

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

GAID Mohammed et BEKAKRA Abdelhakim

Thème

Détection des défauts rotoriques dans la machine asynchrone triphasée par analyse du couple électromagnétique

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

Dr.

Maitre de conférences A

Président

Dr. HALEM Noura

Maitre de conférences A

Rapporteur

Dr.

Maitre de conférences B

Examineur

Année Universitaire 2019/2020

الله أكبر

Remerciements

Au terme de ce travail, nous remercions Dieu le tout Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous donné durant toutes ces années d'étude.

Il est agréable de remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce modeste travail, en particulier "**Dr. HALEM Noura**", qui a acceptée de diriger ce travail, nous lui exprimons ici toute notre gratitude.

Nos Enseignants du département d'Électrotechnique, pour leur soutien moral et leur accueil chaleureux.

Nos collègues et amis pour leurs encouragements et leurs aides durant la réalisation de ce travail.

Dédicace

C'est à mon Dieu que j'adresse en premier lieu mes remerciements.

Je dédie ce travail à ma mère, j'espère qu'il sera aussi beau que son cœur.

À mon père, dont le cœur ne s'endort jamais, sauf après que mon cœur s'est endormi, au paradis
pour toujours, si dieu le veut.

Gaid Mohammed

Dédicace

Louange à Allah. Je vous remercie et exige plus s'il vous plaît. Louange à Dieu, comme vous nous avez gracieusement réconfortés après oui et merci dans le bien et le mal. Et merci dans l'intensité et la prospérité et vous féliciter quand même.

À qui était l'aide et la chaleur entre mes côtes ...

"Maman"

A qui je n'ai rien épargné ...

" Mon père"

Au lien sur lequel j'étais basé ...

" Mes frères et sœurs"

Et à ceux qui ont rendu ma vie exaltante avec eux comme un soleil ils ont enlevé mes nuages

"mes amis"

À tous ceux qui m'ont appris des personnages ...

"Mes professeurs"

BEKAKRA Abdelhakim

Sommaires

Sommaries

Sommaries.....	II
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VIII
Liste des symboles et abréviations	X
Introduction générale	1
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS	3
I.1. Introduction	4
I.2. Le moteur asynchrone triphasé à cage	4
I.2.1. Principe de fonctionnement	4
I.2.2. Glissement d'un moteur asynchrone triphasé à cage	5
I.2.3. Constitution du moteur asynchrone triphasé à cage	5
I.2.3.1. Stator	6
I.2.3.2. Rotor	6
I.3. Notion sur la sûreté de fonctionnement du moteur asynchrone triphasé à cage	7
I.4. Les défauts dans le moteur asynchrone triphasé à cage	8
I.4.1. Défaillances des roulements mécaniques	8
I.4.2. Défaillances au stator	9
I.4.3. Défaillances au rotor	10
I.5. Conséquences des défauts dans Le moteur asynchrone triphasé à cage	11
I.6. Méthodes de diagnostic des défauts dans le moteur asynchrone triphasé à cage	11
1.6.1. Les méthodes de connaissances	12
I.6.2. Les méthodes de redondances analytiques	12
I.6.3. Les méthodes par l'analyse de signaux	13

I.7. Modèles dédiés au diagnostic de la machine asynchrone	15
I.7.1. Approche analytique	15
I.7.2. Approche numérique	15
I.7.2.1. Méthode des schémas magnétiques équivalents	15
I.7.2.2. Méthodes des éléments finis	16
I.8. Conclusion	17
CHAPITRE II: SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE	
TRIPHASÉE À CAGE	18
II.1. Introduction	19
II.2. La méthode des éléments finis	19
II.2.1. Formulations	19
II.2.2. Le modèle utilisé	21
II.2.2.1. Le modèle magnétostatique	21
II.2.2.2. Le modèle magnétodynamique	22
II.3. Logiciel de résolution	22
II.3.1. Présentation du logiciel FLUX2D	23
II.4. Construction du modèle élément fini de la machine asynchrone	23
II.4.1. Phase de préparation (Préprocesseur)	24
II.4.2. Phase de calcul (Processeur de calcul)	25
II.4.3. Phase de visualisation (Post-processeur)	26
II.5. Conclusion	26
CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS	27
III.1. Introduction	28
III.2. Résultats de simulation	28
III.2.1. Machine à l'état sain	28

III.2.1.1. Moteur à vide	28
III.2.1.2. Pleine charge	30
III.2.2. Machine avec 10% de défaut d'excentricité	31
III.2.2.1. Moteur à vide	31
III.2.2.2. Pleine charge	32
III.2.3. Interprétations	34
III.2.4. Analyse spectrale	34
III.2.4.1. Etat sain	34
III.2.4.2. Etat de défaut	35
III.2.4.3. Interprétations	36
III.3. Conclusion	41
Conclusion générale	42
Bibliographie	44
Annexe	47

Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS

I.1	Principe de fonctionnement du moteur asynchrone à cage triphasé	5
I.2	Structure du moteur asynchrone	6
I.3	Structure d'un roulement à billes	8
I.4	Types d'excentricité : (a) statique, (b) dynamique, (c) mixte	10
I.5	Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : (a) rupture de barres (b) rupture d'anneau de court-circuit	11
I.6	Méthodes de diagnostic de la machine triphasé à cage asynchrone	12

CHAPITRE II: SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASÉE À CAGE

II.1	Structure de la machine asynchrone 2 pôles étudiée	24
II.2	Maillage du circuit magnétique	25
II.3	Circuit électrique du modèle	25

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

III.1	Courant i_a , moteur sain à vide	28
III.2	Zoom du courant i_a , moteur sain à vide	29
III.3	Vitesse de rotation angulaire w , moteur sain à vide	29
III.4	Couple électromagnétique C_e , moteur sain à vide	29
III.5	Courant i_a , moteur sain à pleine charge	30
III.6	Vitesse de rotation angulaire w , moteur sain à pleine charge	30
III.7	Couple électromagnétique C_e , moteur sain à pleine charge	31
III.8	Courant i_a , moteur sain à vide en défaut d'excentricité de 10 %	31
III.9	Vitesse de rotation angulaire w , moteur sain à vide en défaut d'excentricité de 10 %	32
III.10	Couple électromagnétique C_e , moteur sain à vide en défaut d'excentricité de 10 %	32
III.11	Courant i_a , moteur sain à pleine charge en défaut d'excentricité de 10 %	33
III.12	Vitesse de rotation angulaire w , moteur sain à pleine charge en défaut d'excentricité de 10 %	33
III.13	Couple électromagnétique C_e , moteur sain à pleine charge en défaut d'excentricité de 10 %	33
III.14	Spectre de i_a en linéaire, moteur sain, à vide	34

III.15	Spectre de ia en db , moteur sain, à vide	34
III.16	Spectre de ia en linéaire, moteur sain, à vide	35
III.17	Spectre de ia en db , moteur sain, à vide	35
III.18	Spectre de ia en linéaire, moteur sain, pleine charge	35
III.19	Spectre de ia en db , moteur sain, pleine charge	35
III.20	Spectre de ia en linéaire, défaut de 10 % d'excentricité, à vide	35
III.21	Spectre de ia en db , défaut de 10 % d'excentricité, à vide	35
III.22	Spectre de ia en linéaire, défaut de 10 % d'excentricité, pleine charge	36
III.23	Spectre de ia en db , défaut de 10 % d'excentricité, pleine charge	36
III.24	Spectre de ia en linéaire, défaut de 10 % d'excentricité, pleine charge	36
III.25	Spectre de ia en db , défaut de 10 % d'excentricité, pleine charge	36
III.26	Superposition des courants, état sain et état de défaut	37
III.27	Superposition des couples, état sain et état de défaut	37
III.28	Superposition des vitesse, état sain et état de défaut	38
III.29	Superposition des courants, état sain et état de défaut	38
III.30	Superposition des couples, état sain et état de défaut	38
III.31	Superposition des vitesse, état sain et état de défaut	39
III.32	Superposition des courants, état sain et état de défaut	39
III.33	Superposition des couples, état sain et état de défaut	39
III.34	Superposition des vitesse, état sain et état de défaut	40

Liste des tableaux

Liste des tableaux

I.1	Signatures spectrales des défauts de la machine asynchrone à cage	14
III.1	Valeurs moyennes des parties positives du courant	37
III.2	Valeurs moyennes des vitesses	40
III.3	Valeurs de l'écart de la plage des couples	41

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles et abréviations

g	Glissement du moteur asynchrone en pourcentage [sans unités]
n_s	Fréquence de rotation du champ B en tours par seconde [tr.s ⁻¹]
n	Fréquence de rotation du rotor en tours par seconde [tr.s ⁻¹]
P	Nombre de pair de pôles.
f_s	Fréquence du réseau d'alimentation.
s	Glissement.
f_v	Fréquences caractéristiques des vibrations, soit (f_{bille} , $f_{b.int}$ ou $f_{b.ext}$).
nb	Nombre d'éléments roulants.
BD	Diamètre d'un élément roulant,
PD	Distance entre les centres des billes diamétralement opposées.
β	Angle de contact des billes avec les bagues du roulement.
f_r	Fréquence de rotation du rotor.

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

La plupart des secteurs 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 majeurs défauts recensés sont les courts circuits entre spires des bobinages du stator, les dégradations des anneaux au rotor, tous les problèmes de barres (ruptures ou imperfections) et les défauts d'excentricité.

Notre travail consiste à modéliser la machine asynchrone par une méthode fiable parmi plusieurs qu'on trouve dans la littérature et à appliquer une technique de diagnostic se basant sur l'analyse spectrale du couple en plus de celle qui est couramment utilisée : l'analyse spectrale du courant. Le défaut à détecter est l'asymétrie rotor ou excentricité statique. Pour ce faire ou dans cette logique, le choix pour la modélisation proposée est l'utilisation de la méthode des éléments finis, méthode, la plus fiable possible, car c'est celle qui décrit le comportement et le fonctionnement de la machine de la manière la plus fine possible. Selon ce qui précède notre travail est organisé comme suit :

Le premier chapitre présente la constitution de la machine, donne un exposé de plusieurs définitions en ce qui concerne le diagnostic suivi d'une présentation des différents défauts pouvant toucher la machine asynchrone ainsi que leurs origines et à la fin on y expose différentes techniques utilisées en diagnostic.

Comme on va modéliser la machine asynchrone par les éléments finis, le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la méthode des éléments finis ainsi que les formules qui la régissent c'est-à-dire les équations de Maxwell. Le modèle magnétodynamique a été retenu.

Le troisième chapitre englobe la simulation des modèles réalisés pour l'état sain et celui de défaut d'excentricité, la collecte des résultats, l'analyse spectrale du courant statorique et les interprétations pouvant être obtenues.

Enfin le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS

I.1. Introduction

La surveillance est un moyen d'assurer le bon fonctionnement de la machine asynchrone triphasée à cage. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui a pour objectif de trouver les causes des dysfonctionnements.

Dans ce chapitre, on va présenter les constituants de la machine, les définitions qui concernent le diagnostic et tout ce que s'y rapporte, puis on va énumérer les défauts pouvant toucher la machine asynchrone à cage et leurs origines et enfin on va passer en revue certaines techniques de diagnostic utilisées.

I.2. Le moteur asynchrone triphasé à cage

I.2.1. Principe de fonctionnement

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme [1].

L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique.

La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, dans ce cas, vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique les courants s'annuleraient, de même que le couple qu'ils produisent, et la machine ne serait plus entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement [1].

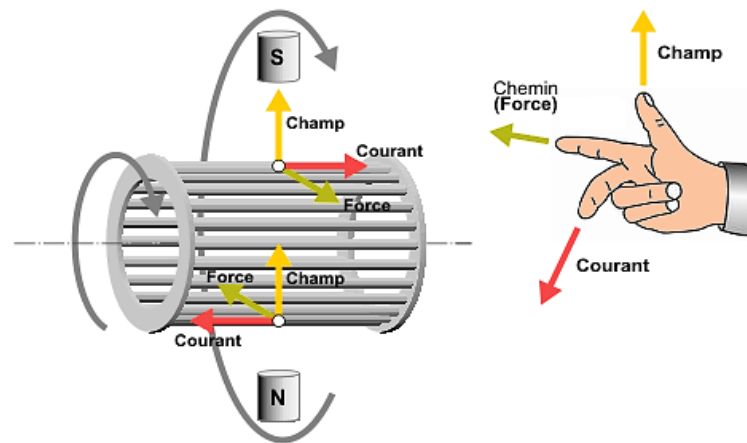


Fig.I.1: Principe de fonctionnement du moteur asynchrone à cage triphasé [1]

I.2.2. Glissement d'un moteur asynchrone triphasé à cage

Le glissement est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à une machine synchrone hypothétique construite avec le même stator. Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pourcents : de 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées, il peut atteindre 10 % pour les petites machines monophasées. Les pertes par effet Joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une machine de qualité se doit de fonctionner avec un faible glissement [2].

$$g = \frac{n_s - n}{n_s}$$

g : Glissement du moteur asynchrone en pourcentage [sans unités]

n_s : Fréquence de rotation du champ B en tours par seconde [tr.s^{-1}]

n : Fréquence de rotation du rotor en tours par seconde [tr.s^{-1}]

I.2.3. Constitution du moteur asynchrone triphasé à cage

Bien que la paternité des machines asynchrones soit attribuée à plusieurs chercheurs, il est admis cependant qu'en 1889, Mikhaïl Dolivo Dobrovolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891. Il existe cependant plusieurs types de machines.

