

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université d'Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Machines Electriques

Présenté par

BOUSHABA Abdelhakim, SOUSSA Ayoub et KIDOUS

Mohammed

Thème

**Détection des défauts rotoriques dans la machine
asynchrone triphasée par analyse de la vitesse de
rotation**

Soutenu le 12/09/2020. Devant le jury composé de :

Dr. ALLAL Abderrahim	Maitre de conférences A	Président
Dr. HALEM Noura	Maitre de conférences A	Rapporteur
Dr. TOUIL Slimane	Maitre de conférences B	Examineur

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

Nous remercions ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la santé, la volonté et la patience de mener ce travail à terme.

Nous tenons à remercier cordialement ;

*Notre encadreur, **Dr. HALEM Noura** pour ses orientations, ses conseils, ses remarques judicieuses et sa disponibilité.*

Nous remercions aussi ;

- *les membres du jury.*
- *Aussi nos remerciements vont à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour finir ce travail.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de ma grand-mère ;

A ma chère mère et mon cher père ;

Qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes chères sœurs ;

Dr. Yasmine, Safa et Wafa aussi Abir et son mari et sa petite Amira,

A ma grand-mère, à mes oncles, mes tantes et tous leurs enfants ;

A qui je souhaite une bonne santé.

A mes chers ;

Abderrahim, Amir, Badr Eddine, Nacer Eddine, Zohir, Houssam, Abelouahab, Saddek, Majd Eddine, Redha, Saber, Oussama, Salah, Chahir, Ayoub, Mohammed

Dr. Rachid, Ahmed, Abderrahmane et aussi mes très chers qui sont loin de moi.

A toute ma famille BOUSHABA.

A tous mes collègues de la promotion « Machines électriques 2020 ».

الملخص

العمل المقدم في هذه المذكرة هو مساهمة في نمذجة الآلة اللامتزامنة ذات القفص السنجابي لتشخيص أعطال الدوار بطريقة العناصر المحددة. موضوع دراستنا هو تشخيص عطب اللامركزية. تم عمل تذكير بالآلة غير المتزامنة ثم تم إجراء عرض تقديمي حول الأعطال المختلفة بالإضافة إلى عرض موجز لطرق التشخيص المختلفة، من بين أمور أخرى التحليل الطيفي للتيار في الجزء الساكن. يبدو أن تطبيق التحليل الطيفي على الكميات المختلفة لم يقدم أي دليل حول اللامركزية. ومع ذلك ، كانت الدراسة الزمنية للإشارات المختلفة مثمرة.

RESUME

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en vue du diagnostic des défauts rotoriques par la méthode des éléments finis. Le défaut d'excentricité est l'objet de notre étude.

Un rappel de la machine asynchrone a été fait puis un exposé sur les différents défauts ainsi qu'une présentation brève des différentes méthodes de diagnostics ont été effectués entre autres l'analyse spectrale du courant statorique ou MCSA.

Il semble que l'application de l'analyse spectrale sur les différentes grandeurs n'a fourni aucun indice sur le défaut d'excentricité. Cependant l'étude temporelle des différents signaux a été fructueuse.

ABSTRACT

The work presented in this memory is a contribution to the modeling of the asynchronous squirrel-cage machine for diagnosis of the rotor defects by the finite element method. The defect of eccentricity is the object of our study.

A recall of the asynchronous machine was made then a talk on the various defects as well as a short presentation of the various methods of diagnoses were carried out inter alia the spectral analysis of the stator current or MCSA.

It seems that the application of the spectral analysis on the various sizes did not provide any index on the defect of eccentricity. However, the temporal study of the various signals was profitable.

TABLE DES MATIERES

	Page
Remerciements	i
Dédicaces	ii
Résumé	iii
Listes des figures et tableaux	viii
Liste des symboles et abréviations	xii
Introduction générale	1

CHAPITRE I : Etat de l'art

I.1 Introduction	5
I.2 Machine asynchrone à cage d'écureuil	5
I.2.1 Stator	6
I.2.2 Rotor	7
I.2.3 Organes mécaniques	7
I.2.4 Paliers	8
I.3 Défaillance de la machine asynchrone	8
I.3.1 Défauts statoriques	9
<i>I.3.1.1 Court-circuit entre spires</i>	9
<i>I.3.1.2 Court-circuit entre phases</i>	9
<i>I.3.1.3 Court-circuit avec le bâti (la carcasse)</i>	9
I.3.2 Défauts rotorique	9
<i>I.3.2.1 Rupture de barres et d'anneau de court-circuit</i>	91
<i>I.3.2.2 Excentricité</i>	10
I.3.3 Défaillances des roulements mécaniques	12

I.3.4 Défaillances de circuit magnétique	12
I.4 Méthodes de diagnostics	13
I.4.1 Méthodes de connaissances	13
I.4.2 Méthodes de redondances analytiques	13
I.4.3 Méthodes par l'analyse de signaux	13
<i>I.4.3.1 Diagnostic par analyse du courant statorique</i>	14
<i>I.4.3.2 Diagnostic par l'analyse vibratoire</i>	14
<i>I.4.3.3 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite</i>	14
<i>I.4.3.4 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique</i>	14
<i>I.4.3.5 Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée</i>	15
I.5 Méthodes de modélisation	15
I.5.1 Approche analytique	15
I.5.1.1 Modèle de Park	15
I.5.1.2 Modèle triphasé-triphasé	16
I.5.1.3 Modèle multi-enroulement	16
I.5.2 Approche numérique	16
<i>I.5.2.1 Modélisation par Méthode des réseaux de perméance</i>	16
I.5.2.2 Modélisation par méthode des éléments finis	17
I.6 Conclusion	18

CHAPITRE II : Modélisation de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis

II.1 Introduction	20
II.2 Méthode des éléments finis	20

II.2.1 Principe de la méthode des éléments finis	20
II.2.2 Formulations	21
II.2.3 Model utilisé	23
II.2.3.1 <i>Model magnétostatique</i>	23
II.2.3.2 <i>Model magnétodynamique</i>	24
II.2.3.3 <i>Model magnétique transitoire</i>	24
II.3 Présentation du logiciel FLUX2d	25
II.4 Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage par la méthode des éléments finis	25
II.5 Conclusion	30

CHAPITRE III : Simulation par éléments finis du défaut d'excentricité et résultats

III.1 Introduction	32
III.2 Résultats de simulation	32
III.2.1 Machine à l'état sain	32
III.2.1.1 <i>Moteur à vide</i>	32
III.2.1.2 <i>Pleine charge</i>	34
III.2.2 Machine avec 10% de défaut d'excentricité	36
III.2.2.1 <i>Moteur à vide</i>	36
III.2.2.2 <i>Pleine charge</i>	38
III.2.3 Interprétations	40
III.2.4 Analyse spectrale	41

III.2.4.1 <i>Etat sain</i>	41
III.2.4.2 <i>Etat de défaut</i>	42
III.2.4.3 Interprétations	43
III.3 Spectres de la vitesse	47
III.4 Spectres du couple	49
III.5 Conclusion	51
Conclusion générale	52
Listes des références	55
Annexe	58

Les listes des figures

	Page
CHAPITRE I : Etat de l'art	
Fig.I.1.Eléments de construction du moteur à induction	6
Fig.I.2 Stator d'un moteur à induction	7
Fig.I.3 représentation de la cage du rotor	7
Fig.I.4 Statistiques des défauts de la machine asynchrone	8
Fig.I.5 Défaut d'un rotor a cage d'écureuil : (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit	10
Fig.I.6 Type d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte	11
Fig.I.7 structure d'un roulement à billes	12
Fig.I.8 Diaporama des méthodes de diagnostic de machine électrique	13

CHAPITRE II : Modélisation de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis

Fig.II.1 Fonction d'interpolation d'un élément	21
Fig.II.2 La géométrie de la machine asynchrone 2 pôles étudiée	26
Fig.II.3 Caractéristiques B(H) pour le circuit magnétique	27
Fig.II.4 Maillage du circuit magnétique	27
Fig.II.5 Circuit électrique du modèle	28
Fig.II.6 Répartition du bobinage statorique	28
Fig.II.7 Formes d'onde des tensions de phase de la machine	28
Fig.II.8 Répartition des lignes de flux magnétique dans le circuit magnétique (a) a l'instant $t=0.005s$; (b) a l'instant $t=5s$	29

Chapitre III : Simulation par éléments finis du défaut d'excentricité et résultats

Fig.III.1 Courant i_a , moteur sain à vide	33
--	----

Fig.III.2 Zoom du courant i_a , moteur sain à vide	33
Fig.III.3 Superposition des courant i_a , i_b , i_c ; moteur sain à vide	33
Fig.III.4 Vitesse de rotation angulaire w , moteur sain à vide	34
Fig.III.5 Couple électromagnétique C_e , moteur sain à vide	34
Fig.III.6 Courant i_a , moteur sain à pleine charge	35
Fig.III.7 Zoom du courant i_a , moteur sain à pleine charge	35
Fig.III.8 Superposition des courant i_a , i_b , i_c ; moteur sain à pleine charge	35
Fig.III.9 Vitesse de rotation angulaire w , moteur sain à pleine charge	36
Fig.III.10 Couple électromagnétique C_e , moteur sain à pleine charge	36
Fig.III.11 Courant i_a , moteur à vide en défaut d'excentricité de 10%	37
Fig.III.12 Zoom du courant i_a , moteur à vide en défaut d'excentricité de 10%	37
Fig.III.13 Superposition des courant i_a , i_b , i_c ; moteur à vide en défaut d'excentricité de 10%	37
Fig.III.14 Vitesse de rotation angulaire w , moteur à vide en défaut d'excentricité de 10%	38
Fig.III.15 Couple électromagnétique C_e , moteur à vide en défaut d'excentricité de 10%	38
Fig.III.16 Courant i_a , moteur à pleine charge en défaut d'excentricité de 10%	39
Fig.III.17 Zoom du courant i_a , moteur à pleine charge en défaut d'excentricité de 10%	39
Fig.III.18 Superposition des courant i_a , i_b , i_c ; moteur a pleine charge en défaut d'excentricité de 10%	39
Fig.III.19 Vitesse de rotation angulaire w , moteur à pleine charge en défaut d'excentricité de 10%	40
Fig.III.20 Couple électromagnétique C_e , moteur à pleine charge en défaut d'excentricité de 10%	40
Fig.III.21 Spectre de i_a en linéaire, moteur sain à vide	41
Fig.III.22 Spectre de i_a en db, moteur sain à vide	41
Fig.III.23 Spectre de i_a en linéaire sur une plage [0,100] Hz moteur sain, à vide	41
Fig.III.24 spectre de i_a en db sur une plage [0,100] Hz moteur sain, à vide	41
Fig.III.25 Spectre de i_a en linéaire, moteur sain à pleine charge	42
Fig.III.26 Spectre de i_a en db, moteur sain à pleine charge	42
Fig.III.27 Spectre de i_a en linéaire, défaut de 10% d'excentricité, à vide	42
Fig.III.28 Spectre de i_a en db, défaut de 10% d'excentricité, à vide	42

Fig.III.29 Spectre de ia en linéaire, défaut de 10% d'excentricité, à pleine charge	42
Fig.III.30 Spectre de ia en db, défaut de 10% d'excentricité, à pleine charge	42
Fig.III.31 Spectre de ia en linéaire, sain et défaut de 10% d'excentricité, à pleine charge	43
Fig.III.32 Spectre de ia en db, sain et défaut de 10% d'excentricité, à pleine charge	43
Fig.III.33 superposition des courants, état sain et état de défaut	44
Fig.III.34 superposition des couples, état sain et état de défaut	44
Fig.III.35 superposition des vitesses, état sain et état de défaut	45
Fig.III.36 superposition des courants, état sain et état de défaut à vide	45
Fig.III.36 bis-superposition des courants, état sain et état de défaut à vide	46
Fig.III.37 superposition des couple, état sain et état de défaut à vide	46
Fig.III.38 superposition des vitesses, état sain et état de défaut à vide	46
Fig.III.39 superposition des spectres des vitesse, état sain, à vide, mi et pleine charge	47
Fig.III.40 superposition des spectres des vitesse, état de défaut, à vide, mi et pleine charge	48
Fig.III.41 superposition des spectres des vitesse [0 150] Hz, état sain, à vide, mi et pleine charge	48
Fig.III.42 superposition des spectres des vitesse [0 150] Hz, état de défaut, à vide, mi et pleine charge	49
Fig.III.43 superposition des spectres des couples, état sain, à vide, mi et pleine charge	49
Fig.III.44 superposition des spectres des couples, état de défaut, à vide, mi et pleine charge	49
Fig.III.45 superposition des spectres des couples [3500 4600] Hz, état sain, à vide, mi et pleine charge	50
Fig.III.46 superposition des spectres des couples [3500 4600] Hz, état de défaut, à vide, mi et pleine charge	50
Fig.III.47 superposition des spectres des couples [0 1500] Hz, état sain, à vide, mi et pleine charge	50
Fig.III.48 superposition des spectres des couples [0 1500] Hz, état de défaut, à vide, mi et pleine charge	51

Liste des tableaux

Page

CHAPITRE I : Etat de l'art

Tab.I.1 Signatures spectrales caractéristiques de quelques défauts pouvant affecter la machines asynchrone	15
--	----

CHAPITRE III : Simulation par éléments finis du défaut d'excentricité et résultats

Tab.III.1 Comparaison des valeurs moyennes des courants partie positive	43
Tab.III.2 Comparaison des valeurs moyenne des vitesses	47

Liste des symboles et abréviations

p : Nombre de pair de pole

R : Le nombre des barres rotorique

s : Le glissement

f_s : Fréquence d'alimentation

f_v : Fréquence de vibration

f_r : Fréquence rotorique

f_{roul} : Fréquence caractéristique de défaut de roulement

$f_{b.int}$: Fréquence caractéristique de bague intérieure

$f_{b.ext}$: Fréquence caractéristique de bague extérieure

f_{exc} : Fréquence caractéristique de défaut d'excentricité

f_b : Fréquence caractéristique de défaut de barre cassé

n_d : Ordre de l'excentricité dynamique

n_b : Nombre d'élément roulant

BD : Le diamètre d'un élément roulant

PD : La distance entre les centres billes diamétralement opposé

β : L'angle de contact des billes avec les bagues du roulement

λ : Range des harmoniques du temps

MCSA : Motor Current Signature Analysis

FEM : Finit Element Method

FFT : Fast Fourier Transforme

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans l'industrie, la sécurité des personnes, du matériel, de l'environnement du travail, la qualité de service et la rentabilité des installations imposent des contraintes sévères de fiabilité et de sûreté de fonctionnement.

Cependant, aucun système n'est à l'abri d'une défaillance, par conséquent, ceci exige la mise en œuvre de systèmes de prévoyance et de détection de défauts de manière précoce. Aussi depuis quelques années, et grâce à l'apport considérable de l'outil informatique et du matériel numérique, il est devenu possible de créer des systèmes de supervision et de diagnostic. Leur rôle est de signaler la présence des dysfonctionnements dans le processus (soit dans les moteurs électriques).

Actuellement, la plupart des équipages industriels sont à base de machines asynchrones triphasées, du fait de leur robustesse et de leur faible coût. Cependant, quoi que robustes, ces machines subissent des perturbations auxquelles elles sont sensibles. Les principaux défauts recensés sont les court-circuits entre spires des bobinages du stator, les dégradations des anneaux au rotor et tous les problèmes de barres et le défaut d'excentricité (statique, dynamique et mixte). Le premier type de défaut peut être détecté par l'observation des paramètres électriques du stator (inductances et résistances). Pour les défauts rotoriques, le modèle est plus complexe dans le sens que le défaut doit être ramené vers ou signalé par une grandeur mesurable extérieure au rotor lui-même. D'où l'importance que revêt un modèle dédié à la détection de défauts. A la suite de ce qui précède, le mémoire est partagé en trois chapitres.

Plusieurs modèles ont été développés, parmi ces modèles le modèle triphasé-triphasé linéaire et celui de Park qui représentent le comportement électrique de la machine asynchrone mais ils négligent les phénomènes magnétiques ou électriques tels que les courants de Foucault, la saturation magnétique, l'effet d'une géométrie complexe (l'effet d'encoche), Ces modèles sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axe de référence, ce qui conduit à des interprétations théoriques qui ne peuvent pas être utilisées pour analyser des effets localisés tels que les barres cassées dans le rotor de la machine en les distinguant des effets provenant d'autres incidents. D'autre part, ces modèles sont imprécis et ne décrivent qu'un fonctionnement sain de la machine.

La considération du comportement électromagnétique local du moteur permet d'avoir une modélisation plus précise. La résolution numérique *des équations de Maxwell* régissant le

comportement des champs électromagnétiques et la prise en considération des équations électriques représentant le circuit d'alimentation du moteur, permet de réduire les simplifications faites dans les modèles classiques et ainsi d'avoir un modèle plus proche de la machine électrique réelle.

Dans ce but nous nous orientons dans ce mémoire vers l'utilisation de la méthode de calcul par éléments finis à travers l'outil logiciel Flux2D, ce dernier nous permet d'utiliser la technique de circuits couplés pour la modélisation de la machine asynchrone.

A la suite de ce qui précède, le mémoire est partagé en trois chapitres :

Le premier chapitre recense les différents défauts des machines asynchrones d'une manière plus ou moins brève, on y trouve des techniques de détection et de diagnostic des défauts choisis à travers une analyse bibliographique.

Dans le deuxième chapitre, l'accent est mis sur la méthode de calcul par éléments finis, aussi une présentation brève sur l'outil logiciel utilisé dans ce mémoire. Dans ce chapitre, nous avons réalisé le modèle par les éléments finis de la machine asynchrone, après simulation, nous avons présentés les résultats de la distribution des lignes de flux pour l'état sain.

Le chapitre trois a été dédié à la simulation des deux modèles à base des éléments finis pour la simulation de l'état de sain et de l'état de défaut. Les résultats issus des simulations ont y été présentés et étudiés, ce qui a permis de trouver une issue autre que celle fournie par l'analyse spectrale qui s'est avérée inutile face au défaut d'excentricité.

Le mémoire est clôturé par une conclusion et des perspectives.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

I.1 Introduction

Caractérisée par sa robustesse, son prix relativement bas, son entretien moins fréquent, l'absence de collecteurs, sa puissance massique élevée ..., la machine asynchrone demeure la plus utilisée dans presque toutes les applications industrielles avec ou sans variation de la vitesse. Elle présente beaucoup d'autres avantages par rapport aux autres types de machines électriques.

Cependant de multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone, elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques, et leurs causes sont très variées.

L'étude des défauts des machines asynchrones a un double objectif :

- Comprendre leur génération de manière à prévoir leur gravité et leur développement.
- Analyser leur impact sur le comportement de la machine et en déduire les signatures.

