



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 les ondelettes**

Réalisé par : - bouzekri abdelhakim  
- Arroussi Ammar

Dirigé par : Dr. Bessam besma

*Année universitaire 2019/2020*

## Remerciements

**Avant tout. Je tiens à remercier le ALLAH, qui m'a donné le courage et la patience pour arriver au bout de mes études.**

A travers ce modeste travail, je remercie mon encadreur Dr : Bessam Besma, pour leur encadrement pendant celui-ci.

Pour l'intéressante documentation qu'ils ont mise à ma disposition, pour leurs conseils précieux durant cette étude et réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements les plus vifs s'adressent aussi à monsieur le président et les membres du jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

J'exprime également ma gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à ma formation.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

---

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents que je remercie énormément  
pour leur soutien, amour, patience et  
sacrifice. Que dieu vous protège.*

*A ma grande mère.*

*A mes frère.*

*A ma soeurs*

*A mes amis mabrook.m ,oussam.,  
gholam,chaybe,ammar,sami,halim,moussa ,abd  
arrahim,basta,toufik,sif*

*À tous mes camarades*

*A toute ma famille cousins, cousines, tantes et  
oncles....*

## Liste des symboles

MAS : moteur asynchrone

$g$  : Glissement.

$p$  : Nombre de paires de pôles de la machine.

$N_r$  : Nombre de barres rotoriques.

$m$  : Nombre de phases statorique.

$U_0$  : Perméabilité magnétique de l'entrefer.

$l$  : Longueur du rotor.

$r$  : Rayon moyen de l'entrefer.

$\lambda$  : Permittivité de l'entrefer.

$N_s$  : Nombre de spires par phase statorique.

$g_e$  : Epaisseur de l'entrefer.

$j_t$  : Moment d'inertie de la machine.

$f_v$  : Coefficient de frottement visqueux.

$kd$  : 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.

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

$l_{m_{s_i s_i}}$  : Inductance de magnétisation des enroulements statoriques.

$M_{s_i s_j}$  : Mutuelle inductance entre deux phases statoriques  $i$  et  $j$ .

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

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

$L_{kk}$  : Inductance propre de chaque maille rotorique.

$L_{ki}$  : Inductance mutuelle entre la ( $K^{\text{ème}}$ )<sup>e</sup> maille et la ( $i^{\text{ème}}$ )<sup>e</sup> maille du rotor.

$L_{ai}$  : Inductance mutuelle entre la phase statorique  $a$  et la ( $i^{\text{ème}}$ )<sup>e</sup> maille rotorique.

$L_{f_{s_i s_i}}$  : Inductance de fuite statorique.:

$L_{fbk}$  : Inductance de fuite de la barre  $k$ .  
 $L_{mb}$  : Inductance de magnétisation rotorique.  
 $[M_{sr}]$  : Matrice des mutuelles inductances stator rotor.  
 $f$  : Fréquence électrique des grandeurs statoriques (fréquence du réseau).  
 $f_r$  : Fréquence électrique des grandeurs rotoriques.  
 $\theta$  : Position du rotor par rapport au stator.  
 $\theta_s$  : Angle électrique statorique.  
 $\theta_r$  : Angle électrique rotorique.  
 $\varphi$  : Position angulaire le long de la surface intérieure du stator.  
 $\alpha_r$  : Angle entre deux phases rotoriques.  
 $\omega_s$  : 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.  
 $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Tensions aux bornes des phases a. b. c respectivement.  
 $[V_r]$  : Vecteur tension rotorique.  
 $[I_s]$  : Vecteur courant statorique.  
 $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Courants qui parcourent les enroulements a. b. c respectivement.  
 $[I_r]$  : Vecteur courant rotorique.  
 $ibk$  : Courant traversant la ( $K^{eme}$ ) 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.  
 $\phi_{r1} \ \phi_{rNr}$  : Flux rotoriques dans les mailles du rotor.  
 $g^{-1}$  : Fonction inverse de l'entrefer.  
 $N_i$  : Fonction de l'enroulement  $i$ .  
 $w_{c0}$  : Co-énergie magnétique.  
 $Cem$  : Couple électromagnétique.  
 $Cr$  : Couple de charge.

**Grandeurs liés à l'application de la théorie des ondelettes :**

$L^2(\mathbb{R})$  : Espace vectoriel des fonctions mesurables, carrées et intégrables dans l'axe des réels  $\mathbb{R}$ .

$\psi$  : Ondelette mère

$\varphi$  : Fonction d'échelle

$s$  : Paramètre d'échelle.

$u$  : Paramètre de translation.

$Wf(s,u)$  : transformée en ondelettes de la fonction  $f$ .

$c_\psi$  : Coefficient de l'ondelette mère  $\psi$ .

$\hat{f}(\omega)$  : Transformée de Fourier de la fonction  $f$ .

$\hat{\psi}$  : Transformée de Fourier de la fonction  $\psi$

$\eta$  : Centre des fréquence.

$\xi = \eta/s$  : Centre de fréquence délaté.

$CA$  : Coefficient ondelette d'approximation.

$CD$  : Coefficient ondelette de détail.

$A_i$  : Signal d'approximation au niveau  $i$ .

$D_i$  : signal de détail au niveau  $i$ .

$FTOD$  : Transformée en ondelettes discrète.

$E_j$  : valeur propre d'énergie.

$T$  : Vecteur des valeurs propres d'énergie.

$n_{lS}$  : niveau de décomposition.

# Liste des figures

<b>Figure. I.1</b> : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	3
<b>Figure I.2</b> : stator.....	3
<b>Figure I.3</b> : Rotor à cage d'écureuil .....	4
<b>Figure I.4</b> Rotor a bobiné.....	5
<b>Figure I.5</b> : Sources de défauts de la machine asynchrone à cage.....	6
<b>Figure I.6</b> : Principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes.....	7
<b>Figure I.7</b> : Quatre types de défauts dans les roulements à billes.....	8
<b>Figure I.8</b> : Dimensions d'un roulement billes.....	8
<b>Figure I.9</b> : Différents types de la dissymétrie de l'entrefer.....	11
<b>Figure I.10</b> : Excentricité statique (a) et dynamique.....	11
<b>Figure I.11</b> : Rotor à cage d'écureuil.....	13
<b>Figure I.12</b> : Rupture d'une barre et d'un anneau de court-circuit.....	13
<b>Figure I.13</b> : Rupture réelle des barres rotoriques.....	14
<b>Figure I.14</b> : Structure adoptée pour modéliser le stator.....	16
<b>Figure I.15</b> : Circuit équivalent d'un rotor à cage d'écureuil.....	17
<b>Figure. I.16</b> : La fonction définissant la $i^{\text{ème}}$ maille rotorique.....	20
<b>Figure I.17</b> : Circuit équivalent d'un rotor avec une barre cassée.....	27
<b>Figure I.18</b> : Circuit équivalent d'un rotor à cage avec deux barres cassées.....	28
<b>Figure I.19</b> : Circuit équivalent d'un rotor avec une portion d'anneau de court circuit cassée.....	30
<b>Figure II.1</b> : Méthode externe de diagnostic.....	33
<b>Figure II.2</b> : Méthode interne de diagnostic.....	34
<b>Figure II.3</b> : pavage de la transformée de fourrier à fenêtre glissante.....	38
<b>Figure II.4</b> : Les différentes méthodes de diagnostic.....	39
<b>Figure II.5</b> : Quelques formes des ondelettes usuelles.....	41
<b>Figure II.6</b> : Ondelette de Morlet.....	42
<b>Figure II.7</b> . Ondelettes de Meyer.....	42
<b>Figure II.8</b> : Ondelettes de Daubechies (dbN).....	43
<b>Figure II.9</b> : Propriétés d'une ondelette mère, contractée et dilatée.....	45

<b>Figure II.10:</b> Analyse temps-échelle.....	45
<b>Figure II.11:</b> Transformée en ondelette par multi résolution.....	47
<b>Figure II.12:</b> L'arbre de décomposition d'ondelette a trois niveaux .....	47
<b>Figure.III.1.</b> Evolution des courants statoriques pour un fonctionnement sain (a), pour un fonctionnement avec défaut de barres cassées (b) et pour un fonctionnement avec défaut de deux barres cassées (c).....	51
<b>Figure III.2.</b> détails obtenus par l'ondelette <i>db44</i> a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée,c) Machine avec deux barres cassées.....	54
<b>Figure III.3.</b> détails obtenus par l'ondelette <i>db24</i> .a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée,c) Machine avec deux barres cassées.....	55
<b>Figure III.4.</b> détails obtenus par l'ondelette <i>db6</i> a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée,c) Machine avec deux barres cassées.....	56
<b>Figure III.5.</b> Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence ( <i>db44</i> ).....	57
<b>Figure III.6.</b> Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence ( <i>db24</i> ).....	57
<b>Figure III.7.</b> Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence ( <i>db6</i> ).....	58



# Liste des Tableaux

<b>Tableau II.1:</b> Familles d'ondelettes.....	40
<b>Tableau II.2 :</b> Les propriétés principales des ondelettes.....	41
<b>Tableau II.3 :</b> L'étude comparative des différentes méthodes d'analyse vibratoires.	48
<b>Tableau III.1 :</b> Bandes de fréquences obtenues par la décomposition en multi niveau.....	53

---

---

**Sommaire**

Introduction générale.....	1
I.1.Présentation de la machine asynchrone : défauts et modélisations.....	
I.2. Généralités sur la machine asynchrone .....	2
I.2.1. Définition .....	2
I.2.2.Eléments de constitution de la machine asynchrone .....	2
I.2.2.1.Le stator.....	3
I.2.2.2 Le rotor.....	4
I.2.3. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone.....	5
I.2.4.Domaines.....	5
I.3. Les défaillances de la machine asynchrone.....	5
I.3.1.Défaillances d'ordre mécanique.....	7
I.3.1.1. Défaillances des roulements.....	8
I.3.1.2. Défaillances du flasque.....	10
I.3.1.3 Défaillances de l'arbre.....	10
I.3.1.4 Défauts d'excentricité.....	10
I.3.2. Défaillances d'ordre électrique.....	11
I.3.2.1. Défaillances des circuits électriques statoriques.....	12
I.3.2.2. Défaillances des circuits électriques rotoriques.....	12
I.4 Modèle de la machine en l'absence de défaillance.....	14
I.4.1 Hypothèses simplificatrices .....	15
I.4.2 Structure du stator .....	15
I.4.3 Structure du rotor.....	16
I.4.4 Equations différentielles associées.....	17
I.4.4.1 Equations électriques du stator .....	17
I.4.4.2 Equations électriques du rotor.....	21
I.4.4.3 Equations mécaniques de la machine.....	24
I.5 Modèle de la machine en présence de défaillances.....	25
I.5.1 Machine avec une seule barre cassée.....	26
I.5.2 Machine avec deux barres cassées adjacentes.....	28
I.5.3 Rupture d'une portion d'anneau de court circuit.....	29

Conclusion.....	31
II. Méthodologie de diagnostic des défauts par les ondelettes.....	
II.1. Introduction.....	32
II.2. Définition du diagnostic.....	32
II.3. Les méthodes de diagnostic.....	32
II.3.1. Les méthodes externes.....	32
II.3.2. Les méthodes internes.....	33
II.3.3. les méthodes inductives.....	35
II.3.4. Les méthodes déductives.....	35
II.4. Méthodes de diagnostic de défauts dans les machines électriques.....	35
II.4.1. Méthode de diagnostic avec modèle.....	36
II.4.2. Méthodes de diagnostic sans modèle.....	36
II.4.2.1. Techniques de traitement de signal utilisé dans le diagnostic.....	37
II.4.2.1.1. Transformée en Série de Fourier.....	37
II.4.2.1.2. Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG).....	37
II.5. La Transformée en Ondelette.....	39
II.5.1. Historique.....	39
II.5.2. Définition.....	40
II.5.3. La famille d'ondelettes.....	40
II.5.3.1 Ondelette de Morlet.....	41
II.5.3.2 Ondelettes de Meyer.....	42
II.5.3.3. Ondelettes de Daubechies.....	43
II.5.4. Choix de la meilleure ondelette.....	43
II.5.5. Principe La Transformée en ondelettes.....	44
II.5.6. Les types de la transformée en ondelette.....	45
II.5.6.1. La transformation en ondelette continue.....	45
II.5.6.2. La transformation en ondelette discrète.....	46
II.5.6.3. La multi-résolution.....	47
II.5.7. Avantages et inconvénients des ondelettes.....	48
CONCLUSION.....	49
III .Application d'ondelette au diagnostic des défauts rotoriques dans la MAS.....	
III.1. Introduction.....	50
III.2 description du banc d'essai.....	50
III.3 présentations de différents signaux relèves.....	50
III.4 analyse du courant statorique par la technique des ondelettes.....	52
III.4.1 Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelettes.....	52

III.4.2 Energie de la décomposition d'ondelette.....	56
III.5 CONCLUSION.....	58

## *Introduction générale*

Le diagnostic des défaillances des machines asynchrones s'est largement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient indispensable pour contribuer à obtenir un meilleur gain de productivité. Les chaînes de production doivent être dotées des systèmes de protections fiables car une quelconque défaillance, même la plus anodine, peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable sans oublier la perte de production et le coût non négligeable de réparation.

C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan international, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour objectif principal de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système. Il existe plusieurs procédures de diagnostic, le choix d'une approche est lié à la complexité et à la connaissance que l'on souhaite acquérir sur le système. Les ondelettes ont été utilisées avec succès dans le diagnostic de défauts des machines électriques à cause de l'analyse multi-échelle d'un signal par la dilatation et la translation. La transformée en ondelettes peut extraire des caractéristiques temps-fréquence d'un signal plus efficacement que les transformées de Fourier de courte durée (STFT).

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente d'une part l'étude des défauts rotorique dans la MAS, et d'autre part l'utilisation de la technique des ondelettes pour l'analyse et le diagnostic de ces défauts. Le diagnostic par la technique des ondelettes est effectué et validé par simulation dans l'environnement Matlab/Simulink.

Ce mémoire est scindé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, un rappel sur la constitution, la modélisation de la MAS.

Le deuxième chapitre on a parlé sur Méthodologie de diagnostic des défauts par les ondelettes

Le troisième chapitre consacré au Application d'ondelette (ondelette Daubechies) au diagnostic des défauts rotoriques dans la MAS

En fin ce travail est clôturé par une conclusion générale.

# *Chapitre 1*

*Présentation de la machine  
asynchrone : défauts et  
modélisations*

## **I.1.INTRODUCTION**

Les machines électrique ou machines tournantes sont des dispositifs électrique qui permettent de générer un mouvement ou une énergie mécanique a partir d'une énergie éeectrique et inversement .les machine électrique tournantes sont classée en trois catégories qui sont les machines a courant continu, les machine synchrone et les machine asynchrone. Le Choi de la machine est en relation direct avec le type d'application et de son environnement.

Depuis son invention et sa découverte par NICOLA TESLA, la machine asynchrone à attirer une attention particulière des industriels et elle est devenu l'actionneur le plus important parmi les machine tournantes de nos jours .Elle est caractérisée par sa simplicité de conception, de fabrication d'entretien, de robustesse et peut couteuse avec un excellent rendement [1].

Dans ce chapitre, nous présenterons généralité sur le moteur asynchrone (constitution, principe de fonctionnement)

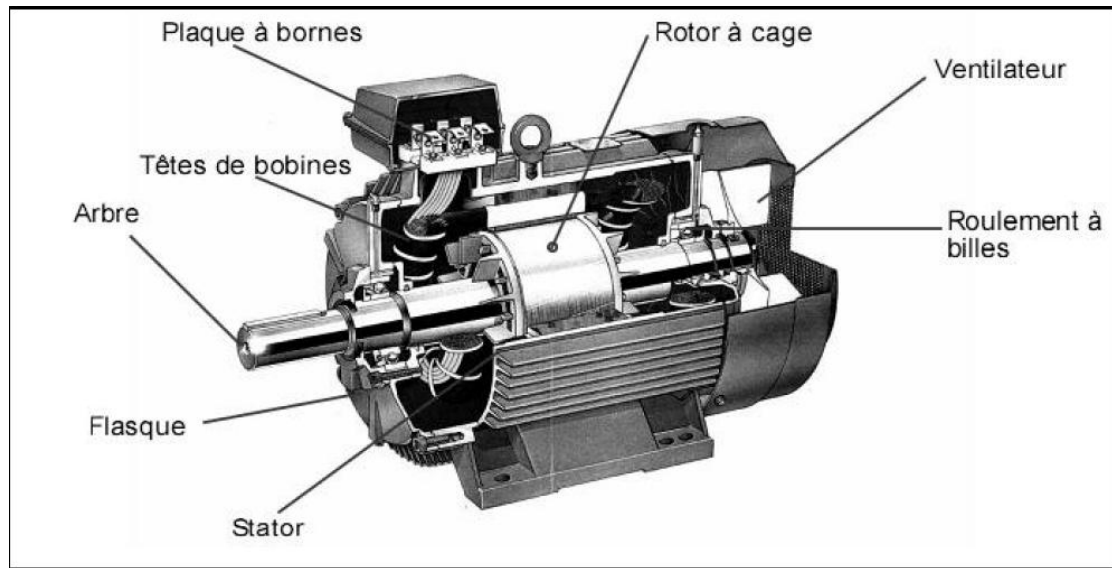
## **I.2. Généralités sur la machine asynchrone**

### **I.2.1. Définition**

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales .Le rotor est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique. La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie transférée du stator au rotor ou inversement se fait par induction électromagnétique [2].

### **I.2.2.Eléments de constitution de la machine asynchrone**

L'organisation d'une machine asynchrone triphasée est montrée sur la figure I.1. Elle est constituée des principaux éléments suivants :



**Figure. I.1** : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

### I.2.2.1. Le stator

Anneau de tôles encoché et portant un enroulement triphasé semblable à celui d'un alternateur. Cet enroulement est presque toujours relié à la source et constitue le primaire [3]. On utilise des tôles minces dont l'épaisseur varie entre 0,35 et 0,50 mm pour minimiser les pertes dans les circuits magnétiques [4].

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique [5].



**Figure I.2** : stator

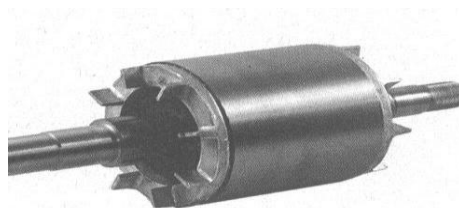
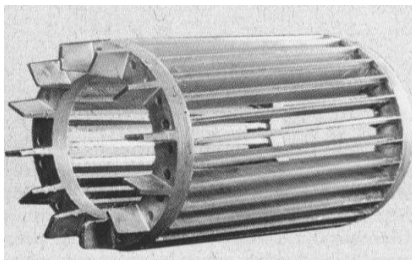
### I.2.2.2 Le rotor

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôle qui en général, de même origine que celle utilisées pour la construction du stator .les rotors de machine asynchrones peuvent être de deux type : bobinés ou a cage d'écureuil [5].

#### ➤ rotor a cage d'écureuil

L'ensemble a l'aspect d'une cage cylindrique dont à chaque bout une couronne métallique est raccordée dans laquelle se trouve un empilement de tôle dont l'axe du moteur passe au centre [3].

Les enroulements sont constitués se barres de cuivre pour les gros moteur ou d'aluminium pour les petit. Ces barres sont court-circuitées a chaque extrémité par deux anneaux dit «de court-circuitées», ces barres uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone [5].



**Figure I.3** : Rotor à cage d'écureuil [1]

#### ➤ rotor bobiné

Comme pour le rotor a cage il est constitué de tôles empilées mais des encoches sont pratiquées pour le passage du bobinage qui lui-même est raccordé en une extrémité en bout d'arbre sur des bagues l'autre extrémité du bobinage est connecté ensemble (point milieu du couplage étoile).sur les bagues viennent frotter les balais (aussi appelé les collecteurs) qui sont raccordés de démarrage (résistance) [5].



**Figure I.4** Rotor bobiné

### **I.2.3. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone**

Le principe de fonctionnement du moteur repose sur les lois fondamentales de l'induction électromagnétique. En effet, les trois enroulements statoriques alimentés par un réseau triphasé équilibré créent dans l'entrefer un champ magnétique tournant. Les conducteurs du rotor sont soumis à ce champ tournant. Ce champ crée dans le circuit électrique du rotor des courants induits qui provoquent une force magnétomotrice qui entraîne le rotor en rotation [6].

