

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

CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Mémoire de fin d'études
Présenté pour l'obtention du diplôme de la

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie électrique
Spécialité : Contrôle et Diagnostic des Systèmes Electriques

Thème

**Etude de défaut de roulement de la
machine asynchrone**

Proposé et dirigé par :
M. BESSOUS Nouredine

Réalisé par :
ZERROUK Ahmed
AMMAR Abdelkarim
BOULAL Abdelaali

Promotion: 2010-2011

REMERCIEMENTS

Avant tout on remercie Dieu le tout puissant qui nous a donné le courage la patience, l'aide et la volonté de réaliser ce modeste travail.

*Nous tenons à remercier vivement notre encadreur Mr : **BESSOUS NOUREDDINE** qui à ménagé un grand effort afin de nous permettre de mener à bien le présent travail et à qui nous exprimons notre gratitude et notre respect.*

Nous remercions aux enseignants du département d'électrotechnique.

Table des figures

Figure I.1: Le stator de la machine asynchrone, et vue schématique en perspective du stator de la machine asynchrone.....	4
Figure I.2: Rotor à cage (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux (bagues) de court-circuit.....	5
Figure I.3: Constitution du rotor bobiné.....	6
Figure I.4: Structure d'un roulement à billes.....	7
Figure I.5: Court-circuit entre spires statoriques.....	10
Figure I.6: Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.....	11
Figure I.7: Répartition des contraintes mécaniques radiales et zones de charge d'un roulement.....	13
Figure I.8: Ecaillage d'une piste de roulements dus à des surcharges mécaniques.	14
Figure I.9: rupture total d'une bague.....	14
Figure I.10: Effets sur les roulements de la circulation de courants électriques.....	15
Figure I.11: Criques de corrosion sur une piste de roulement.....	15
Figure I.12: Marques d'indentation d'un le piste des roulements dus à la présence de contaminant.....	16
Figure I.13: Mécanismes généraux d'usure en présence de contaminant.....	17
Figure I.14: Dégradations provoquées par la détérioration du lubrifiant dans des roulements.....	18
Figure I.15: Etude statique des pannes de la machine asynchrone.....	19
Figure I.16: la répartition des différentes parties du moteur.....	20
Figure I.17: Autre répartition des différentes parties du moteur.....	20
Figure I.18: Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.....	22

Figure II.1: Représentation symbolique de la machine asynchrone.....	27
Figure II.2: transformation le repère (abc) en (dq).....	30
Figure II.3: transformation de Park est la position des axes.....	31
Figure II.4: Modèle SIMULINK d'un moteur asynchrone.....	34
Figure II.5: Fonctionnement à vide et en charge de la MAS.....	35
Figure II.6: Structure d'un roulement.....	37
Figure II.7: Spectre de courant statorique sous un défaut au niveau de bagues extérieur.....	38
Figure II.8: Spectre de courant statorique sous un défaut au niveau de bagues intérieur.....	38

Résumé

L'utilisation de la machine asynchrone est la plus croissante dans les différents domaines industriels pour cela la nécessité impose plusieurs projets de la recherche pour l'étude de la commande, la maintenance et la détection des défauts de cette machine.

Notre étude porte sur la présentation de la machine asynchrone et les différents défauts qu'ils peuvent attaquer cette dernière et des techniques pour le diagnostic, Nous avons exposé un modèle d'une méthode de l'analyse spectrale des courants statoriques pour la détection, c'est-à-dire l'analyse des harmoniques avec la simulation numérique en cas d'un défaut au niveau du roulement qui est représenté l'objet de notre étude.

Les mots clés :

- Machine asynchrone.
- Diagnostic.
- Les défauts.
- Roulement.
- L'analyse spectrale.

ملخص

لقد أصبحت الآلة اللامتزامنة الأكثر استعمالا في العديد من المجالات الصناعية, لذلك وضعت أبحاث مختلفة لدراستها من أجل التحكم بها وحمايتها وصيانتها واكتشاف أعطابها.

إن دراستنا هذه تصف الآلة اللامتزامنة ومختلف الأعطاب التي قد تصيبها ومجموعة من التقنيات لتشخيص هذه الأعطاب, كما قمنا بعرض نموذج لتقنية التحليل الطيفي لتتار التغذية في الجزء الثابت عبر المحاكاة الرقمية للكشف عن طريق التوافقيات في حالة وجود أعطاب على مستوى المدحرجة التي هي بالتحديد محل دراستنا .

الكلمات المفتاحية:

- الآلة اللامتزامنة.
- التشخيص.
- الأعطاب.
- المدحرجة.
- التحليل الطيفي.

Introduction général.....	1
---------------------------	---

Chapitre I

Etude de la machine asynchrone et ses défauts

I.1. Introduction.....	3
I.2. Constitution de la machine asynchrone.....	3
I.2.1. Le Stator.....	3
I.2.2. Le rotor.....	5
I.2.2.1 Le rotor à cage	5
I.2.2.2. Le rotor bobiné.....	6
I.2.3. Les organes mécaniques.....	6
I.3. Définition des différents défauts de la machine asynchrone.....	8
I.3.1. Les causes et les effets des défauts.....	8
I.3.2. Les différents défauts.....	9
I.3.2.1. Les défauts de stator.....	9
I.3.2.2. Les défauts de rotor.....	10
I.3.2.3. Les défauts de roulement.....	12
I.4. Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone.....	19
I.5. Les différentes méthodes du diagnostic.....	21
I.5.1. Diagnostic des défauts par l'analyse spectrale et le suivi des grandeurs mesurables..	21
I.5.2. Analyse des courants statoriques.....	21
I.5.3. Analyses vibratoires de la machine.....	22
I.5.4. Analyse des flux.....	22
I.5.5. Analyse du couple électromagnétique.....	23
I.6. Conclusion.....	24

Chapitre II
Modélisation et simulation de la MAS

II.1. Introduction.....	25
II.2. Modélisation de la machine asynchrone.....	26
II.2.1. Présentation du modèle.....	26
II.2.2. Modèle triphasée (abc).....	27
II.2.2.1. Les équations électriques de MAS.....	27
II.2.2.2. La relations entre le flux et le courant.	28
II.3. Modèle de PARK.....	30
II.3.1. Choix de référentiel.....	31
II.3.1.1. Repère lié au stator.....	32
II.3.1.2. Repère lié au rotor.....	32
II.3.1.3. Repère lié au champ tournant.....	33
II.4. Equations mécaniques.....	33
II.5. Résultats de la simulation de la machine asynchrone.....	34
II.6. La machine sous un défaut de roulement.....	37
II.7. Conclusion.....	40
Conclusion générale.....	41
Références bibliographique.....	42

Introduction générale

Le diagnostic et la détection de défauts mobilisent à ce jour beaucoup de chercheurs dans les différents domaines industriels, spécialement les entraînements électriques qui utilisent de plus en plus les moteurs asynchrones à cause de leur robustesse, leur puissance mécanique et de leur coût. Mais sont utilisation limité dans l'entraînement des systèmes à vitesse constante par rapport aux systèmes à vitesse variable à cause de la difficulté de sa commande [KHA09].

Aujourd'hui, avec la progression de l'électronique de puissance, le moteur asynchrone peut-être asservi bien en couple qu'en vitesse. Ce contrôle lui ouvre de larges domaines d'utilisation (l'aéronautique, le nucléaire, la chimie, les transports ferroviaires, etc....).

Malgré sa fiabilité et sa robustesse, la machine asynchrone subit, au cours de sa fonctionnement, un certains nombres de contraintes de différentes natures (électriques, mécaniques et environnement). Ces dernières induits des défaillances qui peuvent conduisent à des arrêts non programmés, à des pertes de production, à des réparations coûteuses et peuvent entraîner de graves conséquences sur la sécurité des personnes, des matériels et d'environnement [KHA09].

De nombre travaux ont été consacrés à ce nouveau type de détection qui utilise différentes technique de diagnostic préventif, des méthodes utilisent les grandeurs mécanique comme le couple et la vitesse qui demandent des captures au niveau de la machine et des autre méthodes avancé comme l'analyse spectrale.

La détection des défauts à leur premier phase (maintenance prédictive) est devenue une nécessité majeur afin d'éviter la défaillance totale des machines électriques, il est aussi important de savoir qu'un défaut non traité peut entraîner des dégradations encore plus importantes.

Introduction générale

L'objectif principal de notre travail est l'étude des défauts mécanique (les défauts de roulement) que leurs effets sur les grandeurs électriques et mécaniques du moteur asynchrone. Pour cela, notre mémoire sera organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons fait une synthèse bibliographique sur la machine asynchrone, et les différentes techniques de diagnostic.

Le deuxième chapitre est présente un modèle de la machine asynchrone pour la simulation et afin d'expliquer les effets de défauts de roulement sur le couple, la vitesse et le courant statorique, plus une vérification précise du défaut de roulement a été présentée.

Enfin, a terminé ce mémoire par une conclusion générale.

I.1. Introduction

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc.... L'apparition dans les années 1980 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc....). Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les trois dernières décennies.

I.2. Constitution de la machine asynchrone.

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe, on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux mêmes en permanence, on définit deux types de rotor bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. [BOU09].

I.2.1. Le Stator.

