



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Machine Electrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
Houioua Moussa

Le : dimanche 7 juillet 2019

Etude comparative des différents facteurs de sévérité de défauts dans un moteur asynchrone triphasé

Jury :

Dr. Yahia Khaled	MCA	Université de biskra	Rapporteur
Dr. DERGHAL Hamid	MCA	Université de biskra	Président
Dr. Charouf Omar	MCA	Université de biskra	Examineur

Année universitaire : 2018 - 2019



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Machine Electrique

Présenté et soutenu par :
Houioua Moussa

Le : dimanche 7 juillet 2019

Etude comparative des différents facteurs de sévérité de défauts dans un moteur asynchrone triphasé

Présenté par :

Avis favorable de l'encadreur :

Houioua Moussa

Dr. Yahia Khaled

Signature

Avis favorable du Président du Jury

DERGHAL Hamid

Signature

Cachet et signature

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

- *A mon père, à ma mère.*
- *A mes frères et mes sœurs, à toute la famille Houioua .*
- *A tous mes amis.*
- *A tous mes collègues surtout étudiants Master 2 Machine électrique.*

Moussa

Remerciements

Je remercie, avant tout, Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé parmi Ses innombrables Grâces, santé et courage pour accomplir ce travail.

*Mes plus vifs remerciements vont à mon encadreur pour sa disponibilité et la qualité de son encadrement, **YAHIA Khaled**, Maître de conférences à l'Université Mohamed Khider de BISKRA.*

Mes vifs remerciements vont également aux membres de jury de soutenance de ce mémoire :

Derghal Hamid , d'avoir accepté la présidence de jury de soutenance.

Charouf Omar , pour avoir accepté d'examiner mon travail et faire partie du jury.

Je n'oublierai pas d'exprimer un profond respect à tous mes professeurs qui m'ont inculqué les fondements scientifiques tout au long des cursus de mon étude.

Mes derniers mots s'adressent tous particulièrement à ma famille : mon père, ma mère, mes frères et mes sœurs mes amis.

Liste des tableaux

Tab. II.1 : Familles d'ondelettes.....	26
Tab. III.1 : Bandes fréquentielles des signaux de décomposition (expérimental).....	35
Tab. III. 2 : FSD, obtenu par (a) db5, (b) db24, (c) db44, de méthode utilisées en fonction du nombre de barres cassées en moyenne charge, expérimental.....	41
Tab. III. 3 : FSD, obtenu par (a) db5, (b) db24, (c) db44, de méthode utilisées en fonction du nombre de barres cassées en pleine charge, expérimental.....	43
Tab. III. 4 : FSD-T de l'enveloppe du courant statorique (Env ia), en fonction de l'ordre de l'ondelette De Daubechies (db), (a) 1BC, (db) 4BC.....	46
Tab. III. 5 : FSD T de l'enveloppe du courant statorique (Env ia), en fonction du type de l'ondelette mère avec (a) 1BC, (b) 4BC	47

Liste des figures

Fig. I.1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à caged'écureuil.....	5
Fig. I.2 : Vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs d'encoches, tête de bobines). (Enroulement statorique d'une machine a 4 pôles).....	6
Fig. I.3 : Photo du stator d'une machine asynchrone.....	6
Fig. I.4 : Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit.....	7
Fig. I.5 : Photo du rotor d'une machine asynchrone.....	8
Fig. I.6 : Classification des défauts selon leurs origines.....	10
Fig. I.7 : Représentation des différents défauts statorique possibles.....	11
Fig. I.8 : Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un Mas.....	12
Fig. I.9 : Rupture de barre.....	13
Fig. I.10 : Rupture d'un anneau.....	13
Fig. I.11 : Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte.....	14
Fig. I.12 : Proportion des défauts.....	15
Fig. I.13 : Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissance.....	16
Fig. I.14 : Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances.....	16
Fig. II.1 : Les différents points de mesure.....	19
Fig. II.2 : Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.....	20
Fig. II.3 : Principe de la transformée de Fourier.....	24
Fig. II.4 : Représentation temporelle vers ondelettes.....	25
Fig. II.5 : Quelques formes des ondelettes usuelles.....	26
Fig. II.6 : Pavage de la Transformée en ondelettes (TO).....	27
Fig. II.7 : Décomposition du signal s en approximations et détails.....	28
Fig. II.8 : Décomposition simple du signal s en approximations et détails.....	29
Fig. II.9 : Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux.....	30
Fig. III.1 : Banc d'essai expérimental.....	33

Fig. III.2 : Rotors utilisés.....	34
Fig. III.3 : Caractéristiques de l'enveloppe du courant statorique $Env(i_a)$ du moteur asynchrone en pleine charge, (a) sain, (b) 1BC,(c) 4BC, expérimental.....	36
Fig. III.5 : Signature de l'enveloppe du courant statorique ($Env i_a$), obtenue par db44,pour un moteur asynchrone en moyenne charge,(a) sain, (b)1BC ,(c)4BC ,expérimental.....	38
Fig. III.6 : Signature de l'enveloppe du courant statorique ($Env i_a$), obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en pleine charge, (a) sain, (b)1BC ,(c)4BC expérimental.....	40
Fig. III.7 : FSD, obtenu par (a) db5, (b) db24, (c) db44 en fonction du nombre de barres cassées (moyenne charge).....	44
Fig. III.8 : FSD, obtenu par (a) db5, (b) db24, (c) db44 en fonction du nombre de barres cassées (pleine charge).....	45
Fig. III.9 : FSD-T de l'enveloppe du courant statorique ($Env i_a$), en fonction de l'ordre de l'ondelette De Daubechies (db), avec (a) 1BC, (db) 4BC.....	46
Fig. III.10 : FSD T de l'enveloppe du courant statorique ($Env i_a$), en fonction du type de l'ondelette mère avec, (a) 1BC, (b) 4 BC	48

Liste des symboles

Nr :	vitesse de rotation.
Ns :	vitesse du champ tournant.
g :	glissement.
f :	Fréquence d'alimentation.
P :	Nombre de paire de pôles.
fbc:	Fréquence de barre cassé.
B_s :	Induction magnétique.
P :	Perméance.
Fmm :	force magnétomotrice.
σ :	La force radiale créée par le champ d'entrefer.
μ₀ :	Perméabilité magnétique de l'air.
TFR :	Transformée de Fourier rapide.
TOC :	Transformée en ondelette continue.
TOD	Transformée en ondelette discrète.
Ld :	Nombre de niveaux de la décomposition.
Envia :	l'enveloppe du courant.
Db :	Daubechies.
FSD :	Facteur de sévérité de défaut.
Isa :	Courants de phase.
Id :	Courants de Park.
CA :	Coefficients ondelette d'approximation.
CD :	Coefficients ondelette de détails.

Résumé :

L'utilisation de la machine asynchrone est la plus croissante dans les différents domaines industriels. Pour cela, la nécessité impose plusieurs projets de recherche pour l'étude de la commande, la maintenance et la détection des défauts de cette machine.

Dans ce travail nous avons utilisé la transformée d'ondelettes discrète (TOD) dans le but du diagnostic des défauts de cassure de barres rotorique des moteur asynchrone. Nous avons également étudié différents facteurs de sévérité de défaut (FSD) pour identifier la sévérité des barres cassées. L'utilisation de la transformée en ondelettes discrète (TOD) des grandeurs électrique de la machine asynchrone en vue du diagnostic des défauts de cassure de barres rotorique dans le cas des fonctionnements à couple de charge variable est obligatoire l'analyse par (TOD) peut accomplir la tache du diagnostic de défaut est peut donner des bons résultats.

MOTS-clés : Moteur asynchrone, facture de sévérité (FSD), Transformée en Ondelettes discrète (TOD), cassure de barres rotorique.

ملخص :

لقد أصبحت الآلة الغير متزامنة الأكثر استعمالا في العديد من المجالات الصناعية لذلك وضعت أبحاث مختلفة لدراستها من اجل التحكم بها وحمايتها و صيانتها و اكتشاف اعطابها.

في هذا العمل قمنا باستعمال تقنية التحويل الموجي المتقطع (TOD) لهدف تشخيص اعطاب انكسار قضبان الدوار في الآلات الغير متزامنة. وكذلك قمنا بدراسة تغيرات معامل الخطورة (FSD) من اجل تحديد القضبان المكسورة. استعمال التحويل الموجي المتقطع للمقادير الكهربائية للالات غير متزامنة من اجل تشخيص اعطاب انكسار قضبان الدوار في الحالة التشغيل تحت عزم متغير. في هذه الحالة التحليل الموجي يمكن ان يكمل عملية التشخيص ويعطي نتائج جيدة.

كلمات مفتاحية : الآلات الغير متزامنة, معامل الخطورة, التحويل الموجي المتقطع, انكسار القضبان.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : La machine asynchrone et ses défauts	
Introduction.....	3
I.1. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	3
I. 2. CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE	
I. 2. 1. Moteur Asynchrone (MAS).	4
I. 2. 2. Le stator.....	5
I. 2. 3. Le rotor à cage.....	6
I. 2. 4. Les organes mécaniques.....	8
I.3. Principaux défauts de la machine asynchrone, causes et conséquences	
I. 3. 1. Défauts statoriques.....	8
I. 3. 1. 1. Court-circuit entre phases statorique.....	11
I. 3. 1. 2. Court-circuit entre spire d'une même phase.....	11
I. 3. 1. 3. Défauts du circuit magnétique.....	12
I. 3. 2. Défauts rotorique... ..	12
I. 3. 2.1. Cassure de barres.....	12
I. 3. 2.2. Rupture d'anneaux.....	13
I. 3. 2.3. Défauts d'excentricité... ..	14
I.4. Etude statistique.....	16
Conclusion.....	17
Chapitre II : Méthodes de diagnostic de la machine asynchrone	
Introduction.....	18
II. 1. Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone.....	18

II. 2. Approches de diagnostic de défauts de la machine asynchrone

II. 2.1. Approche signal.....	18
1. Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques.....	19
2. Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite.....	20
3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites.....	20
4. Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique.....	20
5. Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée.....	21
6. Diagnostic par l'analyse du courant statorique.....	21
7. Diagnostic par l'analyse du vecteur de Park.....	21
II. 2.2. Approche modèle.....	22

II. 3. Technique de traitement de signaux dédiés au diagnostic de la machine asynchrone.....

II. 3.1. Transformée de Fourier Rapide (TFR)	22
II. 3.2. Transformée en ondelettes (TO)	24
II. 3.2.1. Transformée en ondelettes continue (TOC)	25
II. 3.2.2. Transformée en ondelettes continue discrète (TOD)	26
II. 3.3. Avantages de la transformée en ondelettes.....	31

Conclusion.....

Chapitre III : Diagnostic de défaut de cassure de barres rotorique dans la machine

asynchrone.....

Introduction.....

III. 1. Banc d'essai expérimental de cassure de barres.....33

III. 2. Résultats expérimentaux de cassure de barres34

 a) Allures temporelles des grandeurs électriques utilisées dans le diagnostic.....35

 b) Analyse par la transformée en ondelettes discrète (*TOD*).....37

Conclusion.....

Conclusions générales.....50

INTRODUCTION

générale

Introduction générale

Introduction générale

Ce travail expose le diagnostic des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil. La machine asynchrone occupe maintenant une grande place dans les applications industrielle, du fait de sa grande robustesse. Il est en effet omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,... et dans la propulsion électrique des véhicules, de tramway et de train de grande vitesse, voire même de bateaux de croisière.

Malgré ces avantages remarquables, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermique, électrique, mécanique et d'environnement) peuvent affecter la durée de vie de celle-ci en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables. Il est impératif donc de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats.

L'objectif principal du présent travail est d'exploiter la méthode de traitement de signal appliquée pour le diagnostic des défauts de cassures de barres rotoriques en utilisant la transformée en ondelettes discrète (TOD).

Le présent mémoire sera organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la machine asynchrone et ses défauts, ou nous rappelons brièvement les principaux éléments constituant cette machine, les différents défauts affectant cette machine avec leurs causes et conséquence et une étude statistique.

Dans la première partie du second chapitre, nous présentons les différentes approches utilisées pour le diagnostic des défauts de la machine asynchrone. Nous avons présenté quelques méthodes de diagnostic dans ce travail comme : diagnostic par analyse des vibrations mécaniques et diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite et diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites et diagnostic par l'analyse du courant statorique. Dans ce travail nous avons utilisé la méthode de diagnostic par l'analyse du courant statorique (l'enveloppe du courant statorique). La seconde partie de ce chapitre sera consacré à une étude théorique plus détaillée des technique de traitement de signal en particulier la transformée de Fourier rapides (TFR) et la transformées en ondelettes (TO).

Introduction générale

Dans le troisième chapitre, nous présentons respectivement, les résultats expérimentaux de diagnostic des défauts de cassure de barres rotorique dans les moteurs asynchrones triphasés fonctionnant couple de charge variable. Ces défauts sont diagnostiqués en utilisant les signaux électriques du moteur analysés par la transformé en ondelettes discrète (TOD).

Enfin, une conclusion générale clôture sur ce modeste travail.

Chapitre I :
La machine
asynchrone et ses défauts

INTRODUCTION

La machine asynchrone est la plus utilisée dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Son seul point noir est l'énergie réactive. La machine asynchrone est très appréciée dans les milieux industriels par sa robustesse, son couple massique important et son faible coût de revient.

Ce chapitre traite du diagnostic des défauts de la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Après avoir rappelé les éléments de constitution de cette machine, nous effectuons une analyse des différents défauts pouvant survenir sur chacun d'eux en donnant leurs causes, conséquences et étude statistique.

I. 1. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction. La machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit.

Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau du courant induit dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse N_s différent du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulement rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuit sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limité par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est :

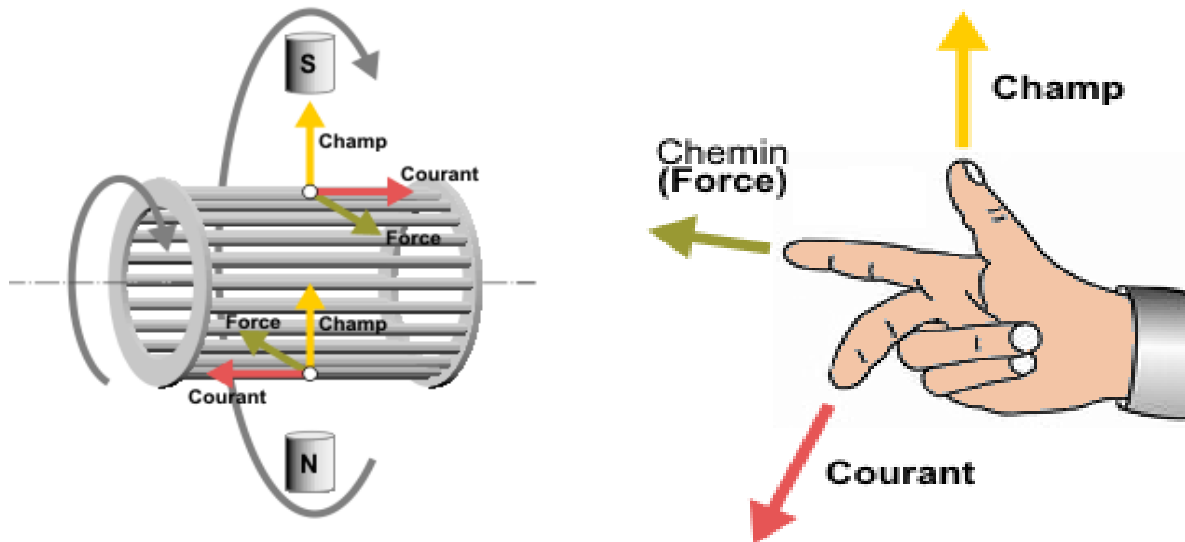
$$N_r = f/p \quad (I.1)$$

Ou f : est la fréquence d'alimentation.

p : représente le nombre de paire de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (N_s) diffère de celle du rotor (N_r) ; c'est-à-dire lorsque $N_r \neq N_s$; car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $N_r = N_s$ champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique le rapport

$g = \frac{N_s - N_r}{N_s}$ est appelé glissement de la machine asynchrone [12].