### **I.2.4. Domaines**

Le moteur asynchrone est très utilisée dans les applications industrielles, car de par sa conception, son cout est relativement moindre à celui des autres machines, sa robustesse au niveau électromagnétique est grande, et une bonne standardisation existe entre les différents fabricants. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), dans l'industrie (machine-outil), dans l'électroménager. Elle était à l'origine uniquement utilisée en moteur, mais toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice; c'est par exemple le cas des éoliennes [7].

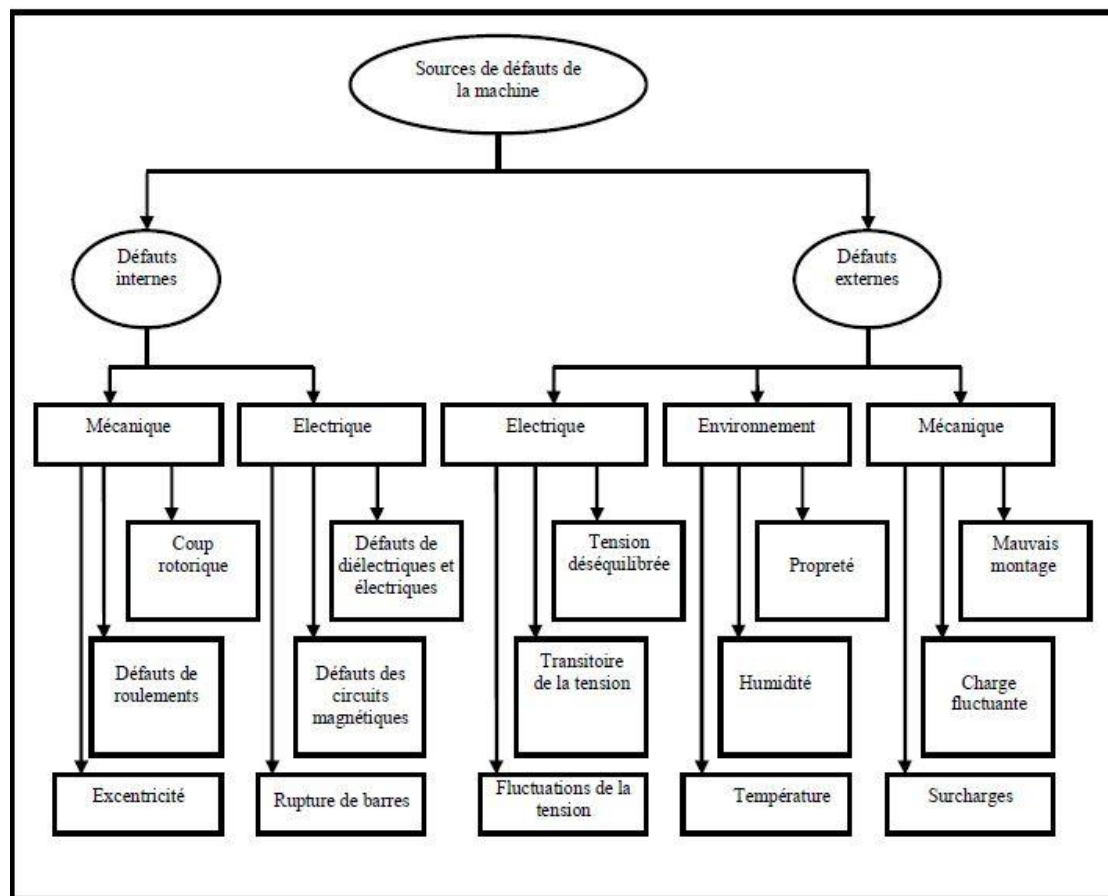
### **I.3. Les défaillances de la machine asynchrone**

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.5 présente l'arbre de défaut de la machine asynchrone où les défauts sont classifiés selon leur emplacement : rotor et stator [8,9]



**Figure I.5 :** Sources de défauts de la machine asynchrone à cage [8]

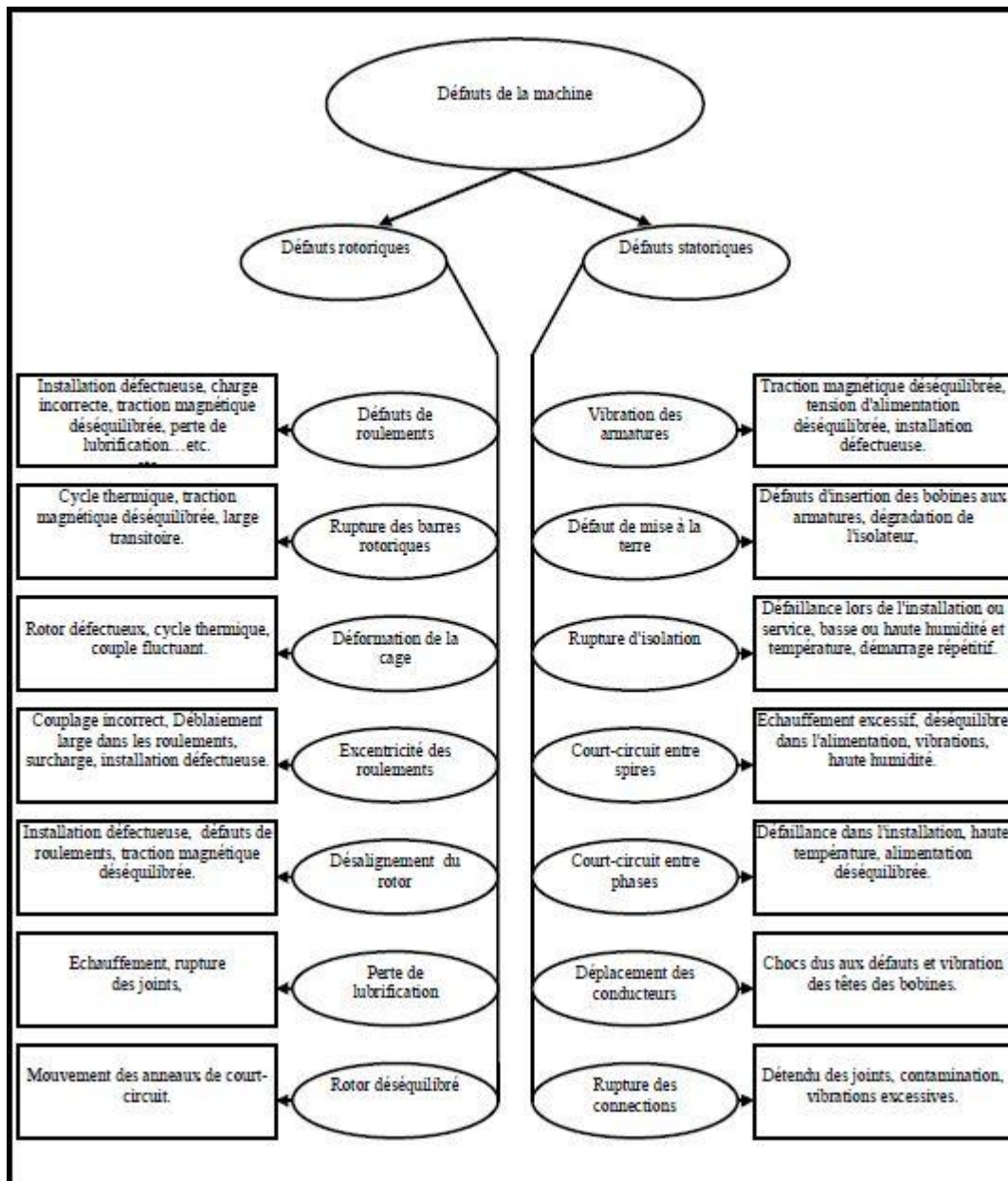


Figure I.6 : Principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes [8]

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.1.1. Défaillances d'ordre mécanique

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 [9.10]

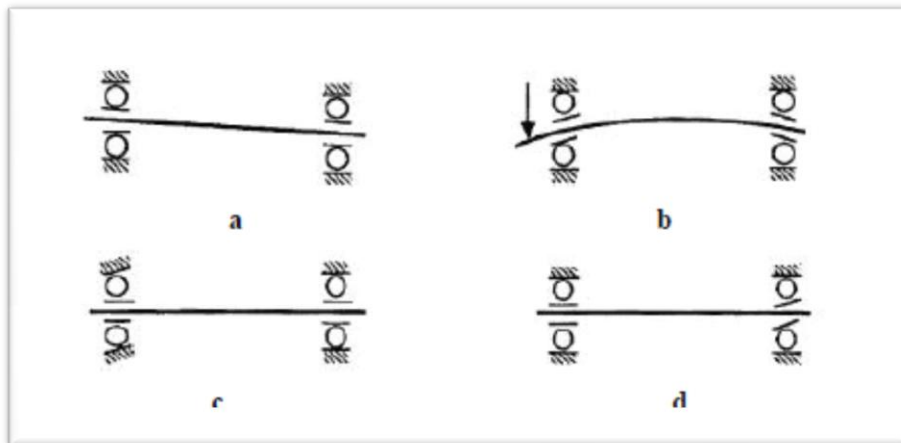


Figure I.7 : Quatre types de défauts dans les roulements à billes [9,11]

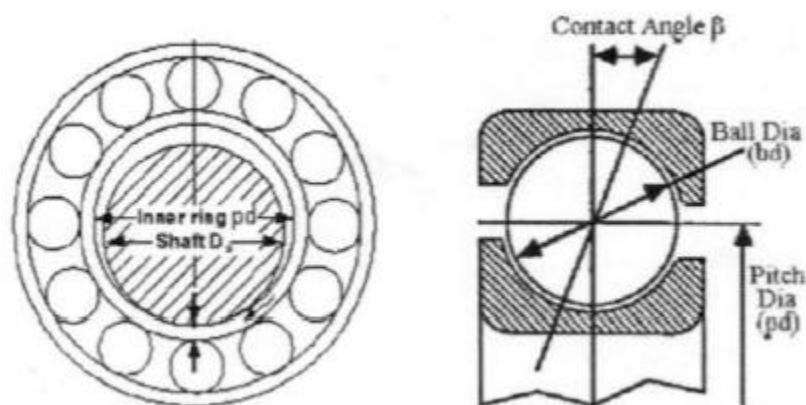


Figure I.8 : Dimensions d'un roulement billes [9]

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 déménageant dans les deux directions [10,12].

Comme avec l'excentricité de hauteur de fuite, ces variations produisent des courants de stator aux fréquences données en références [10,12]

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

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

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

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 représentent les fréquences générées par les différents défauts des roulements à billes, sont exprimées par :

Pour un défaut dans la course externe du roulement :

$$f_i = \left(\frac{N}{2}\right) f_r [1 - DB \cos(\beta) / PD] \quad (I.3)$$

Pour un défaut dans la course interne du roulement :

$$f_i = \left(\frac{N}{2}\right) f_r [1 + DB \cos(\beta) / PD] \quad (I.4)$$

Pour un défaut dans les billes :

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

Pour un défaut dans la course :

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

### **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 [38].

### **I.2.1.3 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 [13].

### **I.3.1.4 Défauts d'excentricité [9]**

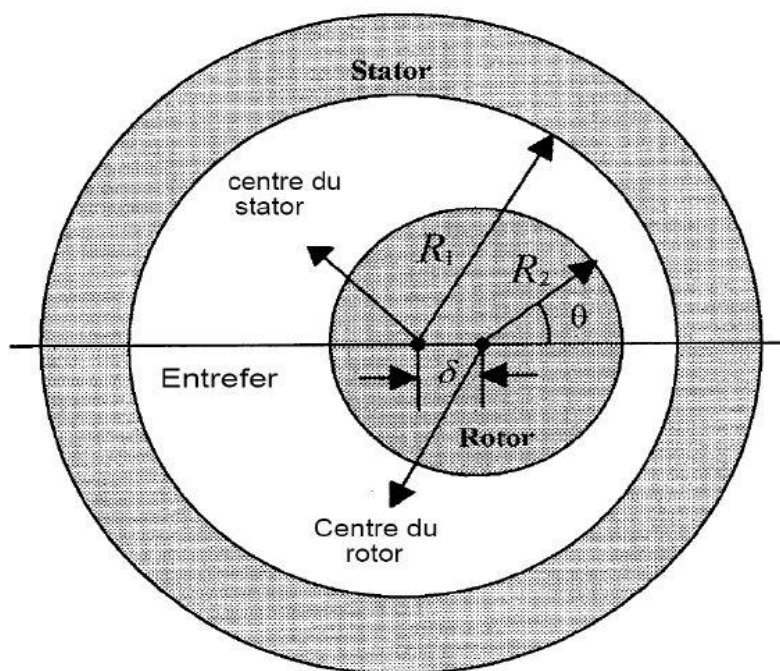
Ceux-ci provoquent la variation de l'entrefer dans le moteur, la répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant. Quand l'excentricité devient grande, les forces radiales résultantes 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 (Figure I.8 et I.9) à savoir :

-L'excentricité statique : lorsque l'axe du stator coïncide avec l'axe de rotation et non avec l'axe du rotor.

- L'excentricité dynamique : lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide pas avec l'axe de symétrie du stator.

- L'excentricité mixte : lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide pas avec les axes de symétrie du rotor et du stator.



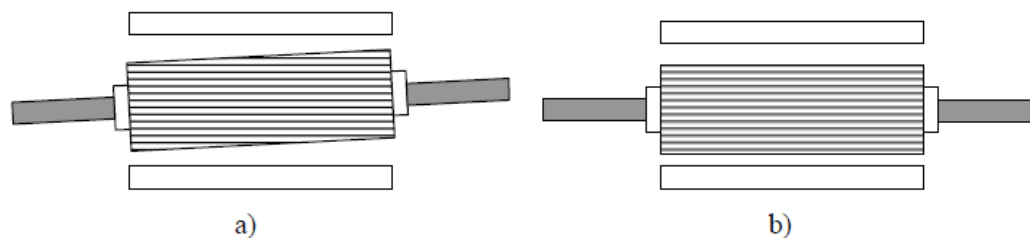
**Figure I.9** : Différents types de la dissymétrie de l'entrefer [9]

Tel que :

$R_1$  : Rayon interne statorique,

$R_2$  : 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. Défaillances d'ordre électrique

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 [14].

**I.3.2.1. Défaillances des circuits électriques statoriques [38]**

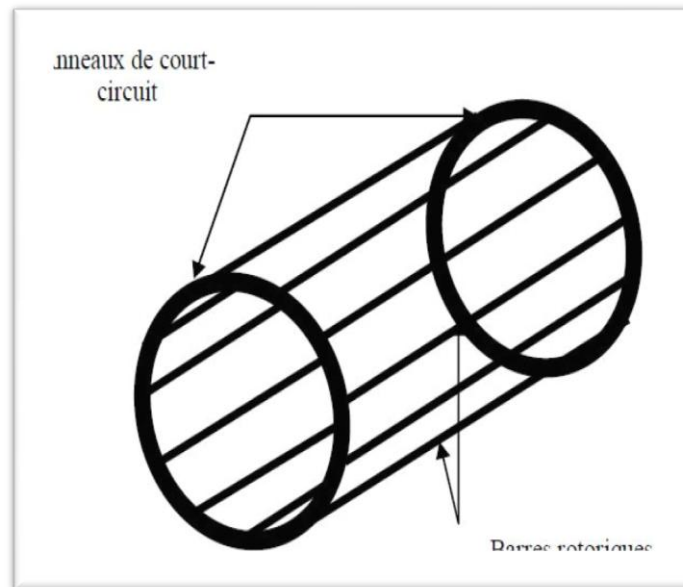
L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, par exemple, les défauts de type court-circuit inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défaut peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique.

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.

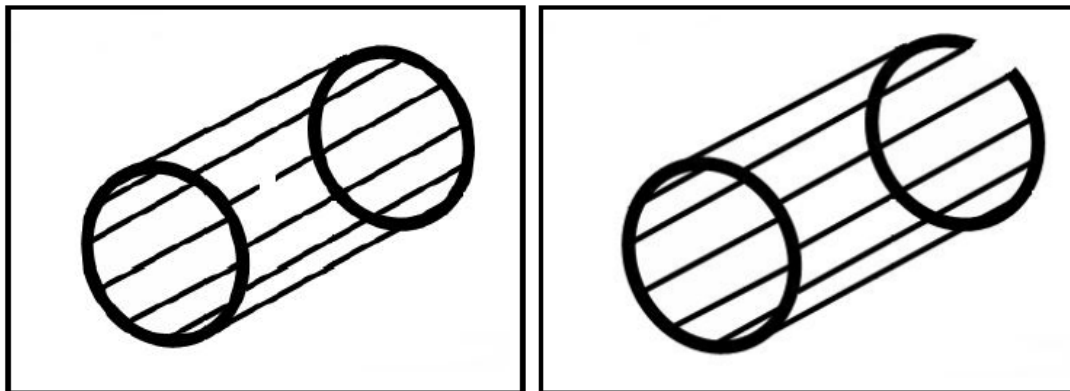
**I.3.2.2. Défaillances des circuits électriques rotoriques**

Deux types de défaillances peuvent apparaître au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. 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 [38].

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 [38].



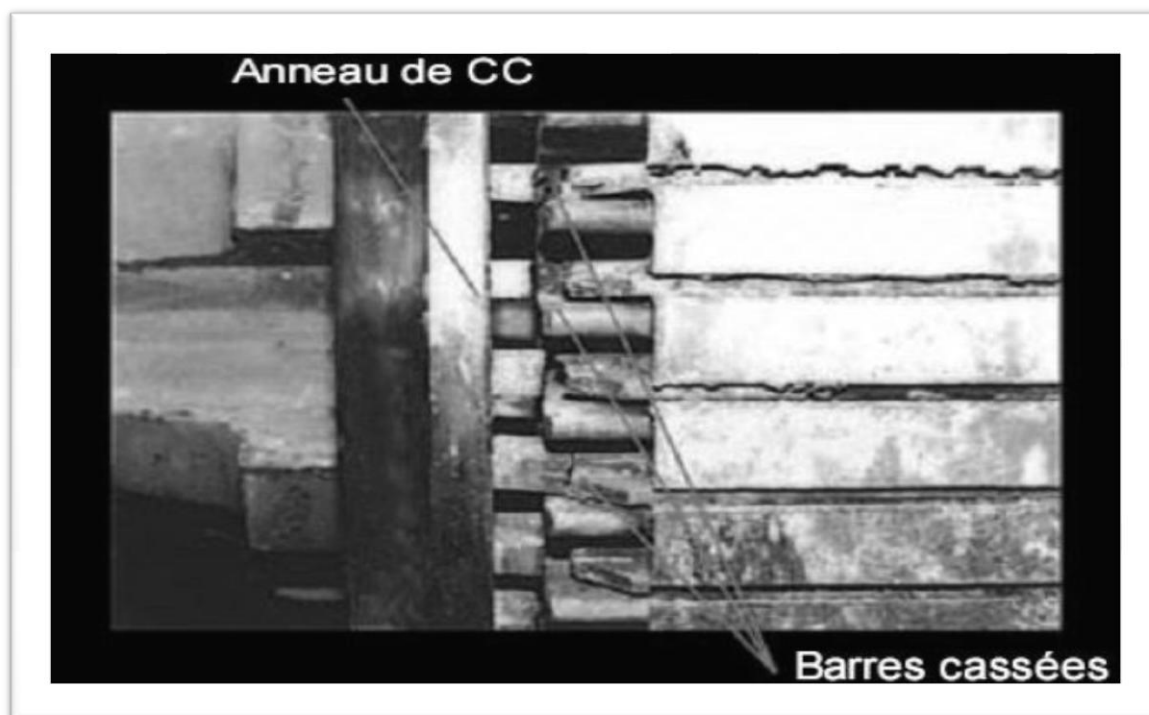
**Figure I.11 :** Rotor à cage d'écureuil



**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 [14]. 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:

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



**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 [38].

#### **I.4 Modèle de la machine en l'absence de défaillance**

Pour modéliser la machine asynchrone à cage d'écureuil, nous utiliserons la méthode. Des circuits électriques multiples couplés magnétiquement pour donner un modèle physique envisageant tout les modes de fonctionnement de la machine asynchrone. 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 [15], soit en utilisant une décomposition en séries de Fourier de l'induction d'entrefer de la machine [16,17].

