



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel
Spécialité : Génie Industriel

Thème

**Contribution à l'amélioration de la séparation entre
L'écho de la variation de charge et les défauts de
barres**

Présenté et soutenu publiquement par :

LAMRI Hayet

BOURAS Fatima Zohra

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
ADJELOUA Abd El Aziz	MAA	Université Oran 2	Président
NEKROUF Djilali	MAA	Université Oran 2	Encadreur
BELKACEM Belkacem	MAA	Université Oran 2	Examineur

Juin 2017

Remerciement

Louange à notre seigneur ' ALLAH ' qui nous a dotées de la merveilleuse faculté de raisonnement. Louange à notre créateur qui nous a incitées à acquérir le savoir. C'est à lui que nous adressons toutes nos gratitudes en premier lieu.

Nous voudrions remercier les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Tout d'abord, ce PFE ne serait pas aussi riche et n'aurait pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de notre encadreur M. NEKROUF Djilali, nous le remercions pour la qualité de son encadrement, sa rigueur et sa disponibilité, ses remarques fructueuses et ses directives précieuses, qui ont contribué efficacement à l'avancement de ce travail.

Nous remercions également tous les membres de jury qui ont fait l'honneur d'accepter de participer à cette soutenance.

Nous n'oublions pas d'adresser notre gratitude à tous nos amis et collègues pour leurs soutiens et encouragements.

Finalement, nous pensons que nous ne sommes arrivées à ce stade que grâce aux encouragements et aides apportés par nos parents et nos frères et sœurs à qui nous devons beaucoup de respect et d'admiration, et nous leur disons mille mercis.



DEDICACE

Je dédie ce modeste travail : à l'esprit de mes chers parents que Dieu lui accorde sa grâce et sa miséricorde et les accueille dans son vaste paradis.

A mes deux chères sœurs Hadjira et Souhila leurs maris.

A tous mes neveux Ishak, Adam, Samad et Sadik.

A mes deux nièces Amani et Manel.

A tous mes amis et mes collègues.

A mon meilleur encadreur Mr Nekrouf Djilali.

A tous les enseignants de l'IMSJ.

Hayet

DEDICACE

Je dédie ce travail :

- *A mes chers parents*

Je vous remercie pour tout le soutien, leur patience, et leur sacrifice, et l'amour que vous me portez depuis mon enfance, et leurs prières tout au long de mes études.

- *A mes chers frères Mohamed, Abdelhak, et Yasser, et ma belle sœur Fouta qui ont été toujours présents pour moi.*
- *A mes amis avec qui j'ai partagé des moments des plus agréables.*
- *A mes cousins et cousines et tous les membres de la famille.*
- *Un grand remerciement à mon encadreur Mr Nekkrouf Djilali.*

J'exprime également ma gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à mon formation depuis mon premier cycle d'étude à la fin de mon cycle universitaire.



Fatima

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicace

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des notations

Introduction générale

Chapitre I : Présentation des différents défauts de la machine asynchrone

I.1 Introduction.....	3
I.2 La machine asynchrone	4
I.2.1. Principe de fonctionnement.....	4
I.2.2. Eléments de constitution de la machine asynchrone	5
I.2.2.1 Stator.....	6
I.2.2.2 Rotor à cage :	7
I.2.2.3 Organes mécaniques	8
I.3. Définition des différents défauts de la machine asynchrone	9
I.3.1. Les cause des défauts	9
I.3.2. Les différents défauts	10
I.3.2.1. Les défauts du stator :	10
A. Défauts d'isolant dans un enroulement	10
B. Court-circuit entre spires	11
C. Court-circuit entre phases	11
D. Défaut phase- terre	11
E. Défauts de circuit magnétique	12
I.3.2.2. Les défauts rotoriques :	12

A. Défaut d'excentricité.....	12
B. Défaut de rupture des anneaux	13
C. Défaut de cassure de barre	14
I.3.2.3. Défauts aux paliers	14
A. Défauts des roulements	14
B. Défaut du flasque	15
C. Défaut de l'arbre.....	16
I.4 Conclusion :	16

