



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseau électrique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
HIRECHE Abdelhakim

Le : lundi 25 juin 2018

Diagnostic des défauts de cassure de barres dans les machines asynchrones par la technique du rotor bloqué

Jury :

Mr	ALLOUI Lotfi	Prof	Université de Biskra	Président
Mr	MIMOUNE Sourî Mohamed	Prof	Université de Biskra	Encadreur
Mr	KHENE Mohamed Lotfi	MCA	Université de Biskra	Examineur



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

Réf:.....

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

MASTER

Thème

Diagnostic des défauts de cassure de barres dans les machines asynchrones par la technique du rotor bloqué.

Présenté par :
HIRECHE Abdelhakim

Soutenu le : 25 Juin 2018

Devant le jury compose de :

Mr. ALLOUI Lotfi	Prof	Président
Mr. MIMOUNE Sourî Mohamed	Prof	Encadreur
Mr. Khene Mohamed Lotfi	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 : Réseau électrique

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

MASTER

Thème

**Diagnostic des défauts de cassure de barres dans les machines
asynchrones par la technique du rotor
bloqué.**

Présenté par :

HIRECHE Abdelhakim

Avis favorable de l'encadreur :

Prof. MIMOUNE Sourî Mohamed

signature

Avis favorable du Président du Jury

Prof. ALLOUI Lotfi

Signature

Cachet et signature

Remerciements

Je remercie « **ALLAH** » le tout puissant de m'avoir donné le courage ainsi que la force pour pouvoir finir ce modeste travail.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont participé à la réussite de mon travail :

Nous tenons à exprimer nos vifs et sincères remerciements à «Professeur Mimoune Med Sourî», de nous avoir encadrés, pour sa constante disponibilité, son aide, encouragements et nous lui sommes reconnaissants pour ses conseils et orientations.

Je remercie Mr : ALLOUI Lotfi (professeur à l'université de Biskra) d'avoir accepter de présider ma soutenance de master, et Mr: Khene Mohamed Lotfi (MCA à l'université de Biskra). Pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous remercions aussi tous les enseignants du département d'Electrotechnique qui ont contribué à notre formation.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes très chers parents
pour leur soutien moral et matériel, pour leurs
encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés dans les moments les plus
ardus.

A mon frère Ramzi

A mon sœur Hadjer

Et à tous mes amis.

HIRECHE ABDELHAKIM

Liste des figures

Figure		page
Chapitre I : Généralité sur le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone		
I.1	Machine asynchrone	5
I.2	Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	6
I.3	Vue schématique en perspective du stator.	7
I.4	Vue schématique en perspective du rotor.	8
I.5	Proportion des défauts	12
I.6	Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.	12
I.7	Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances.	13
I.8	Structure d'un roulement à billes.	14
I.9	Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.	17
I.10	Défaut d'un rotor à cage d'écureuil.	18
I.11	Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique.	29
I.12	Dimension du roulement à billes.	31
Chapitre II : Calcul de champ électromagnétique par la MEF dans la MAS		
II.1	Maillage du domaine d'étude(Ω) en volume finis	39
II.2	Un domaine d'étude discrétisé en éléments finis.	40
II.3	fonction d'interpolation d'un élément.	42
II.4	l'enchaînement des programmes de Flux 2D.	44
II.5	Les dimensions de la machine.	45
II.6	Dimension des encoches, a) l'encoche statorique, b) l'encoche rotorique.	45
II.7	Bobinage statorique.	46
II.8	Circuit magnétique de la MAS.	46
II.9	Les points de maillage.	50
II.10	Répartition du maillage.	50

II.11	Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.	51
II.12	CIR_VOLTAGE circuit pour voltage source de simulations.	52
II.13	Circuit équivalent de la cage rotorique.	52
II.14	Les tensions statoriques à vide.	53
Chapitre III : Diagnostic de défauts de cassure de barres par l'analyse spectrale		
III.1	Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone.	57
III.2	la distribution des lignes du flux à vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.	58
III.3	l'induction B à vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.	58
III.4	le courant statorique de la phase A à vide.	59
III.5	le courant dans la barre rotorique 1 à vide.	59
III.6	vitesse de rotation à vide.	60
III.7	le couple électromagnétique à vide.	60
III.8	La distribution des lignes du flux machine avec une barre cassée (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.	61
III.9	L'induction magnétique avec une barre cassée. (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.	62
III.10	le courant statorique de la phase A à vide avec une barre cassée.	62
III.11	Le courant dans la barre adjacente à la barre cassée (barre 10).	63
III.12	Le courant dans la barre 11 cassée à vide.	63
III.13	La vitesse de rotation à vide avec une barre cassée.	64
III.14	Le couple électromagnétique à vide avec une barre cassée.	64
III.15	Spectre du courant statorique phase A (avec zoom) pour un temps de traitement de 1.5s en régime permanent.	65
III.16	Spectre du courant statorique phase A (avec zoom) pour un temps de traitement de 2.5s en régime permanent.	66
III.17	Spectre du courant statorique phase A (avec zoom) pour un temps de traitement de 3.5s en régime permanent.	66
III.18	la distribution des lignes du flux en charge (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.	67
III.19	L'induction B à vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.	68
III.20	le courant statorique de la phase A en charge.	68

III.21	Vitesse de rotation en charge.	69
III.22	le couple électromagnétique en charge.	69
III.23	La distribution des lignes du flux machine avec une barre cassée (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.	70
III.24	L'induction magnétique avec une barre cassée. (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.	71
III.25	le courant statorique de la phase A en charge avec une barre cassée.	71
III.26	Le courant dans la barre 11 cassée.	72
III.27	Le courant dans la barre adjacente à la barre cassée (barre 10).	72
III.28	La vitesse de rotation en charge avec une barre cassée.	73
III.29	La vitesse de rotation en charge sans défaut et avec défaut.	73
III.30	La vitesse de rotation (zoom au régime permanent) sans défaut et avec défaut.	74
III.31	Le couple électromagnétique en charge avec une barre cassée.	74
III.32	Spectre du courant statorique phase A pour un temps de traitement de 1.5s en régime permanent.	75
III.33	Spectre du courant statorique phase A pour un temps de traitement de 2.5s en régime permanent.	76
III.34	Spectre du courant statorique phase A pour un temps de traitement de 3.5s en régime permanent.	76
Chapitre IV : Diagnostic des défauts de cassure de barres par la technique TURBO		
IV.1	la distribution des lignes du flux(a) sans défaut ;(b) avec défaut à 380V.	81
IV.2	l'induction B (a) Sans défaut; (b) Avec défaut à 380V.	81
IV.3	le couple électromagnétique sans défaut à 380V.	82
IV.4	le couple électromagnétique avec défaut à 380V.	82
IV.5	le courant statorique sans défaut à 380V.	83
IV.6	le courant statorique avec défaut à 380V.	83
IV.7	Vitesse de rotation.	84
IV.8	<i>Spectre</i> (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut à 380V.	84
IV.9	Spectre du courant statorique avec et sans défaut pour une marge de 100 à 220Hz à 380V.	85
IV.10	la distribution des lignes du flux(a)sans défaut;(b) avec défaut à 220V.	86
IV.11	l'induction B (a) sans défaut ; (b) avec défaut à 220V.	86

IV.12	le couple électromagnétique sans défaut à 220V.	87
IV.13	le couple électromagnétique avec défaut à 220V.	87
IV.14	le courant statorique sans défaut à 220V.	88
IV.15	le courant statorique avec défaut à 220V.	88
IV.16	<i>Spectre (avec zoom)</i> du courant statorique avec et sans défaut à 220V.	89
IV.17	Spectre du courant statorique avec et sans défaut pour une marge 100 à 200Hz à 220V.	89
IV.18	la distribution des lignes du flux(a) sans défaut ;(b) avec défaut à 110V.	90
IV.19	l'induction B (a) sans défaut ; (b) avec défaut à 110V.	90
IV. 20	le couple électromagnétique sans défaut à 110V.	91
IV.21	le couple électromagnétique avec défaut à 110V.	91
IV.22	le courant statorique sans défaut à 110V.	92
IV.23	le courant statorique avec défaut à 110V.	92
IV.24	<i>Spectre (avec zoom)</i> du courant statorique avec et sans défaut à 110V.	93
IV.25	Spectre du courant statorique avec et sans défaut pour une marge 100 à 220Hz à 110V.	93
IV.26	la distribution des lignes du flux(a) sans défaut ;(b) avec défaut à 80V.	94
IV.27	l'induction B (a) sans défaut; (b) avec défaut à 80V.	94
IV.28	le couple électromagnétique sans défaut à 80V.	95
IV.29	le couple électromagnétique avec défaut à 80V.	95
IV.30	le courant statorique sans défaut à 80V.	96
IV.31	le courant statorique avec défaut à 80V.	96
IV.32	<i>Spectre (avec zoom)</i> du courant statorique avec et sans défaut à 80V.	97
IV.33	Spectre du courant statorique avec et sans défaut pour une marge 100 à 220Hz à 80V.	97
IV.34	la distribution des lignes du flux(a) sans défaut ;(b) avec défaut à 50V.	98
IV.35	l'induction B (a) sans défaut ; (b) avec défaut à 50V.	98
IV.36	le couple électromagnétique sans défaut à 50V.	99
IV.37	le couple électromagnétique avec défaut à 50V.	99
IV.38	le courant statorique sans défaut à 50V.	100
IV.39	le courant statorique avec défaut à 50V.	100
IV.40	<i>Spectre (avec zoom)</i> du courant statorique avec et sans défaut à 50V.	101

IV.41	Spectre du courant statorique avec et sans défaut pour une marge 100 à 250Hz à 50V.	101
IV.42	Amplitude du pic du courant à 150 Hz.	103
IV.43	Différence de l'amplitude du pic de courant entre sans et avec défaut de cassure de barre à 150 Hz.	103
IV.44	Amplitude du pic du courant à 50 Hz.	104
IV.45	Différence de l'amplitude du pic de courant entre sans et avec défaut de cassure de barre à 50Hz.	104

Liste des Symboles

Ω	Domaine surfacique.
Γ	Frontière de domaine Ω .
A	Potentiel magnétique.
μ_0	Perméabilité magnétique de l'air.
H	Champ magnétique.
B	Induction magnétique.
B_r	Induction radiale dans l'entrefer.
E	Champ électrique.
D	Induction électrique.
ε	Permittivité électrique.
μ	Perméabilité magnétique.
J	Densité de courant uniforme.
J_c	Densité de courant de conduction
ρ	Densité de charges électriques.
σ	conductivité électrique.
J	unité imaginaire.
ν	Réductivité magnétique
t	Temps.
MRID	Maillage de diamètre intérieur du rotor.
MRBOT	Maillage de bas des barres.
MRTOP	Maillage de têtes des barres.
MAIRGAP	Maillage de deux limites de l'entrefer.
MSTOP	Maillage de têtes des encoches.
MSOD	Maillage de diamètre extérieur du stator.
L_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_{os}	Ordre des harmoniques de temps de la FMM.
n_d	Ordre de l'excentricité.

f_s	Fréquence d'alimentation.
f_r	Fréquence rotorique.
f_{he}	Fréquence des harmoniques d'encoches rotoriques.
f_{roul}	Fréquence de vibration relative aux défauts de roulements.
f_v	Fréquence caractéristique de vibration.
f_{bille}	Fréquence de vibration relative aux défauts de billes.
$f_{b.int}$	Fréquence de vibration relative au défaut de bague intérieure.
$f_{b.ext}$	Fréquence de vibration relative au défaut de bague extérieur.
f_b	Fréquence caractéristique du défaut de barres.
f_{ecc}	Fréquence d'ordre supérieur caractéristique du défaut d'excentricité.
f_{mix}	Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte.
f_{st}	Fréquence caractéristique du défaut statorique.
n_b	Nombre d'éléments roulant du roulement.
θ	L'angle de contact des bielles avec les bagues du roulement.
Db	Le diamètre d'un élément roulant.
Dc	La distance entre les centres des billes diamétralement opposées.
FFT	Transformation de Fourier rapide.

Liste des tableaux

Tableau		page
Chapitre I : Généralité sur le diagnostic de défauts dans la machine asynchrone.		
I.1	Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone.	10
I.2	Les causes des défauts de la machine asynchrone.	20
Chapitre II : Calcul de champ électromagnétique par la MEF dans la MAS.		
II.1	Paramètres globales de la machine.	47
II.2	la taille des éléments du maillage.	49
II.3	B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.	51

Sommaire

Liste des figures	I-V
Liste des tableaux	VII
Liste des symboles	IX-X
Introduction générale	2-3
Chapitre I : Généralité sur le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone	
I.1 Introduction	5
I.2 Constitution de la machine asynchrone	5
I.2.1 Stator	6
I.2.2. Rotor à cage	7
I.2.3. Organes mécaniques	8
I.3. Principe de fonctionnement d'une MAS	9
I.4. Les avantages et inconvénients de la MAS	10
I.5 Définition de quelques termes liés au diagnostic	10
I.6 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone	11
I.6.1 Défaillances des roulements mécaniques	13
I.6.2 Défaillances au stator	14
I.6.2.1 Défauts d'isolant dans un enroulement	15
I.6.2.2 Un court-circuit entre spires de la même phase	15
I.6.2.3 Un court-circuit entre phases	16
I.6.2.4 Défaillances du circuit magnétique	16
I.6.3 Défaillances au rotor	16
I.6.3.1 Excentricité	17
I.6.3.2 Rupture de barres et d'anneau de court-circuit	18
I.7. Origines et causes des défauts	19
I.8. Modélisation de la machine asynchrone	22
I.8.1. Méthode des éléments finis	23
I.8.2. Méthode des réseaux de perméance	23
I.8.3. Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés	23
I.9 Généralité sur le diagnostic	24

I.9.1 Etapes du diagnostic	24
I.10 Différents Méthodes de Diagnostic	24
I.10.1- Méthodes sans modèle	25
I.10.2- Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites	25
I.10.3- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique	25
I.10.4- Diagnostic par analyse du courant statorique	26
I.10.5- Diagnostic par analyse du vecteur de Park	26
I.10.6- Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence	26
I.11 Signatures spectrales pour révéler le défaut	27
I.11.1 Les harmoniques de la fmm dans la machine asynchrone	27
I.11.2 Les signatures spectrales pour révéler les défauts	27
I.11.2.1 Les défauts statoriques	27
I.11.2.2 Les défauts des barres rotoriques	28
I.11.2.3 Les défauts d'excentricité	29
I.11.2.4 Les défauts de roulements	30
I.12 CONCLUSION	32
Chapitre II : Calcul de champ électromagnétique par la MEF dans la MAS	
II.1 Introduction	34
II.2 Historique	34
II.3. Méthode des éléments finis	35
II. 4 Le modèle employé	36
II. 5 : Les méthodes numériques utilisées pour le calcul des champs	38
II. 5.1 : Généralité	38
II.5.2 Méthode des Différences Finis (MDF)	39
II.5.3 Méthode des Volumes Finis (MVF)	39
II.5.4 Méthode des Eléments Finis (MEF)	39
II.5.5 Méthode des intégrales de frontière(MIF)	40
II.5.6 Méthode des circuits couplés(MCC)	40
II.6 Le principe de la MEF	41
II.7 Logiciel de résolution	42
II.8 Présentation du logiciel Flux2D	43

II.9 Construction du modèle de la machine asynchrone	45
II.9.1 Les données de la machine étudiée	48
II.9.2 Procédure de construction du modèle par FLUX2D	48
II.9.3 Le circuit électrique	52
II.10 Résultats de simulation par la magnétodynamique	54
II.11. Conclusion	54
Chapitre III : Diagnostic de défauts de cassure de barres par l'analyse spectrale	
III.1 Introduction	56
III.2. Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage à vide	57
III.2.1. Etat sain à vide sous la tension nominale de 380 V.	57
III.2.2 Etat avec défaut à vide sous la tension nominale de 380 V.	61
III.2. 3. Etat du défaut à vide par l'étude spectrale	65
III.3. Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage en charge	67
III.3.1. Etat sain en charge 18 N/m sous la tension nominale de 380 V.	67
III.3.2. Etat avec défaut en charge 18 N/m sous la tension nominale de	70
III.3. 3. Etat du défaut en charge par l'étude spectrale.	75
III.4 Conclusions et Constations	77
Chapitre IV : Diagnostic des défauts de cassure de barres par la technique TURBO	
IV.1. Introduction	79
IV.2. Description de la technique TURBO	79
IV.3. Diagnostique de cassure de barre de la machine asynchrone triphasée à cage par la technique du rotor bloqué <i>TURBO</i>.	80
IV.3.1. cas de tension d'alimentation 380V	81
IV.3.1.1. Résultats de la simulation	81
IV.3.2.cas de tension 220V	86
IV.3.2.1. Résultats de la simulation	86
IV.3.3.cas de tension 110V	90
IV.3.3.1. Résultats de la simulation à l'état sain	90

IV.3.4.cas de tension 80V	94
IV.3.4.1. Résultats de la simulation	94
IV.3.5.cas de tension 50V	98
IV.3.5.1. Résultats de la simulation à l'état sain	98
IV.4 Conclusion	105
Conclusion générale	107-108
Bibliographie	110-113

Introduction générale

Dans le secteur industriel, la protection du matériel, la qualité de service et la rentabilité des installations imposent des conditions sévères de fiabilité et de sûreté de fonctionnement. La maintenance industrielle a pour vocation d'assurer le bon fonctionnement des outils de production. L'apparition de nouveaux modes de contrôle a la nécessité de réduire les coûts de production et de prévoir et d'éviter les dysfonctionnements.

La machine asynchrone triphasée a été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance mais l'avènement de l'électronique de puissance renversa la tendance. Sa prédominance résulte dans le processus industriel à sa robustesse et son coût d'achat et d'entretien relativement faible.

Les machines asynchrones triphasées est très employée dans l'aéronautique, le nucléaire, les industries pétroliers, chimiques, dans le transport (métro, trains, propulsion de véhicule et des navires, les ascenseurs), dans l'industrie (machines-outils, treuils) et dans l'électroménager.

Les défauts dans les machines électriques peuvent être d'origine :

- ❖ Mécanique : excentricités du rotor, défaut sur les accouplements, corrosion des roulements etc.
- ❖ Electrique : court-circuit du bobinage statorique, rupture de barres rotoriques ou d'anneau etc.
- ❖ Magnétique : défaut d'isolement entre les tôles statoriques.

Les grandeurs mesurables tel que le courant statorique, les tensions, la vitesse ou bien encore la température et la densité de flux magnétique, donnent des informations précises sur la qualité des défauts et servir ainsi à déterminer les signatures de défauts du moteur .

Dans ce travail la modélisation de la machine asynchrone saine et avec défaut sera étudiée par le logiciel Flux2D employant la méthode d'éléments finis en régime transitoire pour déterminer avec précision les différentes grandeurs de la machine asynchrone triphasée saine et de valider les modèles plus simples de type circuits électriques.

L'objectif essentiel de notre travail est la modélisation de la machine asynchrone par les techniques déjà existantes de simulation d'une cassure de barre et d'exposer les résultats par

confrontation à ce qui existe dans la littérature. Par la suite, on introduit la technique du rotor bloqué *TURBO*, pour le diagnostic du défaut de cassure de barre. On y expose ses inconvénients et ses avantages.

Le plan de notre travail est comme suit :

Dans le premier chapitre, on décrit la machine asynchrone. Bien qu'elle soit 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 intérêt grandissant.

Dans le deuxième chapitre, on expose les lois fondamentales de l'électromagnétisme et le modèle mathématique qui caractérise l'évolution spatio-temporelle du champ électromagnétique. Par la suite on décrit la méthode numérique pour le calcul des champs électromagnétiques par le logiciel FLUX 2D utilisant la méthode des éléments finis.

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

Nous introduisons dans le quatrième chapitre la technique du diagnostic de défauts de cassure de barre par la technique universelle du rotor bloqué *TURBO*. Cette technique comme on va découvrir va nous permettre une meilleure détection que celle qu'on utilise actuellement avec la machine asynchrone en utilisant le mode en charge. On va voir dans ce chapitre les inconvénients et les avantages de cette nouvelle technique.

Une conclusion générale est donnée à la fin avec perspectives.

I.1 Introduction

La machine asynchrone est par excellence la machine la plus répandue dans l'industrie. Cet intérêt croissant est justifié par de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, ...etc. Le développement des convertisseurs de fréquence permettant de varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant les convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc....) [01].

Bien que la machine asynchrone soit 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 intérêt grandissant depuis les 2 dernières décennies [24,01].

I.2 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction, comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit 2 types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est, électriquement, équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit [03]. Dans ce travail, nous nous intéressons à la machine asynchrone à cage d'écureuil.

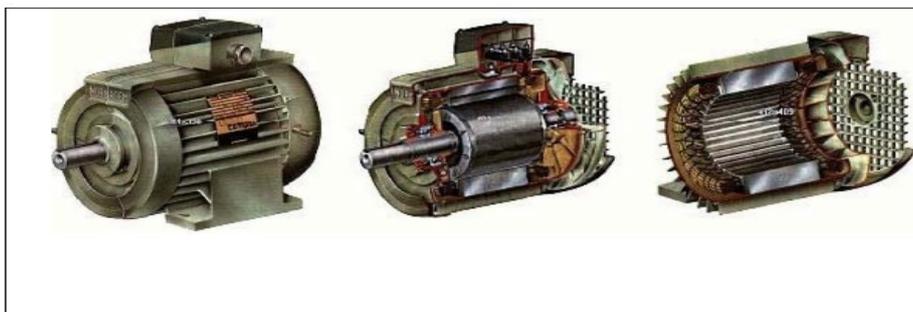


Figure I.1: Machine asynchrone.

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la Figure. I.2.

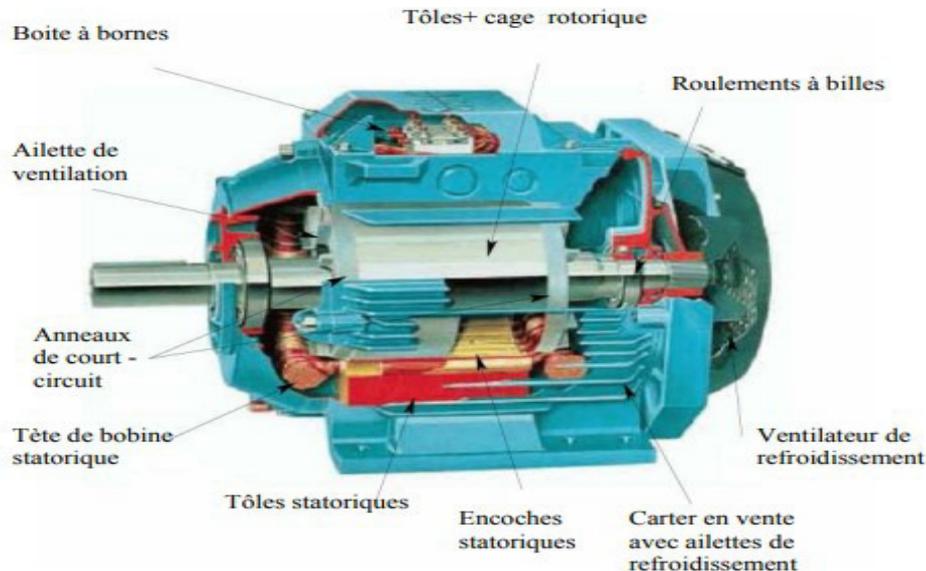


Figure I.2: Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

I.2.1 Stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (Figure .I.3). Le bobinage statorique peut se décomposer en 2 parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [01].

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique. [02]

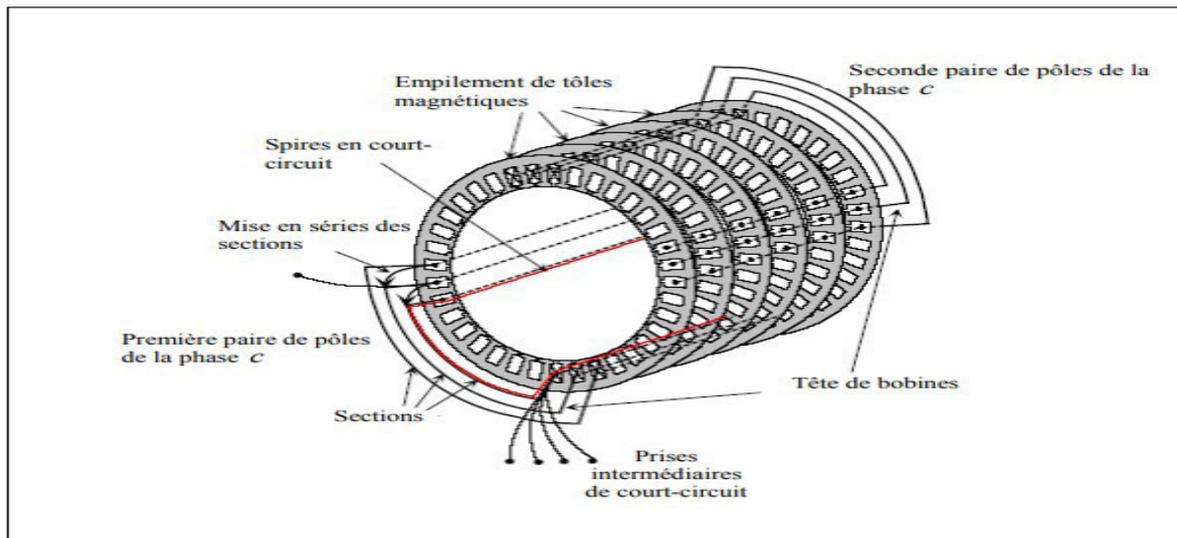


Figure I.3: Vue schématique en perspective du stator.

I.2.2 Rotor à cage

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (Figure. I.4). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor [01]. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques. Mais, leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [34].

Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné. De ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'un plus grande Empilement de tôles magnétiques, Spires en court circuit. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones, actuellement, en service. [01]

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). Pour remédier à cette situation, 2 autres types de cages ont été développés : Rotor à double cage et rotor à encoches profondes.

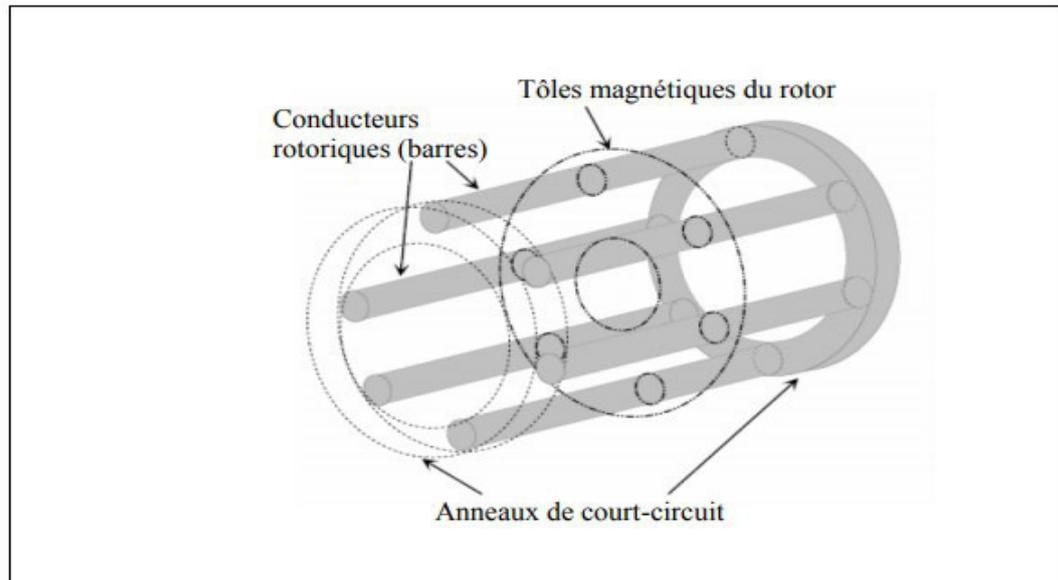


Figure I.4: Vue schématique en perspective du rotor.

I.2.3. Organes mécaniques

La carcasse sert de support. Elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est, généralement, constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des plusieurs efforts :

- Efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale,...etc.).
- Efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges.
- Efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent et transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dus aux dissymétries des réductances du circuit magnétique. Ils sont, généralement, à roulements pour les machines de petite et moyenne puissances [01].

Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer à un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage,...etc). Cela permet de fournir aux

moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse [01].

I.3 Principe de fonctionnement d'une MAS

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit.

Ce fonctionnement repose 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 [04].

Lorsque le rotor tourne à une vitesse n_s différente du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est :

$$n_s = \frac{\Omega}{p} \text{ ou } n_s = \frac{60f}{p} \quad (\text{I. 1})$$

Avec :

f : est la fréquence d'alimentation.

p : représente le nombre de paire de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone (sans collecteur) n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_s) diffère de celle du rotor (n), c'est-à-dire, lorsque $n \neq n_s$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $n = n_s$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique [04].

Le rapport :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_r} \text{ ou } g = \frac{ns - n}{ns} \quad (\text{I. 2})$$

Est appelé glissement d'une machine asynchrone. [04]

I.4 Les avantages et inconvénients de la MAS

Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone sont assez nombreux mais les principaux sont résumés dans le tableau suivant :

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• La robustesse.• La simplicité de construction.• Leurs bas coûts.• Un rendement excellent.	<ul style="list-style-type: none">• Non découplage naturel.• Non linéarités.

Tableau .I.1: Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone [05].

I.5 Définition de quelques termes liés au diagnostic

- **Défaillance:**

Événement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal, le système n'est plus apte à assurer totalement sa fonction.

- **Diagnostic:**

Ensemble d'actions visant à évaluer l'état d'un procédé à partir de la connaissance de son fonctionnement. A partir de l'observation du procédé, on détermine par comparaison avec les divers états de fonctionnement connus (ou un raisonnement logique) le degré de défaillance du système, l'origine de ses défaillances et leurs causes.

- **Disponibilité:**

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

- **Fiabilité:**

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

- **Maintenance et maintenabilité :**

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

- **Sécurité :**

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

- **Sûreté:**

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

1.6 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

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

- **Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts** : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- **Les amplificateurs de défauts** : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.
- **Les vices de fabrication et les erreurs humaines** : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants (Figure. I.5) : [38,01]

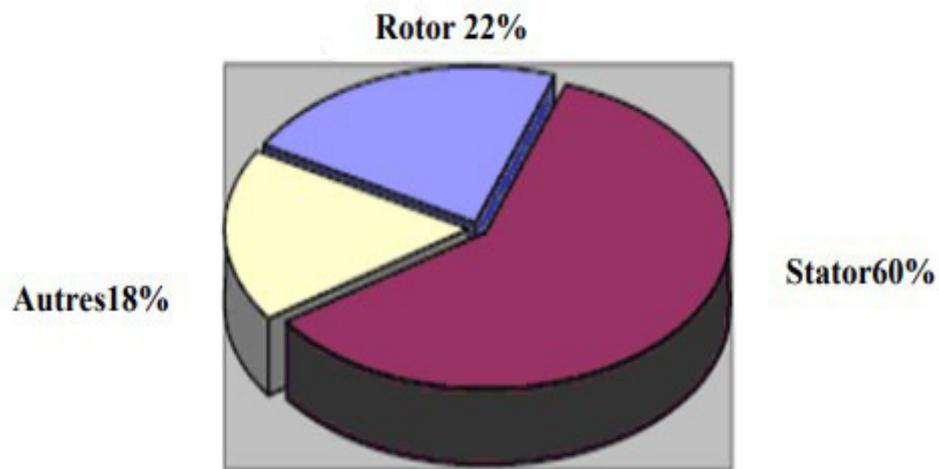


Figure I.5: Proportion des défauts.

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure I.6:

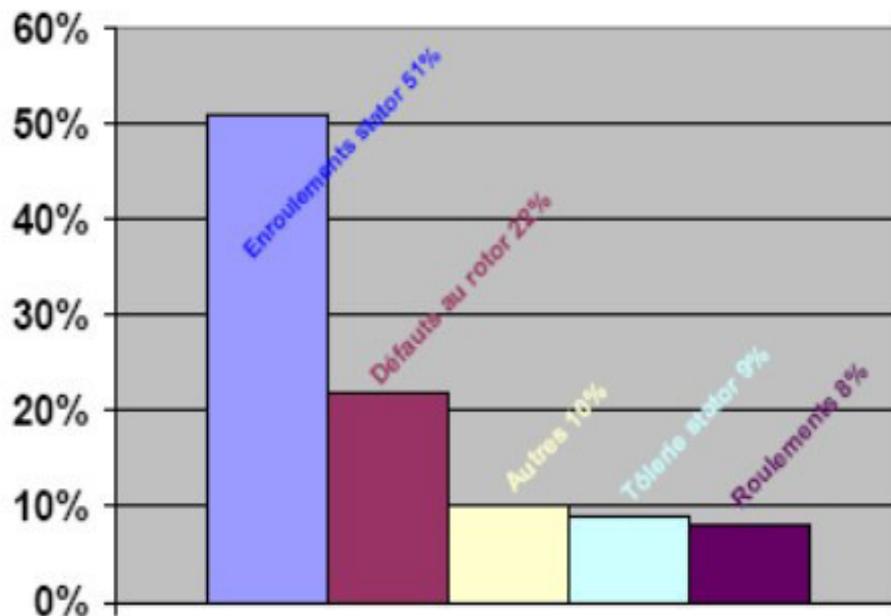


Figure I.6: Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.

Une autre étude statistique [35] faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur la figure I.7.

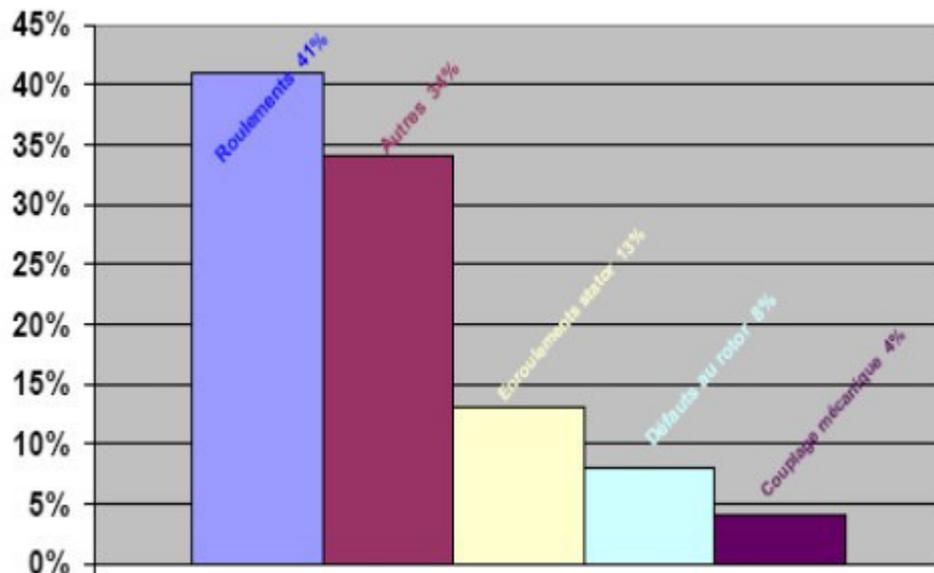


Figure I.7: Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances.

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue.

I.6.1 Défaillances des roulements mécaniques

La plupart des défauts observés sur le terrain sont liés à l'usure abrasive, à l'humidité, à la corrosion, au montage incorrect, à des ajustements incorrects des bagues sur l'arbre ou dans le palier, au glissement des éléments roulants, à une pollution imprévue ou à la défaillance de la cage, des joints ou de la lubrification, une charge excessive [07]. Ils entraînent des effets mécaniques dans les machines tels que l'augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Ces types de défaut induisent également des variations (oscillations) dans le couple de charge de la machine asynchrone. Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor [08].

La figure (I.8(a)) présente une vue coupe d'un roulement à billes et la figure (I.8(b)) présente un défaut de cage à bille.

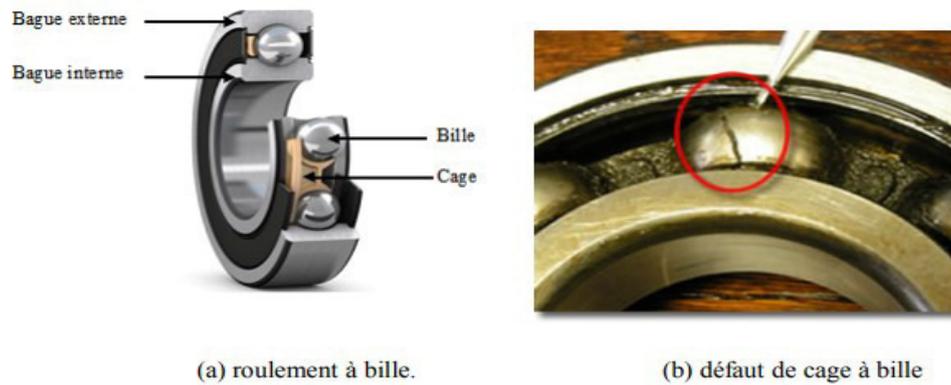


Figure I.8: Structure d'un roulement à billes.

I.6.2 Défaillances au stator

Les défaillances au stator représentent environ de 40% à 60% des défauts des machines à induction. La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants. L'enroulement statorique d'une machine électrique est soumis à des efforts induits par une variété de facteurs, parmi les plus importants, une surcharge thermique, les vibrations mécaniques, les pics de tension provoqués par le réglage de fréquence, etc. Les causes les plus fréquentes des défauts d'enroulement statorique sont :

- Vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader
- Échauffement excessif du noyau et des enroulements du stator.
- Fissures dans la tôle, de fixation, et des jonctions.
- Mauvaise connexion des têtes des enroulements.
- Fonctionnement dans un environnement sévère, contamination provoquée par l'humidité et la saleté.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- Décharges électriques.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Fuites dans les systèmes de refroidissement.

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit: défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et armature, déséquilibre d'alimentation, défaut de circuit magnétique [09].

I.6.2.1 Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or, les matériaux d'isolation ont une limite mécanique, de température et de tension. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

Lorsque le défaut de l'isolant se crée sur une spire, le courant de défaut circule entre le cuivre de cette spire et la tôle du stator (défaut phase - masse). Il peut aussi circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est détérioré (défaut entre-spires). Dans le cas des bobinages à deux couches, une même encoche peut contenir des conducteurs de deux phases différentes. La détérioration simultanée et dans une même zone, des isolants de ces deux bobines provoque un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaut phase-phase). Ce type de défaut peut aussi exister dans les bobinages à une couche au niveau des têtes de bobines où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact. La topologie du circuit électrique est ainsi influencée par ces défauts [09]

I.6.2.2 Un court-circuit entre spires de la même phase

Le chauffage excessif provoqué par le court-circuit entre spires est la raison pour laquelle les moteurs tombent en panne presque toujours en quelques minutes, si ce n'est quelques secondes. Ainsi, chaque 10°C additionnel augmente la détérioration de l'enroulement deux fois plus rapidement que dans un fonctionnement à température normale. Le défaut de court-circuit entre spires de la même phase est assez fréquent dans la machine asynchrone, ce défaut a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie aussi le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Donc, la conséquence est une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant encourager l'apparition d'un 2ème court-circuit, alors un défaut en chaîne. Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut [09].

I.6.2.3 Un court-circuit entre phases

Ce défaut peut arriver en tout point du bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs. L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage. [09]

I.6.2.4 Défaillances du circuit magnétique

Les tôles du circuit magnétique sont feuilletées et isolées entre elles, cependant elles peuvent se retrouver court-circuitées. Les causes les plus fréquentes de défaut de circuit magnétiques sont généralement liées à un défaut sévère d'excentricité statique et/ou dynamique qui peut conduire à un contact front entre le stator et le rotor ce qui détruit le circuit magnétique, ou bien court-circuit des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles, ainsi la projection des corps étrangers dans l'entrefer peut entraîner l'abrasion des tôles et ainsi les court-circuitées [09].

I.6.3 Défaillances au rotor

Dans les machines asynchrones à cage, les défaillances qui peuvent atteindre le rotor sont considérées comme plus variées et plus complexes que celles affectant le stator. Ceci est particulièrement vérifié pour les machines de faible et moyenne puissances. Plusieurs facteurs manifestent l'apparition des défaillances au niveau du rotor de la machine asynchrone, parmi eux on cite:

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

Les défauts qui sont les plus répétitifs, localisés au niveau du rotor sont : l'excentricité statique et dynamique, la rupture de barres rotoriques et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit. [09]

I.6.3.1 Excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité [10].

L'excentricité, décentrement du rotor par rapport au stator, d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe dès sa fabrication. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine.

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées comme donnée par la figure (I.9): [11 01] [12 01]

- L'excentricité statique : l'axe de rotation du rotor est fixe mais ne coïncide pas avec celui du stator, dont la cause principale est un défaut de centrage des flasques
- L'excentricité dynamique : le rotor possède un axe de rotation qui tourne autour de l'axe géométrique du stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.
- L'excentricité mixte, la plus fréquente, est la combinaison des deux cas su-présentés.

