



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
Et de la Recherche scientifique
Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued
Faculté de la Technologie



Mémoire de Fin d'Études
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Machines électriques

Mémoire

Diagnostic d'un moteur asynchrone d'un compresseur à piston

Réalisé par:

- *DERBALI Belgacem*
- *BADJADI Chouaib*

Encadré par:

Dr : ALLAL Abderrahim

Soutenu en 17 Juin 2021

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Allah Le Tout Puissant d'avoir nous donné le courage, la force et la persévérance d'achever ce travail.

Nous tenions à remercier vivement notre encadreur,

*Monsieur "**Allal Abderrahim**", pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa contribution générale à l'élaboration de ce travail.*

Nous souhaiterons également remercier nos enseignants de la faculté de la technologie

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements tous nos proches et amis qui nous ont toujours soutenu et encouragé pour la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie cette thèse à :

 *mes chers parents pour leur amour et leur soutien.*

Que Dieu leur procure bonne santé et longue vie,

 *tous mes frères et sœurs,*

 *ma femme*

 *mes filles : Rawane et Djana*

 *toute ma famille et tous mes amis,*

DERBALI Belgacem

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

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

A mes frères.

Je leur souhaite tout succès...tout le bonheur

A mes amis et mes camarades

*Pour une sincérité merveilleuse....jamais oubliable, en leur
souhaitant Tout le succès...tout le bonheur.*

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du

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

A toute personne

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

• *BADJADI Chouaib*

LISTE DES FIGURES

Chapitre I		
Figure I.1	<i>Machine asynchrone</i>	6
Figure I.2	<i>Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil</i>	7
Figure I.3	<i>Vue schématique en perspective du stator</i>	8
Figure I.4	<i>Stator moteur asynchrone</i>	8
Figure I.5	<i>Rotor à cage</i>	9
Figure I.6	<i>Vue schématique en perspective du rotor</i>	9
Figure I.7	<i>Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage</i>	11
Figure I.8	<i>Proportion des défauts</i>	12
Figure I.9	<i>Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances</i>	13
Figure I.10	<i>Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances</i>	13
Figure I.11	<i>Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage</i>	14
Figure I.12	<i>Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage</i>	15
Figure I.13	<i>Différents types de défauts d'enroulements statorique</i>	17
Figure I.14	<i>Ruptures de barre rotor</i>	19
Figure I.15	<i>Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone</i>	20
Figure I.16	<i>Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique</i>	20
Figure I.17	<i>Défauts d'excentricité : (a) statique, (b) dynamique, (c) mixte</i>	21
Figure .I.18	<i>Dimensions du roulement à billes</i>	23
Figure .I.19	<i>Compresseur à piston</i>	23
Figure .I.20	<i>Cycle de compression d'un compresseur à piston</i>	23

Chapitre II		
Figure II.1	<i>Structure de la cage de rotor de la machine asynchrone</i>	31
Figure II.2	<i>Induction magnétique produite par une maille rotorique</i>	31
Figure II.3	<i>Position de la maille "k" par rapport à la bobine statorique de la phase "a"</i>	32
Figure II.4	<i>Schéma électrique équivalent d'une maille rotorique</i>	35
Figure II.5	<i>Modèle multi-enroulement équivalent de la cage rotorique</i>	37
Figure II.6	<i>Modèle général de court- circuit dans le repère de Park lié au rotor</i>	46
Figure II.7	<i>Excentricité statique dans une machine asynchrone</i>	48
Chapitre III		
Figure III.1	<i>Courant de trois phases statorique moteur à l'état sain avec default</i>	54
Figure III.2	<i>Courant de trois phases statorique moteur à l'état sain</i>	54
Figure III.3	<i>Couple électromagnétique d'un moteur à l'état sain</i>	54
Figure III.4	<i>Couple électromagnétique d'un moteur à l'état avec default</i>	55
Figure III.5	<i>Courant de trois phases statorique moteur à l'état sain</i>	55
Figure III .6	<i>Courant statorique moteur à l'état</i>	56
Figure III.7	<i>Couple électromagnétique d'un moteur à l'état sain</i>	56
Figure III .8	<i>Couple électromagnétique d'un moteur à l'état avec default</i>	57
Figure III .9	<i>Spectre logarithmique du courant (moteur avec faible charge)</i>	58
Figure III .10	<i>Spectre logarithmique du courant (moteur avec moyenne charge)</i>	58
Figure III .11	<i>Spectre logarithmique du courant (moteur avec plain charge)</i>	59
Figure III .12	<i>Courbe de détection du défaut rotorique</i>	59

NOTATION ET SYMBOLES

f_{cc} : fréquence de court-circuit [Hz]

f_s : fréquence d'alimentation [Hz]

g : glissement

k : entier naturel (=1, 2, 3...)

p : nombre de pair de pôles

f_{bc} : fréquence défaut de barre cassée [Hz]

f_{exe} : fréquence défaut d'excentricité [Hz]

f_{roul} : fréquence défaut des roulements [Hz]

f_v : fréquences caractéristiques des vibrations [Hz]

D_b : diamètre de la bille [m]

D_p : diamètre du palier [m]

β : angle de contact [rd]

N_s : nombre de spires statoriques par phase

n_{ccq} : Nombre de spires en court-circuit

θ_{ccq} : Angle du bobinage en court-circuit

$Q(\theta_{ccq})$: Matrice situant l'angle du bobinage en court-circuit

i_s : courant d'une phase statorique [A]

θ : position [rd]

e : épaisseur de l'entrefer [m]

ε_s : Degré d'excentricité statique

O_s : Centre du stator

O_c : Centre autour duquel tourne la trace O_r du rotor

O_r : Trace du rotor excentré

μ_0 : perméabilité magnétique de l'air [H.m⁻¹]

B_s : induction magnétique créée dans l'entrefer par le courant statorique [T]

R : rayon moyen de l'entrefer [m]

l : longueur active du circuit magnétique [m]

L_{sp} : inductance propre statorique [H]

L_{sf} : inductance de fuite rotorique [H]

N_r : nombre de barres rotoriques

L_b : inductance d'une barre rotorique [H]

L_e : inductance total de l'anneau de court-circuit [H]

L_{sc} : inductance cyclique statorique [H]

L_{rc} : inductance cyclique rotorique [H]

R_e : résistance totale de l'anneau de court-circuit [Ω]

I_e : courant dans l'anneau de court-circuit [A]

i_{bk} : courant de la barre k [A]
 i_{rk} : courant de maille rotorique k [A]
 i_{ek} : courant dans une portion d'anneau k [A]
 i_a, i_b, i_c : courants des phases statoriques [A]
 α : angle électrique entre deux mailles rotoriques [rd]
 M_{sr} : mutuelle cyclique entre le stator et rotor [H]
 ω_s : pulsation des grandeurs statoriques [rd/s]
 ω_r : vitesse de rotation mécanique [rd/s]
 R_r : résistance de l'enroulement rotorique [Ω]
 R_s : résistance de l'enroulement statorique [Ω]
 d, q : indices pour les composantes de Park directe et quadrature, respectivement
 α, β : indices pour les composantes de Clarke
 s, r : indices stator et rotor respectivement
 C_e : couple électromagnétique [N.m]
 C_r : couple mécanique résistant [N.m]
 J : moment d'inertie [kg.m²]
 R_{bfk} : résistance de la barre défaillante k [Ω]
 R_b : résistance d'une barre rotorique à l'état sain [Ω]
 x : vecteur d'état
 u : vecteur de commande
 $\Phi_{dr,qr}$: flux rotoriques diphasés dans le repère (d, q) [Wb]
 $\Phi_{\alpha r, \beta r}$: flux rotoriques diphasés dans le repère (α, β) [Wb]
 T_r : constante de temps rotorique
 T_s : constante de temps statorique
 y : vecteur de sortie
 $i_{ds,qs}$: courants statoriques diphasés dans le repère (d, q) [A]
 $i_{\alpha s, \beta s}$: courants statoriques diphasés dans le repère (α, β) [A]
 $\wedge$: valeurs estimées
 r_p : degré relatif du système
 t : temps [s]
 $r_{\omega,i}$: Résidus de la vitesse et du courant

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Notations et symboles

Sommaire

Introduction générale.....01

Chapitre I

Etat de l'art sur le diagnostic de défauts de la machine asynchrone

I.1 Introduction.....	05
I.2 La machine asynchrone.....	05
I.2.1 Constitution de la machine asynchrone	06
I.2.1.1 Le stator.....	07
I.2.1.2 Le rotor à cage.....	09
I.2.1.3 Les organes mécaniques.....	10
I.2.2 Principe de fonctionnement.....	10
I.2.3 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone.....	12
I.3. Défauts internes et externes.....	14
I.3.1. Défaillances au stator.....	16
I.3.1.1. Défauts d'isolant dans un enroulement.....	16
I.3.2.2. Court-circuit entre spires.....	17
I.3.2.3. Court-circuit entre phases-bâti.....	17
I.3.2.4. Court-circuit phase-bâti.....	18
I.3.2. Défauts de rotor.....	18
I.3.2.1. Ruptures de barres.....	19
I.3.2.2. Ruptures d'anneaux.....	19
I.3.2.3. Excentricité statique et dynamique.....	19
I.3.3. Défaillances mécaniques.....	20
I.3.3.1. Défauts des roulements.....	22
I.3.3.2. Autres défaillances mécaniques.....	22
I.4. Aperçu sur les méthodes de diagnostic des défauts.....	24
I.4.1. Méthodes de diagnostic avec modèle.....	24
I.4.1.1 surveillance à base des observateurs (estimateurs)	24
I.4.1.2 surveillance par projection dans l'espace de parité.....	24
I.4.1.3 surveillance par estimation paramétrique.....	24
I.4.2. Méthodes de diagnostic sans modèle	24
I.4.2.1. Analyse vibratoire de la machine.....	24
I.4.2.2. Analyse des courants statorique.....	25
I.4.2.3. Analyse du vecteur de Park.....	25
I.4.2.4. Analyse du couple électromagnétique.....	25

I.4.3. Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI)	26
I.5. Compresseur à piston (système bille-manivelle)	27
I.5.1. Historique d'un compresseur	27
I.5.2. Les types des compresseurs à piston	27
I.5.2.1. Compresseur à piston simple effet	27
I.5.2.2. Compresseur à piston double effet	27
I.5.2.3. Compresseur à piston étagée	28
I.5.2.4. Compresseur à piston différentielle	28
I.5.3. Cycle de compression	28
I.5.3.1. Compression	28
I.5.3.2. Refoulement	28
I.5.3.3. Expansion	28
I.5.3.4. Aspiration	28
I.5.4. Principes de fonctionnement d'un compresseur	29
I.5.4.1. Les principes de base	29
I.5.4.2. Le descriptif des composants	30
I.6. Conclusion	31

Chapitre II

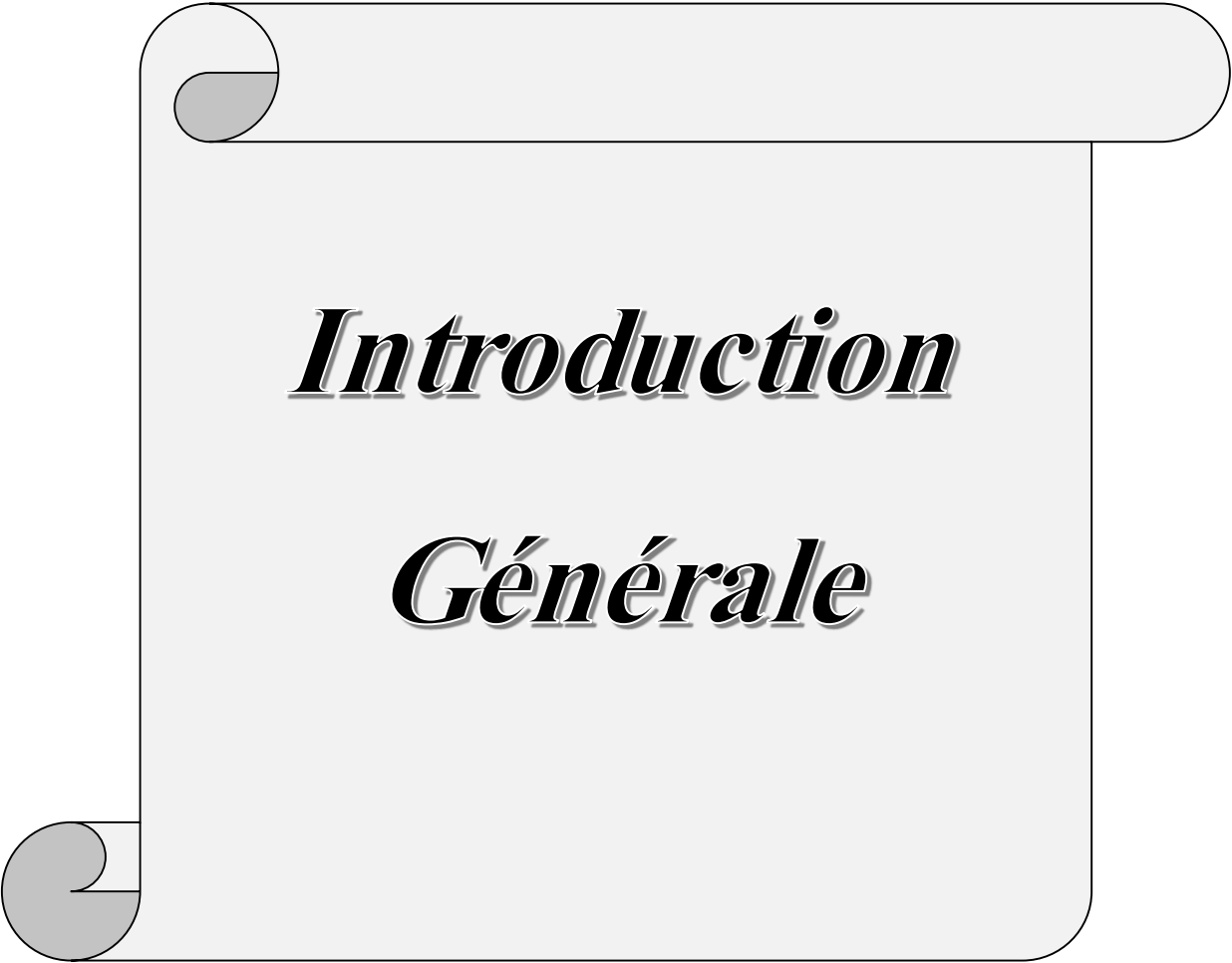
Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone à cage avec défaut rotorique

II.1. Introduction	33
II.2. Modèle multi-enroulement de la machine	33
II.2.1. Calcul des inductances	34
II.2.1.1. Partie statorique	34
II.2.1.2. Partie rotorique	35
II.2.1.3. Mutuelles inductances entre stator/rotor	37
II.2.2. Mise en équation	39
II.2.2.1. Equations statorique	39
II.2.2.2. Equations rotorique	40
II.3. Modèle réduit de la machine asynchrone à cage tenant compte des défauts	43
II.3.1. Modèle réduit de la machine tenant compte des défauts des cassures de barres rotorique	46
II.3.2. Simulation numérique : cas d'un défaut rotorique	47
II.3.3. Modèle réduit de la machine tenant compte du défaut de court-circuit statorique	47
II.4. Prise en compte du défaut d'excentricité statique de la machine asynchrone	49
II.5. Prise en compte des défauts dans le modèle	50
II.6. Conclusion	51

Chapitre III

Résultat de simulation

III.1 Introduction	53
III.2. Résultats de simulation de la machine asynchrone	53
III.2.1. Résultats de simulation d'un fonctionnement sain	55
III.2.2. Résultats de simulation d'un fonctionnement avec défaut rotorique.....	57
III. 3. Résultats de simulation d'un fonctionnement avec charge variable	57
III. 3.1. Faible charge	58
III .3.2. Moyenne charge.....	58
III .3.3. Plain charge	59
III.4. Prise en compte de trois défauts simultanés dans la machine asynchrone.....	60
III.5. Conclusion.....	60
<i>Conclusion générale</i>	60
<i>Bibliographie</i>	



Introduction

Générale

Introduction générale :

Actuellement, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique. Des applications de la machine asynchrone à vitesse variable, ont vu le jour dans divers domaines en l'occurrence l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision. Toutefois, cette machine peut être affectée par des défauts potentiels qui se répercutent sur la sécurité de la production, la qualité du service et la rentabilité des installations. Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machines.

La surveillance d'un dispositif implique le diagnostic des défauts : il consiste en la détection d'un changement anormal dans le comportement ou l'état d'un système et dans la localisation de sa cause. Le but est de garantir la sécurité et la continuité de service et d'enregistrer les événements utiles pour la maintenance curative ou le retour d'expérience.

