

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

SPECIALITE: Commande des systèmes
Electriques



FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° D'ORDRE:

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER

Présenté par :

Mr. ABDELKEBIR Adel

THEME

**Diagnostic d'un moteur à Induction en utilisant
la transformée en ondelettes**

Soutenue le 20 /05/ 2017 devant le jury composé de :

LAAMARI Yahia	UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Président
BELHAMDI Saad	UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Encadreur
CHOUCHOU Abdelmadjid	UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Examineur

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2016 / 2017

REMERCIEMENTS

A l'issue de travail j'adresse mes remerciements premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces longues années d'études.

Mes remerciements s'adressent à mon promoteur Dr S.BELHAMDI, pour avoir proposé et dirigé ce modeste travail et pour son continuel suivi tout le long de la réalisation et la correction de ce mémoire.

Je remercie également tous les membres de jury d'avoir accepter de juger mon travail.

Je tiens à remercier vivement toute personne, qui m'a aidé de près ou de loin à accomplir ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Ma mère,

Mon père,

Ma femme,

Mes sœurs et mes frères.

Mes amis

Adel Abdelkebir

Liste des figures

Figure 1.1	Stator d'une machine asynchrone	04
Figure 1.2	Rotor à cage d'écurueil d'une machine asynchrone	04
Figure 1.3	Défauts d'excentricité statique et dynamique	08
Figure 1.4	Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone	09
Figure 1.5	Diaporama des méthodes de diagnostic de machines électriques	10
Figure 1.6	Représentation temporelle vers ondelettes	14
Figure 2.1	Partie électrique d'un rotor à cage	17
Figure 2.2	Schéma multi enroulements du rotor	19
Figure 2.3	Induction magnétique produite par une maille rotorique	19
Figure 2.4	Position de la maille (k) par rapport à la bobine statorique de la phase "a"	20
Figure 2.5	Schéma équivalent d'une maille rotorique	23
Figure 2.6	Schéma de en SUMILINK de modèle réduit	33
Figure 2.7	Simulation avec modèle réduit : machine en charge ($C_r=3.5N.m$)	34
Figure 2.8	Simulation avec le modèle réduit: en charge, avec rupture d'une barre à partir de $t=2s$	35
Figure 2.9	Simulation avec modèle réduit : machine en charge ($C_r=3.5N.m$) et avec rupture de deux barres adjacentes à $t=2s$ et $t=3s$	36
Figure 2.10	Simulation avec modèle réduit : machine en charge ($C_r=3.5N.m$) et avec rupture de trois barres adjacentes à $t=2s$, $t=3s$ et $t=4s$	38
Figure 3.1	Fenêtre de Hamming et Hanning pour état sain et avec défaut	50
Figure 3.2	Différents types d'ondelettes à l'état sain	53
Figure 3.3	Différents types d'ondelettes avec une cassure d'une barre à $t=2s$	54
Figure 3.4	Différents types d'ondelettes avec cassure de deux barres adjacentes à partir de $t=2s$.	56
Figure 3.5	Différents types d'ondelettes avec cassure de trois barres adjacentes à partir de $t=2s$.	57

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Défauts des machines électriques selon leurs origines	05
Tableau 3.1	Famille des ondelettes	43

SOMMAIRE

NOTATION ET SYMBOLE

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART SUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE LA

MACHINE ASYNCHRONE

I.1	Introduction.....	3
I.2	Eléments de constitution de la machine asynchrone.....	3
I.2.1	Stator.....	3
I.2.2	Rotor.....	4
I.2.3	Les paliers.....	5
I.3	Différents défauts dans les systèmes électromécaniques.....	5
I.3.1	Défaut dû au réseau d'alimentation.....	7
I.3.2	Défaut dû au moteur asynchrone.....	7
I.3.2.1	Défaillances mécaniques.....	7
I.3.2.2	Défaillances électriques.....	8
I.4	Méthodes de diagnostic des machines électriques.....	10
I.4.1	Méthodes de diagnostic sans modèle.....	11
I.4.1.1	Analyse vibratoire de la machine.....	12
I.4.1.2	Analyse des courants statorique.....	12
I.4.1.3	Analyse du vecteur de Park.....	12
I.4.2.4	Analyse du couple électromagnétique.....	13
I.4.2.5	Transformée de Fourier rapide (FFT).....	13
I.4.2.6	Transformée en Ondelettes (TO).....	14
I.5	Conclusion.....	15

CHAPITRE II

MODELISATION ET SIMULATION DU MODELE REDUIT A L'ETAT SAIN ET DEFAILLANT

II.1 Introduction.....	16
II.2 Hypothèses simplificatrices.....	16
II.3 Modèle multi enroulement.....	17
II.3.1 Calcule des inductances	18
II.3.1.1 Partie statorique.....	18
II.3.1.2 Partie rotorique.....	19
II.3.1.3 Mutuelle inductance entre stator et rotor.....	20
II.4 Mise en équation.....	21
II.4.1 Partie statorique.....	21
II.4.1.1 Equations électriques.....	21
II.4.1.2 Equations magnétiques.....	22
II.4.2 Partie rotorique.....	23
II.5 Equation d'état de la machine	24
II.6 Transformation de Park.....	27
II.7 Modèle de taille réduite.....	29
II.8 Simulation du modèle de la (MAS)	32
II.9 Conclusion.....	39

CHAPITRE III

TECHNIQUES DES ONDELETTES APPLIQUEES AU MAS

III.1 Introduction.....	40
III.2 Transformée de Fourier.....	41
III.2.1 La Transformée de Fourier Rapide (FFT).....	41
III.2.2 Analyse des signaux dans le domaine temps fréquence (STFT).....	42
III.3 LES ONDELETTES (WAVELETS)	43
III.3.1 Transformée en ondelettes	44
III.3.1.1 Définition.....	44
III.3.2 Transformée en ondelettes continue.....	45

III.3.3 Transformée en ondelettes discrète (TOD).....	47
III.4 Application de l'analyse spectrale.....	47
III.4.1 Interprétation des résultats.....	51
III.5 Application de la technique des ondelettes au diagnostic de la MAS.....	51
III.5.1 Résultats de simulation par la transformée en ondelettes continues.....	51
III.6 Interprétation des résultats	63
III.7 Conclusion.....	63
CONCLUSION GENERALE	64
ANNEXE A	66
BIBLIOGRAPHIE	67

NOTATION ET SYMBOLES

B_s	Induction magnétique créée dans l'entrefer par le courant statorique [T]
C_e	Couple électromagnétique [N.m]
e	l'épaisseur de l'entrefer [m]
f_s	fréquence d'alimentation [Hz]
N_s	Nombre de spires statoriques par phase
N_r	Nombre de barres rotorique
n	entier naturel
μ_0	Perméabilité magnétique de l'air
L_{sp}	Inductance propre statorique [H]
L_{sf}	Inductance de fuite rotorique [H]
L_b	Inductance d'une barre rotorique [H]
L_e	Inductance total de l'anneau de court-circuit [H]
L_{sc}	Inductance cyclique [H]
I_e	Courant dans l'anneau de court- circuit [A]
I_{bk}	Courant de barre [A]
I_{rk}	Courant dans la boucle rotorique [A]
I_{ek}	Courant dans un portion d'anneau [A]
s, r	Indices correspondants au stator et rotor.
a, b, c	Indices correspondants aux trois phases a, b, c
$[V_s], [V_r]$	les vecteurs tensions statoriques et rotoriques.
$[I_s], [I_r]$	les vecteurs courants statoriques et rotoriques.
$[\psi_s], [\psi_r]$	les vecteurs flux statoriques et rotoriques.
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Tensions d'alimentation des phases statoriques.
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	Tensions d'alimentation des phases rotoriques.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants statoriques.
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	Courants rotoriques.
$\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$	Flux statoriques.
ψ_{rk}	Flux magnétique crée par une maille rotorique [wb].
R_s, L_s	Résistance et inductance propre d'une phase statorique.
R_r, L_r	Résistance et inductance propre d'une phase rotorique.
R_{bk}	Résistance de la barre K [Ω]
R_{bfk}	Résistance de la barre défaillante [Ω]
R_b	Résistance d'une barre rotorique à l'état sain [Ω]
[P]	Matrice de transformation de Park.
d, q	Indices pour les composantes de PARK directe et Quadrature.
p	Nombre de paire de pôle
C_r	Couple résistant.
Ω	Vitesse angulaire de rotation.
f	Coefficient de frottement.
J	Moment d'inertie de la partie tournante de la machine.
L	Longueur active du circuit magnétique [m]
R	Rayant moyen de l'entrefer
M_{sr}	Mutuelle cyclique entre le stator-le rotor [H]
M_s	Mutuelle entre phase statorique [H]
a	Angle électrique entre deux mailles rotorique [rd]
θ_s	Position des grandeurs statoriques [rd].
θ_r	Position du rotor [rd].
X	Variable d'entrée.
X_{ref}	Grandeurs de consigne ou de référence.
X_{dr}	Grandeurs rotorique d'axe d (repère d).
X_{qr}	Grandeurs rotorique d'axe q (repère q).
X_{ds}	Grandeurs statorique d'axe d (repère d).

X_{qs}	Grandeurs statorique d'axe q (repère q).
[A]	Matrice de transition.
[B]	Matrice de commande.
Ψ	Ondelette mère
a	Paramètre d'échelle
b	Paramètre de translation

Abréviation :

MAS	Machine Asynchrone.
FFT	Transformée de Fourier rapide
TOC	Transformée en ondelettes continues
TOD	Transformée en ondelettes discrètes

INTRODUCTION GENERALE

Les machines asynchrones sont largement utilisées dans l'industrie. Assurer leur continuité de fonctionnement nécessite la mise en place de programmes de maintenance préventive et corrective. En effet, la fiabilité et la sûreté de leur fonctionnement permettent en partie d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations. [1]

Cependant, nul système complexe n'est pas l'abri d'une défaillance, il faut donc mettre en œuvre des systèmes de surveillance et prévoir des redondances matérielles dans les équipements. Depuis quelques années et grâce à l'évolution des techniques informatiques, il est possible de faire appel aux systèmes de supervision et de diagnostic. Leur rôle est de signaler la présence des dysfonctionnements dans le processus. Le diagnostic utilise les informations contenues dans les signatures afin de trouver la cause du défaut avec si possible tous les détails possibles tels que le temps d'apparition et l'amplitude. L'un des principaux axes d'intérêt du diagnostic consiste à chercher le modèle le plus adapté pour décrire et interpréter les effets des défauts sur le processus, actuellement, la plupart des machines électriques des équipements industriels sont machine asynchrone multi-enroulement, du fait de leur robustesse et de leur faible coût. Mais les machines subissent de plus en plus de perturbations aux quelles sont sensibles, les principaux défauts électriques recensés sont les courts circuits entre spires des bobinages du stator (dus au vieillissement des isolants), les dégradations des anneaux au rotor et tous les problèmes de barres (ruptures ou imperfections). [2]

Depuis longtemps déjà, la rupture des barres dans les moteurs a fait l'objet de nombreux travaux. D'autres recherches ont suivi dans la même voie, ou ont été initiés dans le diagnostic des autres défauts de la machine (désalignement entre la machine et la charge, Excentricité du rotor, usure des paliers), le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente la détection des défauts rotorique dans la machine asynchrone. Les outils d'analyse et diagnostic de défaut sont à base de l'utilisation du spectre de la transformée de Fourier (FFT) et de l'ondelette (TOC).

Dans ce contexte, le mémoire comporte trois chapitres organisés comme suit :

- ◆ Le premier chapitre traite les différents défauts qui peuvent apparaître dans les machines asynchrones et leurs causes ainsi que les différentes méthodes de diagnostic.
- ◆ Le deuxième chapitre est consacré à la formulation mathématique du modèle multi-enroulement de la machine asynchrone triphasée à cage et la présentation des résultats de simulation du modèle de taille réduit à l'état sain et défaillant.
- ◆ Dans le troisième chapitre on va étudier l'analyse des défauts à travers l'analyse spectrale du courant, en utilisant la transformation de Fourier rapide FFT, et de l'ondelette (TOC) et on termine par une conclusion générale et perspective.

Chapitre I

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

I.1 Introduction

Les moteurs asynchrones triphasés sont les moteurs employés le plus fréquemment dans l'industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, faible coût d'achat et de maintenance. Malgré ses qualités, la machine asynchrone peut présenter des anomalies et des défauts structurels, parmi lesquels la rupture totale ou partielle des barres rotorique ou des portions d'anneau, court circuit entre spires au stator ainsi que le défaut d'excentricité. Pour ces raisons, il est très intéressant de développer des outils de diagnostic pour la détection d'une manière anticipée les défauts pouvant surgir dans la machine [3].

Le but de ce chapitre est de présenter un état de l'art des méthodes de diagnostic appliquées à la machine asynchrone. Ensuite, un rappel des différents éléments constitutifs de la machine asynchrone triphasée. Après avoir cité les différents défauts pouvant survenir dans la machine et leurs causes, on essaye d'abord parler brièvement les techniques de base couramment utilisées dans le domaine du diagnostic des défauts. Enfin une citation des méthodes de modélisation de la machine en vue le diagnostic des défauts rotorique sera effectué.

I.2 Eléments de constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone à cage ou MAS est une machine électrique tournante assurant la tâche de la conversion d'énergie par induction électromagnétique.

Les parties constitutives de la machine asynchrone sont:

- le stator: partie fixe de la machine, constituée de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- le rotor: c'est la partie tournante où est constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine.
- les organes mécaniques: permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

I.2.1 Stator

Les différents types des moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste dans son principe, le même. Il est constitué d'un enroulement

bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure 1.1) [4].

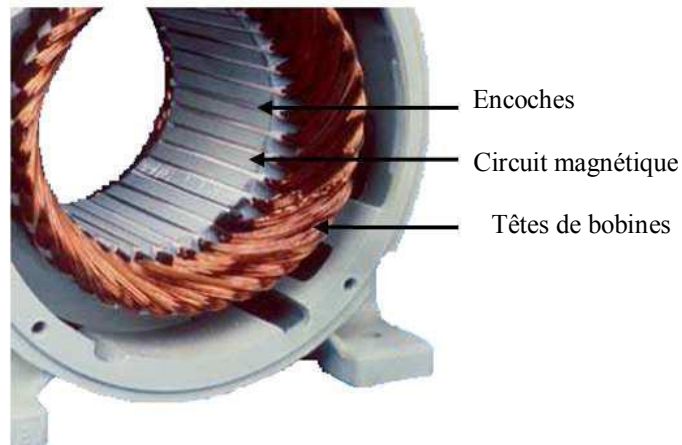


Figure 1.1: Stator d'une machine asynchrone

I.2.2 Rotor

Le circuit rotorique est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui de la machine à rotor bobiné.

Les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. La figure (1.2) illustre un rotor à cage. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.



Figure 1.2: Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone

I.2.3 Les paliers

Sont des organes mécaniques qui permettent la rotation du rotor et assurent le maintien des différents sous-ensembles. Ils sont constitués de deux composants: les flasques et les roulements à billes.

I.3 Différents défauts dans les systèmes électromécaniques

Les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine.

Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Défauts des machines électriques selon leurs origines [5]

Défaillances des Machines Electriques	Interne	Mécanique	Contact entre le stator et rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
			Mouvement des enroulements et des tôles
		Électrique	Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
	Externe	Mécanique	Défaillance au niveau du circuit magnétique
			Charge oscillante
			Surcharge de la machine
		Environnemental	Défaut de montage
			Humidité
			Température
		Électrique	Propreté
			Fluctuation de la tension
			Sources de tensions déséquilibrées
Réseau bruité			

Les causes des défauts au stator et au rotor sont multiples [6], les plus fréquentes d'entre eux sont énumérées ci-dessous :

❖ Défauts statoriques :

- court-circuit entre spires : surtension, température excessive, vibration, humidité ;
- court-circuit entre phases : haute température, alimentation déséquilibrée, défaut d'installation;
- défaut d'isolation : démarrage fréquent, décharge partielle, condition, température et humidité extrême ;
- défaut entre le stator et carcasse : cycle thermique, abrasion de l'isolant, encrassement des spires par la carcasse, présence des points anguleux dans les encoches, choc ;
- déplacement des conducteurs : démarrage fréquent, vibration de tête de bobines ;
- défaillance des connecteurs : vibration excessive ;
- vibration de la carcasse : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, déséquilibre d'alimentation, surcharge, mouvement des enroulements, contact avec le rotor.

❖ Défauts rotoriques :

- défaut de roulements : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, haute température, perte de lubrifiant, charge déséquilibrée, corrosion ;
- rupture de barres : cycle thermique, régime transitoire à longue durée ; déséquilibre magnétique;
- rupture d'une portion d'anneau : cycle thermique ;
- excentricité : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défauts des roulements ;
- désalignement des roulements : défaut de couplage, mauvaise installation, surcharge ;
- défaut du circuit magnétique : défaut de fabrication, surcharge, cycle thermique ;
- déséquilibre mécanique : mauvais alignement, mouvement des anneaux de court-circuit.

Une description succincte de défauts les plus courants est donnée dans les paragraphes suivants:

I.3.1 Défaut dû au réseau d'alimentation

Les réseaux et les installations électriques sont le siège d'incidents de nature aléatoire, dont les plus fréquents sont :

- Court-circuit entre les phases.
- Coupures de phase d'alimentation.
- Déséquilibre des tensions d'alimentation.

Les répercussions de ces anomalies sur la continuité du service et le fonctionnement des équipements dépendent de la nature du défaut. Ce dernier est provoqué soit dans les réseaux aériens soit par des contraintes de nature :

- climatique (pluie, foudre,...),
- d'environnement (branches d'arbres, plombs de chasses,...),
- par suite de l'interconnexion des différents réseaux.

Il en résulte que les installations électriques peuvent subir un nombre difficilement prévisible de perturbations de tension dont l'influence se caractérise par, soit une chute de tension transitoire, soit une coupure brève. Dans les cas les plus graves, cela provoque la coupure de longue durée.

I.3.2 Défaut dû au moteur asynchrone

Les défaillances qui peuvent affectées la machine sont d'origines diverses: électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques.

I.3.2.1 Défaillances mécaniques

➤ Défauts de roulement

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tous types des machines électriques.

Les défauts des roulements qui ont de nombreuses causes telles que l'écaillage de fatigue, la contamination du lubrifiant, une charge excessive ou des causes électrique comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs [7], les problèmes de rotation au sein de la culasse de roulement causés par un enroulement abîmé, écaillé ou fissuré peuvent créer des perturbations au sein de la machine, comme les courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone et pour des vitesses importantes peut provoquer la détérioration de ces derniers.

➤ Défauts d'excentricité

Parfois, la machine peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

On distingue trois catégories d'excentricité (figure 1.3) :

- **L'excentricité statique**: est généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator;
- **L'excentricité dynamique** se manifeste lorsque le centre de rotation du rotor diffère du centre géométrique du stator mais, de plus le centre de rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique ou statorique.
- **L'excentricité mixte** représente la somme des deux cas statique et dynamique.

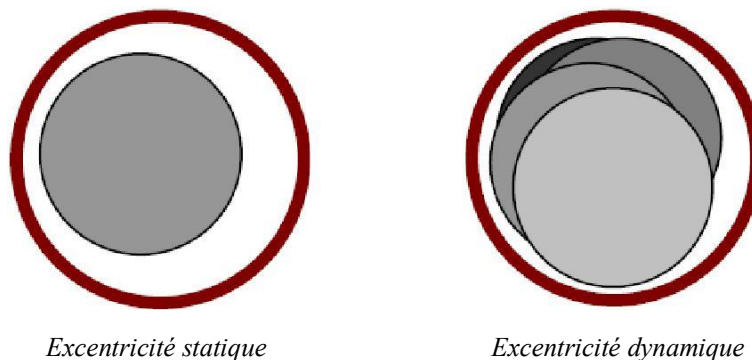


Figure 1.3: Défauts d'excentricité statique et dynamique

I.3.2.2 Défaillances électriques

➤ Défauts statorique

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. On peut citer à titre d'exemple, les défauts de type courts circuits entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches [8]. Ce type de défauts peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. On peut citer aussi les courts circuits entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statorique.

➤ Défauts rotorique

L'analyse du spectre du courant statorique en régime permanent fournit des indications sur les défaillances rotorique telles que les ruptures des barres, d'anneaux de court-circuit [9]:

- Défaut de cassure des barres

La rupture des barres d'une machine asynchrone est un défaut les plus couramment étudié en laboratoire en raison de sa simplicité de réalisation.

La rupture de barre provoque une dissymétrie du rotor. Le résultat de la dissymétrie réside dans la création d'un champ tournant en sens opposé à celui généré par le stator et cela à la fréquence de glissement par conséquent, il y'aura réaction d'un courant supplémentaire dans le bobinage statorique [10].

- Cassure d'une portion d'anneau de court-circuit

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotorique [11].

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassures.

Noyau du rotor

Barre cassée

Anneaux de court-circuit



Figure 1.4: Exemple d'un défaut de cassure de barre d'un moteur asynchrone

I -4 Méthodes de diagnostic des machines électriques

On retrouve, dans les différents travaux, les trois axes constituant le domaine du diagnostic des machines électriques, qui conduisent à définir trois méthodologies de diagnostic : méthodes de connaissances, méthodes de redondances analytiques et méthodes par modélisation de signaux (voir Figure I.5).

La Figure (I.5) présente le diaporama des méthodes de diagnostic de machines électriques [12].