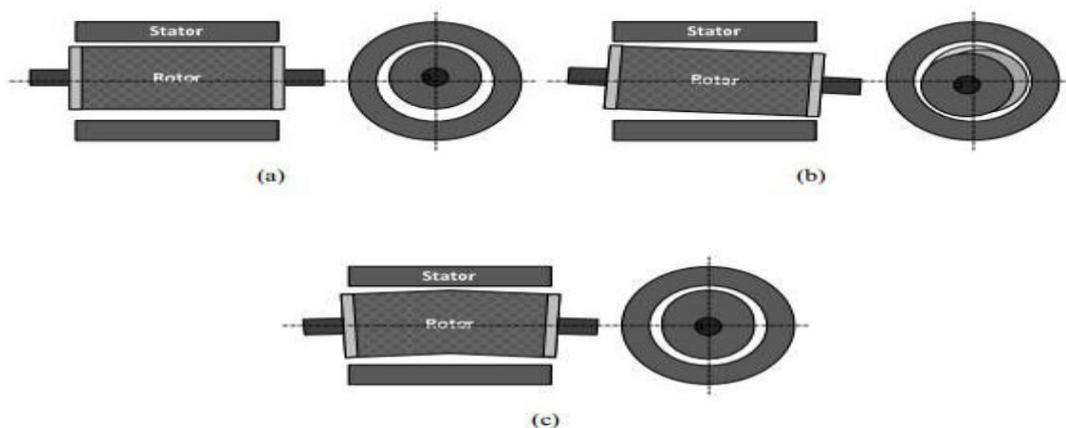


Figure I.9 : Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.

I.6.3.2 Rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Les mêmes défauts qu'au stator peuvent se retrouver dans un rotor bobiné. Pour une machine asynchrone avec un rotor à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit (Figure I.10)

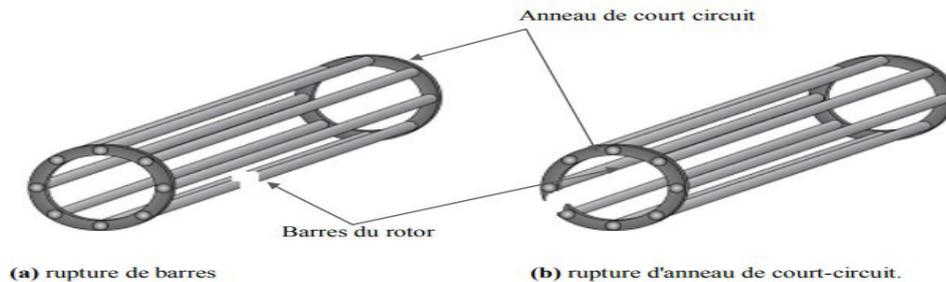


Figure I.10 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil.

Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures) [13]. Cela fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante) [14,15]. Si l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statoriques.

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres dans une machine asynchrone à cage. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques [16]. Il convient de mentionner, qu'un mauvais dimensionnement des anneaux, conduit à une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et, donc, à des courants pouvant entraîner leur cassure [16,17].

L'apparition d'un défaut de rupture de barres n'induit pas à un arrêt de la machine, du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes [17]. Ces barres sont alors surchargées, et les contraintes thermiques et électromécaniques engendrées peuvent conduire à leur rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine.

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

I.7 Origines et causes des défauts

La majorité de ces défauts sont l'origine d'une combinaison de diverses contraintes agissant sur la machine, ce qui peut être classée en thermique, électrique, mécanique, environnemental et défauts de fabrication [18].

- **Thermique** : L'augmentation de la température au dessus de la température de fonctionnement normal de la machine entraîne la détérioration de l'isolant du bobinage au niveau du stator et également le rotor bobiné. Donc, par cet effet la durée de vie de l'isolant se raccourcit rapidement. Elle influe également sur le lubrifiant, dans les roulements, qui perd ses propriétés physiques et qui perturbe la rotation normale des billes dans la cage. Cette surcharge thermique peut se produire en raison des variations de tension appliquées, tension de phase déséquilibrée, ventilation obstruée, température ambiante plus élevée, démarrages répétitifs dans un court laps de temps, à des surcharges, etc. [19,07]
- **Electrique** : Une tension supérieure à la valeur nominale ou des variations brutales et instantanées de cette tension, va conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation. Ces spots causent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut) [19]. Pour les roulements, il y a la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs qui cause les arcs électriques [21] et cause le vieillissement rapide de ces derniers.
- **Mécanique**: Les démarrages répétitifs ont pour conséquence d'augmenter la température dans les bobinages du stator et du rotor. Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure [18]. Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration. L'entraînement des surcharges, les vibrations dues aux excentricités de l'arbre ou au mauvais ajustement des roulements, manque de ventilation, manque de lubrifiant ces effets influent négativement sur le fonctionnement normal de la machine.

- **Environnemental** : La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Les milieux poussiéreux influent également sur la lubrification des roulements ce qui provoquent leurs usures et corrosions et conduisent à leurs détériorations [19]
- **Défauts de fabrication** : Les défauts de fabrication ont un effet néfaste sur le fonctionnement normal des machines. Ils peuvent être la conséquence de : Mauvaise soudure entre les barres et les anneaux, mauvais serrage, insuffisance baignade pour l'isolant, montage anormal des roulements ou des enroulements, moulage défectueux dans le cas de rotors injectés sous pression d'aluminium [21].

Tableau (I.2) : Les causes des défauts de la machine asynchrone [10,23]

	Defauts	Causes	Effets sur le système
Defauts statopriques	Vibration du support.	Un déséquilibre magnétique, mouvement des enroulements, un déséquilibre de l'alimentation, surcharge, mauvaise installation, un contact avec le rotor.	Vibrations mécaniques .
	Un défaut entre le stator et la carcasse	Ecrasement des spires par la carcasse, le cycle thermique, une abrasion de l'isolant, présence de points anguleux dans les encoches, un choc.	courant dans la phase
	Défaut d'isolation	Endommagement de l'isolant lors de l'insertion des enroulements, démarrage fréquent, condition de température ou l'humidité extrême.	Court-circuit dans l'enroulement
	Court-circuit inter spires	Température excessive, humidité, vibration, surtension.	variation courants statoriques, augmentation d'amplitude sur les autres phases

	Court-circuit inter phases	Défauts d'installation, haute température, alimentation déséquilibrée, contrainte d'écrasement au niveau des enroulements.	déséquilibre des courants statoriques
	Déséquilibre d'alimentation	Problème sur le réseau d'alimentation Défaillance du convertisseur .	Augmentation : courants dans les autres phases de vibrations de l'échauffement
Défaut rotoriques	Défauts de roulements	Mauvaise installation, déséquilibre magnétique, perte de lubrifiant ou mal lubrifiés, mauvaise qualité de lubrifiant, haute température, manque de propreté, charge déséquilibrée. Surcharge. jeu au niveau des paliers .	oscillations du couple de charge augmentation des pertes augmentation vibrations Altération de l'équilibre magnétique
	Rupture de barres	déséquilibre magnétique, régime transitoire à longue durée, fatigue thermique. Réduction de la valeur moyenne de couple électromagnétique Oscillations de la vitesse Vibrations mécaniques .	Réduction de la valeur moyenne de couple électromagnétique Oscillations de la vitesse Vibrations mécaniques
	Ruptures d'anneaux	Défaut de fabrication. Surcharge du couple	Déséquilibre la répartition des courants
	Défaut du circuit magnétique	Défaut de fabrication, fatigue thermique, surcharge.	Vibrations mécaniques
	Désalignement du rotor (excentricité)	Mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défaut de roulements. Positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage Usure des	oscillations de couple

		roulements Défaut de charge Défaut de fabrication.	
--	--	--	--

Tableau (I.2) : Les causes des défauts de la machine asynchrone.

En général, ces défauts produisent un ou plusieurs symptômes qui peuvent être [10]:

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

I.8 Modélisation de la machine asynchrone

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

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

En ce qui concerne les modèles physiques, ce sont les lois régissant l'électromagnétisme qui sont utilisées pour décrire le fonctionnement de la machine asynchrone. Ces modèles sont divers et peuvent varier en complexité et/ou en précision selon la méthode de modélisation utilisée [26]. Nous ne les citerons pas tous mais nous pouvons énoncer les plus populaires dont ceux basés sur :

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

Les modèles comportementaux, quant à eux, reprennent les modèles physiques en y incluant des paramètres supplémentaires. Ces paramètres permettent la détection, et pour certains d'entre eux, la localisation du défaut observé. Nous introduisons alors une description exhaustive de ces différentes méthodes de modélisation pour permettre une compréhension adéquate des problèmes propres à chacune d'entre elles. [24]

I.8.1 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une approche qui requiert un temps de calcul important. Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de dimension faible pour permettre de considérer le matériau magnétique linéaire sur les surfaces correspondantes. L'utilisation des équations de Maxwell, à partir des formes locales, permet de résoudre le problème. La résolution analytique correspondante est complexe et ne permet de traiter le phénomène de saturation que de façon approchée [17]. De nombreux logiciels ont vu le jour pour permettre d'aborder cette approche difficile. Nous pouvons citer Flux 2D, Flux 3D ou encore Maxwell. Le but principal de ces logiciels est, rappelons le, de déterminer la cartographie du champ magnétique présents dans les machines électriques dans l'objectif d'optimiser le dimensionnement de ces dernières. [24].

I.8.2 Méthode des réseaux de perméance

La méthode des réseaux de perméance est basée sur la décomposition du circuit magnétique de la machine asynchrone, en tubes de flux élémentaires. Chaque tube ainsi obtenu est caractérisé par sa perméance selon qu'il soit dans le fer ou dans l'air. A partir de cette décomposition, on construit un réseau dit de perméance. Ces réseaux peuvent être assimilés à un circuit électrique habituel, seulement ceux sont les flux et les différences de potentiels magnétiques qui sont considérés au lieu des courants et des différences de potentiels électriques. Cette approche permet de prendre en compte les caractéristiques du fer utilisé pour la construction de la machine asynchrone. En effet, le calcul des différentes perméances ne peut se faire qu'en fixant une valeur précise pour la perméabilité relative du fer. Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance dans l'entrefer variable selon la position du rotor de la machine. [24]

I.8.3 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés

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

rupture de barre rotorique et/ou de portion d'anneau de court-circuit. Nous pouvons aussi intégrer à ce type de modèle les défauts d'excentricité statique et dynamique. [24]

I.9 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 [39]:

- ✓ 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.

I.9.1 Etapes 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 [39]:

- ✓ 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.

I.10 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 de 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 important de savoir

que les différentes méthodes du diagnostic sont classées selon l'approche qu'ils l'appartiennent. En effet, il existe deux approches [39] :

- approches sans modèle,
- approches avec modèle.

I.10.1 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 [20].

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 [20].

I.10.2 Diagnostic par l'analyse des tensions statorique 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 [20].

I.10.3 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 [20].

I.10.4 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 (Motor Current Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace) [20].

I.10.5 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 [20].

I.10.6 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 [20] :

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

I.11 Signatures spectrales pour révéler le défaut

I.11.1 Les harmoniques de la fmm dans la machine asynchrone

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

En réalité, l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est fonction de différents paramètres, tel que les composantes fréquentielles apparaissent dans les tensions d'alimentation ces composantes dites harmoniques de temps et la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage. A cause de cette structure, Il a été démontré qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique d'autres harmoniques dites harmoniques d'espace (harmoniques d'encoches rotoriques) ayant pour fréquences [25].

$$f_{he} = \left[\frac{kN_b}{p} (1-g) \pm n_{os} \right] \cdot f_s \quad (I.3)$$

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

I.11.2 Les signatures spectrales pour révéler les défauts

I.11.2.1 Les défauts statoriques

Pour déceler les défauts de court-circuit, plusieurs approches ont été mises en œuvre, à savoir l'utilisation d'une bobine concentrique placée autour de l'arbre de la machine afin de capter puis analyser le flux axial de la machine. Ce type de défauts entraîne l'apparition d'une série d'harmoniques dans le spectre du flux axial donnée par [25,27] :

$$f_{st} = f_s \cdot \left(k \pm \frac{n(1-g)}{p} \right) \quad (I.4)$$

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

Le diagnostic des court-circuits statoriques peut être effectué via la MCSA, et est basé sur la détection des composantes fréquentielles données par l'expression (I.2), du fait que cette onde de flux tournant sera l'origine des composantes de courant équivalentes dans l'enroulement statorique [25 ,27] .

Les harmoniques 150Hz, 250Hz...apparaissent en cas de court-circuit entre spires, mais sont souvent présents à cause de la saturation et de n'importe quel défaut susceptible d'entraîner un déséquilibre d'impédance, tel que le déséquilibre de tension. Aussi, il a été démontré que les harmoniques d'encoches rotoriques et de saturation subissent des variations en cas de défauts statoriques [25].

- **Défaut de court-circuit :**

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

La variation des paramètres se fait comme suit :

- ✓ La résistance statorique augmente.
- ✓ La résistance rotorique diminue.
- ✓ L'inductance rotorique diminue.
- ✓ L'inductance de magnétisation diminue.

I.11.2.2 Les défauts des barres rotoriques

Un défaut dans le rotor va engendrer une sorte d'asymétrie qui, dans le cas d'une alimentation par un système de tensions triphasées symétrique, va être à l'origine d'un champ magnétique inverse de fréquence $-gf_s$ dans le circuit rotorique. Cela va engendrer des courants circulant dans le circuit statorique à une fréquence de $(1-2g)f_s$. Une autre composante apparaît aussi dans le spectre du courant statorique à une fréquence de $(1+2g)f_s$. Cette composante est due aux fluctuations de la vitesse provoquées par les oscillations du couple. Il a été démontré qu'un processus répétitif donne naissance à une série d'harmoniques dont les fréquences sont données par [27] :

$$f_b = (1 \pm 2kg)f_s \quad (I.5)$$

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

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

$$f_b = \left[\frac{k}{p/2} (1-g) \pm g \right] \cdot f_s \quad (I.6)$$

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

Les défauts de cassure de barres génèrent également dans les signaux du couple et de vitesse des composantes de fréquences $2gf_s$ et $4gf_s \dots$ [27].

I.11.2.3 Les défauts d'excentricité

L'excentricité se répartit en deux catégories : statique et dynamique (voir la Figure I.11). L'excentricité statique se distingue par le fait que le centre du rotor n'est pas égal à celui du stator. L'excentricité dynamique est caractérisée par le fait que le centre du rotor tourne autour du centre du stator [36].

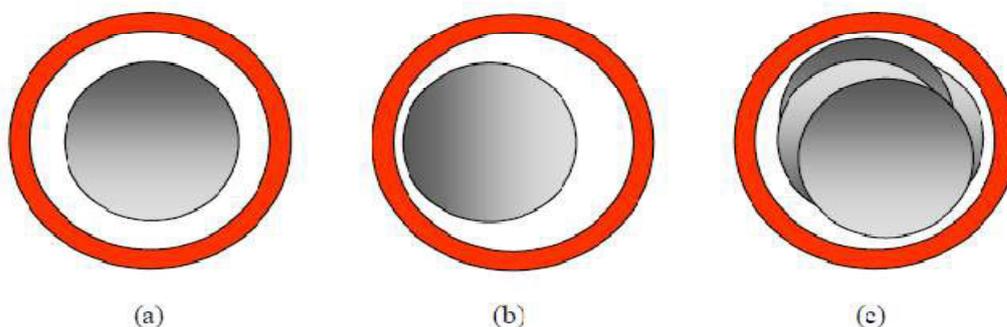


Figure I.11: Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique.

Même à l'état sain, la machine présente toujours un certain degré d'excentricité statique résiduelle dû aux inévitables erreurs de fabrication [25]. La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant à des fréquences f_{ecc} données par :

$$f_{ecc} = \left[\left(\frac{kN_b \pm n_d}{p} \right) (1-g) \pm n_{os} \right] \cdot f_s \quad (I.7)$$

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

Une autre série d'harmoniques liés à la coexistence des deux types d'excentricité en même temps (excentricité mixte), apparaît de part et d'autre de la fondamentale à des fréquences données par [25,27] :

$$f_{mix} = |f_s \pm kf_r| \quad (I.8)$$

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

Les défauts d'excentricité peuvent également être décelés par une analyse vibratoire, sachant que des composantes de hautes fréquences de vibration générées par l'excentricité sont données par une formule similaire à (I.7).

I.11.2.4 Les défauts de roulements

Parce que les éléments roulants du roulement supportent le rotor, quelque soient les défauts dans les roulements, ils vont produire des mouvements radiales entre le rotor et le stator dans la machine. Par conséquent, des variations d'entrefer génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [25,27] :

$$f_{roul} = |f_s - kf_v| \quad (I.9)$$

Avec $k=1,2,.....$ et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations, soit f_{bille} , $f_{b.int}$ ou $f_{b.ext}$.

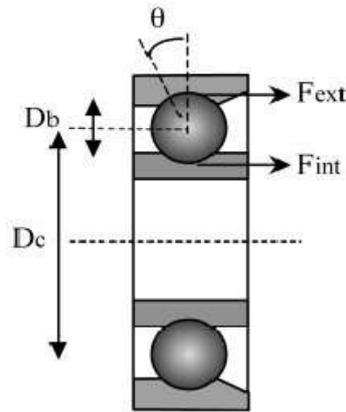


Figure I.12: Dimension du roulement à billes.

a) -Défaut au niveau d'une bille :

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

b) -Défaut sur la bague intérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 + \frac{Db}{Dc} \cos \theta \right] \quad (I.11)$$

c) -Défaut sur la bague extérieure :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 - \frac{Db}{Dc} \cos \theta \right] \quad (I.12)$$

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

I.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé l'état de l'art de la machine asynchrone et les méthodes de surveillance et de diagnostic. Ce chapitre est scindé en deux parties : la première concerne la constitution, les défaillances et les différentes méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone en présence de défauts. La deuxième partie en affectant à chaque défaut une signature spectrale qui lui est propre, la méthode de l'analyse des courants constitue un moyen performant susceptible de prévoir un défaut majeur.

II.1 Introduction

Tous les phénomènes électromagnétiques que l'on veut généralement étudier au sein des dispositifs électrotechniques sont régis par les équations de Maxwell et les équations caractéristiques du milieu à étudier. Ces équations sont le couramment de vieux concepts de la physique.

Dans ce chapitre, nous allons exposer les lois fondamentales de l'électromagnétisme et le modèle mathématique qui caractérise l'évolution spatio-temporelle du champ électromagnétique, et on va également exposer les plusieurs types des méthodes numériques pour le calcul des champs, et également on va expliquer le fonctionnement du logiciel FLUX 2D qui travaille avec la méthode des éléments finis.

Les informations fournies par ce type de simulation nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques, lorsque le problème est correctement posé et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul d'où une grande souplesse d'utilisation.

II.2 Historique

C'est James Clerk Maxwell qui propose que tous les phénomènes électriques et magnétiques devaient être liés entre eux. Il formula sous une forme mathématique unifiée l'ensemble de tous les phénomènes électriques et magnétiques. Ces équations montrent qu'en régime stationnaire, les champs électrique et magnétique sont indépendants l'un de l'autre alors qu'ils ne le sont pas en régime variable dans le temps.

Les équations de Maxwell spécifient que toute variation spatiale ou temporelle d'un champ magnétique entraîne l'existence d'un autre champ électrique et vice versa. Ces équations sont donc valables dans n'importe quel point de l'espace. Elles peuvent être formulées sous forme suivante [37].

II.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. [28,29].

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

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Lois de Faraday}) \quad (\text{II. 1})$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Lois d'Ampère}) \quad (\text{II. 2})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{Lois de la conservation}) \quad (\text{II. 3})$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{Théorème de Gauss}) \quad (\text{II. 4})$$

Tels que :

\vec{E} : Champ électrique [$v.m^{-1}$],

\vec{D} : Induction électrique [$c.m^{-2}$],

\vec{H} : Champ magnétique [$A.m^{-1}$],

\vec{B} : Induction magnétique [T],

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Vecteur densité de courant de déplacement, négligeable aux basses fréquences [A/m^2]

\vec{J}_c : Densité de courant de conduction [$A.m^{-2}$],

ρ : Densité de charge électrique [$C.m^{-3}$].

Ces équations ne suffisent pas pour résoudre les problèmes électromagnétiques, il faut leurs joindre des relations qui traduisent le comportement des milieux à étudier :

$$\text{Alors : } \vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad \text{Où } \vec{H} = \nu \vec{B} \quad (\text{II. 5})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II. 6})$$

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

Tels que :

σ : Conductivité électrique [$S.m^{-1}$].

μ : Perméabilité magnétique [$H.m^{-1}$].

μ_0 : Perméabilité magnétique de vide.

ε : Permittivité [$F.m^{-1}$].

ν : Réductivité magnétique [$m.H^{-1}$].

II. 4 Le modèle employé

Selon les résultats escomptés et le temps de simulation dont on dispose, trois modes de résolutions peuvent être employé [28] :

➤ Le mode magnétostatique

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

essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les sources sont indépendantes du temps. Le terme $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

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

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

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

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

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

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

Par la substitution de(II.11) et(II.10) dans(II.9) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

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

où

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

➤ Le mode magnétodynamique

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

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

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

➤ Le mode magnétique transitoire

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

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

II. 5 Les méthodes numériques utilisées pour le calcul des champs

II. 5.1 Généralité

Il existe deux grandes catégories de méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles mathématiques caractérisant les problèmes physiques, lorsqu'il s'agit de calculer des effets dont les causes (densité du courant (tension), densité de la puissance dissipée) sont connues à l'avance. Ces méthodes sont :

- Les méthodes analytiques.
- les méthodes numériques.

Les méthodes analytiques, s'avèrent d'applications très difficiles dès que la complexité de la géométrie s'accroît et que certains matériaux, dans des conditions de fonctionnement optimales, présentent des non linéarités physiques, donc mathématiques.

L'apparition des ordinateurs, de grandes puissances, a mis en valeur l'intérêt des méthodes dites numériques. Celles-ci font appel à des techniques de discrétisation.

Ces méthodes numériques transforment les équations aux dérivées partielles (EDP) à des systèmes d'équations algébriques dont la solution fournit une approximation de l'inconnue en différents points situés aux nœuds du réseau géométrique correspondant à la discrétisation. Parmi ces méthodes, nous citons la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis, la méthode des volumes finis, la méthode des intégrales de frontières et la méthode des circuits couplés,... etc [31].

II.5.2 Méthode des Différences Finis (MDF)

La MDF consiste à transformer par un développement en série de TAYLOR l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences.

La méthode aux différences finies permet d'obtenir des résultats satisfaisants dans de nombreux problèmes comme elle possède la simplicité de la formulation numérique, mais elle reste limitée aux configurations à géométrie régulière, donc, relativement trop simple [31].

II.5.3 Méthode des Volumes Finis (MVF)

La MVF se déduit à partir de la MDF. Le domaine d'étude (Ω) est subdivisé en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud du maillage (celui des différences finies).

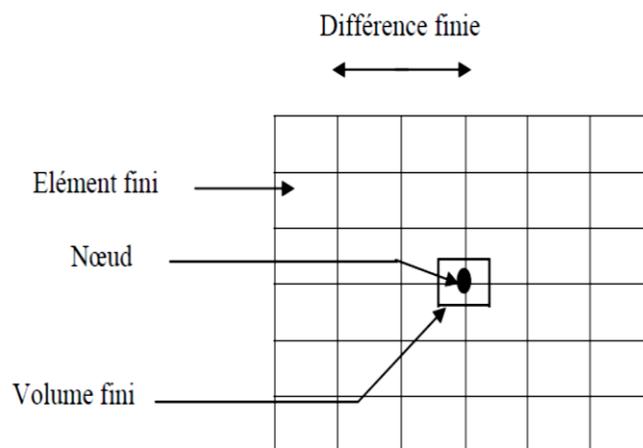


Figure II.1 : Maillage du domaine d'étude(Ω) en volume finis

L'EDP est intégrée sur chacun des volumes élémentaires. Pour calculer l'intégrale sur ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, exponentielle) entre deux nœuds consécutifs [31].

II.5.4 Méthode des Éléments Finis (MEF)

La méthode des éléments finis est très puissante pour la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP) sur tout dans les géométries complexes et quelques soient les conditions physiques de fonctionnements.

A la différence avec la MDF, la MEF consiste à utiliser une approximation simple de l'inconnue pour transformer les EDP en équations algébriques.

Toutefois, cette méthode ne s'applique pas directement aux EDP, mais à une formulation intégrale qui est équivalente au problème à résoudre, en utilisant l'une des deux approches suivantes :

-La méthode variationnelle qui consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement, l'énergie du système étudié. Cette méthode n'est donc applicable que si on connaît une fonctionnelle équivalente au problème différentiel que l'on veut résoudre.

-La méthode des résidus pondérés ou méthode projective qui consiste à minimiser le résidu induit par l'approximation de la fonction inconnue.

A l'une ou à l'autre des deux méthodes, on associe une subdivision du domaine d'étude, en éléments simples, appelés éléments finis, comme il est indiqué sur la figure (II.2), et à approximer la fonction inconnue sur chaque élément par des fonctions d'interpolation. Ces fonctions sont généralement des polynômes de Lagrange de degré un, ou deux [31].

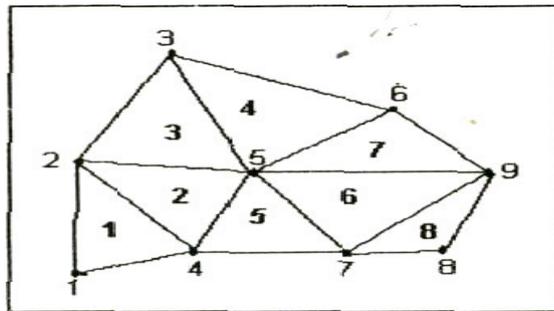


Figure II.2 : Un domaine d'étude discrétisé en éléments finis.

II.5.5 Méthode des intégrales de frontière(MIF)

Elle est très lorsque le matériau est homogène et linéaire. Elle ramène le traitement de l'EDP dans l'ensemble du matériau à celui limité à la frontière du domaine. Ne nécessitant pas un maillage volumique ni matériau ni espace, elle est économique en taille mémoire et temps de calcul. Elle est souvent couplée à la méthode des éléments finis [30].

II.5.6 Méthode des circuits couplés(MCC)

Deux systèmes sont dits être analogiques lorsqu'ils obéissent aux mêmes équations et aux conditions aux limites identiques. Cela signifie que l'équation traduisant un des systèmes peut être transformée, pour exprimer le deuxième système, par simple changement des symboles et des différentes variables.

La base de la méthode des circuits couplés, est de faire l'analogie entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques. Elle consiste à subdiviser le domaine d'étude en spires élémentaires. Par application des lois de Kirchhoff à ces circuits élémentaires, on peut calculer la distribution des variables en question [30].

II.6 Le principe de la MEF

Le principe de la méthode des éléments finis est défini sur la partition du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie appelé élément fini. Le vecteur potentiel, dans un élément peut être approximé par des fonctions d'interpolation linéaire ou parabolique. Ces fonctions d'interpolation doivent assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'interpolation du potentiel dans un élément sont des d'interpolation parabolique. Pour un élément triangulaire on a [27] :

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

Pour les éléments quadrilatéraux on a:

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

Les constantes a, b, c et d sont à déterminer en utilisant les potentiels aux nœuds correspondants. Le potentiel A_e est défini sur l'élément et nul ailleurs. La valeur approximée du potentiel dans tous les éléments du domaine de résolution est donnée par :

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

e : Numéro d'élément.

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

Le potentiel en tous points d'un élément ainsi que la densité de courant sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets (Figure. II.3).

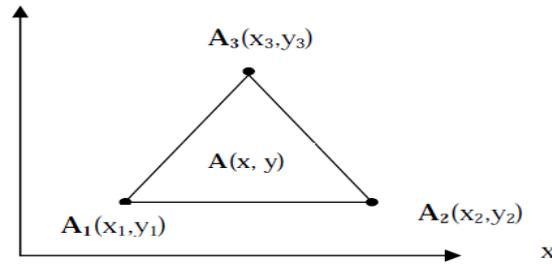


Figure II.3 : fonction d'interpolation d'un élément

II.7 Logiciel de résolution

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution [32] :

- introduction des données géométriques et des propriétés physiques.
- Maillage
- résolution.
- exploitation des résultats.

Sont séquentiellement exécutées.

Les modules associés à ces tâches doivent pouvoir être séparément accessibles. Ainsi, une géométrie discrétisée pourra servir à traiter plusieurs cas où seules les sources d'excitation ou les conditions aux limites sont modifiées. Lors d'une optimisation de formes, l'utilisateur doit également pouvoir faire varier un paramètre géométrique sans devoir refaire le maillage ou réintroduire les conditions aux limites.

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

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

II.8 Présentation du logiciel Flux2D

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite " bande de roulement " pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage [27]. La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés :

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

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

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

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

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

- **Module Solving Process**

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

- **Module Analysis**

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

L'enchaînement de ces modules de Flux 2D est schématisé par la figure II.4.

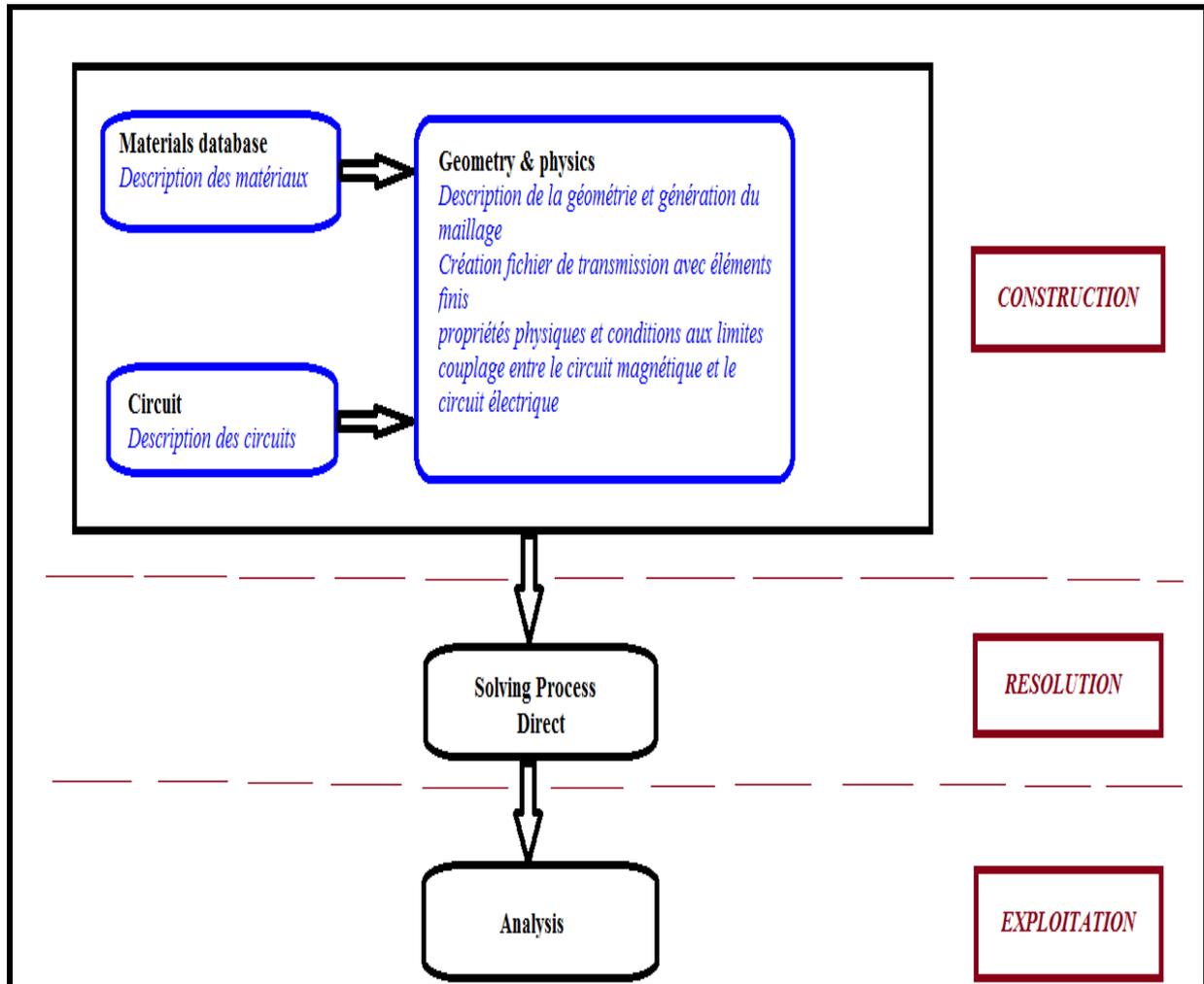


Figure II.4 : l'enchaînement des programmes de Flux 2D

II.9 Construction du modèle de la machine asynchrone

On utilisera le logiciel flux sous sa forme 2D bien que l'inclinaison des encoches ainsi que les effets d'extrémités nécessiteraient pour une étude précise une présentation 3D. Les raisons de ce choix sont simples [33] :

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

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

- L'hystérésis et les pertes fer sont négligées

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

II.9.1 Les données de la machine étudiée

La figure II.5 présente la géométrie de la machine étudiée et ses dimensions.

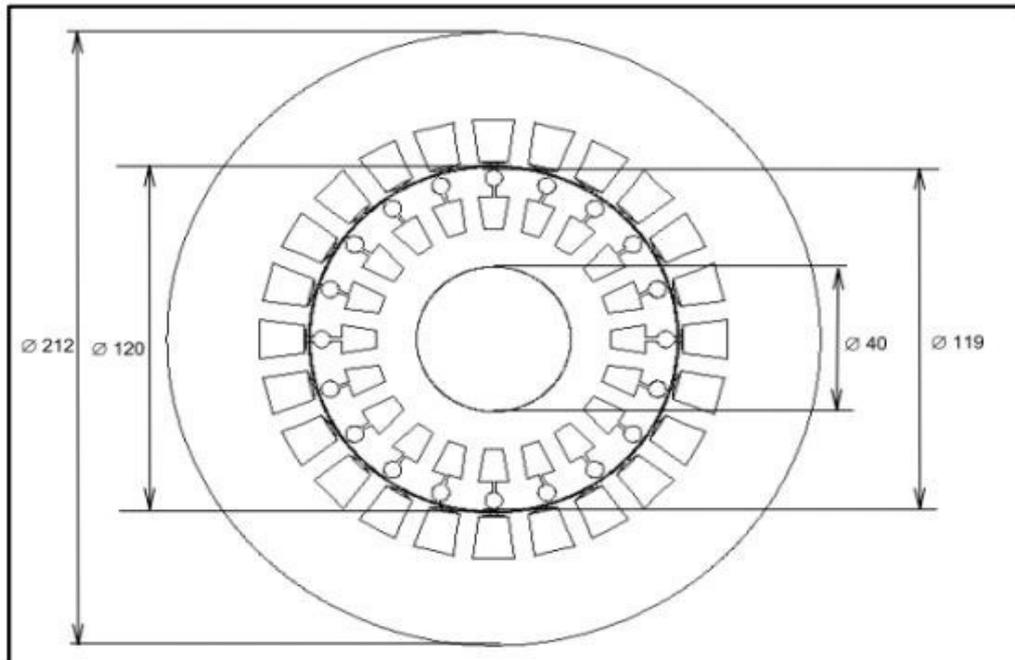


Figure II.5 : Les dimensions de la machine

La forme et les dimensions des encoches de stator et de rotor sont montrées sur la figure (II.6).

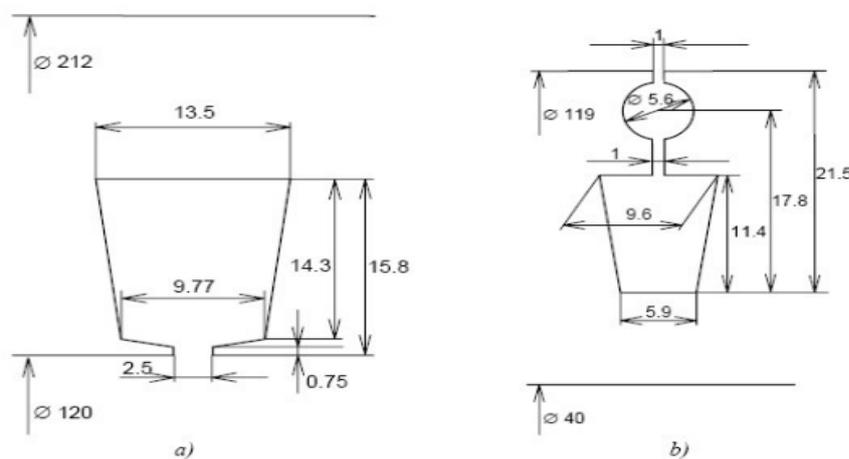


Figure II.6: Dimension des encoches, a) l'encoche statorique, b) l'encoche rotorique.

L'enroulement du stator est un enroulement de cuivre à deux couches, Figure II.7, avec une étape raccourcie de 8/12 et $w_1 = 208$ tours par phase.

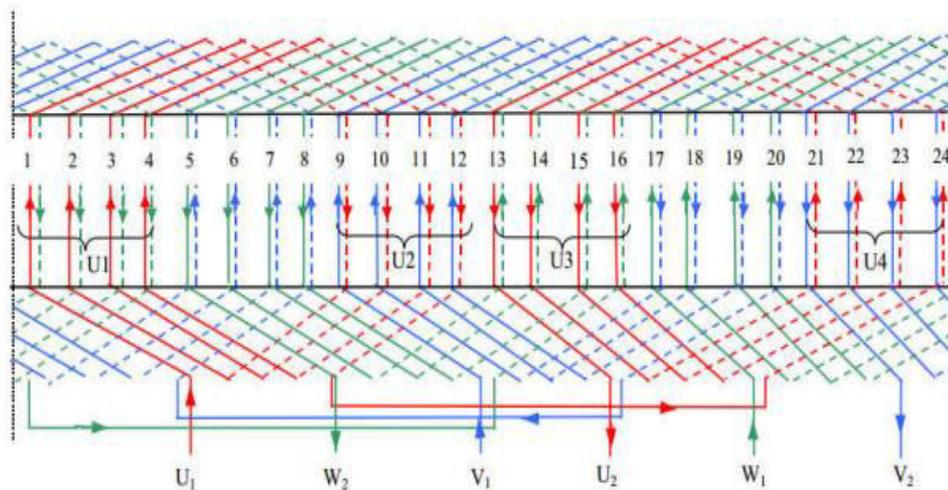


Figure II.7: Bobinage statorique

La figure II.8 présente le circuit magnétique de la machine asynchrone et la répartition de ces trois phases d'alimentation sur les encoches statoriques.

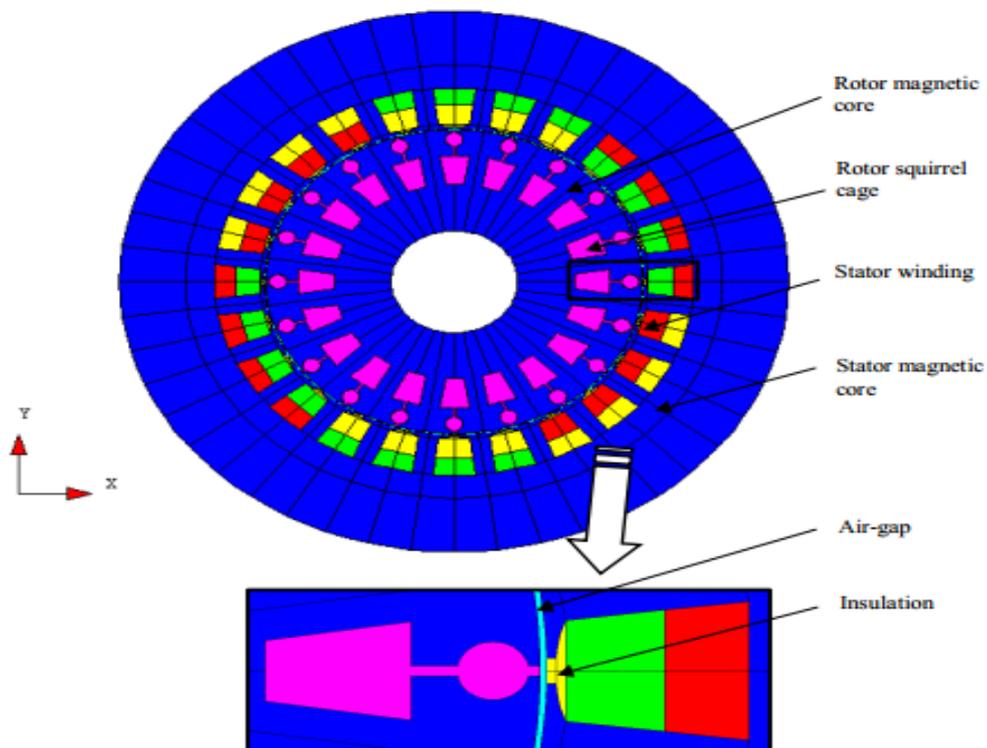


Figure. II.8: Circuit magnétique de la MAS

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

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

Tableau. II.1 : Paramètres globales de la machine

II.9.2 Procédure de construction du modèle par FLUX2D

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

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

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

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

Génération du maillage

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

Tableau II.2 la taille des éléments du maillage

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

Tableau II.2: la taille des éléments du maillage

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

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

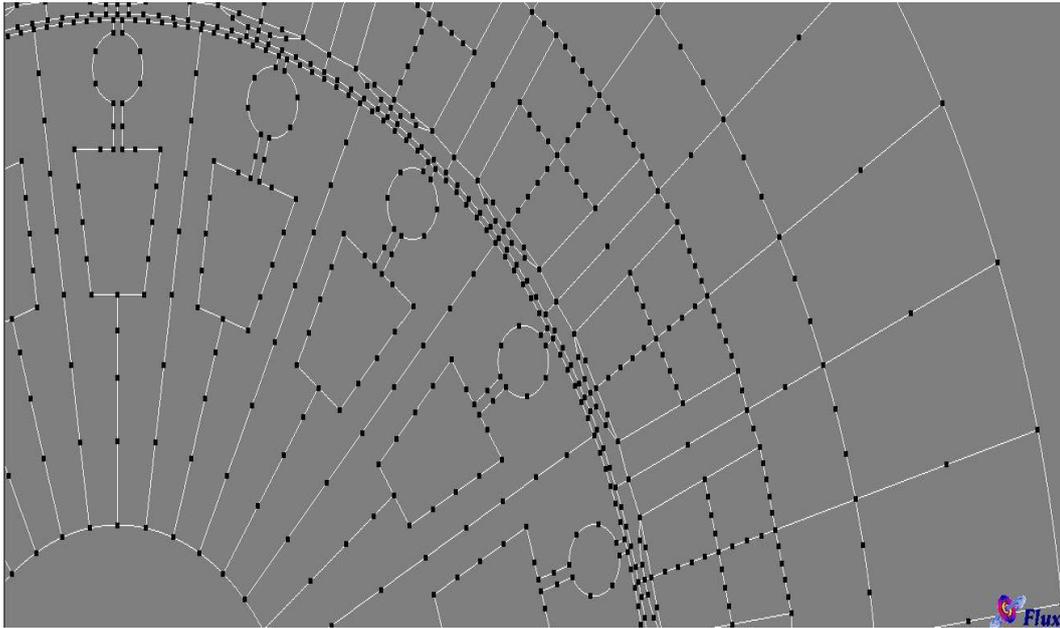


Figure II.9: Les points de maillage

Jusqu'à ici le maillage n'est pas effectué, pour mailler la géométrie on choisit la commande Mesh lines puis la commande Mesh faces et le maillage sera schématisé. La figure II.10 représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.

