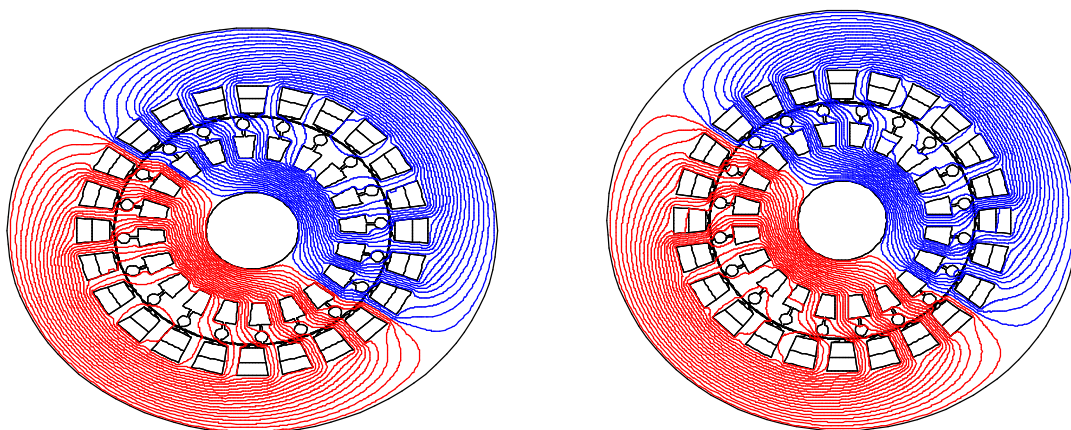


Figure. IV.39 Spectre du courant statorique de la machine saine (avec zoom).

IV.5 Simulation du défaut de Court –circuit entre spires par la méthode des éléments finis (méthode 2)

Nous présentons dans cette partie les résultats des simulations de la MASY obtenus par réduction de spires en diminuant la valeur de la résistance qui présente la valeur de la résistance des enroulements statoriques, les résultats concernent la présentation des grandeurs, électriques, magnétiques et mécaniques. Les résultats indiqués montrent bien que le court-circuit entre spires a provoqué l'augmentation des courants statoriques, dans son spectre, des harmoniques apparaissent.