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine. Figure1.1

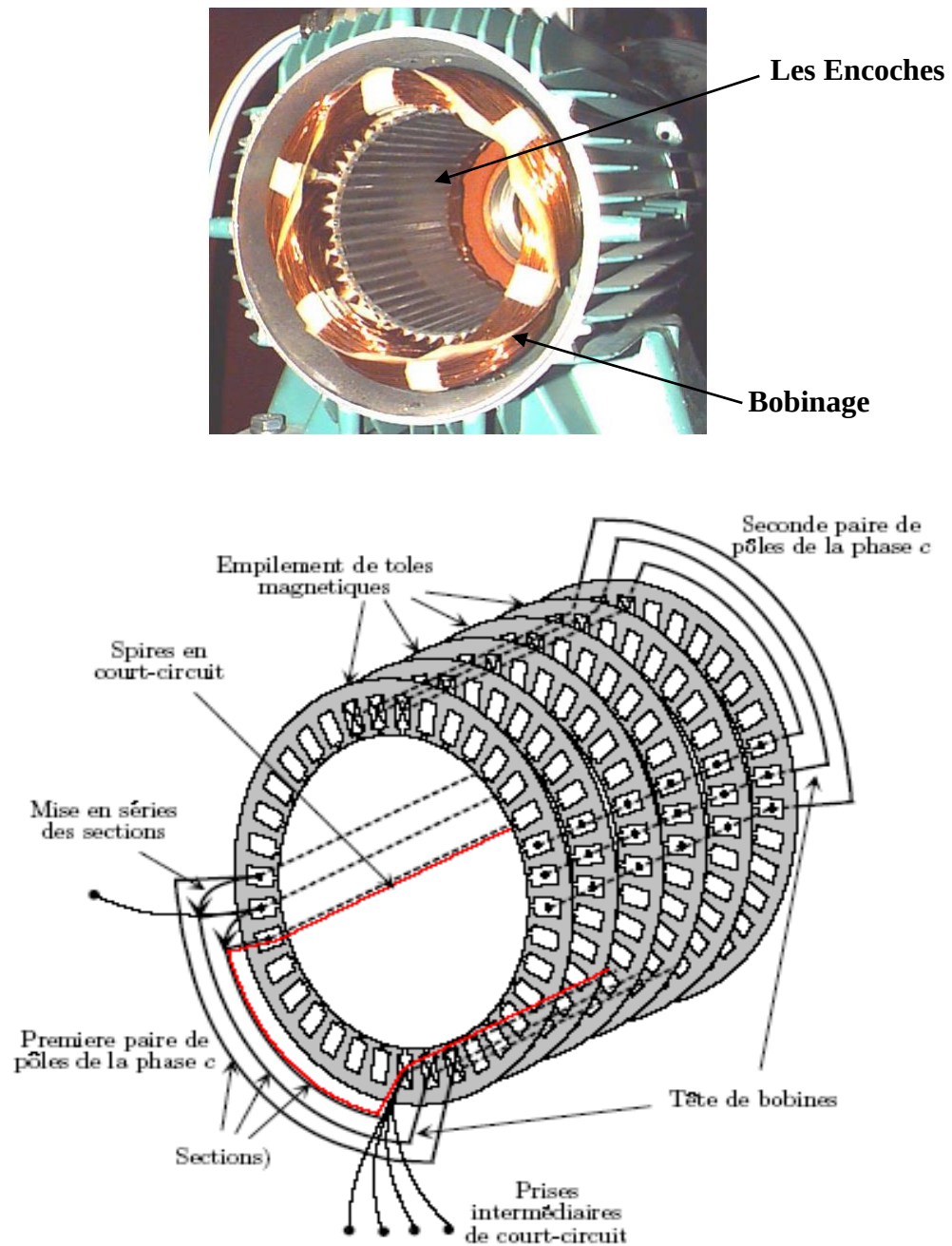


Figure I.1. Le stator de la machine asynchrone, et vue schématique en perspective du stator de la machine asynchrone.

I.2.2. Le rotor.

C'est par le rotor, la partie mobile, que la machine asynchrone se distingue de l'autre machine triphasée, la machine synchrone. De manière générale, le rotor est le siège de grandeurs électromagnétiques variables.

I.2.2.1. Le rotor à cage.

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (**figure. I.2**) Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [KER84]. [BOU09]

Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

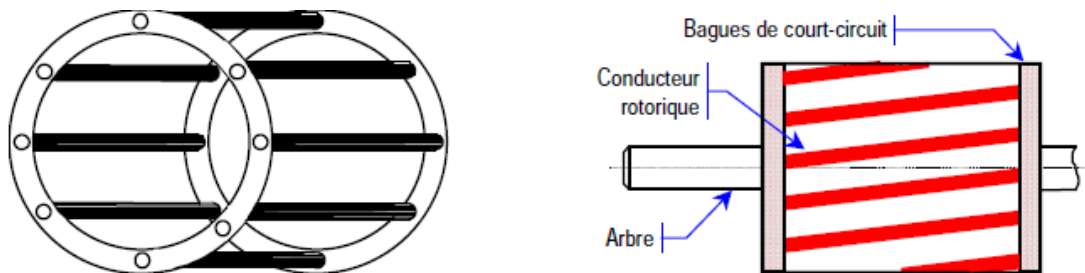


Figure I.2. Rotor à cage (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux (bagues) de court-circuit.

I.2.2.2. Le rotor bobiné.

Le rotor d'une machine bobiné est constitué de trois bobines (on parle aussi de rotor à bague). Chaque bobine est reliée à une bague. Les bagues permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor.

Le rotor est mis en court-circuit par l'extérieur au travers de trois bornes liées électriquement par des contacts glissants appelés bagues réalisées en laiton sur lesquelles s'appliquent des balais de graphite. Les trois enroulements rotoriques sont couplés en étoile à l'intérieur de la machine.

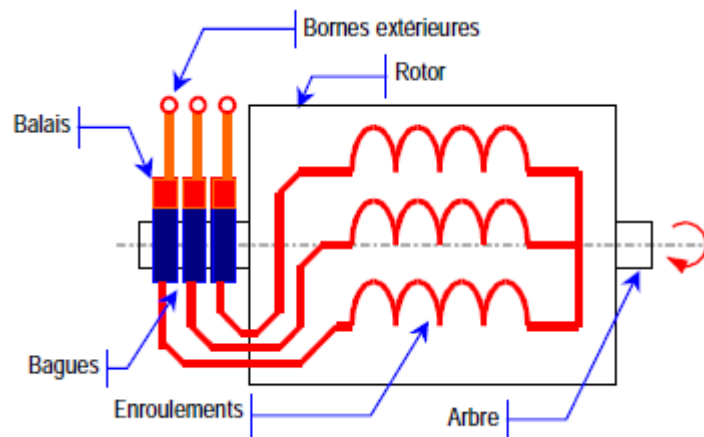


Figure I.3. Constitution du rotor bobiné.

I.2.3. Les organes mécaniques.

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation.

Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance. [BOU09].

- **les roulements.**

Le roulement est un organe de base qui assure une liaison mobile entre deux éléments d'un mécanisme en rotation l'un par rapport à l'autre. Sa fonction est de permettre la rotation relative de ces éléments, sous charge, avec précision et avec un frottement minimal. La majorité des machines électriques utilisent les roulements,

En fonction de l'application envisagée, les organes de roulement peuvent être des billes, des rouleaux ou des aiguilles. Chaque type de roulement possède des caractéristiques spécifiques en termes de charges radiales et axiales supportées, de vitesse limite ou encore de défaut d'alignement admissible. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance prix. Environ 40 % à 50 % des défauts rencontrés dans les machines asynchrones sont liés aux roulements [TRA09] [ALI09].

Constitution des roulements à billes.

Le roulement est composé des éléments suivants:

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

La figure montre la construction typique d'un roulement à billes. Les billes sont liées par une cage qui assure une distance uniforme entre elles et empêche tout contact:

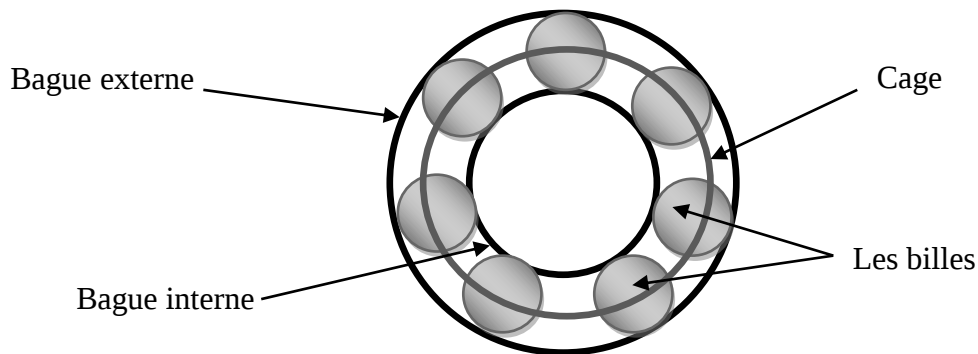


Figure I.4. Structure d'un roulement à billes.

I.3.Définition des différents défauts de la machine asynchrone.

I.3.1. Les causes et les effets des défauts.

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes [BON 92]:

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

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

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

Et aussi pour le rotor les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- thermique (surcharge,...)
- électromagnétique (force en $B_2(t)$,...)
- résiduel (déformation,...)
- dynamique (arbre de transmission,...)
- mécanique (roulement,...)
- environnemental (agression,...).

I.3.2.Les différents défauts.**I.3.2.1.Les défauts de stator.****➤ Défauts d'isolant dans un enroulement.**

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Les différentes causes pour ce type de défaut sont [BOU09] :

- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- vibrations mécaniques.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau
- d'isolation.
- vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- fonctionnement dans un environnement sévère.

➤ Les courts-circuits.

On peut avoir des défauts courts-circuits inter spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défaut peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases.

Nous pouvons citer aussi les courts-circuits apparaissant entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou encore entre deux phases statoriques. Ces défauts ont le plus souvent une origine mécanique.

En effet, des vibrations excessives peuvent mener à un desserrement des boulons de la plaque à bornes de la machine créant ainsi le court-circuit. Une cosse mal serrée à la jonction du câble d'alimentation et des bornes de la machine peut être à l'origine d'une ouverture de phase.

Le défaut le plus couramment rencontré reste encore la fusion d'un fusible de protection. Ces défauts peuvent être détectés par une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [DID04] [OND06].



Figure. I.5. Court-circuit entre spires statoriques.

I.3.2.2. Les défauts de rotor.

Les défauts rotoriques se situent au niveau de la cage ou au niveau de l'entrefer. Au niveau de la cage les défauts se résument à la rupture de barres de la cage ou à la rupture d'anneaux de court-circuit. Au niveau de l'entrefer les défauts se manifestent par une excentricité statique, dynamique ou mixte.

