

**République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique**



**Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie**

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

LICENCE ACADEMIQUE

**Domaine : Sciences et de la Technologie
Filière : Génie Électrique
Spécialité: Contrôle Et Diagnostic Des Systèmes Electriques**

Thème

**Etude et Simulation d'un Défaut
dans un Moteur Asynchrone à Cage**

Dirigé par:
Halem Noura

Réalisé par:
Obeidi Nabil
Chadou Mohammed
Mesai Aoun Hocine

Soutenu 03-04 Juin 2014

Remerciements

*Nous rendons nos profondes gratitude à dieu qui nous a aidé
réaliser ce modeste travail.*

*Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour
leur encouragement, leur soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont
enduré.*

*Nous Remercions nos encadreur " Halem Noura " pour les
efforts qu'ils ont déployés, pour nous aider conseiller, encourager
et corriger.*

*Nous Remercions aussi tout le corps enseignant et administratif
qui ont contribué à notre formation universitaire.*

SOMMAIRE

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre 1:

Généralités sur le moteur triphasé à induction et ses défauts

1. 1. Introduction	2
1. 2. Construction du moteur asynchrone a cage	2
1. 2. 1. Stator	2
1. 2. 2. Rotor à cage	3
1. 3. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone	3
1.4. Défauts des moteurs asynchrones et leurs origins	3
1. 5. Les défauts du moteur asynchrones a cage	6
1. 5. 1. Défauts statoriques	6
1. 5. 2. Défauts rotoriques	7
1. 5. 2. 1. Défauts de roulements	7
1. 5. 2. 2. Défaut d'excentricité	7
1. 5. 2. 3. Défauts de rupture de barres et d'anneau de court circuit.....	9
1.6. Conclusion.....	10

Chapitre 2 :

Techniques de diagnostic du moteur à induction triphasé

2. 1. Introduction	11
2. 2. Techniques de diagnostic des machines asynchrones	11
2. 2.1. Diagnostic par mesure de la puissance instantanée	11
2. 2. 2. Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques	11
2. 2. 3. Diagnostic par analyse de la température.....	12
2. 2. 4. Diagnostic par les analyses chimiques	13
2. 2. 5. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite	13
2. 2. 6. Diagnostic par mesure du courant statorique	13
2. 2. 6. 1. La transformée de fourier discrète.....	14
2. 2. 6. 2. La transformée de fourier rapide.....	14

2. 3. Signatures spectrales des défauts dans le spectre du courant statorique	15
2. 3. 1. Défauts statoriques.....	15
2. 3. 2. Défauts rotoriques.....	15
2. 3. 2. 1. Cassure de barres rotoriques.....	15
2. 3. 2. 2. Excentricité d'entrefer.....	15
2. 3. 2. 3. Défauts au niveau des roulements.....	16
2. 4. L'aspect modelisation.....	18
2. 4. 1. Approche analytique.....	18
2. 4. 2. Méthode des schémas magnétiques équivalents.....	18
2. 4. 3. Méthodes des éléments finis	19
2.5. Conclusion	19

Chapitre 3 :

Diagnostic de défaut de cassure de barres rotoriques

3 . Diagnostic du défaut de cassure de barre par la méthode d'analyse spectrale du courant statorique	20
3. 1. Introduction	20
3. 2. Détection de défaut de cassure de barres rotorique par la technique MCSA	22
3. 3. Conclusion	25
Conclusion Générale.....	26

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1. 1: types d'excentricité: a- statique; b- dynamique; c- mixte.....	9
Figure 1. 2: Représentation de l'effet d'une barre cassée sur les barres adjacentes.....	10

Chapitre 2

Figure 2.1: Dimension du roulement à bille.....	17
--	----

Chapitre 3

Figure 3. 1: Circuit magnétique du moteur simulé.....	21
Figure 3. 2: Spectre du courant statorique d'un moteur sain.....	22
Figure 3. 3: Spectre du courant statorique avec une seule barre cassée.	22
Figure 3. 4: Spectre du courant statorique avec deux barres cassées adjacentes.....	23
Figure 3. 5: Spectre du courant statorique avec deux barres cassées non adjacentes.....	23
Figure 3. 6 : Répartition des lignes d'équiflux au démarrage du moteur.....	24

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1: Défaits des moteurs électriques selon leurs origines.....	6
Tableau 3. 1: Spécifications de moteur à induction simulé.....	21

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

La majorité des machines électriques des équipements industriels sont asynchrones triphasées, du fait de leur robustesse et de leur faible coût. Mais les machines subissent de plus en plus de perturbations auxquelles elles sont sensibles.

Les principaux défauts recensés sont les courts circuits entre spires des bobinages du stator (dus aux vieillissements des isolants), *les dégradations des anneaux au rotor et tous les problèmes de barres (ruptures ou imperfections)*. 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 :

- ◆ Dans le premier chapitre, nous présenterons les principaux défauts pouvant modifier le fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé et leurs origines.
- ◆ Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des signatures spectrales sur le courant statorique. Nous présenterons par la suite, les différentes techniques utilisées pour la détection des défauts, ainsi que les approches utilisées dans la modélisation de la machine asynchrone.
- ◆ Le chapitre trois contient une application de détection de défaut de cassure de barres rotoriques en utilisant la technique d'analyse spectrale du courant statorique.

Chapitre 1

1. 1. INTRODUCTION

À cause de sa robustesse, son prix relativement bas, son entretien moins fréquent, l'absence de collecteurs, sa puissance massique élevée ..., le moteur asynchrone est le 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.

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

1. 2. CONSTRUCTION DU MOTEUR ASYNCHRONE A CAGE

Le moteur asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe, on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil [BACHIR 02].

Dans ce chapitre, nous allons considérer le cas d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit.

1. 2. 1. Stator

Le circuit magnétique est un empilement de tôles fines d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. On utilise des tôles minces dont l'épaisseur varie entre 0,35 et 0,50 mm pour 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 est constituée de 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

1. 2. 2. Rotor à cage

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 de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu.

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, 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. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques. Leur résistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [BACHIR 02].

1. 3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR ASYNCHRONE

Le branchement est très simple, trois fils amènent le courant de la ligne à l'enroulement du stator. Le rotor est en court-circuit, dès que le stator est alimenté par des courants triphasés de pulsation ω_s il se produit un champ tournant, si le bobinage statorique comprend $(2p)$ pôles, ce champ tourne à la vitesse angulaire $(\Omega_s = \omega_s / p)$, dite vitesse de synchronisme.