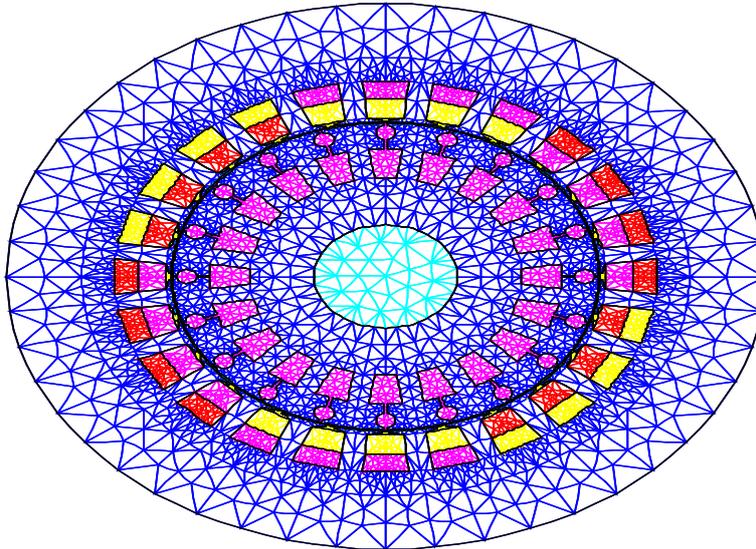


Figure II.10: Répartition du maillage.

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et

vers l'extérieur de la culasse pour alléger le temps de calcul sans perte sensible d'information. La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre, lors de nos simulations nous appliquons la condition de Dirichlet sur tout le contour de la machine avec un potentiel vecteur nul [27].

Création des matériaux

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

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

Pour ce qui est des propriétés magnétiques des matériaux ferreux, on prendra en compte la non-linéarité des caractéristiques B(H) (Tableau III.3).

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 II.3: B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.

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

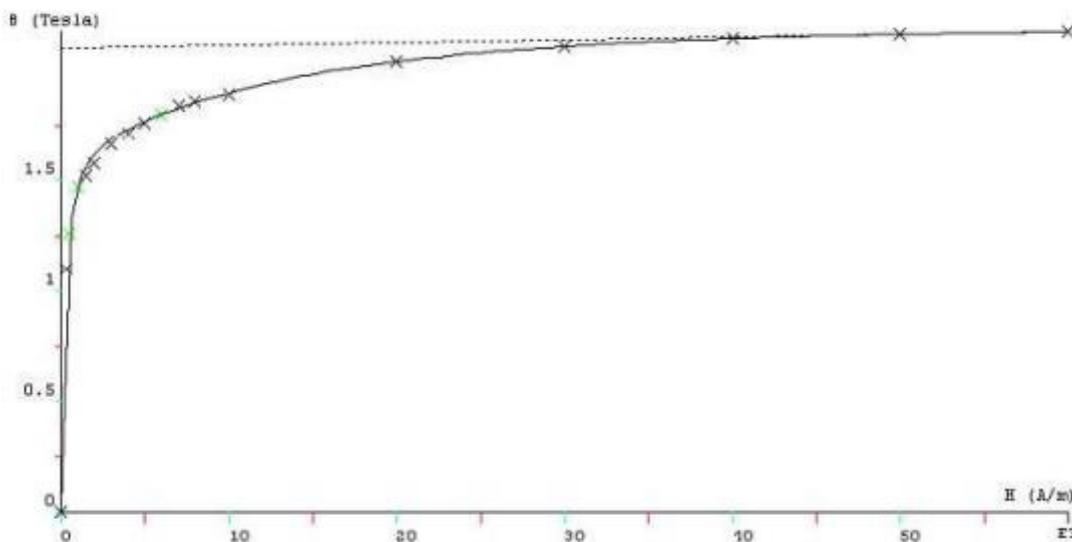


Figure. II.11: Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.

II.9.3 Le circuit électrique

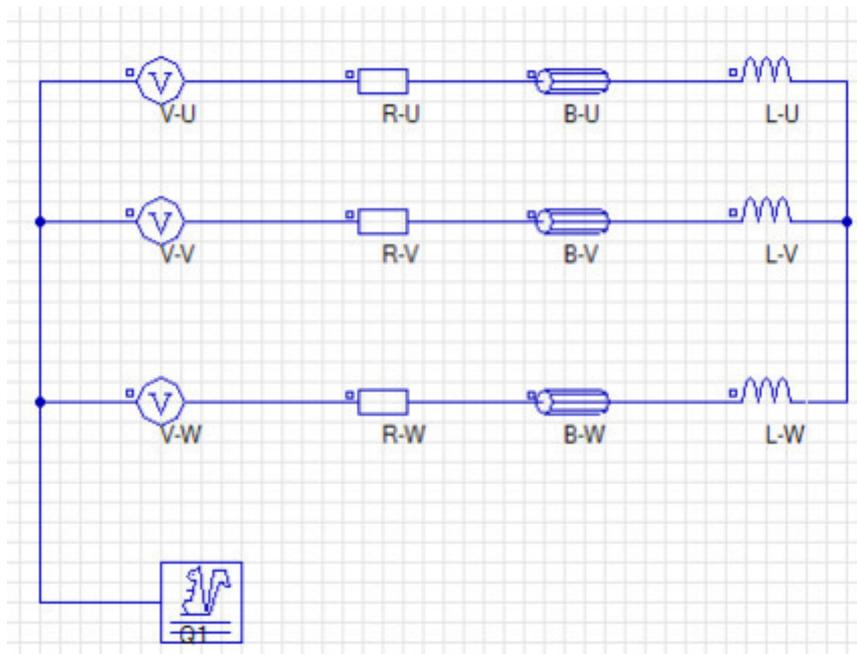


Figure. II.12 : CIR_VOLTAGE circuit pour voltage source de simulations.

Les paramètres du circuit électrique qui aimanté la machine a simulé :

$$R_U, R_V, R_W = 0.9 \Omega$$

$$L_U, L_V, L_W = 4.04 \text{ mH}$$

$$B_U, B_V, B_W = 1.54 \Omega$$

$$R_{\text{cage d'écureuil}} = 1.39e-6 \Omega$$

$$L_{\text{cage d'écureuil}} = 1.06e-8 \text{ H}$$

$$V_U = 380 * \text{SQRT}(2) * \text{SIN}(314 * \text{TIME})$$

$$V_V = 380 * \text{SQRT}(2) * \text{SIN}(314 * \text{TIME} - 2.094)$$

$$V_W = 380 * \text{SQRT}(2) * \text{SIN}(314 * \text{TIME} + 2.09)$$

Nombre de barre de la cage d'écureuil=20

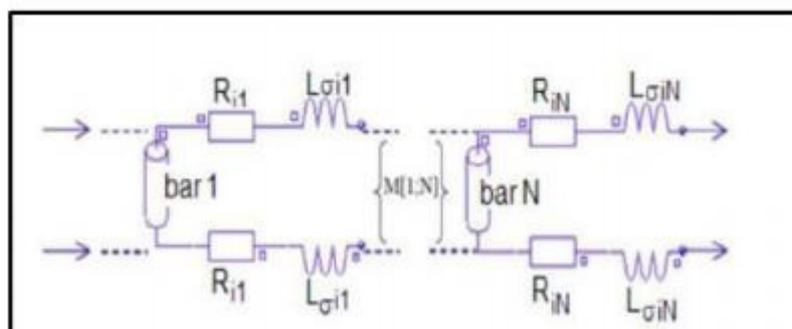


Figure II.13: Circuit équivalent de la cage rotorique.

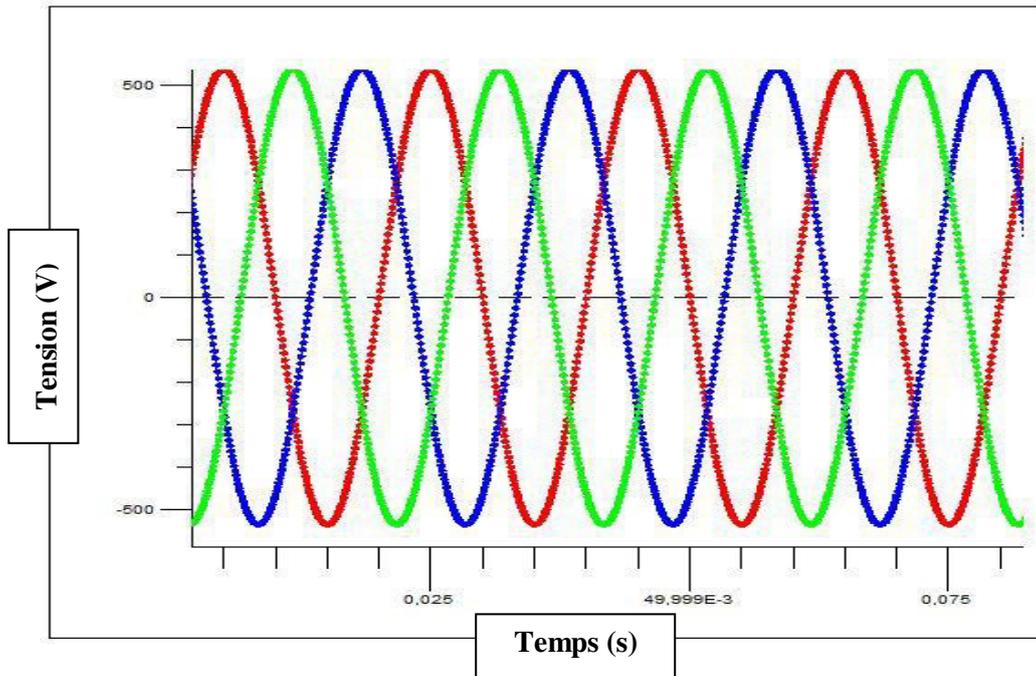


Figure .II.14 : Les tensions statoriques à vide

Les propriétés physiques et régions

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

Fixé : définit les parties fixes du modèle.

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

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

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

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

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

II.10 Résultats de simulation par la magnétodynamique

On rappelle les avantages et les inconvénients de la magnétodynamique [28] :

➤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» prise en compte. Cela aboutit à des courants statoriques parfois déséquilibrés car les harmoniques des espaces ne sont pas prises en compte.

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique et numérique qu'on va utiliser pour modéliser la machine asynchrone, basé sur la méthode des éléments finis. On a commencé par la représentation de la méthode de calcul de champ par les éléments finis en citant les équations qui régissent le champ électromagnétique dans les machines électriques qui sont les équations de Maxwell. Puis on est passé à la description de principe de calcul et du logiciel utilisé, on a cité la méthode de réalisation de ce modèle et du couplage de circuit magnétique avec le circuit électrique extérieur d'alimentation.

III.1 Introduction

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

Comme présenté précédemment, une barre cassée signifie que le courant circulant dans celle-ci est nul et le courant qui circulait à travers cette barre se répartit sur les autres barres adjacentes. Ces dernières seront surchargées, ce qui provoquera leurs ruptures, et parfois un arrêt total de la machine. Les phénomènes qui peuvent accompagner la rupture de barres dans une cage rotorique sont:

- Contraintes thermiques dues aux surcharges thermiques, points chauds, pertes excessives, et/ou étincelles.
- Contraintes magnétiques dues aux forces électromagnétiques, traction magnétique déséquilibrée, bruit et/ou vibrations électromagnétiques.
- Contraintes résiduelles dues aux problèmes de construction.
- Contraintes dynamiques engendrées par les couples de l'arbre et/ou les forces centrifuges.
- Contraintes de l'environnement causées par l'humidité et la poussière.
- Contraintes mécaniques dues aux pertes dans les tôles, la fatigue des parties du rotor et le défaut de roulements.

Lorsqu'une barre est cassée, des harmoniques du flux sont produits et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences:

$$f_b = (1 \pm 2k) f \quad (\text{III.1})$$

Avec $k=1, 2, 3, \dots, g$: est le glissement et f est la fréquence d'alimentation.

Les défauts de cassures de barres génèrent également dans les signaux du couple et de la vitesse des composantes de fréquences $2gf$ et $4gf$ [25]. De notre part, nous avons utilisé le courant statorique comme paramètre afin de localiser et identifié la nature du défaut.

La signature du défaut sur l'analyse spectrale du courant statorique est déduite par la formulation (III.1).

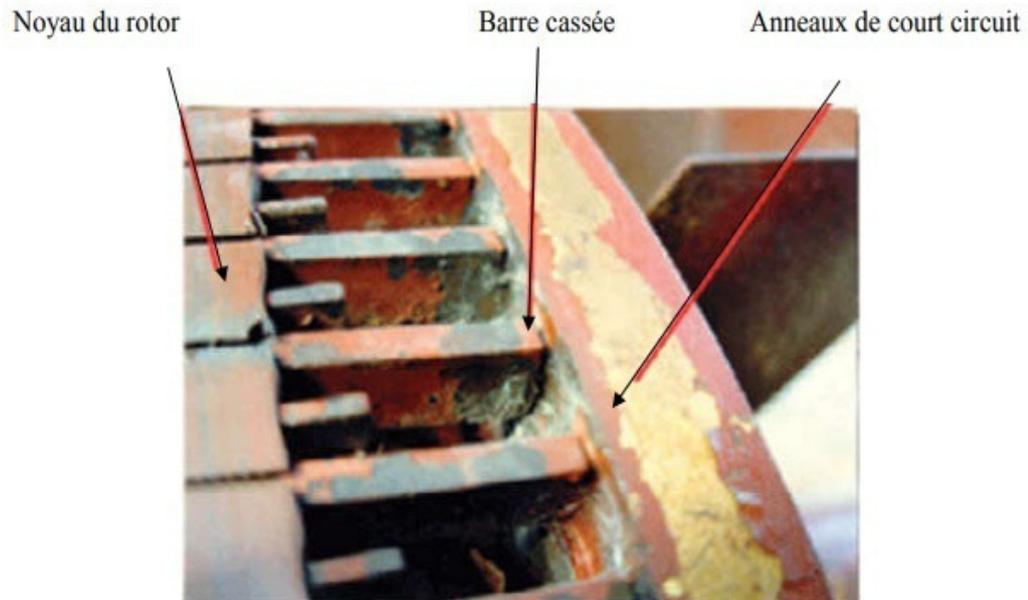


Figure. III.1: Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone.

III.2 Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage à vide

III.2.1 Etat sain à vide sous la tension nominale de 380 V.

La figure III.2 montre la distribution des lignes du flux à vide et la figure III. 3 montre le module de l'induction B , (a) au démarrage ; (b) en régime permanent. De ces figures, on peut voir le champ tournant résultant de la combinaison spatiale et temporelle de 120 degré des trois phases statoriques. La figure III.4 montre le courant statorique de la phase A. On voit bien la demande en courant au démarrage qui est très important puis qui se stabilise à une valeur minime au régime permanent ou la vitesse atteint la vitesse nominale et le couple atteint une valeur presque nulle. La figure III.5 montre le courant rotorique à vide, ce courant est très important au démarrage suivant le principe du transformateur avec un rapport de transformation important.

La figure III.6 et la figure III.7 montre la vitesse de rotation et le couple électromagnétique à vide.

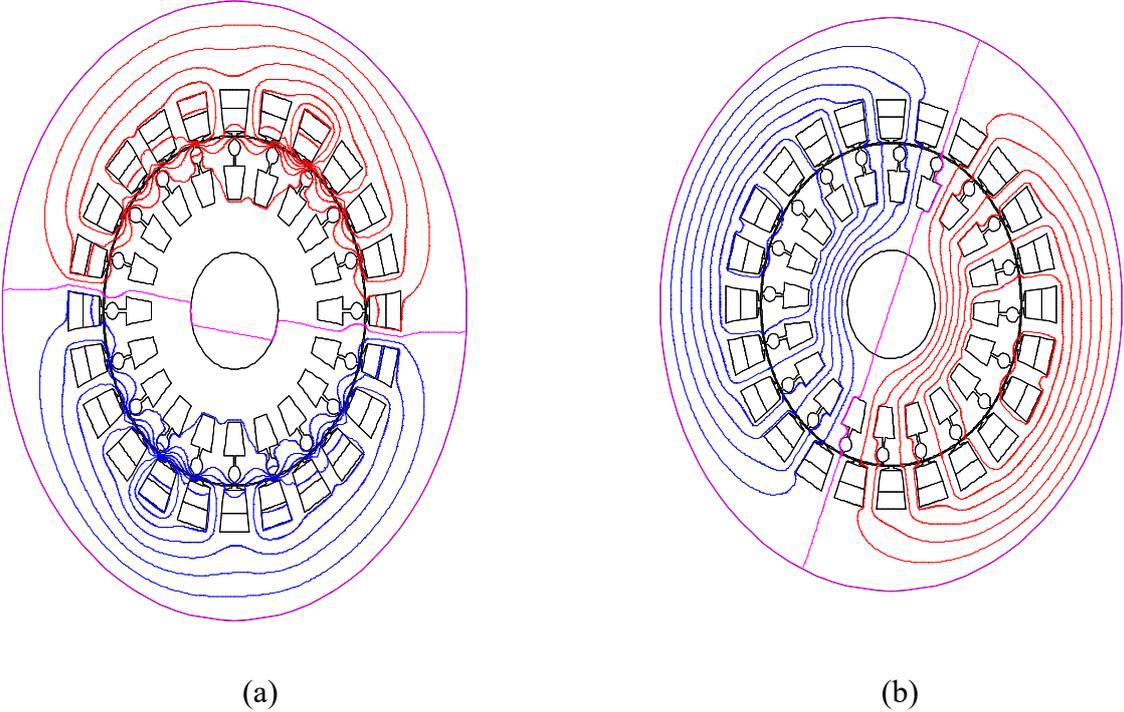


Figure III.2: la distribution des lignes du flux à vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent

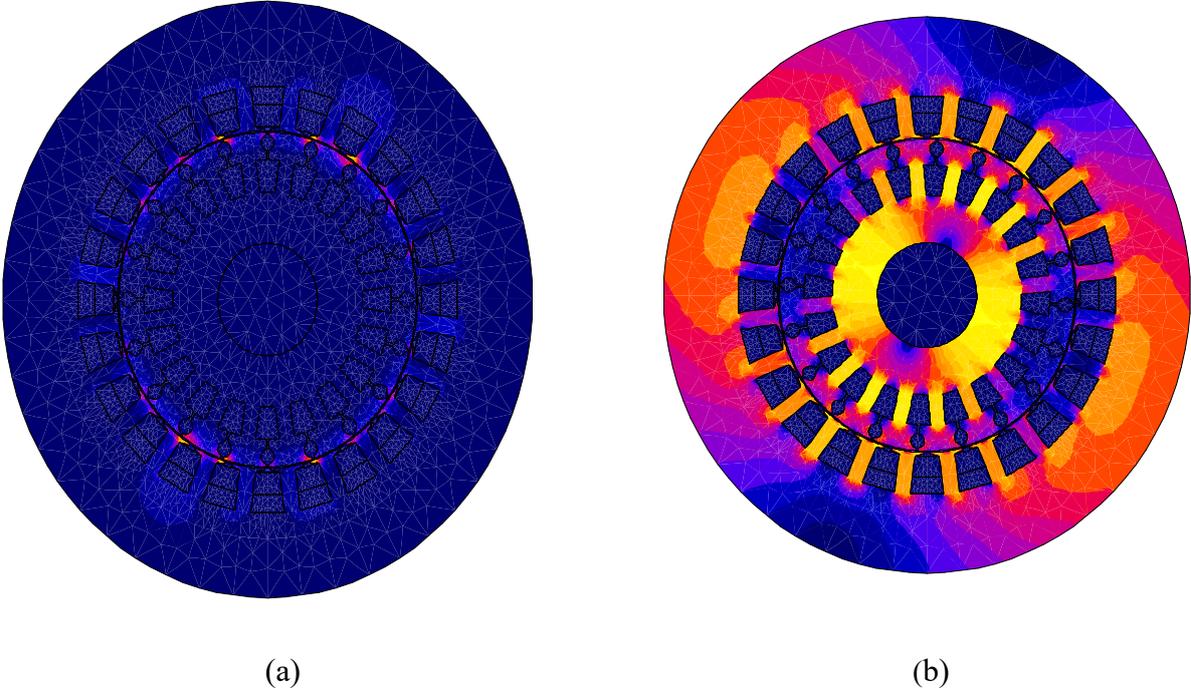


Figure III.3 : l'induction B à vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.

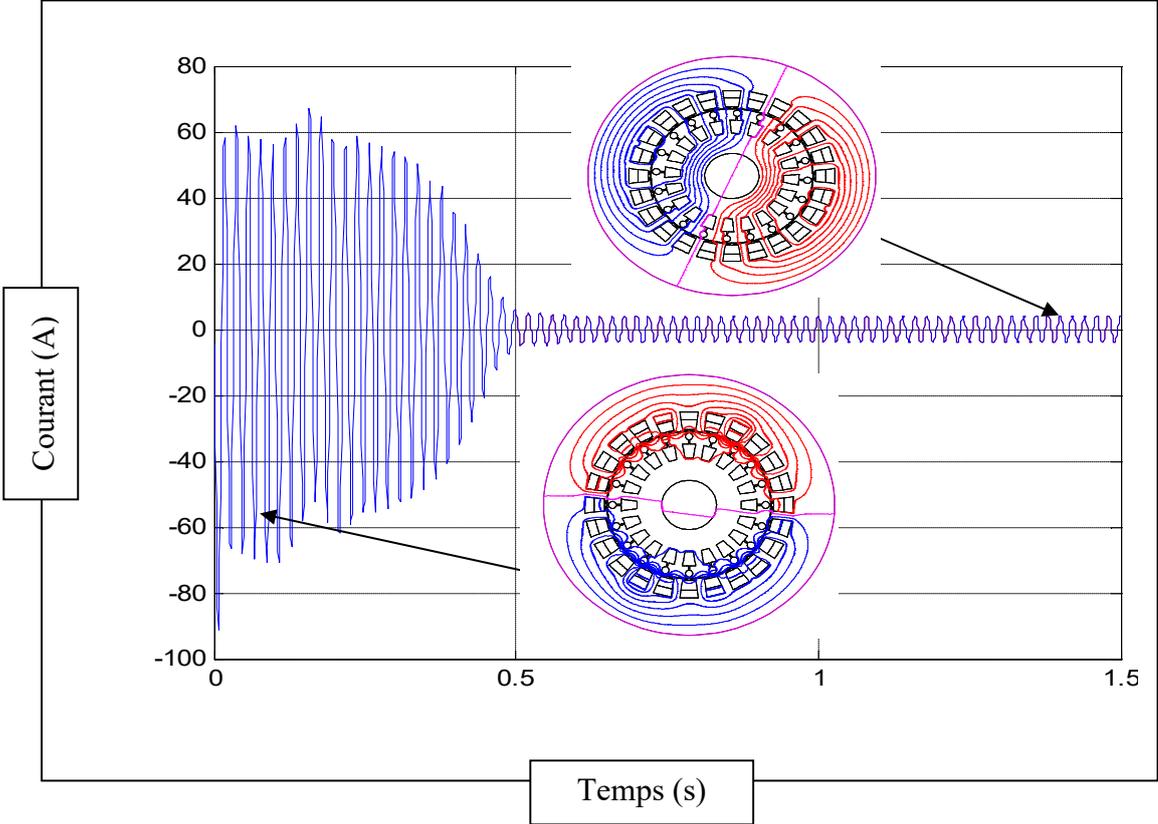


Figure III.4: le courant statorique de la phase A à vide.

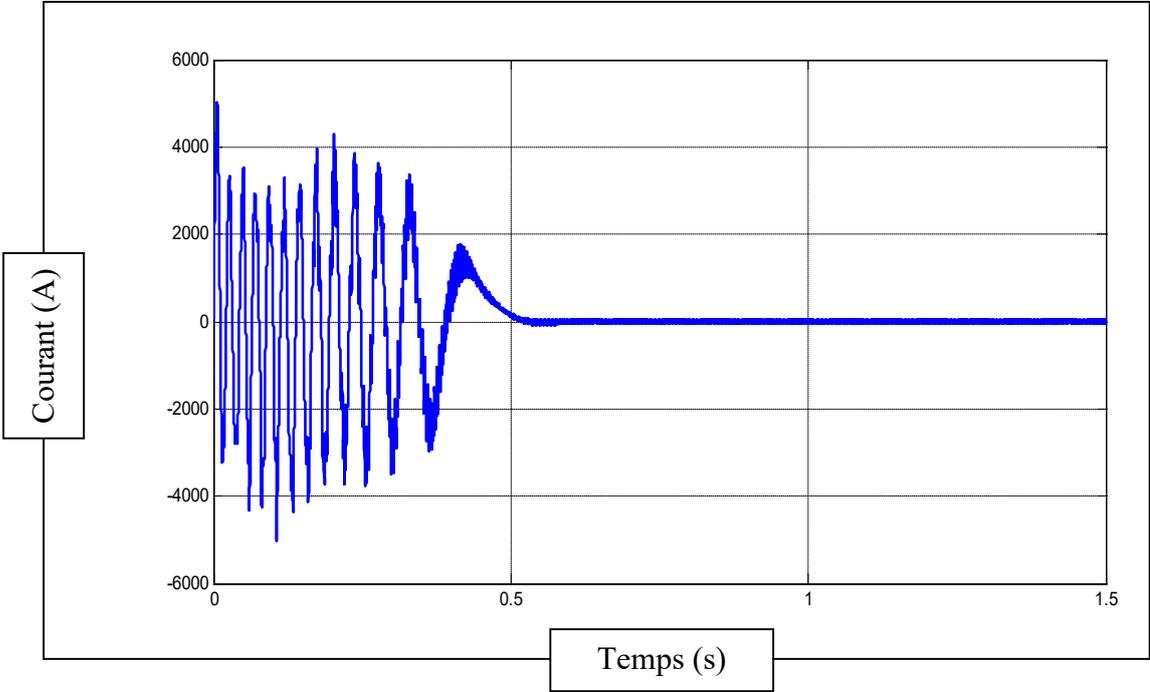


Figure III.5: le courant dans la barre rotorique 1 à vide.

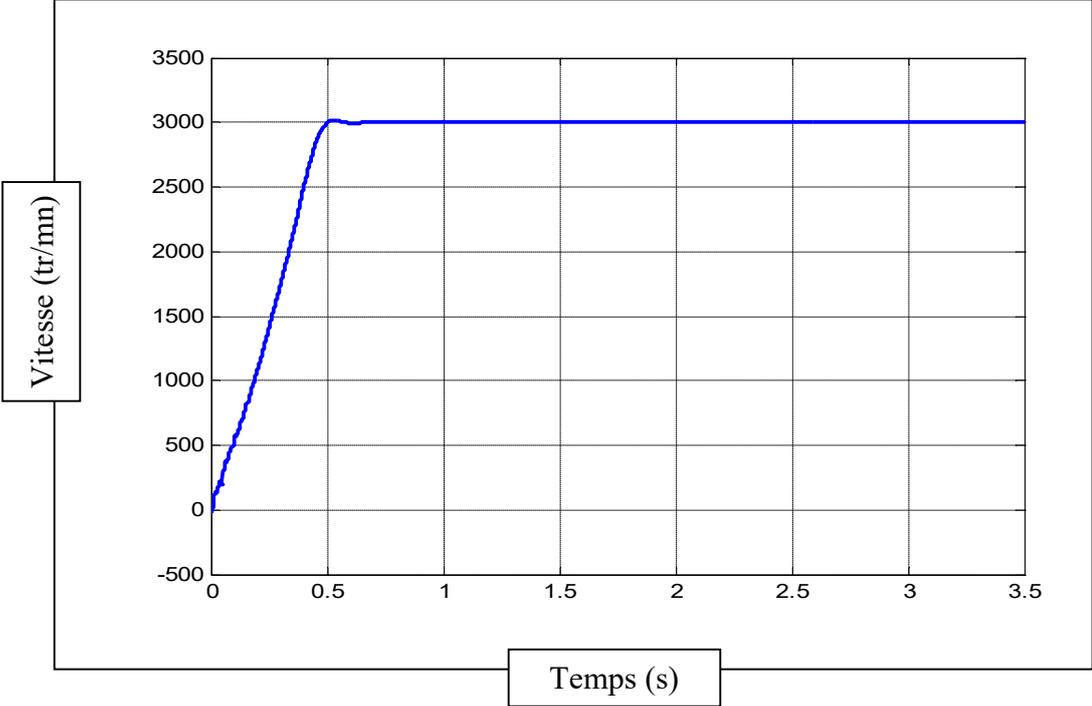


Figure III.6: vitesse de rotation à vide.

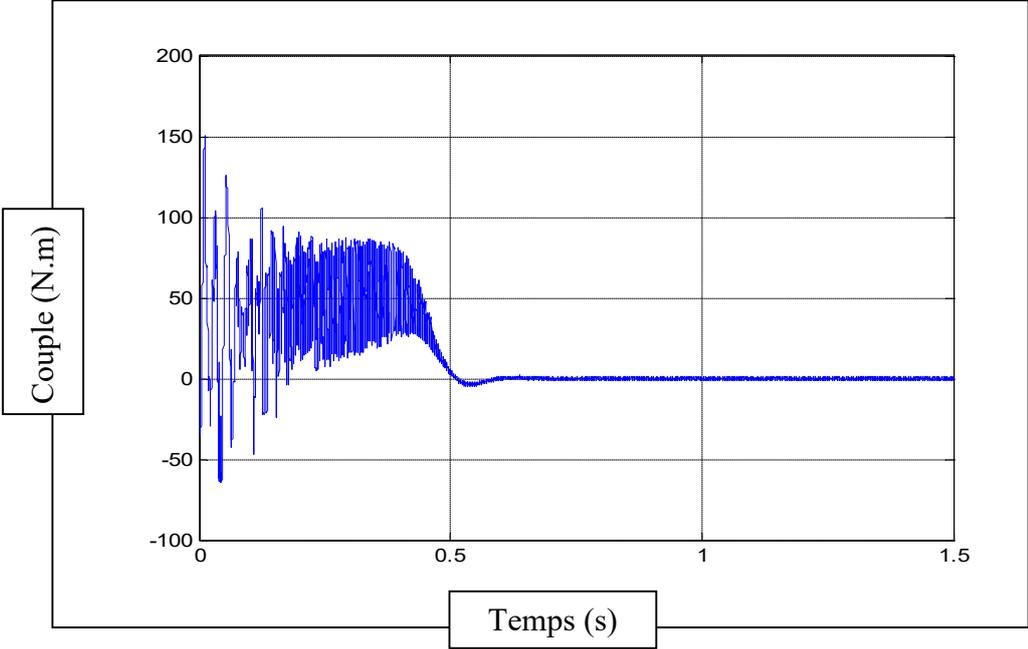


Figure III.7: le couple électromagnétique à vide.

III.2.2 Etat avec défaut à vide sous la tension nominale de 380 V.

La figure III.8 montre la distribution des lignes du flux à vide et la figure III.9 montre le module de l'induction B , (a) au démarrage ; (b) en régime permanent en présence de la barre cassée.

D'après ces figures, on peut voir que le champ tournant est perturbé par la présence de la barre casée au démarrage par contre en régime permanent la barre cassée ne modifie pas considérablement l'allure du champ. La figure III.10 montre le courant statorique de la phase A avec une demande en courant au démarrage très importante puis cette demande se stabilise à une valeur minime au régime permanent. La figure III.11 montre le courant rotorique à vide pour une barre cassée et la figure III.12 l'allure du courant pour une barre adjacente. Pour la simulation de la barre cassée, on a considéré que la barre a une résistivité de 10 (Ohm.m). Pour la barre adjacente le courant est beaucoup plus important au démarrage que celui dans une barre à l'état sein. L'allure de la vitesse et du couple sont presque les mêmes qu'à l'état sein. La figure III.13 et la figure III.14 montre la vitesse de rotation et le couple électromagnétique à vide avec une barre cassée.

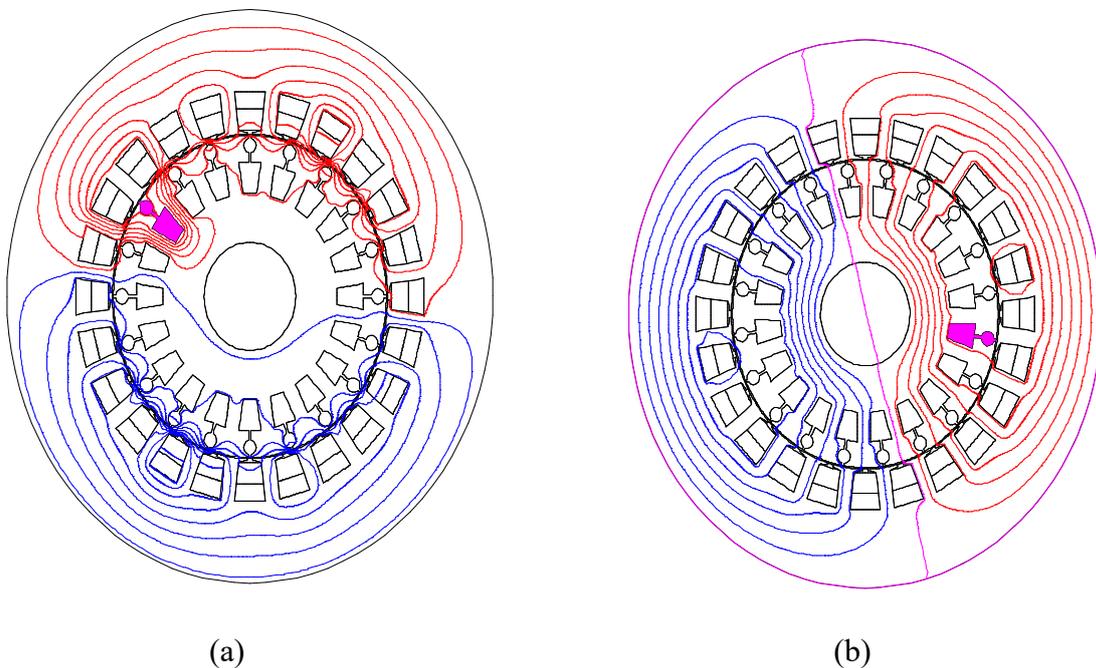


Figure III. 8: La distribution des lignes du flux machine avec une barre cassée (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.

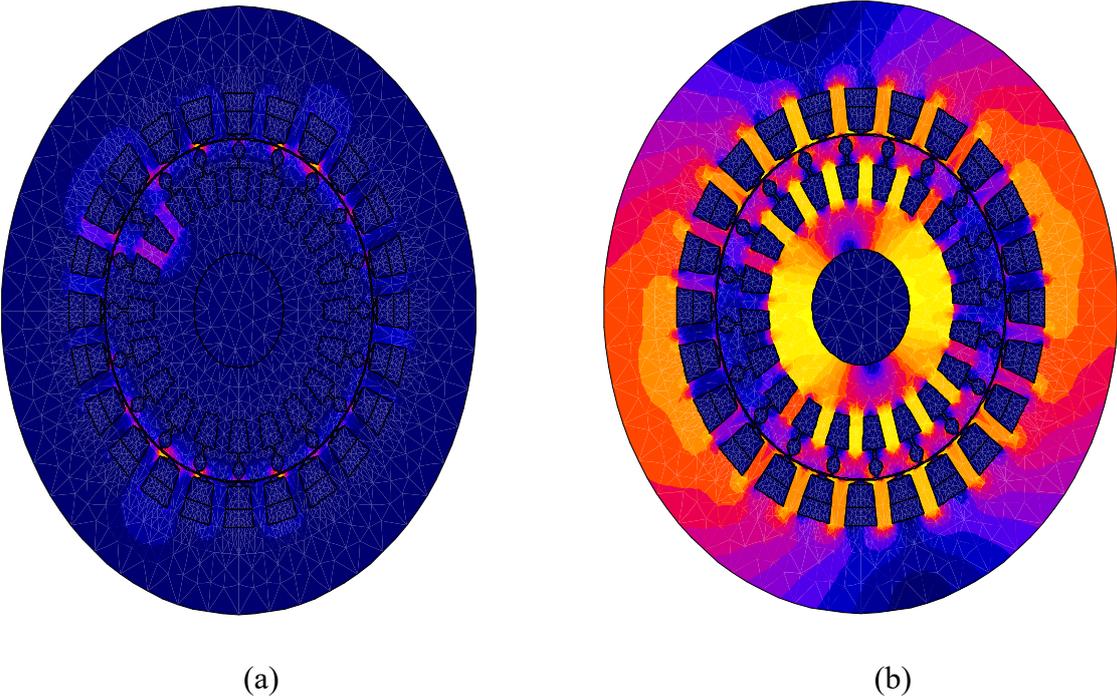


Figure III. 9: L'induction magnétique avec une barre cassée. (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.

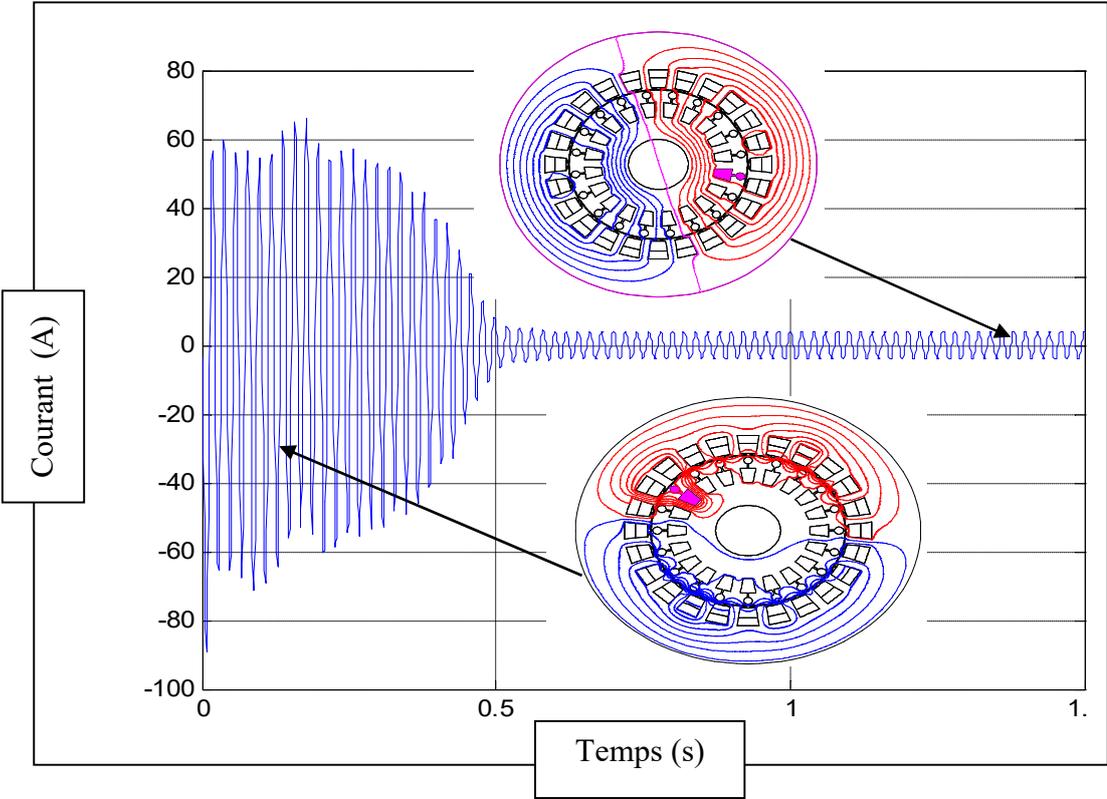


Figure III.10 : le courant statorique de la phase A à vide avec une barre cassée.