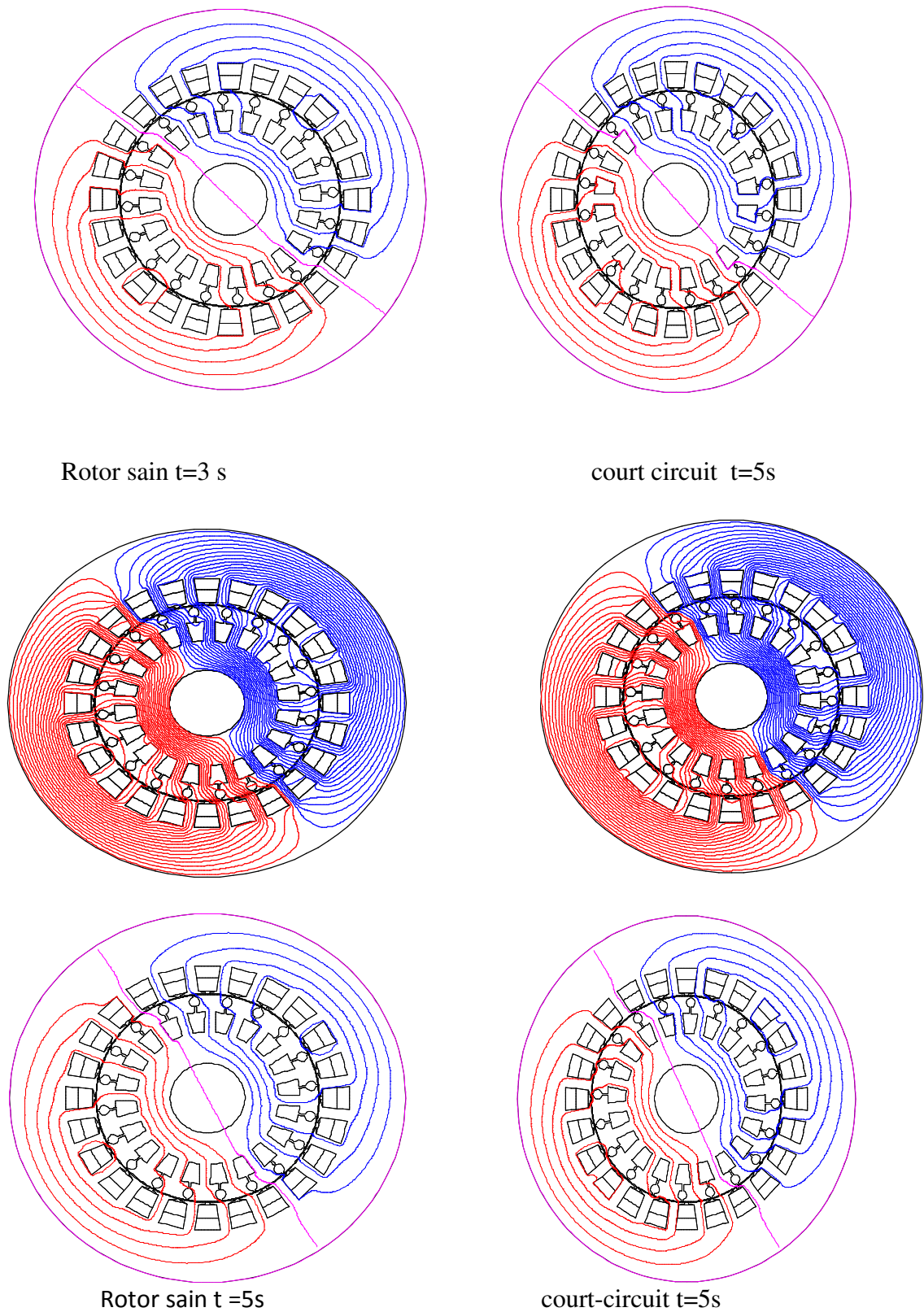


Figure IV.40 Lignes des flux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'état sain et la machine avec d défaut (en pleine charge).

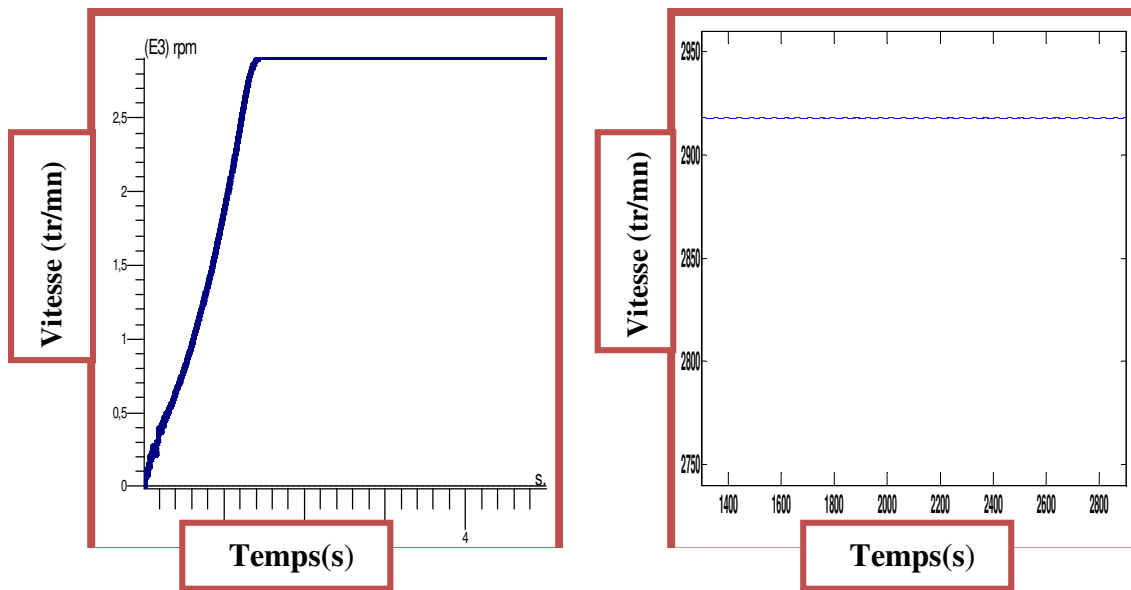


Figure. IV.41 La vitesse de rotation de la machine à l'état sain (avec zoom)