Ce champ balaie les conducteurs du rotor et y induit des forces électromotrices, le rotor étant en court-circuit, ces forces électromotrices y produisent des courants induits. Ces courants, placés dans le champ tournant forment un couple, le rotor étant libre, ce couple le fait tourner. Le sens de rotation est tel que, d'après la loi de Lenz, la rotation s'oppose à la cause qui lui donne naissance, cette cause est le déplacement du champ par rapport aux conducteurs du rotor. Le rotor tourne donc pour rattraper le champ, mais il ne peut tourner aussi vite, car il n'y aurait plus déplacement du champ par rapport au rotor, donc plus de courants induits et plus de couple.

C'est parce que le mouvement du rotor n'est pas synchrone de celui du champ que ce moteur dit asynchrone.

1.4. DÉFAUTS DES MOTEURS ASYNCHRONES ET LEURS ORIGINES

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

Une défaillance de machine électrique représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement. Les raisons de défaillances dans les machines tournantes électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, l'environnement de travail, nature de la charge et le calendrier de maintenance.

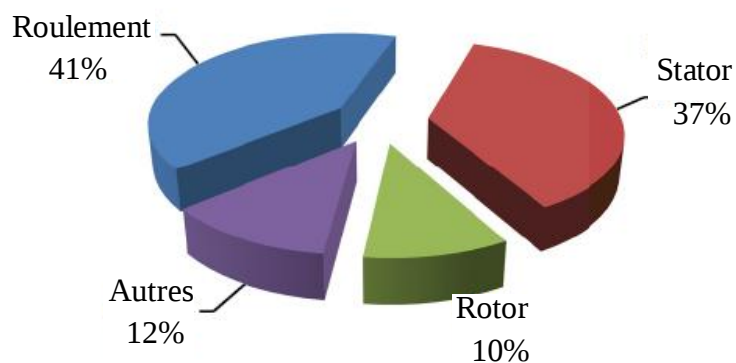
D'après, les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine.

Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le Tableau 1.1 [Ceban 12].

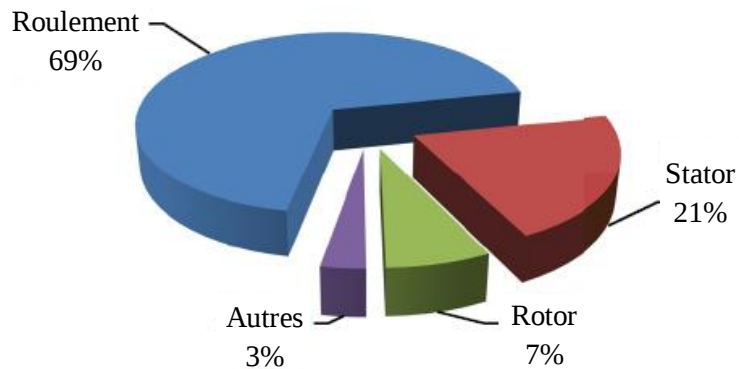
Statistiquement, il est difficile de donner une répartition exacte des défaillances de machines électriques puisque le recensement des pannes et défauts n'est pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance.

Des multiples études statistiques sur des machines ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'à présent. Toutes ces statistiques mentionnées dans concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie.

Les études effectuées sur des machines asynchrones de grade puissance (de 100 KW à 1 MW) dans les années 90 par Thorsen mentionnées après par Thomson ont montré que sur cette gamme de puissance certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres et les pannes le plus fréquentes sont du type mécanique (figure 1. 1 .a), la majorité d'entre elles se situent sur les roulements (41%) et le stator (37%). Les moins fréquentes sont les pannes au rotor (10%) et les autres types constituent 12 %.



(a)Thomson 1999 [Thomson99]



(b) Bonnet 2008 [Bonnett08]

Les origines des défauts sont souvent de natures différentes, mais sont généralement fortement liées les uns aux autres. On cite comme causes majeurs :

- a. Cause thermiques : balourds thermiques, points chauds, températures ambiantes élevées ...
- b. Entourage du moteur (tensions et transitoires d'alimentation, inverseurs, air de refroidissement, mauvais courant de charge, surcharges, corrosion, humidité.....).
- c. Causes mécaniques et mauvais emploi du moteur (Abus) (résonance avec la commande de vitesse, chocs en service, vibrations, jeux excessifs, balourds mécaniques...).
- d. Fabrication imparfaite.
- e. Erreurs pendant la réparation (taille et type inapproprié d'enroulement, roulements inadéquats...).
- f. Epuisement de la durée de vie du moteur [Ghoggal 05].

Une classification des défauts qui existent dans les moteurs électriques selon leurs origines est présentée dans le Tableau [Ceban 12] :

Tableau 1. 1: Défauts des moteurs électriques selon leurs origines.

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

1. 5. LES DEFAUTS DU MOTEUR ASYNCHRONES A CAGE

1. 5. 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.

- ❖ 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. La contrainte thermique amenée par le courant de court-circuit risque d'entraîner la propagation du défaut à

d'autres spires, ce qui peut conduire du déclenchement des protections électriques dans l'alimentation.

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

L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage[Ceban 12].

1. 5. 2. Défauts rotoriques

1. 5. 2. 1. Défauts de roulements

Comme il est indiqué sur la Figure 1.1, la majorité des défauts dans les machines électriques concernent les défauts de roulements qui ont de nombreuses causes telles que l'écaillage de fatigue, la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou des causes électriques comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs.

Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Ce type de défaut induit également des variations (oscillations) dans le couple de charge de la machine asynchrone. Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor.

