



جامعة عباس لغرور خنشلة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم الهندسة الصناعية  
Université Abbès LAGHROUR Khenchela  
Faculté des Sciences & de la Technologie  
Département de Génie Industriel



## **Mémoire de fin d'études**

*Pour l'obtention du diplôme de Master (LMD)*

**Filière : Automatique**

**Spécialité : Automatique et informatique industrielle**

### **Détection des défauts rotorique dans la machine asynchrone par la méthode de prony**

Réalisé par : - Ben Mesbah Oussama      Dirigé par : Dr. Bessam Besma  
- Tihamamine Ghoulem Allah

*Année universitaire 2019/2020*

# Dédicaces

*Je dédie ce fruit de travail :*

*À ma mère et à mon père qui ont tout le credit*

*À mes sœurs .*

*À mes amis Houssam et Taqi al-Din et Raid et Ramzi et Mabrouk et à tous ceux que je  
n'ai pas mentionnés.*

*À tous mes professeurs*

*À Hakim ,Ammar et Akram et tous mes collègues et régiment spécial*

*«Automatique et informatique industrielle».*

*À vous tous un grand merci.*

*À mon binôme Ghoulème que je remercie pour  
avoir partagé avec moi ces moments pour la  
réalisation de ce modeste travail et j'espère en  
garder de très bons souvenirs*

# Dédicaces

*Je dédie ce fruit de travail :*

*À ma mère et à mon père qui ont tout le credit*

*À mes frères.*

*À mes amis amis nizar, mabrouk, takî, nassim, akram et à tous ceux que je n'ai pas mentionnés.*

*À tous mes professeurs*

*À Hakîm et Ammar et tous mes collègues et régiment spécial*

*«Automatique et informatique industrielle».*

*À vous tous un grand merci.*

*À mon binôme Oussama que je remercie pour  
avoir partagé avec moi ces moments pour la  
réalisation de ce modeste travail et j'espère en  
garder de très bons souvenirs*

# Remerciement

*Notre premier Remerciement va à Allah Soubhanhou watahala.*

*Nous tenions à remercier vivement notre encadreuse,  
madame 'Bessam besma',*

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

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

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

## Notations et symboles

$N_r$	Nombre de barres rotoriques.
$p$	Nombre de paires de pôles de la machine.
$N_r$	Nombre de barres rotoriques.
$m$	Nombre de phases statioique.
$\mu_0$	Perméabilité magnétique de l'entrefer.
$l$	Longueur du rotor : Rayon moyen de l'entrefer.
$\lambda$	Permittivité de l'entrefer.
$N_s$	Nombre de spires par phase statorique.
$N_r$	Le nombre de barres rotorique.
$L_m$	Mutuelle inductance entre une phase statorique et une maille rotorique quand leurs axes coïncident.
$\theta_r$	L'angle électrique du rotor.
$\alpha_r$	L'angle électrique entre deux barres adjacentes.
$\mu_0$	La perméabilité magnétique de l'entrefer.
$r$	Rayon moyen de l'entrefer.
$g_e$	L'épaisseur de l'entrefer.
$l$	Longueur du rotor.
$R_{bk}$	Résistance d'une barre rotorique k ;
$L_{bk}$	Inductance de fuite d'une barre rotorique k ;
$R_{ak}$	Résistance du segment d'anneau de court-circuit k ;

## Notations et symboles

---

- $L_{ak}$  Inductance de fuite du segment d'anneau de court-circuit k ;
- $i_{bk}$  Courant circulant dans la barre rotorique k ;
- $i_{ak}$  Courant dans le segment d'anneau de court-circuit k ;
- $J_{tk}$  Courant circulant dans la boucle rotorique k ;
- $J_{rcc}$  Courant circulant dans l'anneau de court-circuit.
- $f_i$  Fréquences de vibration caractéristiques correspondant aux dimensions du roulement.
- $f_r$  La fréquence de rotation rotorique.
- $f_d$  Coefficient de distribution.
- $R_s$  Résistance d'un enroulement statorique.
- $R_{bk}$  Résistance d'une barre rotorique k.
- $R_{ak}$  Résistance de la portion d'anneau de court circuit k.
- $R_r$  Résistance rotorique équivalente (ramenée au stator).
- $[R_s]$  Matrice des résistances statoriques.
- $[R_r:]$  Matrice des résistances rotoriques.
- $L_{m_{s_i s_i}}$  Inductance de magnétisation des enroulements statoriques
- $L_{f_{s_i s_i}}$  Inductance de fuite statorique
- $\theta$  La position du rotor par rapport au stator.
- $\varphi$  La position angulaire le long de la surface intérieure du stator.
- $g^{-1}(\varphi, \theta)$  La fonction inverse de l'entrefer, dans le cas où l'entrefer est constant et petit par rapport au rayon du stator, la fonction est constante et égale à  $(l/g)$ .
- $N_i(\varphi, \theta)$  La fonction de l'enroulement  $i$ , elle représente la distribution spatiale de la force magnétomotrice le long de l'entrefer pour un courant unitaire circulant dans l'enroulement  $i$ .

## Notations et symboles

---

$M_{s_i s_i}$	Mutuelle inductance entre deux phases statoriques.
$L_{b_k}$	Inductance propre de chaque maille rotorique..
$L_{a_k}$	Inductance de fuite du segment d'anneau de court-circuit.
$L_{kk}$	Inductance propre de chaque maille rotorique.
$L_{ki}$	Inductance mutuelle entre la $K^{ème}$ maille et la $i^{ème}$ maille du rotor.
$L_{ai}$	Inductance mutuelle entre la phase statorique a et la $i^{ème}$ maille rotorique.
$L_{mb}$	Inductance de magnétisation rotorique.
$M_{sr}$	Matrice des mutuelles inductances stator rotor.
M	Position angulaire le long de la surface intérieure du stator.
$\omega_s$	Pulsation électrique des grandeurs statoriques.
$\omega_r$	Pulsation électrique des grandeurs rotoriques.
$\Omega_s$	Vitesse angulaire synchrone.
$\Omega_r$	Vitesse angulaire rotorique.
$[v_s]$	Vecteur tension statorique.
$[v_r]$	Vecteur tension rotorique.
$[I_s]$	Vecteur courant statorique.
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique.
$i_{bk}$	Courant traversant la $K^{ème}$ barre rotorique.
$[j_{r1} \ j_{r2} \ \dots \ j_{rk} \ \dots \ j_{rNr} \ j_{rcc}]$	Courant dans les mailles rotoriques.
$j_{rcc}$	Courant traversant l'anneau de court circuit.
$[\phi_s]$	Vecteur flux total statorique.
$[\phi_r]$	Vecteur flux rotorique.

## Notations et symboles

---

$g^{-1}$  Fonction inverse de l'entrefer.

$N_i$  Fonction de l'enroulement  $i$ .

$C_{em}$  Couple électromagnétique.

$C_r$  Couple de charge.

## Liste des figures

- Figure I.1** La répartition des différentes pannes
- Figure I.2** Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil
- Figure I.3** Stator d'une machine asynchrone basse tension
- Figure I.4** Rotor à cage d'écureuil
- Figure I.5** la Sources de défauts de machine asynchrone à cage
- Figure I.6** Principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes
- Figure I.7** Quatre types de défauts dans les roulements à billes
- Figure I.8** Dimensions d'un roulement billes
- Figure I.9** Différents types de la dissymétrie de l'entrefer
- Figure I.10** Excentricité statique (a) et dynamique(b)
- Figure I.11** Rotor à cage d'écureuil
- Figure I.12** Rupture d'une barre et d'un anneau de court circuit
- Figure I.13** Rupture réelle des barres rotoriques
- Figure I.14** Structure adoptée pour modéliser le stator
- Figure I.15** Circuit équivalent d'un rotor à cage d'écureuil
- Figure I.16** La fonction définissant la  $i^{\text{ème}}$  maille rotorique
- Figure I.17** Circuit équivalent d'un rotor avec une barre cassée
- Figure II.1** Différentes étapes de diagnostic
- Figure II.2** Redondance physique et analytique
- Figure II.3** Différents grandeurs de diagnostic dans une machine
- Figure II.4** Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial

**Figure III.1** Evolution des courants statoriques pour un fonctionnement sain (a), pour un fonctionnement avec défaut de barre cassée (b) et pour un fonctionnement avec défaut de deux barres cassées (c).

**Figure III.2** Spectre du courant statorique pour une machine en régime sain et avec défaut rotorique.

**Figure III.3** Courant statorique et son enveloppe pour un défaut de cassure de deux barres au rotor.

**Figure III.4** Spectre de l'enveloppe du courant statorique pour une machine en régime sain et avec défaut rotorique.

## Liste des tableaux

**Tab.III.1** Paramètre statistiques extraits à partir des spectres fréquentiels de courants statorique.

# Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Notations et symboles	
Liste des Figures	
Liste des tableaux	
Introduction	
générale.....	1

## Chapitre I

I.1 Introduction.....	3
I.2 Eléments de constitution de la machine asynchrone.....	4
I.2.1 Le stator.....	5
I.2.2 Le rotor.....	6
I.2.3 Paliers.....	7
I.3 Les défaillances de la machine asynchrone.....	8
I.3.1 Défaillances d'ordre mécanique.....	9
I.3.1.1 Défaillances des roulements.....	10
I.3.1.2 Défaillances du flasque .....	12
I.3.1.3 Défaillances de l'arbre.....	12
I.3.1.4 Défauts d'excentricité.....	13
I.3.2 Défaillances d'ordre électrique.....	14

I.3.2.1	Défaillances des circuits électriques statoriques.....	14
I.3.2.2	Défaillances des circuits électriques rotoriques.....	14
I.4	Modèle de la machine en l'absence de defaillance.....	16
I.4.1	Hypotheses simplificatrices.....	17
I.4.2	Structure du stator.....	17
I.4.3	Structure du rotor.....	18
I.4.4	Equations differentielles associees .....	20
I.4.4.1	Equations électriques du stator.....	20
I.4.4.2	Equations électriques du rotor.....	24
I.5	Modele de la machine en presence de defaillances.....	27
I.5.1	Machine avec une seule barre cassee.....	28
I.5.2	Machine avec deux barres cassees adjacente.....	31
I.5	Conclusion.....	32

## Chapitre II

II .1	introduction.....	33
II.2	La définition et objectif du diagnostic .....	33
II.2.1	Définition.....	33
II.2.2	Objectif.....	33
II.3	Considération générales sur les systèmes de diagnostic.....	33
II.4	Concepts de base de diagnostic.....	34
II.5	Les différentes étapes de diagnostic.....	35
II.5.1	La détection.....	35

II.5.2	La localisation.....	35
II.5.3	L'identification.....	35
II.6	Type de diagnostic.....	36
II.6.1	Inductif de diagnostic.....	36
II.6.2	Diagnostic déductif.....	37
II.6.3	Diagnostic invasif.....	37
II.6.4	Diagnostic non invasif.....	37
II.7	Principe de diagnostic de défaut.....	38
II.7.1	Redondance physique (matérielle).....	38
II.7.2	Redondance analytique.....	38
II.8	Diagnostic de la machine asynchrone.....	39
II.8.1	Diagnostic par mesure de température.....	40
II.8.2	Diagnostic par mesure des vibrations.....	40
II.8.3	Diagnostic chimique .....	41
II.8.4	Technique magnétique et électrique.....	41
II.8.4.1	Diagnostic par mesure de flux magnétique axial.....	41
II.8.4.2	Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites.....	42
II.8.4.3	Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique.....	42
II.9	Analyse spectrale.....	42
II.9.1	Méthodes de traitement des signaux.....	43
II.9.1.1	Méthode de prony.....	43
II.9.1.1.1	Historique et définition .....	43
II.9.1.1.2	Propriétés.....	43

II.9.1.1.3 L'analyse.....	44
II.10 Conclusion.....	45

## Chapitre III

III.1. Introduction.....	47
III.2 Description du banc d'essai.....	47
III.3 présentations de différents signaux relevés.....	47
III.4 Analyse du courant statorique par la FFT.....	49
III.5 Analyse spectrale de l'enveloppe du courant statorique.....	50
III.6 Analyse du courant statorique par la méthode de PRONY.....	53
III.7 Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	56
Bibliographies	
Résumé	

## *Introduction Générale*

Les moteurs asynchrones à cage d'écureuil sont réservés aux entraînements électriques à vitesse constante en raison de leur difficulté à contrôler et surveiller les paramètres du rotor. Cependant, la machine présente également de nombreux avantages, tels que la robustesse, des coûts de fabrication relativement faibles et des systèmes de maintenance minimaux. Toutes ces qualités prouvent l'utilisation de la machine dans l'industrie. En outre, le développement de la technologie de l'électronique de puissance a favorisé le contrôle de la machine, rendant la machine à cage d'écureuil largement utilisée dans le domaine industriel. Certaines utilisations de moteurs asynchrones ne peuvent tolérer des pannes intempestives.

Ces défaillances peuvent être mécaniques (excentricité du rotor, défaillance de l'accouplement, défaillance du roulement, etc.) ou électromagnétique (court-circuit de l'enroulement). Une partie du stator, de la tige ou de la bague de court-circuit est endommagée, la dent est endommagée, etc.). D'autres défauts peuvent également être attribués aux composants du variateur, tels que l'alimentation électrique, la charge ou la panne de charge. Dans le réducteur mécanique.

La défaillance d'un moteur à cage asynchrone pendant le fonctionnement ne signifie pas que le moteur s'arrêtera immédiatement, mais affecte directement les performances du moteur, telles que le couple électromagnétique, le courant statorique et la vitesse. Par conséquent, un diagnostic de la machine asynchrone est nécessaire pour identifier et déterminer la cause de la panne. Dans les moteurs asynchrones, il est difficile de localiser les défauts physiques grâce à des capteurs, en particulier lorsque des défauts sont détectés dans le rotor, en raison de son mouvement à jour.

L'analyse par traitement du signal des grandeurs de ligne (courant statorique, tension et puissance) peut donner une image réelle sur les déséquilibres qui se produisent dans la machine asynchrone ; Cette analyse est basée sur les techniques telles que : l'analyse de Fourier, de Hilbert et prony. Dans ce mémoire, un diagnostic par la technique des prony, hilbert et FFT Les techniques que nous avons utilisées permettent une analyse très précise des signaux et permettent de détecter l'instabilité des signaux là où cette caractéristique n'est pas disponible dans les techniques conventionnelles. Le mémoire contient trois chapitres répartis comme suit:

Dans un premier chapitre, nous avons déterminé les composants de la machine à cage d'écureuil, les différents défauts qui se produisent souvent dans la machine et leurs causes. Nous utilisons un modèle basé sur le couplage magnétique de circuits pour analyser le comportement de la machine avec ou sans panne. Ce type de méthode fournit un modèle de machine simple avec un temps de calcul raisonnable. L'inductance de la machine prend en compte les harmoniques les plus importantes de l'espace afin d'obtenir un résultat plus réaliste.

Le deuxième chapitre est consacré aux types et les différentes techniques et méthodes de diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil et nous avons parlé sur la méthode de Prony.

Le troisième chapitre présente le banc d'essai sur lequel s'est effectuée l'acquisition des différents signaux nécessaires à l'application de la méthode de Prony et de son optimisation en vue d'obtention des résultats du diagnostic de défauts rotorique de la machine asynchrone.

# *Chapitre 1*

## *Présentation de la machine asynchrone : défauts et modélisations*

## I.1 INTRODUCTION

Les moteurs à induction jouent un rôle important dans le fonctionnement sûr et efficace des installations industrielles en raison de leurs nombreux avantages, tels que la simplicité de construction ainsi que la fiabilité et le coût relativement bas ...

La détection des défauts des moteurs asynchrones est analysée à l'aide de signaux détectés par l'un de leurs trois principaux composants: le stator, le rotor et les paliers. Parmi ces composants, beaucoup d'efforts sont consacrés aux défaillances de barres de rotor des moteurs à induction ; C'est pourquoi un diagnostic correct est si important [1].

Les défaillances des roulements représentent plus de 40% de toutes les défaillances des machines à induction, et leur détection est souhaitable pour éviter d'endommager les processus industriels [2]. Bien que les défauts du rotor semblent être moins importants que les erreurs de roulement quantitativement, la plupart des défaillances de roulement sont dues à un désalignement de l'arbre, à l'excentricité du rotor et à d'autres erreurs liées au rotor [3]. Ces défauts provoquent certains symptômes tels que des tensions déséquilibrées dans l'entrefer et courants de ligne, pulsations de couple, couple moyen réduit...etc (voir: figure (I.1)).

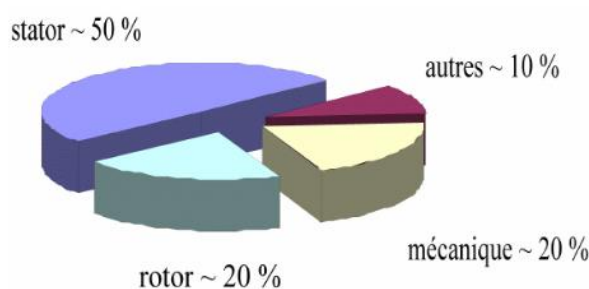
Le problème du diagnostic des défauts est de déterminer le type de défaut le plus détaillé possible, tel que: la taille du défaut, sa localisation, la méthode à suivre, et le temps de détection, afin que l'on puisse intervenir rapidement. À en juger par ces détails importants, de nombreuses méthodes d'utilisation de modèles mathématiques ont été développées depuis plus de 30 ans, et il existe une riche littérature de centaines d'articles, dont certaines enquêtes. [4, 5].

Afin d'identifier les défauts, les méthodes de diagnostic dépendent de différents types de domaines scientifiques et techniques. Il peut être décrit comme suit: Recherche basée sur les champs électromagnétiques Mesure de température Bruit et vibrations Analyse chimique, Mesure du bruit acoustique Analyse de signature de courant moteur MCSA, Modélisation, intelligence artificielle et réseaux de neurones, Observateurs.

Pour étudier et traiter les défauts, il faut pouvoir modéliser correctement et précisément la machine, depuis quelques années, les programmes de simulation faisaient toujours intervenir la transformation de Clarke ou celle de Park pour pouvoir effectuer une simulation de la machine

asynchrone dans un temps relativement court. Aujourd'hui, grâce à l'évolution des technologies informatiques et des processeurs en particulier, nous pouvons nous passer de ces transformations, ce qui permet, dans le cas de la machine asynchrone à cage d'écureuil, de calculer tous les courants de barres rotoriques et d'anneaux de court circuit.

Dans ce chapitre, nous décrivons la machine asynchrone avec un bref rappel des études Répartition des défauts. Nous donnerons ensuite les éléments de cette constitution Machine, suivi du principe de fonctionnement et de divers types de défauts pour Machine asynchrone et nous détaillons le modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil en l'absence des défauts, puis nous introduisons les différentes défaillances dans ce modèle. Nous terminerons par une conclusion.