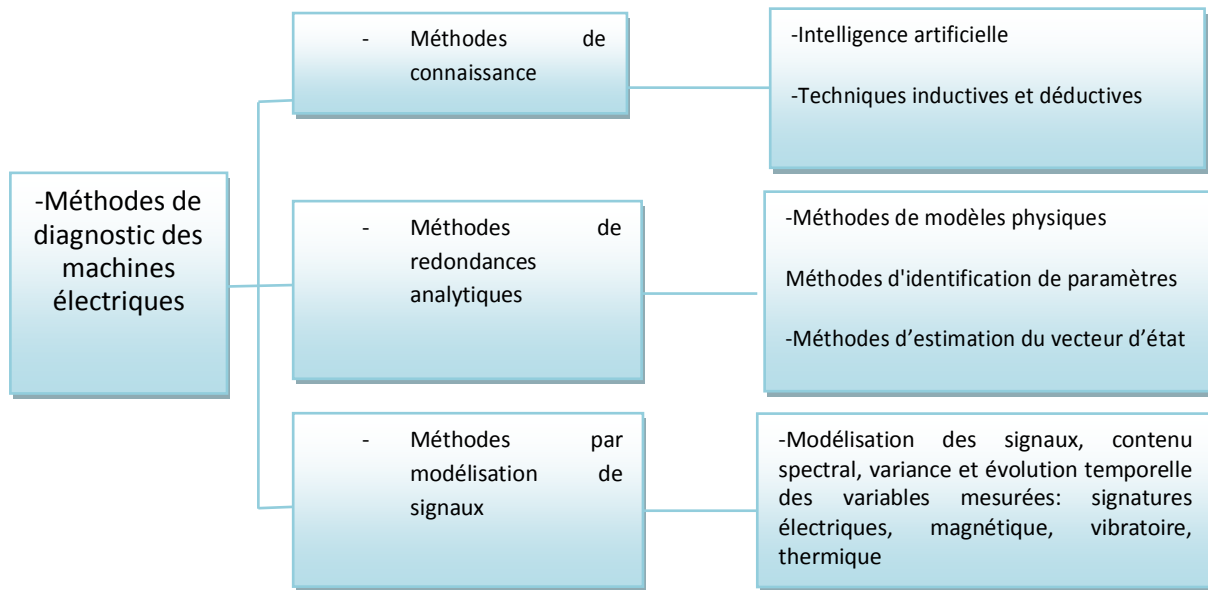


Figure I.5 : Diaporama des méthodes de diagnostic de machines électriques

1. Les méthodes de connaissances n'utilisent pas de modèle mathématique pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expérience humaine confortée par des retours d'expérience. Dans la littérature sont présentées plusieurs techniques de détection de défauts par ces méthodes [13-14]. Les techniques basées sur l'intelligence artificielle mettent en œuvre la reconnaissance de formes, les systèmes experts, les réseaux de neurones et la logique floue, qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés pour améliorer leur efficacité. Les méthodes inductives ou déductives ne s'appliquent pas directement au diagnostic, mais peuvent y aider. Elles sont essentiellement utilisées pour définir les causes du défaut en utilisant des modèles de pannes. Il est à noter que ces méthodes sont davantage du ressort des automaticiens que des électrotechniciens.

2. **Les méthodes de redondances analytiques** se basent sur une modélisation quantitative du système et exploitent les relations entre les variables du système considéré pour identifier les paramètres physiques à surveiller. On y distingue trois classes : les méthodes de modèles physique, les méthodes d'identification de paramètres et les méthodes d'estimation du vecteur d'état.
3. **Les méthodes par modélisation de signaux** sont des méthodes basées sur une modélisation des signaux, le contenu spectral, la variance et l'évolution temporelle des variables mesurées. Ces méthodes exploitent essentiellement les signatures électrique, magnétique, vibratoire, thermique ou la puissance instantanée [15].

La démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic des défauts sur les machines électriques repasse sur l'analyse des grandeurs mesurables et les signaux de défaut. Les grandeurs et signaux de défauts les plus fréquemment utilisés sont : les courants statoriques , la tension d'alimentation, le flux de dispersion, le couple électromagnétique, la vitesse de rotation , la puissance instantanée aussi que les vibrations mécaniques.

I.4.1 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 statorique est très intéressante pour le diagnostic, puisque les informations présentes dans l'analyse des courants englobent celles trouvées dans l'analyse vibratoire et celles liées aux phénomènes électriques.

Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que: les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations,...etc. Dans ce que suit, on présente brièvement les transformées de Fourier rapide (FFT) et la transformée en ondelettes (TOC).

I.4.1.1 Analyse vibratoire de la machine

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

Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts mécaniques fréquemment rencontrés [16]. Plutôt que de disposer d'une étude au cas par cas, on réalise une synthèse de l'ensemble des informations que peuvent fournir ces signaux en fonction des défauts, à partir de la référence, qui présente une comparaison entre les signatures des courants et les signatures vibratoires [17], [18].

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

I.4.1.2 Analyse des courants statorique

L'analyse des signatures du courant statorique par la transformée de Fourier rapide (*TFR*) est considérée comme référence dans le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones [19]. Elle consiste à détecter les défauts par la détection de l'apparence de composantes fréquentielles révélatrices des défauts dans le spectre du courant statorique. Cette méthode est très utilisée en raison de sa simplicité, peu coûteuse et facile à exécuter. Elle permet de détecter aussi bien les défauts électriques que mécaniques.

I.4.1.3 Analyse du vecteur de Park

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des moteurs asynchrones triphasés. Une des plus connues et des plus appropriées repose sur le calcul des courants dits de Park. En fonction des courants statorique de phase $i_R(t)$, $i_S(t)$ et $i_T(t)$, les courants de Park $i_d(t)$ et $i_q(t)$ peuvent être calculés grâce aux deux relations suivantes [20]:

$$i_d(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_R(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_S(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_T(t)$$

$$i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{6}} i_R(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_T(t)$$

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

I.4.2.4 Analyse du couple électromagnétique

Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmoniques dans le spectre du couple électromagnétique, résultant d'une interaction entre le flux et le courant. L'analyse spectrale de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient major de cette méthode [21].

I.4.2.5 Transformée de Fourier rapide (FFT)

La transformée de Fourier rapide (FFT) est un algorithme de calcul rapide de la transformée de Fourier discrète. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la transformée de Fourier discrète, de $\frac{N}{\log_2(N)}$.

Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal $x(t)$. En effet, la FFT décompose le signal $x(t)$ sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux $\{e^{2\pi f k T}\} f \in R$.

Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate.

Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence. Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps. Dans le cas de l'existence de sauts d'impulsions ou de changements de fréquence par exemple, la FFT ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent dans le signal [22], [23]. Ces phénomènes sont non stationnaires et du fait qu'ils sont brefs et souvent à caractère oscillatoire, leur contenu spectral est difficile à mettre en évidence.

Pour résoudre ce problème, GABOR (1964) a introduit la transformée de Fourier à court terme qui se base sur le fenêtrage (Windowing). Il s'agit de segmenter en tranche de temps fixes le signal à analyser et d'appliquer par la suite la Transformée de Fourier à chaque tranche. La suite logique pour la résolution de ce problème a été l'élaboration d'un puissant outil localisé en temps et en fréquences dénommé la transformée en Ondelettes (Wavelets transform).

I.4.2.6 Transformée en Ondelettes (TO)

La transformée en Ondelette est un outil récent de traitement de signal. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier [24]. Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse Temps-fréquence classique.

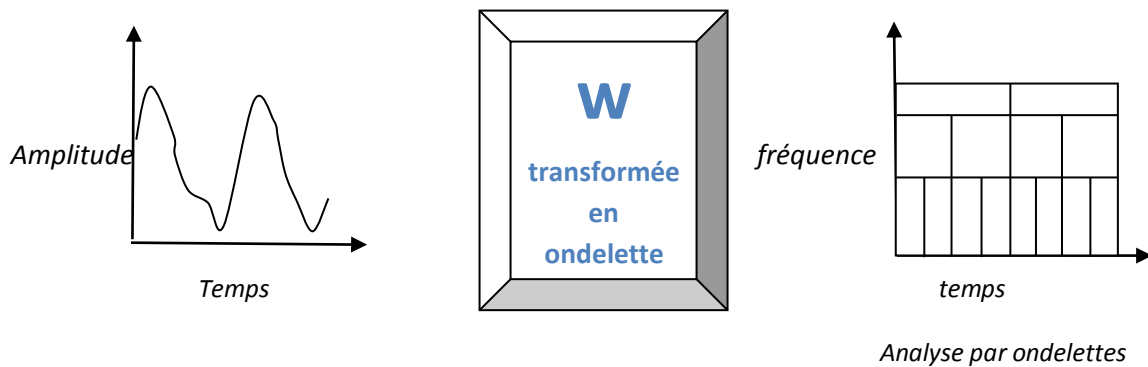


Figure I.6 : Représentation temporelle vers ondelettes

I.5 Conclusion

Ce chapitre a été, essentiellement dédié à l'état de l'art des méthodes de surveillance et de diagnostic des machines électriques et plus particulièrement la machine asynchrone à cage d'écureuil. Une description d'une manière non exhaustive de la constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil a été présentée, ainsi que les différents types des défauts qui peuvent affecter la machine et leurs origines. En fin, un panorama sur les méthodes internes et externes utilisées dans le diagnostic des défauts de la machine a été présenté. L'étude détaillée des divers défauts affectant le fonctionnement de la machine nécessite l'élaboration de modèle de la machine en défaut, ce qui fera l'objet du second chapitre.

Chapitre II

Modélisation et simulation du modèle Réduit à l'état sain et défaillant

II.1 Introduction

Tant dans le domaine du diagnostic que dans celui de la commande des machines électriques, il est intéressant de disposer de modèles capables de représenter le comportement du système en présence de déséquilibres structurels. La mise au point d'une procédure de diagnostic à base de modèle analytique pour la machine asynchrone recouvre un certain nombre de problèmes qui doivent être résolus. L'un de ces problèmes est le problème de la synthèse de modèles décrivant le comportement de la machine.

Ceci non pas d'une façon moyenne comme pour la commande, mais d'une façon plus exacte en intégrant certains paramètres pour décrire le plus précisément possible le comportement de la machine.

Pour cela il fallut s'orienter vers des modèles plus sophistiqués (modèles de type circuit, modèle multi enroulements) pour une description adaptée aux défauts, que ce soit pour une simulation plus réaliste ou pour une utilisation dans la méthode de détection [25].

La modélisation décrite dans ce chapitre a pour objet de permettre la représentation d'une rupture de barre pour une machine asynchrone à cage. Dans cette perspective, on a développé, en utilisant l'approche analytique, un modèle basé sur un circuit maillé représentant la cage rotorique.

II.2 Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, alors il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices [26] :

- L'entrefer constant.
- L'effet des encoches négligé.
- La distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Le circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Les pertes ferromagnétiques négligeables.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques, ne sont pas pris en compte.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut écrire :

- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.
- Les inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques sont constantes.

II.3 Modèle multi enroulement

L'objectif est avant tout de posséder un modèle de la machine asynchrone qui met en évidence l'influence des défauts étudiés sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants, afin d'étudier les phénomènes mise en jeu, deux approches sont possibles, la première s'appuie sur la distribution des champs et des courants en tout point de la machine, et permet de simuler son fonctionnement en régime de défaut, cette méthode coûteuse en temps de calcul, et nécessite la connaissance des paramètres géométriques et des caractéristiques des matériaux relatifs au moteur asynchrone, la seconde approche consiste à modéliser le rotor de la machine par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, c'est à cette dernière que nous nous sommes intéressés afin de disposer d'une modèle mathématique où les paramètres mesurables apparaissent explicitement et ne nécessitent pas d'outils de calcul complexes[25]. On introduit dans notre étude le modèle de la machine asynchrone où on considère le stator a des constitutions symétrique pour permettre d'avoir une force magnétomotrice sinusoïdale dans l'entrefer et le rotor à une structure, telle que représentée en figure (2.1).

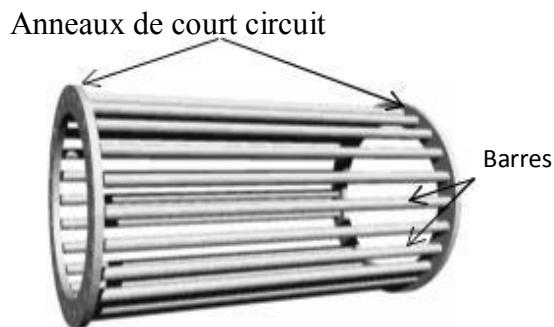


Figure 2.1: Partie électrique d'un rotor à cage

II.3.1 Calcule des inductances

II.3.1.1 Partie statorique

L'intensité de champ magnétique H produit par une bobine statorique dans le fer est très faible par rapport à ça valeur dans l'entrefer et la symétrie du dispositif d'après le théorème d'ampère on à [27]:

L'expression d'induction maximale dans l'entrefer est :

$$B_{max} = \mu_0 \frac{N_s I_s}{2.p.e} \quad (\text{II-01})$$

La décomposition de l'expression de l'induction (II-01) en série de Fourier fournit le fondamental :

$$B_s(\theta) = \frac{2\mu_0 N_s I_s}{e.p\pi} \cos\left(p.\theta - m\frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II-02})$$

Par conséquent, le flux magnétique dans l'entrefer est obtenu par l'intégration de l'expression (II-02)

$$\text{On obtient:} \quad \Phi_s(\theta) = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_s^2}{e.p^2} R.L.I_s \quad (\text{II-03})$$

Le flux principal de l'enroulement statorique de la phase "a" est :

$$\psi_{sa} = N_s \cdot \Phi_s = N_s \cdot I_s \frac{2\mu_0 N_s .R.L}{e.p^2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \cos(p.\theta) d\theta \quad (\text{II-04})$$

$$\text{Donc : } \psi_{sa} = L_{sp} \cdot I_s \quad (\text{II-05})$$

L'inductance principale de la phase "a" statorique d'après (II-04) est donnée donc par :

$$L_{sp} = 4 \mu_0 \frac{N_s^2}{e\pi p^2} R.L \quad (\text{II-06})$$

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

$$L_{sa} = L_{sp} + L_{sf} \quad (\text{II-07})$$

Puisque les enroulements statoriques sont symétriques, les inductances propres des trois phases sont considérées égales ($L_{sa} = L_{sb} = L_{sc} = L_s$).

II.3.1.2 Partie rotorique

Le rotor à cage est représenté par la figure 2.2.

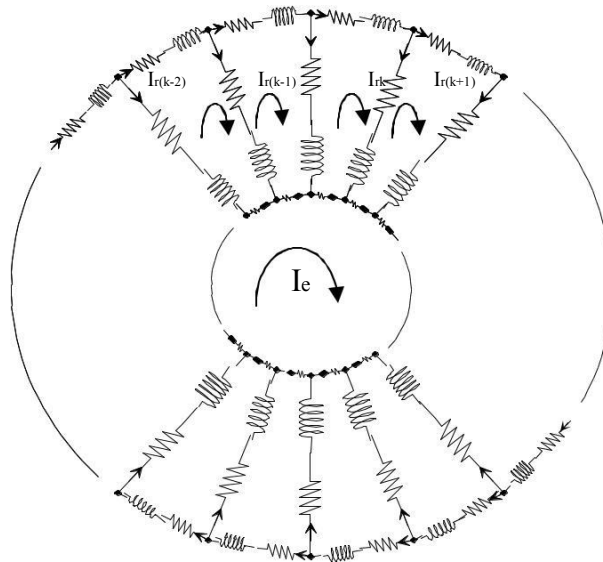


Figure 2.2 : Schéma multi enroulements du rotor [25]

La Figure 2.3 montre l'allure de l'induction magnétique en fonction de θ_r , supposé radial par une maille rotorique dans l'entrefer, on remarque que contrairement au stator, elle ne peut se ramener au fondamentale [28].

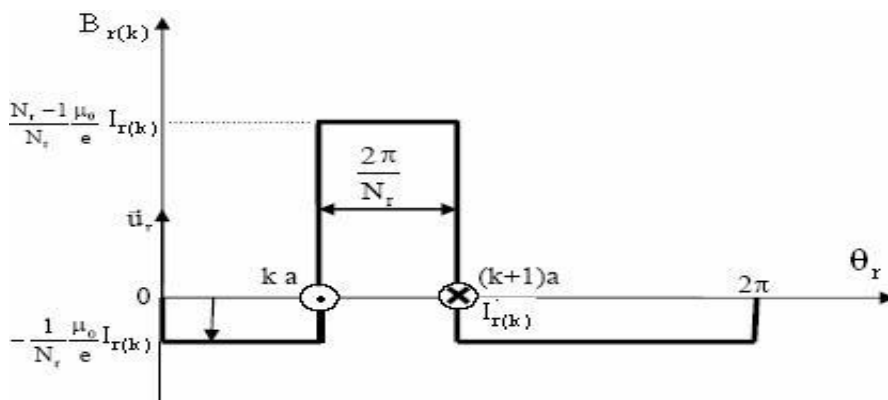


Figure 2.3 : Induction magnétique produite par une maille rotorique

À partir de cette répartition, on calcul l'inductance principale et l'inductance mutuelle d'une maille rotorique par l'expression du flux propre de la maille k.

On a donc :

$$\Phi_{rpk} = \frac{(N_r - 1)}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi.R.L}{e} i_{rk} \quad (\text{II-08})$$

L'inductance propre d'une boucle rotorique est :

$$L_{rpp} = \frac{(N_r - 1)}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi.R.L \quad (\text{II-09})$$

Les mailles rotoriques sont magnétiquement couplées par l'intermédiaire du flux rotorique d'entrefer, l'inductance mutuelle entre deux mailles k et j est donné par:

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi.R.L \quad (\text{II-10})$$

II.3.1.3 Mutuelle inductance entre stator et rotor

La Figure 2.4 indique les bases géométriques de l'expression de flux mutuelle entre l'enroulement d'une phase (n) au stator (représenté par une spire diamétrale) et un circuit élémentaire (k) au rotor.

$$M_{rka} = -M_{sr} \cos(p\theta - n\frac{2\pi}{3} + ka) \quad (\text{II-11})$$

tel que la valeur maximale de l'inductance mutuelle stator et rotor est:

$$M_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s.R.L}{e.p^2\pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right) \quad (\text{II-12})$$

$a = p \frac{2\pi}{N_s}$ est l'angle électrique entre deux maille rotorique.

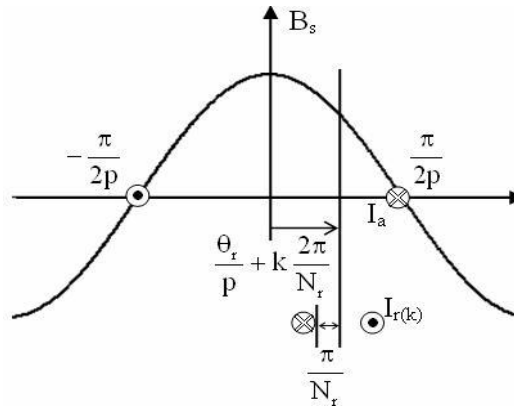


Figure 2.4 : Position de la maille (k) par rapport à la bobine statorique de la phase "a"

II .4 Mise en équation

L'objectif de cette étape est de trouver un modèle adéquat de la machine asynchrone pour mener la simulation.

II.4.1 Partie statorique

II.4.1.1 Equations électriques

En appliquant la loi d'Ohm sur les phases statorique, nous obtenons:

$$[V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d}{dt} [\psi_S] \quad (\text{II-13})$$

Où

$[V_S]$ représente le vecteur tension statorique .

$[I_S]$ le vecteur courant statorique.

$[\psi_S]$ le vecteur flux statorique.

Tel que :

$$[V_S] = \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} ; \quad [I_S] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} ; \quad [\psi_S] = \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{bmatrix}$$

La matrice des résistances R_S où sont regroupées les résistances des phases statoriques, se mettent sous la forme suivante :

$$[R_S] = \begin{bmatrix} r_{Sa} & 0 & 0 \\ 0 & r_{Sb} & 0 \\ 0 & 0 & r_{Sc} \end{bmatrix}$$

II.4.1.2 Equations magnétiques

Les trois phases statoriques sont aussi magnétiquement couplées avec les mailles rotoriques donc les flux total ψ_s s'écrivent sous la forme suivante :

$$[\psi_s] = [L_s] [I_s] + [M_{sr}] [I_{rk}] \quad (\text{II-14})$$

Où

L_s : Matrice des inductances statoriques.

M_{sr} : La matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques.

I_{rk} : Le vecteur courant des mailles rotoriques.

Avec:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sp} + L_{sf} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sp} + L_{sf} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sp} + L_{sf} \end{bmatrix} \quad (\text{II-15})$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos(\theta_r + ka) & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos(\theta_r + ka - \frac{2\Pi}{3}) & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos(\theta_r + ka - \frac{4\Pi}{3}) & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

avec: $k=0, 1, 2, \dots, N_r - 1$

$$[I_{rk}] = \begin{bmatrix} i_{r0} \\ i_{r1} \\ \cdot \\ \cdot \\ i_{(N_r-1)} \end{bmatrix}$$

θ_r : L'angle de rotation du rotor par rapport au stator.

II.4.2 Partie rotorique

La figure (2.5) illustre la modélisation du rotor par son schéma électrique équivalent. Le rotor est composé des différentes barres et portions d'anneaux les reliant à chaque extrémité. Ce découpage est largement suffisant pour l'étude des ruptures de barres ou d'anneaux. Par contre, la prise en compte des courants inters barres nécessiterait d'affiner encore le circuit [29].