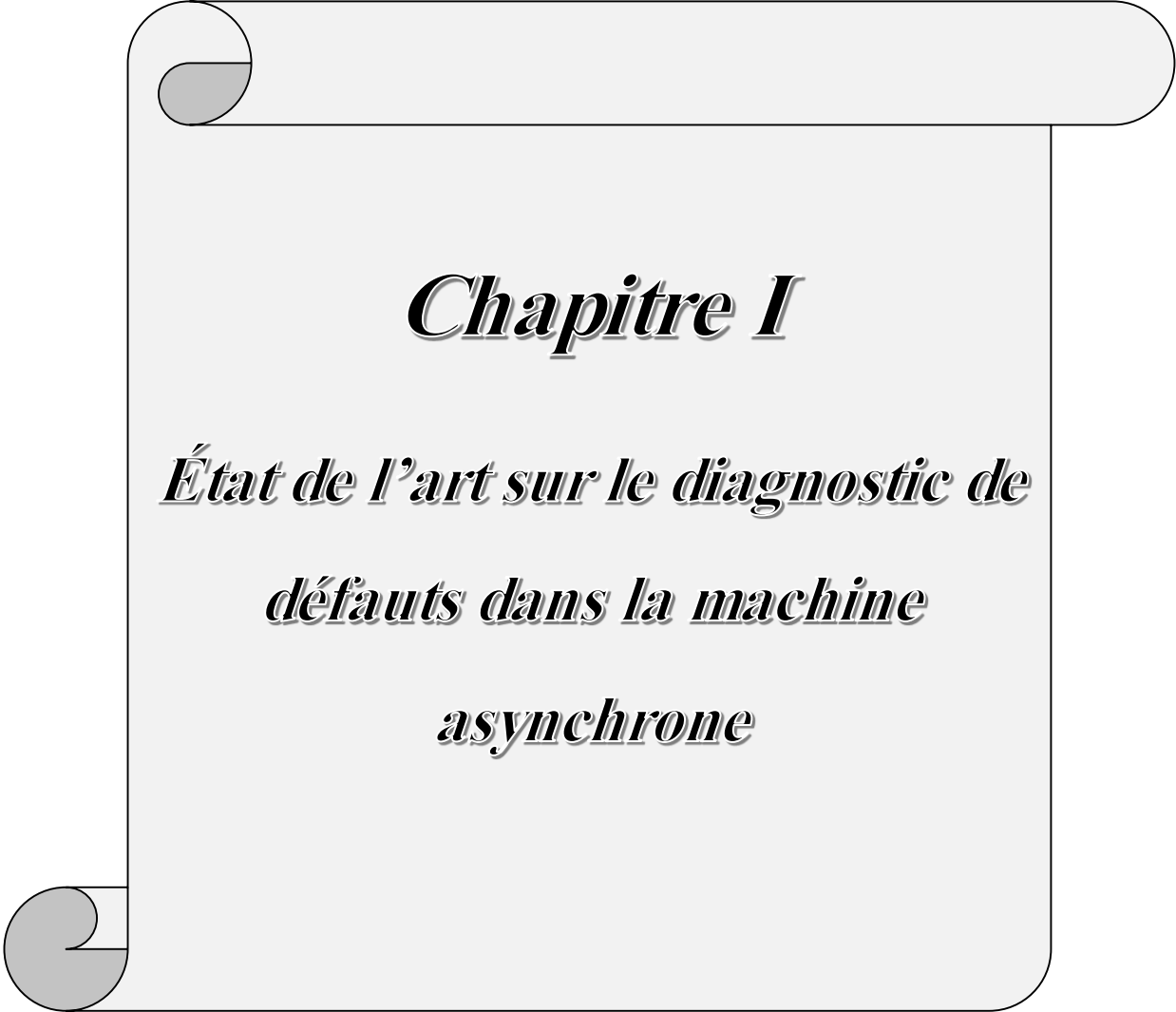
C'est dans cette optique que cette thèse est orientée. Elle s'intéresse, en effet au développement des techniques et méthodes de surveillance et de diagnostic des défauts du moteur asynchrone, en l'occurrence les défauts de stator, du rotor et le défaut de roulement.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre présente la constitution de la machine asynchrone et aussi leurs différentes défaillances qui peuvent se produire sur ce type de machine. Ce chapitre se décompose en deux parties : la première partie fait état des différentes origines (électriques, mécaniques,...) des défaillances qui peuvent se produire sur la machine asynchrone; la deuxième partie traite des techniques qui permettent la mise en œuvre d'une procédure de diagnostic. On présente aussi la constitution d'un compresseur à piston et leur principe de fonctionnement.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du modèle mathématique de la machine à induction tenant compte du défaut de cassure de barres. Le modèle utilisé de la machine est un modèle réduit issu d'une transformation du modèle multi enroulements permettant la représentation de la cage rotorique par un circuit maillé dans lequel les défauts sont introduits. Le diagnostic des défauts est basé sur l'analyse par la FFT en régime stationnaire du signal du courant statorique.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les résultats de simulation du moteur asynchrone, dans les différentes conditions de fonctionnement, (avec et sans défaut). Nous montrerons les effets des cassures de barres sur les différentes grandeurs électriques et électromécaniques de la machine. Et les effets de la variation de charge (compresseur d'air a piston) sur le défaut au niveau de moteur asynchrone.



Chapitre I

***État de l'art sur le diagnostic de
défauts dans la machine
asynchrone***

1.1 Introduction :

Le diagnostic est une composante principale d'un module de supervision. Il consiste déterminer à chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve. Il s'appuie sur une connaissance a priori des modes de fonctionnement et sur une connaissance instantanée matérialisée par une nouvelle observation de l'état du système. Il existe plusieurs approches pour réaliser le diagnostic, le choix d'une approche est lié au mode de représentation de la connaissance.

La première partie de ce chapitre fait état des différentes origines (électriques, mécaniques,...) des défaillances qui peuvent se produire sur la machine asynchrone. Débute par un rappel sur la constitution des machines électriques, et plus particulièrement sur celle de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Nous évoquerons essentiellement des défauts qui peuvent survenir tant au stator qu'au rotor et d'enroulements de la machine.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous arborons sur les différentes approches de diagnostic et leurs domaines d'applications.

1.2 La machine asynchrone :

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 puissance massique, 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 rendu 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 deux dernières décennies [1], [2].

I.2.1 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 [3].

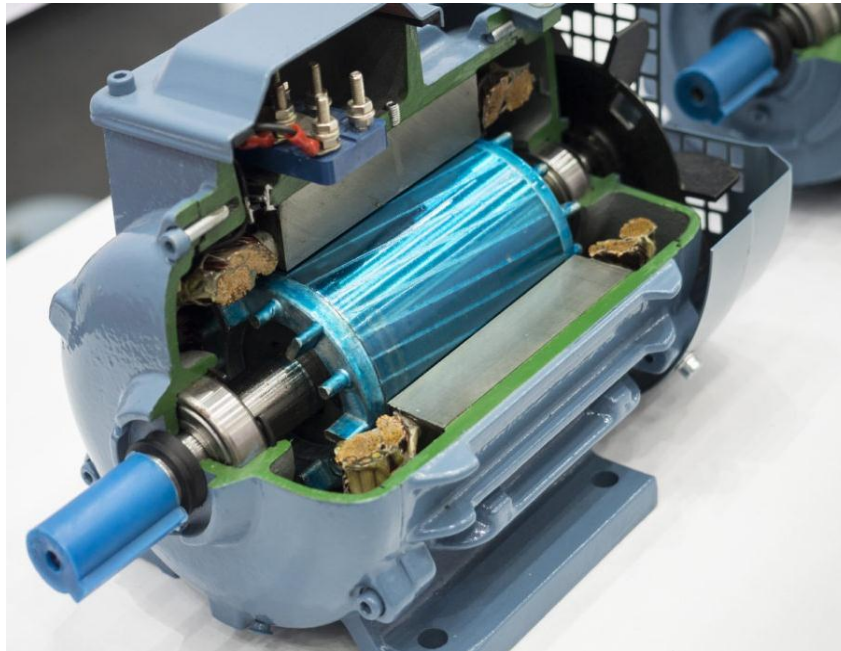


Fig. I.1 : Machine asynchrone

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la Figure I.2.

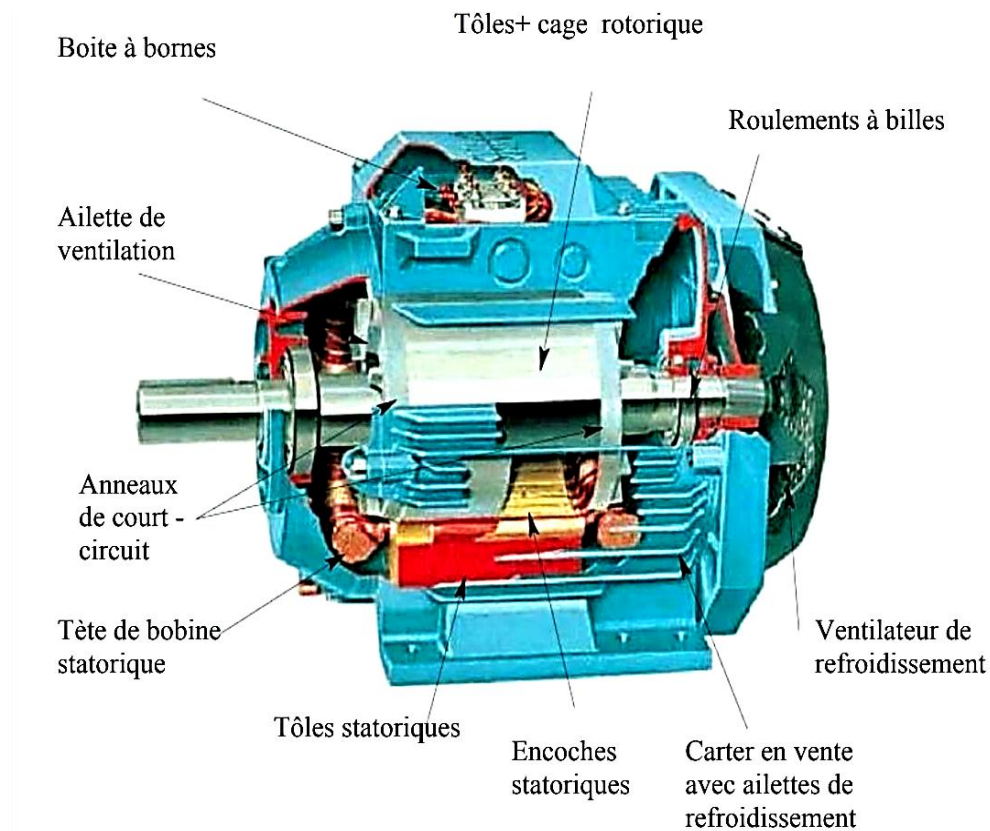


Fig. I.2 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [1]

I.2.1.1 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 (figure I.3). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [2].

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 la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.

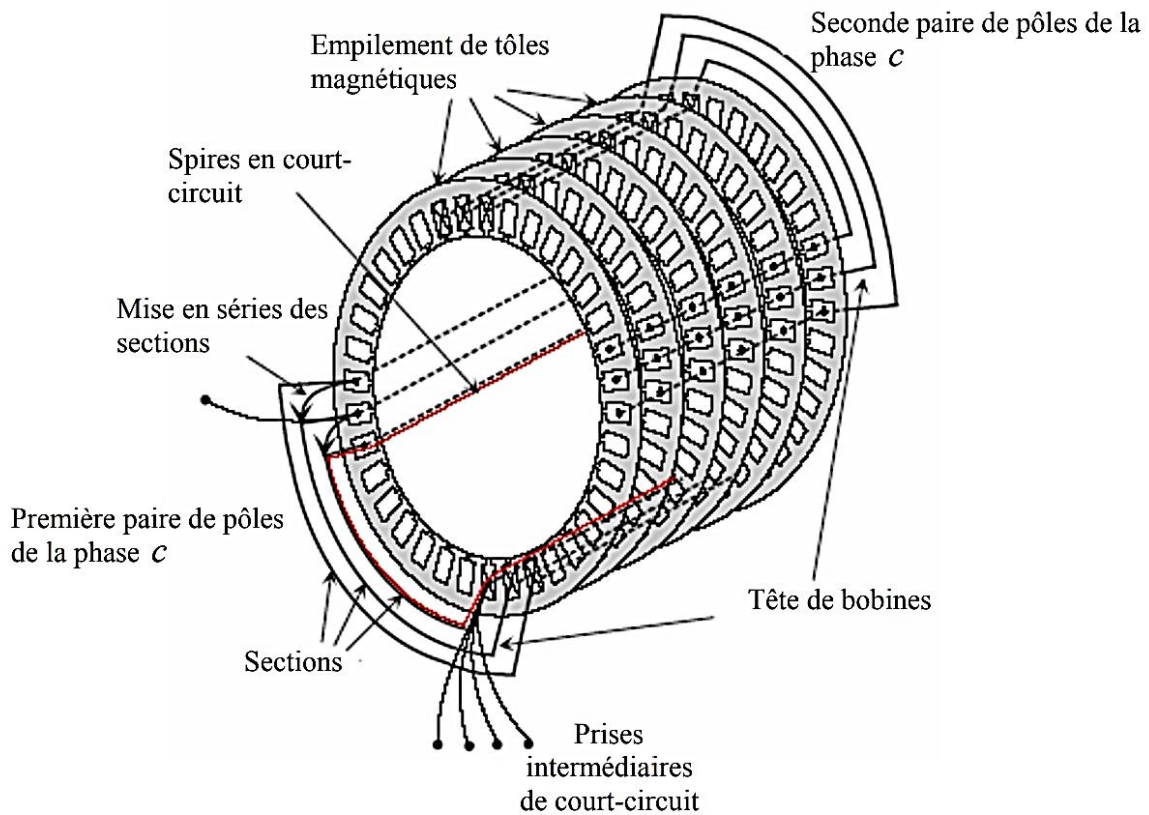


Fig. I.3: Vue schématique en perspective du stator [3].

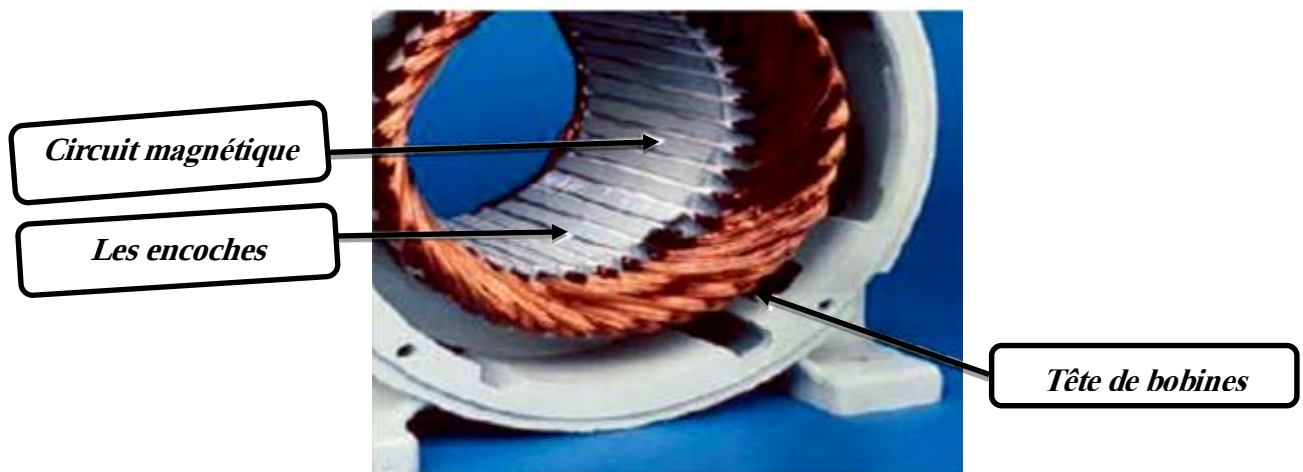


Fig.I.4: Stator moteur asynchrone [4].

I.2.1.2 Le rotor à cage :

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure I.5) et (figure I.6). 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 [2]. 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 [5]. 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.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).

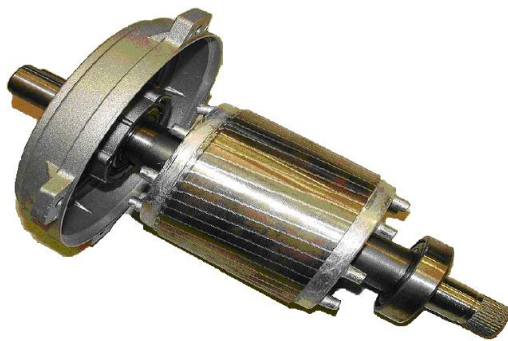


Fig. I.5: Rotor à cage [4].

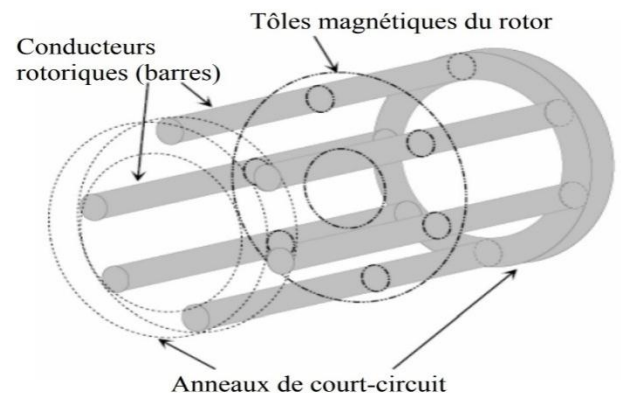


Fig. I.6 : Vue schématique en Perspective du rotor [6].

1.2.1.3 Les organes mécaniques :

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

Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage,...). Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse [2].

1.2.2. Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni par un réseau triphasé équilibré de pulsation ω sur enroulements statorique, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ magnétique tournant (loi de LENZ).

Cette interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor [7].

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

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

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

p : Le nombre de paires de pôles.

Un rotor en court-circuit, balayé par ce champ tournant, sera traversé par des courants induits (courant de Foucault), ce qui soumet ce dernier à des forces électromagnétiques de Laplace. L'ensemble de ces forces crée un couple moteur qui mettra le rotor en rotation (voir figure I.4), le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant, sa vitesse de rotation est légèrement inférieure à celle du champ tournant ($\Omega < \Omega_s$) [7], [8].

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

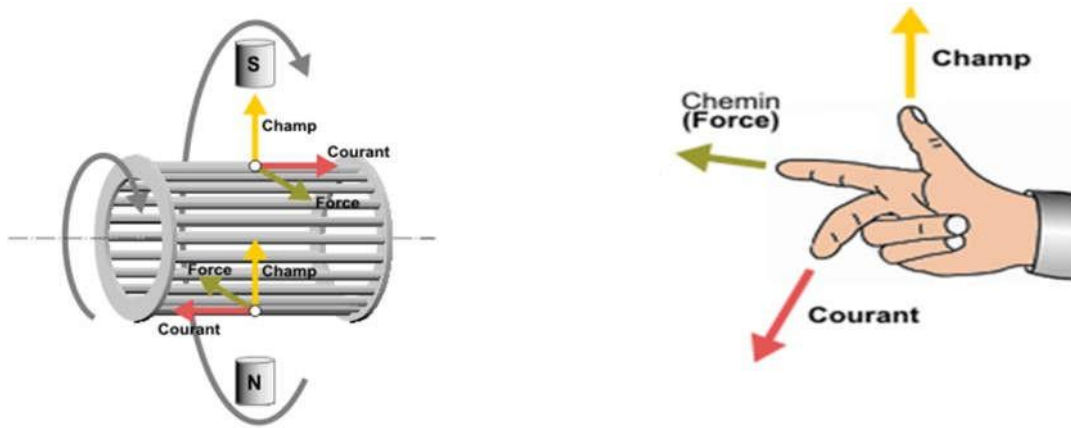


Fig. I.7 : Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage [8].