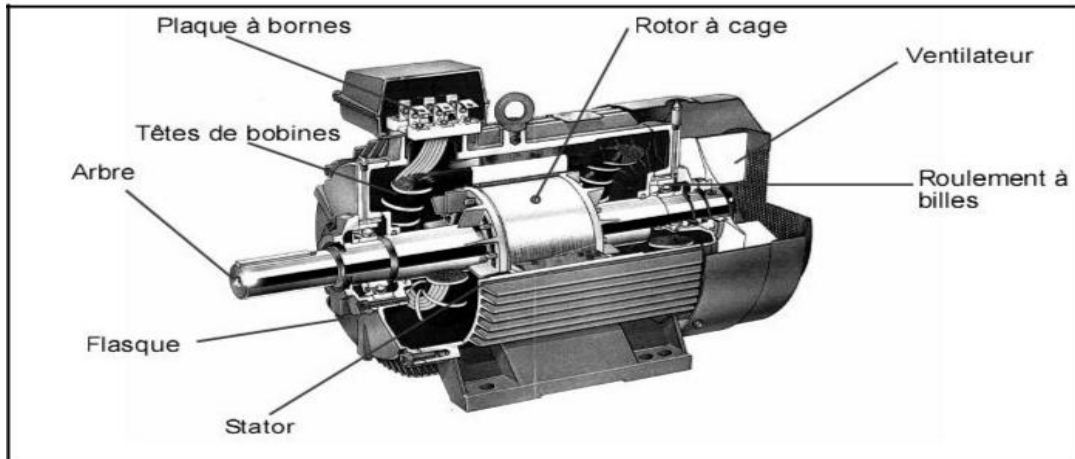


**Figure. I.1** : La répartition des différentes pannes [6].

## I.2 ELEMENTS DE CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

La connaissance des éléments de constitution des machines asynchrones permet de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

- le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique;
- le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique;
- les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur



**Figure. I.2** : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écuriel [7]

### I.2.1 LE STATOR

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les enroulements du stator. Ces feuilles sont coupées en une seule pièce pour les petites machines, tandis que pour les machines plus puissantes, elles sont coupées en morceaux. Ils sont généralement recouverts de vernis pour limiter l'effet Foucault. Après tout, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

A l'issue de cette étape d'assemblage, les enroulements statoriques sont placés dans les découpes prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés imbriqués, ondulé ou même concentrique. Le bobinage concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage d'une machine asynchrone est réalisé mécaniquement. Dans le cas de grosses machines, les enroulements sont constitués de barres plates en cuivre de différentes sections, insérées directement dans les découpes. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier est réalisée à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de types différents selon l'application de la machine asynchrone.

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Nous représentons sur la figure I.1 les différentes parties de constitution du stator d'une machine asynchrone. Nous pouvons visualiser la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement de la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge [7-8].

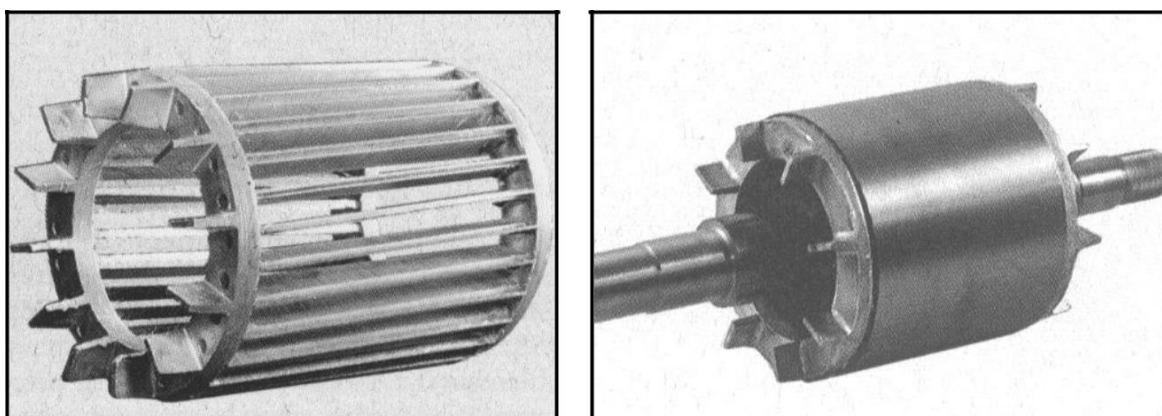


**Figure I.3 :** Stator d'une machine asynchrone basse tension [7].

## I.2.2 LE ROTOR

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil.

Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium [7].



**Figure I.4 :** Rotor à cage d'écureuil [7]

Il existe différentes structures de rotor à cage qui dépend principalement de la taille du moteur et de l'application qu'il en sera fait.

Nous donnons une photographie en (FigI.4) de l'arbre sur lequel les tôles sont empilées, les deux anneaux de court-circuit ainsi que les barres d'aluminium formant la cage d'écurueil. Souvent, ces barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques (biais d'encoche au rotor) et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone. L'isolation des barres avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles. De plus, la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre [7,8].

### **I.2.3 PALIERS [7]**

Les roulements qui supportent et font tourner l'arbre du rotor sont constitués de brides et de roulements à billes placés à chaud sur l'arbre. Les brides en fonte sont fixées au carter du stator avec des boulons ou des barres de serrage comme illustré à la figure I.2.

## **I.3 LES DEFAILLANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE**

La machine asynchrone est considérée comme robuste et également défaillante dans le cas de son emploi de longue durée et dans des conditions dures. Il est important que les mesures soient prises pour diagnostiquer l'état de la machine au fur et à mesure qu'elle entre dans le mode de défauts. Il est donc nécessaire de faire un contrôle continu, en ligne ou hors ligne, des variables de la machine. Les raisons derrière les défauts dans les machines électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'installation, l'environnement de fonctionnement, la nature de la charge et le programme de la maintenance.

Le moteur asynchrone, comme n'importe quelle autre machine électrique tournante, est soumis aux forces électromagnétiques et mécaniques. La conception du moteur est telle que l'interaction entre ces forces dans des conditions normales mène à un fonctionnement stable avec un bruit et des vibrations minimums. Quand le défaut a lieu, l'équilibre entre ces forces est perdu, aboutissant à un autre perfectionnement du défaut. Les défauts du moteur asynchrone peuvent être classés par catégorie dans deux types : mécanique et électrique. Les sources des défauts du moteur peuvent être internes, externes ou dues à l'environnement, comme présenté à la figure I.5.

Les défauts internes peuvent être classifiés concernant leurs origines c'est à dire électrique et mécanique. Habituellement, d'autres types de défauts de roulement et de refroidissement se rapportent aux défauts de rotor parce qu'ils appartiennent aux pièces mobiles. La figure I.6 présente l'arbre de défaut de la machine asynchrone où les défauts sont classifiés selon leur emplacement : rotor et stator [9,10].

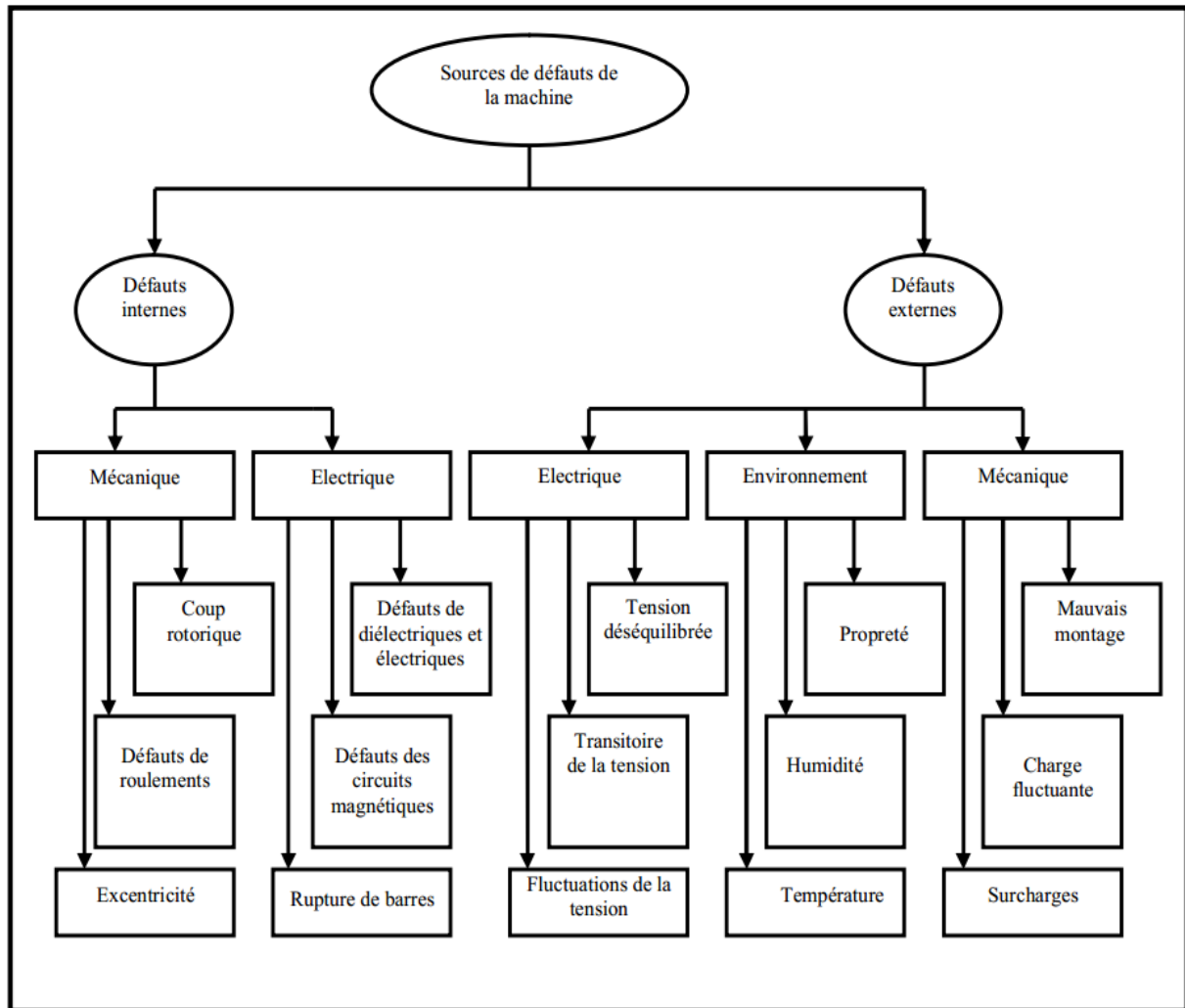


Figure I.5 : Sources de défauts de la machine asynchrone à cage [9]

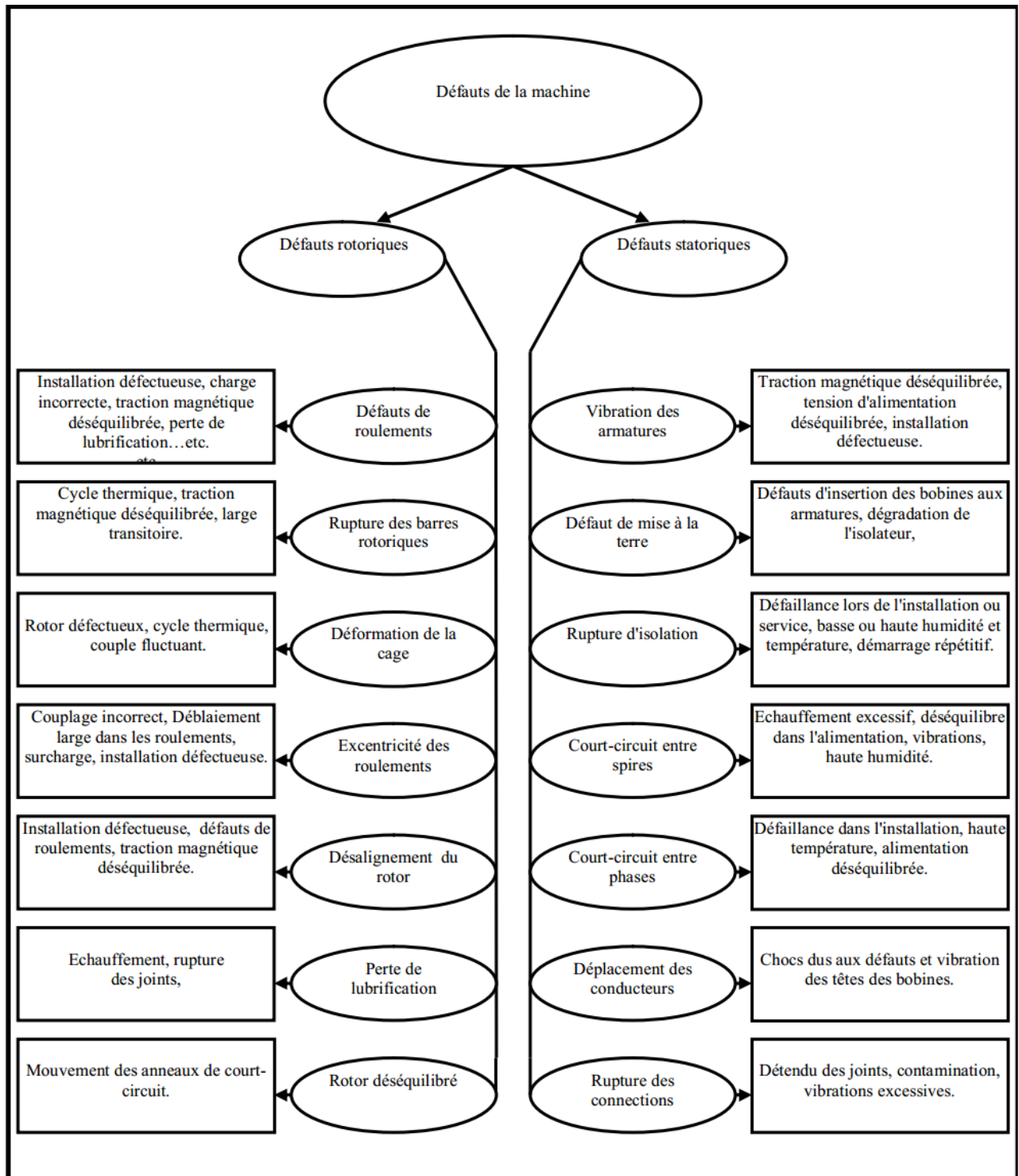


Figure I.6 : Principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes [3]

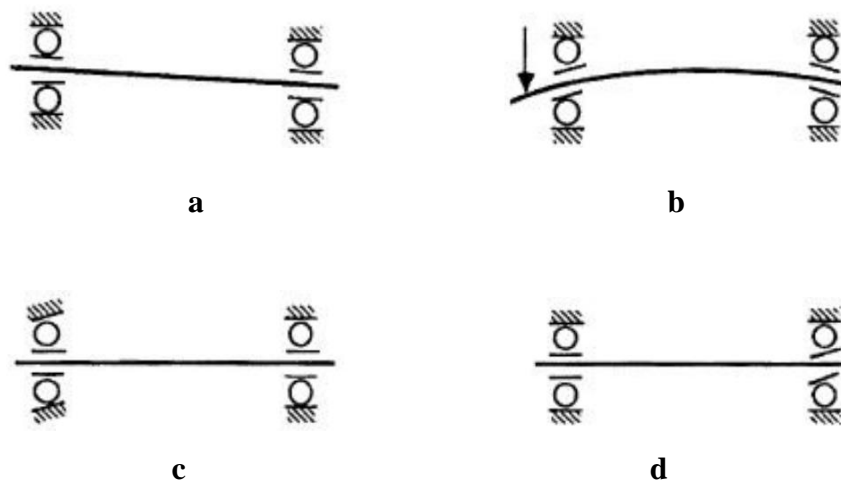
D'après les deux organigrammes ci-dessus, on peut classer les défauts majeurs qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone à cage d'écureuil en deux catégories :

**I.3.1 DEFAILLANCES D'ORDRE MECANIQUE**

Les défaillances d'ordre mécanique sont, en général, les plus souvent rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur. On énumérera par la suite certains de ces défauts.

### I.3.1.1 Défaillances des roulements

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations dans la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers. L'huile de graissage, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce type de défaillances [10-12].



**Figure I.7 :** Quatre types de défauts dans les roulements à billes [10,11].

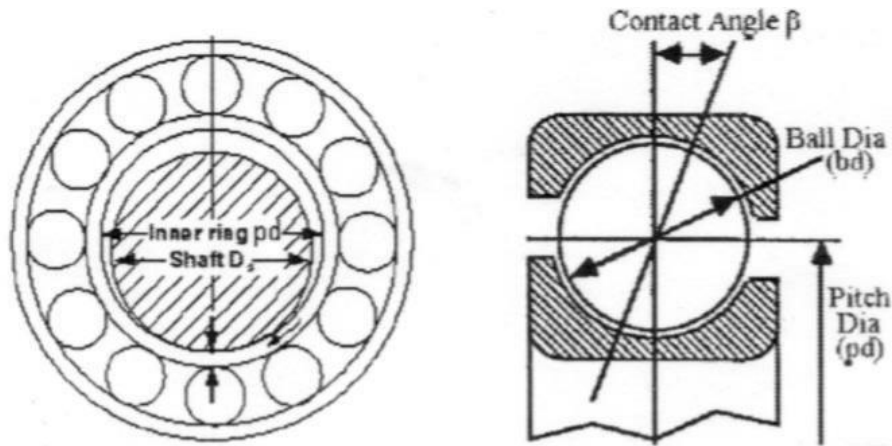


Figure I.8 : Dimensions d'un roulement billes [10].