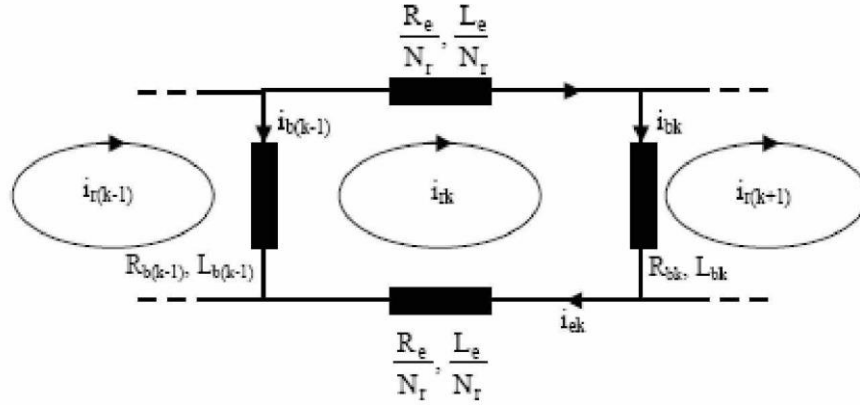


Figure 2.5 : Schéma équivalent d'une maille rotorique

L'équation électrique de cette boucle est :

$$\frac{R_e}{N_r} i_{rk} - R_{b(k-1)} \cdot i_{b(k-1)} + \frac{R_e}{N_r} i_{ek} + R_{bk} \cdot i_{bk} + \frac{d}{dt} \Phi_{rk} = 0 \quad (\text{II.17})$$

Avec : $i_{ek} = i_{rk} - i_{bk}$

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

Le flux totalisé Φ_{rk} pour un circuit élémentaire k est composé de la somme des termes suivants :

- le flux principal :

$$\Phi_{rk} = L_{rp} \cdot I_{rk} \quad (\text{II.18})$$

- le flux mutuel avec les autres circuits du rotor :

$$\Phi_{rr} = M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} I_{rj} \quad (\text{II.19})$$

le flux mutuel avec le stator :

$$\Phi_{sr} = M_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) \quad : \quad \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\Pi}{3}\right) \quad : \quad \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\Pi}{3}\right) \right] \quad (II.20)$$

L'équation (II.17) devient donc :

$$0 = R_{bk} \cdot I_{r(k-1)} + \left(2 \frac{R_e}{N_r} I_{rk} + R_{b(k-1)} + R_{bk} \right) I_{rk} - R_{bk} \cdot I_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} I_e + \frac{d}{dt} \Phi_{rk}$$

D'où :

$$\begin{aligned} \Phi_{rk} = & \left(2 \frac{L_e}{N_r} + L_{rp} + 2L_b \right) I_{rk} - M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} I_{rj} - L_b (I_{r(k-1)} + I_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} I_e \\ & - M_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) \quad : \quad \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\Pi}{3}\right) \quad : \quad \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\Pi}{3}\right) \right] [I_{sabc}] \end{aligned}$$

Avec $k=0,1,2,\dots,N_r - 1$

L'équation relative à l'anneau de court-circuit est :

$$\frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{dI_{rk}}{dt} - L_e \frac{dI_e}{dt} - \left(R_e L_e - \frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{dI_{rk}}{dt} \right) = 0 \quad (II.21)$$

de même façon on utilise les équations de $I_{e(k)}$ et $I_{b(k)}$ et on trouve :

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r} I_{rk} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=1}^{N_r-1} \frac{dI_{rk}}{dt} - L_e \frac{dI_e}{dt} - R_e I_e = 0$$

II.5 Equation d'état de la machine

Écrivant maintenant le système sous la forme canonique suivante :

$$[V]=[R][I]+ [L] \frac{d}{dt} [I] + [I] \frac{d}{dt} [L] \quad (II.22)$$

Tel que :

$[V] = [V_a \quad V_b \quad V_c \quad : \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad : \quad 0]^t$: Le vecteur global des tensions ((Nr+4) x1). Il contient les trois tensions statoriques et les N_r tensions des mailles rotoriques, ainsi que la tension de l'anneau de court-circuit.

$[I] = [i_a \ i_b \ i_c \ \vdots \ i_{r0} \ i_{r1} \ \dots \ i_k \ \dots \ i_{r(N_r-1)} \ \vdots \ i_e]^t$: le vecteur global des courants $((N_r+4) \times 1)$. Il contient les trois courants statoriques et les N_r courants des mailles rotoriques, ainsi que le courant de l'anneau de court-circuit.

La matrice globale des résistances est :

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_S]_{3 \times 3} & \vdots & [0]_{3 \times (N_r+1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ [0]_{(N_r+1) \times 3} & \vdots & [R_r]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix} \tag{II.23}$$

La matrice des résistances rotoriques est :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{b0} + R_{b(N_r-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} - R_{b0} & \dots & 0 & \vdots & \dots & \dots & -R_{b(N_r-1)} \dots \frac{R_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & -R_{b(k-1)} R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{N_r} - R_{bk} \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -R_{b(N_r-1)} & \dots & \dots & 0 \dots -R_{b(N_r-2)} R_{b(N_r-1)} + R_{b(N_r-2)} + 2\frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \frac{R_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{R_e}{N_r} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{R_e}{N_r} \dots R_e \end{bmatrix} \tag{II.24}$$

La matrice globale des inductances est donnée par :

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_S]_{3 \times 3} & \vdots & [M_{Sr}]_{3 \times (N_r + 1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ [M_{rs}]_{(N_r + 1) \times 3} & \vdots & [L_r]_{(N_r + 1) \times (N_r + 1)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

La matrice des inductances rotoriques :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r}M_{rr} - L_b & 0 & \vdots & M_{rr} & \dots & M_{rr} - L_b & -\frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{rr} - L_b & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r}M_{rr} - L_b & M_{rr} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{rr} - L_b & \dots & M_{rr} & \dots & \dots & M_{rr} - L_b & L_{rp} + 2L_b + 2\frac{L_e}{N_r} - \frac{L_e}{N_r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{L_e}{N_r} & \dots & \dots & \vdots & \dots & \frac{R_e}{N_r} & \dots & L_e \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

II.6 Transformation de PARK

La transformation de Park permet le passage d'un système triphasé équilibré vers un système biphasé.

Le système de grandeurs triphasées est tel que la somme instantanée des grandeurs est nulle. Ceci permet d'annuler la composante homopolaire. Par conséquent, le repère (h, d, q) peut être réduit à un repère biphasé (d, q).

La matrice de Park est définie par :

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

(II.27)

On définit la matrice globale de Park de dimension $(N_r + 4) \times (N_r + 4)$ comme :

$$[T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [0]^T & \vdots & [1]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

L'inverse de la matrice globale de Park est :

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} & \vdots & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [0]^T & \vdots & [1]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Sachant que:

$$[V] = [T][V_{tr}] \quad \text{avec : } [V_{tr}] = [V_{0s} \quad V_{ds} \quad V_{dq} \quad \vdots \quad 0 \quad 0 \dots \dots 0 \quad \vdots \quad 0]^t$$

$$[I] = [T][I_{tr}] \quad \text{avec : } [I_{tr}] = [i_{0s} \quad i_{ds} \quad i_{dq} \quad \vdots \quad i_{r0} \quad i_{r1} \dots i_k \dots i_{r(N_r-1)} \quad \vdots \quad i_e]^t$$

L'équation (II.22) devient :

$$[T][V_{tr}] = [R][T][I_{tr}] + [L] \frac{d}{dt} [T][I_{tr}] + [T][I_{tr}] \frac{d}{dt} [L] + [L][T] \frac{d}{dt} [I_{tr}]$$

$$[V_{tr}] = (A+B+C) [I_{tr}] + D \frac{d[I_{tr}]}{dt} \quad (\text{II.30})$$

avec les termes A, B, C, D donnés par :

$$A = [T]^{-1} [R] [T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [R_s] [P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix}$$

$$B = [T]^{-1} [L] \frac{d}{dt} [T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] \frac{d}{dt} [P(\theta)] & \vdots & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [M_{sr}] \frac{d}{dt} [P(\theta)] & \vdots & [0] \end{bmatrix}$$

$$C = [T]^{-1} [L] \frac{d}{dt} [T] = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [P(\theta)]^{-1} \frac{d}{dt} [M_{sr}] \\ \dots & \dots & \dots \\ [P(\theta)] \frac{d}{dt} [M_{sr}] & \vdots & [0] \end{bmatrix}$$

$$D = [T]^{-1} [L] [T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] & \vdots & [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] \\ \dots & \dots & \dots \\ [M_{rs}]^T [P(\theta)] & \vdots & [L_r] \end{bmatrix}$$

La mise en équation du modèle de la machine, conduit à un système complet de dimension $Nr+4$

:

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{0s} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [R_{tr}] \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{0s} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} + [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{0s} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

$[L_{tr}]$ et $[R_{tr}]$ sont les matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park.

On ajoute les équations électromagnétiques (II.32) (II.33) afin d'avoir la vitesse électrique et la position électrique θ_r du rotor.

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \omega_r) \quad (\text{II.32})$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (\text{II.33})$$

II.7 Modèle de taille réduite

La représentation système par l'expression (II-24) fait apparaître un système d'ordre très élevé car il est constitué de nombre de phases statoriques, du nombre de phases rotoriques et des équations électromécaniques [29].

Nous avons appliqué une transformation de Park étendue au système rotorique de manière à transformer ce système à N_r phases en un système (d, q).

Nous pouvons définir un vecteur d'état $[X]$ qui, après l'application de cette matrice de transformation, donnera :

$$[X_{0dqs}] = [T(\theta_s)] [X_{abcs}] \Rightarrow [X_{abcs}] = [T(\theta_s)]^{-1} [X_{0dqs}]$$

$$[X_{0dqr}] = [T_{3N_r}(\theta_r)] [X_{rjk}] \Rightarrow [X_{rjk}] = [T_{3N_r}(\theta_r)]^{-1} [X_{0dqr}]$$

Soit la partie statorique :

$$[V_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_s] [i_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] [i_{rk}] \}$$

L'application de la transformation donne :

$$\begin{aligned} [V_{0dqs}] &= \{ [T(\theta_s)] [R_s] [T(\theta_s)]^{-1} \} [i_{0dqs}] + \{ [T(\theta_s)] [L_s] [T(\theta_s)]^{-1} \} \frac{d}{dt} [i_{0dqs}] \\ &+ \{ [T(\theta_s)] [L_s] \frac{d}{dt} [T(\theta_s)]^{-1} \} [i_{0dqs}] + \{ [T(\theta_s)] [M_{sr}] [T_{3N_r}(\theta_r)]^{-1} \} \frac{d}{dt} [i_{0dqr}] \\ &+ \{ [T(\theta_s)] \frac{d}{dt} [M_{sr}] [T_{3N_r}(\theta_r)]^{-1} \} [i_{0dqr}] \end{aligned}$$

Les équations de tension statorique après la transformation de Park dans le repère lié au rotor sont :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_{er} \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_{er} \Phi_{ds} \\ V_{0s} = R_s I_{0s} + \frac{d\Phi_{0s}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Nous avons la puissance mécanique P_m est :

$$\begin{cases} P_m = \omega(\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}) \\ P_m = C_e \Omega \\ \omega = \Omega \cdot P \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

$$C_e = P(\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{II.36})$$

Pour la partie rotorique :

$$[V_r] = [R_r][i_{rk}] + \frac{d}{dt} \{ [L_r][i_{rk}] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}] [i_s] \}$$

Nous obtenons de la même façon :

$$\begin{aligned} [V_{odqr}] &= \{ [T(\theta_R)][R_r][T(\theta_R)]^{-1} \} [i_{odqr}] + \{ [T(\theta_R)][L_r][T(\theta_R)]^{-1} \} \frac{d}{dt} [i_{odqr}] \\ &+ \{ [T(\theta_R)][M_{sr}] \frac{d}{dt} [T(\theta_R)]^{-1} \} [i_{odqr}] + \{ [T(\theta_R)][M_{rs}][T(\theta_s)]^{-1} \} \frac{d}{dt} [i_{odqs}] \end{aligned}$$

En choisissant un référentiel lié au rotor, les relations angulaires peuvent s'écrire $\theta_s = \theta_r$ et $\theta_R = 0$

Après simplifications, nous obtenons un modèle de taille réduite pour la machine asynchrone.

$$\begin{bmatrix} L_{sc} \cdot I_2 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} \cdot I_2 & \vdots & 0 \\ -\frac{3}{2} M_{sr} \cdot I_2 & L_{rdq} & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{dqs} \\ i_{dqr} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{dqs} \\ V_{dqr} \\ \dots \\ V_e \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} R_s \cdot I_2 + \omega_r L_{sc} \cdot J_2 & -\frac{N_r}{2} \omega_r M_{sr} \cdot J_2 & \vdots & 0 \\ 0 & R_{rdq} \cdot I_2 & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dqs} \\ i_{dqr} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & -\frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{sc} & 0 & \frac{N_r}{2} M_{sr} & 0 \\ -\frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} M_{sr} & 0 & L_{rc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_e \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \\ V_e \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & \frac{N_r}{2} \omega_r M_{sr} & 0 \\ 0 & R_s & \frac{N_r}{2} \omega_r M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_e \end{bmatrix}$$

Avec :

$$L_{rdq} = L_{rp} - M_{rr} + 2 \frac{L_e}{N_r} + 2L_e (1 - \cos(a))$$

$$R_{rdq} = 2 \frac{R_e}{N_r} + 2R_b (1 - \cos(a))$$

Et :

$$I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad J_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Dans le cas d'un défaut rotorique, la matrice $[R_r]$ doit être modifiée

En utilisant la matrice de transformation, nous obtenons une matrice d'ordre 2 pour le rotor.

La matrice de défaut rotorique s'écrit :

$$[R_{rf}] = [R_r] + \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \dots & 0 & R_{bk}' & -R_{bk}' & 0 & \dots \\ 0 & \dots & 0 & -R_{bk}' & R_{bk}' & 0 & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \dots \end{bmatrix}$$

La nouvelle matrice des résistances rotoriques, après transformations, devient :

$$[R_{rfdq}] = [T(\theta_R)][R_{rf}][T(\theta_R)]^{-1} = [T(\theta_R)]\{[R_r] + [R_r']\}[T(\theta_R)]^{-1}$$

La matrice résistance est :

$$[R_{rfdq}] = \begin{bmatrix} R_{rdd} & R_{rdq} \\ R_{rqd} & R_{rqq} \end{bmatrix}$$

Où les quatres termes de cette matrice sont :

$$R_{rdd} = 2R_b (1 - \cos(a)) + 2 \frac{R_e}{N_r} + \frac{2}{N_r} (1 - \cos(a)) \sum_k R_{bfk} (1 - \cos(2k - 1) a)$$

$$R_{rdq} = -\frac{2}{N_r} (1 - \cos(a)) \sum_k R_{bfk} (\sin(2k - 1) a)$$

$$R_{rqd} = -\frac{2}{N_r} (1 - \cos(a)) \sum_k R_{bfk} (\sin(2k - 1) a)$$

$$R_{rqq} = 2R_b (1 - \cos(a)) + 2 \frac{R_e}{N_r} + \frac{2}{N_r} (1 - \cos(a)) \sum_k R_{bfk} (1 + \cos(2k - 1) a)$$

L'indice k caractérise la barre cassée.

Pour la partie mécanique, après l'application de la transformation généralisée sur l'expression du couple, on obtient :

$$C_e = p \cdot N_r \cdot M_{sr} (I_{ds} I_{qr} - I_{qs} I_{dr})$$

La sous-matrice, relative à la résistance rotorique, est un bon indicateur de la présence d'un défaut. En effet, en cas de défaut R_{rdd} et R_{rqq} ne sont plus égaux comme c'est le cas pour la machine saine. En outre, les termes R_{rdq} et R_{rqd} prennent une valeur non nulle, ce qui témoigne de la présence d'un défaut au rotor [29].

II.8 Simulation du modèle de la (MAS)

La simulation à été effectuée par le logiciel «Simulink» sous «Matlab». Dans cette partie on présentera le comportement du moteur asynchrone dans le cas où le rotor est sain et dans le cas où le rotor est défaillant dont les paramètres de la MAS sont donnés dans l'annexe [A]. On note que la matrice A dépend de la vitesse électrique du rotor w , pour cela on la décompose en deux matrices comme suit :

$$A = A_{11} + A_{12}\omega$$

La figure (2.6) représente le schéma bloc de simulation d'une machine asynchrone.

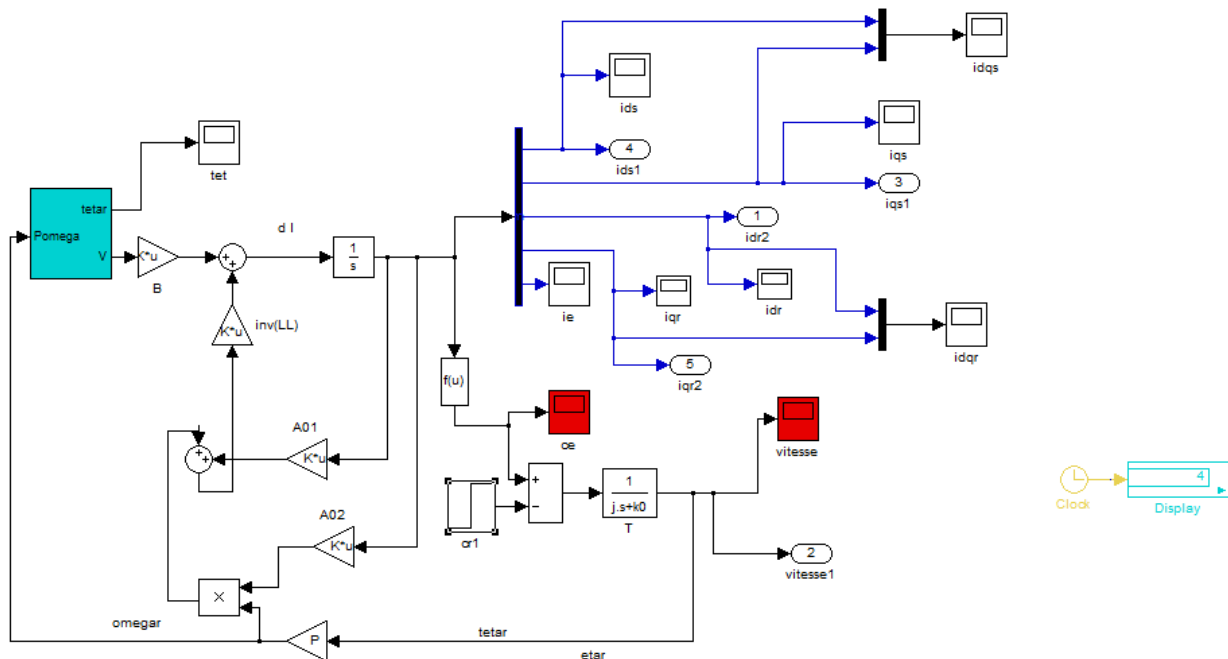
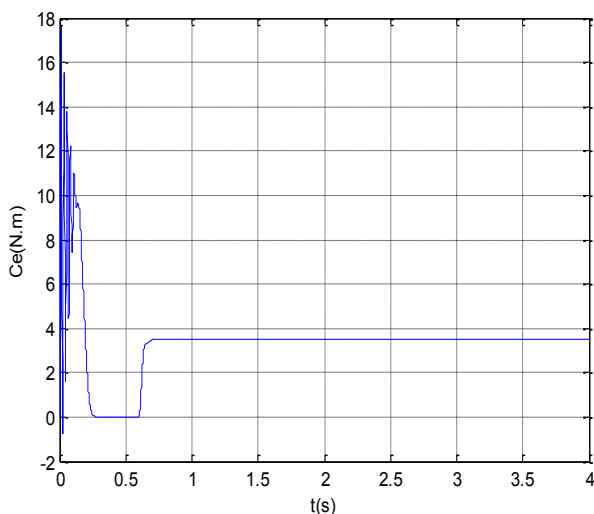


Figure 2.6 : Schéma de simulation en SUMILINK de modèle réduit

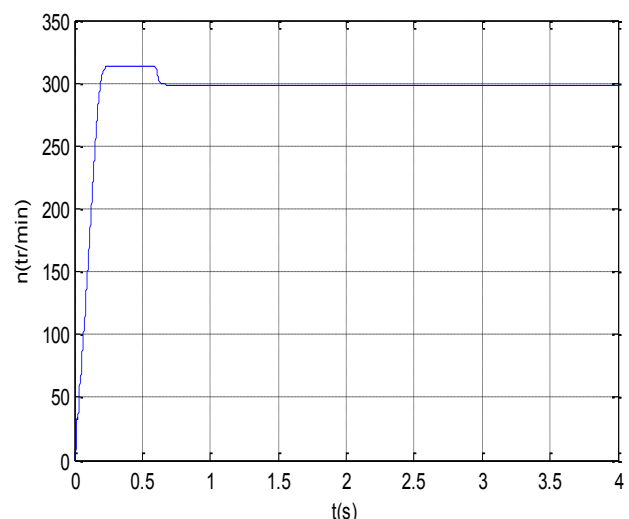
A- Cas d'une machine saine

Pour observer le comportement du modèle simulé, un couple de 3.5 N.m est appliqué à la machine à l'instant t=0.6 s .Ce couple représente le couple nominal de la machine réelle étudiée.

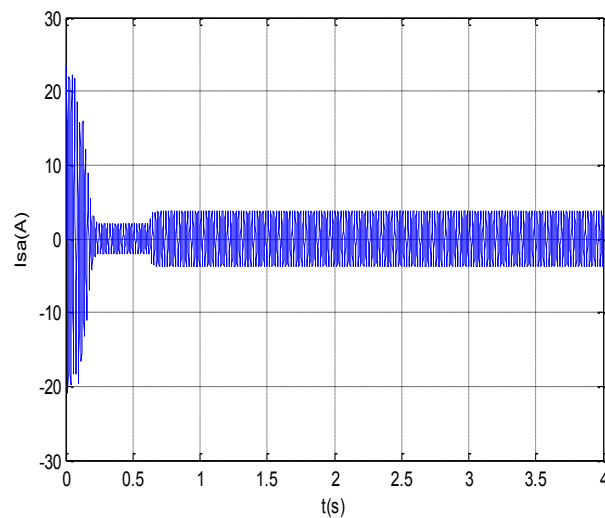
La simulation du modèle du moteur asynchrone avec un rotor sain donne pour la vitesse la courbe de la figure (2.7.b) .Le couple électromécanique est présenté par à la figure (2.7.a), le courant statorique est représenté par la figure (2.7.c) .Toutes ces courbes correspondent bien à un fonctionnement normal d'un moteur asynchrone.



a) Le couple électromagnétique



b) Vitesse de rotation



c) Courant statorique

Figure 2.7 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge ($C_r=3.5$ N.m)

A l'instant $t=0.6$ s, nous appliquons un échelon de couple résistant $C_r=3.5$ N.m. Les figures (2-7) montrent l'évolution du couple électromagnétique, de la vitesse et du courant statorique. Les formes des graphes montrent qu'en phase de démarrage le moteur subit un allongement du régime transitoire. A titre d'exemple, nous prenons la courbe du couple électromagnétique. Cette dernière comprend au début une série d'oscillations d'amplitude élevées qui s'amortissent au cours de l'accélération du moteur, à la fin du régime de démarrage (0.45s. Figure 2-7-a). Le couple atteint sa valeur permanente.

b- Cas d'une machine avec défaut rotorique

1-Cas d'une cassure d'une barre :

Pour observer le comportement du modèle simulé, un couple de 3.5 N.m est appliqué à la simulation du modèle du moteur asynchrone avec un défaut de rupture d'une barre 1 à $t=2$ s.