Cette dernière approche nous a semblé la plus adéquate étant donné que nous n'avons pas les informations nécessaires pour calculer les inductances de la machine par la méthode des fonctions de bobinage. En effet, le calcul de ces inductances par une décomposition en séries de Fourier ne nécessite pas la connaissance précise du bobinage de la machine car les termes relatifs à l'étalement, au raccourcissement, à

l'inclinaison du bobinage sont intégrés au calcul des inductances à travers des coefficients spécifiques. Ce type de modélisation permet donc de prendre en compte les harmoniques des inductances souhaités (simulation possible au fondamental de l'induction ou avec les harmoniques d'espace les plus importants).

Tout type de modélisation ne peut se faire sans poser quelques hypothèses simplificatrices qui font l'objet de la modélisation. 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 (courants, vitesse, couple, ...). 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 [38].

#### **I.4.1 Hypothèses simplificatrices [13]**

Dans l'approche proposée, on suppose que :

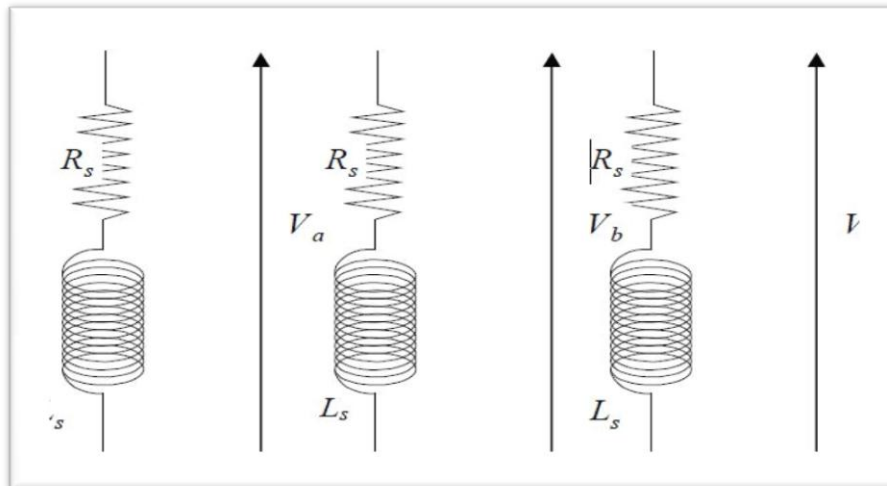
1. le circuit magnétique est linéaire (perméabilité relative du fer très grande devant  $l$ ). Cette hypothèse permet d'introduire le concept d'inductance propre et mutuelle entre les bobinages statoriques et rotoriques.
2. l'effet de peau est négligeable.
3. les barres rotoriques sont isolées les unes des autres : cette hypothèse permet d'éliminer les courants d'inter-barres et leurs effets au sein de la cage rotoriques.
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.

#### **I.4.2 Structure du stator [38]**

Le stator de la machine étudiée est un stator triphasé de  $m$  encoches statoriques. Une phase statorique est composée de plusieurs bobines logées dans les encoches du stator.

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 II.1 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.

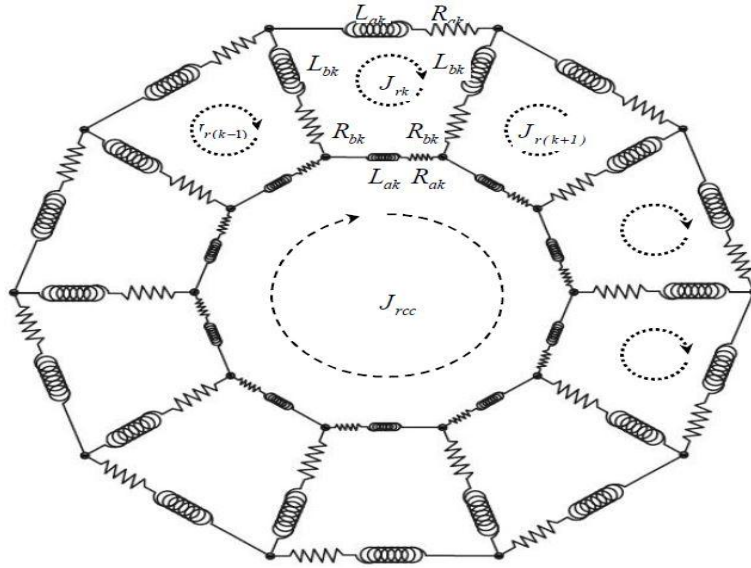


**Figure I.14** : Structure adoptée pour modéliser le stator

### I.4.3 Structure du rotor

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. La cage rotorique peut se décomposer en  $(N_r+1)$  circuits électriques rotoriques indépendants. En effet, si on considère deux barres rotoriques adjacentes ainsi que les segments d'anneau de court-circuit les reliant, nous obtenons une boucle rotorique fermée qui peut être étudiée sous forme de circuit électrique. Un des anneaux de court-circuit crée par conséquent une boucle supplémentaire ce qui porte le nombre de boucles totales à  $(N_r+1)$ . On associe à chacune de ces boucles un courant, ce qui amène à calculer  $(N_r+1)$  courants rotoriques. Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit [18].

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'écreuil

$R_{bk}$  : 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 différentielles associées

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

Ces équations différentielles vont permettre d'associer le vecteur tension, le vecteur courant ainsi que le vecteur flux pour les trois phases statoriques  $s_a$ ,  $s_b$  et  $s_c$ .

En appliquant la loi d'Ohm sur les trois phases statoriques, on obtient:

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad (I.8)$$

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

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \text{ et } [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

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

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{s_a} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s_b} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s_c} \end{bmatrix} \quad (\text{I.10})$$

$R_{si}$  : 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.11).

$$[\phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][J_r] \quad (\text{I.11}).$$

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 :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{s_a s_a} & M_{s_a s_b} & M_{s_a s_c} \\ M_{s_b s_a} & L_{s_b s_b} & M_{s_b s_c} \\ M_{s_c s_a} & M_{s_c s_b} & L_{s_c s_c} \end{bmatrix} \quad (\text{I.12})$$

Tel que :

$$\begin{cases} L_{s_a s_a} = L_{m_{s_a s_a}} + L_{f_{s_a s_a}} \\ L_{s_b s_b} = L_{m_{s_b s_b}} + L_{f_{s_b s_b}} \\ L_{s_c s_c} = L_{m_{s_c s_c}} + L_{f_{s_c s_c}} \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

$L_{m_{s_i s_i}}$  : 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  $sN$  spires par phase est donnée par :

$$L_{m_{s_i s_j}} = \frac{U_0 \cdot l \cdot r}{g} \cdot N_s^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad (\text{I.14})$$

La matrice des inductances mutuelles  $[M_{sr}]$  entre les trois phases statoriques et les  $(N_r+1)$  boucles rotoriques se met sous la forme matricielle suivante :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{s_a r_1} & M_{s_a r_2} & \dots & M_{s_a r_k} & \dots & M_{s_a r_{N_r}} & M_{s_a r_{cc}} \\ M_{s_b r_1} & M_{s_b r_2} & \dots & M_{s_b r_k} & \dots & M_{s_b r_{N_r}} & M_{s_b r_{cc}} \\ M_{s_c r_1} & M_{s_c r_2} & \dots & M_{s_c r_k} & \dots & M_{s_c r_{N_r}} & M_{s_c r_{cc}} \end{bmatrix} \quad (\text{I.15})$$

Le vecteur  $[J_r]$  regroupe les  $(N_r + 1)$  courants de boucles rotoriques :

$$[U_r] = [j_{r_1} \ j_{r_2} \ \dots \ j_{r_k} \ \dots \ j_{r_{N_R}} \ j_{r_\infty}] \quad (\text{I.16})$$

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, [15, 16,19].

$$M_{s_i s_j}(\theta) = \mu_0 \cdot l \cdot r \cdot \int_0^{2\pi} g^{-1}(\varphi, \theta) \cdot N_i(\varphi, \theta) \cdot N_j(\varphi, \theta) \cdot d\varphi \quad (\text{I.17})$$

Avec :

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

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

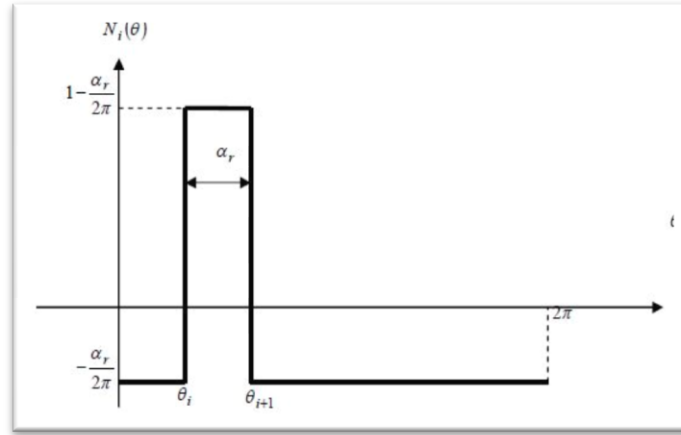
$g^{-1}(\varphi, \theta)$  : La fonction inverse de l'entrefer, dans le cas où l'entrefer est constant et petit par rapport au rayon du stator, la fonction est constante et égale à  $(l/g)$ .

$N_i(\varphi, \theta)$  : 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:

$$\begin{aligned} N_a &= \frac{N_s}{2} (\cos \theta) \\ N_b &= \frac{N_s}{2} (\cos \theta - \frac{2\pi}{3}) \\ N_c &= \frac{N_s}{2} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (\text{I.18})$$

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  $a$  et la  $i^{\text{ème}}$  maille rotorique est la suivante :

$$M_{s_a r_i} = \frac{U_0 l r}{g} \int_0^{2\pi} N_a(\theta) N_i(\theta) d\theta = \frac{U_0 l r}{g} \frac{N_s}{2} [\sin \alpha_r \cos \theta_i - (1 - \cos \alpha_r) \sin \theta_i] \quad (\text{I.19})$$

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 :

$$\theta_i = \theta_r + (i - 1) \alpha_r \quad (\text{I.20})$$

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

$$M_{s_i r_i} = L_m \cos (\theta_r + (i - 1) \alpha_r + \delta)$$

Avec : (I.21)

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

$N_s$ : 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.

$U_0$  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 à cage 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 [38]

Tout comme pour les équations du stator de la machine asynchrone, 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 :

$$[V_r] = [R_r][J_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \quad (I.22)$$

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

$$[\phi_r] = [\phi_{r1} \quad \phi_{r2} \quad \dots \quad \phi_{rk} \quad \dots \quad \phi_{rNr} \quad \phi_{rcc}] \quad (I.23)$$

Il est à noter que dans le cas particulier de la machine asynchrone à cage d'écurieul, 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.25. 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 :

$$[\phi_r] = [L_r][J_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (I.24)$$

Où la matrice inductance  $[L_r]$ , décrite par l'équation(I.27), se compose des inductances propres, de magnétisation, de fuite et mutuelles de chaque boucle rotorique.

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{rt_1} & -R_{rb_2} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & -R_{rb_{N_r}} & -R_{a_1} \\ -R_{rb_1} & R_{rt_2} & -R_{rb_2} & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & -R_{a_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -R_{rb_{k-1}} & R_{rt_k} & -R_{rb_k} & \dots & 0 & 0 & -R_{a_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_{rb_{N_r}} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_{rb_{N_r-1}} & R_{rt_{N_r}} & R_{a_{N_r}} \\ -R_{a_1} & -R_{a_2} & -R_{a_3} & \dots & -R_{a_{k-1}} & -R_{a_k} & -R_{a_{k+1}} & \dots & -R_{a_{N_r-1}} & -R_{a_{N_r}} & \sum_{k=1}^{N_r} -R_{a_k} \end{bmatrix} \quad (I.25)$$

$$\begin{cases} R_{rt_1} = R_{rb_{N_r}} + R_{rb_1} + 2R_{a_1} \\ \vdots \\ R_{rt_k} = R_{rb_{N_r-k+1}} + R_{rb_k} + 2R_{a_k} \\ \vdots \\ R_{rt_{N_r}} = R_{rb_{N_r-1}} + R_{rb_{N_r}} + R_{a_{N_r}} \end{cases} \quad (I.26)$$

Sachant que :

$$R_{rb_1} = R_{rb_2} = R_{rb_3} \dots = R_{rb_{N_r}} = R_b$$

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

Ce qui donne :

$$\begin{cases} R_{rt_1} = R_{rt_2} = R_{rt_3} = \dots = R_{rt_{N_r}} = R_0 \\ R_0 = 2(R_b + R_a) \end{cases}$$

La matrice résistance  $[R_r]$  devient :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_0 & -R_b & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & -R_b & -R_a \\ -R_b & R_0 & -R_0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_0 & -R_b & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_0 & R_a \\ -R_a & -R_a & -R_a & \dots & -R_a & -R_a & -R_a & \dots & -R_a & -R_a & \sum_{k=1}^{N_r} -R_a \end{bmatrix} \quad (I.27)$$

La matrice inductance rotorique est exprimée comme suit:

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rr_1} & M_{r_1 r_2} - L_{fb_1} & M_{r_1 r_3} & \dots & M_{r_1 r_k} & \dots & M_{r_1 r_{N_r-1}} & M_{r_1 r_{N_r}} - L_{fb_{N_r}} & -L_{a_1} \\ M_{r_2 r_1} - L_{fb_1} & L_{rr_2} & M_{r_2 r_3} - L_{fb_1} & \dots & M_{r_2 r_k} & \dots & M_{r_2 r_{N_r-1}} & M_{r_2 r_{N_r}} & -L_{a_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_k r_1} & M_{r_k r_2} & M_{r_k r_3} & \dots & L_{rr_k} & \dots & \dots & 0 & -L_{a_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_{N_r} r_1} - L_{fb_{N_r}} & M_{r_{N_r} r_2} & M_{r_{N_r} r_3} & \dots & M_{r_{N_r} r_k} & \dots & M_{r_{N_r} r_{N_r-1}} & -L_{fb_{N_r-1}} & L_{rr_{N_r}} & -L_{a_{N_r}} \\ -L_{a_1} & -L_{a_2} & -L_{a_3} & \dots & -L_{a_k} & \dots & -L_{a_{N_r-1}} & -L_{a_{N_r}} & \sum_{k=1}^{N_r} -L_{a_k} \end{bmatrix} \quad (I.28)$$

$$\begin{cases} L_{rr_1} = L_{mb_1} + L_{b_{N_r}} + 2L_{a_1} \\ L_{rr_k} = L_{mb_k} + L_{b_{k-1}} + L_{b_k} + 2L_{a_k} \\ L_{rr_{N_r}} = L_{mb_{N_r}} + L_{b_{N_r-1}} + L_{b_{N_r}} + 2L_{a_{N_r}} \end{cases} \quad (I.29)$$

Sachant que :

$$L_{b_1} = L_{b_2} = L_{b_3} = \dots = L_{b_{N_r}} = L_b$$

$$L_{a_1} = L_{a_2} = L_{a_3} = \dots = L_{a_{N_r}} = L_a$$

$$L_{rr_1} = L_{rr_2} = L_{rr_3} = \dots = L_{rr_{N_r}} = L_0$$

$$L_0 = L_{mb_k} + 2(L_a + L_b)$$

La matrice mutuelle rotor-rotor devient :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_0 & M_{r_1 r_2} - L_{fb_1} & M_{r_1 r_3} & \dots & M_{r_1 r_k} & \dots & M_{r_1 r_{N_r-1}} & M_{r_1 r_{N_r}} - L_{fb_{N_r}} & -L_a \\ M_{r_2 r_1} - L_{fb_1} & L_0 & M_{r_2 r_3} - L_{fb_1} & \dots & M_{r_2 r_k} & \dots & M_{r_2 r_{N_r-1}} & M_{r_2 r_{N_r}} & -L_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_k r_1} & M_{r_k r_2} & M_{r_k r_3} & \dots & L_0 & \dots & \dots & 0 & -L_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_{N_r} r_1} - L_{fb_{N_r}} & M_{r_{N_r} r_2} & M_{r_{N_r} r_3} & \dots & M_{r_{N_r} r_k} & \dots & M_{r_{N_r} r_{N_r-1}} & -L_{fb_{N_r-1}} & L_0 & -L_a \\ -L_a & -L_a & -L_a & \dots & -L_a & \dots & -L_a & -L_a & \sum_{k=1}^{N_r} -L_a \end{bmatrix} \quad (I.30)$$

$[M_{rs}]$ , décrite par l'équation I.31, se compose des inductances mutuelles entre les  $(N_r + 1)$  boucles rotoriques et les trois phases statoriques.

$$[M_{rs}] = \begin{bmatrix} M_{r1sa} & M_{r1sb} & M_{r1sc} \\ M_{r2sa} & M_{r2sb} & M_{r2sc} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{rk sa} & M_{rk sb} & M_{rk sc} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{rN_r sa} & M_{rN_r sb} & M_{rN_r sc} \\ M_{rcc sa} & M_{rcc sb} & M_{rN_r sc} \end{bmatrix} \quad (\text{I.31})$$

Notons qu'à travers la réciprocité des inductances mutuelles entre les phases statoriques et les boucles rotoriques, nous avons  $[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$ .

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

$$l_{mb_{ii}} = \frac{U_0 l_r}{g} = \int_0^{2\pi} N_i^2(\theta) d\theta \frac{U_0 l_r}{g} \alpha_r \left(1 - \frac{\alpha_r}{2\pi}\right) \quad (\text{I.32})$$

$$l_{mb_{ij}} = \frac{U_0 l_r}{g} = \int_0^{2\pi} N_i(\theta) N_j(\theta) d\theta \frac{U_0 l_r}{g} \left(-\frac{\alpha_r^2}{2\pi}\right) \quad (\text{I.33})$$

$$l_{mb_{ii}} = l_{mb_{ij}} + \frac{U_0 l_r}{g} \alpha_r \quad (\text{I.34})$$

Les équations électriques des  $(N_r+1)$  boucles rotoriques étant décrites, on aborde la description des équations mécaniques de la machine asynchrone.

#### I.4.4.3 Equations mécaniques de la machine [38]

Les équations mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone peuvent se mettre sous la forme :

$$J_t \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f_v \Omega - C_r \quad (\text{I.35})$$

$$\Omega + \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{I.36})$$

Où  $J_t$  représente le moment d'inertie de la machine étudiée,  $\Omega$  sa vitesse rotorique,  $C_{em}$  son couple électromagnétique,  $f_v$  son frottement visqueux et  $C_r$  son couple de charge.

L'équation II.29 lie la vitesse rotorique à la position du rotor  $\Omega$ . Les paramètres  $J_t$ ,  $f_v$  et  $C_r$  dépendent 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 :

$$W_{co} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} [L_s] & M_{sr} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix} \quad (\text{I.37})$$

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 :

$$W_{em} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_s] & M_{sr} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix} \quad (I.38)$$

On propose ci-après un récapitulatif des équations électriques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil, est donné ci-après :

$$\left\{ \begin{array}{l} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \\ [\phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][J_r] \\ [V_r] = [R_r][J_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \\ [\phi_r] = [L_r][J_r] + [M_{rs}][I_s] \\ C_{em} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_s] & M_{sr} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [J_r] \end{bmatrix} \\ J_t \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f_v \Omega - C_r \\ \Omega = \frac{d\theta}{dt} \end{array} \right. \quad (I.39)$$

Le modèle obtenu ne peut jamais donner des résultats confondus sur la réalité à cause des hypothèses posées précédemment, mais il peut donner une image proche de fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil, tel que, les courants statoriques et rotoriques, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation.

### I.5 Modèle de la machine en présence de défaillances

Après l'établissement du modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil sans défaut, on procède maintenant à la modélisation de la machine en présence de défauts au rotor. Une telle procédure permet de juger les défauts à leur attribuer.

Dans cette partie, on s'intéressera aux défauts intervenant sur les barres rotoriques (cassures) et sur les cassures des portions d'anneau de court circuit. La modélisation de ce type de défaillance peut être faite en utilisant deux méthodes différentes, le but étant d'annuler le courant qui traverse la barre incriminée. Le circuit électrique rotorique donné sur la figure I.15 doit être reconsidéré pour permettre la prise en compte du défaut rotorique dans le modèle de la machine [13].