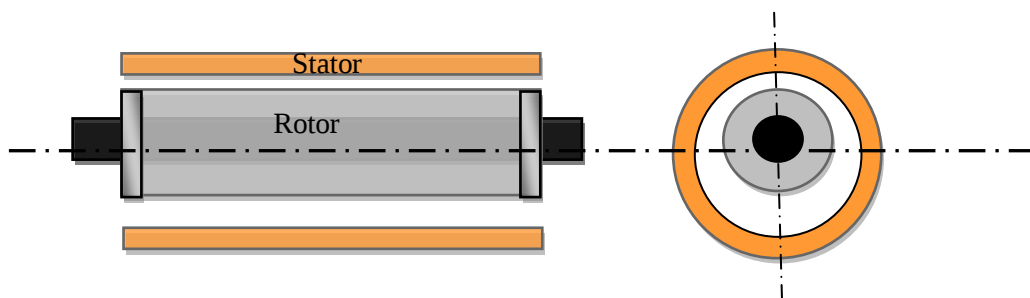
1. 5. 2. 2. Défaut d'excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator. Lors du fonctionnement du moteur, deux causes principales aggraveront l'excentricité. La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine

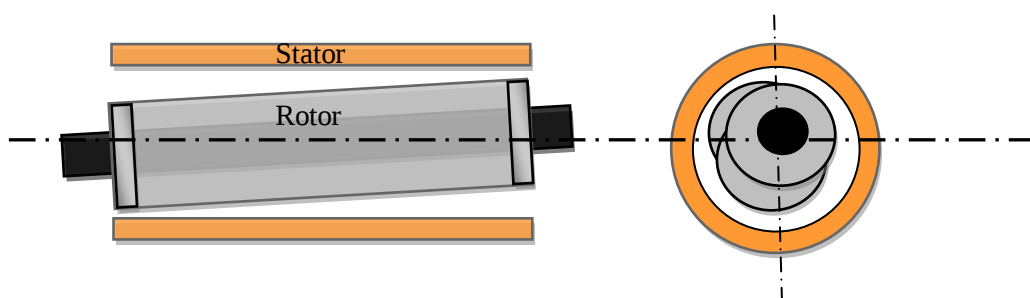
intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement. Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine [Halem 10] :

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées:

- ◆ **L'excentricité statique:** 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:** elle a 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:** la somme des deux cas présentés ci-avant.



(a)



(b)

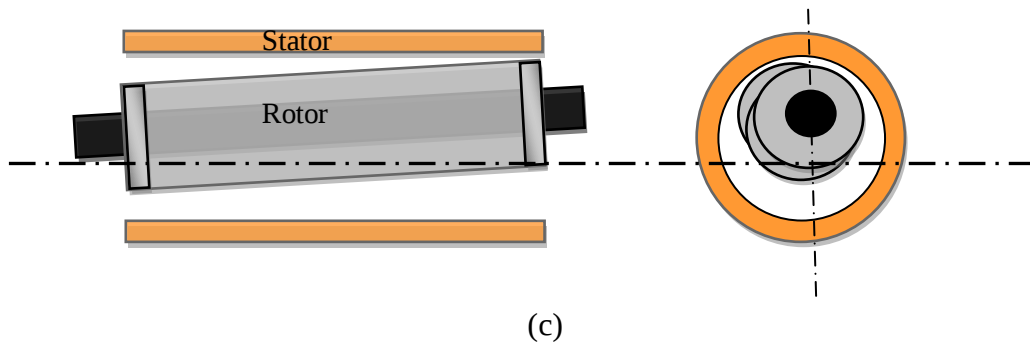


Figure 1. 1: types d'excentricité: a- statique; b- dynamique; c- mixte.

1. 5. 2. 3. Défauts de 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.

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

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

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

Devant la multitude des défauts envisageables et les conséquences de leurs apparitions, les techniques de surveillance se sont rapidement imposées auprès des utilisateurs des machines électriques. Elles commencent également à intéresser les concepteurs[Ceban 12].

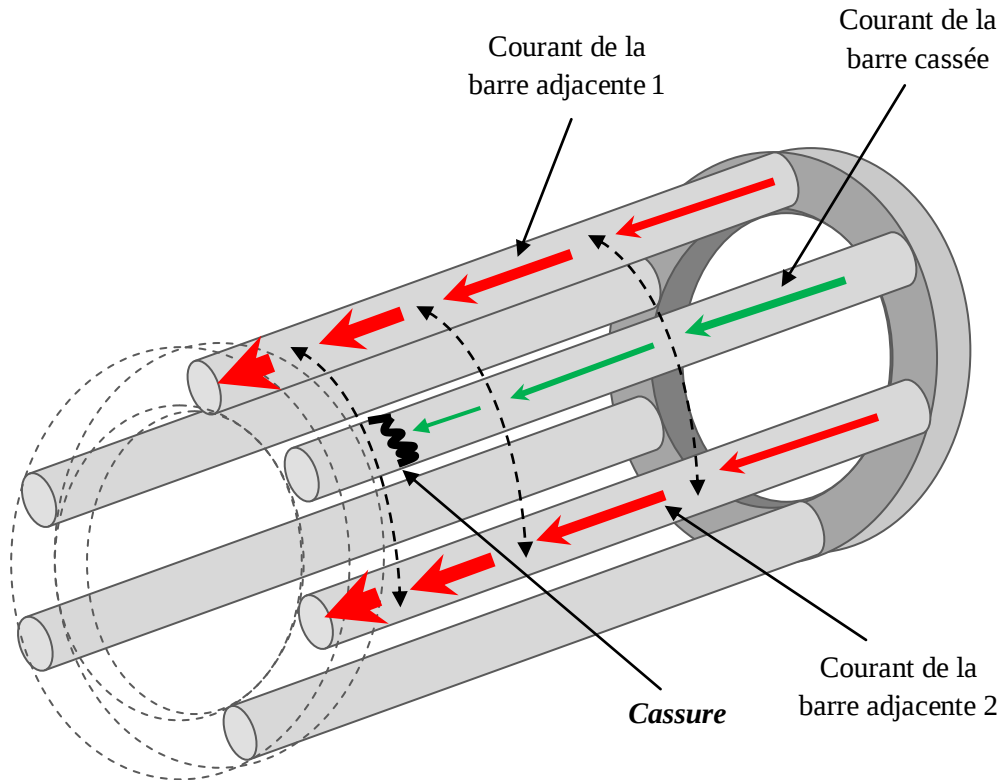


Figure 1. 2: Représentation de l'effet d'une barre cassée sur les barres adjacentes.

1.6. CONCLUSION

Les différents types de défauts qui peuvent être apparaitre dans les moteurs asynchrones sont bien cités dans ce chapitre, ainsi que leur origine .

Les technique utilisé pour détecter ces défauts seront bien discuter dans le deuxième chapitre .

