

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
**Université A. MIRA - Bejaia**

*Faculté de Technologie*  
*Département de génie électrique*  
*Spécialité machines électriques*



Mémoire de Fin de Cycle  
En vue de l'obtention du diplôme

## **MASTER**

Thème

# **Diagnostic de la machine asynchrone**

Présenté par :  
AIT ELHADJ elhocine  
BENHADDAD iles

Devant le jury composé de :

Mr SAOU Rachid  
Mr TARAFT Saci  
Mr MOKRANI Ahmed

Président  
Encadreur  
Examineur

**Année universitaire : 2021 / 2022**

# Remerciement

*Premièrement, je veux remercier le bon dieu pour la puissance, la volonté et la santé qu'il m'a donnée durant tous ces années d'études.*

*J'adresse mes sincères remerciements à mes parents, maitres de ma vie.*

*Et je voudrais enfin de remercier tous le corps enseignants de la faculté technologie et a tous qui m'aime et que j'aime.*

## Liste Des Figures

### Chapitre I : Généralités sur les machines asynchrones et leurs défaillances

<b>Figure I.1.</b> Photo du stator d'une machine asynchrone .....	3
<b>Figure I.2.</b> Vue schématique en perspective du stator.....	4
<b>Figure I.3.</b> Vue schématique du rotor.....	4
<b>Figure I.4.</b> Circuit magnétique constituant le rotor à cage d'écurueil .....	5
<b>Figure I.5.</b> Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.....	6
<b>Figure I.6</b> Proportion du défaut.....	7
<b>Figure I.7</b> Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.....	8
<b>Figure I.8</b> Causes internes de défauts de la machine asynchrone .....	9
<b>Figure I.9</b> Causes externes de défauts de la machine asynchrone .....	9

### Chapitre II: Modélisation de la machines asynchrone saine et défaillante

<b>Figure II.1</b> Représentation schématique de la MAS .....	18
<b>Figure II.2</b> Position des axes dq par rapport aux axes de la machine .....	21
<b>Figure II.3</b> première modèle avec défaut rotorique.....	25
<b>Figure II.4</b> Modèle de la machine avec défaut rotorique .....	26

## **Chapitre III : Les méthodes et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone**

<b>Figure III.1</b> Transformations de mesures dans un système de diagnostic .....	32
<b>Figure III.2</b> Les méthodes de diagnostic .....	34
<b>Figure III.3</b> Les différentes méthodes de diagnostic .....	37
<b>Figure III.4</b> La structure générale de réseau de neurone .....	38
<b>Figure III.5.</b> Différentes étapes du diagnostic par RDF .....	40
<b>Figure III.6</b> Vulgarisation en schéma d'un système expert.....	44
<b>Figure III.7</b> Architecture habituelle d'un système expert .....	45

## **Chapitre IV Simulation des machines asynchrones défaillantes**

<b>Figure IV.1</b> courant rotorique saine et avec $R_r$ augmente de 25%,75%.....	52
<b>Figure IV.2</b> courant statorique saine et avec $R_r$ augmente de 25%,75%.....	53
<b>Figure IV.3</b> vitesse de rotation saine et avec $R_r$ augmente de 25%,75% .....	54
<b>Figure IV.4</b> couple électromagnétique saine et avec $R_r$ augmente de 25%,75%.....	54
<b>Figure IV.5</b> courante rotorique saine et avec frottement augmente de 25%,75% .....	55
<b>Figure IV.6</b> courant statorique saine et avec frottement augmente de 25%,75% .....	56
<b>Figure IV.7</b> vitesse de rotation saine et avec frottement augmente de 25%,75% .....	57
<b>Figure IV.8</b> couple électromagnétique saine et avec frottement augmente de 25%,75% .....	58

## Table des matières

Remerciement	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1

### **Chapitre I : Généralités sur les machines asynchrone et leurs défaillances**

I.1. introduction.....	3
I.2 Machine asynchrone : Constitution et principe de fonctionnement.....	3
I.2.1 Constitution de la machine asynchrone .....	3
II.3. Principe de fonctionnement .....	5
II.4. Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone.....	7
I.5. Les différents types des défauts internes et externes d'un moteur asynchrone .....	8
I.5.1 /Défaillances au stator .....	10
I.5.1.1 Défauts d'isolant dans un enroulement.....	11
I.5.1.2 Court-circuit entre spires .....	11
I.5.1.3 Court-circuit entre phases-bâti .....	11
I.5.1.4 Court-circuit phase-bâti .....	12
I.5.2 Défauts de rotor.....	13
I.5.2.1 Ruptures de barres .....	13
I.5.2.2 Ruptures d'anneaux .....	13
I.5.2.3 Excentricité statique et dynamique .....	14
I.5.3 Défaillances mécaniques .....	14
I.5.3.1 Défauts des roulements.....	14

## Table des matières

I.5.4 Défaillances du ventilateur .....	15
I.5.4.1 Défauts du Carter.....	16
I.6 Recherche indispensable des symptômes .....	16
Conclusion .....	17

## **Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone saine et défaillante**

II.I. introduction .....	18
II.2 Modélisation de la machine asynchrone saine.....	18
II.2.1 Modèle triphasé .....	18
II.2.2 Transformation de Park.....	21
II.2.3 Choix du référentiel .....	23
II.2.4 Représentation du couple électromagnétique .....	23
II.6 Modélisation de la machine asynchrone avec rupture de barre.....	24
Conclusion .....	27

## **Chapitre III : Les méthodes et techniques de diagnostic de la machine asynchrone**

III.I. introduction.....	28
III.2 Caractéristiques souhaitables d'un système de diagnostic.....	28
III.2.1 Rapidité et sensibilité de détection.....	29
III.2.2 Identification de nouveaux défauts .....	29
III.2.3 La localisation .....	30
III.2.4 Adaptabilité .....	30
III.2.5 Identification des défauts multiple .....	31
III.2.6 Estimation d'erreur de classification.....	31
III.2.7 Facilité d'explication .....	31

III.3 Transformation des mesures dans un système de diagnostic .....	32
III.4. Classification des méthodes de diagnostic .....	33
III.4.1 Approche à base de modèle qualitatif .....	34
III.4.2 Approche à base de modèle quantitatif .....	34
III.4.3 Approche à base d'extraction de caractéristiques qualitatives .....	35
III.4.4 Approche à base d'extraction de caractéristiques quantitatives ....	36
III.4.4.1 La méthode statistique .....	36
III.4.4.1 La méthode non statique .....	36
III.5 Méthodes basées sur une approche système.....	37
III.5.1 Réseaux de neurones.....	37
III.5.2 Reconnaissance de forme (RdF) .....	39
III.5.3 Méthodes de Coalescence (Clustering) .....	40
III.5.4 Méthodes de prises de décision (classification).....	41
III.5.4.1 Discriminant Linéaire – ACP .....	42
III.5.4.2 Les K plus proches Voisins (K- Nearest Neighbors) .....	42
III.5.5. Les systèmes experts.....	43
III.5.5.1 Caractéristiques.....	44
III.5.5.2 Composition.....	44
III.6 Méthodes basées sur une approche signal.....	46
III.6.1 Transformée de Hilbert (TH) .....	47
III.6.2 Transformée de Fourier Rapide (TFR).....	47
III.6.3 Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG) .....	47
III.7 Autres méthodes de diagnostic .....	47
III.7.1 Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques .....	47
III.7.2 Diagnostic par mesure de flux magnétique .....	49
III.7.3 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique.....	49
III.7.4 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée .....	49

## Table des matières

III.7.5 Diagnostic par mesure du courant statorique.....	50
III.8 Choix de méthodes de surveillance pour notre application .....	50
Conclusion .....	51

### **Chapitre IV :simulation des machines asynchrones défaillantes**

IV.1.Introduction.....	52
IV.2 Résultats de simulation.....	52
IV.3.Conclusion .....	59

Conclusion générale .....	60
---------------------------	----

Annexe

Bibliographie

# **Introduction générale**

## | Introduction générale

### **Introduction générale**

Une machine électrique est un dispositif électromécanique fondé sur l'électromagnétisme permettant la conversion d'énergie électrique en travail ou énergie mécanique.

Les machines électriques jouent un rôle primordial dans le développement de la technique industriel, actuellement les machines asynchrones spécialement les moteurs asynchrones sont l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel.

Les moteurs asynchrones jouent un rôle important dans le domaine de la conversion de l'énergie électromécanique. Surtout avec l'évolution de l'électronique de puissance, Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et sont faible coût d'achat de fabrication De plus, la vitesse de rotation est presque constante sur une large plage de puissance. Mais les machines subissent de plus en plus des perturbations aux quelles sont sensibles. Suite aux exigences de la continuité de service vont dans le sens que l'on doit avoir continuellement une information sur l'état de fonctionnalité de la machine (états et paramètres) et notamment sur la manière avec laquelle sa commande est réglée lors l'appétions d'une défaillance.

Dans ce mémoire on va présenter la constitution des machines asynchrones et aussi leurs différentes défaillances qui peuvent se produisent sur ce type de machine et des techniques qui permettent la mise en œuvre d'une procédure de diagnostic. On présentant deux approches principales, à savoir l'approche signal et l'approche système.

Notre objectif est l'étude du modèle simulée des défauts pour une machine asynchrone .en faisant le point sur les modèles conçus (à l'état sain et non sain), Ce mémoire est organisé en quatre Chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités et la constitution sur les machines asynchrones et les différents types de défauts qui peuvent apparaître.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone saine et non saine.

Dans le troisième chapitre on a cité des différent méthodes et techniques de diagnostic dans la machine asynchrone.

## Introduction général

Finalemnt, dans le quatrième chapitre, la simulation des machines asynchrones saines et non saines a été présentée sur matlab simulink.

# **Chapitre I : Généralité sur les machines asynchrones et leurs défaillances**

**I.1.introduction :**

Les moteurs asynchrones triphasés sont les moteurs les plus employés dans L’industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevé, et entretien facile. Le moteur asynchrone est utilisé aujourd’hui dans de nombreuses applications, Notamment dans le transport (trains, métro, propulsion des navires...), dans l’industrie (machines-outils) et dans l’électroménager. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n’est pas Forcement proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter d'une manière condensée des généralités sur les machines asynchrones et leurs défauts, On présente dans un premier temps, la constitution d’une machine asynchrone et son principe de fonctionnement, Ensuite, nous décrivons les différents défauts qui peuvent apparaître dans la machine Asynchrone et provoquer des pannes.

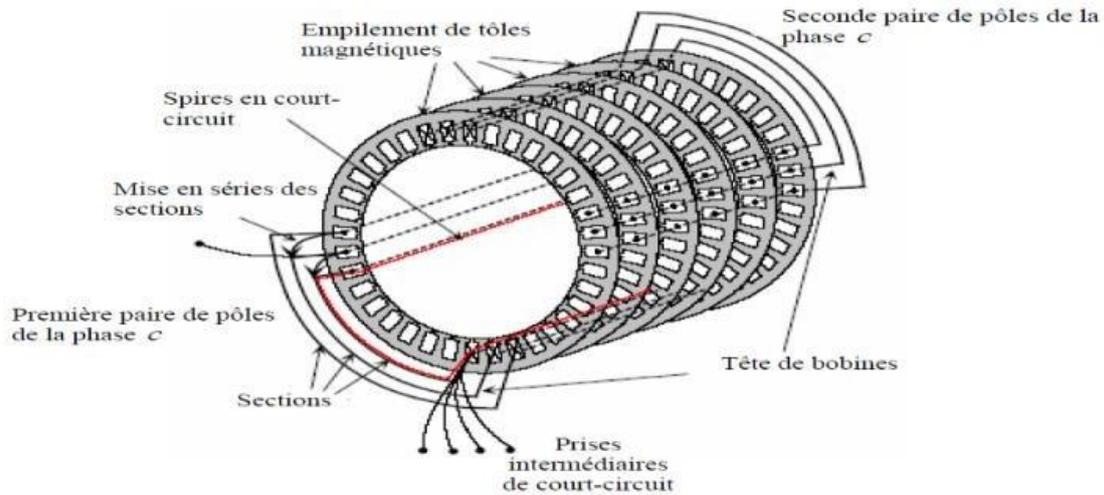
**I.2 Machine asynchrone : Constitution et principe de fonctionnement**

**I.2.1 Constitution de la machine asynchrone**

**-Le stator :** Comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre vide ; ces tôles sont percées de trous à leurs Périphérie intérieur. L’alignement de ces trous forme des encoches dans lesquels on loge un bobinage triphasé. Ces tôles sont isolées entre elles par oxydation pour les moteurs de petites et moyennes puissances ou par un verni pour les moteurs de grande puissance, veuillez voir la figure I.1.

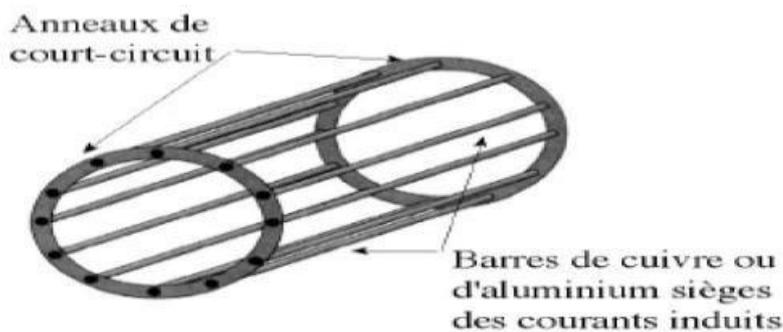


**Figure I.1.** Photo du stator d’une machine asynchrone [33]



**Figure I.2.** Vue schématique en perspective du stator [33]

- **Le rotor** : Se compose d'un cylindre de tôles poinçonnées à leurs périphéries extérieur pour former les encoches destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court, de l'ordre de 0.4 à 2 mm seulement. Il existe deux types de rotor : rotor à cage d'écureuil et rotor bobiné, veuillez voir la figure I.3 .



**Figure I.3.** Vue schématique du rotor[33]

- **Rotor à cage d'écureuil** : l'enroulement à cage d'écureuil est constitué de barres de cuivre nues introduites dans les encoches. Ces barres sont soudées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent, l'ensemble ressemble à une cage d'écureuil dans les moteurs

de petites et moyennes puissances, les barres et les anneaux sont formés d'un seul bloc d'aluminium coulé, veuillez voir la figure I.4.



**Figure I.4.** Circuit magnétique constituant le rotor à cage d'écureuil [33]

- **Rotor bobiné** : comprend un bobinage triphasé semblable à celui du stator placé dans les encoches. Il est composé de trois enroulements raccordés en étoile, l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague tournant avec l'arbre.

Ces bagues permettent, par l'intermédiaire de trois balais d'insérer une résistance extérieure en série avec chacun des trois enroulements lors du démarrage du moteur. en fonctionnement normal, les balais sont court-circuités.

- **organes mécaniques** : le stator autoporteur reçoit de chaque côté un flasque sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements à billes ou à rouleaux suivant le type de charge (Axiale ou radiale). Un ventilateur est placé au bout de l'arbre sur le rotor pour le refroidissement de la machine. Il peut être remplacé par une ventilation forcé motorisé pour le refroidissement aux vitesses lentes.

### I.3. Principe de fonctionnement

L'enroulement statorique reçoit de l'énergie électrique du réseau, ce qui crée un champ

Tournant à la vitesse angulaire ce champs en balayant les barres rotoriques y induit des FEM et donc des courants.

Ces courants induits produiront un champ qui sera de sens opposé au champ statorique, cela va produire un couple moteur qui entrainera la mise en mouvement du rotor dans les sens du champ tournant statorique.

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

$$\Omega_s = \left(\frac{w_s}{p}\right) = \left(60 \times \frac{f_s}{p}\right) \quad (\text{tr/min}) \quad (I.1)$$

$f_s$ : fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation [Hz].

$p$  : nombre de paires de pôles.

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 ( $\Omega_s$ ) et la vitesse de rotation du rotor ( $\Omega$ ). Le glissement ( $g$ ) est alors donné par :

$$g = \frac{(\Omega_s - \Omega)}{\Omega_s} \quad (I.2)$$

Où :

$g$  : glissement.

$\Omega_s$  : vitesse de synchronisme.

$\Omega$  : vitesse de rotation du rotor.