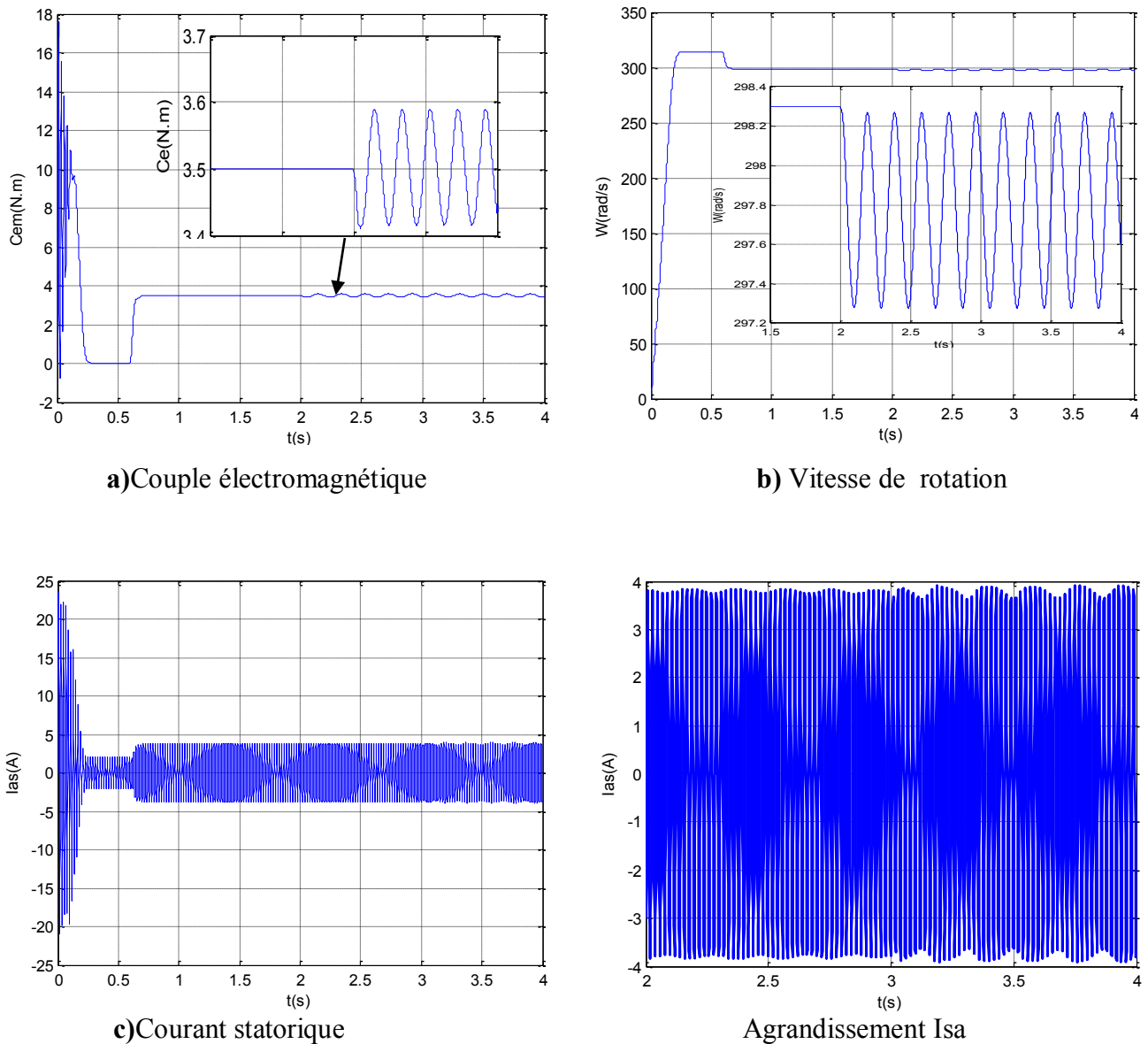


Figure (2-8): Simulation avec le modèle réduit: en charge, avec rupture d'une barre à partir de $t=2s$

➤ **Interprétation des résultats :**

- On remarque dans la figure du couple électromagnétique (a) une augmentation de l'amplitude des ondulations après la rupture de la barre
- La figure (b) représente l'allure de la vitesse de rotation après la rupture de la barre. On remarque des oscillations après la rupture de la barre, par conséquent la valeur moyenne de la vitesse est diminuée.
- La figure (c) permet de vérifier la modulation de l'enveloppe du courant statorique après la rupture d'une barre. On note la présence de l'amplitude de modulation après la rupture de la barre

2-Cas d'une cassure de deux barres adjacentes

Dans la simulation suivante, on va supposer deux défauts successifs : rupture de deux barres adjacentes :

-Rupture de la barre 1 à $t=2s$

-Rupture de la barre 2 à $t=3s$

La machine était initialement saine et chargée $C_r=3.5$ N.m.

Les figures montrent l'évolution du courant statorique, du couple électromécanique, la vitesse en charge et lors de la rupture de la première barre puis de la deuxième barre.

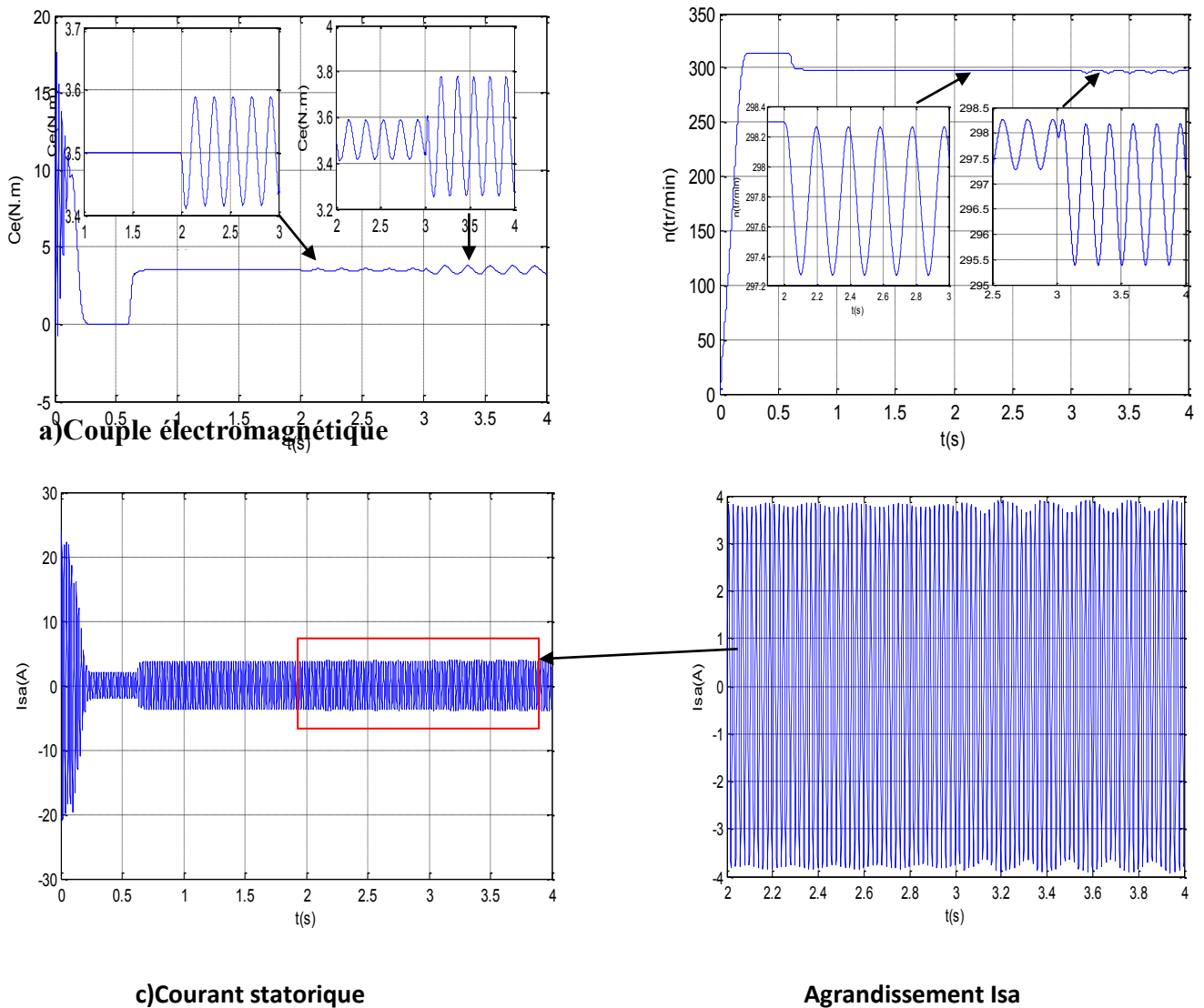


Figure 2. 9 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge ($C_r=3.5$ N.m) et avec rupture de deux barres adjacentes à $t=2s$ et $t=3s$

Interprétation des résultats :

- On remarque dans la figure du couple électromagnétique (a) une augmentation de l'amplitude des ondulations après la rupture de la barre 1, et des ondulations plus grandes que les premières après la rupture de la barre 2.
- La figure (b) représente l'allure de la vitesse de rotation après la rupture de la barre 1, puis la rupture de la barre 2. On remarque des oscillations après la rupture de la barre 1 et la rupture de la barre 2, par conséquent la valeur moyenne de la vitesse est diminuée.
- La figure (c) permette de vérifier la modulation de l'enveloppe du courant statorique après la rupture d'une barre puis de deux barres (1 et 2). On note également l'augmentation de l'amplitude de modulation quand une deuxième barre est cassée.

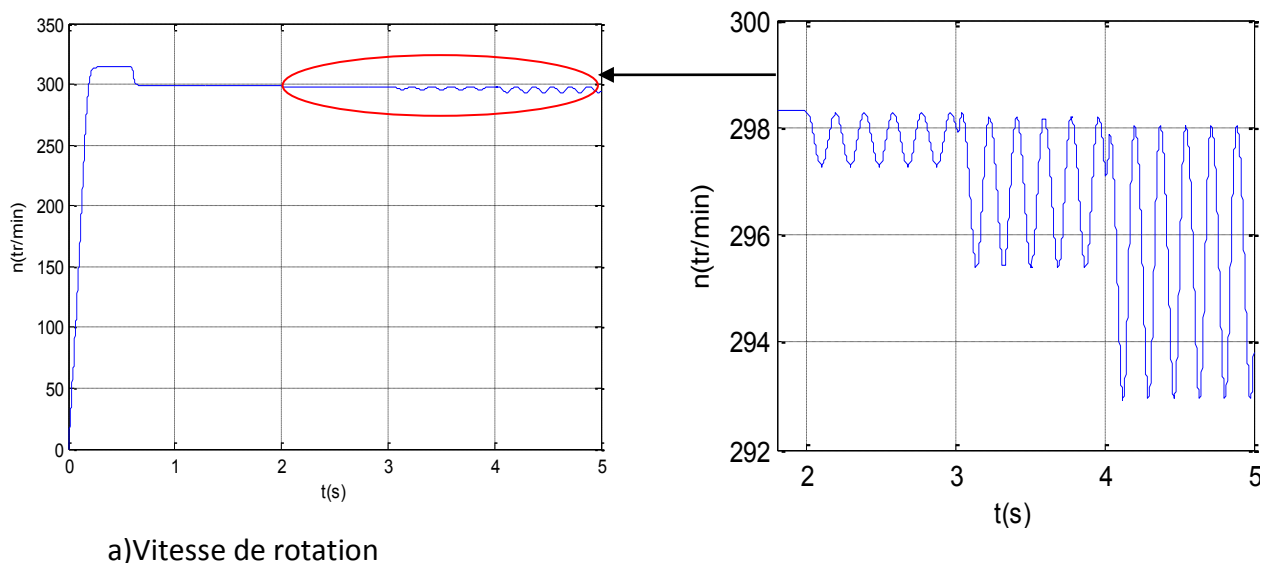
3-Cas d'une cassure de trois barres adjacentes :

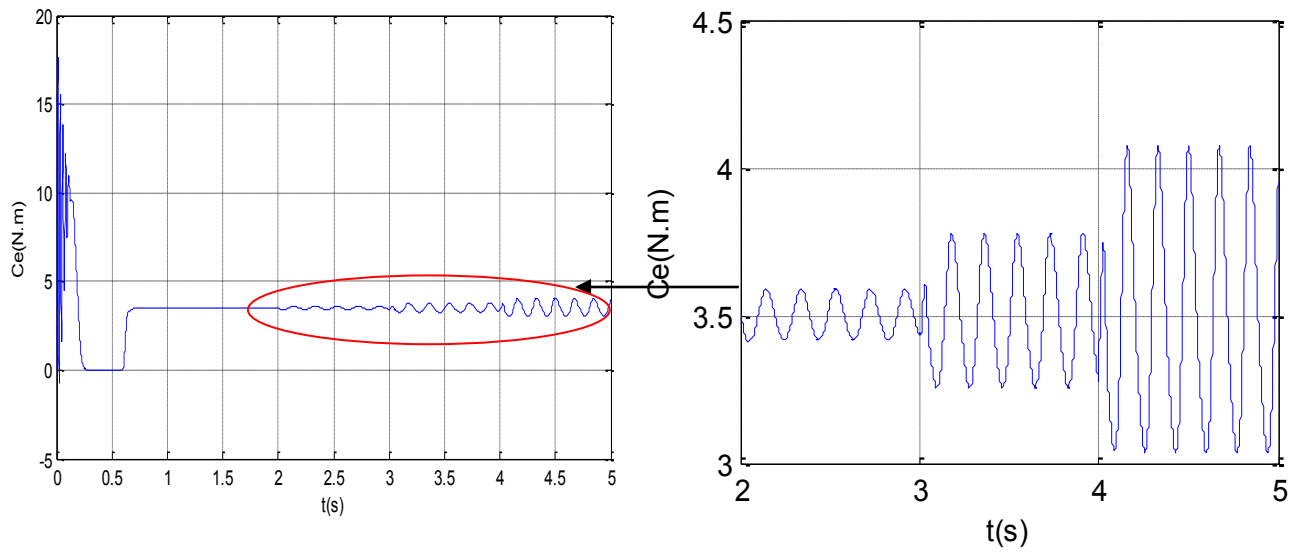
Dans la simulation suivante, on va supposer trois défauts successifs : rupture de barres adjacentes :

- Rupture de la barre 1 à $t=2s$
- Rupture de la barre 2 à $t=3s$
- Rupture de la barre 3 à $t=4s$

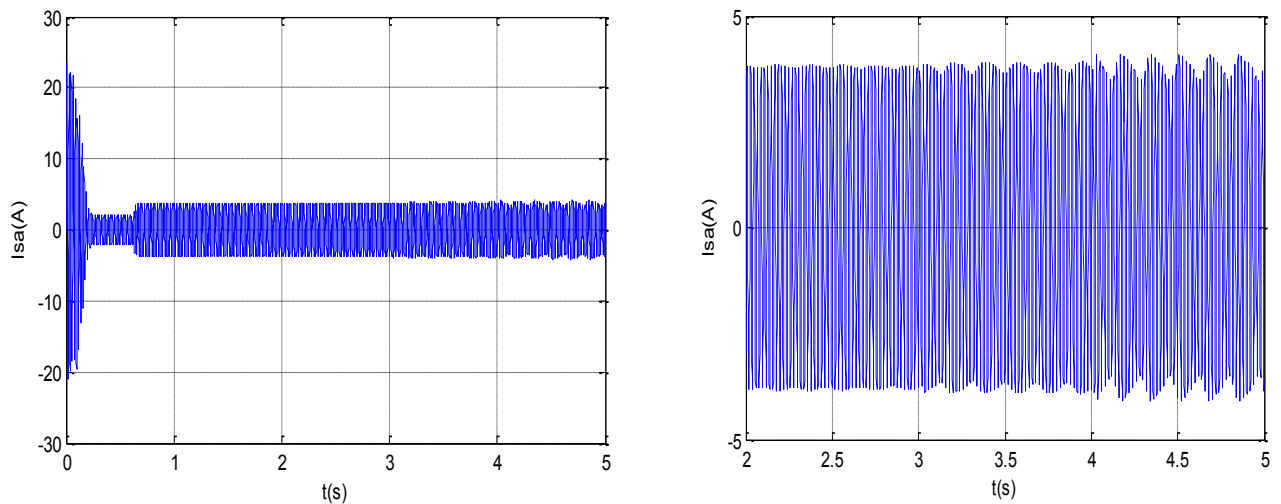
La machine était initialement saine et chargée $C_r=3.5$ N.m.

Les figures montrent l'évolution du courant statorique, du couple électromécanique, la vitesse en charge et lors de la rupture de la première barre puis de la deuxième barre puis la troisième barre.





b) Couple électromagnétique



c) Courant statorique

Agrandissement I_{sa}

Figure 2. 10 : Simulation avec modèle réduit : machine en charge ($C_r=3.5\text{N.m}$) et avec rupture de trois barres adjacentes à $t=2\text{s}$, $t=3\text{s}$ et $t=4\text{s}$.

Interprétation des résultats :

- La figure (a) représente l'allure de la vitesse de rotation après la rupture de la barre 1, puis la rupture de la barre 2 puis la rupture de la barre 3. On remarque des oscillations après la rupture de la barre 1 et la rupture de la barre 2 et la rupture de la barre 3, par conséquent la valeur moyenne de la vitesse est diminuée.

- On remarque dans la figure du couple électromagnétique (b) une augmentation de l'amplitude des ondulations après la rupture de la barre 1, et des ondulations plus grandes que les premières après la rupture de la barre 2 et 3.

- La figure (c) permette de vérifier la modulation de l'enveloppe du courant statorique après la rupture d'une barre puis de deux barres (2 et 3). On note également l'augmentation de l'amplitude de modulation quand une deuxième barre est cassée.

➤ **Remarque**

- Les défauts de rupture de barres se traduisent : dans les courbes du courant statorique : par l'apparition d'une modulation d'amplitude,
- Pour simuler la rupture de la 1^{ère} barre, on augmente sa résistance de 11 fois [29]. Il s'ensuit une augmentation de la valeur efficace du courant dans les barres voisines de la barre cassée.
- On remarque aussi que le temps du régime transitoire augmente avec la sévérité du défaut de barres.
- Au moment de l'apparition du défaut, les grandeurs électriques sont caractérisées, par rapport au régime normal, par des variations brusques.

Conclusion :

Dans ce travail, nous avons établi le modèle mathématique de la machine asynchrone alimentée en tension. La complexité de ce modèle a été réduite par un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et par l'application de la transformation de PARK qui ramène le modèle triphasé en un modèle diphasé équivalent et les résultats de simulation pour différents régimes de fonctionnement, sain et défaillant (sans onduleur) . On a trouvé que la rupture d'une barre provoque des oscillations dans le couple et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique avec l'apparition des harmoniques, l'amplitude de ces oscillations augmentent avec le nombre et l'emplacement des barres cassées. Les résultats obtenus permettent de conclure, que la cassure d'une barre provoque diminution de la valeur moyenne de vitesse, cette dernière est diminuée en fonction du nombre des barres cassées. Nous présentons les résultats de simulation obtenus à l'aide de ce modèle dans le Chapitre suivant qui sera consacré au diagnostic des défauts dans la cage rotorique.

Chapitre III

Techniques des Ondelettes appliquées au MAS

III.1 Introduction

Les transformations linéaires ont toujours joué un très grand rôle dans le traitement du Signal, l'objectif du traitement du signal est d'analyser avec soin, coder efficacement, transmettre rapidement et reconstruire soigneusement un signal à partir de ses fluctuations et de ses oscillations, c'est dans cet axe que les outils de traitement de signal ont pris naissance l'un après l'autre de la transformée de Fourier avec ses variétés aux ondelettes de nos jours utilisées massivement dans le traitement des signaux dans les différents domaines [30].

La transformée de Fourier, ou plus généralement l'analyse fréquentielle ou spectrale, est un outil fondamental pour la compréhension et la mise en œuvre de nombreuses techniques numériques de traitement des signaux. Cet outil trouve de nombreuses applications dans des différents secteurs tels que la reconnaissance vocale, l'amélioration de la qualité des images, la transmission numériques, le milieu biomédical et autres. Il a, également, envahi le domaine de diagnostic et détection des défauts dans les machines électriques statiques ou tournantes [30].

De nos jours, l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables, des machines électriques, reste la plus utilisée pour le diagnostic des défauts, car la plupart d'entre eux et qui sont connus peuvent être détectés avec ce type d'approche [31]. Avec les limitations qu'ont connues ces méthodes, les recherches ont poussé vers une autre envergure pour améliorer la qualité et l'efficacité du traitement du signal d'où la naissance des ondelettes. La transformée en ondelettes décompose le signal à la fois en temps et en fréquence et qui introduit une fenêtre dont la taille variant avec la fréquence.

Les ondelettes donnent une bonne alternative pour l'étude des classificateurs dans les différents domaines (traitement d'image, biomédical, ...) et aussi dans la détection et la classification des défauts dans les machines électriques [32-33].

Les ondelettes constituent donc un outil parmi les plus récents du traitement du signal et qui datent de quelques décennies seulement. Elles nous permettent d'effectuer une analyse robuste et mènent à de multitudes applications. Contrairement à la transformée de Fourier à court terme, la transformée en ondelettes fait appel à la notion de temps-échelle impliquant des fenêtres d'analyse de longueurs dynamiques [34].

L'objectif de ce chapitre est double. Présenter la théorie d'ondelettes et la technique du FFT en première étape et en deuxième étape appliquer leur transformée pour la détection des défauts dans une machine asynchrone à cage d'écureuil.

III.2 Transformée de Fourier

L'analyse de Fourier est une base majeure de la physique et des mathématiques. Elle est indissociable du traitement du signal, et ce pour deux raisons principales. La première est l'universalité du concept de fréquence sur lequel elle repose. La seconde tient à la structure même de l'analyse de Fourier qui se prête aisément à des transformations communes comme le filtrage linéaire en les traduisant de manière particulièrement simple.