I.2. 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 [9]:

- les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts: surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survolage 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 [10] sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants (figure I.8)[10], [2]:

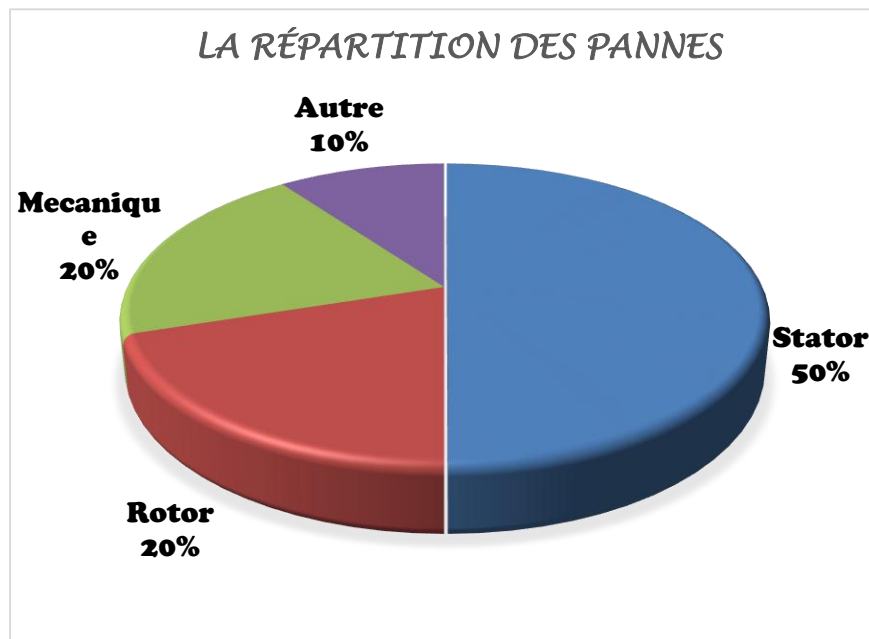


Fig. I.8 : Proportion des défauts [2]

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure I.9:

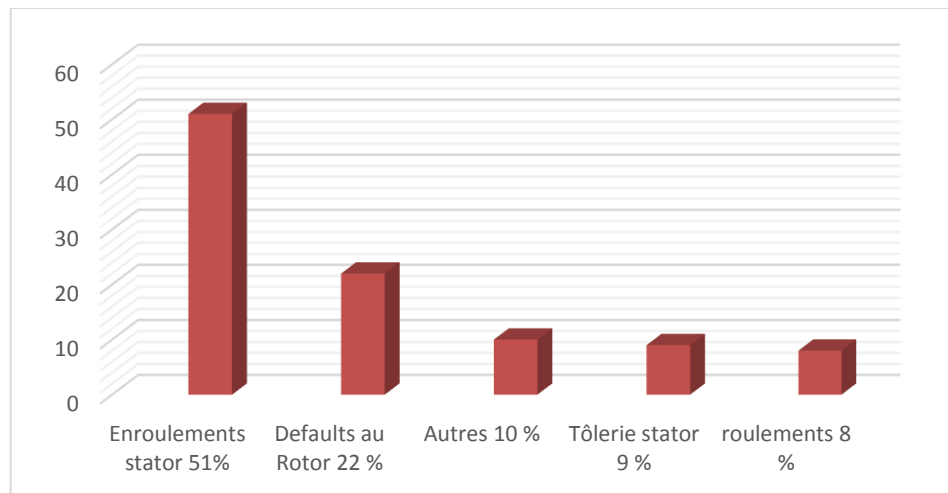


Fig. I.9 : Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances [2]

Une autre étude statistique [11] faite sur des machines de grande puissance (de 100kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur la figure I.10 [11].

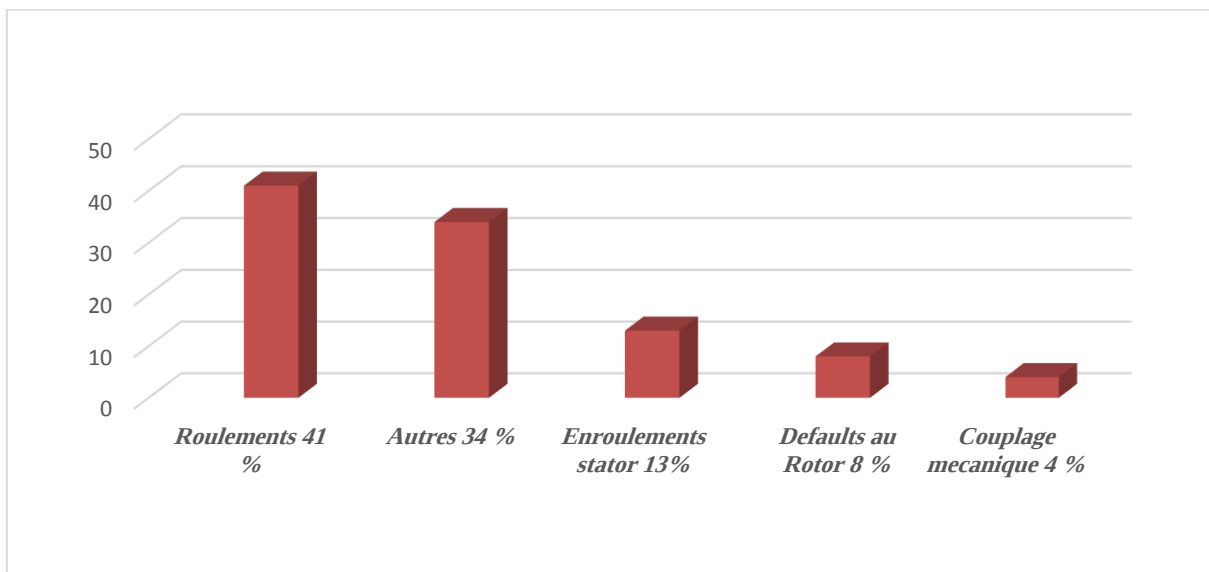


Fig. I.10 : Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances [2]

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.3. Défauts internes et externes :

Il existe 2 types de défauts principaux : Internes et externes. Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures I.11 et I.12 [12].

Nous pouvons ainsi remarquer que les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique,...). Tandis que, les défauts externes sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'environnement de l'utilisation de la machine.

D'après les organigrammes (Fig. I.11 - I.12), les origines des défauts sont diverses :

Thermique, mécanique, électrique ou encore environnemental. A titre indicatif, les démarrages fréquents provoquent des courants élevés dans les barres rotoriques

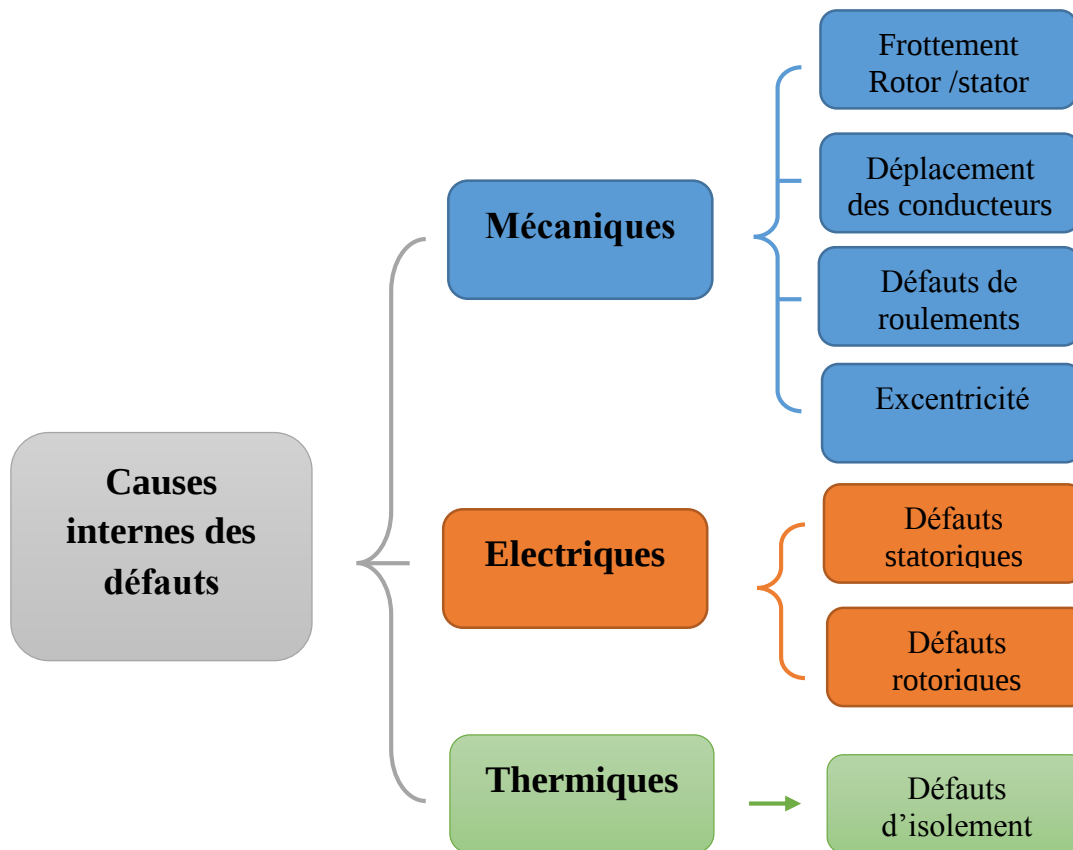


Fig. I.11 : Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

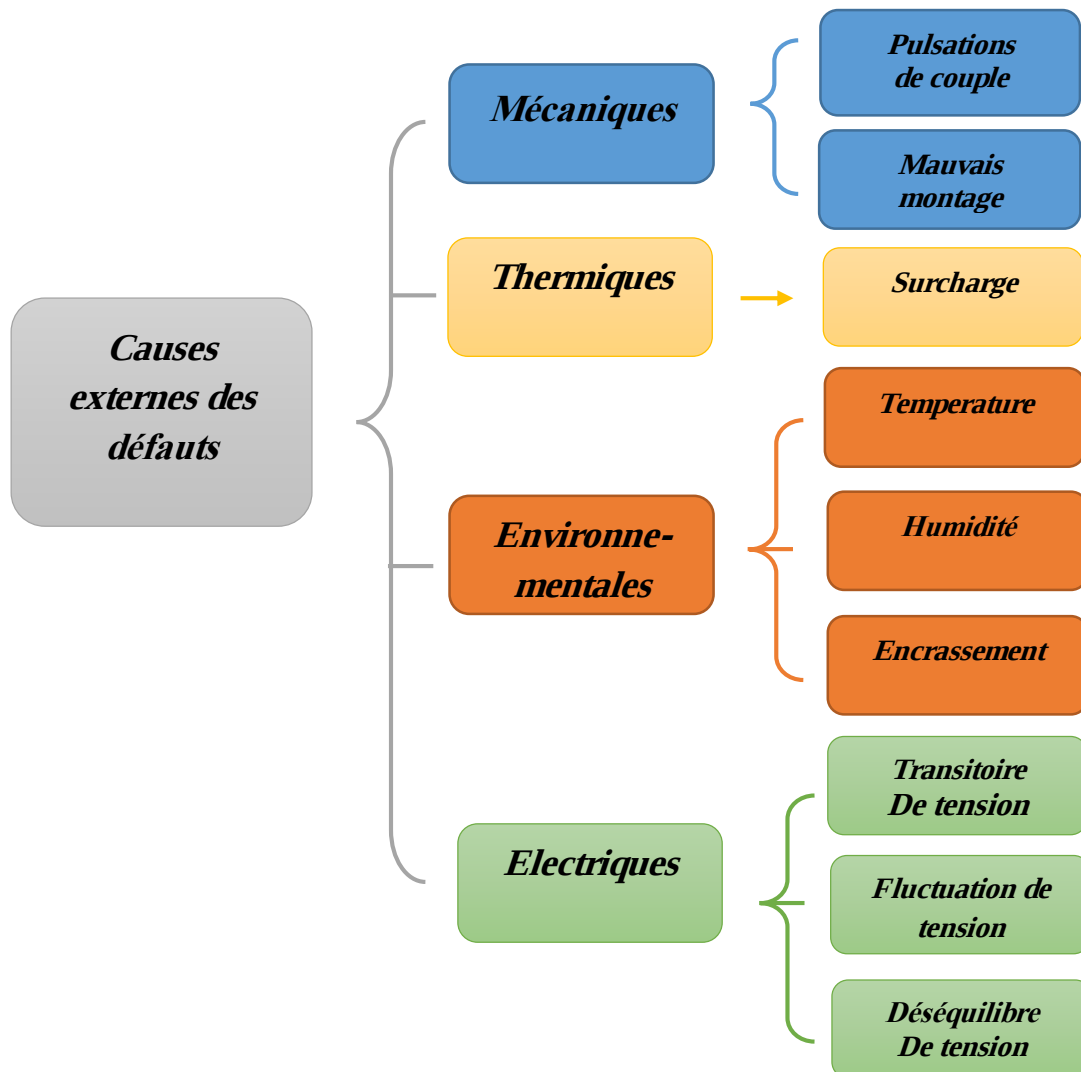


Fig. I.12 : Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

Ces courants dans les barres rotoriques engendrent, par conséquent, des sur échauffements et des contraintes mécaniques conduisant à terme à des fissures puis à une cassure de barres. Par effet d'avalanche, la barre cassée accélère la rupture des barres adjacentes pouvant aboutir jusqu'à la destruction totale du rotor. De même, les efforts électrodynamiques que subissent les conducteurs des phases se traduisent par des vibrations mécaniques ayant pour effet de détériorer l'isolation. Sur le plan électrique, les fronts détensions générés par les convertisseurs statiques accentuent le phénomène de décharges partielles et réduisent, par conséquent, la durée de vie de l'isolant. Quant aux origines environnementales, l'humidité et les produits corrosifs ou abrasifs sont les plus rencontrés [12].

Au niveau de l'entrefer, les défauts se manifestent par une excentricité statique, une excentricité dynamique ou une excentricité mixte. Le défaut d'excentricité statique est, généralement, dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Le défaut d'excentricité dynamique peut être causé aussi bien par une déformation du cylindre rotorique que par une déformation du cylindre statorique [13]. L'excentricité mixte est une combinaison des 2 premiers.

Au niveau de la cage, les défauts se manifestent par la rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit. Ces 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) [12].

Au niveau des paliers, nous pouvons citer le défaut de décentrage des flasques conduisant, généralement, à une excentricité statique alors qu'une détérioration de roulements billes conduit, le plus souvent, à une excentricité dynamique.

Il est important de signaler que plusieurs études statistiques ont été menées dans le but de quantifier l'impact de chaque type de défaut sur la fiabilité de la machine et leurs pourcentages ont été cités dans plusieurs publications [10], [11]. Les résultats obtenus restent quand même assez différents d'une étude à l'autre. Cependant, toutes les études convergentes pour classer les défauts de paliers comme étant les plus fréquents, suivis par les défauts statoriques et, en dernier, les défauts de cage rotorique [12], [14].

1.3.1. Défaillances au stator

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème thermique (surcharge), électrique (diélectrique), mécanique (bobinage,) et environnemental (agression,...etc.). Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit [2].

1.3.1.1. Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...etc.) 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 thermique, électrique et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce dernier se

dégrade de manière prématurée ou accélérée, jusqu'à la cassure totale. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- ❖ Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- ❖ Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- ❖ Vibrations mécaniques.
- ❖ Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, ou à une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.

Vieillessement 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.

1.3.2.2. Court-circuit entre spires :

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude sur les autres phases modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage. De ce fait, une dégradation accélérée des isolants, peut provoquer, ainsi, un défaut en cascade (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste, sensiblement, identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut. Les différents court-circuit qui peuvent apparaître dans la machine sont représentés par la figure I.13.

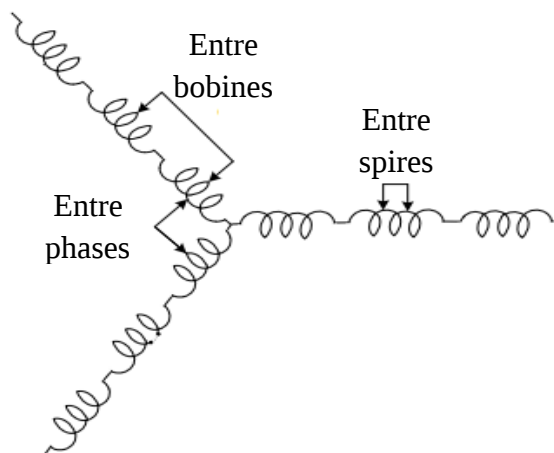


Fig. I.13 : Différents types de défauts d'enroulements statoriques [15].

I.3.2.3. Court-circuit entre phases-bâti :

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage. Cependant, les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système

L'apparition d'un court-circuit, proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre 2 phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont, totalement, déséquilibrés. Ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [2].

I.3.2.4. Court-circuit phase-bâti :

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

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

Cependant, le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, ce type de défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [2].

I.3.2. Défauts de rotor :

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie rotorique au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer des problèmes tels que : thermique (surcharge), électromagnétique (excentricité), résiduel (déformation), dynamique (arbre de transmission) et mécanique (roulement). Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

I.3.2.1. Ruptures de barres [16], [17] :

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique par l'augmentation de l'amplitude des oscillations [2], qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation. Ceci engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine.

Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît, rapidement, avec le nombre de barres cassées.

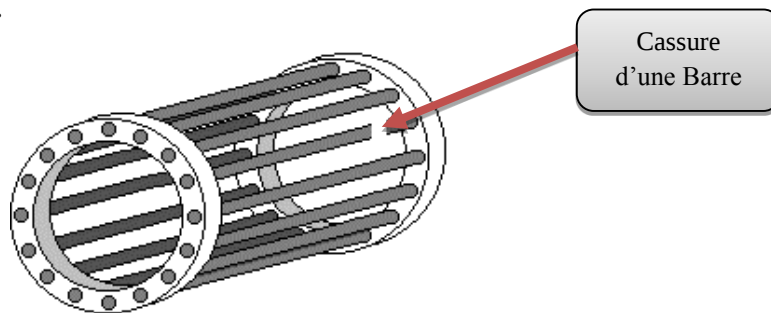


Fig. I.14 : Ruptures de barre rotor

I.3.2.2. Ruptures d'anneaux :

La rupture d'une 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 [2]. 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,...etc.) 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. De ce fait, elle engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaires à celui provoqué par la cassure de barres.

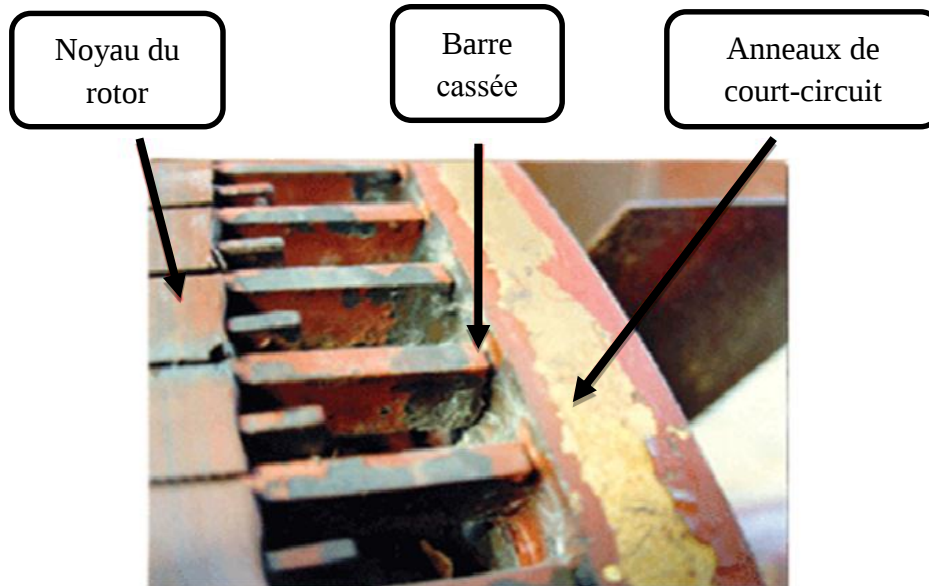
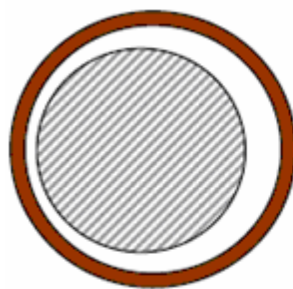


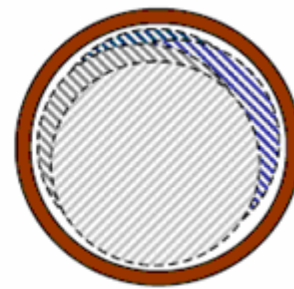
Fig. I.15 : Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone [18]

I.3.2.3. Excentricité statique et dynamique :

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor (Fig. I.16).



a : Excentricité statique



b : Excentricité dynamique (plusieurs Positions du rotor au cours de la rotation)

Fig. I.16 : Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique

Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Trois cas d'excentricité sont, généralement, distingués [2]:

- ✓ **Excentricité statique** : Le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- ✓ **Excentricité dynamique** : Le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- ✓ **L'excentricité mixte** : Il caractérise les 2 cas, précédemment, cités.