I. 2. CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

I. 2. 1. Moteur Asynchrone (MAS)

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous intéressent à la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la (**Fig. I.1**) [6].

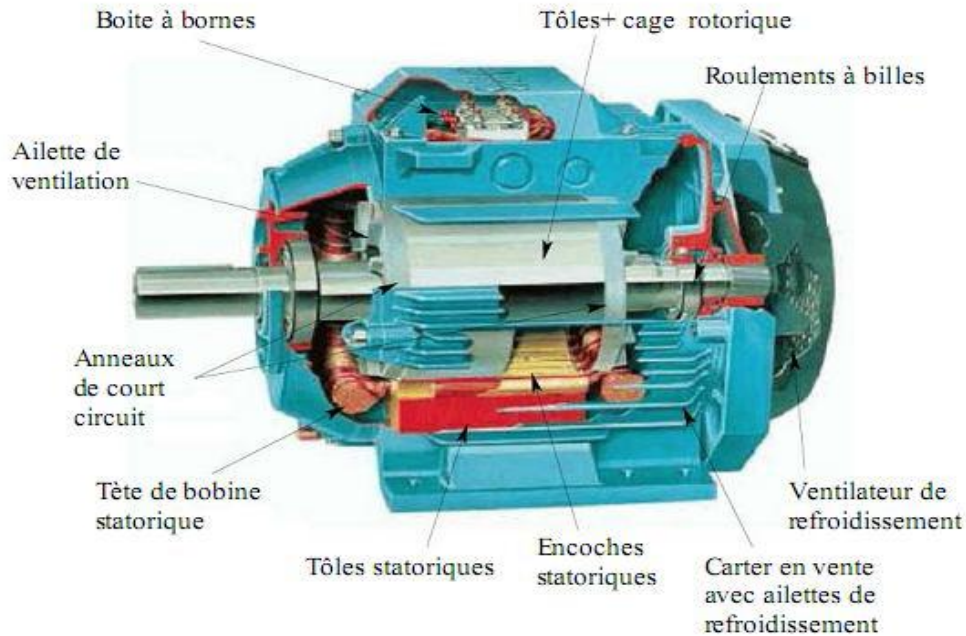


Fig. I.1 : Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [4].

La machine asynchrone à cage est composée de :

- le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

I.2.2. Le stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont comportées des encoches parallèles à l'axe de la machine (**Fig. I.2**).

Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique [11].

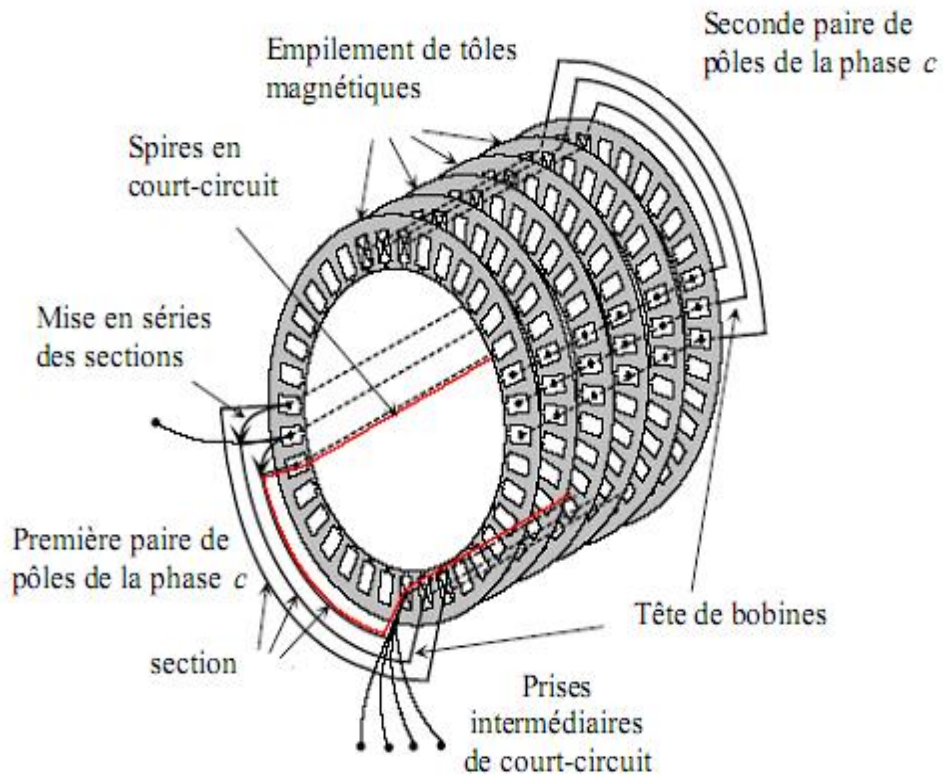


Fig. I.2 : Vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs d'encoches, tête de bobines). (Enroulement statorique d'une machine a 4 pôles) [11].

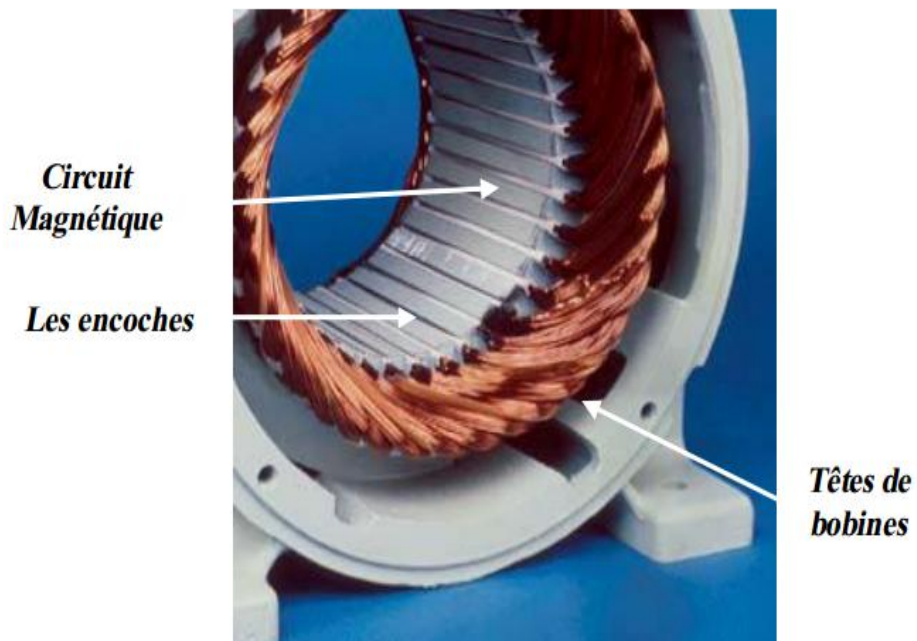


Fig. I.3 : Photo du stator d'une machine asynchrone [6].

I.2.3. Le rotor à cage

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (**Fig. I.4**) et (**Fig. I.5**) Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre.

Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service. Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes) [6].

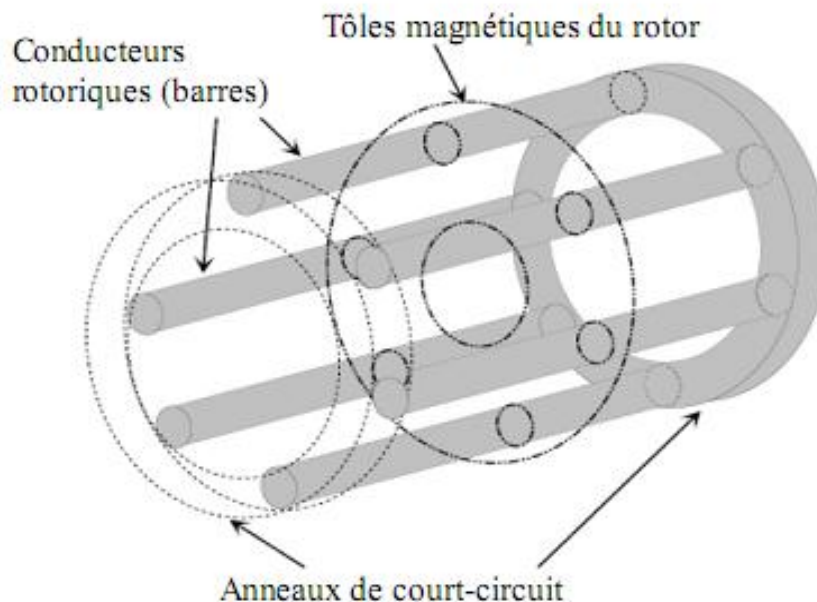


Fig. I.4 : Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit [6].

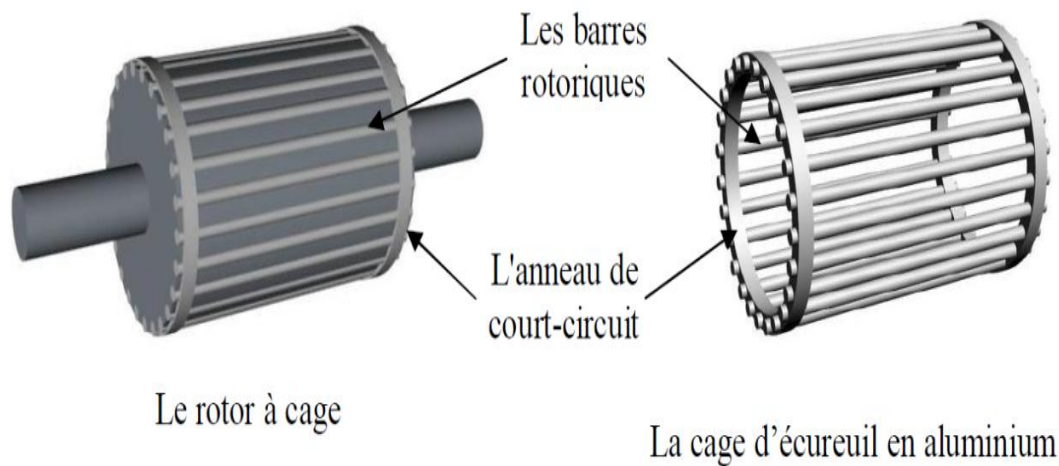


Fig. I.5 : Photo du rotor d'une machine asynchrone [6].

I.2.4. Les organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance. Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage,...). Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse [11].

I.3. Principaux défauts de la machine asynchrone, causes et conséquences

Si l'on élimine les pannes dues à des causes intrinsèques, c'est-à-dire, résultant d'une mauvaise conception (mauvais choix des matériaux), d'une mauvaise fabrication (défauts d'usinage) ou d'un mauvais montage (serrage, désalignement) du moteur, les défaillances usuelles d'une machine asynchrone sont les suivantes [3] :

I.3.1. Défauts statoriques :

- Court-circuit entre phases statorique.
- Court-circuit entre spire d'une même phase.
- Ouverture d'une phase.
- Défauts du circuit magnétique (ruptures de tôles).

I.3.2. Défauts rotorique:

- Cassure de barres.
- Rupture d'anneaux.
- Défauts de roulement.
- Excentricité statique et dynamique.
- Excentricité mixte.

I.3.3. les causes de défauts

- les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.
- les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Les machines électriques et les systèmes d'entraînement sont soumis à de nombreux types de défauts. Ces derniers peuvent être classés selon leurs causes en deux grandes familles (**Fig. I.6**) les défauts à causes internes et les défauts à causes externes.

Les défauts externes sont provoqués par les tensions d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Les défauts internes sont causés

par les constituants de la machine (circuits magnétiques, bobinages du stator et du rotor, entrefer mécanique, cage rotorique, . . .) [7].

A titre d'exemple, nous pouvons citer d'une manière non exhaustive les défauts suivants :

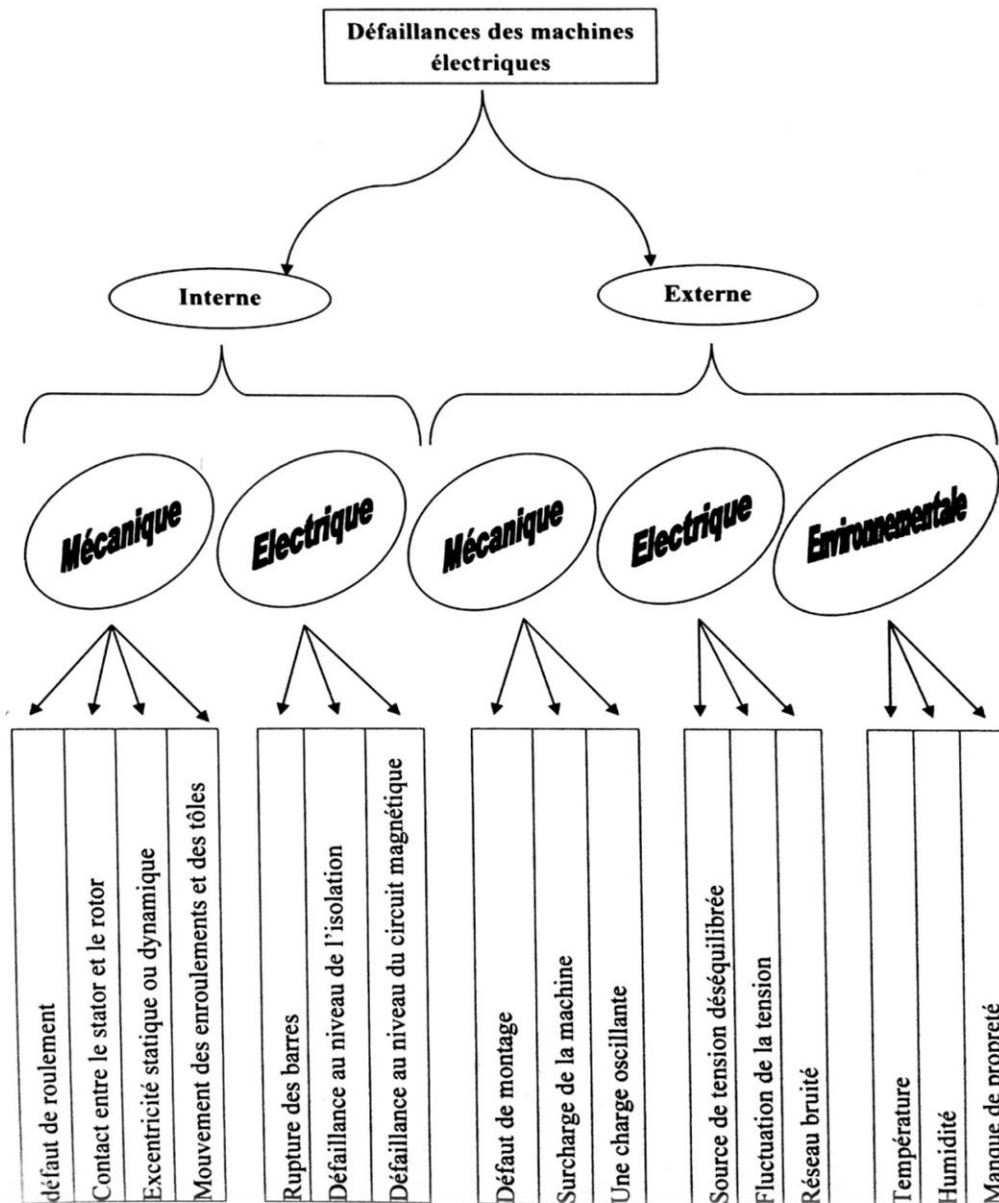


Fig. I.6 : Classification des défauts selon leurs origines [1].

I.3.1.1. Court-circuit entre phases statorique

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

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

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases (**Fig. I.7**) [6].