I.2 Machine asynchrone à cage d'écureuil

La machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil est connue également sous le terme de moteur à induction [1]. On se propose, dans cette section, de rappeler brièvement la constitution de la machine asynchrone. Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement [2].

Les machines asynchrones peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes [2]:

- 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.

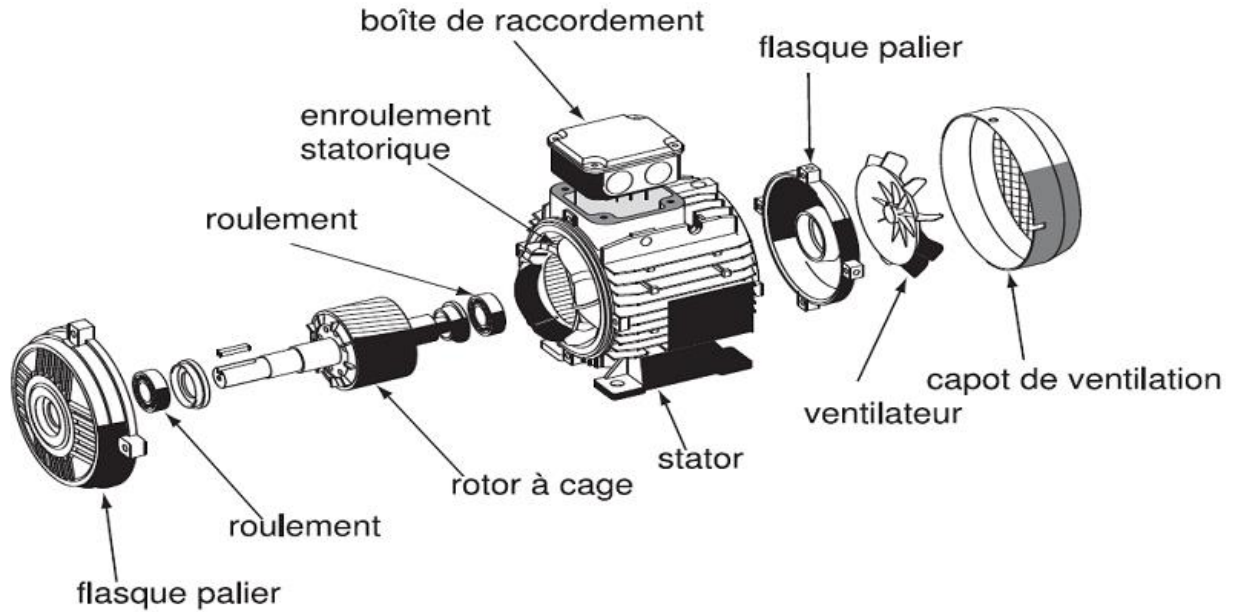


Fig. I. 1 les éléments de construction du moteur à induction

Réf [1]

I.2.1 Stator

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

Les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriquée, ondulée ou encore concentrique. L'enroulement concentrique est souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone [2].

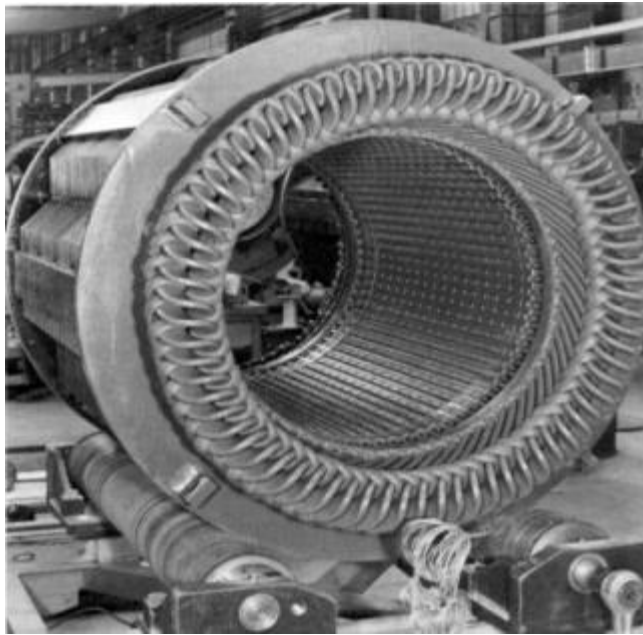


Fig. I. 2 Stator d'un moteur à induction Réf [1]

I.2.2 Rotor

Le rotor est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans le cas des rotors à cage d'écurieil, les encoches peuvent être semi-ouvertes ou fermées. Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées par un anneau terminal placé à chaque extrémité du rotor. Les conducteurs sont généralement réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre ou, à l'occasion, en laiton préformées et frettées dans les tôles du rotor [9].

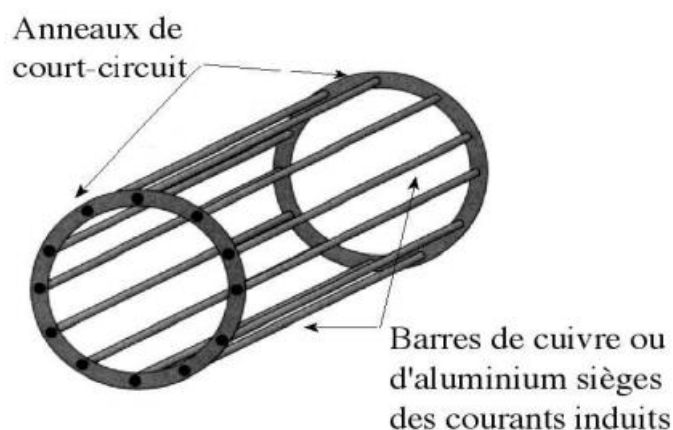


Fig. I. 3 Représentation de la cage du rotor Réf [1]

I.2.3 Organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie

centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des 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). Il est supporté par un ou plusieurs paliers [1].

I.2.4 Paliers

Les paliers sont constitués de roulements à billes et des flasques. Les roulements à billes sont insérés à chaud sur l'arbre, permettant ainsi d'assurer le guidage en rotation de l'arbre. Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage comme le montre (Figure I.1). L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone [2].

I.3 Défaillance de la machine asynchrone

Une défaillance d'une machine électrique représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou à long terme provoquer son endommagement [3].

Une variété d'études statistiques par différents auteurs tels que [IEEE85, Thorsen95, Thorsen99] offrent une synthèse des défauts qui peuvent affecter la machine. Ces études sont présentées à la figure I.4 [12].

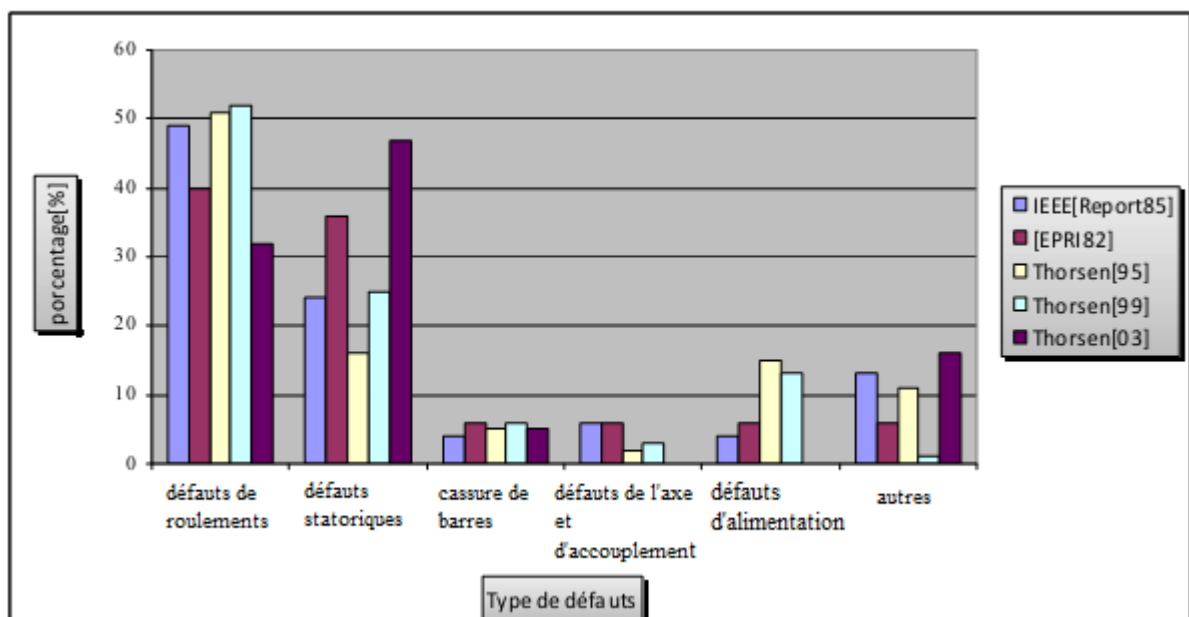


Fig. I. 4 Statistiques des défauts de la machine asynchrone

Réf [12]

I.3.1 Défauts statoriques

La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants qui se manifestent sous la forme d'un court-circuit entre spires, d'un court-circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse [3].

I.3.1.1 Court-circuit entre spires

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement. D'autre part, il entraîne aussi une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases et dans le cas des machines asynchrones, il amplifie les courants dans le circuit rotorique [3].

I.3.1.2 Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre dépend de la localisation du défaut. Dans le cas des machines asynchrones, les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce type de défaut [5].

I.3.1.3 Court-circuit avec le bâti (la carcasse)

Le bâti est raccordé généralement avec une masse de terre. Si le bâti n'a pas d'importance dans la sécurité, il crée les effets capacitifs ; le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement en cas court-circuit. La sécurité des personnes est donc soumise à un danger inattendu, et les dispositifs de protection sont nécessaires (disjoncteurs de sécurité) [6].

I.3.2 Défauts rotorique

I.3.2.1 Rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Les mêmes défauts qu'au stator peuvent se retrouver dans un rotor bobiné. Pour une machine asynchrone avec un rotor à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit (Figure I.5) [3].

La cassure ou rupture de barre (Figure I.5(a)) 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 de court-circuit. 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 [5].

La rupture de portion d'anneau (Figure I.5(b)) 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. 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 statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [10].

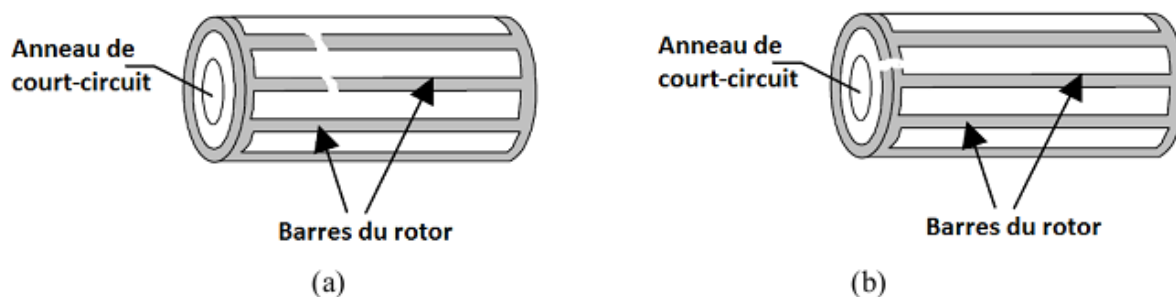


Fig. I. 5 Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : (a) rupture de barres ;

(b) rupture de court-circuit

Réf [3]

I.3.2.2 Excentricité

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se 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) [5]. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine. Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées [3]:

- L'excentricité statique (Figure I.6(a)) – généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.

- L'excentricité dynamique (Figure I.6(b)) – correspond, elle à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.
- L'excentricité mixte (Figure I.6(c)) – la somme des deux cas présentés ci-avant.

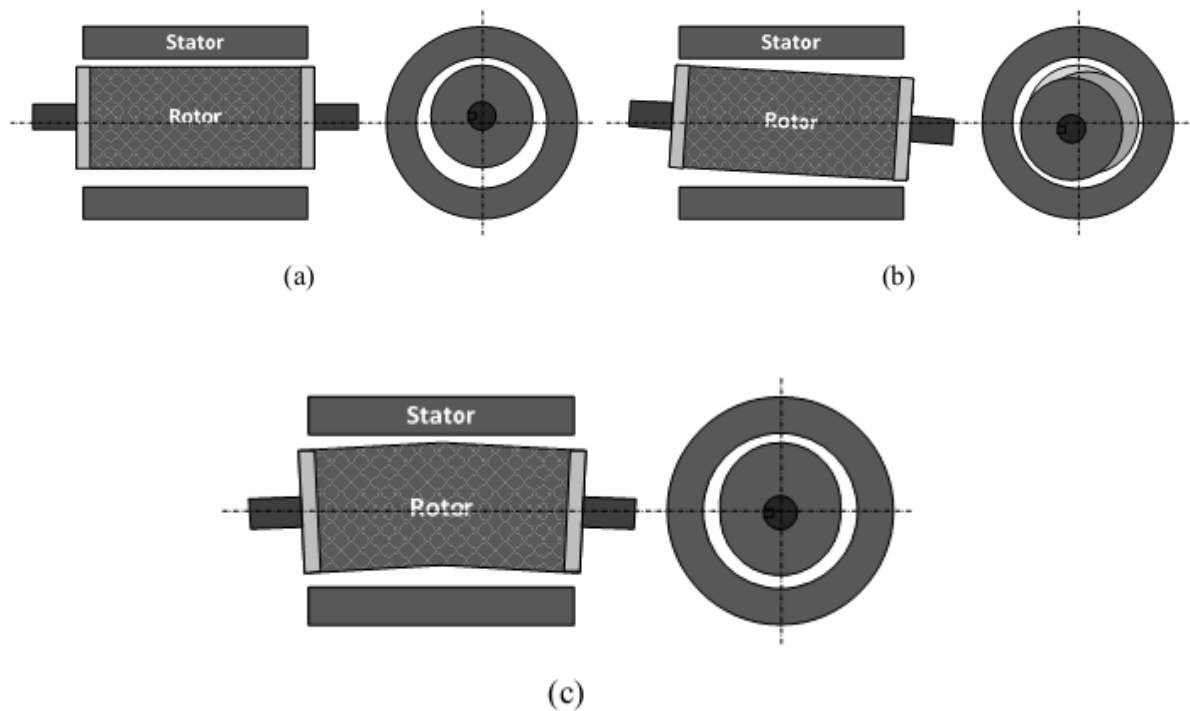


Fig. I. 6 Types d'excentricité : (a) statique, (b) dynamique, (c) mixte. Réf [3]

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature 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 vibrations considérables dans les enroulements [5].

I.3.3 Défaillances des roulements mécaniques

Parce que les éléments roulants du roulement supportent le rotor, quelque soient les défauts dans les roulements, ils vont produire des mouvements radiaux entre le rotor et le stator dans la machine. Par conséquent, des variations d'entrefer génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [7].

Le roulement est composé des éléments suivants [8] :

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

La figure I.7 montre la construction typique d'un roulement à billes.

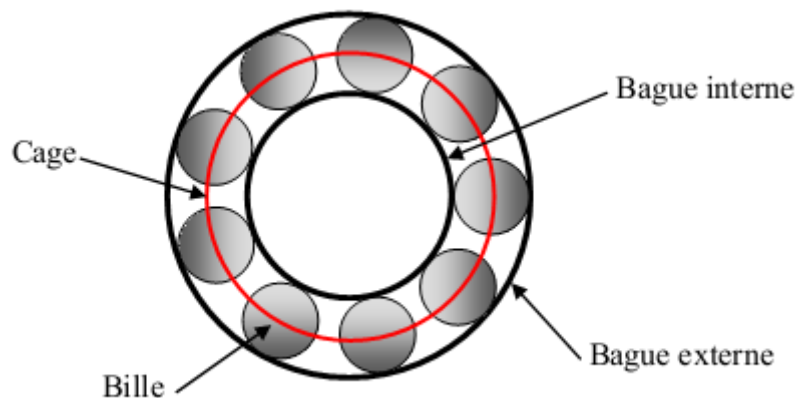


Fig. I. 7 Structure d'un roulement à billes

Réf [8]

I.3.4 Défaillances de circuit magnétique

Les tôles du circuit magnétique sont feuilletées et isolées entre elles, cependant elles peuvent se retrouver court-circuitées. Les causes les plus fréquentes de défaut de circuit magnétique sont généralement liées à un défaut sévère d'excentricité statique et/ou dynamique qui peut conduire à un contact front entre le stator et le rotor ce qui détruit le circuit magnétique, ou bien court-circuite des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles, ainsi la projection des corps étrangers dans l'entrefer peut entraîner l'abrasion des tôles et ainsi les court-circuiter [14].

I.4- Méthodes de diagnostics

On retrouve, dans les différents travaux, les trois axes constituant le domaine du diagnostic des machines électriques, qui conduisent à définir trois méthodologies de diagnostic : méthodes de connaissances, méthodes de redondances analytiques et méthodes par modélisation de signaux (voir Figure I.8) [3].

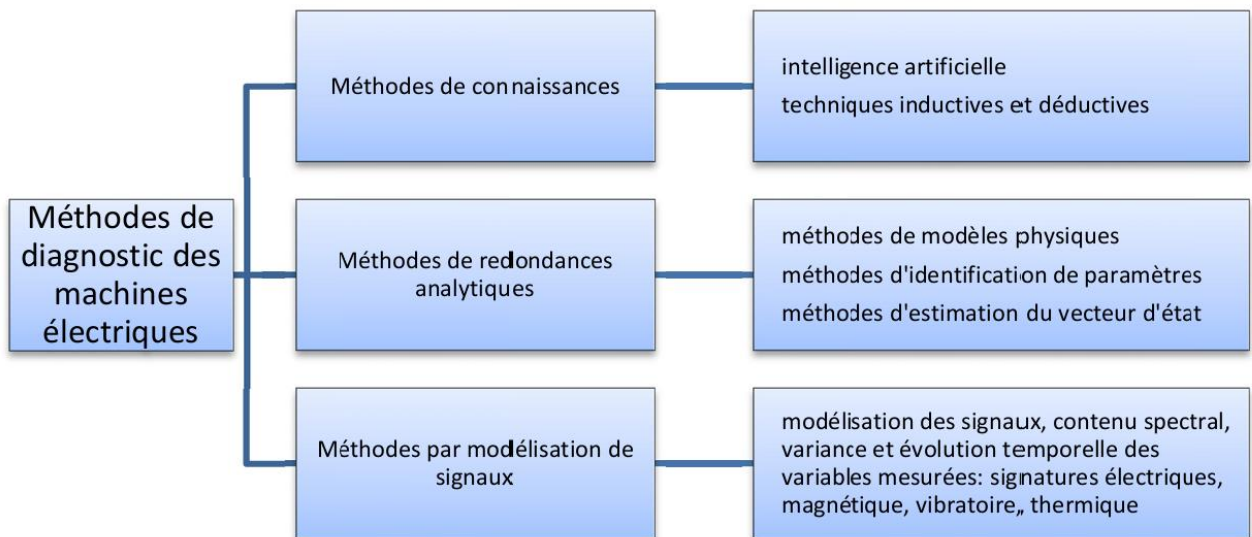


Fig. I. 8 Diaporama des méthodes de diagnostic de machine électrique

Réf [3]

I.4.1 Méthodes de connaissances

Les méthodes de connaissances n'utilisent pas de modèle mathématique pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expérience humaine confortée par des retours d'expérience [3].