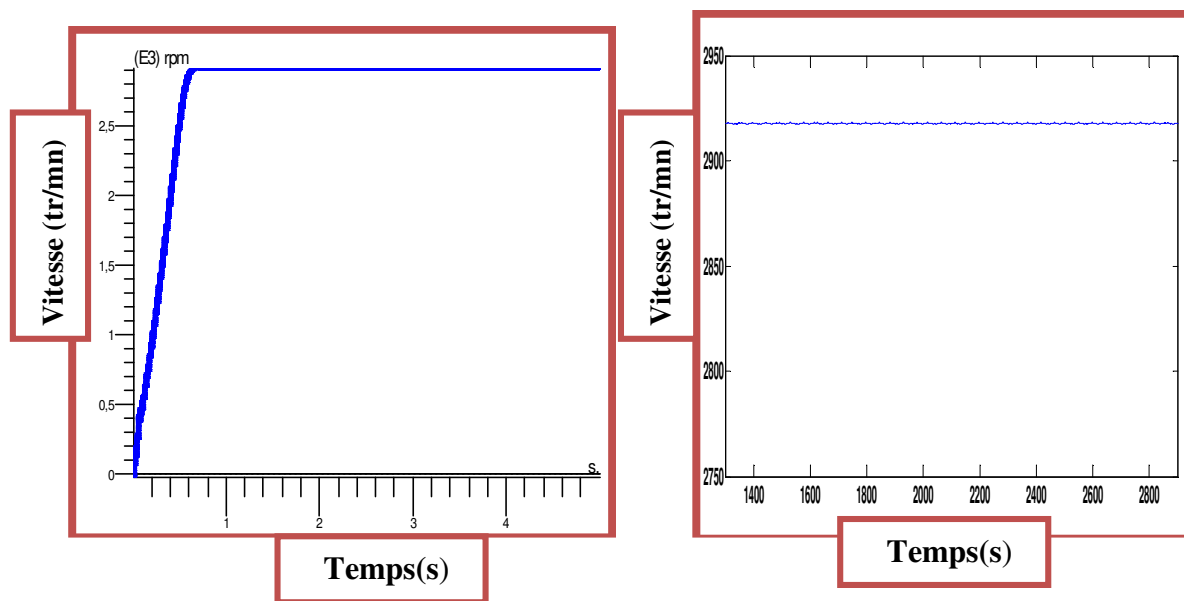


Figure. IV.42 La vitesse de rotation de la machine avec court-circuit (avec zoom).

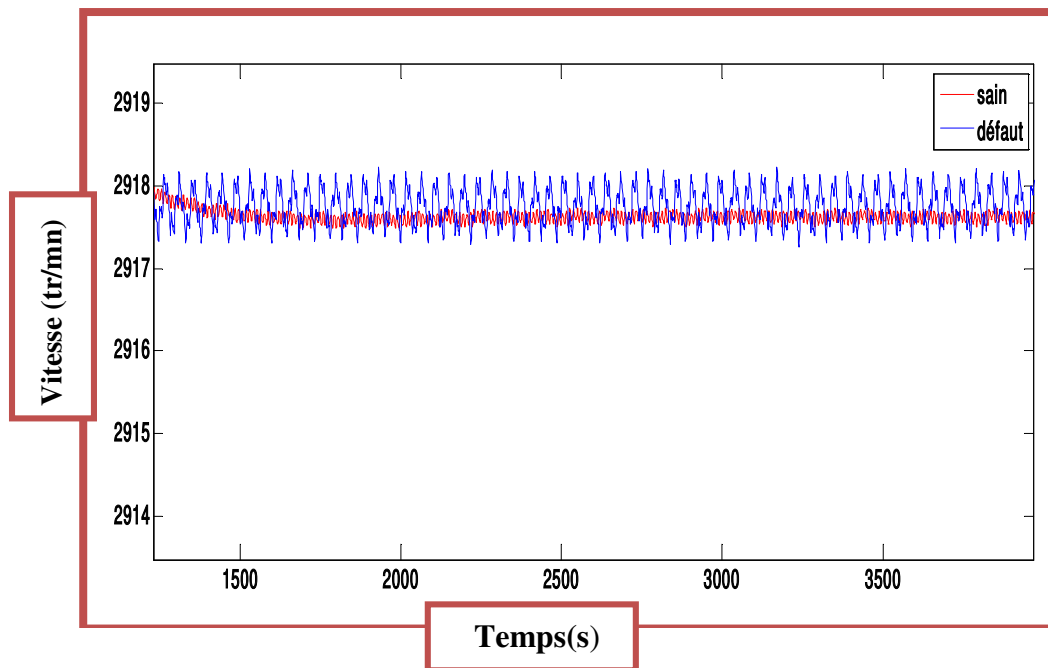


Figure. IV.43 La vitesse de rotation pour une machine asynchrone saine (a) et une machine asynchrone avec court – circuit (b) (en pleine charge) avec zoom.