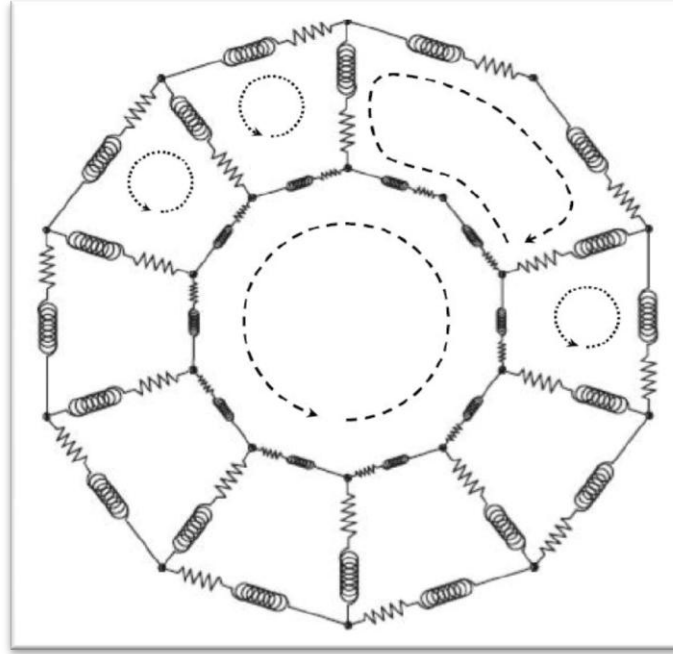
Une première méthode de modélisation consiste à reconstituer totalement le circuit électrique rotorique. Dans ce type d'approche, la barre rotorique défaillante est

enlevée du circuit électrique, ce qui oblige à recalculer les matrices résistance  $[R_r]$  et inductance  $[L_r]$  de la machine asynchrone. En effet, la suppression d'une barre de la cage nous donne une matrice  $[R_r]$  et  $[L_r]$  de rang inférieur à celle développée pour la machine saine. La modification de l'ordre des matrices rotoriques oblige à recalculer les lois électriques et magnétiques de la boucle  $k$ . Nous présentons dans la suite les structures finales que prend le circuit électrique rotorique lorsque nous sommes en présence de rupture des barres et portions d'anneau de court-circuit [13][15,16,19].

La seconde approche envisageable consiste à augmenter artificiellement la valeur de la résistance de la barre incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible de zéro en régime permanent. Par comparaison avec la première méthode, la structure du circuit électrique rotorique n'est pas modifiée car nous considérons, dans ce type de modélisation, qu'une rupture de barre n'altère pas les inductances propres et mutuelles de la cage rotorique. Par conséquent la modélisation de rupture partielle des barres et de portion d'anneau de court-circuit est possible dans cette dernière approche.

### **I.5.1 Machine avec une seule barre cassée [38]**

D'après la première approche, la cassure d'une barre au rotor est introduite par un changement au niveau des équations et surtout dans le calcul des inductances propres et mutuelles et la résistance. Si la barre qui constitue la maille  $k$  est enlevée, le modèle est diminué par une maille, ce qui veut dire que le courant  $j_{rk}$  traverse une maille deux fois plus large et que la maille  $(k + 1)$  est éliminée comme indiqué sur la figure I.16 suivante :



**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  $K^{ème}$  maille du rotor.

$$N_k(\theta) = \begin{cases} -\frac{\alpha_r}{2.\pi} & 0 < \theta \leq \theta_k \\ 1 - \frac{\alpha_r}{2.\pi} & \theta_k < \theta \leq \theta_{j+2} \\ -\frac{\alpha_r}{2.\pi} & \theta_{k+2} < \theta \leq 2.\pi \end{cases} \quad (I.40)$$

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

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

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

$$Lm_{bij} = \frac{U0.l.r}{g} \int_0^{2.\pi} N_i(\theta).N_j(\theta)d\theta = -2.\frac{U0.l.r}{g}.\frac{\alpha_r^2}{2.\pi} \quad (I.41)$$

Alors la matrice inductance rotorique devient :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_0 & M_{r_1 r_2} - L_{f_{b1}} & M_{r_1 r_3} & \dots & M_{r_1 r_k} & M_{r_1 r_{k+2}} & \dots & M_{r_1 r_{N_r-1}} & M_{r_1 r_{N_r}} - L_{f_{bN_r}} & -L_a \\ M_{r_2 r_1} - L_{f_{b1}} & L_0 & M_{r_2 r_3} - L_{f_{b1}} & \dots & M_{r_2 r_k} & M_{r_2 r_{k+2}} & \dots & M_{r_2 r_{N_r-1}} & M_{r_2 r_{N_r}} & -L_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_k r_1} & M_{r_k r_2} & M_{r_k r_3} & \dots & L_0 & M_{r_k r_{k+2}} - L_{f_{bk+2}} & \dots & \vdots & 0 & -L_a \\ M_{r_{k+2} r_1} & M_{r_{k+2} r_2} & M_{r_{k+2} r_3} & \dots & M_{r_{k+2} r_k} & L_0 & \dots & M_{r_{k+2} r_{N_r-1}} & \dots & -L_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_{N_r} r_1} - L_{f_{bN_r}} & M_{r_{N_r} r_2} & M_{r_{N_r} r_3} & \dots & M_{r_{N_r} r_k} & \dots & M_{r_{N_r} r_{N_r-1}} - L_{f_{bN_r-1}} & L_0 & \dots & -L_a \\ -L_a & -L_a & -L_a & \dots & -L_a & \dots & -L_a & -L_a & \sum_{k=1}^{N_r} -L_a & \end{bmatrix} \quad (I.42)$$

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

$$M_{s_a r_k} = \frac{U_0 l r}{g} \int_0^{2\pi} N_a(\theta) N_k(\theta) d\theta \frac{U_0 l r}{g} \frac{N_s}{2} [\sin \alpha_r \cos \theta_k - (1 - \cos \alpha_r) \sin \theta_k] \quad (I.43)$$

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

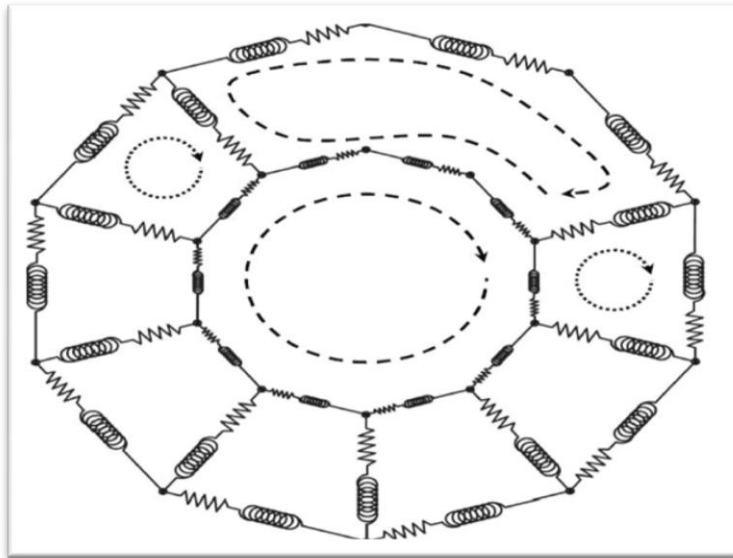
$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_0 & -R_b & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & -R_b & -R_a \\ -R_b & R_0 & -R_0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & R_b & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_{0k} & -R_b & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & R_b & R_0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_0 & R_a \\ -R_a & -R_a & -R_a & \dots & -R_a & -R_a & -R_a & \dots & -R_a & -R_a & \sum_{k=1}^{N_r-1} -R_a \end{bmatrix} \quad (I.44)$$

Avec :

$$R_{0k} = 2. (R_b + 2. R_e) \quad (I.45)$$

**I.5.2 Machine avec deux barres cassées adjacentes [38]**

Dans le cas de rupture de deux barres adjacentes, le nombre de mailles rotoriques 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  $i_{rk} = i_{rk+1} = i_{rk+2}$ , ce 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 :

$$N_k(\theta) = \begin{cases} -\frac{\alpha_r}{2.\pi} & 0 < \theta \leq \theta_k \\ 1 - \frac{\alpha_r}{2.\pi} & \theta_k < \theta \leq \theta_{j+3} \\ -\frac{\alpha_r}{2.\pi} & \theta_{k+3} < \theta \leq 2.\pi \end{cases} \quad (\text{I.46})$$

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 :

$$L_{0k} = L_{mb_{kk}} + 2.(L_b + 3.L_e) \quad (\text{I.47})$$

Avec :

$$L_{mb_{kk}} = \frac{U_{0.l.r}}{g} \int_0^{2.\pi} N_k^2(\theta) d\theta = \frac{U_{0.l.r}}{g} \alpha_r \cdot \left(3 - \frac{5.\alpha_r}{2.\pi}\right) \quad (\text{I.48})$$

La mutuelle inductance rotor- rotor est :

$$L_{m_{bik}} = \frac{U_{0.l.r}}{g} \int_0^{2.\pi} N_i(\theta) \cdot N_k(\theta) d\theta = -3 \frac{U_{0.l.r}}{g} \cdot \frac{\alpha_r^2}{2.\pi} \quad (\text{I.49})$$

La mutuelle inductance stator-rotor est :

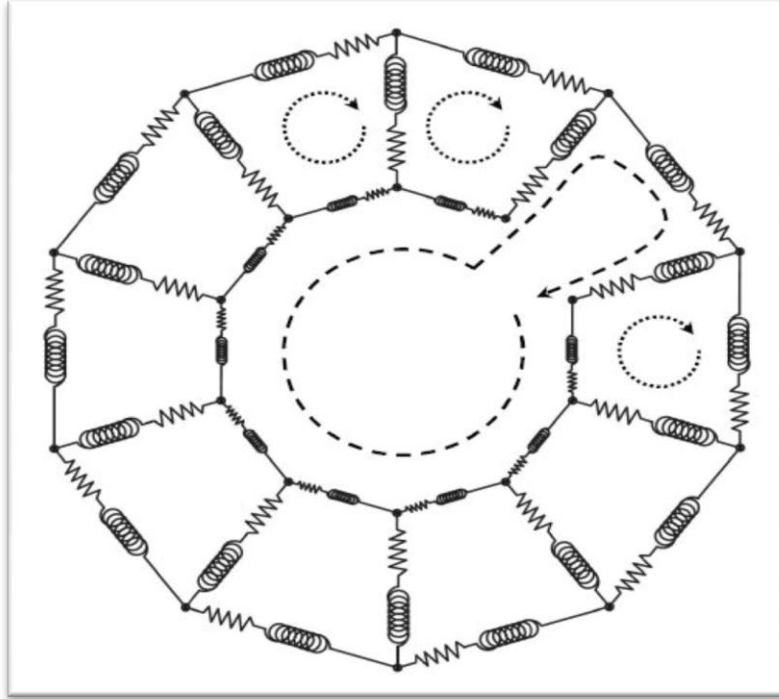
$$M_{s_{ak}} = \frac{U_{0.l.r}}{g} \int_0^{2.\pi} N_a(\theta) \cdot N_k(\theta) d\theta = L_m \cdot \cos(\theta_r + 3.(k-1).\alpha_r + \delta) \quad (\text{I.50})$$

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

$$R_{0k} = 2.(R_b + 3.R_a) \quad (\text{I.51})$$

### I.5.3 Rupture d'une portion d'anneau de court circuit [38]

La rupture d'une portion d'anneau de court circuit liée à une maille  $k$  indique que le modèle d'équations est diminué par une seule équation. Alors il suffit d'annuler la  $K^{\text{ème}}$  ligne avec la  $K^{\text{ème}}$  colonne de la matrice des inductances rotoriques, de même pour la matrice des résistances rotoriques. Cependant les autres éléments de ces matrices restent les mêmes.



**Figure I.19 :** Circuit équivalent d'un rotor avec une portion d'anneau de court circuit cassée

Les matrices des inductances et des résistances sont représentées comme suit :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_0 & M_{r_1 r_2} - L_{f_{b1}} & M_{r_1 r_3} & \dots & M_{r_1 r_{k-1}} & 0 & M_{r_1 r_{k+1}} & \dots & M_{r_1 r_{N_r}} - L_{f_{bN_r}} & -L_a \\ M_{r_2 r_1} - L_{f_{b1}} & L_0 & M_{r_2 r_3} - L_{f_{b2}} & \dots & M_{r_2 r_{k-1}} & 0 & M_{r_2 r_{k+1}} & \dots & M_{r_2 r_{N_r}} & -L_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_{k-1} r_1} & M_{r_{k-1} r_2} & M_{r_{k-1} r_3} & \dots & L_0 & 0 & M_{r_{k-1} r_{k+1}} & \dots & 0 & -L_a \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ M_{r_{k+1} r_1} & M_{r_{k+1} r_2} & M_{r_{k+1} r_3} & \dots & M_{r_{k+1} r_{k-1}} & 0 & L_0 & \dots & \dots & -L_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{r_{N_r} r_1} - L_{f_{bN_r}} & M_{r_{N_r} r_2} & M_{r_{N_r} r_3} & \dots & M_{r_{N_r} r_k} & 0 & M_{r_{N_r} r_{k+1}} & \dots & M_{r_{N_r} r_{N_r}} & -L_a \\ -L_a & -L_a & -L_a & \dots & -L_a & 0 & \dots & -L_a & \dots & -L_a \end{bmatrix} \sum_{k=1}^{N_r} -L_a \tag{I.52}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_0 & -R_b & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -R_b & -R_a \\ -R_b & R_0 & -R_0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -R_b & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_0 & -0 & \dots & 0 & 0 & -R_a \\ \vdots & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_b & R_0 & R_a \\ -R_a & -R_a & -R_a & \dots & -R_a & -R_a & -0 & \dots & -R_a & -R_a & \sum_{k=1}^{N_r-1} -R_a \end{bmatrix} \tag{I.53}$$

Dans le cas général, s'il y a un grand nombre de portions d'anneaux cassées ( $k$ ), le modèle d'équations sera diminué de  $k$  équations, avec l'annulation des mailles liées à ces portions.

**Conclusion**

D'après l'étude que nous avons faite dans ce chapitre sur le moteur asynchrone, on a conclu que ce moteur présenter plusieurs avantages par rapport autres moteur en matière de réduction du cout d'achat et d'exploitation, et fonctionnement a grand vitesse et puissance. Cependant, le Choi optimal du moteur reste une question très important dont le but est d'exploiter au maximum les capacités du moteur asynchrone.



## *Chapitre 2*

*Méthodologie de diagnostic des défauts par les ondelettes*

## II.1. Introduction

Le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application. Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver la cause d'une défaillance ou d'un défaut. En général, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers, que l'on retrouve souvent sous le nom: FDI (Fault Detection and Isolation). Le rôle d'une telle procédure est de fournir une information sur l'apparition d'un défaut et sa provenance le plus rapidement possible. Les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70. En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications [20].

Ce chapitre est spécifié au diagnostic des défauts d'une MAS par les ondelettes.

## II.2. Définition du diagnostic

La définition de ce dernier, adoptée par les instances internationales de normalisation, est la suivante : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test » [20].

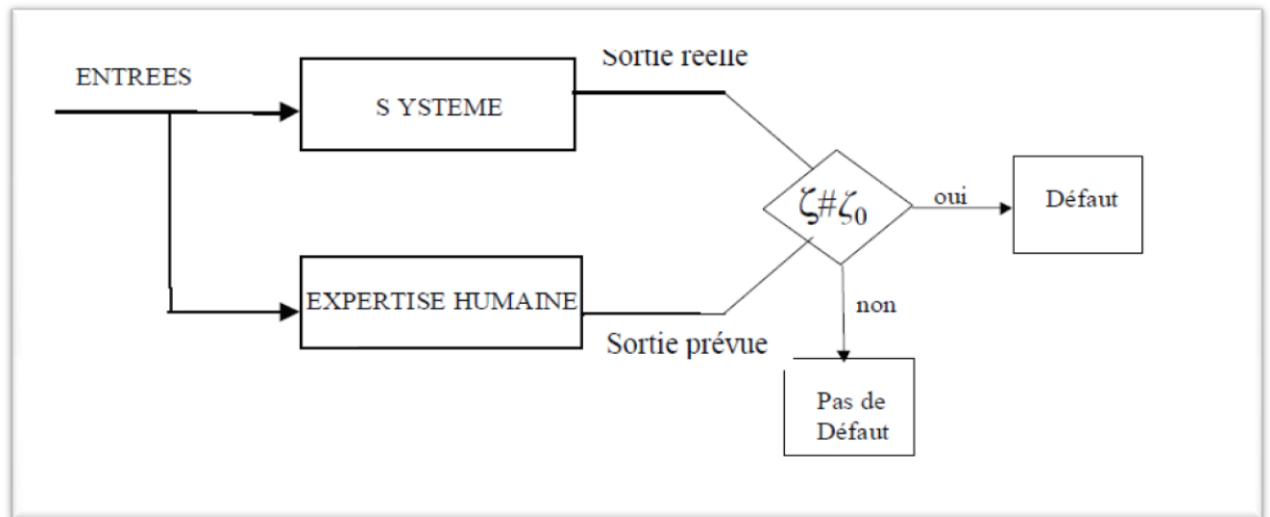
## II.3. Les méthodes de diagnostic

La connaissance et le raisonnement sont deux éléments clés dans la solution d'un problème. D'après Puppe [21], le diagnostic est, au niveau conceptuel, une distribution systématique des symptômes en diverses catégories de défauts. Par rapport à la connaissance et au raisonnement deux grandes classes de méthodes de diagnostic existent :

- ✓ Les méthodes externes et internes : ces méthodes reposent sur la connaissance du modèle. Les méthodes externes utilisent la connaissance issue de l'expertise humaine, tandis que les méthodes internes dépendent de la connaissance obtenue à partir de modèles mathématiques du système.
- ✓ Les méthodes inductives et déductives : le type de raisonnement utilisé dans la résolution du problème constitue la principale caractéristique de ces méthodes.

### II.3.1. Les méthodes externes

Le principe de causalité établit que "chaque effet (symptôme) a une cause (défaut) ; les mêmes causes dans les mêmes conditions auront les mêmes effets". Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine acquise par apprentissage. Cette méthode, illustrée par la figure (II.1) emploie un module de reconnaissance [22].



**Figure II.1 :** Méthode externe de diagnostic.

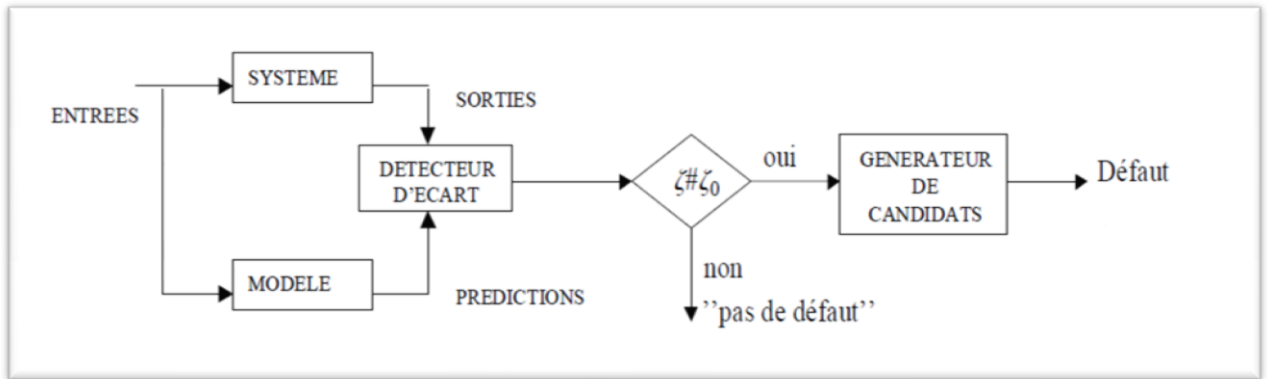
Le module de reconnaissance utilise les observations issues du système, des entrées et des sorties, afin de trouver les relations de cause à effet. Dans ces méthodes de diagnostic le facteur déterminant est l'algorithme de classification. D'après [22] cinq types d'algorithmes de classification existent :

- ✚ Algorithme de classification statistique ;
- ✚ Algorithme de classification géométrique ;
- ✚ Algorithme de classification polynomiale ;
- ✚ Algorithme de classification par réseaux de neurones ;
- ✚ Algorithme de classification floue.

### II.3.2. Les méthodes internes

La connaissance du modèle permet de décrire les relations de cause à effet. Ces méthodes requièrent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèles mathématiques. Ces méthodes, comme indiqué à la figure(I.2), utilisent un modèle pour reproduire le comportement (prédictions) du système. Les écarts sont obtenus par la comparaison des sorties et des prédictions. Finalement le

générateur de candidats utilise les écarts afin de trouver les relations de cause (défaut) à effet (symptôme) [39].