➤ Ruptures de barres.

Cassure ou la rupture de barre est l'une des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotoriques. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [OND06].

➤ **Ruptures d'anneaux.**

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

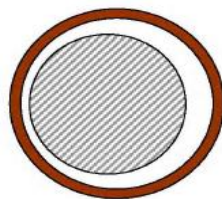
De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques [OND06].

➤ **Excentricité statique, dynamique et mixte.**

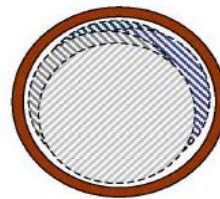
La machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) son origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge ou à un défaut de fabrication [CAS03].

Trois cas d'excentricités sont généralement distingués :

- ❖ l'excentricité statique: le rotor est déplacé du centre de l'alésage mais tourne toujours autour de son axe.
- ❖ l'excentricité dynamique: le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- ❖ l'excentricité mixte: associant les deux cas, statique et dynamique. On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante :



Excentricité statique



Excentricité dynamique

Figure. I.6. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.

Ce défaut modifie le comportement magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromotrices, ce qui agit directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquences des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

I.3.2.3. Les défauts de roulement.

Les défauts, les causes et les effets.

❖ Les Causes.

Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme [NTX05] :

- contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, ...
- corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, ...
- 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.
- Mauvaise lubrification.

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer Les types de défauts suivants :

- Défaut de bague extérieure,
- Défaut de bague intérieure,
- Défaut de billes,
- Défaut de cage

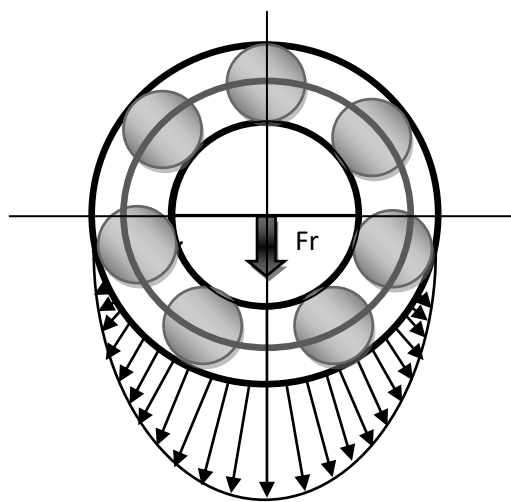
❖ Modes de dégradations d'un roulement à billes.

➤ Effets des contraintes mécaniques.

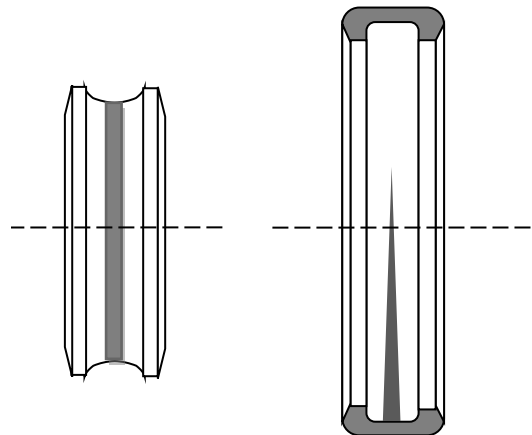
Lorsqu'un roulement est placé dans une machine, il subit des contraintes mécaniques radiales et axiales. Les contraintes axiales apparaissent plus particulièrement dans des machines existe une pré-charge axiale, c'est-à-dire un dispositif appliquant une poussée ou une traction dans l'axe de l'arbre de rotation.

Les contraintes radiales, quant à elles, existent nécessairement du fait de la masse de l'arbre de rotation de la machine. Ces dernières s'exercent donc sur la bague interne du roulement qui les transmet à la bague externe par l'intermédiaire des billes. Ainsi, les contraintes radiales ne s'exercent pas en un seul point de la bague externe mais se répartissent dans la moitié inférieure de celle-ci, comme le schématise la figure.

Dans la figure, considérons le cas où la bague interne est rotative alors que la bague externe est fixe. La zone de charge couvre alors un arc de la piste de roulement externe. Par ailleurs, de par la rotation de la bague interne, la zone de charge couvre la longueur totale de la piste de roulement interne.



Répartition d'une contrainte radiale
au sein d'un roulement



Schématisation de la zone de charge d'une
bague interne et d'une bague externe

Figure.1.7. Répartition des contraintes mécaniques radiales et zones de charge d'un roulement
[MOR90].

Lorsque les efforts exercés sont trop importants, il y a surcharge du roulement. La résistance des matériaux des bagues ou des billes est mise à mal et il se produit des criques et fissures internes, voire un écaillage des pistes de roulement ou des billes si les efforts sont cycliques. La dégradation du roulement est alors considérée comme mortelle. La figure [GUY96] montre les dégradations sévères que peuvent provoquer des surcharges mécaniques.



Figure. I.8. Ecaillage d'une piste de roulements dus à des surcharges mécaniques.

➤ **Défauts de montage.**

La mise en place d'un roulement sur l'arbre de la machine d'une part et dans son logement au niveau des paliers statoriques d'autre part, nécessite d'être effectuée avec soin. Si les alignements ne sont pas respectés, des contraintes fortes sont exercées sur les bagues. Les mêmes effets que précédemment sont observés. Les contraintes exercées peuvent également être très localisées, allant jusqu'à la rupture complète des bagues figure [GUY96].

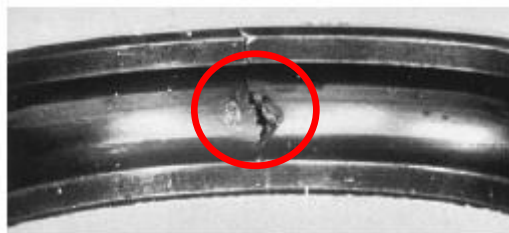
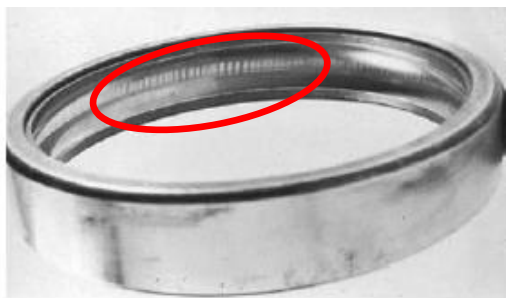


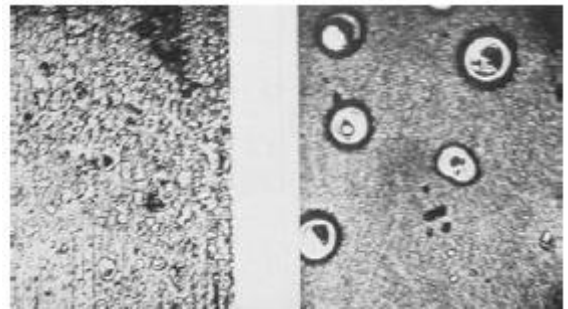
Figure. I.9. Rupture total d'une bague.

➤ **Circulation de courants électriques.**

Les roulements étant métalliques, Le passage de courant électrique dans les bagues et éléments roulants use les surfaces de contact et le lubrifiant. Cette usure provient d'un processus similaire au soudage à l'arc électrique, qui génère des températures localisées élevées. Sur l'illustration, la bille à gauche présente une surface terne due aux multiples micros trous provoqués par le passage du courant. Ou encore à l'apparition de stries perpendiculaires au sens de roulement dans les cas les plus sévères. [TRA09]



Stries de la bande de roulement



Micro trous

Figure. I.10.Effets sur les roulements de la circulation de courants électriques.

➤ **Corrosion.**

Des agents corrosifs, tels que des acides, sont susceptibles de s'introduire dans les roulements et de dégrader les matériaux métalliques les constituant. Des criques apparaissent alors sur les bagues et les billes, Sous l'effet de la corrosion et/ou d'autres facteurs, les criques évoluent en fissures entraînant des dégâts mortels pour le roulement. Comme le montre la figure [TRA09].

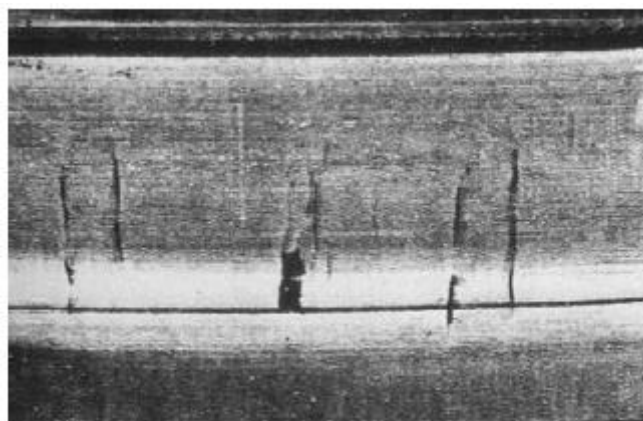


Figure I.11.Criques de corrosion sur une piste de roulement.

➤ **Contamination du roulement.**

Les machines peuvent être installées dans des environnements poussiéreux ou en extérieur, là où les vents peuvent amener des sables ou des poussières. Les roulements utilisés en milieux contaminés, peuvent donc se trouver eux-mêmes contaminés, c'est-à-dire que des impuretés entrent dans le roulement et dégradent alors les surfaces de contact.

Lorsque les particules de contaminant s'insèrent au niveau du contact bille/bague, il peut se produire un phénomène d'abrasion à trois corps et/ou une indentation des particules dans les billes ou les pistes. Ceci ne se produit que si les particules sont constituées d'un matériau plus dur que celui des organes internes du roulement [CHE96]. Les dégradations peuvent alors s'intensifier et créer des fissures, voire un écaillage des constituants du roulement. Ces mécanismes sont résumés par la figure.



Figure. I.12. Marques d'indentation d'un le piste des roulements dus à la présence de contaminant.

