

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

DOMAINE : SCIENCES ET
TECHNOLOGIES

FILIERE : GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE : MAINTENANCE
INDUSTRIELLE



FACULTE: TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT: GENIE
ELECTRIQUE

NO D'ORDRE: MI-06

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

Présenté par :

BABECHE Yacine

BOURAS Samir

THEME

Diagnostic des machines électriques par la méthode des éléments finis

Soutenu le 10/06/2018 devant le jury composé de :

Mr BENSLIMANE Tarak	UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF -M'SIL	Président
Mr ZORIG Assam	UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Rapporteur
Mr MABRAK Samir	UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Examinateur

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2017/2018



Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage et la patience durant toute la période de réalisation de ce mémoire.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur

***M. ZORIG Aissam** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continu
tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous
donner ses conseils et remarques.*

Enfin, je ne remercie également toute personne qui m'a donné de l'aide pendant cette phase de réalisation de ce mémoire et tous mes collègues de la promotion 2017/2018.

*Nos remerciements sont destinés aussi à toutes Nos familles,
et tous Nos amis pour leur aide et leur soutien.*



Dédicasse

Jedédie ce mémoire

*Ames chers parents. Ma mère, qui m'a encouragé à aller de l'avant et
Qui m'a donné tout son amour pour reprendre mes études, et*

Mon très cher père est la plus belle perle du monde

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs

Encouragements.

A tout ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé

Ames frères.

Je leur souhaite tout le succès... tout le bonheur

Ames amis et mes camarade

Pour une sincérité si merveilleuse ...jamais oubliable, en leur souhaitant

Tout le succès ...tout le bonheur.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du

Primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

A tout personne

Qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie

BABECHE yacine



Dédicasse

Jedédie ce mémoire

*Ames chers parents. Ma mère, qui m'a encouragé à aller de l'avant et
Qui m'a donné tout son amour pour reprendre mes études, et*

Mon très cher père est la plus belle perle du monde

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs

Encouragements.

A tout ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé

Ames frères.

Je leur souhaite tout le succès... tout le bonheur

Ames amis et mes camarade

Pour une sincérité si merveilleuse ...jamais oubliable, en leur souhaitant

Tout le succès ...tout le bonheur.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du

Primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

A tout personne

Qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie

BOURAS samir

Table des matières

Table des matières.....	I
Liste des figures.....	III
Liste de tableaux.....	VIII
Liste des Notations et Symboles.....	IX
Introduction générale.....	1
Chapitre I état de l'art de diagnostic des machines asynchrones.....	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. La machine asynchrone.....	4
I.2.1. Eléments de constitution de la machine asynchrone	4
I.2.1.1. Stator.....	5
I.2.1.2. Rotor à cage.....	6
I.2.1.3. Les organes mécaniques.....	6
I.2.2. Principe de fonctionnement.....	6
I.3. Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone.....	8
I.3.1. Défaillances au stator.....	9
I.3.1.1. Défauts d'isolant dans un enroulement.....	9
I.3.1.2. Court-circuit entre spires.....	10
I.3.1.3. Court-circuit entre phases.....	10
I.3.1.4. Court-circuit phase/bâti.....	11
I.3.1.5. Défauts de circuit magnétique.....	11
I.3.2. Défaillances au rotor.....	11
I.3.2.1. Ruptures de barres.....	12
I.3.2.2. Ruptures d'anneaux.....	12
I.3.2.3. Excentricité statique et dynamique.....	13
I.3.3. Défaillances mécaniques.....	14
I.3.3.1. Défauts roulements.....	14
I.3.3.2. Autres défaillances mécaniques.....	15
I.4. Méthodes de modélisation des machines asynchrones.....	15
I.4.1. Modélisation par les équations magnétiquement couplées (CEMC).....	16
I.4.2. Méthode des réseaux de permeances (RNM).....	17
I.4.3. Méthode des éléments finis (MEF).....	18
I.5. Présentation des différentes méthodes de diagnostic.....	18
I.5.1. Approche modèle	19
I.5.1.1. Diagnostic à l'aide des observateurs.....	20
I.5.1.2. Diagnostic par redondance analytique (espace de parité).....	21

I.5.1.3. Diagnostic par estimation paramétrique.....	21
I.5.2. Approche signal	21
I.5.3. Champ de dispersion des machines à courant alternatif.....	22
I.6. Conclusion.....	24
Chapitre II : La modélisation et simulation de la MAS par la méthode des éléments finis.....	27
II.1. Introduction.....	27
II.2. Méthode des éléments finis.....	27
II.2.1. Principe de la méthode des éléments finis	29
II.2.2. Le mode magnétique transitoire.....	30
II.3. Logiciel de résolution.....	30
II.3.1. Présentation de logiciel Flux 2D.....	31
II.4. Application à la simulation de la machine asynchrone.....	32
II.4.1. Les matériaux conducteurs	34
II.4.2. Les matériaux magnétiques.....	34
II.4.3. Couplage avec les équations de circuit	35
II.5. Résultats de simulation	36
II.5.1. Résultats graphiques	36
II.5.2. Analyse des caractéristiques de la machine.....	37
II.6. Simulation des défauts de rupture des barres rotoriques	38
II.7. Simulation des défauts d'excentricité	43
II.8. Simulation des défauts mixtes	46
II.9. Simulation des Défaut de court-circuit entre spire	49
II.10. Conclusion	52
Chapitre III : diagnostic des défauts de la machine asynchrone.....	54
III.1. Introduction	54
III.2. Diagnostic de la machine par l'analyse spectrale du courant statorique.....	54
III.2.1. Origines des raies dues au défaut rotorique.....	54
III.2.2. Excentricité d'entrefer.....	57
III.2.3. Défauts statoriques.....	60
III.3. Diagnostic de la machine par l'analyse de champs de dispersion.....	61
III.3.1. Tension induite de flux de dispersion.....	64
III.4. Conclusion.....	70

Conclusion générale

Références

Résumé

Liste des figures

Fig. I.1. Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	5
Fig. I.2. Structure du stator.....	5
Fig. I.3. Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit).....	6
Fig. I.4. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage.....	7
Fig. I.5. Proportion du défaut.....	8
Fig. I. 6. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.....	8
Fig. I. 7. Court-circuit entre spire.....	10
Fig. I.8. Ruptures de barres.....	12
Fig. I.9. Excentricité statique et dynamique.....	13
Fig. I.10. Différentes défaillances des roulements à billes.	15
Fig. I. 11. Schéma électrique équivalent à la cage rotorique.....	16
Fig. I.12. Réseau de perméances élémentaire autour d'encoche statorique.....	17
Fig. I.13. Méthodes analytiques de diagnostic des défauts.....	19
Fig. I.14. Méthodes de diagnostic par les observateurs	20
Fig. I.15. Répartition de lignes de flux de fuite dans une machine électrique.....	22
Fig. I.16. Parties du champ extérieur.....	23
Fig. I.17. Mesure de champ de dispersion.....	24
Fig. II.1: Fonction d'interpolation d'un élément.....	30
Fig. II.2: Démarche générale pour l'implémentation du modèle en Flux.....	32
Fig. II.3: géométrie de la machine étudiée.....	33
Fig. II.4: Répartition du maillage.....	33
Fig. II.5: Caractéristiques B(H) du matériau magnétique fer.....	35
Fig. II.6: Circuits représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.....	35
Fig. II.7: Répartition des lignes équiflux et l'induction magnétique pour le fonctionnement nominale à $t=1.5s$	36
Fig. II.8: Densité du courant dans les barres au fonctionnement nominale à $t=1.5$	36

Fig. II.9: Courant de phase en fonction du temps.....	37
Fig. II.10: couple en fonction de temps.....	37
Fig. II.11: la vitesse en fonction du temps.....	37
Fig. II.12: Courant de barre en fonction de temps.....	38
Fig. II.13: Répartition des lignes équiflux :(a) machine saine, (b) une seule barre cassées, (c) une barre cassées par pole, (d) deux barre cassées par pole opposé, (e) quatre barre cassées adjacentes.....	38
Fig. II.14: Répartition de l'induction dans le circuit magnétique :(a) machine saine, (b) une seule barre cassées, (c) une barre cassées par pole, (d) deux barre cassées par pole opposé, (e) quatre barre cassées adjacentes.....	39
Fig. II.15: Répartition des densités du courant :(a) machine saine, (b) une seule barre cassées, (c) une barre cassées par pole, (d) deux barre cassées par pole opposé, (e) quatre barre cassées adjacentes.....	40
Fig. II.16: courants de phase de la machine avec defaults au rotor.....	41
Fig. II.17: comparaison de courant dans le cas sain et en présence des défauts.....	41
Fig. II.18: comparaison de couple dans le cas sain et en présence des défauts.....	41
Fig. II.19: comparaison de vitesse dans le cas sain et en présence des défauts.....	42
Fig. II.20: la Répartition des lignes équiflux a $t=1.5s$:(a)machine saine, (b) 20%d'excentricité, (c) 40% d'excentricité, (d) 60% d'excentricité.....	43
Fig. II.21: la Répartition de l'induction magnétique a $t=1.5s$:(a)machine saine, (b) 20%d'excentricité, (c) 40% d'excentricité, (d) 60% d'excentricité.....	44
Fig. II.22: La densité de courant dans les barres de rotor. A $t=1.5s$:(a)machine saine, (b) 20%d'excentricité, (c) 40% d'excentricité, (d) 60% d'excentricité.....	44
Fig. II.23: courant de phase avec défaut d'excentricité : (a) 20%d'excentricité, (b) 40% d'excentricité,(c)60%d'excentricité.....	45
Fig. II.24: courant de barre avec défaut d'excentricité : (a) 20%d'excentricité, (b) 40% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.....	45
Fig. II.25: couple avec défaut d'excentricité : (a) 20%d'excentricité, (b) 40% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.....	46
Fig. II.26: vitesse avec défaut d'excentricité : (a) 20%d'excentricité, (b) 40% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.....	46

Fig. II.27: la Répartition des lignes équiflux a $t=1.5s$: (a) saine, (b) défaut mixte.....	47
Fig. II.28: la Répartition de l'induction magnétique a $t=1.5s$:(a) saine, (b) défaut mixte.....	47
Fig. II.29: La densité de courant. à $t=1.5s$:(a) saine, (b) défaut mixte.....	47
Fig. II.30: Comparaison le courant de phase de la machine saine et défaut mixte (4BC adjacentes et exc 60%).....	48
Fig. II.31: Comparaison le courant de barre de la machine saine et défaut mixte (4BC adjacentes et exc. 60%).....	48
Fig. II.32: Comparaison le couple de la machine saine et défaut mixte (4BC adjacentes et 60% exc).....	48
Fig. II.33: Comparaison le vitesse de la machine saine et défaut mixte (4BC adjacentes et exc 60%).....	49
Fig. II.34: la Répartition des lignes équiflux à $t=1.5s$:(a)machine saine, (b) court circuit 20 spires, (c) court circuit 40 spires.....	49
Fig. II.35: Répartition de l'induction dans le circuit magnétique :(a) machine saine, (b) court circuit 20 spires, (c) court circuit 40 spires.....	50
Fig. II.36: la Répartition de densité de courant à $t=1.5s$:(a)machine saine, (b) court circuit 20 spires, (c) court circuit 40 spires.....	50
Fig. II.37: la comparaison de courant de la phase infecté.....	51
Fig. II.38: la comparaison des courants rotoriques.....	51
Fig. II.39: la comparaison de couple.....	51
Fig. II.40: la comparaison de vitesse.....	52
Fig. III.1 : Schéma de fonctionnement d'un rotor en défaut.....	55
Fig. III.2: (a) courant de phase statorique, (b) courant de phase dans le régime permanent....	55
Fig. III.3 : le spectre de courant statorique de 0 Hz à 1000 Hz et 0Hz à 100 Hz pour une machine saine.....	55
Fig. III.4 : le spectre de courant statorique pour une machine avec défaut de cassure de barre : (a) une seule barre cassée, (b) une barre cassées par pole, (c)deux barres cassées par pole opposé, (d) quatre barres cassées adjacentes.....	56
Fig. III. 5: le spectre de courant statorique de la machine avec défaut: (a) excentricité de 20%, (b) excentricité de 40%, (c) excentricité de 60%.....	59

Fig. III.6: le spectre de courant statorique de 0 Hz à 1000 Hz et 0 Hz à 100 Hz pour une machine avec défaut mixte (4BC adjacentes et excentricité 60%).....	60
Fig. III.7: le spectre de courant statorique de 0 Hz à 1000 Hz et 0 Hz à 200 Hz pour une machine avec défaut court circuit.....	61
Fig. III.8: Lignes de champ magnétique (équiflux) à l'extérieur de la machine saine et avec défaut de cassure de barre : (a) saine, (b) une seule barre cassées, (c) une barre cassées par pole, (d) deux barre cassées par pole opposé, (e) quatre barre cassées adjacentes.....	62
Fig. III.9: Lignes de champ magnétique (équiflux) à l'extérieur de la machine saine et avec défaut d'excentricité(a) machine saine, (b) excentricité de 20%, (c) excentricité de 40% et (d) excentricité de 60%.....	63
Fig. III.10: Lignes de champ magnétique (équiflux) à l'extérieur de la machine avec défaut mixte (4BC adjacentes et excentricité 60%).....	63
Fig. III.11: Lignes de champ magnétique (équiflux) à l'extérieur de la machine avec défaut de court circuit : (a) court circuit 20 spires, (b) court circuit 40 spires.....	64
Fig. III.12: le spectre de tension induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné dans une machine saine : bobine 01.....	64
Fig. III.13: le spectre de tension induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné dans une machine avec défauts cassure de barre : (a) une seule barre cassées, (b) une barre cassées par pole, (c) deux barre cassées par pole opposé, (d) quatre barre cassées.	65
Fig. III.14: les tensions induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné de machine avec défaut : (a) excentricité de 20%, (b) excentricité de 40%, (c) excentricité de 60%, (d) défaut mixte (4BC adjacentes et excentricité 60%).....	66
Fig. III.15: les spectres de tension induite E_c délivré par le capteur bobiné de la machine avec défaut court circuit : (a) court circuit 20spires, (b) court circuit 40 spires.....	66
Fig. III.16: les spectres de tension induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné de la machine saine et avec défaut de cassure de barre : (a) saine, (b) une seule barre cassées, (c) quatre barre cassées adjacentes.....	67
Fig. III. 17: les spectres de tension induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné de la machine avec défaut: (a) excentricité de 20%, (b) excentricité de 40%, (c) excentricité de 60%.....	68
Fig. III.18: les spectres de tension induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné de la machine avec défaut mixte (4BC adjacentes et excentricité 60%).....	69

Fig. III.19: les spectres de tension induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné de la machine avec défaut court circuit : (a) court circuit 20spires, (b) court circuit 40 spires.....**70**

Liste de tableaux

Tableau. II .1: Caracteristique de la machine etudiee.....	33
Tableau. II. 2: B(H) Du materiau magnetique fer.....	34
Tableau.III.1: les amplitudes des composantes $(1 \pm 2g)*f_s$ et $(1 \pm 4g)*f_s$, pour les différentes nombre et position des barres cassées.....	57

Liste des Notations et Symboles

MAS : Machine asynchrone.

CEMC : la Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.

CEMC-A : la Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés analytique.

RNM : la méthode des réseaux de permanées.

CIE : le Modèle à circuits internes équivalents.

MEF : Méthode des éléments Finis.

FFT : (Fast Fourier Transform).

BC : barre cassée.

exc : excentricité.

CC : court circuit.

\vec{E}	Vecteur champ électrique	[v /m]
\vec{H}	Vecteur champ magnétique	[A /m]
\vec{B}	Vecteur induction magnétique	[T]
\vec{D}	Vecteur de déplacement électrique	[C /m ²]
ρ	Densité de charge volumique	[C /m ³]
\vec{J}_c	Vecteur de densité de courant de conduction	[A /m ²]
ϵ	Permittivité électrique	[F/m]
μ	Perméabilité magnétique	[H/m]
σ	Conductivité électrique	[S/m]
\vec{J}	Vecteur de densité de courant total	[A /m ²]

ε_0	Permittivité dans le vide	[F/m]
μ_r	Perméabilité relative	
μ_0	Perméabilité du vide	[H/m]
V	Potentiel scalaire magnétique	[T.m]
\vec{B}	Induction rémanente	[T]
ν	Reluctivité magnétique	[H /m] ⁻¹
\vec{A}	Vecteur potentiel magnétique	[T.m]
\vec{A}_e	Vecteur potentiel magnétique dans un élément	[T.m]
m	Nombre de phases	
q	Nombre des barres	
w_1	Nombre de tours par phase	
R_1	Résistance d'une phase statorique	[Ω]
$L_{\sigma 1}$	Inductance de fuite statorique	[H]
L_m	Inductance de magnétisation	[H]
R_m	Résistance correspondant aux pertes fer	[Ω]
L'_2	Inductance de fuite rotorique	[H]
R'_2	Résistance rotorique	[Ω]
I_{1n}	Courant nominale du moteur	[A]
n_s	La vitesse de synchronisme	tr /s

n_r	La vitesse mécanique	tr /s
n_m	Vitesse correspond au glissement critique	tr /min
p	Nombre de pair de pole	
N_n	La vitesse nominale du moteur	tr /min
P_n	Puissance utile nominale du moteur	[W]
Q_l	Puissance réactive absorbé par le moteur	[W]
M	Coule utile du moteur	[N.m]
M_{en}	Couple électromagnétique nominale	[N.m]
M_{es}	Couple électromagnétique de démarrage	[N.m]
M_{em}	Couple électromagnétique maximale	[N.m]
g_n	Glissement nominale	
g_m	Glissement critique	

Introduction générale

Le moteur asynchrone à cage d'écureuil et nommé souvent le “workhorse” de l'industrie en raison de sa robustesse et polyvalence. Cependant, il a ses limites, qui, ont pour conséquence les défauts prématurés du stator ou du rotor.

Les industriels sont de plus en plus confrontés à la sûreté de fonctionnement des outils de production. Cette demande en termes de sûreté est motivée par des impératifs de production et se trouve actuellement au niveau des cahiers de charges imposés par les industriels à leurs fournisseurs. Ce n'est plus seulement le produit qui est vendu mais l'assurance d'un taux de disponibilité garanti.

Ces contraintes imposées par le marché nécessitent un changement dans la politique de la maintenance. Celle-ci qui était principalement corrective dans les applications standard et préventive dans les applications critiques [1].

La surveillance d'un dispositif implique le diagnostic des défaillances: il consiste en la détection d'un changement anormal dans le comportement ou dans l'état d'un système et dans la localisation de sa cause. Les systèmes de surveillance et de diagnostic peuvent être mis en œuvre en cours d'exploitation (en ligne) ou pendant les phases normales d'arrêt d'exploitation (hors ligne). En cours d'exploitation, le but est de garantir la sécurité et la continuité de service et d'enregistrer les événements utiles pour la maintenance curative. En arrêt d'exploitation, l'objectif est d'évaluer le degré de vieillissement de certains éléments, de décider d'une opération de maintenance préventive ou curative [1].

Le travail proposé s'attarde sur le diagnostic des machines asynchrones triphasé à cage d'écureuil. La croissance de ce type de machines électrique, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la trouvons maintenant dans tout les domaines industriels.

C'est dans cette optique que ce mémoire est orienté. Il s'intéresse, en effet, à la surveillance et au diagnostic des défauts du moteur asynchrone, en l'occurrence les défauts statorique et

rotorique. Elle s'appuie sur des compétences dans les domaines des machines électriques et de traitement du signal.

Notre premier objectif en abordant ce mémoire était la compréhension et l'analyse des défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone. Alors que la recherche et le développement d'outils de surveillance et de diagnostic des défauts fut notre second objectif et qui a été abordé avec soin dans le dernier chapitre.

Pour ce faire trois chapitres sont agencés de la manière suivante :

Dans le premier chapitre nous allons présenter la constitution de la machine asynchrone et aussi leurs différentes défaillances qui peuvent se produire sur ce type de machine ainsi qu'une rappelle sur les méthodes de modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage en présence de défauts. Par la suite nous allons donner un état de l'art sur les méthodes de diagnostic des machines asynchrones.

Le deuxième chapitre consacré à la présentation du modèle de simulation par la méthode des éléments finis, sous logiciel Flux 2D[®], pour analyser le comportement de la machine en absence et en présence de défaillances.

Au troisième chapitre, nous allons proposer une procédure de détection des défauts dans la machine asynchrone, basée sur l'analyse spectrale du courant statorique (FFT) et l'analyse de champs de dispersion (champs de fuite).



**Chapitre I : état de l'art de diagnostic
des machines asynchrones**

Chapitre I état de l'art de diagnostic des machines asynchrones

I.1. Introduction

Ce chapitre introductif nous permet de situer notre démarche par rapport aux autres travaux de recherche dans le domaine du diagnostic des machines asynchrones. Au début, il rappelle la constitution de la machine asynchrone, ainsi que les principaux défauts électriques qui peuvent la toucher. Ensuite nous abordons les différentes techniques de modélisation et qui ont initiées notre démarche en mettant l'accent sur la spécificité de ces méthodes en termes de précision et de complexité de mise en œuvre. Puis, les méthodes de diagnostic les plus fréquemment utilisées sont décrites. À la fin nous allons donner une rappelle théoriques sur le champ magnétique de dispersion.

I.2. La machine asynchrone

La machine asynchrone (MAS) est par excellence la machine la plus répondeuse 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, 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....) [2].

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 deux dernières décennies [2].

I.2.1. Eléments de constitution de la machine asynchrone

La connaissance des éléments de constitution des machines asynchrones permet de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

- ✓ le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique ;
- ✓ le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique ;
- ✓ les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.

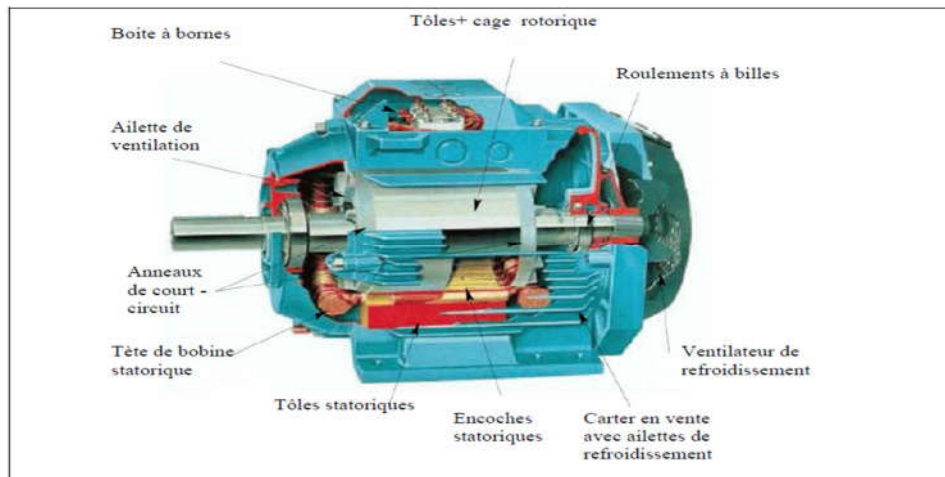


Fig. I.1. Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [2].