En 1807, la transformation de Fourier a vu le jour, elle consiste à décomposer un signal périodique quelconque en une somme de signaux sinusoïdaux de différents amplitudes et déphasages [29].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{III-01})$$

La transformée de Fourier Discrète, généralement notée TFD, est une suite finie de N termes $x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1)$ et elle est calculée par la relation :

$$X(K) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \text{ pour } k = 0, \dots, N-1 \quad (\text{III-02})$$

Où le terme N représente le nombre de points de calcul de la TFD. Ce terme joue sur la précision du tracé alors que le terme X est lié à la résolution en fréquence [35].

III.2.1 La Transformée de Fourier Rapide (FFT)

La transformée de Fourier rapide, est une technique mathématique de calcul rapide élaborée en 1965 par J. W. Cooley et J. W. Tuckey. La FFT permet de ramener le calcul de la transformée de Fourier discrète de N^2 à $N \cdot \log(N)$ opérations. Cette réduction de la complexité de calcul a suffi à faire passer facilement résolubles de nombreux problèmes liés à l'analyse spectrale. Pour une meilleure visualisation d'une analyse fréquentielle, la FFT est utilisée au travers d'une fenêtre glissante d'observation. Malgré sa célébrité et son succès, la FFT reste inadaptable pour les signaux non stationnaires et elle montre assez vite ses limitations, perte de localisation temporelle [36].

III.2.2 Analyse des signaux dans le domaine temps fréquence (STFT)

L'analyse, par ces méthodes, est introduite pour l'étude des signaux non stationnaire c'est à dire les signaux qui évoluent dans le temps. Elle est connue en anglais sous le nom STFT (Short Time Fourier Transform). L'idée originale sur laquelle est basée cette méthode est apparue en 1946 grâce au physicien Denis Gabor [37]. Il s'agit de calculer la transformée de Fourier du signal temporel découpée en morceaux. Multiplication du signal $x(t)$ par une fenêtre glissante $h(t - b)$ (réelle) et calcul de la transformée de Fourier de ce produit.

Par conséquent, la STFT décompose le signal dans le domaine temporel en deux dimensions temps et fréquence (f,b) . Le module de ce plan qui est le carré de l'amplitude de la STFT $|F(f,b)|^2$ est appelé le spectrogram. Le problème, pour cette représentation, est le fenêtrage où le signal ne peut être représenté fidèlement et il se retrouve, donc, dans les mêmes limites que la transformée de Fourier. La résolution en temps et en fréquence du spectrogramme est limitée par le principe d'incertitude de Heisenberg-Gabor qui stipule que l'on ne peut être infiniment précis en temps et en fréquence. Le spectrogramme est une analyse mono-résolution; on ne pas être à la fois « précis » en temps et en fréquence. Cependant, pour une large classe de signaux réels, les zones d'énergie sont non-stationnaires sur des périodes courtes à haute fréquence d'où l'intérêt d'une analyse multi-résolution [38].

Parmi les techniques de l'analyse temps fréquence, la transformation de Wigner-Ville permet des diagnostics précis. Cette transformation est une fonction réelle qui définit une distribution d'énergie dans le plan temps-fréquence. Elle peut être interprétée comme une densité spectrale instantanée.

Cependant, cette analogie est tempérée par l'existence de valeurs négatives qui en rendent l'interprétation délicate. Des procédures de lissage (fréquentiel et temporel) par fenêtrage permettant de réduire les interférences entre les différentes composantes fréquentielles du signal. La représentation temps fréquence a permis ainsi de mettre en évidence la modulation de fréquence linéaire en fonction du temps [35].

III.3 LES ONDELETTES (WAVELETS)

En raison des limites de la transformée de Fourier et de Gabor (STFT), au début des années 1980 la collaboration des physico-mathématiciens a introduit la transformée en ondelettes qui décompose le signal à la fois en temps et en fréquence et qui introduit une fenêtre dont la taille varie avec la fréquence [39,40]. Le terme ondelette désigne une fonction $\psi \in L^2(\mathcal{R})$ qui oscille sur un intervalle de longueur finie, donc d'intégrale nulle. Au-delà, la fonction décroît très vite vers zéro.

A partir de l'unique fonction ψ , on construit par translation et dilatation une famille d'ondelettes :

$$\psi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right), a \in \mathcal{R}^+, b \in \mathcal{R}^+ \quad (\text{III-03})$$

Où a est l'échelle, sert à dilater, et b est la position, sert à translater. Le couple (a, b) définit les atomes (noyaux) de base.

Ci-dessous sont données les familles des ondelettes sur le tableau (3.1), obtenues à partir de Matlab et qui restera une source très intéressante en ce qui concerne le type de forme d'ondelettes.

Tableau (3.1) : Famille des ondelettes [36]

Ondelette	Symbole
Haar	Haar
Daubechies	Db
Symlets	Sym
Coiflets	Coif
BiorSplines	Bior
ReverseBior	Rbio
Meyer	Meyr
Dmeyer	Dmey
Gaussian	Gaus
Mexican_hat	Mexh
Morlet	Morl
Complex Gaussian	Cgau
Shannon	Shan
Frequency B-Spline	Fbsp
Complex Morlet	Cmor

III.3.1 Transformée en ondelettes :

III.3.1.1 Définition :

La transformée en ondelettes est similaire à la transformée de Fourier, avec une fonction de mérite complètement différente. La différence principale est la suivante : la transformée de Fourier décompose le signal en sinus et en cosinus, c'est-à-dire en fonctions localisées dans l'espace de Fourier; contrairement à la transformée en ondelettes qui utilise des fonctions localisées à la fois dans l'espace réel et dans l'espace de Fourier [41-42].

La transformée en ondelettes est en fait un ensemble infini de diverses transformées, dépendant de la fonction de mérite utilisée pour la calculer. Il existe aussi de nombreuses manières de classer les types de transformées en ondelettes. On peut utiliser les *ondelettes orthogonales* pour le développement en ondelettes discret et les *ondelettes non-orthogonales* pour le développement en ondelettes continu [37],[41-42].

L'ondelette est une forme d'onde qui a une durée limitée et avec une valeur moyenne égale à zéro. La transformation en ondelettes permet d'appliquer une analyse multi-résolution sur le signal étudié. L'analyse multi-résolution de la transformation en ondelettes équivaut à une décomposition atomique temps-échelle. Chacun des atomes peut s'interpréter comme étant une projection locale du signal analysé et est obtenu à partir d'une ondelette $\psi(t)$ unique par une translation en temps et une dilatation. Partant d'une fonction bien localisée, dans le plan temps-échelle.

La transformée en ondelettes d'un signal f est la famille $S(u)$ coefficients d'ondelettes qui dépend des deux paramètres a et b où a est l'échelle et b est le facteur de position à analyser. Suivant les besoins de l'analyse du signal f les paramètres (a,b) peuvent être utilisés de façon continue (TOC) ou discrète (TOD). La transformée continue d'ondelettes exigeant une continuité des valeurs des paramètres (a,b) est plutôt utilisée dans l'analyse de l'allure du signal (approximation) tandis que la transformée discrète d'ondelettes basée beaucoup plus sur l'utilisation de la complémentarité des deux filtres, passe-haut et passe-bas, va servir à l'extraction d'informations caractérisant les transitions rapides du signal (détails).

III.3.2 Transformée en ondelettes continue

La transformée en ondelettes continue (Continuous Wavelet Transform CWT) est une implémentation de la transformée en ondelettes utilisant des échelles arbitraires ainsi que des ondelettes pratiquement arbitraires. Les ondelettes utilisées ne sont pas orthogonales et les données obtenues par cette transformée sont hautement corrélées [37], [41-42].

En principe la transformée en ondelettes continue fonctionne en utilisant directement la définition de la transformée en ondelettes, c'est-à-dire en calculant la convolution du signal par l'ondelette mise à l'échelle. Nous obtenons de cette manière pour chaque échelle un ensemble de longueur N identique à celle du signal. En utilisant M échelles choisies arbitrairement nous obtenons une matrice $N \times M$ représentant directement le plan temps-fréquence. L'algorithme utilisé pour ce calcul peut être basé sur une convolution directe ou par une convolution réalisée par une multiplication dans l'espace de Fourier (aussi appelée transformée en ondelettes rapide).

Le choix de l'ondelette utilisée pour la décomposition temps-fréquence est le point le plus important. Celui-ci a une influence sur la résolution en temps et en fréquence du résultat. Nous ne pouvons modifier de cette manière les caractéristiques de la transformée en ondelettes (les basses fréquences ont une bonne résolution fréquentielle mais une mauvaise résolution temporelle; les hautes fréquences ont une bonne résolution temporelle et une mauvaise résolution fréquentielle), mais on peut toutefois augmenter la résolution fréquentielle totale ou la résolution temporelle totale. Ceci est directement proportionnel à la largeur de l'ondelette utilisée dans l'espace réel et dans l'espace de Fourier [41-42].

La transformée en ondelettes utilise des translations et des dilatations d'une fonction fixe, l'ondelette mère $\psi \in L^2(\mathbb{R})$. Dans le cas de la transformée continue, les paramètres de translation et de dilatation varient de manière continue. En d'autres mots, la transformée utilise les fonctions [26].

$$\psi_{(a,b)}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (\text{III-04})$$

Avec $a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$,

Quand on analyse un signal $f(x)$ avec ces ondelettes, on le transforme en une fonction de deux variables (le temps d'échelle d'analyse de signal) qu'on peut appeler $W(a, b)$:

$$W(a, b) = \langle f, \psi_{(a,b)} \rangle \quad (\text{III-05})$$

Que l'on peut également noter :

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int f(x) \psi_{(a,b)}(x) dx$$

Cette transformation est en théorie infiniment redondante puisque l'ondelette est traduite de manière continue. Cependant il existe des méthodes pour diminuer cette redondance : l'une de ces méthodes consiste en l'emploi de la transformée en ondelettes discrète [29].

Le facteur $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$ normalise $\psi_{(a,b)}$ a fin de préserver l'énergie du motif analysant :

$$\|\psi_{(a,b)}\|_2^2 = \int |\psi_{(a,b)}(x)|^2 dx = 1$$

La procédure de calcul des coefficients $C_x(a, b)$ s'effectue comme suit :

On multiplie de signal et la fonction analysante et l'on calcule l'intégrale du produit.

C'est un processus assez simple. En fait il se déroule en cinq étapes :

1. On prend une ondelette et on la compare à une section au début du signal original.
2. On calcule le coefficient $C_x(a,b)$ qui représente le degré de corrélation de l'ondelette avec cette portion du signal .
3. On translate l'ondelette vers la droite et on répète les étapes (1) et (2) jusqu'à ce que le signal soit couvert en entier.
4. On dilate l'ondelette et on répète les étapes une (1) à trois (3).
5. On recommence l'opération pour toutes les étapes à différentes échelles

Le signal peut être reconstruit à partir de ses coefficients en ondelette sous réserve que l'ondelette Ψ vérifie la condition d'admissibilité. C'est - a -dire que l'intégrale suivante existe et soit finie :

$$C_\Psi = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\Psi}(f)|^2}{|f|} df < +\infty \quad (\text{III-06})$$

Ou $\hat{\Psi}(f)$ désigne la transformée de Fourier de $\Psi(x)$. La formule de reconstruction fait intervenir ce coefficient de normalisation C_Ψ

$$f(x) = \frac{1}{C_\Psi} \int_{b \in \mathbb{R}} \int_{a>0} C_x(a, b) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) db \frac{da}{a^2} \quad (\text{III-07})$$

Pour garantir l'existence finie de C_ψ , il faut s'assurer de la convergence l'intégrale aux bornes. A l'infini, il faut que le spectre de l'ondelette mère ait une décroissance au moins en $|f|^{-\frac{1}{2}}$. Par contre, Autour de l'origine le spectre doit s'annuler pour assurer la convergence de l'intégrale en zéro :

$$\widehat{\Psi}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x) dx = 0 \quad (\text{III-08})$$

Cette condition impose à l'ondelette d'être à moyenne nulle. Ainsi son amplitude passe forcément par zéro et présente donc quelques oscillations ; c'est ce que fait qu'on lui attribue le nom d'ondelette.

III.3.3 Transformée en ondelettes discrète (TOD):

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la différence de cette dernière, La TOD (Discrete Wavelet Transform DWT) utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. On appelle transformée en ondelettes discrète dyadique toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur d'échelle $u=2^i$. Il est clair que la transformée en ondelettes discrète est pratique en implémentation sur tout système numérique (PC, DSP, CARTE à $\mu\text{P} \dots$).

Il est à noter que la transformée en ondelette continue TOC est aussi implantable sur les systèmes digitaux avec un lourd calcul provenant de la nature continue du facteur d'échelle et de la dilatation (toutes les valeurs sont possibles). L'analyse en multi-résolution permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue de la plus fine à la plus grossière.

III.4 Application de l'analyse spectrale :

Il existe de nombreux types de fenêtres qui privilégient des aspects particuliers par rapport aux autres. Il convient donc de choisir la fenêtre adéquate pour le signal en fonction du problème particulier que l'on doit résoudre.

Cette caractéristique porte essentiellement sur trois points :

- La largeur et la hauteur du lobe principal.
- La hauteur du premier lobe secondaire.
- L'atténuation des lobes secondaires.

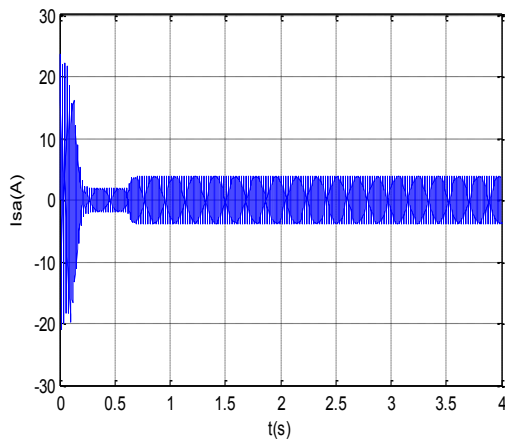
Pour cela, on utilise la fenêtre de Hanning ,Hamming

Lors de la rupture de barre, il est difficile d'analyser directement le courant statorique.

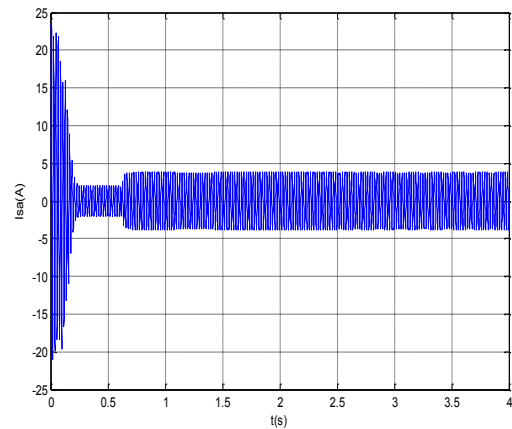
Ce dernier ne présente en effet qu'une faible modulation.

L'analyse par FFT permet de mettre en évidence les raies présentes dans le spectre du signal. Nous présentons les résultats de simulation de l'analyse du courant statorique par FFT en régime permanent et en charge.

Pour le diagnostic des défauts électriques du rotor, on s'intéresse principalement aux harmoniques à gauche du fondamental qui caractérisent ces défauts. On remarque que leurs amplitudes augmentent avec la sévérité des défauts (figure 3.1) et que le cas de deux barres est plus sévère que celui d'une barre et même cas avec trois barres .Quand aux harmoniques à droite du fondamentale. Elles nous donnent de plus amples informations sur la sévérité des défauts.

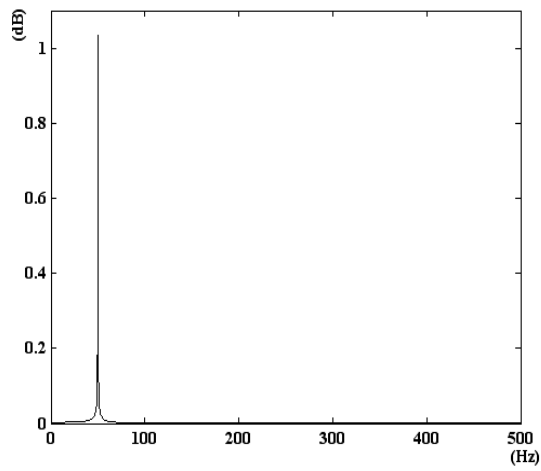


Courant statorique état sain

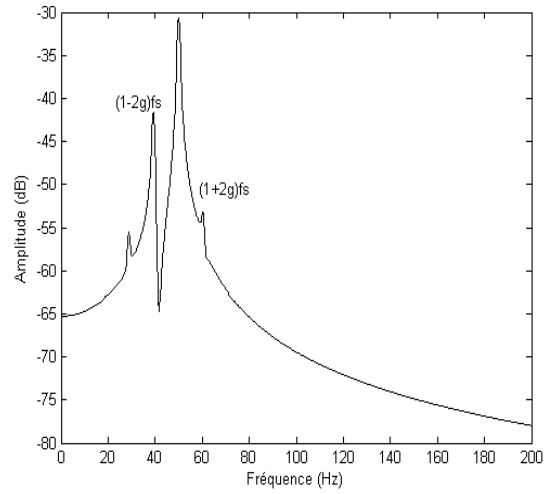


Courant statorique avec une barre cassée

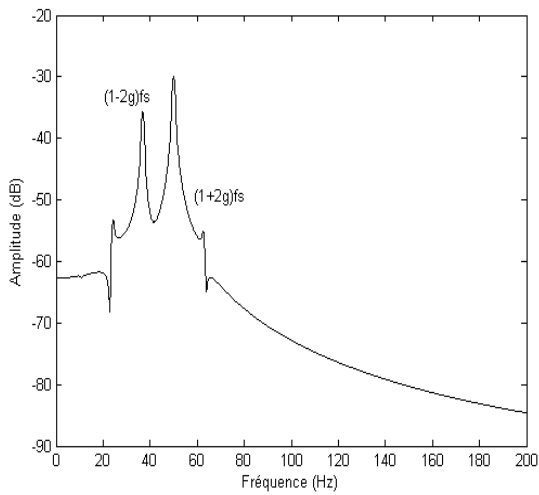
Fenêtre Hamming



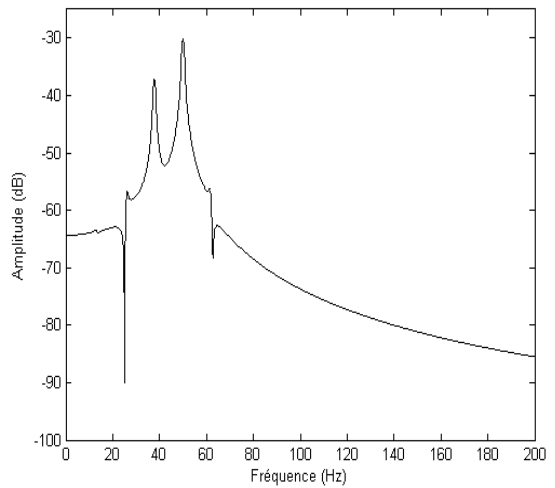
A) Spectre linéaire du courant (machine saine)



B) Moteur en charge ($Cr=3.5N.m$), avec une barre cassée "1"

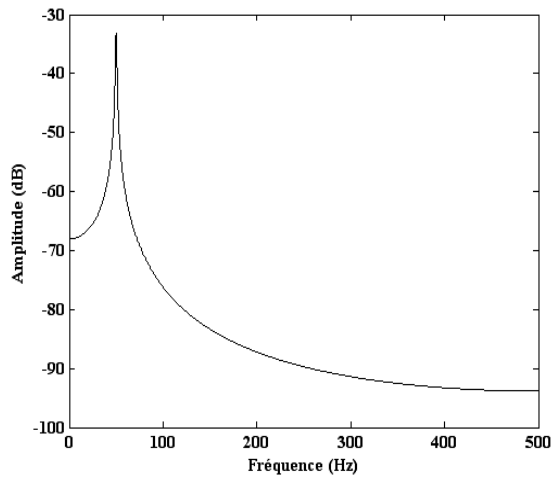


C) Moteur en charge ($Cr=3.5N.m$) avec deux barres cassées 1-2

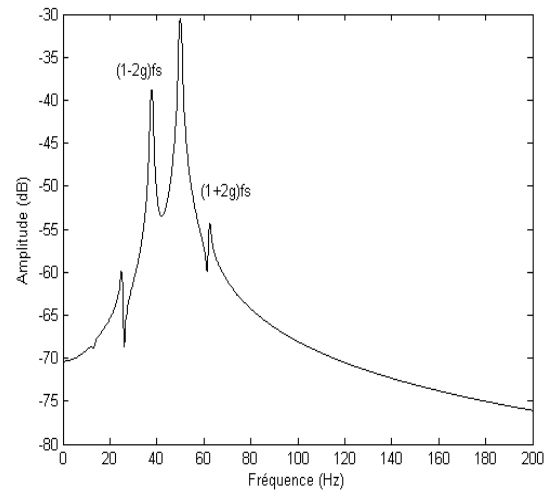


D) Moteur en charge ($Cr=3.5N.m$), avec trois barres adjacentes cassées "1-2.3"

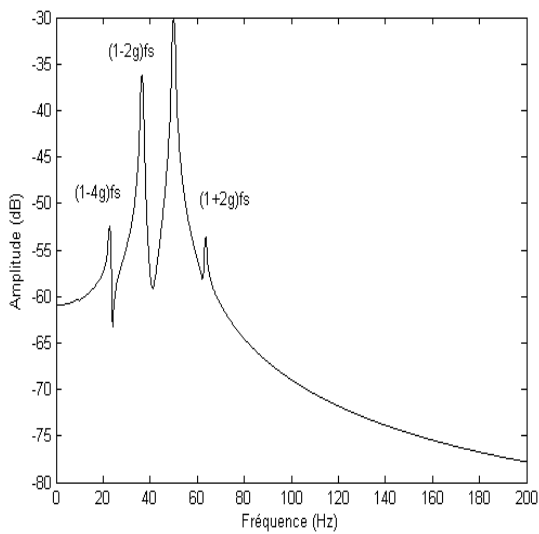
Fenêtre Hanning



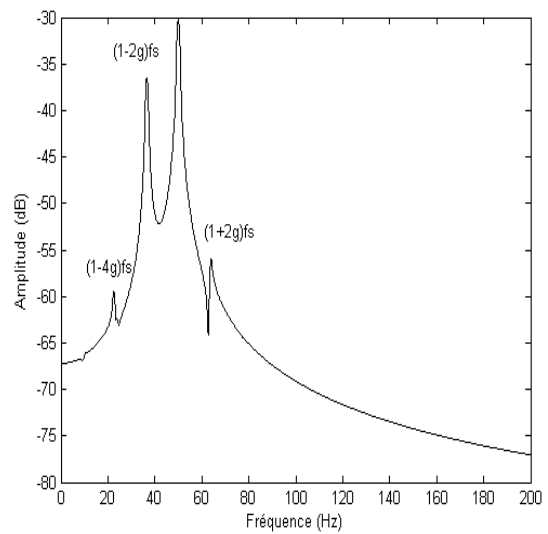
a) Spectre du courant statorique
(Machine saine)



b).Moteur en charge ($C_r=3.5N.m$),
avec une barre cassée "1"



c)Moteur en charge ($C_r=3.5N.m$)
avec deux barres cassées "1 et 2



d)Moteur en charge ($C_r=3.5N.m$)
avec trois barres adjacentes cassées "1, 2 et 3"

Figure 3.1 : Fenêtre de Hamming et Hanning pour état sain et avec défaut

III.4.1 Interprétation des résultats :

Comme on peut le voir, l'utilisation de la fenêtre a un rôle important dans la discrimination des composantes fréquentielles qui indiquent les conditions des défauts.