I.4.2 Méthodes de redondances analytiques

Ces méthodes se basent sur une modélisation quantitative du système et exploitent les relations entre les variables du système considéré pour identifier les paramètres physiques à surveiller. On y distingue trois classes : les méthodes de modèles physiques, les méthodes d'identification de paramètres et les méthodes d'estimation du vecteur d'état [8].

I.4.3 Méthodes par l'analyse de signaux

Le principe des méthodes d'analyse de signal repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé [8]. Ce sont des méthodes basées sur une modélisation des signaux, le contenu spectral, la variance et l'évolution temporelle des variables mesurés [3].

La démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic des défauts sur les machines électriques repose sur l'analyse des grandeurs mesurables et les signaux de défaut. Les grandeurs et signaux de défauts les plus fréquemment utilisés sont [3] :

I.4.3.1 Diagnostic par analyse du courant statorique

Parce qu'il est facilement accessible, et vu sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis) [7].

I.4.3.2 Diagnostic par l'analyse vibratoire

Le diagnostic par l'analyse vibratoire fait partie des techniques mécaniques qui sont employées pour déceler des défauts au niveau des machines électriques. Une vibration est souvent accompagnée d'un bruit sonore qui peut être élevé même pour des faibles amplitudes de vibration. Les problèmes vibratoires dans les moteurs asynchrones ont une complexité accrue à cause de la présence du champ magnétique tournant [7].

I.4.3.3 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator et du rotor ce qui affecte la répartition du champ magnétique dans et hors de la machine. Plusieurs auteurs se sont penchés à l'exploitation du flux axial. En fait, si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de cette tension induite, peut être exploité pour détecter les différents défauts statoriques ou rotoriques [1].

I.4.3.4 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique

Cette technique, permet de détecter aussi bien les défauts rotoriques que les défauts de court-circuit entre spires dans les bobines statoriques. Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tous défauts, soit au niveau du stator ou au rotor, affectent directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de la santé du moteur [1].

I.4.3.5 Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée

Il est clair que le niveau d'informations portées par le signal de la puissance est plus grand que celui donné par le courant d'une seule phase, ce qui représente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres. Cette méthode est utilisée pour la détection des défauts mécaniques ou encore les défauts électriques tels que les courts-circuits entre spires statorique [1].

Pratiquement, la surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste donc à effectuer une transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Le tableau I.1 résume les signatures spectrales qui caractérisent les défauts de la machine asynchrone à cage [8].

Tab.I.1 Signatures spectrales caractéristiques de quelques défauts pouvant affecter la machine asynchrone

Défauts	Signatures spectrales
Roulement	$f_{roul} = f_s \mp k \cdot f_r , k = 1, 2, \dots$ $f_{bille} = \frac{PD}{BD} f_r \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos\beta \right)^2 \right]$ $f_{b.int} = \frac{n_b}{BD} f_r \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos\beta \right]$ $f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos\beta \right]$
Court-circuit statorique	$f_b = f_s \left[\frac{n}{p} (1 - s) \mp k \right], n = 1, 2, 3, \dots, k = 1, 3, 5, \dots$
Excentricités	$f_H = \left \left(\lambda \mp (k R + n_d) \frac{(1 - s)}{p} \right) f_s \right $ $f_{exc} = f_s \mp k \cdot f_r , k = 1, 2, 3, \dots$
Cassure de barres rotoriques	$f_b = (1 \mp 2 k s) f_s, k = 1, 2, 3, \dots$

I.5 Méthodes de modélisation

I.5.1 Approche analytique

I.5.1.1 Modèle de Park

Le modèle de Park est le modèle dynamique le plus simple du moteur asynchrone triphasé. Il a été développé pour la commande des machines saines triphasées et est obtenu par application

de la transformation de Park sur le modèle ABC/abc. La composante homopolaire s'annule si la machine est supposée équilibrée [13].

La représentation biphasée du modèle de Park n'est valide que si les phases de l'alimentation sont équilibrées et que la machine est saine et équilibrée, lors de l'apparition d'un défaut, un déséquilibre s'instaure dans la machine [13].

I.5.1.2 Modèle triphasé-triphasé

Dans le cas du modèle ABC/abc, le moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné tout comme celui à cage d'écureuil est représenté par 6 enroulements dans l'espace électrique ; trois enroulements triphasés repérés pour le stator par les axes \vec{A}, \vec{B} et \vec{C} et trois enroulements fictifs triphasés repérés pour le rotor par \vec{a}, \vec{b} et \vec{c} [13].

Le modèle triphasé-triphasé, représente la machine par trois phases au stator et trois autres au rotor. Il permet la détection de quelques types de défauts reliés surtout au stator tels que l'ouverture d'une phase statorique. Le court-circuit phase-phase ou le court-circuit phase-neutre. Mais il n'est possible pas avec ce modèle d'accéder aux problèmes liés aux barres rotoriques ou aux anneaux de courts-circuits [13].

I.5.1.3 Modèle multi-enroulement

Un modèle du moteur asynchrone à cage d'écureuil appelé modèle multi-enroulements a été proposé dans la littérature. Il suppose que le rotor est constitué d'autant de phases que de barres et que le stator est présenté par 3 phases comme dans le modèle ABC/abc. Il est donc possible d'observer les défauts au stator et au rotor à cause de la modélisation détaillée de la machine présentée par m circuits statoriques et n_b barres rotoriques [13]

I.5.2 Approche numérique

I.5.2.1 Modélisation par Méthode des réseaux de perméance

La méthode des réseaux de perméance est basée sur la décomposition du circuit magnétique de la machine électrique en tubes de flux élémentaires. Chaque tube ainsi obtenu, est caractérisé par sa perméance suivant qu'il se trouve dans le fer ou dans l'air. À partir de cette décomposition, on construit un réseau dit de perméance. Cette approche permet de prendre en compte les caractéristiques du fer utilisé pour la construction de la machine. En effet, le calcul des différentes perméances ne peut se faire qu'en fixant une valeur précise pour la perméabilité relative du fer μ_r . Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer qui varie en fonction de la position du rotor de la machine [5].

I.5.2.2 Modélisation par méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une approche qui requiert un temps de calcul important. L'utilisation des équations de Maxwell, à partir des formes locales, permet de résoudre le problème. La résolution analytique correspondante est complexe et ne permet de traiter le phénomène de saturation que de façon approchée [4].

On distingue deux techniques principales de résolution des équations des champs électromagnétiques [2] :

- **Différences finies** : le maillage est un quadrillage rectangulaire sur les nœuds pour lesquels est effectuée la discrétisation spatiale de l'équation différentielle, associée à la décomposition en série de Taylor du potentiel scalaire.
- **Éléments finis** : le principe fondamental réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, le potentiel est approché par un polynôme de degré faible. La résolution se ramène alors à la minimisation d'une fonction liée à l'énergie emmagasinée dans les éléments.

La méthode des éléments finis, grâce à sa fidélité au comportement électromagnétique de la machine, permet de simuler des dysfonctionnements réels en son sein avec une manifestation tout à fait localisée du défaut. Elle se caractérise essentiellement par [8]:

- Prise en compte de la géométrie de la machine.
- Prise en compte de l'effet de peau dans les barres rotoriques.
- Tenir compte des non linéarités des propriétés physiques dans les matériaux magnétiques.
- La méthode des éléments finis est capable d'examiner l'effet de saturation et les effets d'harmoniques de l'espace, cet avantage est très important particulièrement pour détecter les défauts en utilisant la technique d'analyse spectrale.
- De point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en changeant simplement les données du programme de calcul d'où une grande souplesse d'utilisation.

Actuellement, les logiciels des éléments finis, permettant de résoudre des problèmes magnétiques, sont proposés couramment sur le marché. Ils se répartissent principalement en trois catégories [2] :

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

I.6 Conclusion

Ce chapitre est un prétexte à la présentation des notions très importantes en diagnostic, tels que les défauts qui peuvent affecter la machine asynchrone, leurs causes et leurs signatures, ainsi que les méthodes du diagnostic. Comme nous l'avons mentionné précédemment, notre travail sera consacré à l'étude et à la détection du défaut d'excentricité statique d'un moteur asynchrone. Pour cela, il faut disposer d'un bon modèle, décrivant le comportement électromagnétique de la machine dans l'état sain et avec défaut.

CHAPITRE II

MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

CHAPITRE II : MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE PAR LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

II.1 Introduction

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche, que ce soit dans le but de dimensionnement, de la commande ou du diagnostic. La diversité des objectifs a fait apparaître plusieurs techniques de modélisation et d'outils de simulation, dont chaque type de modélisation est plus ou moins adapté à un domaine plus que les autres.

Afin de représenter le comportement de la machine lors d'un fonctionnement normal (machine saine) et dégradé (machine avec défaut), nous avons choisi de créer un modèle par les éléments finis qui tient compte de la topologie et des dimensions de la machine. Ce modèle présente l'avantage qu'il prend en considération le circuit magnétique de fer, cela conduit à introduire la courbe $B(H)$ avec saturation dans les calculs. De plus la littérature dit que cette méthode est la plus représentative du comportement de la machine. Elle en est la plus proche et la plus fine. Cependant si avec les autres techniques, la simulation de la machine n'excède pas les 30 mn voire une heure, celle-ci exige un temps de calcul qui dépasse les 36 heures avec l'outil d'informatique que nous utilisons et ceci pour chaque cas de simulation. Ceci pour dire que la finesse du modèle et des résultats ça se "paye". Dans ce qui suit nous allons essayer de présenter la méthode des éléments finis.

II.2 Méthode des éléments finis

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 assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [15].

Pour un élément triangulaire on a :

$$A_e(x, y) = a + bx + cy \quad (\text{II.1})$$

Pour les éléments quadrilatéraux on a :

$$A_e(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (\text{II.2})$$

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

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

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{n_e} A_e(x, y) \quad (\text{II.3})$$

e : Numéro d'élément.

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

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

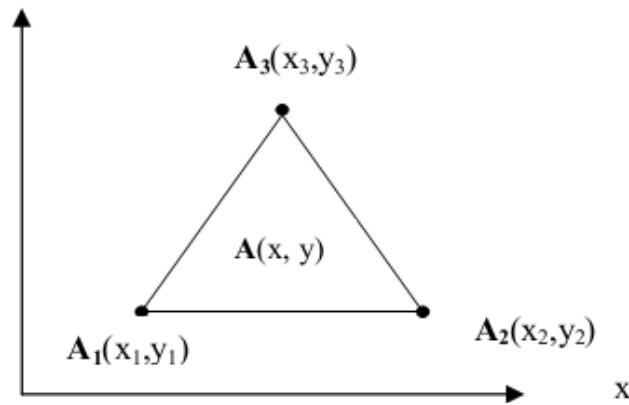


Fig.II. 1 fonction d'interpolation d'un élément ref[15]

II.2.2 Formulations

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

$$D(A) = F \quad (\text{II.4})$$

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

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

$$L(A) = G \frac{\partial A}{\partial t} + HA \quad (\text{II.5})$$

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

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

$$L(A) = H \quad (\text{II.6})$$

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

$$L(A) = G \frac{\partial A}{\partial t} \quad (\text{II.4}) \quad (\text{II.7})$$

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

Dans les machines électriques les équations qui régissent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré. On les définit comme suit : [12].

- Les relations de couplage électromagnétique :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.8})$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.9})$$

- Les relations de la conservation de flux :

$$\overrightarrow{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.10})$$

$$\overrightarrow{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.11})$$

- La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

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

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

- la relation de loi d'ohm :

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

Où,

\vec{H} : Champ magnétique (A/m).

\vec{E} : Champ électrique (V/m).

\vec{B} : Induction magnétique (T).

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

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

μ : Perméabilité magnétique (H/m).

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

II.2.3 Model utilisé

Selon les résultats escomptés et le temps de simulation dont on dispose, trois modes de résolutions peuvent être employé : [15]

II.2.3.1 Model magnétostatique

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courants induits) de la machine car il impose de connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. On s'en servira essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les sources sont indépendantes du temps.

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

Par conséquent, les équations du modèle deviennent : [15]

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

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

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

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

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

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

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

$$\overrightarrow{rot}(v.\overrightarrow{rot}\vec{A}) = \vec{j} + \overrightarrow{rot}(v.\vec{B}_r) \quad (\text{II.16})$$

où,

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

II.2.3.2 Model magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources du courant ou de la tension variant en fonction du temps, le terme $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ n'est pas nul et qui suppose la densité de courant sinusoïdale, et simulé en régime permanent. Ce qui permet d'obtenir des valeurs convenables du courant efficace. Ce mode pourra être utilisé pour étudier un schéma équivalent de la machine. Le système à résoudre est le suivant : [12]

$$\overrightarrow{rot}(v\overrightarrow{rot}\vec{A}) + j\omega\sigma\vec{A} = \vec{j} \quad (\text{II.17})$$

$j\omega = 2\pi f$: Pulsation électrique (rad.s⁻¹)

j : unité imaginaire ($j^2 = -1$)

II.2.3.3 Model magnétique transitoire

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

Donc le système à résoudre est le suivant : [15]

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

II.3 Présentation du logiciel FLUX2d

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs.

Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non (cas des machines électriques tournantes). C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite " bande de roulement " pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage.

La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés [15] :

- **Module Construction**

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

- **Module Solving Process**

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

- **Module Analysis**

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

II.4 Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage par la méthode des éléments finis

Une modélisation en deux dimensions (2D) de la machine est suffisante, et permet de diminuer notablement le temps de calcul. Le modèle éléments finis correspondant à notre machine à cage d'écureuil de 7.5 kW, 380 V, 50 Hz et 2 pôles est représenté à la figure II.2, (une description complète de la machine est donnée en annexe).

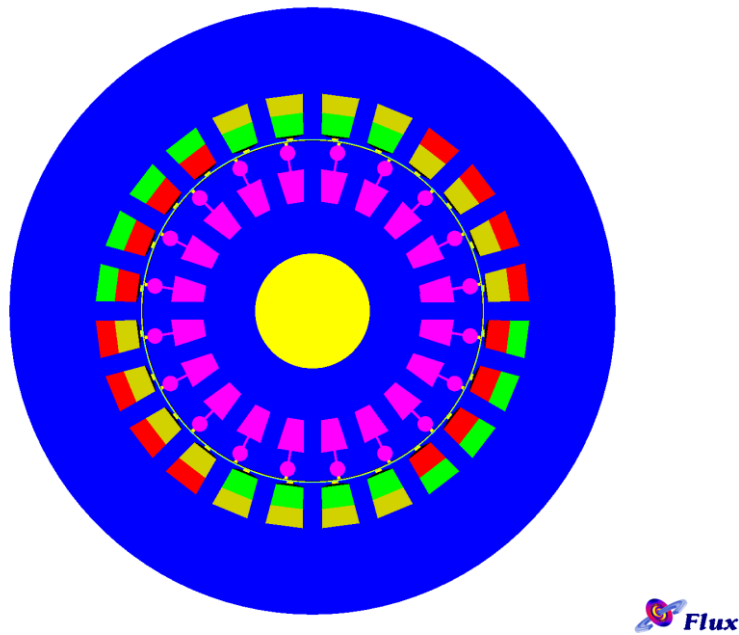


Fig.II.2. La géométrie de la machine asynchrone 2 pole étudiée

- Le stator est défini par un matériau ferromagnétique caractérisé par une courbe d'aimantation $B(H)$ représentée sur la figure II.3.
- Les 24 encoches statoriques sont définies par un matériau non magnétique d'une perméabilité magnétique égale à 1.
- L'entrefer est d'épaisseur égale à 0.5 mm, sa perméabilité magnétique est égale à 1.
- Le rotor contient un noyau ferromagnétique caractérisé par une courbe d'aimantation $B(H)$, et 20 barres d'aluminium.

La figure II.4 représente le maillage du circuit magnétique, l'exploitation principale du modèle éléments finis a pour objectif de faire le diagnostic, ce qui demande un maillage du domaine de calcul assez fin dans l'entrefer, dans les régions de type conducteur massif et au niveau des régions des encoches statoriques. Ces paramètres sont nécessaires pour garantir un compromis raisonnable entre la précision et la rapidité du calcul numérique.

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

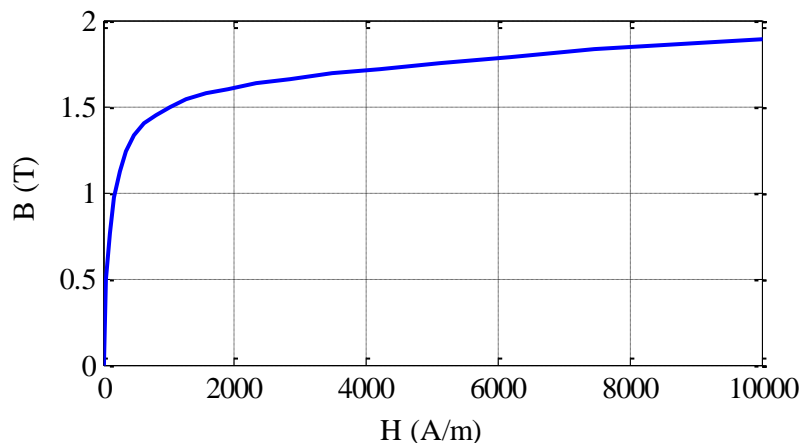


Fig.II.3 Caractéristiques $B(H)$ pour le circuit magnétique

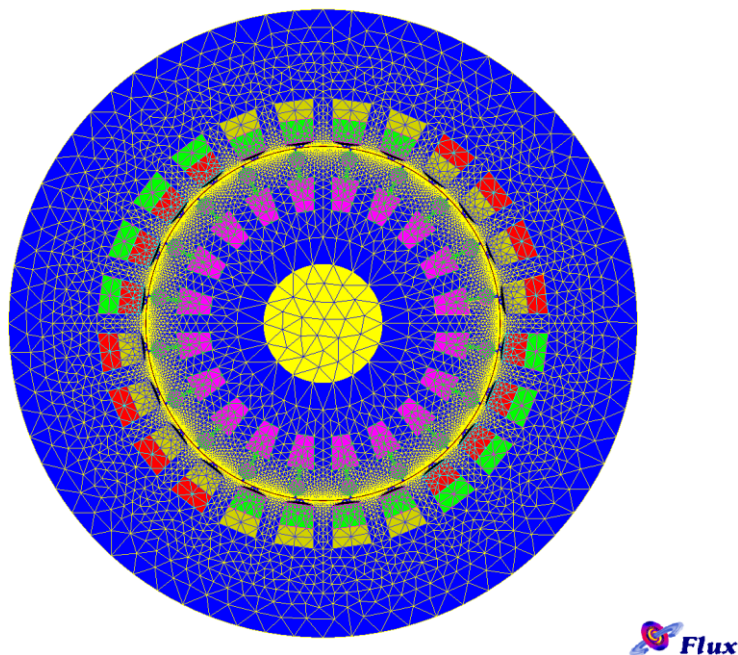


Fig. II.4. Maillage de circuit magnétique

Le couplage entre le circuit magnétique et le circuit électrique d'alimentation (figure II.5) est effectué par la création des régions surfaciques, chacune de ces régions est définie par son nom, son type, matériel, l'élément électrique correspondant dans le circuit, le sens du courant et l'ensemble mécanique.