Progressivement ces machines prennent de l'ampleur du fait de leur simplicité d'utilisation et d'entretien, de leurs robustesses et leurs faibles prix de revient.

La machine asynchrone triphasée souvent appelée moteur à induction est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor. Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Le rotor est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation. Comme illustré dans la figure I.2.

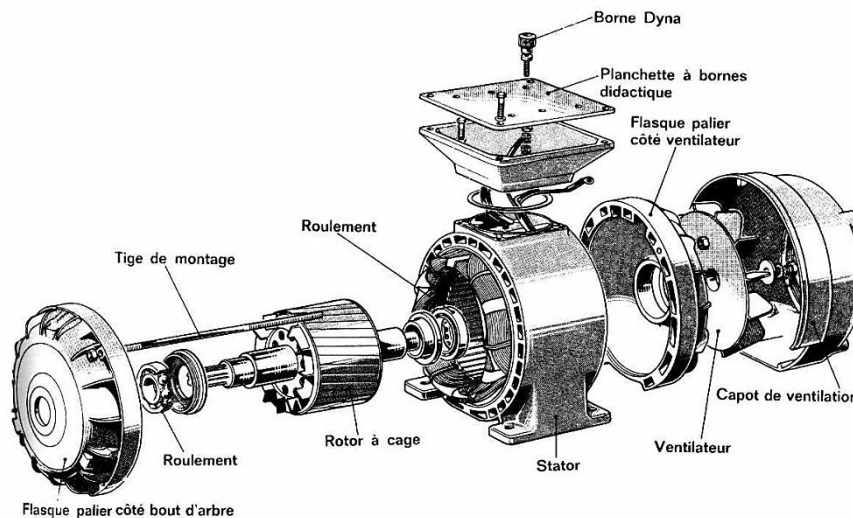


Fig.I.2: Structure du moteur asynchrone [3]

I.2.3.1. Stator

Le circuit magnétique du stator est réalisé par un assemblage de tôles ferromagnétiques fines et découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. L'utilisation des tôles minces permet de minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique [3].

I.2.3.2. Rotor

Le rotor est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu. Dans le rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont des barres obtenues

par injection d'un alliage d'aluminium ou préformées en cuivre et introduites dans les tôles du rotor, il n'y a généralement pas ou très peu d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment forte pour que les courants ne circulent pratiquement pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [4].

I.3. Notion sur la sûreté de fonctionnement du moteur asynchrone triphasé à cage

- **Diagnostic:** associé à l'origine aux Sciences de la Santé, le terme diagnostic désigne, dans le domaine des Sciences de l'Ingénieur, l'analyse des mauvais fonctionnements, défauts ou défaillances d'un système afin d'en déterminer la nature et la cause [5]. C'est aussi par extension l'action consistant à identifier la (ou les) cause(s) probable(s) de la (ou les) défaillance(s) ou de l'évolution d'un ou de plusieurs paramètres significatifs de dégradations à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations. Le diagnostic permet de confirmer, de compléter ou de modifier les hypothèses faites sur l'origine et la cause des défaillances, et de préciser les opérations nécessaires de maintenance corrective [5].
- **Défaillance:** cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Après défaillance d'une entité, cette entité est en état de panne. Une défaillance est un passage d'un état à un autre par opposition à une panne qui est un état [2].
- **Erreur:** tout écart entre la valeur mesurée ou calculée, et la valeur réelle [2].
- **Un défaut:** est une déviation non permise d'au moins une propriété ou un paramètre caractéristique du système par rapport à un comportement usuel, nominal ou acceptable [5].
- **Panne:** état d'une entité inapte à accomplir une fonction requise dans des conditions données d'utilisation [5].
- **Maintenance:** ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise [5].
- **Fiabilité:** aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée. Elle est caractérisée par la probabilité pour que l'entité accomplissant ces fonctions à l'instant 0 puisse les accomplisse à l'instant t [4].
- **La disponibilité:** aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée [5].

- **Maintenabilité:** aptitude d'une entité à être remise en état par une maintenance adaptée afin d'accomplir des fonctions requises dans des conditions données. Elle se caractérise par la probabilité d'être en état, à l'instant t , d'accomplir ces fonctions sachant qu'elle était en panne à l'instant 0. La maintenabilité ne se différencie de la fiabilité que sur ce dernier point : elle caractérise la promptitude de reprise du service attendu après interruption. La maintenabilité, c'est la brièveté des pannes [5].

I.4. Les défauts dans le moteur asynchrone triphasé à cage

I.4.1. Défaillances des roulements mécaniques

Le roulement à billes est un organe de base dans la machine asynchrone qui joue le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor (figure I.3). En plus, il représente l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance-prix [6].

Le roulement est composé des éléments suivants [6]:

- 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).

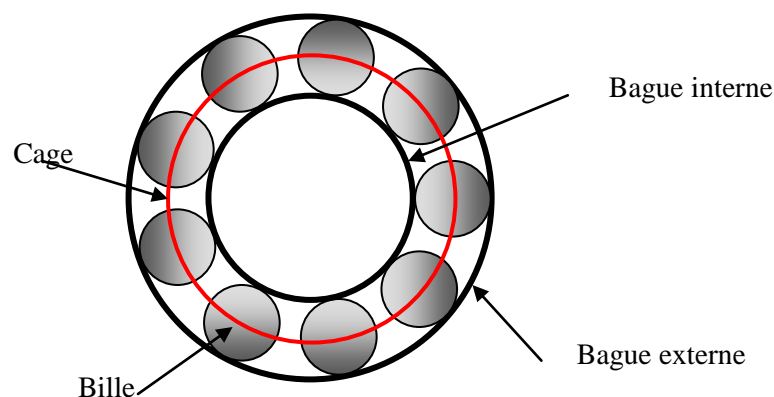


Fig.I.3: Structure d'un roulement à billes [6]

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts suivants [6]:

- Défaut de bague extérieure.

- Défaut de bague intérieure.
- Défaut de billes.

D'après des études statistiques, les défauts de roulement représentent à eux seuls entre 40% et 50% des défauts des machines asynchrones triphasées. Ils constituent donc les défauts les plus fréquents sur les machines asynchrones notamment les machines de fortes puissances. Les roulements peuvent être endommagés par les causes suivantes [6]:

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

Par conséquent, le traitement de ce type de défaut prend une place prépondérante et constitue une piste privilégiée dans le domaine de diagnostic des défauts de la machine asynchrone [6].

I.4.2. Défaillances au stator:

Les défaillances au stator représentent environ de 40% à 60% des défauts des machines à induction. La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants. L'enroulement statorique d'une machine électrique est soumis à des efforts induits par une variété de facteurs, parmi les plus importants, une surcharge thermique, les vibrations mécaniques, les pics de tension provoqués par le réglage de fréquence, etc [7]. Les causes les plus fréquentes des défauts d'enroulement statorique sont [7]:

- Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader
- Échauffement excessif du noyau et des enroulements du stator.
- Fissures dans la tôle, de fixation, et des jonctions.
- Mauvaise connexion des têtes des enroulements.
- Fonctionnement dans un environnement sévère, contamination provoquée par l'humidité et la saleté.

- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- Décharges électriques.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Fuites dans les systèmes de refroidissement.

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit: défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et armature, déséquilibre d'alimentation, défaut de circuit magnétique [7].

I.4.3. Défaillances au rotor:

Dans les machines asynchrones à cage, les défaillances qui peuvent atteindre le rotor sont considérées comme plus variées et plus complexes que celles affectant le stator. Ceci est particulièrement vérifié pour les machines de faible et moyenne puissances.

Plusieurs facteurs manifestent l'apparition des défaillances au niveau du rotor de la machine asynchrone, parmi eux on cite [11]:

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

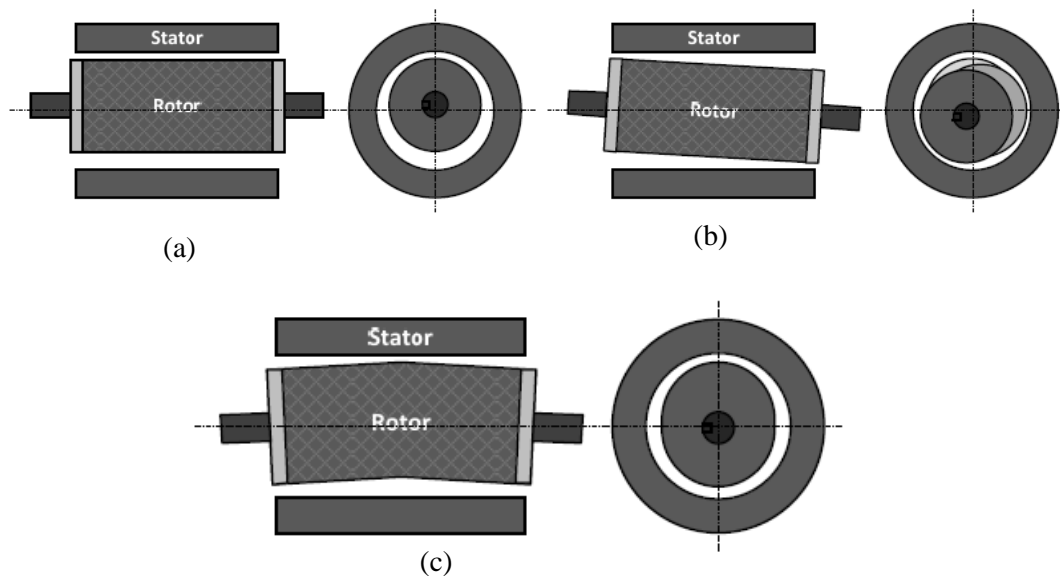


fig.I.4: Types d'excentricité : (a) statique, (b) dynamique, (c) mixte [8]

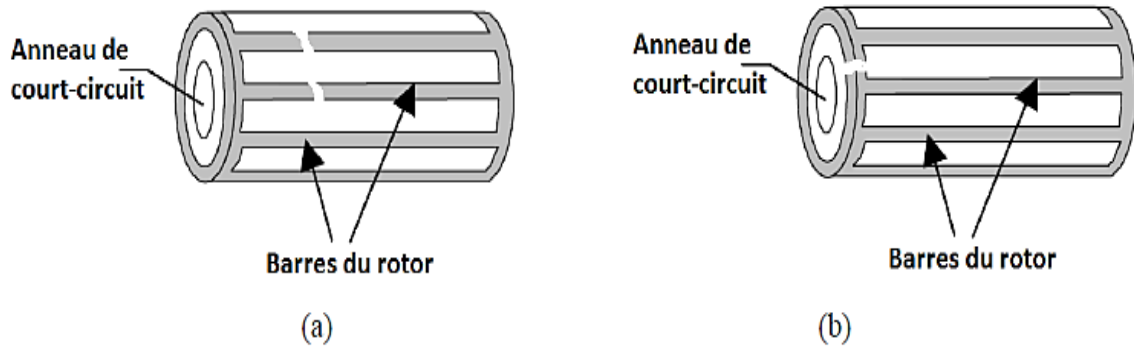


Fig.I.5: Défaut d'un rotor à cage d'écureuil :

(a) rupture de barres

(b) rupture d'anneau de court-circuit [8]

Les défauts qui sont les plus répétitifs, localisés au niveau du rotor sont: l'excentricité statique, mixte et dynamique, la rupture de barres rotoriques et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit [7].

I.5. Conséquences des défauts dans Le moteur asynchrone triphasé à cage

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total. On cite parmi les conséquences des défauts [9]:

- Fluctuations au niveau du couple et de la vitesse.
- Appel supplémentaire de courant.
- Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.
- Augmentations des arrêts non programmés, des pertes de production, et par conséquent, du rendement global.