La relation entre les vibrations des roulements et les spectres du courant statorique peut être déterminée en rappelant que n'importe quelle excentricité de l'entrefer produit des anomalies dans la densité du flux d'entrefer. Puisque les roulements à billes supportent le rotor, n'importe quel défaut de roulement produira un mouvement radial entre le rotor et le stator de la machine. Le déplacement mécanique résultant des roulements endommagés fait changer la hauteur de fuite de machine de telle sorte qu'elle peut être décrite par une combinaison des excentricités tournantes démenageant dans les deux directions. Comme avec l'excentricité de hauteur de fuite, ces variations produisent des courants de stator aux fréquences données en références [6,8]:

$$f_{roul} = |f_s \pm m f_i| \quad (I.1)$$

Où  $m=1,2,\dots$ , et  $f_i$  est l'une des fréquences de vibration caractéristiques correspondant aux dimensions du roulement.

$$f_i = \frac{n}{2} f_r \left[ 1 \pm \frac{DB}{PD} \cos \beta \right] \quad (I.2)$$

Où  $n$  est le nombre de billes,  $f_r$  est la fréquence de rotation rotorique

Les études statiques montrent que presque 40 à 50% de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil sont d'origine mécanique. D'une part, Les défauts de roulement pourraient se manifester souvent et produisent des défauts qui apparaissent sous la forme d'une asymétrie du rotor, et sont classés dans la catégorie des défauts d'excentricité. D'autre part, la naissance d'un

défaut au niveau des roulements dépend aussi de la partie défectueuse, soit dans la partie intérieure ou dans la partie extérieure. Les relations représentant les fréquences générées par les différents défauts des roulements à billes, sont exprimées par :

Pour un défaut dans la course externe du roulement :

$$f_1 = (N/2)f_r[1 - DB \cos(\beta)/PD] \quad (I.3)$$

Pour un défaut dans la course interne du roulement :

$$f_1 = (N/2)f_r[1 + DB \cos(\beta)/PD] \quad (I.4)$$

Pour un défaut dans les billes :

$$f_1 = DB f_r / PD [1 - DB \cos(\beta) / PD]^2 \quad (I.5)$$

Pour un défaut dans course :

$$f_1 = (f_r/2)f_r[1 - DB \cos(\beta)/PD] \quad (I.6)$$

### I.3.1.2 Défaillances du flasque

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [39]

### I.3.1.3 Défaillances de l'arbre

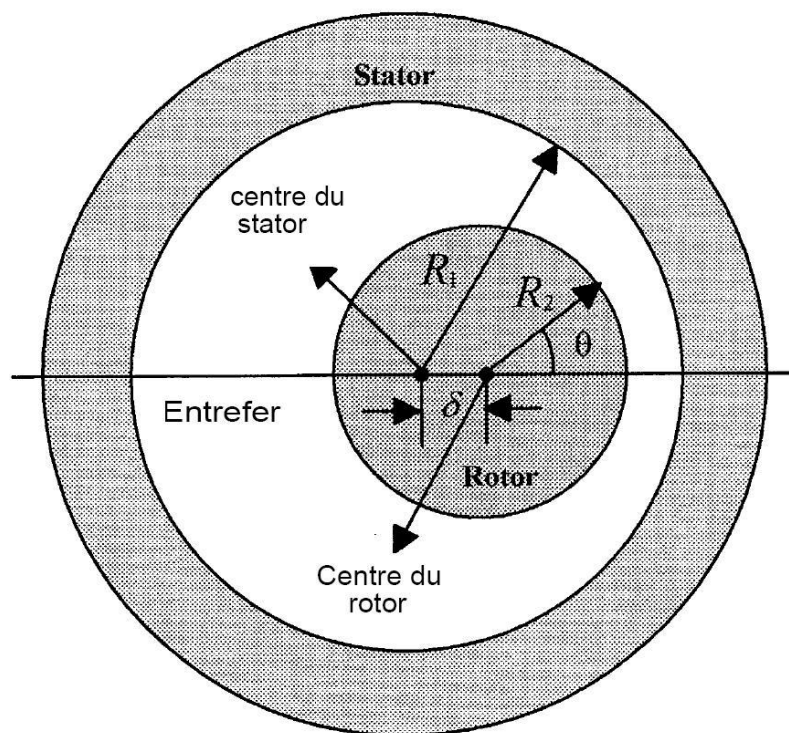
L'arbre de la machine peut laisser apparaître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt immédiat de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur,

amenant ainsi à une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [8].

### I.3.1.4 Défauts d'excentricité [10]

Ceux-ci provoquent la variation de l'entrefer dans le moteur, la répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant. Quand l'excentricité devient grande, les forces radiales résultantes créées par le stator avec la bande du frottement du rotor provoquent des dommages du stator et du rotor.

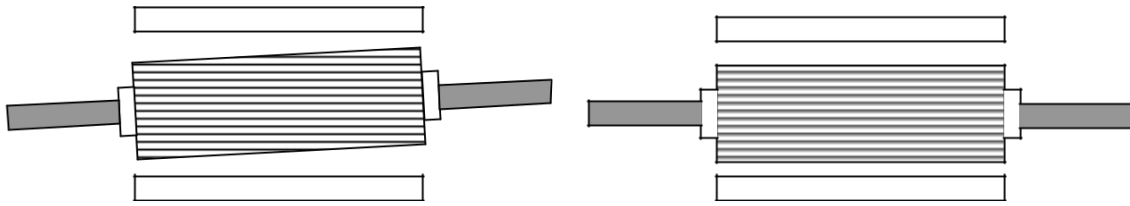
La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries d'ordre naturel. Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer (Fig I.9 et I.10) à savoir :



**Figure I.9:** Différents types de la dissymétrie de l'entrefer [10].

Tel que :

$R1$  : Rayon interne statorique,  $R2$  : Rayon externe rotorique,  $\delta$ : distance entre le centre de rotation et le centre du stator.



**Figure I.10 :** Excentricité statique (a) et dynamique(b)

### **I.3.2 DEFAILLANCES D'ORDRE ELECTRIQUE**

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certains cas, causer l'arrêt définitif de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances sont classées en deux catégories bien distinctes. On peut citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques [13].

#### **I.3.2.1 Défaillances des circuits électriques statoriques**

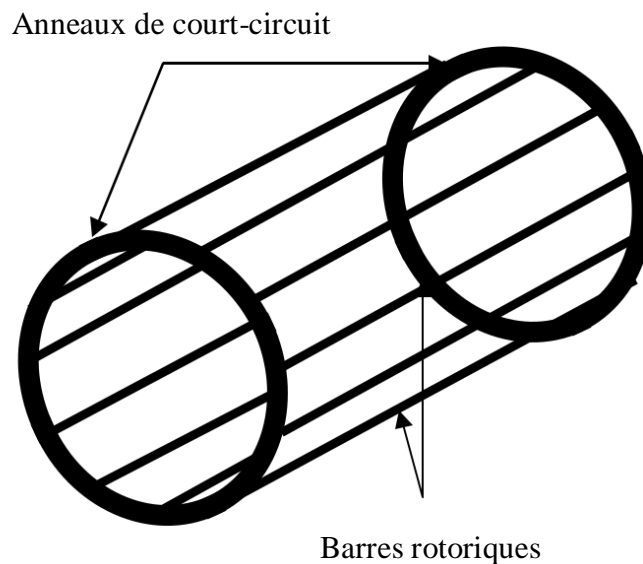
L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, par exemple, les défauts de type courts-circuit inter-spines qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défaut peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. On trouve également les courts-circuits apparaissant entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou encore entre deux phases statoriques. Ces défauts ont le plus souvent une origine mécanique. En effet, des vibrations excessives peuvent mener à un desserrement des boulons de la plaque à bornes de la machine créant ainsi le court-circuit. Une cosse mal serrée à la jonction du câble d'alimentation et des bornes de la machine peut être à l'origine d'une ouverture de phase. Le défaut le plus couramment rencontré reste encore la fusion d'un fusible de protection. Ces défauts peuvent être détectés par une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [13].

#### **I.3.2.2 Défaillances des circuits électriques rotoriques**

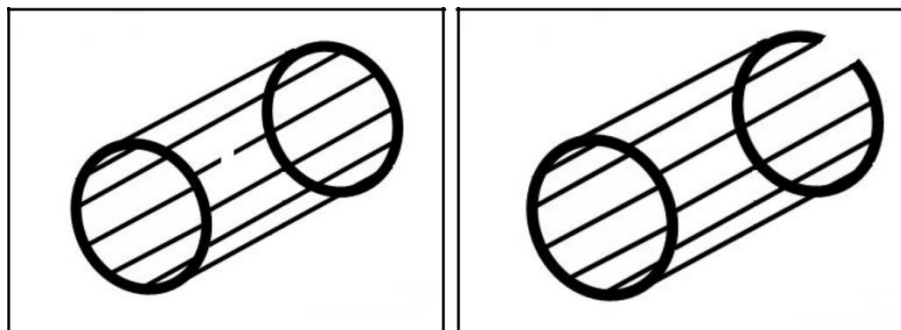
Deux types de défaillances peuvent apparaître au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écurieul. La cage étant composée de barres et d'anneaux de court-circuit d'aluminium ou de cuivre, une rupture partielle ou totale d'un de ces composants peut être considérée comme un défaut électrique rotorique. L'apparition de ce type de défaut peut être d'origine diverse. En effet, la

rupture d'une barre ou d'un segment d'anneau de court-circuit peut être due à plusieurs phénomènes qui sont souvent indépendants les uns des autres. On peut citer par exemple une mauvaise utilisation de la machine asynchrone (charge trop importante) ou encore l'environnement hostile dans lequel elle fonctionne [13].

Une défaillance au niveau de la cage rotorique se situe généralement à la jointure entre une barre et un anneau de court-circuit. En effet, les barres rotoriques et les anneaux de court-circuit ne pouvant pas être construits d'un seul bloc (sauf pour les machines de petite puissance), une soudure est pratiquée aux extrémités de chaque barre pour relier ces dernières aux deux anneaux de court-circuit. La fragilité de ces soudures, par rapport aux barres et aux anneaux fabriqués d'un seul bloc, provoque, à ces endroits précis, une fragilité de la cage d'écureuil [13].



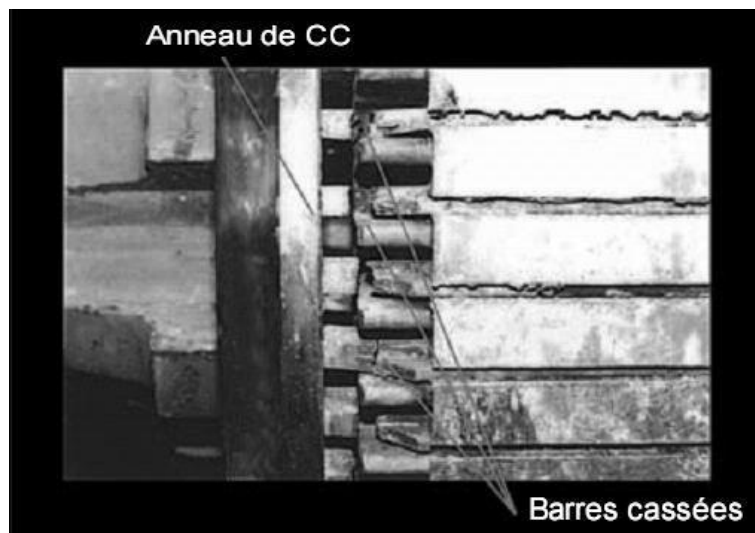
**Figure I.11** : Rotor à cage d'écureuil



**Figure I.12** : Rupture d'une barre et d'un anneau de court circuit

La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations. L'effet de la cassure de barres croît rapidement avec le nombre de barres cassées. La grande amplitude des oscillations accélère la détérioration de la machine et des composants de la chaîne de traction [13]. La rupture de barres provoque un déséquilibre du courant entre les barres du rotor. En effet ce déséquilibre apparaît sous forme des fréquences qui s'ajoutent au courant statorique de la machine, et l'analyse fréquentielle de la signature de la machine montre une apparition des composantes, autour du composant fondamental correspondantes aux fréquences :

$$f = (1 \pm 2kg)f_s, k = 1, 2, \dots, n \quad n \in \mathbb{Z} \quad (\text{I.7})$$



**Figure I.13 :** Rupture réelle des barres rotoriques

Les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants peut entraîner leur cassure. Ce défaut est généralement regroupé avec celui de la cassure de barres dans les études qui se font à partir du stator [13].

#### **I.4 MODELE DE LA MACHINE EN L'ABSENCE DE DEFAILLANCE**

Pour modéliser la machine asynchrone à cage d'écureuil, tous les modes de fonctionnement de la machine asynchrone doivent être pris en compte lorsque nous utiliserons la méthode de

circuits multiples couplés magnétiquement pour donner un modèle physique. Dans cette méthode, les inductances peuvent être calculées soit en utilisant les fonctions de bobinage, en sachant que cela exige une connaissance précise de la forme du bobinage de la machine [14], soit en utilisant une décomposition en séries de Fourier de l'induction d'entrefer de la machine [15,16].

Le regroupement des équations des circuits électriques statoriques et rotoriques sous forme d'un modèle global permet la résolution numérique. Le premier objectif de cette modélisation est de mettre en évidence l'influence des défauts électriques sur les grandeurs temporelles de la machine asynchrone. Pour ce faire, il est indispensable de poser certaines hypothèses qui ont pour but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine.

#### I.4.1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

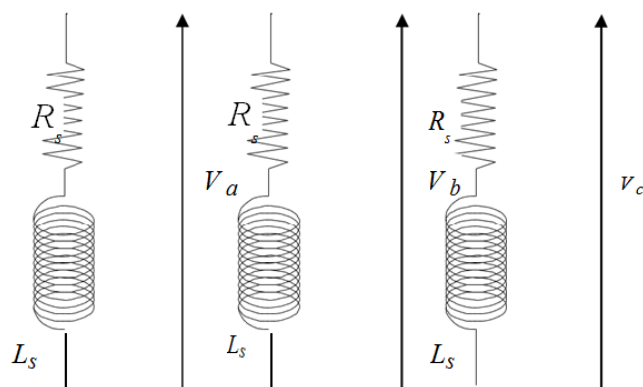
Dans l'approche proposée, on suppose que :

1. le circuit magnétique est linéaire (perméabilité relative du fer très grande devant  $I$ ) : Cette hypothèse permet d'introduire le concept d'inductance propre et mutuelle entre les bobinages statoriques et rotoriques.
2. l'effet de peau est négligeable.
3. les barres rotoriques sont isolées les unes des autres : cette hypothèse permet d'éliminer les courants d'inter-barres et leurs effets au sein de la cage rotorique.
4. les pertes fer de la machine, les effets capacitifs et les effets thermiques sont négligeables dans la construction du modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Le modèle prendra en compte les harmoniques d'espace du bobinage statorique les plus importants ainsi que l'inclinaison des barres rotoriques [8].

#### I.4.2 STRUCTURE DU STATOR

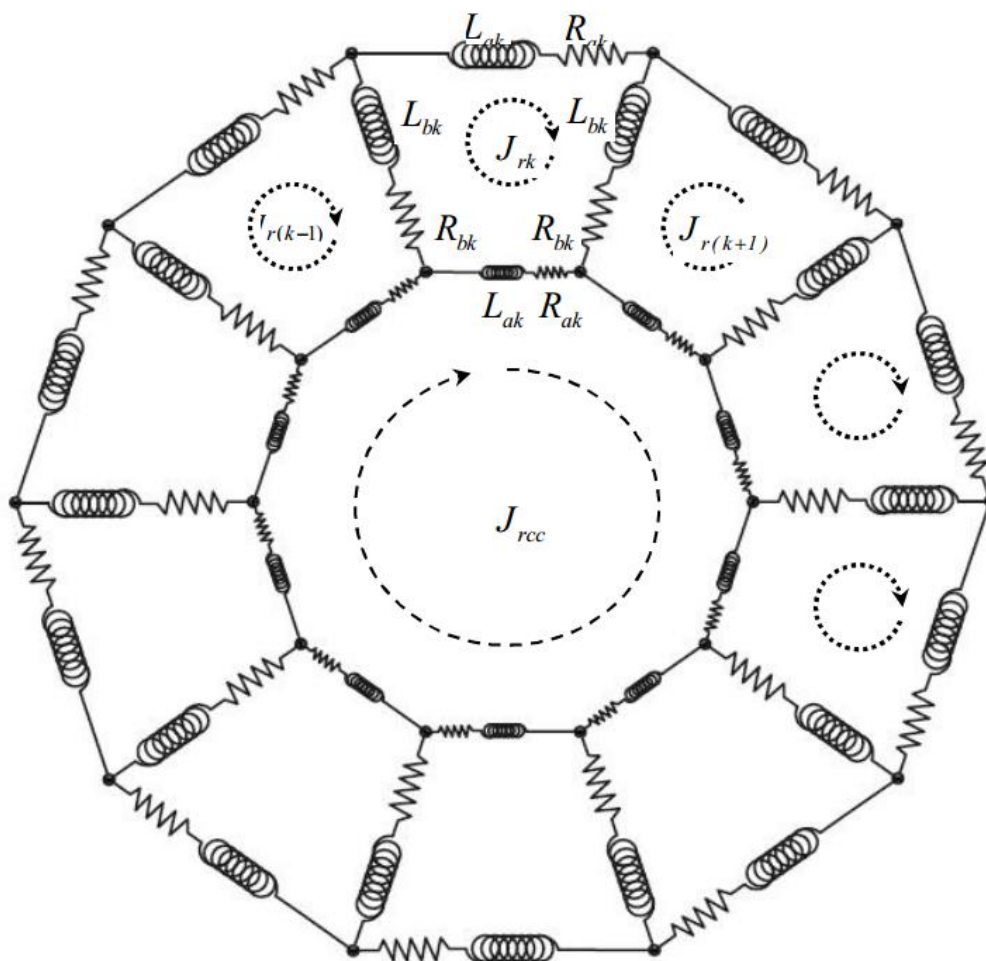
Le stator de la machine étudiée est un stator triphasé de  $m$  encoches statoriques. Ces bobines statoriques sont placées de sorte à obtenir une distribution de la force magnétomotrice la plus sinusoïdale possible le long de l'entrefer. La figure I.14 donne une représentation de la modélisation choisie pour les trois phases statoriques de la machine asynchrone. La valeur des inductances est fonction du nombre de bobines ainsi que du type de bobinage mis en place dans les encoches statoriques (concentrique, imbriqué, ...), celle des résistances dépend essentiellement de la longueur, de la section et du type de cuivre utilisé [39].



. **Figure I.14** : Structure adoptée pour modéliser le stator

### I.4.3 STRUCTURE DU ROTOR [39].

La cage d'écureuil de la machine asynchrone se compose de  $N_r$  encoches rotoriques qui peuvent être soit ouvertes soit fermées sur l'entrefer. Donne la forme des circuits électriques adoptée pour la modélisation de la cage d'écureuil rotorique. La figure I.15 donne la forme des circuits électriques adoptée pour la modélisation de la cage d'écureuil rotorique. Pour permettre une compréhension adéquate du modèle de la cage d'écureuil de la machine, on nomme :



**Figure I.15 :** Circuit équivalent d'un rotor à cage d'écureuil

$R_{bk}$  : Résistance d'une barre rotorique  $k$  ;

$L_{bk}$  : Inductance de fuite d'une barre rotorique  $k$  ;

$R_{ak}$  : Résistance du segment d'anneau de court-circuit  $k$  ;

$L_{ak}$  : Inductance de fuite du segment d'anneau de court-circuit  $k$  ;

$i_{bk}$  : Courant circulant dans la barre rotorique  $k$  ;

$i_{ak}$  : Courant dans le segment d'anneau de court-circuit  $k$  ;

$j_{rk}$  : Courant circulant dans la boucle rotorique  $k$  ;

$j_{rcc}$  : Courant circulant dans l'anneau de court-circuit.

#### I.4.4 EQUATIONS DIFFERENTIELLES ASSOCIEES [14,15].

##### I.4.4.1 Equations électriques du stator

En appliquant la loi d'Ohm sur les trois phases statoriques le vecteur tension, le vecteur courant ainsi que le vecteur flux  $\phi_{s_a}$ ,  $\phi_{s_b}$  et  $\phi_{s_c}$ .