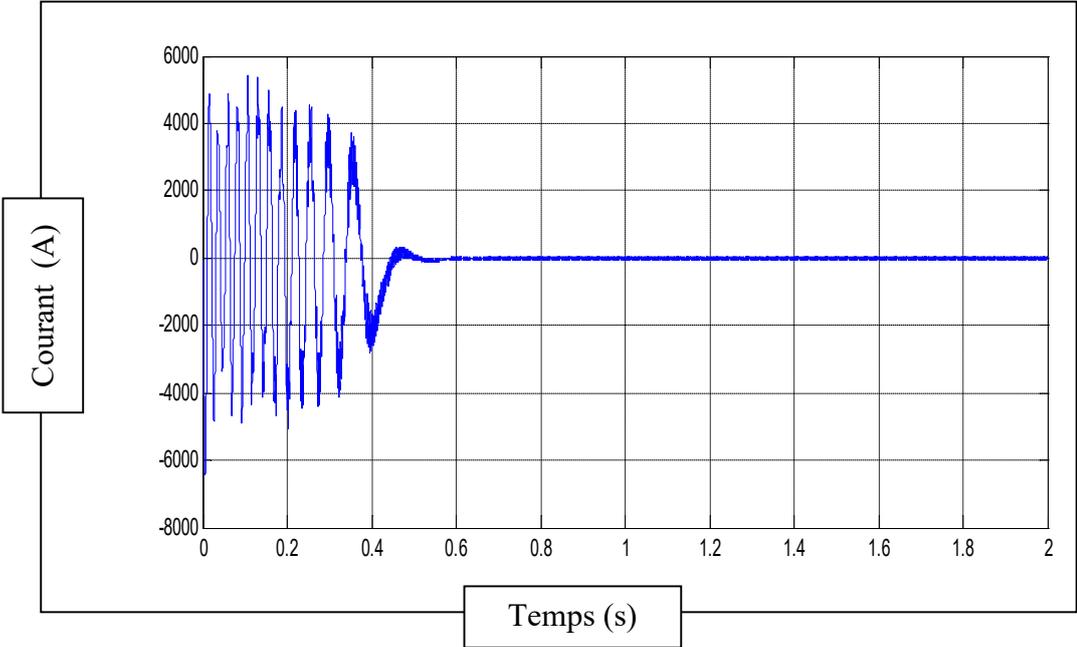


Figure III.11: Le courant dans la barre adjacente à la barre cassée (barre 10).

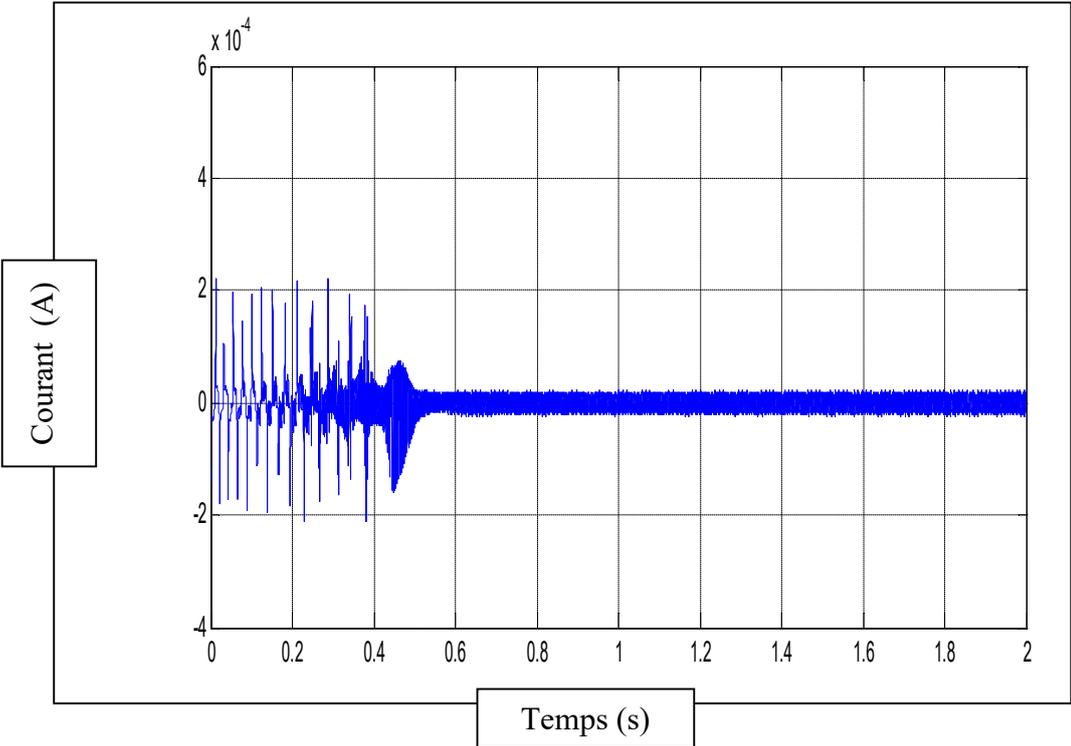


Figure III.12 : Le courant dans la barre 11 cassée à vide.

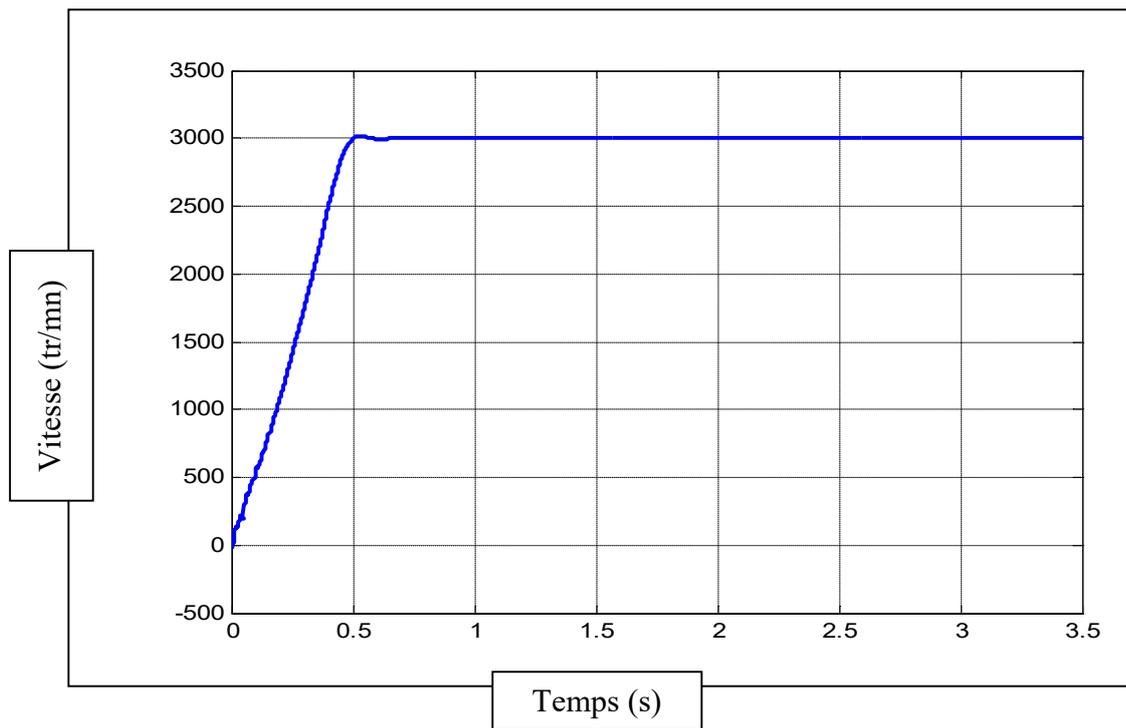


Figure III.13: La vitesse de rotation à vide avec une barre cassée.

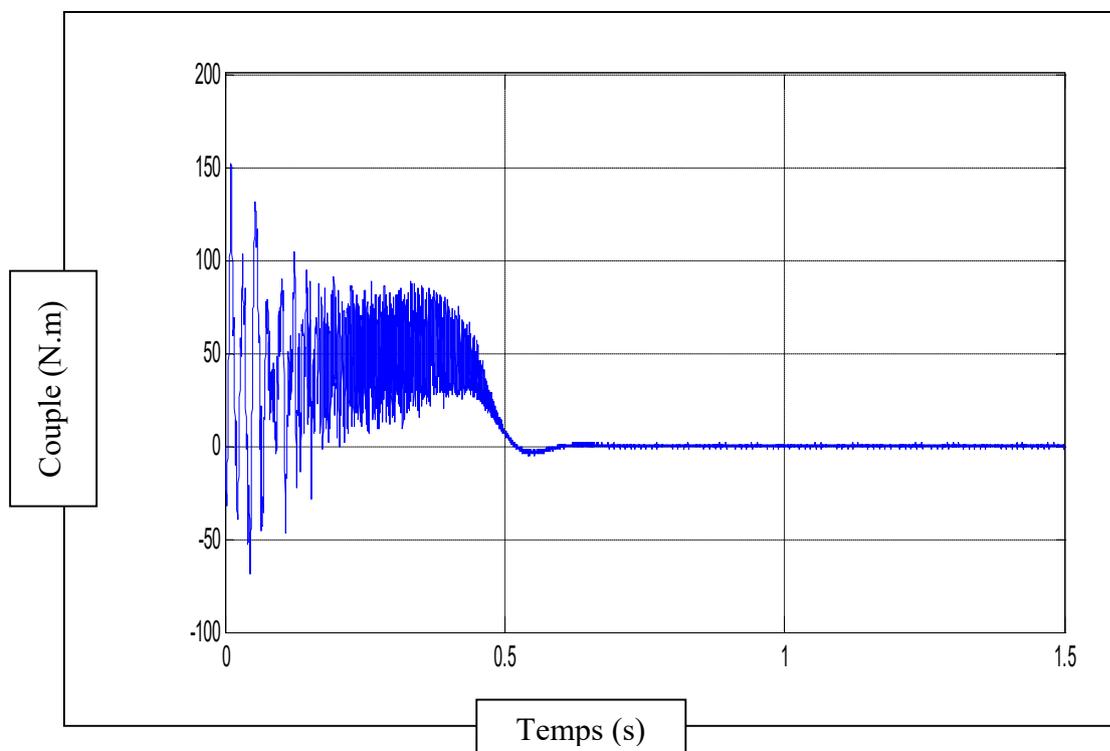


Figure III.14: Le couple électromagnétique à vide avec une barre cassée.

III.2.3 Etat du défaut à vide par l'étude spectrale

On voit bien qu'au démarrage la barre cassée est bien traversée par les lignes du flux et son effet peut être visualisé dans le signal du courant statorique (Figure III.8). Mais malheureusement comme la détection par la technique du Transformé de Fourier FFT ne s'effectue pas dans ce régime puisque le temps de ce régime n'est pas favorable pour la détection (le temps est très court au moins 1s pour détecter un défaut de 1Hz). De plus le régime permanent n'est pas lui aussi favorable à la détection puisque comme on peut le voir, la barre cassée se localise dans une zone de point mort des lignes du flux c'est-à-dire n'est pas traversée par les lignes du flux qu'après plusieurs tours et la détection n'est pas propice dans cette zone. Même si on augmente le temps de traitement (1.5-0.5) s (Figure III.15), (2.5-0.5) s (Figure III.16) et (3.5-0.5) s (Figure III.17) aucune détection n'est apparente cela est dû à la valeur du glissement qui est très petit et la signature du défaut est complètement cachée dans le pic de la fréquence fondamentale $f=50$ Hz.

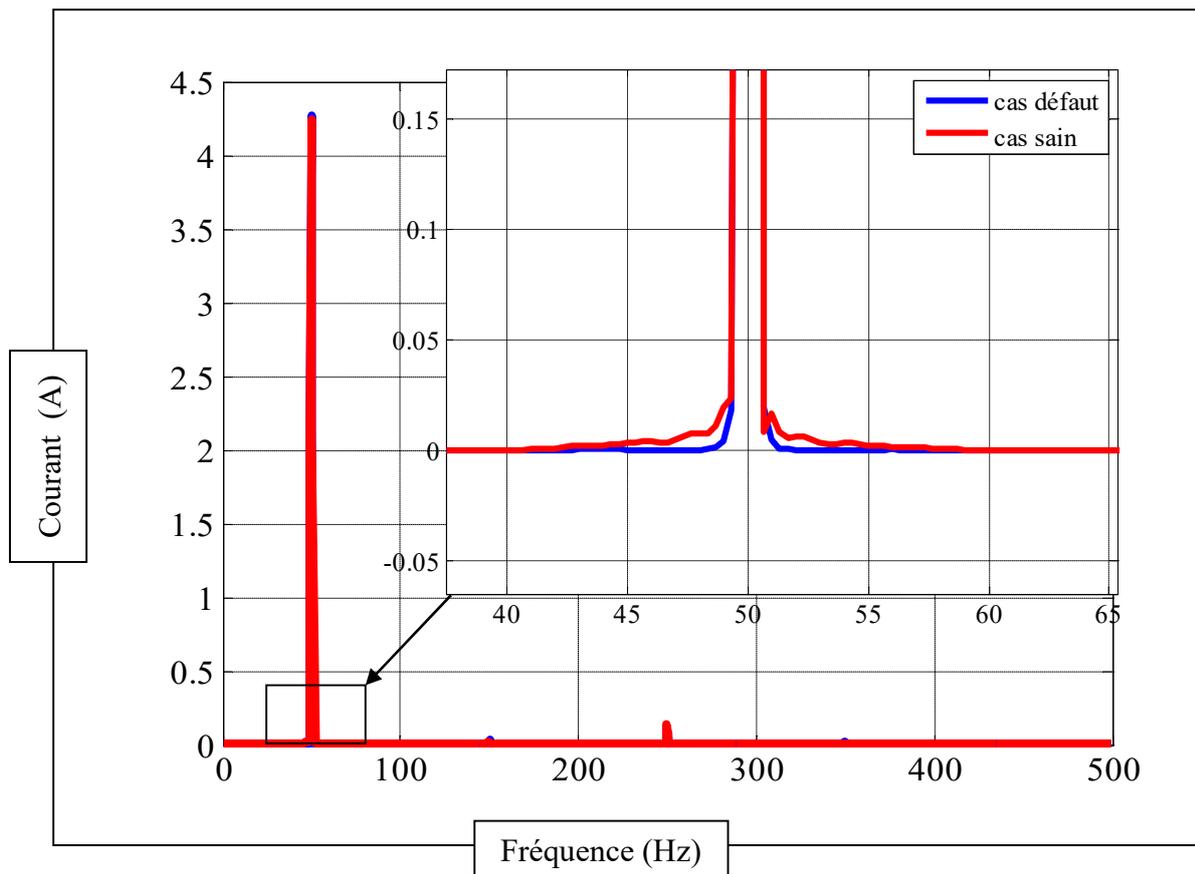


Figure III.15: Spectre du statorique phase A (avec zoom) pour un temps de traitement de 1.5s en régime permanent.

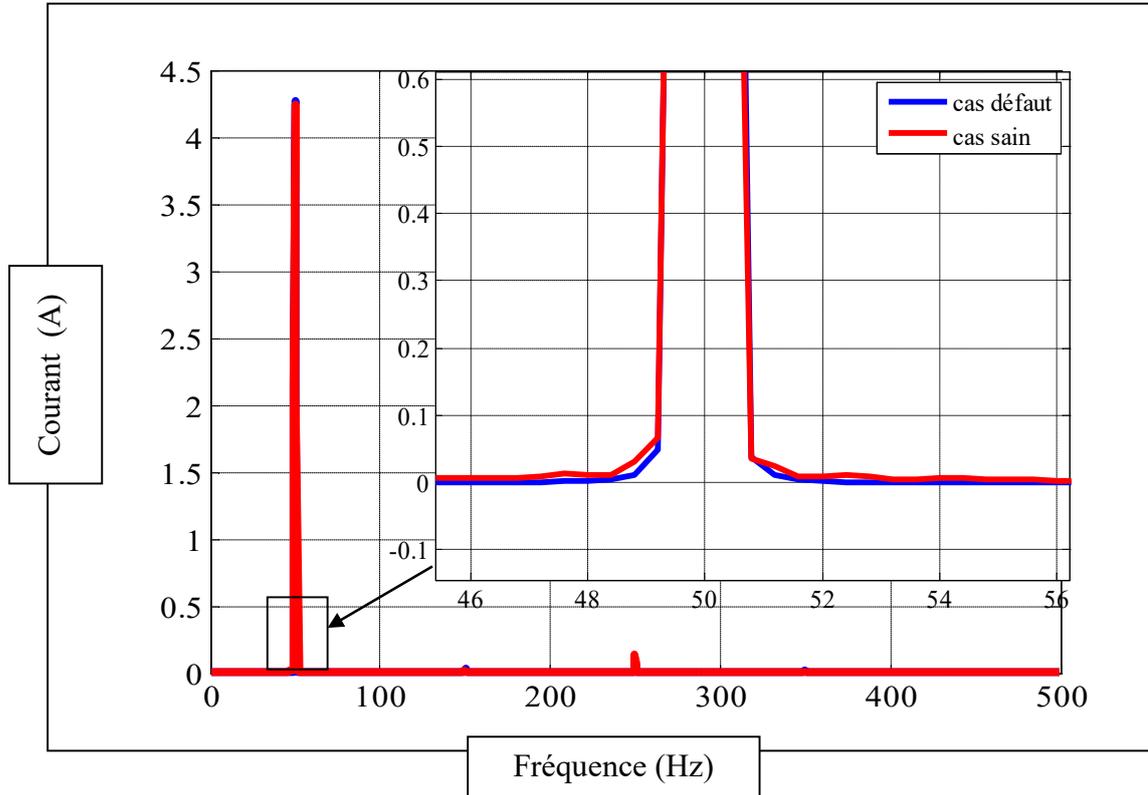


Figure III.16: Spectre du courant statorique phase A (avec zoom) pour un temps de traitement de 2.5s en régime permanent

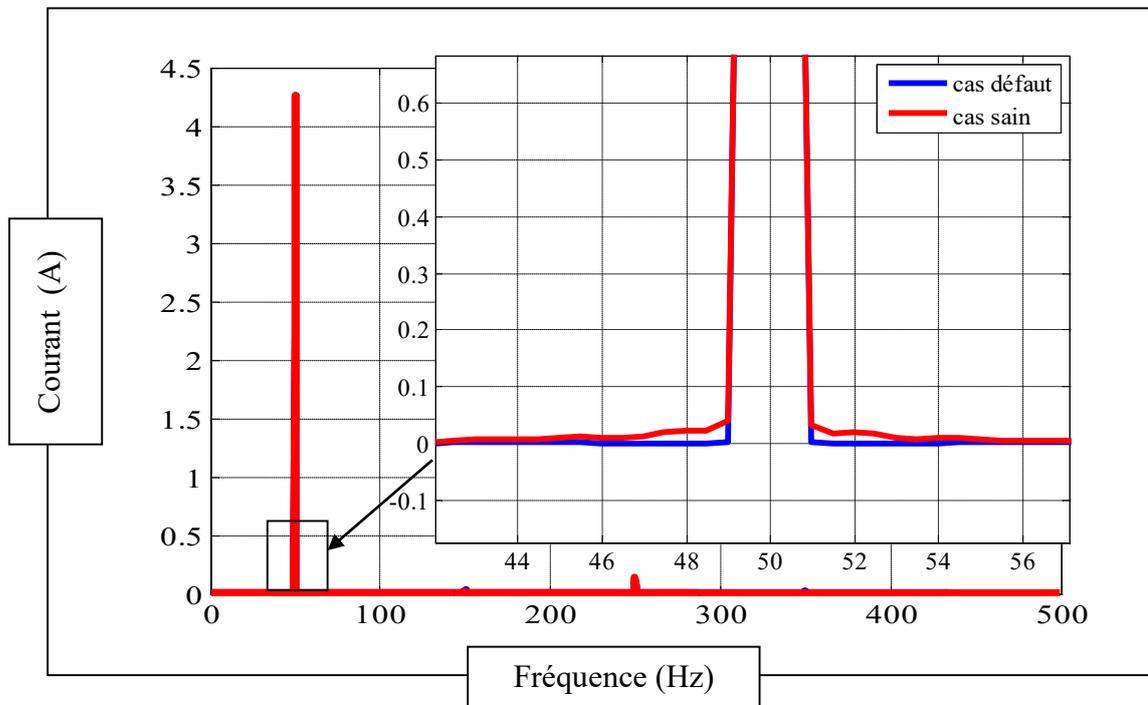


Figure III.17: Spectre du courant statorique phase A (avec zoom) pour un temps de traitement de 3.5s en régime permanent.

III.3 Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage en charge

Pour visualiser la signature du défaut symbolisé par la cassure de barre, il nous a été suggéré de faire les tests en utilisant un couple résistant important [06]. Cela augmenterait le glissement qui par la suite peut aider à séparer la fréquence du défaut f_b de la fréquence du signal f traduit par l'équation III.1. On a choisit un couple de 18 N/m inférieur au couple nominal de 24.5 N/m qui est suffisant pour la bonne détection.

III.3.1 Etat sain en charge 18 N/m sous la tension nominale de 380 V.

Sous la même tension 380V, nous allons présenter les grandeurs locales et globales de la machine en charge. La figure III.18 montre la distribution des lignes du flux en charge et la figure III.19 montre le module de l'induction B , (a) au démarrage ; (b) en régime permanent. La figure III.20 montre le courant statorique de la phase A. On voit bien la demande en courant au démarrage qui est très important avec un temps de démarrage plus important qu'à vide. On peut voir que le module du courant en régime permanent est plus important en charge pourtant il est le même au démarrage. La figure III.21 et la figure III.22 montre respectivement la vitesse de rotation qui est moins importante qu'à vide et le couple électromagnétique en charge qui se stabilise à la valeur du couple résistant en régime permanent.

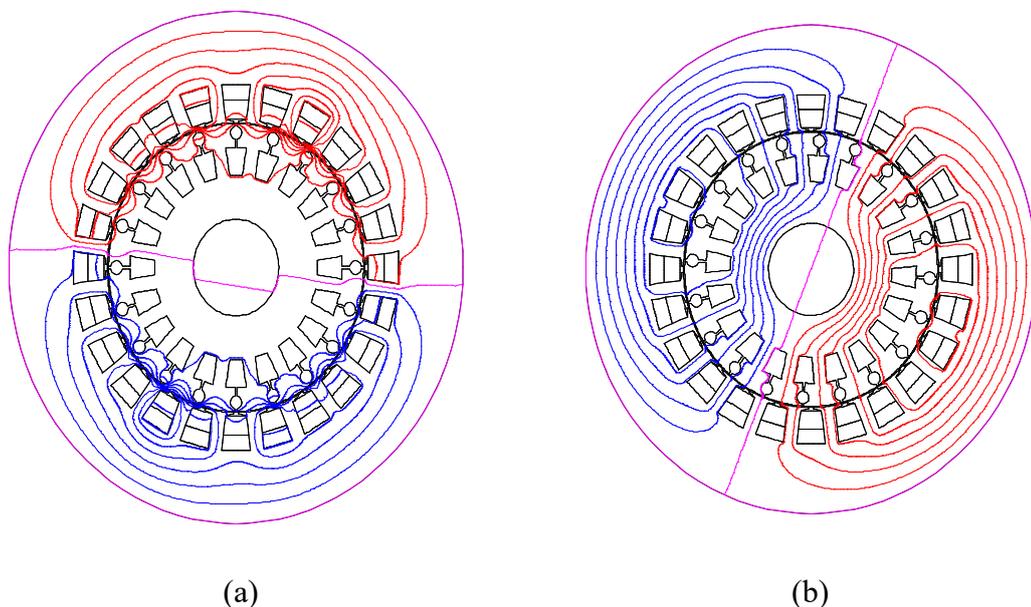


Figure III. 18 : la distribution des lignes du flux en charge (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.

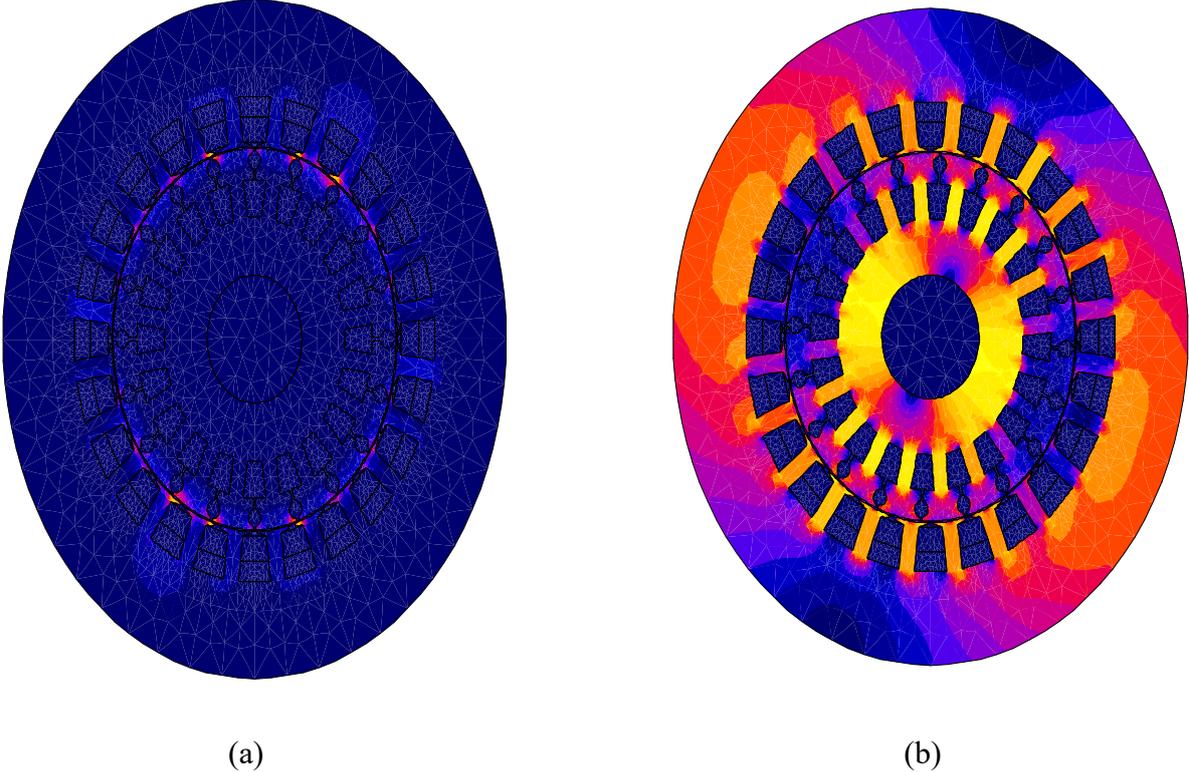


Figure III.19 : L'induction B en charge (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.

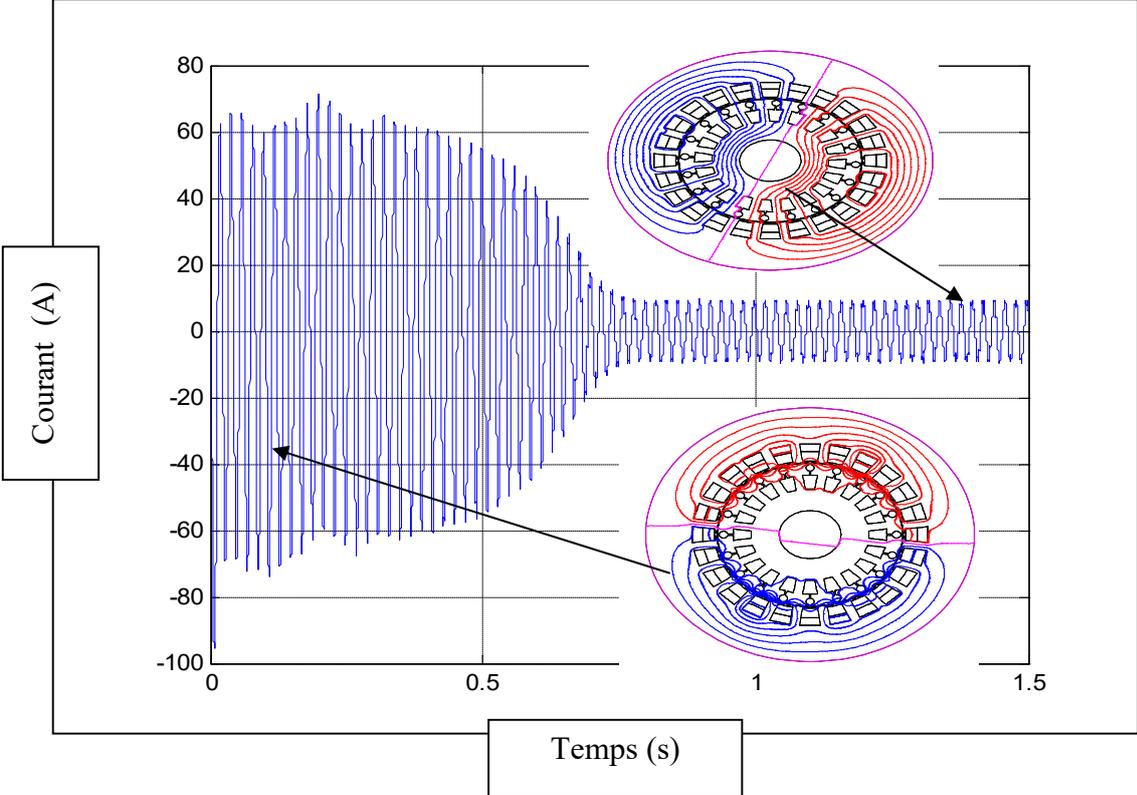


Fig.III.20: le courant statorique de la phase A en charge.

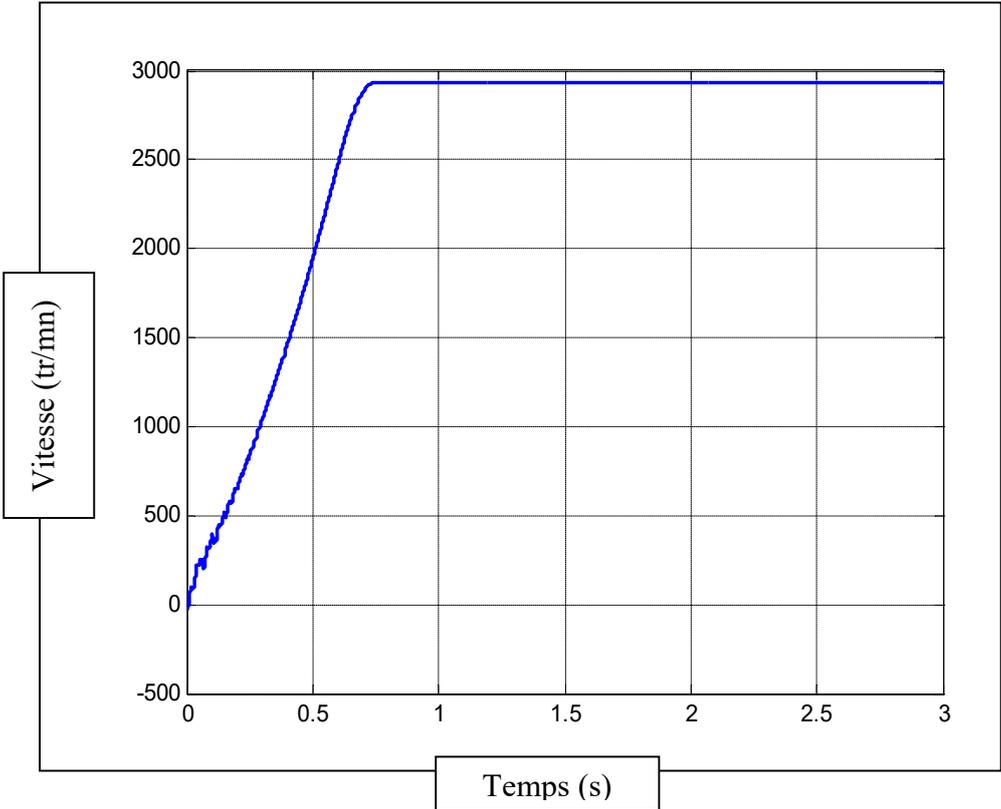


Fig.III.21: Vitesse de rotation en charge.

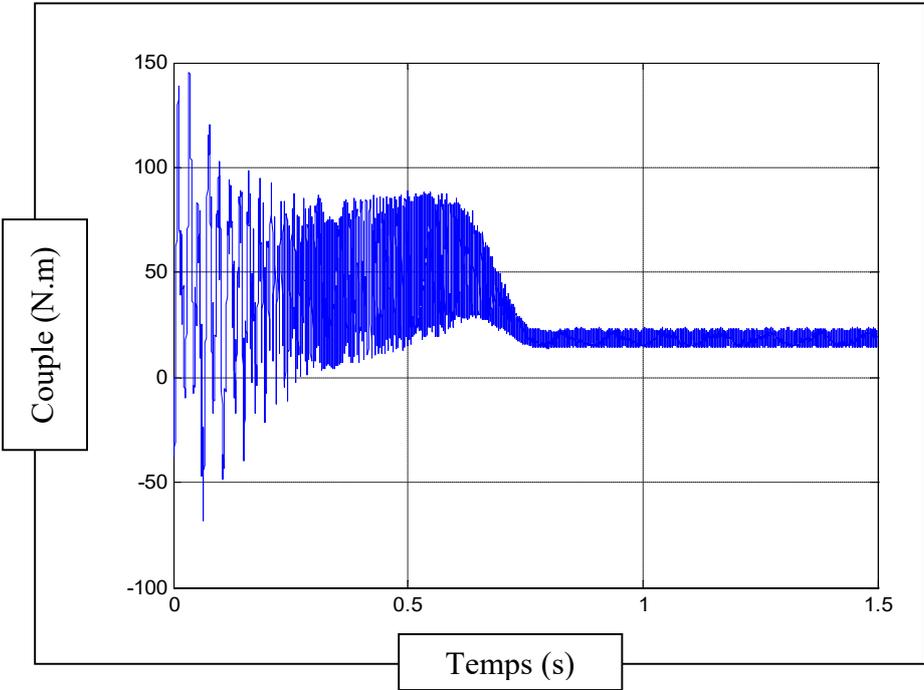


Fig.III.22: le couple électromagnétique en charge.

III.3.2 Etat avec défaut en charge 18 N/m sous la tension nominale de 380 V.

La figure III.23 montre la distribution des lignes du flux en charge et la figure III.24 montre le module de l'induction B, (a) au démarrage ; (b) en régime permanent en présence de la barre cassée. D'après ces figures, on peut voir que le champ tournant est perturbé par la présence de la barre casée au démarrage par contre en régime permanent la barre cassée ne modifie pas considérablement l'allure du champ. La figure III.25 montre le courant statorique de la phase A avec une demande en courant au démarrage très importante puis cette demande se stabilise à une valeur minime au régime permanent. La figure III.26 montre le courant rotorique en charge pour une barre cassée et la figure III.27 l'allure du courant pour une barre adjacente. Pour la simulation de la barre cassée, on a considéré que la barre a une résistivité de 10 (Ohm.m). Pour la barre adjacente le courant est beaucoup plus important au démarrage que celui dans une barre à l'état sein. L'allure de la vitesse et du couple sont presque les mêmes qu'à l'état sein. La figure III.28 et la figure III.31 montre la vitesse de rotation et le couple électromagnétique en charge avec une barre cassée. La vitesse dans l'état avec défaut présente quelques ondulations.

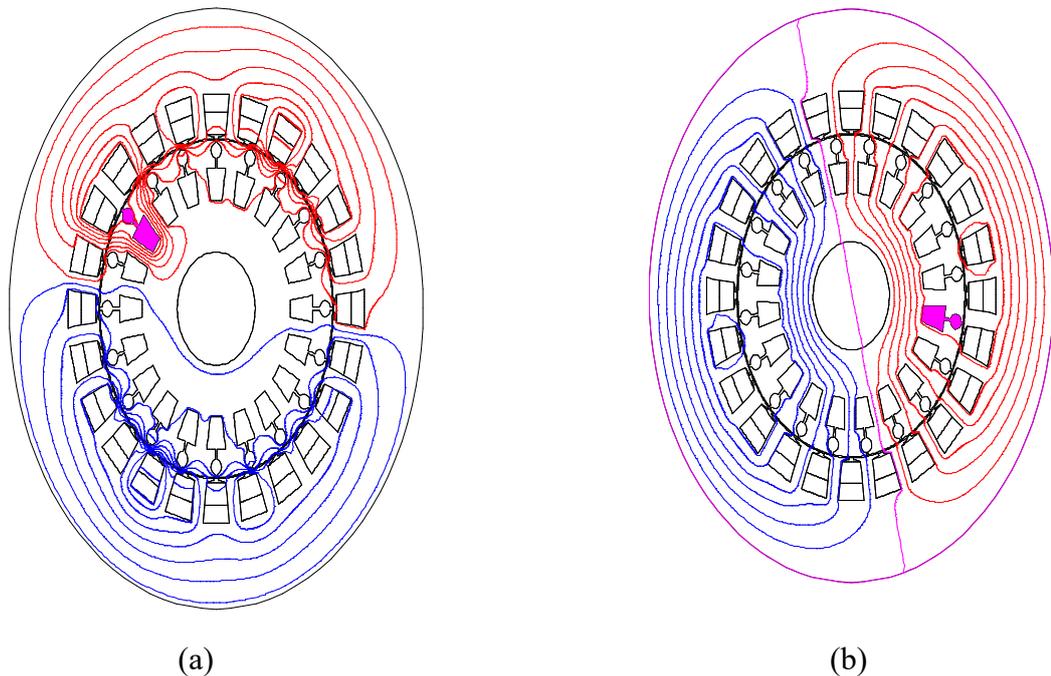


Figure III.23: La distribution des lignes du flux machine avec une barre cassée (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.

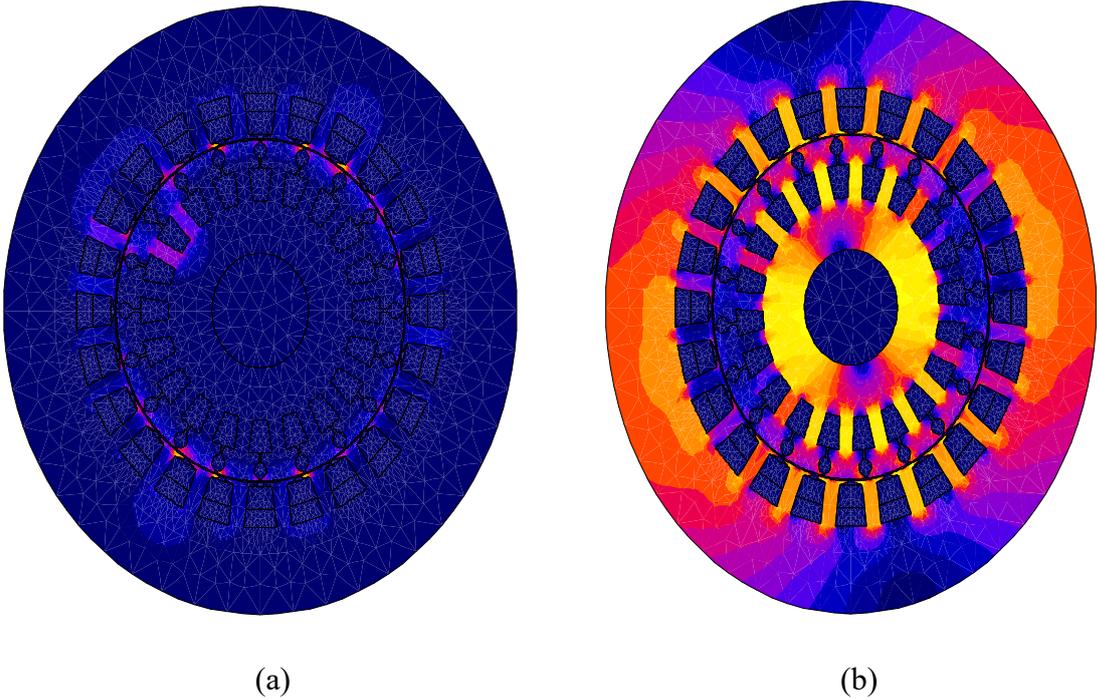


Figure III.24: L'induction magnétique avec une barre cassée. (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.