I.6. Méthodes de diagnostic des défauts dans le moteur asynchrone triphasé à cage

Les méthodes de diagnostics sont couvertes par une somme appréciable de travaux. Un consensus semble être établi pour définir trois méthodologies de diagnostic: méthodes de connaissances, méthodes de redondances analytiques et méthodes par modélisation de signaux (voir figure I.6) [8].

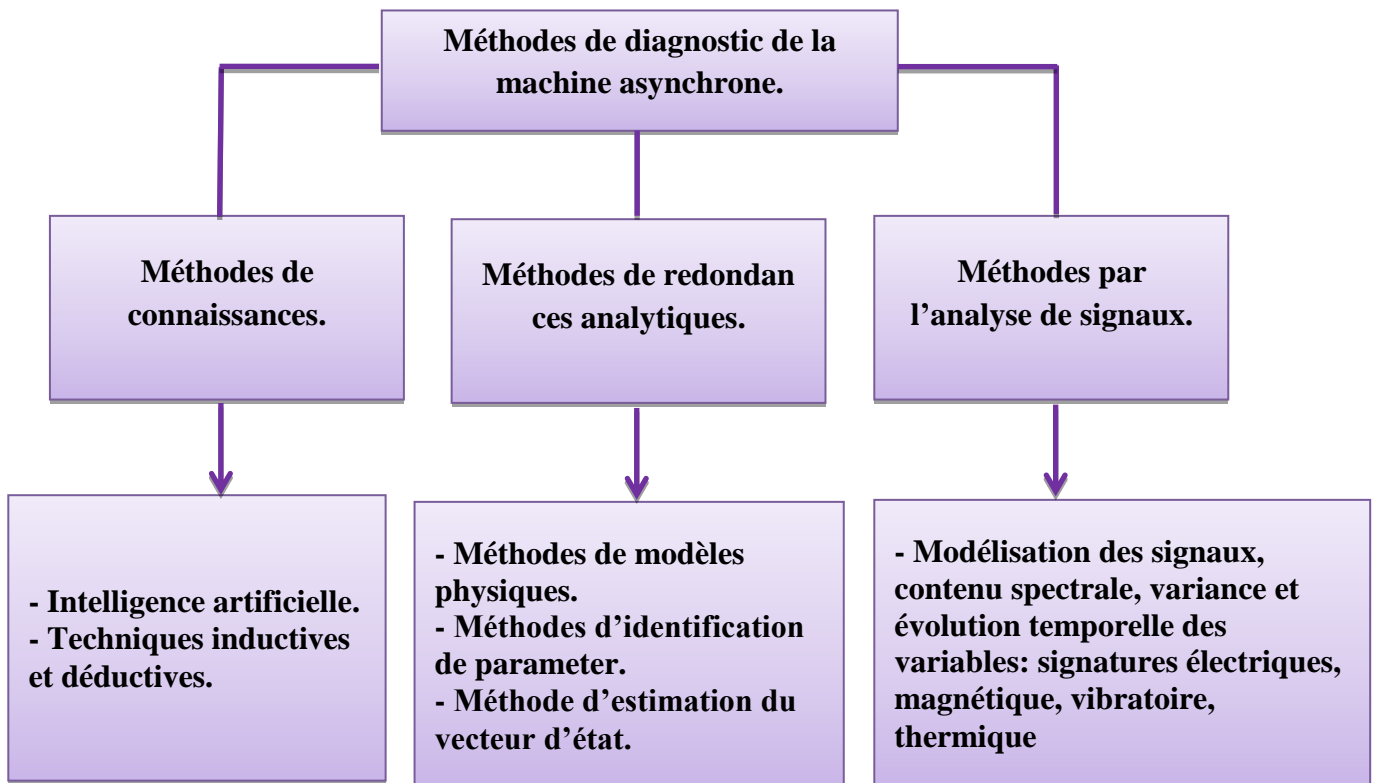


Fig.1.6: Méthodes de diagnostic de la machine triphasé à cage asynchrone [8]

1.6.1. Les méthodes de connaissances

Dans la littérature spécialisée plusieurs techniques de détection de défauts par ces méthodes sont présentées. Ces méthodes ne font pas appel au modèle mathématique pour décrire les relations de cause à effet. En définitif, la seule connaissance repose sur l'expérience humaine confortée par des retours d'expérience. Les techniques basées sur l'intelligence artificielle mettent en oeuvre la reconnaissance de formes, les systèmes experts, les réseaux de neurones, et la logique floue, qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés pour améliorer leur efficacité. Cependant, les méthodes inductives ou déductives ne s'appliquent pas directement au diagnostic, mais peuvent y aider. Elles sont essentiellement utilisées pour définir les causes du défaut en utilisant des modèles de pannes. Il est à noter que ces méthodes sont davantage du ressort des automaticiens que des électrotechniciens [8].

1.6.2. Les 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.6.3. Les 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. Le traitement du signal est utilisé depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les défauts rotoriques. La première étape dans cette approche concerne naturellement la modélisation des signaux. Il s'agira par la suite de les caractériser dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral, leur variance, etc [6].

L'analyse de ces grandeurs quantifiables fidèlement attribuée aux signaux des défauts reste la démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic de défauts dans les machines électriques.

L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement, les vibrations, etc. Ces symptômes sont la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques électriques et mécaniques de la machine. Une lecture sur les travaux précédents confirme l'existence de plusieurs techniques de détection de défauts par traitement de leurs signaux. Le défaut étant traduit par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation, ces méthodes se trouvent bien adaptées à la détection de défauts. Exigeant uniquement un capteur de courant ou/et un capteur de vitesse, l'analyse spectrale est de loin la méthode de diagnostic la plus économique et la plus rapide, d'où son succès auprès des industriels [6].

L'analyse spectrale représente la méthode la plus usitée pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

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. Les grandeurs choisies sont soit électriques, comme la puissance instantanée, et plus particulièrement le courant statorique, soit mécaniques (vibration couple électromagnétique), ou bien magnétique (induction magnétique).

Le tableau (I.1) résume les signatures spectrales qui caractérisent les défauts de la machine asynchrone à cage [6].

Tab.I.1: Signatures spectrales des défauts de la machine asynchrone à cage [44]

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

Avec:

P Nombre de pair de pôle.

f_s Fréquence du réseau d'alimentation.

s Glissement.

f_v Fréquences caractéristique des vibrations, soit (f_{bille} , $f_{b.int}$ ou $f_{b.ext}$).

n_b Nombre d'éléments roulants.

BD Diamètre d'un élément roulant,

PD Distance entre les centres des billes diamétralement opposées, et β l'angle de contact des billes avec les bagues du roulement et f_r est la fréquence de rotation du rotor.

I.7. Modèles dédiés au diagnostic de la machine asynchrone

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, la vérification sur prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défauts et elles apportent également la possibilité des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Plusieurs voies de modélisation existent, elles sont actuellement utilisées pour examiner des problèmes tels que la commande, la conception ou la surveillance.

En ce qui nous concerne, nous nous intéressons aux modèles simulant le comportement électromagnétique de la machine asynchrone en vue de faire le diagnostic.

Parmi les approches de modélisation, nous citons deux [2]:

I.7.1. Approche analytique

Les modélisations analytiques reposent sur le concept d'inductance, notion qui caractérise par définition une relation linéaire flux-courant. Toute considération de la saturation magnétique, phénomène physique (effet de peau, harmoniques de flux d'entrefer) omniprésent dans le fonctionnement normal de la machine, se trouve à priori exclue de cette approche. Cette approche globale des phénomènes électromagnétiques permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine, chaque branche est constituée d'une résistance en série avec une force électromotrice. Ensuite l'utilisation de la théorie des circuits et des systèmes permet de trouver les équations différentielles caractérisant le fonctionnement de la machine. Ces dernières seront intégrées analytiquement ce qui permet de réduire considérablement la complexité des calculs. Dans ce cadre, plusieurs modèles mathématiques ont été développés avec plusieurs degrés de complexité depuis les modèles triphasés au stator et rotor jusqu'aux modèles triphasés au stator et multiphasés au rotor (multi-enroulements) [2].

I.7.2. Approche numérique

On cite deux méthodes:

I.7.2.1. Méthode des schémas magnétiques équivalents

Cette approche consiste à découper le circuit magnétique qui constitue la machine étudiée en tubes de flux, caractérisés chacun par sa réluctance ou sa perméance. Ces grandeurs, tout comme les inductances, peuvent être définies selon les valeurs de flux, prenant ainsi en considération la saturation magnétique. Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer variable selon la position du rotor. Les circuits électriques statoriques et rotoriques sont considérés grâce aux équations de couplage

électrique/magnétique. Au rotor, les n phases sont constitués par les mailles électriques limitées par deux barres successives. Ce couplage est concrétisé au niveau de la mise en équation par le choix des inconnues du système qui seront simultanément les flux dans les différentes mailles du réseau magnétique ainsi que les courants statoriques et rotoriques. Pour la résolution des équations, un problème de non-linéarité s'impose et nécessite l'utilisation d'une méthode itérative en pas à pas dans le temps [2].

I.7.2.2. Méthodes des éléments finis

Il s'agit cette fois de découper le circuit magnétique de la machine en éléments de dimension suffisamment faible pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes. A partir des formes locales des équations de Maxwell, il est possible d'exprimer le problème à résoudre. La résolution analytique est complexe et ne permet de traiter la saturation que de façon approchée. Les progrès des calculateurs ont permis d'envisager leur résolution numérique. De nombreux outils logiciels leurs ont dédiés. Citons, entre autres, ANSYS, FLUX2D, FLUX 3D et MAXWELL [2]. Cependant, ces logiciels ont historiquement été conçus pour déterminer le champ électromagnétique, et dans l'objectif de l'optimisation du dimensionnement [2].

Ces trois méthodes ont chacune leur place sur la double échelle complexité/précision des approches de simulation. La méthode analytique est la plus simple à mettre en œuvre mais elle nécessite des hypothèses restrictives, vient ensuite celle des schémas magnétiques, enfin celle des éléments finis. C'est cette dernière qui nécessite des moyens et des temps de calculs plus importants.

L'adéquation de ces méthodes au diagnostic de la machine existe pour chacune d'entre elles selon ce que l'on cherche à diagnostiquer. La méthode des éléments finis, qui reproduit le plus fidèlement le comportement électromagnétique de la machine permet de simuler des dysfonctionnements réels en son sein avec une manifestation tout à fait localisée du défaut (par exemple, des ruptures des barres). Cependant, les moyens et temps de calcul nécessaires à cette méthode constituent son handicap majeur et freinent son utilisation pour la simulation et l'évolution d'algorithmes de détection de défauts. La modélisation par schéma magnétique peut tenir compte d'une particularité géométrique du circuit magnétique ou d'une spécificité du circuit électrique. Les résistances statoriques, l'effet pelliculaire ne peuvent pas être correctement pris en compte [2].

I.8. Conclusion

Ce chapitre est un prétexte à la présentation des Principe de fonctionnement, de Glissement et de Constitution du moteur asynchrone triphasé à cage, en plus de définition des notions très important en sur la sûreté de fonctionnement du moteur asynchrone triphasé à cage, nous avons également abordés défauts qui peuvent affectés la machine asynchrone, leurs causes et Conséquences leurs signatures, ainsi que les méthodes de diagnostic de défaut, et enfin nous avons montioner modèles dédiés au diagnostic de la machine asynchrone.

CHAPITRE II: SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASÉE À CAGE

CHAPITRE II: SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASÉE À CAGE

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, la machine asynchrone triphasée à cage sera simulée par la méthode des éléments finis, cette méthode offre un espace d'harmoniques plus proche que celui de la machine réelle, ce qui permet une application fiable de la technique d'analyse des différents signaux de la machine.

II.2. La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation sont d'une grande précision et 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 adéquat (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 de calcul (Logiciel), d'où une grande souplesse d'utilisation [10].

II.2.1. Formulations

Considérons un certain domaine (Ω) dans lequel un champ A , scalaire ou vectoriel, est la solution de l'équation aux dérivées partielles suivante [11] :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

On les définit comme suit [10] :

- Les relations de couplage électromagnétique :

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

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

- Les relations de la conservation des flux :

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

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

- La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

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

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

- La relation de la loi d'Ohm :

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

où,

\vec{H} : Champ magnétique (A/m)

\vec{E} : Champ électrique (V/m)

\vec{B} : Induction magnétique (T)

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

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

\vec{D} : Induction électrique (C/m²)

μ : Perméabilité magnétique (H/m)

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

II.2.2. Le modèle utilisé

Selon les résultats escomptés et le temps de simulation dont on dispose, deux modèles de résolutions peuvent être employés [11] :

II.2.2.1. Le modèle magnétostatique

Ce modèle ne pourra être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courant induits) de la machine car il impose de connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. On s'en servira essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les sources sont indépendantes du temps. Le terme $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

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

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

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

La condition (II.13) permet de définir une fonction en vecteur potentiel \vec{A} telle que :

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

Pour que A soit totalement défini, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition $div(A) = 0$ appelée jauge de Coulomb, qui vérifie 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 :

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

II.2.2.2. Le modèle magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources de courant ou de tension qui varient en fonction du temps. Le terme $\frac{\partial B}{\partial t}$ n'est pas nul, ce qui permet d'obtenir des valeurs convenables du courant efficace. Ce modèle pourra être utilisé pour étudier un schéma équivalent de la machine.