Chapitre II : Transformée en ondelettes

II.1 Introduction	17
II.2 Transformée en ondelettes.....	17
II.2.1 Historique des ondelettes	17
II.2.2 Définition d'une ondelette	18
II.2.3 La famille d'ondelettes	19
II.2.3.1 Ondelette de Haar.....	20
II.2.3.2 Ondelettes de Daubechies.....	20
II.2.3.3 Les symlets de Daubechies	21
II.2.3.4 Ondelette de Morlet.....	22
II.2.3.5 Ondelette chapeau mexicain	22
II.2.3.6 Ondelettes de Meyer.....	23
II.2.4 Ondelettes et résolution temps-échelle	23
II.2.5 La transformée en ondelette :	25
II.2.5.1 La transformée en ondelette continue (TOC) ou (CWT)	26
II.2.5.2 La transformée en ondelette discrète (TOD):	27
II.3 Conclusion :	28

Chapitre III : Etude de la méthode d'extraction des signatures ROOT- MUSIC

III.1 Introduction :	29
III.2 Méthodes d'analyse spectrale à haute résolution (HR) :	29
III.2.1 Algorithme « MUSIC » :	30
III.2.2 Méthode ROOT–MUSIC :	30
III.2.3 Estimation de puissances d'harmoniques:	32
III.4 Méthode d'extraction des paramètres Root-MUSIC :	33
III.4.1 Analyse du courant statorique :	33
III.5 Conclusion :	34

Chapitre IV : simulation

IV.1 Introduction :	35
IV.2. Résultat expérimentaux du diagnostic des défauts de barres.....	36
IV.2.1.Caractéristiques du moteur asynchrone utilisé.....	37
IV.3. Simulation.....	38
IV.3.1. Application pratique de l'ondelette stationnaire (swt) pour calculer les Coefficients d'approximation et de détails.....	38
IV.3.2. Analyse des coefficients d'ondelette par l'algorithme ROOT-MUSIC.....	38
A. Moteur sain.....	39
B. Défaut de barre	40
C. Variation de charge	43
IV.3.3.Comparaison entre le spectre de défaut et le spectre en cas de variation de Charge....	45
IV.4 Interprétation des résultats	45
IV.5 Conclusion.....	45

Conclusion générale

Annexes

Bibliographie

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II.1. Famille d'ondelettes.	19
Tableau II. 2. la précision en fonction du facteur d'échelle.	24
Tableau IV.1. Caractéristiques du moteur asynchrone.	37
Tableau IV.2. Fréquences et Puissances cas de moteur sain.	39
Tableau IV.3. Fréquences et Puissances en cas des défauts de barre.	42
Tableau IV.4. Fréquences et Puissances en cas des variations de charge.	44

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 : Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil	5
Figure I.2 : Vue schématique en perspective du stator.	6
Figure I.3 : Vue schématique en perspective du rotor.	8
Figure I.4 : Différents courts-circuits.	12
Figure I.5 : Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.	13
Figure I.6 : Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.	14
Figure I.7 : Photo d'une barre cassée [9].	15
Figure II.1 : Projection de l'ondelette sur le signal	19
Figure II.2 : Forme de l'ondelette de Haar	20
Figure II.3 : Forme des ondelettes daubechies	21
Figure II.4 : Forme de l'ondelette Symlet	21
Figure II.5 : Ondelette de Morlet	22
Figure II.6 : Ondelette chapeau mexicain	22
Figure II.7 : Ondelette de Meyer	23
Figure II.8 : Résolution temps-fréquence de la TFCT	24
Figure II.9 : Résolution temps-fréquence de TO	25
Figure II.10 : Balayage de l'ondelette sur signal pour calculer 'TOC'	26
Figure III.1 : les fréquences de bande latérale autour de la fréquence fondamentale.	34
Figure IV.1 : Banc d'essai destiné au diagnostic des défauts.	36
Figure IV.2 . Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas de moteur sain.	39
Figure IV.3 . Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d'un défaut de barre (1).	40
Figure IV.4 . Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d'un défaut de barre (2).	40
Figure IV.5 . Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d'un défaut de barre (3).	41