Chapitre 2

2. 1. INTRODUCTION

Dans le domaine de diagnostic des machines asynchrone triphasée existent plusieurs techniques de détection des différents défauts, dans ce chapitre ces méthodes seront citées. Ces méthodes dépendent du modèle utilisé pour modéliser le moteur à induction, dans ce but on a présenté les différents aspects de modélisation et leur efficacité dans ce domaine.

2. 2. TECHNIQUES DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES

Il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure, tel que la mesure du champ magnétique, de bruit, de vibration, du courant...etc. d'autres sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques avec celles du moteur sain (courant statorique, couple électromagnétique, et vitesse mécanique).

2. 2.1. Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet de nombreux travaux [Halem 10]. La puissance instantanée est la somme des produit des courants est des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau des informations, apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres.

2. 2. 2. Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques

D'après le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer, est le produit de la F.m.m

$$\delta(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (2.1)$$

(Fm) et de la perméance (P).

$$B_s = Fm.P \quad (2.2)$$

La force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor, en plus la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches

statoriques et rotoriques, l'excentricité). De ce fait, l'analyse spectrale des signaux de vibrations mécaniques, permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques.

Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres [Ghoggal 05].

2. 2. 3. Diagnostic par analyse de la température : La Thermographie

Grâce à des dispositifs à infrarouge, on perçoit les zones chaudes dont les températures dépassent les températures limites prédéterminées. Pour ce faire, un balayage systématique de l'ensemble de l'installation électrique, et notamment du moteur asynchrone, est effectué.

Les systèmes examinés étant en fonctionnement, les éléments qui composent l'installation électrique sont en charge normale. En fait, ils vont nous apparaître, sur l'image infrarouge plus ou moins rayonnant suivant leur rôle, leur conception, leur charge et leur matériau.

L'opérateur fait la part de choses entre les températures normales de fonctionnement et les anomalies. Les anomalies sont localisées spatialement, un réglage des paramètres de l'objet (émissivité, ambiance...) permet le calcul direct de la température maximale observée et éventuellement la surchauffe. Un calcul complémentaire peut, dans le cas où le système n'est pas à sa charge normale, permettre d'estimer la surchauffe ramenée à son fonctionnement normal.

La surchauffe étant calculée, nous rapprochons celle-ci de la cinétique de dégradation et donc des degrés d'urgence. Cette détermination est très importante car elle permet une véritable localisation dans le temps, d'où une gestion aisée du traitement des anomalies. Un cliché dans l'infrarouge et une photo dans le visible mémorisent le défaut. La détection serait possible suite à l'analyse du spectrogramme obtenu, au billet duquel les zones en dégradation seraient délimitées.

Un frottement excessif au niveau des paliers ou bien des billes de roulements se traduira par un échauffement graduel qui risque de devenir important. Un mauvais contact est susceptible de générer des décharges électriques traduisant l'augmentation locale de la température, une corrosion, une oxydation, une tresse défectueuse, et beaucoup d'autres exemples de cas pratiques pouvant être l'objet d'une inspection thermographique[Ghoggal05].

2. 2. 4. Diagnostic par les analyses chimiques

La plupart des moteurs sont refroidis par l'air, ou le plus souvent à l'aide d'un circuit fermé avec un échangeur de chaleur refroidi à l'eau. La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air de refroidissement et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge.

Dans certains cas, l'huile de roulement est analysé régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents [Halem 10].

2. 2. 5. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Pratiquement, de multiples solutions permettent de capter le flux de fuite axial dans une machine électrique, tel que les sondes à effet Hall. Mais l'exemple de base consiste à enrouler une bobine autour de l'arbre de la machine, celle-ci sera le siège d'une FEM induite liée au flux de fuite axial.

La réalité fait que les circuits électriques et magnétiques de la machine ne sont jamais parfaits à causes des tolérances et des défauts de fabrication parmi d'autres, et présentent souvent quelques degrés d'asymétrie permettant la génération des flux de fuite dont le contenu spectral est lié directement aux harmoniques contenus dans les courants statoriques et rotoriques.

2. 2. 6. Diagnostic par mesure du courant statorique

Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car il est très facile d'accès et nous permet de détecter aussi bien les défauts électriques que les défauts purement mécaniques

Cette technique est dénommée dans littérature "Motor Current Signature Analysis" (MCSA).

❖ *Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :*

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles).
- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présents dans le spectre du courant à l'état sain.

2. 2. 6. 1. La transformée de Fourier discrète

La transformée de Fourier Discrète, généralement notée TFD, d'une suite finie se calcul grâce à la relation :

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \quad (2.3)$$

Où le terme N représente le nombre de points de calcul de la TFD.

En pratique, on essaye d'avoir un nombre de point P de la suite $p_s(n)$ supérieur ou égal au nombre de point de la FFT ($p \leq N$).

La transformée de Fourier Inverse, notée ITFD, se calcul grâce à la relation :

$$P_s(n) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{j \frac{2\pi nk}{N}} \quad (2.4)$$

En décomposant l'exponentielle de (l'équation I.1), le nombre complexe $F(k)$ peut se mettre sous la forme :

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) - j \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (2.5)$$

Cette équation nous permet ainsi de définir la transformée de Fourier en cosinus, notée TDF-COS grâce à l'équation suivante:

$$F_c(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (2.6)$$

Ainsi que la transformée de Fourier en sinus, notée TFD-SIN, calculée avec l'équation:

$$F_c(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (2.7)$$

Ces deux transformées permettent d'obtenir des temps de calcul réduits lorsqu'elles doivent être implantées dans un algorithme de calcul.

2. 2. 6. 2. La transformée de Fourier rapide

La transformée de Fourier rapide, notée TFR, est une technique de calcul rapide élaborée en 1965 par J. W. Cooley et J. W. Tuckey. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la TFD [qui est de l'ordre de $\log 2(n)$] de :

$$Gain = \frac{N}{\log_2(N)} \quad (2.8)$$

Cette transformée de Fourier rapide est très utilisée lorsqu'il est indispensable d'obtenir une analyse fréquentielle "en ligne" dans certains processus au travers d'une fenêtre glissante d'observation.