I.2.1.1. stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statorique. Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique. [3].



Fig. I.2. Structure du stator [3].

I.2.1.2. Rotor à cage

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor figure (I.3). 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.

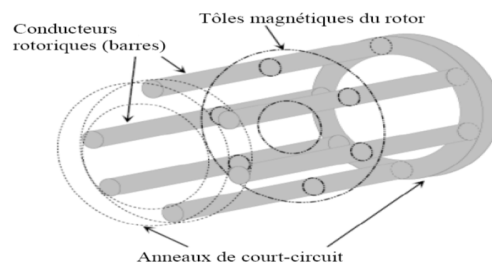


Fig. I.3. Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit) [3].

I.2.1.3. Les 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 efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire) [4].

I.2.2. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni par un réseau triphasé équilibré de pulsation ω_s aux enroulements statoriques, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ magnétique tournant (loi de LENZ). Cette interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor [5].

Dans la MAS, l'onde du champ tournant se déplace dans l'entrefer de la machine avec une vitesse de rotation nommée vitesse de synchronisme Ω_s . Elle est liée à la fréquence d'alimentation f_s par l'expression suivante :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = 60 * \frac{f_s}{p} \quad (\text{tr/min}) \quad (\text{I.1})$$

Ou f_s : fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation [HZ].

P : le nombre de paires de pôles.

Un rotor en court-circuit, balayé par ce champ tournant, sera traversé par des courants induits (courant de Foucault), ce qui soumet ce dernier à des forces électromagnétiques de Laplace. L'ensemble de ces forces crée un couple moteur qui mettra le rotor en rotation (voir figure I.4), le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant, sa vitesse de rotation est légèrement inférieure à celle du champ tournant ($\Omega < \Omega_s$) [5].

En effet, Il existe donc toujours une différence de vitesse entre le stator et le rotor .cette différence s'appelle le glissement (g) qui est une caractéristique particulière de la MAS. Il est défini comme étant l'écart de vitesse entre la vitesse de synchronisme (Ω_s) et la vitesse de rotation du rotor (Ω). Le glissement (g) est alors donné par :

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

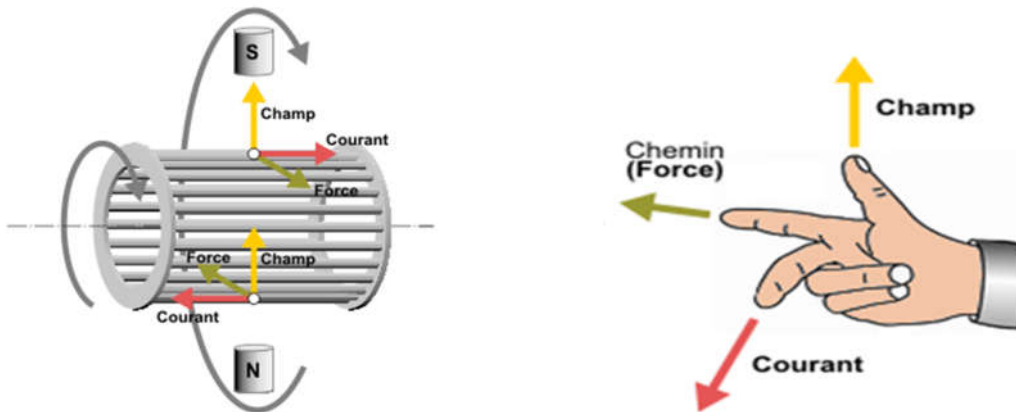


Fig. I.4. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage [5].

I.3. 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 [6] :

- 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 [7] sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance de 50kW à 200kW a donné les résultats suivants figure (I.5) :

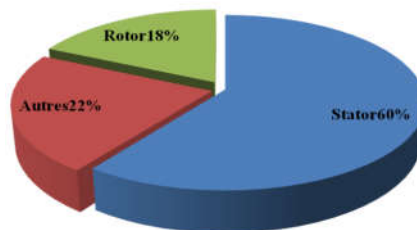


Fig. I.5. Proportion du défaut [7].

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

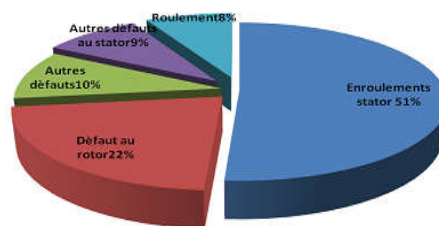


Fig. I.6. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances [8].

I.3.1. Défaillances au stator

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème :

- thermique (surcharge,...)
- électrique (diélectrique,...)
- mécanique (bobinage,...)
- environnemental (agression,...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

I.3.1.1. 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 des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, Ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- vibrations mécaniques.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- 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.
- fonctionnement dans un environnement sévère.

I.3.1.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statorique dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit).

Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.



Fig. I.7. Court-circuit entre spire [8].

I.3.1.3. Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit (fig. I.7) proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statorique sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux

sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.

I.3.1.4. Court-circuit phase/bâti

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit.

Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas.

Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut.

I.3.1.5. Défaux de circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc.

I.3.2 .Défaillances au rotor

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- thermique (surcharge,...)
- électromagnétique (force en $B^2(t)$,...)
- résiduel (déformation,...)
- dynamique (arbre de transmission,...)

- mécanique (roulement,...)
- environnemental (agression,...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

I.3.2.1. Ruptures de barres

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [9], [10].



Fig. I.8. Ruptures de barres [9].

I.3.2.2. Ruptures d'anneaux

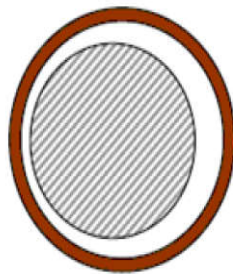
La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter [7], ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants

que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

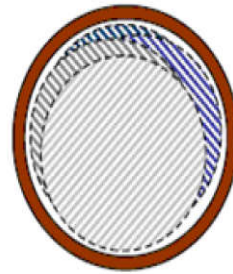
La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statorique similaire à celui provoqué par la cassure de barres.

I.3.2.3. Excentricité statique et dynamique

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se



Excentricité statique



Excentricité dynamique

(plusieurs positions du rotor au cours de la rotation)

Fig. I.9. Excentricité statique et dynamique.

traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor, Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Trois cas d'excentricité [11], [12] sont généralement distingués :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités.

Ce défaut modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système.

Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

I.3.3. Défaillances mécaniques

I.3.3.1. Défauts roulements

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et d'assurer une bonne rotation du rotor. Dans l'article [13], l'auteur présente la plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement. Comme il a été présenté précédemment, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles :

- l'usure due au vieillissement
- la température de fonctionnement élevée
- la perte de lubrification et l'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement)
- le défaut de montage
- les courants d'arbres (court circuit)

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures
- l'attaque des billes
- la corrosion due à l'eau
- défaut de graissage, problème dû à la température

- décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge

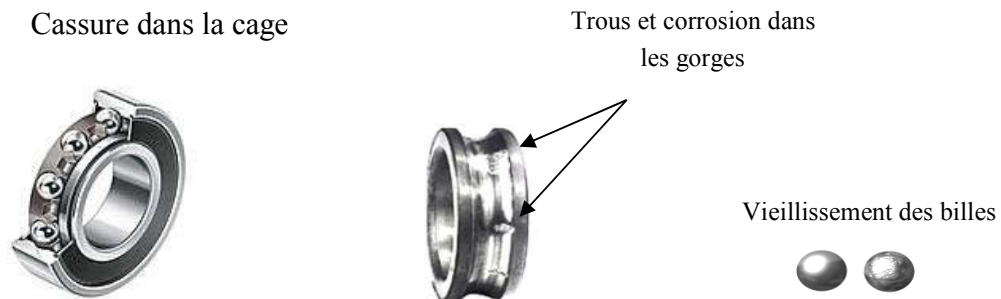


Fig. I.10. Différentes défaillances des roulements à billes [13].

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur.

I.3.3.2. Autres défaillances mécaniques

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc a priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydabilité à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs.

I.4. Méthodes de modélisation des machines asynchrones

Nous exposons les principales méthodes de modélisation fine de la machine asynchrone à cage défectueuse comme la méthode circuits internes équivalents, la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés, la méthode des réseaux de perméances ainsi que la méthode des éléments finis.

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

I.4.1. Modélisation par les équations magnétiquement couplés (CEMC)

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

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

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

Le rotor est représenté par un circuit électrique comportant des mailles magnétiquement couplés comme le montre la figure (I.8) [14, 15].

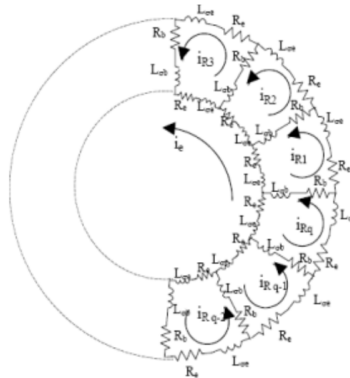


Fig. I.11.Schéma électrique équivalent à la cage rotorique [14].

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

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

La première hypothèse peut cependant être partiellement contournée par l'introduction de l'onde fondamentale de saturation dans l'expression de la perméances de l'entrefer Permettant ainsi la prise en compte de la chute de tension magnétique (f.m.m.) dans le fer [16]. Quand à la troisième hypothèse, il faut dire qu'elle est partagée par toutes les méthodes de modélisation tant les courants inter-bars sont difficiles à prendre en compte de façon locale.

I .4.4. Méthode des réseaux de perméances (RNM)

La méthode des réseaux de perméances [17] est basée sur la décomposition du circuit magnétique étudié en tubes de flux, chaque tube étant caractérisé par sa perméance.

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

Ainsi, la machine asynchrone peut être décomposée en une association de circuits élémentaires, composés d'une dent, d'une encoche et de la portion de culasse concernée. Un circuit élémentaire est modélisé par trois perméances (perméance de dent, perméance de culasse et perméance de fuite de pied d'encoche) et une source de (f.m.m) (Fig. I.12).

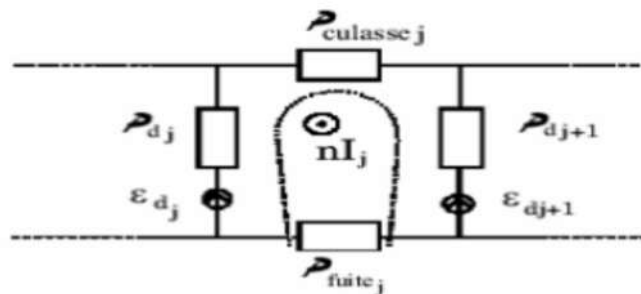


Fig. I.12. Réseau de perméances élémentaire autour d'encoche statorique [17].

Toutes les valeurs de perméances sont calculées par le biais d'une simulation avec la méthode des éléments finis en magnétostatique et il est possible de prendre en compte la saturation magnétique. La mise en équations, l'obtention et la résolution du système d'équations différentielles non linéaires qui décrit le comportement électromagnétique et dynamique du système, ont déjà été présentées dans [18] ainsi que le logiciel de simulation par réseaux de perméances couplés électriquement (SiRe PCE) qui a été développé dans l'environnement MATLAB.

I.4.5. Méthode des éléments finis (MEF)

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

Cependant, compte tenu de sa grande consommation en temps de calcul, la MEF, dans le domaine du diagnostic de la machine asynchrone, est souvent utilisée dans le but de comprendre et de quantifier les conséquences locales d'un défaut sur les différents constituants de la machine [16, 19].

Ainsi et à titre d'exemple, la MEF est une méthode très bien adaptée à l'étude des effets locaux du défaut de rupture de barres de la cage rotorique. De même, la MEF sert à mieux appréhender les impacts magnétiques et thermique locaux du défaut de court-circuit inter-spires dans les phases statoriques.

I.5. Présentation des différentes méthodes de diagnostic

Un système de diagnostic de défauts consiste en trois étapes :

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

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

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées car elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés. Sur un problème un peu complexe, il n'est d'ailleurs pas rare de devoir utiliser plusieurs méthodes qu'on peut classer selon le schéma de la Figure (I.13). [20].

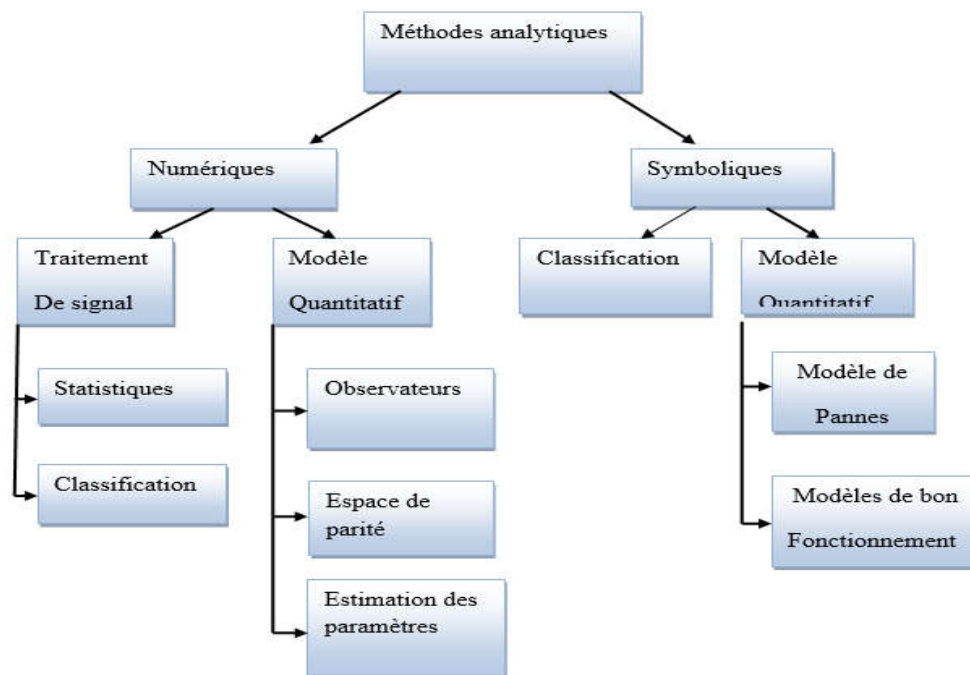


Fig. I.13. Méthodes analytiques de diagnostic des défauts [20].

I.5.1. Approche modèle

Cette méthode est basée sur l'estimation des signaux non mesurables ou sur le suivi des paramètres durant le fonctionnement [21, 22, 23, 24]. Elles supposent une connaissance

approfondie du procédé sous forme de modèle numérique. Dans le cas de la machine asynchrone, une modélisation dans le référentiel triphasé ou biphasé équivalent est nécessaire.

Des paramètres (mécaniques ou électriques) de ces modèles sont relevés et utilisés pour avoir une signature des défauts. On teste la cohérence entre les mesures et les calculs des modèles par des grandeurs caractéristiques de l'état du procédé, appelées résidus. Le vecteur des résidus, nul en fonctionnement normal, est comparé en ligne aux signatures de pannes. Selon ce mécanisme de diagnostic, on distingue :

- le diagnostic par les observateurs [25]
- le diagnostic par redondance analytique (espace de parité)
- le diagnostic par estimation paramétrique [25, 26, 27].

I.5.1.1. Diagnostic à l'aide des observateurs

Le principe de cette méthode est d'utiliser les erreurs d'estimation sur les sorties comme résidus. L'objectif est de construire des résidus structurés c'est-à-dire menant à la localisation des défauts. Dans certains cas l'utilisation de plusieurs observateurs, mis en batterie, peut être nécessaire pour garantir la localisation des défauts. [25].

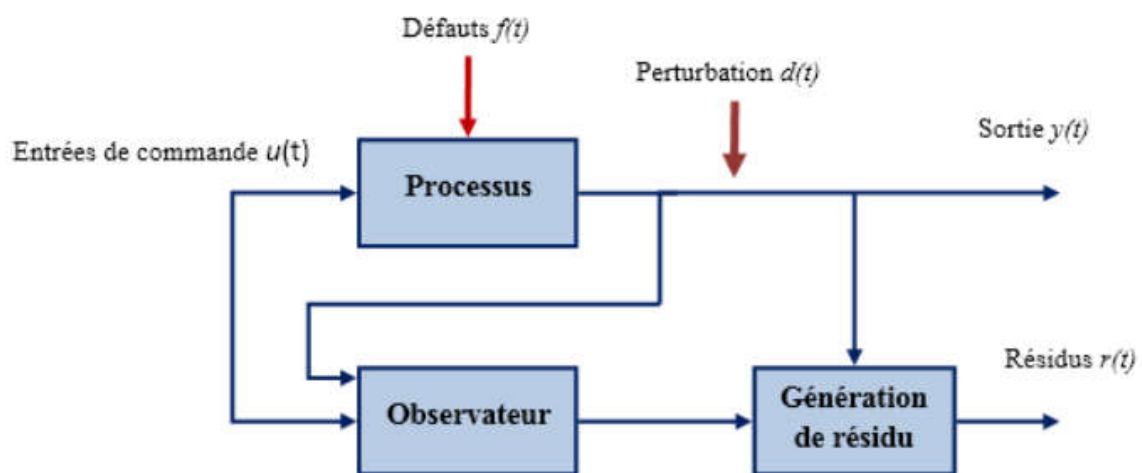


Fig. I.14. Méthodes de diagnostic par les observateurs [25].

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

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

La philosophie de cette approche est d'exploiter la redondance analytique existant dans les équations d'état lorsque celles-ci sont écrites sur un horizon d'observation. Le vecteur de résidus est alors généré en projetant les mesures observées sur cet horizon dans un espace appelé espace de parité [28].

I.5.2. 3. Diagnostic par estimation paramétrique

La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique consiste à identifier les paramètres physiques (ou structuraux lorsque les grandeurs physiques ne sont pas accessibles) contenus dans le modèle de connaissance du système. Ce modèle mathématique doit contrairement au cas précédent, pouvoir caractériser les fonctionnements sains et en présence de défaut. Un défaut étant à l'origine d'une variation paramétrique, l'estimation des paramètres du modèle permet d'indiquer la présence d'un déséquilibre dans la machine. Quant aux algorithmes d'identification paramétrique, ils doivent respecter deux contraintes très restrictives et fortement corrélées :

- une excitation persistante très riche, difficilement compatible avec un procédé en fonctionnement ;
- un nombre limité de paramètres à estimer.

Comme exemple, on peut citer le suivi des paramètres électriques de la machine asynchrone qui permet de détecter des défauts rotorique [29,30] et du court-circuit statorique

I.5.2. Approche signal

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

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

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

- les courants absorbés,
- le flux de dispersion,
- les tensions d'alimentation,
- la tension du neutre (neutre alimentation - neutre machine),
- le couple électromagnétique,
- la vitesse rotorique, les vibrations.

Les outils de traitement du signal font appel à des méthodes statistiques (change- ment de moyenne, rupture de modèle, analyse spectrale, analyse temps-fréquence ondelettes [24]) ou bien à des méthodes de reconnaissance de formes [25] qui permettent de classer les signatures de défauts. Il faut dans ce cas disposer de suffisamment d'expériences pour pouvoir constituer une base d'apprentissage. C'est dans ce cadre qu'entrent les réseaux de neurones. Les approches de classification se retrouvent également si l'on caractérise les situations avec des attributs symboliques.

I-5. Champ de dispersion des machines à courant alternatif

Dans une machine électrique tournante, le flux de fuite est créé par différents éléments de la machine. Une répartition de ces lignes de champ est donnée dans la figure (I.15).

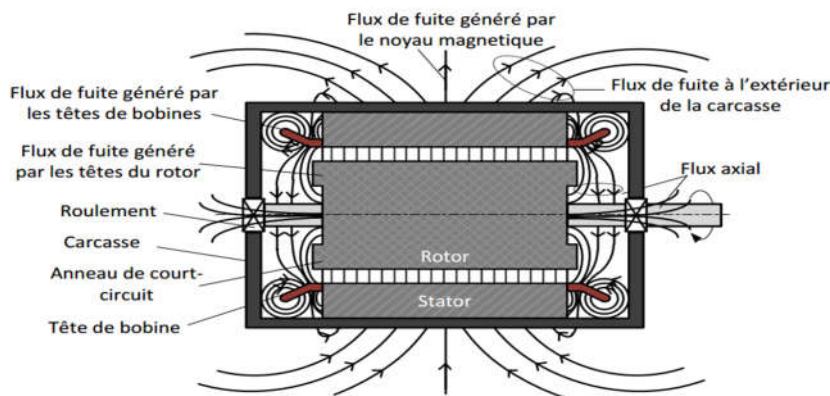


Fig. I.15. Répartition de lignes de flux de fuite dans une machine électrique [31].

D'après la répartition des lignes de champ, on peut décomposer le champ extérieur en de deux parties appelées champs externes axial et radial. Ces deux champs se combinent pour

former le champ de dispersion : le champ axial situé dans un plan qui comprend l'axe de la machine, il est généré par les courants dans les têtes de bobines de la machine (ou l'anneau de court-circuit) ; le champ radial situé dans un plan perpendiculaire à l'axe de la machine, c'est une image de l'induction d'entrefer qui est atténuée par le circuit magnétique statorique (paquet de tôles) et par la carcasse extérieure de la machine. Le champ radial peut être décomposé en composante normale et composante tangentielle. Il peut contenir une composante provenant des têtes de bobines comme indique sur la figure (I.16) [31].

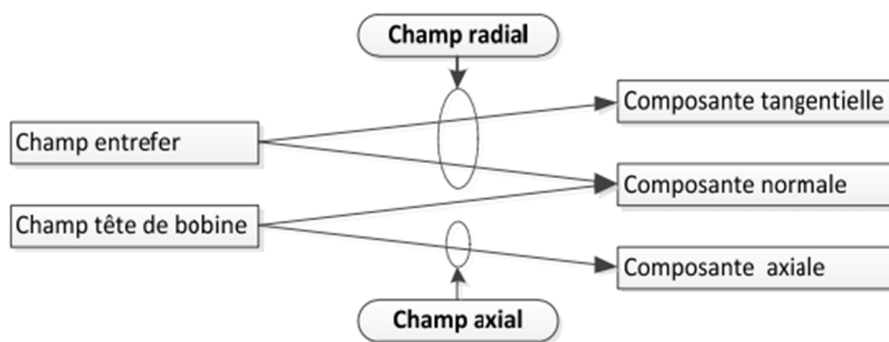


Fig. I.16. Parties du champ extérieur [31].

Le flux de dispersion peut donner une information sur la présence d'un défaut, parfois la localisation de celui-ci. D'un point de vue diagnostic, l'avantage des méthodes basées sur la mesure du champ de dispersion est qu'elles sont non invasives. Ces méthodes sont simples à mettre en œuvre, elles consistent à disposer un capteur à la périphérie du moteur et de récupérer le signal du champ de fuite (voir figure I.7), selon la position du capteur, le champ mesuré n'émane pas forcément du même endroit, et ne résulte, par conséquent, pas forcément du même phénomène physique [31].

La figure (I.17) montre les différentes possibilités de mesure du champ de dispersion à l'aide d'un capteur bobiné.