La figure II.6, illustre la répartition du bobinage dans les encoches statoriques. L'enroulement statorique a deux couches avec une étape raccourcie de 8/12 et $w_1 = 208$ tours par phase. La figure II.7 représente les formes d'ondes des tensions de phases de la machine asynchrone triphasée.

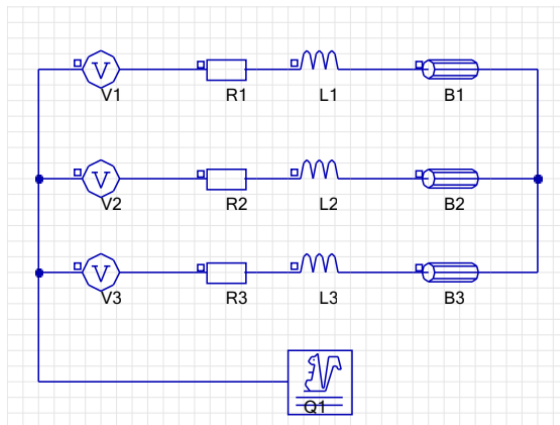


Fig.II.5 Circuit électrique du modèle

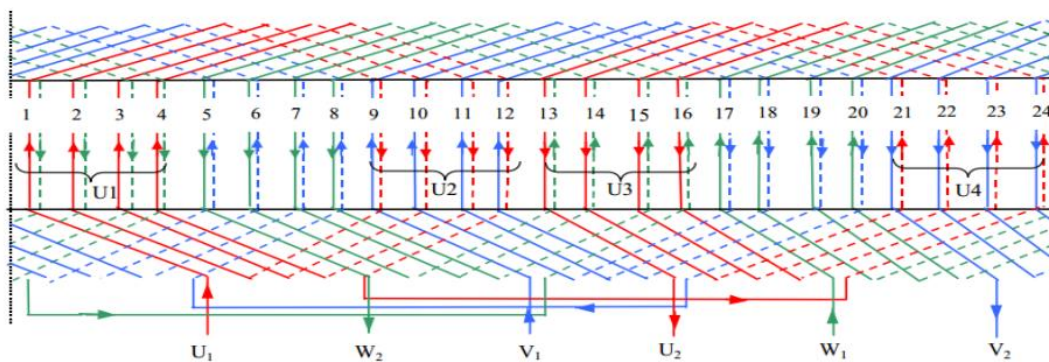


Fig.II.6 Répartition du bobinage statorique

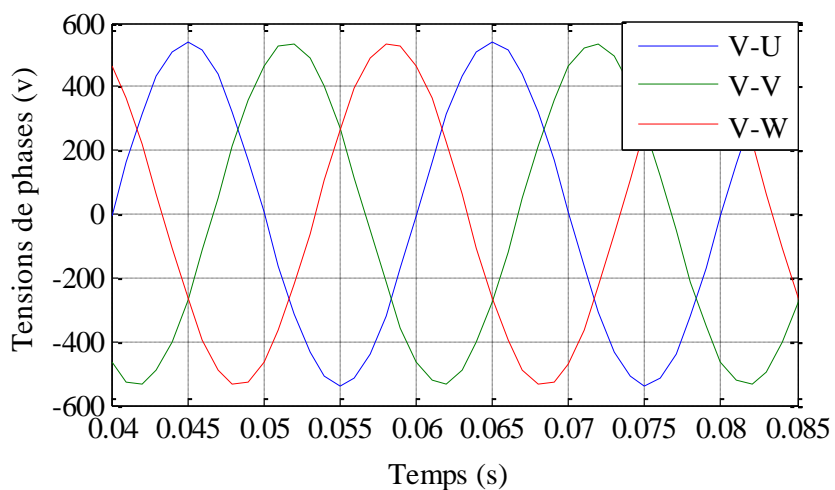
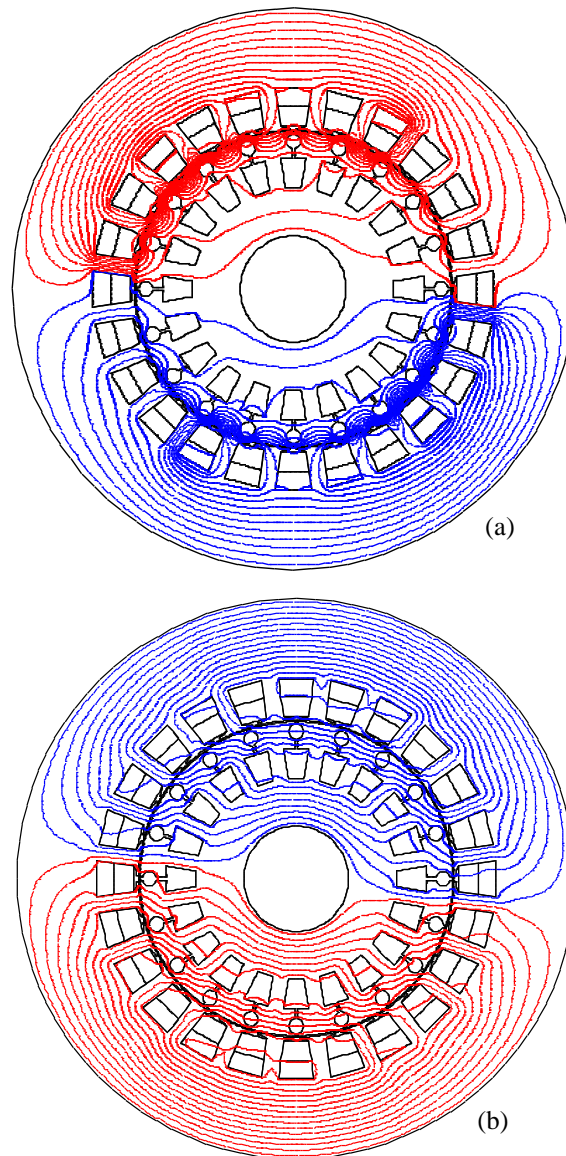


Fig.II.7 Formes d'onde des tensions de phases de la machine

D'après le modèle magnétodynamique de la machine asynchrone saine, on peut obtenir des représentations de la répartition des lignes de flux magnétiques, en fixant l'instant de la représentation, comme illustré dans la figure II.8. La distribution des lignes de flux au début du

calcul avant d'atteindre le régime permanent à l'instant $t = 0.005$ s, montre que les lignes du champ magnétique traversent les barres orthogonalement aux parois verticales (figure II.8.a). Quand la machine passe au régime permanent (figure II.8.b), les lignes de flux sont présentées jusqu'à l'intérieur du rotor. Nous remarquons bien la présence de deux pôles, la distribution des lignes est presque symétrique par rapport aux axes des pôles.



*Fig.II.8 Répartition des lignes de flux magnétique dans le circuit magnétique
(a) à l'instant $t=0.005$ s ; (b) à l'instant $t=5$ s*

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle numérique de la machine asynchrone, basé sur la méthode des éléments finis. On a commencé par la présentation de la méthode de calcul de champ par les éléments finis puis nous avons passé en revue la formulation en citant les équations qui régissent le champ électromagnétique dans les machines électriques qui sont les équations de Maxwell.

On a présenté dans le présent chapitre quelque résultats retirés du modèle éléments finis de la machine saine, les autres résultats (courants, vitesse, couple, ...) dans l'état sain et l'état défectueux seront présentés au chapitre suivant.

CHAPITRE III

SIMULATION PAR ELEMENTS

FINIS DU DEFAUT

D'EXCENTRICITE ET RESULTATS

CHAPITRE III : SIMULATION PAR ELEMENTS FINIS DU DEFAUT D'EXCENTRICITE ET RESULTATS

III.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la méthode des éléments finis ainsi que les formules de Maxwell qui la régissent. Dans celui-ci, les modèles de la machine asynchrone étant réalisés, nous allons faire la simulation pour une machine à l'état sain avec le premier modèle ensuite effectuer une simulation avec un second qui tient compte du défaut d'excentricité. La procédure consiste à réaliser la simulation pour différentes charges : à vide, mi et pleine charge. Ceci pour les cas de l'état sain et l'état de défaut.

En ce qui concerne l'état de défaut, un degré de 10% du défaut d'excentricité a été effectué. Aussi les simulations ont été réalisées sous les conditions suivantes : le pas et le temps de simulation sont un compromis entre la finesse des résultats escomptés, la résolution spectrale et la totalité de la durée de simulation vis-à-vis de l'outil informatique (plusieurs jours pour chaque cas). Les conditions sont :

- La fréquence d'échantillonnage $f_e = 10\text{kHz}$,
- Le temps de simulation $T_s = 6\text{s}$

Les résultats trouvés sont exposés au fur et à mesure dans les figures suivantes.

III.2 Résultats de simulation

III.2.1 Machine à l'état sain

III.2.1.1 Moteur à vide

Les figures III.1 à III.5 montrent les résultats obtenus par simulation de la machine à l'état sain et à vide. La première représente le courant d'une phase, la seconde son zoom sur quelques périodes. La troisième figure rassemble ensemble avec agrandissement les trois courants des phases. La figure qui suit représente la grandeur vitesse et la dernière celle du couple. Ces résultats sont conformes à ceux de la littérature.

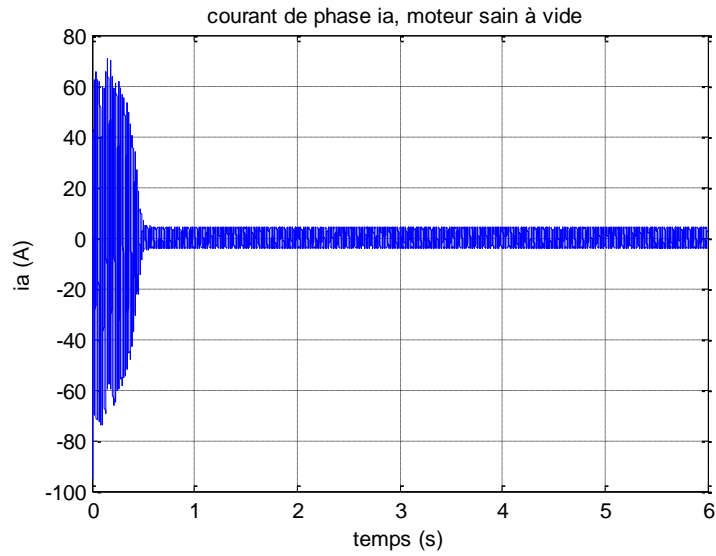


fig. III .1 Courant i_a ,moteur sain à vide

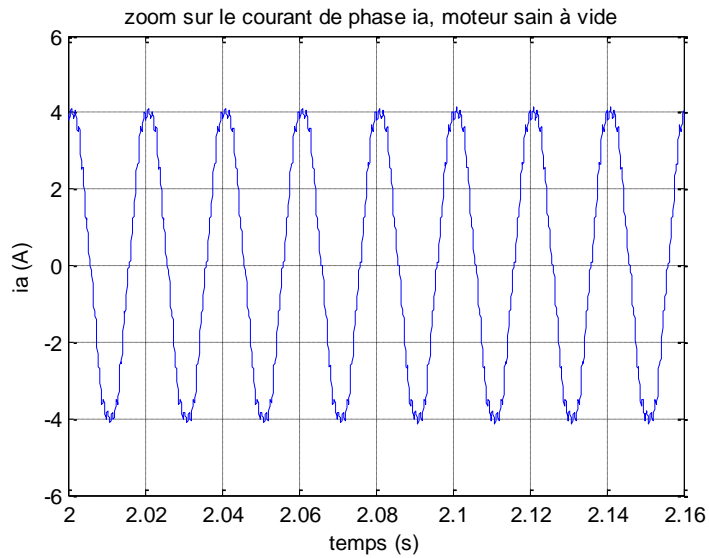


fig. III .2 Zoom du courant i_a ,moteur sain à vide

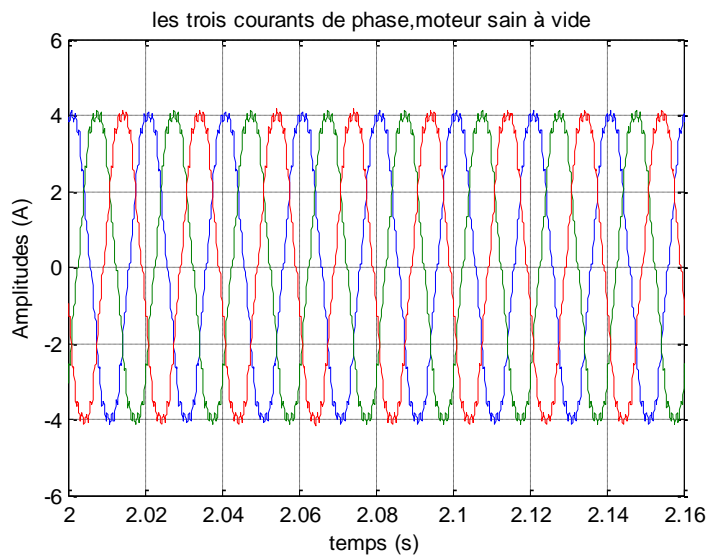


fig. III .3 Superposition des courants i_a , i_b et i_c ,moteur sain à vide

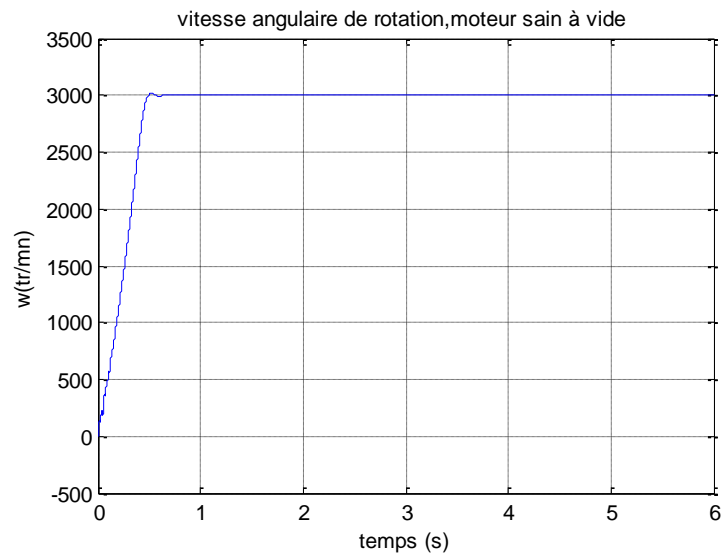


fig. III.4 Vitesse de rotation angulaire w , moteur sain à vide

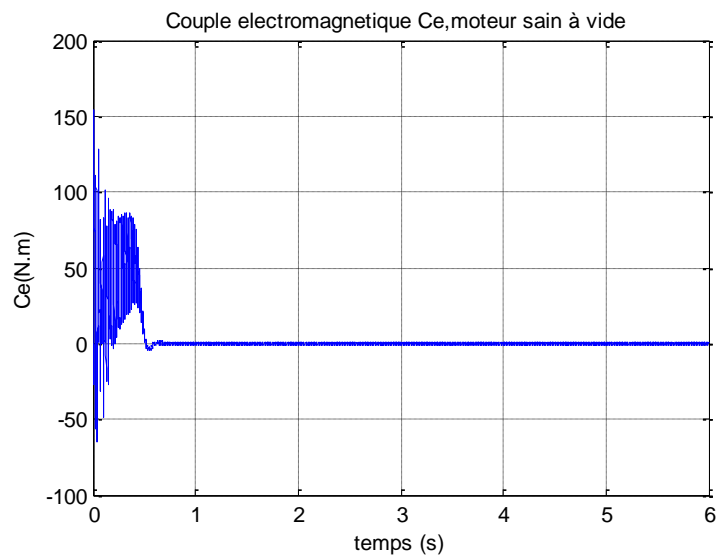


fig. III.5 Couple électromagnétique C_e , moteur sain à vide

III.2.1.2 Pleine charge

Les figures III.6 à III.10 visualisent les grandeurs courant, vitesse de rotation et couple électromagnétique pour le moteur à l'état sain et à pleine charge.

Elles évoluent de manière naturelle tout en remarquant le surplus du temps du régime transitoire dû à la pleine charge.