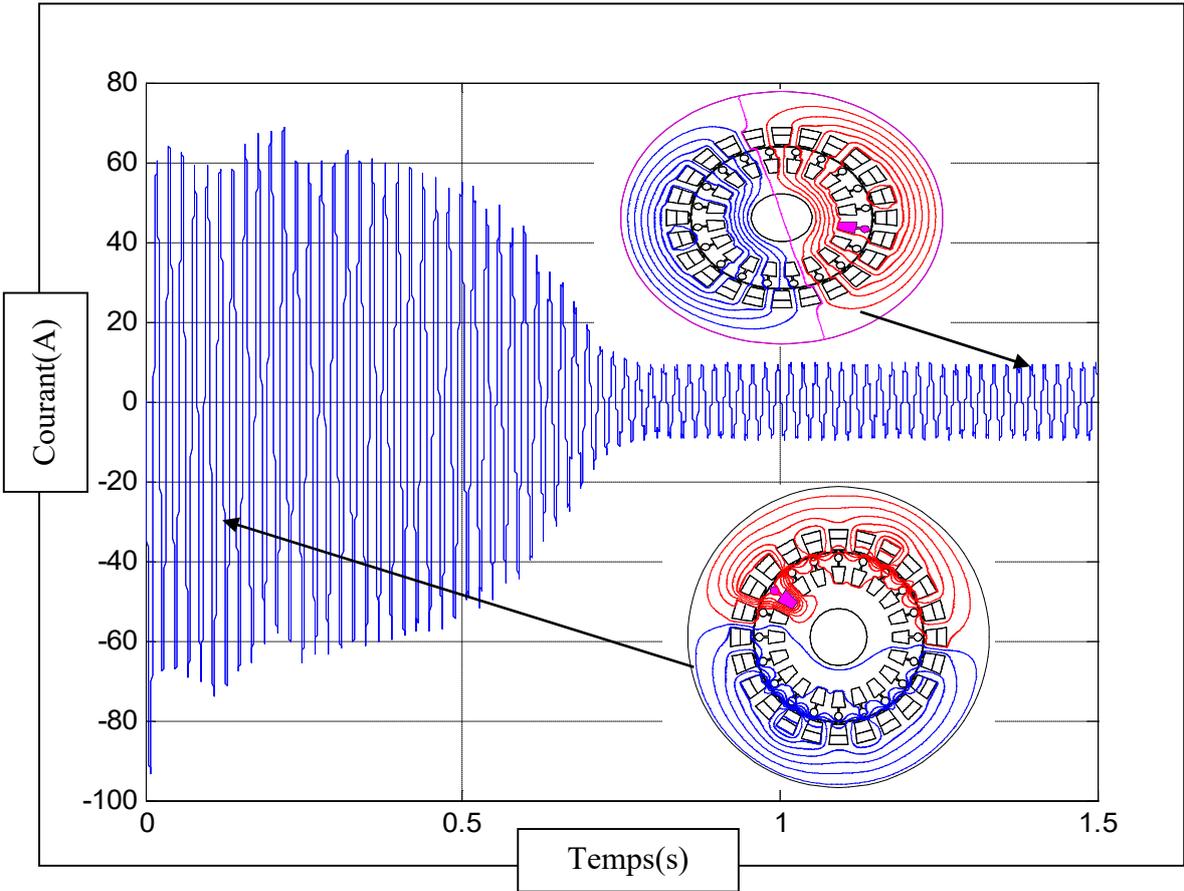


Figure III.25: le courant statorique de la phase A en charge avec une barre cassée.

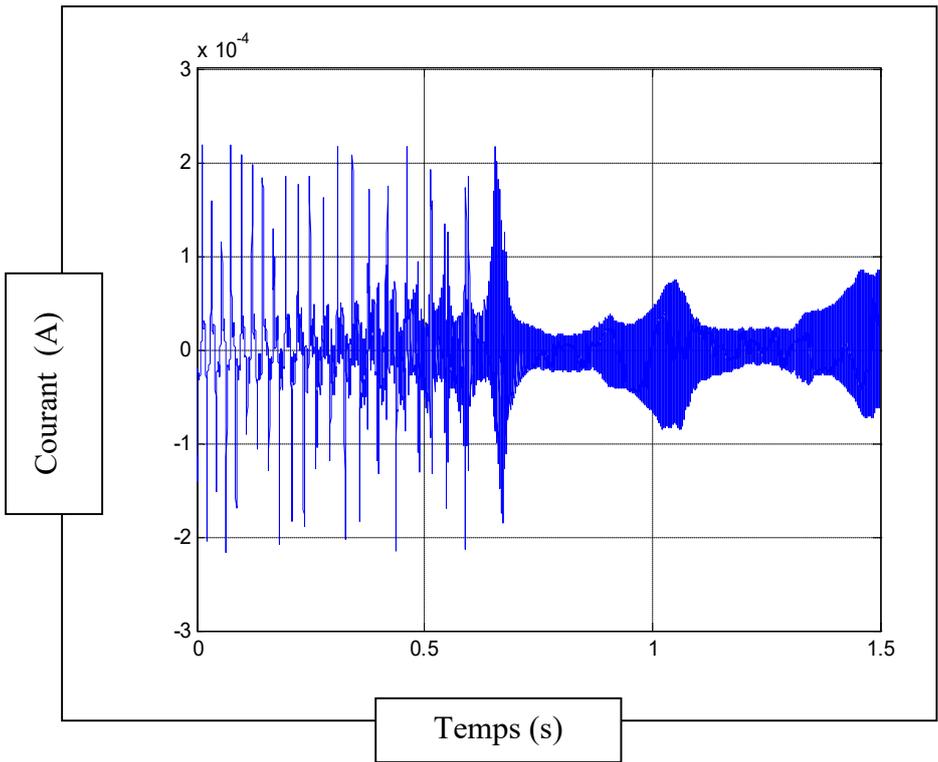


Figure III.26: Le courant dans la barre 11 cassée.

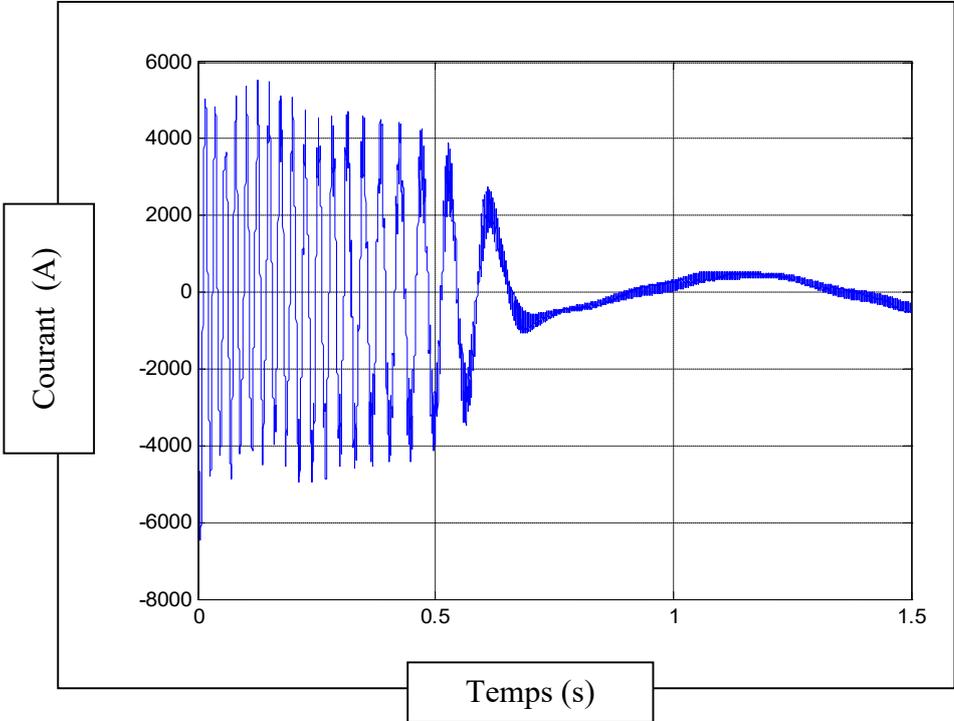


Figure III.27: Le courant dans la barre adjacente à la barre cassée (barre 10).

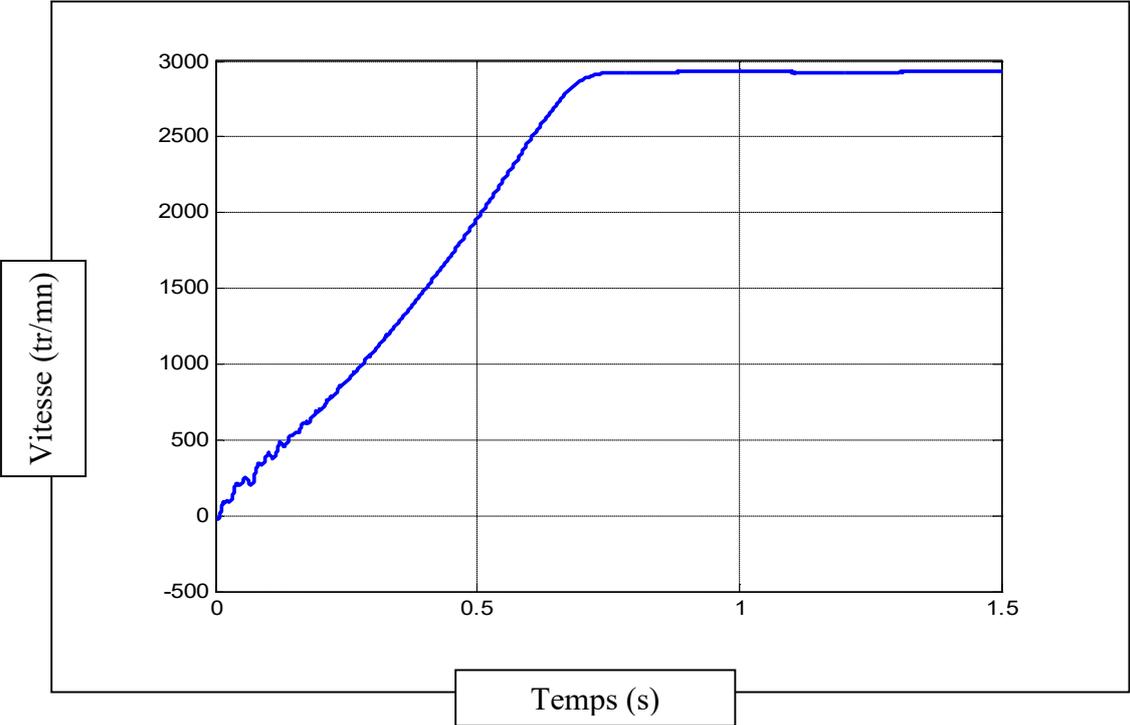


Fig.III.28: La vitesse de rotation en charge avec une barre cassée.

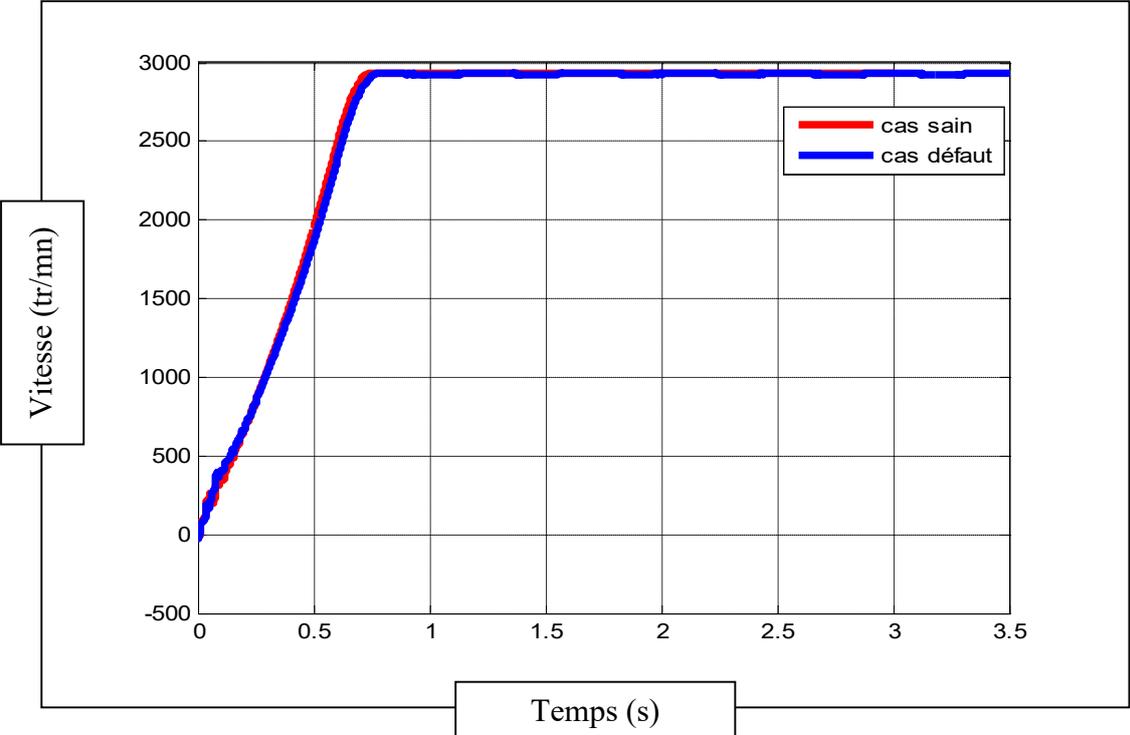


Fig.III.29: La vitesse de rotation en charge sans défaut et avec défaut.

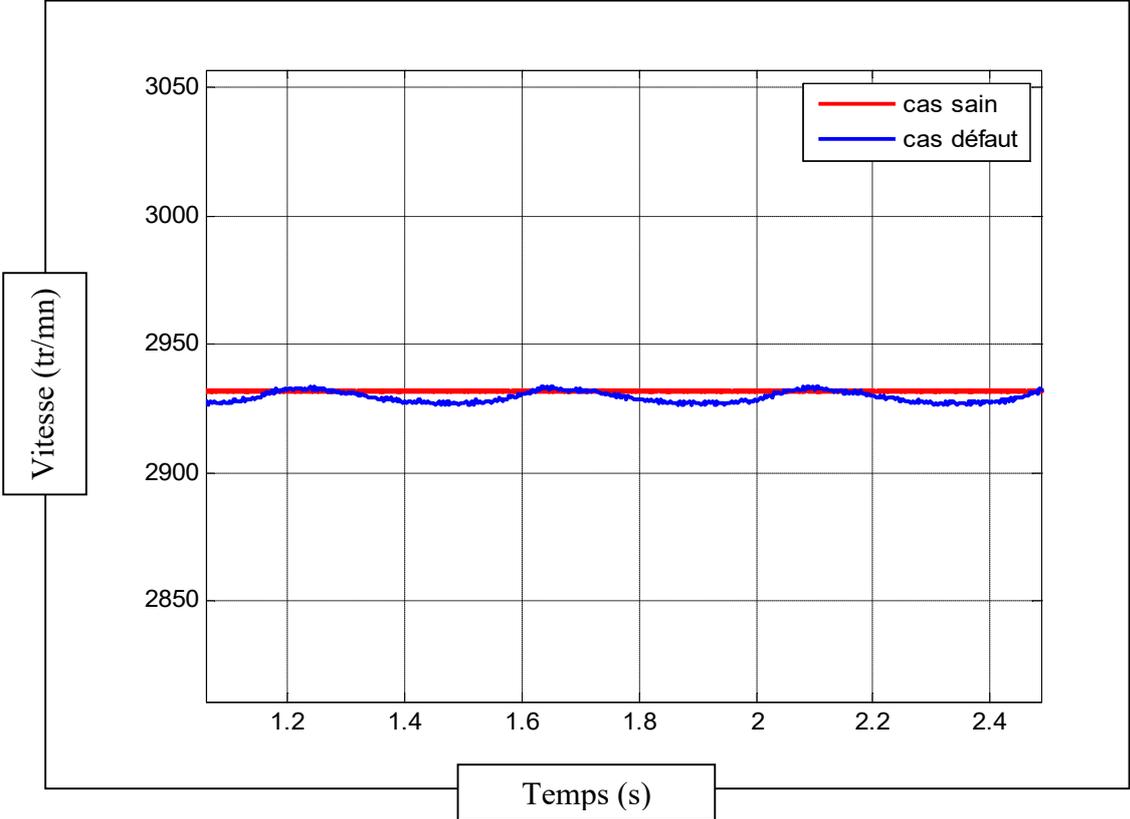


Fig.III.30: La vitesse de rotation (zoom au régime permanant) sans défaut et avec défaut.

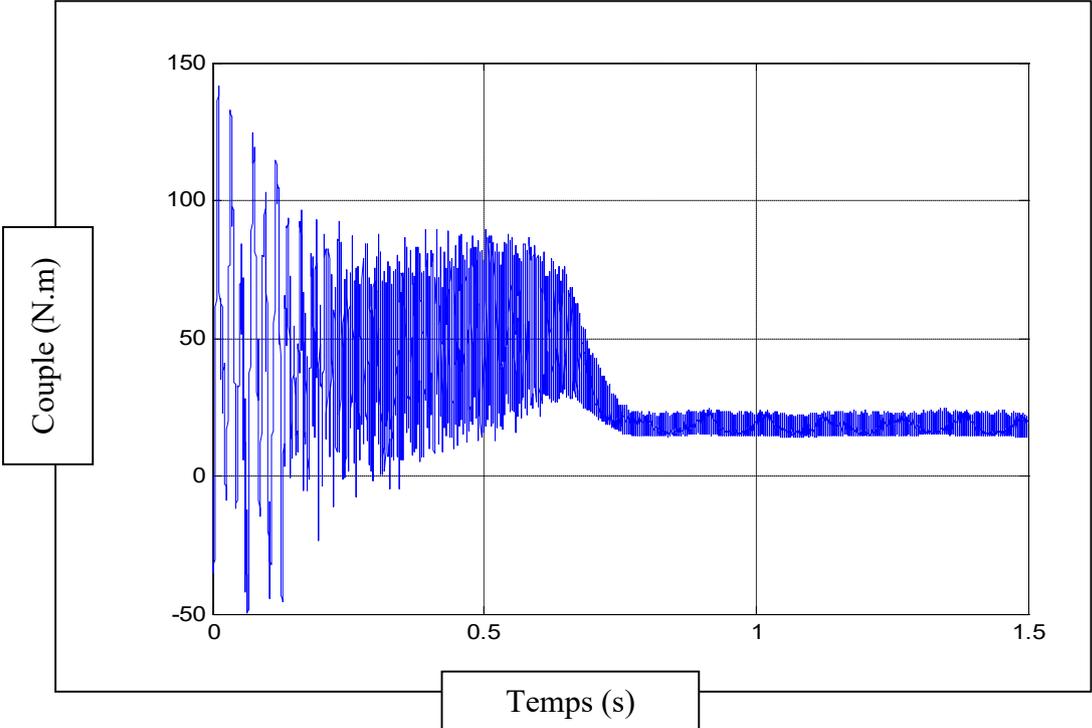


Fig.III.31: Le couple électromagnétique en charge avec une barre cassée.

III.3. 3 Etat du défaut en charge par l'étude spectrale

Comme dans le cas de l'état à vide, on voit qu'au démarrage la barre cassée est bien traversée par les lignes du flux et son effet peut être visualisé dans le signal du courant statorique (Figure III.23). Le temps au démarrage reste toujours très court et il n'est favorable pour la détection. De plus en régime permanent vu que le glissement est plus important dans le cas de la machine en charge, la barre cassée se trouve traversée par les lignes du flux après quelques tours la détection devient propice dans cette zone. On remarque que le temps de traitement est important pour la détection du défaut (le temps est très court au moins 1s pour détecter un défaut de 1Hz). Pour un temps de traitement (1.5-0.7)s Figure III.32 inférieur à 1s, on n'a pas trouvé une détection mais si on augmente le temps de traitement (2.5-0.7)s Figure III.33 et (3.5-0.7)s Figure III.34 qui représente un temps supérieur à 1s la détection est apparente cela est du à la valeur du glissement qui est très petit et la signature du défaut est complètement apparente.

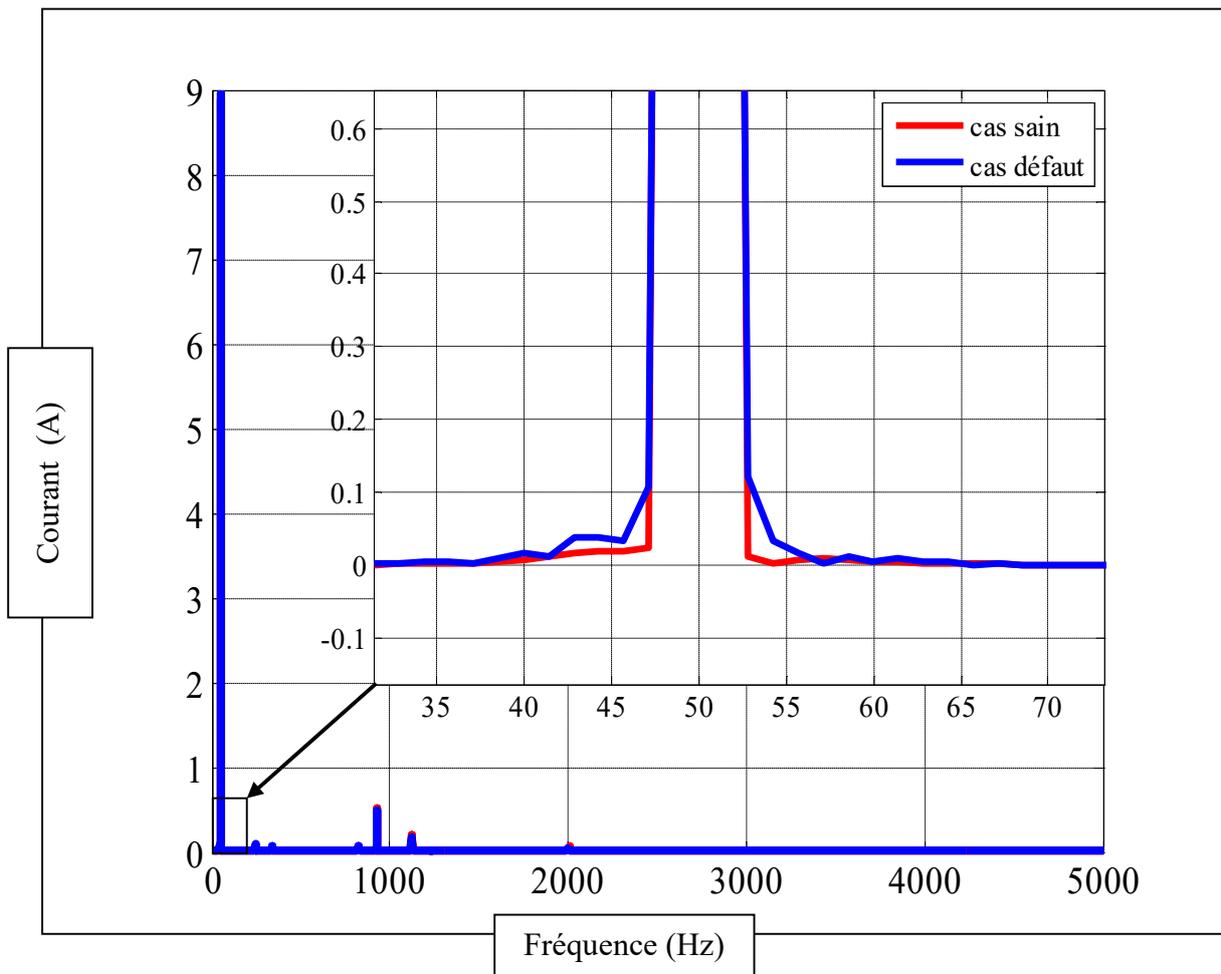


Figure III.32: Spectre du courant statorique phase A pour un temps de traitement de 1.5s en régime permanent.

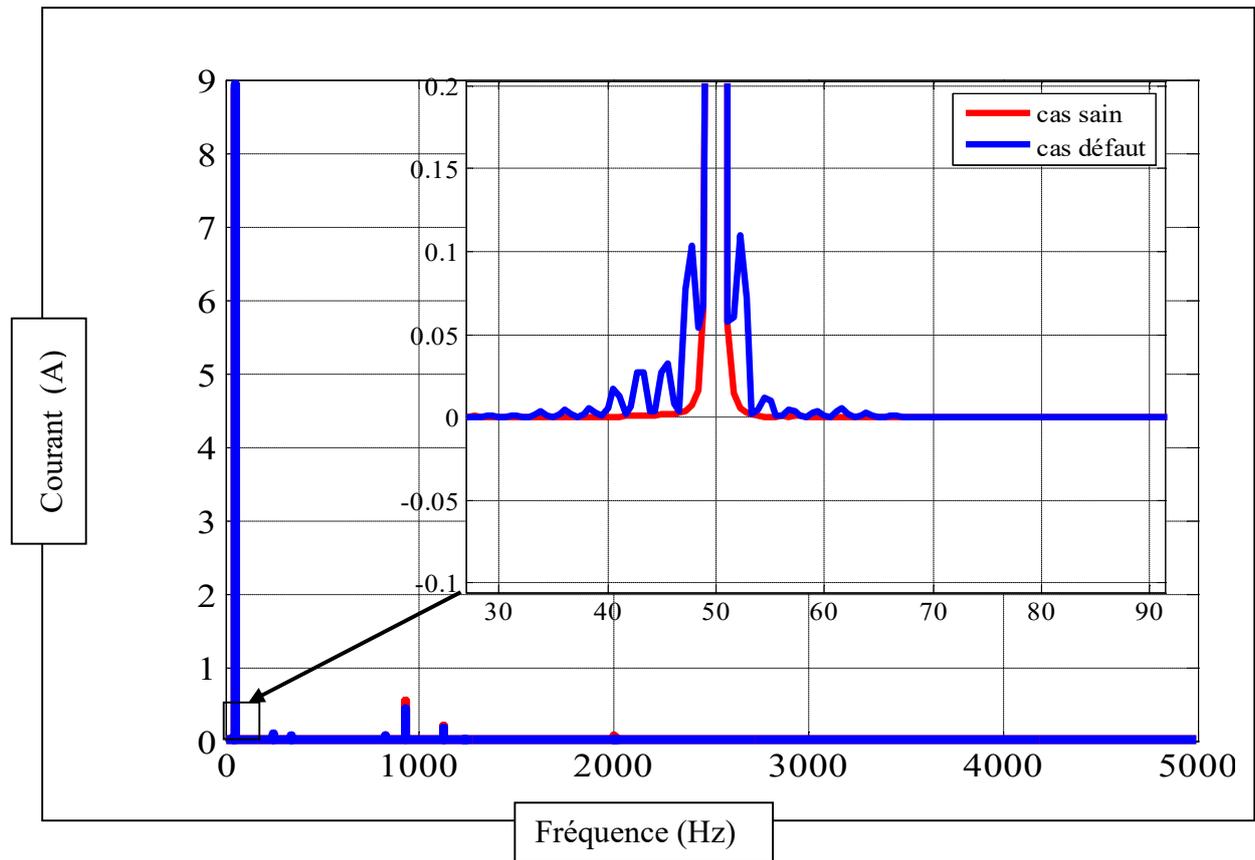


Figure III.33: Spectre du courant statorique phase A pour un temps de traitement de 2.5s en régime permanent.

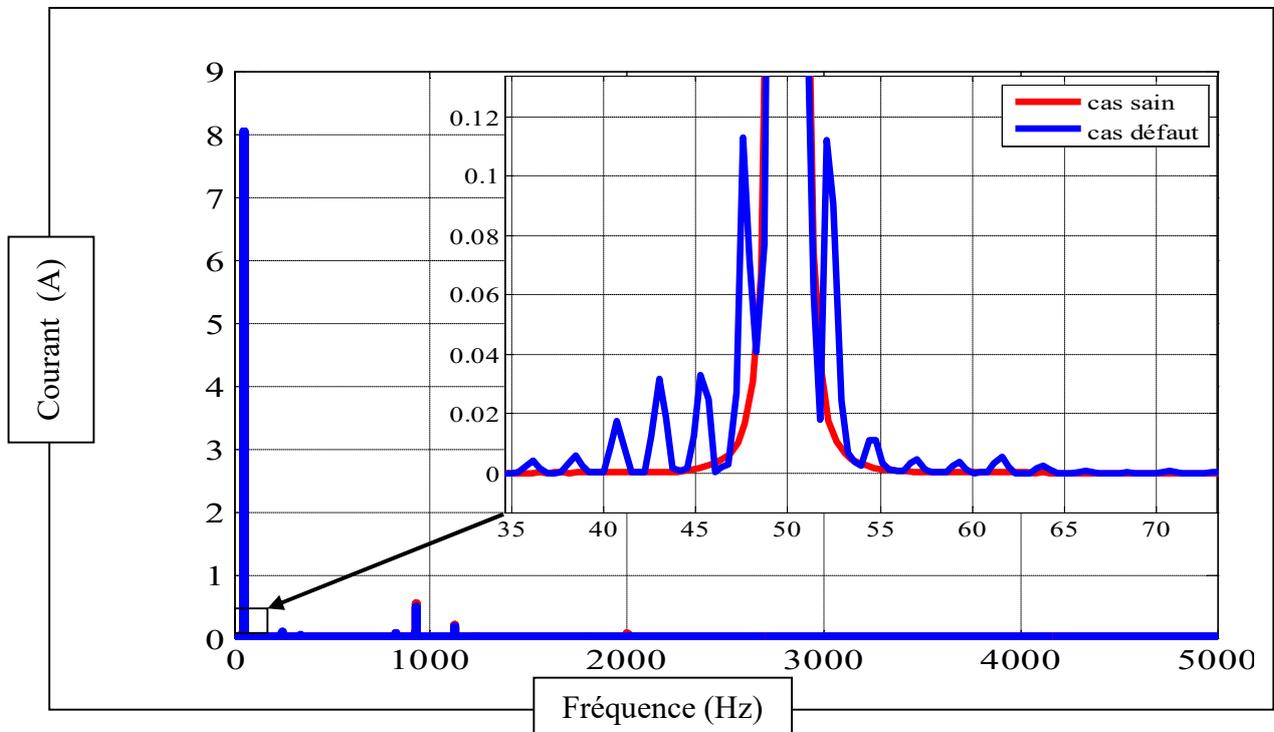


Figure III.34: Spectre du courant statorique phase A pour un temps de traitement de 3.5s en régime permanent.

III.4 Conclusions et Constations

Enfin, nous pouvons tirer les conclusions suivantes qui sont très importantes par la suite pour pouvoir détecter les défauts de cassure de barres :

- Le régime de démarrage ne permet pas la détection du défaut puisque le temps n'est pas assez important pour la détection (inférieur à 1s) à vide ou en charge.
- Le régime en charge avec un couple résistant très important est propice pour la détection des défauts de cassure de barre car cela augmenterait le glissement et la barre cassée se trouve traversée par les lignes de flux.
- Un temps important en régime permanent qui est supérieur à 1s est favorable à la détection.

Ces constatations nous ont permis de trouver une technique de détection meilleure que celle qu'on utilise actuellement avec la machine asynchrone en utilisant le mode en charge. Cette nouvelle technique est la technique à rotor bloqué qu'on voit le voir dans le chapitre suivant avec ses inconvénients et ses avantages.

IV.1 Introduction

Nous introduisons dans ce chapitre la technique du diagnostic de défauts de cassure de barres par la technique universelle du rotor bloqué *TURBO*. Nous avons constaté dans le chapitre précédent que le régime en charge avec un couple résistant très important permet la détection des défauts de cassure de barre puisque cela augmenterait le glissement et la barre cassée se trouve traversée par les lignes de flux.

Cette technique comme on va la découvrir va nous permettre une meilleure détection que celle qu'on utilise actuellement avec la machine asynchrone en utilisant le mode en charge. On voit dans ce chapitre les inconvénients et les avantages de cette nouvelle technique *TURBO*.

IV.2 Description de la technique *TURBO*

Lors d'une cassure de barre, les harmoniques de flux sont produites et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique. Les défauts de cassures de barres génèrent également dans les signaux du couple et de la vitesse des composantes de fréquences $2g$ et $4g$. De notre part, nous avons utilisé le courant statorique comme paramètre afin de localiser et identifié la nature du défaut. La signature du défaut sur l'analyse spectrale du courant statorique est déduite par la formulation.

$$f_b = (1 \pm 2kg)f_0 \quad (IV.1)$$

Dans le cas du rotor bloqué le glissement g est égale à 1 et si on prend $k=1$, la fréquence du défaut f_b sera égale à $(f_0 \pm 2f_0)$ c'est-à-dire : $(50 \pm 100)\text{Hz} = (\pm 150)\text{Hz}$. Alors on peut clairement visualiser ces fréquences f_b sur le spectre du courant aux fréquences : 150Hz, 250Hz, 350Hz ...etc.

Pour valider les résultats de cette technique, des tests on été entamés sur la même machine asynchrone mais avec la technique du rotor bloqué *TURBO*.

IV.3 Diagnostique de cassure de barre de la machine asynchrone triphasée à cage par la technique du rotor bloqué *TURBO*.

Le blocage du rotor exige un courant fort à la tension nominale d'alimentation. Pour cela la technique *TURBO* exige une tension réduite dans les environ 30% de la tension nominale.

On a relevé pour différentes tension d'alimentation 380V, 220V, 110V, 80V et 50V, respectivement la distribution des lignes de flux, l'induction B, le couple électromagnétique, le courant statorique dans la phase A, la vitesse et le spectre du courant statorique pour le cas sans et avec défaut.

IV.3.1 cas de tension d'alimentation 380V

IV.3.1.1 Résultats de la simulation

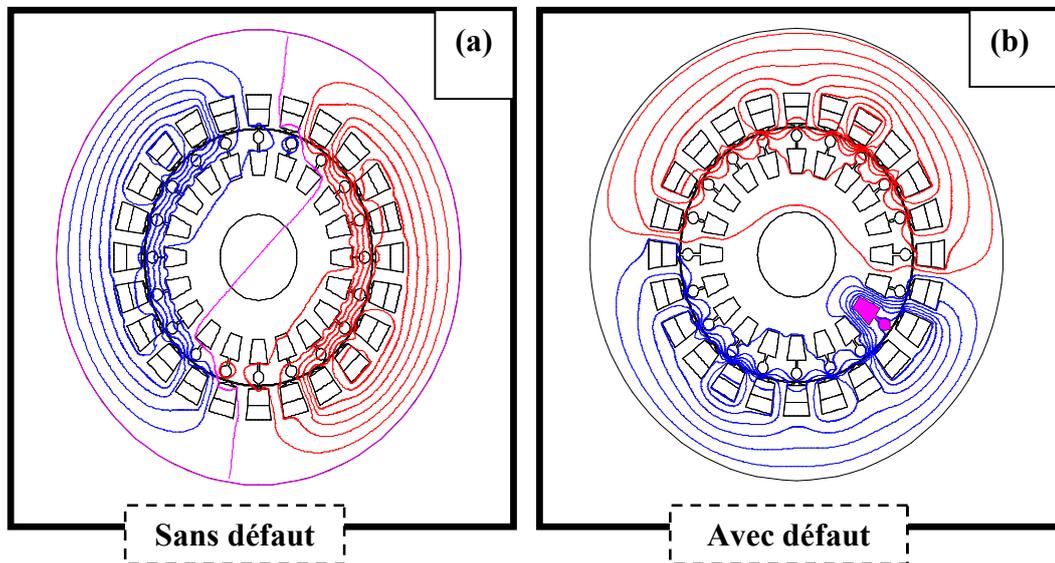


Figure IV.1: la distribution des lignes du flux(a) sans défaut ;(b) avec défaut à 380V.

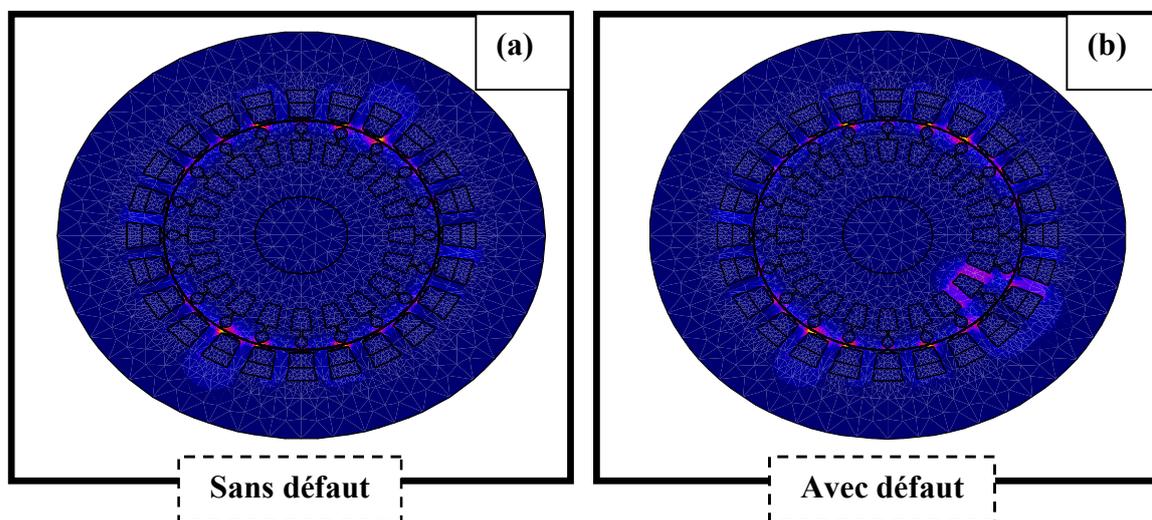


Figure IV.2: l'induction B (a) Sans défaut; (b) Avec défaut à 380V.

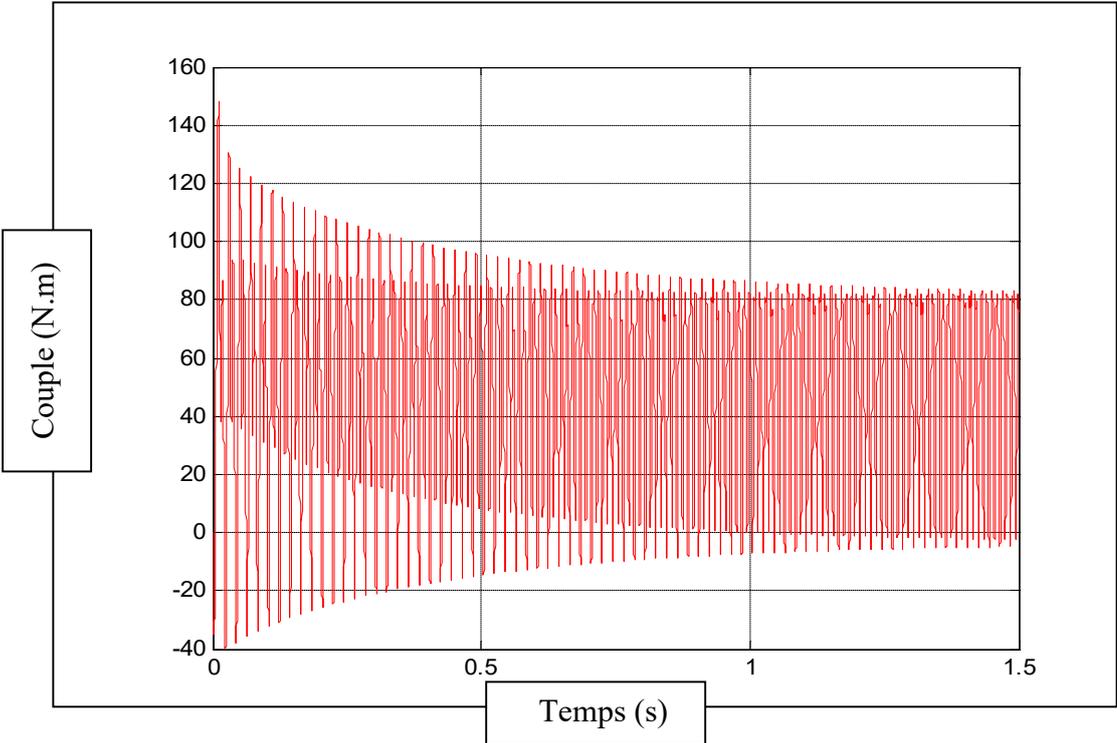


Figure IV.3: le couple électromagnétique sans défaut à 380V.

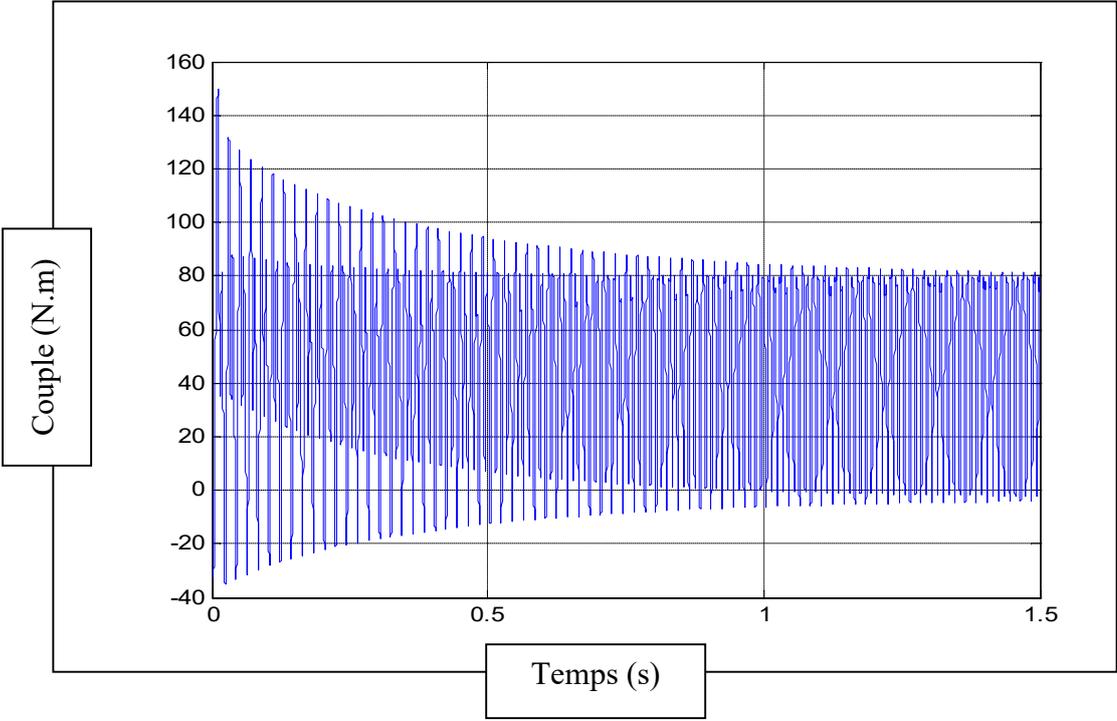


Figure IV.4: le couple électromagnétique avec défaut à 380V.