Ce défaut d'excentricité modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant [13]. Ceci engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système.

Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [2].

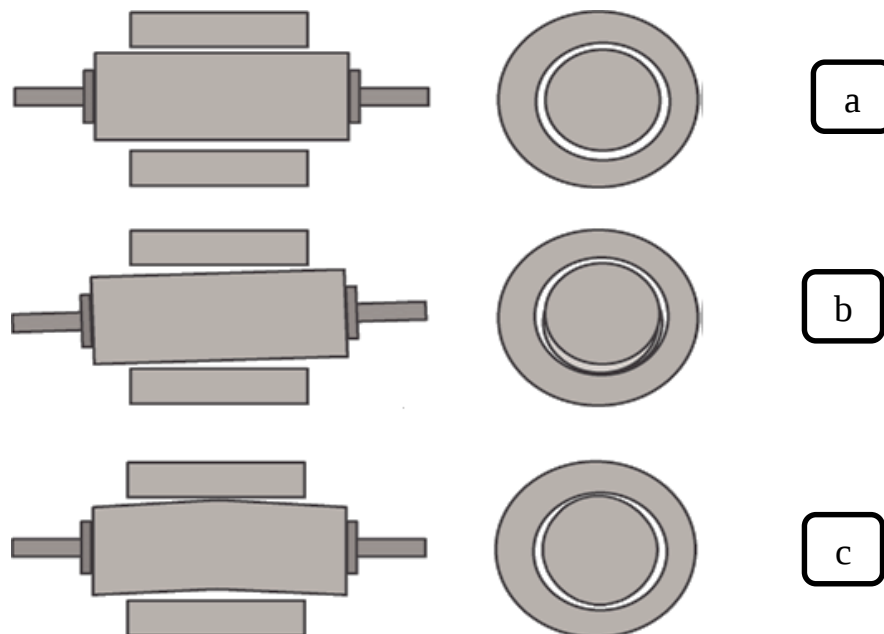


Fig. I.17 : Défauts d'excentricité : (a) statique, (b) dynamique, (c) mixte

I.3.3. Défaillances mécaniques :

I.3.3.1. Défauts des roulements :

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. Dans l'article [19], l'auteur présente la plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement. Comme, il a été présenté, précédemment (Fig. I.10), ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est, généralement, lié à l'usure des roulements et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Les causes possibles sont :

- ✓ L'usure due au vieillissement.
- ✓ La température de fonctionnement élevée.
- ✓ La perte de lubrification.
- ✓ L'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement).
- ✓ Le défaut de montage.
- ✓ Les courants d'arbres (Shaft Current).

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- ✓ Des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- ✓ L'ondulation de leur surface de roulement.
- ✓ L'attaque des billes.
- ✓ La corrosion due à l'eau.
- ✓ Défaut de graissage, problème dû à la température.
- ✓ Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge.

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

La figure I.18 présente les dimensions et la géométrie du roulement à billes. La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre du courant statorique est basée sur le fait que toutes les excentricités interfèrent sur le champ dans l'entrefer de la machine asynchrone.

Les harmoniques contenus dans le spectre du courant statorique peuvent être décrits par l'expression suivante [20] : $f_{roul} = |f_s + kf_v|$

Où : f_{roul} : fréquence des roulements

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

f_v : fréquences caractéristiques des vibrations

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres physiques du roulement tel que diamètre de la bille, diamètre du palier et l'angle de contact.

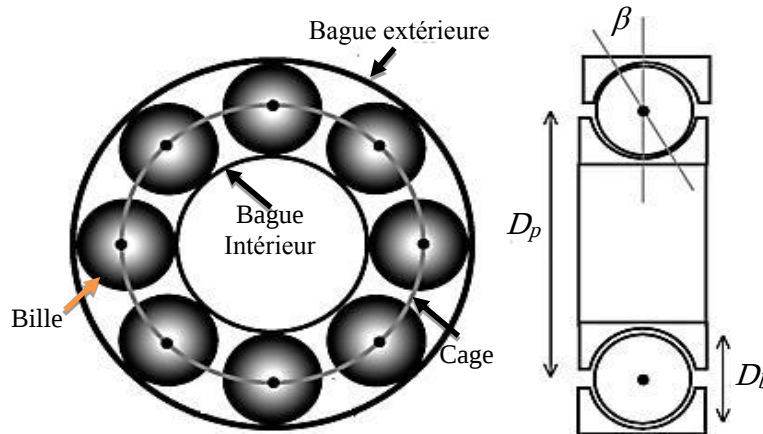


Fig. I.18 : Dimensions du roulement à billes [21]

Avec :

D_b : diamètre de la bille

D_p : diamètre du palier

β : angle de contact.

I.3.3.2. Autres défaillances mécaniques :

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc à priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs [2].

1.4. Aperçu sur les méthodes de diagnostic des défauts :

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées, elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés.

1.4.1. Méthodes de diagnostic avec modèle :

Ces méthodes sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance a priori du système. Elles peuvent s'appuyer sur le suivi d'évolution des paramètres caractéristiques du système étudié. Une comparaison entre un dispositif surveillé et un modèle de référence fait apparaître des différences comportementales de certaines grandeurs caractéristiques liées au fonctionnement de la machine. Ces différences sont appelées **résidus**. Ces résidus sont alors utilisés comme entrées d'un processus de détection des défauts [22].

1.4.1.1: surveillance à base des observateurs (estimateurs):

Ce modèle est décrit sous une représentation de variable d'état [23].

1.4.1.2 : surveillance par projection dans l'espace de parité :

Cette méthode consiste à vérifier l'exactitude des équations mathématiques du modèle en se basant sur les sorties du procédé [24].

1.4.1.3 : surveillance par estimation paramétrique:

C'est la détermination des vecteurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système [22].

1.4.2.Méthodes de diagnostic sans modèle :

Les méthodes se fondent sur l'analyse des mesures que fournit la machine lors de son fonctionnement. Une comparaison entre le spectre du courant d'alimentation et celui du signal fourni par un capteur de vibration montre que l'utilisation des courants statorique est très intéressante pour le diagnostic, puisque les informations présentes dans l'analyse des courants englobent celles trouvées dans l'analyse vibratoire et celles liées aux phénomènes électriques. Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que: les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations... etc.

1.4.2.1.Analyse vibratoire de la machine :

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radial.

Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les

défauts mécaniques fréquemment rencontrés [25].

L'inconvénient majeur de la surveillance basée sur les vibrations est le coût du capteur des vibrations. Cela limite l'utilisation de cette technique dans plusieurs applications notamment, dans les petites machines où le coût est un facteur important [4].

1.4.2.2. Analyse des courants statorique :

L'analyse des signatures du courant statorique par la transformée de Fourier rapide (TFR) est considérée connue référence dans le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones [26]. Elle consiste à détecter les défauts par la détection de l'apparence de composantes fréquentielles révélatrices des défauts dans le spectre du courant statorique. Cette méthode est très utilisée en raison de sa simplicité, peu coûteuse et facile à exécuter. Elle permet de détecter aussi bien les défauts électriques que mécaniques.

1.4.2.3. Analyse du vecteur de Park :

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des moteurs asynchrones triphasés. Une des plus connues et des plus appropriées repose sur le calcul des courants dits de Park. En fonction des courants statorique de phase $i_R(t)$.

Les courants de Park peuvent être calculés grâce aux deux relations suivantes [27] :

$$\begin{cases} i_d(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_R(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_s(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_T(t) \\ i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} i_R(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} i_T(t) \end{cases}$$

A partir du vecteur de Park $[i_d(t), i_q(t)]$, on trace le courant $i_q(t)$ en fonction de $i_d(t)$ c'est-à-dire $i_q(t) = f[i_d(t)]$ de la machine avec un rotor sain et un rotor défaillant. L'effet de défaut se traduit par un épaississement du contour du cercle, ce qui permet d'établir un diagnostic de défaut en effectuant une surveillance des déviations de ce cercle par rapport au modèle de base.

1.4.2.4. Analyse du couple électromagnétique :

Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmoniques dans le spectre du couple électromagnétique, résultant d'une interaction entre le flux et le courant. L'analyse spectrale de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient majeur de cette méthode [28].

I.4.3. Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI) :

Ces dernières années, le diagnostic de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle (IA). Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisant un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent, ce qu'on appelle la base de connaissance (MLN). Parmi ces méthodes, on peut regrouper en quatre grandes familles :

- ✓ Méthodes de reconnaissance des formes.
- ✓ Diagnostic par systèmes experts.
- ✓ Diagnostic par logique floue.
- ✓ Diagnostic par réseaux de neurones.

I.5. Compresseur à piston (système bille-manivelle) :

Le compresseur à piston accumule la pression souhaitée par un mouvement alternatif ou réciproque d'un piston dans un cylindre. C'est le genre de modèle que l'on retrouve dans différentes industries, notamment les secteurs industriels, de l'alimentation et des produits d'emballage.

Le compresseur alternatif à piston comporte un vilebrequin actionné par une machine motrice extérieure, ce vilebrequin via la bielle engendre un mouvement alternatif au piston [4]. La variation de volume et la compression du gaz sont obtenues par le mouvement alternatif d'un piston à l'intérieur d'un cylindre, ce mouvement étant créé par un système bille-manivelle.

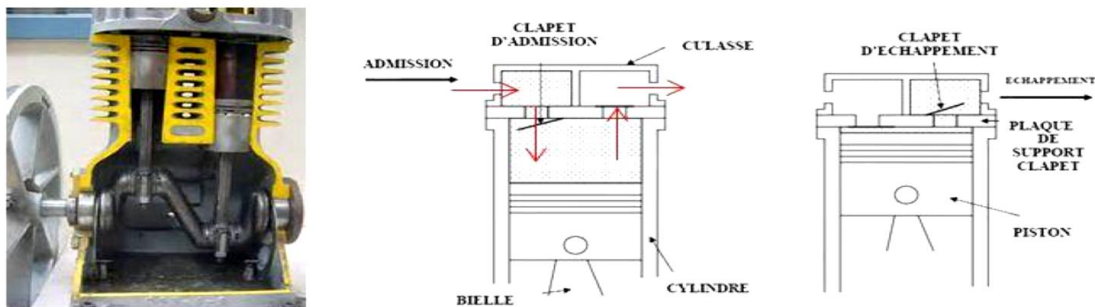


Fig. I.19 Compresseur à piston

1.5.1. Historique d'un compresseur:

Les premiers compresseurs, qui découlaient de la construction des machines à vapeur, étaient en disposition horizontale avec une ou deux lignes de cylindres disposées de part et d'autre d'un volant ou d'un moteur. Vers le milieu du 19^e siècle, la connaissance des grands principes de la thermodynamique permit de voir l'intérêt d'une compression multi-étagée, avec refroidissement intermédiaire. À la fin du 19^e siècle, les constructeurs souhaitaient augmenter les vitesses de rotation afin de diminuer l'encombrement et d'augmenter les performances de ces machines. On vit alors la nécessité d'utiliser des clapets automatiques. Hanns Hörbiger, en 1895, à Vienne, rendit possible le souhait des constructeurs en leur proposant les premiers clapets automatiques. L'augmentation de la vitesse de rotation du vilebrequin les obligea à repenser la composition de la structure, pour des raisons d'équilibrages des efforts. La société Crépelle proposa, dès 1954, les premiers compresseurs auto-équilibrés avec deux cylindres à double effet opposés et horizontaux. Les efforts d'inertie et de pression ont pu ainsi être équilibrés, ce qui permet des vitesses de rotation qui atteignent actuellement 1 500 tr/min.

1.5.2. Les types des compresseurs à piston :

Les compresseurs à piston sont classés selon leurs structures en plusieurs modèles :

1.5.2.1. Compresseur à piston simple effet :

La compression ne s'effectue que d'un seul côté du piston. Les clapets d'aspiration et de refoulement sont disposés dans la tête du cylindre. C'est la version la plus simple du compresseur à piston parce qu'il travaille sur une seule face, l'autre face donne sur le carter d'embiellage. La bielle peut être articulée directement sur un axe de piston, comme dans les moteurs thermiques à pistons et le graissage peut s'effectuer par barbotage. Le volume engendré est égal au produit de la course par la section du piston. Le couple est irrégulier car il n'y a qu'une compression par tour, ce type est réservé aux machines de faibles puissances inférieures de 75KW.

1.5.2.2. Compresseur à piston double effet:

Ce type de compresseur fonctionne sur deux directions (effets), donc la compression s'effectue des deux côtés du piston, alternativement coté tête (effet 1) et coté vilebrequin (effet 2). Chaque chambre est équipée de clapets d'aspiration et de refoulement connectés à des circuits d'aspiration et de refoulement communs. Les capacités d'aspiration des deux effets peuvent être légèrement différentes en raison du volume occupé par la tige du piston coté vilebrequin et des

volumes morts qui peuvent être différents. Ainsi, le volume engendré est égal à deux fois le produit de la section du piston par la course et le couple, comportant deux compressions par tour, devient plus régulier. Mais il est nécessaire de prévoir une tige de piston glissant dans une garniture et d'articuler la bielle sur une crosse coulissant dans une glissière, ce type est réservé aux machines de fortes puissances supérieures de 75KW.

I.5.2.3. Compresseur à piston étagée: dans la conception mécanique d'un compresseur multi étage les éléments sont placés d'une façon superposés et ils coulisent dans deux cylindres concentriques et de diamètres différents. L'étage 1 est affecté au cylindre de plus grande capacité. Les efforts sur l'entraînement sont très irréguliers puisque les phases de compression des deux étages sont simultanées. Il comporte un piston de grand diamètre qui peut travailler soit à simple effet, soit à double effet, l'autre ou les autres pistons sont nécessairement à simple effet. Cette disposition est généralement adoptée sur des machines de fortes puissances (supérieures à 75 kW).

I.5.2.4. Compresseur à piston différentielle: C'est un compresseur qui comporte deux cylindres avec un seul piston, L'étage 2 doit nécessairement avoir la section la plus faible, les efforts sur l'entraînement sont moins intenses qu'avec un piston étagé puisque le début de la détente d'un étage correspond au début de la compression de l'autre [4].

I.5.3. Cycle de compression :

Le cycle de compression peut être décomposé en quatre phases :

I.5.3.1. Compression : Le volume du gaz est réduit par le mouvement du piston. La température et la pression augmentent, l'évolution de la pression suit la loi suivante :

$PV = \text{constant}$. L'augmentation de pression du gaz provient de la réduction de volume et de l'augmentation de la température. L'échauffement du gaz dépend de sa nature du gaz. Les gaz dont les $k = c_p/c_v$ sont les plus élevés s'échaufferont plus.

I.5.3.2. Refoulement: Lorsque la pression à l'intérieur de la chambre dépasse la pression du circuit de refoulement, le clapet de refoulement peut s'ouvrir et le gaz est refoulé. La pression cesse de croître. Elle doit néanmoins être supérieure à la pression du circuit de refoulement pour vaincre la perte de charge des clapets. La perte de charge comme le débit ne sont pas constants, car le piston, entraîné par un système bielle manivelle, ne se déplace pas à une vitesse constante, elle est maximum à mi-course, et nulle aux points morts.

I.5.3.3. Expansion : Lorsque le piston s'éloigne de la tête du cylindre, le gaz emprisonné sous pression dans le volume mort se détend d'abord. Comme dans la phase de compression, l'évolution de la pression suit la loi $PV=\text{constant}$. Cette expansion s'accompagne d'un refroidissement qui dépend de la nature du gaz.

I.5.3.4. Aspiration : Lorsque la pression dans la chambre devient inférieure à la pression du circuit d'aspiration, le clapet d'aspiration peut s'ouvrir. Le gaz pénètre dans la chambre. Le graphe suivant (figure II.11) montre clairement que :

- Le volume de gaz aspiré par le compresseur est inférieur à sa cylindrée.
- Le volume aspiré dépend également de la nature du gaz et plus exactement de la valeur de k .

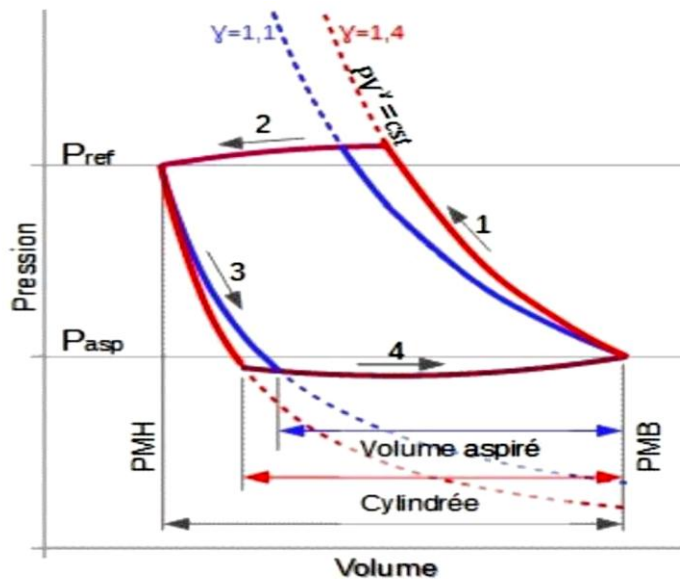


Fig. I.20 : Cycle de compression d'un compresseur à piston

I.5.4. Principes de fonctionnement d'un compresseur :

I.5.4.1 Les principes de base :

- ✓ Le compresseur d'air est une **machine destinée à produire de l'air comprimé**.
- ✓ Cet air comprimé devient source d'énergie pour alimenter des accessoires ou outils pneumatiques tels que soufflette, pistolet de peinture, marteau burineur, etc.
- ✓ Chaque outil a besoin d'une certaine quantité d'air à une pression donnée pour fonctionner. Ce volume se mesure en litre/min ou en m^3/h (à savoir $1\text{m}^3/\text{h}=16,67\text{ l/mn}$).

- ✓ Le volume d'air que délivre un compresseur dépend de la taille de sa cuve et de sa capacité à la remplir plus ou moins vite grâce aux performances de son groupe de compression (moteur électrique et pompe)
- ✓ La cuve du réservoir sert uniquement à stocker l'air, mais suivant les besoins en air, il ne faut pas négliger ce critère. En effet, une fois la cuve vide, il faudra attendre qu'elle se remplisse pour pouvoir relancer vos outils. Une cuve de grande capacité permet donc d'utiliser tous les outils de façon quasi permanente quel que soit l'air demandé par l'outil.

Deux paramètres pour mesurer la performance d'un compresseur : la pression et le débit

- **Pression** : force de l'air comprimé dans la cuve : elle se mesure en Bars
- **Débit** : quantité d'air traité par un appareil : elle se mesure en litres/minute ou mètres cubes/heure.

Deux débits à distinguer : le débit aspiré (volume d'air aspiré par compresseur) et débit restitué (volume d'air comprimé produit par l'appareil). C'est ce dernier qui est important pour le choix du matériel.