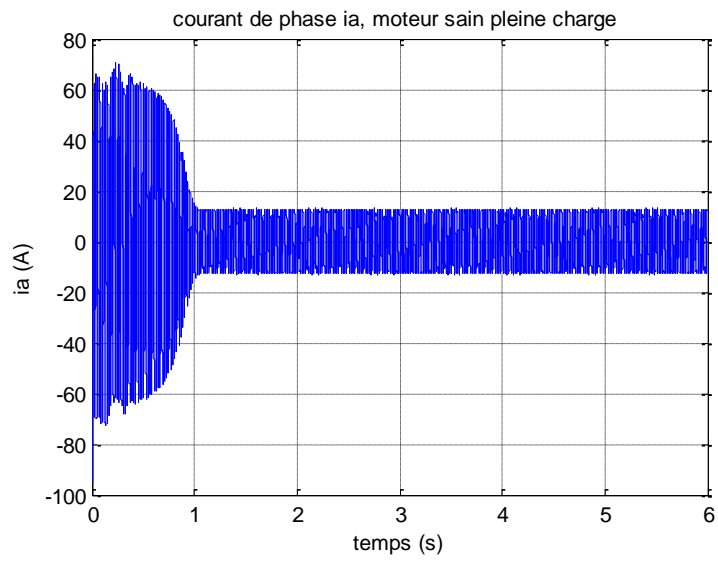


fig. III.6 Courant ia, moteur sain à pleine charge

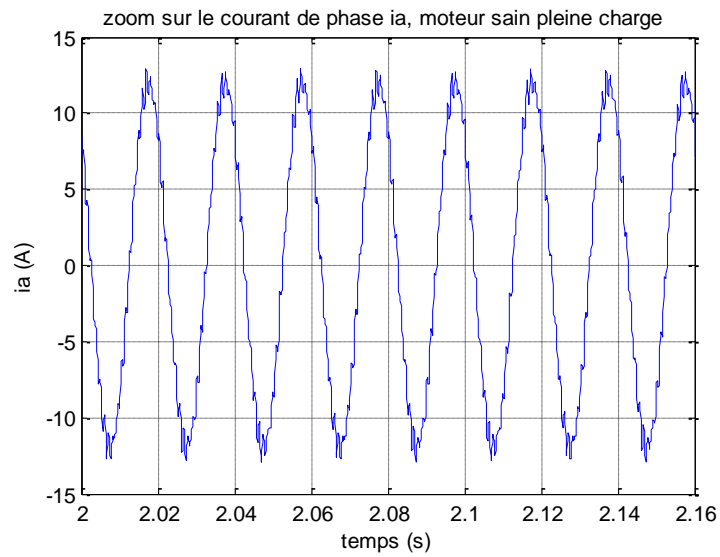


fig. III.7 Zoom du courant ia, moteur sain à pleine charge

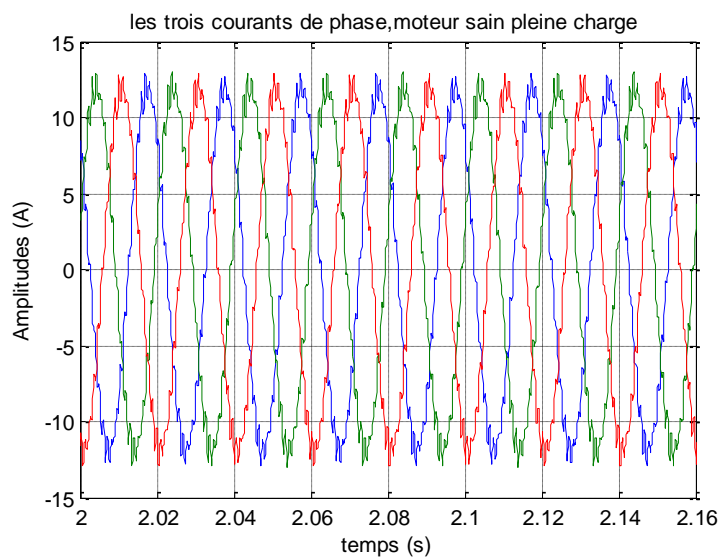


fig. III.8 Superposition des courants ia, ib et ic, moteur sain à pleine charge

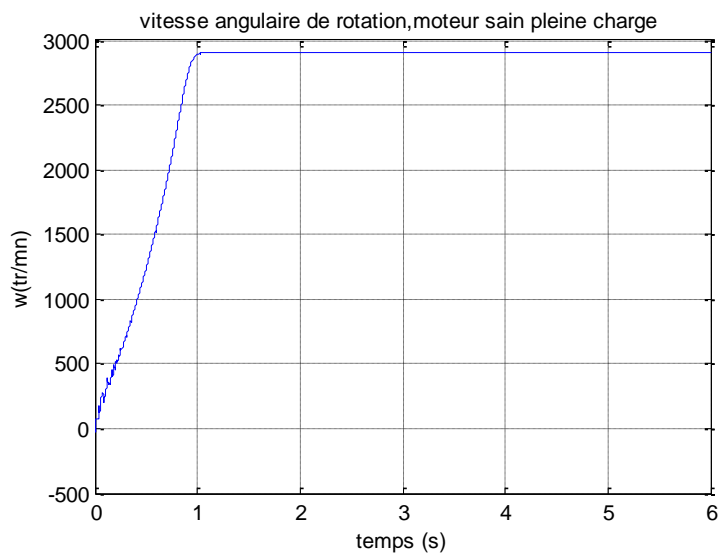


fig. III.9 Vitesse de rotation angulaire w , moteur sain à pleine charge

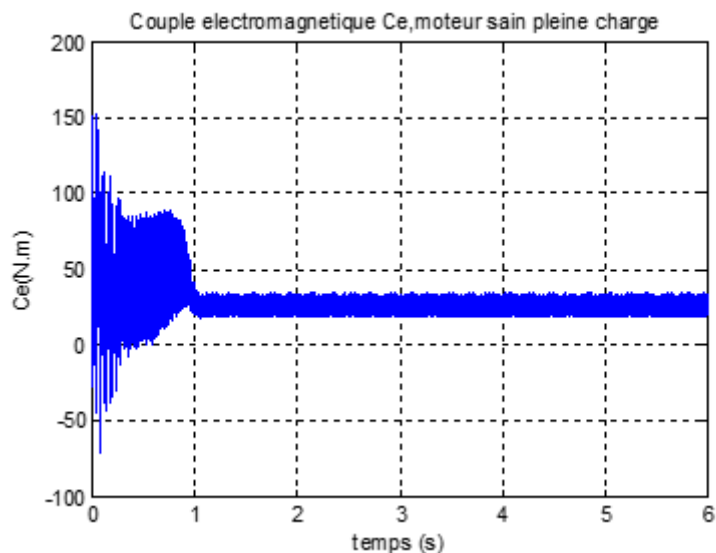


fig. III.10 Couple électromagnétique C_e , moteur sain à pleine charge

III.2.2 Machine avec 10% de défaut d'excentricité

III.2.2.1 Moteur à vide

La simulation du moteur à vide avec un défaut d'excentricité de 10% a fournites résultats qui sont présentés aux figures III.11 à III.15.

Selon la même procédure, le courant, son zoom, les trois courants de phase, la vitesse et le couple. À première vue rien ne semble différent.

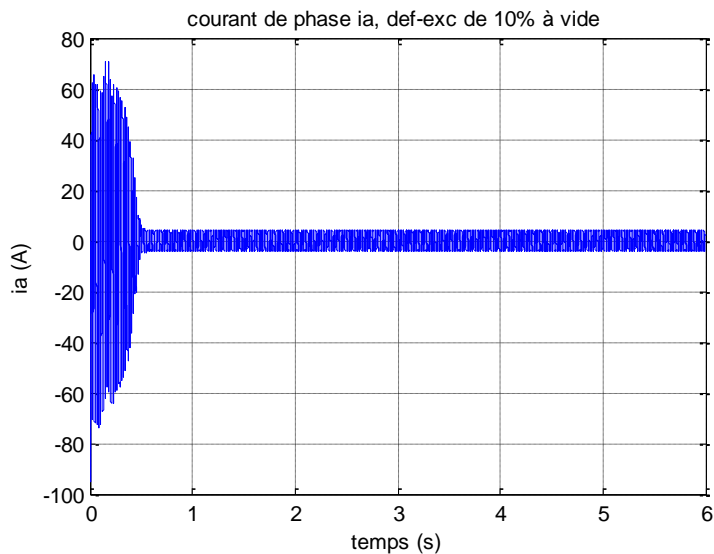


fig. III .11 Courant ia, moteur à vide en défaut d'excentricité de 10%

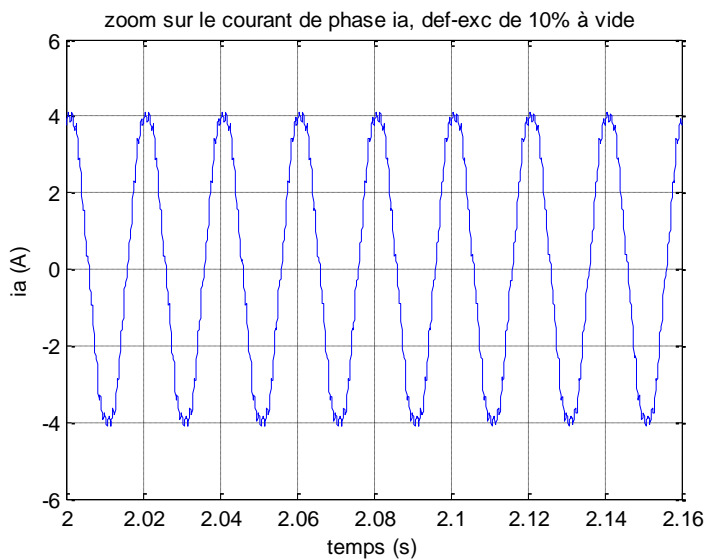


fig. III .12 Zoom du courant ia, moteur à vide en défaut d'excentricité de 10%

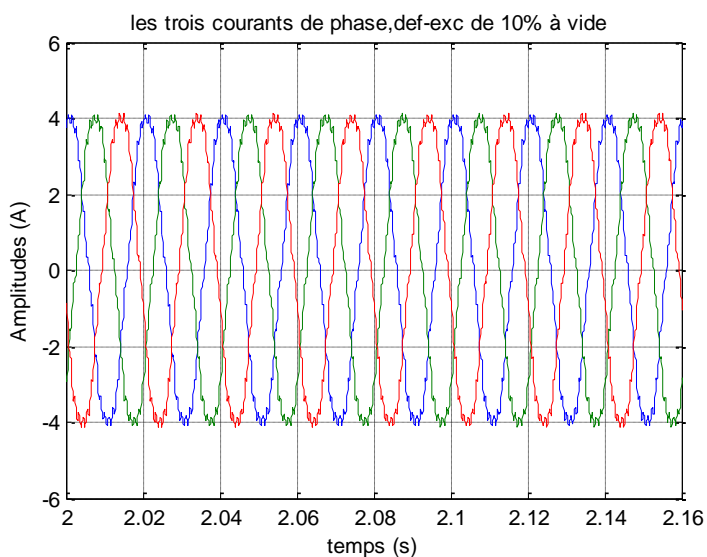


fig. III .13 Superposition des courants ia, ib et ic, moteur à vide en défaut d'excentricité de 10%

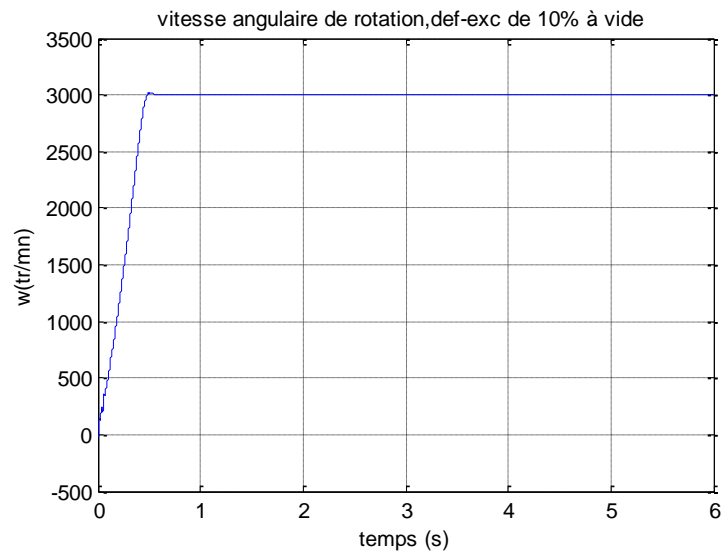


fig. III.14 Vitesse de rotation angulaire w , moteur à vide en défaut d'excentricité de 10%

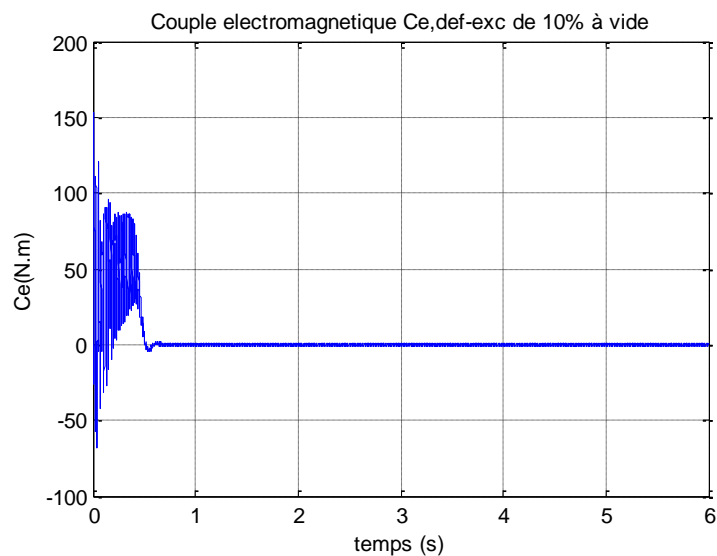


fig. III.15 Couple électromagnétique C_e , moteur à vide en défaut d'excentricité de 10%

III.2.2.2 Pleine charge

Les résultats de simulation de la machine à pleine charge avec un défaut d'excentricité de 10% sont montrés aux figures III.16 à III.20.

Les amplitudes des courants ont augmentées, la valeur de la vitesse a diminuée tandis que celle du couple varie autour de la valeur fixée. Aussi un retard plus grand à l'atteinte de la valeur du régime permanent est observé du à la pleine charge. De même aux premières observations rien ne semble changer.

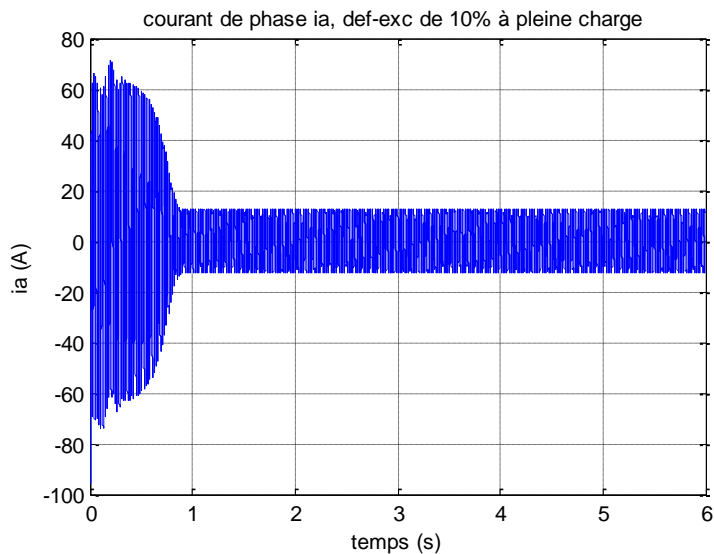


fig.III.16 Courant i_a , moteur à pleine charge en défaut d'excentricité de 10%

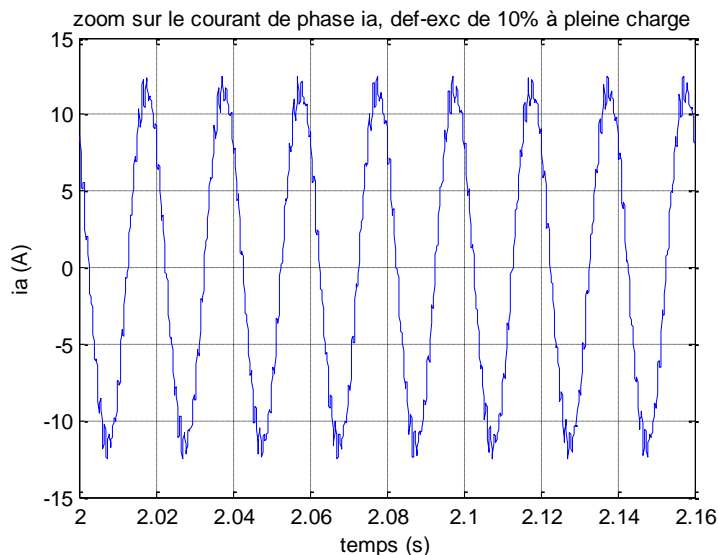


fig.III.17 Zoom du courant i_a , moteur à pleine charge en défaut d'excentricité de 10%

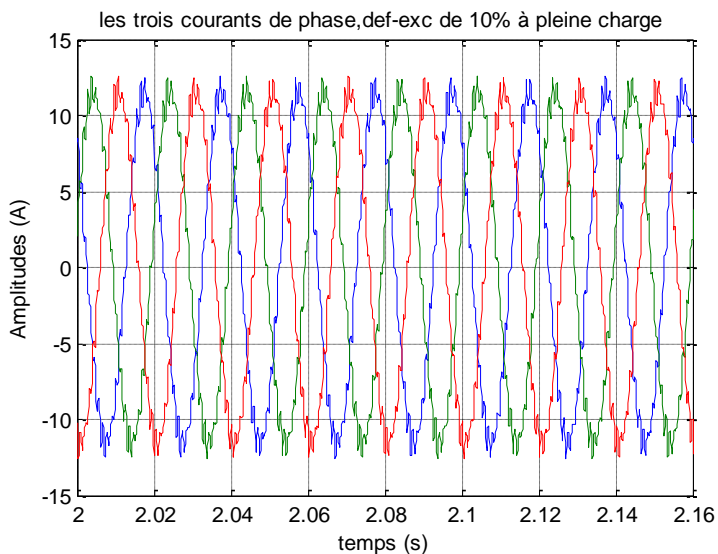


fig.III.18 Superposition des courants i_a, i_b et i_c , moteur à pleine charge en défaut d'excentricité de 10%

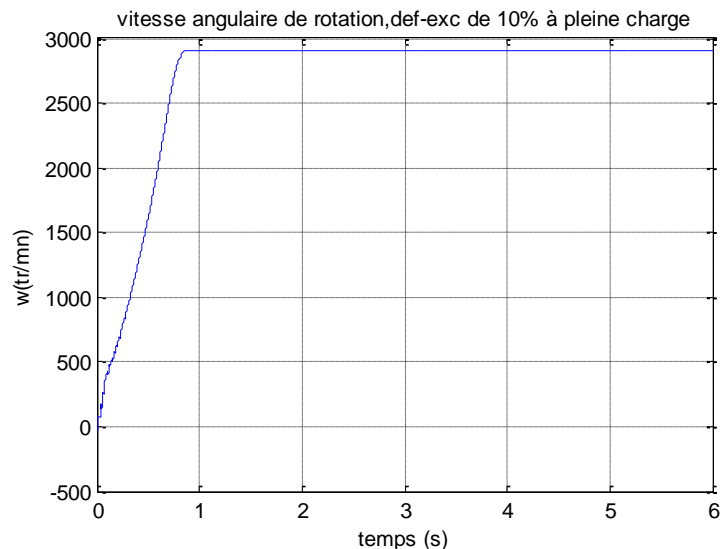


fig. III .19 Vitesse de rotation angulaire w , moteur à pleine charge en défaut d'excentricité de 10%

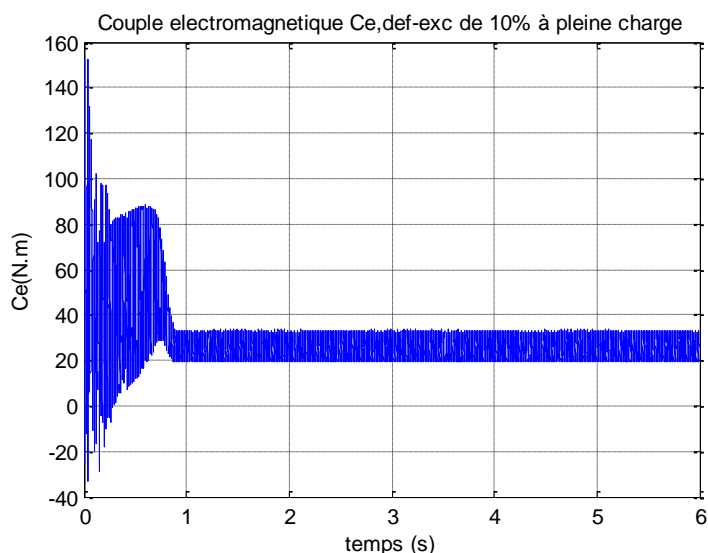


fig. III .20 Couple électromagnétique C_e , moteur à pleine charge en défaut d'excentricité de 10%

III.2.3 Interprétations

Ayant effectuée une comparaison primitive sur les grandeurs semblables entre les signaux issus de l'état sain et ceux issus de l'état défectueux, nous constatons que rien de particulier ne semble apparaitre ou est différent. Cependant nous sommes sûrs qu'ayant effectué un défaut sur le modèle les résultats doivent contenir le défaut mais nous ne savons pas où il se trouve. Alors nous sommes passés à l'analyse spectrale du courant et des autres grandeurs comme dans la littérature. Le passage à la transformée de Fourier nous permet d'obtenir les spectres des différents signaux issus de la simulation par la méthode des éléments finis. Ces spectres peuvent éventuellement nous fournir, si elles existent, des informations en ce qui concerne les fréquences caractéristiques de défaut d'excentricité.