2. 3. SIGNATURES SPECTRALES DES DEFAUTS DANS LE SPECTRE DU COURANT STATORIQUE

2. 3. 1. Défaits statoriques

Les défauts statoriques les plus courants sont la mise en court circuit d'une ou plusieurs spires de son bobinage, la fréquence caractéristique de ce défaut est [Halem 10]:

$$f_{cs} = f_s \left\{ \frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right\} \quad (2.9)$$

Avec : $n=1, 2, 3, \dots$ et $k=1, 3, 5, \dots$

2. 3. 2. Défaits rotoriques

L'analyse du spectre du courant statorique en régime permanent, fournit des indications sur les défaillances rotoriques telles que les ruptures de barres, d'anneaux de court-circuit ou l'excentricité d'entrefer.

2. 3. 2. 1. Cassure de barres rotoriques

Une asymétrie rotorique générée par la présence de barres rotoriques cassées produit des raies spectrales autour de la fréquence fondamentale f_s telles que :

$$f_{brc} = f_s (1 \pm 2kg) \quad (2.10)$$

L'amplitude de ces composantes spectrales est proportionnelle à la sévérité du défaut.

2. 3. 2. 2. Excentricité d'entrefer

Il y a deux types d'excentricité : statique (déformation du corps du stator, positionnement incorrecte du rotor) et dynamique (lorsque le centre du rotor n'est pas le centre de rotation).

Les excentricités d'entrefer peuvent être détectées, en surveillant les raies latérales fondamentales de la fréquence d'alimentation :

$$f_{exc} = f_s \left[1 \pm k \frac{(1-g)}{p} \right] \quad (2.11)$$

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

La détection des excentricités est aussi possible en surveillant les harmoniques principales d'encoches du courant et certaines de leurs composantes spectrales latérales . Cette méthode nécessite la connaissance du nombre d'encoches rotoriques N_e . Les fréquences des composantes spectrales d'encoches et de celles associées aux excentricités d'entrefer dynamiques sont les suivantes :

$$f_{enc+exc} = f_s \left[(k N_e \pm n_d) \frac{(1-g)}{p} \pm n_w \right] \quad (2.12)$$

$n_d=0$, dans le cas d'une excentricité statique et $n_d = 1$, dans le cas d'une excentricité dynamique.

N_e : est le nombre d'encoches rotoriques.

$k=1, 2, 3, \dots$ et $n_w=1, 3, 5, 7, \dots$ (l'ordre de l'harmonique de la F.m.m du stator)

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

2. 3. 2. 3. Défauts au niveau des roulements

Puisque les éléments roulants du roulement supportent le rotor, quelque soient les défauts dans les roulements, ils vont produire des mouvements radiales entre le rotor et le stator dans la machine. Par conséquent, des variations d'entrefer génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquence [CASIMIR03]:

$$f_{roul} = | f_s \pm k f_v | \quad (2.13)$$

D'où : $k = 1, 2, \dots$,

f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations (f_b , $f_{b. \text{int}}$ ou $f_{b. \text{ext}}$)

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées sur les paramètres physiques du roulement.

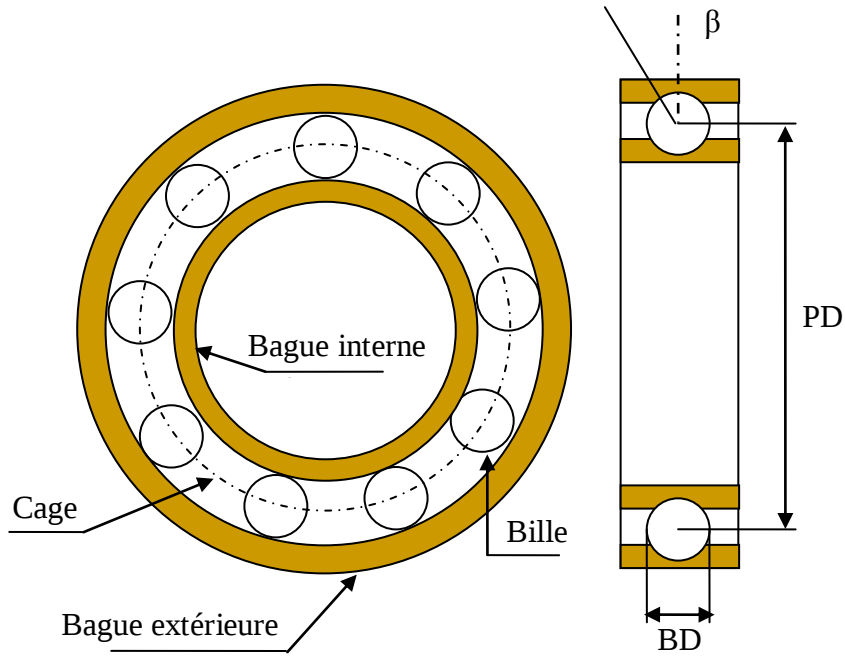


Figure 2.1: Dimension du roulement à bille.

Selon , les fréquences de vibration qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont :

- Défaut au niveau d'une bille :

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (2.14)$$

- Défaut sur la bague intérieure:

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (2.15)$$

- Défaut sur la bague extérieure:

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (2.16)$$

Où n_b est le nombre d'éléments roulants, BD le diamètre d'un élément roulant, PD la distance entre les centres des billes diamétralement opposées, β l'angle du contact des billes avec les bagues du roulement et f_{rot} est la fréquence de rotation du rotor.

Pour des dimensions courantes, c'est-à-dire que le nombre de billes est de 6 à 12, les fréquences de vibrations peuvent être approximés par :

$$f_{b.int} = 0.6 n_b f_{rot} \quad (2.17)$$

$$f_{b,ext} = 0.4 n_b f_{rot} \quad (2.18)$$

2. 4. L'ASPECT MODELISATION

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 de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Parmi les approches de modélisations existantes, nous en privilégions trois qui représentent chacune un niveau de complexité différent : une méthode analytique, une approche par schéma magnétique équivalent et enfin la modélisation par éléments finis [Abed02].

2. 4. 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 a 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 fem. Cette fem est soit liée (cas des branches correspondant aux spires du stator et aux barres et portions d'anneau), soit indépendante dans le cas des branches de l'onduleur. 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, stator et rotor jusqu'aux modèles triphasés au stator et multiphasés au rotor (multi-enroulements).

2. 4. 2. 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 perméances 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 [Abed02].