**Figure II.2 :** Méthode interne de diagnostic

Les méthodes internes de diagnostic se distinguent selon le modèle utilisé :

- Modèle de simulation : c'est une description de la structure physique et du comportement du système. Les modèles analytiques utilisés dans ce mode de diagnostic sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert. Les perturbations sont prises en compte de manière additive à travers des matrices, les défauts sont pris en compte soit de la même manière soit en modifiant la structure même du modèle. C'est dans cet esprit que nous avons développé notre modèle de simulation [23].

- Equations de parité : d'après Patton et al [23], une relation ou équation qui génère un résidu est appelée relation ou équation de parité. Les équations de parité primaires peuvent être obtenues à partir des équations qui décrivent la structure et le comportement du système et les équations de parité additionnelles sont obtenues par l'intermédiaire de transformations afin d'améliorer la tâche de diagnostic

- Observateurs : un module capable d'engendrer une approximation du vecteur d'état est appelé estimateur d'état ou observateur d'état. Le modèle est décrit sous une représentation de variables d'état. L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic [40].

- Estimation paramétrique : l'estimation paramétrique est la détermination des valeurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système. Il s'agit de déterminer les valeurs numériques des coefficients des équations qui décrivent, au niveau de la structure, le modèle du système [40].

- Modélisation des signaux : dans cette méthode, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts. L'analyse spectrale plus particulièrement est utilisée depuis de très nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux défauts (rupture de barres, dégradation des roulements...) se traduisent par l'apparition de fréquences caractéristiques directement liées à la vitesse de la machine [40].

### **II.3.3.les méthodes inductives**

Ces méthodes de diagnostic correspondent à une approche montante ou recherche en avant. Il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système. Ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons afin de trouver le défaut [40].

### **II.3.4.Les méthodes déductives**

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes. A partir d'une connaissance a priori du défaut, la méthode déductive doit trouver quels sont les effets dans le système. Une vérification des « effets trouvés » par rapport aux « effets possibles » permet de confirmer ou d'infirmer l'existence du défaut, ce qui justifie notre raisonnement [40].

Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou arrière) soit une combinaison de raisonnements (avant et arrière). Dans ce dernier cas, le raisonnement est appelé raisonnement mixte ou avant-arrière. La connaissance « a priori » de la cause (défaut) implique la connaissance de certains effets (symptômes) [40].

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons plus particulièrement à la détection de défauts. Notre méthodologie repose sur une connaissance du fonctionnement du système à partir d'un modèle mathématique, ce qui est en accord avec le principe des méthodes internes de diagnostic. Nous développerons plus particulièrement les méthodes par modélisation des signaux.

## **II.4. Méthodes de diagnostic de défauts dans les machines électriques**

Pour effectuer le diagnostic d'une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de symptômes, tels que le bruit, la température, les vibrations...etc. En s'appuyant sur leurs expériences, ces derniers sont dus à des

modifications des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables ou non. Pour effectuer un diagnostic, il est nécessaire de procéder à une ou des analyses afin d'interpréter les signaux issus des capteurs tant sur le plan fréquentiel que temporel. Parmi tous les signaux permettant d'établir un diagnostic, ceux-ci peuvent provenir de la mesure du courant absorbé par le moteur électrique, le carré de ce courant, la puissance instantanée, le vecteur de Park....

Il est important de savoir que les différentes méthodes de diagnostic sont classées selon les approches auxquelles elles appartiennent. En effet, il existe deux approches [24] :

- Approche sans modèle,
- Approche avec modèle.

#### **II.4.1. Méthode de diagnostic avec modèle**

Deux approches peuvent être utilisées pour diagnostiquer les défauts à partir des modèles paramétriques.

- La première repose sur le suivi des paramètres électriques caractérisant les modèles.
- La deuxième approche consiste à analyser les résidus générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller.

#### **II.4.2. Méthodes de diagnostic sans modèle**

Ces méthodes se fondent sur l'analyse des mesures que fournit la machine lors de son fonctionnement. Une comparaison entre le spectre du courant d'alimentation et celui du signal fourni par un capteur de vibration montre que l'utilisation des courants statoriques est très intéressante pour le diagnostic, puisque les informations présentes dans l'analyse des courants englobent celles trouvées dans l'analyse vibratoire et celles liées aux phénomènes électriques. Il existe plusieurs méthodes de diagnostic sans modèle parmi-lesquels :

- ✚ Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites.
- ✚ Diagnostic par mesure du couple électromagnétique.
- ✚ Diagnostic par analyse du courant statorique.
- ✚ Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques de la machine.
- ✚ Diagnostic par analyse du vecteur de Park.
- ✚ Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI).
- ✚ Diagnostic par utilisation des techniques de traitement de signal.

Dans ce que suit, on présente brièvement les techniques de traitement de signal utilisé dans le diagnostic (les transformées de Fourier rapide (FFT) et la transformée en ondelettes (TO.....) [25].

#### II.4.2.1. Techniques de traitement de signal utilisé dans le diagnostic

Les techniques de traitement du signal appliquées à la détection des défaillances dépendent des conditions de fonctionnement de la machine. Ces conditions peuvent être très différentes selon que la vitesse et/ou le couple sont constante ou variable [26]. Parmi ces techniques on peut citer :

##### II.4.2.1.1. Transformée en Série de Fourier

Au 19<sup>ème</sup> siècle 1822, le mathématicien français J. Fourier a montré qu'une fonction périodique pouvait être décomposée en une somme infinie de fonctions exponentielles périodiques complexes. Soit  $x(t)$  et  $X(f)$  deux signaux représentant la même grandeur physique, mais dans deux domaines différents.  $x(t)$  est le signal représentatif dans le domaine (amplitude-temps),  $x(f)$  est le signal représentatif dans le domaine (amplitude fréquences).

La transformée de Fourier permet le passage entre deux domaines de représentations complémentaires ; temporelle et fréquentielle grâce à l'intégrale qui porte son nom et qui s'exprime, pour une fonction  $x(t)$ , par :

$$g_{a,b}(t) = g(t - b)e^{i2\pi at} \quad (\text{II.1})$$

De même, si l'on veut retrouver  $x(t)$  à partir de  $x(f)$ , il faut connaître le spectre pour toutes les fréquences jusqu'à l'infini :

$$c(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)g_{a,b}(t)dt \quad (\text{II.2})$$

Comme l'information fournie par l'intégrale correspond à toutes les instances de temps, la Transformée de Fourier permet de dire en quelles quantités les fréquences existent mais elle ne dit pas à quels instants ces fréquences sont présentes.

Cette analyse convient pour les signaux stationnaires où chaque composante de fréquence existe à tout instant, mais ne convient pas aux signaux non stationnaires [27]-[28].

##### II.4.2.1.2. Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG)

En 1940, D. Gabor a présenté la première forme de représentation « Temps – Fréquence » appelée Transformée de Fourier Fenêtrée (TFF). Sa technique consiste à découper le signal en différentes plages de longueur fixe. Cette technique se base sur une analyse locale c'est-à-dire, chaque plage est étudiée séparément des autres par

l'analyse traditionnelle de Fourier, juxtaposant les résultats sous la forme d'une représentation « temps – fréquence » ou « spectrogramme » C'est un outil de base pour l'analyse des signaux non-stationnaires. Le signal est supposé stationnaire sur chaque fenêtre [40].

La *TFCT* consiste en la décomposition du signal  $s(t)$  suivant une famille de fonctions  $g_{a,b}$  Qui dérivent toutes d'une même « fonction fenêtre »  $g(t)$  par :

- Translation en temps (paramètre  $b$ )
- Modulation en fréquence (paramètre  $a$ )

La fonction  $g$  est multipliée par une fonction sinusoïdale de fréquence  $a$

$$g_{a,b}(t) = g(t - b)e^{i2\pi at} \quad (\text{II.3})$$

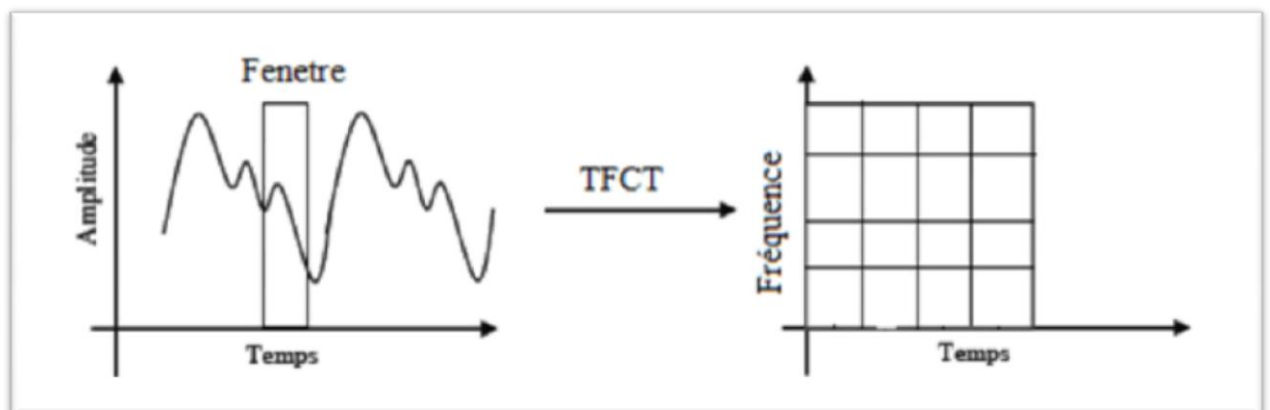
Où le terme  $b$  localise une fenêtre d'analyse. Cette transformation s'écrit:

$$c(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)g_{a,b}(t)dt \quad (\text{II.4})$$

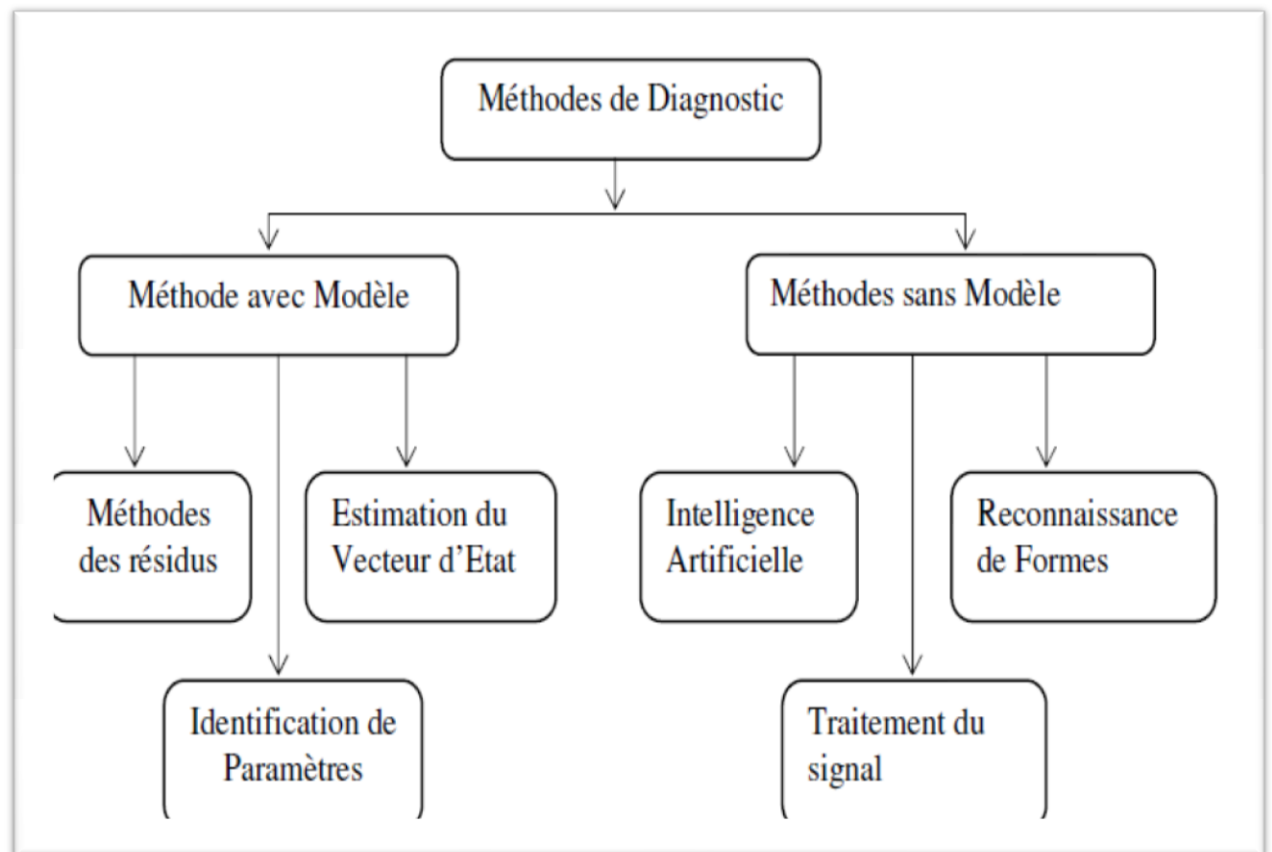
$C(a, b)$  est la transformée de Fourier fenêtrée du signal  $s(t)$  sur une fenêtre de largeur  $b$ , selon une fréquence  $a$ .

Les inconvénients majeurs de cette transformation sont :

- On ne peut pas savoir quelle fréquence existe à un instant donné.
- la taille de la fenêtre d'analyse fixe, toutes les fréquences seront analysées avec la même résolution.
- Les résolutions temporelles et fréquentielles ne varient pas en fonction du temps et de la fréquence [28].



**Figure II.3:** pavage de la transformée de fourrier à fenêtre glissante [29].



**Figure II.4 :** Les différentes méthodes de diagnostic.

## II.5. La Transformée en Ondelette

### II.5.1. Historique

La théorie des ondelettes est récente, elle est née au milieu des années 80. Et pourtant, elle est déjà utilisée dans de nombreux domaines qu'ils soient théoriques ou pratiques: analyse harmonique, vision ordinateur, traitement du signal, compression d'images, analyse de turbulences etc. son succès est dû à son adaptation aux données et à sa facilité d'implémentation.

Elle a été introduite dans le langage mathématique par Jean Morlet et Alex Grossmann en 1984. Terme initialement français, il a été ensuite traduit en anglais par wavelet, avec le terme wave (onde) et le diminutif let (petite).

En 1986, Yves Meyer, reconnu comme un des fondateurs de la théorie des ondelettes, rassembla toutes les découvertes précédentes, il en a dénombré 16, puis définit les ondelettes orthogonales. En 1986 Stéphane Mallat fit le lien entre les ondelettes et l'analyse multi résolution. Enfin, en 1987, Ingrid Daubechies mit au point des ondelettes orthogonales appelées ondelettes de Daubechies [30].

### II.5.2. Définition

Une ondelette est une forme d'onde de la durée limitée qui a une valeur moyenne zéro:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (\text{II.1})$$

Il est un objet mathématique utilisé pour le traitement du signal. Elle permet en particulier de décomposer un signal dans un domaine fréquentiel dont la précision varie selon la bande de fréquences considérée [29]-[31].

$\Psi(t)$  Représente l'ondelette mère

Cette dernière est dilatée avec un paramètre d'échelle  $s$ , et translatée par  $u$ :

$$\Psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi \frac{t-u}{s} \quad (\text{II.2})$$

### II.5.3. La famille d'ondelettes

Il y a plusieurs ondelettes mères utilisées pour le calcul de la transformée en ondelette des signaux analysés. Chacune d'entre elles a un domaine d'application défini de la forme du signal étudié. Le tableau (II.1) contient les familles les plus usuelles [29] :

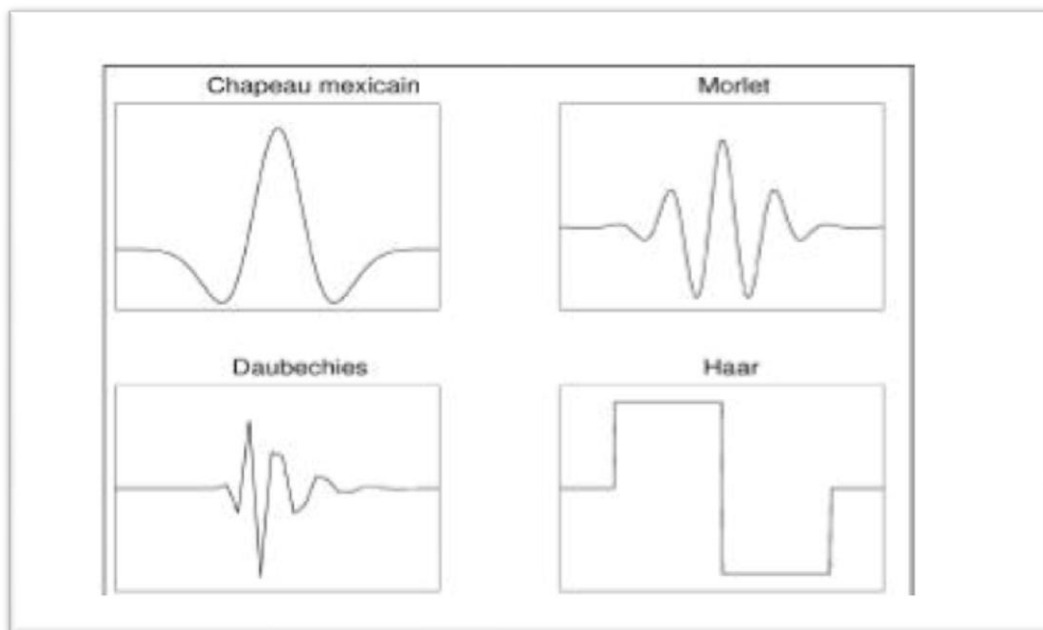
**Tableau II.1:** Familles d'ondelettes

Nom des familles d'ondelettes	Abréviations
Ondelette de Haar	<i>Haar</i>
Ondelettes de Daubechies	<i>Db</i>
Ondelettes Symlets	<i>Sym</i>
Ondelettes Coiflets	<i>Coif</i>
Ondelettes biorthogonales	<i>Bior</i>
Ondelettes de Meyer	<i>Meyr</i>
Ondelettes gaussiennes	<i>gaus</i>
Ondelettes gaussiennes complexes	<i>Cgaus</i>
Ondelettes Mexicain	<i>Mexh</i>
Ondelettes de Morlet	<i>Morl</i>
Ondelettes de Morlet complexes	<i>Cmor</i>
Ondelettes de shannon complexes	<i>Shan</i>

Les familles d'ondelettes peuvent être caractérisées par quatre propriétés principales : existence de filtres associés, orthogonalité ou bi orthogonalité, support compact ou non compact, ondelettes réelles ou complexes. Le tableau ci-dessous résume ces diverses propriétés.