III.2.4 Analyse spectrale

Nous commençons par comparer les spectres du courant de la machine saine avec celle en défaut. Puis le même travail pour la vitesse de la machine saine et celle en défaut. Ceci en quête de raies indicatrices de défaut d'excentricité si elles existent. Grâce à la transformation de Fourier rapide ou FFT (Fast Fourier Transform), nous avons effectués plusieurs spectres des courants pour l'état sain et en défaut et ceci pour toutes les charges. Rappelons que les spectres ont été réalisés sur les signaux après les avoir tronqué de leur partie transitoire sinon, ceci aurait faussé les résultats si elle était conservée. Car la FFT ne s'applique qu'en régime stationnaire.

III.2.4.1 Etat sain

a. Moteur non chargé

Les figures montrant les spectres sont présentées dans les échelles, linéaire et décibel. Les deux premières illustrent les spectres sur une plage de 1000 Hz. Celles qui suivent sur des plages moindres et que l'on suppose suffisantes comme sources d'informations, car l'observation sur toute la plage n'a pas apporté d'indice particulier pour tous les cas observés de la simulation.

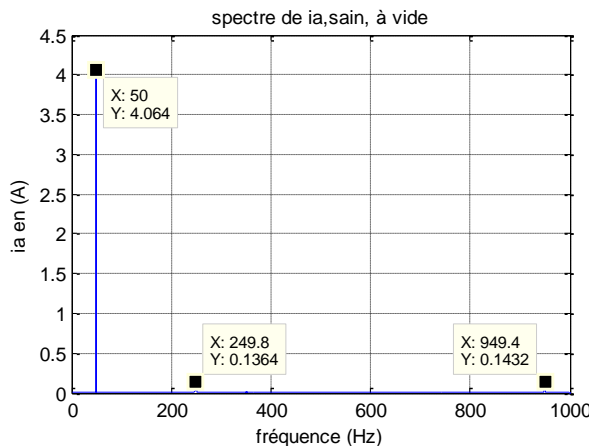


fig. III .21 spectre de ia en linéaire, moteur sain, à vide

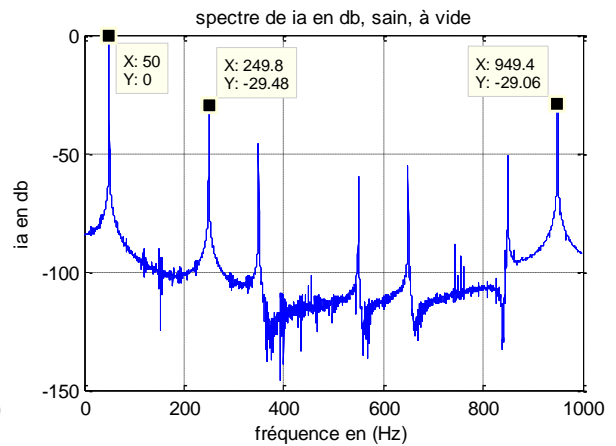


fig. III .22 spectre de ia en db, moteur sain, à vide

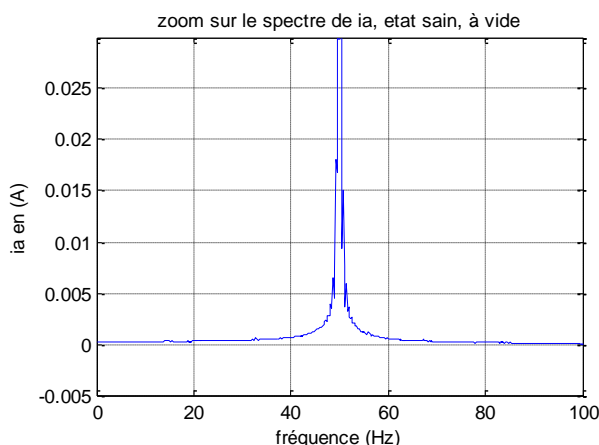


fig. III .23 spectre de ia en linéaire sur une plage [0 100] Hz, moteur sain, à vide

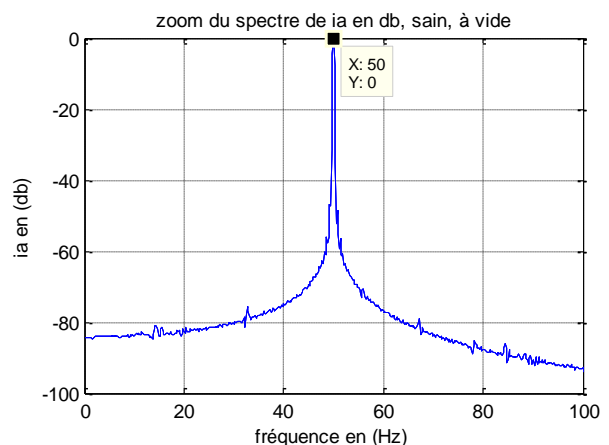


fig. III .24 spectre de ia en db sur une plage [0 100] Hz, moteur sain, à vide

b. Moteur à pleine charge

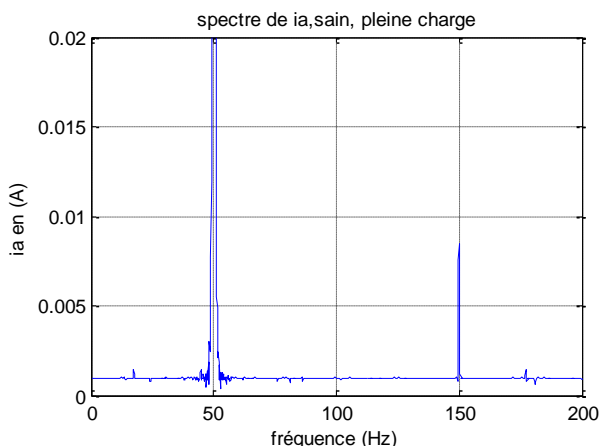


fig. III .25 spectre de ia en linéaire, moteur sain, pleine charge

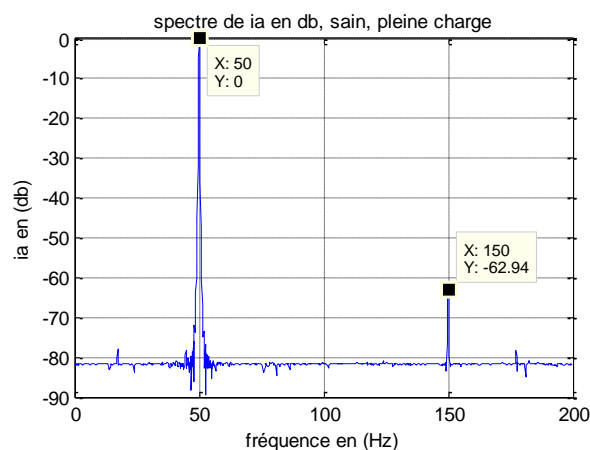


fig. III .26 spectre de ia en db, moteur sain, pleine charge

III.2.4.2 Etat de défaut

a. Moteur non chargé

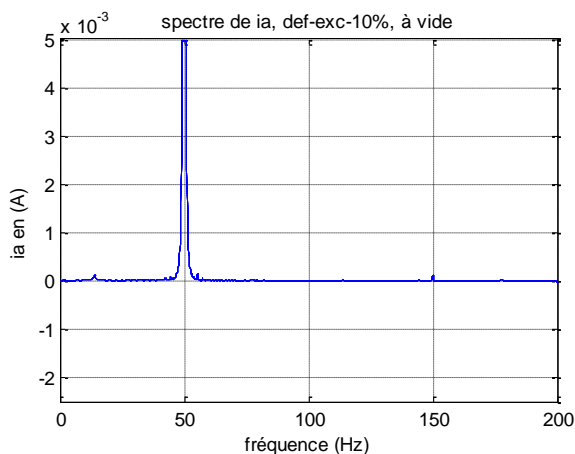


fig. III .27 spectre de ia en linéaire, défaut de 10% d'excentricité, à vide

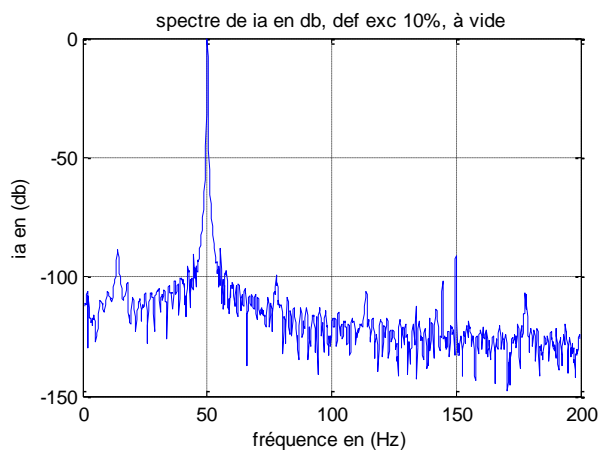


fig. III .28 spectre de ia en db, défaut de 10% d'excentricité, à vide

b. Moteur à pleine charge

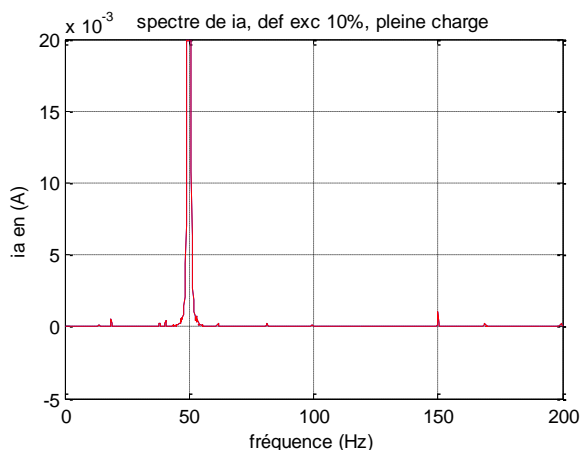


fig. III .29 spectre de ia en linéaire, défaut de 10% d'excentricité, pleine charge

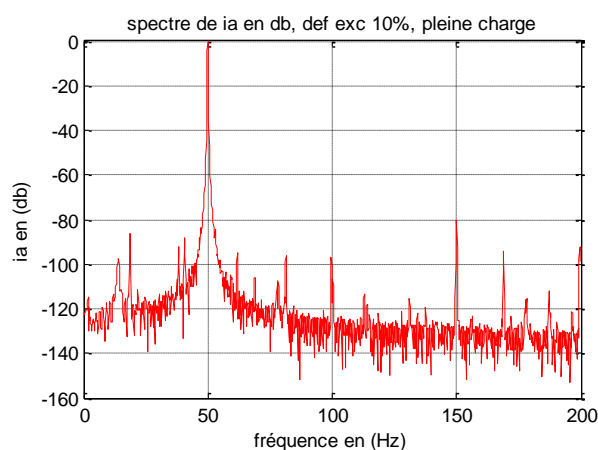


fig. III .30 spectre de ia en db, défaut de 10% d'excentricité, pleine charge

III.2.4.3 Interprétations

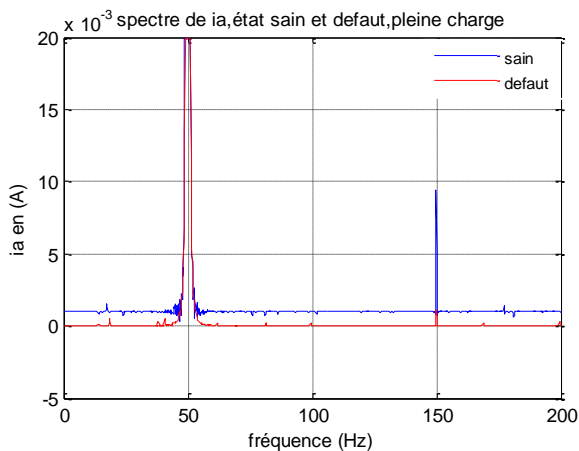


fig.III.31 spectres de ia en linéaire, sain et défaut de 10% d'excentricité, pleine charge

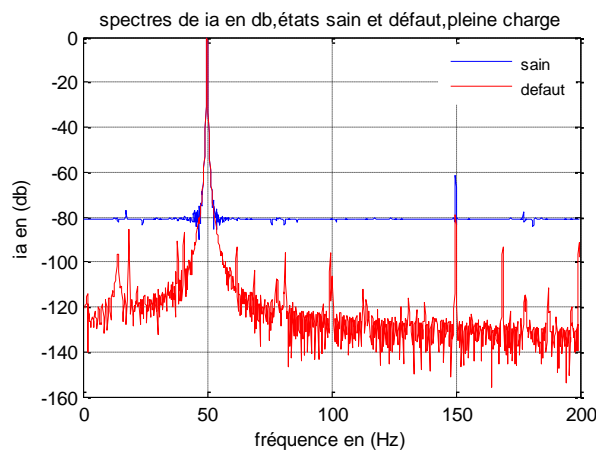


fig.III.32 spectres de ia en db, sain et en défaut de 10% d'excentricité, pleine charge

En observant les spectres du courant sain avec celui en défaut pour différents défauts d'excentricité et pour différentes charges, on a constaté qu'il n'y a pas d'harmonique spécifique survenu après la simulation des défauts. En partant du principe cause et effet, le fait qu'il y a eu défaut, oblige qu'il doit y avoir un changement quelque part qu'il faut détecter. Après maintes études sur les signaux et leurs spectres, nous avons remarqué que lorsque nous avons superposé les spectres de l'état sain avec ceux de l'état en défaut, il y a un légerhaussement des spectres de l'état sain par rapport à ceux de l'état de défaut, bien montré sur les figures précédentes III.31 et III.32. Ceci nous a poussé à chercher un critère autre que les harmoniques par exemple du côté de la valeur moyenne d'un signal. Par suite et pour éviter la moyenne nulle d'un signal alternatif symétrique, nous avons pris seulement la partie positive du signal courant à qui nous avons fait la moyenne. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

Tab.III.1 : Comparaison des valeurs moyennes des courants partie positive

Comparaison entre les courants moyens positifs	A vide	Mi-charge	Pleine charge
Moteur sain	1.2938	2.1459	3.8099
Moteur en défaut	1.2887	2.0885	3.6841

Notre investigation a été couronnée de succès, les résultats montrent clairement une légère différence entre les différentes valeurs, bien claire pour la pleine charge.

Cet aboutissement nous a poussé à élargir encore notre investigation et chercher du côté du couple et de la vitesse. Pour cela la procédure consiste d'abord à éliminer la partie transitoire des signaux et porter ensemble sur une même figure les signaux de même nature, courant, couple et vitesse pour l'état sain et l'état en défaut pour plusieurs valeurs de charges. Les résultats illustrant cet aboutissement sont montrés aux figures III.33 à III.35 suivantes. Elles montrent la superposition des courants, des couples et des vitesses pour les mi et pleine charge pour les cas sain et en défaut de 10% d'excentricité.