2. 4. 3. 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 [Abed02]. Les progrès des calculateurs ont permis d'envisager leur résolution numérique. De nombreux outils logiciels leur sont dédiés. Citons, entre autres, FLUX 2D, FLUX 3D et MAXWELL. Cependant, ces logiciels ont historiquement été conçus pour déterminer le champ électromagnétique, et dans l'objectif de l'optimisation du dimensionnement.

CONCLUSION

Plusieurs techniques de diagnostic des différents défauts dans les moteurs asynchrones sont bien présentées dans ce chapitre, et on peut conclure que la méthode d'analyse spectrale est la plus efficace spécialement la méthode de MCSA, qui sera utilisée dans la 3^{ème} chapitre.

Chapitre 3

3. 1. Introduction

Un modèle éléments finis appliqué à la machine asynchrone a été utilisé dans ce chapitre [H, Z,S,G,A], en utilisant la technique de couplage entre les deux circuits. Le circuit magnétique étant modélisé, le schéma de connexion des conducteurs électriques est introduit. Le circuit électrique représentant le bobinage statorique et les conducteurs massifs de la cage rotorique sont construits séparément. Dans notre modèle éléments finis appliqué à la machine asynchrone, des éléments de forme triangulaire de second ordre (figure 3.1) sont utilisés pour le maillage du circuit magnétique, pour alléger le temps de calcul sans perte sensible d'information.

A travers ce modèle nous simulons un défaut de cassure de barres pour:

- ◆ *une seule barre rotorique cassée.*
- ◆ *deux barres rotoriques cassées adjacentes.*
- ◆ *deux barres rotoriques cassées non adjacentes.*

La figure 3.1 présente le circuit magnétique de la machine asynchrone, la géométrie est très proche de la machine réelle, tant que la machine est alimentée par une source de tension sinusoïdale triphasée [H, Z,S,G,A]. Tant que le tableau 3.1 représente les spécifications de moteur triphasé à induction.

Le moteur est simulé sous une vitesse nominale de 1428 tr/min, et un glissement de 4.8%. Une courbe BH est utilisée pour modéliser les caractéristiques magnétiques de la partie ferromagnétique du moteur.

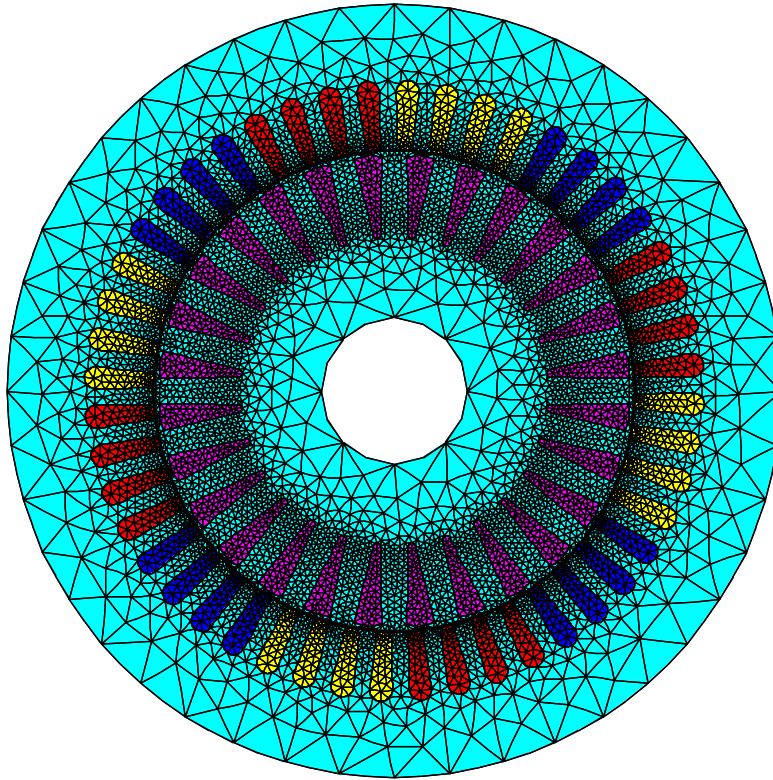


Figure 3. 1: Circuit magnétique du moteur simulé.

Tableau 3. 1: Spécifications de moteur à induction simulé.

Nombre de pôles	4
Nombre de phases	3
Puissance nominale (kW)	1.1
Tension nominale (V)	230
Fréquence (Hz)	50
Vitesse (tr/min)	1425
Nombre des encoches de stator	48
Nombre des encoches du rotor	28

3. 2. DETECTION DE DEFAUT DE CASSURE DE BARRES ROTORIQUE PAR LA TECHNIQUE MCSA

Dans ce paragraphe, le courant statorique obtenu pour les deux cas, sains et avec défaut de cassure de barres; est analysé par la technique de FFT (Fast Fourier Transform), dans le but de détecter les harmonique qui caractérisent ce type de défaut et qui sont données par l'équation : $f_{brc} = f_s(1 \pm 2kg)$.

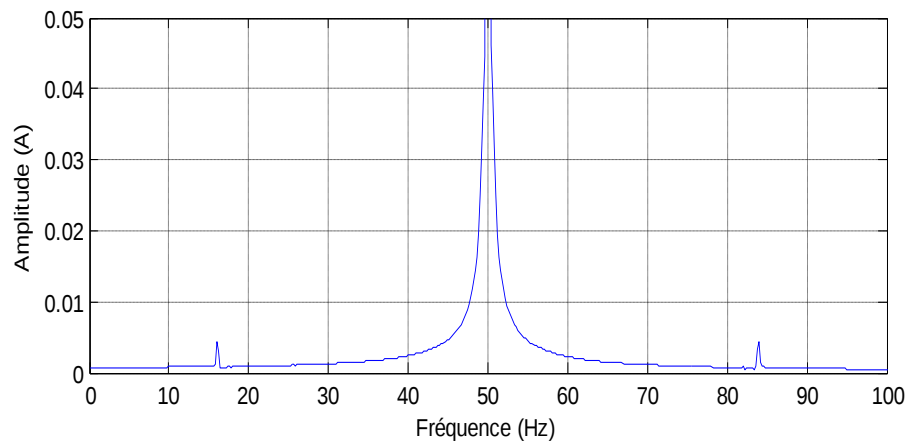


Figure 3. 2: Spectre du courant statorique d'un moteur sain.