I.3.1.2. Court-circuit entre spire d'une même phase

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude sur les autres phases modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage. De ce fait, une dégradation accélérée des isolants, peut provoquer, ainsi, un défaut en cascade (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste, sensiblement, identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut (**Fig. I.7**) [9].

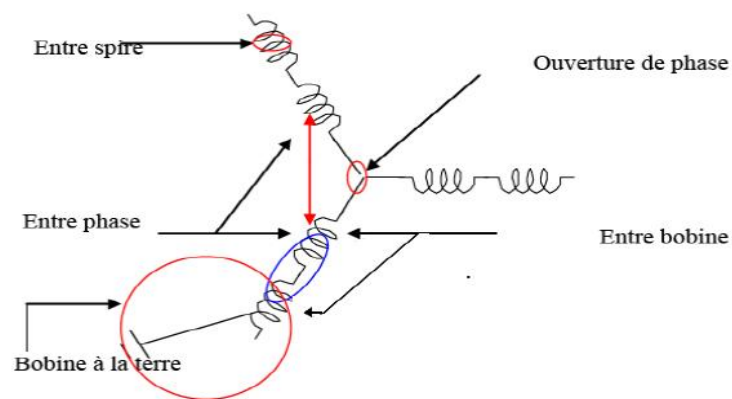


Fig. I.7 : Représentation des différents défauts statorique possibles [7].



Fig. I.7 : Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un MAS [3].

I.3.1.3. Défauts du circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc [11].

Conséquences des défauts statoriques

En générale, l'effet d'un court-circuit est de perturber la répartition spatiale du champ tournant. D'une part cela conduit à des oscillations du couple électromagnétique, donc de la vitesse. Il en découle des vibrations mécaniques qui, si elles sont fortes, peuvent avoir des effets destructeurs pour les organes mécaniques environnant la machine. D'autre part, le courant circulant dans la boucle créée par le court-circuit peut atteindre des valeurs élevées [14].

I.3.2.1. Cassure de barres

La cassure de barre rotorique provoque une dissymétrie du rotor. Le résultat de la dissymétrie réside dans la création d'un champ tournant de sens opposé à celui généré par le stator, et cela à la fréquence de glissement par conséquent, il y'aura création d'un courant supplémentaire dans le bobinage statorique, la relation de la fréquence est donnée sous la forme [5] :

$$f_{bc} = (1 \pm 2kg)f_s \quad (I-2)$$

f_{bc} : fréquence de barre cassé.

$K = 1, 2, \dots, n \quad n \in N.$



Fig. I.8 : Rupture de barre [6].

I.3.2.2. Rupture d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres (**Fig. I.9**) [6].

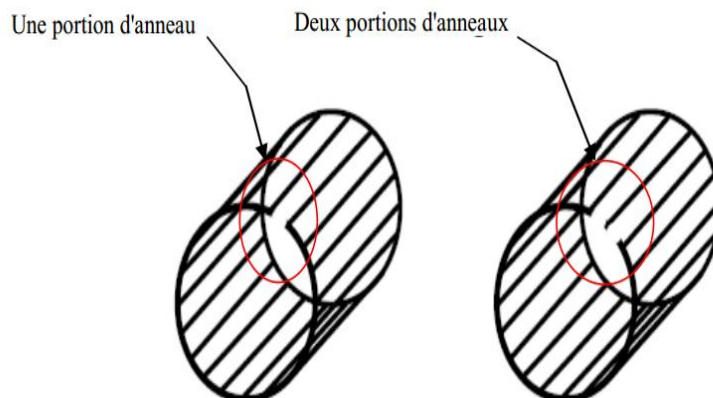


Fig. I.9 : Rupture d'un anneau.

I.3.2.3. Défauts d'excentricité

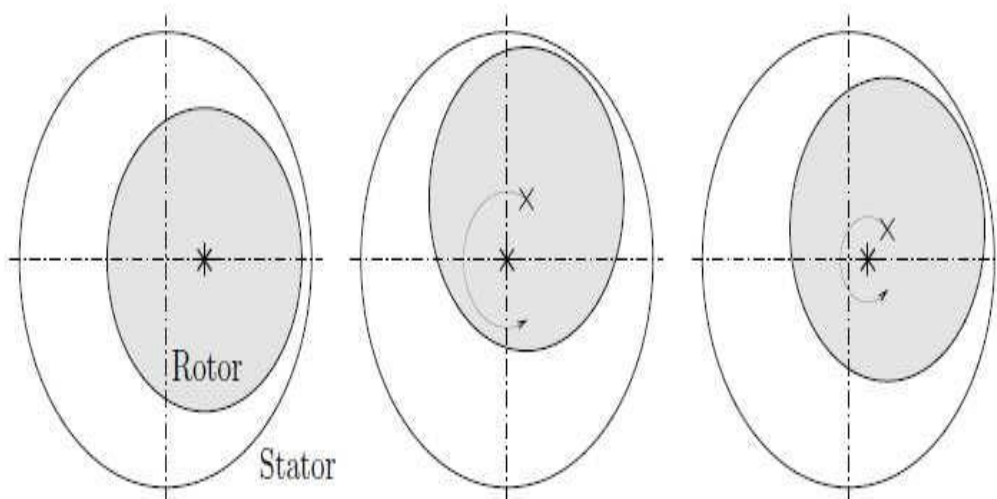
Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor).

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

Trois cas d'excentricité sont, généralement, distingués

- **Excentricité statique** : Le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- **Excentricité dynamique** : Le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.

L'excentricité mixte : Il caractérise les 2 cas, précédemment, cités.



Excentricité statique

Excentricité dynamique

Excentricité mixte

Fig. I.10 : Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte [3].

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

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [11].

- **Conséquences des défauts**

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total. On cite parmi les conséquences des défauts :

- a- Fluctuations au niveau du couple et de la vitesse.
- b- Appel supplémentaire de courant.
- c- Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.
- d- Augmentations des arrêts non programmés, des pertes de production, et par conséquent, du rendement global [2].

I.4. Etude statistique

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants (**Fig. I.11**).

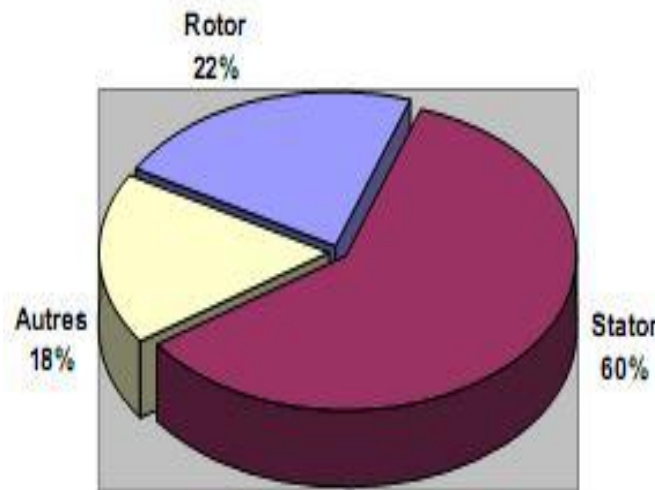


Fig. I.11 : Proportion des défauts.

D'autre part, les mêmes études montrent qu'entre 1973 et 1988, les pannes au stator sont passées de 78% à 60% et au rotor de 12% à 22%. Ces variations sont dues à l'amélioration des isolants sur cette période. La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est la suivante :

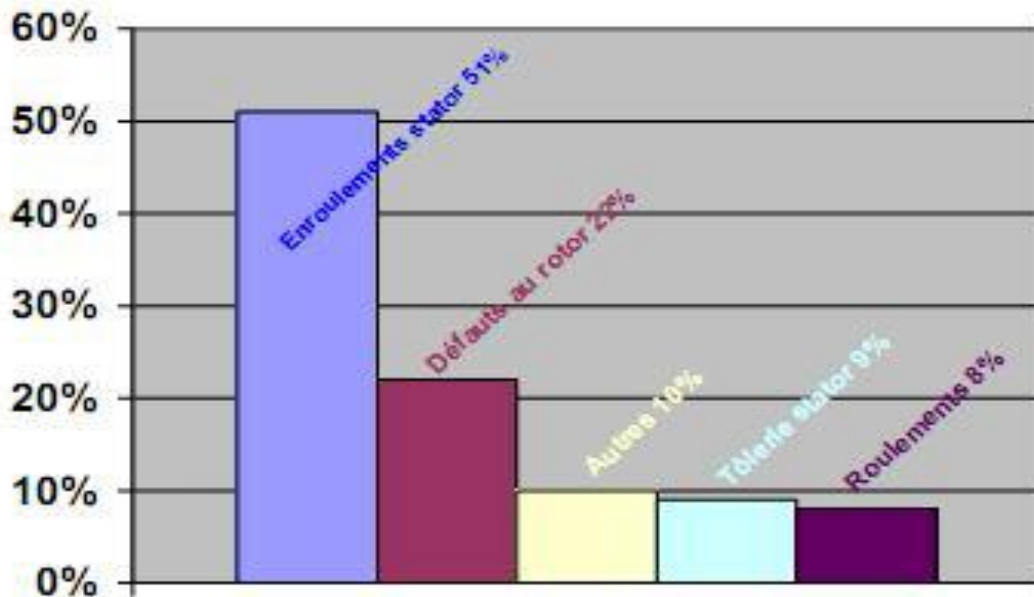


Fig. I.12 : Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne les résultats suivants :

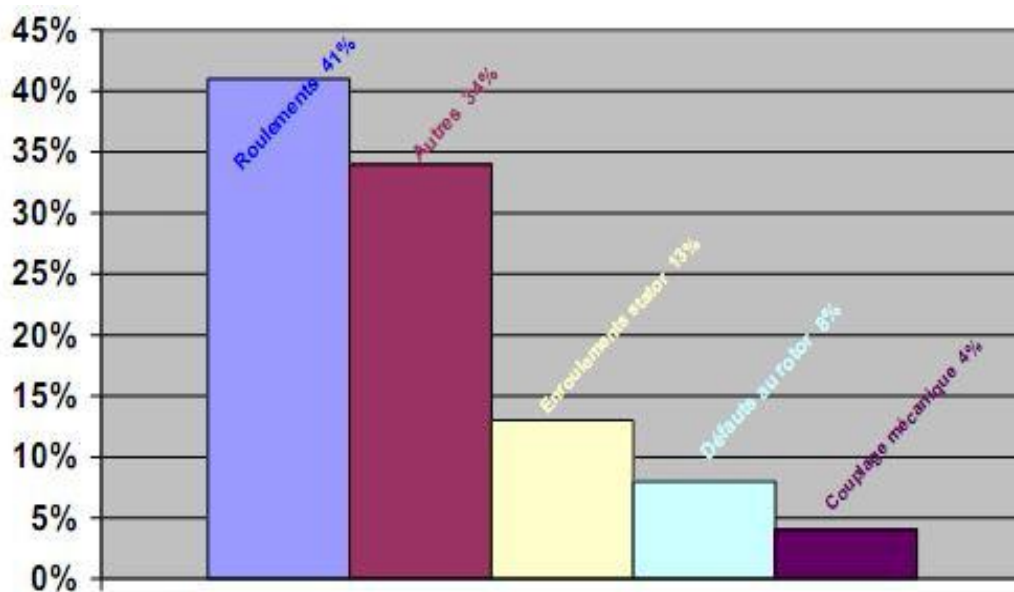


Fig. I.13 : Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances [11].

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue [11].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés les éléments de constitution du moteur asynchrone et le principe de fonctionnement de la machine. On a présentés aussi les différents défauts qui peuvent affecter les différents défauts de la machine (court-circuit, rupture ou cassures des barres et anneau et excentricité rotorique....), ainsi que les causes et les conséquences des défauts.

Le chapitre suivant sera consacré au développement des méthodes et technique de diagnostic des machines asynchrones.

Chapitre I :

Méthode

**De diagnostic de la machine
asynchrone**

Introduction

Dans la première partie de ce chapitre, nous décrivons les diverses méthodes de détection de défauts dans la machine asynchrone. La seconde partie de ce chapitre sera consacrée à une étude plus détaillée de la transformée en ondelettes (TO) en passant brièvement par la transformée de Fourier rapide (TFR).

II. 1. Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

Le diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance. La procédure de diagnostic s'articule autour des étapes suivantes :

- Extraction des informations issues de capteurs de la machine pour obtenir des indicateurs de défauts ou résidus .le résidu représente la différence entre l'observation et la valeur de référence. Avant de chercher la cause du défaut, il est important de valider l'information fournie par les résidus.
- la valeur du résidu doit être quantifiée afin de produire des symptômes .le problème d'évaluation des résidus consiste à définir le seuil à partir duquel on déclarera le défaut.
- la décision constitue la dernière étape de la tâche du diagnostic. A partir de la comparaison de la signature actuelle avec celle de l'expérience, il s'agit de déclarer dans un premier temps, si l'élément est défaillant ou non. Dans un second temps, si L'élément est défaillant, il faut trouver la cause de l'anomalie [12].

II. 2. Approches de diagnostic de défauts de la machine asynchrone

Ces deux possibilités conduisent à définir deux classes de méthodes de surveillance et de diagnostic: une approche dite signal et une approche dite modèle.

II. 2.1. Approche signal :

Le principe de la détection des défauts par une approche signal repose sur l'existence, en cas de défaut, de propriétés particulières de certains signaux physiques prélevés sur la machine en fonctionnement. A partir de modèles de signaux, établis analytiquement, où à partir de simulation des signatures témoignant de la présence d'une défaillance peuvent être établis. De nombreux travaux exploitent ces principes en recherchant, par des techniques appropriées de traitement de signal, à extraire ces signatures, permettant ainsi de confirmer

La présence d'un défaut dans les machines asynchrones. Parmi les méthodes appartient à cette approche, on peut citer [3] :

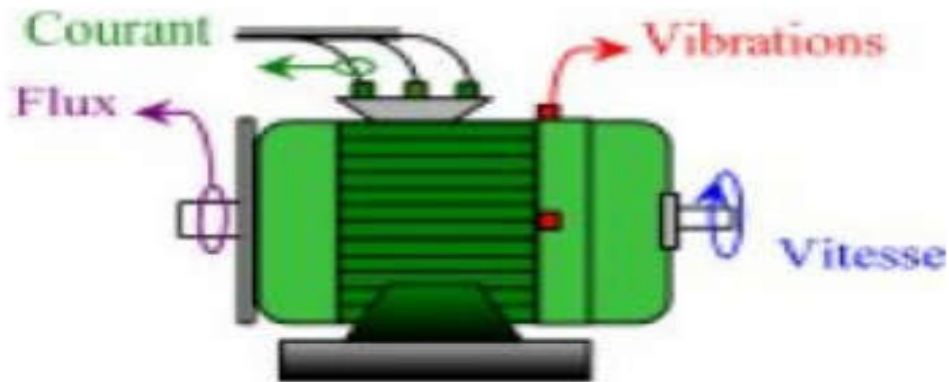


Fig. II.1 : Les différents points de mesure [4].

1. Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

$$\sigma(\theta, t) = \frac{\beta_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (\text{II.1})$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la force magnétomotrice (F_m) et de la perméance (P).

$$B_s = F_m \cdot P \quad (\text{II.2})$$

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations issus du moteur avec défaut sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer. Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode [10].