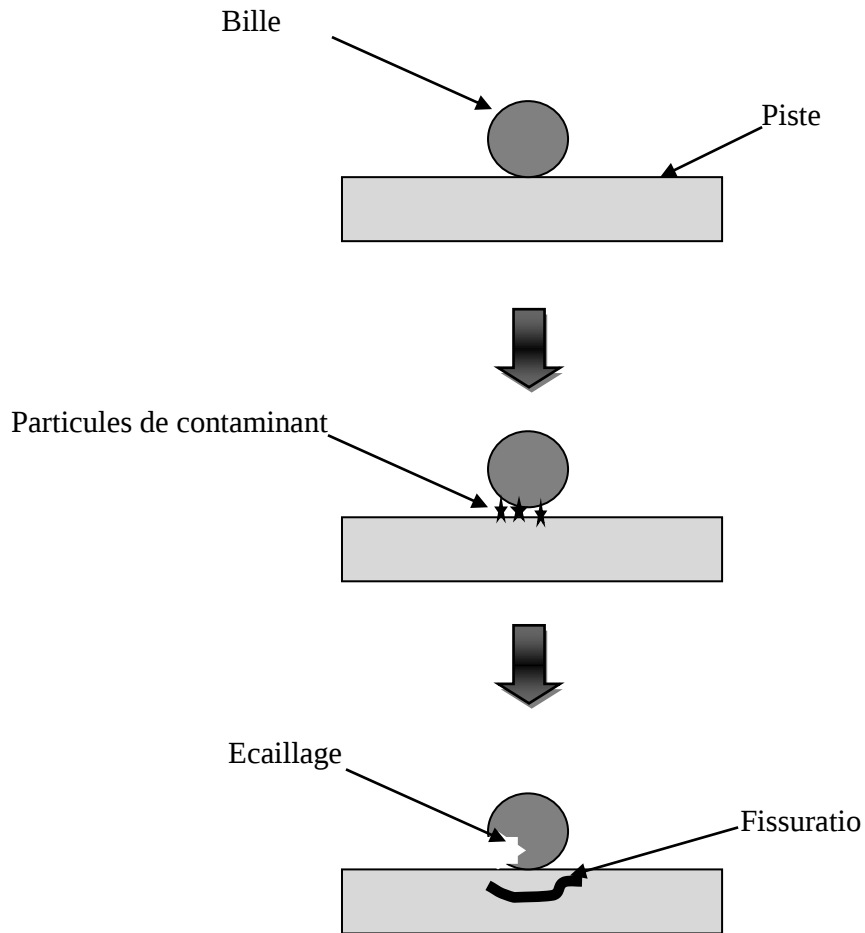


Figure I.13. Mécanismes généraux d'usure en présence de contaminant.

➤ Défaut de lubrification

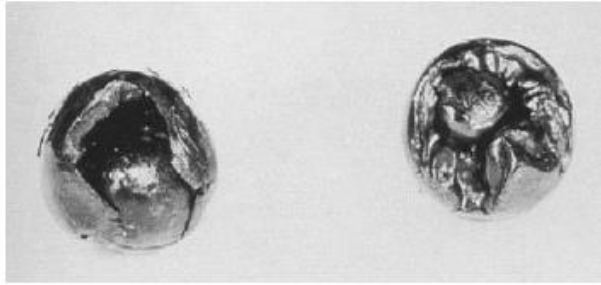
Le lubrifiant est un organe essentiel des roulements dans la mesure où il crée un film d'huile protecteur au niveau des contacts bille/bague permettant de protéger les surfaces. Deux types de défauts de lubrification principaux peuvent se présenter .

Le premier est une dégradation des qualités lubrifiantes de la graisse ou de l'huile ou bien une absence de lubrifiant. En effet, en l'absence de lubrifiant, les surfaces métalliques se trouvent en contact direct, frictionnent et s'érodent rapidement, jus qu'à entraîner des écaillages des pistes, des éclatements des billes, un blocage et donc roulements une destruction du roulement, comme le montre la figure.

Le second type de défaut de lubrification intervient dans les roulements par l'intermédiaire d'un sur-graissage (la graisse occupe tout le volume libre interne au roulement). Dans ce cas, la viscosité de la graisse empêche la libre rotation de la cage et par conséquent des billes, ce qui entraîne un glissement de ces dernières au niveau des points de contact. Les surfaces de contact se dégradent alors rapidement.



Écaillage d'un chemin de roulement



éclatement de billes

Figure. I.14. Dégradations provoquées par la détérioration du lubrifiant dans des roulements.

➤ **Température de fonctionnement.**

En conditions normales d'utilisation, la température de fonctionnement d'un roulement est généralement comprise entre -20°C et $+120^{\circ}\text{C}$. La géométrie générale d'un roulement est dépendante de la température de fonctionnement de celui-ci.

En effet, les éléments métalliques se dilatent avec la température. Dans ce cas, le jeu naturel du roulement est compensé et le lubrifiant ne peut plus s'insérer au niveau des points de contacts bille/bague, ce qui entraîne les mêmes effets que ceux précédemment cités. Par ailleurs, la graisse perd ses propriétés lubrifiantes et la rotation de la cage est perturbée. Les billes glissent alors dans les chemins de roulement provoquant une usure rapide et prononcée.

I.4. Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes [O'Do 85] :

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

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels [ALL 88] sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants (figure I.15) :

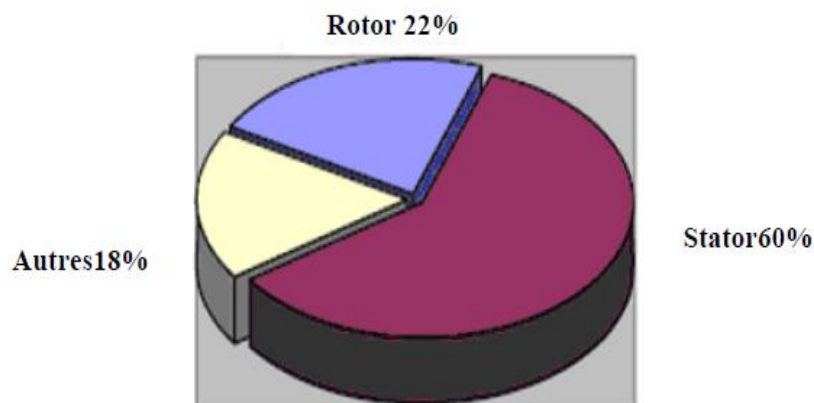


Figure. I.15. Etude statique des pannes de la machine asynchrone [ALL88].

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure I.16:

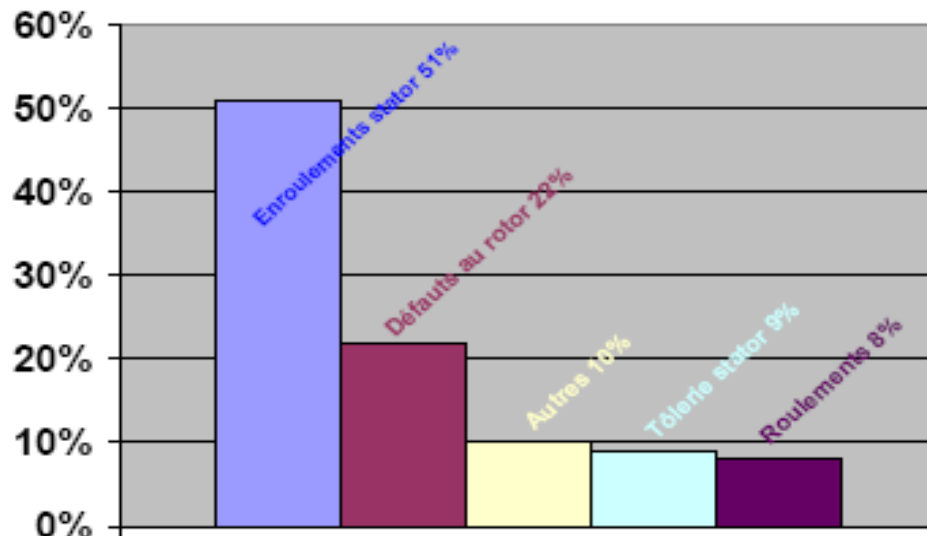


Figure I.16. La répartition des différentes parties du moteur.

Une autre étude statistique [THO95] faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur la figure I.17.

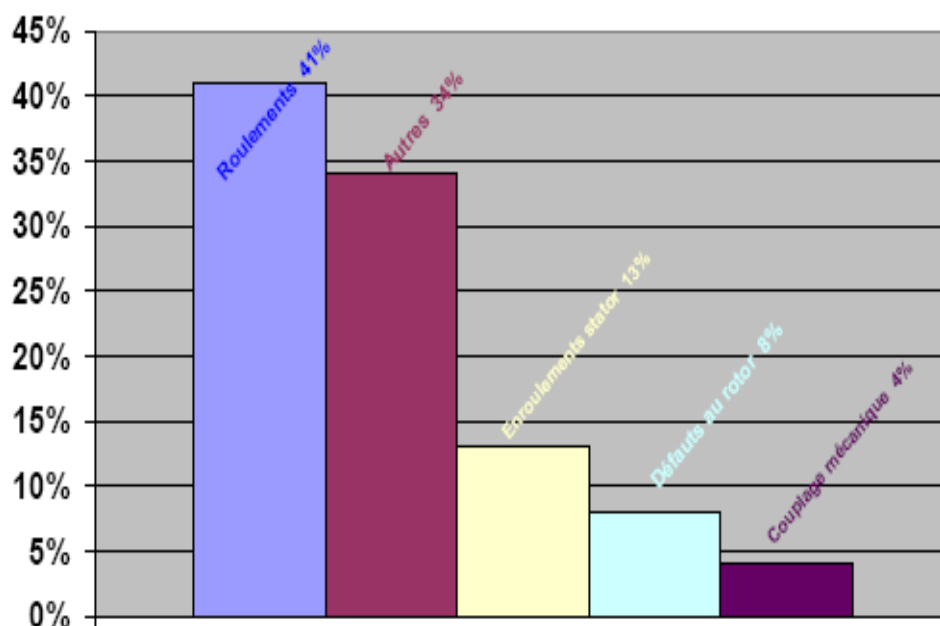


Figure I.17. Autre répartition des différentes parties du moteur.