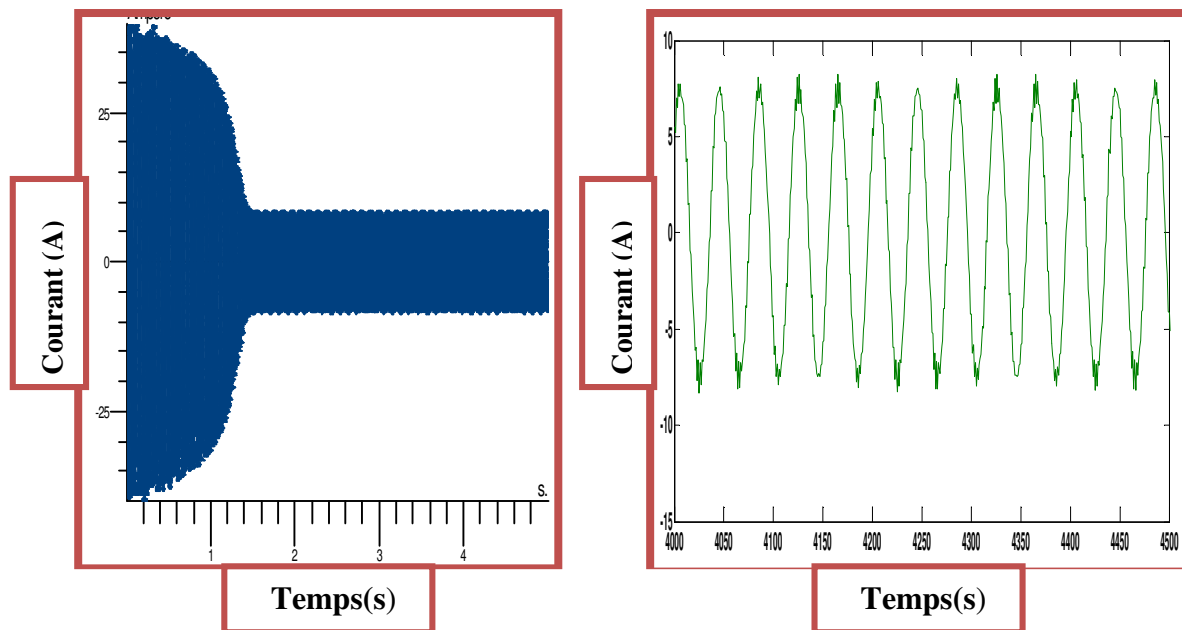


Figure. IV.44 Forme du courant de phase A avec court –circuit en charge
(avec zoom)

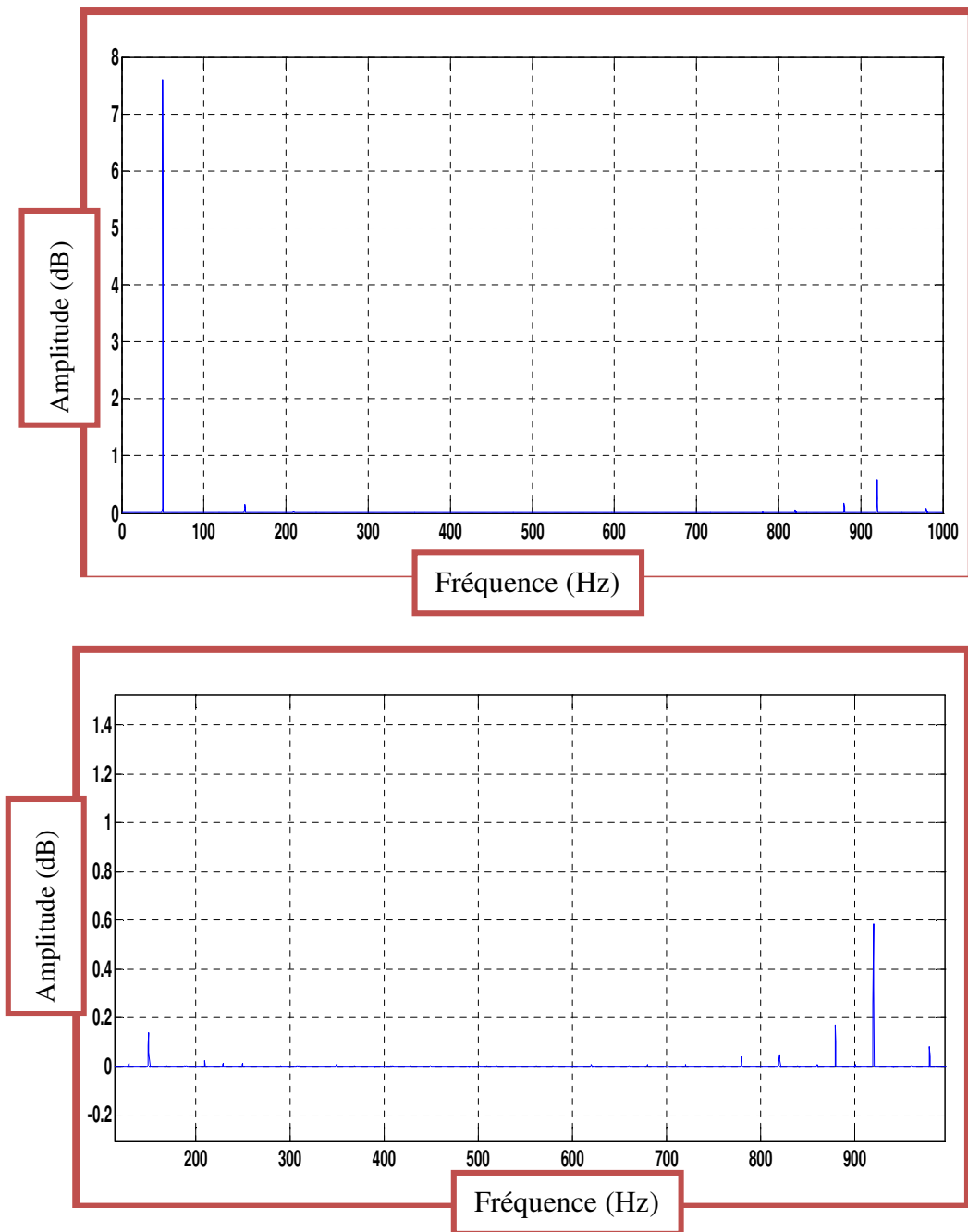


Figure. IV.45 Spectre du courant statorique de la machine sain (avec zoom).