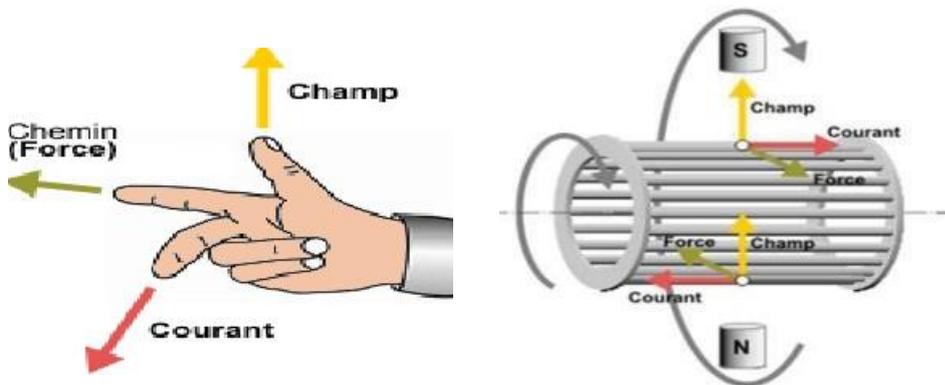


Figure I.5. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone [34]

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

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

- **les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts** : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- **Les amplificateurs de défauts** : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.
- **les vices de fabrication et les erreurs humaines** : défauts de fabrication, composants Défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc. Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance de 50kW à 200kW) a donné les résultats suivants figure (I.6) :

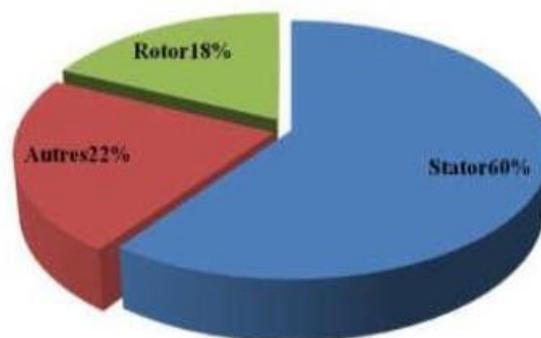
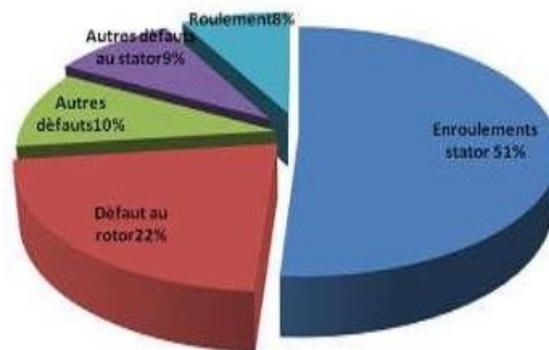


Figure I.6 Proportion du défaut [35]

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure (I.7).



**Figure I.7** Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.[35]

### **I.5. Les différents types des défauts internes et externes d'un moteur Asynchrone**

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.6 et I.7 [3].

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.8 - I.9), 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 rotorique.

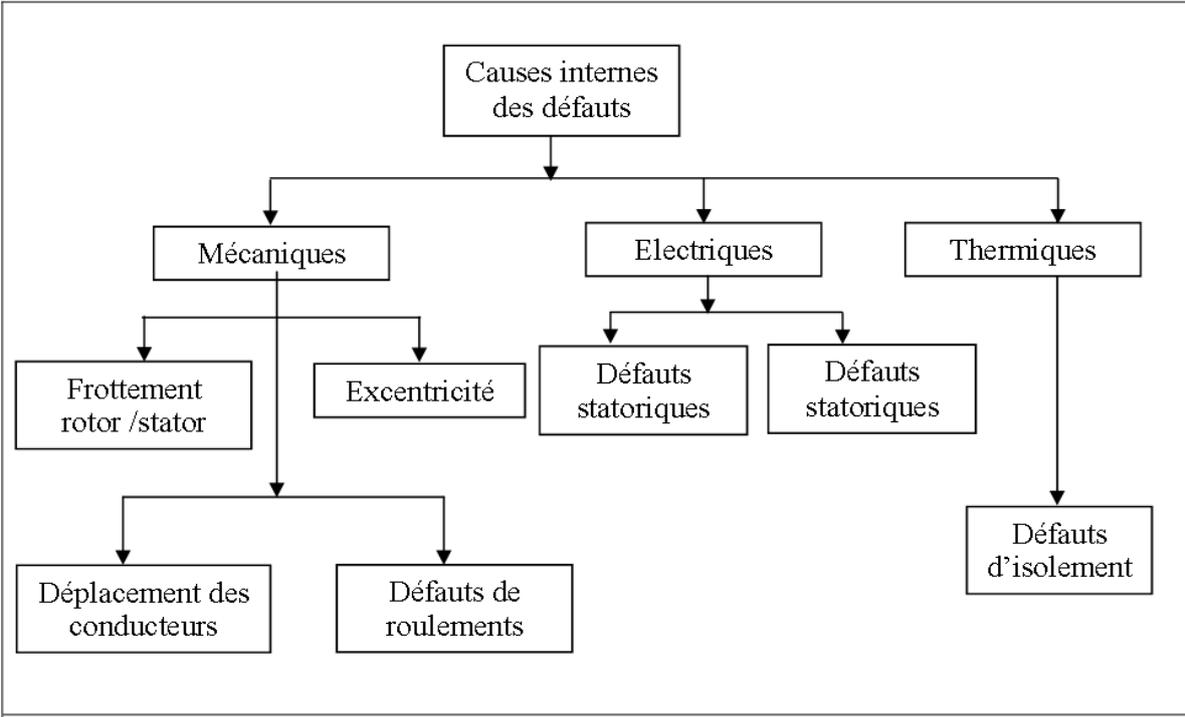


Figure I.8 Causes internes de défauts de la machine asynchrone

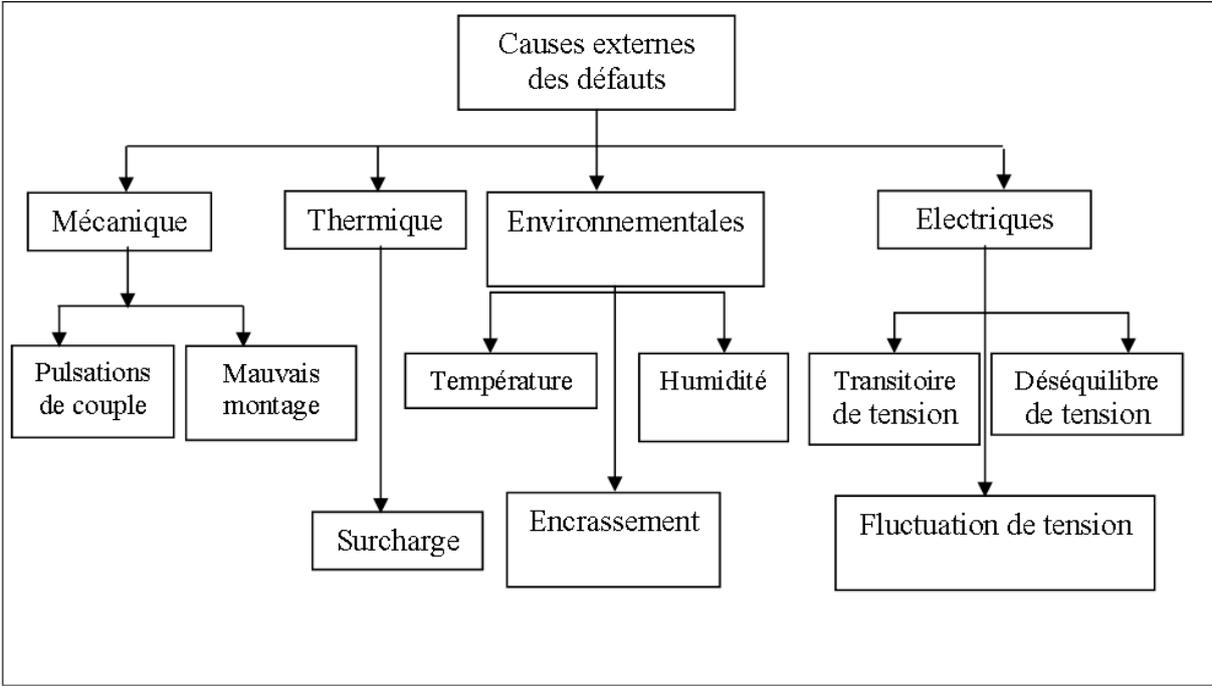


Figure I.9 Causes externes de défauts de la machine asynchrone

Ces courants dans les barres rotoriques engendrent, par conséquent, des suréchauffements 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 de tensions 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[3].

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[4]. 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)[3].

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 à 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 [5]-[6]. 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[3].

### **I.5.1 /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 [7]:

### **I.5.1.1 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.
- Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Fonctionnement dans un environnement sévère.

### **I.5.1.2 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.

### **I.5.1.3 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.

#### **1.5.1.4 Court-circuit phase-bâti**

Le bâti a, généralement, un potentiel flot tant. 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 [7].

## I.5.2 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.5.2.1 Ruptures de barres [8]-[9]

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 [7], 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.

### I.5.2.2 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 [7]. 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

### I.5.2.3 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).

- 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 déroulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Trois cas d'excentricité sont, généralement, distingués [7]:

- 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.

## I.5.3 Défaillances mécaniques

### I.5.3.1 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 [10], 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, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est, généralement, lié à l'usure du roulement 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 delà bande de roulement).
- Le défaut de montage.
- Les courants d'arbres (ShaftCurrent).

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.

#### **1.5.4 Défaillances du ventilateur**

Si le ventilateur n'est pas correctement fixé sur l'arbre ou s'il comporte un nombre de pales cassées, on aboutit à une augmentation anormale de la température de la machine.

**I.5.4.1 Défauts du Carter**

Elles sont généralement dues à :

- Positionnement avec un décentrage du carter sur le bâti.
- Mauvaise fabrication (si les bords du carter ne sont pas usinés Correctement,

les flasques sont alors décentrés par rapport à l’axe de symétrie).

En plus, si les ailettes de refroidissement (sur la surface du carter) sont sous dimensionnées, à cause d’une conception erronée, la machine risque une élévation anormale de sa température au cours du fonctionnement.

**I.6 Recherche indispensable des symptômes**

Lorsque plusieurs défauts présentent les mêmes symptômes, il devient indispensable, pour l’opérateur, de rechercher systématiquement l’existence des symptômes en plus. Il faut insister d'emblée sur le fait que certains de ces symptômes ne sont pas spécifiques à un défaut en particulier et c'est l'analyse minutieuse qui doit faire montrer cela. [11]

Le diagnostic est facile lorsqu’il est fait en temps réel et lorsque les symptômes sont clairs. Le tableau (1) indique quelques modes de pannes typiques observées sur le moteur.

Symptômes	Causes probables
-Intensité réduite, Vitesse élevée et Température réduite.	- Diminution de la charge.
-Température exagérée.	- Ventilation incorrecte.
-Intensité élevée, Vitesse réduite et Température élevée.	- Surcharge.
-Intensité exagérée, Vitesse très réduite et Température exagérée.	- Blocage de rotor ; - Mauvais branchement ; - Moteur chauffé.
- Vitesse réduite.	- Moteur faible.
- Intensité de l’une des phases est exagérée et Température exagérée ; ou - Intensité de deux phases est exagérée et Température exagérée ; ou - Intensité de l’une des phases est exagérée, Température exagérée et Vitesse réduite ; ou - Intensités de deux phases sont exagérées, Température exagérée et Vitesse réduite.	-Court circuit entre spires.
- Intensité d’une phase est nulle.	- Rupture d’une phase du stator ; - Phase non alimentée.
- Intensités de deux phases sont nulles.	- les deux phases non alimentées.

**Tableau I.1** Pannes types observées sur un moteur [11]

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les généralités sur les machines asynchrones, Nous nous sommes penchés sur les principales pannes survenant sur les différentes parties de la machine, ainsi que les causes et les conséquences de leur apparition.

# **Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone saine et défaillante**

### II.1 Introduction :

La modélisation constitue une étape très importante dans la réalisation de la simulation. le modèle mathématique adopté nous aide à comprendre le comportement de la machine en régime dynamique. mais la machine asynchrone compte parmi les systèmes les plus complexes.

Dans ce chapitre, nous ferons la modélisation de la machine asynchrone dans l'état sain et dans l'état non sain (rupture des barres rotoriques).

### II.2 Modélisation de la machine asynchrone saine

#### II.2.1 Modèle triphasé

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 :

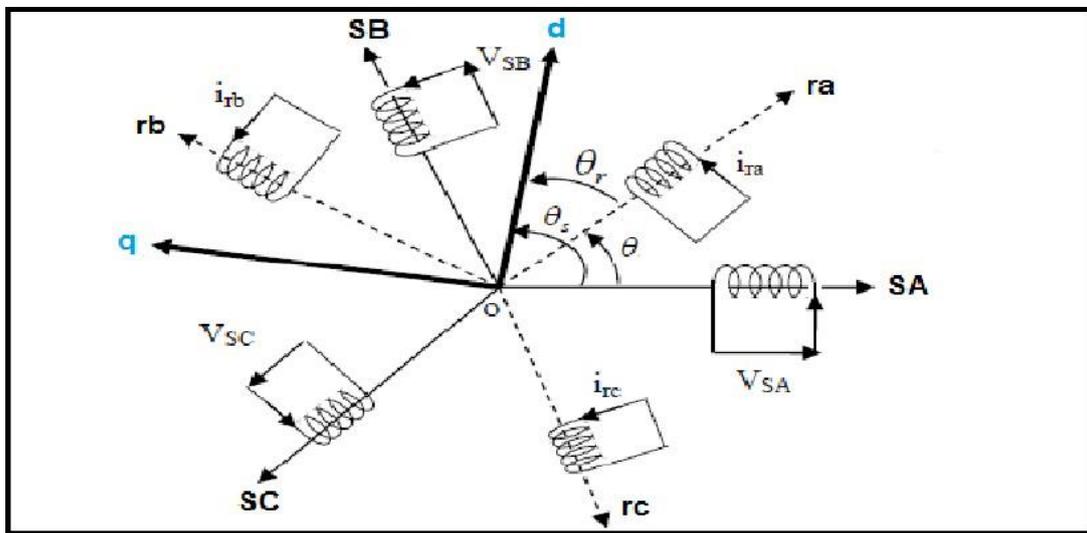


Figure II.1 Représentation schématique de la MAS [13]

#### a. Equations électriques sous formes matricielle [14]

Pour le stator:

$$\begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} U_{ra} \\ U_{rb} \\ U_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Avec les hypothèses simplificatrices précédemment décrites ou les équations des tensions des trois phases statoriques et trois rotoriques s'écrivent :

$$\text{Ou } [U_S]_{abc} = [R_S][i_S]_{abc} + \frac{d}{dt} [\phi_S]_{abc} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Ou } [U_r]_{abc} = [R_r][i_r]_{abc} + \frac{d}{dt} [\phi_r]_{abc} = 0 \quad (\text{II.2})$$

$U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}, U_{ra}, U_{rb}, U_{rc}$  : Les tensions instantanées aux borne de phase statorique et rotorique a, b, c.

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}, i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$  : Les courants instantanées circulants dans ces phase statorique et rotoriques a, b, c.

$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}, \phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$  : Les flux statoriques et rotoriques.

$R_s$  et  $R_r$  : résistance propre statorique et rotorique.

### b. Equations magnétiques sous formes matricielles [14]

L'expression des flux sont :

$$[\phi_S]_{abc} = [L_S][i_S]_{abc} + [M_{sr}][i_r]_{abc} \quad (\text{II.3})$$

$$[\Phi_S]_{abc} = [L_S][i_r]_{abc} + [M_{rs}][i_s]_{abc} \quad (\text{II.4})$$

$$[L_S] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Avec :

$L_s = (l_s - M_s)$  : Inductance cyclique de l'armature S.

$L_r = (l_r - M_r)$  : Inductance cyclique de l'armature R.

$l_s$  et  $l_r$  : Les inductances propres statorique et rotorique

L'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est définie par :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$$

$M_{rs}$  : Mutuelle inductance entre une phase statorique et une phase rotorique.

En substituant les équations des flux (II.3) et (II.4) dans les équations des tensions (II.1),

(II.2) on obtient :

$$[U_S]_{abc} = [R_S][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} ([L_S][i_s]_{abc} + [M_{sr}][i_r]_{abc}) \quad (\text{II.5})$$

$$[U_r]_{abc} = [R_r][i_r]_{abc} + \frac{d}{dt} ([L_r][i_r]_{abc} + [M_{rs}][i_s]_{abc}) = 0 \quad (\text{II.6})$$

On remarque que les équations sont très difficiles à résoudre donc l'étude de la machine asynchrone devient ainsi très compliquée, pour surmonter ce problème on fait appel à la Transformation de Park.