Liste des figures

Figure IV.6. Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d'un défaut de barre (4).	41
Figure IV.7. Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d'une variation de charge (1).	43
Figure IV.8. Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d'une variation de charge (2).	43
Figure IV.9. Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d'une variation de charge (3).	44

Liste des notations

A	La matrice de puissance des harmoniques
A_f	Paramètre de localisation fréquentielle.
a₀	Paramètre de dilatation
B	Paramètre de localisation temporelle.
B₀	Paramètre de translation.
C	Constante de normalisation de reconstruction
E	L'espérance mathématique.
f_e	Fréquence d'échantillonnage
f_b	Fréquence de bande latérale
f_i	La fréquence de la sinusoïde complexe i
f_r	La fréquence de rotation rotorique
f_s	La fréquence d'alimentation
F_{hpr}	La fréquence d'encoche
G	Le glissement
H	L'opérateur de transposition –conjugaison
I_i	La matrice d'identité.
I_j	amplitude de la sinusoïde complexe

Notation

K	entier positif
L	Nombre de sinusoïdes ou des sources
n_e	nombre d'échantillons
n_r	La vitesse mécanique relative du moteur
n_s	Vitesse du moteur
P	nombre de pôles
W(n)	Le bruit
ψ(t)	Fonction d'ondelette
FFT	Fast fourrier transforme
DFT	Discrète fourrier transforme

Introduction générale :

La machine asynchrone occupe un domaine très important dans l'industrie et les transports. Elle est appréciée pour sa robustesse, son faible coût d'achat et d'entretien et ne nécessite qu'une seule source d'alimentation.

Malgré ces qualités évoquées, il n'est pas rare que ces moteurs présentent quelque défaillance émanant d'un vieillissement prématuré. Comme ces machines sont soumises pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes électrique, magnétique, mécanique et thermique. Ces dernières provoquent des défauts dans les différentes parties du moteur, ce qui engendre certains nombres de contraintes de différentes natures (électriques, mécaniques et environnement). Ces derniers induisent des défaillances qui peuvent conduire à des arrêts non programmés, à des pertes de production, à des réparations coûteuses et peuvent entraîner de graves conséquences sur la sécurité des personnes, des matériels et d'environnement.

Il est donc impératif de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats ayant pour but de détecter de façon précoce les défauts.

Les défauts avec leurs effets; se reflètent dans les grandeurs du moteur, principalement dans le flux, le courant, la vitesse et le couple. Dans le passé la plupart des techniques de diagnostique utilisaient les grandeurs mécaniques qui nécessitent l'introduction des capteurs au niveau de la machine ce qui rend l'équipement coûteux et encombrant. Ces inconvénients ont poussé les recherches vers une maintenance prédictive utilisant des grandeurs électromagnétiques tel que (flux, courant, tension, etc) et particulièrement le courant statorique qui exige ni l'introduction d'un capteur au niveau de la machine, ni l'utilisation des équipements onéreux mais seulement un capteur de courant (transformateur de courant ou sonde à l'effet hall) qui donne une image sur le courant de la phase statorique, de plus cette technique est utilisée lors du fonctionnement du moteur ce qui permet de l'utiliser dans la surveillance des machines électriques.

La technique de détection et localisation de défauts préconise un bon traitement des signaux (flux, courant statorique,...etc.); c'est pourquoi beaucoup de méthodes de

traitement de signaux ont été appliqués mais elles manquent de précision et caractérisées par pertes d'information telles que FFT, DFT,...etc.

Par contre la méthode d'analyse par les ondelettes présentent des performances meilleures que les autres d'autant elle est valable pour les signaux stationnaires et non stationnaires surtout si on l'a combine avec la méthode ROOT-MUSIC.

D'autre part, la variation de charge pendant le fonctionnement du moteur engendre des harmoniques que l'on confond avec celles de défauts de barres. Notre but de ce travail est d'annuler ou au moins d'enlever cette ambiguïté en appliquant le mariage entre analyse par ondelettes et Root-MUSIC.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre du diagnostic et détection des défauts de barres dans le rotor d'un moteur asynchrone triphasé à cage.

Le mémoire comporte quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous rappelons la constitution et les principaux défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone à cage

En deuxième chapitre, on présente la méthode des ondelettes

Le troisième chapitre s'étale sur la méthode d'extraction des fréquences ; "algorithme de ROOT-MUSIC".