Ces équations différentielles vont permettre d'associer les vecteurs, on obtient:

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \quad (I.7)$$

Où  $[V_s]$  représente le vecteur tension,  $[I_s]$  le vecteur courant et  $[\phi_s]$  le vecteur flux tel que :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{s_a} \\ V_{s_b} \\ V_{s_c} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} I_{s_a} \\ I_{s_b} \\ I_{s_c} \end{bmatrix}, [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{s_a} \\ \phi_{s_b} \\ \phi_{s_c} \end{bmatrix} \quad (I.8)$$

La matrice des résistances  $[R_s]$ , où sont regroupées les résistances de chacune des phases statoriques, se met sous la forme suivante :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{s_a} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s_b} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s_c} \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

$R_{s_i}$  : résistance d'une phase statorique

Les trois phases statoriques sont non seulement couplées magnétiquement entre elles mais également avec les circuits électriques rotoriques. Par conséquent, les courants de boucles rotoriques notés ici  $[J_r]$  interviennent dans les équations des trois flux statoriques comme le montre l'équation (I.10).

$$[\phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{s_r}][J_r] \quad (I.10)$$

La matrice inductance  $[L_s]$  se compose des inductances propres, de magnétisation, de fuites et mutuelles des trois phases statoriques. Elle peut se mettre sous la forme :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{s_a s_a} & M_{s_a s_b} & M_{s_a s_c} \\ M_{s_b s_b a} & L_{s_b s_b} & M_{s_a b s_c b} \\ M_{s_c s_a} & M_{s_c s_b} & L_{s_c s_c} \end{bmatrix} \quad (I.11)$$

Tel que :

$$\begin{cases} L_{S_a S_a} = L_{m_{S_a S_a}} + L_{f_{S_a S_a}} \\ L_{S_b S_b} = L_{m_{S_b S_b}} + L_{f_{S_b S_b}} \\ L_{S_c S_c} = L_{m_{S_c S_c}} + L_{f_{S_c S_c}} \end{cases} \quad (\text{I.12})$$

$L_{m_{S_i S_i}}$  : Inductance de magnétisation des enroulements statoriques

$L_{f_{S_i S_i}}$  : Inductance de fuite statorique

$$M_{S_i S_j} = -L_{m_{S_i S_j}}/2$$

L'inductance de magnétisation pour un enroulement ayant  $N_s$  spires par phase est donnée par :

$$L_{m_{S_i S_j}} = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot r}{g} \cdot N_s^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad (\text{I.13})$$

La matrice des inductances mutuelles  $[M_{sr}]$  entre les trois phases statoriques et les  $(Nr+I)$

boucles rotoriques se met sous la forme matricielle suivante :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{S_a r_1} & M_{S_a r_2} \dots & M_{S_a r_k} \dots & M_{S_a r_{Nr}} & M_{S_a r_{cc}} \\ M_{S_b r_1} & M_{S_b r_2} \dots & M_{S_b r_k} \dots & M_{S_b r_{Nr}} & M_{S_b r_{cc}} \\ M_{S_c r_1} & M_{S_c r_2} \dots & M_{S_c r_k} \dots & M_{S_c r_{Nr}} & M_{S_c r_{Nr}} \end{bmatrix} \quad (\text{I.14})$$

Le vecteur  $[J_r]$  regroupe les  $(Nr + I)$  courants de boucles rotoriques :

$$[J_r] = [j_{r_1} \ j_{r_2} \ \dots \ j_{r_k} \ \dots \ j_{r_{Nr}} \ j_{r_{cc}}] \quad (\text{I.15})$$

Les équations des trois phases statoriques de la machine étant maintenant décrites, les équations associées aux circuits électriques de la cage rotorique sont maintenant exprimées. La mutuelle inductance entre deux bobines quelconques  $i, j$  de la machine est calculée en supposant que la perméabilité du fer est infinie, [14,15].

$$M_{S_i S_j}(\theta) = \mu_0 \cdot 1. r. \int_0^{2\pi} g^{-1}(\varphi, \theta) \cdot N_i(\varphi, \theta) \cdot N_j(\varphi, \theta) \cdot d\varphi \quad (\text{I.16})$$

Avec :

$\theta$ : La position du rotor par rapport au stator.

$\varphi$ : La position angulaire le long de la surface intérieure du stator.

$g^{-1}(\varphi, \theta)$ : La fonction inverse de l'entrefer, dans le cas où l'entrefer est constant et petit par rapport au rayon du stator, la fonction est constante et égale à  $(l/g)$ .

$N_i(\varphi, \theta)$ : La fonction de l'enroulement  $i$ , elle représente la distribution spatiale de la force magnétomotrice le long de l'entrefer pour un courant unitaire circulant dans l'enroulement  $i$ .

Si l'entrefer est uniforme et très petit par rapport au rayon de rotor, la fonction inverse  $g^{-1}(\varphi, \theta)$  devient simplement une constante, et peut être pris hors de l'intégrale. Dans ce cas, pour trouver l'inductance mutuelle, il faut définir les fonctions d'enroulements. Les fonctions d'enroulements statoriques sont:

$$N_a = \frac{N_s}{2} \cos(\theta)$$

$$N_b = \frac{N_s}{2} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \tag{I.17}$$

$$N_c = \frac{N_s}{2} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})$$

La fonction définissant la  $i^{\text{ème}}$  maille rotorique :

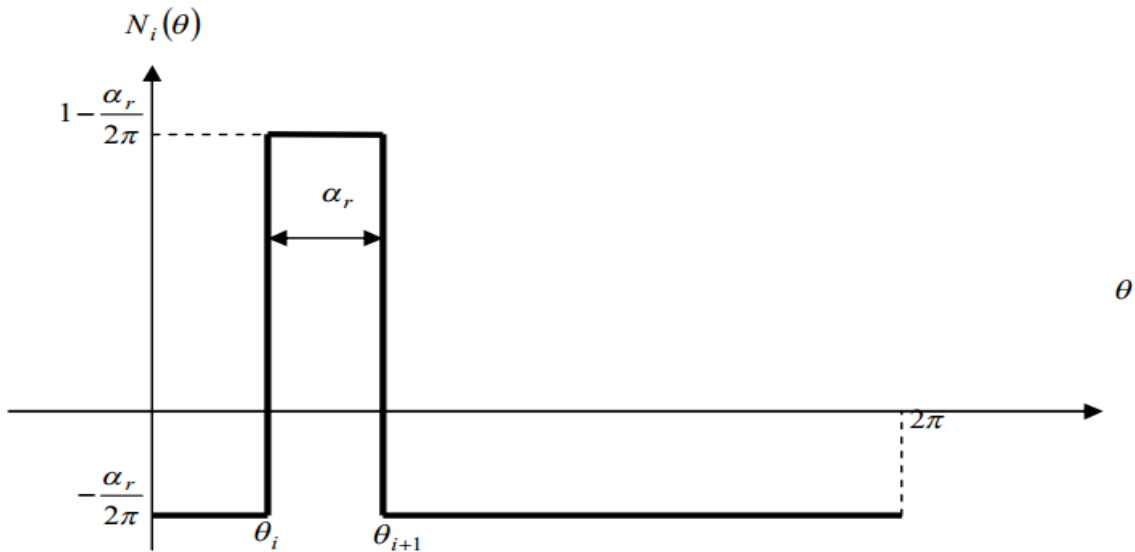


Figure. I.16 : La fonction définissant la  $i^{\text{ème}}$  maille rotorique

L'inductance mutuelle entre la phase  $\alpha$  et la  $i^{\text{ème}}$  maille rotorique est la suivante :

$$M_{s_\alpha r_i} = \frac{\mu_0 l r}{g} \int_0^{2\pi} N_\alpha(\theta) N_i(\theta) d\theta [\sin \alpha_r \cos \theta_i - (1 - \cos \alpha_r) \sin \theta_i] \frac{\mu_0 l r N_s}{g} \quad (\text{I.18})$$

Puisque chaque maille rotorique est placée symétriquement le long de la périphérie du rotor,

$\theta_i$  peut être exprimé en terme de l'angle arbitraire rotorique  $\theta_r$  et l'angle  $\alpha_r$  comme suit :

$$\theta_i = \theta_r + (i - 1)\alpha_r \quad (\text{I.19})$$

En utilisant les expressions trigonométriques, l'inductance mutuelle peut être écrite par:

$$M_{s_\alpha r_i} = L_m \cos(\theta_r + (i - 1)\alpha_r + \delta) \quad (\text{I.20})$$

Avec :  $L_m = \frac{4L_{ms}}{\pi N_s} \sin(\delta)$ ,  $\alpha_r = \frac{2\pi}{N_r}$  et  $\delta = \frac{\alpha_r}{2}$

$N_s$ : nombre de spires par phase

$N_r$ : Le nombre de barres

Tel que :

$L_m$  Mutuelle inductance entre une phase statorique et une maille rotorique quand leurs axes coïncident.

$\theta_r$  L'angle électrique du rotor.

$\alpha_r$  L'angle électrique entre deux barres adjacentes.

$\mu_0$  La perméabilité magnétique de l'entrefer.

$r$  Rayon moyen de l'entrefer.

$g$  L'épaisseur de l'entrefer.

$l$  Longueur du rotor.

Evidemment, dans la machine dont l'extrémité complète, le courant d'anneau  $j_{rcc}$  serait égal à zéro. Les  $N_r$  mailles des courants rotoriques sont couplées entre elles et avec les enroulements statoriques à travers les mutuelles inductances. Cependant, la maille de courant de l'anneau de court-circuit n'est pas couplée avec les enroulements statoriques.

#### I.4.4.2 Equations électriques du rotor [40]

Les équations des circuits électriques rotoriques peuvent se mettre sous une forme matricielle. On relie les tensions de chacune des boucles rotoriques avec les courants et les flux, grâce à l'équation :

$$[V_r] = [R_r][J_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \quad (\text{I.21})$$

Le vecteur  $[\phi_r]$ , donné dans l'équation précédente, se décompose de la façon suivante :

$$[\phi_r] = [\phi_{r_2} \ \phi_{r_2} \ \dots \ \phi_{r_k} \ \dots \ \phi_{r_{N_r}} \ \phi_{r_{cc}}] \quad (\text{I.22})$$

Il est à noter que dans le cas particulier de la machine asynchrone à cage d'écureuil, le vecteur de tension  $[V_r]$  est nul.

Les résistances des  $(N_r + 1)$  boucles rotoriques sont regroupées dans la matrice  $[R_r]$  qui est décrite par l'équation I.24. Les boucles rotoriques étant magnétiquement couplées aux phases statoriques, le vecteur flux  $[\phi_r]$  dépend non seulement des courants de boucles rotoriques mais aussi des courants de chacune des phases statoriques si bien que :

$$[\phi_r] = [L_r][J_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (\text{I.23})$$

Où la matrice inductance  $[L_r]$ , décrite par l'équation I.26, se compose des inductances propres, de magnétisation, de fuite et mutuelles de chaque boucle rotorique.

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{r_{t_1}} & -R_{r_{b_1}} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & -R_{b_{N_r}} & -R_{a_1} \\ -R_{r_{b_1}} & R_{r_{t_2}} & -R_{r_{b_2}} & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & -R_{a_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -R_{b_{k-1}} & R_{r_{t_k}} & -R_{r_{b_k}} & \dots & 0 & 0 & -R_{a_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_{r_{b_{N_r}}} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_{r_{b_{N_r-1}}} & R_{r_{t_{N_r}}} & R_{a_{N_r}} \\ -R_{a_1} & -R_{a_2} & -R_{a_3} & \dots & -R_{a_{k-1}} & -R_{a_k} & -R_{a_{k+1}} & \dots & -R_{a_{N_r-1}} & -R_{a_{N_r}} & \sum_{k=1}^{N_r} -R_{a_k} \end{bmatrix} \quad (\text{I.24})$$

$$\begin{cases} R_{rt_1} = R_{r_{b_{N_r}}} + R_{r_{b_1}} + 2R_{a_1} \\ \vdots = \vdots \\ R_{rt_k} = R_{r_{b_{N_{k-1}}}} + R_{r_{b_k}} + 2R_{a_k} \\ \vdots = \vdots \\ R_{rt_{N_r}} = R_{r_{b_{N_{k-1}}}} + R_{r_{b_{N_r}}} + 2R_{a_{N_r}} \end{cases} \quad (I.25)$$

Sachant que :

$$R_{r_{b_1}} = R_{r_{b_2}} = R_{r_{b_3}} = \dots = R_{r_{b_{N_r}}} = R_b$$

$$R_{a_1} = R_{a_2} = R_{a_3} = \dots = R_{a_{N_r}} = R_a$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} R_{rt_2} = R_{rt_2} = R_{rt_3} = \dots = R_{rt_{N_r}} = R_0 \\ R_0 = 2(R_b + R_a) \end{cases}$$

La matrice résistance  $[R_r]$  devient :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_0 & -R_b & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & -R_b & -R_a \\ -R_b & R_0 & -R_0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_0 & -R_b & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_0 & R_a \\ -R_a & -R_a & -R_a & \dots & -R_a & -R_a & -R_a & \dots & -R_a & -R_a & \sum_{k=1}^{N_r} -R_a \end{bmatrix} \quad (I.26)$$

La matrice inductance rotorique :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{r_{f_1}} & M_{r_{f_2}} - L_{f_{b_1}} & M_{r_{f_2}} & \dots & M_{r_{f_k}} & \dots & M_{r_{f_{N_r-1}}} & M_{r_{f_{N_r}}} - L_{f_{b_1}} & -L_{a_1} \\ M_{r_{f_2}} - L_{f_{b_1}} & L_{r_{f_2}} & M_{r_{f_3}} - L_{f_{b_1}} & \dots & M_{r_{f_k}} & \dots & M_{r_{f_{N_r-1}}} & M_{r_{f_{N_r}}} & -L_{a_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_{f_k}} & M_{r_{f_2}} & M_{r_{f_3}} & \dots & L_{r_{f_k}} & \dots & \dots & 0 & -L_{a_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_{f_{N_r-1}}} - L_{f_{b_{N_r}}} & M_{r_{f_2}} & M_{r_{f_2}} & \dots & M_{r_{f_k}} & \dots & M_{r_{f_{N_r-1}}} - L_{f_{b_{N_r-1}}} & L_{r_{f_{N_r}}} & -L_{a_{N_r}} \\ -L_{a_1} & -L_{a_2} & -L_{a_3} & \dots & -L_{a_k} & \dots & -L_{a_{N_r-1}} & -L_{a_{N_r}} & \sum_{k=1}^{N_r} -L_{a_k} \end{bmatrix} \quad (I.27)$$

$[M_{rs}]$ , décrite par l'équation I.28, se compose des inductances mutuelles entre les  $(Nr + 1)$  boucles rotoriques et les trois phases statoriques.

$$[M_{rs}] = \begin{bmatrix} M_{r_1s_a} & M_{r_1s_b} & M_{r_1s_c} \\ M_{r_2s_a} & M_{r_2s_b} & M_{r_2s_c} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_ks_a} & M_{r_ks_b} & M_{r_ks_c} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_Ns_a} & M_{r_Ns_b} & M_{r_Ns_c} \\ M_{r_{cs}a} & M_{r_{cs}b} & M_{r_{cs}c} \end{bmatrix} \quad (I.28)$$

De ce qui précède, nous notons que

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

D'après la fonction d'enroulement, on peut calculer les inductances mutuelles rotoriques en utilisant l'expression suivante :

$$L_{m_{b_{ii}}} = \frac{\mu_0 l r}{g} = \int_0^{2\pi} N_i^2(\theta) d\theta \frac{\mu_0 l r}{g} \alpha_r \left(1 - \frac{a_r}{2\pi}\right) \quad (I.29)$$

$$L_{m_{b_{ij}}} = \frac{\mu_0 l r}{g} = \int_0^{2\pi} N_i(\theta) N_j(\theta) d\theta \frac{\mu_0 l r}{g} \left(-\frac{a_r^2}{2\pi}\right) \quad (I.30)$$

Décrit l'équation électrique de la boucle de rotor  $(Nr + 1)$ , nous adoptons Description des équations mécaniques des moteurs asynchrones.

Équation mécanique contrôlant le fonctionnement du moteur asynchrone Il peut prendre la forme suivante:

$$J_t \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f_v \Omega - C_r \quad (I.31)$$

$$\Omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (I.32)$$

Où  $J_t$  représente le moment d'inertie de la machine étudiée,  $\Omega$  vitesse rotor,  $C_{em}$  Couple électromagnétique,  $f_v$  est le frottement visqueux,  $C_r$  est le couple de charge. L'équation I.32 relie la vitesse du rotor à la position du rotor  $\theta$ . Paramètres  $J_t$ ,  $f_v$  et  $C_r$  Cela dépend directement de la machine étudiée et de sa charge. Le calcul du couple électromagnétique est déterminé en étudiant la co-énergie magnétique avec l'équation :

$$W_{co} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} [L_s] & M_{sr} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [J_s] \\ [J_r] \end{bmatrix} \quad (I.33)$$

Si cette co-énergie est exprimée en fonction des différents courants de phases de la machine, le couple électromagnétique se calcule en dérivant cette dernière par rapport à la position  $\theta$  que prend le rotor vis-à-vis du stator. L'expression du couple électromagnétique  $C_{em}$  peut finalement être déterminée grâce à la relation :

$$C_{em} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_s] & M_{sr} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [J_s] \\ [J_r] \end{bmatrix} \quad (I.34)$$

Voici un résumé des équations électriques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine à cage asynchrone est illustré ci-dessous:

$$\left\{ \begin{array}{l} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \\ [\phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][J_r] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \\ [\phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][J_s] \\ C_{em} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_s] & M_{sr} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix} \\ J_r \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f_v \Omega - C_r \\ \Omega = \frac{d\theta}{dt} \end{array} \right. \quad (I.35)$$

Le modèle qui en résulte ne peut jamais donner des résultats mitigés par rapport à la réalité en raison des hypothèses faites auparavant, mais il peut donner une image proche du travail d'une machine à cage asynchrone, par exemple le courant stator et rotor, le couple, la vitesse électromagnétique et de rotation.

## 1.5 MODELE DE LA MACHINE EN PRESENCE DE DEFAILLANCES

Après avoir modélisé le moteur asynchrone à cage d'écureuil sans défaut, le moteur est maintenant modélisé en présence d'une panne de rotor. Une telle procédure permet de juger des

défauts attribués aux défauts. Dans cette partie, nous nous concentrerons sur la défaillance (rupture) de la barre du rotor et la rupture de la partie de l'anneau de court-circuit.

Deux méthodes différentes peuvent être utilisées pour modéliser ce type de défaut, dans le but d'éliminer les courants qui traversent les normes pertinentes. Le circuit du rotor indiqué à la figure I.15 doit être reconsidéré afin de prendre en compte la défaillance du rotor dans le modèle de machine [8].

La première méthode de modélisation est basée sur la reconstruction complète du circuit électrique du rotor. Dans ce type d'approche, la barre de rotor endommagée est retirée du circuit électrique, ce qui oblige à calculer la matrice de résistance  $[R_r]$  et d'inductance  $[L_r]$  de la machine asynchrone. En effet, retirer la barre de la cage nous donne une matrice  $[R_r]$  et  $[L_r]$  de rang inférieur à celle développée pour une machine saine. La modification de l'ordre des matrices rotoriques oblige à recalculer les lois électrique et magnétique de la boucle  $k$ . Nous présentons dans ce qui suit les structures finales que prend le circuit électrique du rotor lorsque l'on est en présence de rupture des barres et des portions d'anneau de court-circuit [8][14,15].