### II.2.2 Transformation de Park

Le modèle biphasé de la MAS s'effectue par une transformation du repère triphasé en un repère biphasé, qui n'est en fait qu'un changement de base sur les grandeurs physiques, il conduit à des relations indépendantes de l'angle et à la réduction d'ordre des équations de la machine. La transformation la plus connue par les électrotechniciens est celle de Park (1929).

Cette transformation ainsi, a pour objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation. La fig.II.2 met en relief l'axe direct d du référentiel de Park, et l'axe en quadrature d'indice q.[15]

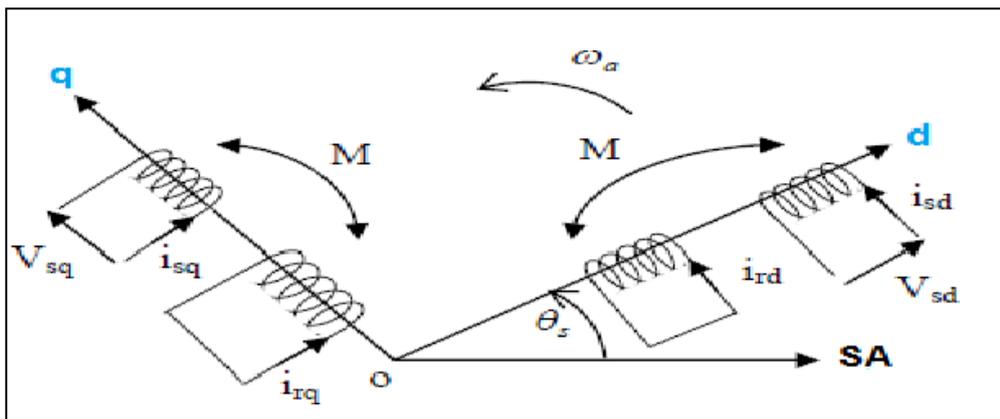


Figure II.2 Position des axes dq par rapport aux axes de la machine [13]

On aura le modèle de la machine asynchrone avec les définitions angulaires suivantes [14]:

$\theta_r$ :est l'angle du rotor entre a et d

$\theta_s$ :est l'angle du stator entre A et d.

$\omega_a$ : est la vitesse angulaire du système d'axe (dq)

$\omega_r$ :est la vitesse angulaire rotorique

Après projection de matrices tensions, courants et flux sur les deux systèmes d'axe on obtient :

$$[v_{dqo}] = [(\theta)] [v_{abc}] \quad (II.7)$$

$$[i_{dqo}] = [(\theta)] [i_{abc}] \quad (II.8)$$

$$[\Phi_{dqo}] = [(\theta)][\Phi_{abc}] \quad (\text{II.9})$$

La matrice de transformation de Park est défini comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

On a choisi le facteur  $\sqrt{\frac{2}{3}}$  pour les valeurs inchangées des puissances électriques instantanées des tensions, courants, et flux.

On obtient finalement le système d'équations de Park qui constitue ainsi un modèle électrique équivalent pour un référentiel lié au champ tournant :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega r$$

#### a. Equations électrique

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega \phi_{sd} \end{array} \right. \quad (\text{II.10})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega \phi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{II.11})$$

#### b. équation magnetique

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_s i_{rd} + M i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_s i_{rq} + M i_{sq} \end{array} \right. \quad (\text{II.12})$$

### II.2.3 Choix du référentiel [16]

Jusqu'à présent, les équations et les grandeurs de la machines ont exprimées dans un repère «dq » qui fait un angle électrique. Avec le stator et qui fait également un angle électrique.

Avec le rotor mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est à dire qu'il est libre. Il existe troischoix important.

On peut fixer le repère **dq** au stator, au rotor ou au champ Tournant

- Référentiel immobile par rapport au stator
- Lié au stator donc ne tourne pas  $\omega_s=0$
- Référentiel immobile par rapport au rotor

Lié au rotor, il se traduit par:  $\omega_s = \omega_r$

- Référentiel immobile par rapport au champ tournant

Lié au champ tournant :  $\omega_s - \omega_r = g.\omega_s$

### II.2.4 Représentation du couple électromagnétique [14]

Le fait de simuler le système dans lerepère dePark nécessite de connaitre la position du rotor on y parvient en introduisant l'équation mécanique de la machine:

L'équation mécanique de la machine sont données par:

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} ( \Phi_{rd} i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd} ) \tag{II.13}$$

Avec  $M = \frac{3}{2} M_{sr}$

La vitesse de rotation mécanique :

$$J \frac{d\Omega(t)}{dt} = C_{em}(t) - f\Omega(t) - Cr \tag{II.14}$$

$\Omega = \frac{\omega}{t}$  : Etant la vitesse de l'arbre moteur

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

Cr : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine

Cem : Couple électromagnétique

### II.3 Modélisation de la machine asynchrone avec rupture de barre [14] :

Les équations de tension et de flux du bobinage de défauts exprimés dans le repéré de biphasé au rotor sont les suivantes :

Les équations de tension et de flux du bobinage de défauts exprimés dans le repéré de biphasé lié au rotor sont les suivantes :

$$0 = n_0 R_r i_0 + \frac{d\theta_0}{dt} \quad (\text{II.15})$$

$$\theta_0 = \frac{2}{3} n_0^2 L_m i_0 + \sqrt{\frac{2}{3}} n_0 L_m [\cos \theta_0 \quad \sin \theta_0] (\bar{i}_{dqs} + \bar{i}_{dqr}) \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$n_0 = \frac{\text{Nombre de spires fictives en défaut}}{\text{Nombre totale de spires fictives par phase}}$$

$\theta_0 = \text{angle repérant de défaut}$

En projetant et sur les axes d et q de Park, on leur associe les vecteurs suivants :

$$\bar{i}_{dq0} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 \end{bmatrix} i_0, \quad \bar{\vartheta}_{dq0} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 \end{bmatrix} \vartheta_0$$

Ainsi les relations et deviennent des vecteurs stationnaires par rapport au rotor, alors l'ensemble des équations de la machine au stator au rotor et au bobinage  $B_0$  est donne par :

$$\bar{U}_{dqs} = R S \bar{i}_{dqs} + \frac{d}{dt} \bar{\vartheta}_{dqs} + \omega P \left( \frac{\pi}{2} \right) \bar{\vartheta}_{dqs} \quad (\text{II.17})$$

$$\bar{\vartheta}_{dqs} = L S \bar{i}_{dqs} + L_m \left( \bar{i}_{dqs} + \bar{i}_{dqr} + \sqrt{\frac{2}{3}} n_0 \bar{i}_{dq0} \right) \quad (\text{II.18})$$

$$0 = R r \bar{i}_{dqr} + \frac{d}{dt} \bar{\vartheta}_{dqr} \quad (\text{II.19})$$

$$\bar{\vartheta}_{dqr} = L_m (\bar{i}_{dqs} + \bar{i}_{dqr}) + \sqrt{\frac{2}{3}} n_0 \bar{i}_{dq0} \quad (\text{II.20})$$

$$0 = n_0 R r \bar{i}_{dqr} + \frac{d}{dt} \bar{\vartheta}_{dq0} \quad (\text{II.21})$$

$$\bar{\vartheta}_{dq0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \bar{n}_0 L_m \mathcal{Q}(\theta_0) (\bar{i}_{dqs} + \bar{i}_{dqr} + \sqrt{\frac{2}{3}} \bar{n}_0 \bar{i}_{dq0}) \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$\mathcal{Q}(\theta_0) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0)^2 & \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) \\ \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) & \sin(\theta_0)^2 \end{bmatrix}$$

Par analogie avec l'étude du schéma équivalent ramené au primaire des transformateurs ; les deux flux de la machine asynchrone en défaut rotorique deviennent :

$$\bar{\phi}_{dqs} = \bar{\phi}_{dqf} + \bar{\phi}_{dqm} = L_f \cdot \bar{i}_{dqs} + L_m (\bar{i}_{dqs} + \bar{i}_{dqr} - \bar{i}_{dq0}) \tag{II.23}$$

$$\bar{\phi}_{dqr} = \bar{\phi}_{dqm} = L_m (\bar{i}_{dqs} + \bar{i}_{dqr} - \bar{i}_{dq0}) \tag{II.24}$$

$$\bar{\phi}_{dq0} = n_0 \mathcal{Q}(\theta_0) \cdot \bar{\phi}_{dqm} \tag{II.25}$$

Avec :

$$\bar{i}_{dq0} = -\sqrt{\frac{2}{3}} n_0 \bar{i}_{dqm} \qquad \tilde{\phi}_{dq0} = -\sqrt{\frac{2}{3}} n_0 \bar{\phi}_{dqm}$$

De même l'équation de tension du bobinage en défaut ramenée au primaire s'écrit :

$$\bar{i}_{dq0} = \frac{2}{3} \cdot \frac{n_0}{R_r} \mathcal{Q}(\theta_0) \cdot \frac{d\bar{\phi}_{dqm}}{dt} = R_0^{-1} \frac{d\bar{\phi}_{dqm}}{dt} \tag{II.26}$$

La bobine représentant le défaut se ramène à un simple quadripôle résistif, non équilibré, mis en parallèle avec l'inductance magnétisante et la résistance rotorique.

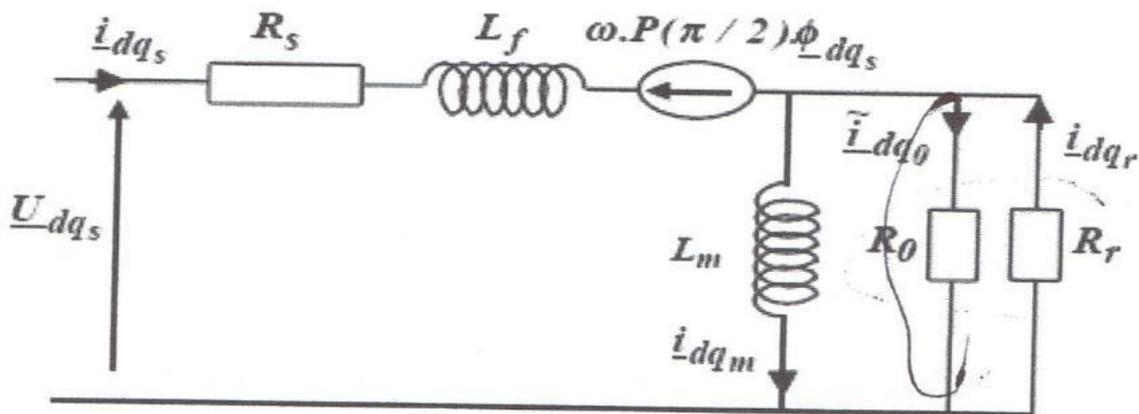


Figure II.3 : première modèle avec défaut rotorique[17]

On peut mettre une résistance équivalente qui correspond à la mise en parallèle de la résistance rotorique et de résistance de défaut alors l'expression de la résistance équivalente au rotor sera :

$$R_{eq}^{-1} = R_r^{-1} + R_0^{-1} = R_r^{-1} + \frac{2}{3} R_r^{-1} Q(\theta_0)$$

$$R_{eq} = R_r + R_{défaut} = R_r - \frac{\alpha}{1 + \alpha} Q(\theta_0) R_r$$

Avec :  $\alpha = \frac{2}{3} n_0$  .ainsi, la résistance équivalente au rotor est la mise en série de la résistance saine  $R_r$  et d'une matrice de défaut  $R_{défaut}$  .la figure suivante présente le schéma équivalent de la machine asynchrone avec fuite ramenée au stator :

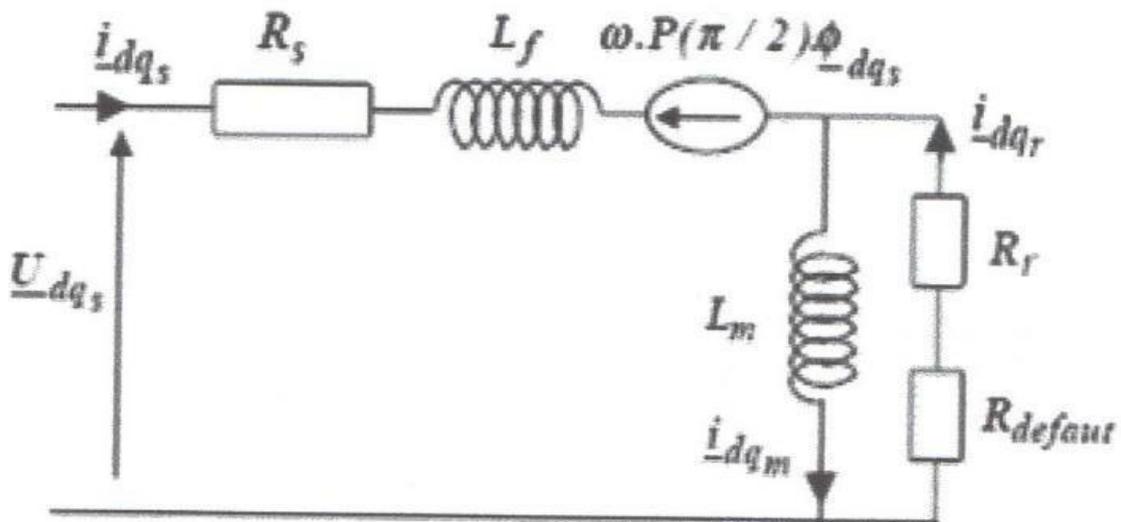


Figure II.4. Modèle de la machine avec défaut rotorique[17]

En effet, vu le caractère purement résistif de ce quadripôle  $R_{défaut}$  .il pourrait être légitime de le confondre avec la résistance rotorique  $R_r$  en fait, il suffit tout simplement d'écrire les expressions respectives de la résistance saine  $R_r$  et la résistance de défaut  $R_{défaut}$  pour pouvoir distinguer leur rôle respectif :

$$R_r = R_r \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{défaut} = -\frac{\alpha}{1 - \alpha} R_r \begin{bmatrix} \cos(\theta_0)^2 & \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) \\ \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) & \sin(\theta_0)^2 \end{bmatrix}$$

En cas d'une marche saine sans défaut de la machine (facteur= 0) la résistance  $R_{\text{défaut}}$  devient nulle. Lorsque le facteur  $\alpha$  est non nul, la résistance  $R_{\text{défaut}}$  introduit un déséquilibre dans les grandeurs rotoriques ainsi que des termes de couplage sur les deux axes d et q du rotor.

### Conclusion

Dans ce chapitre, On a développé un modèle à l'état sain et à l'état non sain (rupture de barres rotorique) pour nous aider à mieux comprendre le comportement de la machine.

En perspective. Nous pouvons proposer les méthodes et les techniques qui ont été présentées dans le chapitre suivant pour la détection et le diagnostic de défauts déferents dans la machine asynchrone.

# **Chapitre III : Méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone**

### III.1.Introduction

La maintenance nécessite de connaître les régimes de fonctionnement des systèmes alors que la surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance dans le but de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic s'intègre à la surveillance en ayant pour objectif de déterminer les causes de dysfonctionnement.

La surveillance et le diagnostic des défauts nécessitent d'obtenir des symptômes caractéristiques du fonctionnement de l'entraînement surveillé et de les analyser pour en déduire l'état du système. l'établissement des symptômes se fait souvent en référence à la connaissance du comportement sain dont on dispose.

La forme et la méthode de génération des symptômes sont tributaires de la forme prise par cette connaissance. Par exemple si le fonctionnement défaillant est mis en évidence par l'apparition des nouvelles raies spectrales dans une grandeur électrique, une analyse en traitement de signal permettra une acquisition des symptômes. Le mode de traitement des symptômes dépend de leur type mais aussi de la forme prise de la connaissance.

Traditionnellement, les symptômes du défaut sont recherchés dans les signaux mesurés: ce sont les méthodes reposant sur une approche signal. Elles traitent en grande partie des informations issues de l'expérience. Les méthodes de surveillance et de diagnostic mises en œuvre s'orientent donc naturellement sur l'analyse du signal (sans ajout de capteur).