Le système à résoudre est le suivant :

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

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

II.3. Logiciel de résolution

Les logiciels à base des éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution sont [12] :

- *Introduction des données géométriques et des propriétés physiques*
- *Maillage*
- *Résolution*
- *Exploitation des résultats*

Ces étapes sont séquentiellement exécutées.

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

Il existe de nombreux logiciels comme: *MAXWELL 2D/3D*, *ANSYS*, *OPERA*, *FLUX2D/3D* qui permettent d'aborder cette approche difficile. Le but principal de ces logiciels est de déterminer la cartographie du champ magnétique présent dans les machines électriques dans

l'objectif d'optimiser le dimensionnement de ces dernières. Pour cette étude, on utilise le logiciel *FLUX2D*.

La modélisation et l'étude de la machine asynchrone saine et avec défaut de barres cassées sera réalisée par la méthode d'éléments finis pas à pas dans le temps connue sous le générique TSFEM (Time Stepping Finite Element Method).

II.3.1. 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 [12] :

- **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. Construction du modèle élément fini de la machine asynchrone

La réalisation du modèle couplé élément fini-circuit électrique de la machine asynchrone par le logiciel *FLUX2D* nécessite trois phases distinctes : phase de préparation, phase de calcul et enfin la phase de visualisation.

II.4.1. Phase de préparation (Préprocesseur)

Cette phase préparatoire est consacrée à la définition des domaines, des matériaux et du mode de bobinage. 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.1, (une description complète de la machine est donnée en annexe).

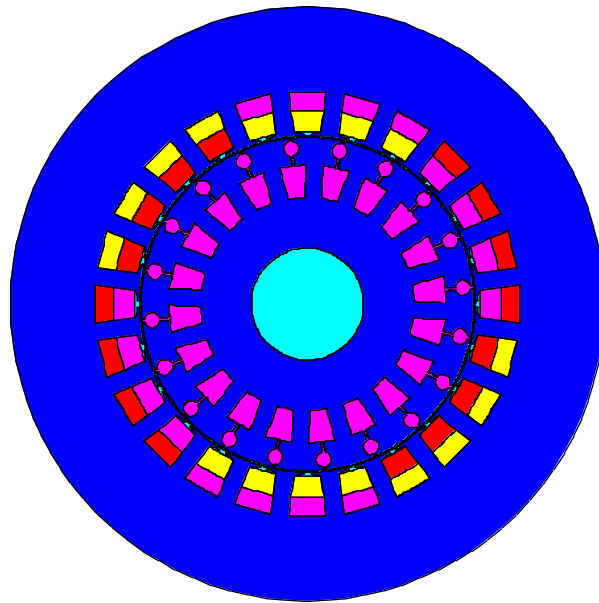


Fig.II.1. Structure de la machine asynchrone 2 pôles étudiée

Le stator est défini par un matériau ferromagnétique caractérisé par une courbe d'aimantation $B(H)$, et 24 encoches statoriques qui 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.

Le maillage du circuit magnétique, est représenté à la figure II.2. L'exploitation principale du modèle éléments finis a pour objectif de faire le diagnostic, ce qui exige 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 assurer un compromis raisonnable entre la précision et la rapidité du calcul numérique.

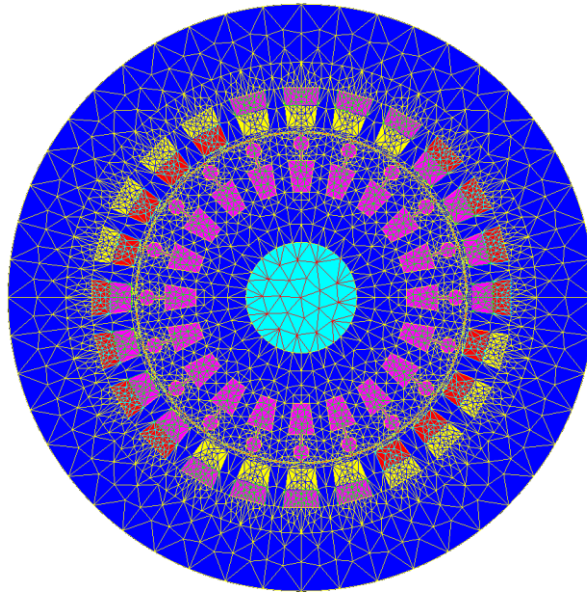


Fig.II.2. Maillage du circuit magnétique

Le circuit électrique présenté dans la figure II.3 est lié au modèle, il contient douze éléments de type bobine qui correspondent aux zones de chacune des trois phases de l'enroulement statorique. La cage d'écurueil contient 20 barres rotoriques et les paramètres électriques des barres.

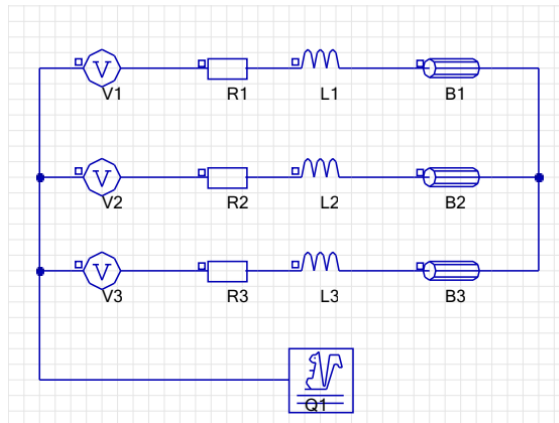


Fig.II.3. Circuit électrique du modèle

II.4.2. Phase de calcul (Processeur de calcul)

A partir des éléments de la géométrie et de la physique de la machine et maillage, ainsi que le type du problème, le processeur fait le calcul des éléments de la matrice Jacobienne et réalise l'assemblage des éléments pour construire la matrice globale et le second membre du problème.

L'application du modèle est du type magnétique transitoire avec couplage du circuit électrique permet l'étude des phénomènes créés par un champ magnétique variable dans le temps. Le champ magnétique est lié à la présence de courants électriques variables. Cette

application permet la prise en compte des courants induits dans les régions conductrices (courants de Foucault).

Pour la résolution magnétique transitoire de cette machine, l'obtention d'un fonctionnement en régime permanent de la machine passe par un fonctionnement en régime transitoire, cet état est atteint après environ 0.5 s avec un pas de temps choisi de: 0.001 s. Le choix de l'intervalle temps est dictée par un certain nombre d'impondérables liés au temps de calcul, de la capacité de stockage et de mémoire.

II.4.3. Phase de visualisation (Post-processeur)

A l'intérieur de ce module, les résultats sont représentés à l'utilisateur sous une forme adaptée à sa perception de la physique du problème. Par exemple, dans un problème d'électrostatique le tracé des équipotentielles est un résultat très utilisée. En magnétostatique, les lignes de flux, où un ensemble de vecteurs d'induction, informent sur la répartition du champ.

Dans l'étude des problèmes magnétiques transitoires qui est notre cas, on peut tracer les allures des différents paramètres de la machine (courants statorique et rotorique, couple électromagnétique, vitesse de rotation, densité de flux magnétique, ...etc).

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthode des éléments finis, nous avons commencés par les formulations mathématiques qui se basent sur les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré telles que les relations de couplage électromagnétique, les relations de la conservation des flux, la relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques et la relation de la loi d'Ohm. Aussi nous avons présenté le logiciel *FLUX2D*. Ce dernier tient compte de la topologie et de la dimension de la machine. De plus il a la possibilité de manipuler le circuit magnétique de fer, ce qui permet d'introduire la courbe $B(H)$ avec saturation dans les calculs. Bien que cette modélisation soit très coûteuse en temps de calcul, elle reste très fidèle au comportement de la machine. Ensuite le modèle magnétodynamique a été adopté.

La machine asynchrone triphasée à cage a été simulée en 2 dimensions à l'état sain. Le courant de phase, le couple électromagnétique, la vitesse de rotation et la distribution des lignes de flux sont visualisés.

Le prochain chapitre sera réservé à la simulation de la machine asynchrone triphasée à cage à base du modèle éléments finis avec un défaut d'excentricité de 10% et ceci sous différentes charges.

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

III.1. Introduction

Ayant présenté la méthode des éléments finis dans le deuxième chapitre ainsi que la formulation des équations de Maxwell qui la régissent et les résultats de simulation de la distribution du flux pour l'état sain, dans celui-ci nous allons présenter les résultats de simulation de l'état sain et de l'état de défaut. Nous avons réalisé deux modèles l'un pour l'état sain l'autre pour l'état en défaut d'excentricité de 10%.

On fait la simulation de l'état sain pour différentes charges : à vide, mi et pleine charge. Pour les mêmes charges on refait la simulation mais avec un modèle contenant un défaut d'excentricité de 10%. Aussi pour obtenir une résolution suffisante, la fréquence d'échantillonnage a été choisie à $f_e = 10\text{kHz}$ et un temps de simulation $T_s = 6\text{s}$.

Ensuite nous allons présenter et commenter les résultats issus de la simulation.

III.2. Résultats de simulation

III.2.1. Machine à l'état sain

III.2.1.1. Moteur à vide

La figure III.1 illustre le courant de phase statorique pendant tout l'intervalle de simulation [0 6]s. Par contre la figure III.2 en donne un aperçu (agrandissement) sur un intervalle d'environ 0.16 s représentant plusieurs périodes du courant. Sur cette figure le courant est légèrement bruité. Les figures III.3 et III.4 représentent respectivement la vitesse de rotation et le couple électromagnétique. Ils commencent par un régime transitoire qui dure à peu près 0.6s et finissent par le régime permanent tout comme le courant.