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

I.5. Les différentes méthodes du diagnostic.

I.5.1. Diagnostic des défauts par l'analyse spectrale et le suivi des grandeurs mesurables.

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres et/ou de portions d'anneaux 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. [KHA09].

La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine,

Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone peuvent être des grandeurs électriques (plus particulièrement les courants de ligne), soit les grandeurs mécaniques (vibration, couple électromagnétique) [NEZ06].

I.5.2. Analyse des courants statoriques.

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone [DID04].

Nous savons que le suivi de l'amplitude des composantes caractéristiques de fréquence dans le spectre du courant permet de se renseigner sur l'état de la cage rotorique. Par d'exemple le spectre du courant statorique lorsque la machine fonctionne avec un rotor sain et un rotor défaillant (une barre cassée). Nous apercevons une nette augmentation de l'amplitude de ces composantes, ce qui traduit la présence d'un défaut au sein de la cage d'écureuil.

I.5.3. Analyses vibratoires de la machine.

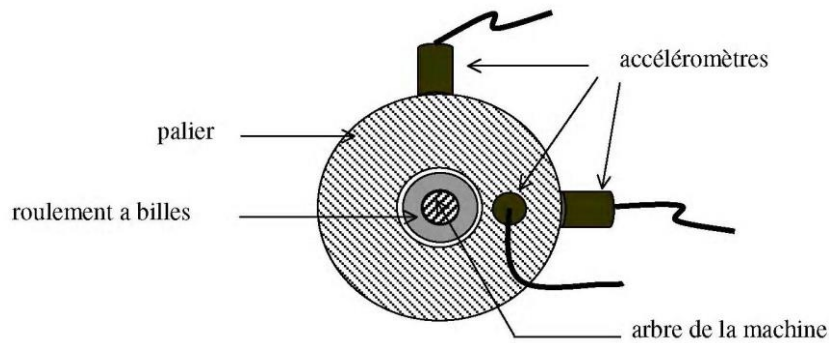


Figure. I.18. Mesures vibratoires sur la machine asynchrone [KHA09].

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales. Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts fréquemment rencontrés, notamment ceux mécaniques [CAS03]. Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients [OND06]:

- Problème d'accessibilité,
- Difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut.

De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant.

Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux.

I.5.4. Analyse des flux.

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion est donc affectée par tout déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique au rotor ou au stator. Le flux d'entrefer et par-là même l'induction magnétique dans cet entrefer, le flux embrassé dans les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés [CAS03].

Ces grandeurs sont difficilement mesurables mais des études ont été menées pour extraire des signatures spécifiques à certains défauts. L'étude des variations de flux peut donc être une solution pour détecter et localiser un défaut à travers de l'utilisation de bobines exploratrices placées à l'extérieur de la machine, perpendiculairement à l'axe du rotor.

I.5.5. Analyse du couple électromagnétique.

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique.

L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état du moteur [HAM06].

I.6.Conclusion

Dans ce chapitre on s'est concentré sur les constitutions de la machine asynchrone et aux quelques techniques de détection des défauts. Au vu de la diversité des défauts inhérents à la machine, les chercheurs de différents pays, pour le diagnostic avaient consacré une quantité d'heure significative et d'énergie pour aboutir à meilleure technique de diagnostic.

Afin de bien diagnostiquer une machine de type asynchrone, nous avons besoin d'un modèle mathématique qui fait mettre à notre main une souple étude de simulation. Le deuxième chapitre sera l'objectif d'obtenir les équations de la machine.

II.1. Introduction.

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone pour objectif de commander et de dimensionner l'entraînement électrique ont été l'objet de nombreux travaux. On dit qu'on peut modéliser un processus physique, si on est capable de prédire quelle est son comportement (sortie) lorsqu'on le soumet à une sollicitation (entrée) connue.

Pour des raisons de commodité pratique, le modèle sera mathématique afin d'être simulé sur calculateur numérique. On cherche donc une relation mathématique qui lie les variables d'entrée et celles de sortie. Cette relation mathématique prend une certaine forme qui définit la structure du modèle.

Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Ainsi la modélisation permet de guider les développements par une quantification des phénomènes.

Pour obtenir le modèle d'un système ; trois tâches doivent être accomplies :

- Choisir le modèle.
- Déterminer ses paramètres.
- Vérifier sa validité.

L'élaboration d'un modèle de la machine asynchrone triphasé nous permettra de simuler la machine à l'aide du logiciel (MATLAB/SIMULINK).

II.2. Modélisation de la machine asynchrone.

II.2.1. Présentation du modèle.

La machine est constituée de deux parties; le circuit électrique et le circuit magnétique. Le circuit électrique est constitué de trois bobinages fixes décalés entre elles de 120° répartis au stator alimentés en tension triphasée, le rotor de la machine est constitué d'un bobinage rotorique comme le stator décalés entre elles de 120° mais en court-circuit ou des barres court-circuitées et disposées en cage d'écureuil (dans le cas d'une machine à cage d'écureuil).

Pour notre étude le choix est porté sur une machine d'un rotor bobiné.

Tout type de modélisation ne peut se faire sans effectuer quelques hypothèses simplificatrices

Les hypothèses simplificatrices admises dans le modèle de la machine asynchrone sont:

- ❖ La parfaite symétrie de la machine.
- ❖ L'alimentation est réalisée par un système de tension triphasées symétriques.
- ❖ Les pertes fer et les effets capacitifs sont négligées.
- ❖ les effets thermiques sont négligeables (les résistances des enroulements ne variant pas avec la température) et l'effet de peau est négligeable.
- ❖ L'absence de saturation et de pertes dans le circuit magnétique (l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables).
- ❖ Un circuit magnétique linéaire (la perméabilité du fer très grande devant 1).
- ❖ Le stator est considéré comme lisse et l'entrefer constant, la répartition de la force magnétomotrice dans l'entrefer est supposée sinusoïdale (l'effet des encoches est négligé).

II.2.2. Modèle triphasée (abc).

Nous pouvons représenter la machine asynchrone schématiquement dans l'espace par les trois enroulements de phase du stator a_s, b_s, c_s , ainsi, que les trois enroulements du rotor a_r, b_r, c_r , θ est l'angle électrique entre l'axe de la phase a statorique et phase a rotorique comme donnée dans la **figure (II.1)**.

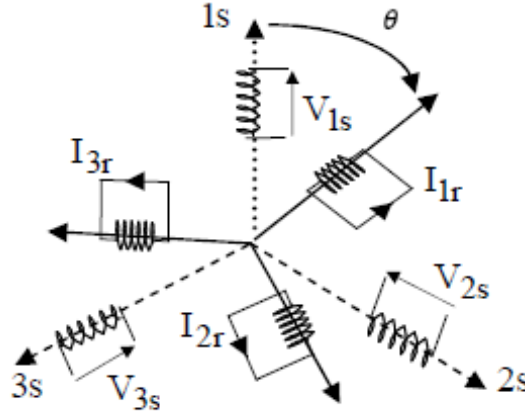


Figure II.1. Représentation symbolique de la machine asynchrone.

II.2.2.1. Les équations électriques de MAS.

La loi de Faraday permet d'écrire:

$$v = Ri + \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Pour les hypothèses simplificatrices précédant, les équations de tension statorique sont :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

et pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = 0 = R_r I_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = 0 = R_r I_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = 0 = R_r I_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont nulles.

On résume les équations précédentes en forme matricielle:

▪ Pour le stator:

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (II.4)$$

▪ Pour le rotor:

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

- $[V_s]$, $[V_r]$: vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.
- $[I_s]$, $[I_r]$: vecteurs des courants statoriques et rotoriques.
- $[\varphi_s]$, $[\varphi_r]$: vecteurs des flux statoriques et rotoriques.
- $[R_s]$, $[R_r]$: matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Les matrices des résistances:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

II.2.2.2. La relations enter le flux et le courant.

Chaque flux comporte une interaction avec le courant de toutes les phases, on représente cette relation comme suit :

$$\begin{aligned} \varphi_{sa} &= L_s I_{sa} + M_s I_{sb} + M_s I_{sc} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \\ \varphi_{sb} &= L_s I_{sb} + M_s I_{sa} + M_s I_{sc} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \\ \varphi_{sc} &= L_s I_{sc} + M_s I_{sa} + M_s I_{sb} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \end{aligned} \quad (II.6)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{ra} &= L_r I_{ra} + M_r I_{rb} + M_r I_{rc} + M_{rs} I_{as} + M_{rs} I_{bs} + M_{rs} I_{cs} \\ \varphi_{rb} &= L_r I_{rb} + M_r I_{ra} + M_r I_{rc} + M_{rs} I_{as} + M_{rs} I_{bs} + M_{rs} I_{cs} \\ \varphi_{rc} &= L_r I_{rc} + M_r I_{ra} + M_r I_{rb} + M_{rs} I_{as} + M_{rs} I_{bs} + M_{rs} I_{cs} \end{aligned} \quad (II.7)$$

En forme matricielle:

$$[\varphi_s] = [L_s] \cdot [I_{sabc}] + [L_{sr}] \cdot [I_{rabc}] \quad (\text{II.8})$$

$$[\varphi_r] = [L_r] \cdot [I_{rabc}] + [L_{rs}] \cdot [I_{sabc}] \quad (\text{II.9})$$

Avec:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_s & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

- L_s, L_r : inductances propres statoriques et rotoriques,
- M_s : inductance mutuelle entre deux phases du stator,
- M_r : inductance mutuelle entre deux phases du rotor.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor :

$$[M_{rs}] = [L_{sr}]^t$$

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Où M_{sr} est la valeur maximale.