**Tableau II.2 :** Les propriétés principales des ondelettes

Ondelettes à filtres		Ondelettes sans filtres	
A support compact		Support non compact	
Orthogonales	Biorthogonales	Orthogonales	Réelles / Complexes
<i>Db, haar, sym, cmor, coif</i>	<i>Bior</i>	<i>Meyr</i>	<i>Gaus, mexh, morl</i> / <i>Cgau, shan, cmor</i>



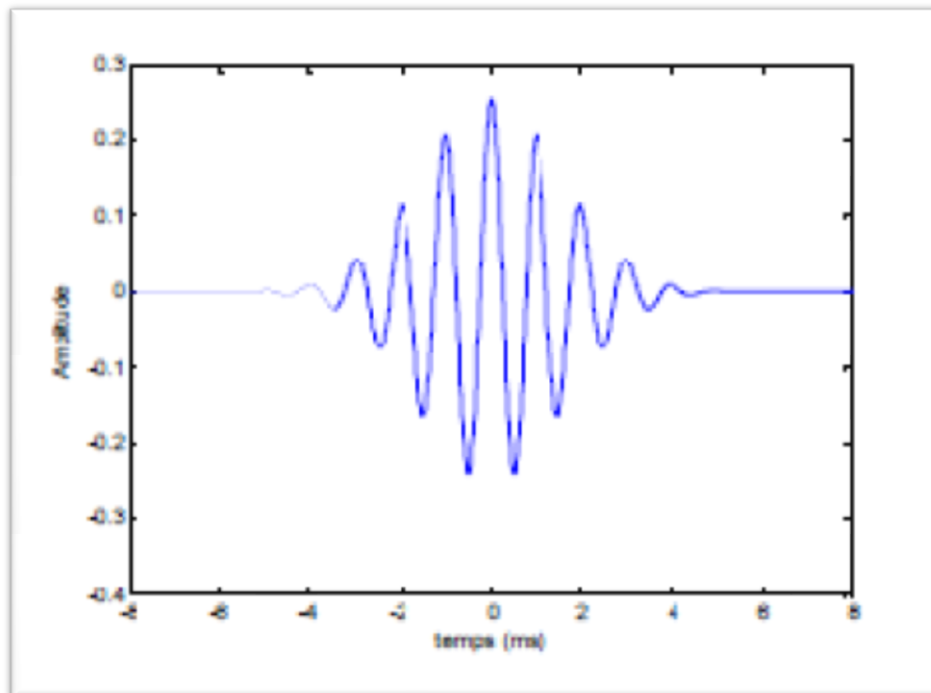
**Figure II.5:** Quelques formes des ondelettes usuelles

**II.5.3.1 Ondelette de Morlet**

Cette fonction ne vérifie qu'approximativement la condition d'admissibilité, elle est définie par :

$$\Psi(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} Ce^{\frac{-x^2}{2}} \cos(5x) dx \tag{II.3}$$

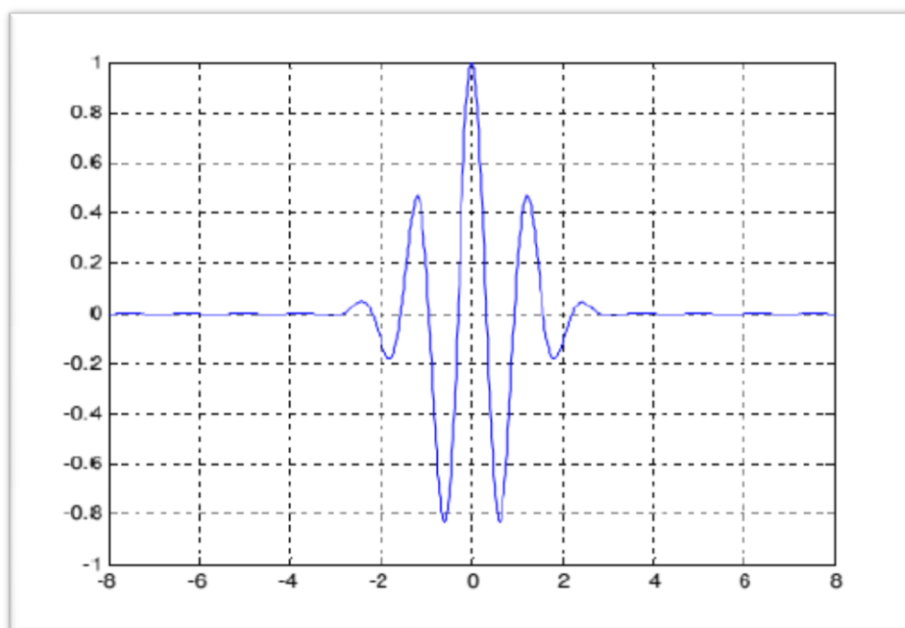
Où « C » est une constante de normalisation de reconstruction. La figure (II.5) montre la forme de cette ondelette [28].



**Figure II.6 :** Ondelette de Morlet.

### II.5.3.2 Ondelettes de Meyer

L'ondelette de Meyer est l'une des premières ondelettes. Elle a été construite par Y.Meyer au milieu des années 1980. Il s'agit d'une ondelette orthogonale qui n'a pas un support compact [32]. La forme de cette ondelette est donnée par la figure II.7:



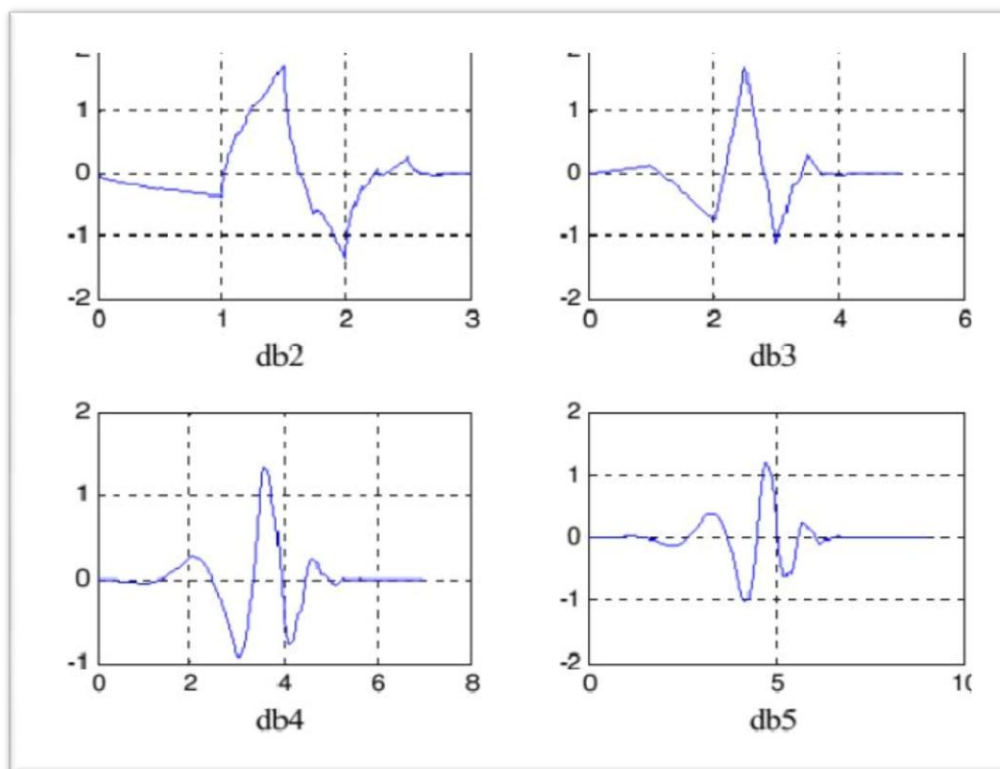
**Figure II.7.** Ondelettes de Meyer

### II.5.3.3. Ondelettes de Daubechies

Cette famille d'ondelettes à un paramètre permettant de manipuler des ondelettes orthogonales à support compact de régularité arbitraire. Pour  $N$ , c'est l'ordre de l'ondelette  $dbN$ . Pour  $N = 1$ ,  $db1$  est appelée ondelette de Haar, c'est la plus simple et la plus ancienne des ondelettes. Elle est bien localisée en espace, mais, en contrepartie, elle est discontinue et sa transformée de Fourier oscille beaucoup donnant une mauvaise localisation en fréquence. Elle est définie par [29] :

$$h(t) \begin{cases} 1 \text{ pour } 0 \leq t \leq 1/2 \\ -1 \text{ pour } \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Hormis  $db1$ , les ondelettes de cette famille n'ont pas d'expression explicite et sont asymétriques. Cependant, leur régularité augmente avec l'ordre et permet une analyse orthogonale [28]. Les ondelettes de cette famille pour les ordres 2, 3, 4 et 5 sont présentées dans la figure (II.8) :



**Figure II.8 :** Ondelettes de Daubechies ( $dbN$ ).

### II.5.4. Choix de la meilleure ondelette

Le critère de choix de la meilleure ondelette mère reste un problème à déterminer. Malheureusement, il n'y a pas d'ondelette qui soit meilleur que les autres, tout dépend de l'application. Dans certain cas, l'ondelette la plus simple (haar) sera optimale. Pour d'autres applications, ce sera le pire des choix possibles.

En pratique le choix de la meilleur ondelette se base sur :

- **la forme d'ondelette analysante** : plus la fonction ressemble à l'événement à traiter, plus l'analyse ne sera efficace.
- **les propriétés mathématiques** (moments nul, régularité,...)
- **ad hoc** : une ondelette qui permet un traitement de signal efficace est acceptable, même si elle n'est pas la meilleure possible. De toute façon, une ondelette optimale pour les signaux mesurés lors d'une certaine expérimentation dans un domaine donné ne le serait pas nécessairement lors d'une autre prise de mesures pour un autre domaine [28].

### II.5.5. Principe La Transformée en ondelettes

La transformée en ondelettes est un outil récent de traitement du signal [32], son principe repose sur la décomposition d'un signal en une famille d'ondelettes d'échelles et des positions différentes. Ces ondelettes sont obtenues en dilatant ou contractant une ondelette mère et en la translatant le long de l'axe temporel. La formule utilisée pour la transformée en ondelettes est :

$$\Psi(a, b) = 1/\int a \Psi(t - b)/a \quad (\text{II.5})$$

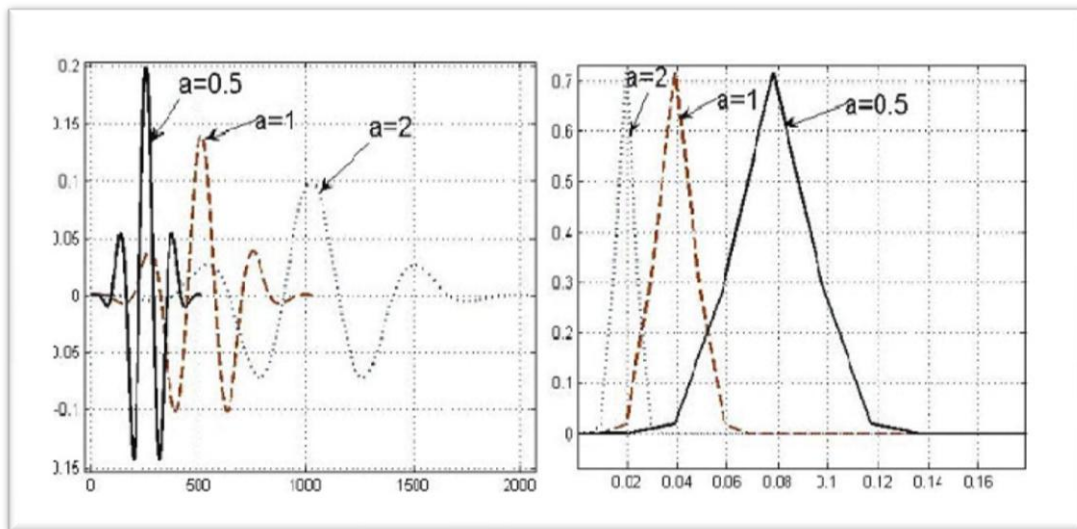
Le paramètre (b) de l'ondelette représente sa translation sur l'axe du temps, par contre (a) est le paramètre d'échelle ( $a \neq 0$ ), donne le contrôle de la fréquence de l'ondelette. Sachant que  $a = 1/f$ . « F » Étant la fréquence.

- Si  $a < 1$ , l'ondelette  $\Psi_{a,b(t)}$  devient contracter et son contenu fréquentiel penchera vers les hautes fréquences va privilégier la localisation temporelle.
- Si  $a > 1$ , l'ondelette  $\Psi_{a,b(t)}$  est très large, et le contenu fréquentiel penchera vers les basses fréquences du plan d'analyse et permettra une meilleure localisation en fréquence.

Par le fait de comprimer ou d'étirer les ondelettes pour modifier leurs fréquences, les ondelettes s'adaptent automatiquement aux différentes composantes du signal. Une fenêtre étroite permet d'analyser les phénomènes transitoires de haute fréquence alors qu'une fenêtre large analyse la composante longue durée de basse fréquence. C'est une procédure de multi-résolution [30]. La Figure (II.9) présente les propriétés temporelles (image de gauche) et fréquentielles (image de droite) de 3 échelles différentes d'une ondelette :

- $a = 0.5$  correspond à une ondelette contractée.
- $a = 1$  correspond à l'ondelette de base ou l'ondelette mère.

- $a = 2$  correspond à une ondelette dilatée.



**Figure II.9:** Propriétés d'une ondelette mère, contractée et dilatée [33].

## II.5.6. Les types de la transformée en ondelette

### II.5.6.1. La transformation en ondelette continue

La transformée en ondelette continue (TOC) d'un signal  $x(t)$  est donnée par :

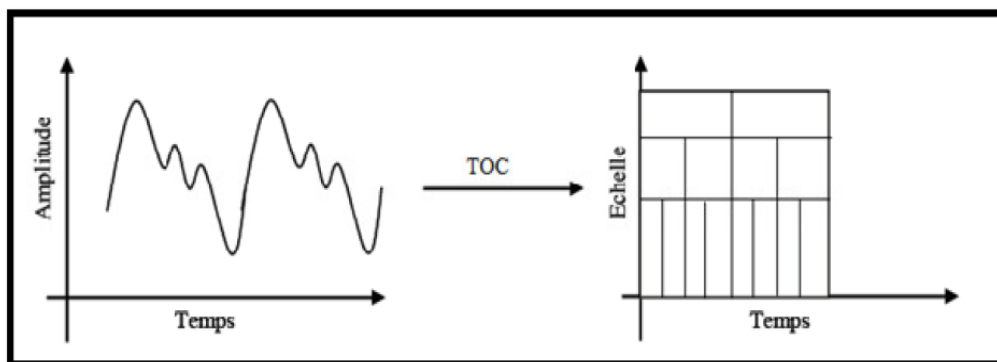
$$W(a, b) = 1 / \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi \frac{t-b}{a} x(t) dt \quad (\text{II.6})$$

Où  $\Psi(t)$  : est l'ondelette mère analysante.

$a$  : est un facteur d'échelle de dilatation temporelle.

$b$  : est un facteur de translation dans le temps.

Le résultat de la transformée en ondelette continue (TOC) est donc des coefficients  $W$  en fonction de  $a$  (facteur d'échelle) et de  $b$  (facteur de translation) (figure II.10). Les coefficients  $W(a,b)$  décrivent la corrélation entre le signal à analyser et l'ondelette mère analysante. La transformation en ondelette continue produit une représentation temps-échelle similaire à celle de la représentation temps fréquence produite par la transformée de Fourier à fenêtre glissante.



**Figure II.10:** Analyse temps-échelle.

Les étapes de l'algorithme de la *TOC* sont les suivantes :

1. Choisir l'ondelette mère  $\psi(t)$ .
2. Initialisation de  $a$  et  $b$ .
3. L'ondelette mère est placée au début du signal au point qui correspond au temps  $t=0$ .
4. Calculer la valeur de  $W(a,b)$ .
5. Translater (ou décaler) l'ondelette mère vers la droite par une valeur  $b$  à l'emplacement  $t = b$ .
6. Revenir à l'étape 4, jusqu'à ce que l'ondelette atteigne l'extrémité du signal, (une rangée des points sur le plan temps-échelle pour une valeur de  $a$  est maintenant accomplie).
7. Incrémentation de  $a$ .
8. Revenir à l'étape 3, jusqu'à une valeur désirée de  $a$  [31].

### II.5.6.2. La transformation en ondelette discrète

La transformée en ondelette discrète, ou TOD (en anglais : Discrete Wavelet Transform, ou DWT) est une technique fournit suffisamment d'information, tant pour l'analyse que pour la reconstruction du signal d'original, en un temps de calcul notablement réduit. Le TOD translate et dilate l'ondelette selon des valeurs discrètes des facteurs d'échelle et de translation telles que :

$$a = a_0$$

$$b = k b_0 a_0^j$$

Ou :

$$a_0 > 1 \quad b_0 > 0 \quad k, j \in \mathbb{Z}$$

Les coefficients de la TOD sont définie par:

$$\Psi(a_0, b_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi_{b_0}^{a_0}(t) dt \quad (\text{II.7})$$

$$\Psi_{b_0}^{a_0}(t) = |a_0^j|^{-1/2} \Psi\left(\frac{t - kb_0 a_0^j}{a_0^j}\right) \quad (\text{II.8})$$

On appelle transformée en ondelette discrète toute base d'ondelette travaillant avec un facteur d'échelle  $a = 2f$ , Ce type de la transformée est pratique en implémentation sur tout système numérique.

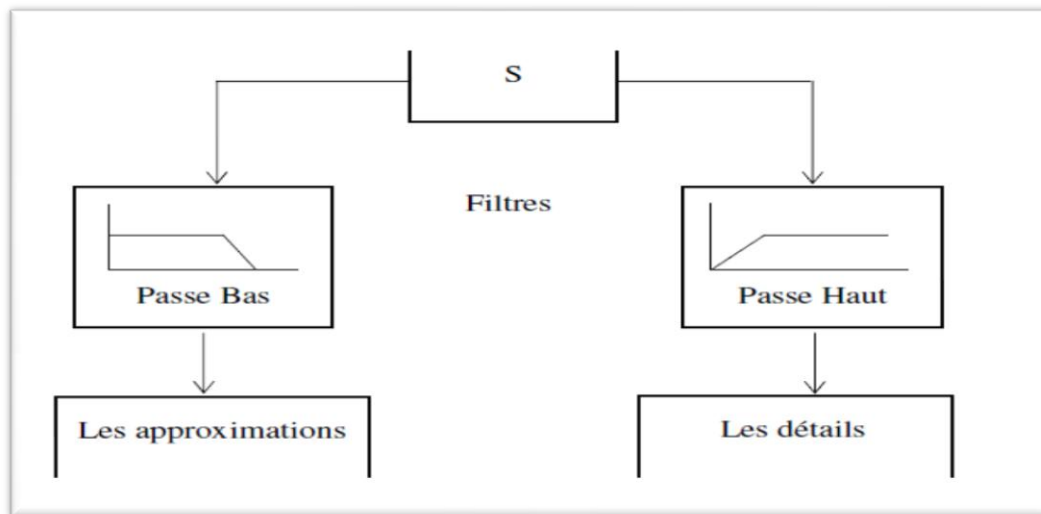
Dans la majorité des cas, on utilisé  $b_0 = 2$   $a_0 = 2$ , on obtient la transformée en ondelette discrète dyadique [27].

### II.5.6.3. La multi-résolution

Cette technique consiste à décomposer le signal avec la transformée en ondelette en passant par deux filtres. L'un est un passe bas pour avoir les approximations qui représentent l'allure générale du signal, et l'autre est un passe haut pour avoir ses détails.

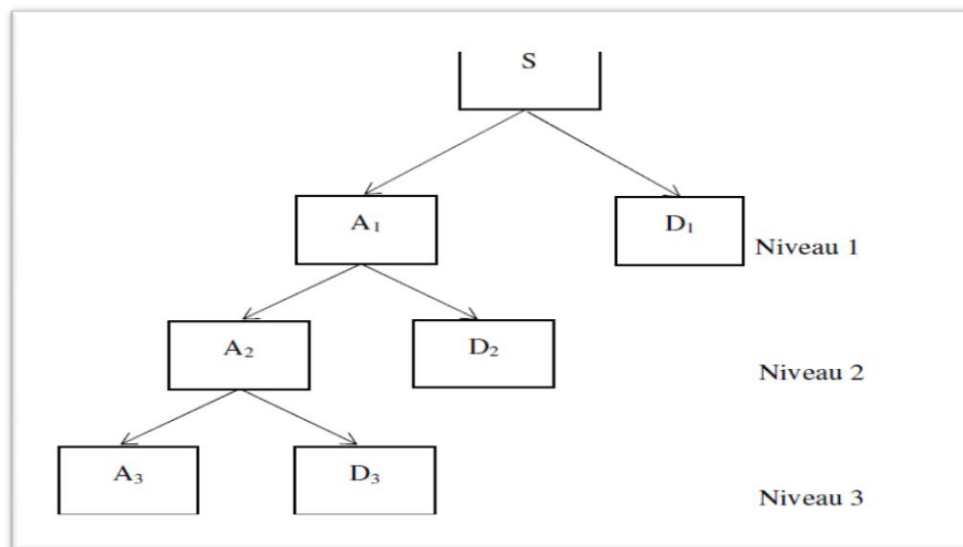
La transformée en ondelettes discrète décompose le signal en deux parties [34] :

- les approximations qui correspondent à la basse fréquence.
- les détails qui correspondent à la haute fréquence.



**Figure II.11:** Transformée en ondelette par multi résolution

Le processus de décomposition peut être réitéré, de sorte qu'un signal  $s(t)$  peut être décomposé en plusieurs composantes de basse résolution : ceci s'appelle l'arbre de décomposition d'ondelette (voir figure ci-après).



**Figure II.12:** L'arbre de décomposition d'ondelette a trois niveaux [35]

Donc le signal décomposé s'écrit :

$$S(t)=D1+D2+D3+A3 \quad (\text{II.9})$$

Ici le niveau présenté est de valeur 3 comme exemple.

La décomposition en multi-niveaux est réalisée à l'aide de l'ondelette mère 'Daubechies', le niveau de décomposition nécessaire est calculé d'après la relation suivante [36] :

$$n_{ls} = \text{int}\left(\frac{\log\left(\frac{f_s}{f}\right)}{\log(2)}\right) \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$f$  : Fréquence du fondamental.