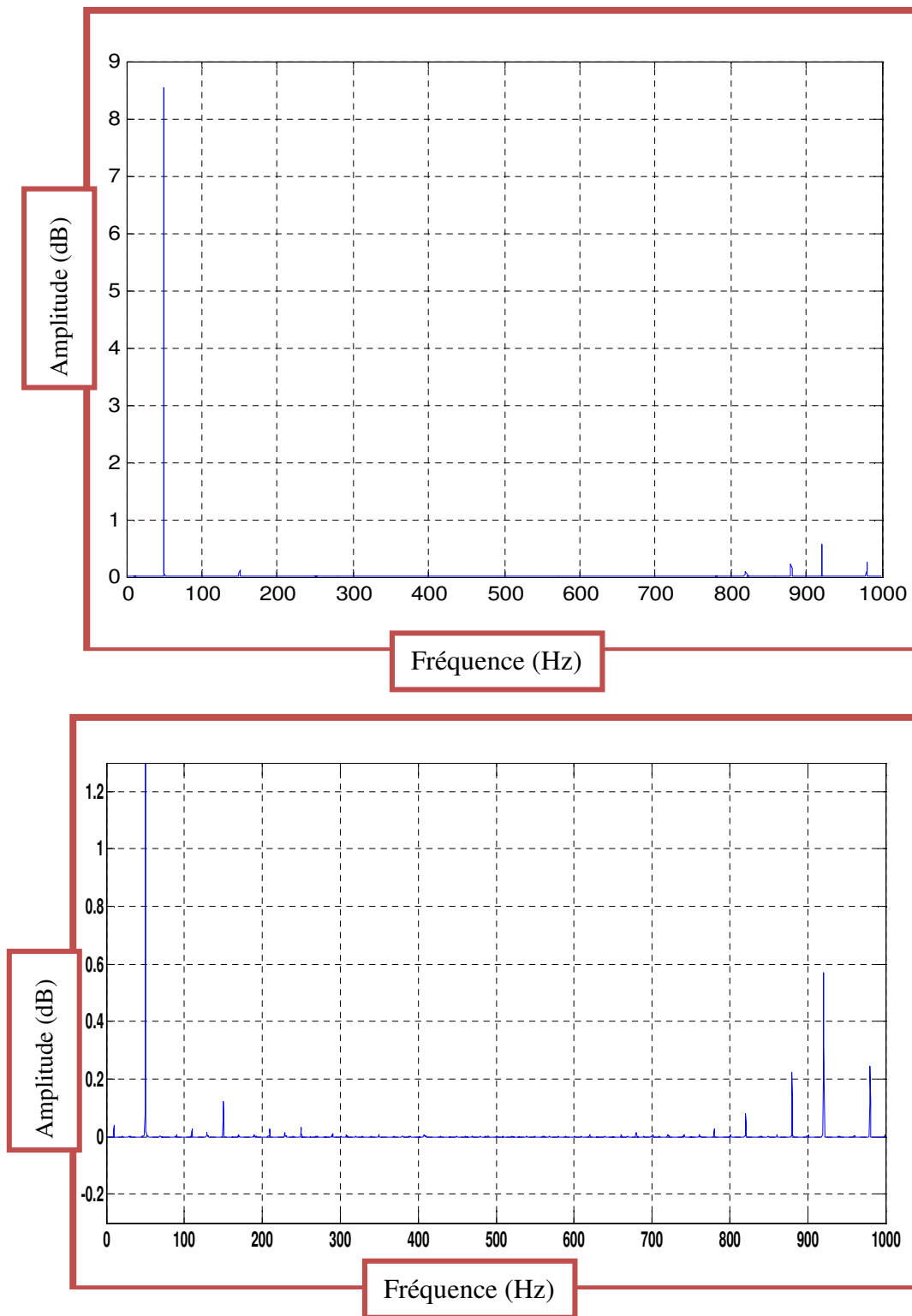


Figure. IV.46 Spectre du courant statorique de la machine avec court-circuit (avec zoom).