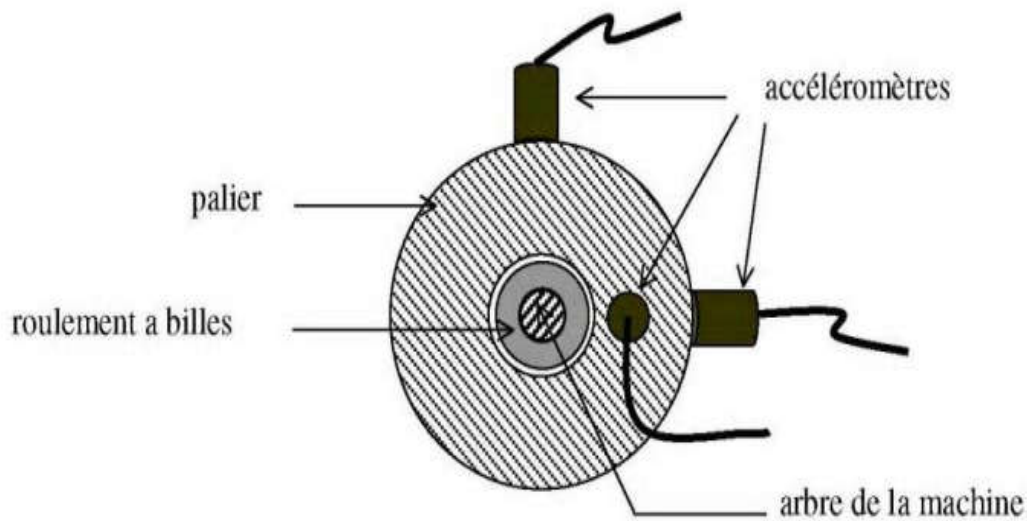


Fig. II. 2 : Mesures vibratoires sur la machine asynchrone [10].

2 . Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéale sans défauts, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeur dépendantes du degré de sévérité du défaut .

Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. L'analyse spectrale de la tension induite dans cette bobine, peut être exploitée pour détecter les différents défauts comme la rupture de la barre rotorique [1].

3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

Cette technique, est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques, pendant la déconnexion du moteur du réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette approche, les effets de non – idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques du temps) peuvent être évités. Cependant, l'application de cette technique est impossible lorsqu'il s'agit d'un moteur appartenant à une chaîne de production [1].

4. Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état du moteur [1].

5. Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones a fait l'objet des nombreux travaux. Car la puissance instantanée est la somme des produits des courants des tensions dans les trois phases statorique. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase (oscillations plus importantes et plus visibles). Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [13].

6. Diagnostic par l'analyse du courant 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. 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 car elle est simple, peu coûteuse et facile à exécuter. Elle permet de détecter aussi bien les défauts électriques que mécaniques [13].

7. Diagnostic par l'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 de phase $I_{sa}(t)$, $I_s(t)$ et $I_s(t)$, nous pouvons trouver les courants de Park $i_d(t)$ et $i_q(t)$. Utilisent le vecteur de Park pour détecter le défaut de non uniformité de l'entrefer (l'excentricité) [13].

II. 2.2. Approche modèle

Le principe de la détection de défauts par une approche modèle repose sur la comparaison du comportement réel de la machine avec celui fourni par un modèle de représentation de la machine auquel sont appliquées les mêmes excitations qu'au système réel. La forme du modèle utilisé peut prendre plusieurs formes. Il peut être simplement basé sur une représentation en régime sain de la machine ou inclure dans sa formulation des éléments supplémentaires relatifs au défaut surveillé. Dans tous les cas, le principe de comparaison entre un dispositif surveillé et un modèle fait apparaître des différences comportementales de certaines grandeurs caractéristiques liées au fonctionnement de la machine. Ces différences sont appelées résidus. Ces résidus sont alors utilisés comme entrées d'un processus de détection des défauts. Trois grandes approches de génération de résidus se sont développées [3]:

- Approche à base d'observateurs.
- Approche par projection dans l'espace de parité.
- Approche par estimation paramétrique.

II. 3. Technique de traitement de signaux dédiés au diagnostic de la machine asynchrone

Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal. Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que : les courants, les puissances, le couple, les vibrations,...etc. Dans ce qui suit, on présente brièvement les transformées de Fourier rapide (TFR) et la transformée en ondelettes (TO) [2].

II. 3.1. Transformée de Fourier Rapide (TFR)

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

Considérons le signal $x(t)$ à temps continu. Si x est d'énergie finie, sa transformée de Fourier rapide (TF) à la fréquence f est la suivante :

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (\text{II.3})$$

Son inverse est donnée par :

$$X(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) e^{j2\pi f t} df \quad (\text{II.4})$$

Sa transformée de Fourier discrète (TFD) de N points avec une période d'échantillonnage T est donnée par

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{K=N-1} x(kt) e^{-\frac{j2\pi k t}{NT}} \quad (\text{II.5})$$

et sa relation inverse est donnée par :

$$x(kt) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{K=N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{\frac{j2\pi k t}{NT}} \quad (\text{II.6})$$

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 $\{e^{j2\pi f t}\}_{f \in \mathbb{R}}$. 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 changement de fréquence par exemple, la FFT ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent dans le signal 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.

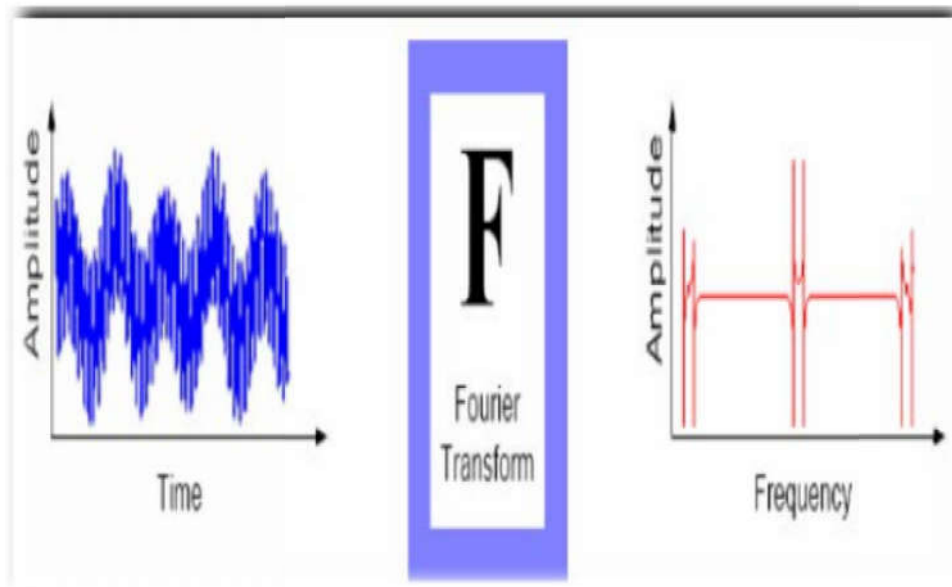


Fig. II.3 : Principe de la transformée de Fourier.

Pour résoudre ce problème, GABOR 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 fréquences dénommé la transformée en ondelettes (Wavelets transforme) [2].

II. 3.2. Transformée en ondelettes (TO)

La transformée en ondelettes 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. 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 . Plusieurs travaux utilisent la TO pour le diagnostic de défauts dans les machines asynchrone triphasée à cage [2].

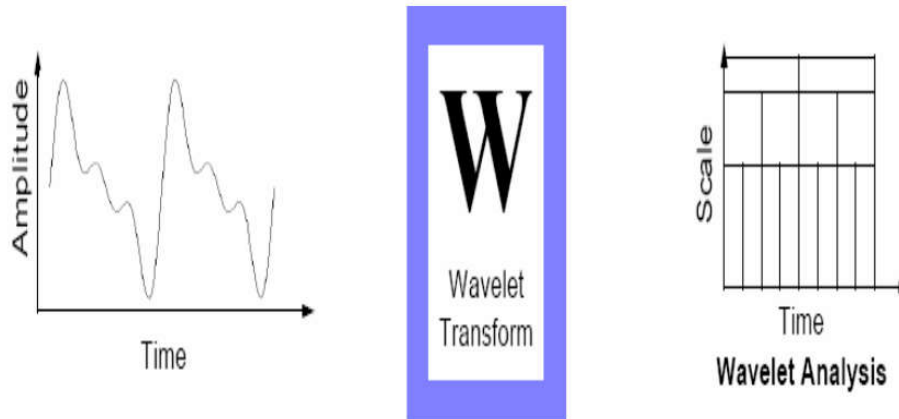


Fig. II.4 : Représentation temporelle vers ondelettes.

II. 3.2.1. Transformée en ondelettes continue (TOC)

La transformée continue en ondelettes (TOC), réalise une projection sur une base de fonctions dont la construction diffère de celle de la Transformée de Fourier à Court Terme et auxquelles on réserve classiquement le terme d'ondelettes. Les ondelettes sont construites à partir d'une « ondelette mère » $\psi(f)$ à l'aide d'un opérateur de translation temporelle et d'un opérateur de changement d'échelle.

- $\psi(f)$ est une fonction de moyenne nulle :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(f) d(t) = 0 \tag{II.7}$$

Cette dernière est dilatée avec un paramètre d'échelle "a", et tradatée par "b"

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{II.8}$$

La transformée continue en ondelettes est définie par :

$$Tx(b, a) = \langle x, \Psi_{a, b} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) .dt \tag{II.9}$$

Sa version fréquentielle est donnée par :

$$Tx(b, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) \psi^*(af) e^{j2\pi fb} df \tag{II.10}$$

Ily a plusieurs ondelettes mère utilisées pour le calcul de la transformée en ondelette des signaux analysés [10].

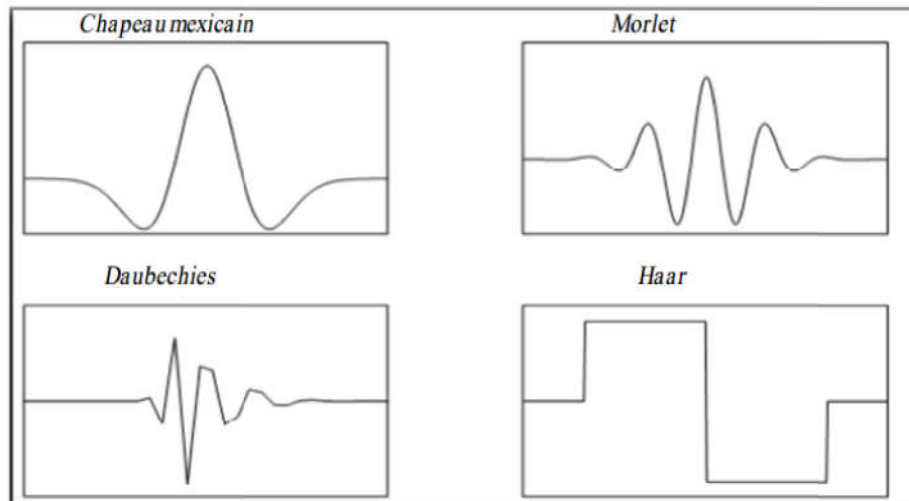


Fig. II.5 : Quelques formes des ondelettes usuelles.

Tab. II.1 : Familles d'ondelettes.

Nom des familles d'ondelettes	Nom court en Matlab
Ondelette de Haar	Haar
Ondelette de Daubechies	Db
Symlets	Sym
Coiflets	Coif
Ondelettes biorthogonales	Bior
Ondelette de Meyer	Meyr
Approximation discrète de l'ondelette de Meyer	Dmey
Ondelette de Battle et Lemarié	Btlm
Ondelette gaussiennes	Gaus
Chapeau mexicain	Mexh
Ondelette de Morlet	Morl
Ondelette gaussiennes complexes	Cgau
Ondelette de Shannon complexes	Shan
Ondelette B-spline fréquentielles complexes	Fbsp
Ondelette de Morlet complexe	Cmor

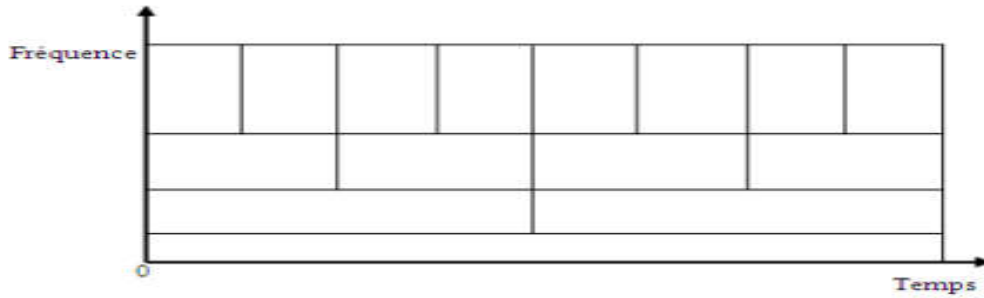


Fig. II.6 : Pavage de la Transformée en ondelettes (TO).

Généralement ces composantes de faibles échelles n'existent que sur de courtes durées du signal, elles apparaissent de temps en temps associées à des pics transitoires. A l'inverse, les grandes échelles existent typiquement sur toute la durée du signal (Fig. II.2).

II. 3.2.2. Transformée en ondelettes discrète (TOD)

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la différence de cette dernière, La TOD 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 $a = 2^i$. 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.

Pour mettre en œuvre la transformée en ondelette sur des signaux numériques, une discrétisation des paramètres de résolution a et position b est nécessaire. Cette discrétisation du plan temps fréquence correspond à la construction d'une grille non uniforme définie par les paramètres de l'équation (II.7). b_0 dépend de l'ondelette choisie.

$$(b, a) = (nb_0 a_0^m, a_0^m), b_0 > 0, a_0 > 1, m \in \mathbb{Z} \tag{II.11}$$

L'idée essentielle de cette discrétisation est la suivante. Une fois choisi un grossissement a_0^m et étudié le processus à une position donnée, nous nous déplaçons à une autre position. Si le grossissement est important (analyse des détails à petite échelle), les déplacements se font par petits incréments. Au contraire, si le grossissement est faible (analyse à plus grande échelle), les déplacements peuvent être plus rapides. Ceci est automatiquement accompli si l'incrément de déplacement est inversement proportionnel au grossissement. Un atome de cette transformée discrète se définit alors comme décrit dans l'équation (II.8).

$$\Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) = a_0^{-m/2} \psi(a_0^{-m} t - nb_0) \tag{II.12}$$

La transformée en ondelette discrète de $x(t)$, calculée à partir de $\Psi_{m,n}(t)$, est donnée par l'équation :

$$\Psi_{dx}(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int x(t) \psi(a_0^{-m}t - nb_0) \quad (\text{II.13})$$

Dans la formalisation de l'analyse multi-résolution, deux choix de discrétisation sont possibles. Le premier consiste en une décomposition continue où a_0 est très proche de 1 et b_0 est suffisamment petit. Dans ce cas, il sera nécessaire d'étudier les fréquences en fonction de coefficients de dilatation imposés par une évolution en puissance de m , avec m le niveau de détails. Le second choix ($a_0=2, b_0=1$) correspond à un échantillonnage dyadique du plan temp-fréquence (transformée en ondelettes discrète, TOD).

La transformation en ondelettes peut aussi être considérée comme un processus de décomposition du signal en approximations et en détails. Le signal d'origine $f(t)$, traverse deux filtres complémentaires, passe-haut et passe-bas, et émerge en tant que deux signaux respectivement le signal d'approximations A et le signal de détails comme le montre la (Fig. II.7) [8].

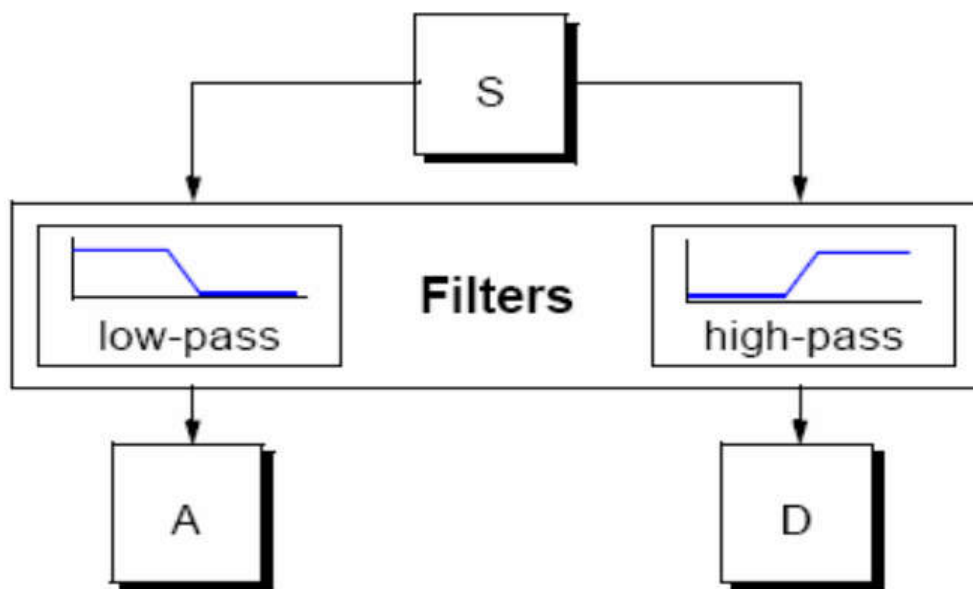


Fig. II.7 : Décomposition du signal s en approximations et détails.