Nous avons de bons résultats par l'application de cette technique au courant statorique pour un état sain et avec défaut.

Du point de vue des résultats de simulation effectués, on peut affirmer que la manifestation des raies est un signe de l'existence du défaut, de plus leur amplitude est une indication du degré de sévérité du défaut.

- Les figures (3.1.A), (3.1.a) représentent le spectre du courant statorique par la fenêtre de Hamming et Hanning à l'état sain .C'est évident qu'on n'observe aucune raie latérale.
- Les autres figures représentent le spectre du courant statorique par la fenêtre de Hamming et Hanning pour des différentes cassures de barre, on remarque l'apparition des raies latérales de fréquence et des amplitudes.

III.5 Application de la Technique des Ondelettes au diagnostic de la MAS :

La signature du courant statorique ou le courant moteur représente une source très riche en information 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 permanent.

Dans le cas de notre étude nous avons basé sur l'application de la TOC pour traiter et analyser le courant d'une phase statorique de la machine pendant son régime permanent pour détecter d'éventuels défauts dans la machine.

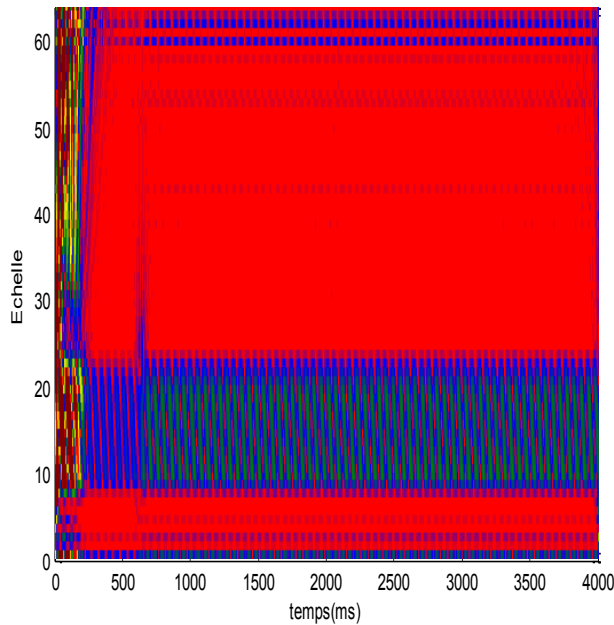
III.5.1 Résultats de simulation par la transformée en ondelettes continues :

Dans cette section on se propose d'analyser le courant statorique de la machine asynchrone à l'aide de la transformée en ondelettes continues (TOC). Les figures ci-dessous montrent l'évolution des coefficients de la (TOC) du courant d'une phase statorique pour des

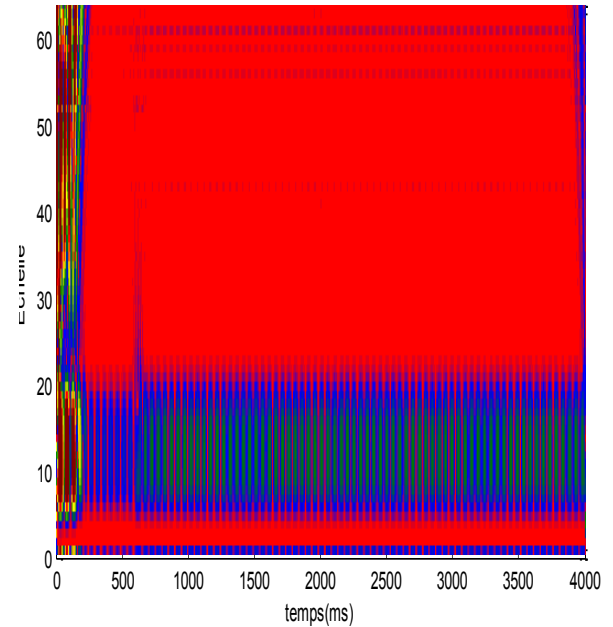
échelles entre 0 et 64 respectivement dans le cas : Moteur sain, une barre cassée, deux barres cassées à $t=2s$ et avec l'application d'un couple de charge de 3.5 N.m à partir de $t=0.6s$.

- **Résultats de simulation d'un fonctionnement avec machine saine (Application d'ondelettes) :**

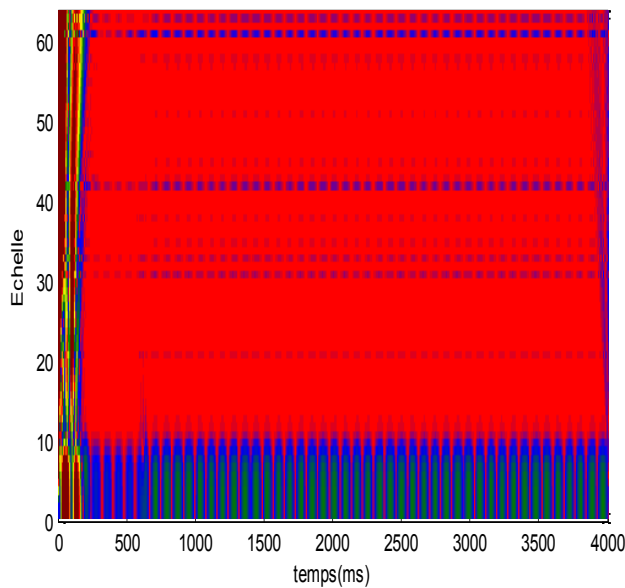
La figure (3.2) représente les transformées en ondelettes du courant d'une phase statorique dans le cas d'une machine saine par application de divers types d'ondelettes.



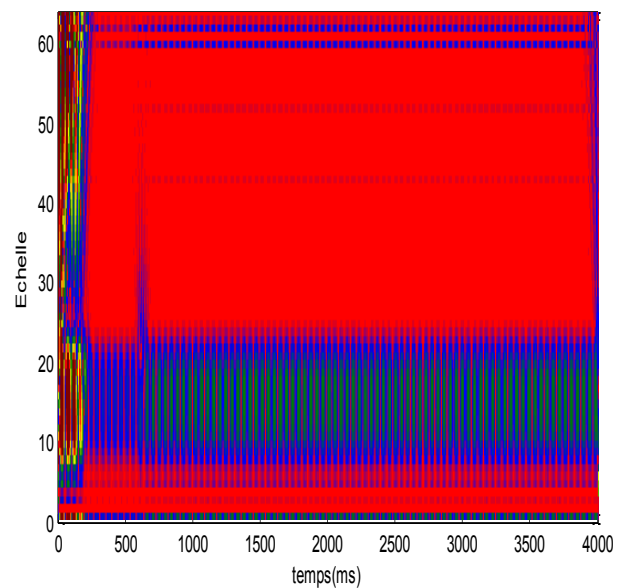
Cas d'ondellete Meyr



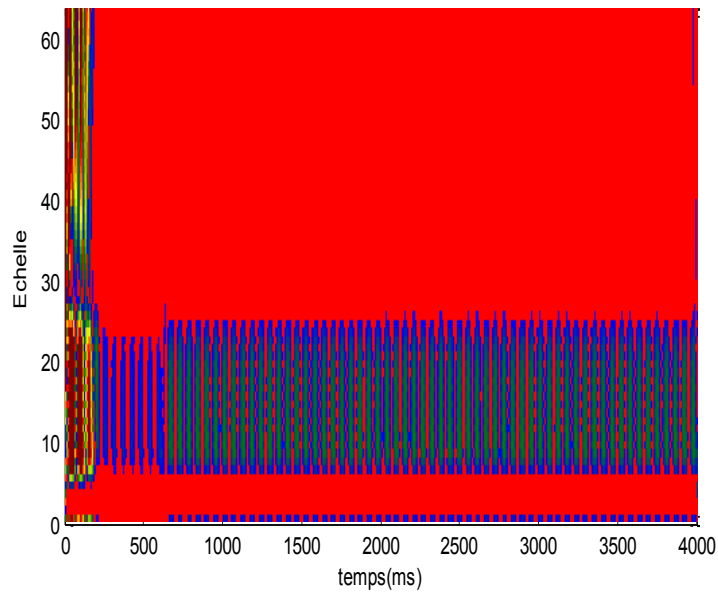
Cas d'ondelette Gaussien



Cas d'ondelette Mexican



Cas d'ondelette Morlet

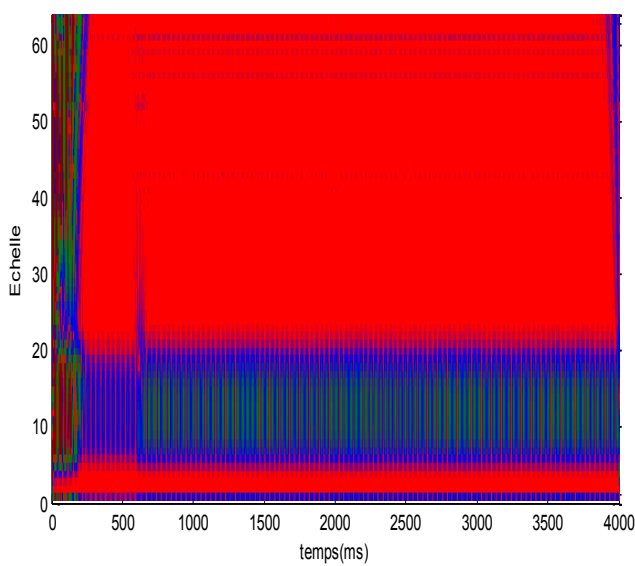


Cas d'ondelette Coifet

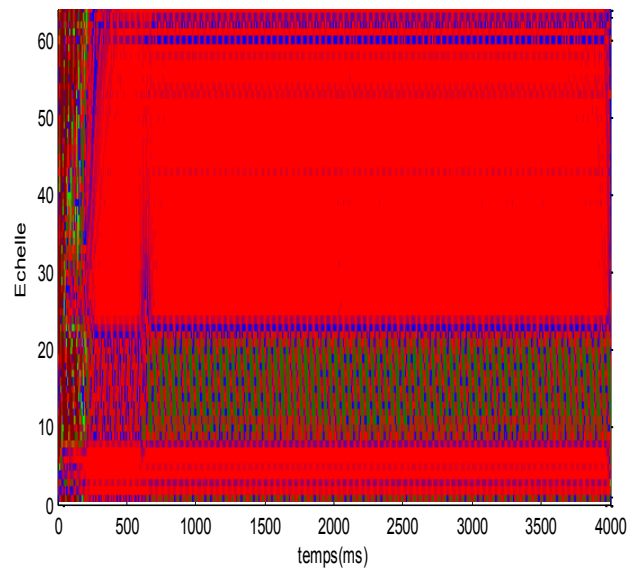
Figure (3.2) : Différents types d'ondelettes à l'état sain

- **Résultats de simulation d'un fonctionnement avec cassure d'une seule barre:**

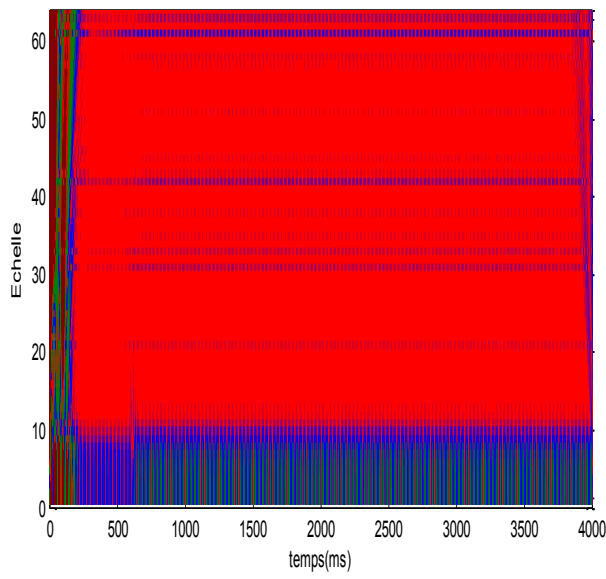
La figure (3.3) représente les transformées en ondelettes du courant d'une phase statorique respectivement dans le cas de cassure d'une barre à $t=2s$.



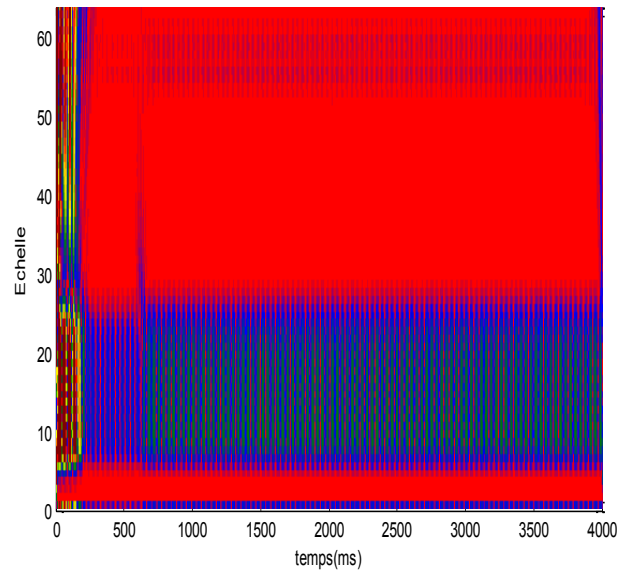
Cas d'ondellete Gaussien



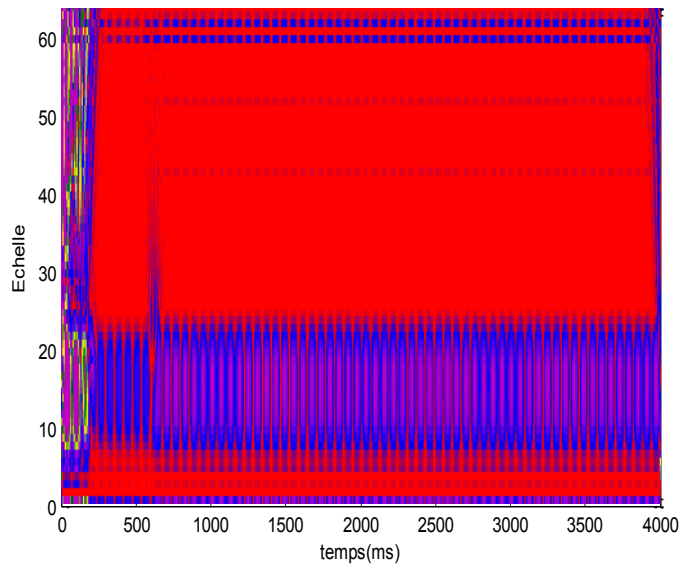
Cas d'ondelette Meyr



Cas d'ondelette Mexican



Cas d'ondelette Coifet

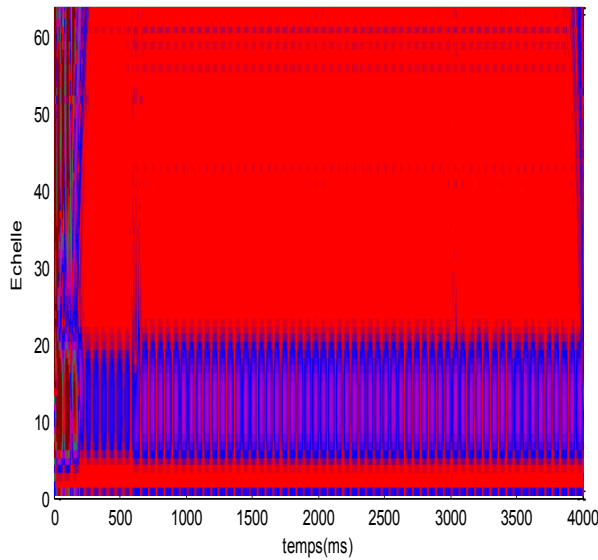


Cas d'ondelette Morlet

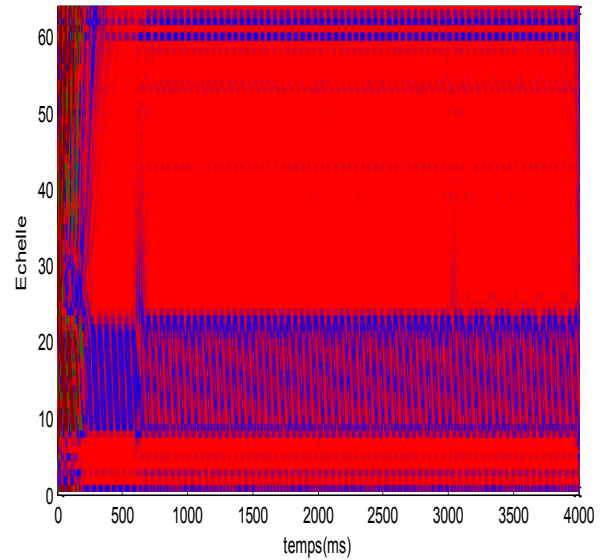
Figure (3.3) : Différents types d'ondelettes avec une cassure d'une barre à $t=2s$

- **Résultats de simulation d'un fonctionnement avec cassure de deux barres adjacentes :**

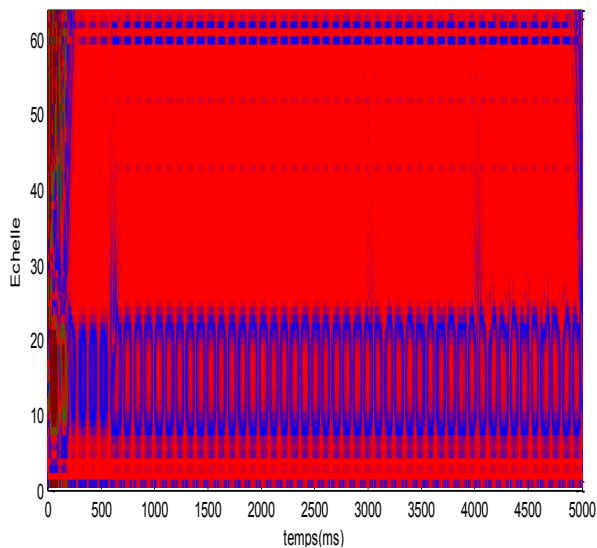
La figure (3.4) représente les transformées en ondelettes du courant d'une phase statorique respectivement dans le cas de cassure d'une barre à $t=2s$ suivi de cassure d'une autre barre à $t=3s$.



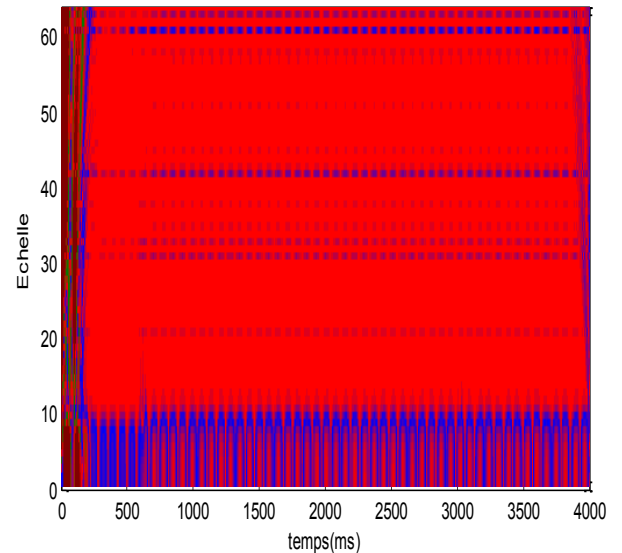
Cas d'ondelette Gaussien



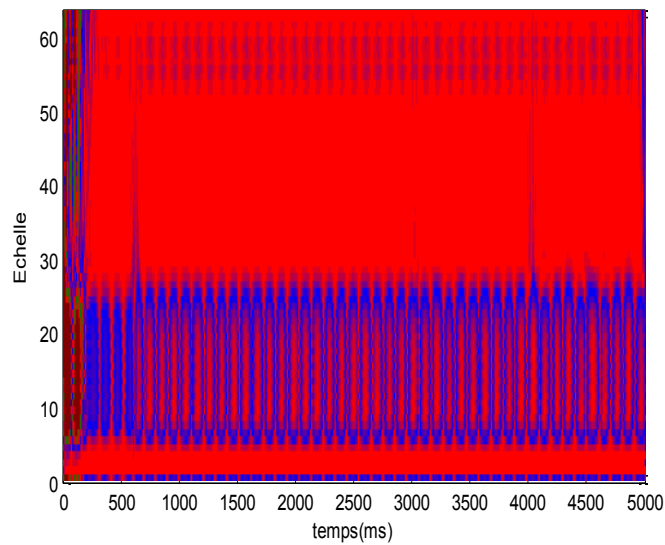
Cas d'ondelette Meyr



Cas d'ondelette Morlet



Cas d'ondelette Mexican

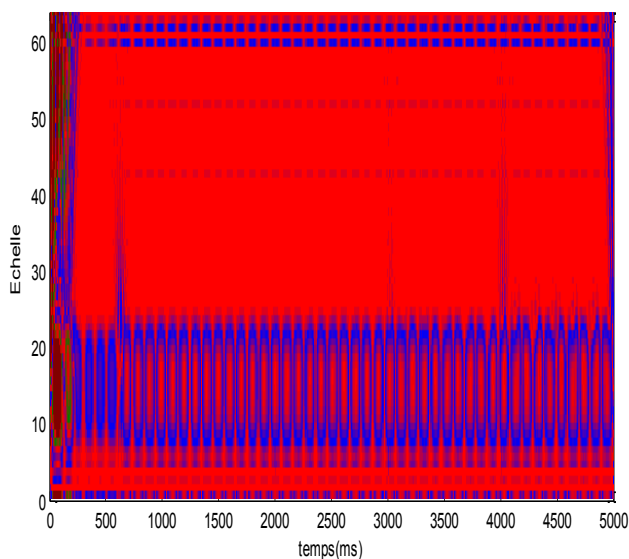


Cas d'ondelette Coiflet

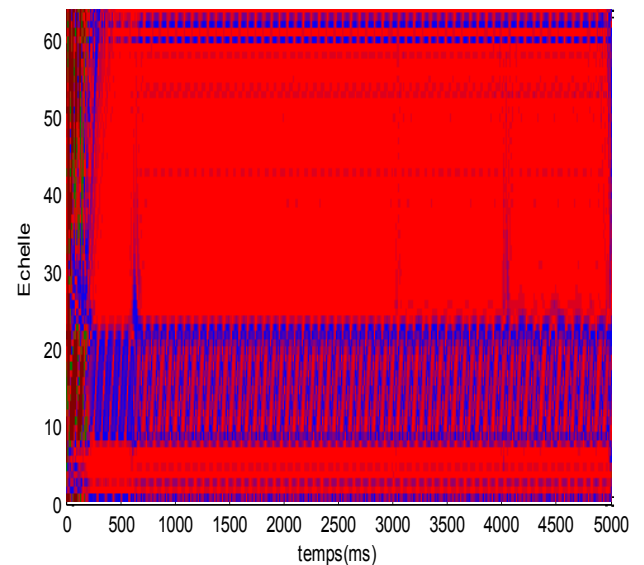
Figure (3.4) : Différents types d'ondelettes avec cassure de deux barres adjacentes à partir de $t=2s$.