Le quatrième chapitre est sur la simulation et ses résultats. Le mémoire s'achève par une conclusion générale.

I.1 Introduction

Le diagnostic est une composante principale d'un module de supervision. Il consiste à déterminer à chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve. Il s'appuie sur une connaissance a priori des modes de fonctionnement et sur une connaissance instantanée matérialisée par une nouvelle observation de l'état du système. Il existe plusieurs approches pour réaliser le diagnostic, le choix d'une approche est lié au mode de représentation de la connaissance.

Ce chapitre Débuté par un rappel sur la constitution des machines électriques, et plus particulièrement sur celle de la machine asynchrone à cage d'écureuil, puis on parle sur les différentes origines (électriques, mécaniques...) des défaillances qui peuvent se produire sur la machine asynchrone. Nous évoquerons essentiellement des défauts qui peuvent survenir tant au stator qu'au rotor et d'enroulements de la machine.

I.2 La machine asynchrone

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilo watts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc....

L'apparition dans les années 80 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc....).

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies.

I.2.1. Principe de fonctionnement

Le moteur d'induction se comporte comme un transformateur à couplage par champ tournant et à secondaire en court-circuit.

Le primaire (stator) recevant des courants de pulsation (W_s) crée un flux tournant à la vitesse angulaire synchrone ($\Omega_s = \frac{W_s}{p}$), ce flux balayant les enroulements secondaires y induit.

Des forces électromotrices et donc des courants puisque ce bobinage est en court-circuit. Le couple est dû à l'action du flux primaire sur les courants secondaires induits.

Le moteur tourne à une vitesse Ω_m d'autant plus inférieure à Ω_s , que le couple résistant sur son arbre est plus grand.

On appelle glissement l'écart des vitesses angulaires synchrones Ω_s et réels Ω_m

Rapporté à la vitesse angulaire synchrone comme dans la relation : $g = \frac{\Omega_s - \Omega_m}{\Omega_s}$ (1).

I.2.2. Eléments de constitution de la machine asynchrone :

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

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

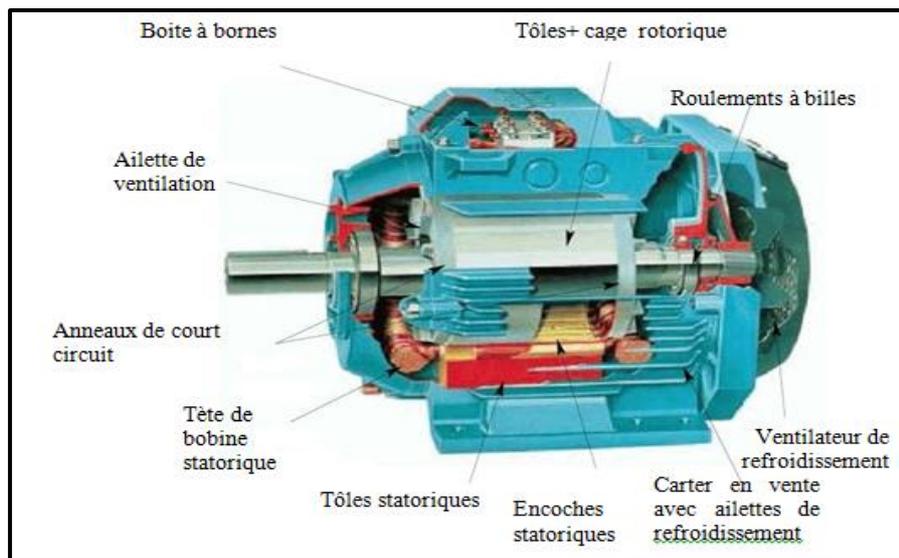


Figure I.1. Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

I.2.2.1 Stator

Il est à l'axe de la machine (figure 1.2). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties: les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines.

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ 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.