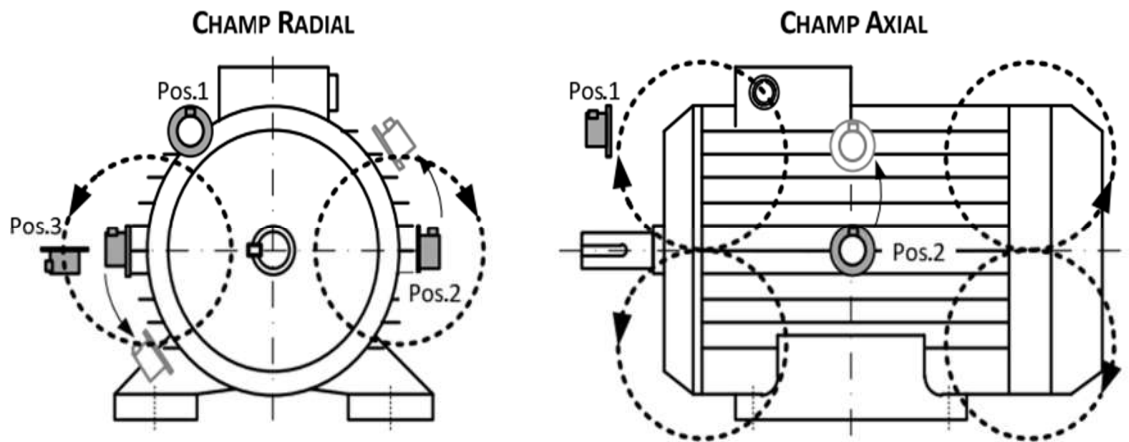


Fig. I.17. Mesure de champ de dispersion [31].

Du fait de la circulation supposée des lignes de champ, le capteur sera plus sensible au champ axial ou radial, selon la position de cette bobine sur le pourtour de la machine.

Si la bobine est plaquée en position 1 (Pos.1), elle va mesurer le champ axial. Dans ce cas l'amplitude du flux mesuré est maximale au niveau des flasques (près des têtes de bobines), et que le minimum se situe au milieu de la longueur de la machine ; ce minimum étant pratiquement nul.

Si la bobine est plaquée en position 2 (Pos.2), elle va mesurer le champ radial, mais elle peut également embrasser une partie du champ axial selon que le capteur est plus ou moins éloigné des têtes de bobines.

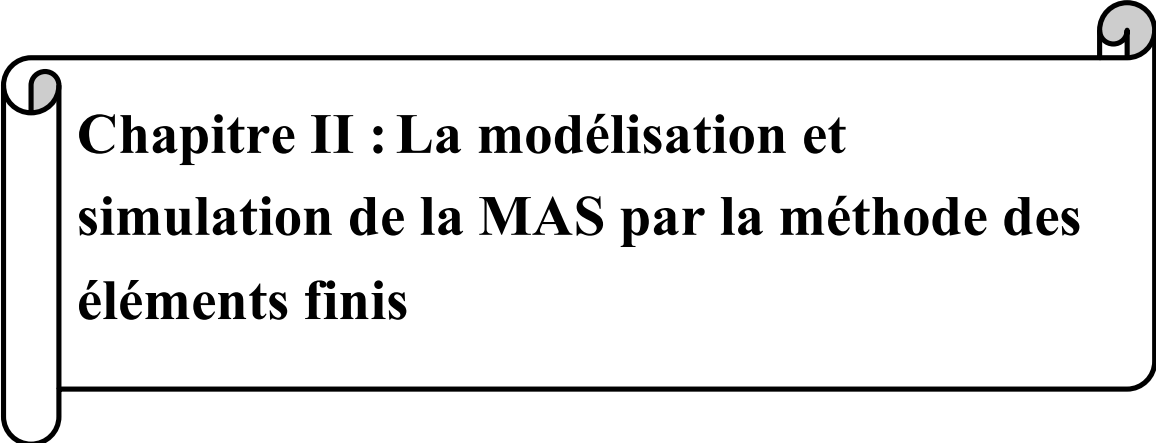
La position 3 (Pos.3) correspond à la mesure du champ qualifié de "radial pure" puisque, en théorie, aucune ligne de champ axial ne peut traverser la section du capteur bobiné dans cette position [31].

I.6. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons montré que les principaux éléments de la constitution d'une machine asynchrone triphasée peuvent présenter des défaillances qui peuvent induisent un arrêt intempestif de la machine, aussi des études statistiques ont été présentées pour illustrer l'impact de ces défauts dans le domaine industriel, et dans le deuxième partie différentes méthodes de modélisation et de diagnostic de la

machine asynchrone triphasée ont été présentées. En fin nous avons terminé notre chapitre par une description sur le champ magnétique de dispersion dans les machines électriques.

L'objectif de deuxième chapitre est la modélisation simulation de la machine asynchrone saine et avec différents défauts par la méthode des éléments finis.



**Chapitre II : La modélisation et
simulation de la MAS par la méthode des
éléments finis**

Chapitre II : La modélisation et simulation de la MAS par la méthode des éléments finis

II.1. Introduction

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone a fait l'objet de nombreux travaux, que ce soit dans le but de conception, de la commande ou le diagnostic. La diversité des objectifs a fait paraître plusieurs techniques de la modélisation et des outils de la simulation selon le domaine étudié.

Mais ces outils sont souvent trop spécifiques à une topologie ou à une machine bien déterminée. Il serait, cependant, intéressant de disposer d'un outil simple et générique, pouvant servir comme un banc d'essai pour les machines électriques, que ce soit en mode sain ou en présence de défaut d'excentricité et casseur de barre rotorique.

Dans ce chapitre nous présenterons la simulation des défauts dans la machine asynchrone, par la méthode des éléments finis, sous logiciel Flux 2D®.

II.2. 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, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques, lorsque le problème est correctement posé (géométrie, physique, lien avec les équations de circuit...) et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de 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.

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 [32]:

- Les relations de couplage électromagnétique :

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

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

- Les relations de la conservation des flux :

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

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

- La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

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

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

- La relation de la loi d'Ohm :

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

Où,

\vec{H} : Champ magnétique (A/m)

\vec{E} : Champ électrique (V/m)

\vec{B} : Induction magnétique (T)

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

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

μ : Perméabilité magnétique (H/m)

σ : Conductibilité électrique ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)

II.2.1. Principe de la méthode des éléments finis

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, Le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être approchée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), dont l'expression varie d'un type à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurées la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [33].

Pour élément triangulaire on a :

$$A_e(x, y) = a + bx + cy \quad (\text{II.8})$$

Pour les éléments quadrilatéral on a:

$$A_e(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (\text{II.9})$$

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

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

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{ne} A_e(x, y) \quad (\text{II.10})$$

e : Numéro d'élément.

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

Le potentiel en tous points d'un élément ainsi que la densité de courant sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets (Fig. II.1).

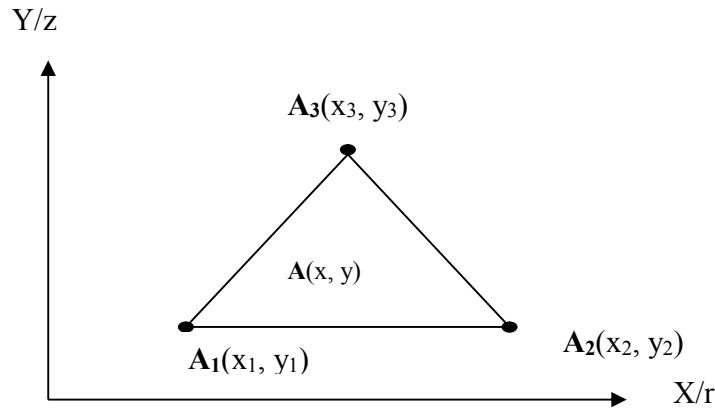


Fig. II.1: Fonction d'interpolation d'un élément.

II.2.2. Le mode magnétique transitoire

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

Donc le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{rot}(v.\overrightarrow{rot}A) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{rot}B_r + \sigma \overrightarrow{grad}V = O \quad (\text{II. 11})$$

II.3. Logiciel de résolution

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution : introduction des données géométriques et des propriétés physiques ; maillage ; résolution ; exploitation des résultats ; sont séquentiellement exécutées [33].

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

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

formulation est implantée dans le logiciel d'éléments finis Flux 2D que nous allons présenter dans ce qui va suivre.

II.3.1. Présentation de logiciel Flux 2D

Méthode des éléments finis. Il permet le calcul des états magnétiques, électriques et thermiques des dispositifs en régimes permanents et transitoires ou harmoniques, avec des fonctionnalités d'analyse multiparamétrique étendues, les couplages circuit et cinématique.

Le Flux 2/3D est développé (en collaboration avec le G2ELab, fusion du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, du Laboratoire d'Électrostatique et Matériaux Diélectrique et du Laboratoire de Magnétisme du Navire) et distribué en France par la société CEDRAT S.A. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits, [34].

Les principaux modules permettant la simulation de tous systèmes physiques à l'aide de FLUX 2D sont présentés :

- **Module préprocesseur** : Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie du dispositif à étudier (PREFLU), de choisir et/ou de construire une banque de matériaux (CLSMAT), d'affecter les propriétés physiques aux différentes régions géométriques prédéfinie (PROPHY) et de définir le schéma et/ou les données du circuit électrique (CIRFLU). Il permet également un maillage automatique d'une géométrie 2D prédéfinie (PREFLU).
- **Module processeur** : Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER 2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.
- **Module post-processeur** : c'est une module (Post-Pro 2D) 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 prédéfinie. 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. Les développements informatiques de ce travail ont tous été réalisés en utilisant FLUX 2D, logiciel de calcul des champs par éléments finis. Ces développements à consistés à implanter les formulations présentées dans le chapitre précédent et à intégrer les lois de comportements.

La **figure (II.2)** présente la démarche générale utilisée pour implémenter le modèle éléments finis à l'aide de FLUX 2D.

Cette démarche est détaillée dans l'étape suivante :

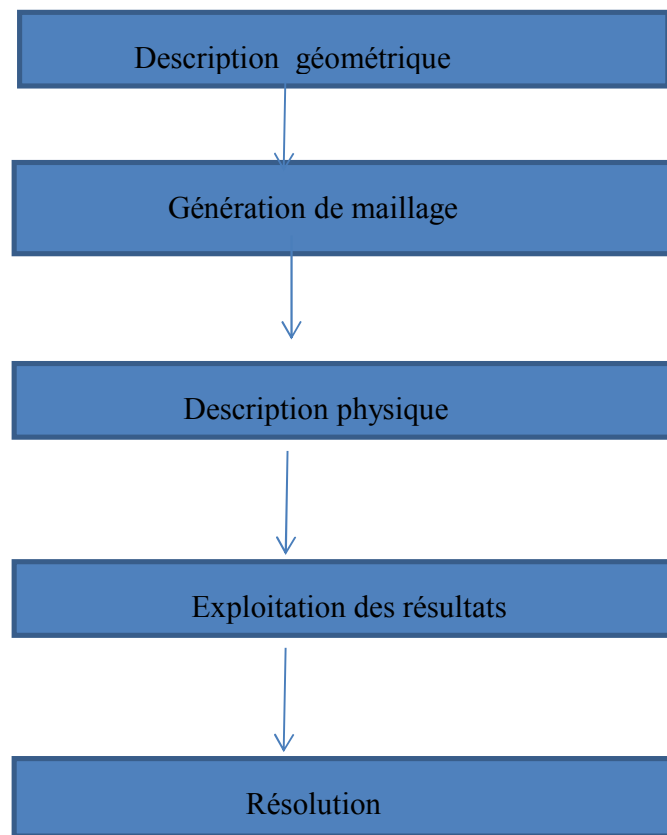


Fig. II.41: Démarche générale pour l'implémentation du modèle en Flux, [35].

II.4. Application à la simulation de la machine asynchrone

Les caractéristiques de la machine asynchrone étudiée sont données dans le tableau (II.1).

<i>Partie</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Valeur</i>	<i>unité</i>
<i>Machine</i>	<i>Puissance nominale</i>	2.2	<i>kW</i>
	<i>Tension nominale</i>	220	<i>V</i>
	<i>Vitesse nominale</i>	1440	<i>tr/min</i>
	<i>Nombre de pôles</i>	4	
	<i>Fréquence</i>	50	<i>Hz</i>
	<i>Longueur active</i>	97	<i>mm</i>

Stator	<i>Nombre de phases</i>	3	
	<i>Type de connexion</i>	Y	
	<i>Nombre d'encoches</i>	36	
	<i>Diamètre interne</i>	99	mm
	<i>Diamètre externe</i>	173	mm
Rotor	<i>Diamètre externe</i>	98.67	mm
	<i>Diamètre interne</i>	34	mm
	<i>L'épaisseur de l'entrefer</i>	0.33	mm
	<i>Nombre de barres</i>	48	

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

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

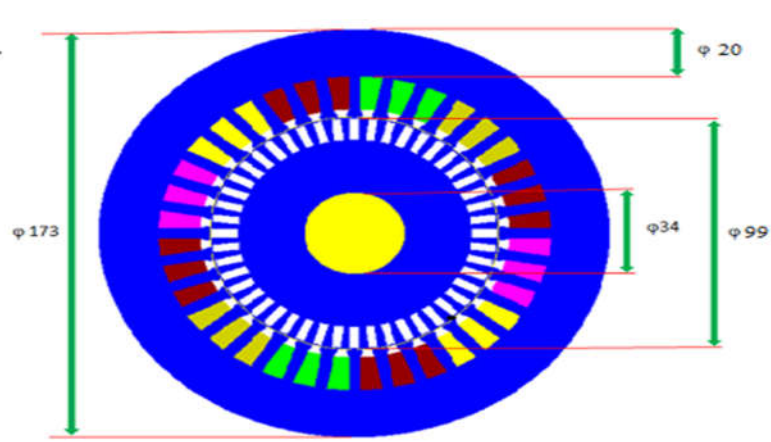


Fig. II.42: géométrie de la machine étudiée.

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

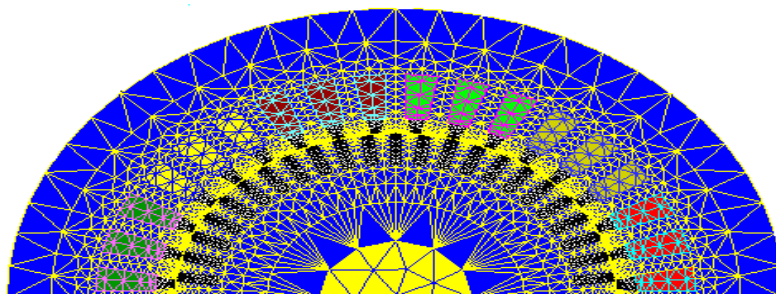


Fig. II.43: Répartition du maillage.

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

II.4.1. Les matériaux conducteurs

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

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

II.4.2. Les matériaux magnétiques

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

H [A /m]	B [T]	H [A /m]	B [T]	H [A /m]	B [T]	H [A /m]	B [T]
0	0	400	1.1	3000	1.57	30000	1.98
100	0.2	500	1.18	4000	1.6	40000	2.06
120	0.38	700	1.28	5000	1.63	50000	2.12
160	0.62	900	1.34	7500	1.7	70000	2.2
200	0.78	1000	1.37	10000	1.75	80000	2.23
250	0.92	1400	1.39	15000	1.84	90000	2.28
300	1.01	2000	1.5	20000	1.9	95000	2.3

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

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

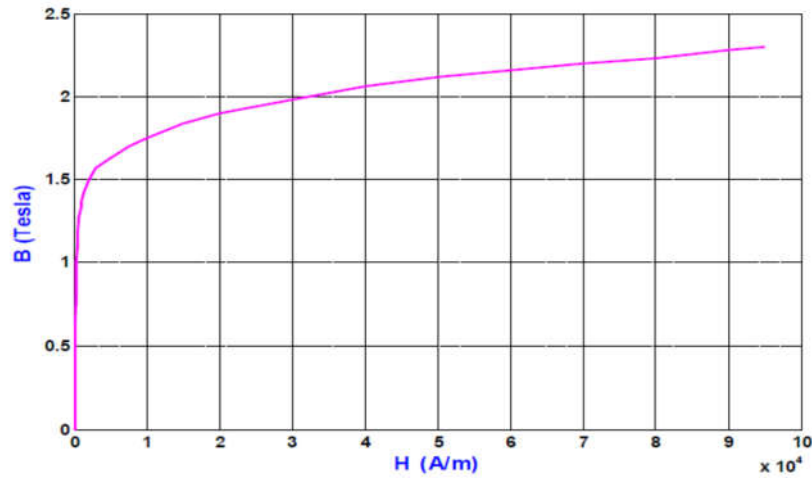


Fig. II.5: Caractéristiques B(H) du matériau magnétique fer.

II.4.3. Couplage avec les équations de circuit

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

- Les sources de tension d'alimentation (V_U, V_V, V_W) ;
- Le bobinage statorique (B_U, B_V, B_W) ;
- Les inductances de fuite, (L_U, L_V, L_W)
- Les résistances de chute de tension dans le réseau (R_U, R_V, R_W) sont négligeables ;
- Les résistances des voltmètres pour mesurer la tension statorique $R1, R2, R3$ sont également négligeables.

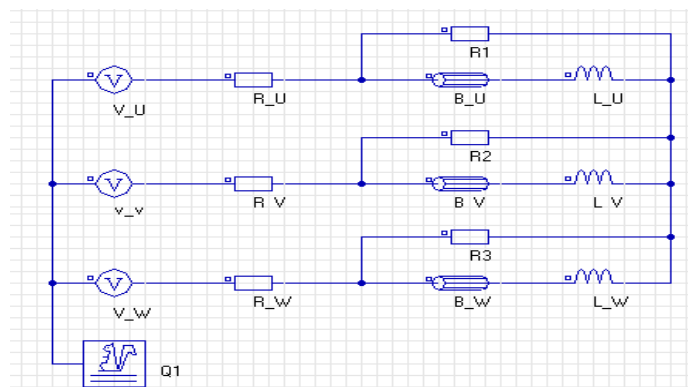


Fig. II.6: Circuits représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.

II.5. Résultats de simulation

II.5.1. Résultats graphiques

Le résultat de simulation ci-dessous représente la répartition des lignes équiflux et l'induction dans la machine pour le fonctionnement nominal.

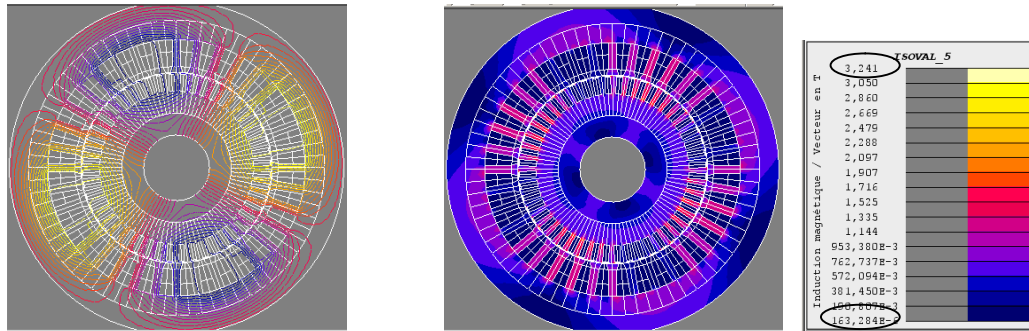


Fig. II.7: Répartition des lignes équiflux et l'induction magnétique pour le fonctionnement nominale à $t=1.5s$.

D'après les résultats précédents on remarque que la répartition des lignes équiflux et l'induction est quasi symétrique par rapport à l'axe de symétrie des pôles de la machine.

La figure (II.8) représente la densité de courant dans les barres de rotor au fonctionnement nominal.

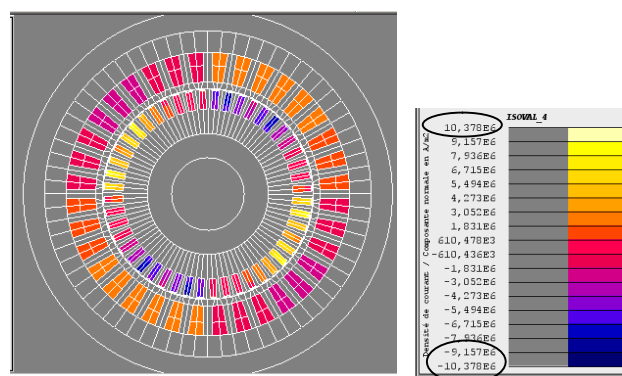


Fig. II.8: Densité du courant dans les barres au fonctionnement nominale à $t=1.5s$

On constate aussi que la répartition de courants rotorique est symétrique.

II.5.2. Analyse des caractéristiques de la machine

Après un régime transitoire (Fig. II.9) d'environ 0.172s durant lequel la machine se magnétise,

Les courants au stator atteignent le régime permanent à vide la valeur de 2.57A et atteint la valeur de 4.24A après l'application de la charge à $t=0.4$. Les figures (II.10, II.11) représentent le couple électromagnétique et la vitesse de la machine, on remarque que le couple prend des grandes valeurs dans le régime transitoire et se stabilise au régime permanent à une valeur de 14.35N.m et la vitesse atteint au régime permanent la valeur nominale 1421tr/mn.

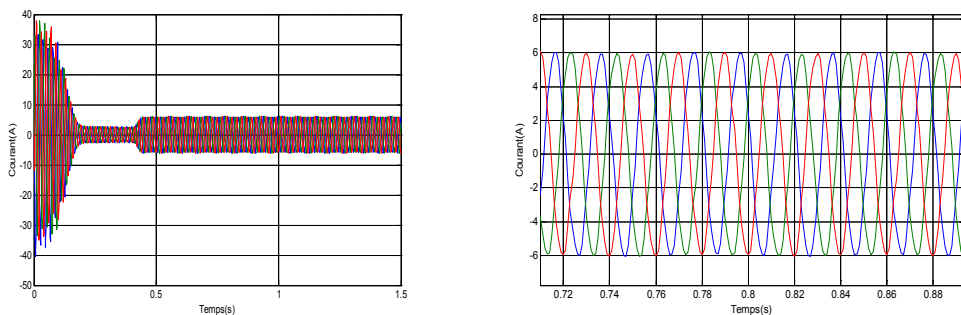


Fig. II.9: Courant de phase en fonction du temps.

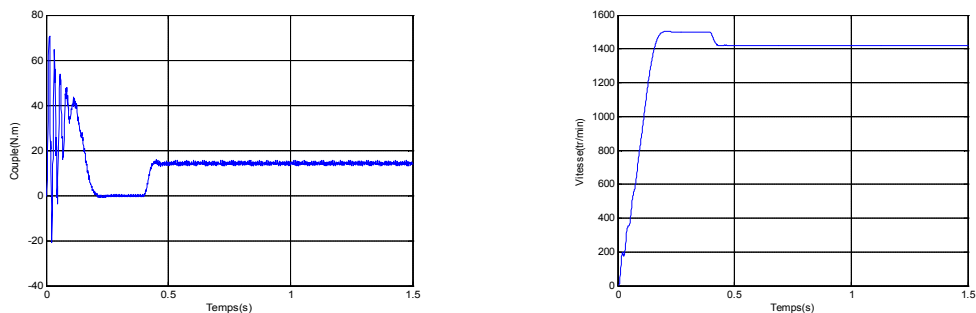


Fig. II.10: couple en fonction de temps.