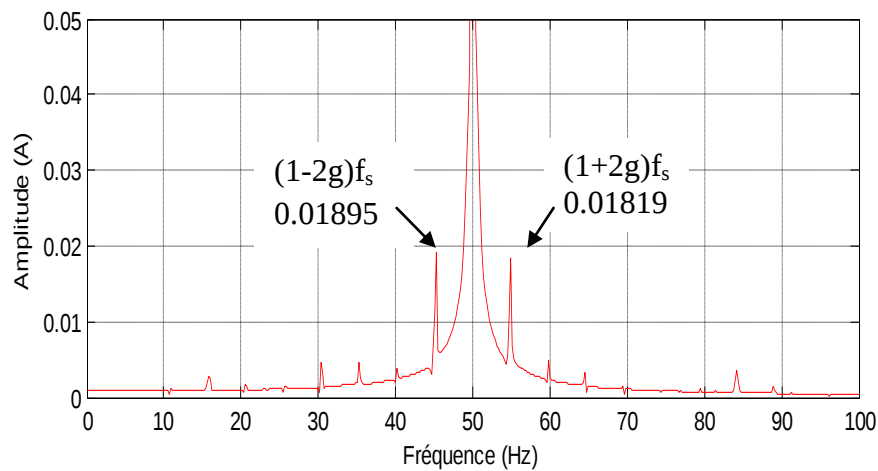


Figure 3. 3: Spectre du courant statorique avec une seule barre cassée.

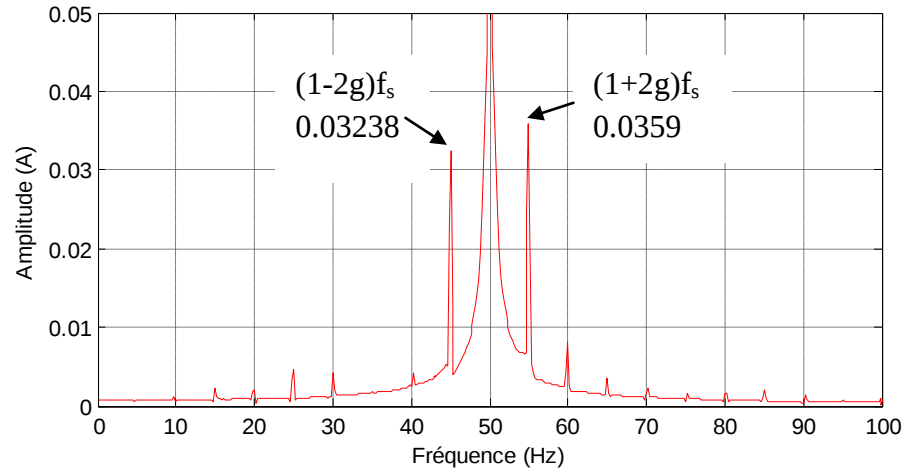


Figure 3. 4: Spectre du courant statorique avec deux barres cassées adjacentes.

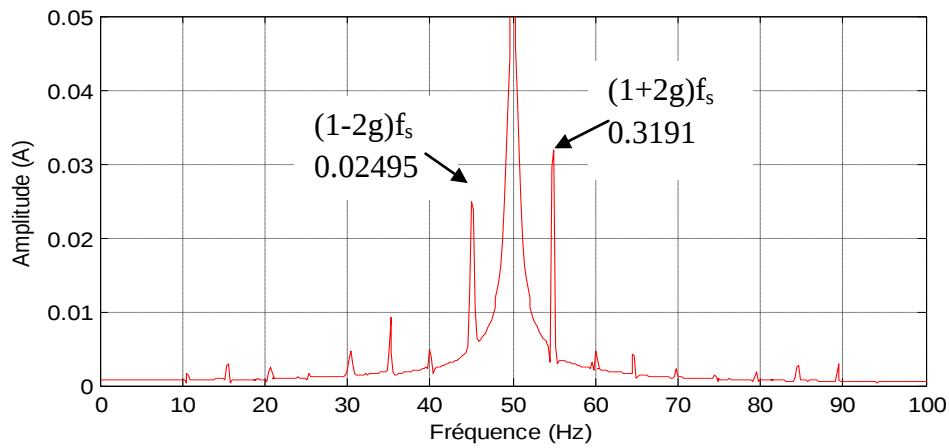


Figure 3. 5: Spectre du courant statorique avec deux barres cassées non adjacentes.

D'après les spectres précédents, figures 2, 3, 4, et 5 on peut constater que le défaut de cassure de barre injecte des harmoniques dans le spectre de courant statorique, ces harmoniques sont clairement absents dans la figure 3.2 lorsque le rotor du moteur est sain. Par contre les harmoniques qui caractérisent les défauts de cassure de barres suivant l'équation $f_{brc} = f_s(1 \pm 2kg)$ et pour $k=1$, sont observés autour du fondamental lors de la cassure d'une seule barre rotorique (figure 3.3).

Lors de la cassure de deux barres adjacentes (figure 3.4) les amplitudes de ces harmoniques sont plus grandes que le cas précédent d'une seule barre cassée (figure 3.3). Ces amplitudes sont moins élevées quand les deux barres cassées ne sont pas adjacentes (figure 3.5), donc on peut dire que la sévérité de défaut est plus grandes quand les barres cassées sont adjacentes.

La figure 3.6 présente la distribution des lignes d'équiflux pour une vitesse nulle, c'est à dire au début du calcul avant d'éteindre le régime permanent.

D'après cette figure on observe que le défaut de cassure de barres cause un déséquilibre magnétique. Et on peut observer ce phénomène clairement lors du démarrage du moteur [Thomson99].