La deuxième approche possible consiste à augmenter artificiellement la valeur de résistance de la barre chargée d'un facteur tel que le courant qui la traverse est aussi proche de zéro que possible en régime permanent. Par rapport à la première méthode, la structure du circuit électrique du rotor n'est pas modifiée, car dans ce type de modélisation nous pensons que la rupture de la barre ne change pas les inductances spécifiques et mutuelles de la cage du rotor. Par conséquent, dans cette dernière approche, il est possible de modéliser la défaillance partielle des barres et des parties de l'anneau de court-circuit.

### **I.5.1 MACHINE AVEC UNE SEULE BARRE CASSEE**

Selon la première approche, la rupture de la barre sur le rotor est introduite en modifiant les équations, notamment dans le calcul de l'inductance et de la résistance spécifiques et mutuelles.

Si la barre constituant le  $k$  maillage est supprimée, le modèle est réduit par le maillage, ce qui signifie que le courant  $J_{rk}$  coupe le maillage deux fois plus large et le maillage  $(k+1)$  est éliminé comme le montre la figure I.17 ci-dessous.

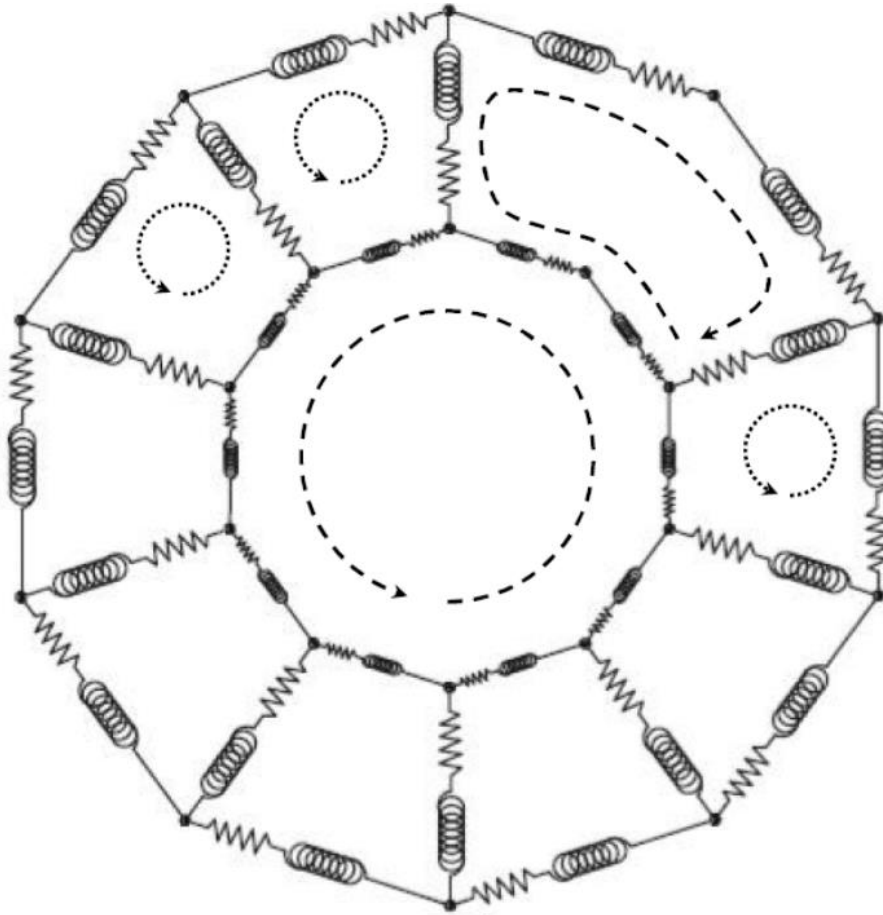


Figure I.17 : Circuit équivalent d'un rotor avec une barre cassée

Dans la matrice d'inductance, on élimine donc la ligne et la colonne  $(k+1)$ , et les termes relatifs à la colonne  $k$  sont recalculés en tenant compte de la fonction de l'enroulement correspondante à la  $k^{\text{ème}}$  maille du rotor.

$$N_k(\theta) = \begin{cases} -\frac{\alpha_r}{2\pi} & 0 < \theta \leq \theta_k \\ 1 - \frac{\alpha_r}{2\pi} & \theta_k < \theta \leq \theta_{j+2} \\ -\frac{\alpha_r}{2\pi} & \theta_{k+2} < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (\text{I.35})$$

La nouvelle inductance propre correspondante à la maille  $k$  s'écrit sous la forme :

$$L_{0k} = L_{mb_{kk}} + 2(L_b + 2L_e)$$

La mutuelle inductance rotor- rotor  $Lm_{bij}$  est dans ce cas :

$$Lm_{bij} = \frac{\mu_0 l r}{g} \int_0^{2\pi} N_i(\theta) N_j(\theta) d\theta = -2 \frac{\mu_0 l r}{g} \frac{\alpha_r^2}{2\pi} \quad (\text{I.36})$$

Alors la matrice inductance rotorique devient :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_0 & M_{r_1 r_2} - L_{f_{b1}} & M_{r_1 r_3} & \dots & M_{r_1 r_k} & M_{r_1 r_{k+2}} & \dots & M_{r_1 r_{N_r-1}} & M_{r_1 r_{N_r}} - L_{f_{bN_r}} & -L_a \\ M_{r_2 r_1} - L_{f_{b1}} & L_0 & M_{r_2 r_3} - L_{f_{b1}} & \dots & M_{r_2 r_k} & M_{r_2 r_{k+2}} & \dots & M_{r_2 r_{N_r-1}} & M_{r_2 r_{N_r}} & -L_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_k r_1} & M_{r_k r_2} & M_{r_k r_3} & \dots & L_0 & M_{r_k r_{k+2}} - L_{f_{b_{k+2}}} & \dots & \vdots & 0 & -L_a \\ M_{r_{k+2} r_1} & M_{r_{k+2} r_2} & M_{r_{k+2} r_3} & \dots & M_{r_{k+2} r_k} & L_0 & \dots & M_{r_{k+2} r_{N_r-1}} & \dots & -L_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_{N_r-1} r_1} - L_{f_{bN_r}} & M_{r_{N_r-1} r_2} & M_{r_{N_r-1} r_3} & \dots & M_{r_{N_r-1} r_k} & \dots & M_{r_{N_r-1} r_{N_r-1}} - L_{f_{bN_r-1}} & L_0 & \dots & -L_a \\ -L_a & -L_a & -L_a & \dots & -L_a & \dots & -L_a & -L_a & \dots & \sum_{k=1}^{N_r} -L_a \end{bmatrix} \quad (I.37)$$

La mutuelle inductance  $M_{s_a r_k}$  entre l'enroulement statorique (a) et la maille  $k$  s'obtient à partir de :

$$M_{s_a r_k} = \frac{\mu_0 l r}{g} \int_0^{2\pi} N_a(\theta) N_k(\theta) d\theta = \frac{\mu_0 l r N_s}{g} [\sin \alpha_r \cos \theta_k - (1 - \cos \alpha_r) \sin \theta_k] \quad (I.38)$$

La matrice des résistances rotoriques est aussi affectée par la cassure d'une barre, elle est obtenue à partir de cette nouvelle représentation :

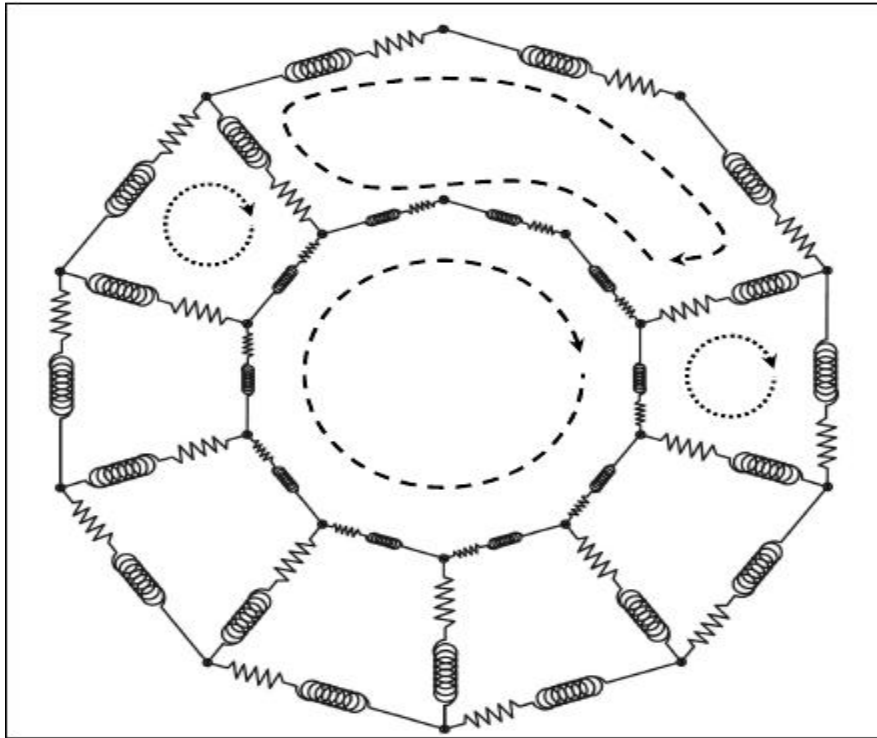
$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_0 & -R_b & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -R_b & -R_a \\ -R_b & R_0 & -R_0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_0 & -R_b & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_0 & R_a \\ -R_a & -R_a & -R_a & \dots & -R_a & -R_a & -R_a & \dots & -R_a & -R_a & \sum_{k=1}^{N_r-1} -R_a \end{bmatrix} \quad (I.39)$$

Avec :

$$R_{0k} = 2.(R_b + 2.R_e) \quad (I.40)$$

**I.5.2 MACHINE AVEC DEUX BARRES CASSEES ADJACENTE**

Dans le cas de rupture de deux barres adjacentes, le nombre de mailles rotorique diminue de deux, si la première barre est traversée par les courants  $i_{rk}$ ,  $i_{rk+1}$  et la deuxième est traversée par  $i_{rk+1}$ ,  $i_{rk+2}$  dans le cas de cassure, ces trois courants sont forcément égaux ( $i_{rk}=i_{rk+1}=i_{rk+2}$ ) qui veut dire que le courant  $i_{rk}$  traverse une maille trois fois plus large comme mentionné sur la figure suivante :



**Figure I.18 :** Circuit équivalent d'un rotor à cage avec deux barres cassées

La fonction de l'enroulement  $k$  dans ce cas est :

$$N_k(\Theta) = \begin{cases} -\frac{\alpha_r}{2\pi} & 0 < \theta \leq \theta_k \\ 1 - \frac{\alpha_r}{2\pi} & \theta_k < \theta \leq \theta_{k+3} \\ -\frac{\alpha_r}{2\pi} & \theta_{k+3} < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (I.41)$$

Le même type de relations appliqué dans le cas d'une seule barre cassée est employé pour le calcul des nouvelles matrices d'inductance et de résistance dans ce cas :

$$L_{0k} = L_{m_{bkk}} + 2.(L_b + 3.L_e) \quad (I.42)$$

Avec:

$$L_{m_{bkk}} = \frac{\mu_0.I.r}{g} \int_0^{2.\pi} N_k^2(\theta).d.\theta = \frac{\mu_0.I.r}{g} .\alpha_r .(3 - \frac{5.\alpha_r}{2.\pi}) \quad (I.43)$$

La mutuelle inductance rotor- rotor est :

$$L_{m_{bik}} = \frac{\mu_0.I.r}{g} \int_0^{2.\pi} N_i(\theta).N_k(\theta).d.\theta = -3 \frac{\mu_0.I.r}{g} .\frac{\alpha_r^2}{2.\pi} \quad (I.44)$$

La mutuelle inductance stator- rotor est :

$$M_{SaSk} = \frac{\mu_0.I.r}{g} \int_0^{2.\pi} N_a(\theta).N_k(\theta).d.\theta = L_m.\cos(\theta + 3.(k-1).\alpha_r + \delta) \quad (I.45)$$

La nouvelle résistance rotorique pour la maille k s'écrit dans ce cas :

$$R_{0k} = 2.(R_b + 3.R_a) \quad (I.46)$$

## I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les éléments structurels de la machine à cage d'écurueil asynchrone, nous décrivons également la plupart des échecs Peut apparaître, et leur impact sur les performances de la machine. Nous avons également cité les différents types de défauts qui peuvent se produire au sein de la machine à savoir les défauts statorique du type court-circuit entre spires d'une même phase et les défauts rotorique du type rupture de barres. . Par conséquent, le deuxième chapitre sera réservé pour la méthodologie de la conception et l'exploitation de traitement de signale dans le domaine de diagnostic.

## *Chapitre 2*

# *Méthodologie de diagnostic des défauts par la méthode de prony*

## **II .1 introduction**

Les moteurs asynchrones jouent un rôle important dans l'industrie et sont devenus la colonne vertébrale de l'industrie, et beaucoup de recherches ont été faites sur eux pour améliorer leur performance et leur développement dans leur domaine, parmi les choses étudiées il y a le diagnostic. Le mauvais diagnostic peut être dévastateur, ou le bon diagnostic peut être vital, et est un sujet sensible, il existe donc de nombreuses études et recherches. De nombreuses méthodes de diagnostic ont émergé, y compris la méthode de prony. Dans ce chapitre, nous allons discuter du diagnostic et de la méthode de prony et nous allons essayer de les expliquer .

## **II.2 La Définition et objectif du diagnostic**

### **II.2.1 Définition**

Le diagnostic d'un système matériel désigne toute méthode permettant de déterminer si une machine est défaillante ou non et de déterminer l'origine de la panne à partir des informations relevées par observation, contrôles et tests.

Cette méthode peut se présenter sous diverses natures et divers supports. Il peut s'agir :

- d'un algorithme de détection électronique ou informatique
- d'un arbre de défaillance
- d'un simple test visuel [17]

### **II.2.2 objectif du diagnostic**

Le but du système de diagnostic est de prédire la plupart Rapidement et avec précision afin de pouvoir expliquer davantage ce principe Précision, nous définirons d'abord le sens par défaut, puis nous rappellerons Fonctions de diagnostic, telles que la détection, la localisation et l'identification des défauts [20].

## **II.3 Considération générales sur les systèmes de diagnostics**

Il existe plusieurs critères à évaluer diagnostic. Généralement, nous prêtons attention à:

- Rapidité : Lorsque la chaîne de production échoue, Le système de surveillance doit réagir rapidement dans cette situation, Et le système de diagnostic rapide peut éviter les dommages Matière et humain [21].
- Isolation : D'après[22][23] Capacité à surveiller le système Distinguer les différents modes de dysfonctionnement des processus. Une défaillance génère généralement une série d'alarmes et peut Il est difficile de retracer l'organe défaillant. Isolement La défaillance est liée à la structure du résidu (signal de détection Failure) et exécutez la procédure de détection.
- Robustesse : Il s'agit de vérifier la détection et la détection du système de surveillance Isoler les défauts affectant le processus de surveillance Environnement incertain. Il est à noter que la norme de robustesse n'est pas Non seulement la méthode de génération de résidus, mais aussi Procédé d'évaluation. Une évaluation puissante des résidus peut répondre à toutes les exigences Portez une attention particulière au seuil d'atteindre les objectifs suivants Minimisez les fausses alarmes [21].
- Sensibilité : Caractériser la capacité du système de diagnostic à détecter les défauts Une certaine gamme, ne dépend pas seulement de la structure Les résidus, mais aussi du rapport entre le bruit de mesure et le défaut[24]
- Adaptabilité
- Identifier plusieurs défauts

### **II.4 Concepts de base de diagnostic**

Pour comprendre la théorie de diagnostic, il est nécessaire de définir ses propres concepts de base [18-19] :

- Défaut : qui est un état indésirable, reflétant un écart entre le comportement normal de référence d'un système physique et celui observé lors de son instrumentation. Ce défaut peut ne pas affecter le fonctionnement d'un tel système, mais il peut prédire sa défaillance future. La recherche des défauts est donc une tâche essentielle en diagnostic.
- Défaillance : définit l'excentricité fonctionnelle dans un système physique. Celui-ci sera dans ce cas, incapable d'achever ses fonctions ou ses services. Un défaut comprend une défaillance mais l'inverse n'est pas juste. Il existe plusieurs types de défaillances. Elles sont classées selon leurs causes, leurs conséquences, leur degré de gravité, leur apparition et leur évolution.

- Panne : est le résultat d'apparition d'une défaillance. Le système relatif cesse de faire correctement sa fonction.
- Symptôme : est une caractéristique indiquant l'état anormal de système relatif.
- Perturbation : est l'entrée non contrôlée d'un système physique. Elle a une influence gênante. Son effet est la variation inattendue des grandeurs physiques en sortie de système.

Les systèmes de diagnostic de défauts exécutent les trois principales tâches suivantes :

- 1) détection de défaut : c'est l'indication de quelque chose qui ne va pas dans le système surveillé ;
- 2) localisation de défaut : c'est la détermination de la position exacte de défaut (composant défectueux) ;

identification de défaut : c'est la détermination des causes et de la gravité de défaut

### **II.5 Les différentes étapes de diagnostic**

Les termes de diagnostic correspondent aux caractéristiques du défaut et le diagnostic de défaut est doit passer par plusieurs étapes consécutives.

#### **II.5.1 La détection**

Cette opération permet de décider si le système est en fonctionnement normal ou non.

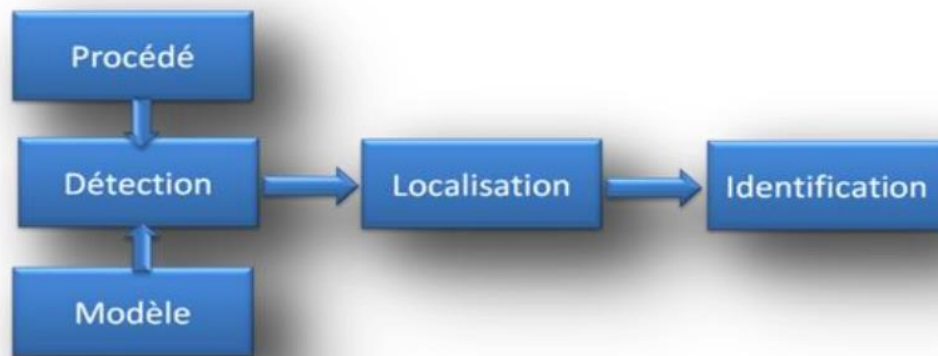
- Probabilité de fausse détection : conduit à des arrêts ou des reconfigurations inutiles,
- Probabilité de non détection : peut conduire à une panne intolérable dans les systèmes à haut niveau de sécurité (aéronautique, nucléaire, ...etc).

#### **II.5.2 La localisation**

Il s'agit de l'identification de l'élément qui a causé l'échec. Parfois, il est impossible de trouver l'interaction entre les composants du système et les instruments. La solution est d'isoler un sous-système qui comprend des composants pouvant contenir des défauts [22].