Fig. II.11: la vitesse en fonction du temps.

La figure (II.12) représente les courants dans les barres Pour notre étude, le courant efficace dans une barre est de 149.90 (A) et sa fréquence est de $(1-g)*f_s/p$ c'est à dire dans notre cas est 23Hz.

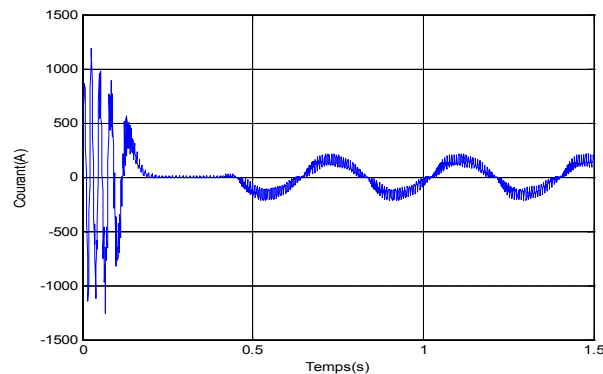


Fig. II.12: Courant de barre en fonction de temps.

II.6. Simulation des défauts de rupture des barres rotoriques :

Les cassures des barres sont les défauts les plus fréquents au rotor. Leurs simulations permettent d'identifier les signatures de ces défauts et de prévoir les détériorations générées dans la machine. Pour illustrer le défaut de cassure des barres, nous avons effectué la simulation du moteur dans les cas de une seule barre cassées, une barre cassées par pole, deux barre cassées par pole opposé et quatre barre cassées adjacentes.

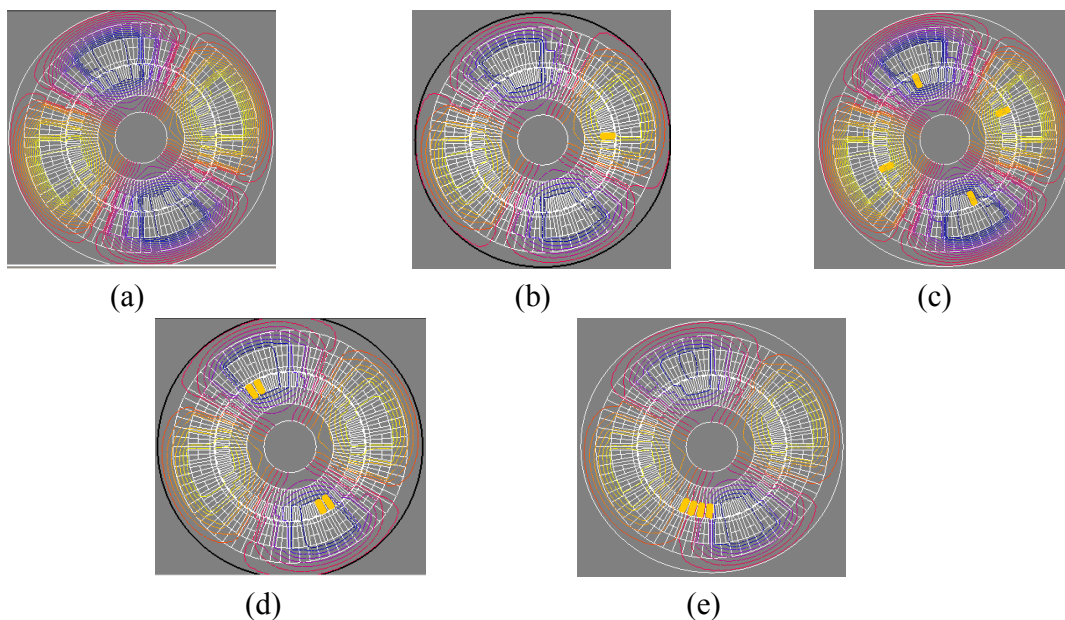


Fig. II.13: Répartition des lignes équipotentiels : (a) machine saine, (b) une seule barre cassées, (c) une barre cassées par pôle, (d) deux barre cassées par pôle opposé, (e) quatre barre cassées adjacentes.

La figure (II.13) représente la distribution des lignes de flux dans la machine qui fait apparaître le déséquilibre provoqué par la rupture de barres. Pour un moteur sain, les courants dans les barres entraînent une répartition symétrique des lignes de flux autour de chaque pôle.

Les distributions de l'induction (Fig. II.14) montrant aussi l'accentuation de déséquilibre lors de l'apparition des défauts. Nous remarquons qu'autour du défaut, l'induction est relativement élevée. Au stator, l'induction est totalement déséquilibrée entre le pôle de la machine.

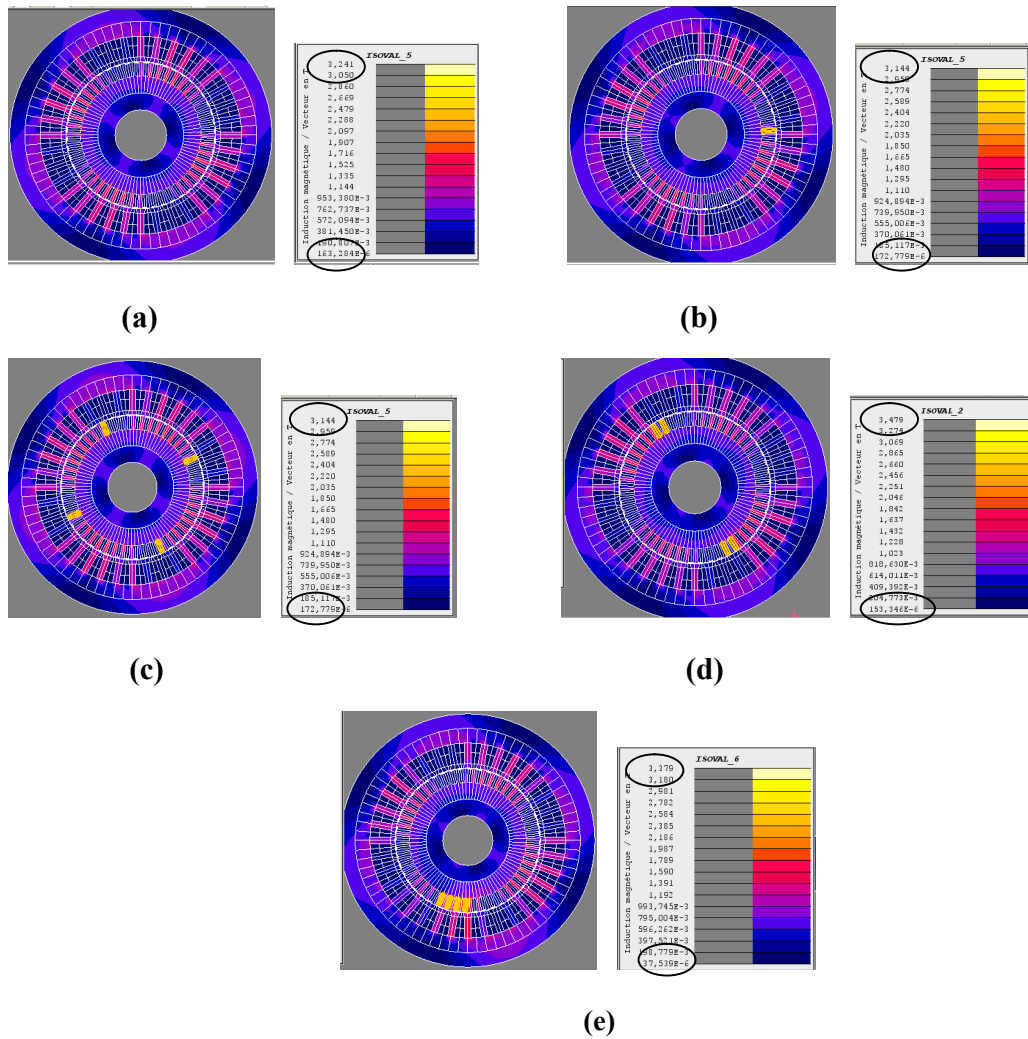


Fig. II.14: Répartition de l'induction dans le circuit magnétique : (a) machine saine, (b) une seule barre cassées, (c) une barre cassées par pôle, (d) deux barre cassées par pôle opposé, (e) quatre barre cassées adjacentes.

La figure (II.15) représente la répartition du courant dans les barres rotoriques en fonctionnement nominale pour la machine saine et avec rotor infecté. On remarque l'augmentation du courant rotorique lors de l'apparition des défauts, surtout dans les barres adjacentes aux barres cassées. et que la sévérité de défaut et plus grand dans le cas où les barres cassées sont adjacentes par pôle ou les barres cassées sont séparées.

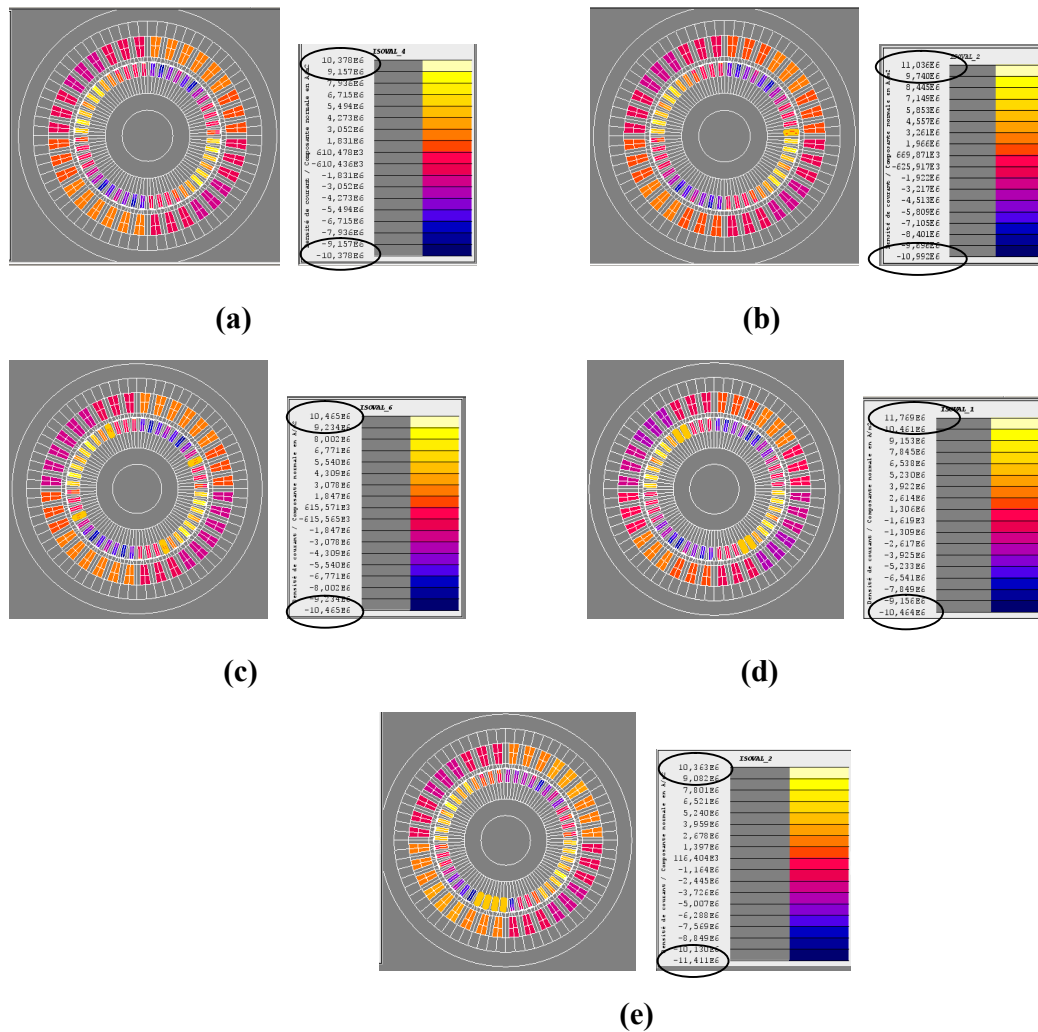


Fig. II.15: Répartition des densités du courant : (a) machine saine, (b) une seule barre cassées, (c) une barre cassées par pôle, (d) deux barre cassées par pôle opposé, (e) quatre barre cassées adjacentes.

Les figures (III.16, 17, 18, 19) représentent l'influence de cassure des barres sur les grandeurs de la machine.

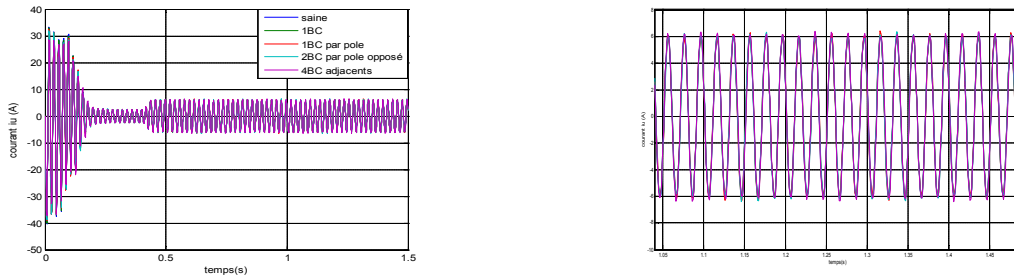


Fig. II.16: courants de phase de la machine avec defaults au rotor.

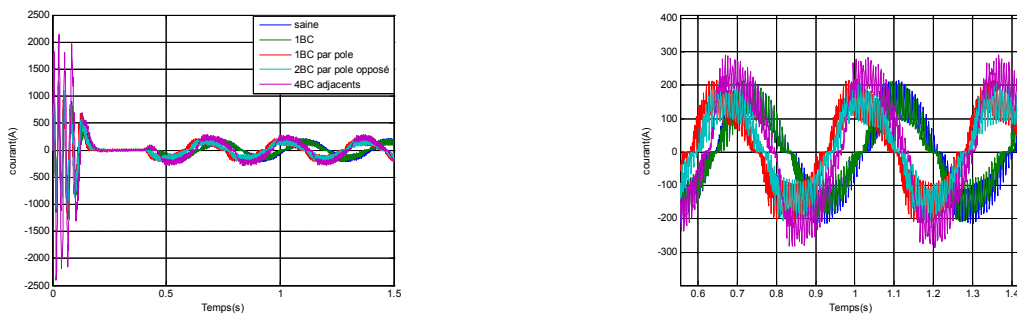


Fig. II.17: comparaison de courant dans le cas sain et en présence des défauts.

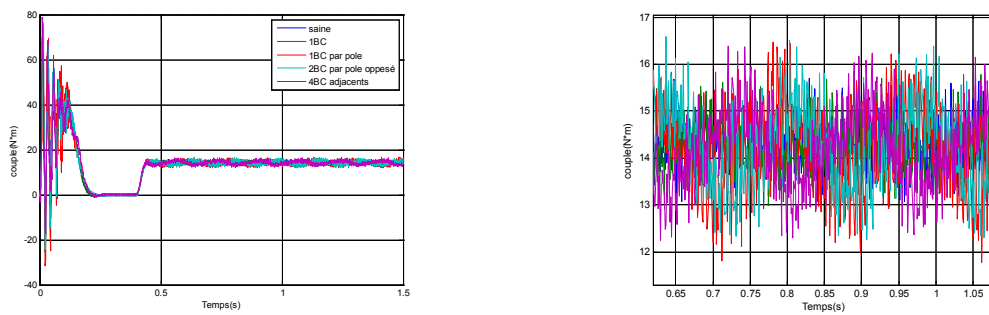


Fig. II.18: comparaison de couple dans le cas sain et en présence des défauts.

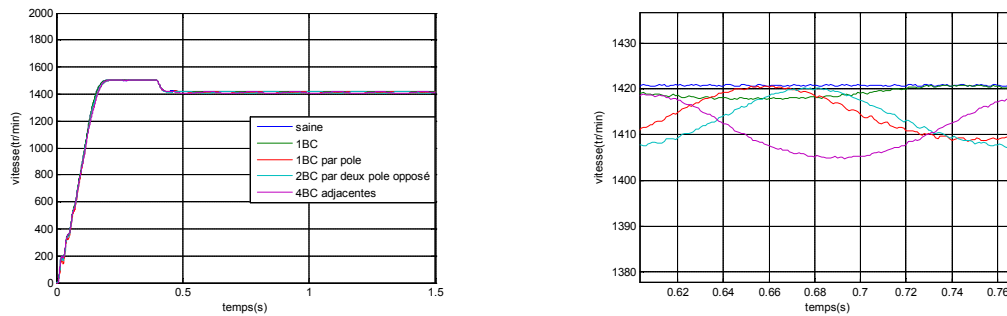


Fig. II.19: comparaison de vitesse dans le cas sain et en présence des défauts.

Les courants des phases statoriques (fig. II.16) sont toujours déphasés entre eux de 120° , cependant une ondulation de l'amplitude des courants apparaît avec la cassure des barres. L'amplitude de cette oscillation est proportionnelle au nombre de barres cassées.

La rupture des barres provoque un déséquilibre du courant entre les barres du rotor (Fig. II.17) et une augmentation de l'amplitude du courant, Cette amplitude augmente avec le nombre de barres cassées. Notons que l'amplitude des oscillations est proportionnelle aussi à ce nombre.

La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations (Fig. II-18). L'effet de la cassure de barre croît rapidement avec le nombre des barres cassées. La grande amplitude des oscillations accélère la détérioration de la machine et des composants de la chaîne de traction.

Comme il a été mentionné dans la partie théorique, on peut observer que le défaut génère des oscillations de vitesse (Fig. II.19) Ces variations dues aux fluctuations de couple sont de faible fréquence. On retrouve bien une période correspondant à la fréquence $2g_f$. Aussi, on peut constater que ces oscillations sont beaucoup plus influencées par la barre cassée.

On peut remarquer qu'il est difficile d'observer l'effet de défaut en régime permanent, quand la machine n'est pas chargée. Cependant, nous avons trouvé que Le fait que les barres adjacentes conduisent plus de courant entraîne une surchauffe de ces barres qui provoque un vieillissement accéléré et explique l'effet cumulatif sur la rupture des barres.

II.7. Simulation des défauts d'excentricité

L'excentricité peut être une conséquence des défauts mécaniques, elle se manifeste généralement par un décentrement du rotor par rapport au stator entraînant une variation de l'entrefer, Leurs simulations permettent d'identifier les signatures de ces défauts et de prévoir les détériorations générées dans la machine, pour illustrer le défaut d'excentricité nous avons effectué la simulation du moteur dans les différents cas, 20% ,40% et 60% d'excentricité.

Le résultat de simulation dans les figures (II.20.21) représente la répartition des lignes équiflux et l'induction dans la machine.

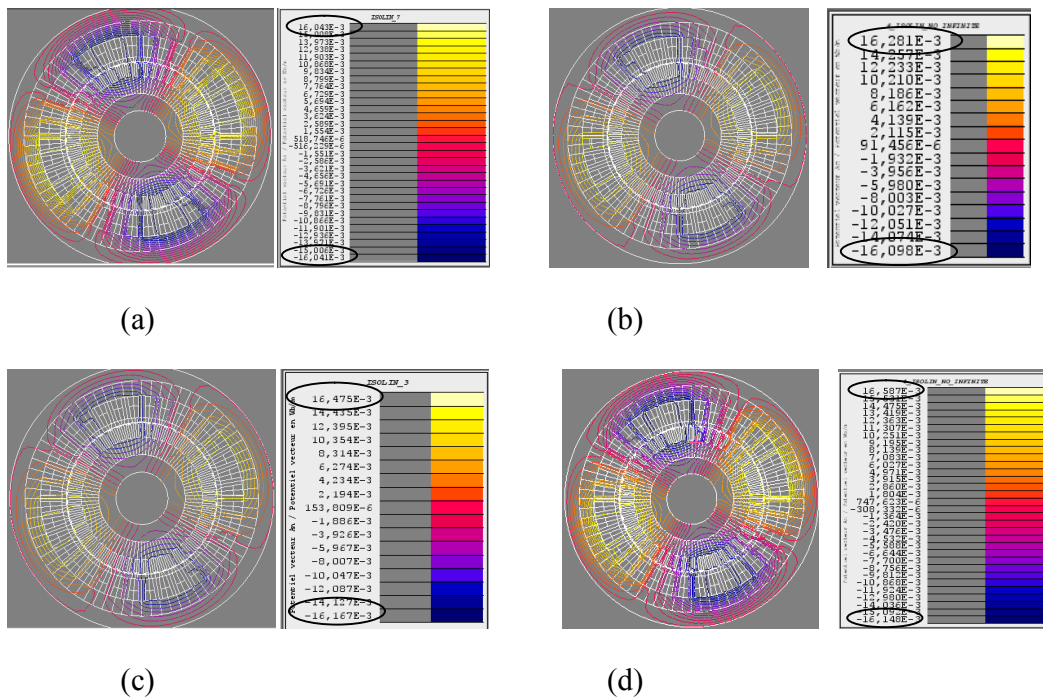


Fig. II.20: la Répartition des lignes équiflux a $t=1.5s$:(a)machine saine, (b) 20%d'excentricité, (c) 40% d'excentricité, (d) 60% d'excentricité.

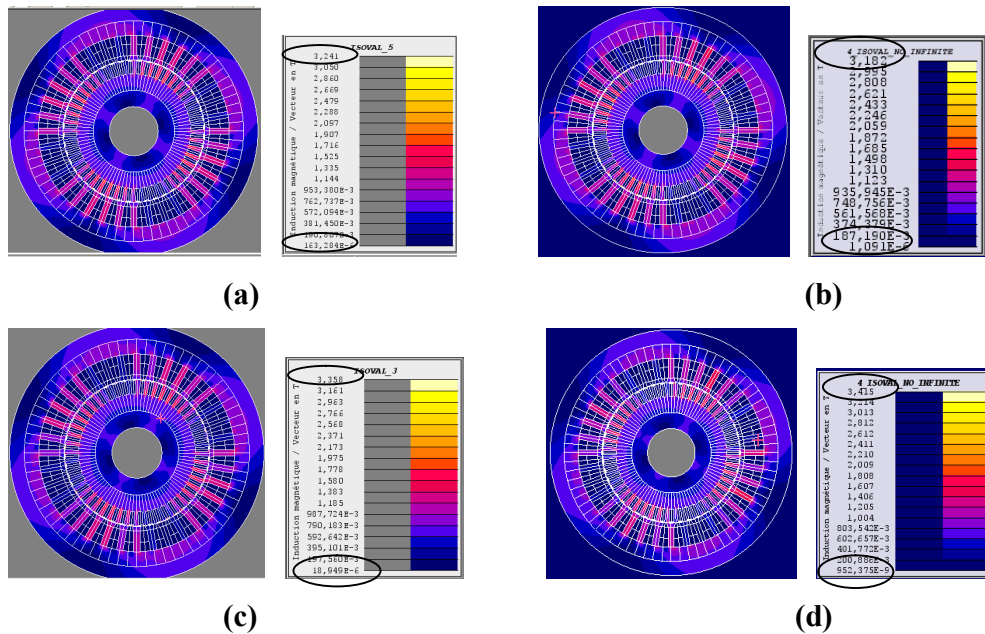


Fig. II.21: la Répartition de l'induction magnétique a $t=1.5s$:(a)machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 40% d'excentricité, (d) 60% d'excentricité.