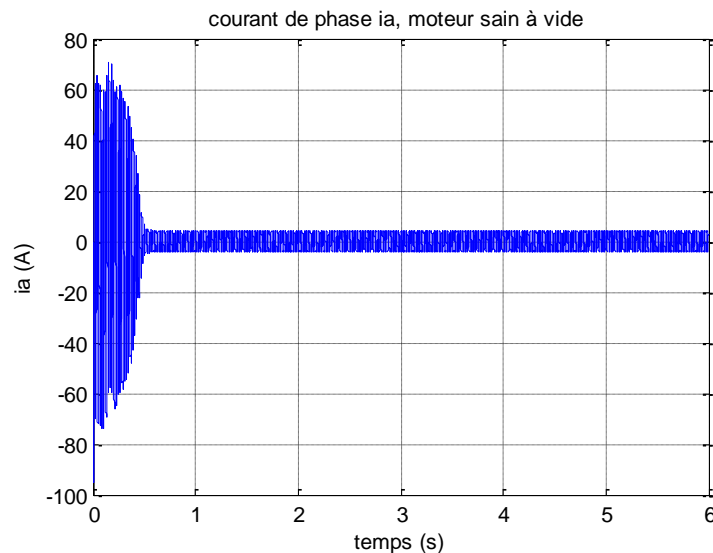


Fig.III.1 Courant i_a , moteur sain à vide

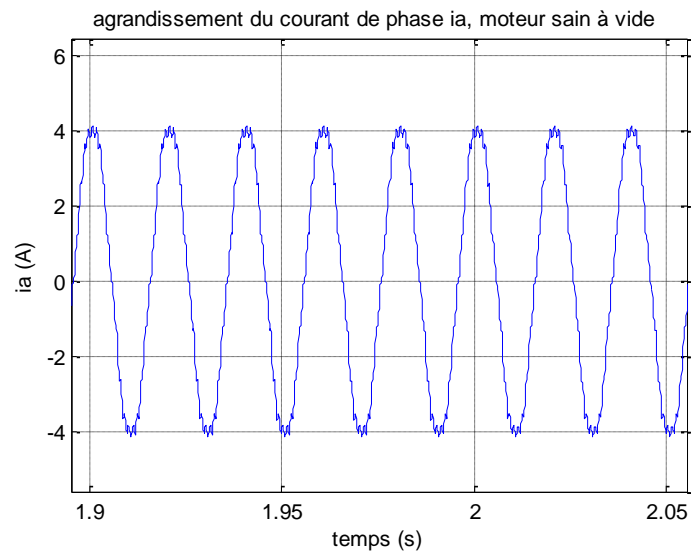


fig. III .2 Zoom du courant i_a , moteur sain à vide

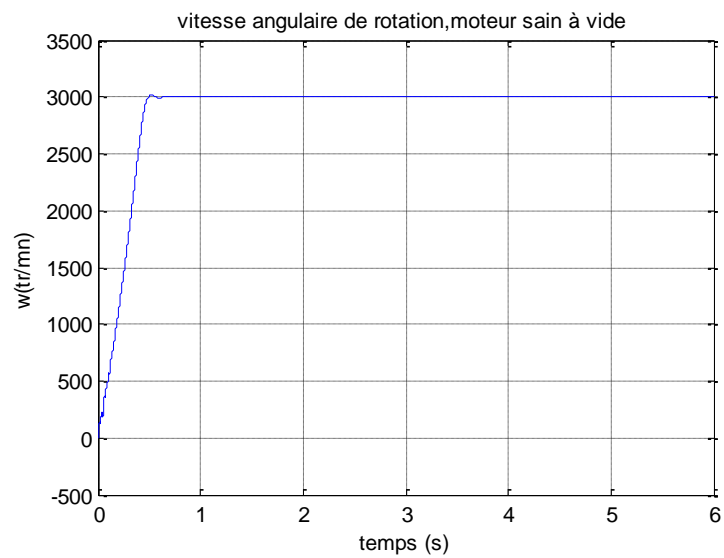


fig. III .3 Vitesse de rotation angulaire w , moteur sain à vide

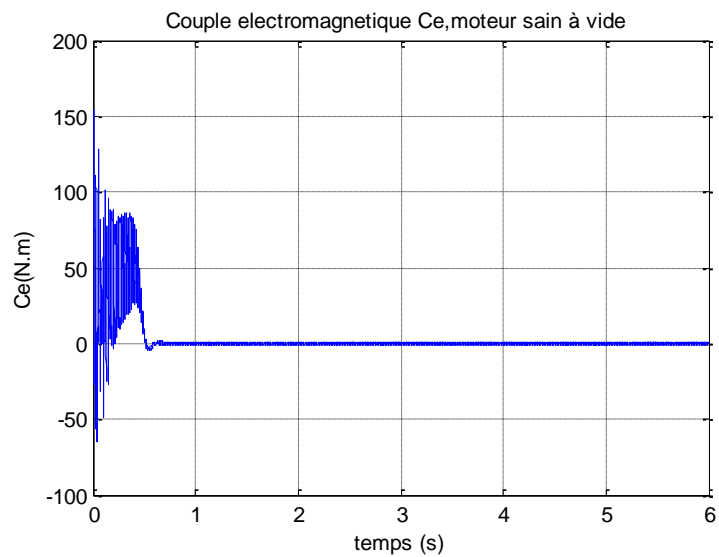


fig. III .4 Couple électromagnétique C_e , moteur sain à vide

III.2.1.2. Pleine charge

Avec la pleine charge, les résultats obtenus par la simulation sont présentés aux figures suivantes. La figure III.5 visualise le courant, son amplitude a augmenté. La deuxième figure soit III.6 montre la vitesse de rotation, elle évolue normalement pour atteindre sa valeur permanente qui a diminuée à cause de la charge. La figure III.7 illustre le couple électromagnétique pour le moteur à l'état sain et à pleine charge. Toutes les grandeurs évoluent de manière naturelle et la durée du régime transitoire a augmenté du à la pleine charge.

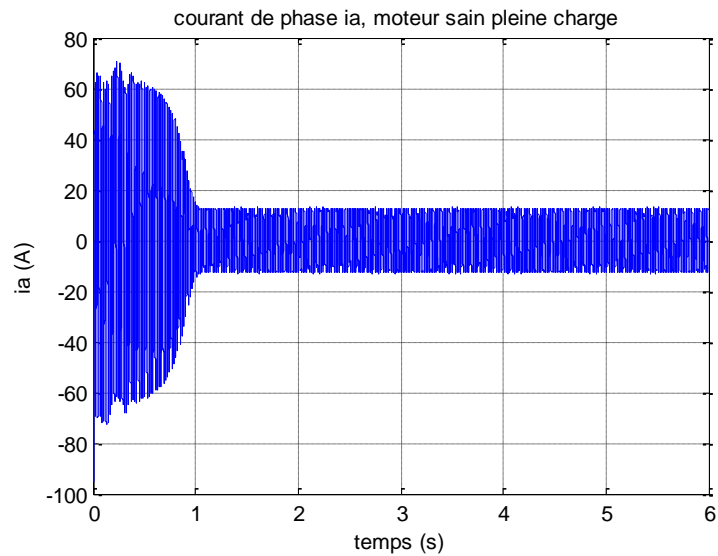


fig. III .5 Courant i_a ,moteur sain à pleine charge

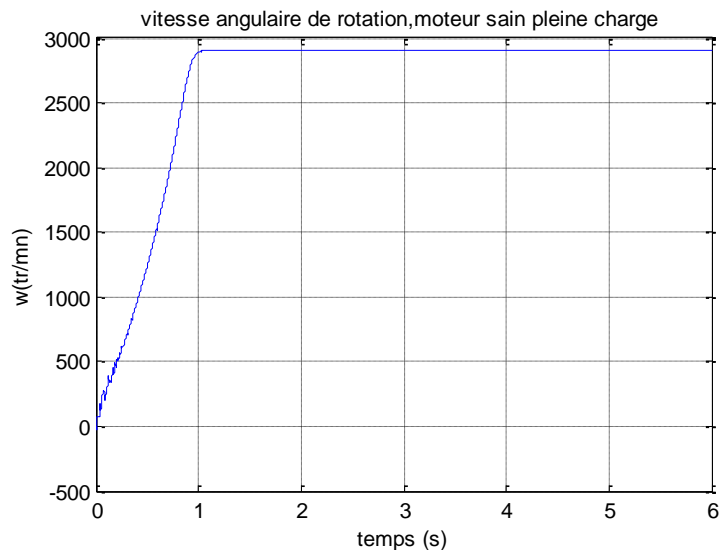


fig. III .6 Vitesse de rotation angulaire w ,moteur sain à pleine charge

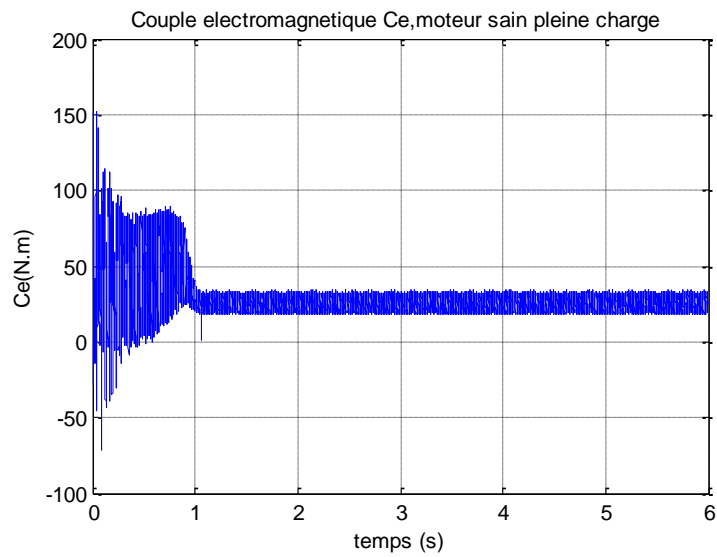


fig. III.7 Couple électromagnétique C_e , moteur sain à pleine charge

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

III.2.2.1. Moteur à vide

La simulation du moteur à vide et avec défaut a été réalisée pour un degré d'excentricité de 10%. Les résultats obtenus courant, vitesse et couple sont présentés aux figures III.8 à III.10. Ces figures après observation ressemblent à celles de l'état sain pour la même charge, c'est-à-dire que rien de nouveau n'est apparu.

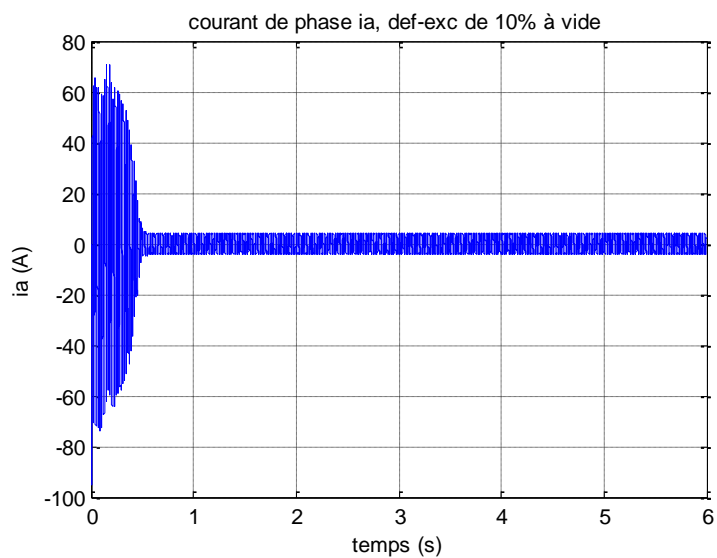


fig. III.8 Courant i_a , moteur à vide en défaut d'excentricité de 10%

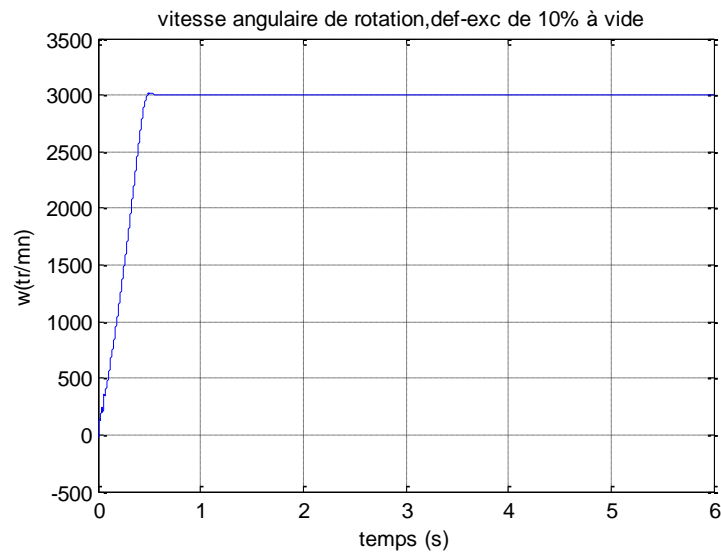


fig.III.9 Vitesse de rotation angulaire w , moteur à vide en défaut d'excentricité de 10%

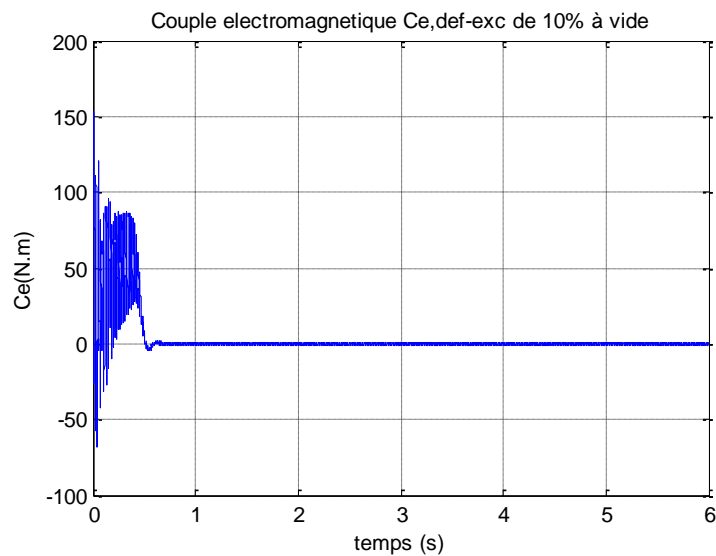


fig.III.10 Couple électromagnétique C_e , moteur à vide en défaut d'excentricité de 10%

III.2.2.2. Pleine charge

Nous passons à la simulation de la machine à pleine charge avec un défaut d'excentricité de 10%. Les résultats illustrant la simulation sont présentés aux figures III.11 à III.13. Comme précédemment elles représentent le courant, la vitesse et le couple électromagnétique. On observe que l'amplitude du courant a augmenté, celle de la vitesse a diminuée alors que celle du couple varie autour de la valeur imposée. La comparaison de ces résultats avec ceux de l'état sain n'a montré aucun changement perceptible.