Une autre approche, appelée « système » basée sur des méthodes heuristiques, issues de l'expérience et de l'expertise. Des techniques d'aide à la génération et la formalisation des symptômes (mesures) ont permis de fournir une aide à l'expertise en quantifiant les symptômes (analyse de signaux électrique, vibratoire, thermique) mais l'analyse reste une affaire de règles et de classification (reconnaissance de forme, système expert..). Ces méthodes de surveillance nécessitent une bonne connaissance du système et de ces composants.

### III.2 Caractéristiques souhaitables d'un système de diagnostic [18] :

Afin de pouvoir comparer diverses approches de diagnostic, il est utile d'identifier un

ensemble de caractéristiques souhaitables qu'un système de diagnostic devrait posséder. Bien que ces caractéristiques ne soient habituellement possédées par aucune méthode de diagnostic particulière, elles sont utiles pour évaluer diverses méthodes en termes d'information à priori qui doit être fournie, de rapidité, de robustesse, d'adaptabilité, etc. Chaque fois qu'une anomalie produit dans un procédé, un système de diagnostic fournit un ensemble d'hypothèses de défauts qui explique les observations. l'efficacité d'un système de diagnostic demande que le défaut réel soit un sous-ensemble de l'ensemble des défauts suspectés.

La résolution d'un système de diagnostic demande que l'ensemble des défauts fournis soit aussi minimal que possible. Les paragraphes suivants présentent un ensemble de caractéristiques souhaitables qu'un système de diagnostic doit posséder [18].

### **III.2.1 Rapidité et sensibilité de détection**

Un système de diagnostic devrait répondre rapidement en détectant et en diagnostiquant les mauvais fonctionnements du procédé. Cependant, les réponses rapides du diagnostic et les performances tolérables durant un fonctionnement normal sont deux buts différents. Un système qui est conçu pour détecter un défaut rapidement sera sensible aux influences de toutes les erreurs (bruit, incertitudes...). Ceci rend le système sensible au bruit et peut déclencher fréquemment des fausses alarmes pendant un fonctionnement normal.

### **III.2.2 Identification de nouveaux défauts**

Une des fonctionnalités minimales qu'un système de diagnostic doit posséder, est de pouvoir décider, étant donné des conditions courantes de fonctionnement, si le procédé fonctionne normalement ou anormalement, et s'il est anormal, si la cause est un défaut de fonctionnement connu ou un inconnu. Ce critère est connu comme identification de nouveauté (nouveaux événements). En général, on dispose de données suffisantes pour décrire le comportement normal du procédé. Cependant, typiquement on n'a pas de tels historiques de données disponibles pour modéliser les modes de fonctionnement anormaux d'une manière satisfaisante. Seuls quelques gabarits de données peuvent être disponibles pour couvrir une partie du fonctionnement anormal. Ainsi, il est possible qu'une grande partie de la région de dysfonctionnement ne puisse avoir été modélisée. Ceci posera des défis sérieux pour

l'identification de nouvelles situations. Même dans ces conditions difficiles, on voudrait que le système de diagnostic puisse identifier l'occurrence des nouveaux défauts et ne les classifie pas comme d'autres défauts de fonctionnement connus ou comme fonctionnement normal.

### **III.2.3 La localisation**

La localisation est la capacité du système de diagnostic à distinguer entre différents défauts. Dans des conditions idéales exemptes de bruit et d'incertitudes de modélisation, ceci revient à dire que le système de diagnostic devrait pouvoir générer un ensemble d'hypothèses qui ne contient pas les défauts absents. Naturellement la capacité de concevoir de tels systèmes dépend en grande partie de la connaissance de la structure et des caractéristiques du procédé.

### **III.2.4 Adaptabilité**

En général les procédés évoluent en raison des changements des entrées externes ou des changements structurels. Les conditions de fonctionnement du procédé peuvent changer non seulement en raison des perturbations mais également en raison des changements des conditions environnementales telles que les changements des quantités de production avec des demandes variantes, des changements de qualité de matière première, etc. Ainsi le système de diagnostic devrait être adaptable aux changements. Il devrait être possible de développer graduellement la portée du système pendant que les nouvelles situations émergent grâce à la disponibilité d'informations supplémentaires.

### **III.2.5 Identification des défauts multiple**

La capacité d'identifier les défauts multiples est un objectif important, mais difficile, à cause de l'influence simultanée de la plupart des défauts. Dans un système non linéaire général, des interactions se manifestent, et par conséquent un système de diagnostic ne peut pas employer les différents modèles de chaque défaut pour modéliser l'effet combiné des défauts. Par ailleurs, l'énumération des différentes combinaisons de défauts multiples et l'analyse de leurs effets deviennent combinatoires pour des procédés de grande échelle.

### **III.2.6 Estimation d'erreur de classification**

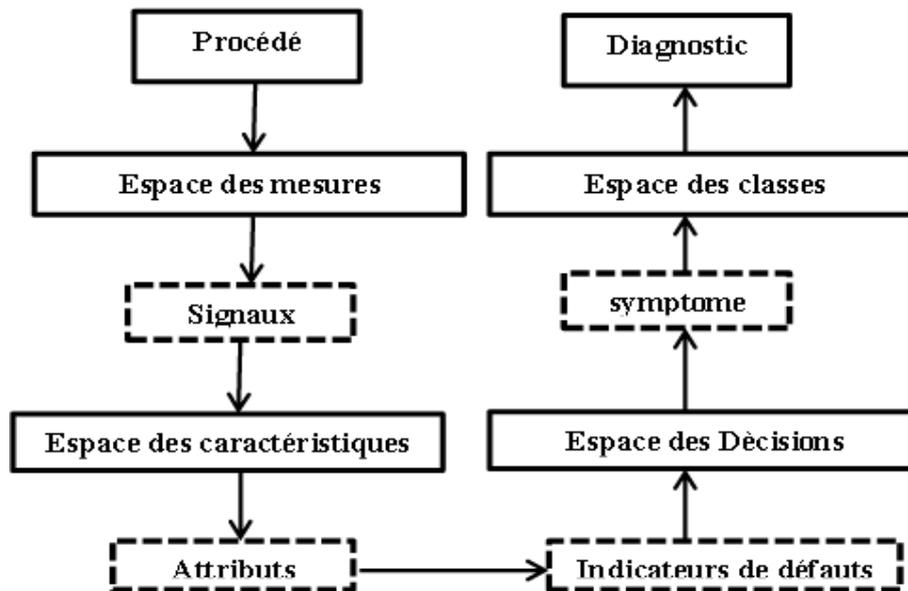
Une condition pratique importante pour un système de diagnostic, est l'établissement des niveaux de confiance. Ceci pourrait être considérablement facilité si le système de diagnostic pouvait fournir une évaluation a priori sur l'erreur de classification qui peut se produire. De telles mesures d'erreur seraient utiles pour projeter des niveaux de confiance sur les décisions produites par le système donnant à l'utilisateur une meilleure sensation à propos de la fiabilité des recommandations proposées par le système de diagnostic.

### **III.2.7 Facilité d'explication**

En dehors de la capacité d'identifier la source d'un défaut de fonctionnement, un système de diagnostic devrait également fournir des explications sur la façon dont le défaut a commencé et a évolué vers la situation actuelle. C'est un facteur très important lorsque l'on conçoit des systèmes interactifs d'aide à la décision en ligne. Ceci exige la capacité de raisonner au sujet de la cause et des effets dans un procédé. Un système de diagnostic doit justifier ses recommandations de sorte que l'opérateur puisse en conséquence évaluer et agir en utilisant son expérience. On voudrait que le système de diagnostic justifie non seulement pourquoi certaines hypothèses ont été proposées, mais expliquer également pourquoi certaines autres hypothèses n'ont pas été proposées.

### III.3 Transformation des mesures dans un système de diagnostic

Généralement, le processus de diagnostic peut être défini comme un processus décisionnel. La décision finale est constituée de l'ensemble des défauts possibles. La figure II.1, montre les diverses transformations que les données du procédé subissent pendant le processus de diagnostic.



**Figure III.1** Transformations de mesures dans un système de diagnostic[19]

**L'espace des mesures** est défini par les sorties du système, ces sorties peuvent avoir subi des prétraitements (élimination de données aberrantes, filtrage,...). Ce sont les entrées du système de diagnostic.

**L'espace des caractéristiques** est l'espace obtenu en fonction des mesures en utilisant une connaissance a priori du problème. Ici, les mesures sont analysées et combinées à l'aide d'une connaissance a priori du procédé pour extraire les caractéristiques utiles concernant le comportement du procédé, pour faciliter le diagnostic. Il y a deux manières de développer l'espace des caractéristiques à partir de l'espace des mesures, à savoir, la sélection et l'extraction des caractéristiques. L'extraction de caractéristiques est un procédé qui facilite, par l'utilisation de la connaissance antérieure du problème, une transformation de l'espace de mesure dans un espace de dimension inférieure.

**Le passage de l'espace des caractéristiques à l'espace des décisions** est habituellement fait pour satisfaire une certaine fonction objective (telle que réduire au minimum la non détection). Cette transformation est réalisée en employant une fonction discriminante, dans certains cas en employant des fonctions simples de seuil.

**L'espace des décisions** est l'espace correspondant au nombre de variables de décision obtenu par des transformations appropriées de l'espace des caractéristiques.

**L'espace des classes** correspond au nombre de classes de défaut. En classant les défauts, nous indiquons catégoriquement à quelle classe un défaut appartient. L'espace des classes est ainsi l'interprétation finale du système de diagnostic fourni à l'utilisateur.

### III.4. Classification des méthodes de diagnostic

Compte tenu de l'importance des enjeux en termes de productivité (arrêt inutile des installations), de sécurité (anomalie non détectée) ou de qualité de production (mesure incorrecte d'une grandeur à contrôler), de nombreuses approches ont été utilisées pour apporter une contribution à la solution du problème de diagnostic.

On distingue cependant, parmi les différentes méthodes, deux familles principales ; celles qui utilisent un modèle du système à surveiller, et utilisent généralement les techniques de l'automatique ; et celles pour qui seules les données acquises sur le procédé considéré, qui se limitent à son observation passée et présente, permettent de caractériser son mode de fonctionnement. Parmi les méthodes basées sur l'utilisation d'un modèle du procédé, deux sous-familles importantes peuvent également être dégagées ; celles utilisant un modèle qualitatif et celles recourant à un modèle quantitatif (dit aussi modèle numérique).

Pour certaines méthodes, cette distinction est cependant sans fondement, car elles utilisent de manière mixte les deux types de modèles en essayant de tirer profit des avantages et s'affranchir des limitations de chacun d'entre eux. Toutes les méthodes nécessitent une phase d'apprentissage qui permet de connaître une référence de fonctionnement normal ou dégradé. Cette référence permet de générer en temps réel les symptômes lors de la phase de diagnostic. Les sections suivantes présentent les grandes familles de méthodes de diagnostic

représentées par la Figure (III.2)[18].

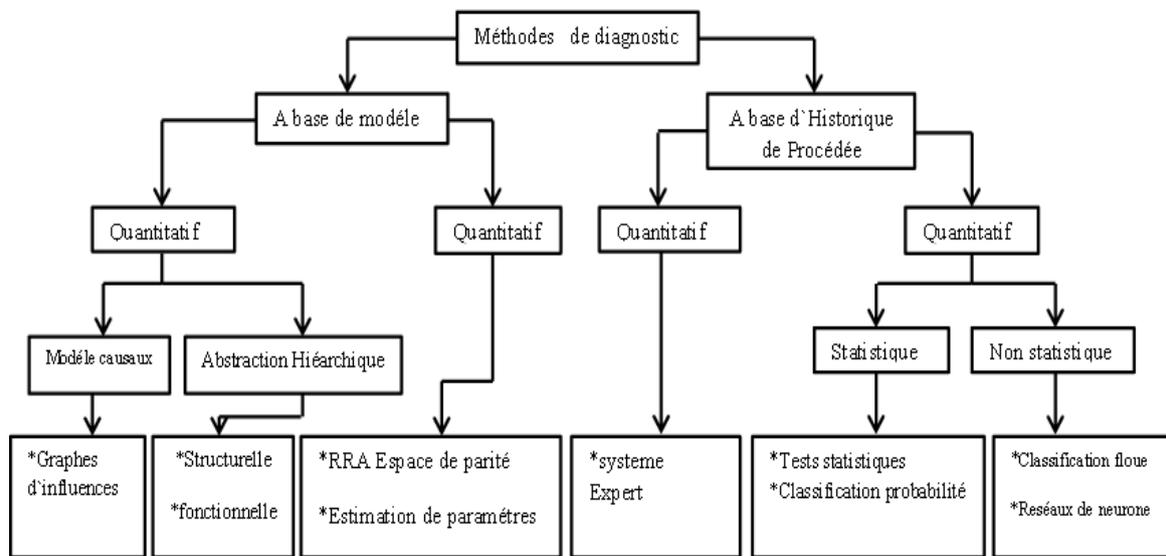


Figure III.2 Les méthodes de diagnostic[18]

#### III.4.1 Approche à base de modèle qualitatif

C'est une connaissance qui s'exprime avec des symboles et peut être traitée, en simulant la façon dont un humain raisonne logiquement, par des techniques informatiques relevant de l'intelligence artificielle. Pour construire des représentations qui permettent une meilleure

#### III.4.2 Approche à base de modèle quantitatif

L'utilisation de modèle mathématique pour le diagnostic est très largement répandue. Les méthodes de surveillance à base de modèle (Model-based-FDI: FaultDetection and Isolation) utilisent un modèle et reposent sur la génération et l'étude d'un signal particulier appelé "indicateur de défaut" ou "résidu".

**Un résidu** est un signal qui reflète la cohérence des données mesurées vis-à-vis d'un modèle comportemental du système. Les modèles utilisés peuvent être de nature et de complexité différente. Ils peuvent être : à temps continu ou à temps discret, linéaires ou non linéaires, représentant le bon fonctionnement ou tenant compte des défaillances. Les sorties du modèle

se représentent classiquement sous la forme de valeurs numériques.

**La localisation** qui suit la détection peut être effectuée à l'aide d'une table de signature ou matrice d'incidence. Les colonnes de cette table sont représentatives des différents défauts et les lignes des différents résidus. Un 1 représente le symptôme qui indique que le résidu est sensible au défaut, un 0 le contraire. La signature d'un défaut (colonne de la matrice) définit l'état des symptômes lorsque ce défaut affecte le système (l'état est une grandeur logique ou symbolique).

**En surveillance**, par contre, il est parfois nécessaire de compléter le modèle afin de caractériser le comportement défaillant du système. Suivant la classe de modèle considérée, les techniques de génération de résidus seront différentes. Suivant le niveau de connaissance sur les défaillances, les résultats de la procédure de surveillance seront plus ou moins précis et complets.

### III.4.3 Approche à base d'extraction de caractéristiques qualitatives

Ces méthodes ont l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance d'un modèle mathématique ou structurel du procédé, contrairement aux méthodes à base de modèles. Seulement, la disponibilité de grandes quantités de données historiques du procédé est nécessaire. Il y a diverses façons de traiter ces données et de les présenter en tant que connaissance a priori pour le diagnostic. Ceci est connu comme l'extraction de caractéristiques. Parmi les méthodes d'extraction de caractéristiques qualitatives, se trouvent les méthodes à base de règles (systèmes experts), et les méthodes de représentation et analyse qualitative des tendances.

### **III.4.4 Approche à base d'extraction de caractéristiques quantitatives**

Dans la section précédente, on a vu la méthode basée sur l'extraction de caractéristiques qualitatives. Dans cette section, on va évoquer la méthode qui extrait les caractéristiques quantitatives. On peut analyser les signaux issus de l'instrumentation et proposer pour chacun de ces signaux un modèle.

#### **III.4.4.1 La méthode statistique**

Comme tests d'hypothèses, classification probabilistes, analyse en composante principale, moindres carrés partiels, cette méthode est, en fait, une référence du comportement d'un signal, qui peut être représentative de l'état normal de l'installation ou d'un défaut particulier.

#### **III.4.4.2 Les méthodes non statistiques**

On peut citer la classification floue, réseaux de neurones, méthodes de signature, méthodes fréquentielles, temps-fréquence et temps-échelle. La méthode non statistique est une autre méthode de représentation pour un signal qui peut très bien être utilisée comme référence pour le diagnostic, est sa représentation par un spectre de fréquences, une signature graphique, ou encore l'extraction d'attributs (ou caractéristiques), à partir des données suivie de leur classification, qui permettent, pour des procédés dont on veut analyser plusieurs signaux liés entre eux, de discriminer divers modes de fonctionnement, dont le mode normal et certains modes de défaillance.