D'après la figure précédente on remarque un déséquilibre de la distribution des lignes de flux et une diminution de l'induction dans les circuits magnétique lors des différents défauts d'excentricité.

Le figure.(II.22) représente la densité du courants dans le rotor aux différents défauts d'excentricité.

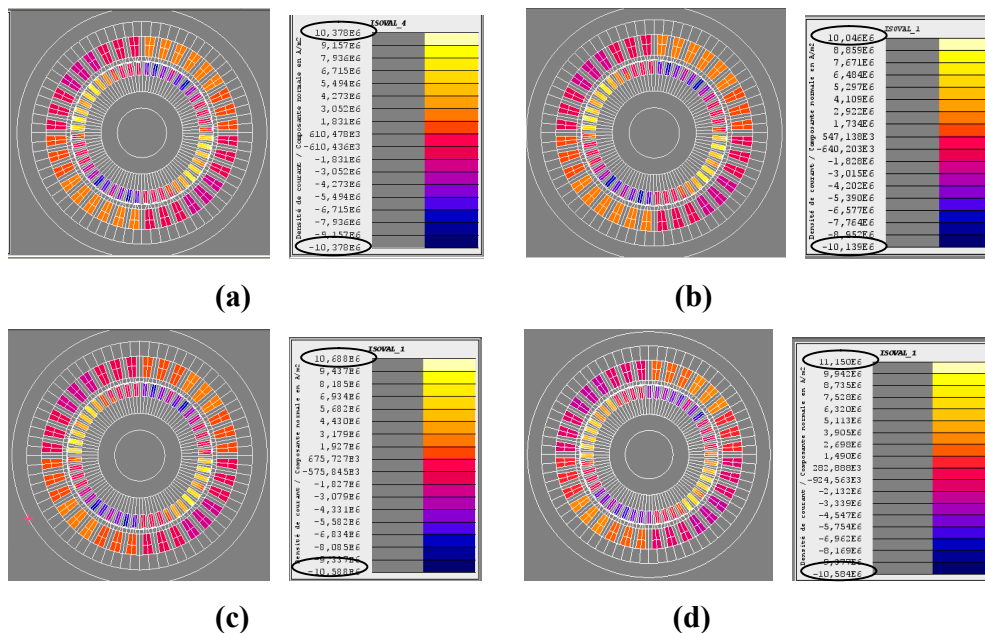


Fig. II.22: La densité de courant dans les barres de rotor. A $t=1.5s$:(a)machine saine, (b) 20% d'excentricité, (c) 40% d'excentricité, (d) 60% d'excentricité.

On constate que la distribution du courant dans les barres rotorique figure(II.22) augmente avec l'accroissement d'excentricité.

Les figures (II.23, 24, 25,26) représentent les différentes caractéristiques de la machine étudiée tel que le courant de phase, le couple, la vitesse de rotation, et les courants dans la barre dans les différents cas : machine saine avec excentricité de 20%, excentricité de 40% et excentricité de 60%.

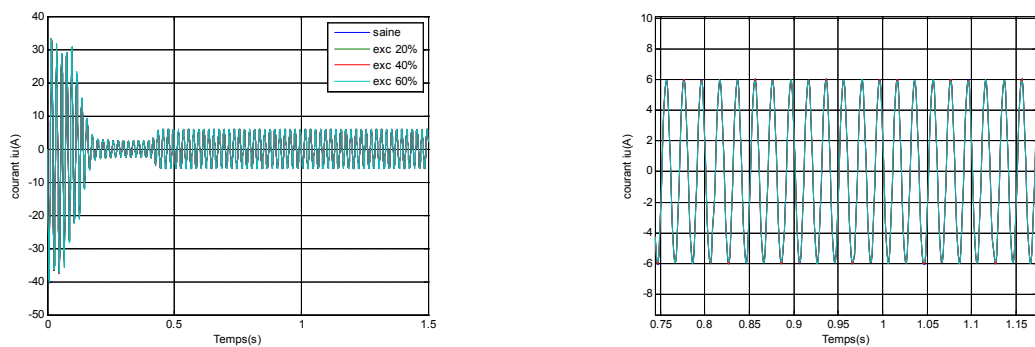


Fig. II.23: courant de phase avec défaut d'excentricité : (a) 20% d'excentricité, (b) 40% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.

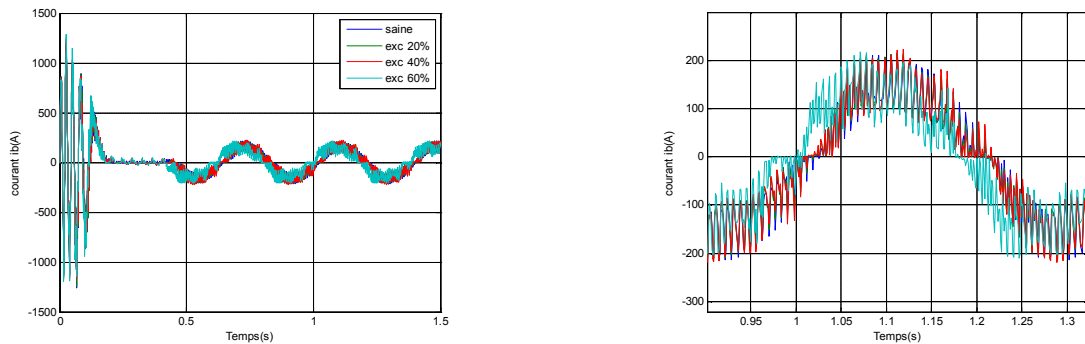


Fig. II.24: courant de barre avec défaut d'excentricité : (a) 20% d'excentricité, (b) 40% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.

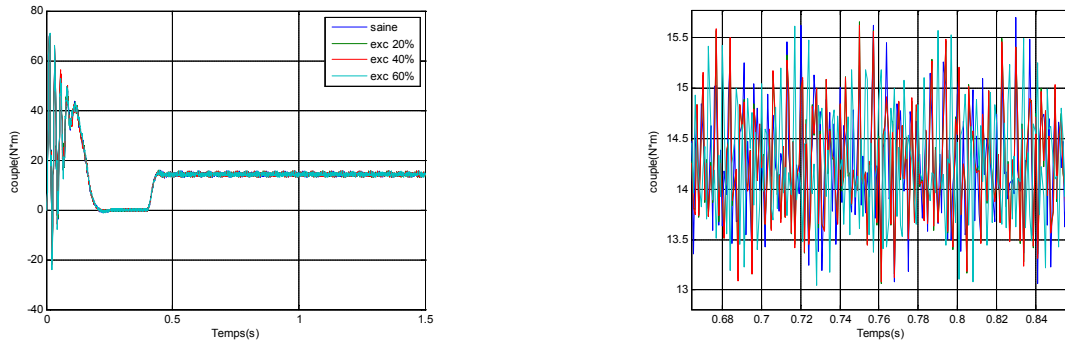


Fig. II.25: couple avec défaut d'excentricité : (a) 20% d'excentricité, (b) 40% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.

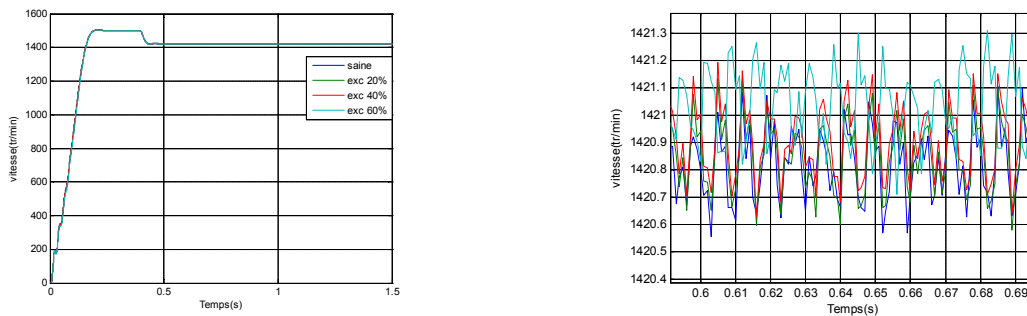


Fig. II.26: vitesse avec défaut d'excentricité : (a) 20% d'excentricité, (b) 40% d'excentricité, (c) 60% d'excentricité.

D'après les différentes caractéristiques de la machine étudiée il est constaté évidemment l'influence du défaut d'excentricité qui consiste dans l'augmentation des oscillations de couple avec le pourcentage d'excentricité ainsi que e un déséquilibre dans les courants des phases et une augmentation des courants des barres.

II.8. Simulation des défauts mixtes

La figure (II.27.28.29) montre la répartition de lignes équiflux et l'induction magnétique et densité de courant pour machine avec défaut d'une quatre barre cassée et 60% d'excentricité statique.

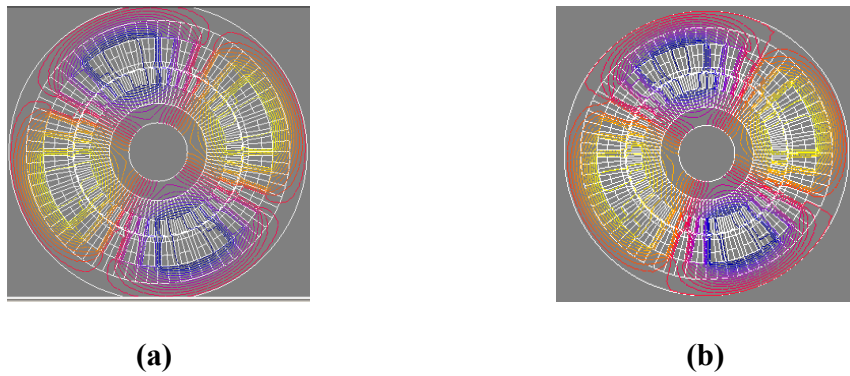


Fig. II.27: la Répartition des lignes équiflux a t=1.5s: (a) saine, (b) défaut mixte.

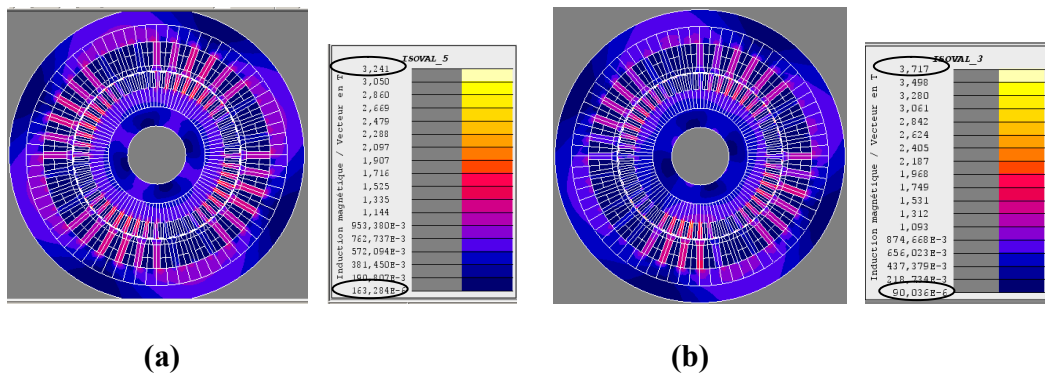


Fig. II.28: la Répartition de l'induction magnétique a t=1.5s:(a) saine, (b) défaut mixte.

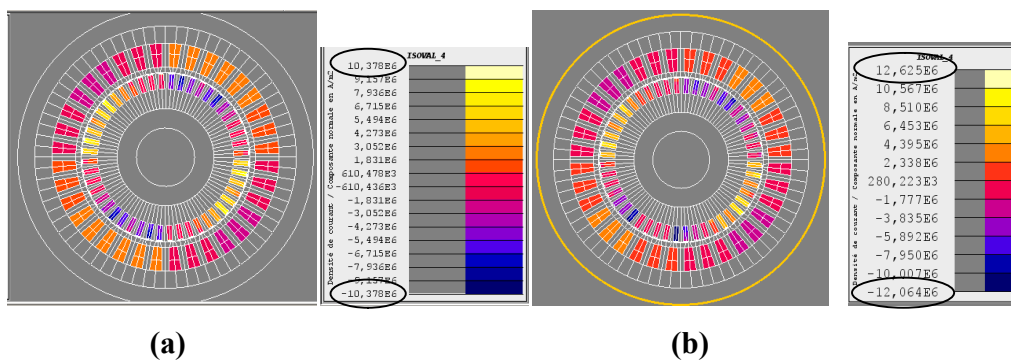


Fig. II.29: La densité de courant. à t=1.5s :(a) saine, (b) défaut mixte.

La déformation est aggravée lorsque l'excentricité statique est combinée à la défaillance de la machine.

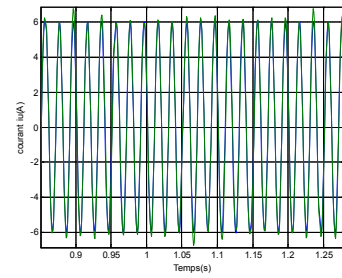
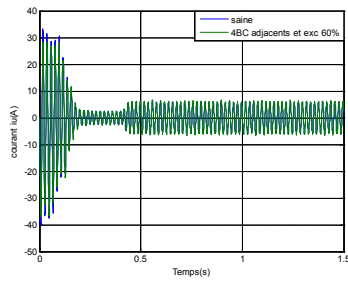


Fig. II.30: Comparaison le courant de phase de la machine saine et défaut mixte (4BC adjacentes et exc 60%).

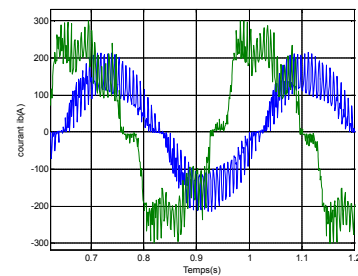
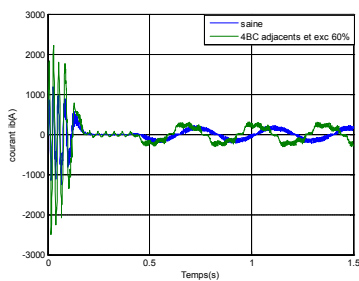


Fig. II.31: Comparaison le courant de barre de la machine saine et défaut mixte (4BC adjacentes et exc. 60%).

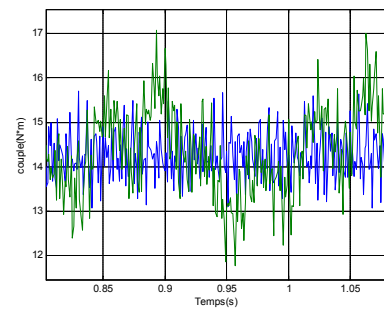
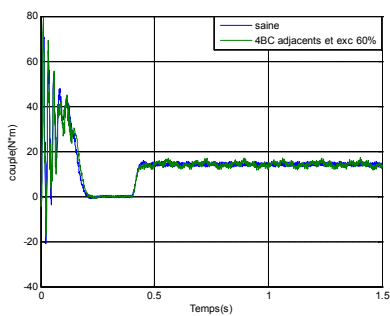


Fig. II.32: Comparaison le couple de la machine saine et défaut mixte (4BC adjacentes et 60% exc).

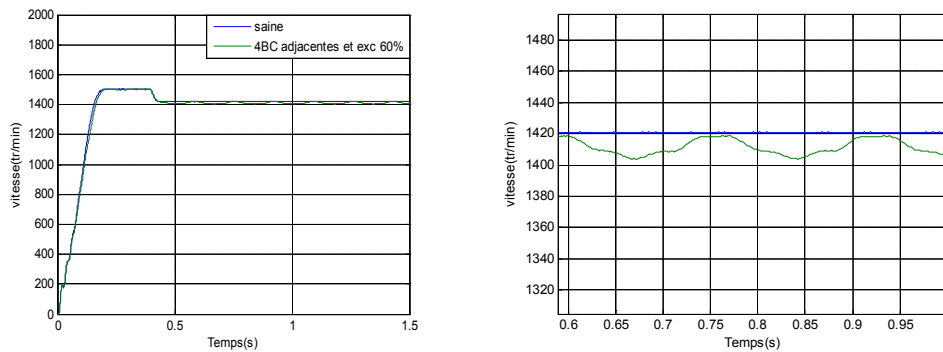


Fig. II.33: Comparaison le vitesse de la machine saine et défaut mixte (4BC adjacentes et exc 60%).

II.9. Simulation des Défaut de court-circuit entre spire

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Il peut se manifester soit entre des spires au milieu du bobinage ou bien entre une spire et le neutre.

Si le court-circuit se manifeste au milieu du bobinage (20 et 40 de spires en court-circuit), une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude est constatée pour les autres phases.

La différence par rapport au court-circuit relié au neutre est la dissymétrie entre les courants des phases non affectées par le défaut. Ceci s'explique par le déséquilibre dû au déplacement du neutre entre les trois phases.

Les figures (II.34) représentent des lignes équipotentiels de court circuit entre spire

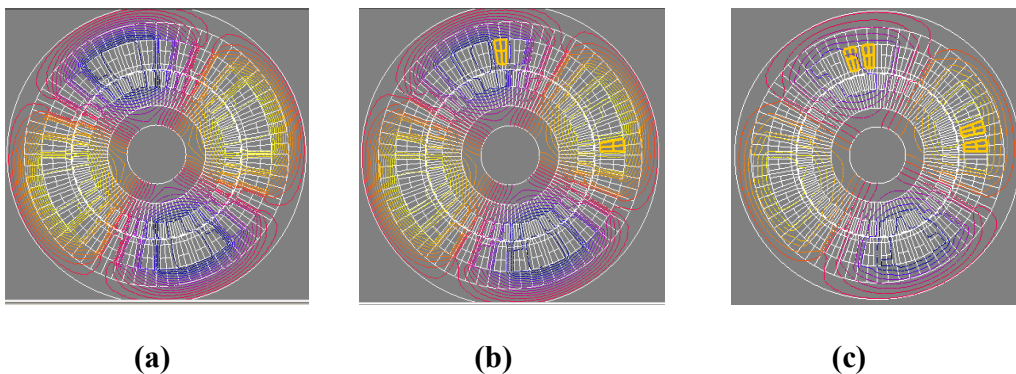


Fig. II.34: la Répartition des lignes équipotentiels à t=1.5s:(a)machine saine, (b) court circuit 20 spires, (c) court circuit 40 spires.

Les figures (II.35) représentent de l'induction dans le circuit magnétique de court circuit entre spire.

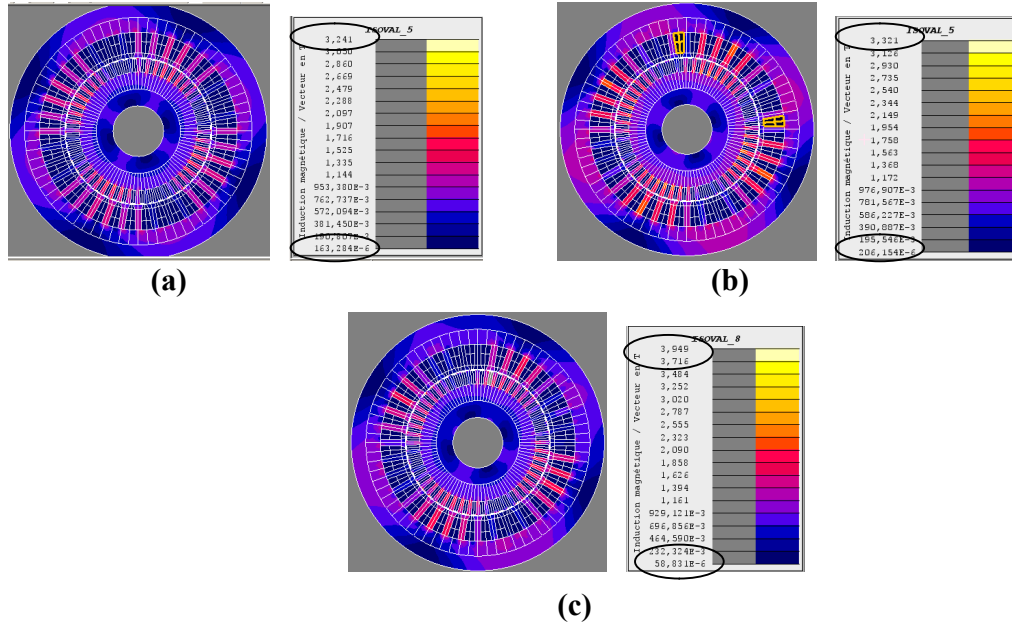


Fig. II.35: Répartition de l'induction dans le circuit magnétique : (a) machine saine, (b) court circuit 20 spires, (c) court circuit 40 spires.

Les figures II.36 représentent de densité de courant de court circuit

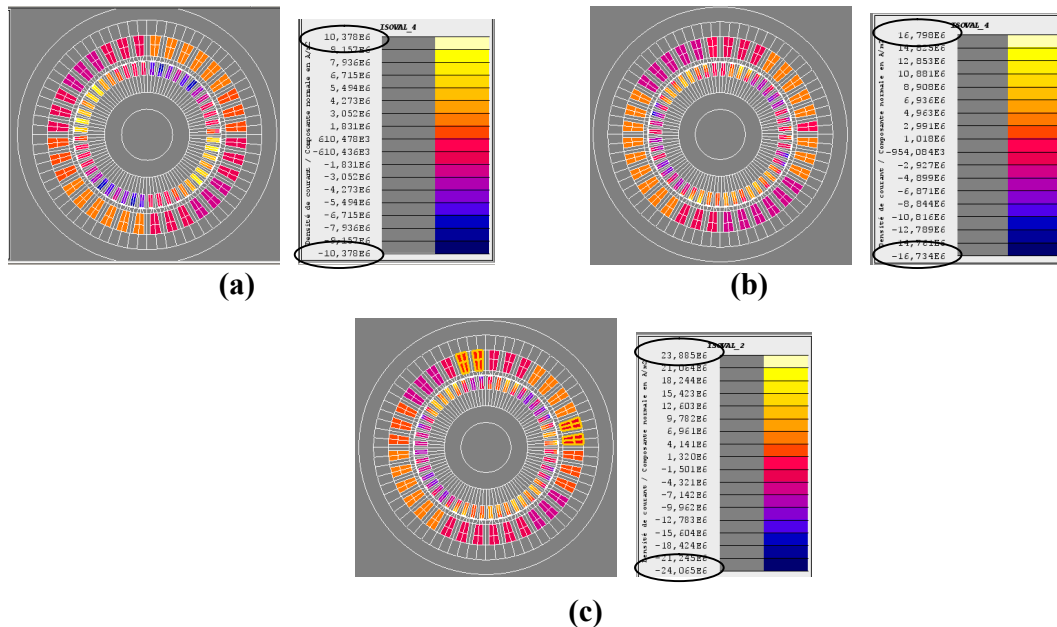


Fig. II.36: la Répartition de densité de courant à $t=1.5s$:(a)machine saine, (b) court circuit 20 spires, (c) court circuit 40 spires.