La pression et le débit doivent être étudiés pour déterminer le compresseur le mieux adapté à vos outils.

- La puissance du groupe de compression composé d'un moteur électrique et d'une tête de compression s'exprime KW ou CH (HP horse power en anglais).

Exemple: Moteur 2,2KW = 3HP = 3CH (1 hp = 745W = 0.746 kW)

- Le moteur électrique alimente directement (entraînement coaxial) ou par courroie (service continu possible grâce au fonctionnement ralenti de la pompe et mieux refroidi) la tête de compression.

1.5.4.2. Le descriptif des composants :

A. Tête, B. Moteur, C. Cuve

D. Circuit de commande avec manomètres et pressostat (interrupteur qui stoppe le moteur une fois la pression maximale atteinte dans la cuve)

E. Filtre régulateur

F. Lubrificateur

I.6.Conclusion :

Ce chapitre a été, essentiellement dédié à l'état de l'art des méthodes de surveillance et de diagnostic des machines électriques et plus particulièrement la machine asynchrone à cage d'écureuil. Une description d'une manière non exhaustive de la constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil a été présentée, ainsi que les différents types des défauts qui peuvent affecter la machine et leurs origines. Et aussi un panorama sur les méthodes internes et externes utilisées dans le diagnostic des défauts de la machine a été présenté. En fin, la constitution et le principe de fonctionnement d'un compresseur d'air à piston qui présente une charge variable du moteur asynchrone.

L'étude détaillée des divers défauts affectant le fonctionnement de la machine nécessite l'élaboration de modèle de la machine en défaut. ce qui fera l'objet du second chapitre.

Chapitre II
Modélisation de la machine
asynchrone avec défaut
rotorique

II.1. Introduction :

L'un des objectifs les plus importants, dans le cadre du diagnostic, concerne la mise au point de modèles mathématiques réellement représentatifs d'un fonctionnement, pour la détection et la localisation des défauts.

La modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil est une phase indispensable pour l'étude de comportement de la machine ci régime sain ou défaillant. Le modèle mathématique permet d'observer et d'analyser les différentes évolutions des grandeurs électriques et électromagnétiques.

Le modèle basé sur les équations électriques et mécaniques des circuits est en général suffisant pour faire la synthèse du diagnostic. La simplicité de la formulation algébrique conduit à des temps de simulation courts. En outre, la précision de la modélisation est acceptable [29].

Dans ce chapitre, on présente le modèle mathématique de la machine asynchrone à cage d'écureuil tenant compte des divers défauts: défaut rotorique de type rupture des banes, défaut statorique de type court-circuit entre spires et défaut simultané statorique / rotorique.

II.2. Modèle multi-enroulements de la machine :

Le modèle du rotor de la machine asynchrone à cage est assimilé à un enroulement polyphasé. Ce modèle permet de renseigner sur le comportement de ce système face aux différentes excitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement.

Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle. Plus le nombre d'hypothèses est grand, plus le modèle sera simple. Dans ce but, le modèle de la machine asynchrone est élaboré sur la base d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices fortes mais généralement admises [30]:

- la saturation est négligeable dans le circuit magnétique,
- la perméabilité relative du fer est très grande,
- la force magnétomotrice (***F.m.m***) dans l'entrefer est à répartition sinusoïdale,
- les courants de Foucault et les pertes par hystérésis sont négligeables.

II.2.1. Calcul des inductances :

II.2.1.1. Partie statorique :

On considère que les enroulements statorique sont régulièrement distribués autour de la périphérie de l'entrefer de telle sorte que l'induction résultante puisse être sinusoïdale. Dans ce cas, l'expression de la FMM sera :

$$F(\theta) = \frac{2N_s}{\pi.P} i_s \cos\theta \quad (\text{II.1})$$

Avec :

θ : Position;

N_s : Nombre de spires statorique par phase ;

P : Nombre de paires de pôles ;

i_s : Courant d'une phase statorique.

D'après le théorème d'Ampère on peut écrire :

$$F(\theta) = \int H dl = \frac{N_s \cdot i_s}{P} \quad (\text{II.2})$$

La décomposition de l'induction sera :

$$\beta_s(\theta) = \frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{N_s}{e.P} i_s \cos\theta \quad (\text{II.3})$$

Avec :

e : Épaisseur d'entrefer (m);

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$: Perméabilité magnétique du vide ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$).

Par conséquent, le flux magnétique dans l'entrefer est obtenu par l'intégration de l'expression (II.3). On peut écrire :

$$\varphi_s = \iint B_s ds = \int_{-\frac{\pi}{2P}}^{\frac{\pi}{2P}} B_s r l d\theta \quad (\text{II.4})$$

Avec :

r : Rayon moyen de l'entrefer ;

l : Longueur

On obtient :

$$\varphi_s = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_s}{e.P^2} r l i_s \quad (\text{II.5})$$

Le flux total traversant l'enroulement de la phase "a" est :

$$\varphi_{sa} = N_S i_{as} \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot N_S \cdot r \cdot l}{e \cdot p^2 \cdot \pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos \theta d\theta \quad (\text{II.6})$$

L'expression (II.6) peut donc se mettre sous la forme :

$$\varphi_{sa} = L_{sp} i_{as} \quad (\text{II.7})$$

L'inductance principale de la phase "a" s'écrit :

$$L_{sp} = 4 \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_S^2 \cdot r \cdot l}{e \cdot p^2 \cdot \pi} \quad (\text{II.8})$$

Le flux de fuite est donné par :

$$\varphi_{fs} = L_{fs} i_{as} \quad (\text{II.9})$$

L'inductance totale de la phase "a" est égale à la somme de l'inductance de magnétisation et de l'inductance de fuite tel que :

$$L_{as} = L_{sp} + L_{fs} \quad (\text{II.10})$$

Puisque les enroulements statoriques sont symétriques, les inductances propres des trois phases sont considérées égales : $L_{as} = L_{sp} = L_{fs}$

II.2.1.2. Partie rotorique :

Comme le modèle du rotor est décomposé en circuits élémentaires (mailles), chacun étant constitué de deux barres et des portions d'anneaux les reliant à chaque extrémité. Chaque barre de la cage du rotor est représentée par une résistance R_b en série avec une inductance de fuite L_b . Les portions d'anneau en court-circuit entre deux barres consécutives sont elles aussi représentées par une résistance R_e en série avec une inductance de fuite L_e . Une maille est composée par deux barres court-circuitées par deux portions d'anneau. Par conséquent, la cage est modélisée par un certain nombre de mailles situées à la périphérie du rotor et par une maille représentant l'un des deux anneaux du court-circuit. En effet, avec N_r nombre de barres, la cage contient $2N_r$ nœuds et $3N_r$ branches en se basant sur la théorie des circuits électriques. Par conséquent, le nombre des courants indépendants dans la cage est: $3N_r - (2N_r - 1) = N_r + 1$. [29], [31].

Le schéma équivalent est indiqué sur la figure II.1.

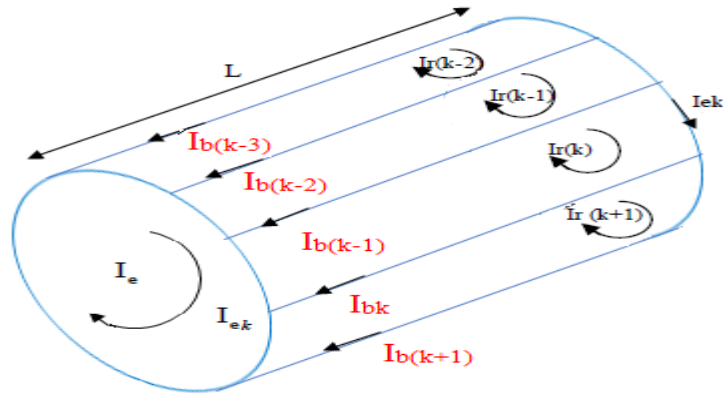


Figure II.1 : Structure de la cage de rotor de la machine asynchrone

La figure II.2 représente, en fonction de θ , l'allure de l'induction magnétique supposée radiale produite par une maille rotorique "k" dans l'entrefer [30], [29].

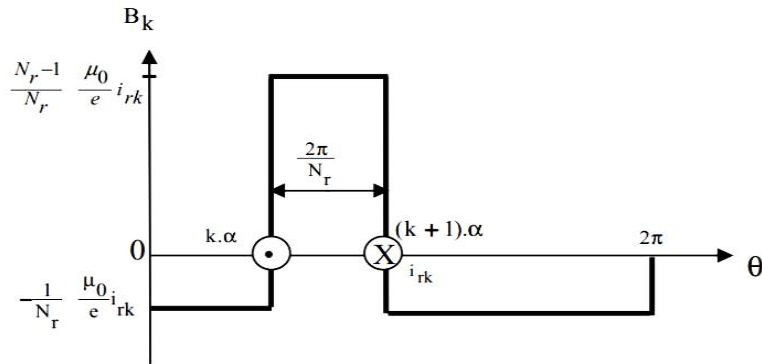


Figure II.2 : Induction magnétique produite par une maille rotorique

Avec:

B_k : Induction magnétique dans l'entrefer produite par une maille rotorique k ;

i_{rk} : Courant dans la boucle k, $k=1, \dots, N_r$;

$\alpha = p \frac{2\pi}{N_r}$: Angle électrique entre deux Barres.

Chaque maille rotorique est considérée comme une bobine à une seule spire parcourue par un courant i_{rk} et est le siège d'un flux principal qui s'exprime par :

$$\varphi_{rp k} = \int_{k\alpha}^{(k+1)\alpha} B_{rp k} \cdot r \cdot l d\theta \quad (\text{II.11})$$

Donc :

$$\varphi_{rp k} = \left(\frac{N_r - 1}{N_r^2} \right) \frac{\mu_0}{e} 2\pi \cdot r \cdot l \cdot i_{rk} \quad (\text{II.12})$$

L'inductance propre d'une boucle rotorique est :

$$L_{rp} = \left(\frac{N_r - 1}{N_r^2} \right) \frac{\mu_0}{e} 2\pi \cdot r \cdot l \quad (\text{II.13})$$

L'inductance totale de la $k^{ème}$ maille rotorique est égale à la somme de son inductance principale, des inductances de fuite des deux barres L_b et des inductances de fuites de deux portions d'anneaux de court-circuit L_e fermant la maille k . L'expression est donc donnée par:

$$L_{rr} = L_{rp} + 2L_b + \frac{2L_e}{N_r} \quad (\text{II.14})$$

Les mailles rotoriques sont magnétiquement couplées par l'intermédiaire du flux rotorique d'entrefer. Le flux traversant la $j^{ème}$ maille et produit par le courant i_{rk} circulant dans la maille k est donné par:

$$\varphi_{jr k} = \int_{j\alpha}^{(j+1)\alpha} \left(-\frac{\mu_0}{e} \frac{1}{N_r} r \cdot l \cdot i_{rk} \right) d\theta \quad (\text{II.15})$$

L'inductance mutuelle entre la $k^{ème}$ maille et les mailles adjacentes est donnée par :

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi \cdot r \cdot l \quad (\text{II.16})$$

II.2.1.3. Mutuelles inductances entre stator/rotor :

La figure II.3 indique les bases géométriques de l'expression du flux mutuel entre l'enroulement d'une phase "a" au stator et un circuit élémentaire "k" au rotor.

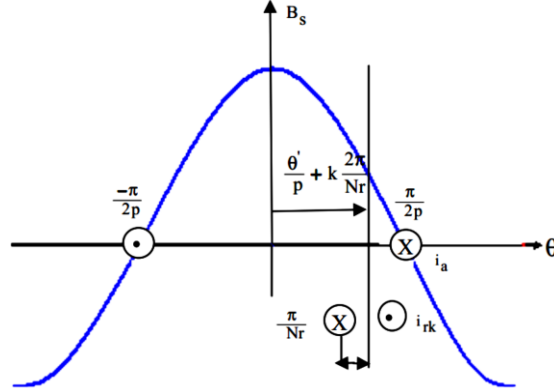


Figure II.3 : Position de la maille "k" par rapport à la bobine statorique de la phase "a"

L'induction produite par la bobine de la phase dans la $k^{\text{ème}}$ maille rotorique est donnée par:

$$B_{sq} = \frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{N_s}{e} i_{sq} \cos\left(p\theta - q \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$q = (1, 2, 3)$,

i_{sq} : Courant dans une phase au stator (a, b, c).

Le flux traversant la maille k, est donné par :

$$\varphi_{sqrk} = \int_{k\alpha}^{(k+1)\alpha} B_{sq} \cdot r \cdot l d\theta \quad (\text{II.18})$$

On obtient :

$$\varphi_{sqrk} = -\frac{2}{\pi} \frac{\mu_0}{e \cdot p} N_s i_{sq} r l \frac{1}{p} \left[\sin\left(p\theta - q \frac{2\pi}{3}\right) \right]_{k\alpha}^{(k+1)\alpha} \quad (\text{II.19})$$

L'expression de l'inductance mutuelle stator-rotor est tirée donc de celle du flux:

$$M_{sqrk} = -M_{sr} \cos\left(p\theta - q \frac{2\pi}{3} + k\alpha\right) \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$M_{sr} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{e p^2} \cdot N_s \cdot r \cdot l \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (\text{II.21})$$

II.2.2. Mise en équation :

Nous utilisons la transformation de *Clarke* pour passer des grandeurs triphasées statorique (a, b, c) aux grandeurs diphasées (α, β). Nous pouvons effectuer la simulation avec deux repères distincts pour le stator et le rotor.

Pour alléger le temps de calcul, on élimine l'angle θ de la matrice de couplage en choisissant le repère le plus approprié et qui est celui du rotor. Dans ce repère, toutes les grandeurs ont une pulsation $g\omega_s$ en régime permanent [29].

II.2.2.1. Equations statorique :

Les équations des tensions pour les trois phases du stator peuvent être écrites sous la forme condensée suivante :

$$[V_s] = [V_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (II.22)$$

Après transformation et rotation, les équations électriques dans le repère rotorique s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

Avec :

$$\varphi_{sdq} = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 \\ 0 & L_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} - M_{sr} \begin{bmatrix} \dots & \cos k\alpha & \dots \\ \dots & \sin k\alpha & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

Où : $k \in [0, N_r - 1]$, $k \in \mathbb{N}$

Donc :

$$\varphi_{ds} = L_{sc} i_{ds} - M_{sr} [\cos 0\alpha i_{r0} + \cos 1\alpha i_{r1} + \dots + \cos k\alpha i_{rk} + \cos (N_r - 1)\alpha i_{r(N_r-1)}] \quad (II.25)$$

De la même façon pour φ_{qs}

$$\varphi_{qs} = L_{sc} i_{qs} - M_{sr} [\sin 0\alpha i_{r0} + \sin 1\alpha i_{r1} + \dots + \sin k\alpha i_{rk} + \sin (N_r - 1)\alpha i_{r(N_r-1)}] \quad (II.26)$$

Après la dérivation de l'expression (II.24), on aboutit à :

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = L_{sc} \frac{di_{ds}}{dt} - M_{sr} [\dots \cos k\alpha \dots] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Et

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = L_{sc} \frac{di_{qs}}{dt} - M_{sr} [\dots \sin k\alpha \dots] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

II.2.2.2. Equations rotoriques :

L'équation de tension d'une maille k rotorique représentée par la figure II.4 peut s'écrire comme suit :

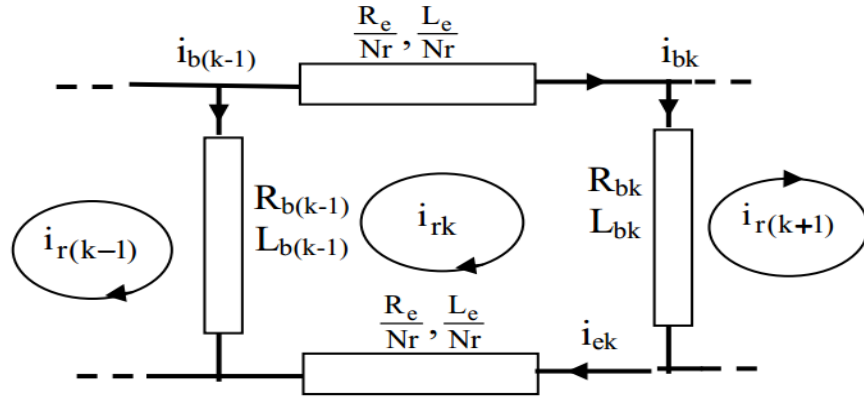


Figure II.4 : Schéma électrique équivalent d'une maille rotorique

$$\frac{R_e}{N_r} i_{rk} - R_{b(k-1)} [i_{r(k-1)} - i_{rk}] + \frac{R_e}{N_r} [i_{rk} - i_{r(k+1)}] + \frac{d\varphi_{rk}}{dt} = 0 \quad (\text{II.29})$$

Sachant que : $i_{bk} = i_{rk} - i_{r(k+1)}$

$$i_{b(k-1)} = i_{r(k-1)} - i_{rk}$$

$$i_{ek} = i_{rk} - i_e$$

L'équation électrique relative à la maille k devient donc:

$$\frac{R_e}{N_r} i_{rk} - R_{b(k-1)} i_{b(k-1)} + \frac{R_e}{N_r} [i_{rk} - i_e] - R_{bk} i_{bk} + \frac{d\phi_{rk}}{dt} = 0 \quad (\text{II.30})$$

Le flux induit dans la maille rotorique est donné par : (II.31)

$$\phi_{rk} = L_{rp} i_{rk} - M_{rr} \sum_{j=0}^{N_r-1} i_{rj} - \frac{2}{3} M_{sr} (i_{ds} \cos k\alpha + i_{qs} \sin k\alpha) + \frac{L_e}{N_r} (i_{rk} - i_{ek}) + L_b (-i_{b(k-1)} + i_{bk}) \quad (\text{II.31})$$

On ajoute à l'équation des circuits du rotor l'équation relative à l'anneau de court-circuit suivante :

$$L_e \frac{di_e}{dt} - \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{di_{rk}}{dt} = \left(R_e i_e - \frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \right) \quad (\text{II.32})$$

La mise en équation du modèle de la machine conduit à un système complet suivant avec $(N_r + 3)$ équations électriques :

$$[L] \frac{d[I]}{dt} = [V] - [R][I] \quad (\text{II.33})$$

Avec

$$[I] = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{r0} \quad \dots \quad i_{rj} \quad \dots \quad i_{r(N_r-1)} \quad i_e]^T ;$$

$$[V] = [V_{ds} \quad V_{qs} \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad 0]^T ;$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos k\alpha & \dots & \dots & 0 \\ 0 & L_{sc} & \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \sin k\alpha & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & -\frac{L_e}{N_r} \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & \vdots \\ -\frac{3}{2} M_{sr} \cos k\alpha & -\frac{3}{2} M_{sr} \sin k\alpha & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} - L_b & L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b & -\frac{L_e}{N_r} \\ 0 & 0 & -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{N_r} & L_e \end{bmatrix} ;$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_r L_{sc} & \dots & \dots & M_{sr} \omega_r \sin k\alpha & \dots & \dots & 0 \\ -\omega_r L_{sc} & R_s & \dots & \dots & -M_{sr} \omega_r \cos k\alpha & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2\frac{R_e}{N_r} + R_{b0} + R_{b(N_r-1)} & -R_{b0} & 0 & 0 & -R_{b(N_r-1)} & -\frac{R_e}{N_r} \\ 0 & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -R_{b(k-1)} & 2\frac{R_e}{N_r} + R_{bk} + R_{b(k-1)} & -R_{bk} & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & -R_{b(N_r-1)} & 0 & 0 & -R_{b(N_r-2)} & 2\frac{R_e}{N_r} + R_{b(N_r-2)} + R_{b(N_r-1)} & -\frac{R_e}{N_r} \\ 0 & 0 & -\frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{N_r} & R_e \end{bmatrix}.$$

L'équation mécanique de la machine, d'une manière générale, s'écrit sous la forme :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_e - C_r - F\omega_r) \quad (\text{II.34})$$

Avec : $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$

Où θ_r représente la position des grandeurs rotoriques, C_e est le couple électromagnétique, C_r est le couple de charge, J est le moment d'inertie de l'ensemble des masses tournantes et F le coefficient de frottement visqueux. Le couple électromagnétique est obtenu par dérivation de la Co-énergie :

$$\varphi_{sdq} = \frac{3}{2} p [i_{sdq}]^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} \begin{bmatrix} \dots & -M_{sr} \cos(\theta_r + k\alpha) & \dots \\ \dots & -M_{sr} \sin(\theta_r + k\alpha) & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

On a donc :

$$C_e = \frac{3}{2} p M_{sr} \{ i_{ds} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \sin k\alpha - i_{qs} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \cos k\alpha \} \quad (\text{II.36})$$

II.3. Modèle réduit de la machine asynchrone à cage en tenant compte des défauts :

L'élaboration d'un modèle mathématique réduit est obtenue à partir du modèle multi-enroulement de la machine asynchrone dédié au contrôle en boucle fermée et qui tient compte des défauts rotoriques et statoriques. Le modèle prend en compte la géométrie du rotor dont le schéma équivalent est indiqué sur la figure II.5. [15].