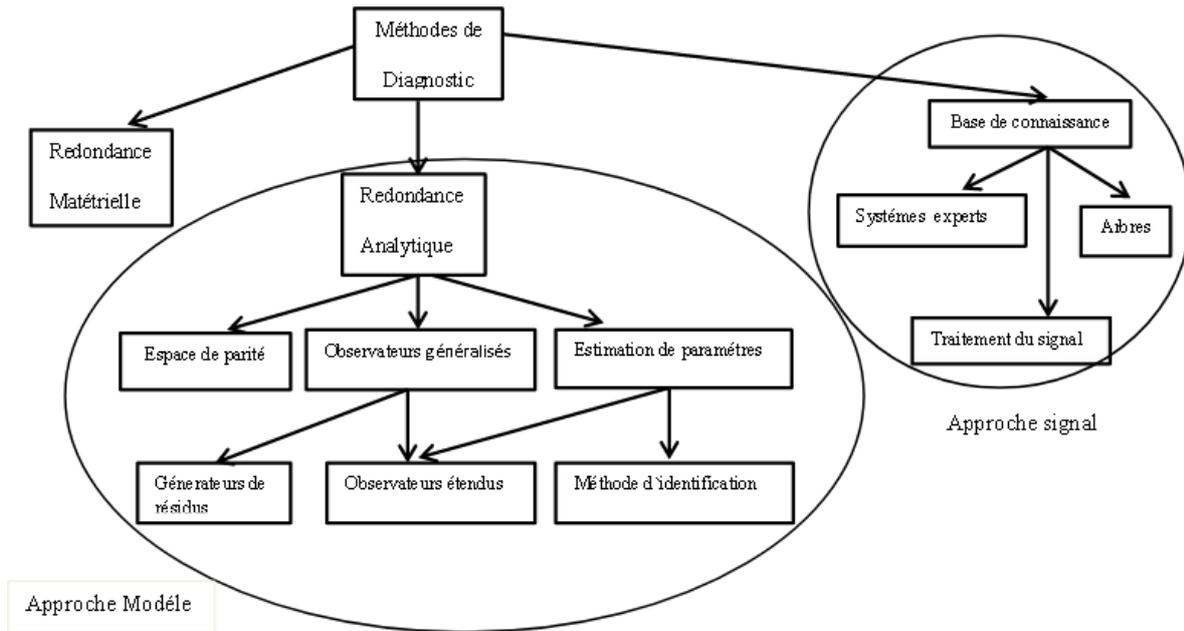


Figure III.3 Les différentes méthodes de diagnostic [19]

### III.5 Méthodes basées sur une approche système

Plusieurs méthodes ont été développées dans la littérature basée sur les réseaux de neurones, la reconnaissance de formes, le neuro-floue, les algorithmes génétiques, les représentations temps fréquence (RTF). Toutes ces méthodes tendent à automatiser le processus de diagnostic depuis l'acquisition des données sur la machine jusqu'à la prise de décision sans l'intervention d'un expert. Dans cette partie, nous allons présenter quelques-unes de ces techniques ainsi que leur application dans le domaine du diagnostic de la machine électrique. [20]

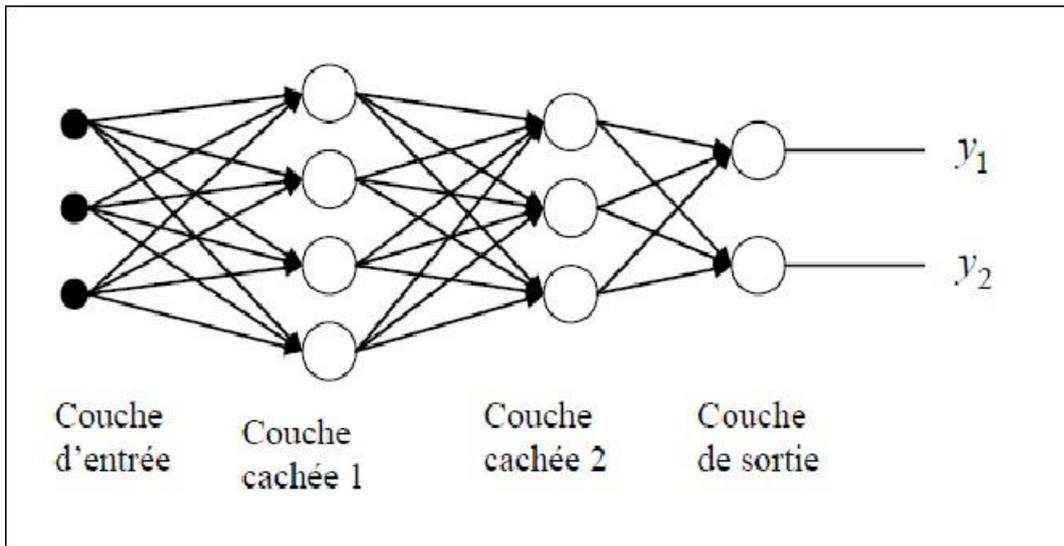
#### III.5.1 Réseaux de neurones

Le principe des réseaux de neurones s'inspire des neurones biologiques. Le modèle du neurone formel se comporte comme un opérateur effectuant une somme pondérée de ses entrées, suivie d'une non linéarité, appelée fonction d'activation, responsable du comportement du neurone.

Un réseau de neurones comprend un certain nombre de couches de neurones interconnectés. Couches d'entrées, couches cachées et couches de sortie. L'entrée représentée par les nœuds de sources fournit des poids d'accès physiques pour l'application des signaux d'entrées.

Les neurones dans la couche cachée, se comportent en détecteurs de caractéristique, tandis que, les neurones dans la couche de sortie présentent à l'utilisateur les conclusions obtenues par le réseau, ou la réponse aux signaux d'entrées (figure III.4). Une loi d'apprentissage permet d'ajuster les poids des connexions afin d'avoir les performances désirées.

L'initialisation du réseau de neurones est un processus itératif d'ajustement des poids et des biais de manière à minimiser un critère d'erreur. Elle constitue la phase d'apprentissage.



**Figure III.4** La structure générale de réseau de neurone[18]

Les avantages des réseaux de neurones :

- La rapidité, très utile lorsque le diagnostic doit être conduit en ligne.
- Un réseau de neurones est robuste surtout vis-à-vis du bruit.

Toutefois un réseau de neurone présente des inconvénients :

- L'apprentissage peut être lent et difficile.
- L'apprentissage est gourmand en temps de calcul. Par ailleurs, il doit être réalisé sur toutes les données à la fois, avec le risque que le réseau oublie les résultats précédents.
- Il est nécessaire de posséder des jeux de données sur toutes les conditions de fonctionnement et en particulier pour les fonctionnements défectueux.
- Un réseau de neurones ne fonctionnera pas forcément correctement hors de sa plage d'apprentissage.

- Une fois entraîné, un réseau de neurones n'est pas flexible. Si de nouvelles données interviennent, il faudra recourir à un nouvel apprentissage. Cependant celui-ci peut être effectué en ligne.

L'intérêt des réseaux de neurones dans le domaine de diagnostic se résume en deux points :

- Le premier point est la faculté de réseau de neurones d'être utilisé en tant que règle de décision dans un processus d'automatisation de l'opération du diagnostic.
- Le second point est la faculté d'apprentissage et de mémorisation d'un grand volume d'information.

### III.5.2 Reconnaissance de forme (RdF)

La Reconnaissance des formes (RdF) repose sur le classement des objets ou formes en les comparant à des formes-types. De manière générale, deux types de RdF se distinguent :

- La RdF structurelle qui se base sur une représentation des formes à l'aide de grammaires. Cette approche ne sera pas développée par la suite.
- La RdF statistique qui s'appuie sur une représentation numérique des formes [20].

La RdF est appliquée pour le diagnostic des défauts de la machine asynchrone. Un vecteur de paramètres, appelé vecteur forme, a été extrait de chacune des mesures effectuées sur la machine. Les règles de décisions utilisées ont permis de classer les observations décrites par le vecteur forme, par rapport aux différents modes de fonctionnement connus avec ou sans défaut. Cette approche permet une classification avec un taux d'erreur presque nul. Toutefois les performances de cette méthode sont liées au choix du vecteur forme. Propose une méthode de sélection des paramètres basée sur un algorithme génétique. Il permet une réduction notable de la dimension de ce vecteur sans perte sensible d'information.

L'approche RdF est une méthode bien adaptée au domaine du diagnostic des défauts. Elle requiert une phase d'apprentissage qui peut être non supervisée. Mais ces méthodes requièrent des volumes de calcul importants, parfois incompatibles avec une exploitation temps réel.

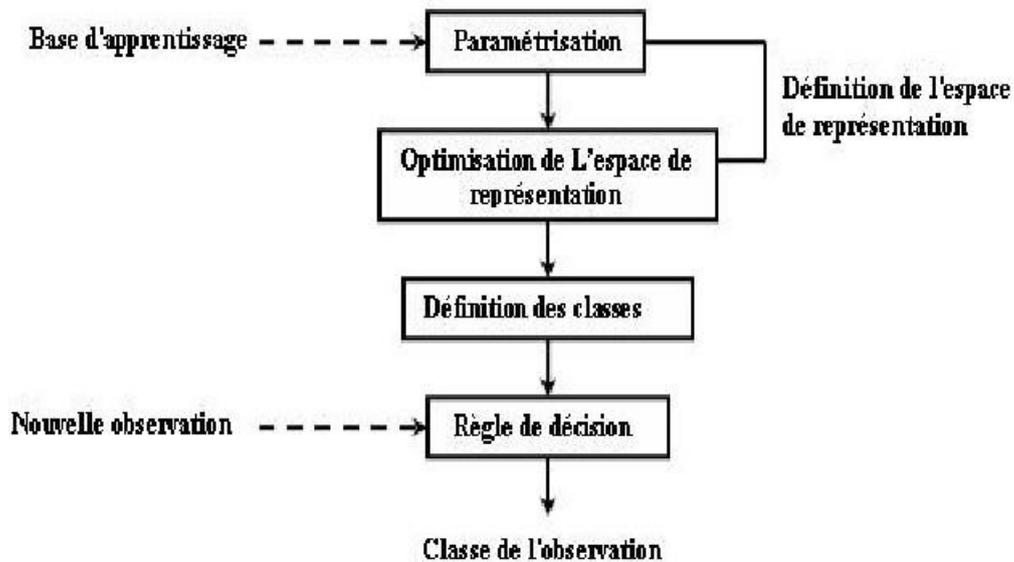


Figure III.5. Différentes étapes du diagnostic par RDF[18]

### III.5.3 Méthodes de Coalescence (Clustering)

Ces algorithmes ont comme paramètres d'entrée le nombre de classes. Ils partagent l'ensemble de  $N$  objets en  $K$ -groupes. Ainsi, la similarité à l'intérieur d'un même groupe est élevée, mais faible entre les différentes classes. Pour ce faire, ces algorithmes itèrent en deux étapes. D'abord, ils calculent les centres des groupes et deuxièmement, ils assignent chaque objet au centre le plus proche.

Chaque classe est caractérisée par le centre ou prototype et par ses éléments. Le prototype des classes est le point dans l'espace de dimension  $d$  ( $d$  correspond au nombre de descripteurs) où la somme des distances à tous les objets d'un même groupe est minimale.

$K$ -Moyen est, sans aucun doute, l'algorithme le plus connu, parmi les différentes méthodes basées sur la distance. Il effectue une séparation stricte de l'espace (c'est-à-dire, chaque objet n'est associé qu'à une seule classe). La mesure de similarité utilisée est la distance. Pour le calcul, plusieurs mesures peuvent être utilisées (la distance euclidienne, Mahalanobis,... etc.). Par conséquent, la forme géométrique change en fonction de la mesure employée (pour le cas euclidien, la géométrie des groupes est une hyper sphère)[21].

Le  $k$ -Moyen flou "FKM" permet d'avoir un regroupement de type flou. Le FKM est un

processus itératif qui permet d'obtenir comme résultat la matrice de partition floue ( $U = [u_{kn}]$ ) laquelle contient les degrés d'appartenance de chaque objet  $x_n$  à chacune des  $K$ -classes.

GK-Moyen [22] est un autre algorithme, reconnu pour ses très bonnes performances. Cet algorithme utilise une norme adaptative de la distance, en obtenant des classes de géométrie hyper-ellipsoïdale avec des axes qui ne sont pas, nécessairement, parallèles aux axes de l'espace des données.

Ceci constitue un avantage face à l'algorithme du FKM parce que le GK-Moyen permet à chaque groupe d'adapter sa norme de distance en fonction de la structure topologique locale des données. Chaque groupe a une matrice de norme induite  $A_k$  qui permet d'obtenir la norme de distance  $D_{nk}^2$  propre à chaque classe [22].

#### III.5.4 Méthodes de prises de décision (classification)

De manière générale, on peut diviser les méthodes de classification entre méthodes avec apprentissage supervisé et méthodes avec auto-apprentissage. Les méthodes avec apprentissage supervisé ont besoin de connaître "a priori" les classes associées aux données d'entraînement.

Dans tous les cas, un vecteur résumant l'information (individu) qui correspond aux échantillons du système, est analysé pour trouver les caractéristiques des classes. La différence entre les deux types de méthodes est la phase d'apprentissage.

Dans le contexte des méthodes basées sur la fouille de données, les méthodes qui se situent dans le "Machine Learning" permettent d'obtenir des règles ou des expressions de classification plus simples, de telle sorte que les résultats obtenus soient facilement interprétables. Un des objectifs de ces méthodes est que l'intervention humaine dans la phase d'entraînement soit minimale et qu'en même temps, les classes obtenues soient facilement interprétables.

#### III.5.4.1 Discriminant Linéaire – ACP

Il s'agit d'un algorithme standard et qui est le plus utilisé dans différents systèmes de diagnostic industriel.

Le but principal de l'ACP est donc de trouver un ensemble de facteurs (composantes) qui ait une dimension inférieure à celle de l'ensemble original de données et qui puisse décrire correctement les tendances principales. L'ACP est une procédure qui ne prend en compte que les variables du processus. Parfois, un ensemble additionnel de données est disponible.

Le discriminant linéaire suppose une distribution normale des données avec des moyennes différentes. Ce type de distribution est justifié quand il y a une grande quantité de données. L'objectif est de trouver les hyperplans qui divisent l'espace des données. En principe, un hyperplan de dimension  $d$  (avec  $d$  égal au nombre de descripteurs) est tracé de telle manière qu'il passe par le milieu de la ligne qui unit les centres de chaque classe.

L'algorithme cherche à obtenir des fonctions discriminantes paramétriques (hyperplans), à partir de la minimisation de l'erreur quadratique de classification. Par conséquent, c'est une technique qui requiert de connaître **a priori** les classes de l'ensemble des données d'entraînement. Une fois la partition de l'espace obtenue, de nouvelles données peuvent être classées.

#### III.5.4.2 Les K plus proches Voisins (K- Nearest Neighbors)

C'est la première méthode de classification qui ne suppose pas un type de distribution des données et c'est la première à proposer une analyse de similitude entre des données en utilisant la distance entre elles [23]. L'algorithme fait un calcul de distance entre tous les individus et chaque objet est classé dans le groupe où se trouvent ses K plus proches voisins. Les k plus proches voisins sont des individus de l'ensemble des données d'entraînement. Habituellement, la distance employée pour l'analyse est la distance euclidienne. Normalement le nombre des K voisins est un ou trois, mais cette valeur dépend de l'application [19].

### III.5.5. Les systèmes experts

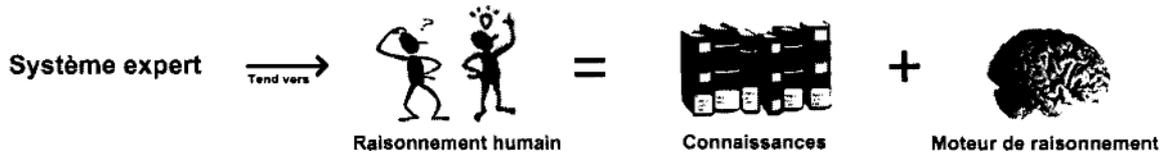
Les systèmes experts sont des outils conçus pour pouvoir modéliser l'approche des experts dans un domaine spécifique. Ils permettent de formaliser leurs connaissances et fournissent un mécanisme pour les exploiter. Lorsque le mode de représentation de la connaissance est de type symbolique, l'approche par système expert est favorisée. Dans ce cadre, la connaissance a priori sur le système est représentée par un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance. Cette base est construite à l'aide d'outils d'aide à la formalisation, ces outils sont fortement liés à l'application.