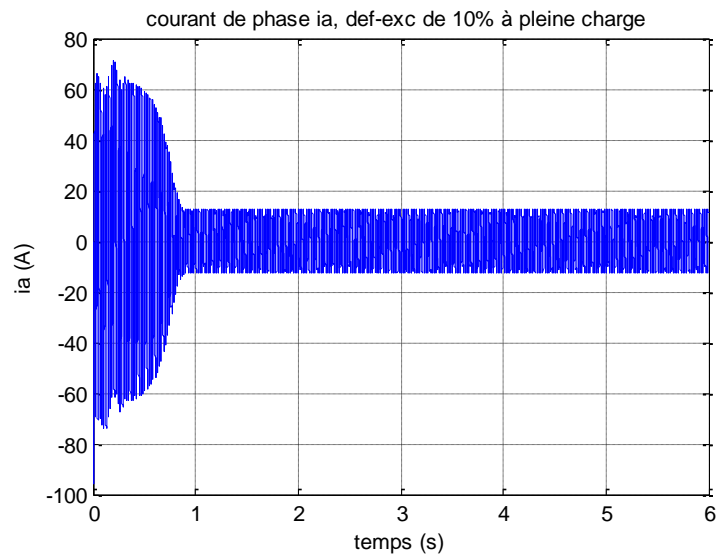


fig.III .11 Courant i_a ,moteur à pleine charge en défaut d'excentricité de 10%

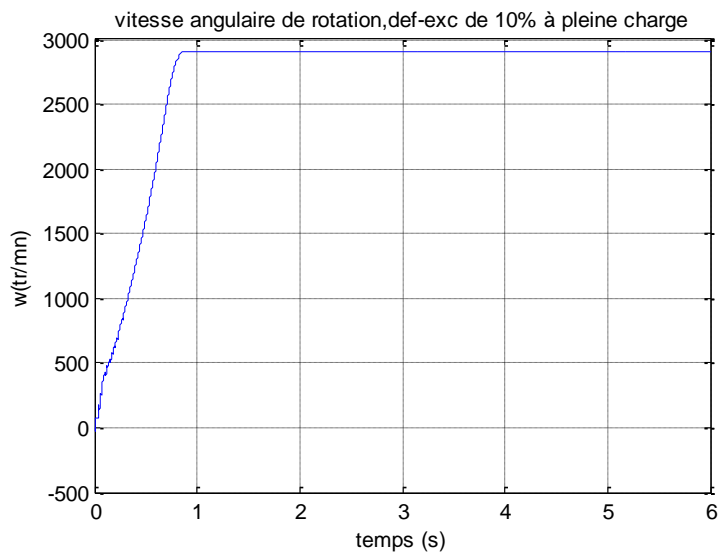


fig.III .12 Vitesse de rotation angulaire w ,moteur à pleine charge en défaut d'excentricité de 10%

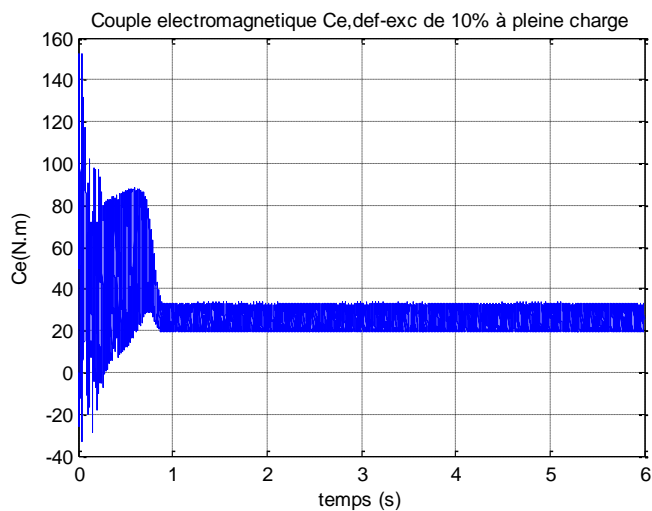


fig.III .13 Couple électromagnétique C_e ,moteur à pleine charge en défaut d'excentricité de 10%

III.2.3. Interprétations

En comparant les grandeurs de même nature, c'est-à-dire le courant avec le courant la vitesse avec la vitesse etc. ceci pour les résultats issus de la machine saine avec ceux de la machine en défaut, nous avons constaté que cette comparaison primaire n'a apportée aucune indication nouvelle. D'autre part en se basant sur le principe cause et effet nous sommes sûrs que le défaut ayant été effectué doit se révéler sur les signaux mais à nous de le découvrir. L'observation sur les signaux temporels n'a en premier lieu, rien donné, nous allons orienter notre recherche vers l'analyse spectrale.

L'analyse spectrale se fait grâce à la transformée de Fourier rapide TFR, elle se fait en régime stationnaire, donc il faut enlever la partie transitoire pour ne pas être induit en erreur.

III.2.4. Analyse spectrale

On applique la TFR aux signaux obtenus de la simulation des deux modèles, sain et en défaut. Les spectres sont comparés entre signaux de même nature. Cette comparaison peut éventuellement nous fournir des harmoniques qui sont liés aux défauts d'excentricité. Nous collectons les spectres pour le moteur sain à vide puis en charge ensuite nous collectons les spectres pour le moteur en défaut à vide et en charge.

III.2.4.1. Etat sain

a. Moteur non chargé

Les spectres sont présentés aux figures suivantes. Les figures III.14 et III.15 montrent les spectres du courant, la première en l'échelle linéaire et la seconde à l'échelle en décibels. Les spectres sont représentés sur un étalement de 1000 Hz. Car les harmoniques significatifs sur toute la plage sont seulement les harmoniques de temps et leurs multiples. Aussi les spectres qui viennent après sont montrés sur un intervalle plus faible.

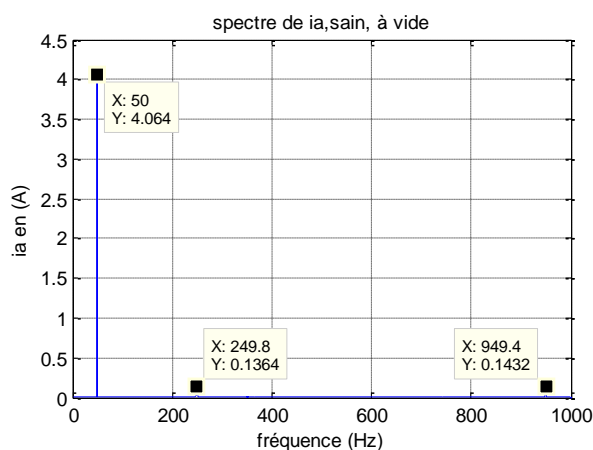


fig. III.14 spectre de ia en linéaire, moteur sain, à vide

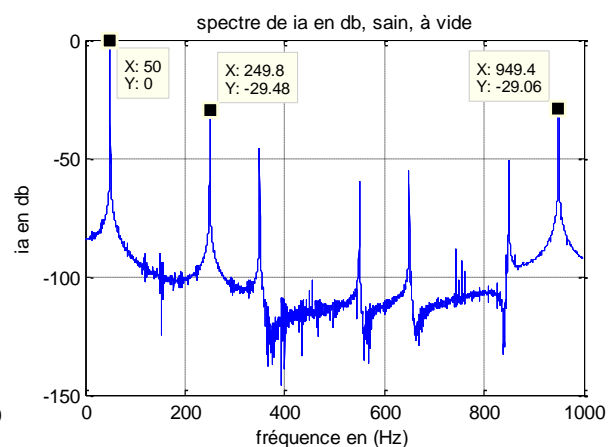


fig. III.15 spectre de ia en db, moteur sain, à vide

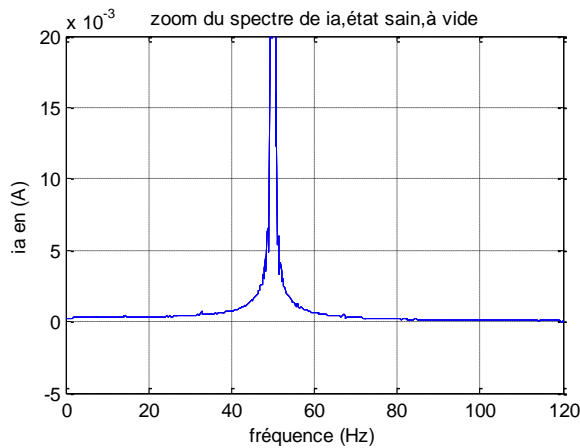


fig. III .16 spectre de ia en linéaire, moteur sain, à vide

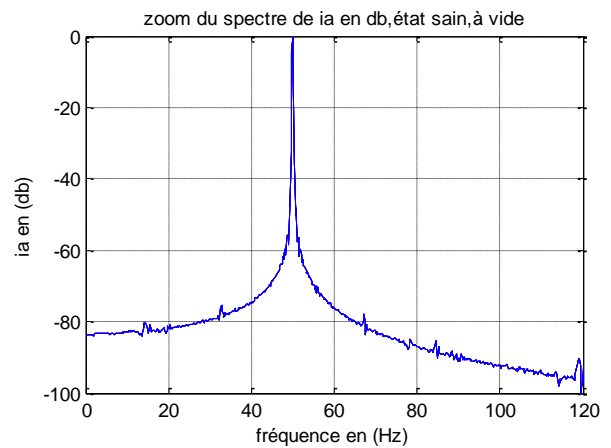


fig. III .17 spectre de ia en db, moteur sain, à vide

b. Moteur à pleine charge

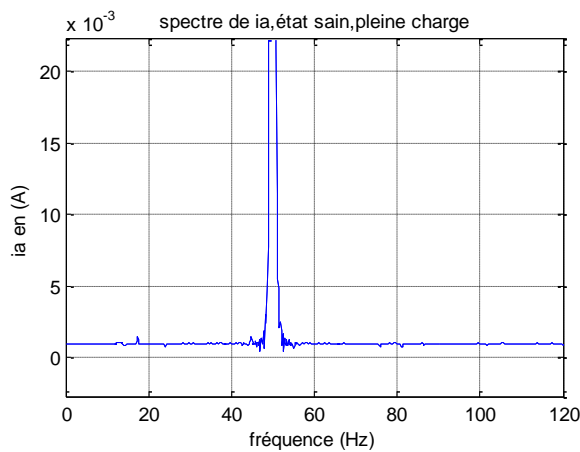


fig. III .18 spectre de ia en linéaire, moteur sain, pleine charge

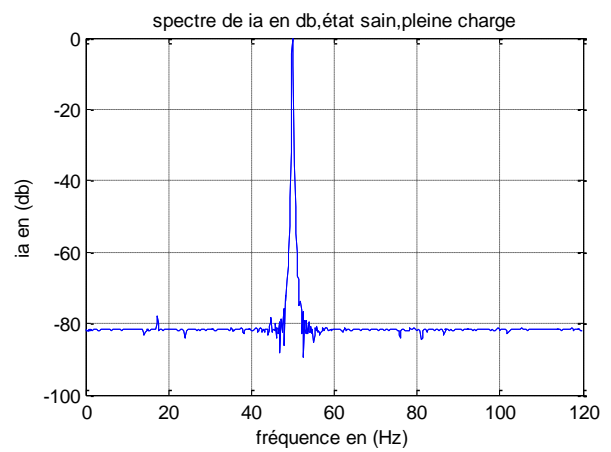


fig. III .19 spectre de ia en db, moteur sain, pleine charge

III.2.4.2. Etat de défaut

a. Moteur non chargé

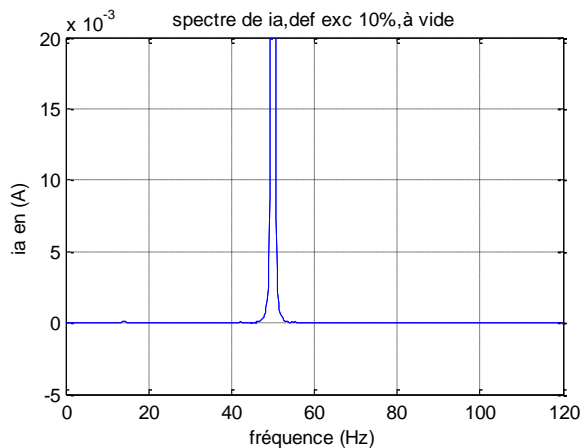


fig. III .20 spectre de ia en linéaire, défaut de 10% d'excentricité, à vide

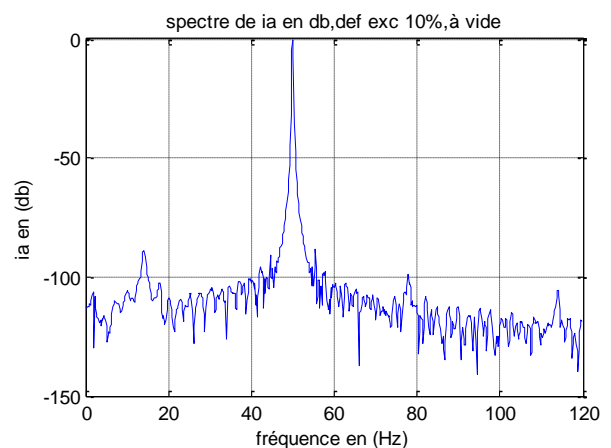


fig. III .21 spectre de ia en db, défaut de 10% d'excentricité, à vide

b. Moteur à pleine charge

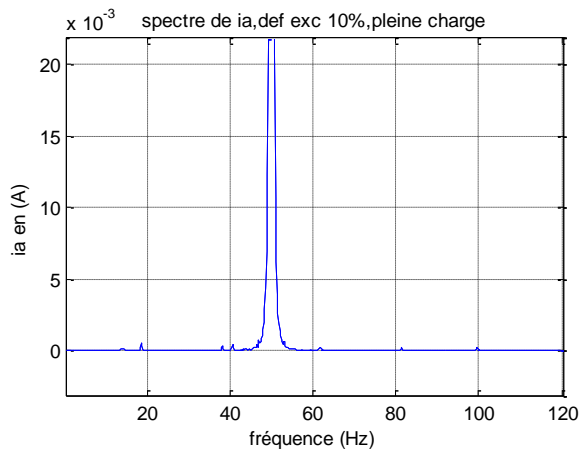


fig. III .22 spectre de ia en linéaire, défaut de 10% d'excentricité, pleine charge