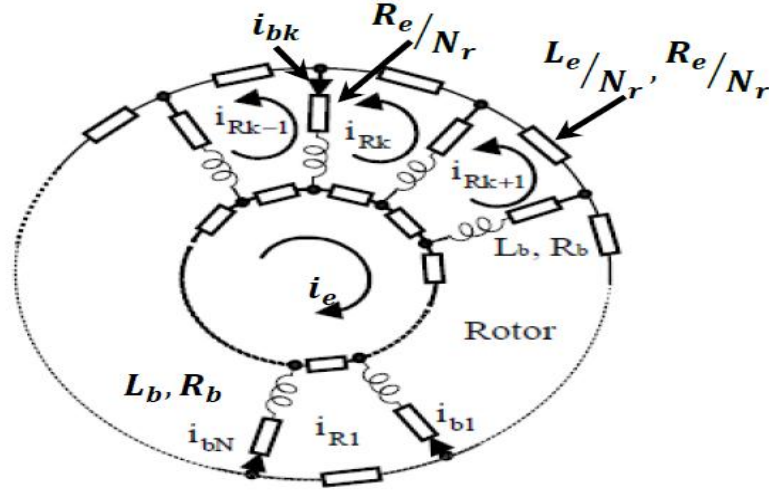


Figure II.5 : Modèle multi-enroulements équivalent de la cage rotorique

Le modèle multi-enroulements présente un handicap dans la mise en œuvre du contrôle en boucle fermée en raison du nombre important d'équations. Une transformation de *Park* étendue sera appliquée au système du rotor pour transformer le système de N_r barres en système (d, q) [29], [15]. On définit un vecteur d'état $[X]$ qui après transformation donne :

$$\begin{cases} [X_{odqs}] = [T_{3 \times 3}(\theta_s)][X_{abcs}] \Rightarrow [X_{abcs}] = [T_{3 \times 3}(\theta_s)]^{-1}[X_{odqs}] \\ [X_{odqs}] = [T_{3 \times N_r}(\theta_r)][X_{rk}] \Rightarrow [X_{rk}] = [T_{3 \times N_r}(\theta_r)]^{-1}[X_{odqs}] \end{cases} \quad (II.37)$$

Avec :

$$[T_{3 \times N_r}(\theta_r)] = \frac{2}{N_r} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \dots & \frac{1}{2} \\ \cos\theta_r & \cos(\theta_r - k.p\frac{2\pi}{N_r}) & \dots & \cos(\theta_r - (N_r - 1).p\frac{2\pi}{N_r}) \\ -\sin\theta_r & -\sin(\theta_r - k.p\frac{2\pi}{N_r}) & \dots & -\sin(\theta_r - (N_r - 1).p\frac{2\pi}{N_r}) \end{bmatrix} \quad (II.38)$$

Et

$$[T_{3 \times N_r}(\theta_r)]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \cos\theta_r & -\sin\theta_r \\ 1 & \cos(\theta_r - k.p \frac{2\pi}{N_r}) & -\sin(\theta_r - k.p \frac{2\pi}{N_r}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(\theta_r - (N_r - 1).p \frac{2\pi}{N_r}) & -\sin(\theta_r - (N_r - 1).p \frac{2\pi}{N_r}) \end{bmatrix} \quad (II.39)$$

Où :

θ_s est la position des grandeurs statoriques.

Le modèle réduit de la machine asynchrone à cage est obtenu en choisissant un référentiel lié au rotor. Après simplifications, on trouve la forme canonique suivante :

$$[L] \frac{d[I]}{dt} = [V] - [R][I] \quad (II.40)$$

Où :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix};$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & \omega_r L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} \omega_r M_{sr} & 0 \\ \omega_r L_{sc} & R_s & -\frac{N_r}{2} \omega_r M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix}$$

L'inductance cyclique totale et la résistance du rotor sont calculées par :

$$\begin{cases} L_{rc} = L_{rp} - M_{rr} + 2 \frac{L_e}{N_r} + 2L_e(1 - \cos\alpha) \\ R_r = 2 \frac{R_e}{N_r} + 2R_b(1 - \cos\alpha) \end{cases} \quad (II.41)$$

L'inductance propre d'une boucle rotorique est :

$$L_{rp} = \left(\frac{N_r - 1}{N_r^2} \right) \frac{\mu_0}{e} 2\pi . r . l \quad (II.42)$$

L'inductance mutuelle entre les mailles du rotor non adjacentes est définie par :

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi \cdot R \cdot l \quad (\text{II.43})$$

L'inductance cyclique totale d'une phase du stator est donnée par l'expression suivante :

$$L_{sc} = L_{sp} + L_{sf} \quad (\text{II.44})$$

L'inductance magnétisante est :

$$L_{SP} = 4\mu_0 \frac{N_r^2 r \cdot l}{e \cdot p^2 \pi} \quad (\text{II.45})$$

L'inductance mutuelle du stator / rotor est donnée par l'expression suivante :

$$M_{sr} = \left(4/\pi\right) \left(\mu_0/e \cdot p^2\right) N_s \cdot r \cdot l \cdot \sin(\alpha/2) \quad (\text{II.46})$$

Les flux dans le référentiel de *Park* sont donnés par :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_{sc} \cdot i_{ds} - \frac{N_r}{2} M_{sr} \cdot i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_{sc} \cdot i_{qs} - \frac{N_r}{2} M_{sr} \cdot i_{qr} \\ \varphi_{dr} = -\frac{3}{2} M_{sr} \cdot i_{ds} + L_{rc} i_{dr} \\ \varphi_{qr} = -\frac{3}{2} M_{sr} \cdot i_{qs} + L_{rc} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

Pour la partie mécanique, l'expression du couple électromagnétique en fonction des courants est donnée par :

$$C_e = \frac{3}{2} p \frac{N_r}{2} M_{sr} (i_{ds} i_{qr} - i_{qs} i_{dr}) \quad (\text{II.48})$$

En considérant l'expression du couple électromagnétique (II.48), la vitesse du rotor sera donnée par :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_e - C_r - F\omega_r) \quad (\text{II.49})$$

II.3.1. Modèle réduit de la machine tenant compte des défauts des cassures de barres rotoriques :

Les défauts rotoriques entraînent une modification sur la matrice $[R]$. La matrice de défaut rotorique s'écrit donc [29], [15]:

$$[R_{rf}] = [R_{rf}] = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \dots & R'_{bk} & -R'_{bk} & 0 & \dots \\ 0 & \dots & -R'_{bk} & R'_{bk} & 0 & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \dots \end{bmatrix} \quad (II.50)$$

Nouvelle matrice des résistances rotoriques, après transformation étendue de *Park*, devient :

$$[R_{rfdq}] = \begin{bmatrix} R_{rdd} & R_{rdq} \\ R_{rqd} & R_{rqq} \end{bmatrix} \quad (II.51)$$

Où les quatre termes de cette matrice sont :

$$\begin{cases} R_{rdd,rqq} = R_r + \frac{2}{N_r} (1 - \cos\alpha) \sum_k R_{bfk} \cdot (1 \pm \cos(2k - 1) \cdot \alpha) \\ R_{rdq,rqd} = -\frac{2}{N_r} (1 - \cos\alpha) \sum_k R_{bfk} \cdot \sin(2k - 1) \cdot \alpha \end{cases} \quad (II.52)$$

R_{bfk} est la résistance d'une barre cassée, l'indice k caractérise la barre cassée [29].

En effet, le modèle d'état de la machine asynchrone en fonction du besoin du système de contrôle prend le courant statorique et les composantes du flux rotorique comme variables d'état. Les équations d'état de la machine tenant compte du défaut rotorique sont obtenues à partir de l'équation de (II.40) et des expressions (II.47). Ainsi le système non linéaire s'écrit [31], [15]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (II.53)$$

Avec :

$$x^T = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \varphi_{dr} \quad \varphi_{qr} \quad i_e]; u^T = [V_{ds} \quad V_{qs}]; y^T = [i_{ds} \quad i_{qs}]$$

$$A = \begin{bmatrix} -a_1 - a_2 R_{rdd} & \omega_r - a_2 R_{rdd} & -a_3 R_{rdd} & -a_4 \omega_r - a_3 R_{rdq} & 0 \\ -\omega_r - a_2 R_{rdd} & -a_1 - a_2 R_{rqd} & -a_4 \omega_r - a_3 R_{rqd} & -a_3 R_{rqd} & 0 \\ -a_5 R_{rdd} & -a_5 R_{rdq} & -a_6 R_{rdd} & -a_6 R_{rdq} & 0 \\ -a_5 R_{rqd} & -a_5 R_{rqd} & -a_6 R_{rqd} & -a_6 R_{rqd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_7 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} a_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_s & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T ; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

L'expression du couple électromagnétique de la machine s'écrit :

$$C_e = p \frac{3 N_r M_{sr}}{4 L_{rc}} (\varphi_{qr} i_{ds} - \varphi_{dr} i_{qs}) \quad (II.54)$$

$$a_1 = \frac{R_s}{\sigma L_{sc}}, a_2 = \frac{3 M_{sr}^2 N_r}{4 L_{sc} L_{rc}^2 \sigma}, a_3 = \frac{M_{sr} N_r}{2 L_{sc} L_{rc}^2 \sigma}, a_4 = \frac{M_{sr} N_r}{2 L_{sc} L_{rc} \sigma}, a_5 = \frac{3 M_{sr}}{2 L_{rc}},$$

$$a_6 = \frac{1}{L_{rc}}, a_7 = \frac{R_e}{L_e}, a_8 = \frac{1}{\sigma L_{sc}}, \sigma = 1 - \frac{3 M_{sr}^2 N_r}{4 L_{sc} L_{rc}}$$

II.3.3. Modèle réduit de la machine tenant compte du défaut de court-circuit statorique :

Les équations d'état de la machine asynchrone à cage prenant en compte un défaut de court-circuit statorique entre spires s'obtiennent en assemblant le vecteur d'état formé des courants statoriques et flux rotoriques avec une entrée et sortie constituée respectivement par des tensions et courants statoriques dans le référentiel biphasé (dq). Le modèle d'état de la machine asynchrone peut être donc défini par le système d'équations non linéaires suivantes [32]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \hat{A}x(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases}$$

Avec:

$$\dot{A} = \begin{bmatrix} -a_1 - a_2 R_r & \omega_r & -a_3 R_r & -a_4 \omega_r & 0 \\ -\omega_r & -a_1 - a_2 R_r & a_4 R_r & -a_3 R_r & 0 \\ -a_5 R_r & 0 & -a_6 R_r & 0 & 0 \\ 0 & -a_5 R_r & 0 & -a_6 R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_7 \end{bmatrix}$$

Et

$$D = \sum_{q=1}^3 \frac{2}{3} \frac{\eta_{ccq}}{R_s} P(-\theta) Q(\theta_{ccq}) P(\theta)$$

Ou

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix}, Q(\theta_{ccq}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{ccq})^2 & \cos(\theta_{ccq}) \sin(\theta_{ccq}) \\ \cos(\theta_{ccq}) \sin(\theta_{ccq}) & \sin(\theta_{ccq})^2 \end{bmatrix}$$

Avec

$P(\theta)$: matrice de rotation d'angle θ ;

$Q(\theta_{ccq})$: matrice situant l'angle du bobinage en court-circuit (si le court-circuit se produit sur la phase "a" (resp. "b" et "c") alors l'angle θ_{ccq} est égal à 0 rad (resp. $2\pi/3$ et $-2\pi/3$) ;

$$\eta_{ccq} = \frac{\eta_{ccq}}{N_s} = \frac{\text{Nombre des spires en court-circuit}}{\text{Nombre des spires sur une phase saine}}$$

Les matrices B et C gardent les mêmes expressions que dans (II.53).

La figure II.8 représente le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone dans le repère de *Park* avec fuites totalisées au stator et prise en compte d'un éventuel défaut de court-circuit sur une des trois phases [33], [15].

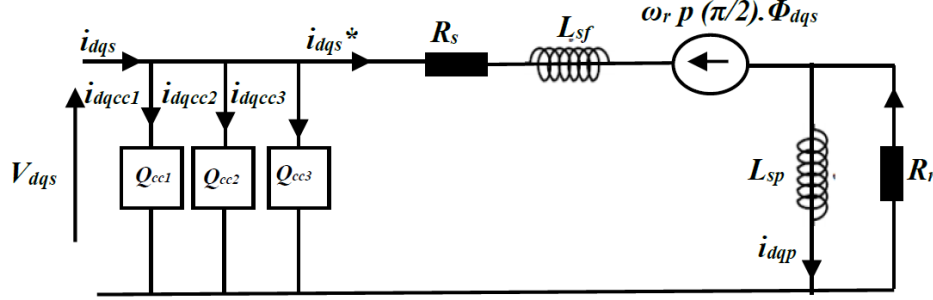


Figure II.6 : Modèle général de court-circuit dans le repère de Park lié au rotor

II.4. Prise en compte du défaut d'excentricité statique de la machine asynchrone :

Parmi les défauts majeurs souvent rencontrés dans la pratique, il y a le défaut d'excentricité. Son existence est interprétée par la non-uniformité de l'entrefer. Il existe trois types d'excentricités qui sont soit statique, dynamique ou mixte [34].

Dans notre étude, on prend en compte le défaut d'excentricité statique. Dans ce cas, le centre du rotor n'est pas confondu avec celui du stator, mais l'épaisseur minimale de l'entrefer reste fixe comme représentée dans la figure II.11.

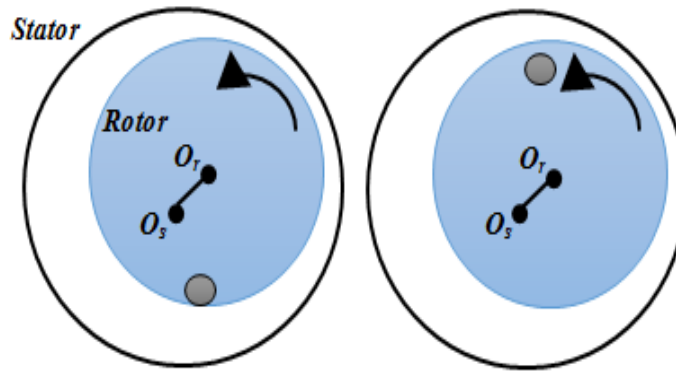


Figure II.7 : Excentricité statique dans une machine asynchrone

Le degré d'excentricité statique est défini par : $\varepsilon_s = \frac{O_s O_r}{e}$

Avec: O_s : centre du stator ; O_r : trace du rotor excentré.

L'expression de la fonction inverse d'entrefer s'écrit [35]: $g_e(\theta)^{-1} = \frac{1}{e} (1 + \varepsilon_s \cos\theta)$

Où: θ : angle mesuré à la périphérie interne du stator.

Toutes les inductances de la machine (inductance propre d'une boucle rotorique L_{rp_k} , inductance mutuelle entre boucle du rotor M_{rrk} et inductance mutuelle stator-rotor M_{rrk}) sont recalculées en utilisant l'expression (II.57) [35], [36].