#### **II.5.3 L'identification**

L'objectif de l'identification est de caractériser plus finement le défaut et déterminer les causes qui ont engendré la défaillance constatée.



**Fig. II.1 :** Différentes étapes de diagnostic [20]

## II.6 Type de diagnostic :

Le type de diagnostic le plus approprié à un système industriel donné ne peut se faire qu'après un recensement raffiné des besoins et des connaissances disponibles.

Pour effectuer le diagnostic des machines d'une installation industrielle, les opérations de maintenance analysent un certain nombre de signaux émis de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent leurs bons fonctionnements. [27] .

De ce fait, le diagnostic peut être classé en deux grandes familles:

- Diagnostic inductif et déductif.
- Diagnostic invasif (interne) et non invasif (externe).

### II.6.1 Inductif de diagnostic :

Ce type de diagnostic correspond à des méthodes de recherche montante (en amont). Il est difficile de trouver le défaut en fonction de son impact sur le système. Type utiliser un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons afin de trouver le défaut [27].

### **II.6.2 Diagnostic déductif**

La principale caractéristique de ce type est le raisonnement en arrière (en aval). Le diagnostic déductif doit établir quels sont les effets sur les systèmes. La vérification des «effets trouvés» par rapport aux «effets possibles» rend cela possible confirmer et / ou informer de l'existence du défaut.

Le diagnostic peut utiliser une méthode de raisonnement (avant ou arrière) ou une combinaison mixte. La connaissance «à priori» de la cause «défaut» implique la connaissance de certains effets.

### **II.6.3 Diagnostic invasif**

Le diagnostic invasif dépend des connaissances acquises à partir des modèles mathématiques du système.

Ce type de diagnostic est principalement issu de la technologie utilisée à l'origine par les ingénieurs en automatisation. Grâce à la technologie d'identification des paramètres, la méthode du problème inverse peut être réalisée. Le diagnostic de défaillance est possible en suivant en temps réel l'évolution des

Paramètres physiques ou utilisez la version "boîte noire" du modèle. Elle implique une compréhension approfondie du fonctionnement sous la forme d'un modèle mathématique, qui doit être vérifié par des expériences avant toute utilisation industrielle.

Les différents types de diagnostic invasif se regroupent en 04 grandes familles:

- Méthode à base de modèle.
- Méthodes d'identification des paramètres.
- Méthodes d'estimation du vecteur d'état.
- Méthodes analytiques.

### **II.6.4Le diagnostic non invasif**

Le diagnostic non invasif utilise des connaissances issues de l'expertise humaine. Le diagnostic est basé sur l'analyse spectrale du signal (ASS) fourni par la machine pendant le fonctionnement.

Les signaux les plus utilisés sont:

- Électriques: analyse des grandeurs électriques aux bornes de la machine: (Tensions, courants, puissance instantanée partielle, puissance instantanée totale, analyse temporelle du module du vecteur de Park...).

- Mécaniques: analyse des vibrations acoustiques (accéléromètre...).
- Thermiques: analyse de la température de la machine: (sonde de température, mesure infrarouge ...).
- Électromagnétiques: analyse des flux dans l'entrefer, (spire de mesure de flux), des flux de dispersion radial ou axial (bobines externes).
- Chimiques: analyse des huiles ou des gaz.

[28].

Notons que ce type de diagnostic, objet du présent travail, a attiré notre attention vu ces avantages:

- Facile à mettre en œuvre technico-économiquement.
- Pas besoin de modèle (grandeurs issues directement des bancs d'essais).
- Signaux vient directement des installations.
- Connaissances sur le système sain (par mesure ou modèle).

### **II.7 Principe de diagnostic de défaut**

#### **II.7.1 Redondance physique (matérielle)**

La redondance physique consiste à utiliser plusieurs capteurs, actionneurs, processeur et logiciels pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière. Un principe de vote majoritaire est appliqué sur les valeurs redondantes pour savoir s'il y a une faute ou non. Elle entraîne un cout important en instrumentation mais fiable, sûr et simple à implanter [20].

#### **II.7.2 Redondance analytique**

Son rôle est d'exploiter les contraintes liant les différentes variables du système. Ces dernières peuvent s'exprimer sous la forme de relation analytique liant les variables connues (relation entrée/sortie ou sortie/sortie). Le diagnostic utilisant la redondance analytique consiste à vérifier si les relations analytiques sont égales à zéro en utilisant les mesures prélevées en ligne sur le système. Le concept de redondance analytique repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à surveiller [25][26].

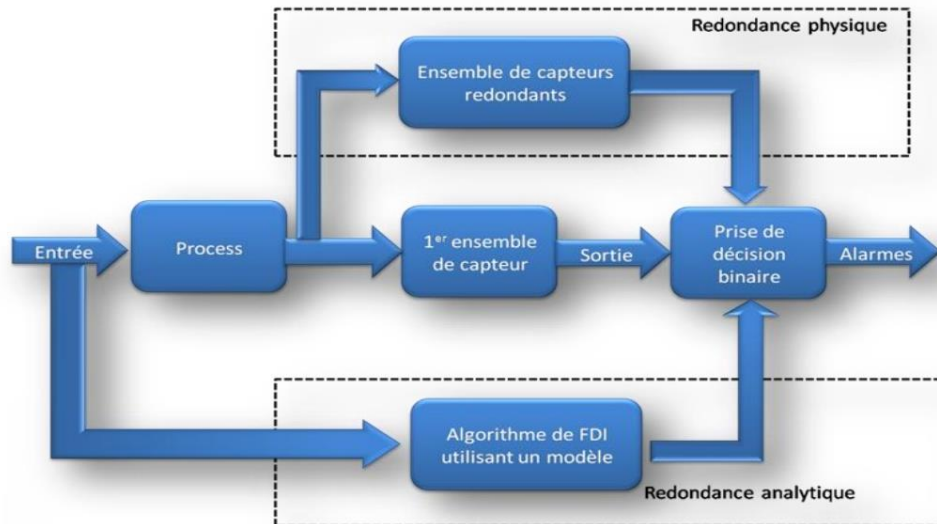


Fig. II.2 : Redondance physique et analytique [20]

## II.8 DIAGNOSTIC DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Les moteurs asynchrones sont soumis à plusieurs types de contraintes différents lors de leur fonctionnement, et l'accumulation de ces contraintes peut provoquer des pannes dans différentes parties du moteur. Afin de résoudre le problème de la détection des défauts, il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection de défauts, dont certaines sont basées sur l'observation et la mesure (mesure du champ magnétique, mesure du bruit), tandis que d'autres sont basées sur l'observation et la mesure. Basé sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques (courant statorique, couple et vitesse) du moteur défectueux Figure II.3.

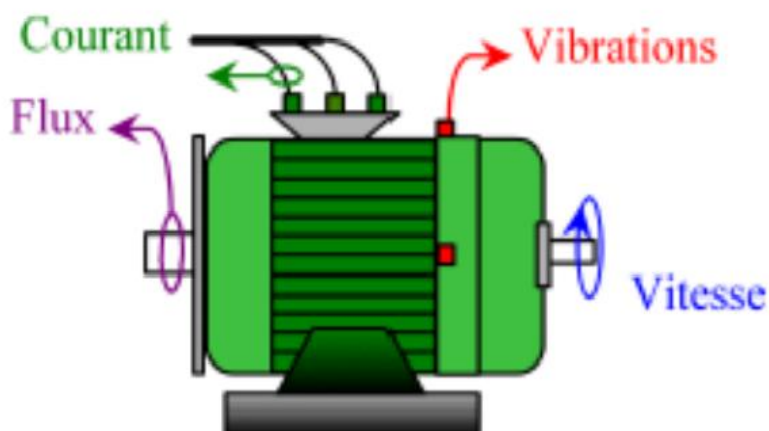


Figure II.3: Différents grandeurs de diagnostic dans une machine[29]

Ces technologies peuvent être divisées en trois catégories: les technologies mécaniques, Technologie chimique et technologie électromagnétique.

### **II.8.1 Diagnostic par mesure de la température [30]:**

Les températures des supports sont surveillées sur des bases de routine, et fournissent des informations utiles. Un volume de liquide refroidissant, débouché sur des températures, est également précieux pour signaler des problèmes de refroidissement et pour surveiller lorsqu'il est proposé de faire fonctionner la machine au-delà de sa puissance.

La température de la bobine est également essentielle pour déterminer la limite à laquelle le moteur peut résister et estimer la durée de vie restante de l'isolation de l'enroulement. En raison de problèmes d'isolation électrique des conducteurs haute tension, les mesures sont rarement prises, bien que des détecteurs de température soient parfois insérés dans la couche isolante entourée de points chauds du conducteur, mais cela nuira à son intégrité.

Par conséquent, il existe encore un besoin d'un capteur haute température qui puisse être installé sur le bobinage ou inséré dans un isolant qui est électriquement isolé de son instrument de mesure.

### **II.8.2 Diagnostic par mesure des vibrations :**

Le signal de vibration détecté contient des informations de base sur l'état de la machine. L'analyse spectrale de ces signaux nous renseigne sur les différents défauts de l'origine de ces vibrations[29].

Les vibrations mécaniques peuvent être captées par des accéléromètres placés sur des roulements dans les directions axiale, verticale et radiale. Comparez le spectre du signal de vibration du moteur défectueux avec le spectre de référence enregistré lorsque le moteur est en bon état. Cette méthode permet de détecter les défaillances électriques et mécaniques, car la force magnétomotrice contient l'influence de l'asymétrie du stator ou du rotor, et la perméabilité dépend du changement de l'entrefer (en raison de l'excentricité des ouvertures du stator, du rotor et du rotor). Cependant, le coût élevé des capteurs de vibrations et les difficultés rencontrées pour connecter ces capteurs (problèmes d'accessibilité) représentent les limites et les lacunes de cette méthode[31].

### **II.8.3 Diagnostic chimique [29]:**

Plusieurs moteurs sont refroidis par air ou en circuit fermé avec des échangeurs de chaleur refroidis par eau. Une isolation électrique diminuée dans le moteur produira du monoxyde de carbone, qui apparaîtra dans le circuit d'air de refroidissement et peut être détecté par la technologie d'absorption infrarouge.

L'air est aspiré du moteur à travers le tube vers le détecteur infrarouge par une pompe auxiliaire. Seuls les moteurs en marche sont échantillonnés et la forme de l'air de chaque moteur est analysée pendant deux minutes.

L'huile de roulement est également analysée régulièrement, et s'il y a des produits qui indiquent une dégradation, une intervention est nécessaire.

À ce stade, on peut conclure que la plupart des technologies ci-dessus nécessitent l'utilisation de capteurs, qui doivent être placés sur la machine. C'est pourquoi ils ne peuvent être utilisés que dans des machines de grande puissance.

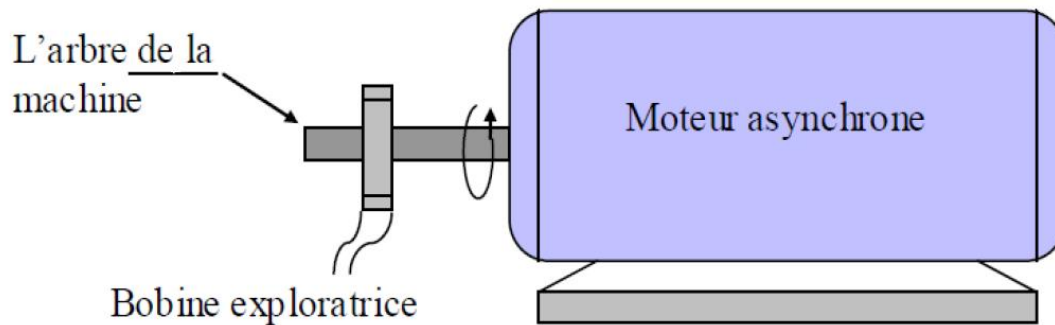
### **II.8.4 Techniques magnétiques et électriques :**

#### **II.8.4.1 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite :**

L'existence de tout défaut provoquera un déséquilibre électromagnétique dans le stator et le rotor, ce qui affectera la distribution du champ magnétique à l'intérieur et à l'extérieur du moteur. Certains auteurs ont étudié le développement de l'écoulement axial. En fait, si nous plaçons une bobine sur l'arbre de la machine, elle deviendra la source de la force électromotrice induite. Le contenu spectral de la tension induite peut être utilisé pour détecter divers défauts de stator ou de rotor [31].

L'analyse spectrale de la tension induite peut être utilisée pour identifier différentes asymétries et défauts. Le contenu harmonique des courants de fuite axiaux du stator et du rotor est directement lié aux harmoniques contenues respectivement dans les courants du stator et du rotor.

La conséquence directe de la défaillance est une augmentation du flux de fuite axial. L'augmentation du débit est une condition nécessaire pour l'utilisation du débit de fuite axial comme technique de diagnostic, c'est-à-dire qu'elle doit avoir une valeur importante.



**Figure II.4:** Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial [29].

#### **II.8.4.2 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites [31].**

En 1999, J. Milimonfared a proposé une autre technique pour détecter les pannes de rotor dans les moteurs asynchrones. Cette technologie est basée sur l'utilisation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux magnétique rotorique dans l'enroulement statorique lors de la déconnexion du moteur électrique du réseau. La déconnexion de la tige affectera directement la tension induite dans l'enroulement du stator. Cependant, dans le cas des moteurs appartenant à la chaîne de production, l'application de cette technologie est impossible.

#### **II.8.4.3 Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique [31]**

Le couple électromagnétique généré dans le moteur provient de l'interaction entre le champ magnétique du stator et le champ magnétique du rotor. Par conséquent, tout défaut du stator ou du rotor affectera directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signal fournit des informations pertinentes sur l'état du moteur. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour obtenir cette quantité représente le principal inconvénient de cette méthode.

### **II.9 Analyse spectrale**

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les court-circuit dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux

phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

### **II.9.1 Méthodes de traitement des signaux**

#### **II.9.1.1 Méthode de prony**

##### **II.9.1.1.1 Historique et définition**

cette méthode s'est avérée être une technique viable pour modéliser une somme linéaire d'exponentielles complexes amorties en signaux qui sont uniformément échantillonnés. L'analyse Prony a été développée par Gaspard Riche, Baron de Prony en 1795 afin d'expliquer l'expansion de divers gaz (de Prony 1795, Hildebrand 1974 et Marple 1987) L'analyse Prony est une méthode de prédiction linéaire pour modéliser un ensemble de données échantillonnées uniformément sous la forme d'une combinaison linéaire de fonctions exponentielles amorties. L'application typique de l'analyse Prony est l'analyse paramétrique des signaux transitoires initiés par des perturbations dans les circuits électriques [33]. Il est également largement utilisé dans le domaine biomédical science [34], génie environnemental [32], radar [35], sonar [36], détection géophysique et traitement de la parole [37]. Il présente les principales caractéristiques suivantes.

##### **II.9.1.1.2 Propriétés**

La méthode présente les principales caractéristiques suivantes :

- L'analyse Prony est paramétrique.
- Prony Analysis nécessite des données de signal échantillonnées de manière uniforme.
- L'analyse Prony ajuste les données du signal à un modèle représenté comme une somme de fonctions exponentielles amorties.
- Prony the Analysis est capable de travailler avec des fenêtres de données nettement plus courtes pour maintenir une résolution haute fréquence.
- Prony l'analyse a généralement une plus grande précision dans l'estimation des valeurs de fréquence.
- L'analyse Prony n'a pas le problème de la fuite spectrale, du phénomène.

**II.9.1.1.3 L'analyse**

Dans cette méthode le signal est supposé être constitué d'une somme d'exponentielles comme montré (II.1). Chaque terme dans (II.1) a quatre éléments : l'amplitude  $A_n$ , le facteur d'amortissement  $\sigma_n$ , la fréquence  $f_n$  et l'angle de phase  $\theta_n$ . Chaque composante exponentielle avec une différente fréquence est vue comme un mode unique du signal original  $y(t)$ . Les quatre éléments de chaque mode peuvent être identifiés de la représentation de l'espace d'état d'un enregistrement de données également prélevé. L'intervalle de temps entre chaque échantillon est  $T$ .

$$y(t) = \sum_{n=1}^N A_n e^{\sigma_n t} \cos(2\pi f_n t + \theta_n) \tag{II.1}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, N$$

En Utilisant le théorème d'Euler et laissant  $t = MT$ , les échantillons de  $y(t)$  sont :

$$y_M = \sum_{n=1}^N B_n \lambda_n^M \tag{II.2}$$

$$B_n = \frac{A_n}{2} e^{j\theta_n} \tag{II.3}$$

$$\lambda_n = e^{(\sigma_n + j2\pi f_n)T} \tag{II.4}$$

L'analyse de Prony se compose de trois étapes. Dans la première étape, on calcule les coefficients d'un modèle de prédication linéaire. Le modèle linéaire d'affirmation (LPM) de l'ordre  $N$  montré en (II.5), est établi pour s'adapter à l'enregistrement de données également prélevé de  $y(t)$  avec la longueur  $M$ . Généralement la longueur  $M$  devrait être au moins trois fois plus grande que l'ordre  $N$ .

$$y_M = a_1 y_{M-1} + a_2 y_{M-2} + \dots + a_N y_{M-N} \tag{II.5}$$

L'estimation des  $a_n$  les coefficients de LPM est essentielle pour le calcul de la fréquence, l'amortissement, l'amplitude et l'angle de phase d'un signal. Pour estimer ces coefficients exactement, beaucoup d'algorithmes peuvent être employés. Une représentation matricielle du signal à des instants d'échantillonnage différents peut être formée en écrivant séquentiellement la prévision linéaire du  $y_M$  répétitivement. En inversant la représentation matricielle, les coefficients linéaires  $a_n$  peuvent être dérivés de (II.6) Un algorithme, qui utilise une décomposition en valeurs singulières de la matrice d'inversion pour dériver les coefficients de LPM, est appelé algorithme SVD.

$$\begin{bmatrix} y_N \\ y_{N+1} \\ \vdots \\ y_{M-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{N-1} & y_{N-2} & \cdots & y_0 \\ y_N & y_{N-1} & \cdots & y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{M-2} & y_{M-3} & & y_{M-N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Dans la seconde étape, les racines  $\lambda_n$  du polynôme caractéristique représentées par (II.7) associé à la LPM de la première étape sont dérivées. Le facteur d'amortissement  $\sigma_n$ , et la fréquence  $f_n$  sont calculés à partir de la racine  $\lambda_n$  selon (II.4).

$$\lambda^N - a_1\lambda^{N-1} - \cdots - a_N\lambda - a_N = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \dots (\lambda - \lambda_n) \dots (\lambda - \lambda_N) \quad (\text{II.7})$$

Dans la dernière étape, les amplitudes et les angles de phase du signal sont résolus par la méthode des moindres carrés. Selon (II.2), l'équation (II.8) est construite en utilisant les racines résolues  $\lambda_n$ .