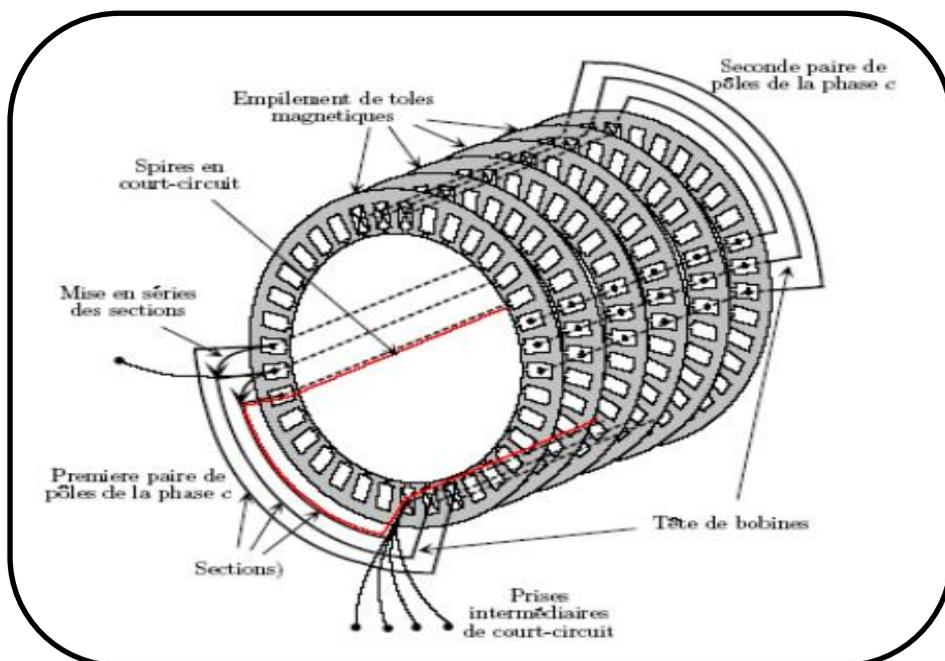
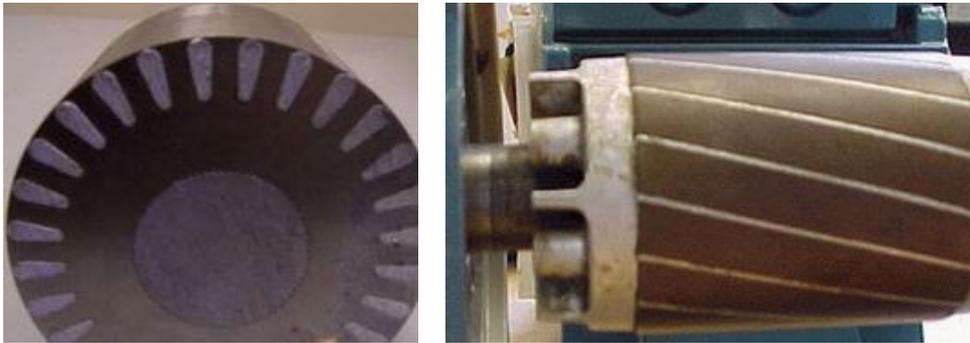


Figure. I.2. Vue schématique en perspective du stator.

I.2.2.2 Rotor à cage :

Le rotor est la partie mobile du moteur asynchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur. Il se compose essentiellement :

- D'un empilage de disques minces isolés entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor afin de canaliser et de faciliter le passage du flux magnétique.
- D'une cage d'écureuil en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoïdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices.



Dans le cas de rotor 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).