- **Résultats de simulation d'un fonctionnement avec cassure de trois barres adjacentes :**

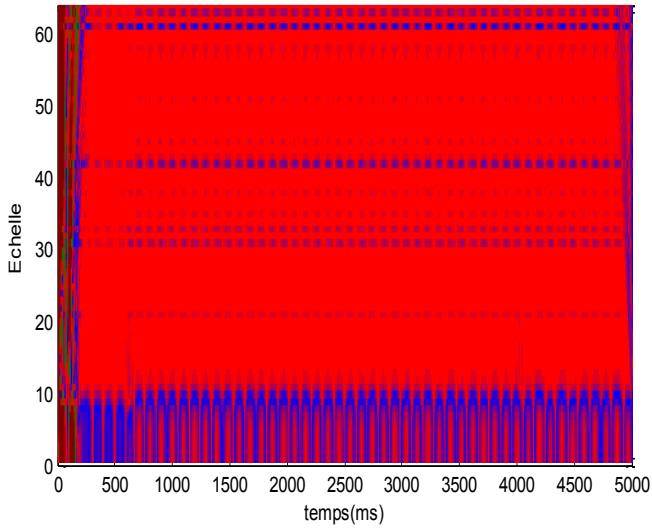
La figure (3.5) représente les transformées en ondelettes du courant d'une phase statorique respectivement dans le cas de cassure d'une barre à $t=2s$ suivi de cassure de deux barres à $t=3s$ et $t=4s$.



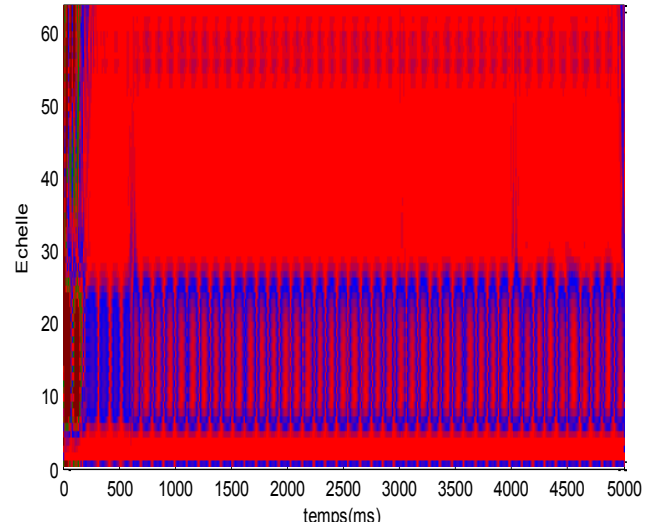
Cas d'ondelette Morlet



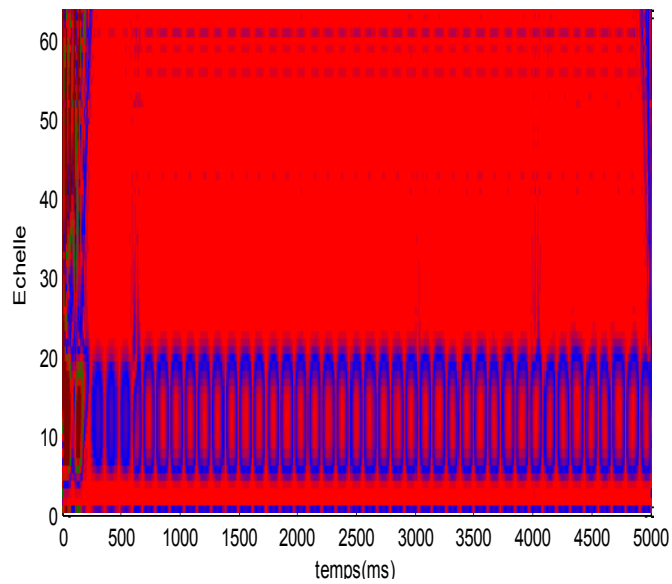
Cas d'ondelette Meyer



Cas d'ondelette Mexican



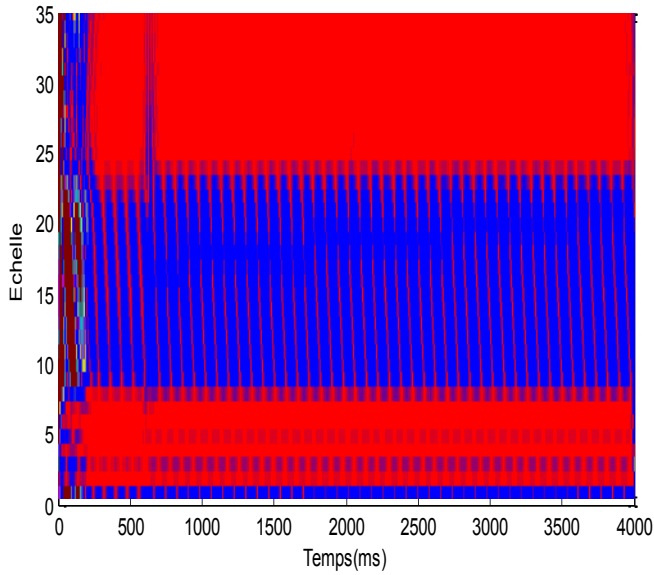
Cas d'ondelette Coiflet



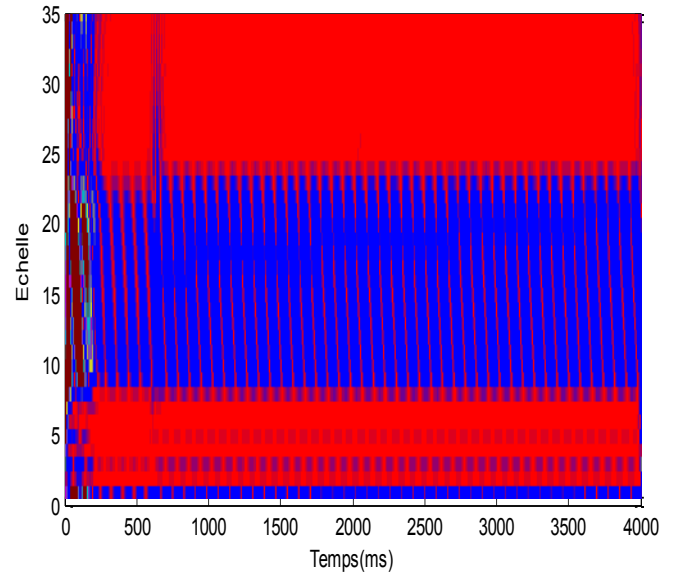
Cas d'ondelette Gaussien

Figure (3.5) : Différents types d'ondelettes avec cassure de trois barres adjacentes à partir de $t=2s$.

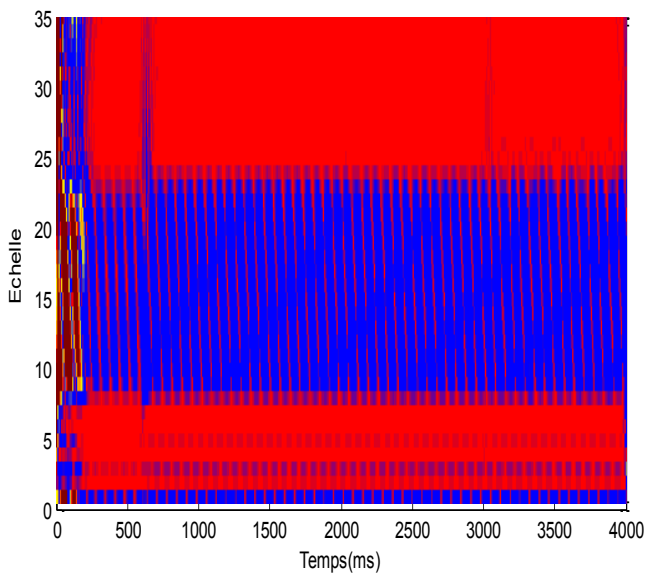
- Différents types d'ondelettes à l'état sain et défaillant :
- Cas d'ondelette Meyr :



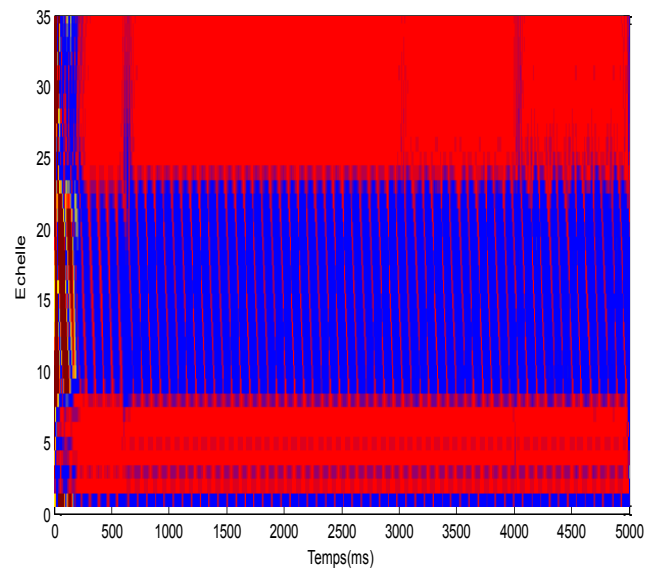
Etat sain



Cassure d'une barre

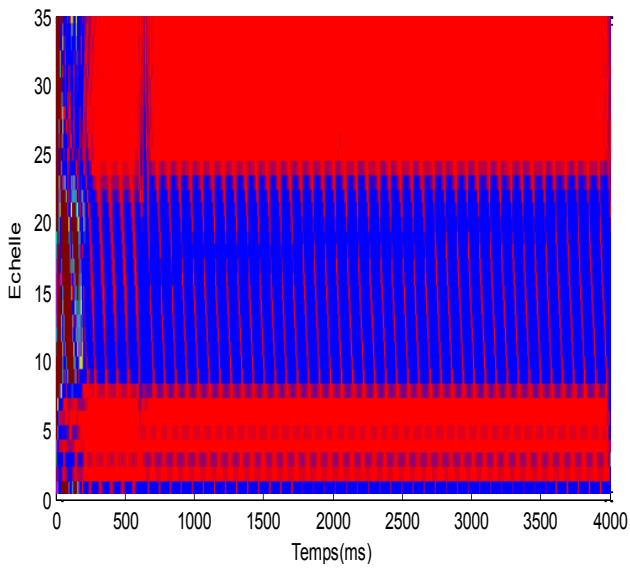


Cassure deux barres

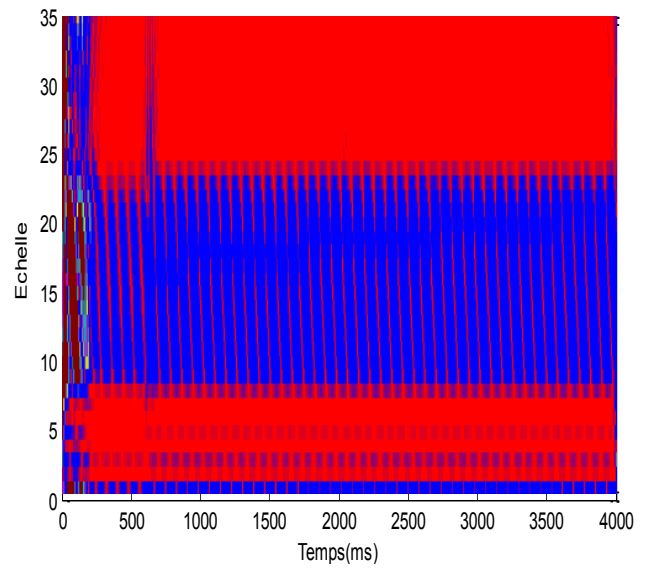


Cassure trois barres

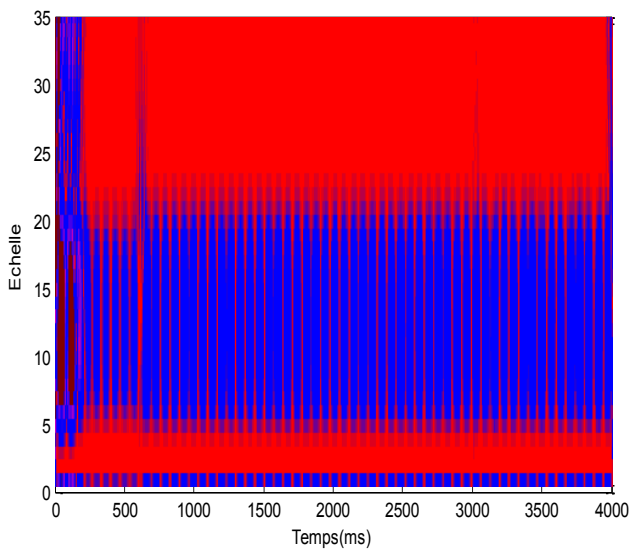
- Cas d'ondelette Gaussien :



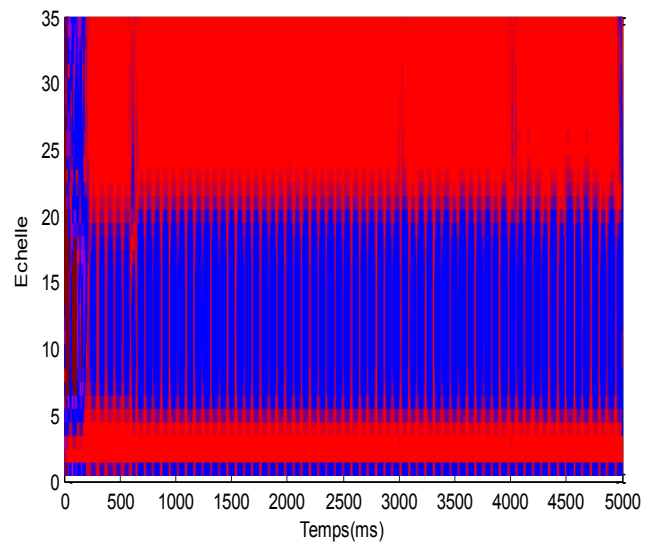
Etat sain



Cassure d'une barre

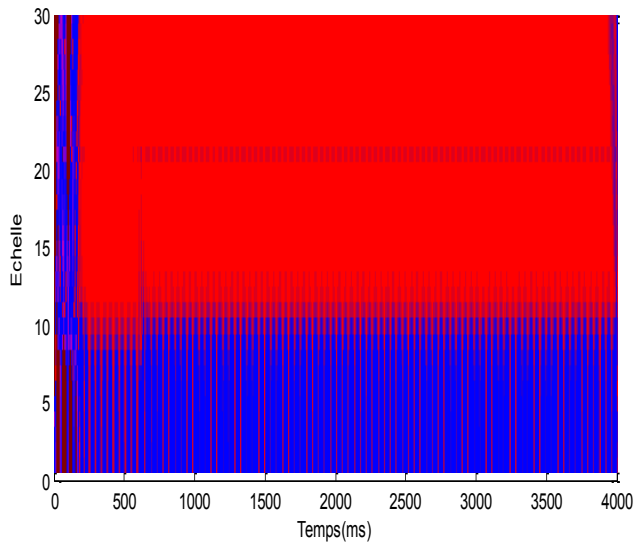


Cassure deux barres

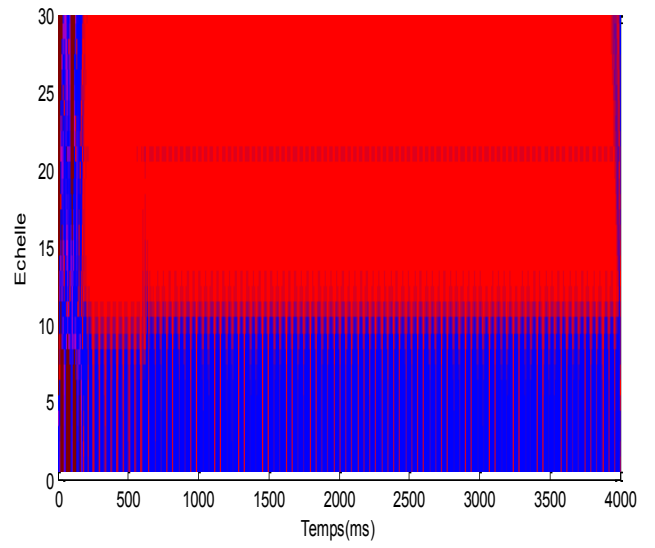


Cassure trois barres

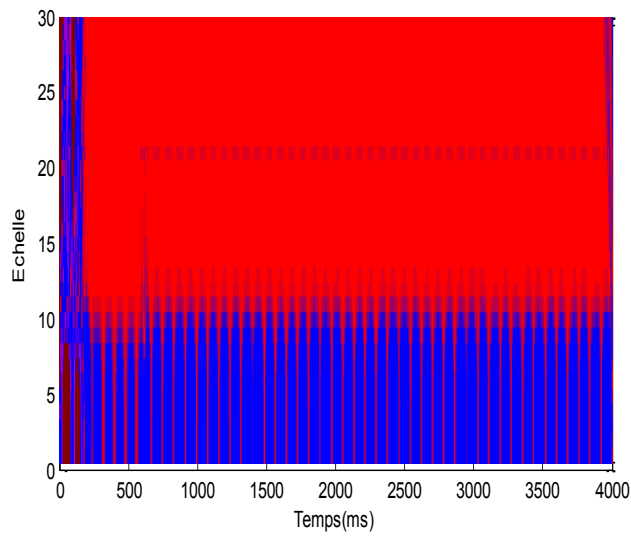
- Cas d'ondelette Mexican :