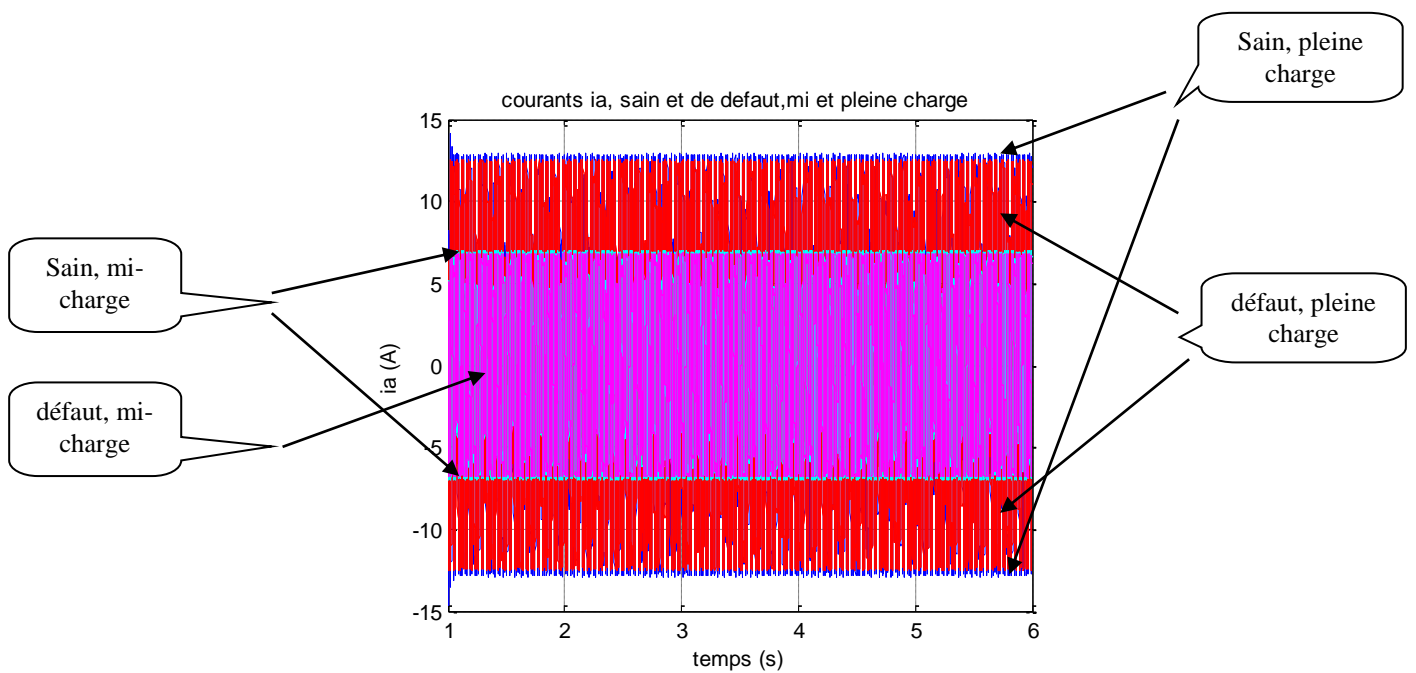


fig. III .33 superposition des courants ,état sain et état de défaut

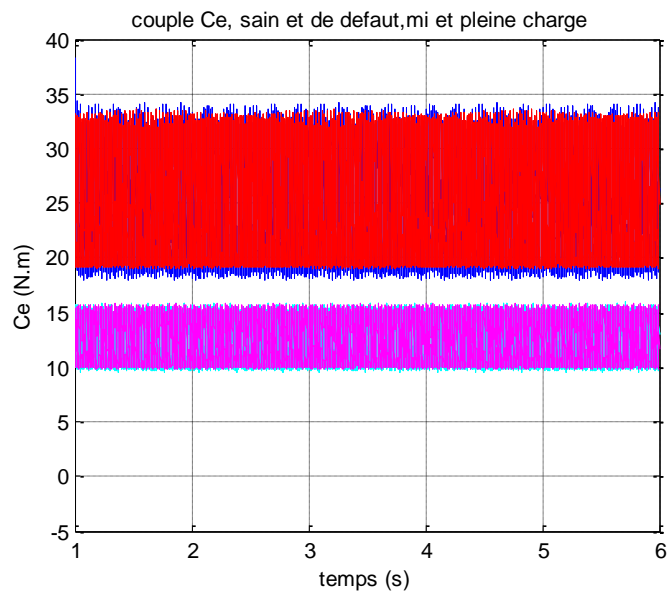


fig. III .34 superposition des couples ,état sain et état de défaut

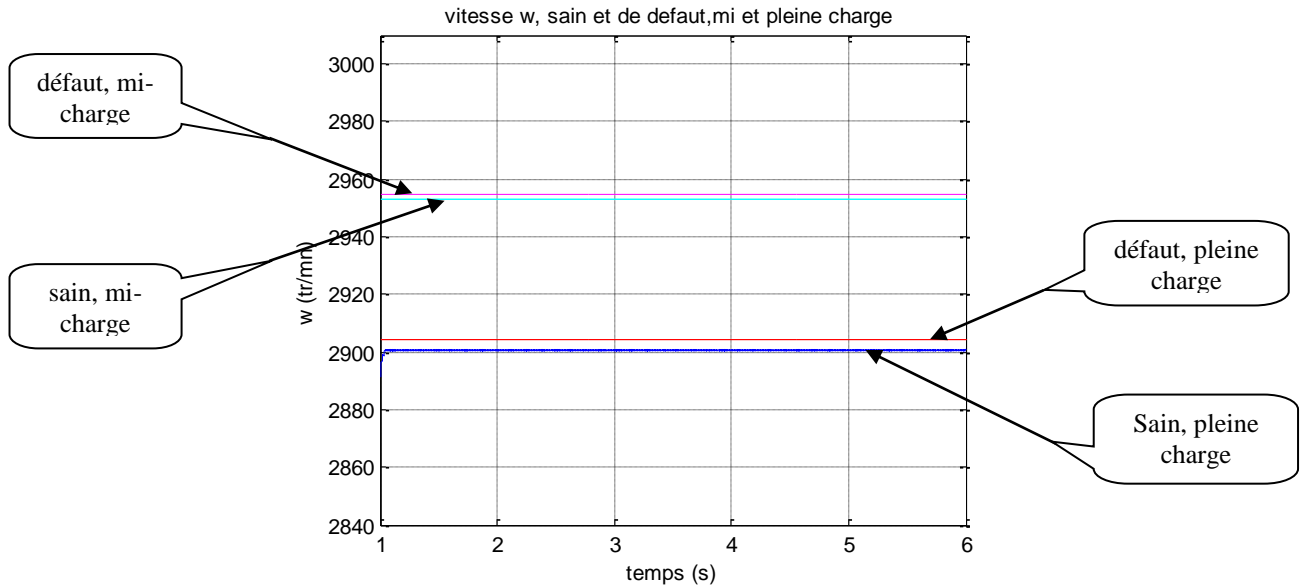


fig. III .35 superposition des vitesses, état sain et état de défaut

Les résultats montrés aux figures précédentes prouvent sans aucun doute la certitude des précédents propos. Pour les courants : on observe que le signal courant de l'état sain pour la mi et la pleine charge surpasse sur la plage crête à crête celle du courant de l'état de défaut pour les charges correspondantes. Il en est de même pour le couple. Tandis que pour le signal vitesse la différence est claire et évidente, les courbes sont bien séparées. Ceci répond à l'annonce précédente "cause-effet". On constate alors que le défaut d'excentricité se manifeste par une augmentation de la vitesse et une légère diminution de l'étalement ou de la plage crête à crête en ce qui concerne le courant. Pour ce qui est du cas de la machine non chargée ou à vide, nous avons omis de représenter les signaux correspondants avec ceux des cas des mi et pleine charge car la différence ne peut être perceptible visuellement. Donc nous les avons représentés séparément.

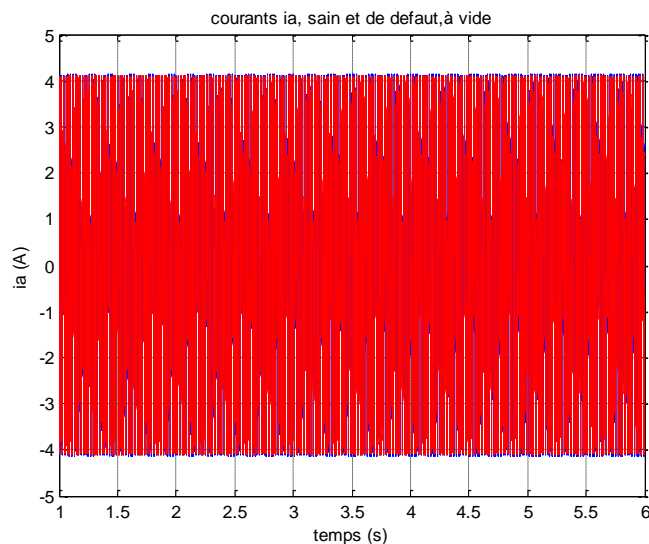


fig. III .36 superposition des courants, état sain et état de défaut, à vide

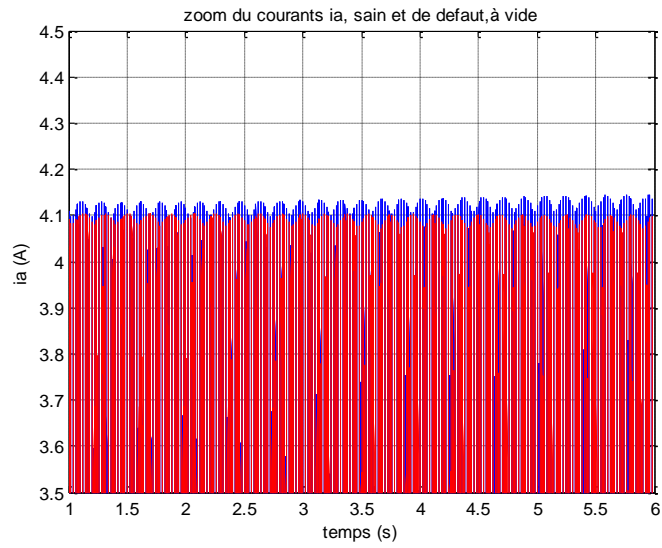


fig.III .36–bis superposition et zoom du courants ,état sain et état de défaut, à vide

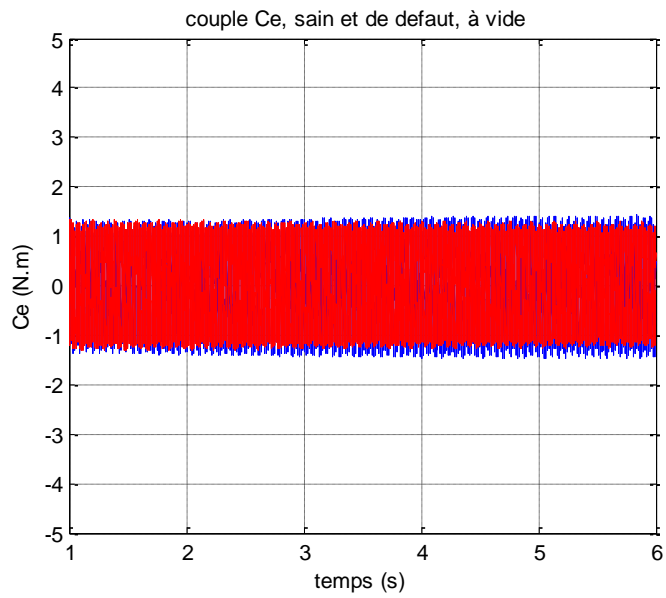


fig.III .37 superposition des couples ,état sain et état de défaut, à vide

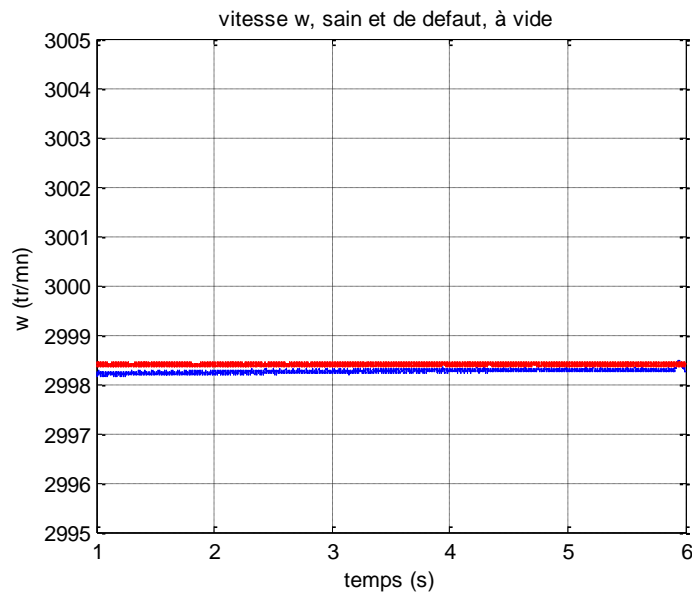


fig.III .38 superposition des vitesses ,état sain et état de défaut, à vide

De même les figures III.36 à III.39 représentant les signaux sains et de défaut d'excentricité pour le cas du moteur non chargé montrent le léger dépassement des plages crête à crête des signaux (voir figure III.36-bis zoom) sains vis-à-vis des signaux contenant le défaut (courant et du couple). Tandis que pour les signaux vitesse la séparation est bien visible. Comme pour le tableau III.1 le tableau III.2 réunit les valeurs moyennes des vitesses des cas sains et défaillant pour différentes charges.

Tab.III.2 : Comparaison des valeurs moyennes des vitesses

Comparaison entre les vitesses	A vide tr/mn	mi-charge	Pleine charge
Moteur sain	2998.3	2953.1	2900.7
Moteur en défaut	2998.4	2954.7	2904.4

Comme pour le courant, la vitesse moyenne pour une même charge lorsqu'il y a défaut a légèrement augmentée. Ceci devient plus évident lorsque la charge augmente. En fait, nous pouvons dire que l'effet du défaut d'excentricité se manifeste comme s'il y a eu diminution de charge.

III.3 Spectres de la vitesse

Notre travail est terminé au III.2.4.3. Cependant on nous a chargé d'ajouter les spectres illustrant la vitesse et le couple. Les spectres superposés sont visualisés aux figures III.39 à III.42.

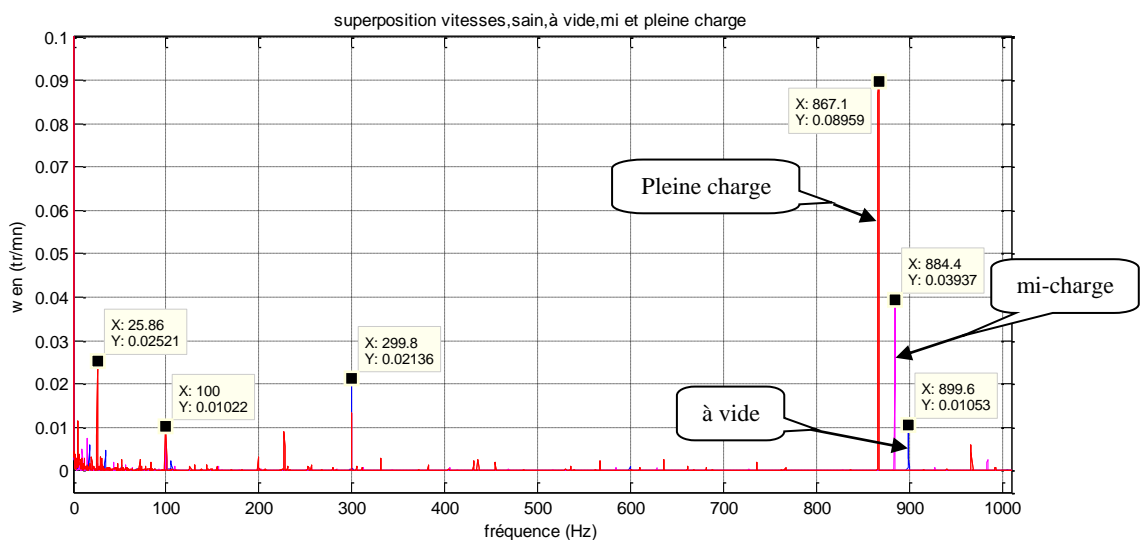


fig. III.39 superposition des spectres des vitesses, état sain, à vide, mi et pleine charge

Notons que la couleur rouge est attribuée à la pleine charge, le magenta à la mi-charge et le bleu

à la charge nulle que ce soit pour l'état sain ou l'état en défaut.

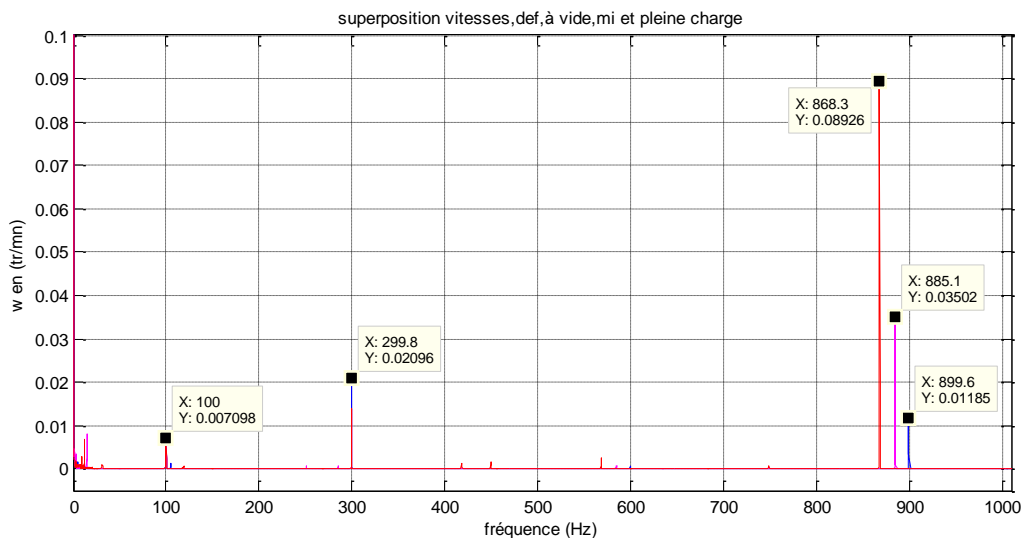


fig. III.40 superposition des spectres des vitesses, état de défaut, à vide, mi et pleine charge

Après étude des spectres, nous avons observés que cette dernière est suffisante sur une plage de 1000 Hz. Les spectres de l'état sain sont rassemblés ensemble sur une même figure (III.39), ceux de l'état de défaut aussi figure (III.40).

Lorsqu'on observe les harmoniques sur la plage [800 1000] Hz, nous remarquons que ces raies ne varient pas de manière sensible et ne peuvent être des harmoniques caractéristiques de défaut. Aussi nous avons observés la plage de fréquence [0 150] Hz, comme c'est montré aux figures III.41 et III.42. Dans ce cas aussi aucun harmonique particulier n'est apparu de manière significative et que nous pouvons suivre sa trace du vide à la pleine charge dans l'état sain à celui de défaut. Cependant ce que nous pouvons constater c'est que d'une manière générale les amplitudes des harmoniques ont diminuées lorsqu'il y a défaut d'excentricité, ils sont plus évidents dans les basses fréquences.