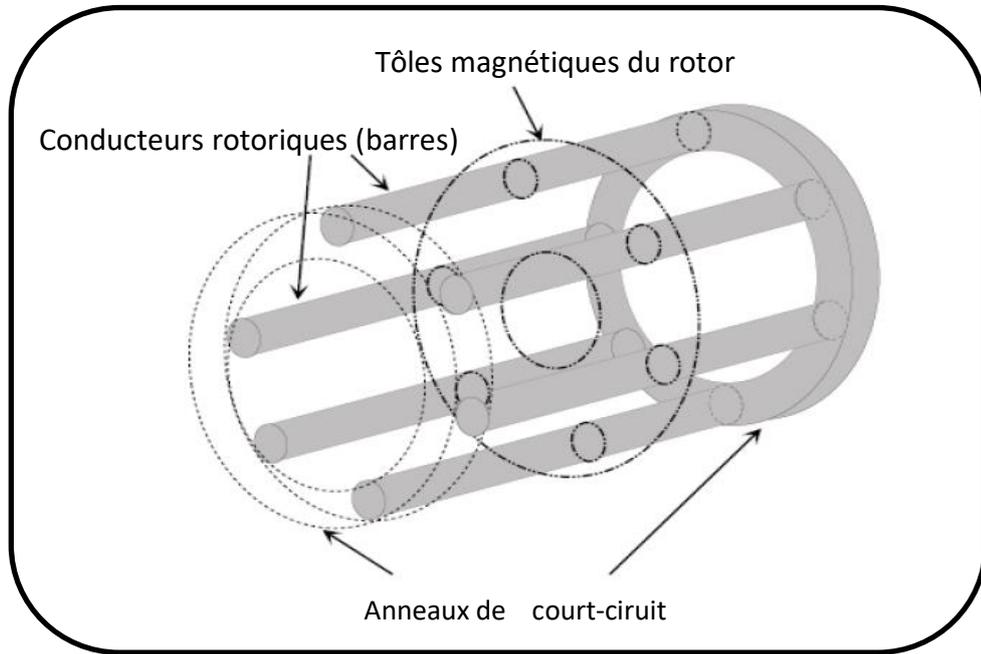


Figure I.3 Vue schématique en perspective du rotor.

I.2.2.3 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.

I.3. Définition des différents défauts de la machine asynchrone

I.3.1. Les cause des défauts

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes [1] :

- Les générateurs de pannes: surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), 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, etc.
- Les vices de fabrication: défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème:

- Thermique (surcharge)
- électrique (diélectrique)
- mécanique (bobinage)
- environnemental (agression)

Et aussi pour le rotor les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- Thermique (surcharge)
- Electromagnétique
- résiduel (déformation)
- dynamique (arbre de transmission)
- mécanique (roulement)
- environnemental (agression).

I.3.2. Les différents défauts

I.3.2.1. Les défauts du stator :

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

- Défaut d'isolant.
- Un court-circuit entre spires.
- Un court-circuit entre phases.
- Défaut phase- terre.
- Défauts de circuit magnétique.

A. Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or, les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction.

Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes pour ce type de défaut sont [2] :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication ;
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation ;
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut d'un convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant ;
- vibrations mécaniques.
- vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation « normale », l'isolant finit naturellement par se dégrader ;
- fonctionnement dans un environnement sévère.

B. Court-circuit entre spires :

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statorique 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 rotoriques. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne. Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [3].

C. Court-circuit entre phases :

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 [1].

D. Défaut phase- terre :

Le défaut d'une phase à la terre a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, Il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels).

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans

l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut.

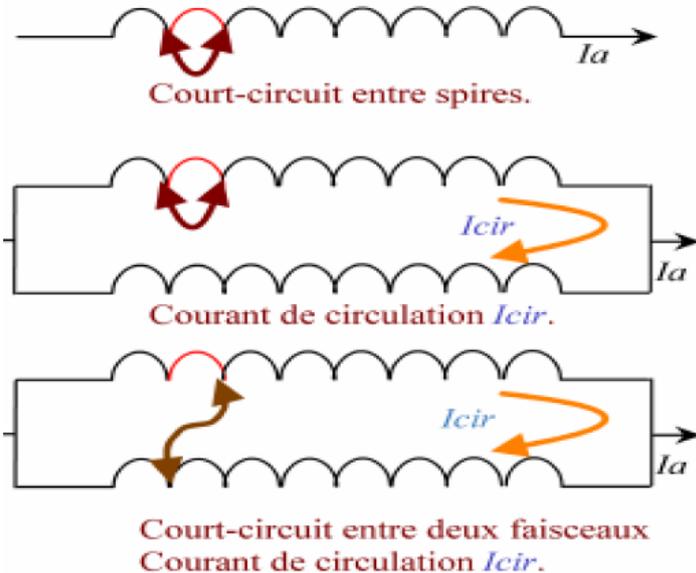


Figure I.4 : Différents courts-circuits.