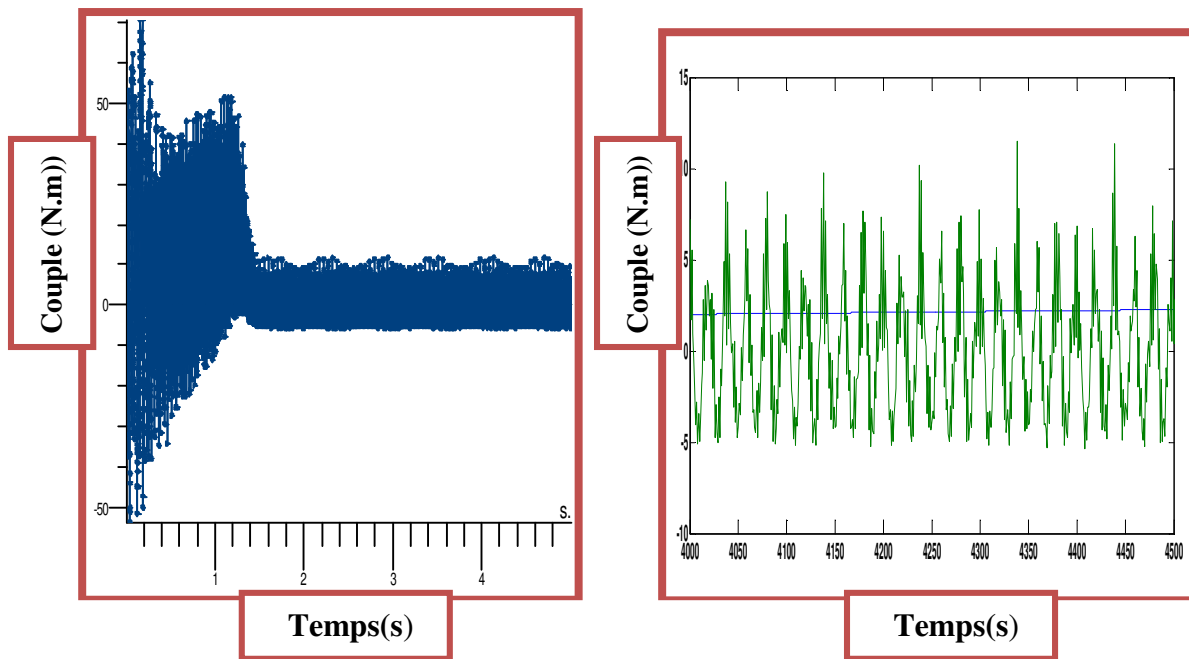


Figure. IV.47 Forme du couple électromagnétique avec court circuit (avec zoom).

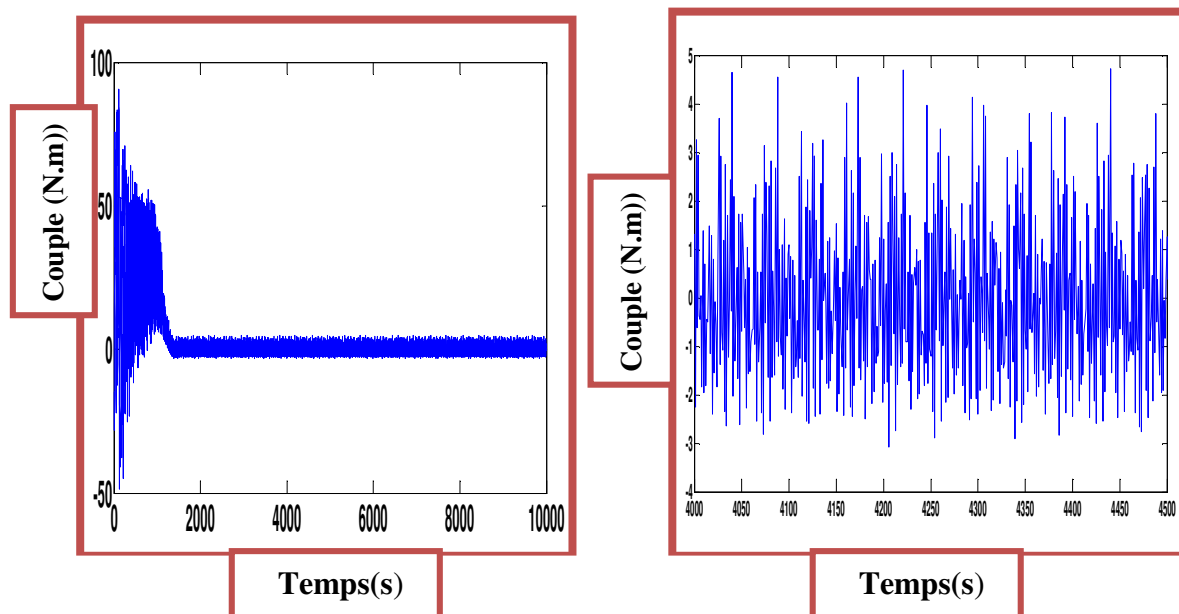


Figure. IV.48 Forme du couple électromagnétique de la machine sain (avec zoom).