Nous notons qu'il n'y a fluctuation dans Répartition des lignes équiflux et l'induction dans le circuit magnétique figure (II.34, II.35) en ce qui concerne la densité de courant est obtenir une augmentation en fonction nombre de spire du court-circuit (fig. II.36).

Les figures (II.37, 38, 39,40) représentent les différentes caractéristiques de la machine étudiée tel que le courant de phase, le courant dans la barre, le couple et la vitesse de rotation.

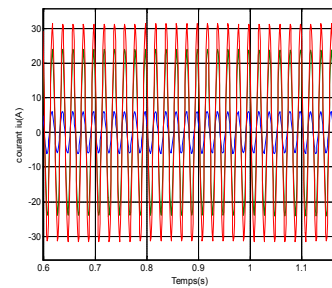
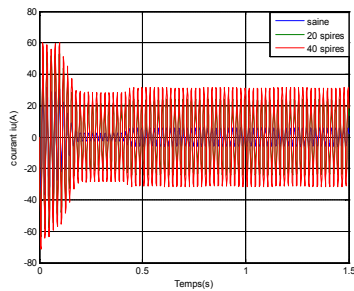


Fig. II.37: la comparaison de courant de la phase infecté.

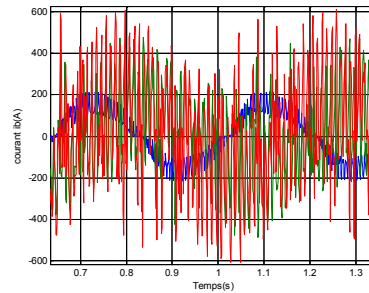
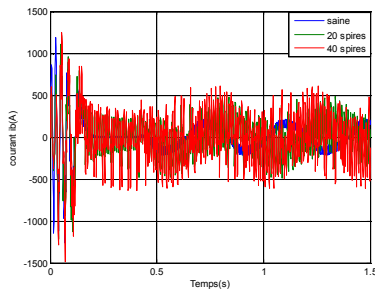


Fig. II.38: la comparaison des courants rotoriques.

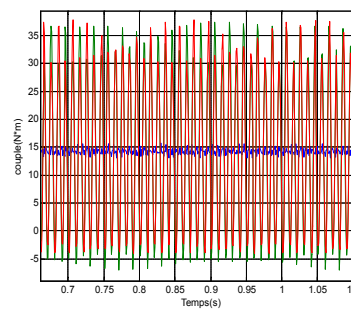
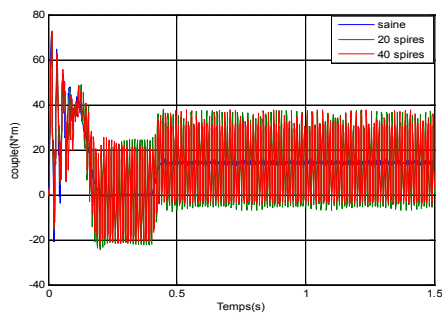


Fig. II.39: la comparaison de couple.

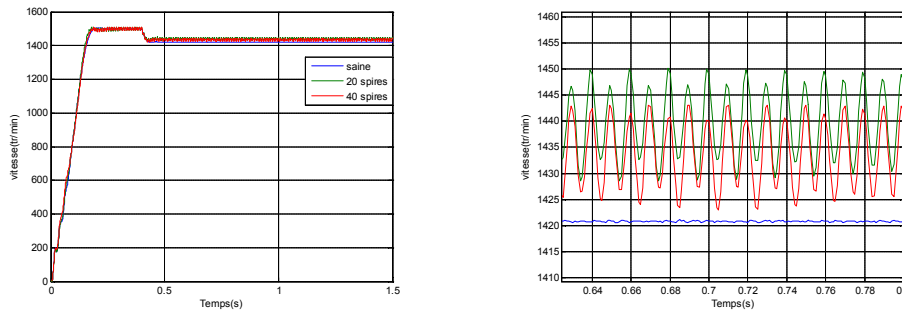


Fig. II.40: la comparaison de vitesse.

on remarque une augmentation visible de l'amplitude du courant dans la phase en défaut, les courants dans les autres phases augmentent aussi, mais l'augmentation est moins importante par rapport à la phase défectueuse. ainsi que augmentation des courants rotoriques et le couple électromagnétique, pour la vitesse on observe des oscillation et ces oscillation augmente en fonction de nombre de spire de court circuit.

Conclusion

Nous avons développé dans ce chapitre un modèle à base de la méthode des éléments finis où nous pouvons inclure les défauts cassure de barre, d'excentricité et court circuit entre spire. La simulation magnéto transitoire nous ont permis d'étudier l'influence des défauts sur les points suivants:

- La distribution des lignes de champs et l'induction magnétique.
- La variation de la densité de courant dans les barres rotoriques.
- Les grandeurs locales, et globales dans la machine (courant, couple, vitesse)

L'analyse présentée par la méthode des éléments finis montre que c'est une méthode efficace et peu coûteuse pour étudier l'influence des défauts sur le comportement des machines asynchrones, et nous a permet de comprendre et de quantifier les conséquences locales des défauts au machine.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right. The text is centered within this border.

**Chapitre III : diagnostic des défauts de la
machine asynchrone**

Chapitre III : diagnostic des défauts de la machine asynchrone

III.1.Introduction

Dans Ce chapitre est deux méthode de diagnostic sera utiliser l'une basé sur l'analyse spectrale du courant statorique (FFT) et la deuxième l'analyse de champs de dispersion (champs de fuite) [36, 37, 38].

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

L'analyse spectrale du courant statorique nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par cassure de barre et excentricité et court-circuit. L'analyse de l'amplitude des harmoniques d'espace dans le spectre du courant statorique donne des informations supplémentaires non négligeables pour le diagnostic des défauts.

Dans la deuxième méthode on propose une nouvelle méthode non invasive de diagnostic des défauts, On exploitera comme grandeur physique le champ magnétique de dispersion mesuré à l'extérieur de la machine et plus particulièrement ses variations spatiales.

III.2. diagnostic de la machine par l'analyse spectrale du courant statorique

III.2.1 Origines des raies dues au défaut rotorique

Les pannes rotoriques sont souvent à l'origine de nuisances dues aux ondulations de couple électromagnétique provoquant des oscillations de la vitesse de rotation. L'information rupture de barre se trouve donc véhiculée par le flux magnétique, et par conséquent dans le courant absorbé au réseau électrique. Il est donc nécessaire de connaître les fréquences résultant d'une rupture de barres afin de pouvoir les détecter à travers une analyse spectrale des courants.

Suite à une rupture de barre, les circuits rotoriques créent en plus du champ rotorique direct un champ magnétique inverse de pulsation gfs du au déséquilibre des enroulements rotoriques (Fig. 1.8). Cela a pour effet d'induire des forces électromotrices dans les circuits statoriques de fréquences $(1 \pm 2g) * fs$ et donc des composantes de courant à ces fréquences selon la relation

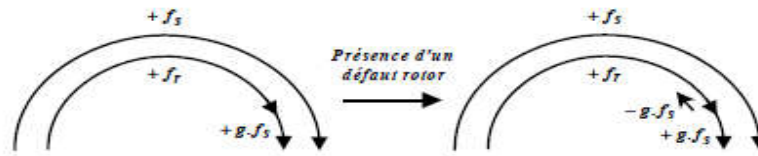


Fig. III.1 : Schéma de fonctionnement d'un rotor en défaut [39].

Une composante oscillatoire du couple électromagnétique à la fréquence $2gfs$ est aussi produite par interaction avec le champ magnétique produit par les bobinages statoriques.

Les forces électromotrices dues au défaut sont alors de fréquences $(1\pm 2g)*fs$. Les champs créés par les courants vont induire, par conséquent, au rotor des courants directs et inverses de fréquences $\pm 3gfs$. Ainsi, au stator, des courants de fréquence $(1\pm 4g)*fs$ sont générés selon le même processus. Par conséquent, des composantes de fréquences $(1\pm 2kg)*fs$ où k est un entier positif, se retrouvent dans les courants absorbés par la machine. [39].

Les figures (III.2, III.3) représentent le courant statorique et son spectre dans la machine saine.

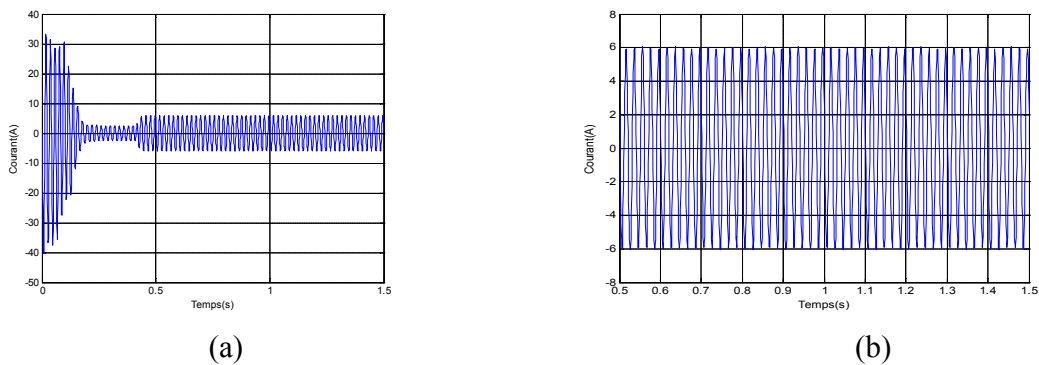


Fig. III.2: (a) courant de phase statorique, (b) courant de phase dans le régime permanent.

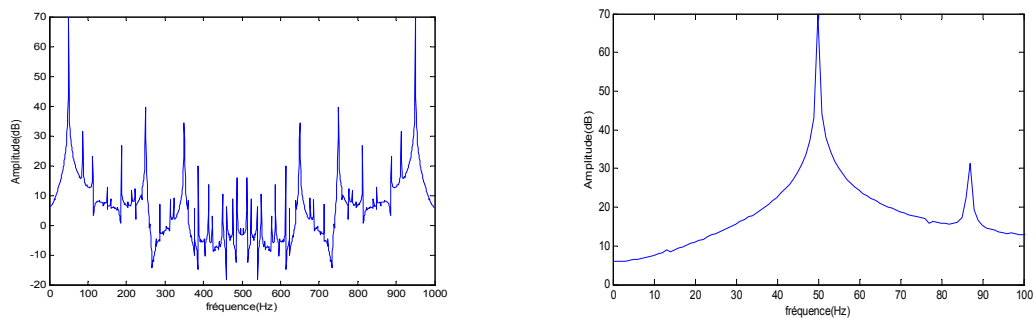


Fig. III.3 : le spectre de courant statorique de 0 Hz à 1000 Hz et 0Hz à 100 Hz pour une machine saine.

La figure (III.4), représente le spectre du courants statorique dans la machine avec défaut au rotor.

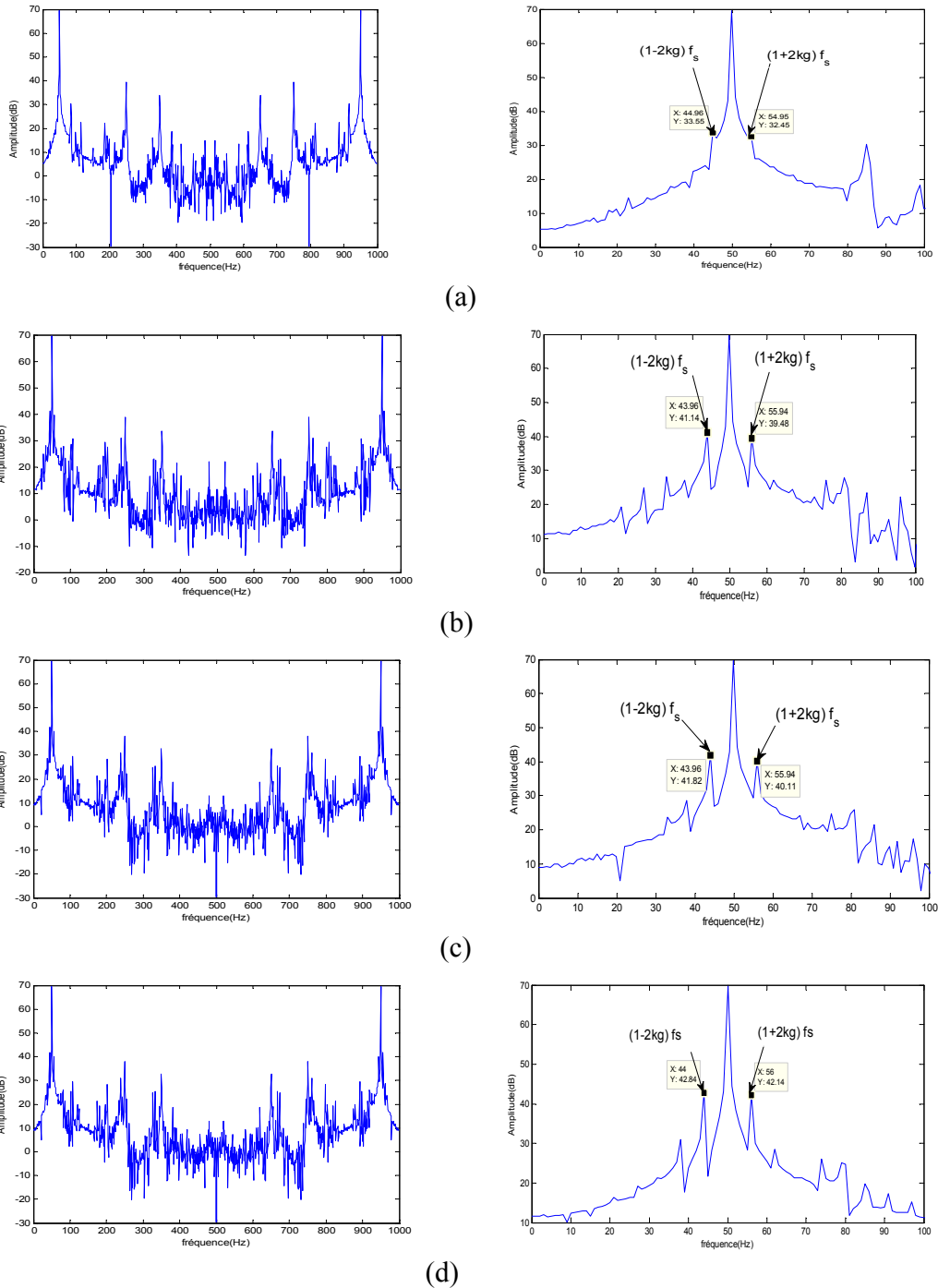


Fig. III.4 : le spectre de courant statorique pour une machine avec défaut de cassure de barre : (a) une seule barre cassée, (b) une barre cassées par pôle, (c)deux barres cassées par pôle opposé, (d) quatre barres cassées adjacentes.

Le tableau (III.1) donne les valeurs en décibel (dB) des signatures de défaut $(1 \pm 2g)*f_s$ et $(1 \pm 4g)*f_s$,

	$(1 - 2g)*f_s$	$(1 + 2g)*f_s$	$(1 - 4g)*f_s$	$(1 + 4g)*f_s$
saine	–	–	–	–
une seule barre cassée	33,95	32,45	24,06	25,34
une barre cassée par pôle	41,14	39,48	29,55	29,25
deux barres cassées par pôle opposé	41,82	40,11	28,52	28,67
Quatre barres cassées adjacentes	42,84	42,14	31,08	28,51

Tableau. III.1: les amplitudes des composantes $(1 \pm 2g)*f_s$ et $(1 \pm 4g)*f_s$, pour les différents nombre et position des barres cassées.

Ce tableau met en évidence l'influence du nombre de barres cassées et leurs positions sur le spectre de courant statorique, pour les valeurs de fréquence de $(1 \pm 2g)*f_s$ et $(1 \pm 4g)*f_s$, il y a une augmentation de l'amplitude de raies en fonction de nombre barres cassées, et en remarque que ces augmentation est plus grand dans le cas des barres cassées sont adjacentes que les barres cassées séparée.

III.2.2. Excentricité d'entrefer

Il y a deux types majeurs d'excentricité : statique (déformation du corps du stator, positionnement incorrecte du rotor) et dynamique (lorsque le centre du rotor n'est pas le centre de rotation). Les excentricités d'entrefer peuvent être détectées, en surveillant les raies latérales fondamentales de la fréquence d'alimentation :

$$f_{exc} = f_s * [1 \pm k (1-g)/p] , \quad \text{Avec : } k = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{III.1})$$

La détection des excentricités est aussi possible en surveillant les harmoniques principales d'encoches du courant et certaines de leurs composantes spectrales latérales.

Cette méthode nécessite la connaissance du nombre d'encoches rotoriques N_b .

Les fréquences des composantes spectrales d'encoches et de celles associées aux excentricités d'entrefer dynamiques sont les suivantes :

$$f_{exc} = f_s [(kn_b \pm n_d) (1-g)/p \pm n_w]; \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{III.2})$$

nd : l'ordre d'excentricité.

$nd = 0$, dans le cas d'une excentricité statique.

$nd = 1, 2, 3, \dots$ dans le cas d'une excentricité dynamique.

nb : le nombre de barres rotoriques.

$n_w = 1, 3, 5, \dots$ (l'ordre de l'harmonique de la F.m.m du stator)

La présence d'une excentricité statique, modifie l'amplitude des harmoniques principales d'encoches du courant statorique, tandis que celle d'une excentricité dynamique fait apparaître de nouvelles raies spectrales [40].

La figure III.5 représente les spectres des courants statorique dans les machines avec défaut d'excentricité.

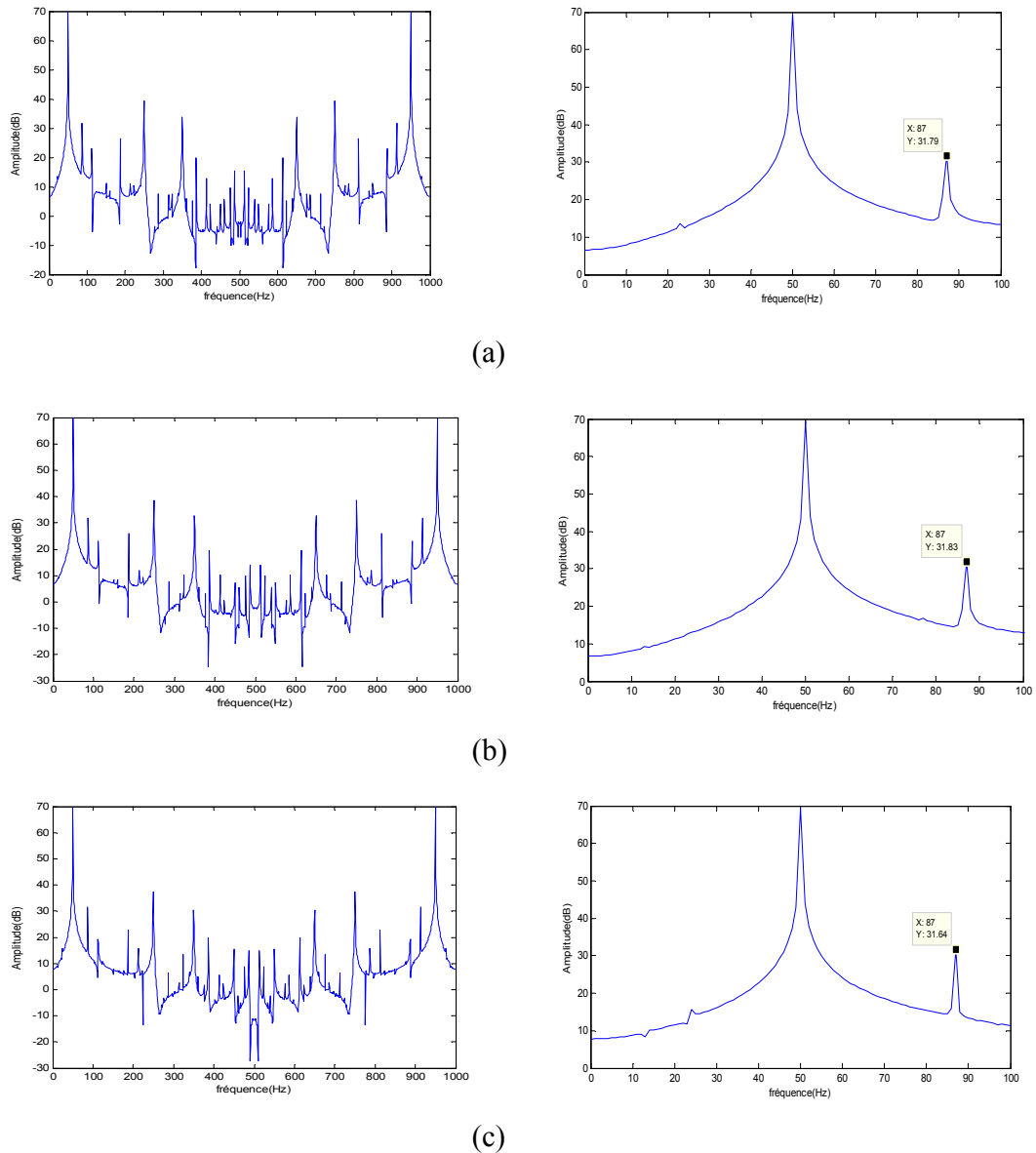


Fig. III.5: le spectre de courant statorique de la machine avec défaut: (a) excentricité de 20%, (b) excentricité de 40%, (c) excentricité de 60%.

Le défaut d'excentricité change le flux dans la machine et par ce changement, toutes les grandeurs qui dépendent du flux vont être perturbées, les signatures de défaut d'excentricité statique n'apparaissent pas dans le spectre du courant statorique, mais on peut remarquer une augmentation des amplitudes pour les harmoniques permanents (RSHs, fmm et saturation).

Les figures (III.6) représentent les spectres des courants statorique dans les machines avec défaut mixte (barre casse adjacentes et 60% d'excentricité statique).

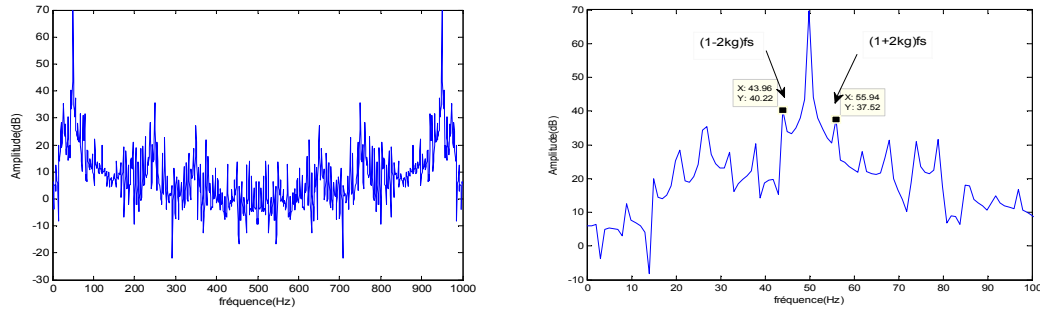


Fig. III.6: le spectre de courant statorique de 0 Hz à 1000 Hz et 0 Hz à 100 Hz pour une machine avec défaut mixte (4BC adjacentes et excentricité 60%).