- L'approximation : est la partie grand échelle, basse -fréquence du signal.
- Le détail : est la partie petit-échelle, haute-fréquence du signal.

➤ **Décomposition simple :**

Comme on a dit précédemment le signal S, est divisé en deux signaux mais, actuellement pour faire cette opération dans un signal réelle, on trouve deux signaux de même taille que le signal original.

Supposé, pour l'instant, que le signal original S contient 1000 échantillons donc le résultat des deux signaux à 1000 échantillons pour chaque signal, le total est 2000 échantillons.

Pour donner deux vecteurs respectivement CA (Coefficients ondelette d'approximation) et CD (Coefficients ondelette de détails). Tous deux sont de taille approximativement égale à la moitié du vecteur d'origine. Ceci est du au fait de l'opération de décimation par 2 (down sampling) [15].

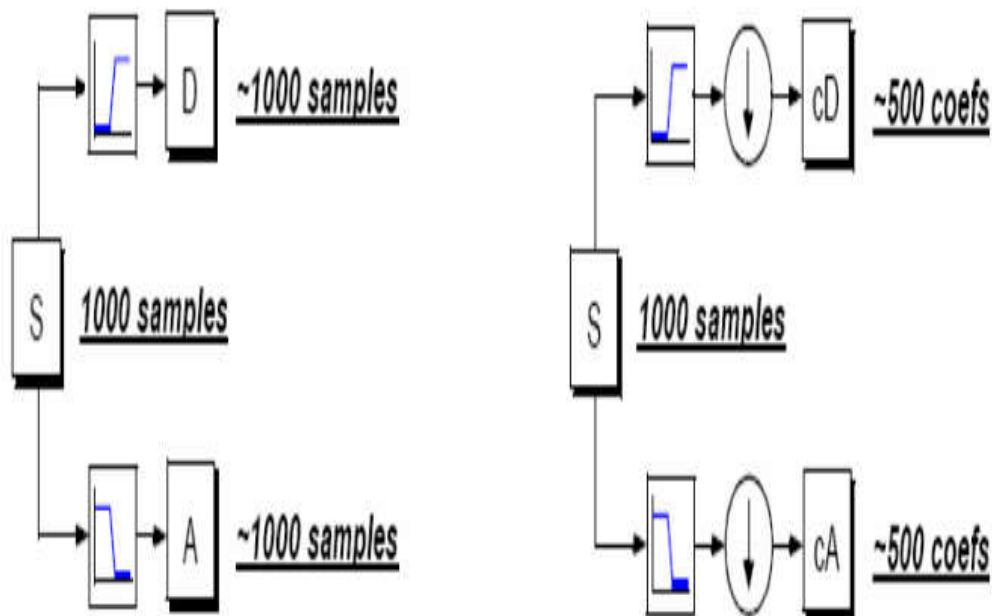


Fig. II.8 : Décomposition simple du signal s en approximations et détails.

➤ **Décomposition multi niveaux :**

Le processus de décomposition peut être réitéré, avec des approximations successives étant décomposées alternativement, de sorte qu'un signal soit décomposé en beaucoup de composants de hautes résolutions. Ceci s'appelle l'arbre de décomposition en ondelettes. Puisque le processus d'analyse est itératif, dans la théorie il peut être continué indéfiniment. En réalité, la décomposition peut procéder seulement jusqu'à ce que les différents détails se composent d'un échantillon ou d'un Pixel simple.

Dans la pratique, on choisira un nombre approprié de niveaux basés sur la nature du signal à décomposer, ou sur un critère approprié tel que l'entropie.

Le signal $f(n)$ est un signal de temps discret pour être décomposé en ses versions approximatives et détaillées en utilisant l'analyse multi-résolutionnel. Les premiers coefficients de décomposition sont A_1 et D_1 , où A_1 est la version approximative du signal original $f(n)$ et D_1 est la représentation détaillée du signal original $f(n)$ [15].

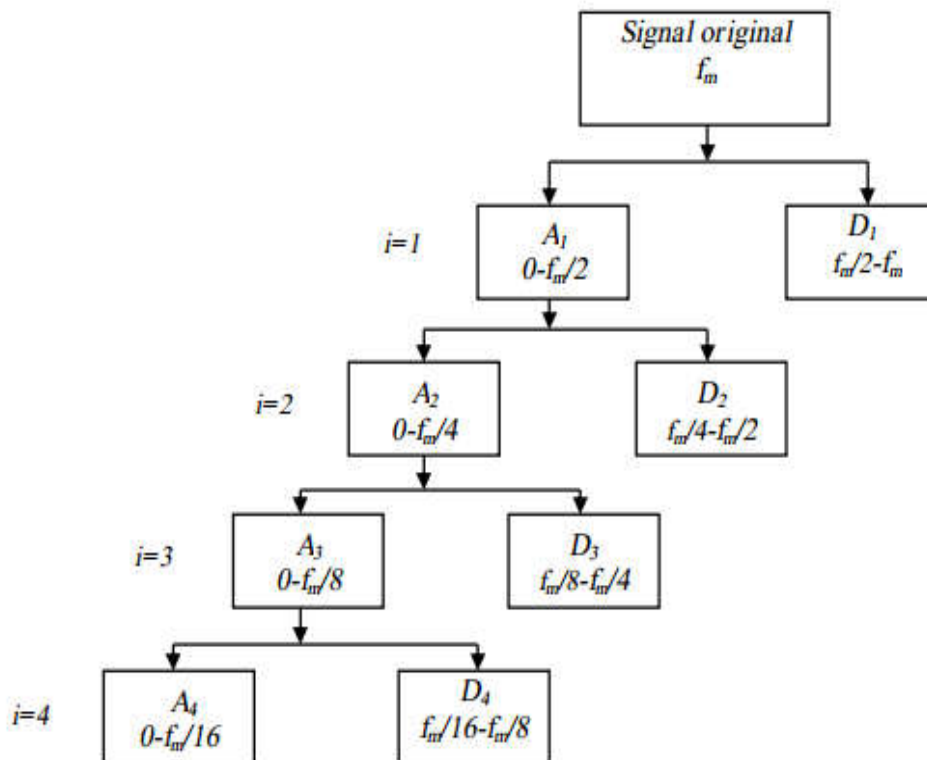


Fig. II.9 : Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux.

D'après l'arbre de décomposition (**Fig. II.9**) on peut estimer le signal original à n'importe quel niveau par la somme des signaux approximation et de détail. Pour une décomposition en quatre niveaux, le signal original est reconstruit en chaque niveau comme suit :

$$\begin{aligned}
 i = 1, f(n) &= A1(n) + D1(n) \\
 i = 2, f(n) &= A2(n) + D2(n) + D_1(n) \\
 i = 3, f(n) &= A3(n) + D3(n) + D_2(n) \\
 i = 4, f(n) &= A4(n) + D4(n) + D_3(n) \\
 i = k, f(n) &= AK(n) + D5(n) + D_{k-1}(n)
 \end{aligned} \tag{II.13}$$

II. 3.3. Avantages de la transformée en ondelettes

Le fait que la transformée en ondelettes utilise des fonctions bien localisées dans le plan temps-fréquence lui donne beaucoup d'avantages :

- La résolution en fréquence de la transformée dépend du facteur de dilatation par le principe de Heisenberg, on peut donc choisir arbitrairement celle-ci suivant ce que l'on désire analyser.
- Pour des signaux physiques présentant des variations très rapides et des discontinuités, l'analyse en ondelettes est adaptée car l'ondelette va détecter ces variations et les analyser. Cette particularité rend l'analyse en ondelettes complémentaire à l'analyse de Fourier. En effet, avec l'analyse de Fourier, les discontinuités d'un signal ne sont pas facilement analysables.
- La localisation en temps est précieuse pour beaucoup d'applications. La localisation en temps est précieuse pour beaucoup d'applications.
- La transformée en ondelette peut représenter complètement et efficacement un signal quelconque avec peu de coefficients **[3]**.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé les méthodes utilisées pour le diagnostic de défauts de cassure de barres rotorique dans la machine asynchrone. Un aperçu sur les ondelettes continues et discrètes appliquées aux signaux unidimensionnels a bien été détaillé à travers la décomposition en ondelettes discrètes. Cette technique qui propose une analyse très fine des signaux permettra par la suite de construire un outil très efficace dans le domaine de traitement de signal en vue de diagnostic les machines asynchrones à cage.

Le chapitre suivant sera consacré au diagnostic de la cassure de barres rotorique dans la machine asynchrone utilisant la transformée en ondelettes discrète (TOD).

Chapitre III :
**Diagnostic de défaut de
cassure de barres rotorique
dans la machine asynchrone**

Introduction

Ce chapitre expose les résultats expérimentaux du diagnostic du défaut de cassure de barres rotorique du moteur asynchrone triphasé à cage. Ce défaut est diagnostiqué en utilisant les signaux de l'enveloppe du courant statorique analysés par la transformée en ondelettes discrète (TOD).

III. 1. Banc d'essai expérimental

Ces essais expérimentaux ont été effectués au sein du Laboratoire des Machines Électriques (LME) de l'Université de Coimbra, Portugal. Le banc d'essai comportant un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil de 28 barres dans le rotor et de 36 encoches dans le stator, de 3 kW, 4 pôles, 120/208V, 12.3/7.1 A, 50 Hz.



Fig. III.1 : Banc d'essai expérimental.

Ce moteur entraine une génératrice à courant continu comme charge mécanique alimentant une charge résistive variable. Afin de faire l'acquisition des signaux du moteur sur PC et les exploiter, deux capteurs de courant et deux autres de tension sont relié à un PC à travers un module de conditionnement et une carte d'acquisition (Fig. III.1).

Cinq rotors ont été utilisés dans les essais expérimentaux, un rotor sain et quatre autres avec une, deux, trois et quatre barres cassées (Fig. III.2).



Fig. III.2 : Rotors utilisés.

III. 2. Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux sont analysés, pour un fonctionnement stationnaire du moteur. Une seule méthode de traitement de signal est utilisée, la transformée en ondelettes discrète (TOD). Daubechies (Db44) a été l'ondelette mère utilisée dans l'analyse des résultats expérimentaux. Une fréquence d'échantillonnage de 12.8 kHz a été choisie. Par conséquent, $N_e = 128000$ échantillons sont acquis avec une résolution de fréquence égale à 0.1Hz. Le nombre des niveaux de décomposition est $l_d = 10$ dans le but d'obtenir plus d'informations

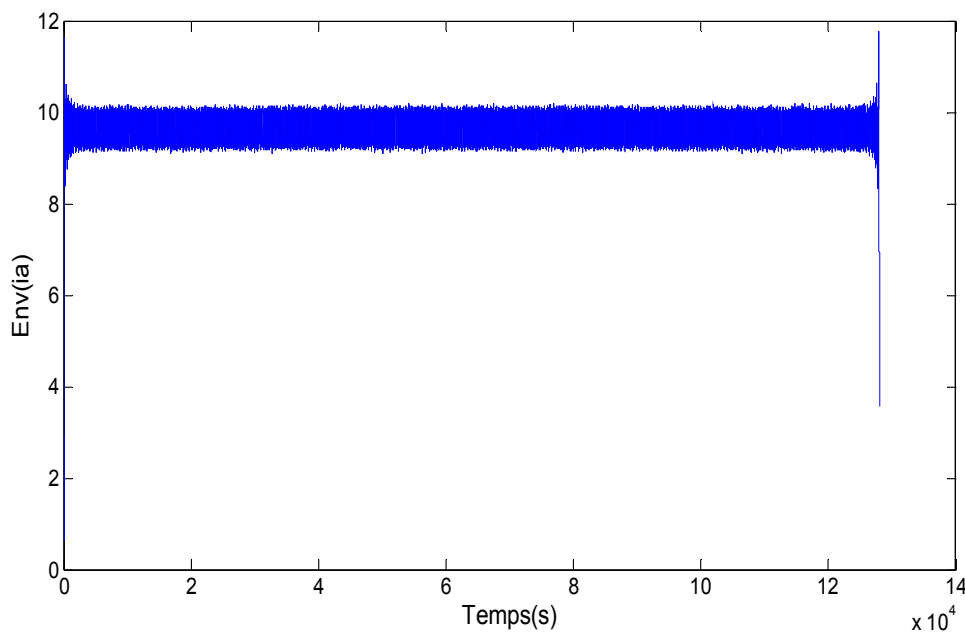
sur le cassure de barre. Ainsi, la bande de fréquence affectée par le défaut est [2.8:20] Hz. Les signaux intéressants et leurs bandes de fréquences sont présentés dans (Tab. III. 1).

Signal	Bande fréquentielle (Hz)
a11	0-2.44
d11	2.44-4.88
d10	4.88-9.76
d9	9.76-19.53

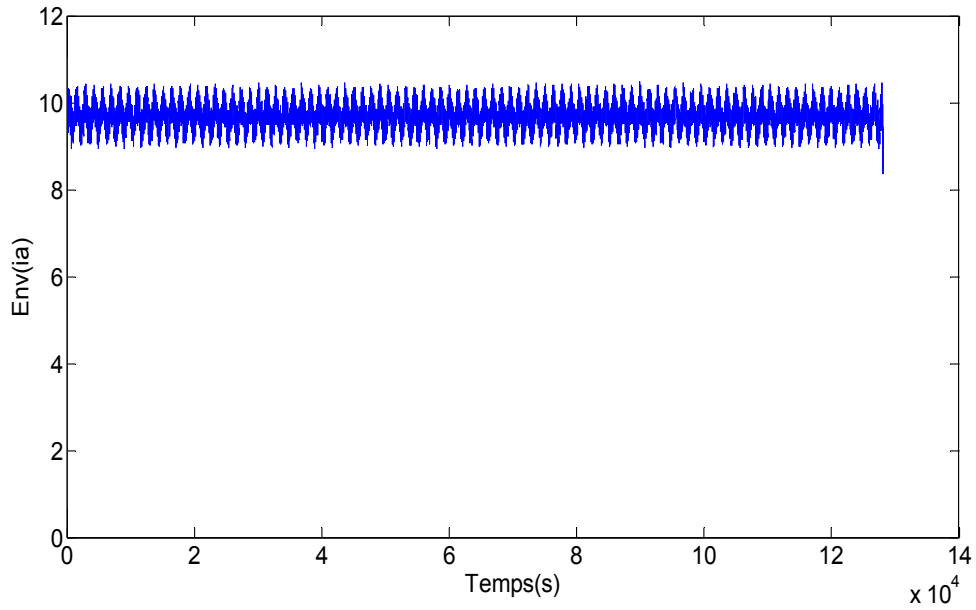
Tab. III.1 : Bandes fréquentielles des signaux de décomposition (expérimental).