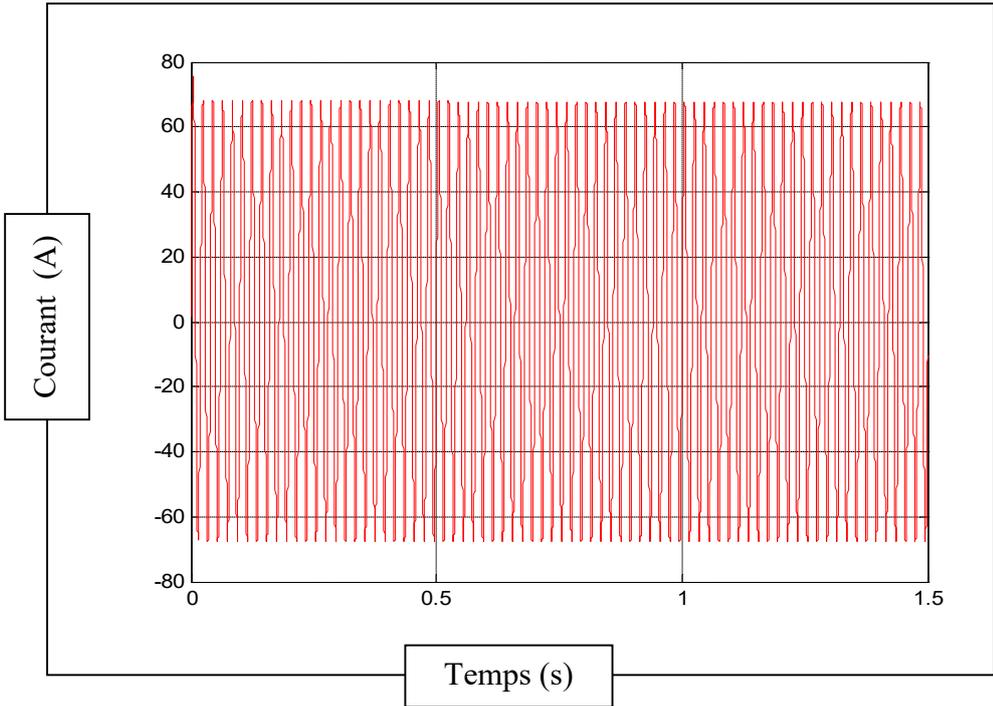


Figure IV.5: le courant statorique sans défaut à 380V.

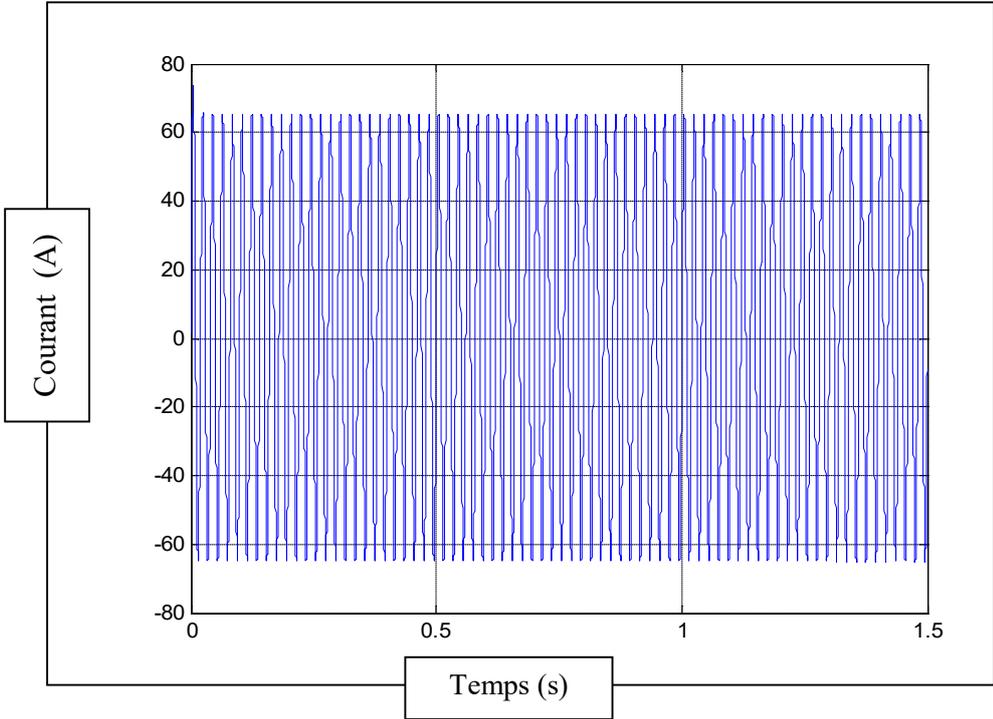


Figure IV.6: le courant statorique avec défaut à 380V.

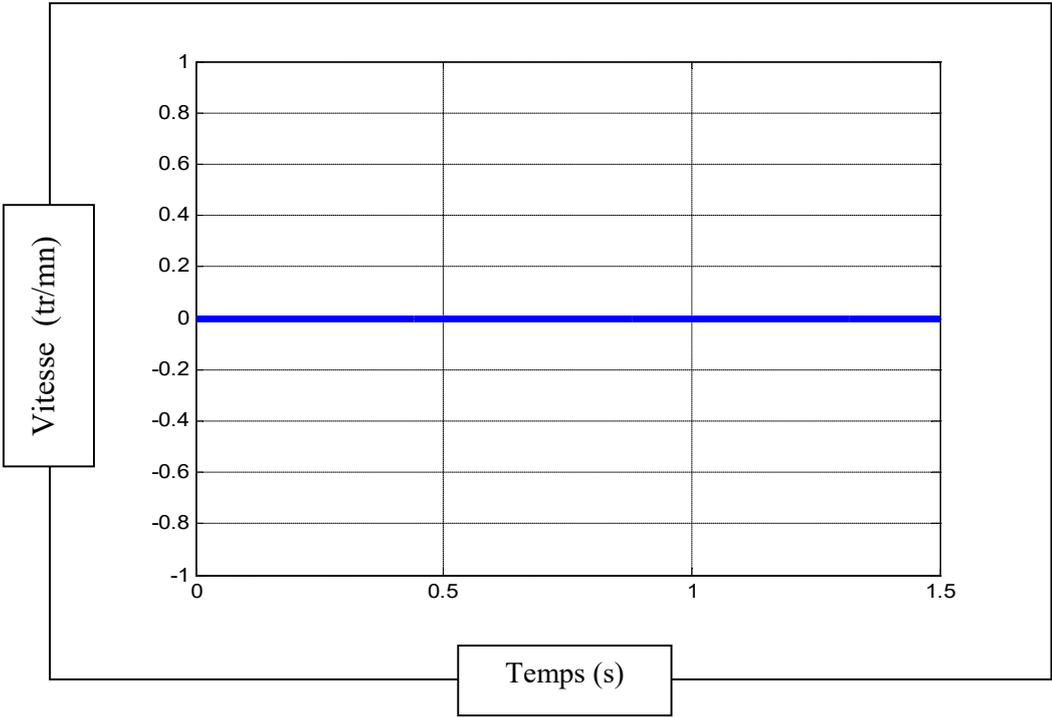


Figure IV.7: Vitesse de rotation.

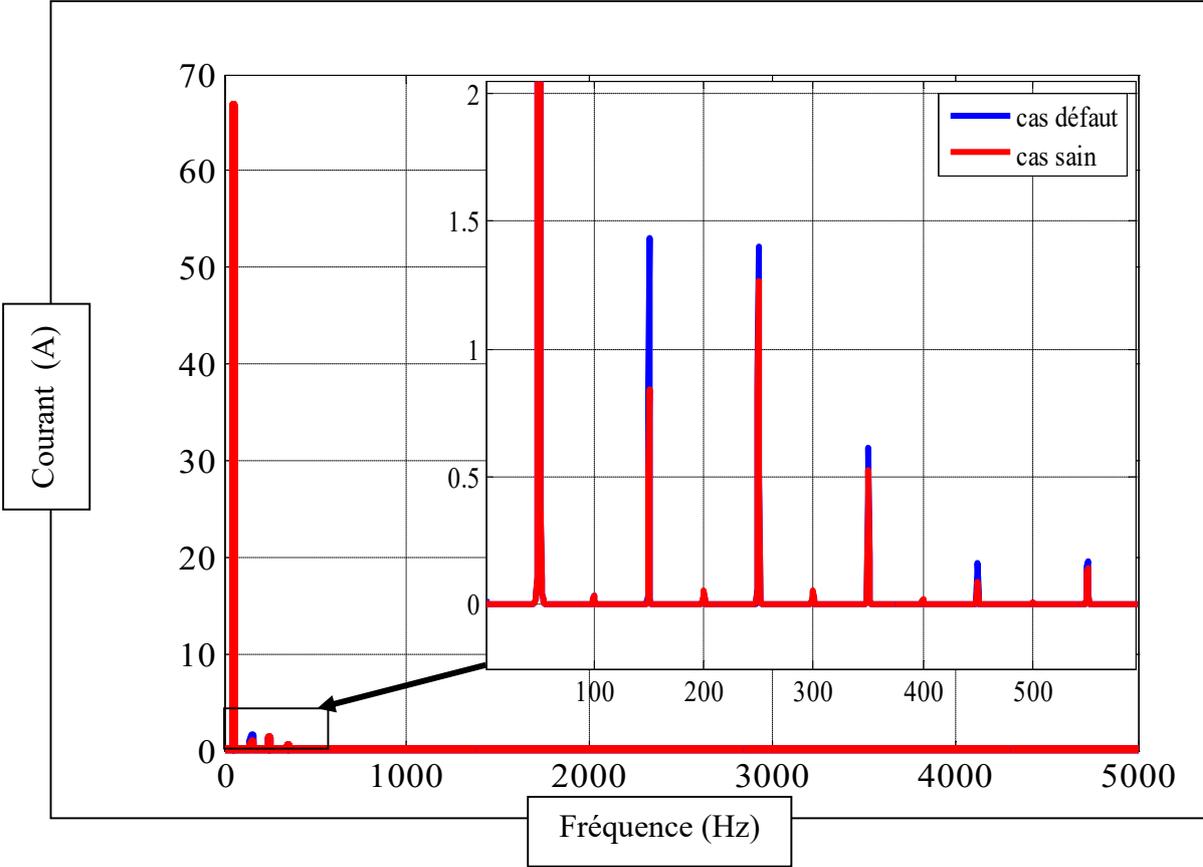


Figure IV.8: Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut à 380V.

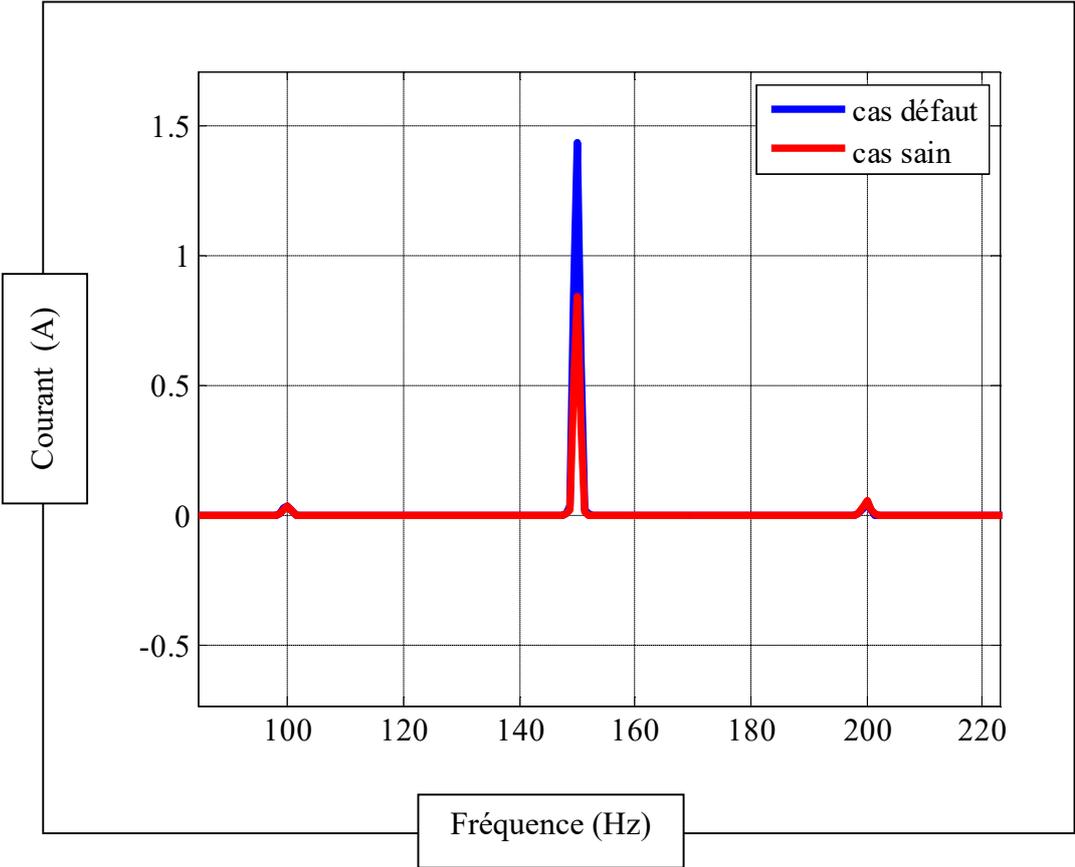


Figure IV.9: Spectre du courant statorique avec et sans défaut pour une marge de 100 à 220Hz à 380V.

IV.3.2 cas de tension 220V

IV.3.2.1 Résultats de la simulation

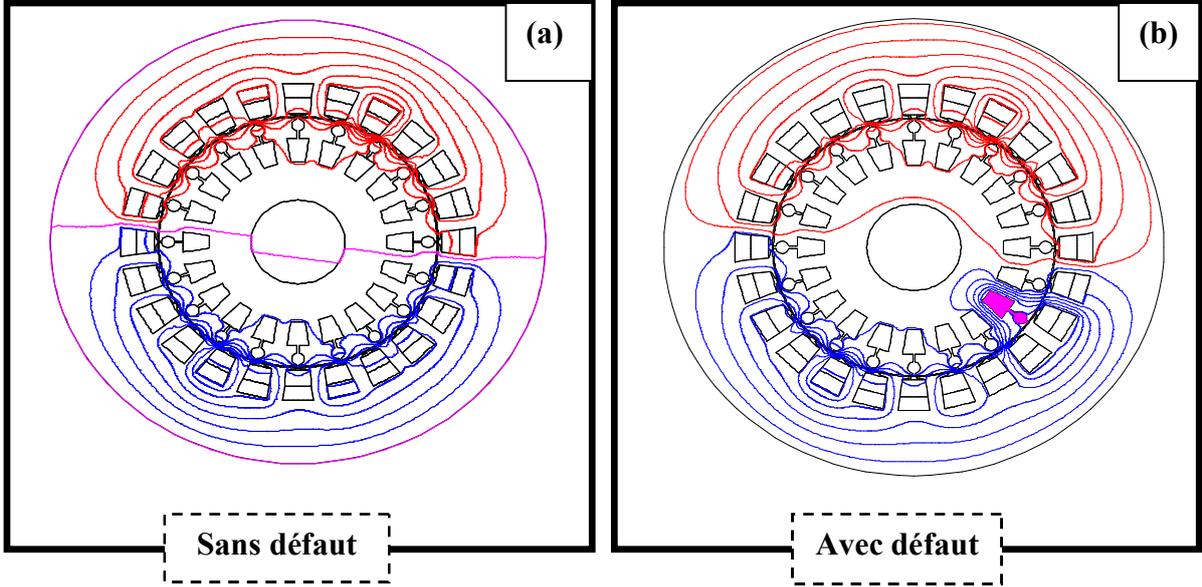


Figure IV.10: la distribution des lignes du flux(a)sans défaut;(b) avec défaut à 220V.

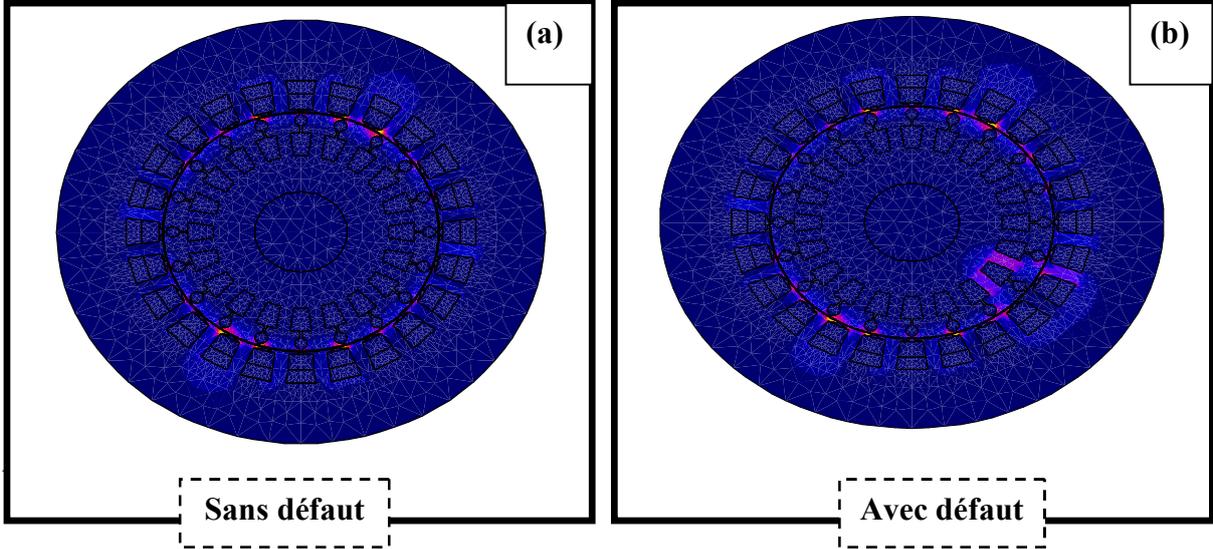


Figure IV.11: l'induction B (a) sans défaut ; (b) avec défaut à 220V.

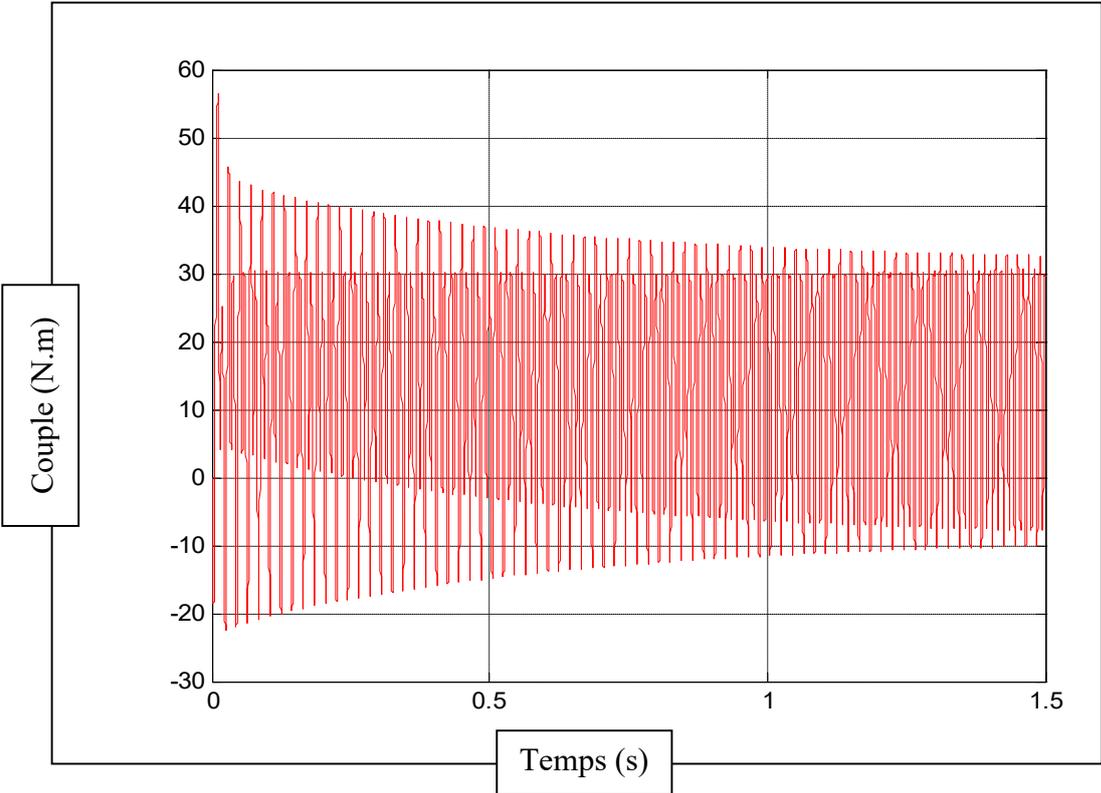


Figure IV.12:le couple électromagnétique sans défaut à 220V.

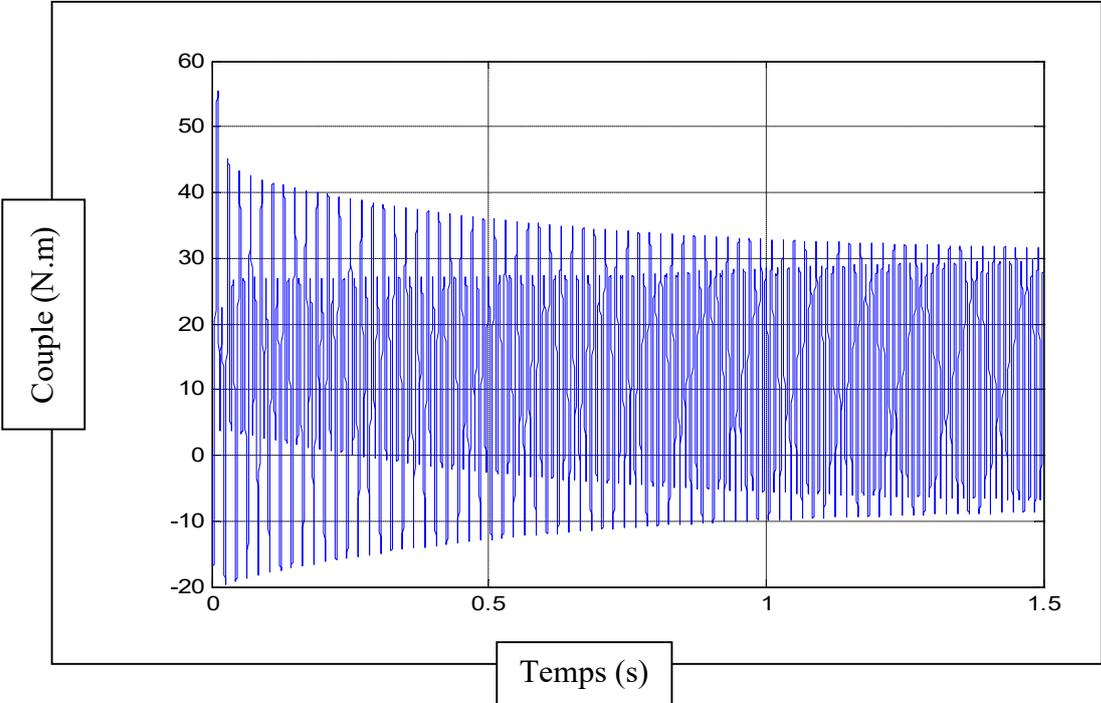


Figure IV.13:le couple électromagnétique avec défaut à 220V.

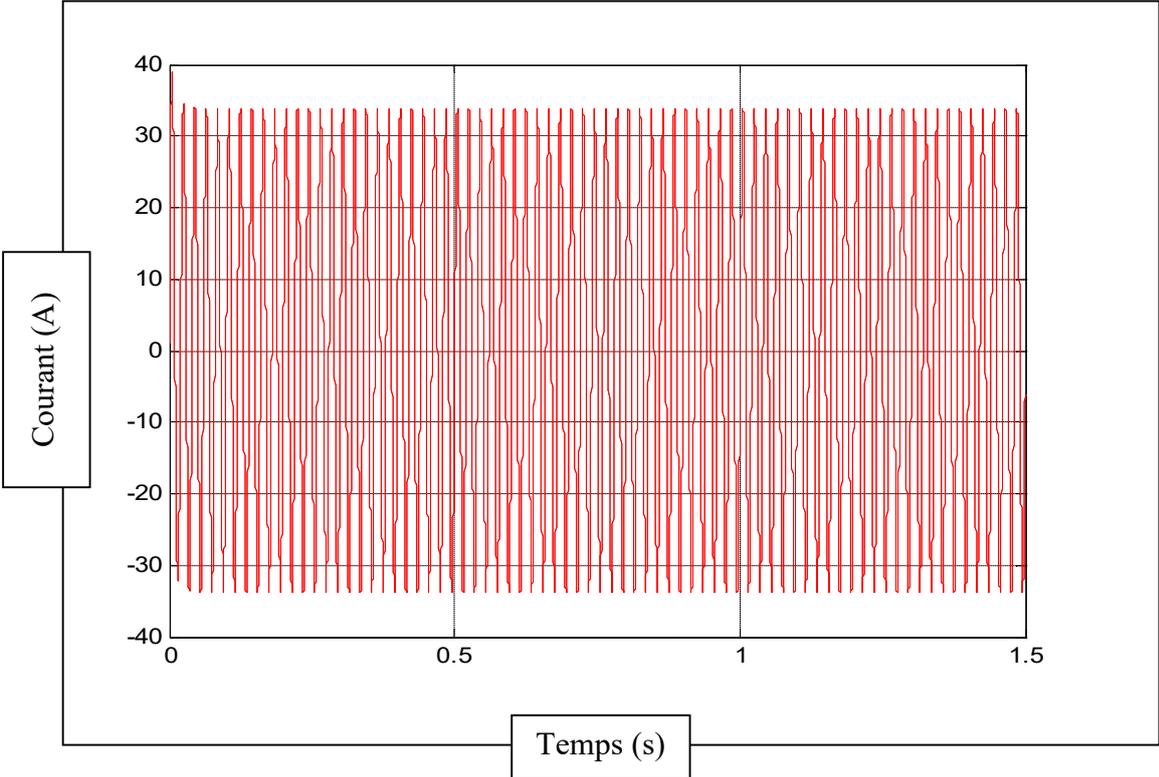


Figure IV.14:le courant statorique sans défaut à 220V.

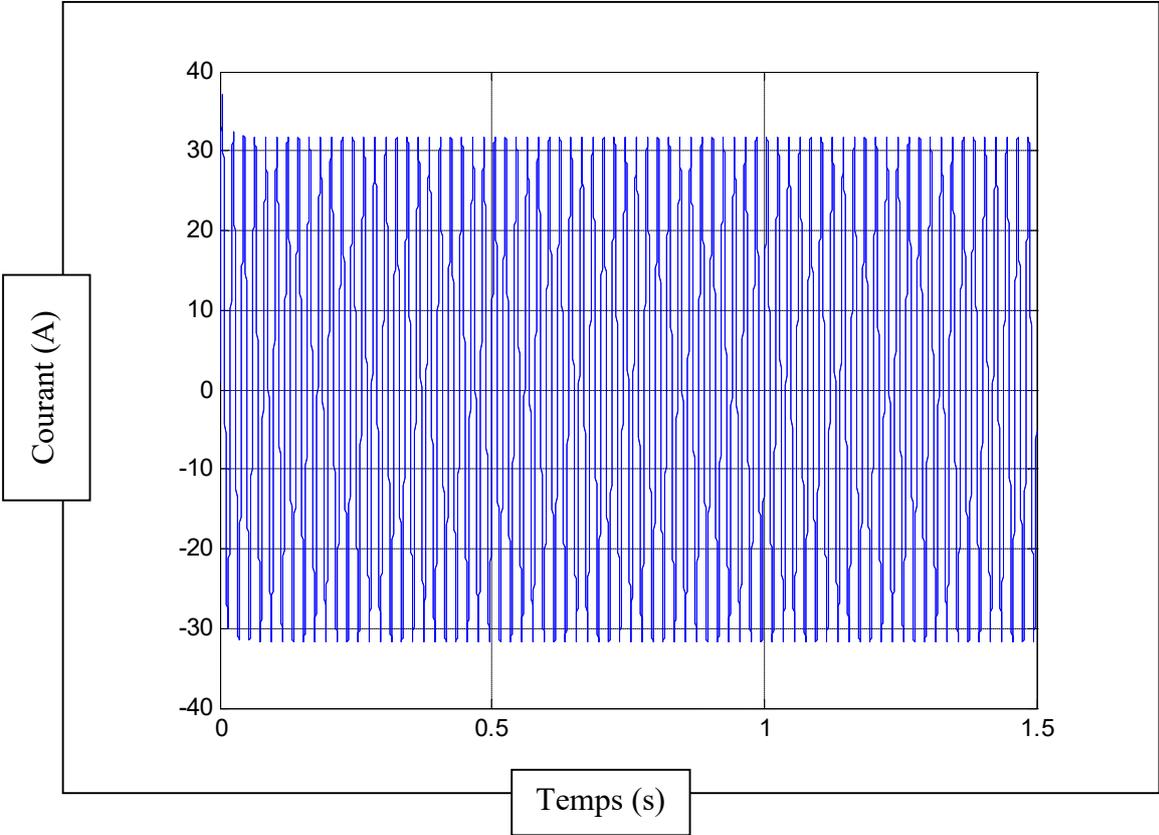


Figure IV.15:le courant statorique avec défaut à 220V.

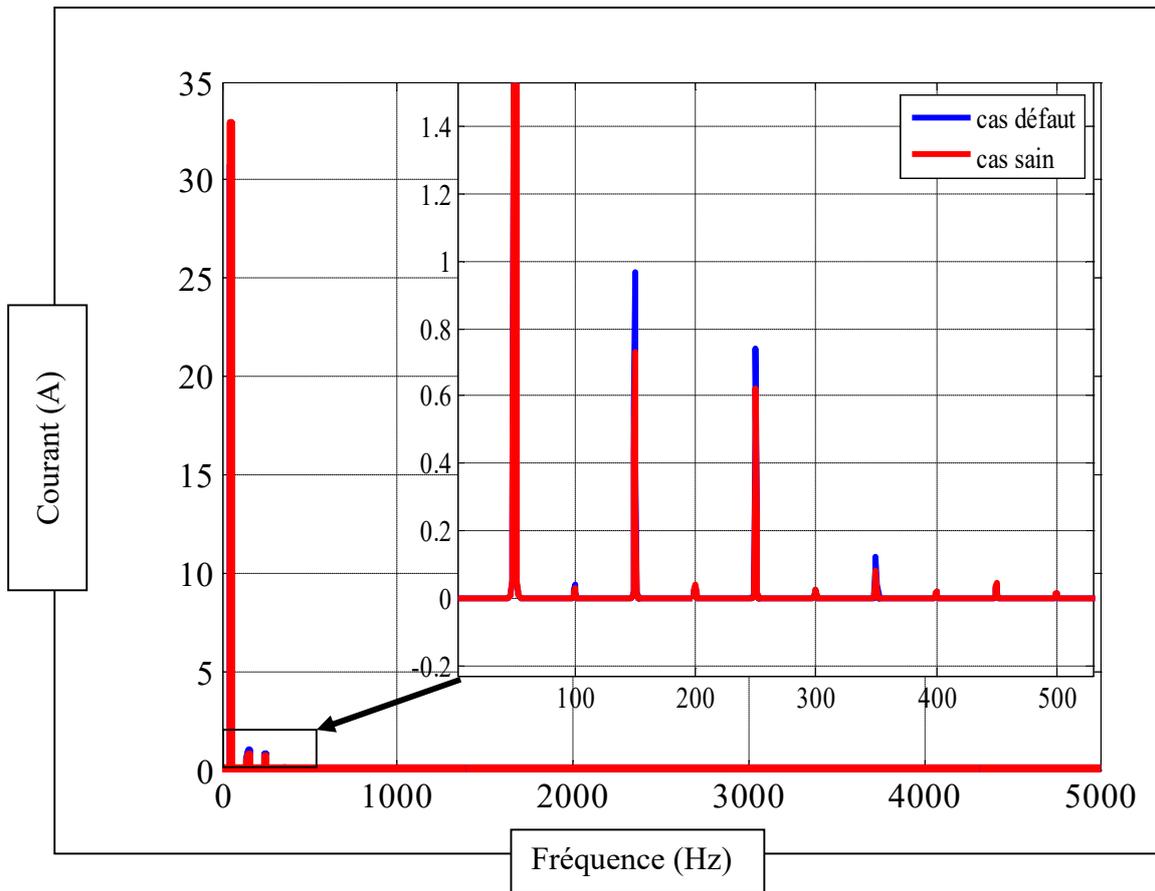


Figure IV.16 : Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut à 220V.

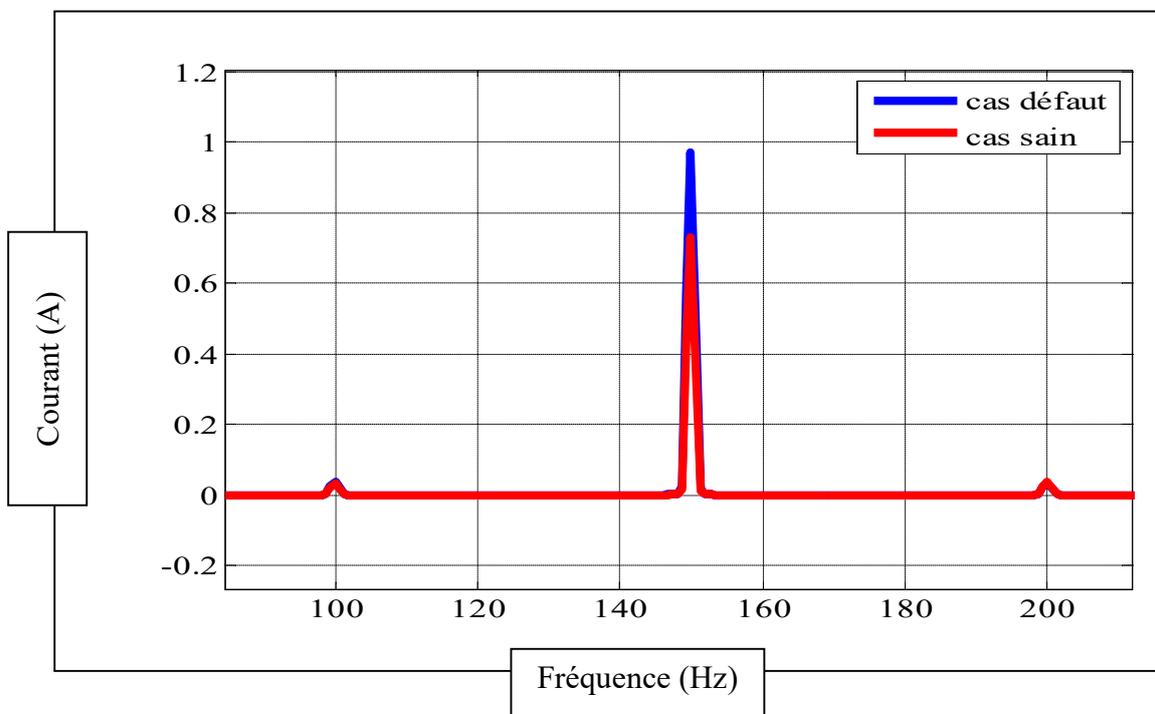


Figure IV.17 : Spectre du courant statorique avec et sans défaut pour une marge 100 à 200Hz à 220V.

IV.3.3 cas de tension 110V

IV.3.3.1 Résultats de la simulation à l'état sain

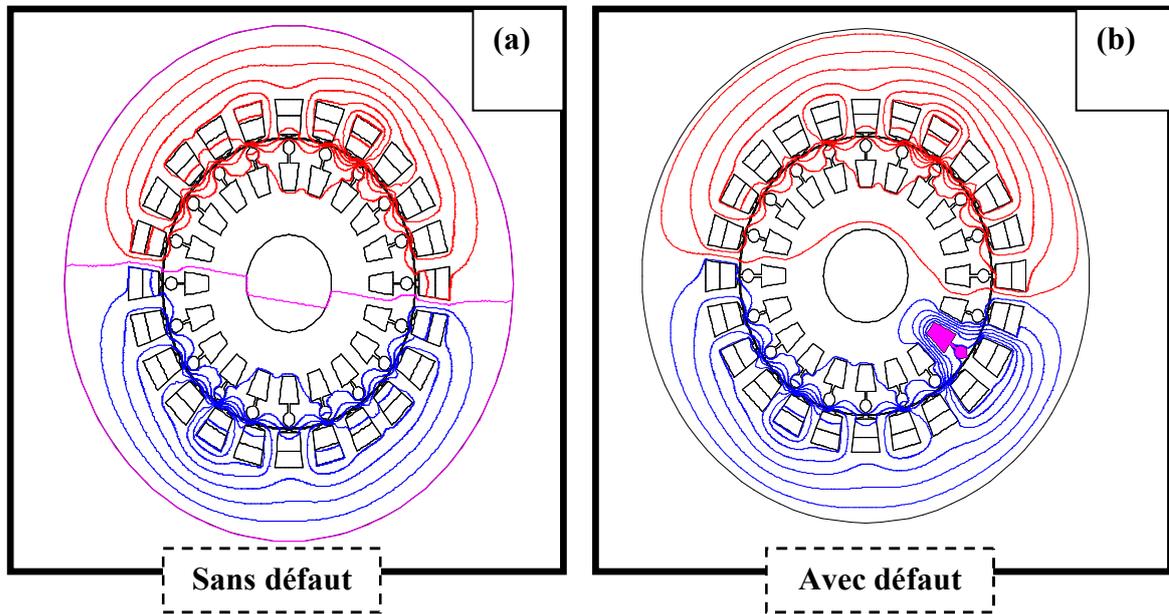


Figure IV.18: la distribution des lignes du flux(a) sans défaut ;(b) avec défaut à 110V.

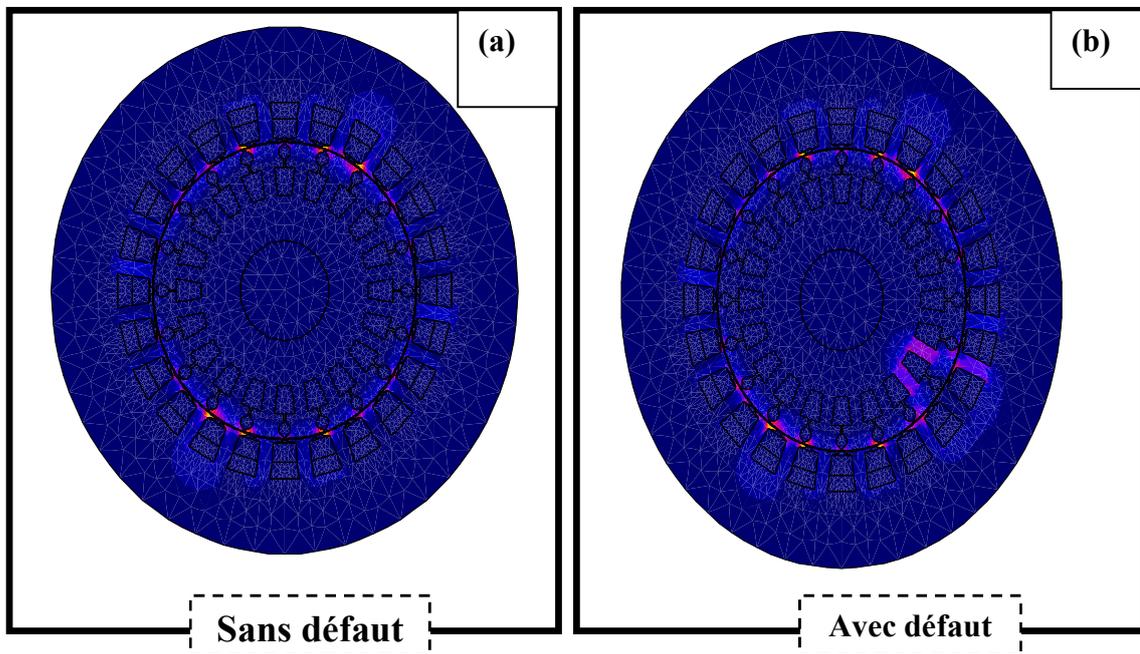


Figure IV.19: l'induction B (a) sans défaut ; (b) avec défaut à 110V.