On remarque que si les deux défauts sont présents dans la machine, alors la valeur des oscillations devient plus importante.

III.2.3. Défauts statoriques

Les défauts statoriques les plus courants sont la mise en court-circuit d'une ou plusieurs spires de son bobinage, ils se manifestent par la création d'harmoniques dans le spectre du courant statorique à des fréquences données, la fréquence caractéristique de ce défaut est précisée par l'expression suivante [40].

$$f_{cs} = f_s [n/p(1-g) \pm k] ; \text{ Avec : } n=1, 2, 3, \dots \text{ et } k = 1, 3, 5, \dots \quad (\text{III.3})$$

Les figures ci-après représentent les spectres des courants statorique dans les machines avec défaut court circuit.

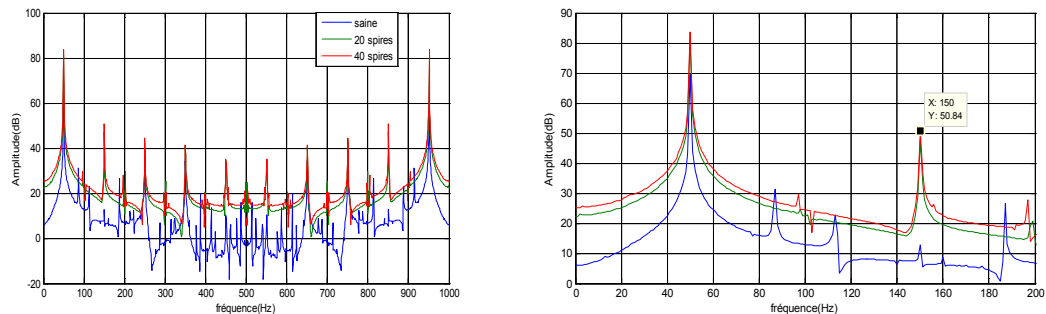


Fig. III.7: le spectre de courant statorique de 0 Hz à 1000 Hz et 0 Hz à 200 Hz pour une machine avec défaut court circuit.

La composante 150 Hz dans le cas d'un court-circuit entre spire peut être considéré comme un résultat de l'asymétrie dans l'enroulement statorique qui fait apparaître du courant la fréquence située à 150Hz augment par rapport au cas sain.

Les signatures de défaut de court-circuit entre spires ressemblent à des signatures d'un déséquilibre sur la tension d'alimentation et l'asymétrie dans l'enroulement statorique rend le pronostic de défaut par l'analyse par FFT un peu délicat.

III.3.diagnostic de la machine par l'analyse de champs de dispersion

Dans cette partie nous avons étudié la répartition des lignes du flux à l'extérieur de la machine pour les différents cas des défauts.

La Figure (III.8) représente ces lignes au fonctionnement nominal. Pour les cas suivants : (a) machine saine, (b) une seule barre cassées, (c) une barre cassées par pôle, (d) deux barre cassées par pôle opposé, (e) quatre barre cassées adjacentes.

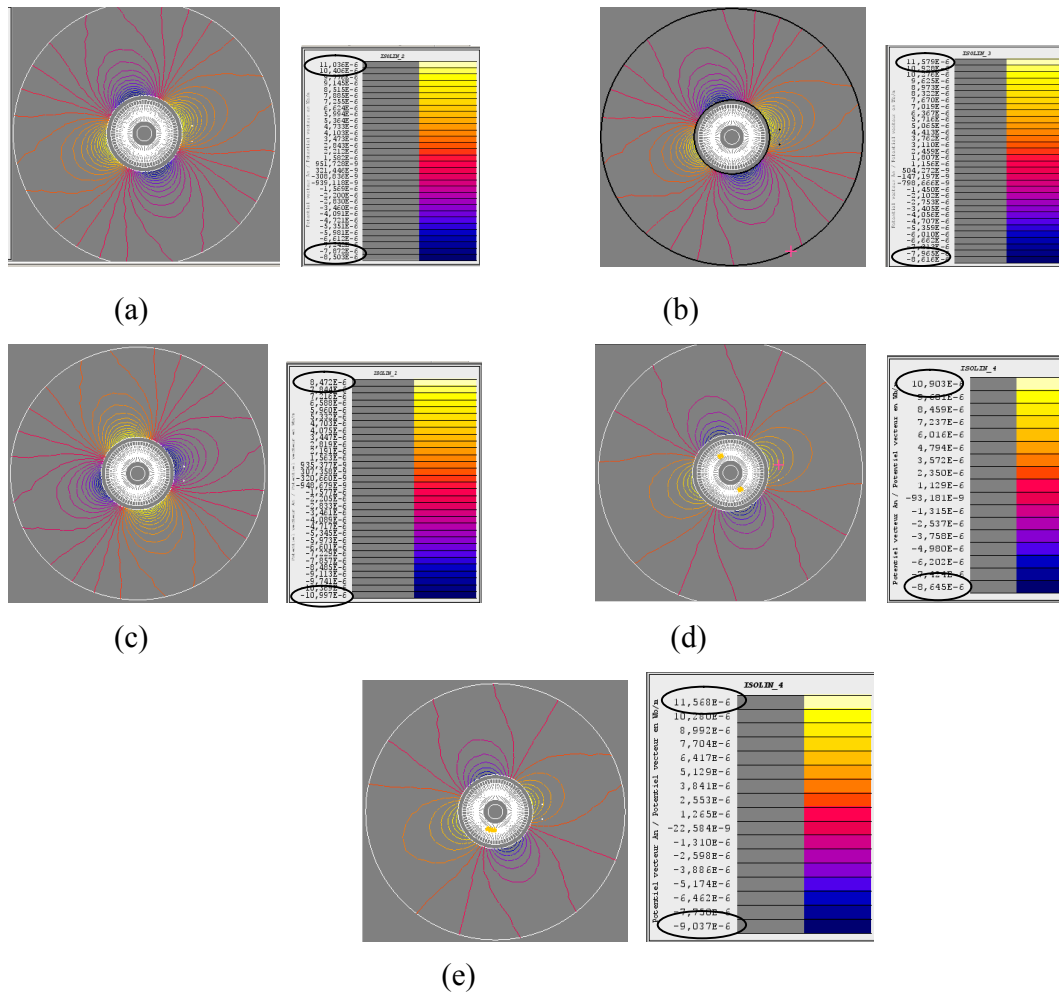


Fig. III.8: Lignes de champ magnétique (équiflux) à l'extérieur de la machine saine et avec défaut de cassure de barre : (a) saine, (b) une seule barre cassées, (c) une barre cassées par pole, (d) deux barre cassées par pole opposé, (e) quatre barre cassées adjacentes.

On remarque que pour la machine saine, les lignes de champ magnétique qui correspond à 4 pôles aux différents pas de temps restent symétriques (voir Figure III.8(a)). Si la machine présente un défaut de barre cassée, ces lignes (Figure III.8 (b, c, d et e)) sont très influencées par le défaut et elles sont distribuées d'une façon non uniforme à cause de la dissymétrie de courants rotoriques.

La Figure (III.9) représente le champ de dispersion au fonctionnement nominal pour les cas suivants : (a) machine saine, (b) machine avec excentricité de 20%, (c) machine avec excentricité de 40% et (d) machine avec excentricité de 60%.

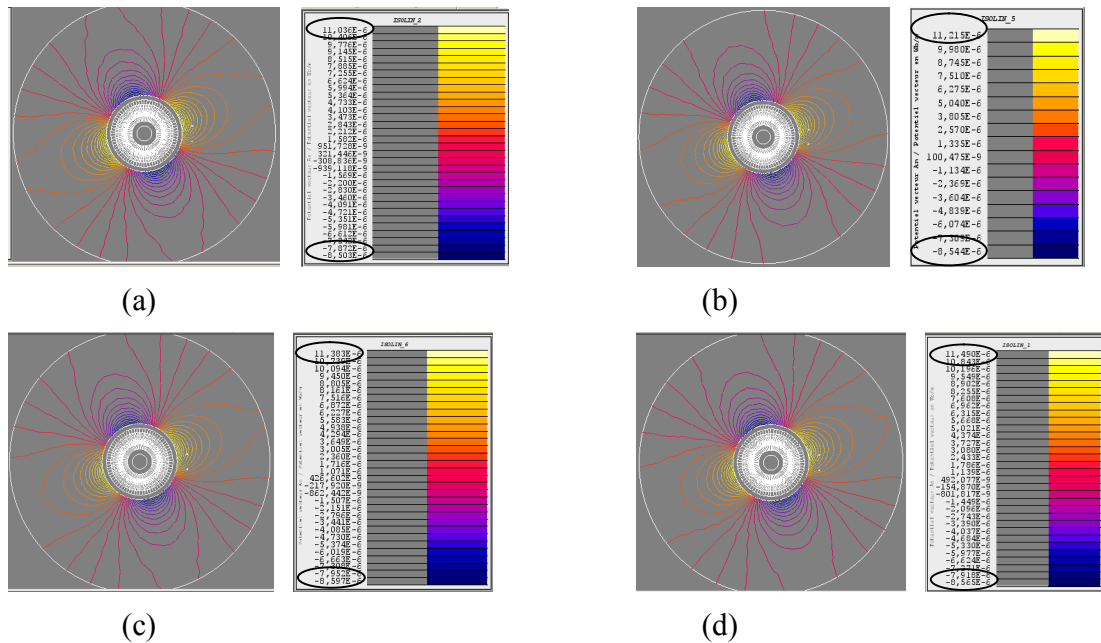


Fig. III.9: Lignes de champ magnétique (équiflux) à l’extérieur de la machine saine et avec défaut d’excentricité(a) machine saine, (b) excentricité de 20%, (c) excentricité de 40% et (d) excentricité de 60%.

On remarque que pour la machine saine, les lignes de champ magnétique qui correspondent aux temps symétriques, Le défaut d’excentricité perturbe également la symétrie de ces lignes de champ, L’excentricité a une influence similaire au défaut de barre cassée sur la distribution des lignes de champ.

Les figures ci-après représentent les lignes du flux à l’extérieur de la machine pour le cas de défaut mixte (4BC adjacentes et excentricité 60%).

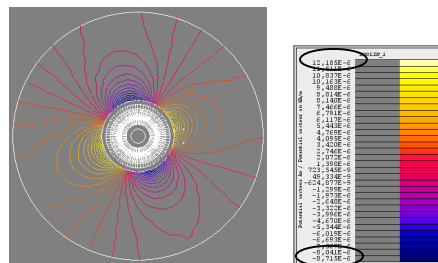


Fig. III.10: Lignes de champ magnétique (équiflux) à l’extérieur de la machine avec défaut mixte (4BC adjacentes et excentricité 60%).

La modification de champ magnétique devient plus importante en présence de ces deux défauts (4BC adjacentes +exc60%).

Les figures ci-après représentent les lignes du flux à l'extérieur de la machine pour les défauts statorique suivants : (a) court circuit 20 spires, (b) court circuit 40 spires.

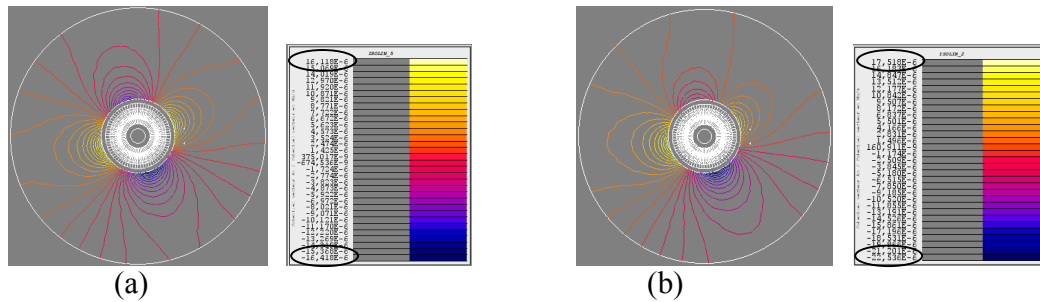


Fig. III.11: Lignes de champ magnétique (équiflux) à l'extérieur de la machine avec défaut de court circuit : (a) court circuit 20 spires, (b) court circuit 40 spires.

On remarque que pour la machine avec défauts, les lignes de champ magnétique est fortement déséquilibré en fonction de nombre de spire en court circuit.

III.3.1. Tension induite de flux de dispersion

Comme l'objectif de ce travail est l'analyse du champ magnétique de dispersion, notre étude rend compte l'analyse des spectres de tension induite E_c délivrée par le capteur bobiné. Pour l'étude, nous prendrons en considération que la composante bobine E_{c1} , les résultats étant similaires pour la composante bobine E_{c2} , avec toutefois des amplitudes légèrement différentes.

La Figure (III.12) montre la tension induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné et son spectre.

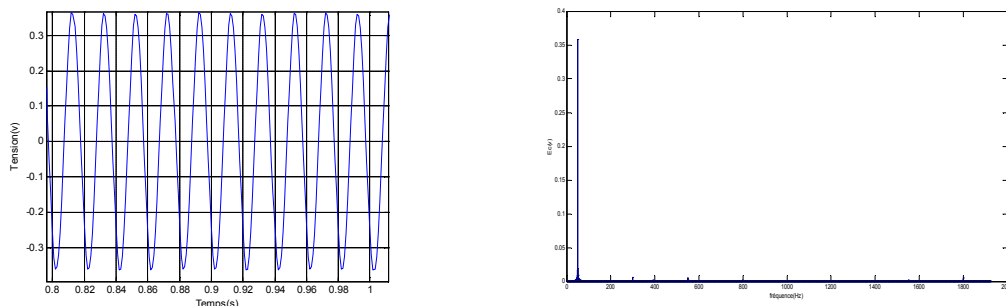


Fig. III.12: le spectre de tension induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné dans une machine saine : bobine 01.

D'après les résultats présentés dans la Figure (III.12), on observe aucune composante en basse et haut fréquence pour la machine saine sur le spectre de tension induite E_c , et l'équilibre de la tension induite.

La Figure (III.13) montre les tensions induites délivré par le capteur bobiné et leurs spectres avec défauts cassure de barre.

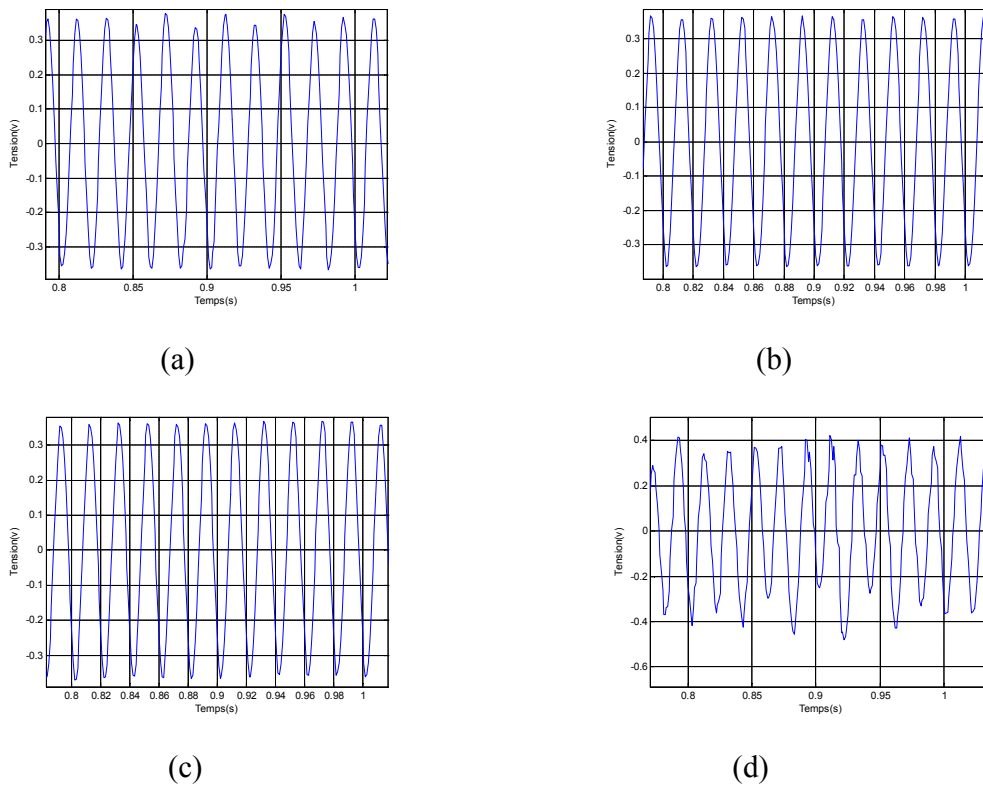


Fig. III.13: le spectre de tension induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné dans une machine avec défauts cassure de barre : (a) une seule barre cassées, (b) une barre cassées par pole, (c) deux barre cassées par pole opposé, (d) quatre barre cassées.

Nous observons un déséquilibre la tension induite dan, surtout dans le cas ou le nombre de barres cassé est adjacentes et leurs position est aléatoires.

La Figure (III.14) montre les spectres de tension induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné dans la machine avec défauts d'excentricité et mixte.

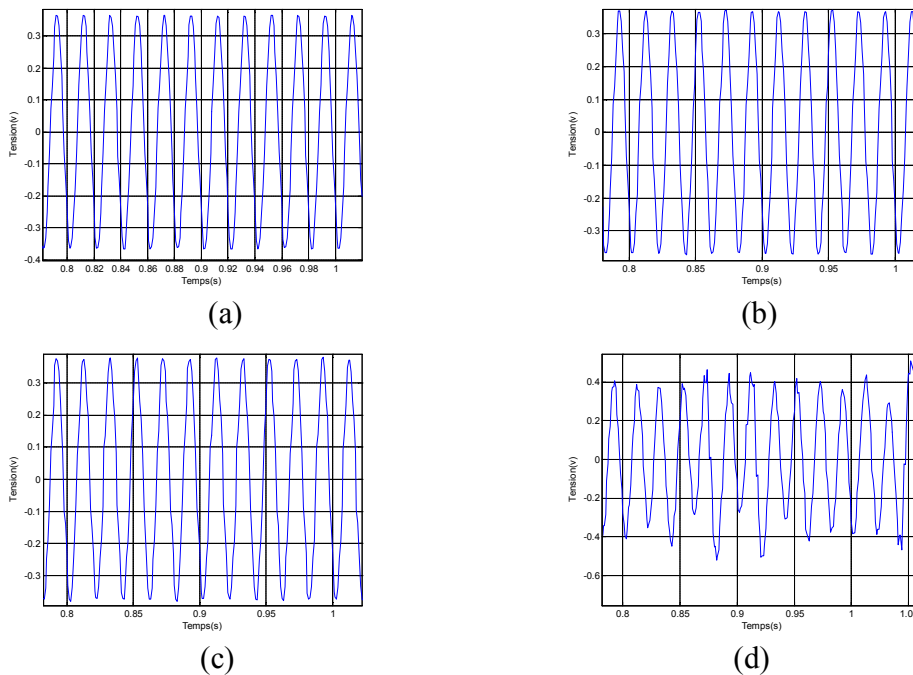


Fig. III.14: les tensions induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné de machine avec défaut : (a) excentricité de 20%, (b) excentricité de 40%, (c) excentricité de 60%, (d) défaut mixte (4BC adjacentes et excentricité 60%).

On remarqué les tensions induite visuellement est équilibré qui nécessite une analyse spectrale pour détecter le défaut d'excentricité par contre dans le cas de défaut mixte est fortement déséquilibré.

La Figure (III.15) montre les spectres de tension induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné dans la machine avec défauts de court circuit.

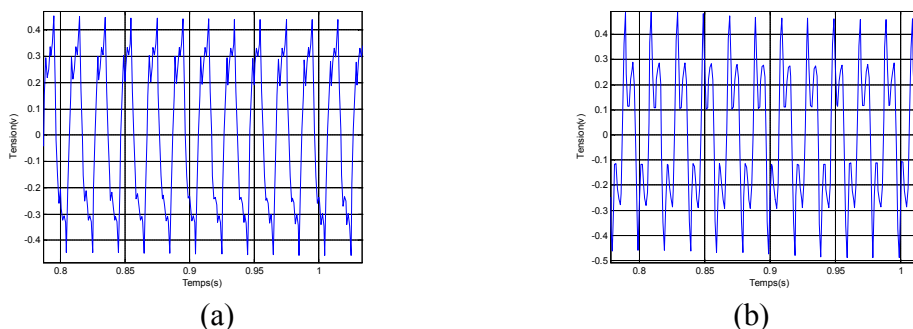


Fig. III.15: les spectres de tension induite E_c délivré par le capteur bobiné de la machine avec défaut court circuit : (a) court circuit 20spires, (b) court circuit 40 spires.

Nous observons un déséquilibre et ce déséquilibre augmente en augmentant le nombre de spire de court circuit.

La Figure (III.16), montre les spectres de tension induite E_c délivré par le capteur bobiné de la machine avec défaut de cassure de barre.

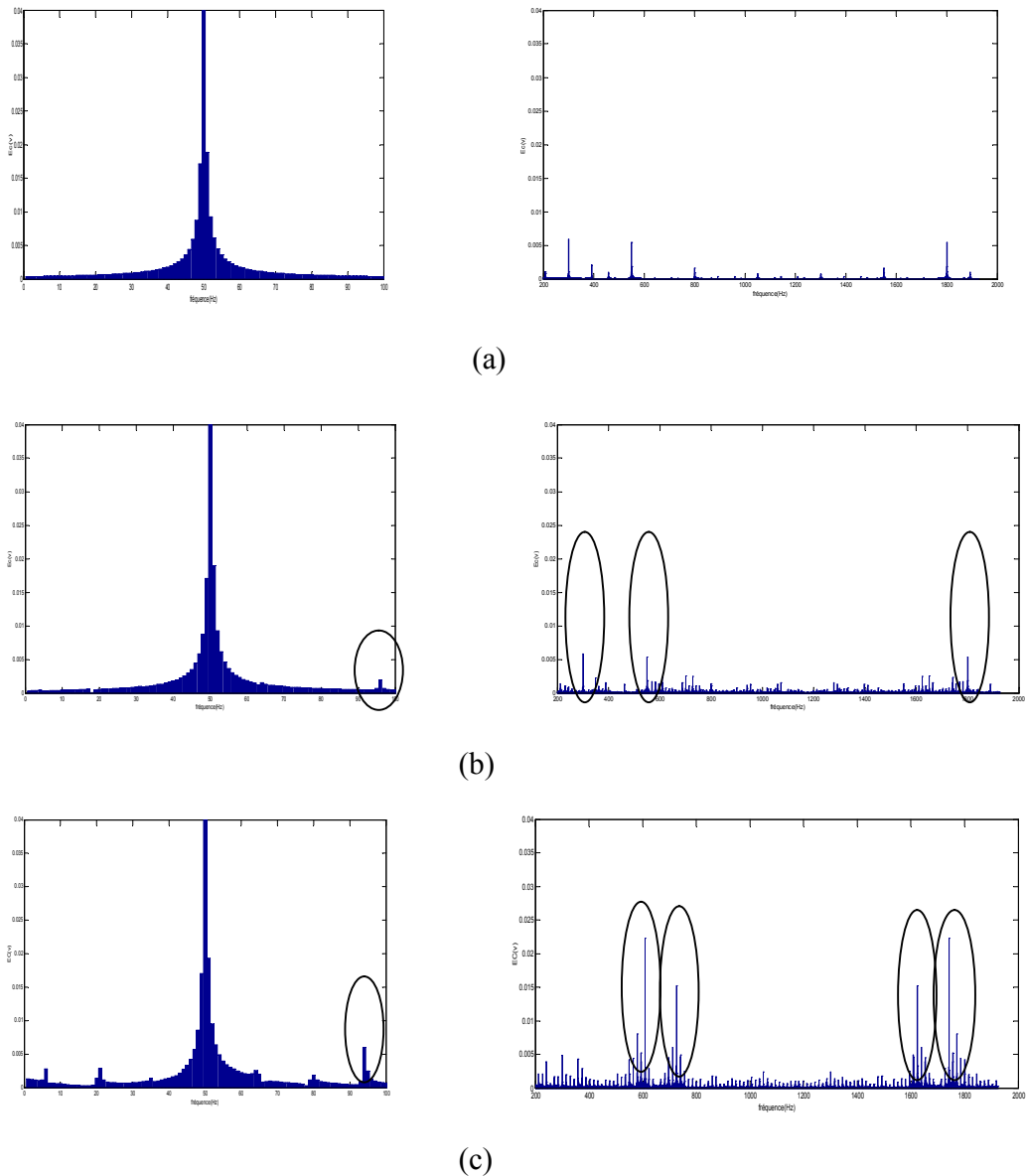


Fig. III.16: les spectres de tension induite E_c délivré par le capteur bobiné de la machine saine et avec défaut de cassure de barre : (a) saine, (b) une seule barre cassées, (c) quatre barre cassées adjacentes.