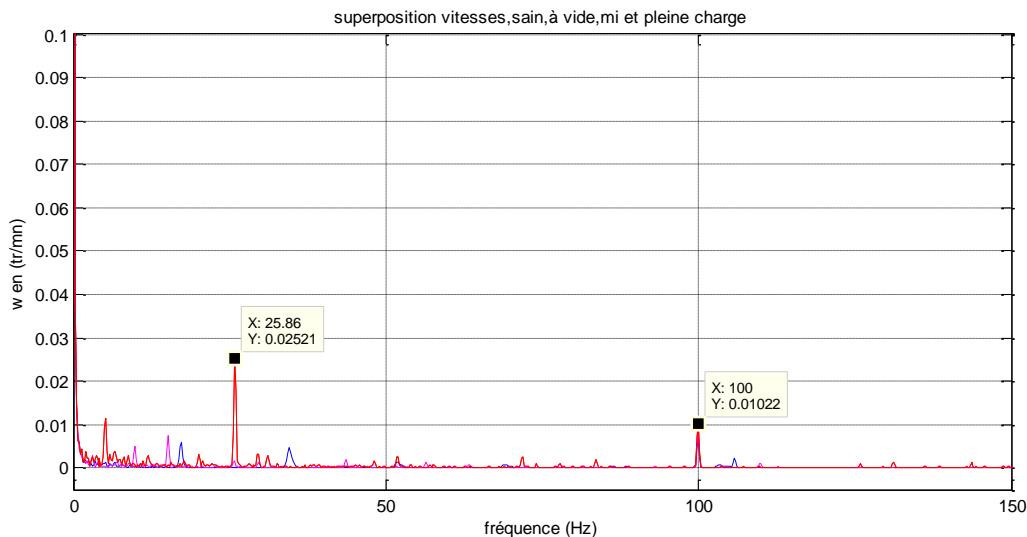


fig. III.41 superposition des spectres des vitesses [0 150] Hz, état sain, à vide, mi et pleine charge

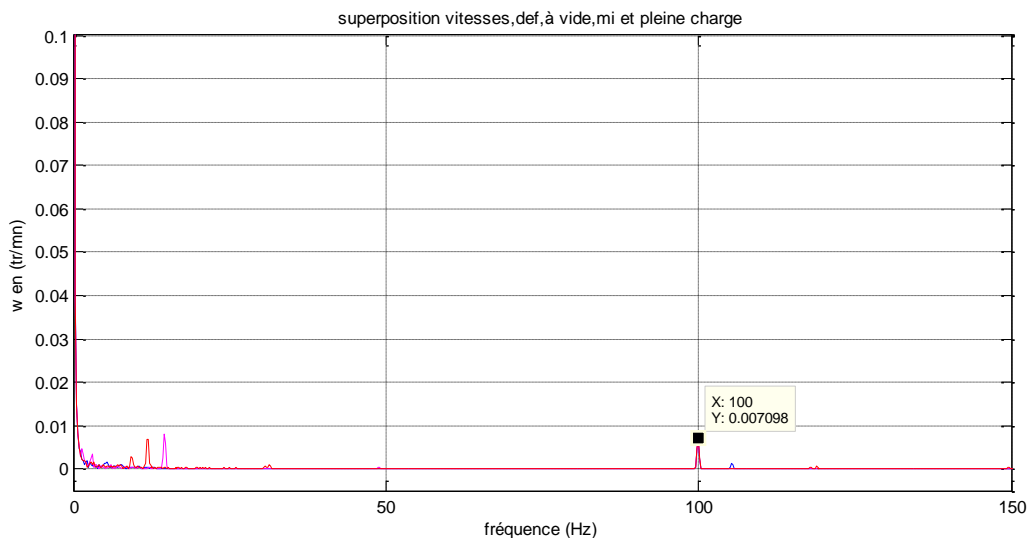


fig. III .42 superposition des spectres des vitesses [0 150] Hz, état de défaut, à vide, mi et pleine charge e

III.4 Spectres du couple

Les spectres du couple pour différentes charges et pour les états sains et de défaut sont exposés aux figures III.43 à III.48. Les deux premières s'étalent sur toute la plage [0 5000] Hz.

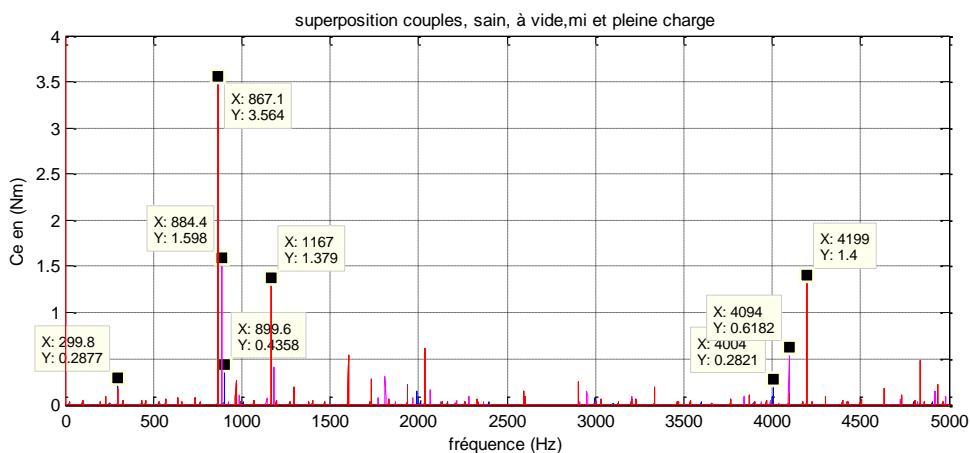


fig. III .43 superposition des spectres des couples, état sain, à vide, mi et pleine charge e

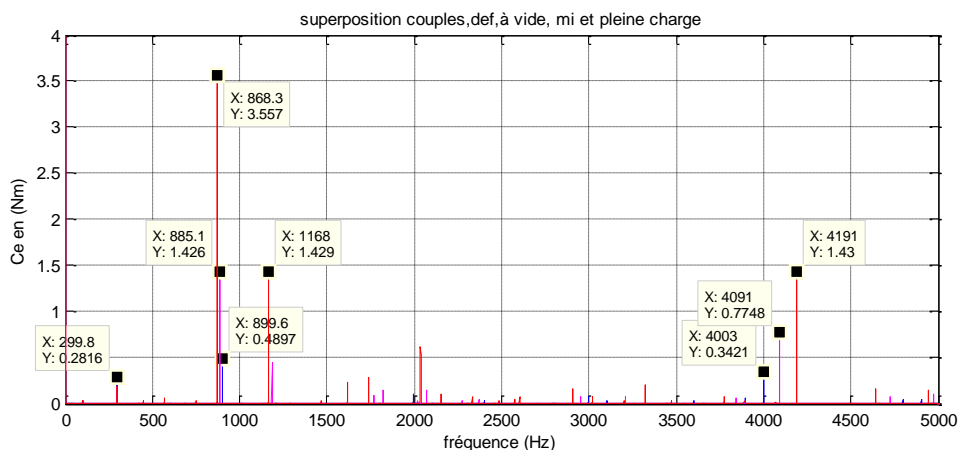


fig. III .44 superposition des spectres des couples, état de défaut, à vide, mi et pleine charge e

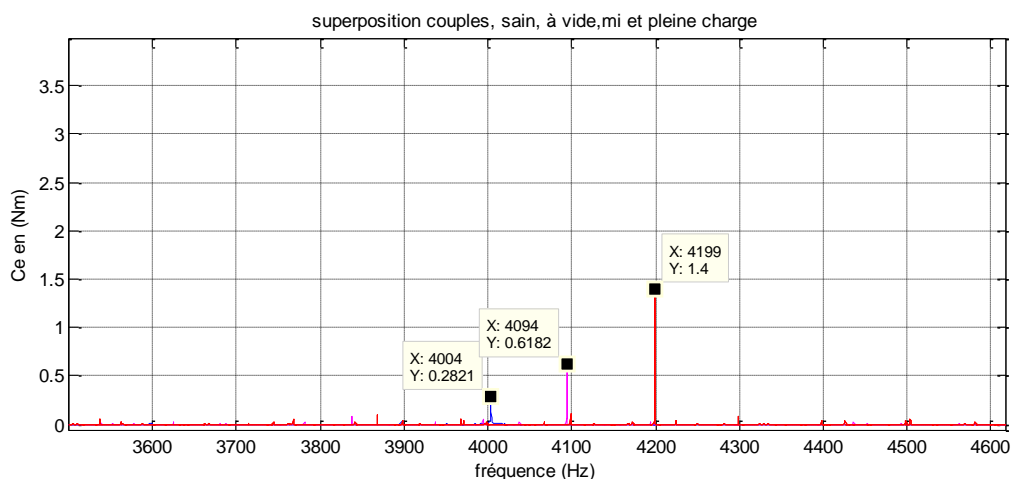


fig. III .45 superposition des spectres des couples [3500 4600] Hz, état sain, à vide, mi et pleine charge

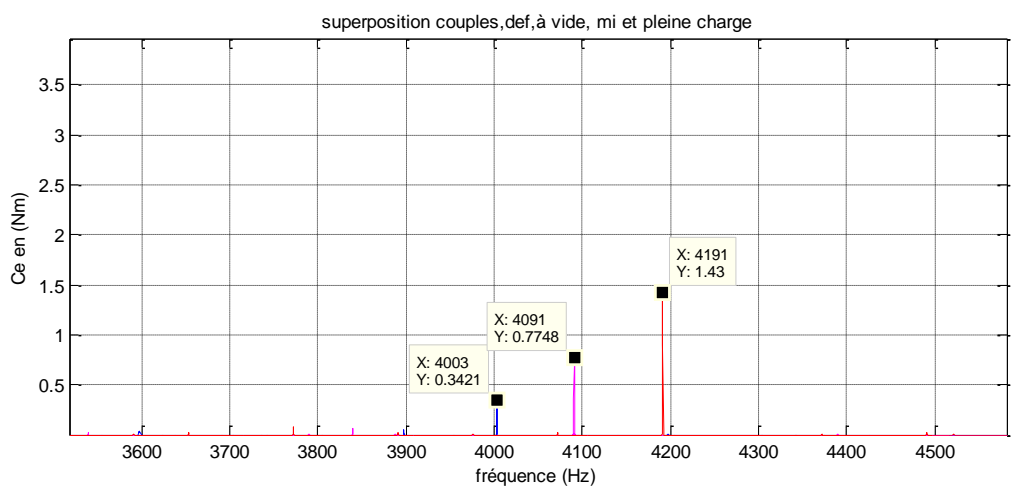


fig. III .46 superposition des spectres des couples [3500 4600] Hz, état de défaut, à vide, mi et pleine charge

Sur cette plage de fréquence les amplitudes de quelques harmoniques pour l'état de défaut ont légèrement augmentées mais ne peuvent servir de critères.

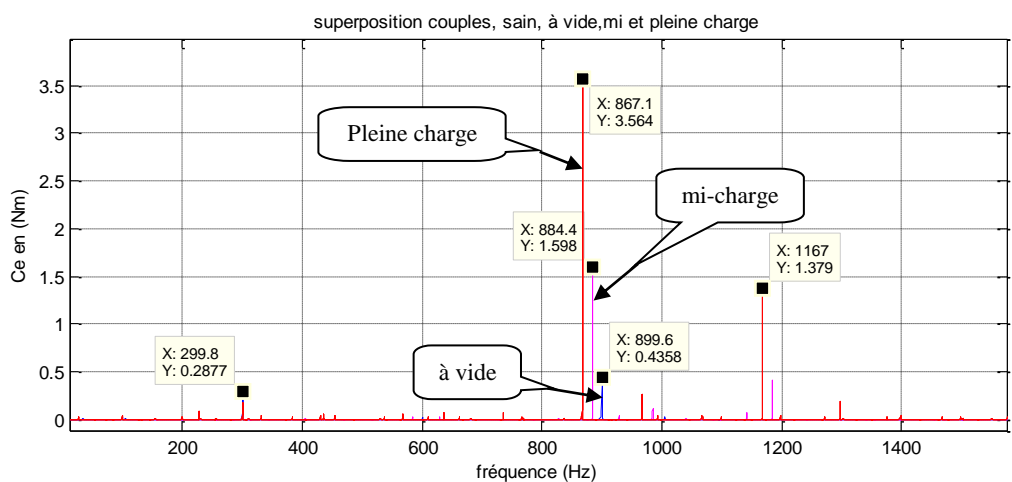


fig. III .47 superposition des spectres des couples [0 1500] Hz, état sain, à vide, mi et pleine charge

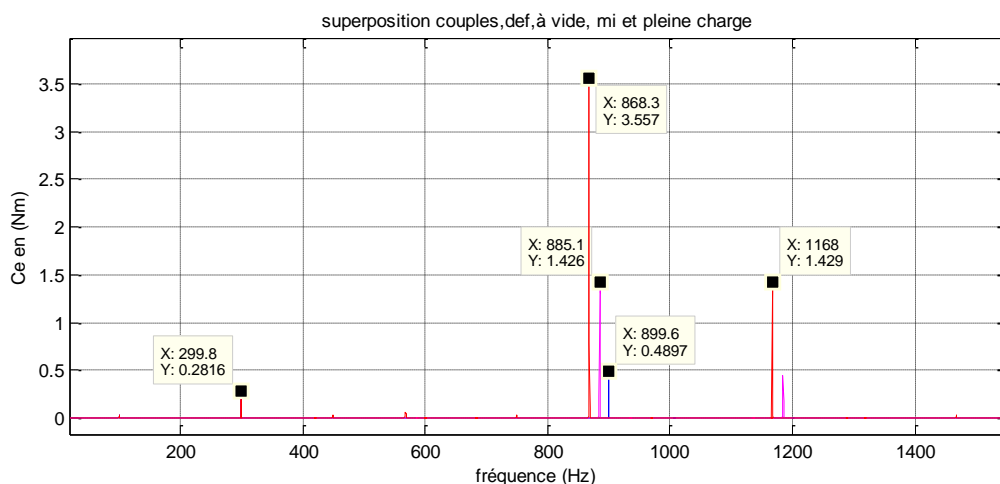


fig. III.48 superposition des spectres des couples [0 1500] Hz, état de défaut, à vide, mi et pleine charge

Il en est de même pour cette plage de fréquence, ils y a des harmoniques dont les amplitudes ont augmentées alors que d'autres ont diminuées, finalement, nous ne pouvons pas tirer de cette étude spectrale des deux grandeurs couple et vitesse des harmoniques spécifiques liés aux défauts d'excentricité, telle est notre conclusion.

III.5 Conclusion

Ce chapitre résume le dur labeur de notre travail. Il rassemble les résultats trouvés grâce aux modèles basés sur les éléments finis. L'un pour l'état sain l'autre pour l'état de défaut. Réaliser les modèles était une tâche difficile. La collecte des résultats était aussi une tâche pénible, car chaque cas demandait des journées d'attente. Malheureusement lorsqu'il y a erreur on recommence de nouveau. Le bien dans tout ça nous avons appris à modéliser par les éléments finis. Et le meilleur dans tout ça est que nous sommes arrivés à identifier le défaut d'excentricité statique d'une manière originale non trouvée dans la littérature. C'est-à-dire que le défaut d'excentricité statique ne se manifeste pas par l'apparition d'harmonique mais par un surplus d'étalement de la plage crête à crête du courant et une augmentation de la valeur de la vitesse en régime permanent par rapport à l'état sain.

Enfin d'un autre côté nous avons confirmé que pour certaines configurations de machines (nombre de paire de pôles, nombre de barres, nombre d'encoches statoriques etc.) mentionnés par [16] l'analyse spectrale ne permet pas de trouver d'harmoniques relatifs aux défauts d'excentricité statique seule ou aux défauts d'excentricité dynamique seule.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

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

Le début de ce mémoire a été marqué par un rappel des différents défauts qui peuvent affecter le bon fonctionnement des machines asynchrones triphasées à cage, ainsi que leurs causes et leurs signatures spectrales. Selon la littérature et la brève présentation des diverses méthodes du diagnostic, nous avons constaté que l'analyse spectrale du courant statorique est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité et son efficacité de prévoir un défaut dès lors que ses premiers signes commencent à apparaître.

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

L'inconvénient majeur de cette méthode (éléments finis-Flux 2D) reste le temps de calcul qui est très long et qui demande un ordinateur très puissant, élément non disponible en notre possession.

Puis nous avons entamé le troisième chapitre qui résume le dur labeur de notre travail. Les signaux trouvés sont conformes à ceux de la littérature. Rappelons que la réalisation des deux modèles pour les états sains et de défaut était une tâche difficile et plus pénible aussi était la collecte des signaux et leur transformation en signaux traitables par Matlab. Car chaque cas demandait des journées d'attente. Malencontreusement lorsqu'il y a eu erreur on recommence de nouveau.

D'un autre côté nous avons appris à élaborer des modèles de la machine asynchrone par les éléments finis et à y introduire des défauts tels que celui de l'excentricité statique ou dynamique. Et le meilleur dans tout ça est que nous sommes arrivés à identifier le défaut d'excentricité statique d'une manière originale non trouvée dans la littérature. C'est-à-dire que le défaut d'excentricité statique ne se manifeste pas par l'apparition d'harmonique mais par un surplus d'étalement de la plage crête à crête du courant et une augmentation de la valeur de la vitesse en régime permanent par rapport à l'état sain. Enfin nous avons confirmé que pour certaines

configurations de machines (nombre de pair de pôles, nombre de barres, nombre d'encoches statoriques etc.) mentionnés par [16] l'analyse spectrale ne permet pas de trouver d'harmoniques relatifs aux défauts d'excentricité statique seule ou aux défauts d'excentricité dynamique seule.

Comme perspectives, nous proposons d'étudier le défaut de l'excentricité mixte et d'autres défauts et dont le plus difficile : le défaut de court-circuit.

LISTE DES REFERENCES

LISTE DES REFERENCES

- [1] BENNEDJAI Soumaya « Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction », thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016
- [2] BAZINE Sadok « Conception et implémentation d'un Méta-modèle de machines asynchrones en défaut », thèse de doctorat, Université de Poitiers, 29/juin/2009
- [3] ANDRIAN CEBAN « Méthode Globale De Diagnostic Des Machines Electriques », thèse de doctorat, Université Lille de Nord de France, 2/février/2012
- [4] DIDIER Gaëtan «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillance », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy-I, 29/Octobre/2004
- [5] VASEGHI Babak « Contribution A L'étude Des Machines Electriques En Présence De Défaut Entre-Spires » thèse de doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 3/décembre/2009
- [6] BESSOUS Noureddine « Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones: Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider -Biskra-, 28 /09/2017
- [7] GHOGGAL Adel « Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée : Modèle Dédié à la Détection des Défauts », thèse de magister, Université de Batna, 2005
- [8] HALEM Noura « Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider -Biskra-, 07/04/2015
- [9] BACHIR Smail «Contribution Au Diagnostic De La Machine Asynchrone Par Estimation Paramétrique », thèse de doctorat, Université de Poitiers, 17/décembre/2002.
- [10] BESSOUS Noureddine « Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones », thèse de magister, Université Mentouri –Constantine-,
- [11] YAHIA Khaled « Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée par une Approche Signal », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider -Biskra-, 18/10/2012

- [12] KHELIF Samia, « modélisation des machines asynchrones en vue du diagnostic pris en compte adéquate de circuit magnétique », thèse de magister, Université Mohamed Khider -Biskra-, 2012
- [13] AZOUZI Khaled, « Modélisation d'un moteur asynchrone pour le suivi de la sévérité des défauts rotorique par l'approche de la fonction d'enroulement », thèse de magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 11/Avril/2011.
- [14] CHAHMI Abdelghani, « Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic » thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 26/février/2017.
- [15] ZORIG Assam, « Identification des Machines Asynchrones en Vue de Leurs diagnostiques », thèse de magister, Université FERHAT ABBAS - SETIF-, 07/07/2010.
- [16] S. Nandi, H. A. Toliyat, X. Li, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors-A Review", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, N°4, PP. 719-729, 2005.

Annexe

Paramètre de la machine

	Paramètres	Valeurs
MACHINE	Puissance	7.5kW
	Courant	8.89 A
	Tension	380V
	Fréquence	50Hz
	Vitesse nominale	2925tr/min
	Nombre de paires de pôles	1
	Longueur du paquet de tôles	125mm
STATOR	Nombre d'encoches	24
	Nombre de spires par phase	208
	Connexion	Y
	Diamètre extérieur	120mm
	Diamètre intérieur	90.4mm
	Résistance par phase	1.54 Ω
ROTOR	Nombre d'encoches	20
	Diamètre extérieur	119mm
	Diamètre intérieur	40mm
ENTREFER	Epaisseur	0.5mm

Géométrie de la machine