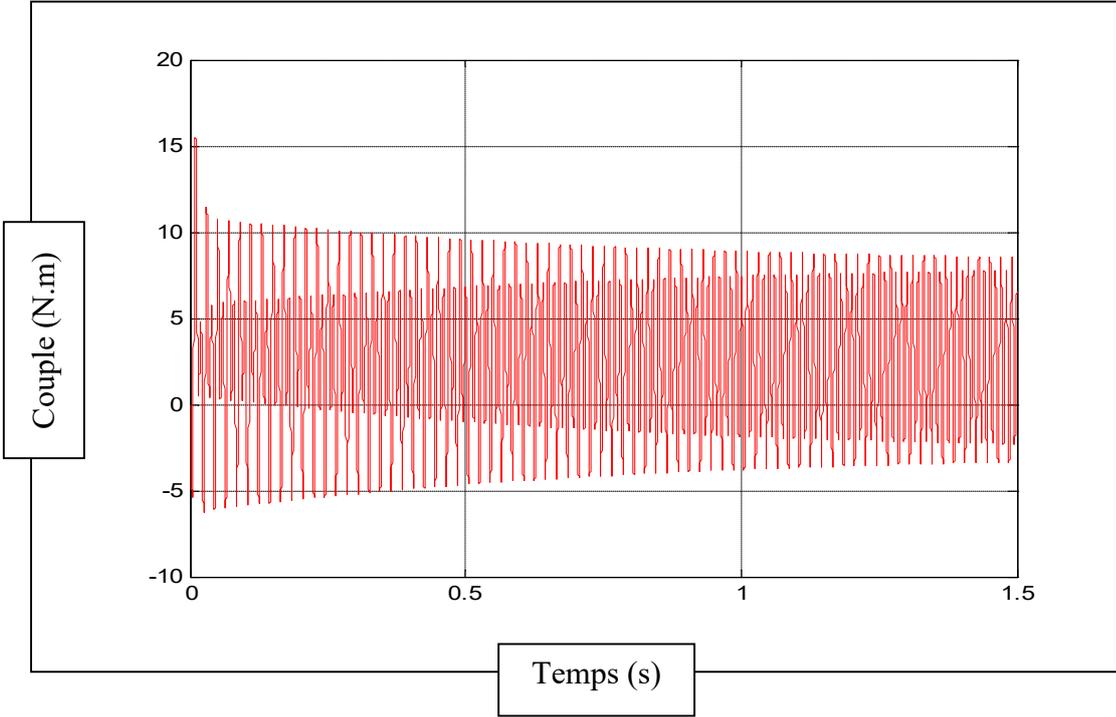


Figure IV. 20: le couple électromagnétique sans défaut à 110V.

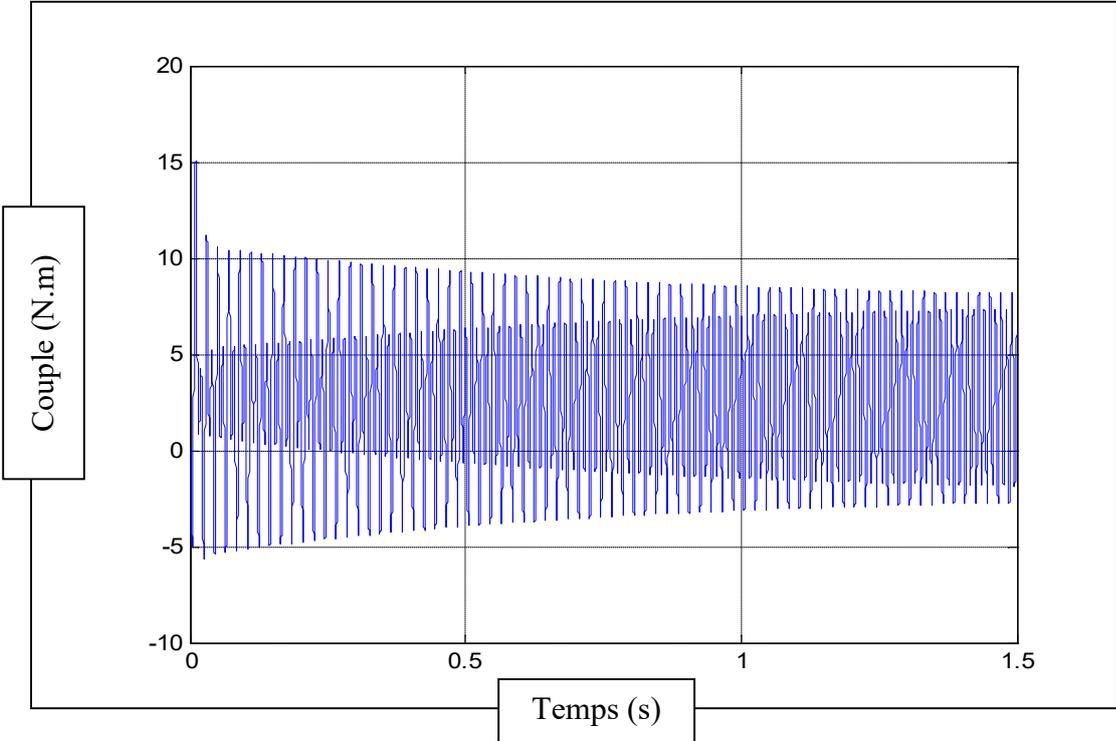


Figure IV.21: le couple électromagnétique avec défaut à 110V.

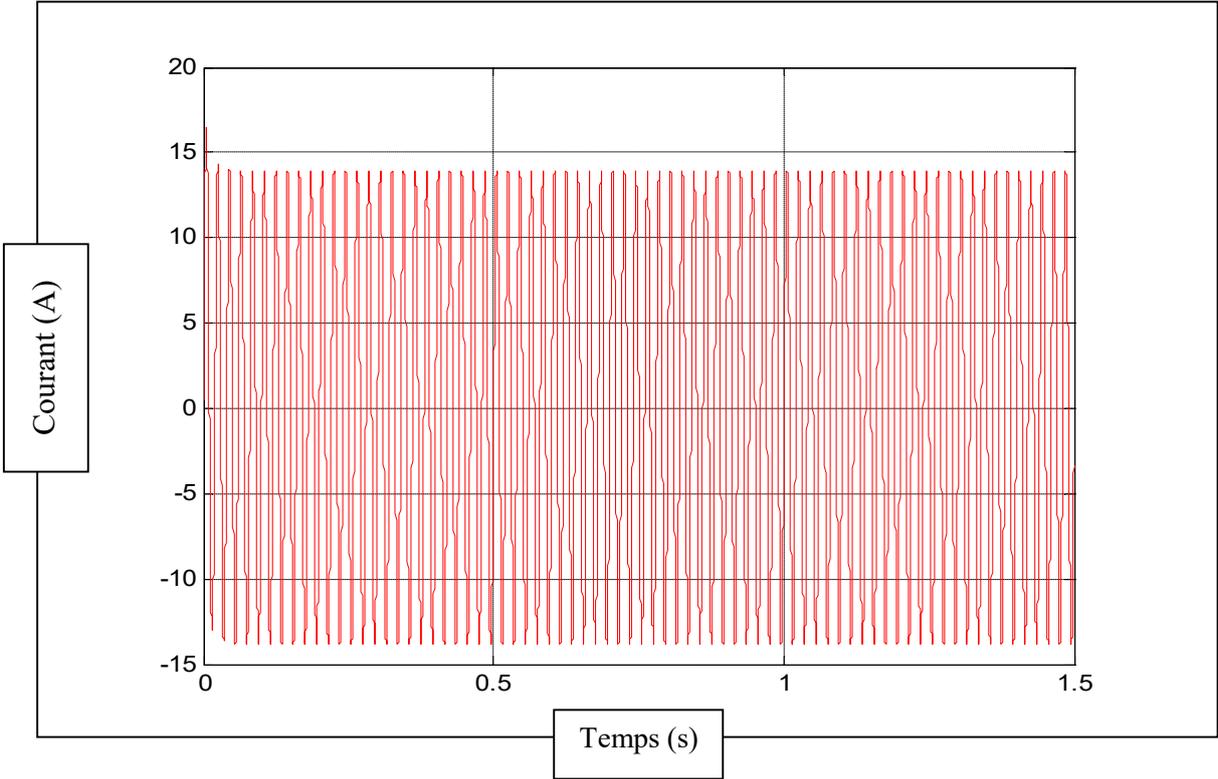


Figure IV.22:le courant statorique sans défaut à 110V.

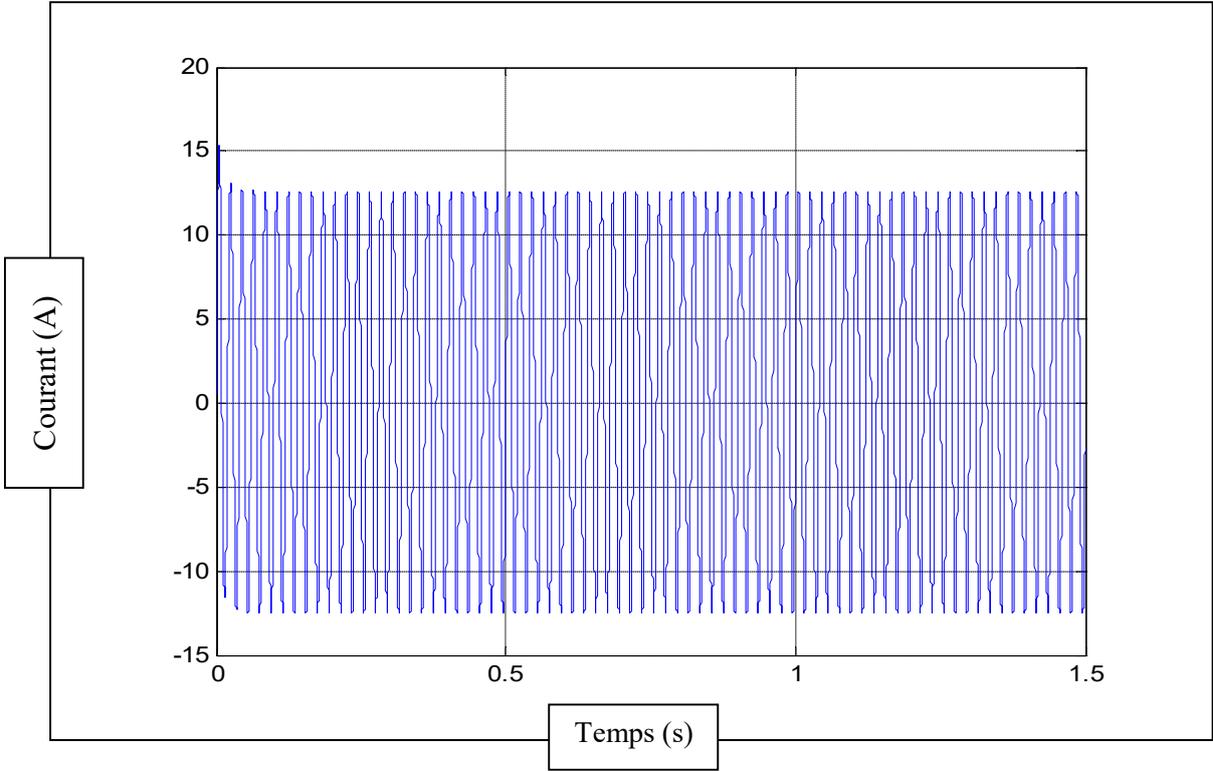


Figure IV.23:le courant statorique avec défaut à 110V.

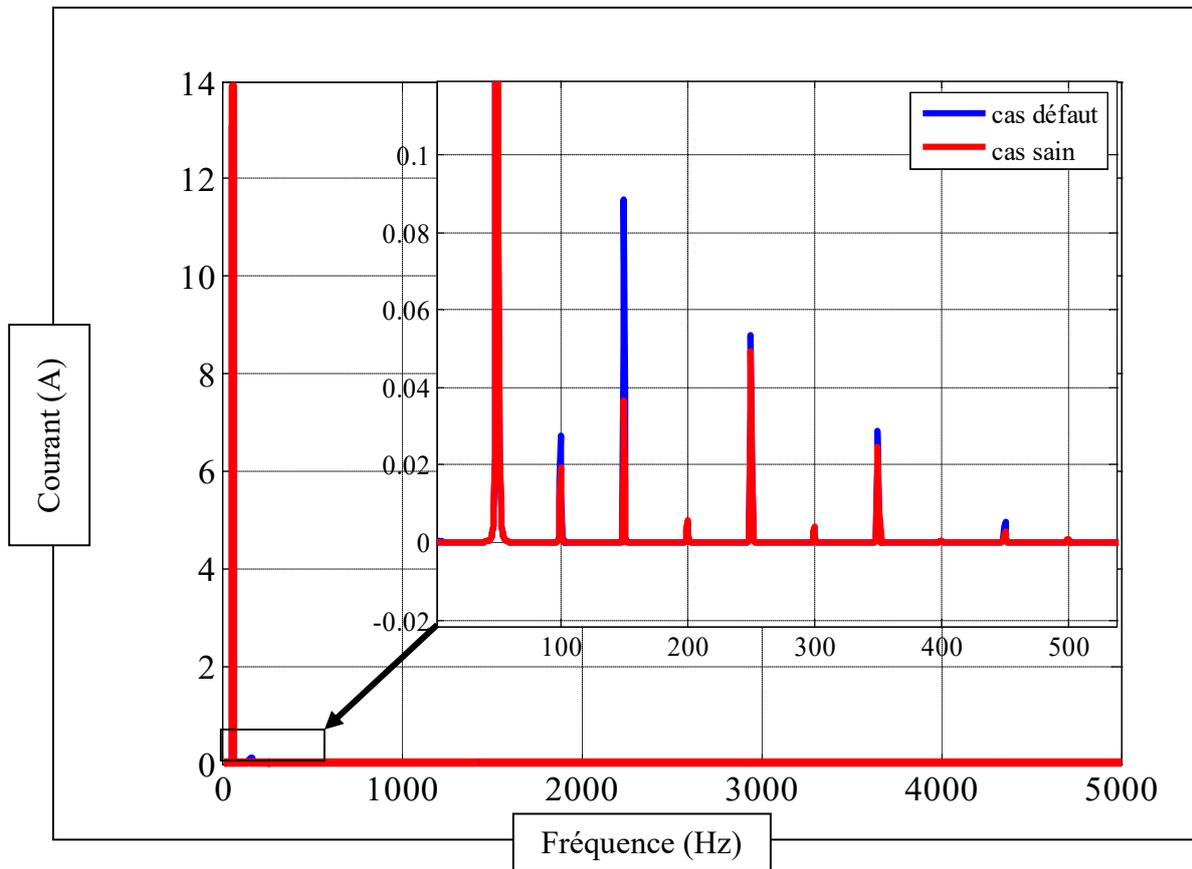


Figure IV.24 : Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut à 110V.

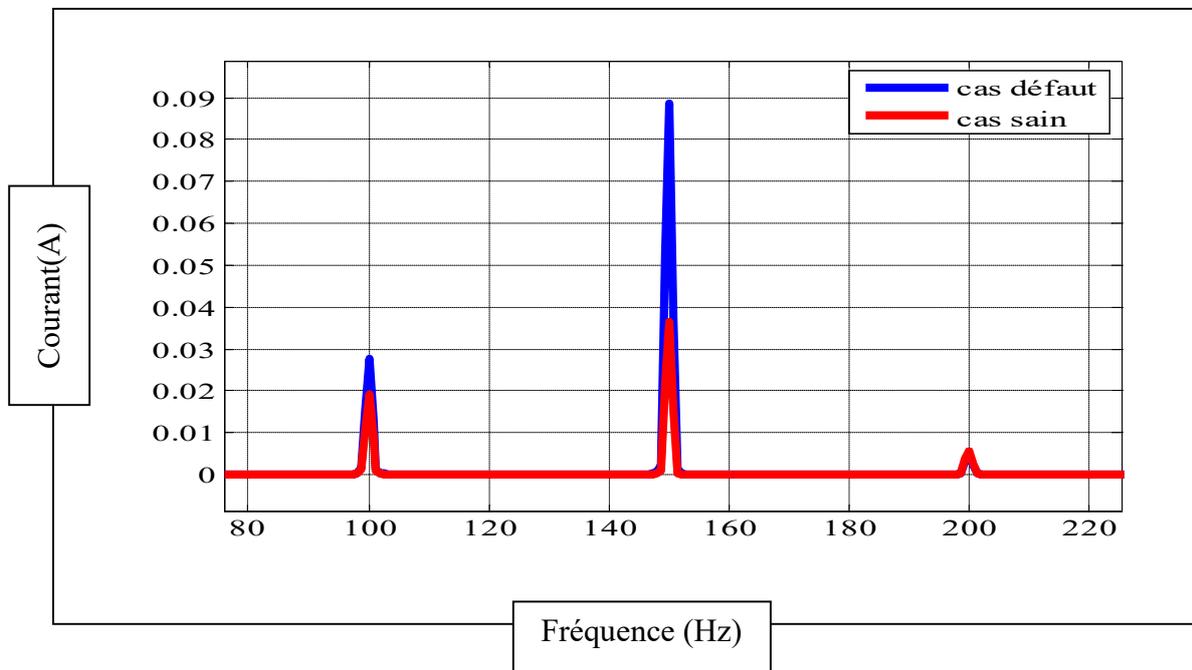


Figure IV.25: Spectre du courant statorique avec et sans défaut pour une marge 100 à 220Hz à 110V.

IV.3.4 cas de tension 80V

IV.3.4.1 Résultats de la simulation

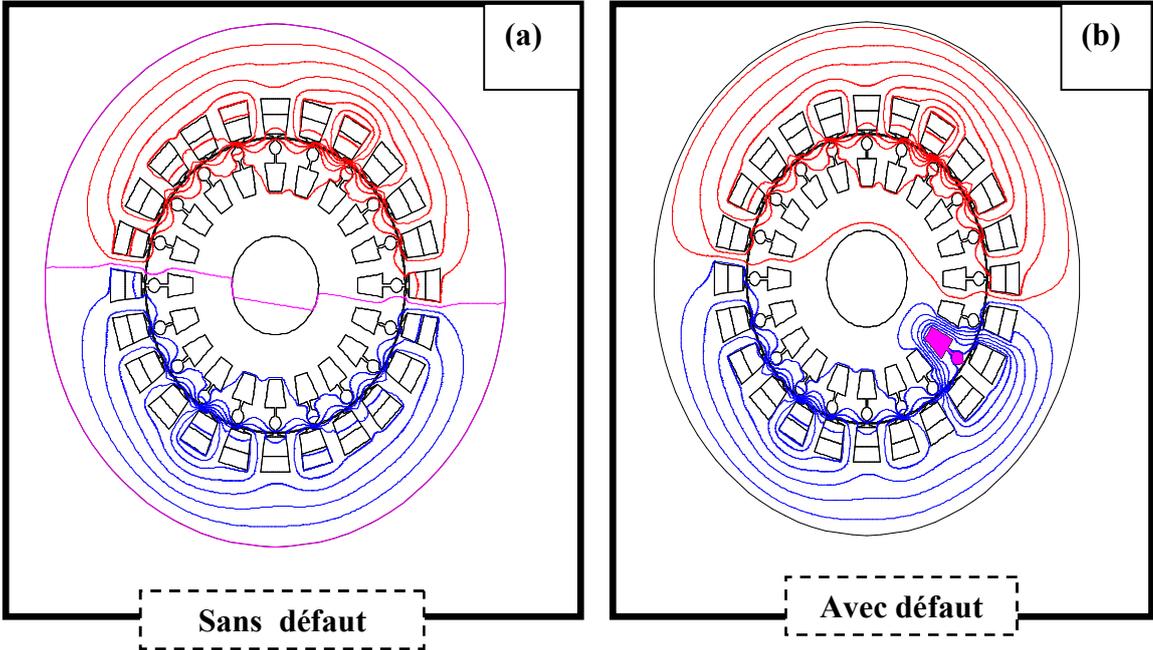


Figure IV.26: la distribution des lignes du flux(a) sans défaut ;(b) avec défaut à 80V.

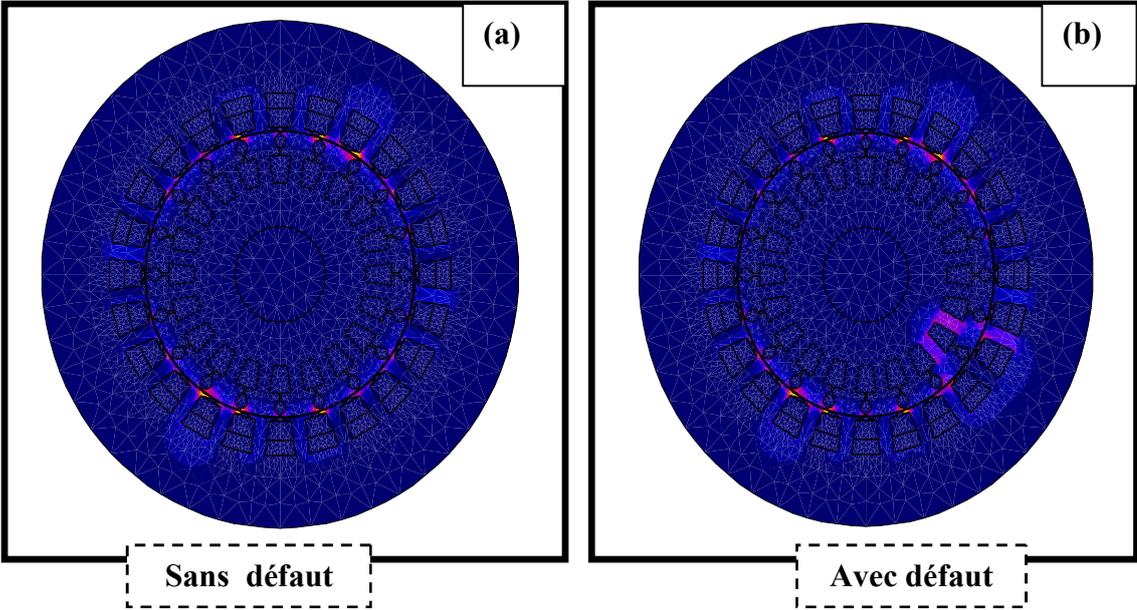


Figure IV.27: l'induction B (a) sans défaut; (b) avec défaut à 80V.

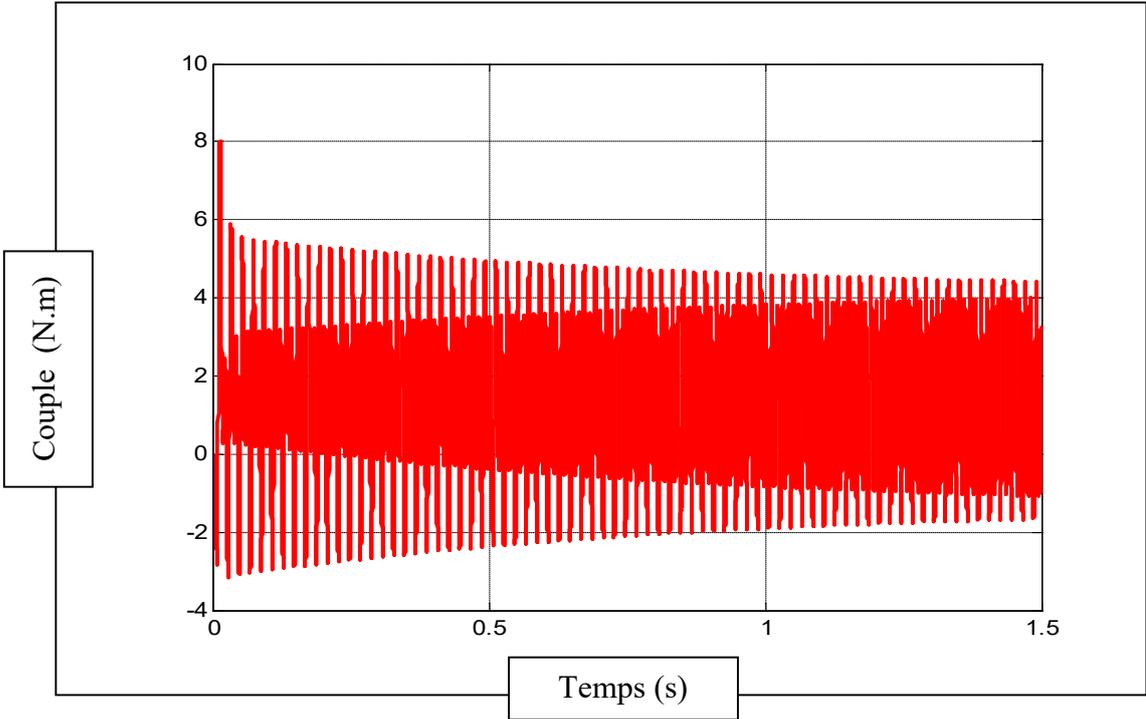


Figure IV.28: le couple électromagnétique sans défaut à 80V.

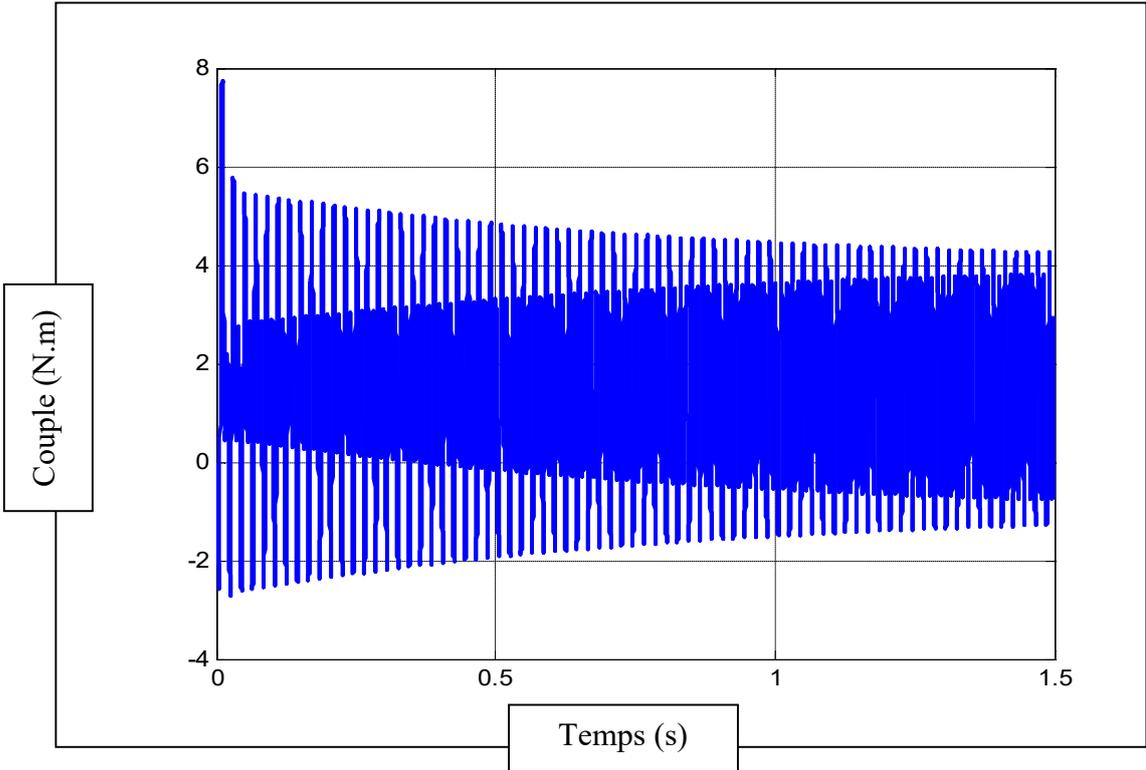


Figure IV.29: le couple électromagnétique avec défaut à 80V.

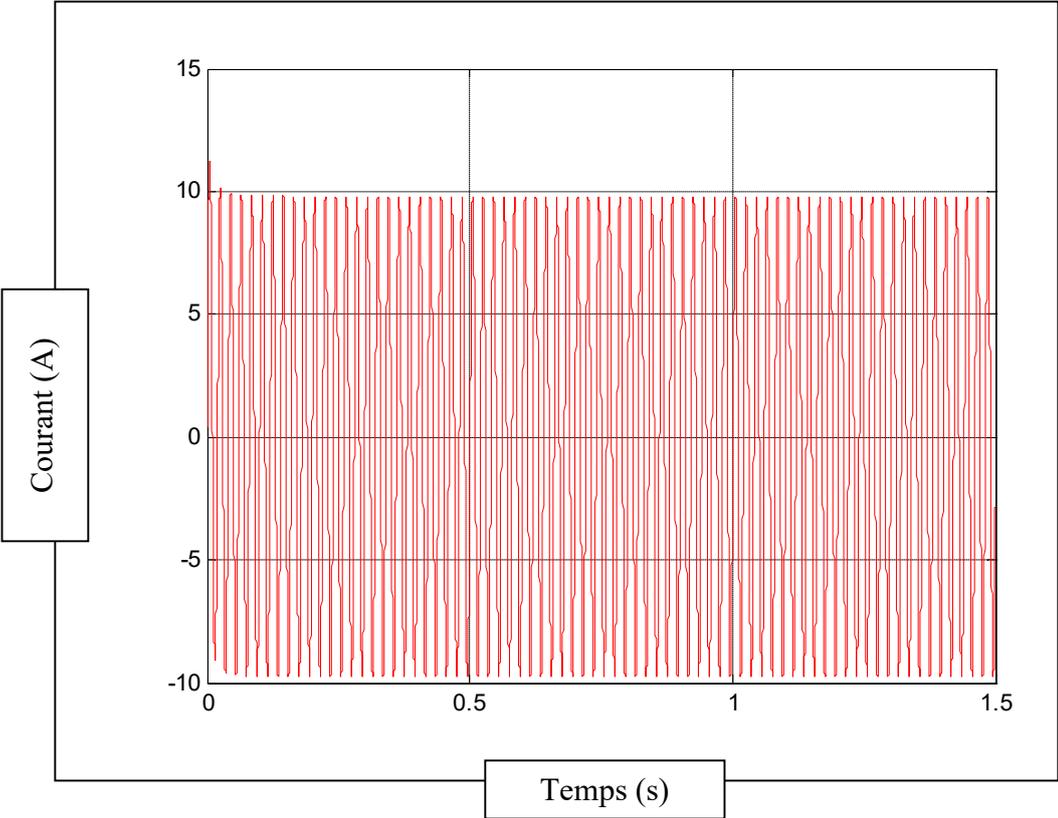


Figure IV.30:le courant statorique sans défaut à 80V.

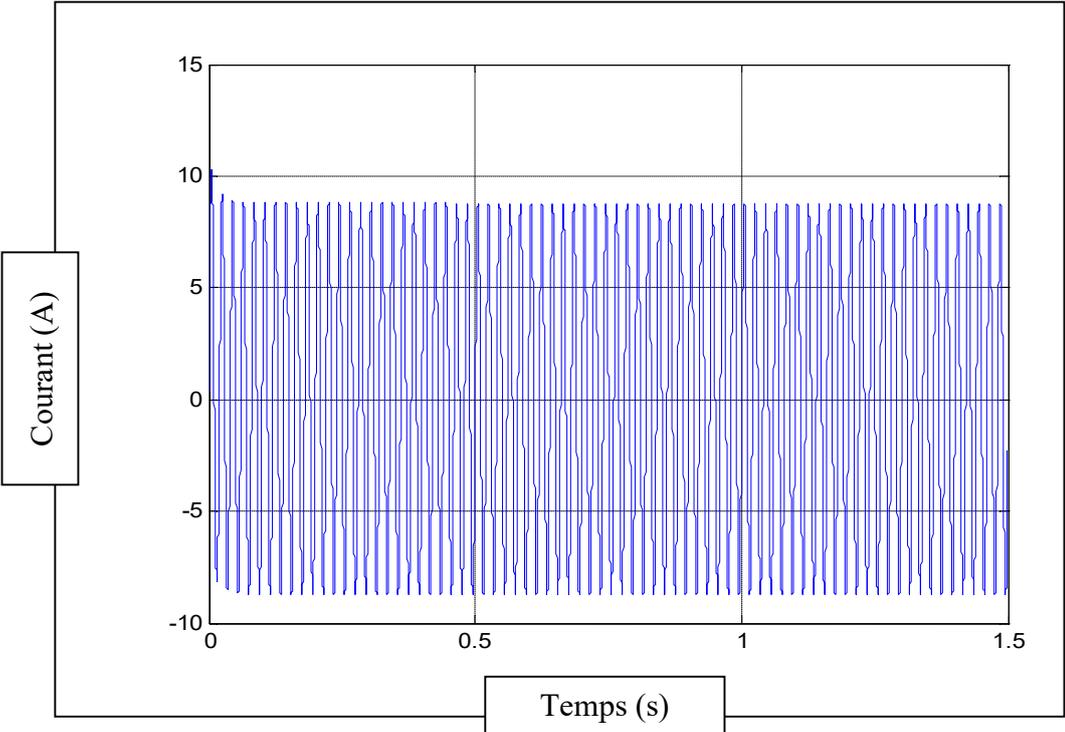


Figure IV.31:le courant statorique avec défaut à 80V.

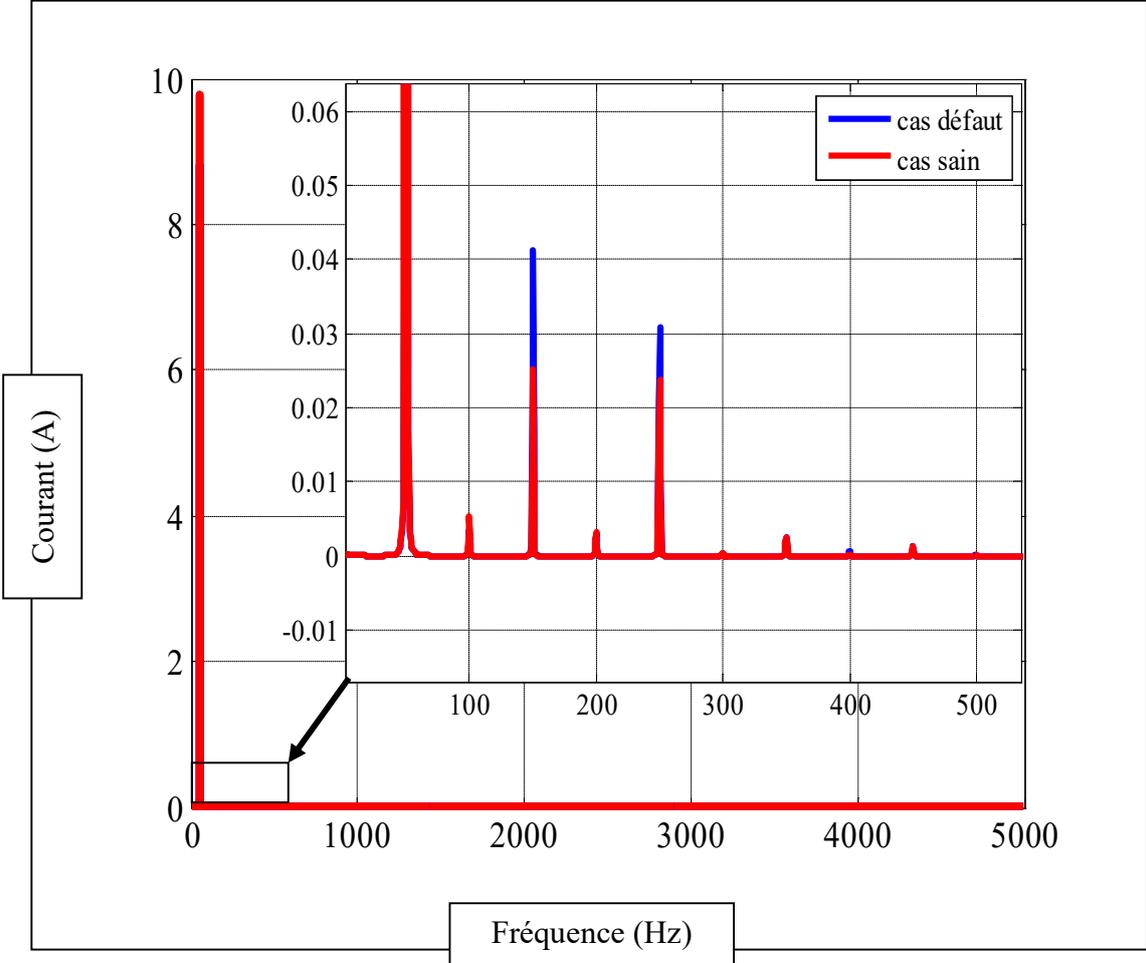


Figure IV.32: Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut à 80V.

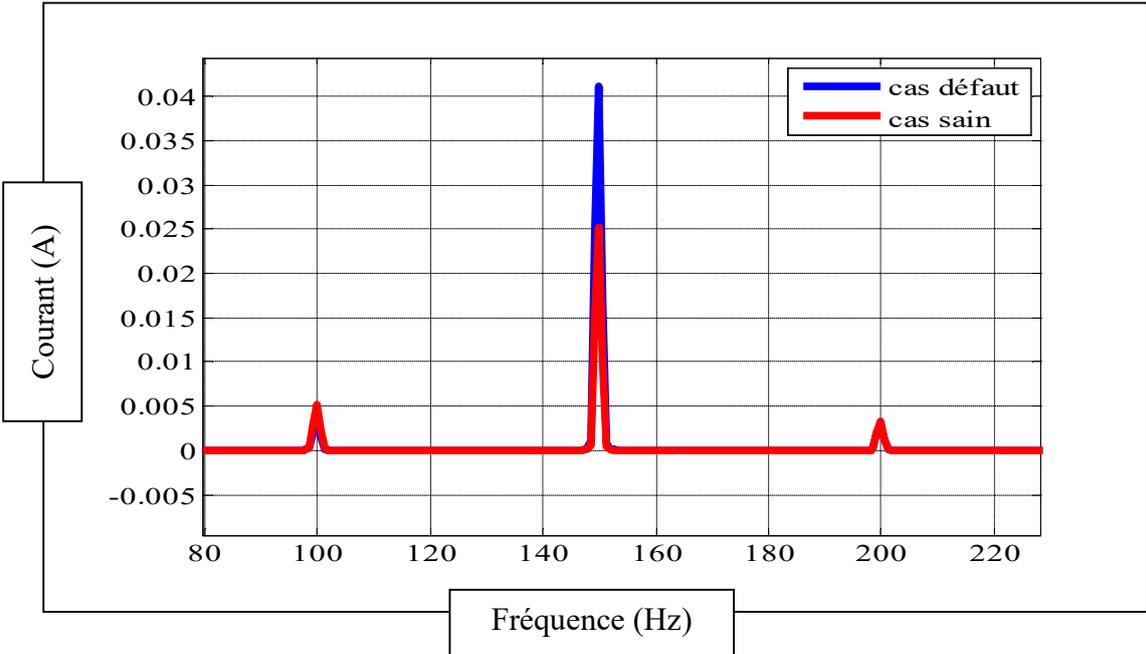


Figure IV.33: Spectre du courant statorique avec et sans défaut pour une marge 100 à 220Hz.

IV.3.5 cas de tension 50V

IV.3.5.1 Résultats de la simulation à l'état sain

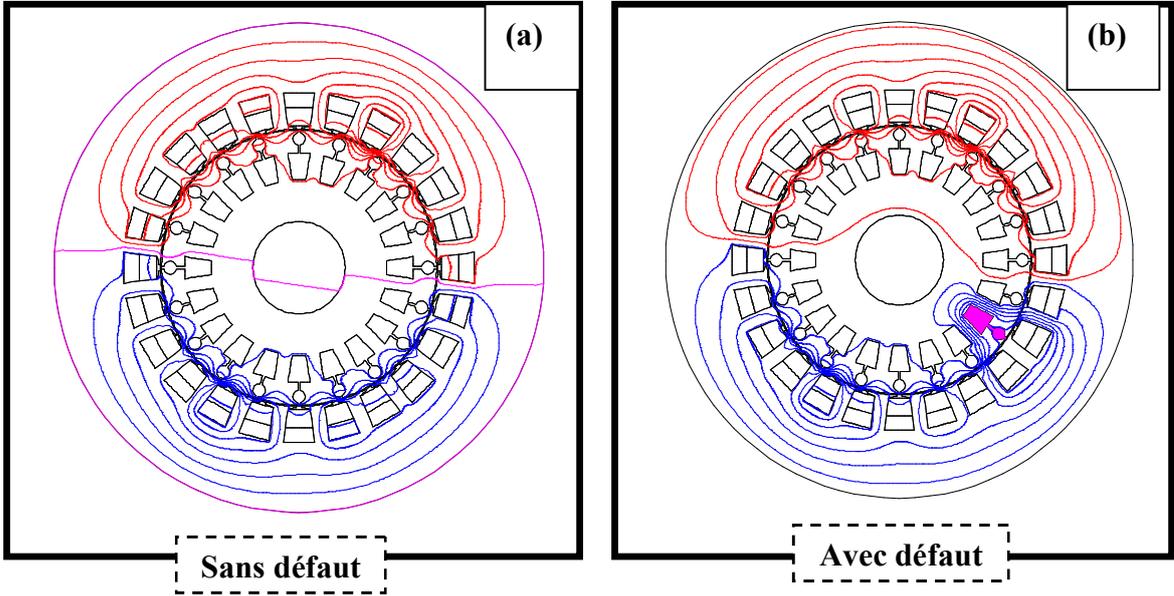


Figure IV.34: la distribution des lignes du flux(a) sans défaut ;(b) avec défaut à 50V.