On remarque la présence de la composante dans les cas (b, c) de basse fréquence autour de (95Hz).et l'augmentation des composantes autour de fréquence (650Hz, 750Hz, 1800Hz).

La Figure (III.17), montre les spectres de tension induite E_c délivré par le capteur bobiné de la machine avec défaut d'excentricité.

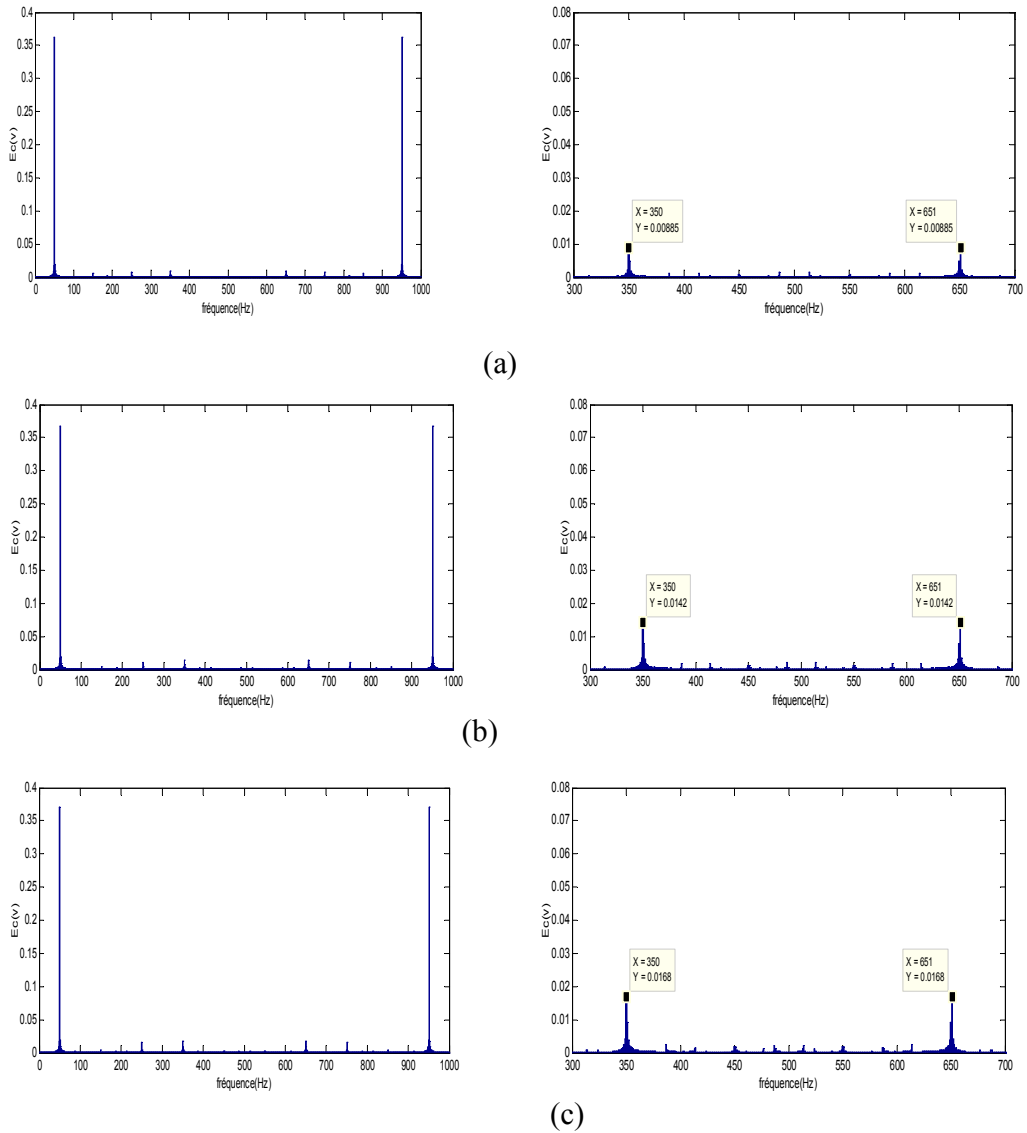


Fig. III.17: les spectres de tension induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné de la machine avec défaut: (a) excentricité de 20%, (b) excentricité de 40%, (c) excentricité de 60%.

D'après les résultats présentés dans la Figure (III.17), on remarque l'augmentation de raies de fréquence (350Hz, 650Hz) composante par rapport à l'état sain.

La Figure (III.18), montre les spectres de tension induite E_c délivré par le capteur bobiné de la machine avec défaut mixte (4BC adjacentes et excentricité 60%).

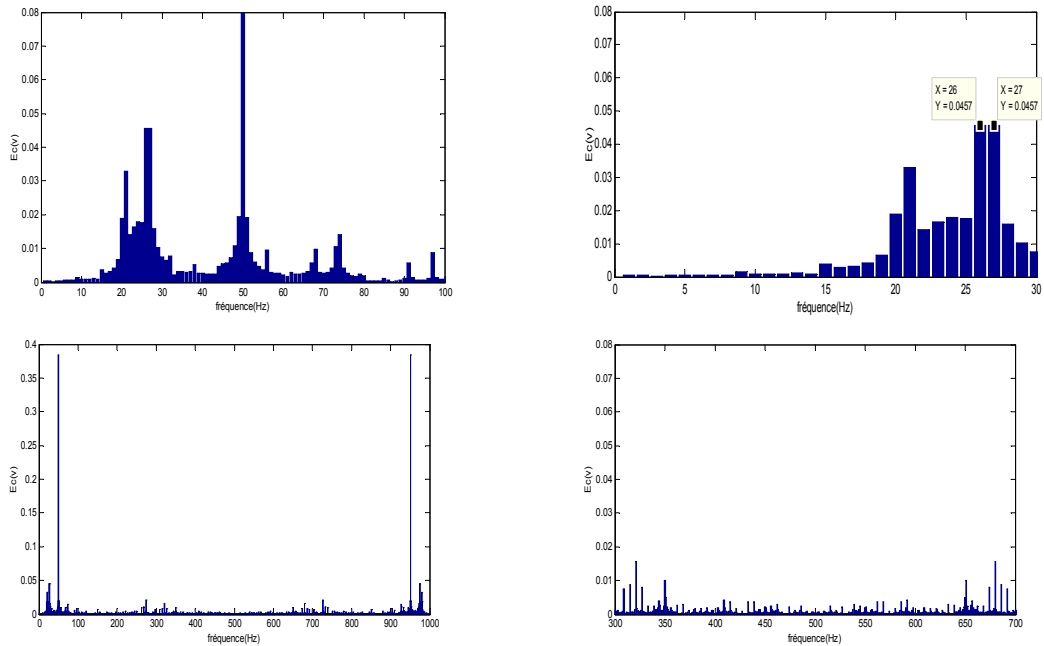


Fig. III.18: les spectres de tension induite E_c délivré par le capteur bobiné de la machine avec défaut mixte (4BC adjacentes et excentricité 60%).

D'après les résultats présentés dans la Figure (III.18), on remarque la présence des signatures des défauts de cassure de barre et l'excentricité de la composante par rapport à l'état sain.

La Figure (III.19), montre les spectres de tension induite E_c délivré par le capteur bobiné de la machine avec défaut de court circuit.

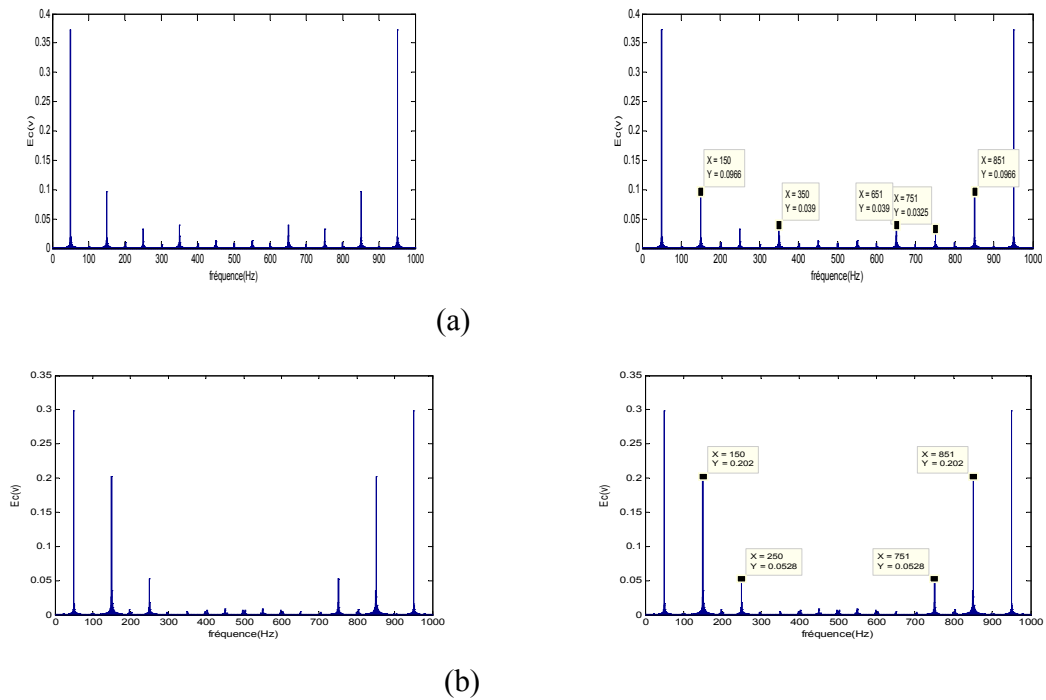


Fig. III.19: les spectres de tension induite E_{c1} délivré par le capteur bobiné de la machine avec défaut court circuit : (a) court circuit 20spires, (b) court circuit 40 spires.

D'après les résultats présentés dans la Figure (III.19), on observe des plusieurs composantes et on a choisi comme indicateur de défaut la composante de fréquence 150Hz et cette composante augmente en fonction nombre de spire en court circuit.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par l'analyse des lignes du flux à l'extérieur de la machine dans les différents cas des défauts, par la suite nous avons utilisé deux méthodes de diagnostic l'une basée sur l'analyse spectrale des courants statorique, nous avons constaté que les défauts de cassure de barre engendrent des raies de fréquence $(1+2K_g)f_s$, et F_s+kF_r pour le défaut d'excentricité, et pour les défauts de court circuit entre spire on observe des composantes d'ordre multiple de fréquence d'alimentation ($k \cdot F_s$).

La deuxième méthode basée sur l'analyse de la tension induite, les résultats montrent aussi l'efficacité de la méthode pour le diagnostic.



Conclusion générale

Conclusion générale

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

Notre travail est basé sur la détection des défauts de la machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil en utilisant des modèles à élément finis.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone triphasée à cage, ainsi que ses origines. Puis, nous avons présenté un état de l'art des différentes techniques de surveillance des machines asynchrones.

Contrairement à la plupart des études analytiques de diagnostic nous avons développé un modèle à base d'éléments finis, sous logiciel Flux 2D[®], permettant de représenter différents défauts pouvant survenir lors d'un fonctionnement normal.

Ces modèles a permis de mettre en évidence l'effet des défauts sur le fonctionnement de la machine, les signatures associées à chaque défaut et de tracer les éventuelles évolutions des pannes électriques qui peuvent être générées suite à ces anomalies.

Enfin nous avons abordé à la détection des défauts dans la machine asynchrone en utilisant deux méthodes, l'une basé sur l'analyse spectrale du courant statorique et la deuxième basé sur l'analyse de champ de fuite, nous avons constaté l'efficacité des deux méthodes dans le domaine de diagnostic.

En termes de perspectives, on peut dire que ce travail est une initiation à :

- Etudier l'influence sur le modèle par les autres défauts possibles ;
- Validation expérimentale ;
- Diagnostic des autres types des machines.

Références

- [1] **K. Nour, T. Arezki** "Technique de diagnostic des défauts statorique d'un moteur asynchrone", Diplôme de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2017.
- [2] **M. Ammar**, "Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones" Thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, 2012.
- [3] **E. Schaeffer**, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outil paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.
- [4] **L. Kerszenbaum et C. F. Landy**, "The existence of large inter bar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and en-ring faults" IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-103, n°7, pp.1854- 1862, July 1984.
- [5] **Y. Laamari**, "Diagnostic des défaillances dans les systèmes électromécaniques" Thèse de doctorat, Université badji mokhtar annaba, 2016.
- [6] **P. O'Donnell**, "Report of large reliability survey of industrial and commercial installations, Part 1", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA 21, N°4, July/august 1985 pp 853 – 864.
- [7] "Présentation des avaries. Machines électriques tournantes" cahier des préventions. CP2, Allianz, 1988.
- [8] **O. V. Thorsen, M. Dalva**, "A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries" IEEEET transactions on Industry Applications, Vol.31, no.5, pp.1186-1196, September 1995.
- [9] **M. S. Naït-Saïd, M. E. H. Benbouzid et A. Benchaïb**, "Detection of broken bars in induction motors using an extended kalman filter for rotor resistance sensor less estimation" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.15, no 1, pp.66-70, Mars 2000
- [10] **N. M. Elkasabgy, A. R. eastham, G. E. Dawson**, "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.28, no.1, Part 1, pp. 165-171, Jan.-Fév. 1992
- [11] **T. J. Sobczyk, A. Izowski**, "Recognition of rotor eccentricity of induction motor based on the Fourier spectra of phase currents" Proc. ICEM'98, pp. 408 – 413, Vol1, September 2 - 4 1998 Istanbul Turkey

- [12] **V. Devanneaux, H. Kabbaj, B. Dagues et J. Faucher**, "An accurate model of squirrel cage induction machines under static, dynamic or mixed eccentricity" Proc. IEEE SDEMPED 2001 – Symposium on diagnostics for electric machines, power electronics and drives, pp.121-126, 1-3 September 2001 Grado , Italia
- [13] **A. H. Bonnet**, "Cause and analysis of Anti-Friction Bearing Failures in A.C Induction Motors" IEEE Transactions on Industry Application, pp 14 - 23, Sept/Oct 1993
- [14] **Poloujadoff M.**, « The theory of three phase induction squirrel cage machine », Electric Machines and Power Systems, n°13,1987, pp. 245-264
- [15] **Toliyat H. A. and Lipo T. A.**, « Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults »,IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 10, n°2, June 1995, pp. 241-247.
- [16] **G. Barakat** « Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone à cage en présence de défauts ». Article de synthèse des travaux de huit laboratoires dans l'opération " Détection de Défauts et Diagnostic des Actionneurs" du thème "Sûreté - Fiabilité", p3, 2005.
- [17] **Jerance N., Rostaing G., Rognon J.-P., Foggia A.**, « Induction machine modeling by reluctance network for fault diagnostic », Proc. of electrimacs'02, Montréal, Canada, 18th - 21st August, 2002.
- [18] **Derrhi M.**, « Modélisation de la machine asynchrone par réseaux de perméances, validation par le diagnostic», Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne, 2000.
- [19] **Bangura J.F., Demerdash N.A.**, « Diagnosis and characterization of effects of broken bars and connectors in squirrel-cage induction motors by time-stepping coupled finite element-state space modeling approach », IEEE Trans. on Energy Conversion, vol.14, n°4, December 1999, pp.1167-1176.
- [20] **Negrea M.D.** Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines. Doctoral dissertation, Helsinki University of Technology, 2006.
- [21] **Bouzida H., O. Touhami, R. Ibtouen, M. Fadel, M. Benhaddadi**, and Olivier G. Model structures used in rotor defect identification of a squirrel cage induction machine. Canadian conference on electrical and computer engineering, IEEE CCECE '06, pp. 1671–1676, May 2006. Ottawa, Ont.

- [22] **Touhami O., N. Lahcene, R. Ibtouen, and M. Fadel.** Modeling of the induction machine for the diagnosis of rotor defects. Part. I: An approach of magnetically couple multiple circuits. In 31st Annual Conference of Industrial Electronics Society, IEEE IECON '05, pp. 1580–1585, Raleigh, NC, USA, May 2005.
- [23] **Touhami O., N. Lahcene, R. Ibtouen, and M. Fadel.** Diagnosis of induction machi rotor defects from an approach of magnetically coupled multiple circuits. In IEEE Proceedings of the 38th Southeastern Symposium on System Theory Tennessee Technological University, pp. 1992–1996, Cookeville, TN, USA, March 5-7 2006.
- [24] **Touhami O., N. Lahcene, and R. Ibtouen.** Spectral analysis for the rotor defects diagnosis of an induction machine. In IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing, pp. 183–187, Faro, Portugal, 1-3 September 2005.
- [25] **Boumegoura T.** Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic. PhD thesis, Ecole centrale de Lyon, France, 2001.
- [26] **Bouzida A. and M.A. Boumaza.** «Diagnostic de défauts au rotor par l'approche de l'estimation paramétriques». Thèse d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2005.
- [27] **Benabida F. and M. Ouadah.** «Diagnostic de défauts au stator et au rotor par estimation paramétrique de la machine asynchrone `a cage d'écureuil». Thèse d'ingénieurs, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2006. ENP 2008 67
- [28] **Merabet S. and D. Houssine.** « Diagnostic de défauts de la machine asynchrone `a cage d'écureuil par la méthode de reconnaissance des formes » Thèse d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2007.
- [29] **Touhami O. and M. Fadel** « Faults diagnosis by parameter identification of the squirrel cage induction machine » International Electric Machines & Drives Conference, IEEE IEMDC '07, pp. 821–825, 3-5 May 2007. Antalya.
- [30] **S. Bazine** « Conception et implémentation d'un Meta-modèle de machines asynchrones en défaut ». Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 29 juin 2009

- [31] **C. Andrian** « Méthode globale de diagnostic des machines électriques ». Thèse de doctorat, Université Lille de Nord de France – École doctorale SPI et Université d'Artois – Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement, 2012.
- [32] **H. Radjeai** « Contribution à l'amélioration des modèles mathématiques des machines synchrones » Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 2007.
- [33] **M. Belatel** « Contribution a la conception assistée par ordinateur des machines électriques » thèse de magister, université Mentouri, Constantine, 2004.
- [34] **M. Mostefai, H. Radjeai** « Maintenance du logiciel FLUX » Université Ferhat Abbas De Sétif, Cedrat, octobre 2008.
- [35] **A. Zorig** « Identification des MAS en Vu de leurs diagnostic » mémoire de magister, Université de Sétif, année 2010
- [36] **V. Fireteanu and A-I. Constantin**, “From the 2D to 3D Finite Element Analysis of the Broken Bar Falts in Induction Motors”, Proc. Of ICATE2016, Craiova, Romania.
- [37] **Negin Lashkari, Hamid Fekri Azgomi, Javad Poshtan, Majid Poshtan**, “Asynchronous motors fault detection using ANN and fuzzy logic methods”, Energy Congress and Exposition (ECCE), 2016 IEEE, 18-22 Sept. 2016, Milwaukee Convention Center Milwaukee, WI, USA.
- [38] **Marcin Wolkiewicz, Grzegorz Tarchala, Teresa Orłowska-Kowalska, Czesław Kowalski**, “Stator fault monitoring based on internal signals of vector controlled induction motor drives”, IECON 2016 – 42nd Annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 23-26 Oct. 2016, Florence, Italy.
- [39] **S. Bachir**. « Contribution au diagnostic da la machine asynchrone par estimation paramétrique », Thèse de Doctorat en Automatique, Ecole Doctorale des Sciences pour l'ingénieur, 2002.
- [40] **R. Merad** « Outils de diagnostic appliques a la machine asynchrone triphasée a cage d'écureuil ». Mémoire de magister, Université de Constantine, 2006.

Résumé

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

L'objectif du présent travail est l'élaboration d'un modèle des éléments finis, à l'aide du Logiciel Flux2D®, qui permet de simuler les différents défauts dans la machine asynchrone.

Dans ce travail on a appliqué deux techniques de diagnostic (analyse spectrale des courants statorique, l'analyse de champs de fuite) pour détecter les signatures de défaut.

Les résultats obtenus indiquent clairement que les signatures de ces défauts apparaissent dans le spectre du courant statorique et la tension induite de champs de dispersion.

Mots clés : Machine Asynchrone, Eléments finis, Flux 2D, champs de dispersion, Diagnostic.

ملخص:

كان تشخيص العيوب في الآلات الكهربائية موضوع العديد من الأبحاث والاهتمام الصناعي لسنوات عديدة. الهدف من هذا العمل هو تطوير نموذج العناصر المحدود باستخدام برنامج Flux2D®، مما يجعل من الممكن محاكاة الأخطاء المختلفة في الآلة غير المتزامنة. في هذا العمل، تم استخدام طريقتين تشخيصيتين (تحليل طيفي للتيارات الساكنة، وتحليل حقول التسرب) للكشف عن التوقعات الافتراضية. تشير النتائج التي تم الحصول عليها بوضوح إلى أن توقعات هذه العيوب تظهر في طيف التيار الثابت والفلطية المستحثة لمجال التشتت. **كلمات البحث:** آلة غير متزامنة، العناصر المنتهية، تدفق ثنائي الأبعاد، مجالات التشتت، التشخيص.

Abstract

The diagnosis of defects in electrical machines has been the subject of several researches and industrial interest for many years.

The objective of this work is the development of a finite element model, using the Flux2D® Software, which makes it possible to simulate the various faults in the asynchronous machine.

In this work, two diagnostic techniques (spectral analysis of the stator currents, the analysis of leakage fields) were used to detect the default signatures.

The results obtained clearly indicate that the signatures of these defects appear in the spectrum of the stator current and the induced voltage of dispersion fields.

Key words: Asynchronous machine, Finite elements, 2D flow, dispersion fields, Diagnosis.