a).Allures temporelles des grandeurs électriques utilisées dans le diagnostic

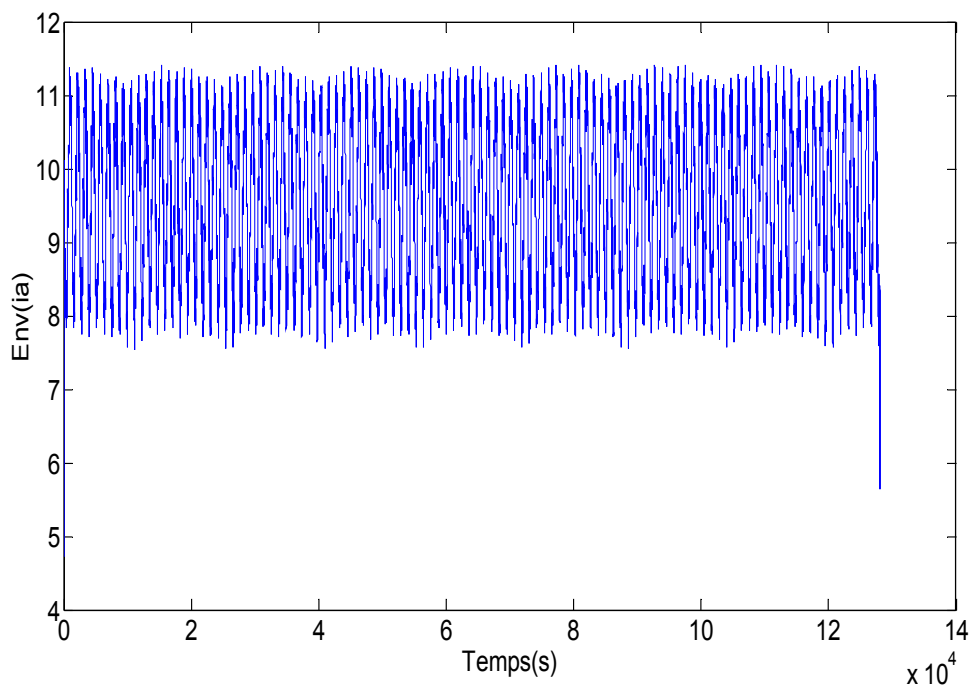
Les figures III.3 représentent, respectivement les allures temporelles expérimentales de l'enveloppe du courant statorique (Env. ia), d'un moteur asynchrone triphasé fonctionnant sous une charge nominale avec une barre et quatre barre rotorique cassée. Notons que ces caractéristiques électriques sont affectées par la présence du défaut. Elles sont modulées par la fréquence caractéristique de défaut 2gf et cette modulation augmente avec l'augmentation de la sévérité du défaut. Le diagnostic de ce défaut est très difficile en examinant seulement ces allures temporelles et le recours donc aux méthodes de traitement de signal est indispensable.



(a)



(b)



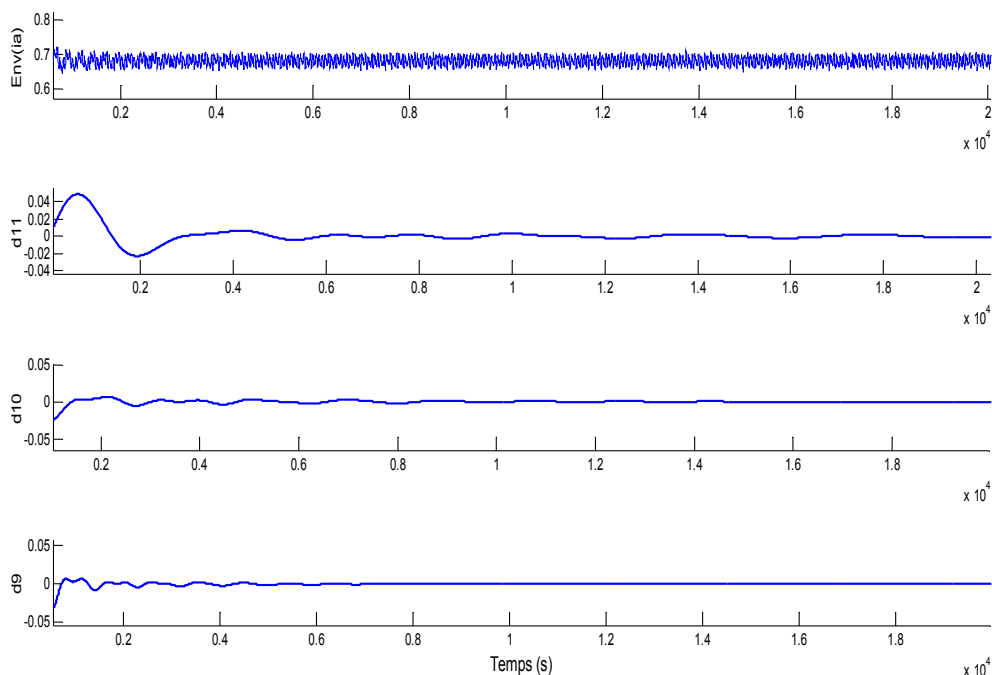
(c)

Fig. III.3 : Caractéristiques de l'enveloppe du courant statorique $Env(i_a)$ du moteur asynchrone en pleine charge, (a) sain, (b) 1BC, (c) 4BC, expérimental.

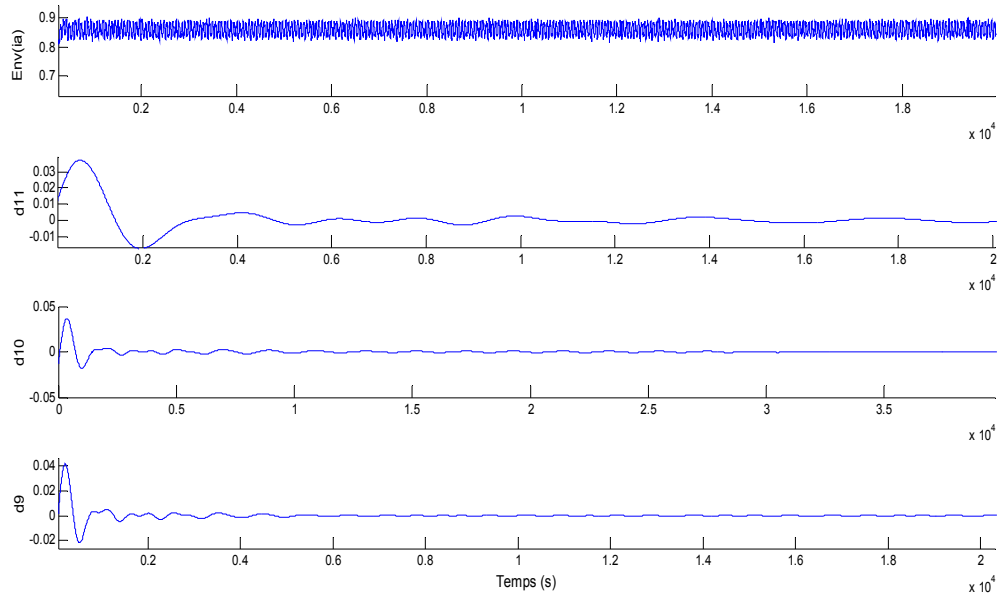
b). Analyse par la transformée en ondelettes discrète (TOD)

Les résultats expérimentaux de la décomposition en ondelettes en utilisant db44 au niveau 11 des signaux de l'enveloppe du courant statorique ($Env\ i_a$) sont examinés. Les figures Fig. III.4 - III.5 comporte le signal original ($Env\ i_a$) et les signaux de détail d9, d10 et d11 à l'état sain à l'état d'une barre cassée et quatre barres cassées respectivement, (a) représente l'état sain, (b) l'état en défaut d'une barre cassée (1BC), (c) l'état en défaut de quatre barres cassées (4BC), les résultats expérimentaux du même signal original avec les signaux de détail d9, d10 et d11.

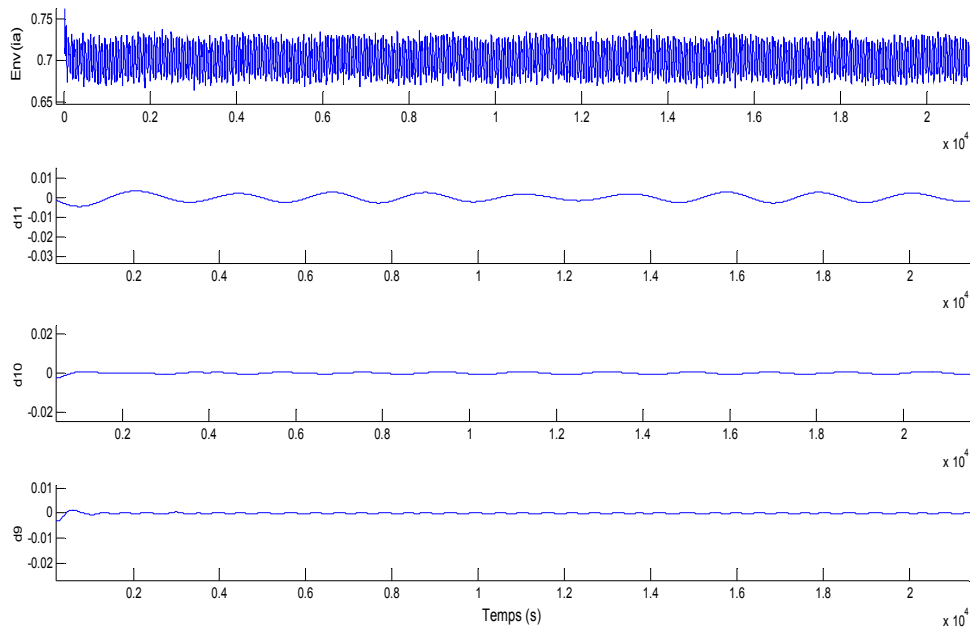
L'objectif de cette analyse qualitative est d'étudier la présence des composantes fréquentielles caractéristique de défaut $2gf$ dans les signaux de détail correspondants. L'analyse par la TOD de ($Env\ i_a$) pour le cas de 1 barre cassée et 4 barres cassées est représentée dans les figures (Fig. III.4-III.5) Dans ce cas, des oscillations fréquentielles caractéristiques de cassure des barres sont observées particulièrement dans d10. En moyenne charge on ne peut pas remarquer la différence entre ces oscillations dans les détails d10 (Fig. III.4). En pleine charge (Fig. III.5), ces oscillations abaissement avec l'augmentation du nombre de barres cassées et permettent de prendre une décision préliminaire sur la présence de défaut de cassure des barres.



(a)

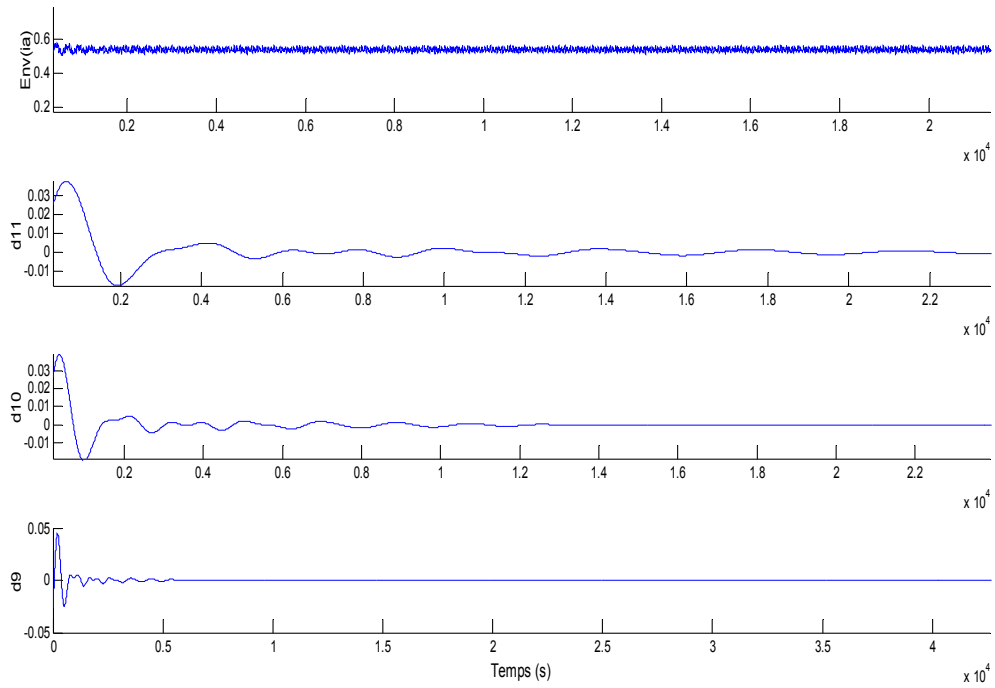


(b)

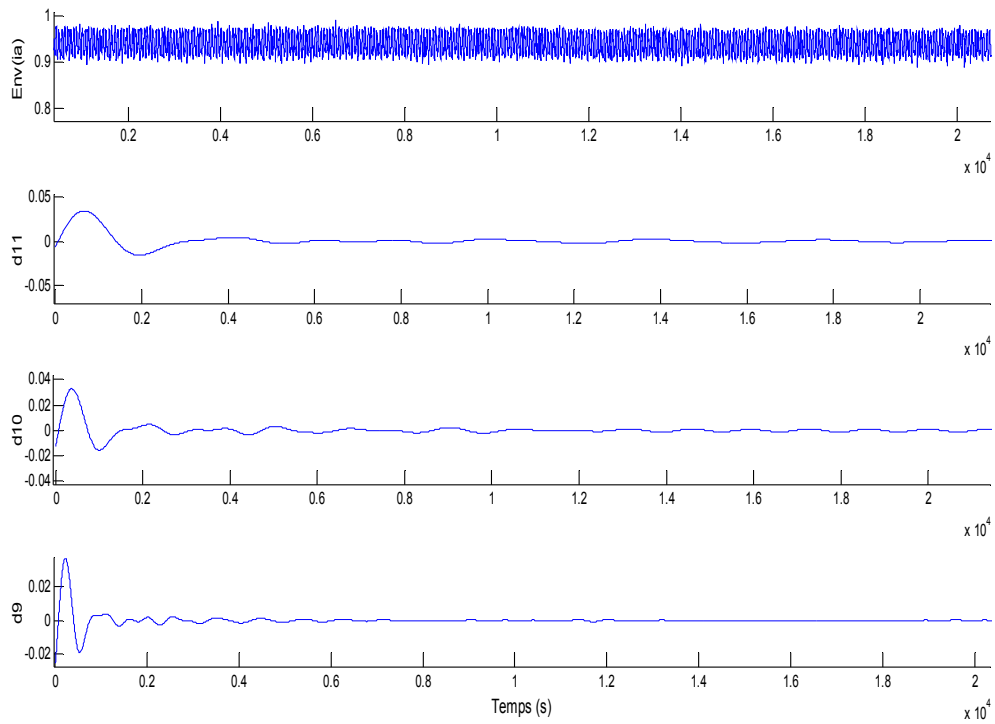


(c)

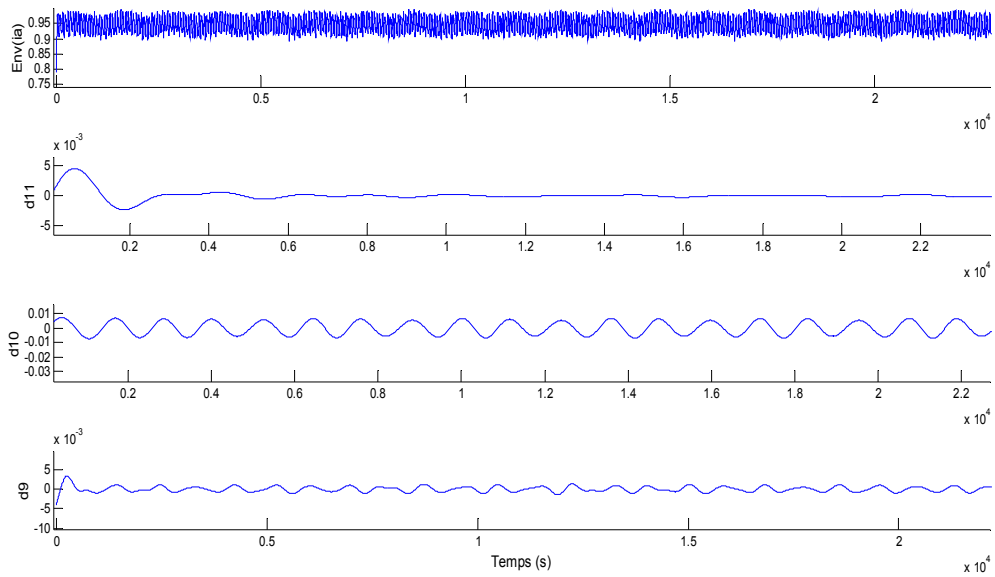
Fig. III.4 : Signature de l'enveloppe du courant statorique (Env ia), obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en moyenne charge,(a) sain, (b)1BC ,(c)4BC ,expérimental.