II.3. Modèle de PARK.

La représentation de la machine asynchrone avec un modèle dans le plan (a,b,c) est complexité et très difficile pour l'étude et la détermination des grandeurs de la machine, pour cela il faut utiliser une transformation triphasée-biphasée pour simplifier cette étude.

La transformation de Park, représente la projection des trois phases de la machine sur un repère biphasé orthogonal en plus des simplifications, pour faire le passage d'une représentation triphasée à une représentation biphasée en utilisant la matrice de transformation $[P]$. Ce modèle basé sur la transformation des enroulements triphasé réel a, b, c en des enroulements fictifs d, q avec une conversion des forces magnétomotrices.

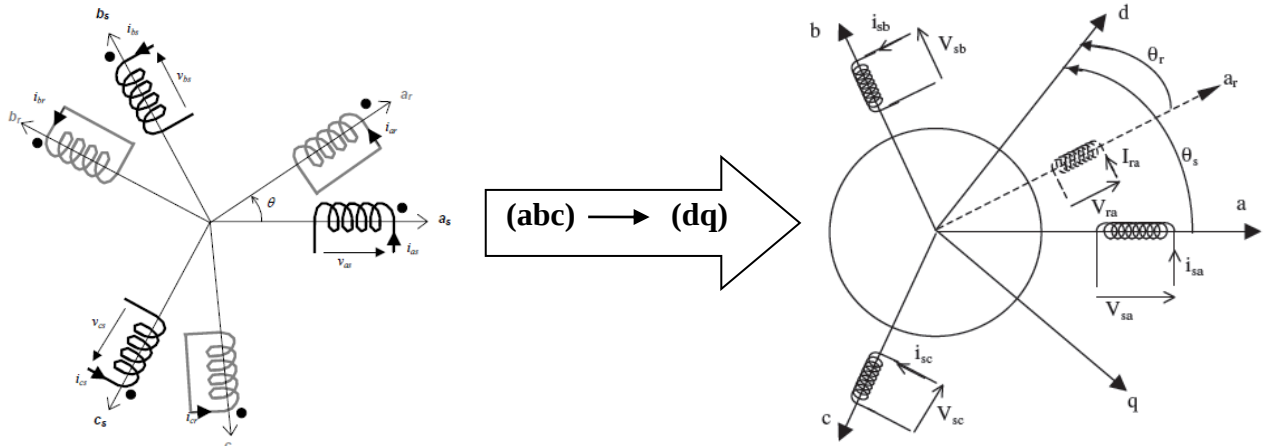


Figure. II.2. transformation le repère (abc) en (dq)

La matrice de Park de transformation est définie pour les courants, les tensions et les flux comme suit:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

La transformation permet de passer du repère abc vers le repère $\alpha\beta$ puis vers le repère dq , le repère $\alpha\beta$ est toujours fixé par rapport le repère abc , par contre le repère dq est mobile. Il forme avec le repère fixé $\alpha\beta$ un angle de la transformation de Park ou angle de Park. [BAG05].

Les repères de la transformation de Park des grandeurs statorique est de grandeurs rotorique en liant les angles θ_s et θ_r par la relation $\theta_s = \theta + \theta_r$. [BAG05].

Les grandeurs statorique et rotorique sont transformés:

$$\begin{aligned} [V_{sdq}] &= P(\theta)[V_{sabc}] \\ [I_{sdq}] &= P(\theta)[I_{sabc}] \end{aligned} \quad (II.12)$$

$$\begin{aligned} [V_{rdq}] &= P(\theta)[V_{rabc}] \\ [I_{rdq}] &= P(\theta)[I_{rabc}] \end{aligned} \quad (II.13)$$

La machine asynchrone est modélisée dans le repère (dq) par les équations de tension suivantes:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \end{cases} \quad (II.14)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = 0 = R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_r - \omega) \cdot \phi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_r - \omega) \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (II.15)$$

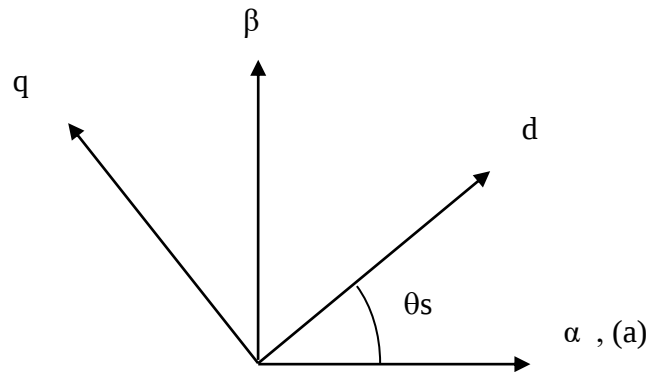


Figure II.3. transformation de Park est la position des axes.

II.3.1. Choix de référentiel.

Les équations de la machine peuvent être réécrites dans le repère $d - q$ à condition de choisir le référentiel [CAS03].

II.3.1.1. Repère lié au stator.

Pour un référentiel immobile par rapport au stator, la convention utilisée est:

$$\theta_s = 0; \theta_r = -\theta \quad \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = 0; \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega$$

On peut être utilisé pour étudier les grandeurs rotoriques et les régimes de démarrage et freinage de la machine.

Les équations des tensions:

❖ Au stator:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \end{cases} \quad (II.16)$$

❖ Au rotor:

$$\begin{cases} V_{rd} = 0 = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega \cdot \varphi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega \cdot \varphi_{rd} \end{cases} \quad (II.17)$$

II.3.1.2. Repère lié au rotor:

Pour un référentiel immobile par rapport au rotor

$$\theta_r = 0; \theta_s = \theta \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = 0; \frac{d\theta_s}{dt} = \omega$$

Ce système peut être utilisé pour étudier les grandeurs rotorique et les processus transitoires dans la machine asynchrone.

Les équations des tensions:

❖ Au stator:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega \cdot \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega \cdot \varphi_{sd} \end{cases} \quad (II.18)$$

❖ Au rotor:

$$\begin{cases} V_{rd} = 0 = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} \\ V_{rq} = 0 = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} \end{cases} \quad (II.19)$$

II.3.1.3. Repère lié au champ tournant.

Ce système tourne avec la vitesse du champ électromagnétique est utilisé dans la commande des machines. Il se traduit par les conditions :

$$\theta = \theta_s = \theta_r \quad \Rightarrow \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$$

Les équations des tensions:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega \cdot \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega \cdot \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega \cdot \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega \cdot \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

II.4. Equations mécaniques.

L'équation mécanique du mouvement dépend des caractéristiques de la charge qui peut différer largement d'une application à une autre. nous supposons ici pour simplifier, que le couple qui s'oppose à celui produit par la machine consiste seulement en un couple dû à l'inertie du rotor et un couple externe de charge qui est connu explicitement dans le cas de l'équation mécanique du mouvement.

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \omega_r \quad (\text{II.22})$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (\text{II.23})$$

Où θ_r l'angle de déplacement du rotor. J représente le moment d'inertie de la machine étudiée, ω_r sa vitesse rotorique, C_{em} son couple électromagnétique, f son frottement visqueux et C_r son couple de charge.

Le couple électromagnétique est déduit de la co-énergie magnétique W_{co} à l'aide de l'équation suivante:

$$C_{em} = \left[\frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_r} \right]_{(I_s, I_r \text{ constants})} \quad (\text{II.24})$$

II.5. Résultats de la simulation de la machine asynchrone.

Pour réaliser cette simulation nous traduisons le modèle représenté par les équations précédentes sous forme de structure en schéma-bloc que nous présentons par la figure (2.6)

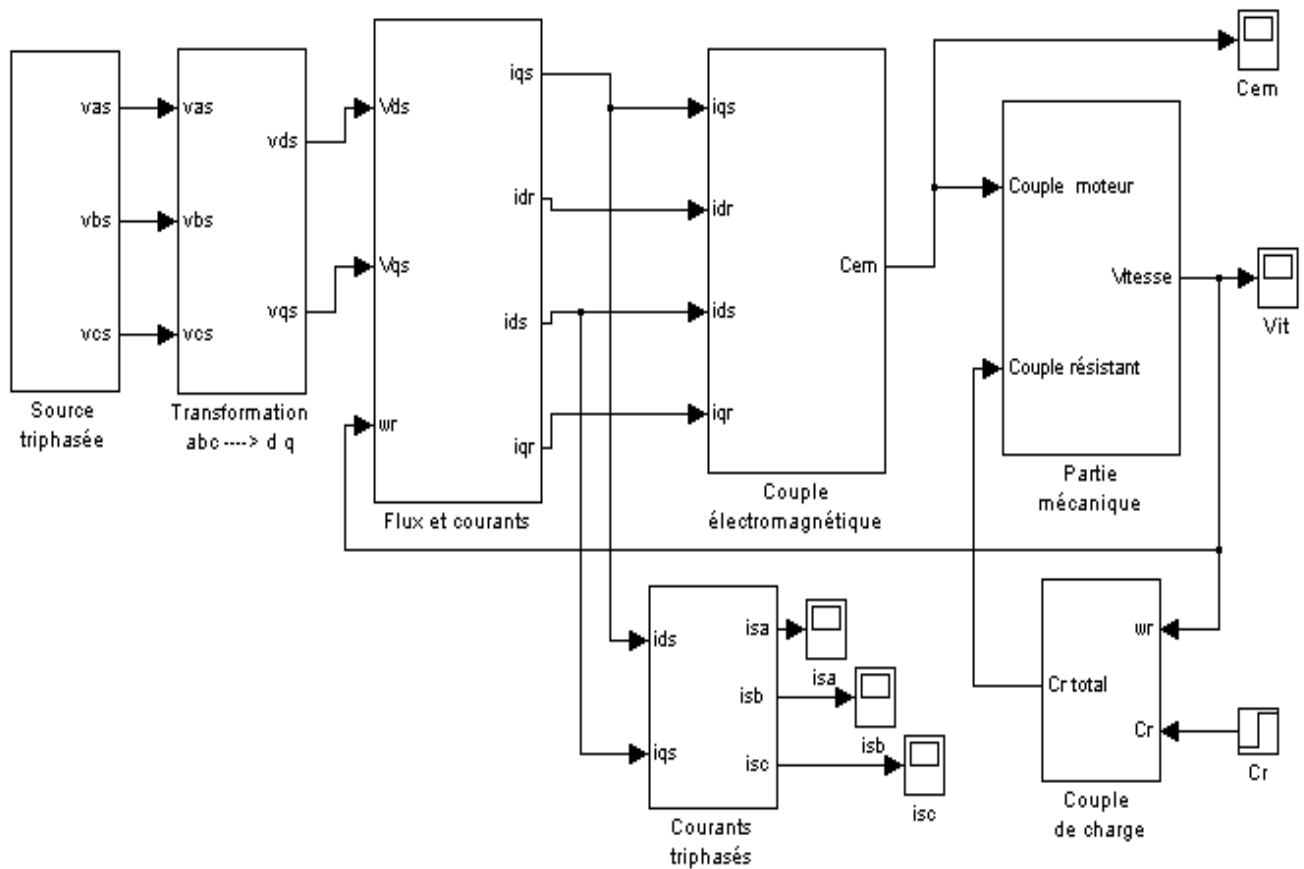


Figure II.4. Modèle SIMULINK d'un moteur asynchrone.