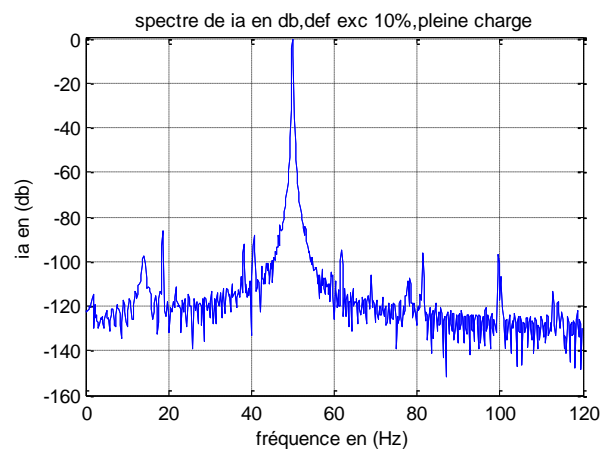


fig. III .23 spectre de ia en db, défaut de 10% d'excentricité, pleine charge

III.2.4.3. Interprétations

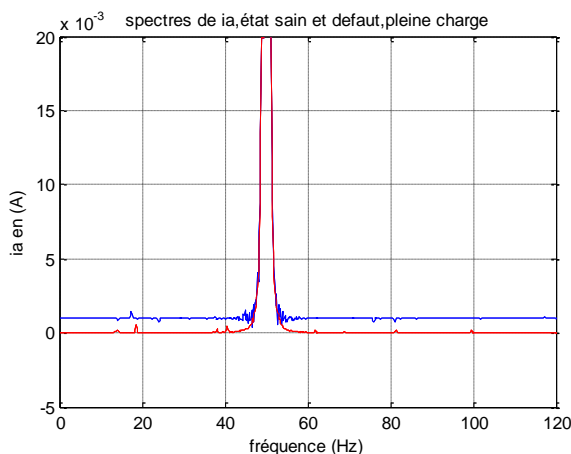


fig. III .24 spectres de ia en linéaire, sain et défaut de 10% d'excentricité, pleine charge

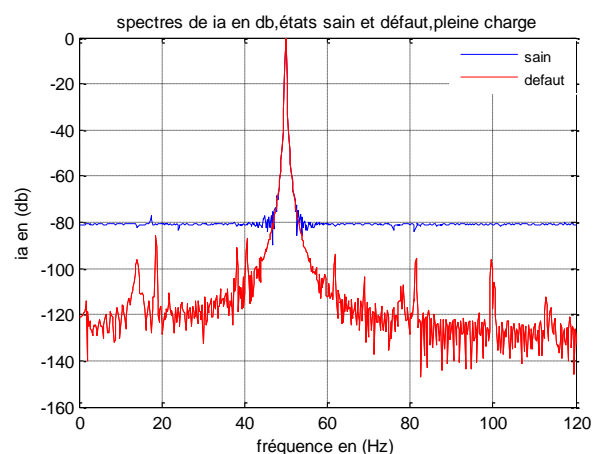


fig. III .25 spectres de ia en db, sain et défaut de 10% d'excentricité, pleine charge

L'observation des spectres des courants sain et en défaut d'excentricité pour plusieurs charges ne nous a pas permis de trouver des harmoniques spécifiques au défaut d'excentricité sur toute la plage de fréquences si ce n'est les harmoniques de temps, tous les autres ont des amplitudes insignifiantes (inférieurs à -60db). Cependant il y a eu défaut donc obligatoirement il doit y avoir changement. Après plusieurs observations sur les spectres, nous avons vu qu'en mettant ensemble les spectres du courant sain et celui en défaut, ces spectres ne se superposent pas, donc il y a une différence même si elle est minime. Cet écart est montré aux figures III.24 et III.25 et il est évident. On nous a orienté de chercher du côté des valeurs moyennes. Nous avons pris les valeurs moyennes des courants de l'état sain et en défaut (moyenne de la valeur positive seulement), elles sont résumées sur le tableau III.1.

Tab.III.1 : valeurs moyennes des parties positives du courant

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

Les valeurs trouvées montrent de toute évidence leur différence ce qui justifie le défaut, donc il apparait dans les amplitudes. Il reste alors à vérifier la vitesse et le couple. En suivant le même procédé, c'est-à-dire nous éliminons les parties transitoires et nous reportons ensemble les grandeurs de l'état sain avec celui en défaut sur une même figure. La figure III.26 présente la superposition des courants pour la pleine charge de l'état sain avec celui en défaut. Tandis que la figure III.27 expose celle des couples des états sain et défectueux.

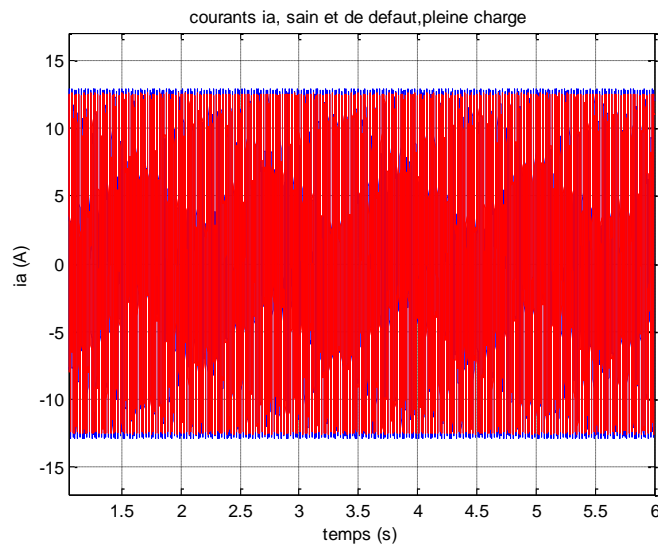


fig.III.26 superposition des courants ,état sain et état de défaut

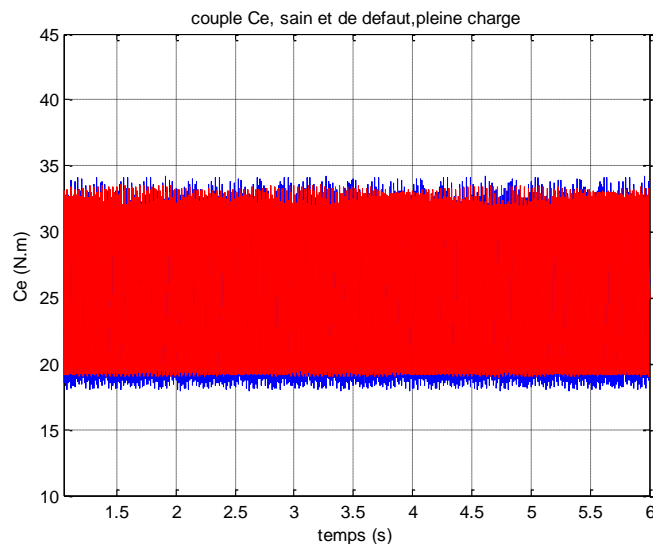


fig.III.27 superposition des couples ,état sain et état de défaut

Les vitesses des états sain et défectueux sont exposées à la figure III.28.

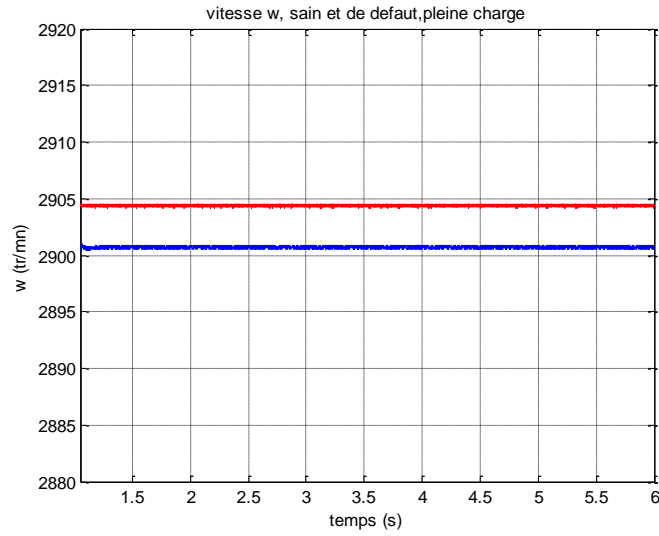


fig. III .28 superposition des vitesses ,état sain et état de défaut

Les figures III.29 à III.34 exposent la superposition des courants, des couples et des vitesses pour les états sains et en défaut.