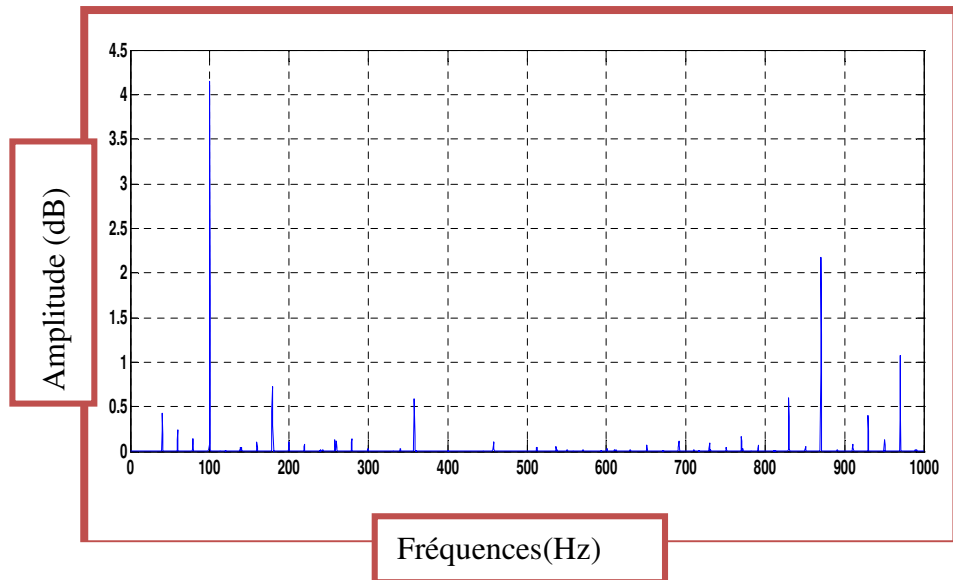


Figure. IV.49 Spectre du couple électromagnétique de la machine avec court circuit (avec zoom).

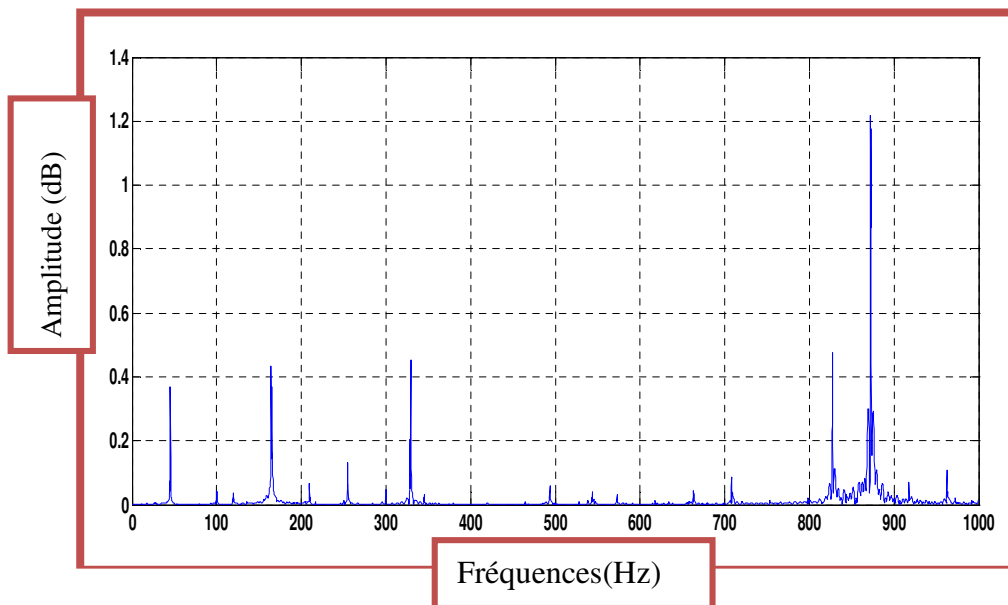


Figure. IV.50 Spectre du couple électromagnétique de la machine sain (avec zoom).

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les résultats des simulations du comportement de la machine asynchrone, dans son état sain et dans son état ayant un défaut, quelques défauts de la machines ont été présentés ou dans la modélisation, nous avons provoqué celui-ci on agissant sur les paramètres de la machine. Par exemple une barre cassée à été modélisé par augmentation de la résistance de la barre rotorique.

Les résultats des simulations ont montré que le comportement de la machine qui présente un défaut, diffère à celui d'une machine saine, ceci veut dire qu'on peut exploiter cette différence dans son comportement pour prévoir ainsi le défaut de la machine, parmi ces changements, la variation dans le spectre du courant, voir du couple ou de la vitesse. Cette variation dans le spectre peut être exploitée pour prévoir ainsi l'état, le défaut et le type de défaut de la machine Asynchrone.

Dans les perspectives, ont propose d'utiliser un modèle tridimensionnel d'une part, ceci peut améliorer les résultats des simulations présentés d'une part, aussi d'introduire le couplage magnétique thermique dans la machine, dans le but de prévoir d'autres types de défaut.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire c'est la modalisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en prenant en considération les défauts statoriques et rotoriques et en vue du diagnostic des défauts statoriques.