Les figures suivantes illustrent les simulations effectuées sur une MAS dont les paramètres sont donnés en annexe. Ces figures présentent les principales caractéristiques de la MAS pour un fonctionnement à vide, puis en charge.

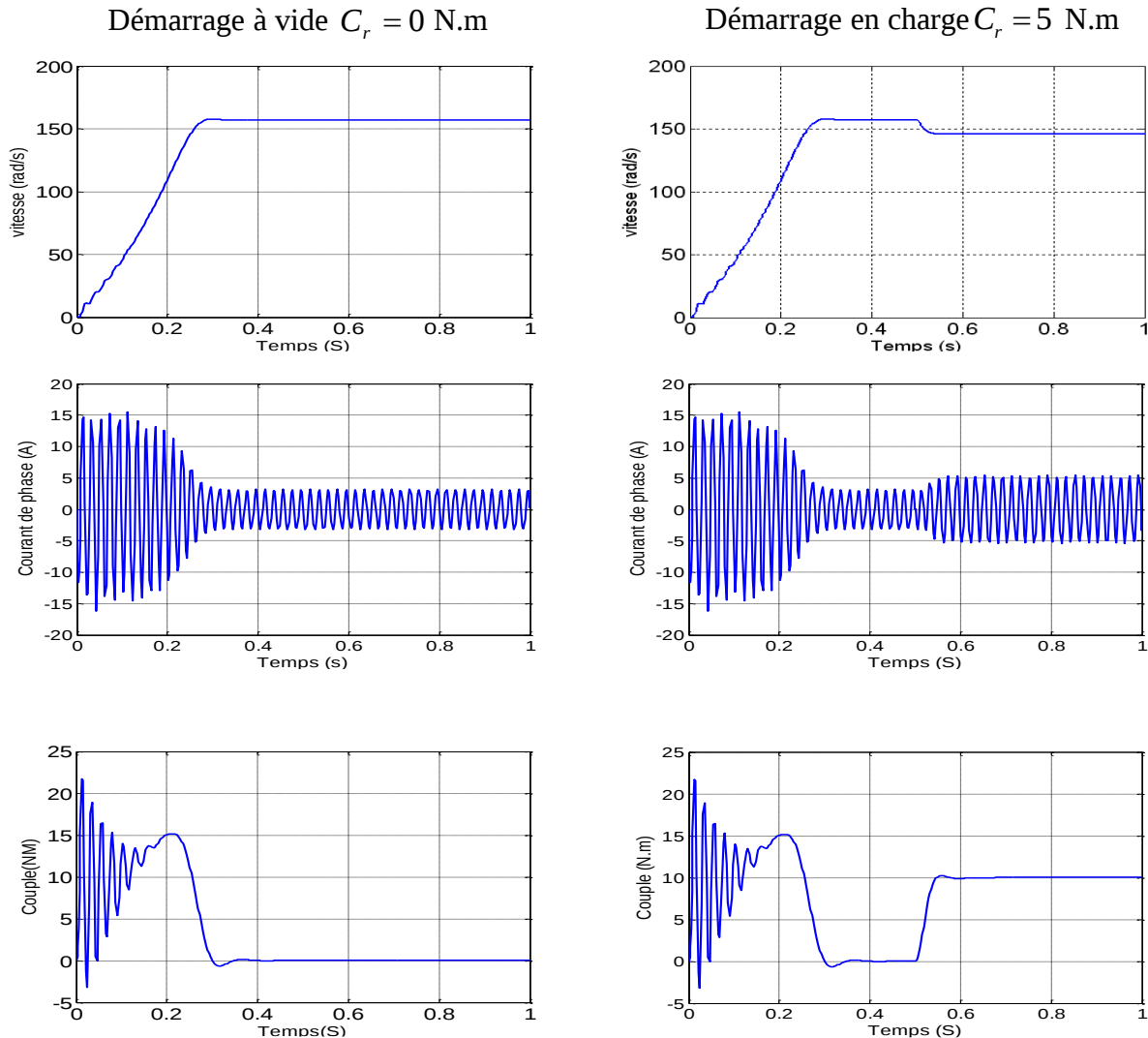


Figure II.5. Fonctionnement à vide et en charge de la MAS.

La figure (II.5) présente les résultats de simulation de la machine asynchrone alimentée directement par le réseau standard « 220/380V ,50HZ ». Dans un premier lieu sans l'application de perturbation et un autre essai avec l'application de la perturbation.

L'examen des courbes permet de constater que le démarrage à vide avec une tension nominale nous donne :

L'allure de la caractéristique de vitesse présente des oscillations dans le premier instant de démarrage avec un accroissement presque linéaire, puis se stabilise à la valeur désirée. Après un

temps d'environ 0.6 s la vitesse de rotation s'établit à une valeur proche de la vitesse de synchronisme.

Pendant le régime transitoire, le couple est fortement pulsatif, présent au premier instant de démarrage, des battements importants suivi d'un nombre d'oscillations avant de se stabiliser à zéro.

Les courants statoriques présentent des oscillations successives autour de zéro avec une amplitude maximale de (12A) jusqu'à 0.6 s. Après ce temps l'amplitude de ces oscillations est diminuée jusqu'à 3A.

Pour, une perturbation de couple ($C_r=5\text{N.m}$) appliquée à l'arbre du moteur, les résultats de simulation correspondants sont regroupés également dans la même figure (II.4)

Lors de l'application de charge, le couple électromagnétique rejoint sa valeur de référence pour compenser cette sollicitation avec une réponse quasiment instantanée. Avant de se stabiliser à la valeur du couple résistant nominal.

On constate une décroissance de vitesse rotorique qui se traduit par un glissement. Ce qu'est un résultat évident (la vitesse augmente pour les sous charge et diminue pour les sur charge en fonctionnement en BO)

Les courants statoriques évoluent selon la charge appliquée à l'arbre du moteur.

II.6. La machine sous un défaut de roulement.

Afin d'avoir comment réagir notre système sous un défaut de roulement, l'application de ce dernier est l'objet de ce titre.

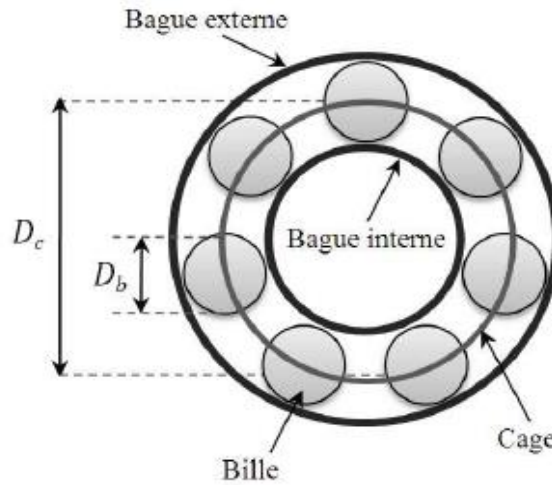


Figure II.6. Structure d'un roulement

D_c : diamètre de la cage

D_b : diamètre d'une bille

N_b : nombre de billes.

Chaque type de défaut a sa propre signature et est caractérisé, pour consulté les harmonique dans le spectre de courant statorique nous avons les frequence carctéristique des different défaut de roulement qui sont donnée par les formule suivant :

Défaut de bague externe :

$$f_{Bex} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \right) \quad (II.25)$$

Défaut de bague interne :

$$f_{Bin} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \right) \quad (II.26)$$

Défaut de bille :

$$f_{Bille} = \frac{D_c}{2D_b} f_r \left(1 + \frac{D_b^2}{D_c^2} \right) \quad (II.27)$$

Défaut de cage :

$$f_{cage} = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \right) \quad (II.28)$$

On va présenter les résultats de monsieur Blodt [BLD08] pour ce genre de défaut.