L'architecture générale d'un système expert se compose principalement de deux éléments :

Une base de connaissance et un moteur d'inférence. Le moteur d'inférence représente l'organe de résolution, son fonctionnement est basé sur des méthodes de résolution indépendantes du contexte. Une méthode de résolution inclut en général les étapes suivantes :

1. la sélection de règles dans la base de connaissance en fonction des faits établis,
2. la résolution des conflits entre les règles sélectionnées,
3. l'exécution en indiquant les conditions de déclenchement et les conséquences

Jusqu'à ce que le but recherché soit atteint, par exemple le diagnostic. En diagnostic, ce type d'approche est adapté aux problèmes nécessitant la manipulation d'une quantité importante de données non homogènes. Ils ont beaucoup été utilisés dans le diagnostic des systèmes statiques. Pour des systèmes dynamiques, ce type d'approche est peu adapté pour des problèmes de temps-réel et de gestion dynamique de l'information. Pour des applications industrielles, on pourra se référer à. On peut aussi faire référence à quelques articles traitant le problème du diagnostic des moteurs électriques à partir de ces systèmes.



**Figure III.6** Vulgarisation en schéma d'un système expert[25]

### III.5.5.1 Caractéristiques

Les systèmes experts sont utiles dans un grand nombre de situations.

- Besoin de faire le diagnostic de problèmes dans un contexte donné.
- Besoin de comprendre la nature d'une situation en particulier.
- Besoin de prédire les répercussions d'un événement courant ou futur.
- Besoin de contrôler un processus ou une activité particulière.
- Besoin de recommandations ou d'une solution pour un problème particulier.

Bien entendu, un système expert n'est pas infallible. Comme n'importe quel expert humain, il peut faire des erreurs. Un certain nombre des erreurs provenant de l'expert humain est dû à la fatigue d'analyse, la trop grande charge de travail, le manque de temps, etc. Avec l'utilisation d'un système expert, ce genre d'erreur est éliminé, ce qui diminue le nombre d'erreurs possibles. D'un autre côté, une limitation d'un système expert par rapport à un expert humain est qu'il n'utilise pas le sens commun, le «bon sens», l'intuition, contrairement à un expert humain. Cependant, les bénéfices de l'utilisation de ce type de système sont nombreux.

- Augmente la rapidité dans la prise de décision.
- Augmente la productivité des experts humains.
- Améliore la consistance dans les décisions.
- Améliore la compréhension des décisions à l'aide d'explication.
- Améliore la gestion de l'incertitude dans les décisions.
- Formalisation de la connaissance sur le domaine du système expert.

### III.5.5.2 Composition

Voici l'architecture commune d'un système expert :

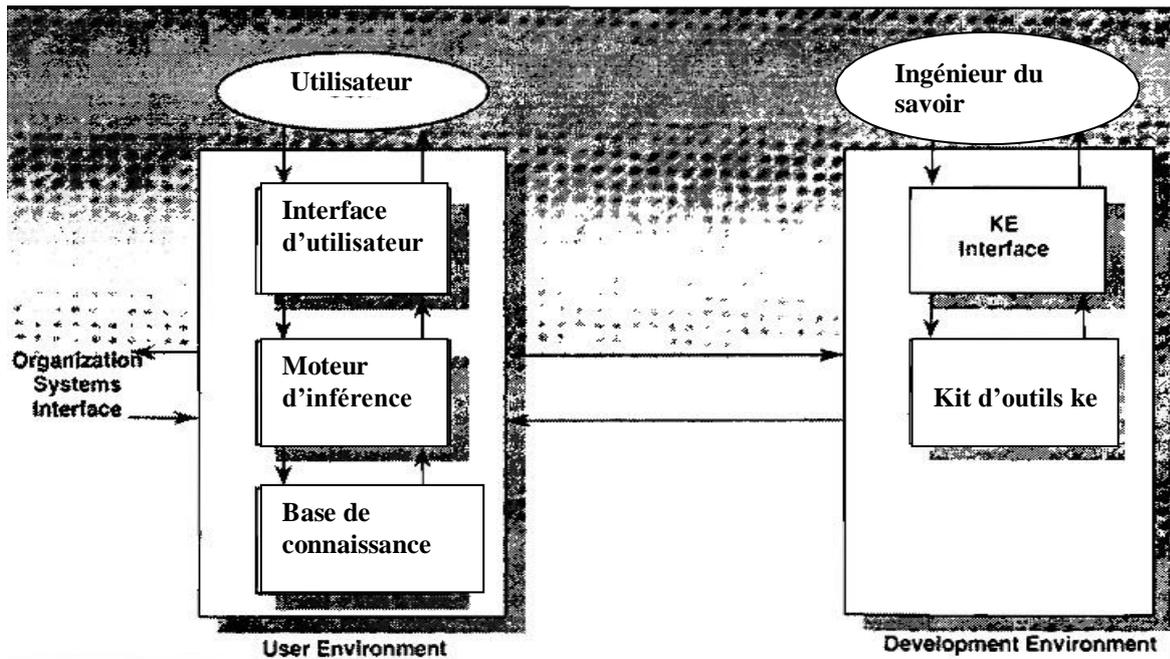


Figure III.7 Architecture habituelle d'un système expert [25]

#### Base de connaissances :

Une base de connaissance regroupe des connaissances spécifiques à un domaine spécialisé donné, sous une forme exploitable numérique.

Elle peut contenir des règles, dans ce cas on parle de base de règles, des faits ou d'autres représentations c'est-à-dire l'ensemble des propriétés générales de l'existant.

Si les algorithmes de manipulation de faits et de règles sont nombreux et connus, la détermination de l'ensemble des faits et règles qui vont composer la base de connaissances est un problème délicat.

Ainsi, comment décrire le comportement d'un expert face à un problème particulier, et sa manière de le résoudre, là est la question. Car ce que l'on souhaite obtenir n'est ni plus ni moins que l'expérience, la connaissance pratique de l'expert, et non la théorie que l'on peut trouver dans les livres ni exclusivement les règles logiques d'inférence.

Equivalents des méthodes d'analyse de l'informatique traditionnelle, des méthodes d'acquisition des connaissances sont développées.

#### Moteur d'Inférence :

Le moteur d'inférence, du verbe « inférer » qui signifie « déduire », est capable d'utiliser faits et règles pour produire de nouveaux faits, jusqu'à parvenir à la réponse à la

question experte posée.

Il existe de nombreux types de moteur, capables de traiter différentes formes de règles logiques pour déduire de nouveaux faits à partir de la base de connaissance. On distingue souvent trois catégories, basées sur la manière dont les problèmes sont résolus :

- Les moteurs - dits à « chaînage avant » - qui partent des faits et règles de la base de connaissance, et tentent de s'approcher des faits recherchés par le problème.
- Les moteurs - dits à « chaînage arrière » - qui partent des faits recherchés par le problème, et tentent par l'intermédiaire des règles, de « remonter » à des faits connus.
- Les moteurs - dits à « chaînage mixte » - qui utilisent une combinaison de ces deux approches chaînage avant et chaînage arrière.
- Certains moteurs d'inférence peuvent être partiellement pilotés ou contrôlés par des métarègles qui modifient leur fonctionnement et leurs modalités de raisonnement.
- Dans un système expert à base de règles, le chaînage avant est une méthode de déduction qui applique des règles en partant des symptômes pour en déduire de nouvelles conclusions. Ces conclusions enrichissent la mémoire de travail et peuvent devenir les prémisses d'autres règles. Par opposition, le chaînage arrière (en)part des conclusions pour essayer de « remonter » aux axiomes.

#### **Programme utilisateur :**

Ce programme permet à l'utilisateur d'interagir avec le système expert. Tout dépendant du type et du contexte du système expert, le programme utilisateur offre différentes possibilités comme par exemple des possibilités de configuration.

### **III.6 Méthodes reposant sur une approche signal**

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. Dans ce que suit, on présente brièvement les transformées de Hilbert (TH), Fourier rapide (TFR), Fourier à fenêtre glissante (TFFG) et la transformée en ondelettes (TO).

### **III.6.1 Transformée de Hilbert (TH)**

C'est une technique parmi les plus connues dans le domaine du traitement de signal. Elle peut être utilisée pour analyser les signaux dans les différents secteurs techniques même en diagnostic [26]. Contrairement à la transformée de Fourier, qui transforme un signal issu du domaine temporel en un signal exprimé dans le domaine fréquentiel, la transformée de Hilbert (TH), ne change pas le domaine du signal. En effet, la transformée de Hilbert d'un signal dépendant du temps.

### **III.6.2 Transformée de Fourier Rapide (TFR)**

La transformée de Fourier rapide (TFR) est une technique largement utilisée pour la détection des défauts dans les machines asynchrones. Elle donne de bons résultats pour des fonctionnements à forte puissance ou à couple constant mais des difficultés apparaissent pour les fonctionnements à couple de charge, vitesse de rotation et tensions d'alimentation variables. La nécessité de trouver d'autres techniques de traitement de signal pour les signaux non stationnaires devient donc nécessaire.

### **III.6.3 Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG)**

Pour pallier le manque d'information sur le temps dans la transformée de Fourier, la TFFG est donc introduite. Cette méthode, pouvant être adaptée aux signaux non stationnaires, est très proche de l'analyse de Fourier classique. Son principe est de définir une fenêtre qui sera utilisée comme masque sur le signal, dans laquelle on considère que le signal est localement stationnaire, puis on décale cette fenêtre le long du signal afin de l'analyser entièrement [27].

## **III.7 Autres méthodes de diagnostic**

### **III.7.1 Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques**

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus

utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [28].

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0}$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer, est le produit de la F.m.m (Fm) et de la perméance (P).

$$B_s = F_m \times P_m$$

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

Pour la surveillance de vibrations on utilise des capteurs tels que les accéléromètres. Des balourds magnétiques, mécaniques et/ou des forces produisent des vibrations. Ces dernières sont mesurées suivant la direction radiale ou la direction axiale. Les mesures ainsi effectuées sont analysées du point de vue spectrale.

Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Ceci permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques (défauts d'enroulements statoriques, irrégularité d'entrefer et asymétrie de l'alimentation).

### III.7.2 Diagnostic par mesure de flux magnétique

Dans une machine idéale sans défaut, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. L'analyse spectrale de la tension induite dans cette bobine, peut être exploitée pour détecter les différents défauts comme la rupture de la barre rotorique[29].

### III.7.3 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur[30].

### III.7.4 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet des nombreux travaux. Car la puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase (oscillations plus importantes et plus visibles). Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres.

### III.7.5 Diagnostic par mesure du courant statorique

Parmi tous les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car il est très facile d'accès et nous permet de détecter aussi bien les défauts électriques que les défauts purement mécaniques. Cette technique est dénommée "Signature Analysis" (MCSA). Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liée à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles).
- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présentés dans le spectre du courant. La surveillance via le courant statorique nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures. Elles sont utilisées pour le moment dans le contexte de machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquence caractéristique de défauts.

M. Cardoso a présenté l'approche du vecteur de Park. Cette approche utilise les grandeurs biphasées  $i_{sd}$ , et  $i_{sq}$  pour l'obtention de la courbe de lissajou :  $i_{sq} = (i_{sd})[31]$ .

### III.8 Choix de méthodes de surveillance pour notre application

La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique, consiste à déterminer les valeurs numériques des paramètres structuraux d'un modèle de connaissance qui gouverne le comportement dynamique du système. La première étape est donc, l'élaboration d'un modèle mathématique de complexité raisonnable pour caractériser la machine en fonctionnement sain et dégradé. Notre approche repose tout d'abord sur une modélisation des défauts que l'on pourra détecter. En effet, les défauts statoriques ou rotoriques doivent être discriminés au niveau des paramètres physiques estimés, pour qu'on puisse les détecter et les localiser. Le modèle de Park est souvent utilisé en diagnostic pour l'estimation paramétrique [32], voici les méthodes étudiées:

**Méthodes de traitement du signal (analyse spectrale) :** sont utilisées pour la surveillance de la machine asynchrone, elle consiste à analyser le spectre du courant statorique d'une seule phase(ou des trois mais de façon indépendante l'une de l'autre). Cette analyse est basée sur la comparaison du spectre du courant de phase du moteur asynchrone avec le spectre dit de référence ‘ ‘ spectre représentant un moteur sain’ ’.

**Méthodes de redondance analytique (approche modèle) :** un modèle dynamique est utilisé en parallèle avec le système réel. En utilisant des entrées identiques et comparant les sorties du modèle aux sorties du système réel, un résidu pour la détection de défaut est généré. Alternativement, les paramètres du modèle numérique peuvent être identifiés en utilisant les entrées et les sorties du système réel. Les valeurs de ces paramètres peuvent donner des informations sur les différents défauts dans la machine.

### **Conclusion**

Pour la maintenance, nous devons connaître les régimes de fonctionnement des systèmes tels que le contrôle et les différentes méthodes et techniques de diagnostic.

On a présentés dans ce chapitre les différentes techniques de détection des défauts dans la machine asynchrone, nous avons présentés aussi plusieurs techniques qui peuvent être utilisé seul ou d'une façon multiples.

Ce chapitre est consacré à l'analyse de deux approches l'approche signal et l'approche Système, un ensemble de techniques et de méthodes a été exposé.

# **Chapitre IV : Simulation de la machine asynchrone défailante**

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous considérons la simulation du modèle de la machine asynchrone, permettant de représenter les différentes courbes du courant du stator, du courant rotor, du couple et de la vitesse.

La simulation est effectuée dans différentes conditions d'exploitation: la machine dans un état sain et défectueux.

- Défauts électrique (on augmente et on diminue la résistance rotorique).
- Défauts mécanique (on augmente le frottement).