Dans ce mémoire, nous avons développé un modèle à base des éléments finis pour simuler les comportements de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Le début de ce mémoire a été marqué par un rappel des différents types des machines électriques et sont définition et différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone triphasé à cage, ainsi que leurs causes et leurs signature spectrales.

Dans ce mémoire, nous avons présentés les résultats des simulations du comportement de la machine asynchrone, dans son état sain et dans son état ayant un défaut, quelques défauts de la machines ont été présenté ou dans la modélisation, nous avons provoqué celui-ci on agissant sur les paramètres de la machine. Par exemple une barre cassé à été modélisé par augmentation de la résistance de la barre rotorique.

Les résultats des simulation ont montré que le comportement de la machine qui présente un défaut, diffère à celui d'une machine saine, ceci veut dire qu'on peut exploité cette différence dans son comportement pour prévoir ainsi le défaut de la machine, parmi ces changements, la variation dans le spectre du courant, voir du couple ou de la vitesse. Ces variation dans le sepectre peut être exploité pour prévoir ainsi l'état, le défaut et le type de défaut de la machine Aynchrone.

Dans les persepectives, ont propose d'utiliser un modèle tridimensionnel d'une part, ceci peut améliorer les résultats des simulations présentés d'une part, aussi d'introduire le couplage magnétique thermique dans la machine, dans le but de prévoir d'autres types de défaut

On propose à court terme étudier la modélisation de la machine asynchrone d'un fonctionnement normal (sans défaut) et dégradé (avec défaut), nous avons créé un modèle éléments finis qui teint compte de la topologie et de dimensions de la machine.

Enfin l'analyse présentée par la méthode des éléments finis que c'est une méthode efficace et couteuse pour étudier l'influence des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone.

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.

L'inconvénient de la méthode des éléments finis c'est le temps de calcul qui est très long.

Un seul cas d'étude dure 2 jours. A noté aussi que la mémoire réserver dans le disque dure doit être très grand (38Go pour une solution de 5 seconde avec un pas 0.00001).

Bibliographie

[01]	Chellouai Nacereddine Mohammed, « Modélisation Des Machines Electriques Par Éléments Finis» Thèse de Master, Electrotechnique Université de Mohammed Khaider Biskra, 2017.
[02]	Belhamsi Saad, « Machines Electriques à Courant Continu et Transformateur» Synthèse du cours, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2015.
[03]	Site Internet : http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere .
[04]	Site Internet : https://fr.wikipedia.org/wiki/Cours d'Electricité , Bruno François.
[05]	Lycée p. Mendès France Epinal, cours machine asynchrone.
[06]	Cazade Eric, « Le moteur asynchrone triphasé » cours machine asynchrone, Lycée La Fayette.
[07]	Medoued Ammar, « Surveillance et Diagnostic Des Défauts des Machines Electriques : Applications Aux Moteurs Asynchrones» thèse doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, 2012.
[08]	A. Hamadou, A.Nessissen, «Modélisation Numérique d'un Moteur Asynchrone à cage d'écureuil »thèse de Master, Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana, 2015.
[09]	Sahroui Mohamed, «Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones» thèse de doctorat, Université de Mohammed Khaidher Biskra, 2010.
[10]	Saadi SAKHARA, «Diagnostic Des Défauts D'un Entraînement Electrique Par La Technique Ondelette» thèse de doctorat, Université de Badji Mokhtar- Annaba, 2017.
[11]	Andrian Ceban, «Méthode Globale De Diagnostic Des Machines Electriques» thèse de doctorat, Université Lille de Nord de France, 2012.
[12]	Pr A.Menacer, Cours diagnostic de la machine asynchrone, 2017.
[13]	Abla Bouguerne, «Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones» mémoire de magister, université Mentouri –Constantine, 2012.
[14]	R.Chaouche ,S.Chetti, «Détection et diagnostic de défauts statorique externe d'un moteur asynchrone triphasé à l'aide de la carte ARDUINO MEGA 2560» Mémoire Master Academique , Universté Kasdi Merbah Ouargla, 2016.
[15]	Hakima Cherif, «Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine Asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelette » mémoire de magister, Université de Mohammed Khaidher Biskra, 2014.
[16]	BOUCHAREB Ilhem, «Modélisation & Simulation de Défauts D'une Machine Synchrone à Réductance Variable » mémoire de magister, Université de Constantine, 2009.

[17]	M. Bouray Islam, «Réalisation de cas de démo Flux accessibles depuis le superviseur » Master Ingénierie Electrique Electronique et Informatique Industrielle, Université de Lorraine, 2014.
[18]	Lakhdari Meftah, «Simulation et commande de la Machine Asynchrone Double Etoile Pour Aerogeneration» mémoire de magister, Université de Fergat Abbas-Setif-1, 2014.
[19]	Laadjal Khaled, «Modélisation de la Machine Asynchrone en présence de défauts par flux 2D» Thèse de Master, Université de Biskra, 2015