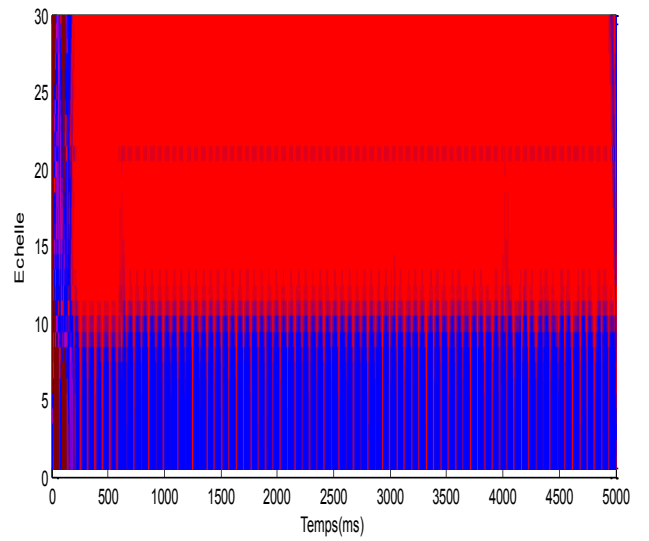
Etat sain



Cassure d'une barre

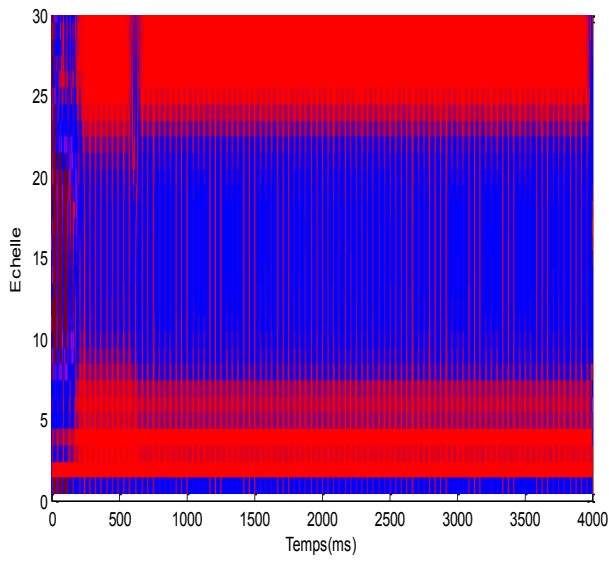


Cassure deux barres

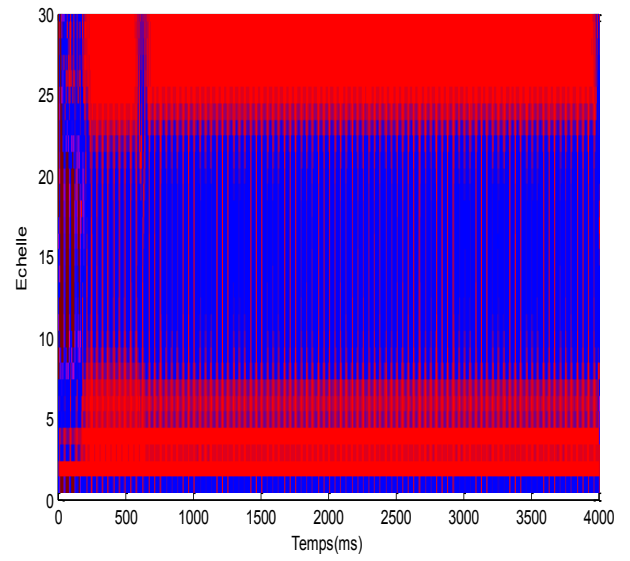


Cassure trois barres

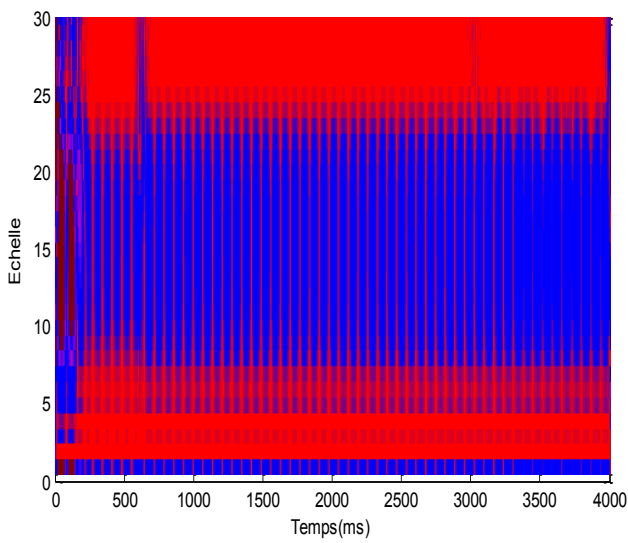
- Cas d'ondelette Morlet



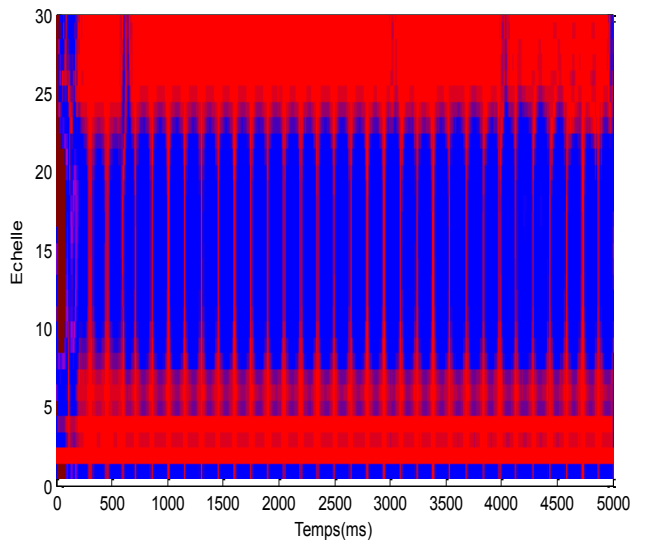
Etat sain



Cassure d'une barre

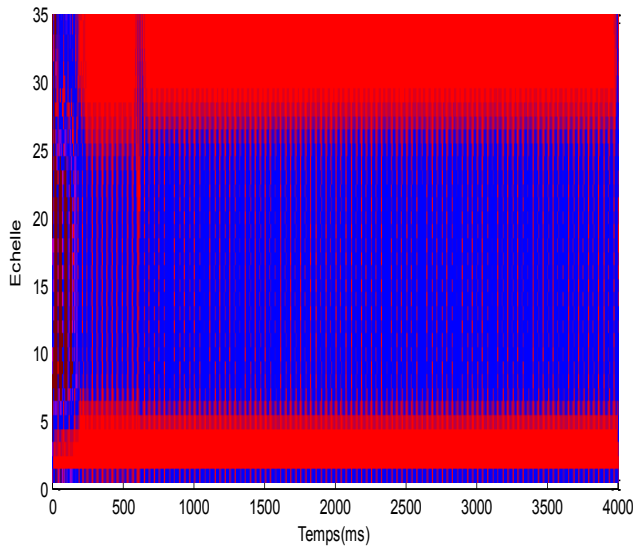


Cassure deux barres

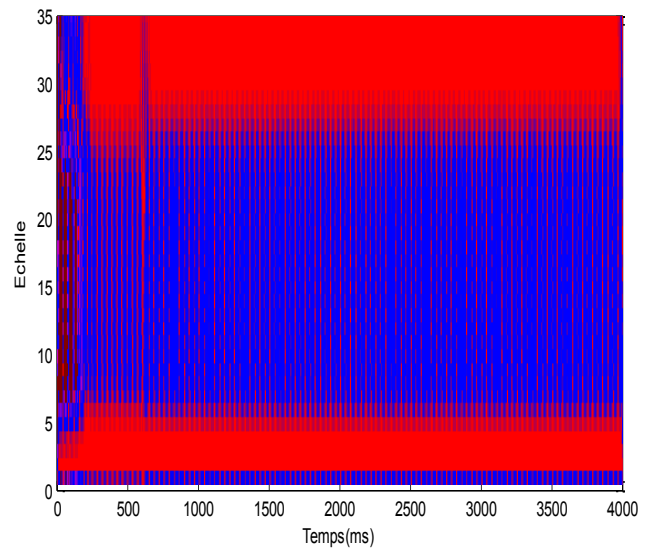


Cassure trois barres

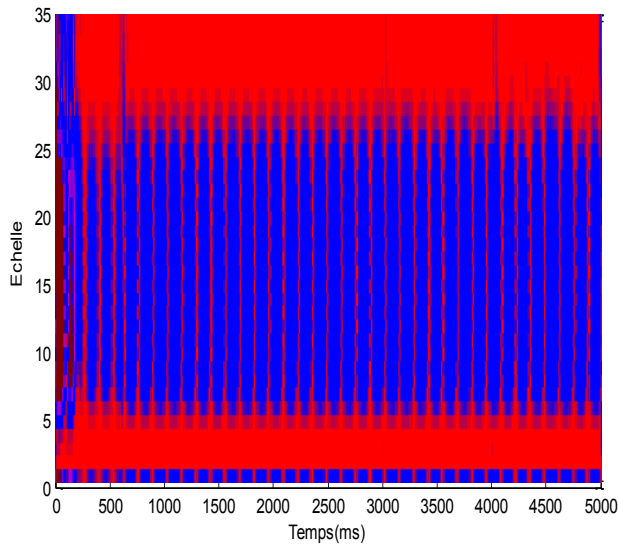
- Cas d'ondelette Coifet :



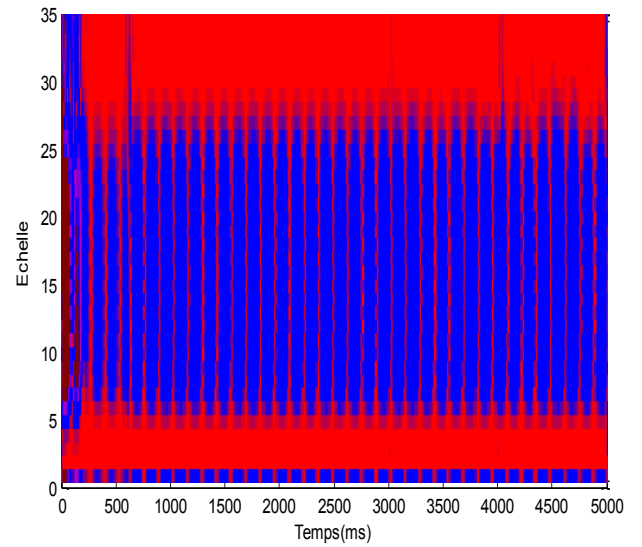
Etat sain



Cassure d'une barre



Cassure deux barres



Cassure trois barres

III.6 Interprétation des résultats :

Les résultats obtenus par l'application de la transformée en ondelettes continues (représentation temps-échelle) au courant d'une phase statorique issu de la MAS montrent que les coefficients C_x (a, b) sont stables dans le cas de fonctionnement à l'état sain. Alors que dans le cas de défauts : cassure d'une ou deux barres ou plus, les coefficients commencent à changer leurs régimes (figure 3.3), (figure 3.4 et 3.5). C'est un indice précoce qui indique que le rotor va subir des défauts. Dans le cas de cassure de deux et trois barres adjacentes, on remarque un changement important de la localisation des coefficients de TOC (figure 3.4 et 3.5). Les résultats décrits dans cette partie sont confirmés par application des différents types d'ondelettes continues.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons abordé principalement deux approximations intelligentes : la transformée de Fourier rapide FFT et les réseaux d'ondelettes, Nous avons donné la représentation mathématique ainsi que la structure décrivant chaque approximation.

L'analyse de Fourier FFT nous a permis de connaître les différentes fréquences excitées dans un signal mais nous n'a pas permis de savoir à quels instants ces fréquences ont été émises. Cette perte de localité dans la FFT n'est pas un inconvénient pour analyser des signaux dans la fréquence variée dans le temps (statiquement stationnaire) mais devient un problème pour l'étude des signaux non stationnaires. Pour cela on utilise les ondelettes.

L'application de la transformée en ondelettes continues TOC au courant d'une phase statorique à travers les résultats obtenus montre l'efficacité de cette technique dans la détection des défauts rotoriques (cassure de barres) en termes du temps-fréquence voire sévérité de défauts

La simulation du modèle multi-enroulement nous a donné un ordre de grandeur sur l'effet de défaut sur les grandeurs physiques de la machine comme la vitesse de rotation et le couple électromagnétique. Cependant l'analyse de ces grandeurs temporelles et notamment le courant statorique ne permet pas de visualiser avec facilité l'effet de défaut car l'ordre des modulations est relativement faible.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les machines asynchrones multi-enroulements. Nous avons focalisé l'étude sur les moteurs à cage pour deux raisons, la première est parce que les moteurs asynchrone à cage sont les plus réponsus dans le monde industriel, tandis que la deuxième réside dans le fait que d'un point de vu structure multi enroulements.

Au début de ce travail, nous avons rappelé les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement de la machine asynchrone multi-enroulement à cage, ainsi que leurs causes. Les méthodes du diagnostic et les approches utilisées pour la modélisation sont aussi représentés.

Nous avons développé un modèle (d, q) pour l'étude de la machine asynchrone, il permet de simuler le comportement de la machine lors des défaillances de barres rotoriques.

Afin de représenter le comportement de la machine, lors d'un fonctionnement normal (état sain et avec défaut) nous avons développé un modèle mathématique multi- enroulement pour la cage rotorique. Ce modèle, conduit à un gain notable en termes de temps de calcul tout en introduisant l'apparition d'un défaut par un changement significatif des résistances de la sous matrice liée au rotor.

Ensuite, nous avons abordé l'aspect lié à la simulation à l'aide du MATLAB 6.5, SIMULINK. Ceci nous a permis de visualiser les performances de la machine, en considérant les différentes conditions de fonctionnement de la machine (état sain, et avec défaut). Nous avons fait la simulation des performances de la machine (le couple, la vitesse de rotation, le courant statoriqu) à l'état sain puis avec défaut rotoriques.

A la fin de ce travail on a fait état d'une méthode permettant la surveillance d'une machine asynchrone multi-enroulement lorsqu'un défaut apparaît. Pour cette surveillance nous avons développés un modèle de la machine qui permet d'étudier les phénomènes répercutés sur les performances de la machine. L'analyse spectrale ayant recours à la procédure de la transformée de Fourier rapide (FFT), l'analyse spectrale et la transformée en Ondelette de ces performances a permis de détecter et de quantifier la valeur des défauts survenue sur la partie rotorique de la machine.

PERSPECTIVES

Le travail de la présente mémoire n'offre pas la solution idéale pour faire face aux contraintes liées au diagnostic et à la détection de défauts des machines tournantes mais il pourrait donner des idées pour des études plus performantes dans cet axe. Comme perspective :

- Une identification des paramètres du modèle et la détection des défauts sur site réel par les deux approches proposées.
- Voir la possibilité d'étendre ces méthodes proposées à une approche globale du diagnostic lors de l'alimentation de la machine avec un onduleur plus entrainement de charge ou par leur intégration dans une commande proposée.
- Utilisation d'autres grandeurs pour la détection des défauts telles que la vitesse et le couple et essayer d'introduire les défauts de roulements parce qu'ils constituent un nombre important dans les défaillances des machines asynchrones, donc une étude électromécanique est souhaitée.

Annexe A [29]

Paramètre du moteur utilisé

$$P_n = 1.1 \text{ kw}$$

$$U = 220/380 \text{ v}$$

$$R_r = 6.3 \ \Omega$$

$$R_s = 7.828 \ \Omega$$

$$J = 0.006093 \text{ Kgm}^2$$

$$R = 0.03575 \text{ m (Rayon)}$$

$$L = 0.065 \text{ m (Longueur)}$$

$$e = 0.00025 \text{ m}$$

$$N_s = 160 \text{ spires par phase}$$

$$N_r = 16$$

$$L_{fs} = 0.018 \text{ H}$$

$$R_b = 150 \cdot 10^{-6} \ \Omega$$

$$R_e = 72 \cdot 10^{-6} \ \Omega$$

$$L_b = 10^{-7} \text{ H}$$

$$L_e = 10^{-7} \text{ H}$$

$$K_0 = 0.000725 \text{ N.ms /rd}$$

$$P = 1$$

Bibliographie

- [1] Belhamdi. Saad "Pris en compte d'un défaut rotorique dans la commande d'un moteur asynchrone," *Thèse de Magister, université de Biskra*, Octobre 2005.
- [2] Saci. Azzouz, Rahali said, Belacel mounir "Simulation Des Machines Asynchrones à Cage Modèle Multi-enroulements Dédiée Au Diagnostic Des Défauts" Mémoire d'ingénieur, Université de M'sila, 2006/2007.
- [3] A.Medoued, Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques applications aux moteurs asynchrones, Thèse de Doctorat, Université du 20 Août 1955, Skikda, 08 Mars 2012.
- [4] O. Ondel, Diagnostic par reconnaissance des formes: Application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Octobre 2006.
- [5] Andrian ceban "Méthode globale de diagnostic des machines électriques", Thèse de Doctorat, Université Lille de Nord de France – École doctorale SPI Université d'Artois – Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement.
- [6] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, pp. 921-937, 1992.
- [7] G.Didier, Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances, Thèse de Doctorat, U.Nancy, France, 2004.
- [8] S.Bazine, Conception et implémentation d'un méta modèle de machines asynchrones en défaut, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France et l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Juin 2009.
- [9] H. Razik, "Contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art", *La revue 3EI*, n°29, pp.48-52, juin 2002.
- [10] M.Bouzid, Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par réseaux de neurones, Thèse de Doctorat, Université de El Manar, Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis ,2009.
- [11] T.Boumegoura, Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone, et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic, Thèse de doctorat, école doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, Mars 2001.
- [12] D. Thailly, "Etude du champ de dispersion des machines à courant alternatif : Application au diagnostic," Thèse de doctorat, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE), Université d'Artois, Béthune, France, 2007.
- [13] F. Filippetti, G. Franceschini, and C. Tassoni, "Neural networks aided on-line

diagnostics of induction motor rotor faults," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, pp. 892- 899, July/August 1995.

[14] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G. A. Capolino, "Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines," IEEE Transactions on Industrial Electronics vol. 55, pp. 4109-4126, December 2008.

[15] H. Razik and G. Didier, "On the monitoring of the defects of squirrel cage induction motors," in Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, 2003, p. 6 pp. Vol.2.

[16] H. Henao, C. Demian, G. A. Capolino, "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 39, pp. 1272–1279, Sept/Oct. 2003.

[17] J.R. Cameron, W.T. Thomson, A.B. Dow, "Vibration and current monitoring for detecting air gap eccentricity in large induction motors", IEE Proceedings, Vol. 133, no.3, pp. 155-163, May 1986.

[18] W.R. Finley, M.M. Hodowanec, W.G. Holter, "An analytical approach to solving motor vibration problems", IEEE Transactions on Industry Application, Vol.363, no. 5, pp. 1467-1480. Sept. /Oct. 2000.

[19] M.E.H. Benbouzid, "Review of induction motors signature analysis as a medium for fault detection", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.47, pp. 984-993, 2000.

[20] S. M. A. Cruz "Stator winding fault diagnosis in three-phase using synchronous motors, by the extended Park's vector approach", IEEE Trans. Ind. Applicat 2000.

[21] M. Sahraoui, Etude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Déc. 2010.

[22] J. Cusido, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, A. Garcia, "Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 2, pp. 633–643, Feb. 2008.

[23] S. H. Kia, H. Henao, G. A. Capolino, "Diagnosis of broken-bar fault in induction machines using discrete wavelet transform without slip estimation," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 45, No. 4, pp. 107– 121, Jul/ Aug. 2009.

[24] S.G. Mallat, "A wavelet tour of signal processing," second ed., Academic Press, 1998.

[25] A. Dida, S. Torurqui " Simulation du moteur asynchrone à cage «Modèle multi enroulement» dédié au diagnostic des défauts ", P F E en Electrotechnique, Biskra, 2004.

[26] N. MANSOURI, L. BENSADIA, "Etude de différents estimateurs du flux statorique lors du contrôle directe du couple d'une machine à induction," *Mémoire d'ingénieur en Electrotechnique, université de M'sila*, juin 2008.

[27] A. Abed " Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone", Nancy, 28 mars 2002.

- [28] G.A Capolino, H.Henao "Une approche spectral pour la modélisation des machines à courant alternatif " EF 01, Nancy, France 2001.
- [29] Belhamdi. Saad "Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différentes techniques de commande," *Thèse de doctorat, université de Biskra*, Mai 2014.
- [30] G. M. Joksimovic' and J. Penman, "The Detection of Inter-Turn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors", *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol. 47, no. 5, pp 1078-1084, OCT. 2000.
- [31] M. E. H. Benbouzid , M. Vieira and C. Theysal., "Induction motors faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 14, no. 1, pp. 14–22, Jan. 1999.
- [32] Zhiwen Liu, Hongrui Cao, Xuefeng Chen, ZhengjiaHe, Zhongjie Shen, "Multi-fault classification based on wavelet SVM with PSO algorithm to analyze vibration signals from rolling element bearings, " *Elsevier, Science Direct, Neurocomputing 99 (2013) 399–410*.
- [33] Matic D., Kulic F., Sanchez M.P, Kamenko I., Support vector machine classifier for diagnosis in electrical machines: Application to broken bar, *Expert Systems with Applications*, 39 (2012) 8681–8689.
- [34]. M. Ayad, D. Chikouche Application de la transformée en ondelette à l'analyse des signaux vibratoires d'un système d'engrenage en vue d'un diagnostic précoce, 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007.
- [35] Steven T. Karris, "Signals and Systems with Matlab Computing and Simulink Modeling," Fourth Edition, 2008 Orchard Publications. www.orchardpublications.com
- [36] M. Bazi Smail "Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur", *Thèse de Doctorat, Université Batna 2*, Décembre 2016.
- [37] Frédéric Truchetet, " Ondelettes pour le signal numérique, " Editions Hermes, Paris, 1998.
- [38] El-Houssin El-Bouchikhi, Vincent Choqueuse, Mohamed Benbouzid, Frédéric Charpentier Jean, "Etude Comparative des Techniques de Traitement du Signal Non-Stationnaires Dédiées au Diagnostic des Génératrices Asynchrones dans les Eoliennes Offshores et les Hydroliennes," *EF2011, Dec 2011, Belfort, France*. pp.1-10, 2011. <hal-00657623>. <https://hal.archives-ouvertes.fr>
- [39] I.Tsoumas, G.Georgoulas, E.Mitronikas, A.Safakas, "Asynchronous Machine Rotor Fault Diagnosis Technique Using Complex Wavelets", *IEEE Trans.En.Conversion*, Vol. 23, No. 2, pp. 444-459 ,June 2008.
- [40] RuqiangYan, RobertX.Gao, XuefengChen, "Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications," *Signal Processing 96 (2014) 1–15*.

[41] Transformée en ondelettes - Gwyddion : <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-fr/wavelet-transform.html>

[42] Montaine Bernard, "Méthodologie d'analyse des synchronisations neuronales dans les signaux EEG à l'aide de graphes d'informations temps-fréquence, " Thèse pour l'obtention du Grade de docteur de l'université de Poitiers, Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées (30 novembre 2006).

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence

des défauts de type rupture des barres rotorique.

La thématique du diagnostic de défaut se base sur l'application de deux techniques de traitement de signal

qui est une solution efficace pour le problème de diagnostic des défauts:

L'une se base sur l'analyse spectrale du courant statorique (FFT) et la seconde sur l'analyse par ondelette

qui offre une analyse très fine des signaux et on peut extraire les informations nécessaires pour le pronostic

du défaut en régime de fonctionnement variable de la machine.

Mots clés : MAS, défaut rotorique, cassure de barre, diagnostic, FFT, Ondelette.

ملخص:

يندرج هذا العمل حول تشخيص الأعطاب في المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور بقفص سنجابي ورصد الأعطاب نوع كسر أعمدة الدوار يستند موضوع تشخيص الأعطاب على طريقتين لمعالجة الإشارات وهما يعتبران حلان ناجعان في التشخيص, الطريقة الأولى التحليل الطيفي لتيار الجزء الثابت والثانية تقنية الموجات والتي لديها تحليل دقيق جدا للإشارة وتستخدم لإستخراج المعلومات اللازمة من تيار الجزء الثابت للمحرك

كلمات مفتاحية:

الألة اللاتزامنية, خلل الدوار, كسر أعمدة الدوار, التشخيص, التحليل الطيفي, الموجات