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\varphi} \mathbf{B} \quad (\text{II.8})$$

$$\mathbf{y} = [y_0 \quad y_1 \quad \dots \quad y_{M-1}]^T \quad (\text{II.9})$$

$$\boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_1^{M-1} & \lambda_2^{M-1} & \dots & \lambda_N^{M-1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$\mathbf{B} = [B_1 \quad B_2 \quad \dots \quad B_N]^T \quad (\text{II.11})$$

L'amplitude  $A_n$  et l'angle de phase  $\theta_n$  ;sont ainsi calculés à partir des variables  $B_n$  selon (II.3). Le plus grand avantage de l'analyse de Prony est sa capacité d'identifier le facteur d'amortissement de chaque mode dans le signal. Grâce à cet avantage, les harmoniques transitoires peuvent être identifiés avec précision.

## II.10 Conclusion

Dans ce chapitre sont rappelées quelques notions de base qui se rapportent à les méthodes de diagnostic les plus utilisées dans le monde industrielle. Cette étude nous a permit de mieux comprendre le fonctionnement de la machine asynchrone saine et défectueuse, par la suite, la connaissance de la relation cause à effet de chaque défaut.

Parmi les méthodes de diagnostic les plus importantes dont nous disposons est l'Analyse spectrale, dans laquelle nous trouvons à leur tour de nombreuses méthodes, y compris la méthode de prony.

Cette méthode permet une estimation précise de l'amplitude, de la constante de temps, de la phase et de la répétabilité des composantes des transitoires des signaux simulés et mesurés. Des valeurs particulièrement mesurées et fortes ont démontré l'applicabilité de la méthode Prony dans des applications réelles.



*Chapitre 3*

*Application de la méthode de  
prony au diagnostic des défauts  
rotoriques dans la MAS*

### III.1. Introduction

Le diagnostic se base essentiellement sur l'analyse spectrale des différents signaux tels que : les courants statoriques, le couple, les vibrations, les flux de fuites, la vitesse, la puissance, etc. qui sont les approches les plus utilisées pour détecter les défauts mécaniques ou électriques dans les MI. Le rôle de la technique de l'analyse spectrale est de découvrir la signature spécifique de chaque type de défaut. En diagnostic, il est indispensable de comprendre comment les signatures des différents défauts se manifestent-elles ? : qui peut être une apparition de nouvelles composantes spectrales (signature propre de défaut) ou seulement une modification des amplitudes des composantes spectrales déjà existantes. C'est pourquoi, il faut avoir une bonne connaissance sur les différents harmoniques qui apparaissent dans le spectre en régime normal ou en état de défaillance.

Ce chapitre porte sur l'application de la méthode de PRONY la méthodologie de cette méthode en détaille dans le chapitre 2.

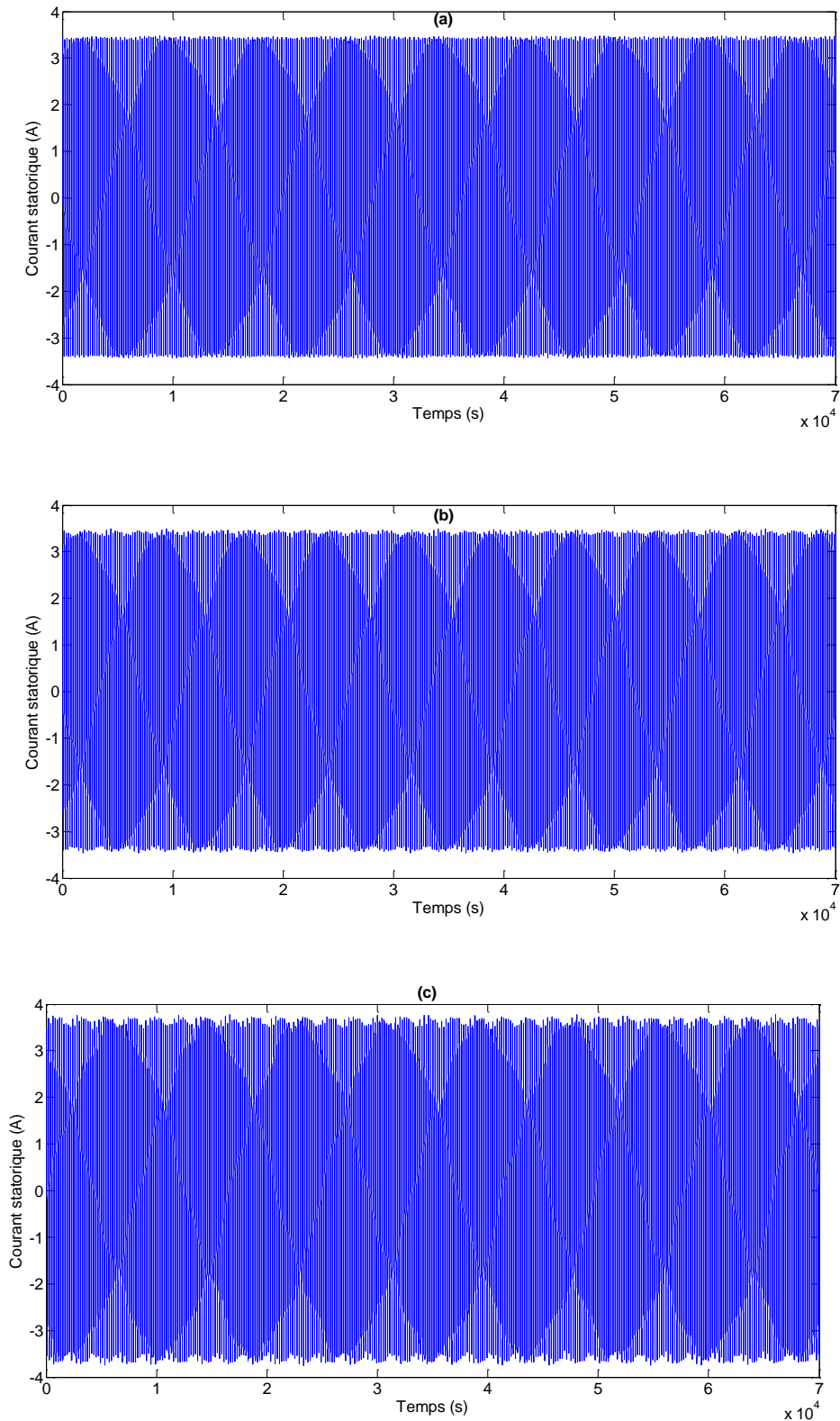
### III.2 Description du banc d'essai

Les données du banc d'essai utilisées dans cette mémoire sont celles du laboratoire d'informatique et d'automatique pour les systèmes, Poitiers. Le banc est composé d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil. Ce moteur est caractérisé par :

- La fréquence d'alimentation : 50 Hz
- La tension nominale : 220 V
- Puissance nominale : 1.1 kw
- Le nombre de paires de pôles :  $p = 1$
- Nombre de barres rotoriques  $N_r = 16$
- Nombre de spires en série par phase  $N_s = 160$

### III.3 présentations de différents signaux relevés

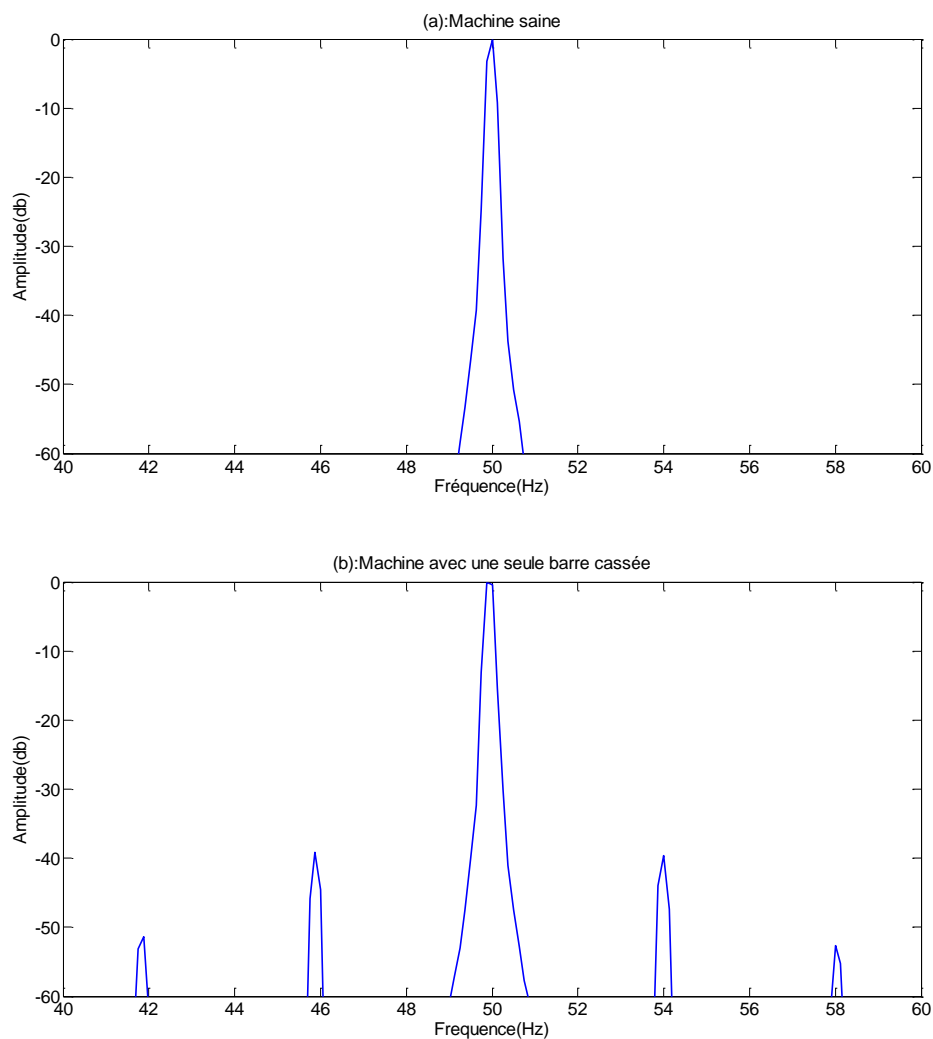
La figure 3.1 illustre l'affectation temporelle des courants statorique, dans le cas du défaut rotor avec une barre cassée et deux barres cassées par rapport à l'état sain de moteur avec fonctionnement en charge (100%)

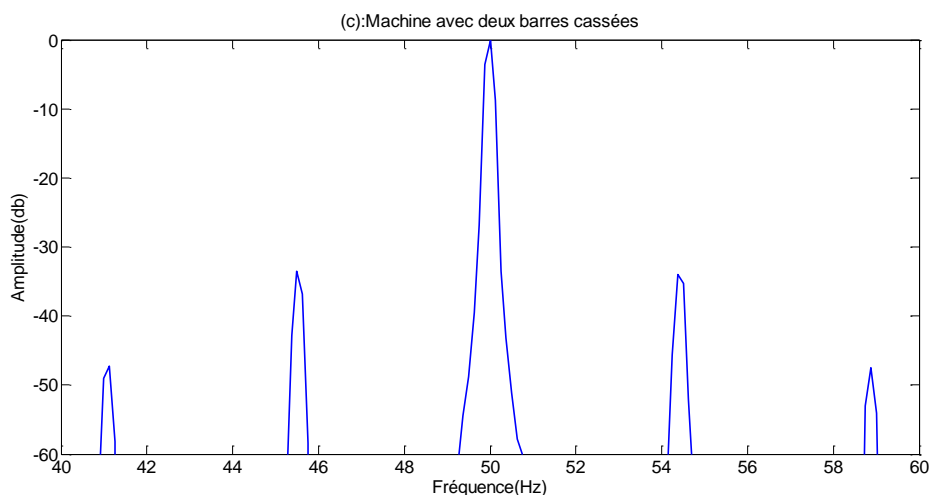


**Fig.III.1.** Evolution des courants statoriques pour un fonctionnement sain (a), pour un fonctionnement avec défaut de barre cassée (b) et pour un fonctionnement avec défaut de deux barres cassées (c)

### III.4 Analyse du courant statorique par la FFT

On considère que la machine avec une charge nominale (100%). L'analyse spectrale par la FFT est effectuée sur le courant statorique pour un rotor sain et avec défaut des barres cassées, avec un fenêtrage de type "Hanning", l'acquisition s'est effectuée à une période d'échantillonnage de  $10^{-4}$  sur une durée totale de 20s. Ces résultats sont représentés sur la figure (3.2).





**Fig.III.2.** Spectre du courant statorique pour une machine en régime sain et avec défaut rotorique.

En fonctionnement sain de la machine, on observe aucune raie latérale autour du fondamentale à 50 Hz (figure 3.2a), qui représente le contenu spectral du courant statorique en régime permanent. En fonctionnement avec défaut d'une et deux barres cassées (figures 2.3b et 3.2c), il y a une apparition des raies latérales au voisinage du fondamental correspondant aux raies de défaut. On constate l'apparition de raies en symétrie autour de la fréquence fondamentale. La différenciation entre une et deux barres cassées ne semble pas évidente même si l'amplitude des raies augmente avec celle du défaut.

### III.5 Analyse spectrale de l'enveloppe du courant statorique

L'analyse spectrale de l'enveloppe du courant statorique permet de déterminer l'état de fonctionnement de la machine asynchrone soit sain ou en défaut en utilisant l'analyse des signaux accessible de la machine.

Son principe est basé sur l'utilisation de la transformée d'Hilbert qui est une technique plus connue dans le domaine du traitement de signal.

La transformée d'Hilbert dans le domaine temporel correspond à un déphasage de valeur  $\pi/2$  de tous les termes de la transformée de Fourier. Elle permet de changer les termes cosinus en termes sinus et les termes sinus en termes cosinus négatifs.

La transformée d'Hilbert d'un signal  $y(t)$  peut s'écrire sous la forme:

$$y(t) \xrightarrow{TH} \tilde{y}(t) = \tilde{y}_{\text{Re}}(t) + j\tilde{y}_{\text{Im}}(t) \quad (3.1)$$

Où  $\tilde{y}_{\text{Im}}(t)$  représente la transformée d'Hilbert du signal  $\tilde{y}_{\text{Re}}(t)$ . Le signal  $\tilde{y}(t)$  est appelé signal analytique.

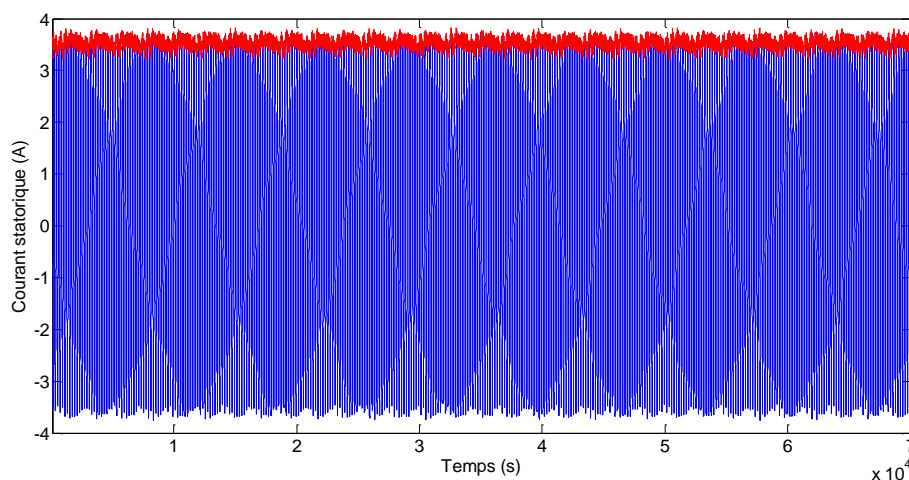
La modulation d'amplitude  $A(t)$  du signal temporel  $y(t)$  se calcule en utilisant l'équation (3.2):

$$A(t) = \sqrt{\tilde{y}_{\text{Re}}(t)^2 + \tilde{y}_{\text{Im}}(t)^2} \quad (3.2)$$

La modulation de phase  $\varphi(t)$  se calcule par:

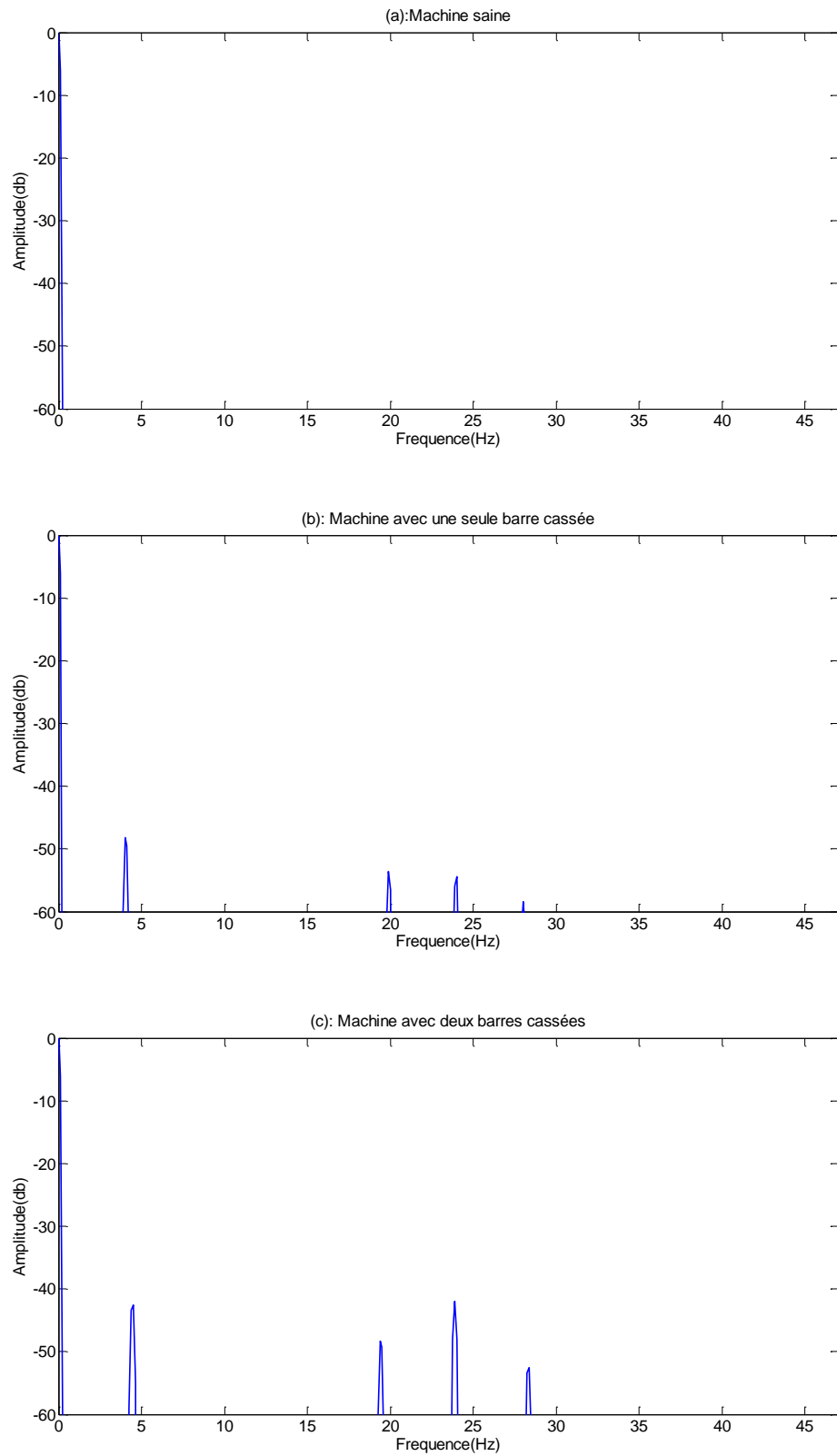
$$\varphi(t) = \arctan \frac{\tilde{y}_{\text{Im}}(t)}{\tilde{y}_{\text{Re}}(t)} \quad (3.3)$$

Le calcul du module de  $\tilde{y}(t)$  donne l'enveloppe du signal  $y(t)$  et le calcul de sa phase nous donne sa modulation de phase ainsi que sa modulation de fréquence en fonction du temps. Nous présentons à la figure (3.3) le courant statorique et son enveloppe pour un défaut de deux barres cassées au rotor.