$f_s$  : Fréquence d'échantillonnage.

### II.5.7. Avantages et inconvénients des ondelettes

La FFT montre ses limites dès lors où elle ne donne pas la localisation temporelle de ses composantes fréquentielles représentées par les pics du spectre, la solution est de calculer les spectres instantanés pour chaque pas temporel du signal. Les outils pour atteindre ce but sont appelés techniques d'analyse temps – fréquence telle que la technique des ondelettes. Le tableau suivant résume quelques avantages et inconvénients des méthodes de traitement de signal

**Tableau II.3** : L'étude comparative des différentes méthodes d'analyse vibratoires [37]..

Les méthodes de traitement du signal	Avantages (buts)	Inconvénients (limites)
Fast Fourier Transform (Transformée de Fourier Rapide) TFR	* Bien adaptée aux signaux stationnaires. * Excellent resolution fréquentielle.	* Ne permet pas d'obtenir d'information temporelle. * Analyse globale.
Short Time Fourier Transform (STFT) Transformée de Fourier de courte durée	* Beaucoup de précision par rapport au FFT. * Analyser le spectre sur des morceaux du signal.	* Fenêtre d'analyse fixée a priori. * Compromis précision temporelle / fréquentielle.
Wavelets (Ondelettes)	* Les ondelettes permettent une décomposition multi-échelle. * Elle permet d'obtenir l'information fréquentielle et temporelle simultanément.	* Les ondelettes ne peuvent pas résoudre tous les problèmes et il reste beaucoup de limitation propre aux ondelettes. * Transformée en ondelettes discrète a une résolution de fréquence très limitée et parfois la fonction de recherche est étalé sur deux échelles et ne peut pas être clairement détecté.

**II.6.CONCLUSION**

Un aperçu sur les ondelettes continues et discrètes appliqués aux signaux unidimensionnels a bien été détaillé à travers la décomposition en ondelettes discrètes et la décomposition en paquet d'ondelettes. Cette technique qui propose une analyse très fine des signaux permettra par la suite de construire un outil très efficace dans le domaine de traitement de signal en vue de diagnostiquer les machines asynchrones à cage.



## *Chapitre 3*

*Application d'ondelette au  
diagnostic des défauts  
rotoriques dans la MAS*

### III.1. Introduction

L'application de la transformée en ondelette dans le domaine du diagnostic des machines asynchrones à cage a été déjà développée à d'un rythme très rapide. Les analyses du signal sont l'une des méthodes les plus importantes utilisées pour la surveillance et le diagnostic de défaut, dont le but est de trouver une simple et efficace transformée des signaux originaux. Par conséquent, l'information importante contenue dans les signaux peut être extraite. La signature du courant statorique représente une source très riche en informations concernant les défauts qui se manifestent souvent dans la machine asynchrone, à cet effet la majorité des travaux du diagnostic sont fondus sur l'analyse du courant statorique soit dans sa partie transitoire ou dans sa partie permanente.

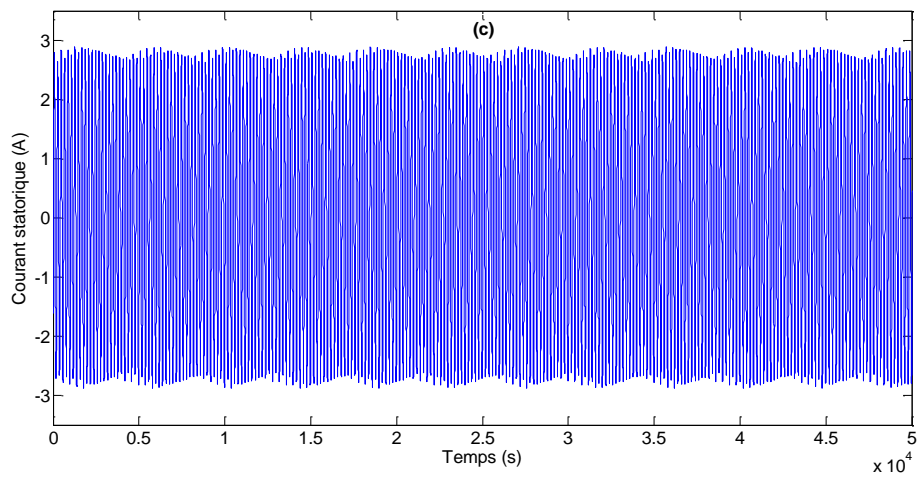
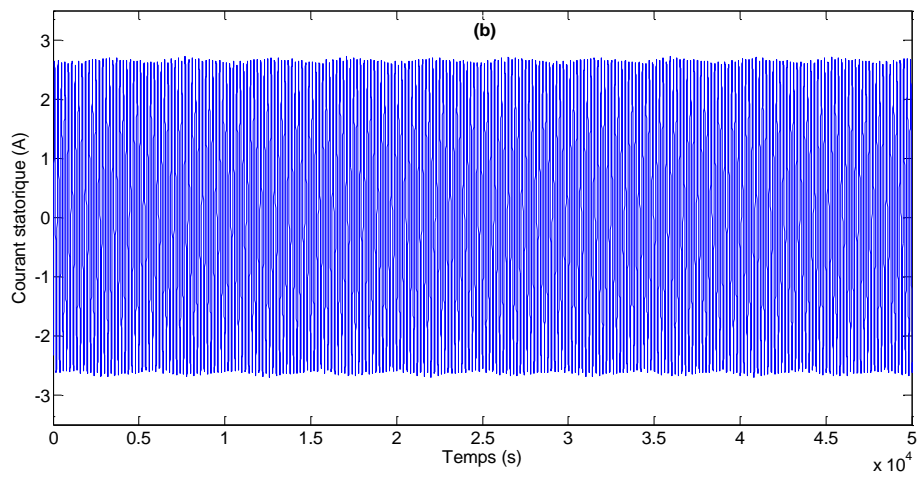
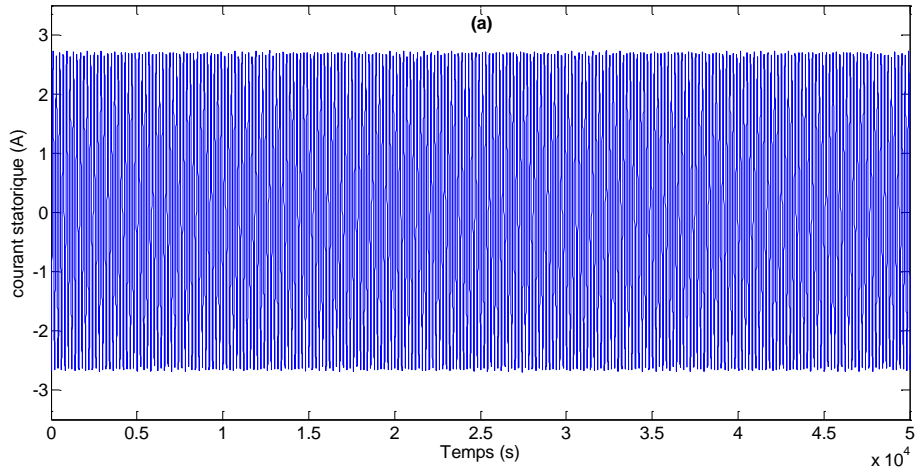
### III.2 DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI

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 PRESENTATIONS DE DIFFERENTS SIGNAUX RELEVES

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 (50%).



**Fig.3.1.** Evolution des courants statoriques pour un fonctionnement sain (a), pour un fonctionnement avec défaut de barres cassées (b) et pour un fonctionnement avec défaut de deux barres cassées (c)

### III.4 ANALYSE DU COURANT STATORIQUE PAR LA TECHNIQUE DES ONDELETTES

En vu la détection du défaut rotorique (cassure de barre). L'analyse du courant statorique est effectuée par deux types d'ondelettes discret à savoir la décomposition multi niveaux et la décomposition par paquet d'ondelettes.

Les résultats obtenus sont effectués pour une période d'échantillonnage de  $10^{-4}$  sur une durée totale de 1s.

#### III.4.1 Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelettes

La décomposition en multi niveau du courant statorique est réalisé à l'aide de l'ondelette mère « Daubechies », le niveau de décomposition nécessaire est calculé d'après la relation:

$$n_{ls} = \text{int}\left(\frac{\log\left(\frac{f_s}{f}\right)}{\log(2)}\right)$$

Avec  $f$ : fréquence du réseau,  $f_s$ : fréquence d'échantillonnage.

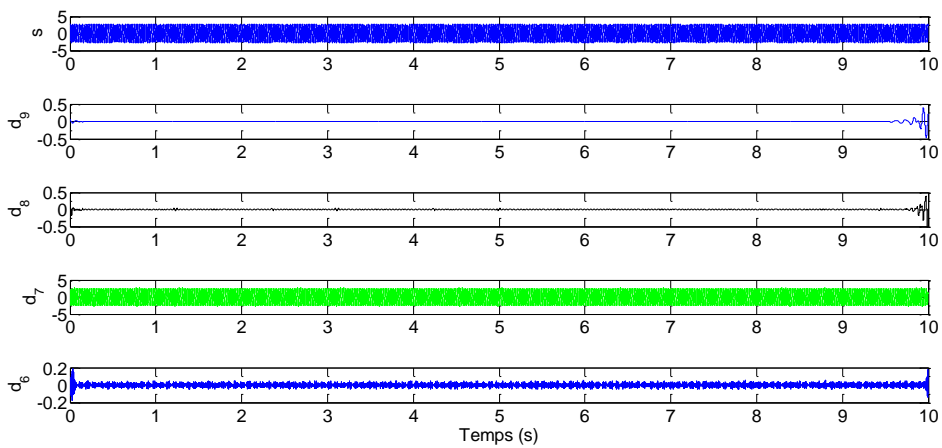
Connaissant  $f=50\text{Hz}$  et  $f_s=10\text{kHz}$ , on peut calculer le nombre de décompositions appropriés qu'est égales à :

$$n_{ls} + 2 = \text{int}\left(\frac{\log(10^4/50)}{\log(2)}\right) + 2 = \text{int}(7.6439) + 2 = 9\text{niveau}$$

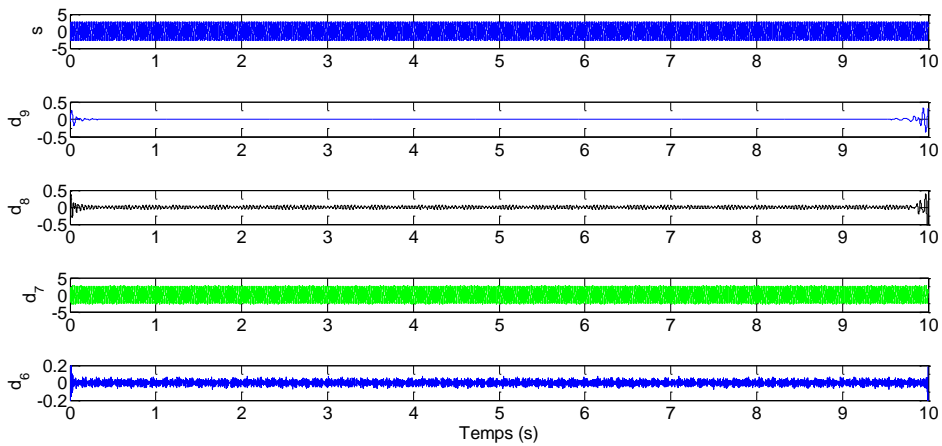
Le Tableau(III.1) indique les différentes bandes de fréquence obtenues par la décomposition en ondelettes discrète.

Niveau	Bandes de fréquences Approximations		Bandes de fréquences Détails	
$J=1$	$A1$	0-5000	$D1$	5000-10000
$J=2$	$A2$	0-2500	$D2$	2500-50000
$J=3$	$A3$	0-1250	$D3$	1250-2500
$J=4$	$A4$	0-625	$D4$	625-312.5
$J=5$	$A5$	0-312.50	$D5$	312.5-625
$J=6$	$A6$	0-156.25	$D6$	156.25-312.5
$J=7$	$A7$	0-78.125	$D7$	78.125-156.25
$J=8$	$A8$	0-39.0625	$D8$	39.0625-78.125
$J=9$	$A9$	0-19.5313	$D9$	19.53-39.0625

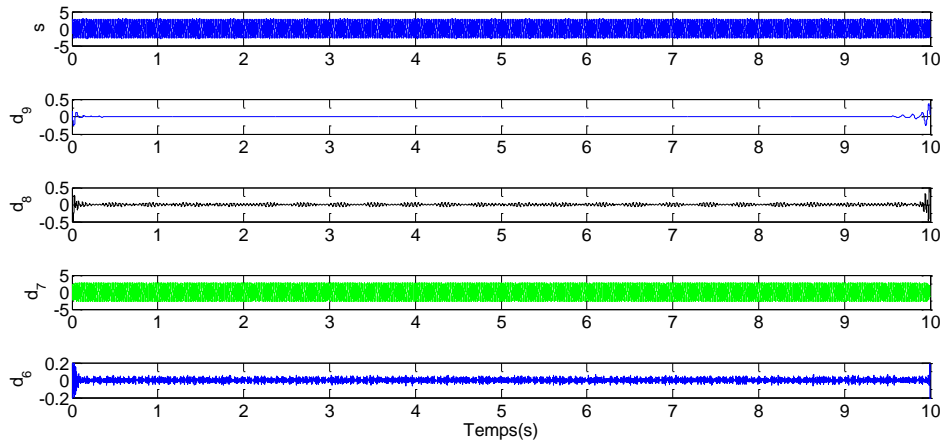
Tableau III.1 : Bandes de fréquences obtenues par la décomposition en multi niveau



(a)



(b)

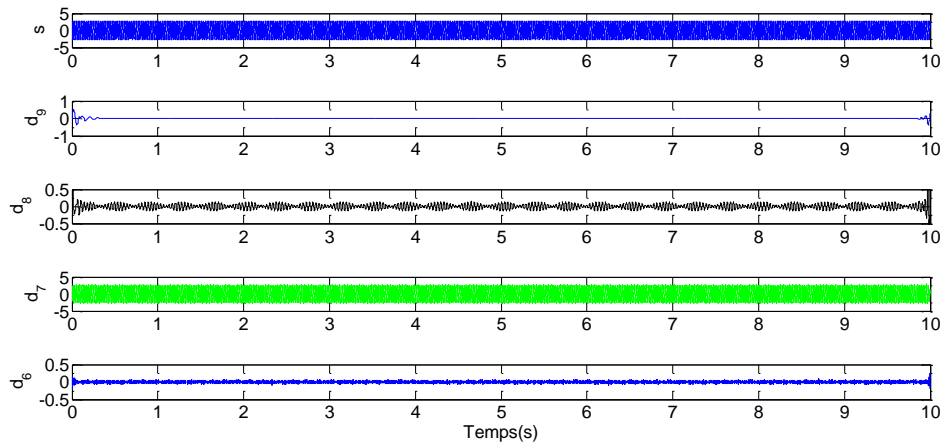


(c)

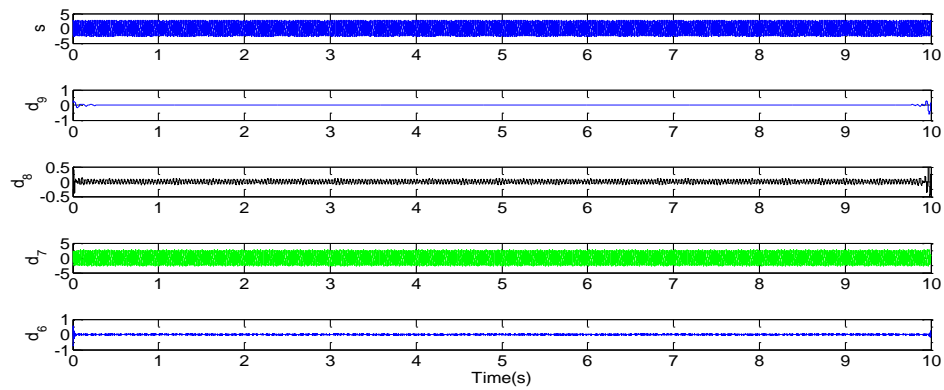
**Fig.3.2.** détails obtenus par l'ondelette *db44*

a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée,

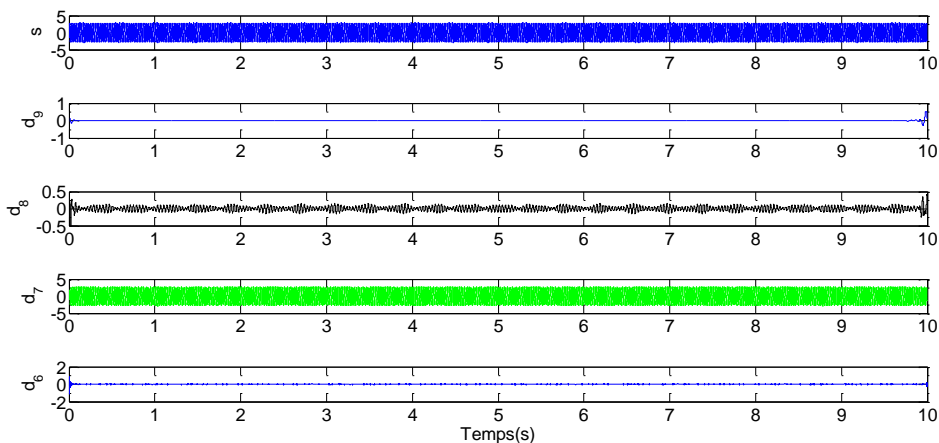
c) Machine avec deux barres cassées.



(a)



(b)

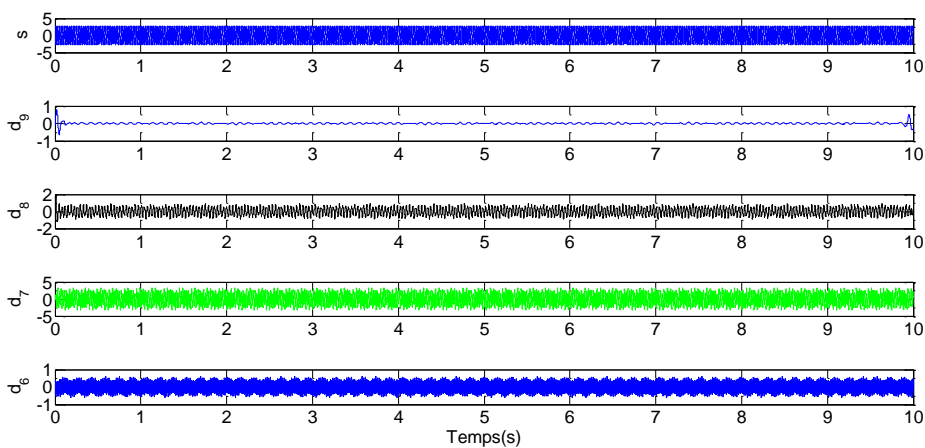


(c)

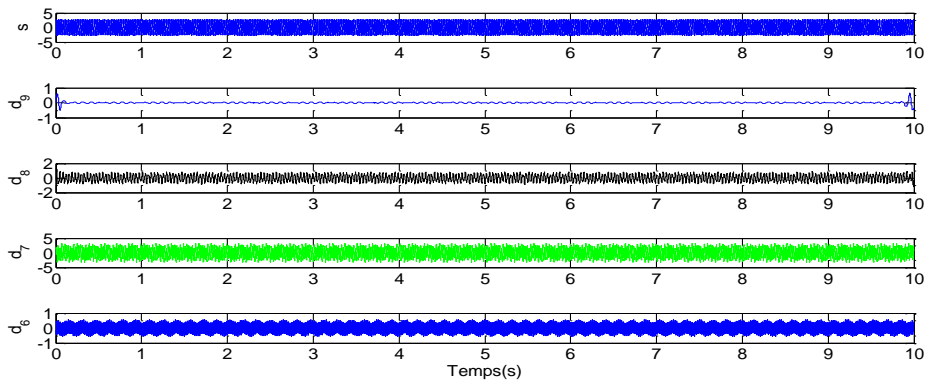
**Fig.3.3.** détails obtenus par l'ondelette *db24*

a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée,

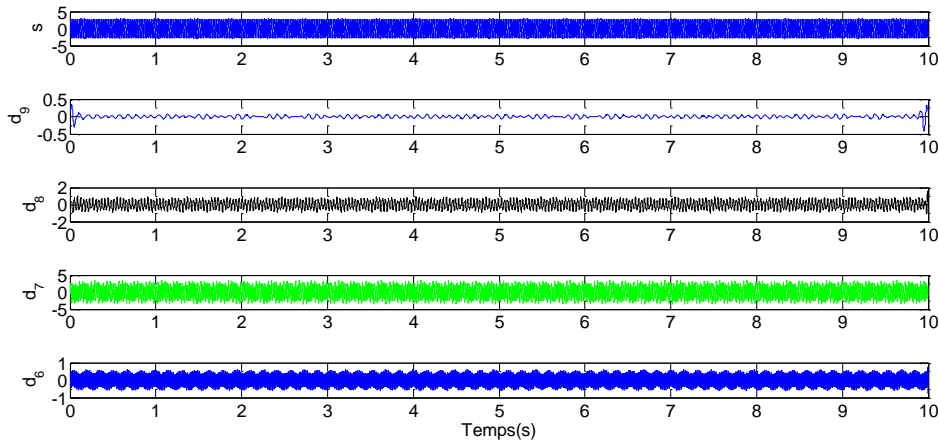
c) Machine avec deux barres cassées.