(a)



(b)



(c)

Fig. III.5 : Signature de l’enveloppe du courant statorique (Env ia), obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en pleine charge, (a) sain, (b)1BC ,(c)4BC expérimental.

<u>Db5</u>					
barre	0_BC	1_BC	2_BC	3_BC	4_BC
FSD	moy	moy	Moy	moy	moy
FSD_Env_ia	0.5488	0.0818	0.2034	0.3521	0.4979
FSD_Env_ib	0.2927	0.0582	0.2700	0.2892	0.4297
FSD_Env_ic	0.4211	0.1993	0.0989	0.5141	0.4920
FSD_Env_va	0.0140	0.0071	0.0833	0.0071	0.0183
FSD_Env_vb	0.5637	0.2213	0.0406	0.1929	0.0021
FSD_Env_vc	0.0210	0.0428	0.0665	0.0739	0.0483
FSD_a	0.0254	0.0873	0.4093	0.0201	0.0367
FSD_b	1.9259	3.8015	0.1504	0.6671	0.0049
FSD_c	0.0499	0.2148	0.6722	0.1437	0.0982
FSD_T	2.0012	4.1037	1.2319	0.8309	0.1397

(a)

<u>Db24</u>					
barre FSD	0_BC	1_BC	2_BC	3_BC	4_BC
	moy	moy	Moy	Moy	moy
FSD_Env_ia	0.3484	0.0425	0.1474	0.2885	0.3366
FSD_Env_ib	0.0715	0.0377	0.2033	0.2129	0.3506
FSD_Env_ic	0.1519	0.1739	0.1015	0.3708	0.3768
FSD_Env_va	0.0267	0.0031	0.0492	0.0023	0.0047
FSD_Env_vb	0.1761	0.1720	0.0682	0.1188	0.0012
FSD_Env_vc	0.0491	0.0264	0.0363	0.0458	0.0190
FSD_a	0.0767	0.0724	0.3335	0.0081	0.0138
FSD_b	2.4621	4.5637	0.3354	0.5580	0.0035
FSD_c	0.3229	0.1517	0.3571	0.1234	0.0505
FSD_T	2.8617	4.7878	1.0260	0.6895	0.0679

(b)

<u>Db44</u>					
barre FSD	0_BC	1_BC	2_BC	3_BC	4_BC
	moy	moy	Moy	Moy	moy
FSD_Env_ia	0.2290	0.0248	0.1118	0.2050	0.3095
FSD_Env_ib	0.0276	0.0299	0.1495	0.1594	0.3297
FSD_Env_ic	0.0712	0.1298	0.0971	0.2932	0.3441
FSD_Env_va	0.0428	0.0029	0.0352	0.0019	0.0021
FSD_Env_vb	0.0894	0.1276	0.0812	0.0825	0.0011
FSD_Env_vc	0.0204	0.0127	0.0097	0.0276	0.0109
FSD_a	0.1867	0.1169	0.3150	0.0091	0.0067
FSD_b	3.2416	4.2723	0.5433	0.5177	0.0033
FSD_c	0.2861	0.0975	0.1000	0.0941	0.0318
FSD_T	3.7144	4.4867	0.9583	0.6209	0.0418

(c)

Tab. III. 2 : FSD, obtenu par (a) db5, (b) db24, (c) db44, de méthode utilisées en fonction du nombre de barres cassées en moyenne charge, expérimental.

<u><i>Db5</i></u>					
barre FSD	0_BC	1_BC	2_BC	3_BC	4_BC
	Ple	Ple	Ple	Ple	Ple
FSD_Env_ia	0.2892	0.0950	0.3109	0.5483	1.1353
FSD_Env_ib	0.1003	0.0509	0.4041	0.4586	0.9968
FSD_Env_ic	0.4287	0.2924	0.3071	0.6049	1.0706
FSD_Env_va	0.1876	0.0114	0.2272	0.0059	0.0026
FSD_Env_vb	0.4053	0.1774	0.0171	0.0734	0.0021
FSD_Env_vc	0.1050	0.0724	0.1068	0.1741	0.0121
FSD_a	0.6486	0.1198	0.7306	0.0108	0.0023
FSD_b	4.0415	3.4844	0.0422	0.1600	0.0021
FSD_c	0.2450	0.2476	0.3478	0.2878	0.0113
FSD_T	4.9351	3.8518	1.1206	0.4586	0.0157

(a)

<u><i>Db24</i></u>					
barre FSD	0_BC	1_BC	2_BC	3_BC	4_BC
	Ple	Ple	Ple	Ple	Ple
FSD_Env_ia	0.2019	0.0553	0.2477	0.4205	0.8362
FSD_Env_ib	0.0134	0.0357	0.3516	0.3111	0.6990
FSD_Env_ic	0.1513	0.2182	0.1970	0.4155	0.7476
FSD_Env_va	0.1635	0.0031	0.1361	0.0020	0.0020
FSD_Env_vb	0.1152	0.1085	0.0021	0.0359	0.0016
FSD_Env_vc	0.0669	0.0529	0.0601	0.0800	0.0060
FSD_a	0.8096	0.0556	0.5494	0.0046	0.0023
FSD_b	8.5962	3.0385	0.0060	0.1155	0.0023
FSD_c	0.4423	0.2424	0.3052	0.1925	0.0081
FSD_T	9.8482	3.3364	0.8606	0.3126	0.0128

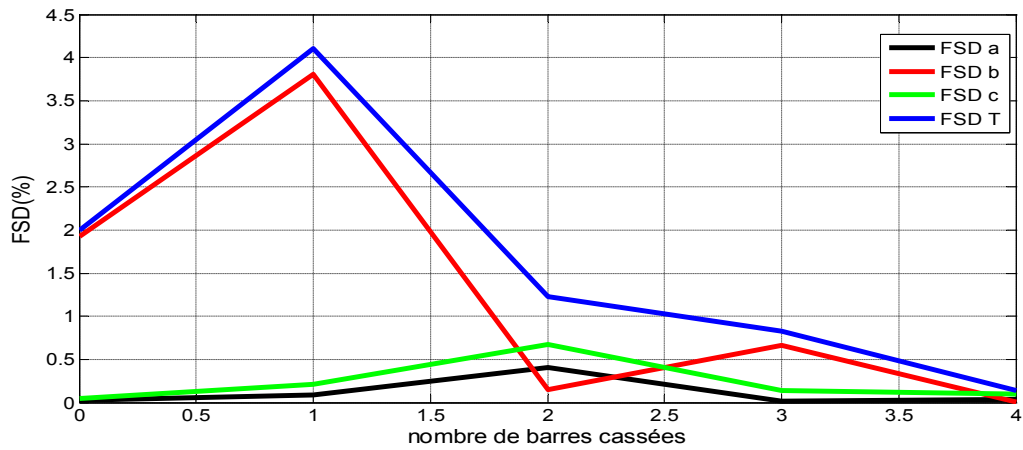
(b)

<u>Db44</u>					
barre	0_BC	1_BC	2_BC	3_BC	4_BC
FSD	Ple	Ple	Ple	Ple	Ple
FSD_Env_ia	0.1263	0.0342	0.1755	0.3193	0.6696
FSD_Env_ib	0.0027	0.0276	0.2802	0.2444	0.5672
FSD_Env_ic	0.0736	0.1459	0.1549	0.3127	0.6180
FSD_Env_va	0.1572	0.0018	0.0923	0.0012	0.0016
FSD_Env_vb	0.0494	0.0770	0.0141	0.0242	0.0013
FSD_Env_vc	0.0226	0.0349	0.0182	0.0469	0.0037
FSD_a	1.2455	0.0528	0.5259	0.0037	0.0023
FSD_b	18.0687	2.7919	0.0504	0.0989	0.0023
FSD_c	0.3076	0.2394	0.1173	0.1501	0.0060
FSD_T	19.6217	3.0841	0.6936	0.2527	0.0107

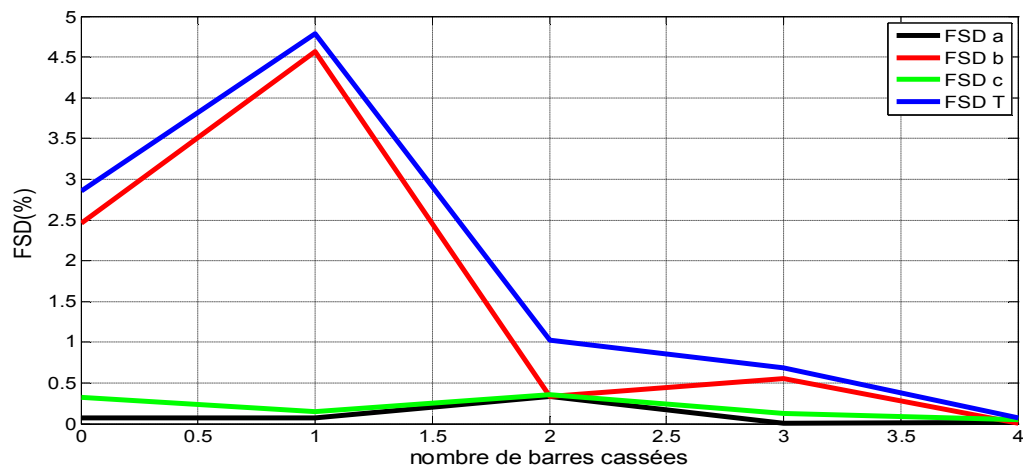
(c)

Tab. III. 3 : FSD, obtenu par (a) db5, (b) db24, (c) db44, des méthodes utilisées en fonction du nombre de barres cassées en pleine charge, expérimental.

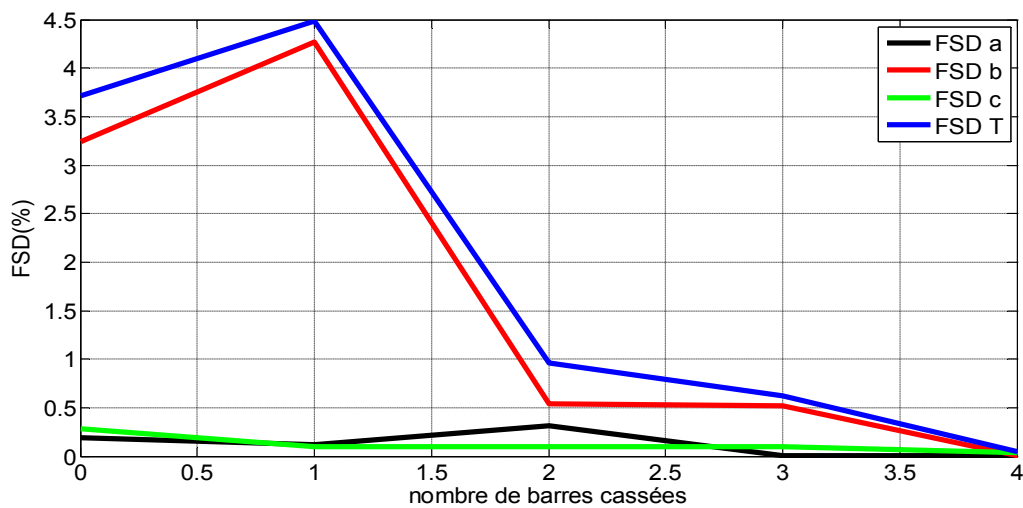
Les performances de l'analyse par la TOD est bien illustrés aux Tab.III.2-III.3 par le facteur de sévérité du défaut (FSD). Ce FSD est défini par la somme des énergies des signaux de détail d9, d10 et d11 pour le cas expérimental et est donné en pourcentage (%). Ce FSD défini par le rapport de la composante caractéristique de défaut $2gf$. Tab.III.2-III.3 montrent que le FSD de la méthode utilisée (Env i_a) pour moyenne et pleine charge dans les cas sain, une, deux, trois et quatre barres rotorique cassées. Ce FSD-T est calculé pour les trois daubechies, (db5), (db24) et (db44) afin d'établir une étude comparative en donnant l'ordre de l'ondelette mère (daubechies le plus sensible au défaut de cassure de barres.



(a)



(b)



(c)

Fig. III.6 : FSD, obtenu par (a) db5, (b) db24, (c) db44 en fonction du nombre de barres cassées (moyenne charge).

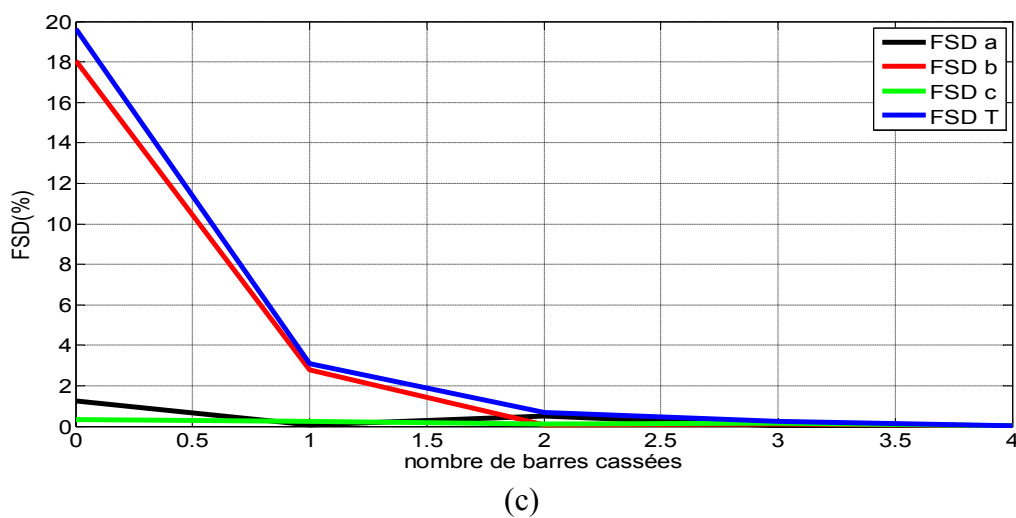
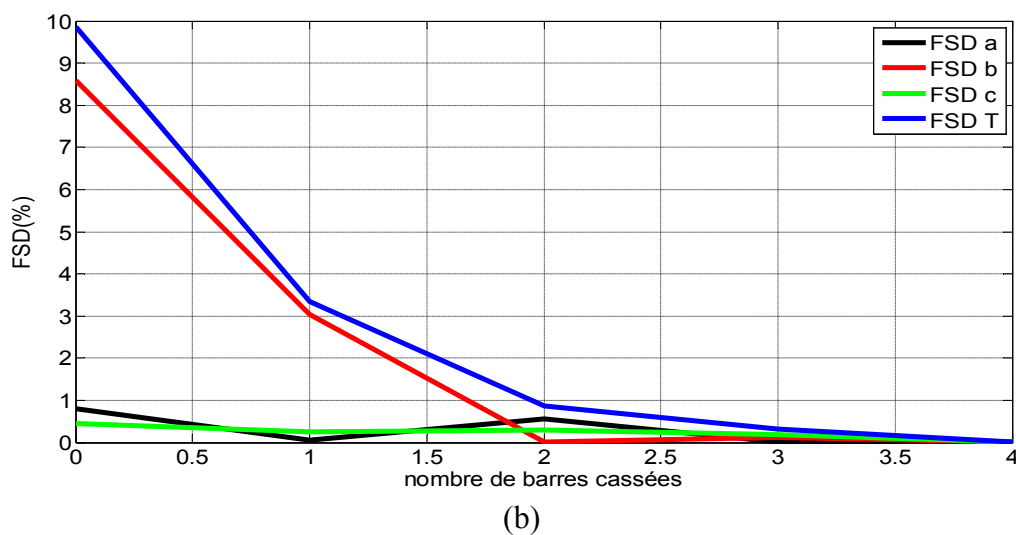
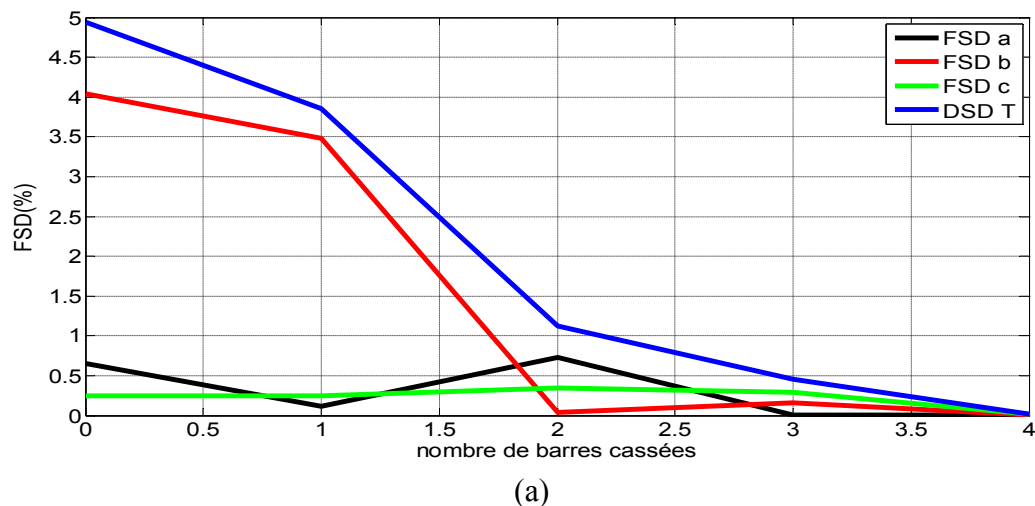