**Fig.III.3.** Courant statorique et son enveloppe pour un défaut de cassure de deux barres au rotor

La figure (III.4) représente le spectre de l'enveloppe du courant statorique. En fonctionnement sain de la machine, on n'observe aucune raie sur la plage des fréquences (figure III.4).

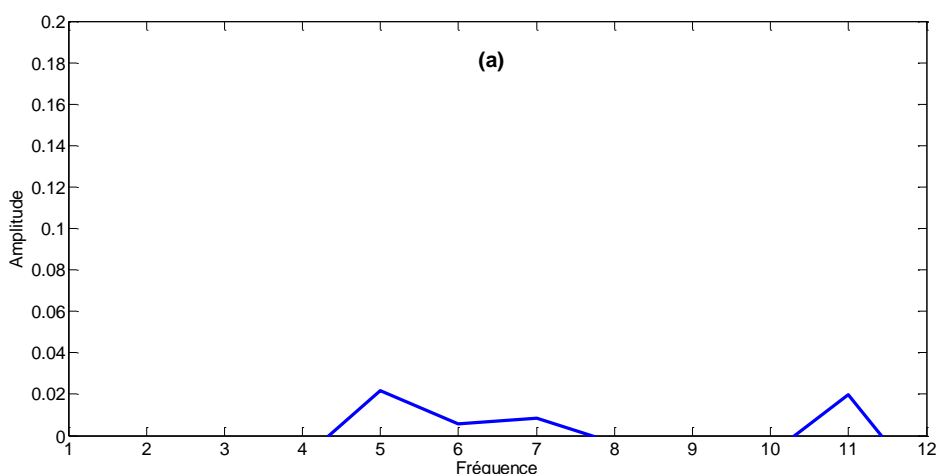


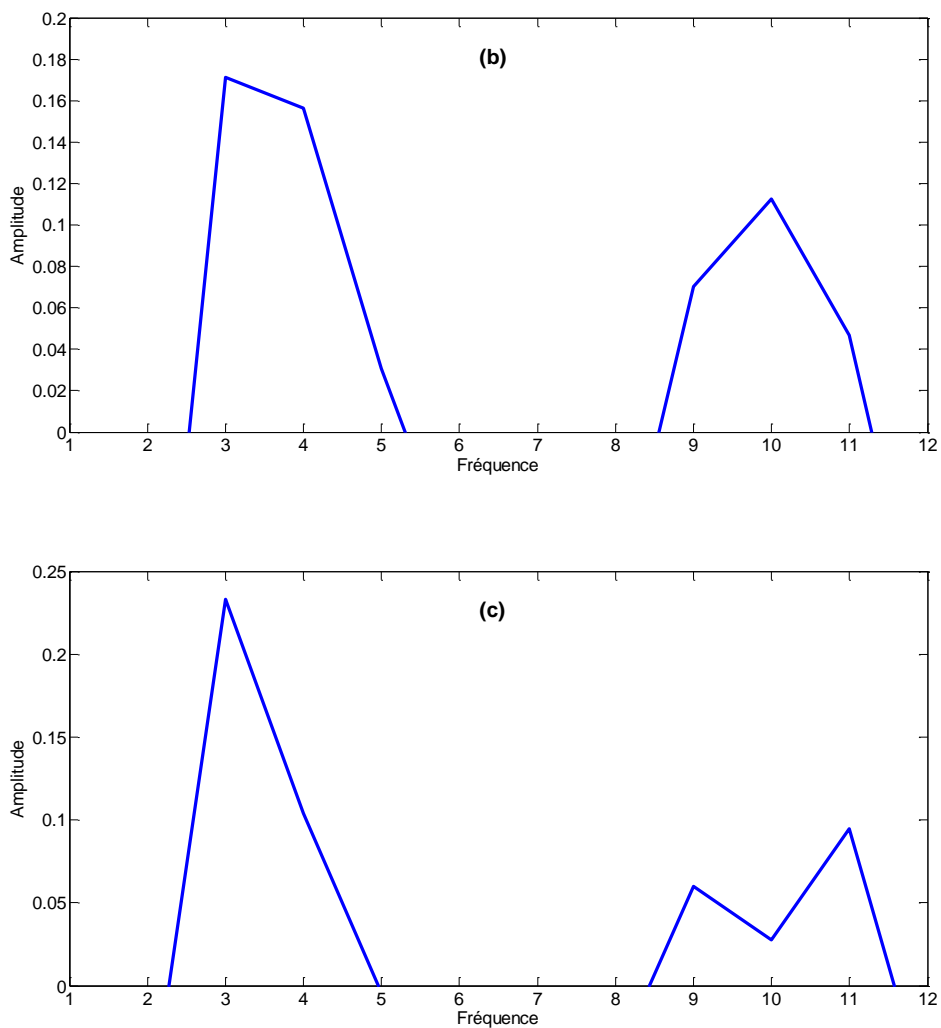
**Fig.III.4.** Spectre de l'enveloppe du courant statorique pour une machine en régime sain et avec défaut rotorique.

Les figures (3.4b) et (3.4c) illustrent le spectre de l'enveloppe du courant statorique pour un défaut d'une barre et deux barres rompues. On constate selon les deux figures (3.4a et 3.4b) la présence des harmoniques, ce qui donne un bon signe de l'existence du défaut de barres, le degré de sévérité est fonction des amplitudes des raies de défaut.

### III.6 Analyse du courant statorique par la méthode de PRONY

L'analyse spectrale du courant statorique pour une machine avec charge nominale est effectuée en utilisant la méthode de Prony. L'analyse fréquentielle des courants statorique reste la méthode la plus utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur des défauts qui apparaissent au sein d'une machine asynchrone. Ces paramètres fréquentiels sont répertoriés dans le tableau (3.3). Les résultats montrés dans les Figures (3.5a, 3.5b et 3.5c) indiquent que les fréquences des défauts (une seule barre cassée et deux barres cassées) peuvent toujours être distinguées par la méthode de Prony. On voit clairement l'apparition des harmoniques. Cela illustre, l'efficacité de cette méthode. Le degré de sévérité est fonction des amplitudes des harmoniques de défaut.





**Fig.III.5.** Spectre de courant statorique obtenu par la méthode de PRONY pour une machine en régime sain et avec défaut rotorique.

Paramètre dans le domaine fréquentiel	Equation
Fréquence moyenne	$x_{fm} = \frac{\sum_{k=1}^K s(k)}{K}$
Centre des fréquences	$x_{cf} = \frac{\sum_{k=1}^K f_k s(k)}{\sum_{k=1}^K s(k)}$
Fréquence efficace	$x_{feff} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K f_k^2 s(k)}{\sum_{k=1}^K s(k)}}$

**Tab.III.1** Paramètre statistiques extraits à partir des spectres fréquentiels de courants statorique.

### III.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié en utilisant un modèle de diagnostic, l'analyse spectrale du courant statorique avec les harmoniques de temps.

On utilise la transformer de Fourier rapide (FFT), la transformée d'Hilbert et la méthode de PRONY, ces approches nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la rupture d'une ou deux barres de la cage rotorique de la machine asynchrone.

D'après les résultats de la simulation nous avons trouvé que les harmoniques de temps, augmentent avec le nombre de barres cassées.

Les résultats obtenus par ces méthodes on été jugés satisfaisants comparativement à ce qui a été trouvé jusqu'a nos jours par validation.

## *Conclusion générale*

Ce travail a porté sur le diagnostic et la détection de défauts rotorique (cassure de barre) de la machine asynchrone. Au début de ce travail, nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone à cage, ainsi que ses origines. Puis, nous avons présenté un état de l'art des différentes techniques de surveillance des machines asynchrones. Nous avons ensuite présenté, dans le deuxième chapitre ont consacrés aux types et les différent technique et méthodes de diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil et nous avons parlé sur la méthode de prony.

Dans le troisième chapitre, nous avons traité quelques techniques utiliser récemment dans le diagnostic, On utilise la transformer de Fourier rapide (FFT), la transformée d'Hilbert et la méthode de PRONY, ces approches nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la rupture d'une ou deux barres de la cage rotorique de la machine asynchrone. Nous avons trouvé que l'amplitude de ces raies augmente avec le nombre de barres cassées. Ceci, donne une indication sur la sévérité du défaut.

A la fin de ce travail, on a fait l'état d'une méthode permettant la surveillance d'une machine asynchrone triphasée lorsqu'un défaut apparaît. Pour cette surveillance, nous avons développé un modèle de la machine qui permet d'étudier les phénomènes répercutés sur les performances de la machine D'après les résultats de la simulation nous avons trouvé que les harmoniques de temps, augmentent avec le nombre de barres. Les résultats obtenus par ces méthodes on été jugés satisfaisants comparativement à ce qui a été trouvé jusqu'a nos jours par validation.

## **Bibliographie**

- [1] s. ergin, a. uzuntas, m. bilginer gulmezoglu, detection of stator, bearing and rotor faults in induction motors, sci verse science direct, procidia engineering 30, (2012) ,p. 1103-109.
- [2] w. zhou, t. g. habetler , r. g. harley, et l. bin, incipient bearing fault detection via stator current noise cancellation using wiener filter, iee int. symp. On diagnostics for electric machines, power electronics and drives,(2007),p. 11-16.
- [3] b. k. aravindh, g. saranya, r. selvakumar, r. s. swetha, m. saranya, e. p. sumesh, fault detection in induction motor using wpt and multiple svm, int. journal of control and automation, (2010). 3(2): p. 9-20.
- [4] p. vas. parameter estimation, condition monitoring and diagnostic of electrical machines. clarendon press, oxford 1993.
- [5] b. yazici, g.b. kliman, w.j. premerlani, r.a. roegl, g.b. robinson and a. abdel- malek. an adaptive on-line statistical method for fault detection using stator current. iee-ias, pp.213-220, new orleans, la, 1977.
- [6] h. razik. le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de défaillance, état de l'art. la revue 3ei n°29, pp. 48-52, juin 2002.
- [7] i. boldea, s. a. nasar. « the induction machine handbook », crc press llc, chapter 1, 2002.
- [8] g. didier. « modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances », thèse de doctorat en génie électrique, université henri poincaré, nancy i. oct 2004
- [9] s. a. al kazzaz sa'ad, g.k.singh. « experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques », electric power systems research 65, pp 179-221, 2003
- [10] m. e. h. benbouzid, g. b. kliman. « what stator current processing based technique to

- use for induction motor rotor faults diagnosis? », *iee, transaction on energy conversion*, vol 18 n°2, pp 238-244, jun 2003.
- [11] m. e. h. benbouzid, m. vieira, c. theys. « induction motors faults detection and localisation using stator current advanced signal processing techniques », *iee, transaction on power electronics*, vol 14 n°1, pp 14-22, jan 1999
- [12] m. e. h. benbouzid. « a review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection », *iee transactions on industrial electronics*, pp1950-1955, 1998.
- [13] t. boumegoura. « recherche de signature electromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic », thèse de doctorat, école doctorale électronique, électrotechnique, automatique de lyon, mars 2001
- [14] r. abdelli. « perturbations singulières appliquées au modèle de machine asynchrone avec défauts au stator et au rotor ». thèse de magister, département de génie électrique, école nationale polytechnique, juillet 2007.
- [15] touhami omar, noureddine lahcène, ibtiouen rachid, fadel maurice. « modeling of the induction machine for the diagnosis of rotor defects. part. i: an approach of magnetically coupled multiple circuits ». *iee-iecon'05, industrial electronics society*, pp.1580-1587, 2005.
- [16] e. ritche, t. jokinen. « dynamic model of three-phase squirrel cage induction motors with rotor faults ». *international conference on electrical machines* , vol. 2, 1994
- [17][https://fr.wikipedia.org/wiki/diagnostic\\_\(mat%C3%A9riel\)#:~:text=le%20diagnostic%20d'un%20syst%C3%A8me,par%20observation%2c%20contr%C3%B4les%20et%20ests](https://fr.wikipedia.org/wiki/diagnostic_(mat%C3%A9riel)#:~:text=le%20diagnostic%20d'un%20syst%C3%A8me,par%20observation%2c%20contr%C3%B4les%20et%20ests).
- [18 ] janos gertler, “fault detection and diagnosis in engineering systems : basic concepts with simple examples”, marcel dekker inc., new york, may 1998.

- [19 ] peter tavner et al., “condition monitoring of rotating electrical machines”, the institution of engineering and technology iet, london, united kingdom, 2008
- [20] khenfer riad « détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques » thèse de docteur en sciences université ferhat abbes - setif-1.le 05 mars 2015.
- [21] h. hacene, “identification et surveillance de processus dynamiques complexes par logique floue. application à un échangeur de chaleur.” université m’hamed bougara de boumerdès, 2007.
- [22] d. berdjag, “méthodes algébriques pour la décomposition de modèles comportementaux: application à la détection et à la localisation de défaillances.” université des sciences et technologie de lille-lille i, 2007.
- [23] r. fellouah, “contribution au diagnostic de pannes pour les systèmes différentiellement plats.” insa de toulouse, 2007.
- [24] f. castang, “synthèse robuste de filtres de diagnostic pour la surveillance à base de modèle des systèmes multivariables et incertains.” bordeaux 1, 2003
- [25] c. christophe, “surveillance des systèmes non linéaires: application aux machines électriques.” 2001.
- [26] r. j. patton, “fault detection and diagnosis in aerospace systems using analytical redundancy,” *comput. control eng. j.*, vol. 2, no. 3, pp. 127–136, 1991
- [27] belhamdi saad “prise en compte défaut rotorique dans la commande d'un moteur asynchrone “thèse de magister, université mohamed khider biskra, soutenue 2005.
- [28] bui. viet. phuong “diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magétique de fuite application à l'analyse de fromages rotoriques d'un alternateur à vide », thèse de doctorat 2007, institut polytechnique nationale de grenoble

(france).

- [29] khatraoui abderrezak, zaid mansour «diagnostic des machines asynchrones triphasées», thèse de master academique , universite echahid hamma lakhdar d'el-oued soutenu en mai 2017.
- [30] mr harir miloud «etude des défauts dans la machine asynchrone à cage d'ecureuil par l'emploi de la fonction d'enroulement modifiée » thèse de magister en electrotechnique option : commande electrique université des sciences et de la technologie d'oran mohamed boudiaf 2008/2009.
- [31] benedjai soumaya «contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction», thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de : doctorat universite badji mokhtar annaba, année : 2015/2016
- [32] s. singh, application of prony analysis to characterize pulsed corona reac-tor measurements, master's thesis, dept. elec. comp. eng., university of wyoming aug. 2003.
- [33] r. zivanovic, p. schegner, o. seifert, and g. pilz, identification of the resonant-grounded system parameters by evaluating fault measurement records, iee trans. power delivery, vol. 19, pp. 1085 1090, july 2004.
- [34] hp sava and jte mcdonnell, modified forward-backward over-determined prony method and its application in modeling heart sounds,iee trans. vision, image and signal processing, vol. 142, pp. 375 380,dec. 1995.
- [35] cw chuang and dl moffatt, natural resonances of radar targets via prony's method and target discrimination, iee trans. aerospace and elec- tronic systems, vol. aes-12, pp. 583 589, sept. 1976.
- [36] r. walker, a. ashley, and p. kavanagh, noise normalization of broadband sonar data in bearing space, in iee int. conf. on acoustics, speech and signal processing,

- icassp'83, vol. 8, pp. 375 378, apr. 1983.
- [37] m. wax and t. kailath, detection of signals by information theoretic criteria, *iee* trans. acoustics speech and signal processing, vol. 33, pp. 387392, apr. 1985.
- [38] li qi, lewei qian, stephen woodruff, and david cartes .prony analysis for power system transient harmonics.the center for advanced power systems, florida state university,tallahassee, fl32310, usa received 9 august 2006; revised 15 december 2006; accepted 18 december 2006 recommended by irene y. h. gu
- [39] c. abdelghani. «identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic », thèse de doctorat en génie électrique, electrotechnique université mohamed bou dhyaf , oran 26/02/2017
- [40] bouzida ahcene «diagnostic de defauts de la machine asynchrone a cage par la technique des ondelettes», thèse de magister en génie électrique, laboratoire de recherche en electrotechnique, ecole nationale polytechnique d'alger 20 janvier 2008.

# *Résumé*

## Abstract

The work presented in this dissertation falls within the framework of the diagnosis of rotor faults in three-phase squirrel-cage asynchronous motors by focusing on rotor faults, using signal spectroscopy using methods based on the stator current spectroscopy with temporal harmonics such as the method of Prony and FFT, Hilbert.

Obviously, it is impossible to simultaneously determine all the faults and all the possibilities of their occurrence. For that we have studied the faults which can occur in particular in the rotor. Using the above methods, we have experimented with an analysis of the evolution of the stator currents for a healthy operation and with a broken bar and two broken bars.

The results revealed the effectiveness of the methods used for diagnosis and showed us data indicating the rotor faults of the asynchronous motor.

**Key words:** Squirrel cage induction machine, Rotor defect, diagnosis, surveillance, detection, Multi-winding model.

## Résumé

Les travaux présentés dans cette mémoire s'inscrivent dans le cadre du diagnostic des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil en se focalisant sur les défauts rotoriques, en utilisant la spectroscopie du signal à l'aide de méthodes basées sur la spectroscopie de courant statorique avec harmoniques temporelles comme la méthode de Prony et FFT, Hilbert.

Evidemment, il est impossible de déterminer simultanément tous les défauts et toutes les possibilités de leur apparition. Pour cela nous avons étudié les défauts qui peuvent survenir notamment dans le rotor, En utilisant les méthodes ci-dessus, nous avons expérimenté une analyse de l'évolution des courants statoriques pour un fonctionnement sain et avec une barre cassée et deux barres cassées.

Les résultats ont révélé l'efficacité des méthodes utilisées pour le diagnostic et nous ont montré des données indiquant les défauts du rotor du moteur asynchrone.

**Mots clés :** Machine asynchrone triphasée à cage, Défaut rotorique, , diagnostic, surveillance ,détection ,Modèle multi-enroulement.