(a)



(b)



(c)

**Fig.3.4.** détails obtenus par l'ondelette *db6*

- a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée,  
c) Machine avec deux barres cassées.

Les figures (3.2), (3.3) et (3.4) représentent les signaux de détail (D9, D8, D7 et D6) obtenus par la décomposition en multi niveau de courant statorique pour un fonctionnement sain et avec d'une seule et deux barres cassées au rotor.

On compare les signaux de détail obtenus pour la machine avec défauts, les figures (3.3 et 3.4) avec l'état sain de la machine la figure (3.2). On remarque des perturbations qui manifestent sous forme d'oscillation aux coefficients ((D9, D8, D7 et D6), augmentée à l'état de défaut par rapport au cas sain de la machine.

### III.4.2 Energie de la décomposition d'ondelette

Quand le défaut des barres rotoriques, du moteur asynchrone apparaît, l'information de défaut du signal du courant statorique est incluse dans chaque bande de fréquence résultante de la décomposition en ondelettes ou en paquet d'ondelettes. En calculant l'énergie associée à chaque niveau ou à chaque nœud de décomposition, on peut construire un outil de diagnostic très efficace.

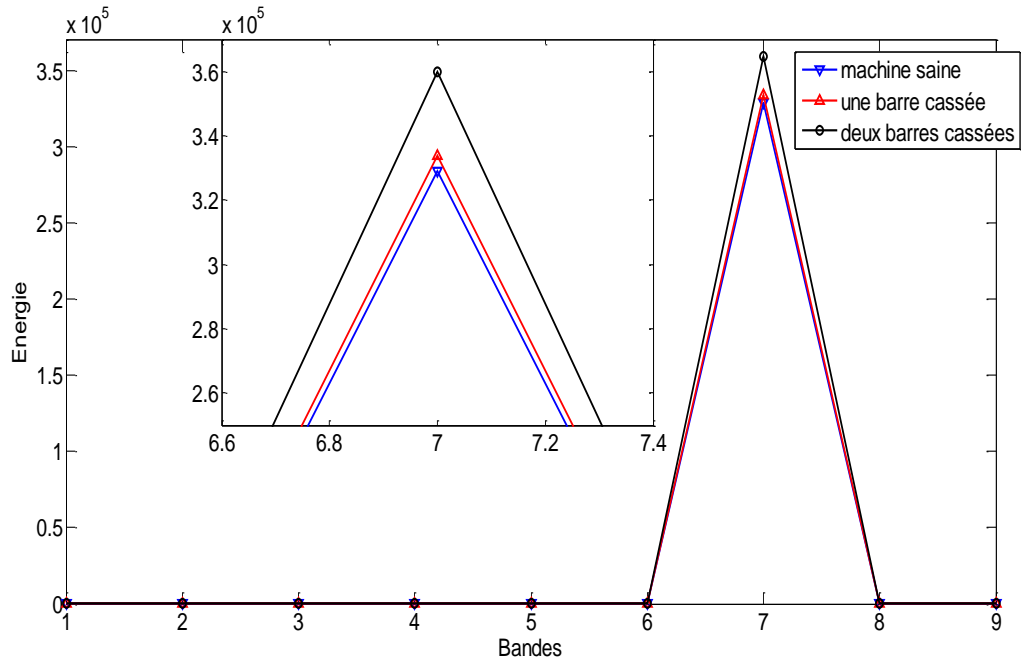
La valeur propre d'énergie de chaque bande de fréquence est définie par :

$$E_j = \sum_{k=1}^{k=n} D_{j,k}^2(n) \quad (3.1)$$

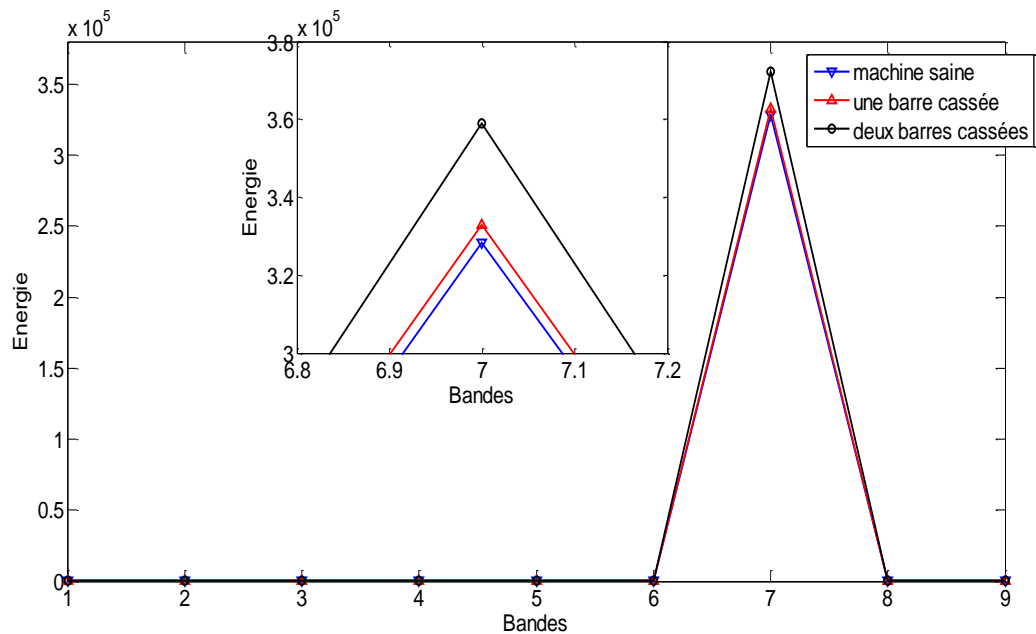
tel que  $j$  est le niveau de décomposition.

Les valeurs propres d'énergies des niveaux des décompositions contiennent l'information des signaux issus des capteurs du moteur asynchrone, le tracé de ces

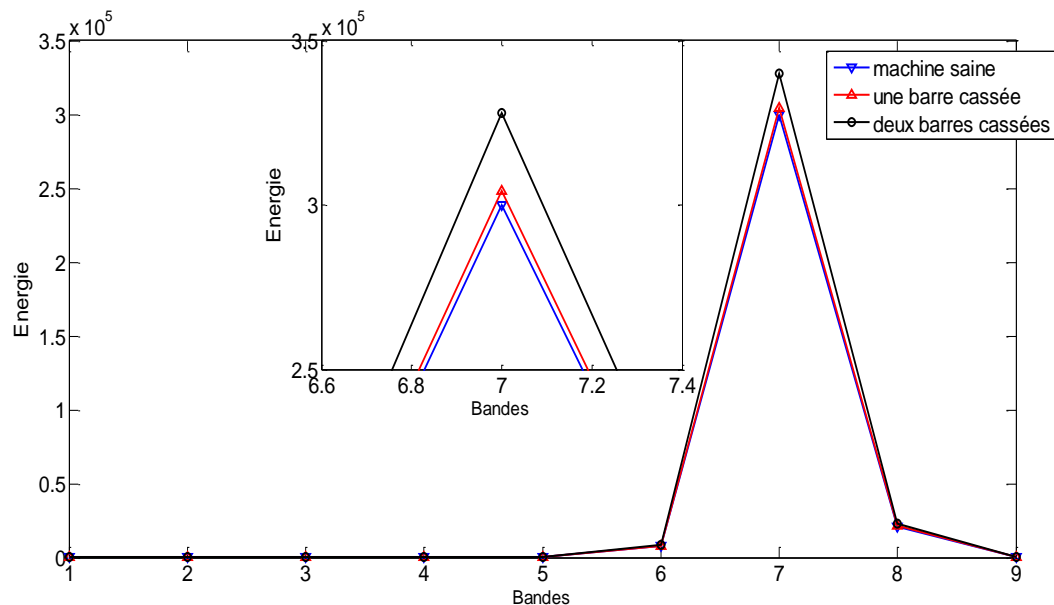
valeurs peut être utilisé pour diagnostiquer les défauts dans la machine et on peut également identifier le degré de défaut. La déviation de certaine valeur propre indique la sévérité du défaut.



**Fig.3.5.** Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db44)



**Fig.3.6.** Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db24)



**Fig.3.7.** Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db6)

Les figures (3.5, 3.6 et 3.7) montrent la variation d'énergie associée à chaque niveau de décomposition de l'ondelette multi niveau dans le cas de la machine saine et avec défaut.

Le calcul de l'énergie emmagasinée dans chaque niveau de décomposition confirme l'augmentation observée dans les signaux de détail et surtout dans le niveau 7 qui correspond à la bande qui se trouve au voisinage et au dessous du fondamentale.

On voit clairement l'effet de défaut rotorique sur l'énergie emmagasinée dans le niveau 7, cette augmentation diffère selon le type de défaut, dans les deux cas de cassure d'une et deux barres au rotor l'énergie augmente par rapport à celle de la machine saine.

### III.5 CONCLUSION

L'application de la transformée en ondelettes discrète a mené à des résultats très significatifs en terme de défauts, la décomposition directe du courant statorique en multi niveau et en paquet d'ondelettes a donné une image réelle sur les différents types de défauts rotoriques de la machine asynchrone à cage ainsi que le calcul de l'énergie relative en chaque niveau de décomposition.

## *Conclusion générale*

Ce travail a porté sur la détection des défauts rotoriques de la machine asynchrone par la transformée en Ondelettes discrète. Les machines électriques asynchrones nécessitent une détection rapide et précoce de leurs défaillances, à cause de sa il ya plusieurs applications qui utilise pour trouve des bonnes résultats.

Le diagnostic est basé sur l'analyse des signaux à niveau élevé obtenus à partir de la décomposition en ondelettes du signal du courant statorique. L'approche utilisée dans ce mémoire est concentrée sur l'étude des signaux d'approximation et de détail résultants de la décomposition en multi-niveau qui contiennent les informations des défauts. Ces signaux permettent la détection de l'évolution des harmoniques caractéristiques liées à la rupture pendant le fonctionnement en charge.

En outre, l'application de la transformée en ondelettes discrète est optimisée, concernant le choix de certains paramètres tels que la fréquence d'échantillonnage, le type de l'ondelette mère, l'ordre de l'ondelette mère ou le nombre de niveaux de décomposition.

La transformée d'ondelettes discrète est basée sur l'analyse des signaux à niveau élevé obtenus a partir de la décomposition en ondelettes du signal du courant statorique. L'analyse multi-résolution en ondelettes, grâce à ses grandes propriétés, semblait la plus intéressante à appliquer. En effet, son pouvoir de décomposition des fréquences et de détection des discontinuités dans un signal nous ont incités à l'adapter pour l'analyse des signaux de défauts de rupture de barre de la MAS. Le calcul de l'énergie de bandes de décomposition de détail à donner un indice simple et efficace pour le diagnostic.

## **Bibliographie**

- [1] ZAHIR AIT OUALI «application des FPGA d'un moteur asynchrone» thèse de magistère, université Tizi ouazo.
- [2] AOUI Ahmed : Utilisation d'observateurs à modes glissants pour le contrôle direct de couple et le contrôle vectorielle d'une machine asynchrone à cage (mémoire Magister en Electrotechnique Université Mohamed Khider – Biskra 2011.
- [3] BOUBACARE HOUSSEINI«prototypage rapide a base de FPGA d'un algorithme de contrôle avancé pour le moteur induction» thèse 2010 université du Québec a trio rivières.
- [4] ALLAL ABDERRAHIM «grandeurs non invasives pour le diagnostic des machina asynchrone »thèse de magistère université de Sétif 05/05/2010.
- [5] GAETAN DIDIER «modélisation et diagnostique de la machine asynchrone présence de défaillances »thèse de doctorat 2004 université Henri Poincaré, nancy-1
- [6] Djedjai Hammi Hichem,"étude et modélisation du moteur asynchrone à double cage ", mémoire master académique université Kasdi Merbah-Ouargla 2016.
- [7] Sahraoui Lazhar et Benyoussef Lakhdar," Commande par Backstepping de la Machine Asynchrone ", mémoire master académique université Kasdi Merbah-Ouargla 2017
- [8] S. A. Al Kazzaz Saad, G.K.Singh. « Expérimenta le investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques », Electric Power Systems Research 65, pp 179-

- 221, 2003.
- [9] M. E. H. Benbouzid, G. B. Kliman. « What Stator Current Processing Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis? », IEEE, Transaction on Energy Conversion, VOL 18 n°2, pp 238-244, Jun 2003.
- [10] M. E. H. Benbouzid. « A review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection », IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp1950-1955, 1998.
- [11] M. E. H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys. « Induction Motors Faults Detection and Localisation Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques », IEEE, Transaction on Power Electronics, Vol 14 n°1, pp 14-22, Jan 1999.
- [12] M. E. H. Benbouzid, H. Nejjari, R. Beguenane, M.vieira. « Induction Motor Asymmetrical Faults Detection Using Advanced Signal Processing Techniques ». IEEE Transaction on Energy, vol, 14, No, pp 147-152. June1999.
- [13] G. Didier. « Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en présence de Défaillances », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I. Oct. 2004.
- [14] T. Boumegoura. « Recherche de Signature Electromagnétique des Défauts dans une Machine Asynchrone et Synthèse d'Observateurs en Vue du Diagnostic », Thèse de Doctorat, Ecole doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon, mars 2001.
- [15] R. Abdelli. « Perturbations Singulières Appliquées au Modèle de Machine Asynchrone avec Défauts au Stator et au Rotor ». Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Juillet

- 2007.
- [16] Touhami Omar, Noureddine Lahcène, Ibtouen Rachid, Fadel Maurice. « Modeling of the Induction Machine for the Diagnosis of Rotor Defects. Part. I: An Approach of Magnetically Coupled Multiple Circuits ». IEEE-IECON'05, Industrial Electronics Society, pp.1580-1587, 2005.
- [17] E. Ritchie, T. Jokinen. « Dynamic Model of Three-phase Squirrel cage Induction Motors with Rotor Faults ». International Conference on Electrical Machines , Vol. 2, 1994.
- [18] X. Luo, Y. Liao, H. A. Toliyat, A. El-Antably, T. A. Lipo. « Multiple Coupled Circuit Modeling of Induction Machines », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 31 n°2, pp 311-318, Mar/Apr 1995.
- [19] L. Noureddine. « Diagnostic de Défauts au Rotor d'une Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil », Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Mai 2005.
- [20] E.F. Kherkhachi, «'Diagnostic du système isolant des machines électriques par identification Paramétrique», Thèse de doctorat, Université de Nantes, Octobre 2015.
- [21] F. Puppe, '' Systematic introduction to expert systems '', chap 1, pp 1-26,U.S.A, Springe-Verlang 1993.
- [22] L. Leonhardt, M. Ayoubi, '' Methods of faultdiagnosis '', Control Eng, Practice, Vol 5, n°5, pp 683-692, 1997.
- [23] R.J. Patton , J. Chen, '' An review of parityspaceapproaches to fault diagnosis'', IFAC SAFEPROCESS'91, Vol 1, pp 239-255, Baden Baden, Germany, Septembre 1991.
- [24] A. Karoui, A. Brahim, « Détection de défaut statorique par suivi paramétrique

- d'un Moteur Synchrone A Aimants Permanents », Mémoire de Master, université de Ouargla, 2014.
- [25] N. BESSOUS, « Contribution au diagnostic des Machines Asynchrones », Mémoire de Magister, Université des frères Mentouri Constantine, 2007.
- [26] A. Abdelkebir, « Diagnostic d'un moteur à Induction en utilisant la transformée en ondelettes », Mémoire de Master, Université Mohammed Boudiaf de M'sila, juin 2015.
- [27] Frédéric Truchetet « Ondelettes pour le signal numérique » Editions Hermes, Paris, 1998.
- [28] A. Tarek, « Analyse du signal ECG par les ondelette », Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2008.
- [29] S. Mazouz, N. Marouf, « Réalisation d'interface graphique pour le débruitage du signal photo pléthsmogramme par la transformée en ondelette discrète », Mémoire de Master, Université Abou bekr Belkeid de Tlemcen, 2015.
- [30] Touafek Ishak « Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques: Comparaison de L'EMD et des ondelettes(WT) » mémoire magister. Université Ferhat Abbas Sétif, 2011.
- [31] L. Hông, « Etude de la méthode de la transformation en ondelette et l'application à la compression des images », pp.10-20, 07-2005.
- [32] M. Misiti, Y. Misiti, « Les ondelettes et leurs applications ». Edition Hermes, Paris 2003.
- [33] H. Sharabty « Diagnostic de la somnolence d'un opérateur : Analyse des signaux physiologiques »Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2007.
- [34] H. Cherif, « Détection des défauts statoriques et rotoriques dans la machine

- asynchrone en utilisant l'analyse FFT et Ondelettes », Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2014.
- [35] Z.E. Hadj slimane « Cours et TP de traitement du signal avancée », Département Génie Electrique et Electronique, Faculté de Technologie, université de Tlemcen.
- [36] A. Bouzida et al, « Application de la technique des ondelettes au diagnostic de défauts de la machine asynchrone à rotor à cage », Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°4 (2014) 549 – 557
- [37] S. Sakhara, « Diagnostic des défauts d'un entrainement électrique par la technique ondelette », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2017
- [38] BOUZIDA Ahcene «diagnostic de défauts de la machine asynchrone a cage par la technique des ondelettes »
- [39] L. Leonhardt, M. Ayoubi, '' Methods of fault diagnosis '', Control Eng, Practice, Vol 5, n°5, pp 683-692, 1997.
- [40] aïcha abed « contribution à l'étude et au diagnostic de la Machine asynchrone », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, mars 2002.

## Résumé

Dans ce mémoire nous avons utilisé la technique des ondelettes dans le but du diagnostic des machines asynchrones. Cette technique qui offre une analyse très fine des signaux unidimensionnels et bidimensionnels à travers une décomposition en ondelettes discrètes, est utilisée pour extraire les informations nécessaires à partir du courant statorique moteur de la machine asynchrone. Les différentes applications de la transformée en ondelettes discrète au domaine du diagnostic des défauts ont été validés sur des signaux expérimentaux relevés à partir de la machine asynchrone défectueuse.

**Mots clés :** défauts de la machine asynchrone, modélisation de la machine asynchrone à cage, technique des ondelettes.

## ملخص

في هذه الأطروحة استخدمنا تقنية الموجات بغرض تشخيص الآلات غير المتزامنة. تُستخدم هذه التقنية ، التي تقدم تحليلاً دقيقاً للغاية للإشارات أحادية البعد وثنائية الأبعاد من خلال التحلل إلى موجات منفصلة أو حزم موجة لاستخراج المعلومات الضرورية من التيار الحركي للألة. تم التحقق من صحة التطبيقات المختلفة للتحويل المويجي المنفصل في مجال تشخيص الأعطال على الإشارات التجريبية المسجلة من الأجهزة المعنية.

**الكلمات المفتاحية:** أخطاء الآلة غير المتزامنة ، نمذجة آلة القفص غير المتزامن ، تقنية الموجات.

## Abstract

In this thesis we used the wavelet technique for the purpose of diagnosing asynchronous machines. This technique, which offers a very fine analysis of one-dimensional and two-dimensional signals through decomposition into discrete wavelets or wavelet packets, is used to extract the necessary information from the motor current of the machine. The various applications of the discrete wavelet transform in the field of fault diagnosis have been validated on experimental signals recorded from faulty machines.

**Key words:** asynchronous machine defects, modeling of the asynchronous cage machine, wavelet technique.