On trouve :

$$L_{rpk} = \frac{\mu_0}{e} r.l \left\{ 2\pi \left(\frac{N_r - 1}{N_r^2} \right) + 4\varepsilon_s \left(\frac{N_r - 1}{N_r^2} \right) \sin \frac{\pi}{N_r} \cos \left(\theta + k \frac{2\pi}{N_r} \right) + \frac{\varepsilon_s}{\pi} \sin \left(\frac{\pi}{N_r} \right)^2 (1 + \cos 2 \left(\theta + k \frac{2\pi}{N_r} \right)) \right\}$$

$$M_{rrk} = \frac{\mu_0}{e} r.l \left\{ \frac{2\pi}{N_r^2} + 2\varepsilon_s \left(\frac{N_r - 1}{N_r^2} \right) \sin \frac{\pi}{N_r} \cos \left(\theta + k \frac{2\pi}{N_r} \right) - \frac{4\varepsilon_s \pi}{N_r^2} \sin \left(\frac{\pi}{N_r} \right) \cos \left(\theta + j \frac{2\pi}{N_r} \right) \right\}$$

$$M_{srk} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{e P^2} N_s r.l \left\{ \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \cos(\theta + k\alpha) + \frac{\varepsilon_s}{4} \sin(\alpha) \cos 2(\theta + k\alpha) + \frac{\varepsilon_s}{4} \sin(\alpha) \cos(\theta + k\alpha) \right\}$$

II.5. Prise en compte des défauts dans le modèle :

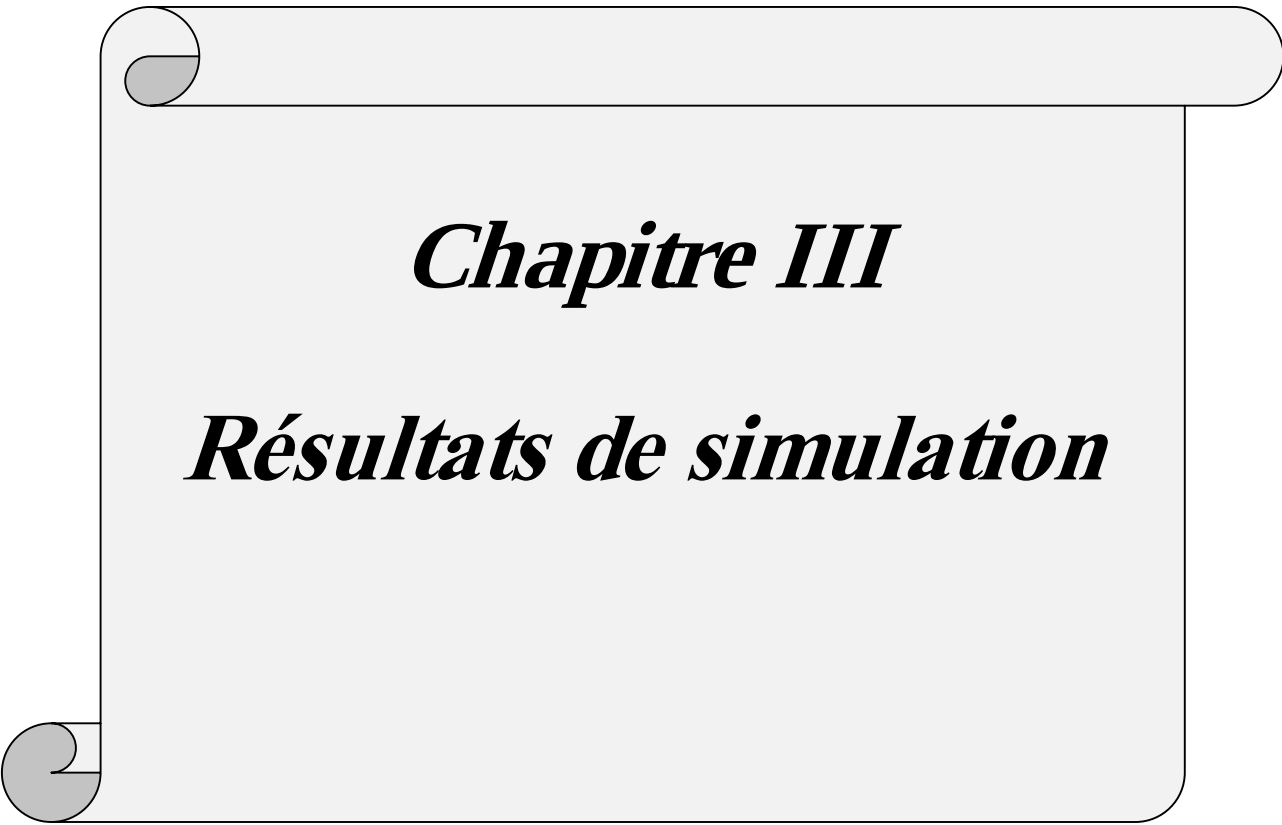
Les défauts simultanés pendant le fonctionnement de la machine sont peu présents. En effet, les vibrations et les frottements consécutifs, dus à une rupture de barres, peuvent endommager, d'une part, les conducteurs d'encoches au stator et, d'autre part, provoquer un échauffement anormal à cause un défaut statorique.

Le type de défaut que nous étudions est la rupture d'une ou plusieurs barres rotoriques. Le circuit électrique rotorique donné à la Figure (II.5) doit être reconsidéré pour permettre la prise en compte du défaut rotorique dans le modèle de la machine.

II.6. Conclusion :

Nous avons utilisé un modèle multi-enroulement qui tient compte de la structure du rotor. Le choix d'un tel modèle est imposé par l'objectif de pouvoir simuler une rupture de barre ou de portion d'anneaux de court-circuit au rotor. Pour cela, nous avons représenté toutes les équations des barres et les portions d'anneaux du rotor.

Dans le chapitre suivant, des résultats de simulation de ce modèle pour différents essais (sain et défaillant) seront étudiés et aussi les effets de la variation du charge (qui présenté par un compresseur d'air à piston) sur les défauts.



Chapitre III

Résultats de simulation

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on considère la simulation du modèle multi enroulements réduit, permettant de représenter les différentes courbes du courant statorique, du courant dans les barres rotorique, le couple et les courants des barres cassées. La modulation est effectuée dans différentes conditions de fonctionnement : la machine à l'état sain et avec défaut. Ensuite, on présente l'analyse détaillée des différents défauts rotoriques, avec la variation du charge qui présenté par la variation d'état de fonctionnement d'un compresseur a piston.

Cette analyse a pour objectif d'analyser les phénomènes observés sur les performances du moteur.

III.2. Résultats de simulation de la machine asynchrone :**III.2.1. Résultats de simulation d'un fonctionnement sain :**

Nous pouvons étudier l'évolution des grandeurs temporelles tels que les courants, le couple lorsque la cage rotorique ne présente aucune défaillance.

La Fig.III.1 représente l'allure du courant de trois phases statorique, décrivant une partie du régime permanent à l'état sain.

La Fig.III.2 représente l'allure du courant de trois phases statorique, décrivant une partie du régime permanent avec défaut.

La Fig.III.3 montre, l'évolution de couple électromagnétique, lors d'un démarrage à vide sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée (sain).

A l'instant $t = 1$ s, nous procédons à un échelon de couple résistant nominal

La Fig.III.4: représentent le couple électromagnétique avec défaut.

Les figures (Fig. III 9), (Fig.III.10) et (Fig.III.11) représentent l'allure de courant dans la barre (1,2), décrivant une partie du régime permanent après l'application du couple (charge variable : faible, moyenne et plan charge).

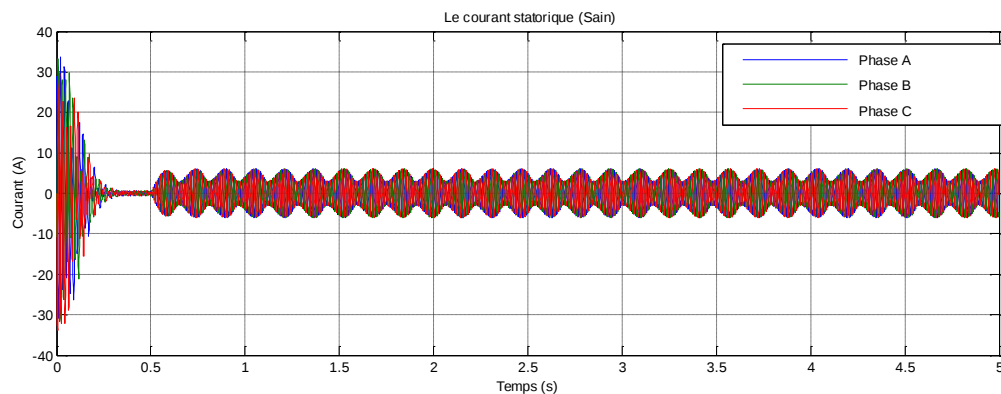


Fig III.1 : Courant de trois phases statorique moteur à l'état sain

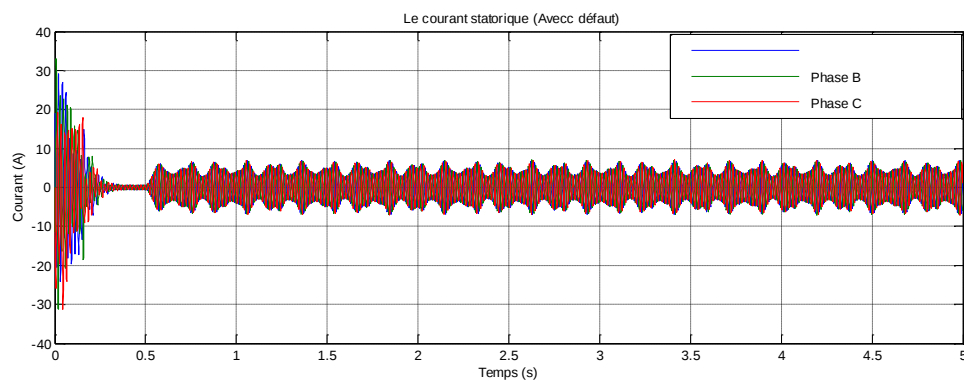


Fig III .2 : Courant de trois phases statorique moteur avec défaut

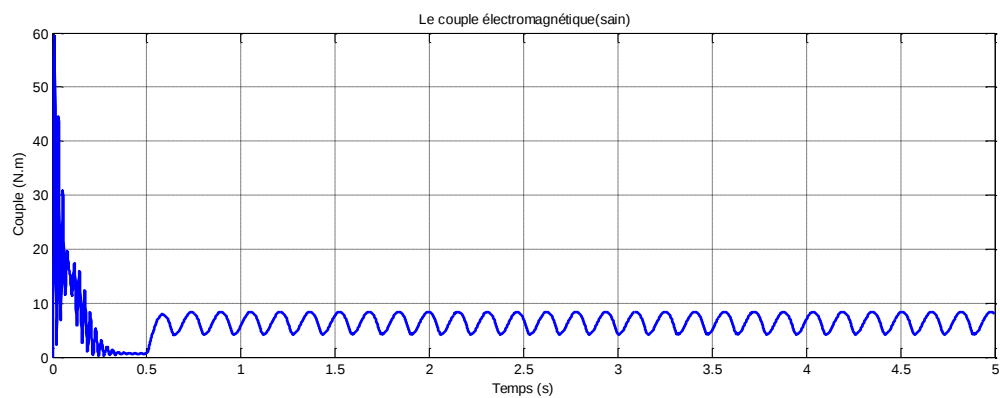


Fig III.3. Couple électromagnétique d'un moteur à l'état sain

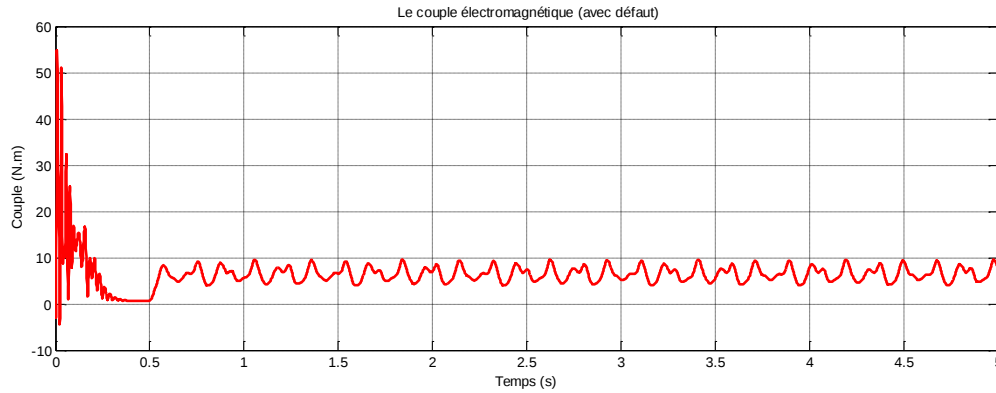


Fig. III .4 : Couple électromagnétique d'un moteur avec défaut

III.2.2. Résultats de simulation d'un fonctionnement avec défaut rotorique :

La cassure de barre et portion d'anneaux des défauts les plus fréquents au rotor. La méthode qu'on a adoptée pour la simulation des défauts rotoriques consiste à remplacer la valeur initiale de la résistance des barres cassées par une valeur finie.

A l'instant $t = 2$ s, nous simulons la rupture de la première barre en augmentant sa résistance de 30 fois (cette valeur a été choisie de sorte que le courant qui traverse la barre défailante soit le plus proche possible de zéro).

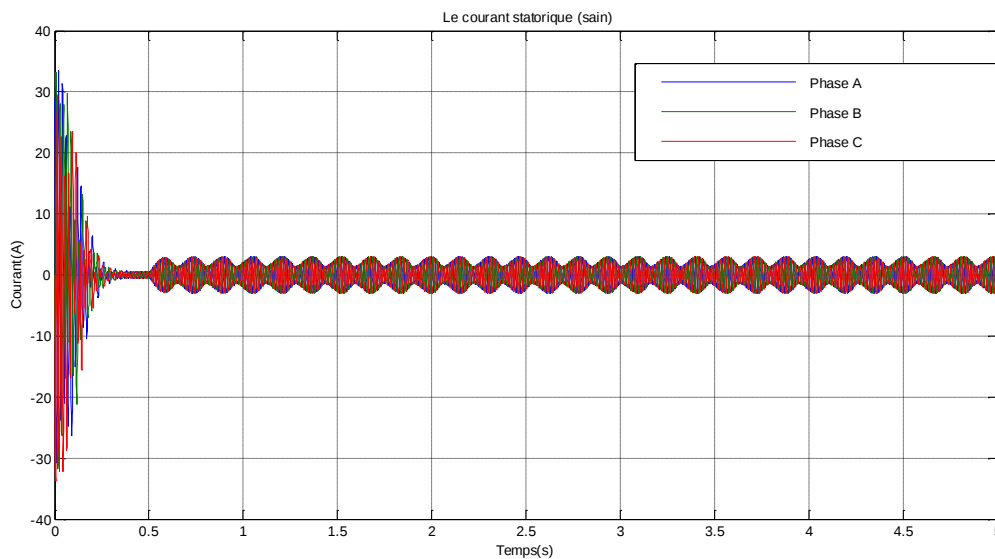


Fig III .5: Courant de trois phases statorique moteur à l'état sain

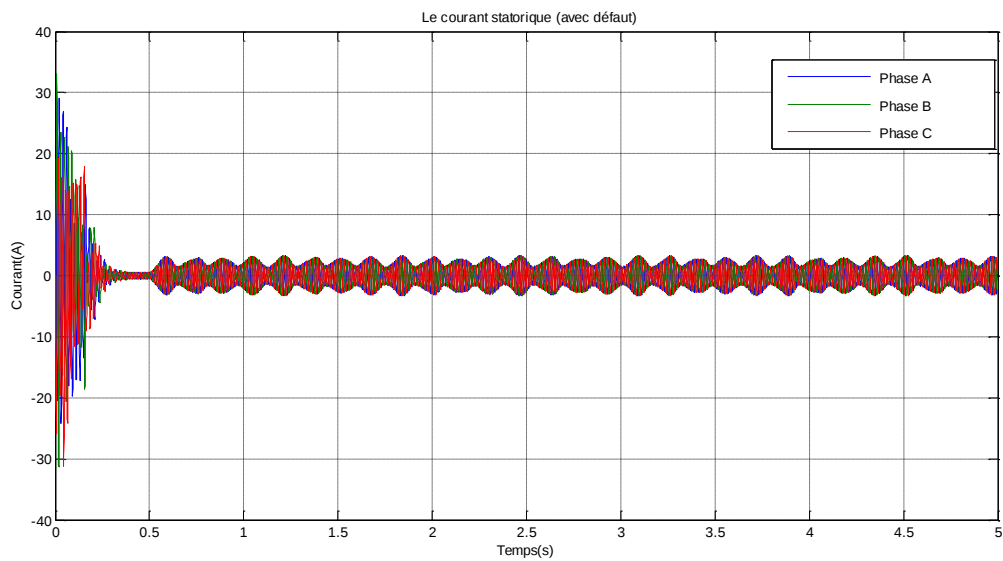


Fig III.6 : Courant statorique moteur avec défaut

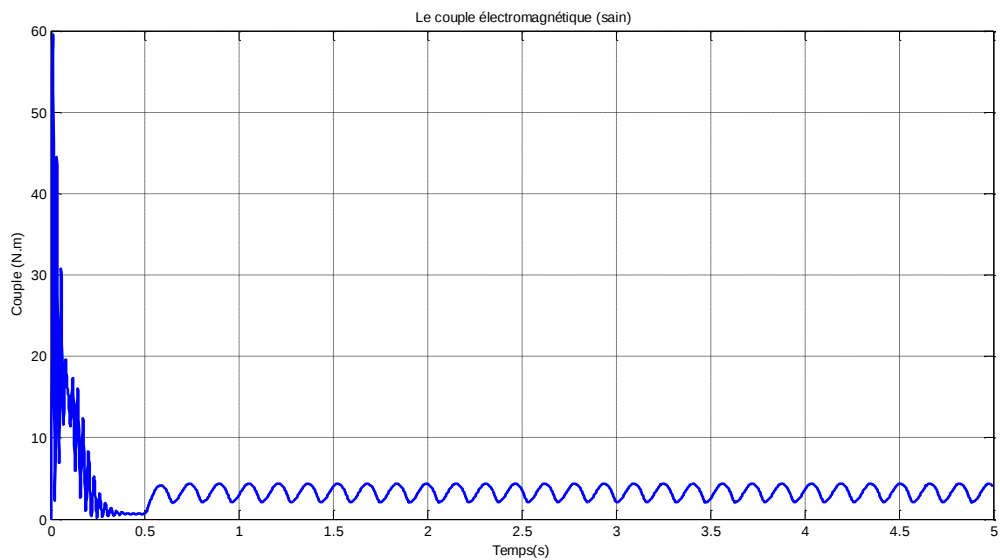


Fig III.7 : Couple électromagnétique d'un moteur à l'état sain

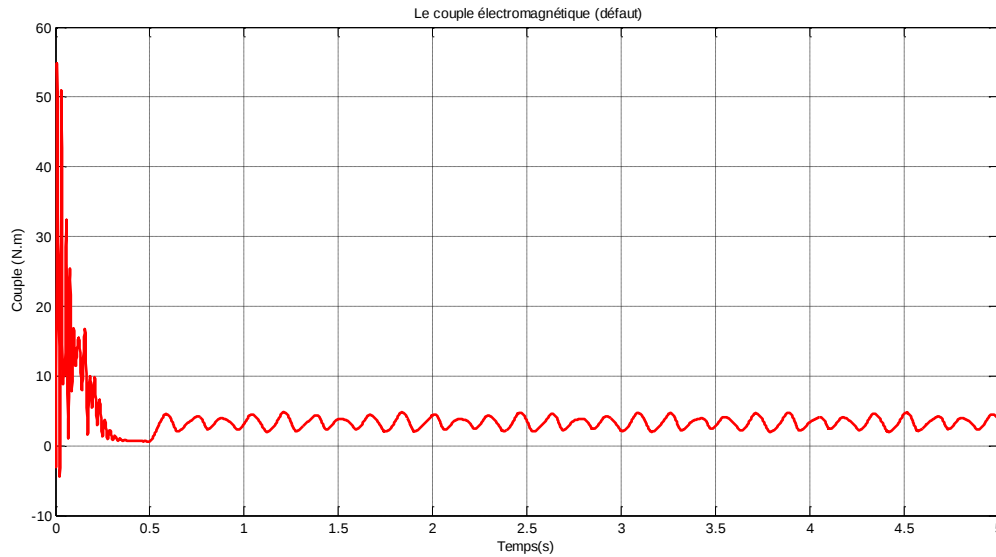


Fig III .8 : Couple électromagnétique d'un moteur avec défaut

III 3-Résultats de simulation d'un fonctionnement avec charge variable:

L'analyse spectrale du courant statorique montre les composantes supplémentaires qui apparaissent en cas de défaut (Fig III .6). Les raies du spectre de la variation de la charge sont données par la relation d'amplitude avec la fréquence (tableau III.1) qui présente un signe de l'existence de cassures de barres.