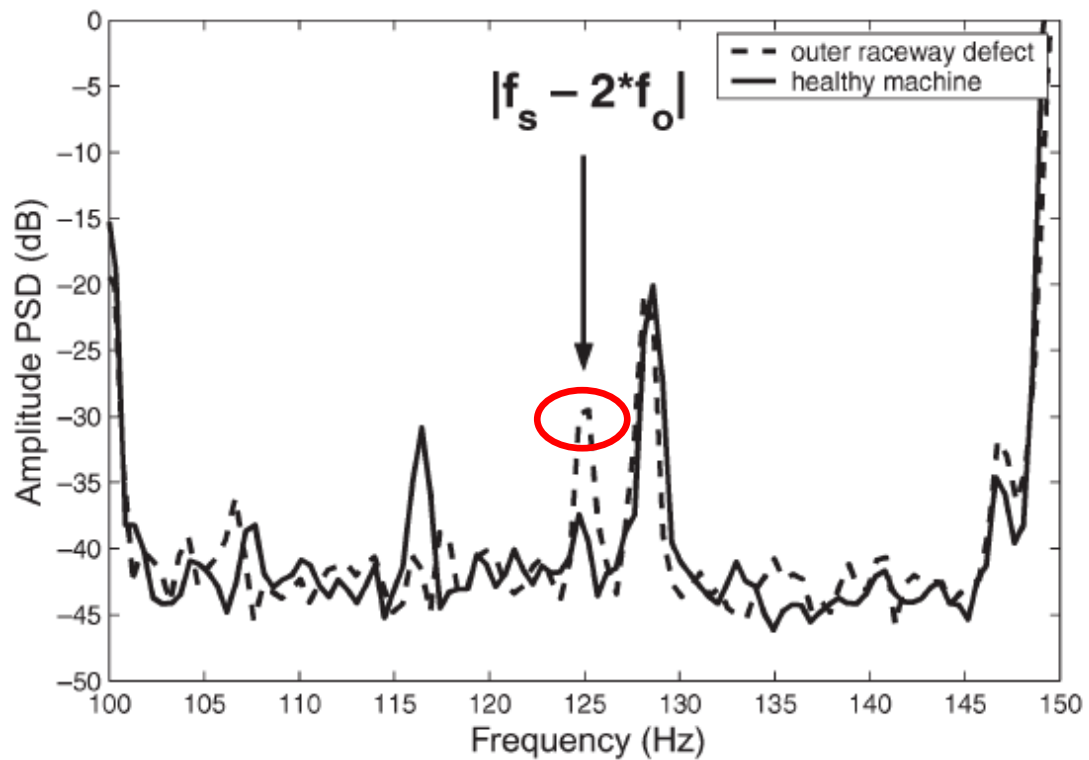


Figure II.7. Spectre de courant statorique sous un défaut au niveau de bagues extérieures.

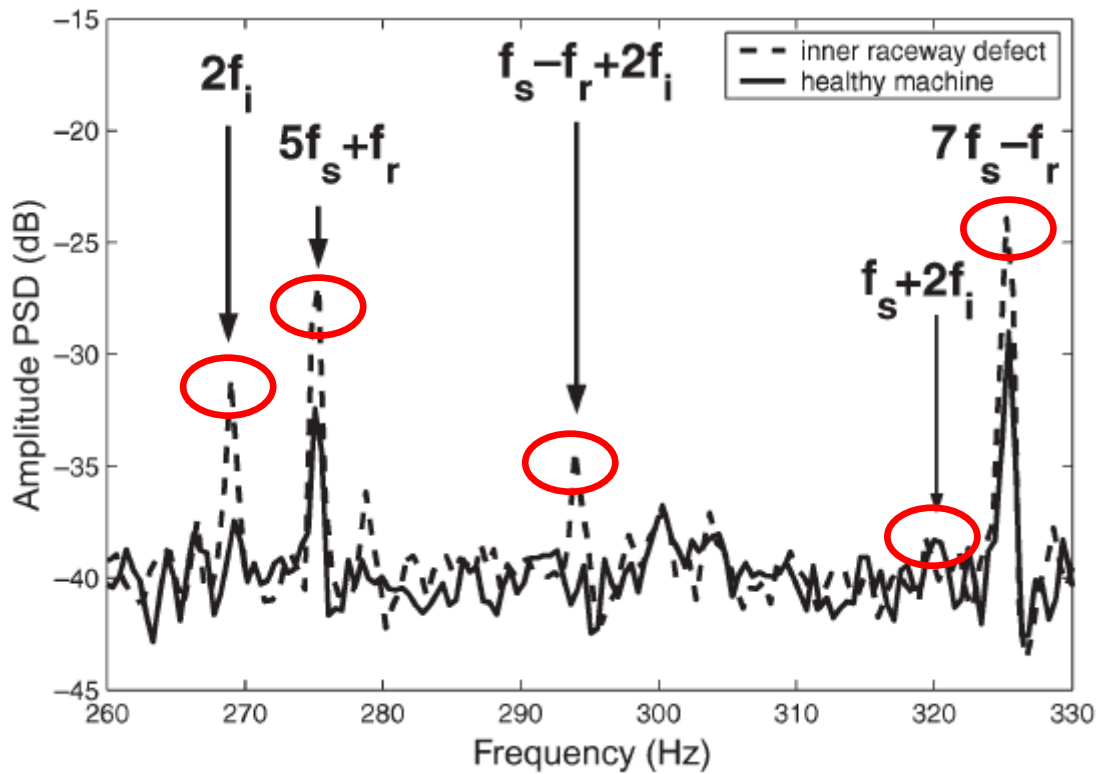


Figure II.8. Spectre de courant statorique sous un défaut au niveau de bagues intérieures.

La base donc de ce FFT c'est de vérifier les fréquences caractéristiques sous de formule dépend de fréquence statorique et rotorique plus le glissement.

D'après ces résultats expérimentaux nous avons pris une idée sur la méthode qui appuie sur l'analyse spectrale du courant du stator sous forme de FFT.

Tel que la figure II.7 présente un défaut de roulement de bague extérieur, et quelques indications aux harmoniques ou bien les fréquences supplémentaires à cause du défaut. Mais la figure II.8 est orientée au défaut de bague intérieur.

II.7.Conclusion.

Dans ce chapitre, on a introduit les hypothèses de travail et la transformation de Park. Ce qui nous a permis de donner le modèle de la machine asynchrone disponible dans la littérature.

C'est le modèle électrique basé sur le circuit électrique équivalent de la machine asynchrone.

Ce chapitre nous a permis aussi de valider le modèle établi et de vérifier que les simulations effectuées par le logiciel MATLAB sont valables, plus une confirmation des fréquences causées par le défaut des bagues extérieur ou intérieur.

Conclusion générale

L'intérêt grandissant des industriels pour la maintenance des entraînements électriques justifie l'accent mis par la recherche sur le diagnostic des machines asynchrones, mais la complexité des systèmes mis en jeu et compte tenu de la fréquence d'utilisation des machines asynchrones dans l'industrie, la détection précoce des défauts dans ces machines est devenue un enjeu économique important. La fondamentale approche sous l'angle nouveau du diagnostic nécessite aujourd'hui un travail préalable de modélisation et de simulation des défauts de la machine.

C'est aussi dans cet esprit que nous avons entrepris notre travail, qui s'articule autour de la modélisation : modélisation pour la simulation des défauts de roulements.

Le travail présenté dans ce mémoire expose un principal point qui est l'état de l'art de diagnostic, puis l'apport d'un modèle dédié au diagnostic sur les défauts de roulements et leur effet sur les courants statoriques.

[ALI09]: Ali IBRAHIM "Contribution au diagnostic de machines électromécaniques Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée" Thèse de Doctorat université de SAINT ETIENNE 10 Mars 2009.

[ALL88]: "Présentation des avaries. Machines électriques tournantes" cahier des préventions. CP2, Allianz, 1988.

[BAG05]: L.BAGHLI "Modélisation et commande de la machine asynchrone" IUFM de Lorraine -UHP

[BLD08]: Martin Blödt, Member, IEEE, Pierre Granjon, Bertrand Raison, Member, IEEE, et Gilles Rostaing "Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring" IEEE Transactions on industrial electronics , VOL.55, No.4, APRIL08

[BON92]: Bonnett, A.H.; Soukup, G.C "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors", Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume: 28, Issue: 4, July-Aug. 1992, Pages: 921 – 937.

[BOU09]: Abla Bouguerne "Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones" Mémoire Magister 2009 Université MENTOURI – CONSTANTINE.

[CAS03]: R. Casimir, "Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes" Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, CEGELY, 2003.

[CHE96]: Z. Chen, J. C. Cuneo, J. J. Mecholsky Jr., S. Hu, "Damage processes in Si₃N₄ bearing material under contact loading", Wear, vol. 198, no. 1-2, Octobre 1996, pp. 197-207.

[DID04]: G. Didier « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2004.

[GUY96]: R. A. Guyer, "Rolling Bearings Handbook and Troubleshooting Guide, Chilton Book Compagny", Radnor, Pennsylvania, 1996.

[HAM06]: E.S. Hamdi « Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage ». Thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2006.

[KHA09]: KHATIR Abdelfattah "Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts" Mémoire magister université FERHAT ABBAS – SETIF UFAS 11 / 04 / 2009.

[KER 84]: L. Kerszenbaum et C. F. Landy, "The existence of large inter bar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and en-ring faults" IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-103, n°7, pp.1854- 1862, July 1984.

[MOR06]: Y. Mori, "Electronique pour le traitement du signal, volume 2 - Notions de signal et de bruit", Hermes, Lavoisier, Paris, 2006.

[NEZ06]: M. Nezar « Diagnostic des associations convertisseurs statiques machine asynchrone en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle ». Thèse de doctorat, université de Batna, 2006.

[NTX05]: Nandi, H. A. Toliyat, and L. Xiaodong "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review". IEEE Trans. Energy Convers. vol. 20(no. 4):pp. 719–729, December 2005.

[O'DO85]: P. O'Donnell, "Report of large reliability survey of industrial and commercial installations, Part 1", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA 21, N°4, July/August 1985 pp 853 – 864.

[OND06]: O. Ondel, "Diagnostic par Reconnaissance des Formes: Application a un Ensemble Convertisseur-Machine ", Thèse de Doctorat, L'Ecole Centrale de Lyon, Octobre 2006.

[THO95]: O.V. Thorsen, M. Dalva, "A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.31, no.5, pp.1186-1196, September 1995.

[TRA09]: Baptiste TRAJIN "Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones " thèse doctorat université de TOULOUSE 1 Décembre 2009.

Introduction général

Chapitre I

Etude de la machine asynchrone et ses défauts

Chapitre II

La modélisation et la simulation de la MAS

Conclusion générale

Références bibliographiques

Sommaire

Remerciement

Table de figure

Résumé