### IV.2 Résultats de simulation

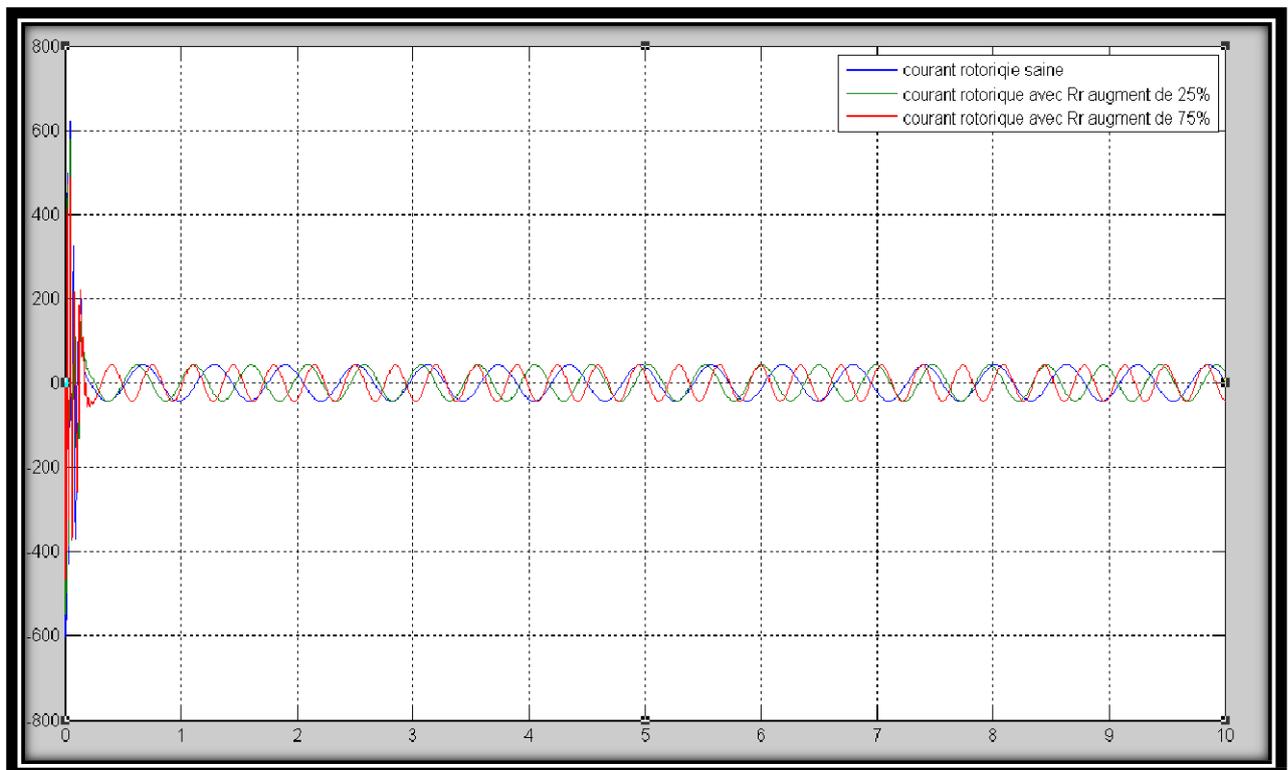


Figure IV.1 courant rotorique sain et avec Rr augmenté de 25%,75%

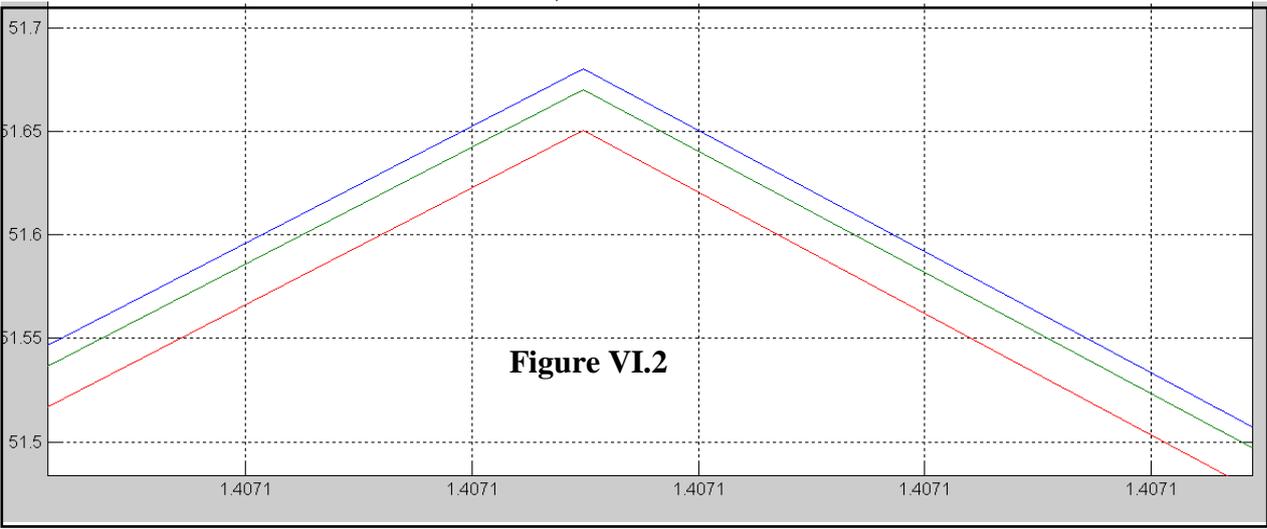
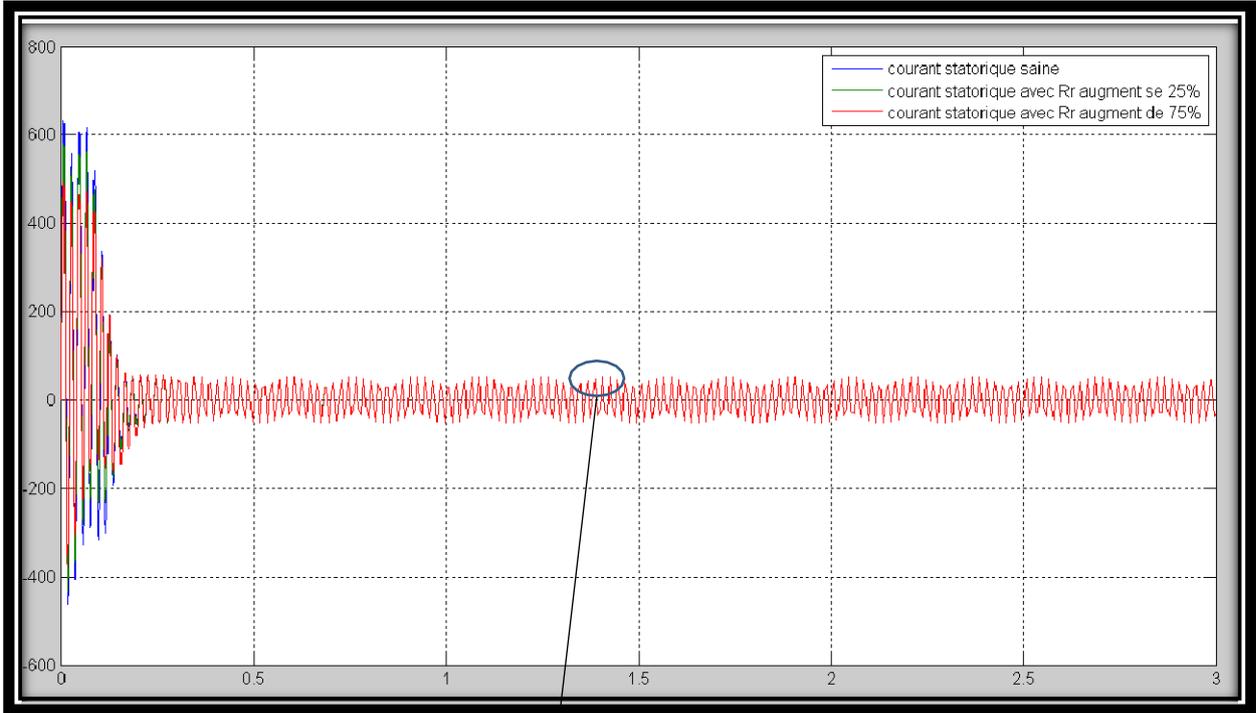


Figure IV.2 courant statorique saine et avec Rr augmente de 25%,75%

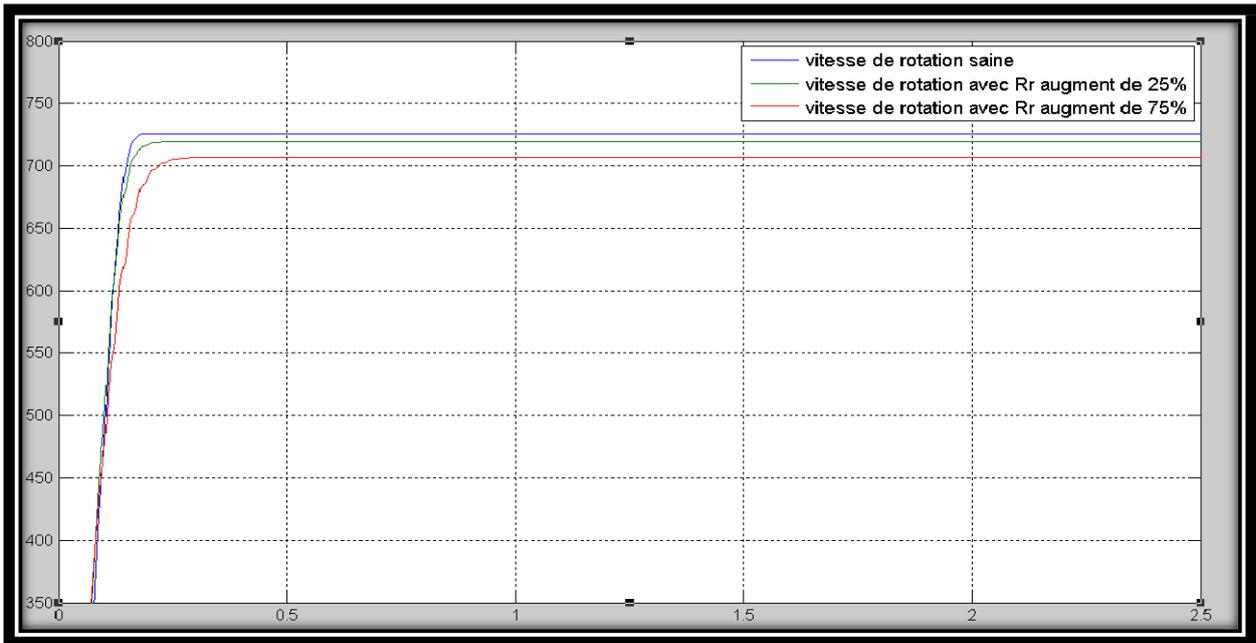


Figure IV.3 vitesse de rotation saine et avec Rr augmente de 25%,75%

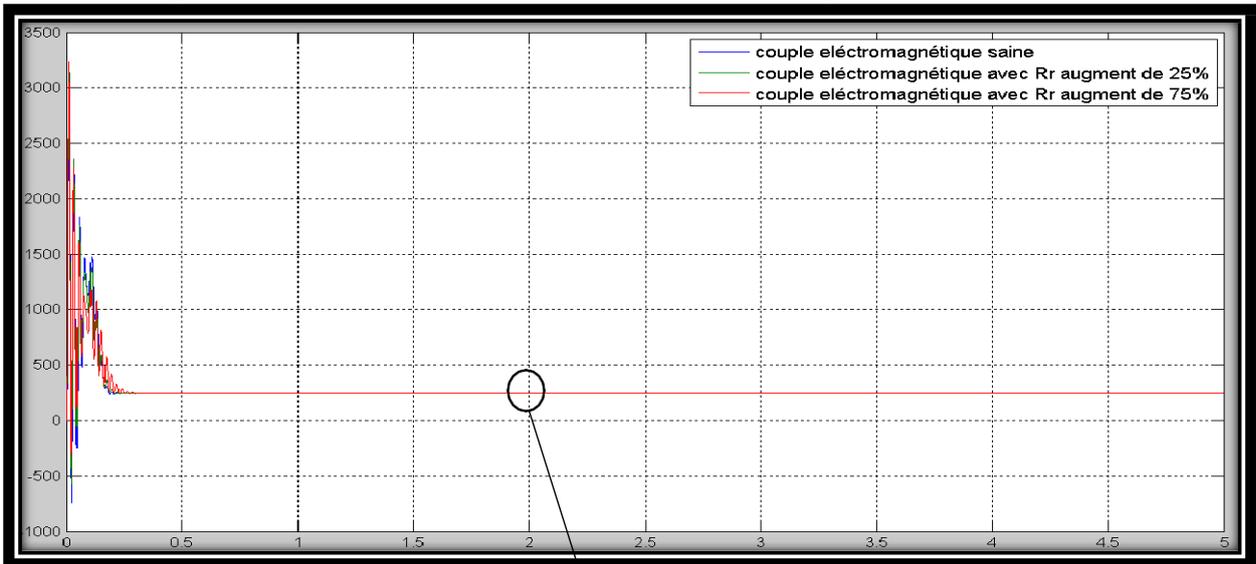
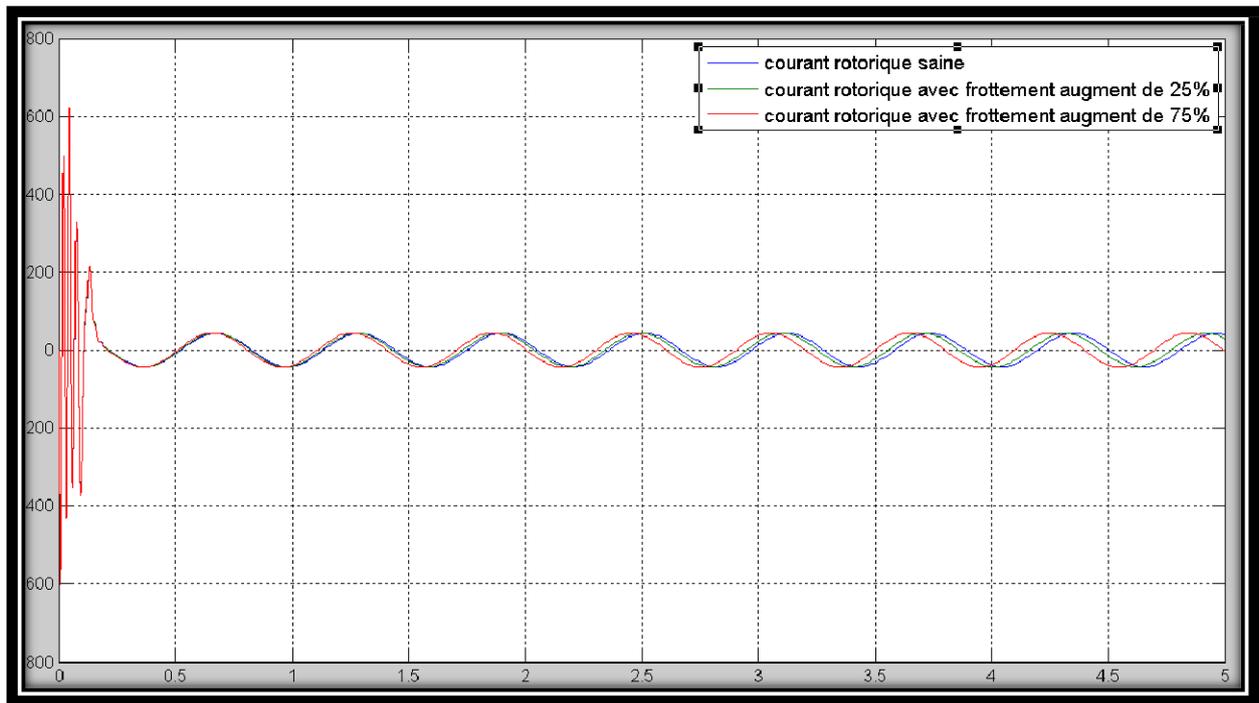