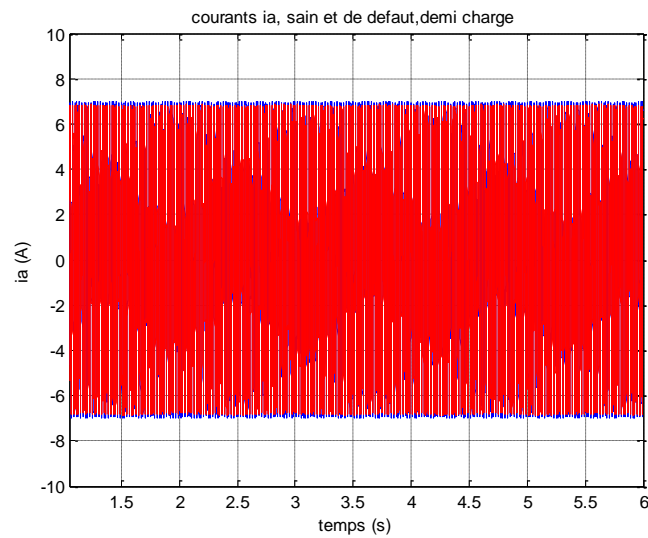


fig. III .29 superposition des courants ,état sain et état de défaut

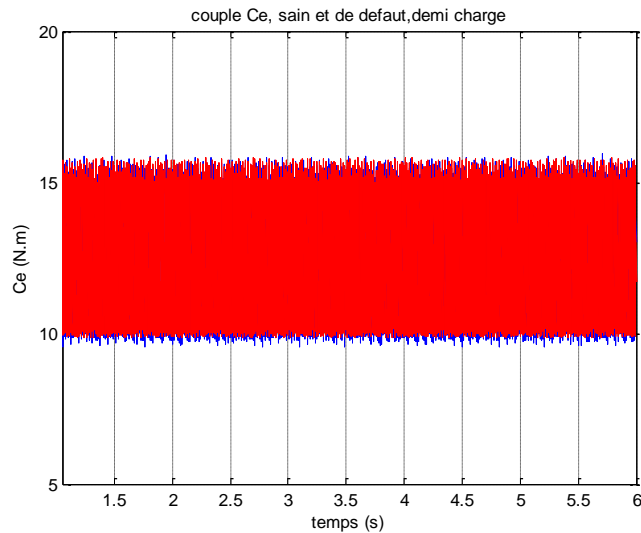


fig. III .30 superposition des couples ,état sain et état de défaut

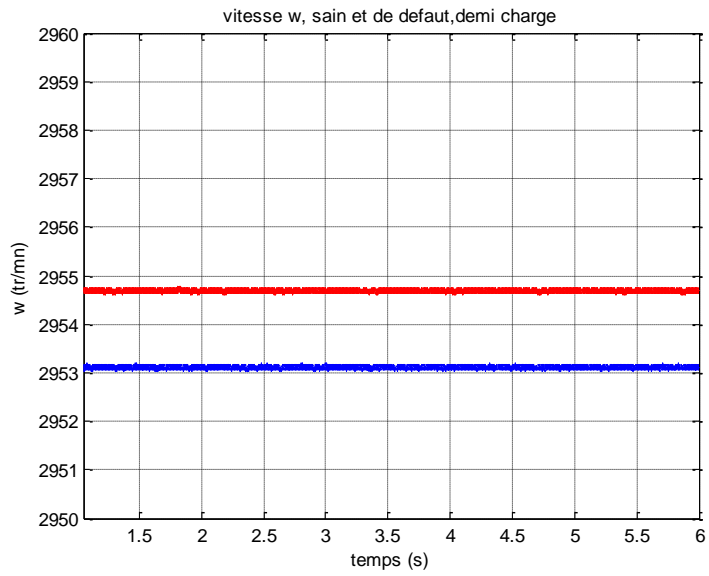


fig. III .31 superposition des vitesses ,état sain et état de défaut

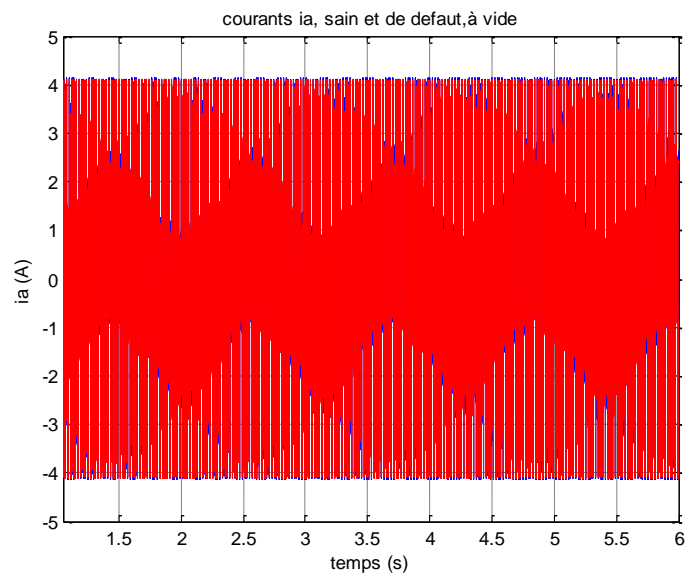


fig. III .32 superposition des courants ,état sain et état de défaut

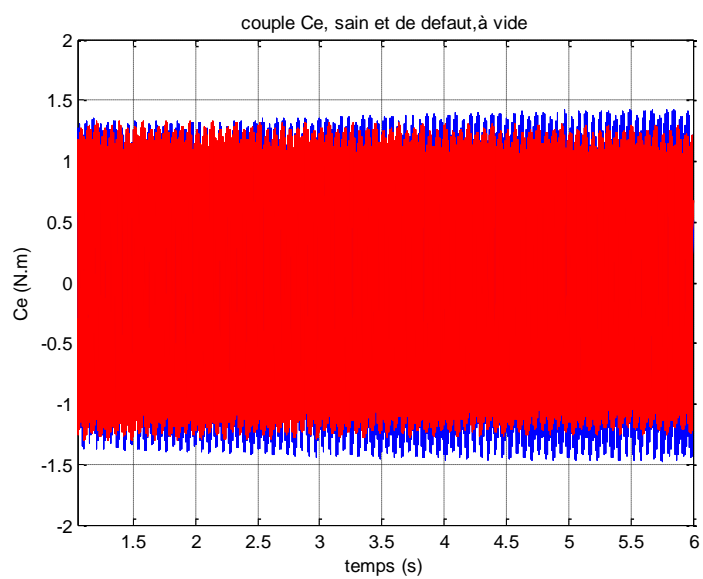


fig. III .33 superposition des couples ,état sain et état de défaut

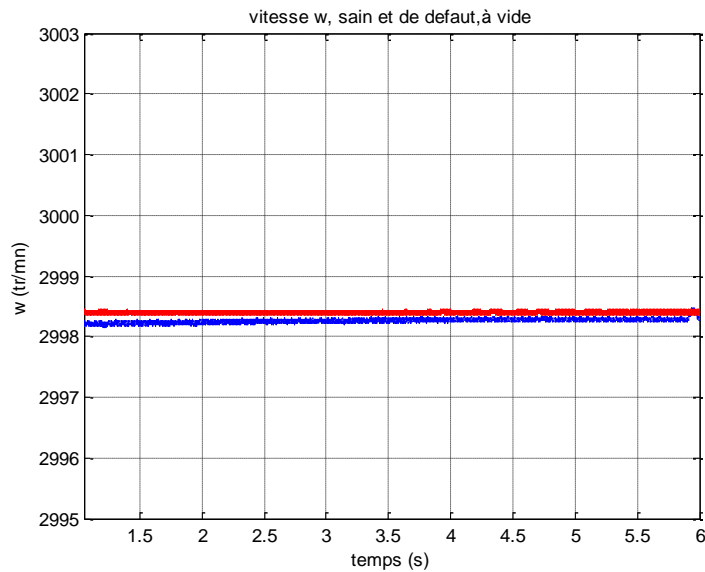


fig.III .34 superposition des vitesses ,état sain et état de défaut

Dans tous les cas des figures précédentes la différence entre les signaux est évidente même si elle est minime pour les faibles charges, ce qui justifie le principe cause et effet. Il y a eu défaut il doit apparaitre quelque part. Pour le courant l'étalement crête à crête de l'état sain est supérieur à celui de l'état de défaut d'excentricité. Pour la vitesse, la valeur moyenne de l'état en défaut est supérieure à celle de l'état sain tandis que pour le couple les valeurs moyennes sont semblables mais l'étalement crête à crête de la variation du couple de l'état sain est supérieur à celui de l'état de défaut tout comme pour le courant.

Comme pour le tableau III.1 le tableau III.2 réunit les valeurs moyennes des vitesses des cas sains et défailants pour différentes charges ainsi que l'étalement crête à crête du couple ΔC_e dans le tableau III.3.

Tab.III .2 : 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

Pour une même charge, la vitesse moyenne lorsqu'il y a eu défaut, a légèrement augmentée à l'inverse du courant. 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 ya eu diminution de charge.

Le tableau III.3 dévoile l'effet du défaut d'excentricité sur le couple. Celui-ci, en se basant sur le tableau, se manifeste par la diminution de l'écart des ondulations ΔC_e du couple comme c'est exposé dans ce qui suit :

Tab.III .3 : valeurs de l'écart de la plage des couples

Comparaison entre les couples	A vide	mi-charge	Pleine charge
Ondulations de couple ΔC_e sain	2.9007	6.4063	16.2632
Ondulations de couple ΔC_e def	2.6364	5.9797	14.5452

III.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé à la simulation des modèles par les éléments finis de la machine asynchrone à l'état sain et celui de l'état de défaut d'excentricité. Ce travail a exigé beaucoup de sacrifices que ce soit temps de travail ou temps de simulation. Chaque cas de simulation exige au moins trois jours de temps de calcul et s'il a erreur il faut reprendre de nouveau c'est-à-dire trois autres jours pour le même cas. Les résultats ont été collectés et analysés en temporel. En premier lieu nous n'avons remarqué aucun indice pouvant nous orienter vers le défaut. Cependant après avoir effectué l'analyse spectrale sur le courant pour différentes charges pour les états sain et défectueux nous n'avons rien remarqué d'intéressant au début si ce n'est à la fin lorsque nous avons superposé ensemble les courants des états sains et en défaut, là nous avons observé le haussement entre les deux signaux pour toutes les charges et après plusieurs recherches nous avons constatés les étalements des courants où celui de l'état sain est plus grand, l'augmentation de la vitesse moyenne de l'état de défaut et la diminution de l'écart des ondulations du couple pour l'état de défaut vis-à-vis de celui du sain.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Le but de ce travail était de détecter le défaut d'excentricité statique dans la machine asynchrone triphasée par utilisation du signal courant et couple comme source d'information, puis de procéder à son analyse en lui appliquant la transformée de Fourier rapide. Celle-ci nous fournit son contenu spectral et de là, en détecter, s'ils existent, les harmoniques caractéristiques de défaut. Pour ce faire, nous avons étudié la méthode des éléments finis. Car d'après la littérature, c'est la méthode la plus fidèle possible, elle permet de rendre compte du comportement et du fonctionnement de la machine dans les moindres détails. Et grâce au logiciel Flux 2D, le modèle magnétodynamique qui en découle tient compte du fonctionnement de la machine que ce soit dans l'état sain ou dans l'état de défaut. Il tient compte de la géométrie de la machine. De plus il a la possibilité de manipuler le circuit magnétique de fer, ce qui permet d'introduire la courbe $B(H)$ avec saturation dans les calculs. En d'autres termes, cette méthode et le logiciel utilisé permettent de modéliser la machine de la manière la plus fine possible.

Donc nous avons procédé à la simulation des modèles par les éléments finis de la machine asynchrone à l'état sain et celui de l'état de défaut d'excentricité. Ce travail a exigé beaucoup de sacrifices que ce soit en temps de travail ou en temps de simulation. Chaque cas de simulation exige au moins trois jours de temps de calcul (avec l'outil d'informatique en notre possession) et s'il y a eu erreur il faut reprendre de nouveau c'est-à-dire trois autres jours pour le même cas. Les résultats ont été collectés et analysés en temporel. En premier lieu nous n'avons remarqué aucun indice pouvant nous orienter vers le défaut. Cependant après avoir effectué l'analyse spectrale sur le courant pour différentes charges pour les états sain et défectueux nous n'avons rien remarqué d'intéressant au début si ce n'est à la fin lorsque nous avons superposé ensemble les courants des états sains et en défaut, là nous avons observé le haussement entre les deux signaux pour toutes les charges et après plusieurs recherches nous avons constatés les étalements des courants où celui de l'état sain est plus grand, l'augmentation de la vitesse moyenne de l'état de défaut et la diminution de l'écart des ondulations du couple pour l'état de défaut vis-à-vis de celui du sain.

Enfin comme perspectives, nous proposons l'étude du court-circuit et surtout de se munir de puissant calculateur pour pouvoir aboutir à des résultats très significatifs et plus précis afin de pouvoir exploiter et explorer la puissante méthode des éléments finis.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Energieplus. 19:07.16/02/2020. (<https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-asynchrone/>).
- [2] A. Abed, "*Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone*", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002.
- [3] S. Bachir, "*Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique*", Thèse de Doctorat, Université de Poitier, France, 2003.
- [4] M. Khov, "*Surveillance et Diagnostic des Machines Synchrones à Aimants Permanents: Détection des Courts-Circuits par Suivi Paramétrique*", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2009.
- [5] A. Ibrahim, "*Contribution au Diagnostic de Machines Electromécaniques: Exploitation des Signaux Electriques et de la Vitesse Instantanée*", Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, France, 2009.
- [6] N. Halem. "*Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis*" . Doctorat en Sciences Université Mohamed Kheider -Biskra . 2015.
- [7] B. Vaseghi, "*Contribution à l'Etude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut*", Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009.
- [8] A. Ceban, "*Méthode Globale de Diagnostic des Machines Electriques*". Docteur de l'Université Discipline. Université Lille de Nord de France – École doctorale SPI Université d'Artois – Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement .2012 .
- [9] A. Ghoggal. "*Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée : Modèle Dédié à la Détection des Défauts*". Mémoire en Vue de l'Obtention du Diplôme de Magistère. Université de Batna .Année Universitaire 2004/2005.

BIBLIOGRAPHIE

- [10] LAKHDARI MEFTAH, " Simulation et commande de la machine asynchrone double étoile pour Aero génération", Thèse de magister, Electrotechnique, UNIVERSITE Ferhat Abbas-Setif-1, 2014.
- [11] S. Khelif, "*Modélisation de la Machine Asynchrone en vue Diagnostic Prise En Compte Adéquate Du Circuit Magnétique*", mémoire de magister, Electrotechnique Université de Mohammed Khider Biskra, 2012.
- [12] I. ZORIG I, "Identification des Machines Asynchrones en Vue de leur Diagnostic", mémoire de magister, Université de Sétif ,2010.

Annexe

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	1.54Ω
ROTOR	Nombre d'encoches	20
	Diamètre extérieur	119mm
	Diamètre intérieur	40mm
ENTREFER	Epaisseur	0.5mm

Géométrie de la machine