	<i>Faible charge</i>	<i>Moyenne charge</i>	<i>Plain charge</i>
Amplitude (dB)	38.81	36.15	33.41
Fréquence (Hz)	-23.61	-25.56	20.44

Tableau III.1 : variation d'amplitude et la fréquence avec la variation de la charge

III 3.1. Faible charge :

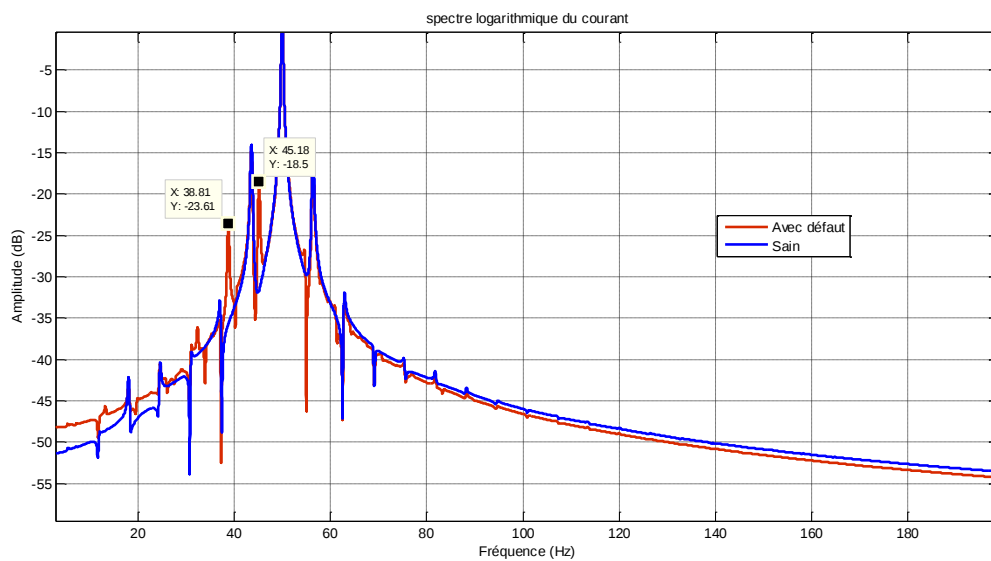


Fig. III .9 : Spectre logarithmique du courant (moteur avec faible charge)

III 3.2. Moyenne charge :

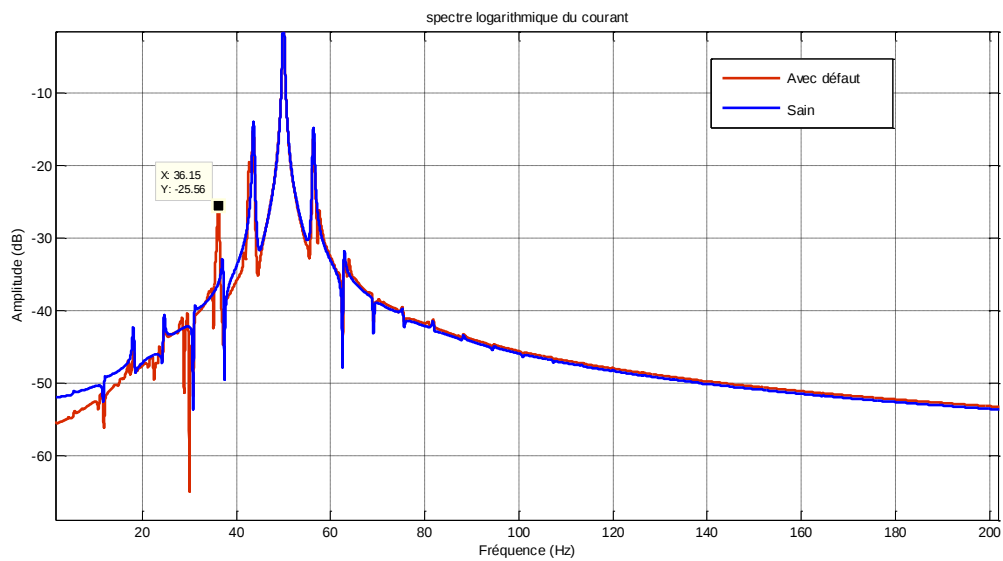


Fig.III .10 : Spectre logarithmique du courant (moteur avec moyenne charge)

III 3. 3. Plain charge :

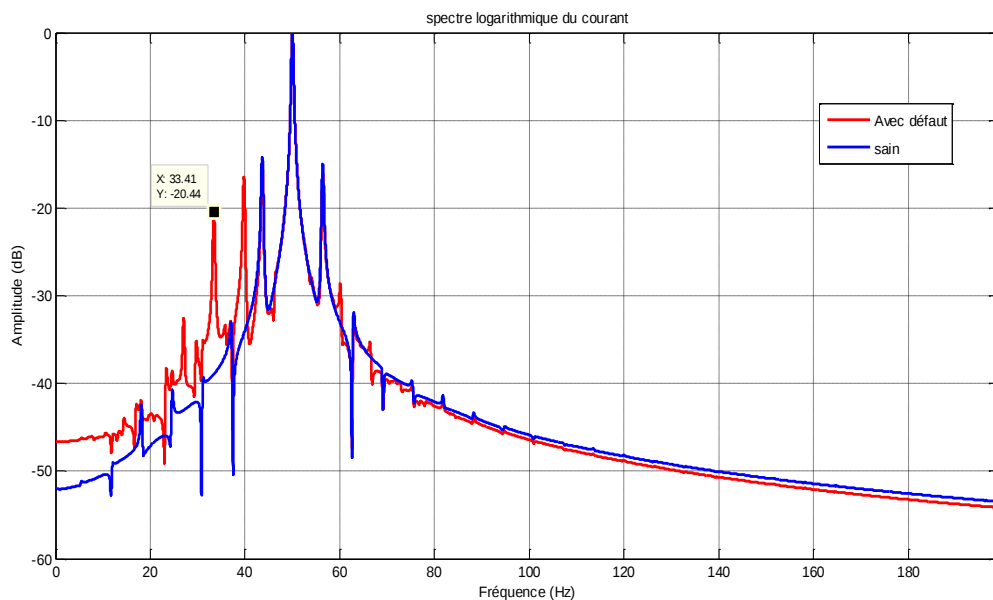


Fig.III .11 : Spectre logarithmique du courant (moteur avec plain charge)

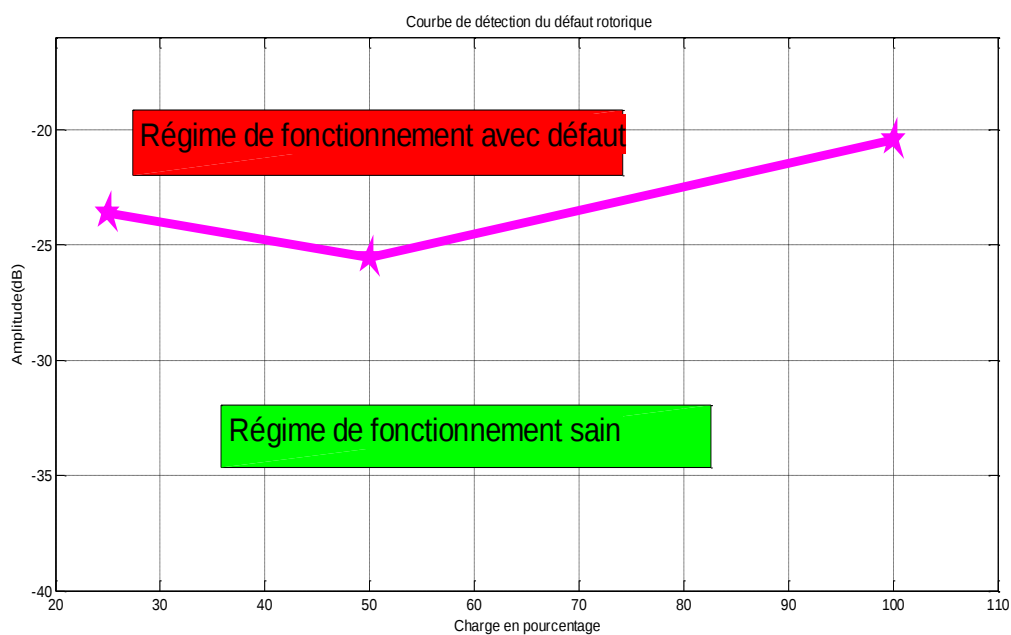


Fig.III .12 : Courbe de détection du défaut rotorique

III.4. Prise en compte de trois défauts simultanés dans la machine asynchrone :

Les défauts simultanés (statorique de type court-circuit entre spires et rotorique de types rupture de barres et excentricité statique) pendant le fonctionnement de la machine sont peu présents. En effet, les vibrations et les frottements consécutifs, dus à une rupture de barres et excentricité statique, peuvent endommager, d'une part, les conducteurs d'encoches au stator et, d'autre part, provoquer un échauffement anormal à cause un défaut statorique.

III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté les résultats de simulation d'un moteur asynchrone triphasé d'un compresseur à piston, pour différents régimes de fonctionnement sain et défaillants.

On a trouvé que la rupture d'une barre provoque des oscillations dans le couple, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique, l'amplitude de ces oscillations augmente avec le nombre et l'emplacement des barres casées et leurs influences sur l'enveloppe du courant statorique.

On a remarqué que la durée du régime transitoire augmente avec le défaut de barres, et on a constaté aussi que les effets de cassures de barres peuvent être inobservables lorsque la machine fonctionne à vide ou avec un charge variable (faible, moyenne et plan charge).

On peut voir que les allures des courants statoriques, la vitesse et le couple électromagnétique ne fournissent pas d'informations fines sur l'état du moteur.

Conclusion

Générale

Conclusion générale :

À cause de leur utilisation fréquente dans diverses applications, les machines asynchrones nécessitent une détection rapide et précoce de leurs défaillances. Le travail présenté s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil.

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

Nous avons ensuite présenté, dans le deuxième chapitre un modèle multi-enroulements permettant la simulation d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Les conséquences d'une rupture de barre de la cage d'écureuil s'obtiennent très simplement, il suffit seulement d'augmenter la résistance de la barre incriminée.

Dans le troisième chapitre, nous avons construit un programme de simulation à l'aide du logiciel *MATLAB 2011a*. Ceci, nous a permis de visualiser les différentes grandeurs de la machine (courant statorique, couple électromagnétique et le courant dans les barres rotoriques) pour fonctionnement à l'état sain et avec défaut, et différents changements sur les régimes permanent et transitoires de la machines et sur sa caractéristique mécanique. Avec la variation de charge qui présenté par le compresseur d'air à piston, celle-ci est proportionnelle à le défaut au niveau des barres cassés.

Bibliographie

- [1] Didier G " Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances " Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.
- [2] Ondel O "Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone" Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006.
- [3] Bachir S "Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique " Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2002.
- [4] BESSAM Besma "Analyse et détection des defaults dans la machine asynchrone a base des techniques intelligentes" Thèse de Doctorat. Université de Biskra, 2016.
- [5] Kerszenbaum L. and Landy C. F "The existence of large interbar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and end-ring faults" IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. 103(7), pp.1854-1862, 1984.
- [6] Schaeffer E., "Diagnostic des machines asynchrones : Modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, France, 1999.
- [7] Y. Laamari, "Diagnostic des défaillances dans les systèmes électromécaniques" Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016.
- [8] B.Yacine ,B.Samir, "Diagnostic des machines électriques par la méthode des éléments finis" Thèse de master, Université Mohamed Boudiaf –M’sila , 2018.
- [9] O'Donnell P., "Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, Part 1", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 21(4), pp. 853 – 864, July/August 1985.
- [10] "Présentation des avaries. Machines électriques tournantes" Cahier des Préventions. CP2, Allianz, 1988.
- [11] Thorsen O. V. and Dalva M., "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(5), pp. 1186-1196, September 1995.

- [12] Lebaroud A., "Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Alegria, 2006.
- [13] Metatla A., Bahi T., HadjadjI.andMedoued A, "Failure detection of eccentricity in asynchronous machine". International Conference of System and Computer, 25-27 November 2008, Cairo. Egypt, 2008.
- [14] MEDOUED Ammar "Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques: Applications aux moteurs asynchrones" Thèse de Doctorat. Université de Skikda, 2012.
- [15] HARZELLI Imadeddine "Contrôle non linéaire de la machine asynchrone en vue du diagnostic des défauts en utilisant des techniques avancées" Thèse de Doctorat. Université de Biskra, 2020.
- [16] Naït-Saïd M. S., Benbouzid M. E. H. and Benchaid A., "Detection of broken bars induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensorless estimation" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.15, (1), pp. 66-70, Mars 2000.
- [17] Elkasabgy N. M., Eastham. A. R. and Dawson. G. E., "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28 (1), Part 1, pp. 165-171, 1992.
- [18] K.Yahia, "contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée par une Approche Modèle", Thèse de Doctorat. Université de Biskra, 2013.
- [19] Bonnett A. H. "Cause and analysis of anti-friction bearing failures in A.C induction motors" IEEE Transactions on Industry Application, pp 14 - 23, Sept/Oct 1993.
- [20] G.Dreyfus, J.M.Martinez, M.Samuelides, M.B.Gordon, F.Badran, and S.Thiria, "Réseaux de neurones : Méthodologie et applications ", Eyrolles, Paris, 2002.
- [21] S. Rajakarunakaran, P. Venkumar, D. Devaraj, and K. S. P. Rao, "Artificial neural network approach for fault detection in rotary system",Appl. Soft Comput., vol. 8, no. 1, pp. 740–748, Jan. 2008.
- [22] R.Isermann, "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing -Tutorial paper". Automatica. vol. 29,no. 4, pp. 815-835. 1993.

- [23] P. M. Frank. "Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge Based Redundancy - A survey and New Results", Elsevier, Automatica, Vol. 26, N° 3, pp. 459-474, 1990.
- [24] J. Gertler, "Fault detection and isolation using parity relations". Elsevier. Control Engineering Practice, Vol. 5, N° 5, pp. 653 - 661. 1997.
- [25] H. Henao, C. Demian, G.A. Capolino. "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor ". IEEE Trans. Ind. Appl, Vol. 39, pp. 1272 - 1279, Sept/Oct. 2003.
- [26] M.E.H. Benbouzid, "Review of induction motors signature analysis as a medium for fault detection". IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 47, pp. 984-993, 2000.
- [27] S. M. A. Cruz "Stator winding fault diagnosis in three-phase using synchronous motors, by the extended Park's vector approach". IEEE Trans. Ind. Appl. 2000.
- [28] M. Sahraoui. " Etude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones", Thèse de Doctorat. Université de Biskra. Déc. 2010.
- [29] A. Menacer, "Contribution à l'identification des paramètres et des états d'une machine à induction pour diagnostic et développement de commande robuste: robustesse vis-à-vis de défauts", thèse de doctorat, université de Batna, Décembre 2007.
- [30] A. Aïcha, "Contribution à l'étude et Au Diagnostic de la Machine Asynchrone", thèse doctorat, université Henri, Nancy, France, 2002.
- [31] T. Ameid, A. Menacer, H. Talhaoui, and I. Harzelli, "Broken rotor bar fault diagnosis using fast Fourier transform applied to field-oriented control induction machine: simulation and experimental study ", Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 92, no. 1–4, pp. 917–928, Sep. 2017.
- [32] S. Bachir, "Contribution Au Diagnostic De La Machine Asynchrone Par Estimation Paramétrique, " Thèse Doctorat, Université de Poitiers, 2002.
- [33] S. Bachir, S. Tnani, J.-C. Trigeassou, and G. Champenois, "Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 3, pp. 963–973, Jun. 2006.
- [34] S. Nandi, T. C. Ilamparithi, S. Bin Lee, and D. Hyun " Detection of Eccentricity Faults in Induction Machines Based on Nameplate Parameters" IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 5, pp. 1673–1683, May 2011.

- [35] M. Y. Kaikaa, M. Hadjami, and A. Khezzar "Effects of the simultaneous presence of static eccentricity and broken rotor bars on the stator current of induction machine " IEEE Trans.Ind. Electron., vol. 61, no. 5, pp. 2452–2463, May 2014.
- [36] M. E. K. Oumaamar, Y. Maouche, M. Boucherma, and A. Khezzar, "Static air-gap eccentricity fault diagnosis using rotor slot harmonics in line neutral voltage of three-phase squirrel cage induction motor " Mech. Syst. Signal Process., vol. 84, pp. 584–597, Feb. 2017.

Résumé

À cause de leur utilisation fréquente dans diverses applications, les machines asynchrones nécessitent une détection rapide et précoce de leurs défaillances. Le travail présenté s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil.

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

Nous avons ensuite présenté, dans le deuxième chapitre un modèle multi-enroulements permettant la simulation d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Les conséquences d'une rupture de barre de la cage d'écureuil s'obtiennent très simplement, il suffit seulement d'augmenter la résistance de la barre incriminée.

Dans le troisième chapitre, nous avons construit un programme de simulation à l'aide du logiciel *MATLAB 2011a*. Ceci, nous a permis de visualiser les différentes grandeurs de la machine (courant statorique, couple électromagnétique et le courant dans les barres rotoriques) pour fonctionnement à l'état sain et avec défaut, et différents changements sur les régimes permanent et transitoires de la machines et sur sa caractéristique mécanique. Avec la variation de charge qui présenté par le compresseur d'air à piston, celle-ci est proportionnelle au défaut au niveau des barres cassées.

Les Mots clé : les machines asynchrones- compresseur- stator- rotor- a cage d'écruile – Matlab

المخلص

نظرًا لاستخدامها المتكرر في تطبيقات مختلفة، تتطلب الآلات غير المتزامنة اكتشافًا سريعًا ومبكرًا لإخفاقاتها. العمل المقدم هو جزء من تشخيص أعطال الدوار في المحركات غير المتزامنة ثلاثية الطور ذات القفص السنجابي. في بداية هذا العمل، تذكرنا العيوب المختلفة التي يمكن أن تؤثر على الأداء السليم لآلة القفص غير المتزامن ثلاثية الأطوار، وكذلك أصولها. بعد ذلك، قدمنا أحدث التقنيات المختلفة لمراقبة الآلات غير المتزامنة. ودستور ضاغط مكبس. ثم قدمنا، في الفصل الثاني، نموذجًا متعدد اللغات يسمح بمحاكاة آلة قفص السنجاب غير المتزامن ثلاثية الأطوار. عواقب كسر قضيب في قفص السنجاب بسيطة للغاية، ما عليك سوى زيادة مقاومة العارضة المعنية. في الفصل الثالث، قمنا ببناء برنامج محاكاة باستخدام برنامج *MATLAB 2011* سمح لنا ذلك بتصور الأحجام المختلفة للآلة (تيار الجزء الثابت، عزم الدوران الكهرومغناطيسي والتيار في قضبان الدوار) للتشغيل في الحالة الصحية ومع وجود خطأ، وتغييرات مختلفة على السرعات الدائمة والعابرة للآلات. على خصائصه الميكانيكية. مع اختلاف الحمل الذي يظهره ضاغط الهواء ذو الكباس، فإنه يتناسب مع الخطأ في القضبان المكسورة.

الكلمات المفتاحية: المحركات اللامتزامنة- الضاغط- الجزء الثابت- الجزء المتحرك- القفص السنجابي –برنامج المحاكاة