Figure IV.4 couple électromagnétique saine et avec Rr augmente de 25%,75%



**Figure IV.5 courante rotorique saine et avec frottement augmente de 25%,75%**

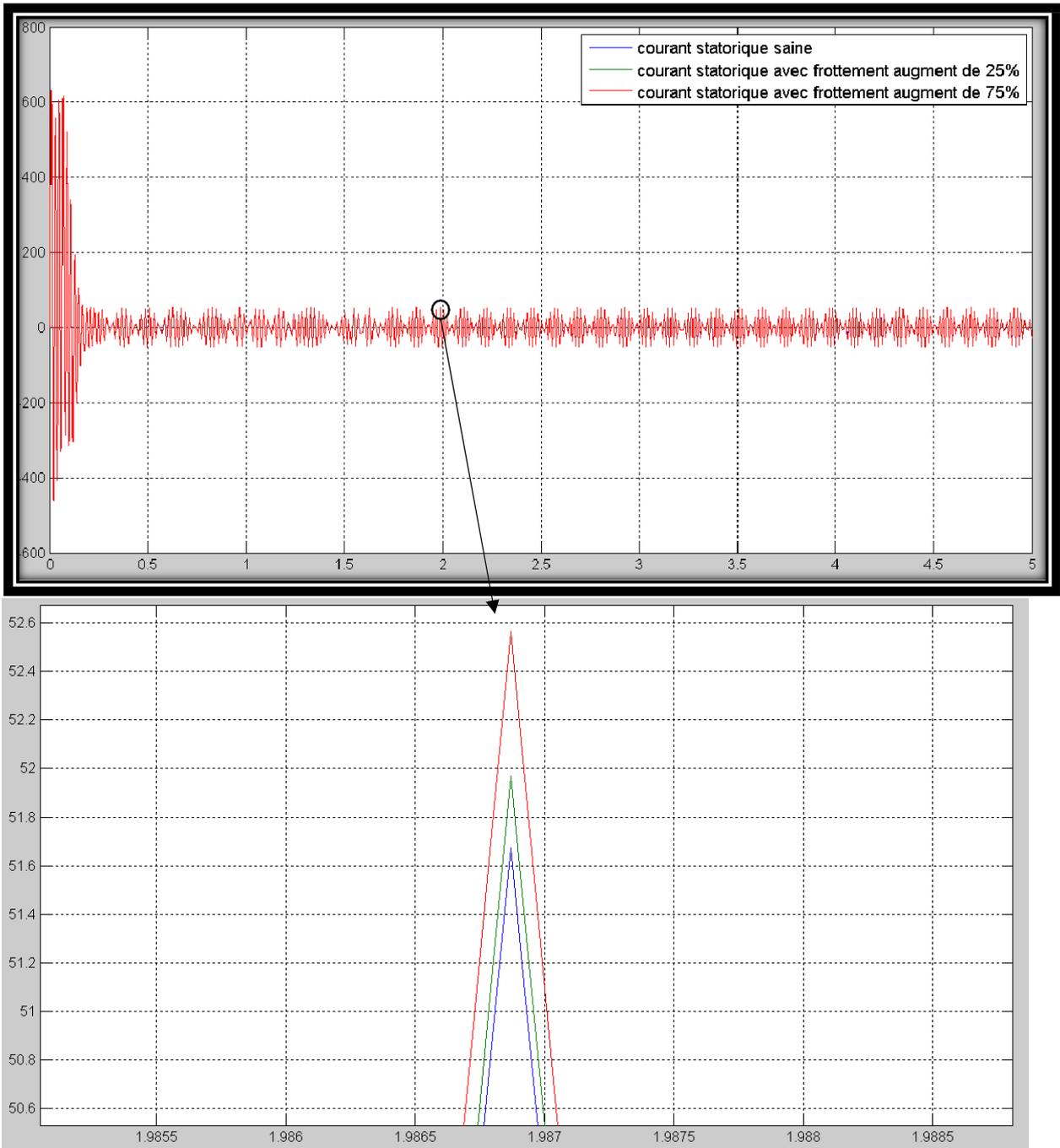


Figure IV.6 courant statorique saine et avec frottement augmente de 25%,75%

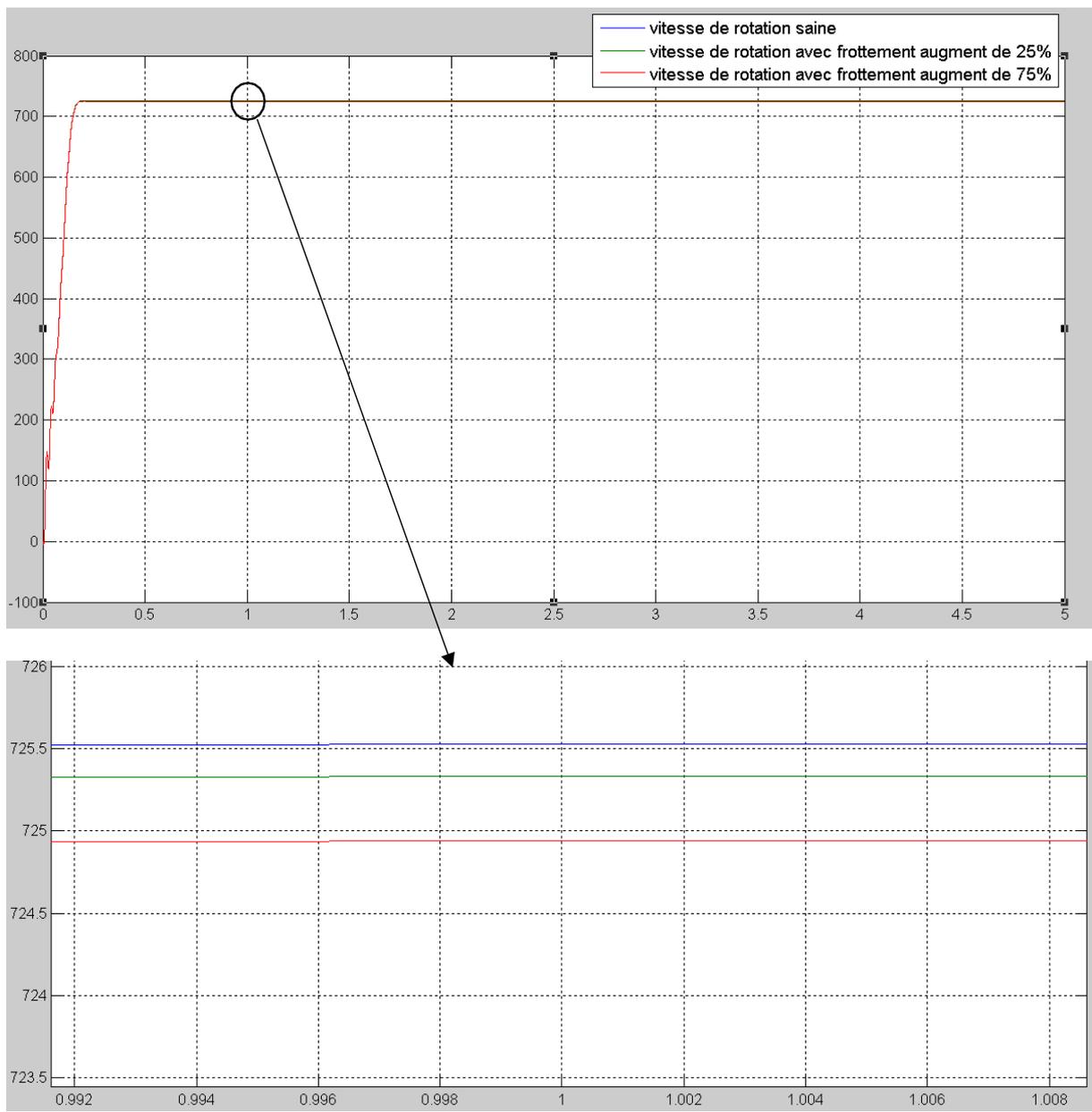


Figure IV.7 vitesse de rotation saine et avec frottement augmente de 25%,75%

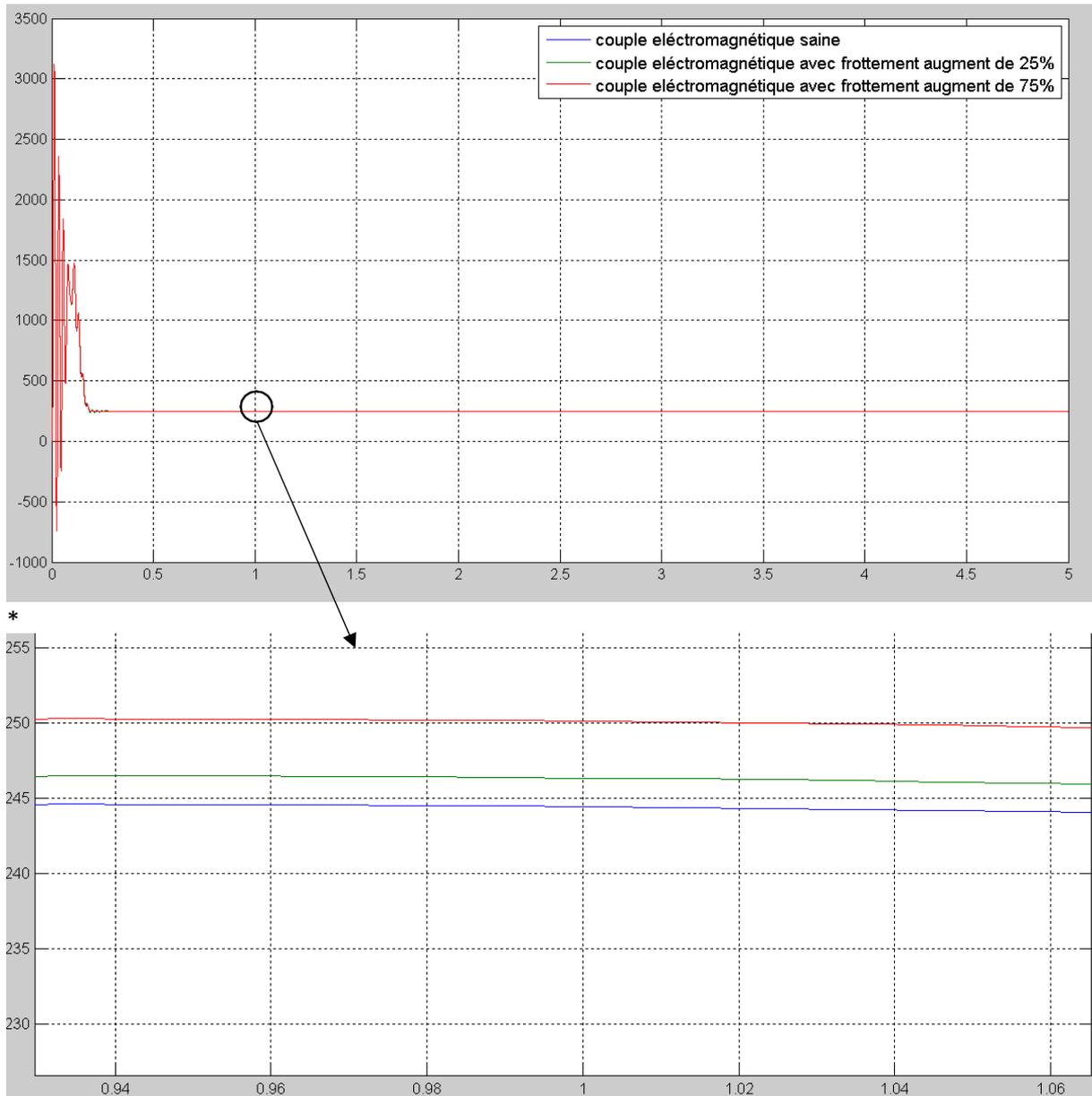


Figure IV.8 couple électromagnétique saine et avec frottement augmente de 25%,75%

**Interprétation des résultats :**

**Défaut rotorique :**

➤ (Rr augmente de 25%,75%)

D’après la figure IV.1 le courant rotorique est oscillé lorsque la résistance rotorique augment. L’amplitude de courant statorique, couple électromagnétique et vitesse de rotation est diminué avec une petite valeur avec l’augmentation de la résistance rotorique Rr (figures : IV.2, IV.3, IV.4).

➤ **(frottement augmente de 25%,75%):**

Dans les figures Figure IV.10, IV.11, IV.12 on remarque une diminution dans la vitesse et l'amplitude de courant statorique et le couple électromagnétique augment à chaque fois le frottement dans la machine augment.

### **IV.3.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons mis au point un modèle sain et défaillant pour la machine asynchrone afin de mieux comprendre son comportement. Et on a simulé ces deux modèles sur MATLAB/SIMULINK. Ces simulations ont permis d'observer les effets des défauts électriques et mécaniques sur le comportement de la machine.

### Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire entre dans le cadre du diagnostic des machines asynchrones fréquemment atteints par des anomalies et des défaillances suite à leur utilisation continue et exhaustive dans le domaine industriel et économique.

Au cours de ce travail nous avons présenté une étude générale sur les moteurs asynchrone, leur constitution, leurs rôles, les principes de fonctionnements, et les différents défauts.

On a traité trois types de défauts à savoir le défaut statorique, le défaut rotorique et les défauts mécaniques.

On a cité les causes principales pour chaque type de défaut électrique ou mécanique. et aussi on a cité les mécanismes et les symptômes produits.

Ensuite on a présenté les différentes approches à base de modèle qualitatif et à base quantitatif on a classées deux approches:

- **une approche signal** basée sur le traitement de signal des grandeurs mesurables, à savoir le courant et la tension.
- **Une approche système**, en l'occurrence la classification par les représentations temps-fréquence.

Le troisième chapitre nous avons traité les différentes techniques de détection des défauts dans la machine asynchrone. Ces techniques peuvent être utilisé seul ou d'une façon multiples.

Le dernier chapitre on a simulé les défauts électrique et mécanique de la machine asynchrone.

## Annexes

### Paramètres de moteurs :

puissance nominale	3.7 [Kw]
vitesse de rotation	749 [tr/min]
fréquence	50 [Hz]
Résistance statorique	0.087 [ $\Omega$ ]
Résistance rotorique	0.228 [ $\Omega$ ]
Inductance statorique	0.00081 [H]
Inductance rotorique	0.00081 [H]
Inductance mutuelle	0.0346 [H]
Nombre de pair de pôle	4
L'inertie	1.662 [Kg.m <sup>2</sup> ]
Coefficient des frottements	0.1
La tension	380 [V]

## **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] O'Donnell P., "Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, Part 1", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 21(4), pp. 853 – 864, July/August 1985.
- [3] Lebaroud A., «Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variable s», Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2006.
- [4] Metatla A., Bahi T., Hadjadj I. and Me doued A, "Failure detection of eccentricity in asynchronous machine". International Conference of System and Computer, 25-27 November 2008, Cairo. Egypt, 2008.
- [5] "Présentation des avaries. Machines électriques tournantes" Cahier des Préventions. CP2, Allianz, 1988.
- [6] 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
- [7] Ondel O., «Diagnostic par reconnaissance des formes : Application à un ensemble convertisseur – machine asynchrone» Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Benbouzid M. E. H., Vieira M, and Theys C, " Induction motor's faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques" IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 14(1): 14 – 22. 1999.

- [11] V. Devanneaux, 'Modélisation des machines asynchrones triphasés à cage d'écurueil envue de la surveillance et du diagnostic', Thèse de doctorat, INPT,France, 2002.
- [12] Ali BEZZIANE « Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone a rotor Défaillant »,thèse de fin d'étude Université de Batna 2003.
- [13] Hamza. A «Commande Vectorielle sans capteur de vitesse de la Machine Asynchrone », thèse de master Université Larbi ben m'hidi Oum el bouaghi -2015-.
- [14] Mr.ghédiri Abdelhalim et Labdani Amina 'Simulation et étude expérimentale des défautsde lamachine asynchrone de 1 KW' MEMOIREPour l'obtention du diplôme de Master LMD Spécialité : Génie Electrique Université LARBI BEN M'HIDIOum El-Bouaghi.
- [15] MESSAOUDI .B « Utilisation du contrôle directe du flux statorique et du filtre De KALMAN en vue du contrôle direct du couple d'un moteur asynchrone », Mémoire deMagister - Université de Biskra
- [16] BEDDIAF. Y « Etude et Simulation d'estimateurs et observateurs robustes de Flux et de vitesse pour la machine asynchrone », Mémoire de Magister - Université de Batn
- [17] René « méthode de commande des machines électriques », Edition hermès, traité EGEM,série génie électrique, chapitre 8, pp253-279.paris 2003
- [18]. Devanneaux, 'Modélisation des machines asynchrones triphasés à cage d'écurueil envue de la surveillance et du diagnostic', Thèse de doctorat, INPT,France, 2002
- [19] : CHAHMI. A 'Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée audiagnostic' Thèse de doctorat université oran.
- [20] Diagnostic et détection des défauts mécaniques affectant les systèmes électromécaniques.B Fouzi - 2019 - biblio.univ-annaba.dz
- [21] Gentil S., Celse B., Charbonnier S., Cocquempot V., Hamelin F., Lesecq S., Maquin D., Montmain J., Ragot J. and Sauter D`` Supervision des procédés complexes``Lavoisier, France, 2007
- [22] Gustafson D., Kessel W.,``Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix`` IEEE Fuzzy Models for Pattern Recognition, 1992 reprinted from Proc. IEEE

- [23] Fix E, Hodges J L `` Discriminatory analysis. Non-parametric discrimination `` USAF School of Aviation Medicine, Randolph Field, TX, 4 Technical Reports 4, 1951
- [25] Mémoire présentée à l'université du Québec a trois rivières (comme exigence partielles de la maîtrise en mathématiques et informatiques appliquées) Parjean-François-Beaudoin  
« Réingénierie de l'expertise d'un système a base de connaissance pour le diagnostic de la performance d'entreprise.
- [27] Ondel O. Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone. Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006
- [28] J.R. Cameron and al `` Vibration and Current Monitoring for Detecting Air gap Eccentricity in Large Induction motors `` IEE Proceedings, Vol.133, Pt. B No.3 May 1986
- [29] K. Delare, M. Iadevaia, W. Heylen, P. Sas, K. Hameyer, R. Belmans  
`` Statistical energy analysis of acoustic noise and vibration for electric motors: Transmission from air gap field to motor frame ``  
IAS Annual Conference Meeting Proceedings, 3-7 October 1999, Phoenix, Arizona, Vol. 3, pp. 1897-1902
- [30] B. Jacquot `` Conception, étude et réalisation des algorithmes de commande des systèmes de traction asynchrone pour les TGV de nouvelle génération `
- [31] J.P. Caron, J.P. Hautier `` Modélisation et commande de la machine asynchrone `` Technip, 1995.
- [32] Smail B, Jean Claude T, Slim Tnani  
`` Diagnostic des défauts statoriques et rotoriques par identification paramétrique sans capteur de vitesse ``  
Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Nantes 8-10 juillet-2002
- [33] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outil paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999
- [34] Y. Laamari, "Diagnostic des défaillances dans les systèmes électromécaniques" Thèse de doctorat, Université badji mokhtar annaba, 2016

[35] Medoued Ammar , « SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES MACHINES ELECTRIQUES :APPLICATIONS AUX MOTEURS ASYNCHRONES » Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Docteur en Sciences, Spécialité: Electrotechnique,université du 20 Août 1955-Skikda, Année : 2012