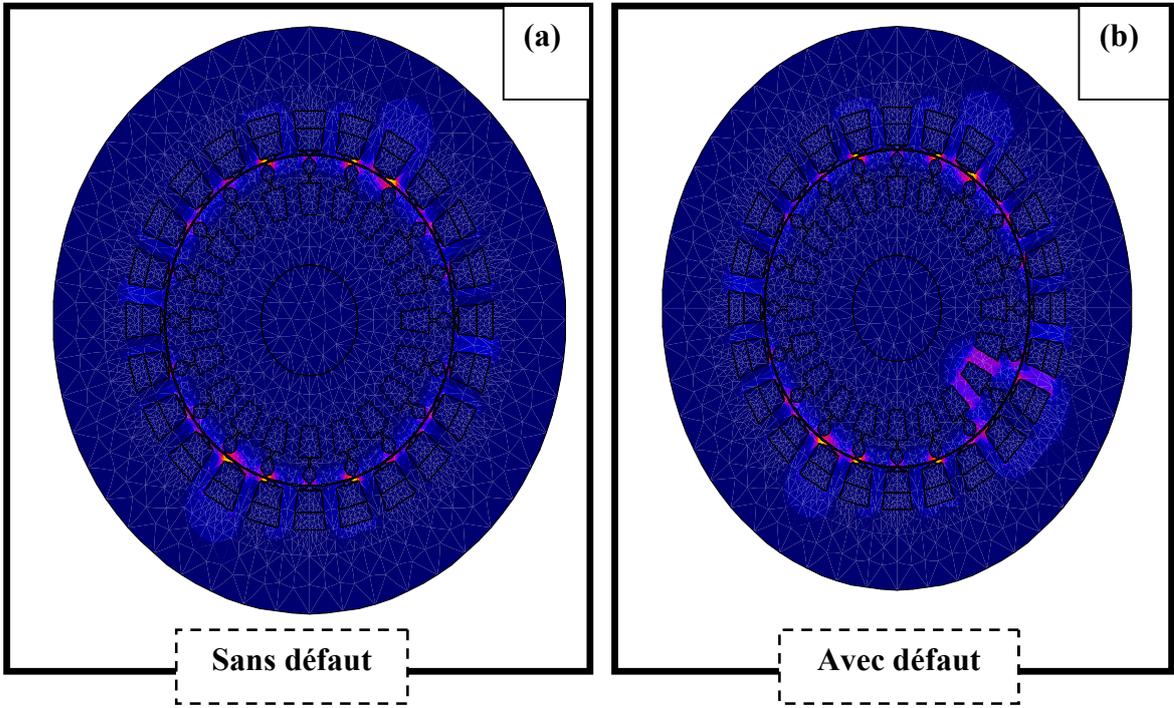


Figure IV.35: l'induction B (a) sans défaut ; (b) avec défaut à 50V.

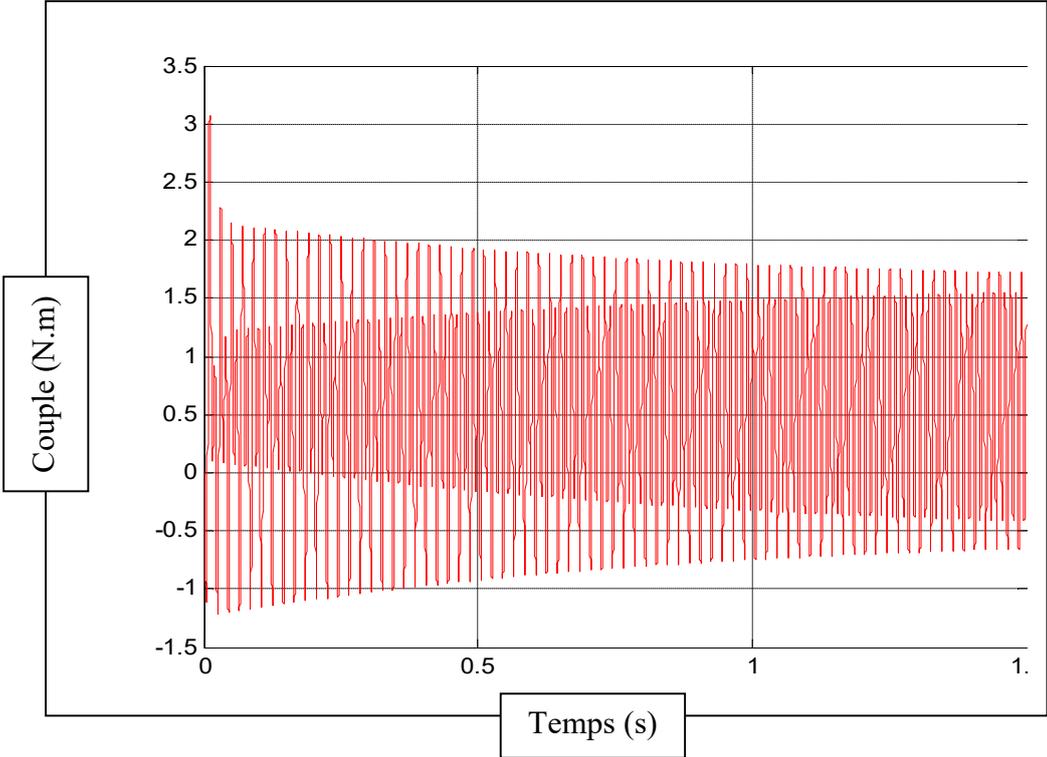


Figure IV.36: le couple électromagnétique sans défaut à 50V.

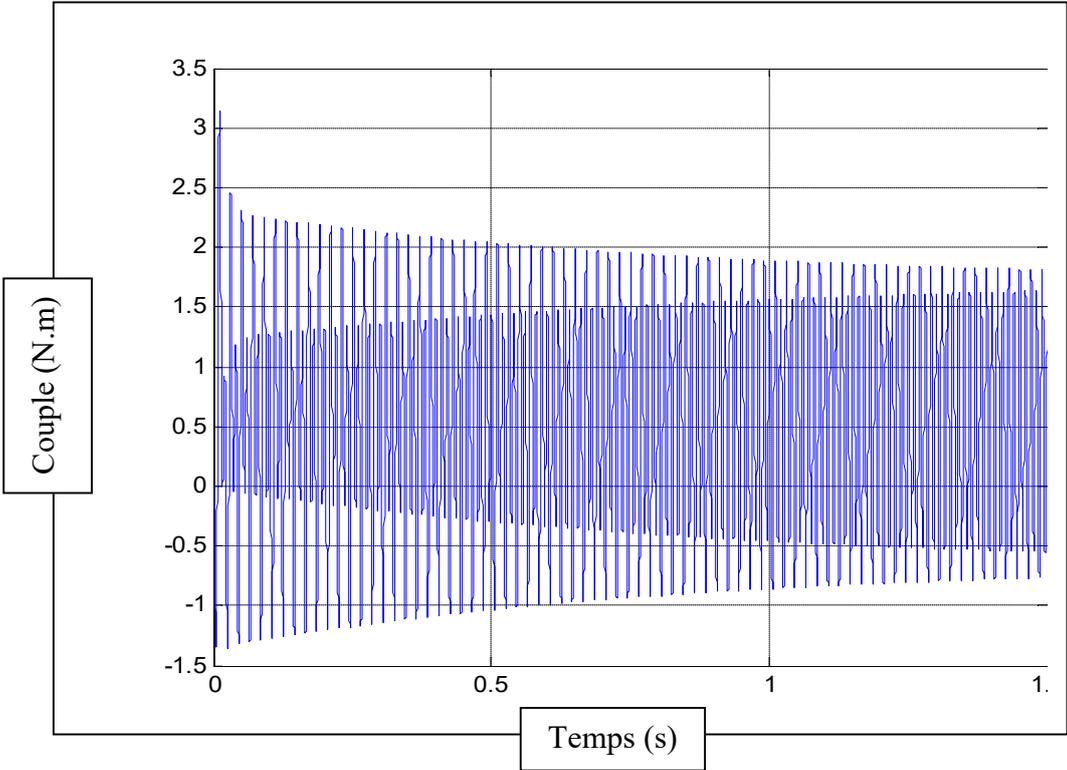


Figure IV.37 : le couple électromagnétique avec défaut à 50V.

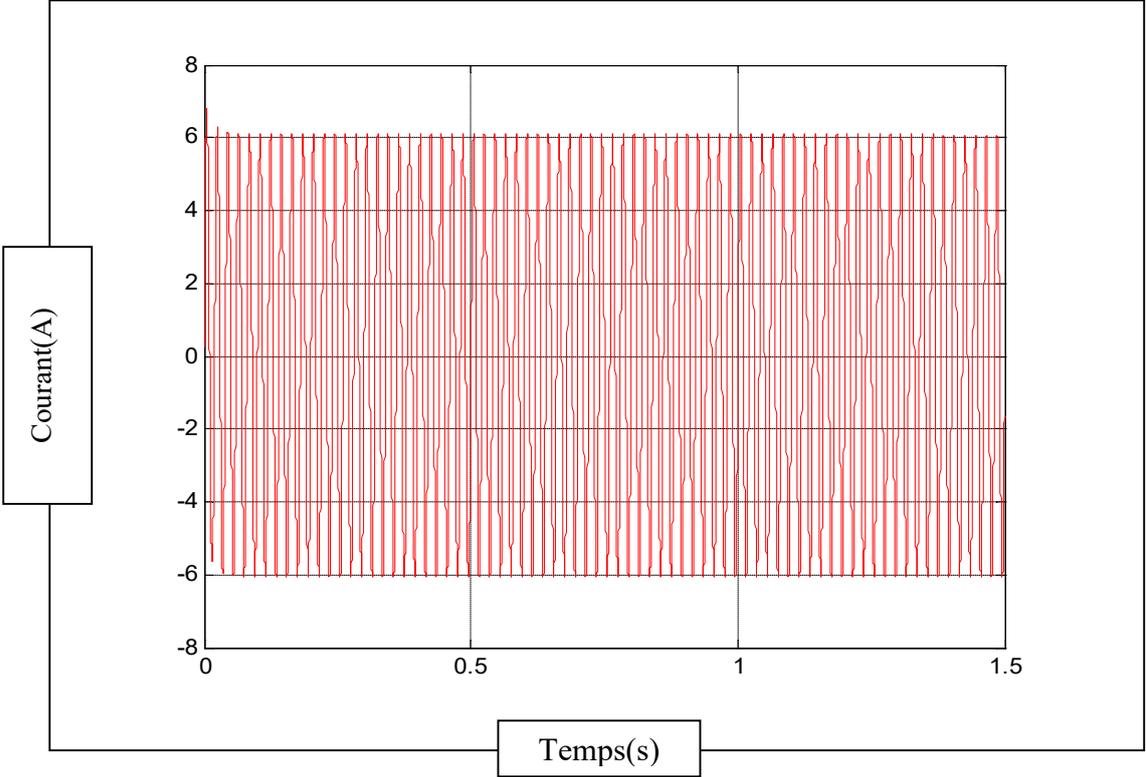


Figure IV.38: le courant statorique sans défaut à 50V.

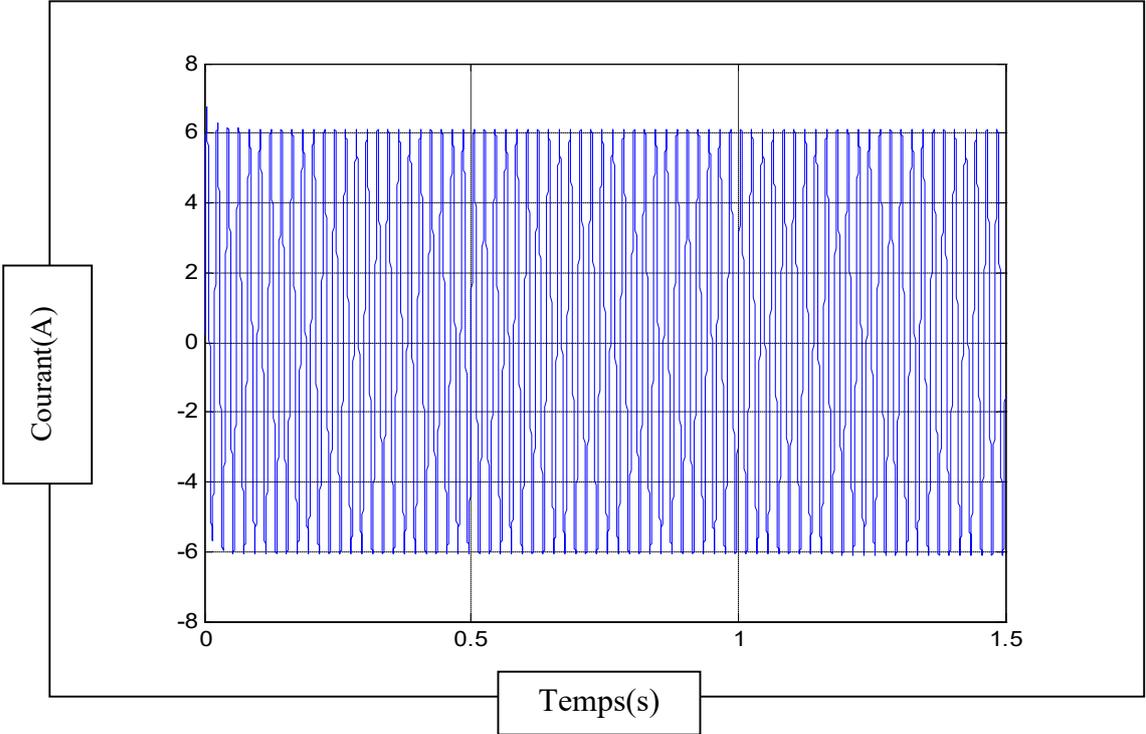


Figure IV.39: le courant statorique avec défaut à 50V.

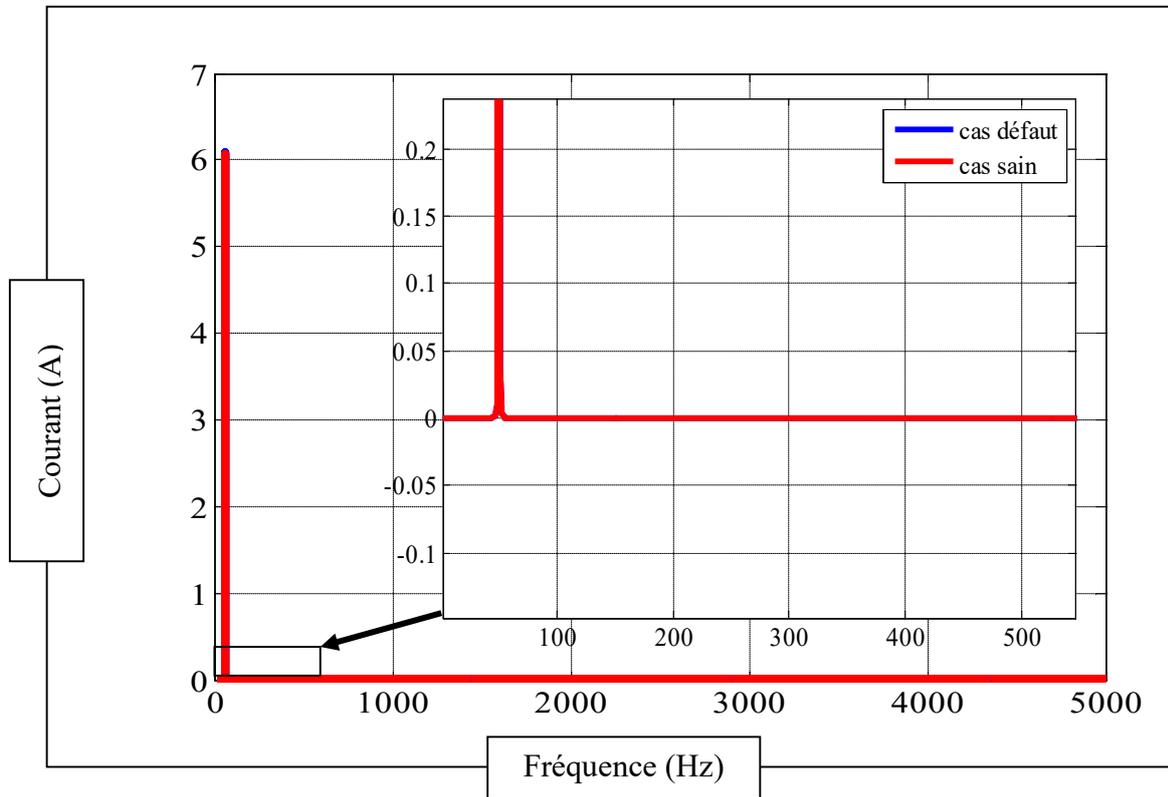


Figure IV.40: Spectre (avec zoom) du courant statorique avec et sans défaut à 50V.

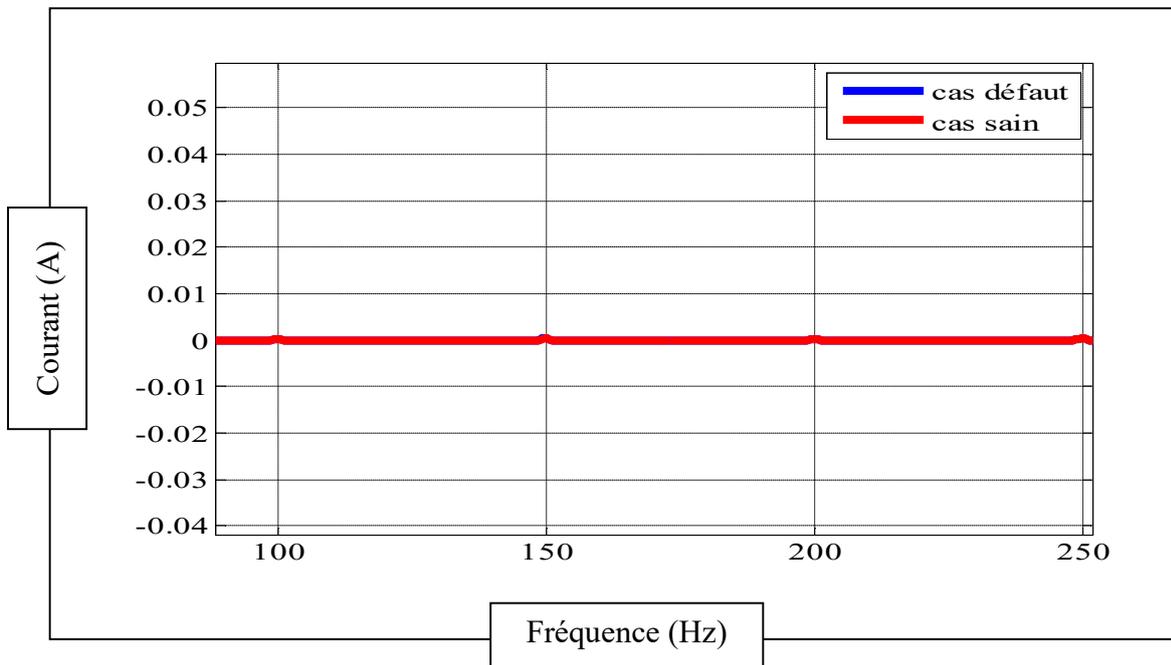


Figure IV.41: Spectre du courant statorique avec et sans défaut pour une marge 100 à 250Hz à 50V.

Suivant les résultats du couple, on remarque que le couple se manifeste comme dans le cas de la MAS en régime transitoire du fonctionnement en charge.

D'après les résultats du courant statorique, on remarque que le courant statorique diminue avec la diminution de la tension d'alimentation 48.08A pour la tension 380V jusqu'au 4.3A pour la tension 50V.

L'analyse du spectre de courant statorique pour la signature du défaut à la fréquence 150Hz, montre que pour avoir une bonne détection, il faut utiliser une tension d'alimentation importante (figure IV.42). Pour cette tension importante, on peut atteindre une sensibilité de 0.6A (figure IV.43). Mais malheureusement cette tension importante est accompagnée par un courant statorique fondamental important.

On a remarqué que l'analyse du spectre de courant statorique pour la signature du défaut à la fréquence fondamentale 50Hz, montre des effets similaires mais inversés dans l'amplitude que pour le cas 150Hz (figure IV.44). Mais pour cette tension importante, on peut atteindre une sensibilité de 2.6A plus importante que celle du cas de la signature en 150Hz (figure IV.45).

La suggestion est soit de trouver un compromis entre les deux sinon si on doit avoir une bonne détection en utilisant la tension max, il faut utiliser un temps très court, dans notre cas, on utilisé 1.5s.

La technique TURBO est confrontée à son application en pratique puisque il est très difficile de bloquer un moteur de 7.5 kW. De plus il faut utiliser cette technique uniquement durant le fin travail.

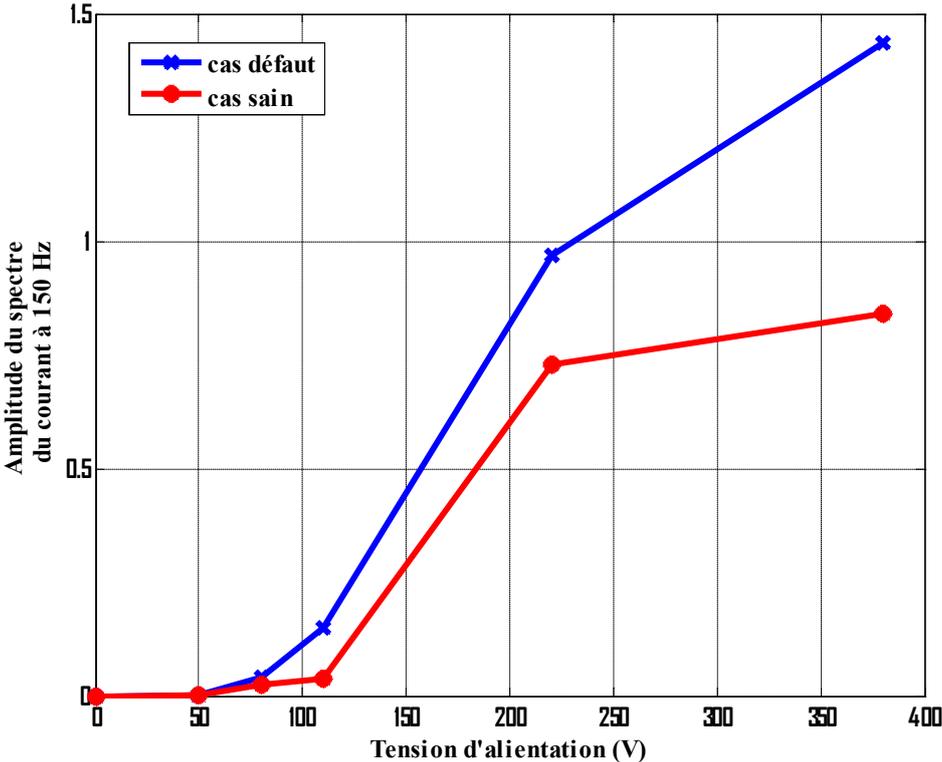


Figure IV.42: Amplitude du pic du courant à 150 Hz.

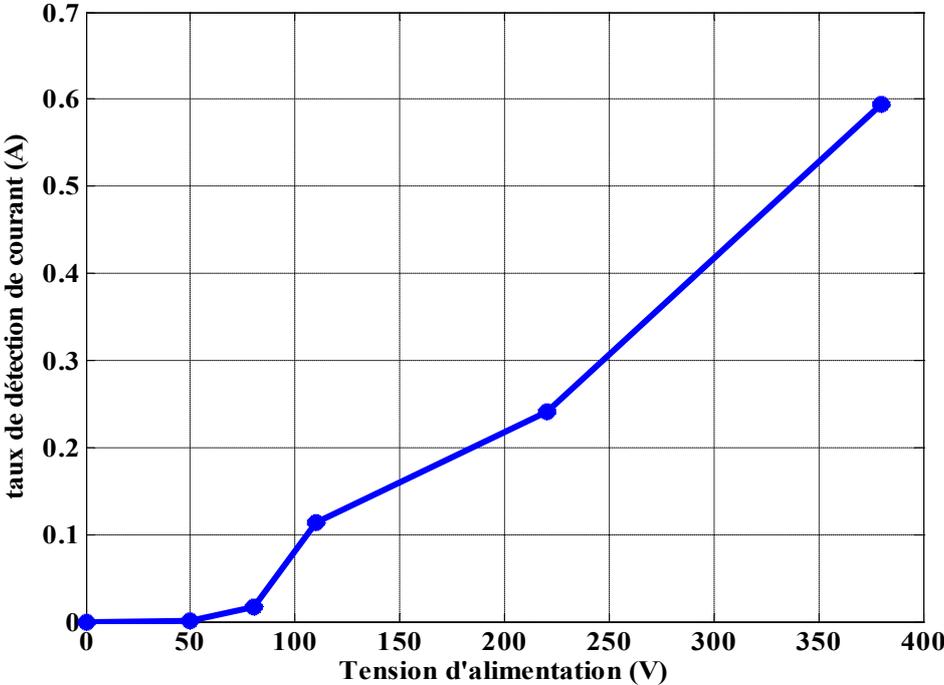


Figure IV.43: Différence de l'amplitude du pic de courant entre sans et avec défaut de cassure de barre à 150 Hz.

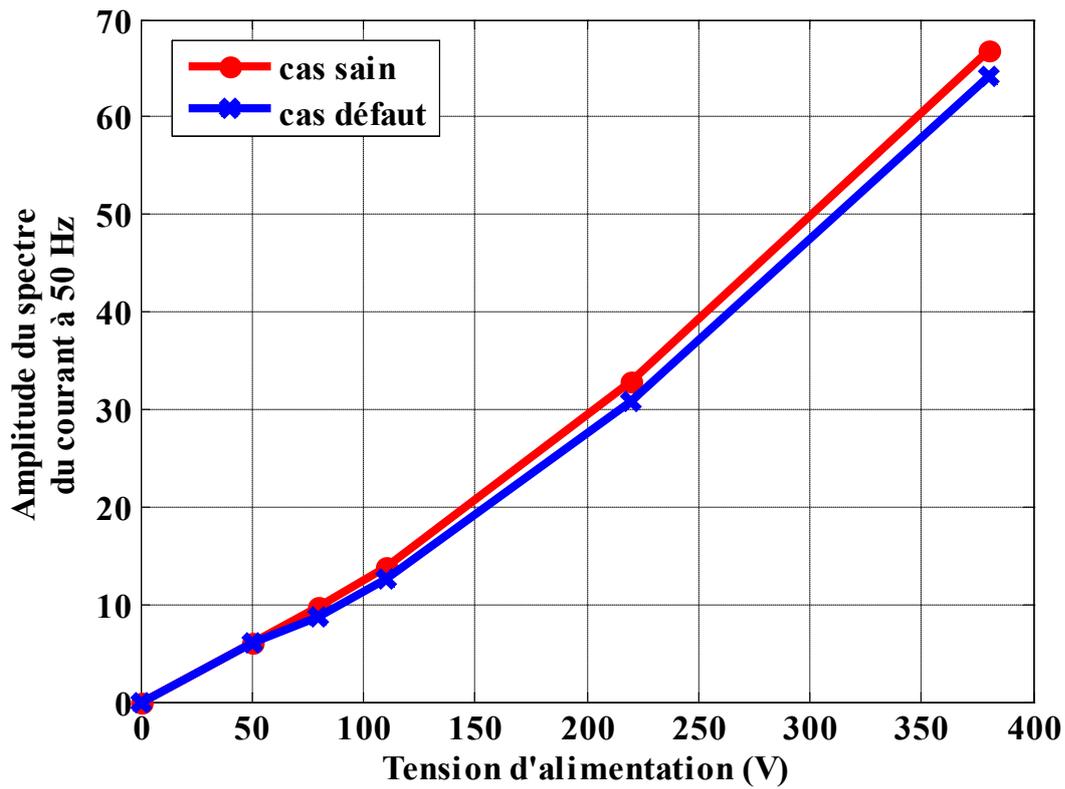


Figure IV.44: Amplitude du pic du courant à 50 Hz.

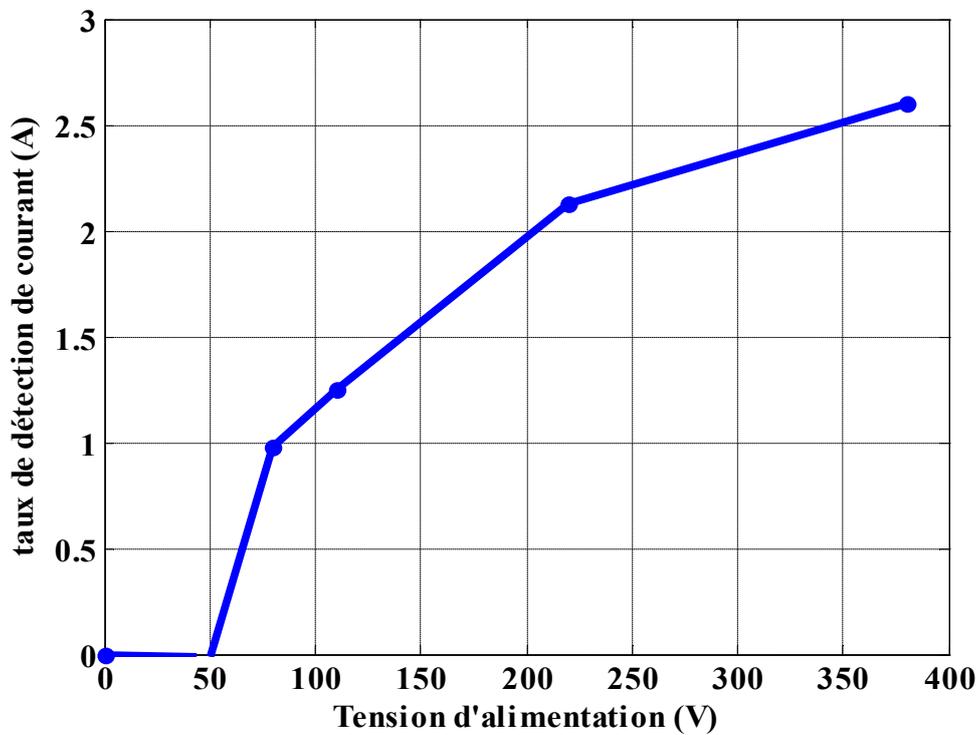


Figure IV.45: Différence de l'amplitude du pic de courant entre sans et avec défaut de cassure de barre à 50Hz.

IV.4 Conclusion

Nous avons exposé une technique qui peut contribuer au diagnostic de défauts de cassure de barres *TURBO*. Cette technique a montré des inconvénients et des avantages et pour que cette technique puisse donner une bonne détection, il faut utiliser une tension d'alimentation importante. On peut trouver un compromis pour la détection pour les signatures en 50Hz et 150Hz. Si on utilise la tension maximale, il faut utiliser un temps très court de 1.5s. Comme perspective, il faut confronter la technique *TURBO* à son application en pratique.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution au diagnostique du défaut de cassure de barres par la technique du rotor bloqué. Cette technique passe par la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en vue du diagnostic des défauts rotoriques.

Nous avons exposé l'état de l'art de la machine asynchrone et ses méthodes de surveillance et de diagnostic. La première partie concerne la constitution, les défaillances et les différentes méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone en présence de défauts. La deuxième partie en affectant à chaque défaut une signature spectrale qui lui est propre, la méthode de l'analyse des courants constitue un moyen performant susceptible de prévoir un défaut majeur et contribuant ainsi à promouvoir ce qui est appelé actuellement 'la maintenance prédictive' ou 'proactive'.

Nous avons aussi présenté le modèle mathématique et numérique qu'on a utilisé pour modéliser la machine asynchrone, basé sur la méthode des éléments finis. On a commencé par la représentation de la méthode de calcul de champ par les éléments finis en citant les équations qui régissent le champ électromagnétique dans les machines électriques qui sont les équations de Maxwell. Puis on est passé à la description de principe de calcul et du logiciel utilisé, on a cité la méthode de réalisation de ce modèle et du couplage de circuit magnétique avec le circuit électrique extérieur d'alimentation.

Enfin, nous avons tiré quelques remarques très importantes pour la détection des défauts de cassure de barres : Le régime de démarrage ne permet pas la détection du défaut puisque le temps n'est pas assez important pour la détection (inférieur à 1s) à vide ou en charge. Le régime en charge avec un couple résistant est très important pour la détection des défauts de cassure de barre car cela augmente le glissement et la barre cassée se trouve traversée par les lignes de flux. Un temps important en régime permanent qui est supérieur à 1s est propice à la détection

Ces constatations ont permis de trouver une technique de détection meilleure que celle utilisée actuellement avec la machine asynchrone en utilisant le mode en charge. Cette nouvelle technique est la technique à rotor bloquée *TURBO*. Nous avons exposé cette technique avec ses inconvénients et avantages. Cette technique montre que pour avoir une bonne détection, il faut utiliser une tension d'alimentation importante.

On peut trouver un compromis pour la détection. Si on utilise la tension max, il faut utiliser un temps très court, dans notre cas, on utilisé 1.5s. Comme perspective, il faut confronter la technique *TURBO* à son application en pratique.

Résumé :

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

Dans cette logique, nous proposons dans ce travail une étude comparative entre le comportement de la machine saine et le comportement de la machine doté de défaut rotorique, Nous avons également comparé la machine dans le cas sain et en cas de défaut rotorique à condition que le rotor soit bloqué.

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 défaut de la machine asynchrone sur le spectre du courant statorique.

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

ملخص :

ينصوي هذا العمل ضمن إطار تشخيص الأخطاء في الماكينات الكهربائية اللامتزامنة ذات القفص السنجابي ثلاثية الأطوار. حاليا تعتبر الماكينة اللامتزامنة العنصر المفتاح في أغلب التجهيزات الصناعية بفضل صلابتها و ثمنها المنخفض نسبيا . و بالرغم من هذه الإيجابيات، قد تتعرض هذه الماكينة إلى أعطال مختلفة تؤثر على أدائها و مدى حياتها الافتراضية ، مما يؤدي إلى خسائر اقتصادية معتبرة للمتعامل الصناعي ، و هذا ما يفرض وضع نظام مراقبة لتفادي هذه الخسائر .

في خضم هذا العمل اقترحنا مقارنة بين الماكينة في الحالة العادية و في حالة وجود الأعطال كما قمنا كذلك بمقارنة الماكينة في الحالة العادية و في حالة وجود الأعطال مع شرط إيقاف الدوار، حيث يتم استخدام تقنية التحليل الطيفي لتيار الثابت الأكثر شيوعا لتشخيص الأعطاب المختلفة في الآلات غير متزامنة ، وهو ما يقودنا إلى دراسة تأثير فشل الآلة غير متزامنة على المحتوى الطيفي للتيار الثابت.

الكلمات المفتاحية: الماكينات الكهربائية اللامتزامنة ذات القفص السنجابي ثلاثية الأطوار، التحليل الطيفي، تقنية العناصر المنتهية.

Bibliographie

- [01] Ondel O., «Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone» Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006.
- [02] MEDOUED AMMAR., « SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES MACHINES ELECTRIQUES : APPLICATIONS AUX MOTEURS ASYNCHRONES» Thèse de Doctorat, Université du 20 Août 1955, Skikda, 2012.
- [03] Bachir S, « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2002.
- [04] BOUSSEKSOU Radouane «Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic», mémoire magister, Université Mentouri-Constantine.
- [05] ZAHIR Ait Ouali «Application des FPGA à la commande d'un moteur asynchrone», mémoire magister, Université Mouloud mammeri de Tizi-ouzou.
- [06] M. Sahraoui, «Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones» thèse de doctorat, Université de Biskra 2010.
- [07] B. Trajin, "Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones," Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1 Décembre 2009.
- [08] A. Ibrahim, "Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée," Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences, ingénierie, santé, Université Jean Monnet, France, 10Mars 2009.
- [09] HALEM Noura «Modélisation des machines asynchrones triphasées à cage en Vue du diagnostic par la méthode des éléments finis», thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra.
- [10] S. Bazine, "Conception et implémentation d'un Méta-modèle de machines asynchrones en défaut," Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle (LAI) - EA 1219, Université de Poitiers, 2009.
- [11] S. Nandi, T. C. Ilamparithi, L. Sang Bin, and H. Doosoo, "Detection of Eccentricity Faults in Induction Machines Based on Nameplate Parameters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, pp. 1673-1683, May 2011.

- [12] R. N. Andriamalala, H. Razik, L. Baghli, and F. M. Sargos, "Eccentricity Fault Diagnosis of a Dual-Stator Winding Induction Machine Drive Considering the Slotting Effects," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 4238-4251, December 2008.
- [13] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in threephase squirrel-cage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, pp. 921-937, 1992.
- [14] A. Ceban, R. Pusca, and R. Romary, "Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. PP, p. 12, 2011.
- [15] G. R. Bossio, C. H. De Angelo, J. M. Bossio, C. M. Pezzani, and G. O. Garcia, "Separating Broken Rotor Bars and Load Oscillations on IM Fault Diagnosis Through the Instantaneous Active and Reactive Currents," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, pp. 4571-4580, November 2009.
- [16] T. Boumegoura, "Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic," Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon Ecully, France, 2001.
- [17] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts," Thèse de doctorat, Institut de Recherche en Cybernétique de Nantes, École Centrale de Nantes, Nantes, France, 1999.
- [18] Arfat Siddique, G. S. Yadava, and Bhim Singh, "A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors," *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 20, No. 1, March 2005.
- [19] A. H. Bonnet, "Cause and analysis of stator and rotor failures in threephase squirrel-cage induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 4, pp. 921-437, Jul./Aug. 1992
- [20] Chaouche Riadh, "Détection et diagnostic de défauts statorique externe d'un moteur asynchrone triphasé à l'aide de la carte ARDUINO MEGA 2560", thèse de master, 2016.
- [21] A. Ibrahim, "Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée," Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences, ingénierie, santé, Université Jean Monnet, France, 10Mars 2009.
- [22] A. H. Bonnett and C. Yung, "Increased Efficiency Versus Increased Reliability," *Industry Applications Magazine*, IEEE, vol. 14, pp. 29-36, 2008.

- [23] S. A. S. Al Kazzaz and G. K. Singh, "Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques," *Electric Power Systems Research*, vol. 65, pp. 197-221, 2003.
- [24] GAETAN Didier «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances», thèse de doctorat, Université de Nancy.
- [25] A. Ghouggal, «Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : modèle dédié à la détection des défauts» mémoire de magister, Université de Batna 2005.
- [26] R. Casimir, E. Bouteleux, H. Yahoui, G. Clerc, H. Henao, C. Delmotte, G. A. Capolino, G. Rostaing, J. P. Rognon, E. Foulon, L. Loron, H. Razik, G. Didier, G. Houdouin, G. Barakat, B. Dakyo, S. Bachir, S. Tnani, G. Champenois, J. C. Trigeassou, V. Devanneaux, B. Dagues, and J. Faucher. Comparaison de plusieurs méthodes de modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts. *Electrotechnique du Futur*, Décembre 2003.
- [27] Samia. Khelif, «Modélisation de la machine asynchrone en vue diagnostic prise en compte adéquate du circuit magnétique», mémoire de magistère, *Electrotechnique Université de Mohammed Khaider Biskra*, 2012.
- [28] A. Assam, « Identification des Machines Asynchrones en Vue de Leurs diagnostics », Thèse de magister de l'Université de Sétif, soutenue 2010.
- [29] B. Vaseghi, « Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spires : Modélisation – Réduction du courant de défaut », Thèse de doctorat de l'Université de Nancy, 3 décembre 2009.
- [30] Ghamri okba, «Modélisation des machines supraconductrice par le logiciel Flux-2d», mémoire de master, *Electrotechnique Université de Mohammed Khaider Biskra*, 2015.
- [31] BEN Malek Salah Eddine, «Modélisation de la machine Pseudo direct drive par Flux 2d», mémoire de master, *Electrotechnique Université de Mohammed Khaider Biskra*, 2015.
- [32] S. Mouellef, « Contribution A L'étude D'une Machine A Réductance Variable : Conception, Modélisation & Simulation D'une MRVDS 6-4 », Thèse de magister, université de Mentouri, Constantine, 03/06/ 2008.
- [33] D. Bendittis, « étude et modèle électromagnétique de machine asynchrone pour l'alternateur-démarrateur », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2002.

- [34] Kerszenbaum L. and Landy C. F., "The existence of large interbar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and end-ring faults" IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. 103(7), pp.1854-1862, 1984.
- [35] Thorsen O. V. and Dalva M., "A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.31(5), pp. 1186-1196, September 1995.
- [36] D.E. Khoudja, «Elaboration d'un système intelligent de surveillance et de diagnostic automatique en temps réel des défaillances des moteurs à induction»thèse de doctorat, Université de Boumerdès 2007.
- [37] M. Bouray Islam, «Réalisation de cas de démo Flux accessibles depuis le superviseur», mémoire de master, Université de Lorraine, 2014.
- [38] Présentation des avaries. Machines électriques tournantes" Cahier des Préventions. CP2, Allianz, 1988.
- [39] Diagnostic des défauts dans la machine asynchrone, Pr A.Menacer.