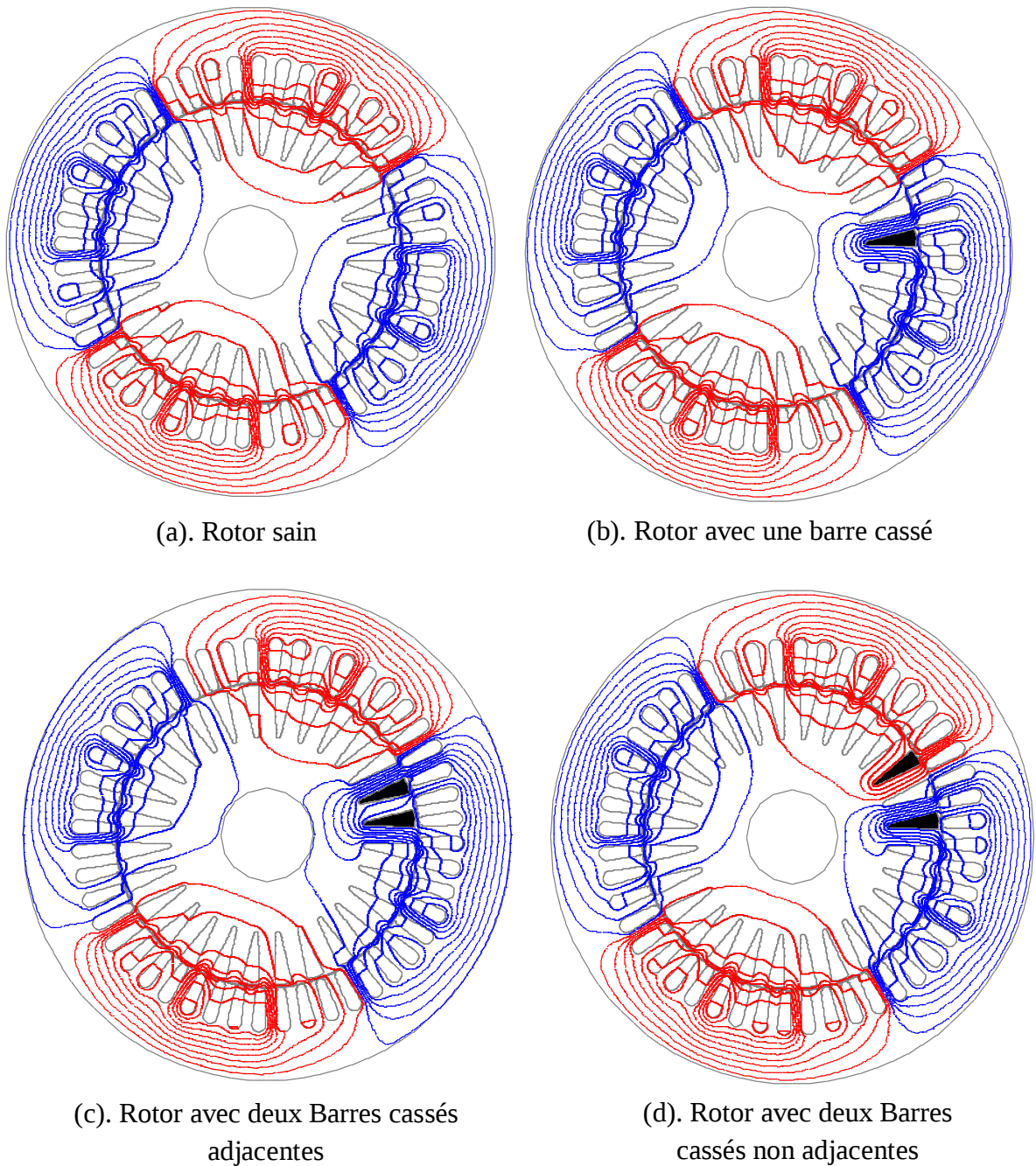


Figure 3. 6 : Répartition des lignes d'équiflux au démarrage du moteur.

3. 3. CONCLUSION

Dans ce chapitre une simulation par la méthode des éléments finis est appliquée au moteur asynchrone triphasé. Notre but est d'appliquer la technique d'analyse spectrale sur le courant statorique pour détecter les harmoniques qui peuvent affirmer qu'il y a des cassures de barres dans le moteur. Cette technique est maintenant la plus utilisable dans le domaine de diagnostic des défauts des machines asynchrones.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les machines asynchrones par la technique d'analyse spectrale appliquée au courant statorique.

L'intérêt grandissant des industriels pour la maintenance des entraînements électriques, et compte tenu de la fréquence d'utilisation des machines asynchrones, la détection précoce des défauts dans ces machines est devenu un enjeu économique important.

Dans ce mémoire une simulation par la méthode des éléments finis est utilisée pour appliquer la technique d'analyse spectrale sur le courant statorique dans le but de détecter les harmoniques qui peuvent affirmer qu'il y a des cassures de barres dans le moteur. Cette technique est maintenant la plus fiable et utilisable dans le domaine de diagnostic des défauts des machines asynchrones.

Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[Halem10] N. Halem, Mémoire de Magistère, Modélisation des Machines Asynchrones en Vue du Diagnostic avec Prise en Compte Adéquate de Circuit Magnétique par Éléments Finis, 20/06/2010.

[BACHIR02] S. BACHIR, thèse de Doctorat, Contribution Au Diagnostic De La Machine Asynchrone Par Estimation Paramétrique 17/12/2002.

[Ghoggal05] A. Ghoggal, Mémoire de Magistère, Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée : Modèle Dédié à la Détection des Défauts 2005.

[Ceban12] A. Ceban, Thèse de Doctorat, Méthode Globale De Diagnostic Des Machines Électriques, 02/02/2012.

[CASIMIR03] R. CASIMIR, thèse de Doctorat, Diagnostic Des Défauts Des Machines Asynchrones Par Reconnaissance Des Formes, 18/12/2003.

[Abed02] A. Abed, Thèse de Doctorat, "Contribution à l'Étude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", 1, mars 2002.

[H, Z, S, G] N. Halem, S. E. Zouzou, K. Srairi, S. Guedidi, Influence Of Broken Rotor Bars Location In The Squirrel Cage Induction Motor Using Finite Element Method, Journal of Fundamental and Applied Sciences, ISSN 1112-9867.

[H, Z, S, G, A] N. Halem, S. E. Zouzou, K. Srairi, S. Guedidi, F. A. Abbood, Static eccentricity fault diagnosis using the signatures analysis of stator current and air gap magnetic flux by finite element method in saturated induction motors, Int J Syst Assur Eng Manag (Apr-June 2013) 4(2):118–128.

[Thomson99] W. T. Thomson, "A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors—past, present and future," in 2nd IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives - SDEMPED '99, Gijón, Spain, 1999, pp. 3-17.

[Bonnett08] A. H. Bonnett and C. Yung, "Increased Efficiency Versus Increased Reliability," Industry Applications Magazine, IEEE, vol. 14, pp. 29-36, 2008.