Fig. III.7 : FSD, obtenu par (a) db5, (b) db24, (c) db44 en fonction du nombre de barres cassées (pleine charge).

Les résultats des figures de moyenne charge (Fig. III. 6) ne peuvent pas être utilisés comme référence pour détecter le défaut des barres cassées car ils sont volatiles. Par contre Les résultats en pleine charge (Fig. III. 7) montrent que plus le nombre de barres cassées dans le rotor est élevé, plus le FSD-T est moins avec une différence entre l'ordre de l'ondelette mère (Daubechies) utilisées, Nous notons que la ('db44') est la meilleure parmi eux car la différence dans les résultats est grande et puisque notre objectif est de déterminer le nombre des barres cassées avec précision, nous avons besoin d'une différence claire entre l'état sain et l'état du défaut.

Ordre (db)	Db1	Db5	Db10	Db15	Db20	Db25	Db30	Db40	Db45
FSD	0.0266	3.8518	2.8531	2.6109	3.3253	3.2777	3.7619	3.3071	3.0454

(a)

Ordre (db)	Db1	Db5	Db10	Db15	Db20	Db25	Db30	Db40	Db45
FSD	0.0062	0.0157	0.0124	0.0117	0.0129	0.0117	0.0122	0.0114	0.0106

(b)

Tab. III. 4 : FSD-T de l'enveloppe du courant statorique (Env ia), en fonction de l'ordre de l'ondelette De Daubechies (db), (a) 1BC, (db) 4BC.

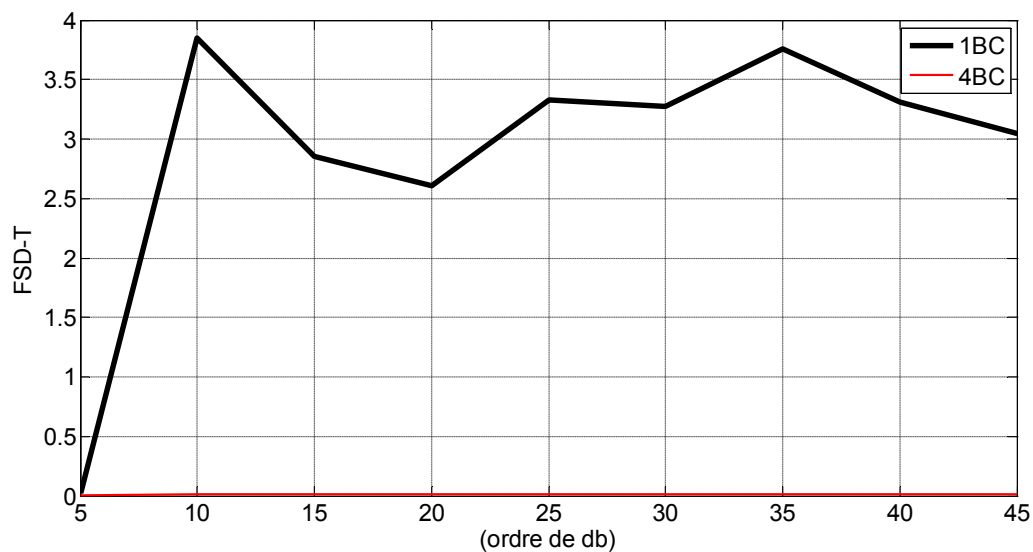


Fig. III.8 : FSD-T de l'enveloppe du courant statorique (Env ia), en fonction de l'ordre de l'ondelette De Daubechies (db), avec (a) 1BC, (db) 4BC.

Et pour justifier l'ordre de l'ondelette mère de Daubechies (db44), ont calculé FSD-T pour différent ordre de l'ondelette utilisée, le (Tab. III. 4) qui illustre, respectivement, les valeurs expérimentaux du FSD-T de l'enveloppe de courant statorique $Env(i_a)$, pour le cas d'un moteur avec une barre et quatre barres cassée, Comme on peut le constater, la valeur du FSD-T diminue avec l'augmentation de nombre des barres cassées pour toutes les daubechies utilisées avec une différence entre les daubechies. Ce qui en fait un bon indicateur de l'état de santé des barres rotorique. La daubechies ('db44') est la plus sensible au défaut suivie par, respectivement, la ('db24'). et Puisque notre objectif est de déterminer le nombre de barres cassée avec précision, nous avons besoin d'une différence claire entre l'état sain et l'état du défaut.

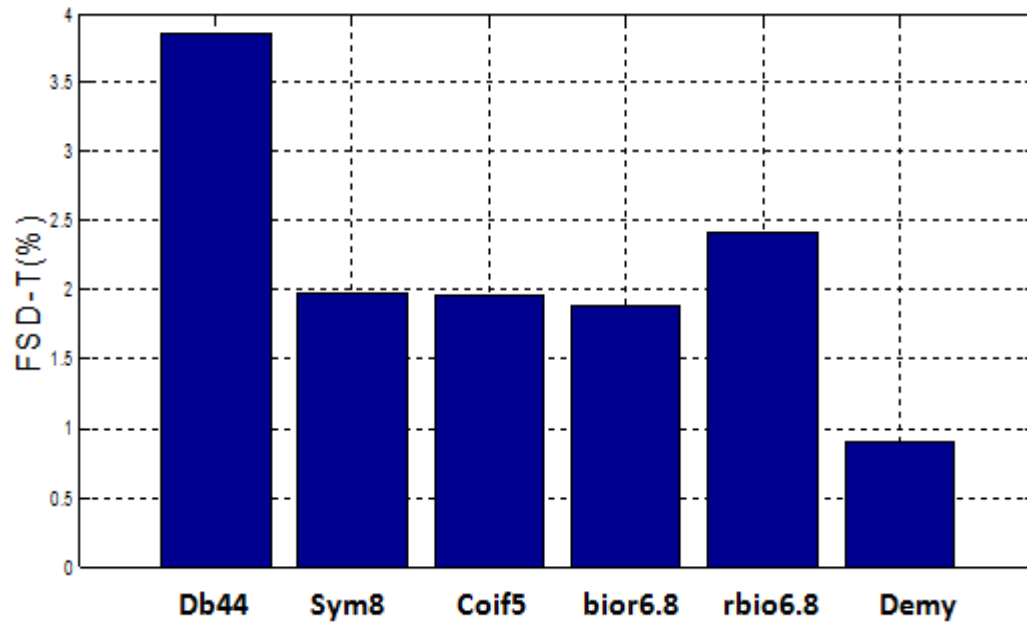
Ondelette mère utilisée	FSD-T
Db44	3.8518
Sym8	1.9819
Coif5	1.9625
bior 6.8	1.8877
rbio 6.8	2.4136
Demy	0.8998

(a)

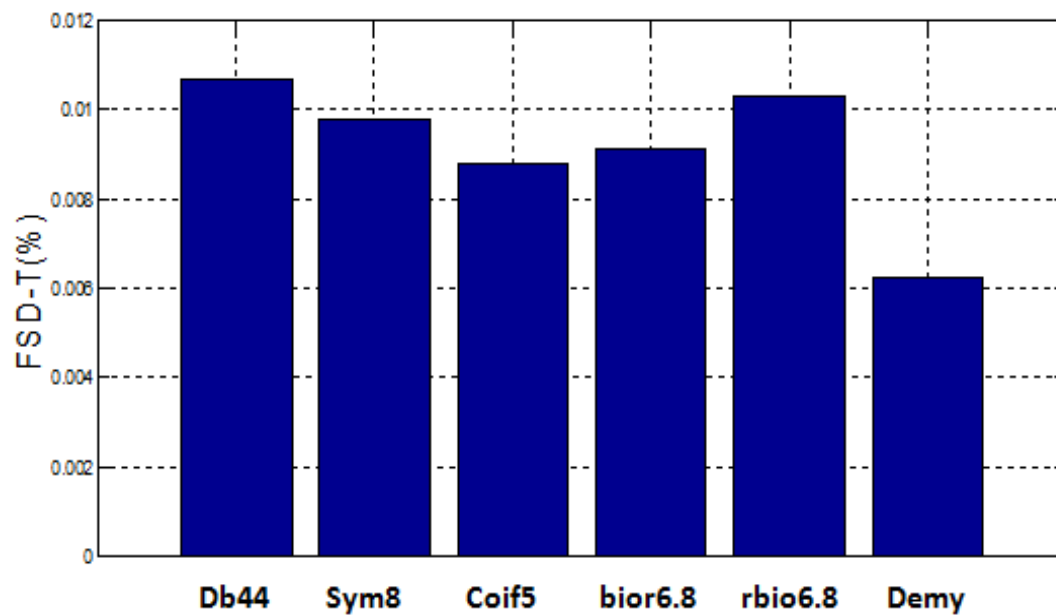
Ondelette mère utilisée	FSD-T
Db44	0.0107
Sym8	0.0098
Coif5	0.0088
bior 6.8	0.0091
rbio 6.8	0.0103
Demy	0.0062

(b)

Tab. III. 4 : FSD T de l'enveloppe du courant statorique ($Env i_a$), en fonction du type de l'ondelette mère avec (a) 1BC, (b) 4BC .



Ondelette mère utilisée (a)



Ondelette mère utilisée (b)

Fig. III.9 : FSD T de l'enveloppe du courant statorique (Env_{ia}), en fonction du type de l'ondelette mère avec, (a) 1BC, (b) 4 BC .

Pour justifier le choix d'utiliser la famille d'ondelette de Daubechies comme ondelette mère dans ce travail, (Tab. III. 4) illustre, respectivement, les valeurs expérimentaux du FSD-T de la méthode utilisée analysée par les ondelettes de *db44*, *sym8*, *coif5*, *bior 6.8* et *rbio 6.8* pour le cas d'un moteur avec une barre et quatre barres cassée. Parmi ces résultats illustrés à la figure (Fig.III. 9), la (*db44*) donne des valeurs de FSD-T plus élevées que d'autres types d'ondelettes et comme nous voulons mieux identifier le défaut, nous avons opté le choix de la famille Daubechies.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude détaillée sur l'application de la transformée en ondelettes (TOD) pour le diagnostic de défaut de cassure de barres rotorique dans les moteurs asynchrones à cage en utilisant les signaux de l'enveloppe du courant statorique $Env (ia)$. La détection du défaut de cassures de barres par la technique d'ondelette discrète nous a donné des bons résultats et peut accomplir la tâche du diagnostic de défaut.

CONCLUSION générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts de cassure de barres rotorique dans la machine asynchrone triphasée avec couple de charge constant en utilisant la transformée en ondelettes discrète (TOD).

Au début de ce travail, nous avons étudié la machine asynchrone et ses défauts. Ou nous rappelons brièvement les principaux éléments constituant cette machine, les différents défauts de cette machine avec leurs causes et conséquences.

Le second chapitre a été consacré au développement de méthodes utilisée pour le diagnostic des défauts de cassure de barres rotorique dans la machine asynchrone. Il s'agit de l'enveloppe du courant statorique (Envia). Les signatures des défauts de cassure de barres rotorique sont aussi bien illustrées.

Nous avons présenté dans le troisième chapitre une étude détaillée de l'application de la transformée en ondelettes discrète (TOD) pour le diagnostic de défauts de cassure de barres rotorique dans un moteur asynchrone en utilisant l'enveloppe du courant statorique. Le diagnostic de défaut de cassure de barres utilisant l'analyse par la transformée en ondelettes discrète par l'ondelette mère (db44) qui nous a donné des bons résultats et peut accomplir la tâche du diagnostic de défaut. Il peut être réalisé en utilisant une analyse qualitative en suivant l'évolution particulière de la composante caractéristique de défaut $2gf$ en fonction de la variation du couple de charge. En outre, un facteur de sévérité de défaut (FSD) a été défini et il s'est avéré être un bon indicateur de l'état du rotor du moteur asynchrone.

Bibliographie

Bibliographie

[1] : **M. SAHRAOUI**, « Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2010.

[2] : **A. ZERROUK**, « Diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone triphasée », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra, 03 juin 2013.

[3] : **K. YAHIA**, « Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone triphasée par une approche modèle », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.

[4] : **B. KERROUM**, « Etude et Diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction » Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2017.

[5] : **A. MAGHRAOUI, A. DEBOUCHA**, « Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage », Mémoire d'Ingénieur, Université Mohamed Boudiaf de M'silla, 2006.

[6] : **B. CHERMAT**, « Diagnostic des défauts de MAS par les méthodes paramétriques de traitement du signal », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.

[7] : **S. BLHAMIDI**, « Diagnostic des défauts de la Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De commande », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

[8] : **S. BOURDIM**, « Méthodes ondelettes et Bayésiennes pour le diagnostic: Application aux machines asynchrones », Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS-SETIF, 04 / 07 / 2011.

[9] : **A. MEDOUED**, « Surveillance et Diagnostic des défauts des Machines électriques : Applications aux Moteur Asynchrone », Thèse de Doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda 2012.

Bibliographie

[10] : **H. NOURA**, « Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 07/04/2015.

[11] : **O. Ondel**, « Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur - machine asynchrone » Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2006. Français. 17 Octobre 2006.

[12] : **H. CHERIF**, « Détection des défauts Statorique et Rotorique dans la Machine Asynchrone en Utilisant L'analyse par FFT et ondelettes », Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

[13] : **R. MERAD**, « Outils de Diagnostic Appliqués à la Machine Asynchrone Triphasée a Cage D'écureuils », Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2006.

[14] : **S. SAKHARA**, « Diagnostic des défauts d'un Entraînement électriques par La Technique Ondelette », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.

[15] : **A. BOUZIDA**, «Diagnostic des défauts de la Machine Asynchrone A cage Par la technique des ondelettes », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ,2008.