E. Défauts de 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.

I.3.2.2. Les défauts rotoriques :

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

- Défaut d'excentricité.
- Défaut de rupture des anneaux.
- Défaut de cassure de barres.

A. Défaut 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, (figure I.5). 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 [4]:

- L'excentricité statique: le rotor est déplacé du centre de l'alésage mais tourne toujours autour de son axe.
- L'excentricité dynamique: le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- L'excentricité mixte: associant les deux cas, statique et dynamique.

On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante :



Figure I.5 : Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.

B. Défaut de rupture des 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.

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 [13].

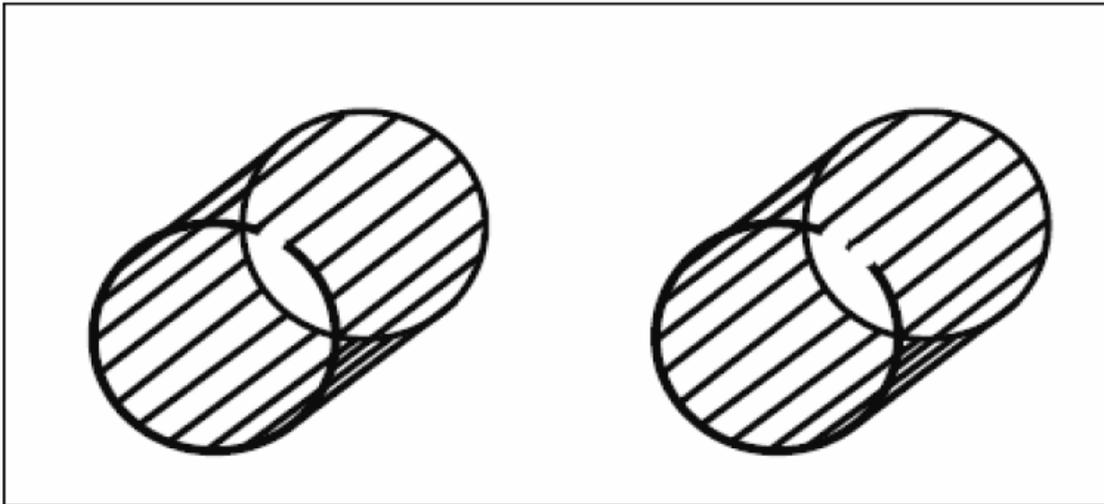


Figure I.6 : Rupture d'une et deux portions adjacentes d'un anneau de court-circuit.

C. Défaut de cassure de barre :

La rupture de barres d'une machine asynchrone est le défaut le plus couramment étudié aux laboratoires. Ce défaut induit des modifications dans les courants du stator et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal. En effet, lors de l'apparition d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produits et induisent des harmoniques dans les courants des enroulements statoriques aux fréquences:

$$F_{cb} = f_s \cdot (1 \pm 2kg)$$

Où F_{cb} : La fréquence supplémentaire dans le courant d'une phase statorique à cause de cassure de barre, f_s : Fréquence fondamentale, g : le glissement et $k = 1, 2, \dots$

De plus les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamentale augmentent avec le nombre de barres défectueuses.

I.3.2.3. Défauts aux paliers :

A. Défauts des roulements :

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. Ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de grande puissance. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles sont :

- l'usure due au vieillissement,
- la température de fonctionnement élevée,
- la perte de lubrification,
- l'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement),



Figure I.7 : Photo d'une barre cassée [9].

- le défaut de montage,
- les courants d'arbres (Shaft Current),
- décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge,

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener le blocage du moteur [9].

B. Défaut du flasque :

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [14].

C. Défaut de l'arbre :

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine.

Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [14].

I.4 Conclusion :

Après avoir étudié, représenté les différentes parties constituant la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil à savoir (stator, rotor, paliers) et synthétisé les défauts de la machine asynchrone, nous allons donner dans la suite un aperçu sur les méthodes d'analyse par ondelettes et Root-MUSIC.

II.1 Introduction :

La transformée de Fourier donne une idée globale du signal :

$$\text{TF}[f(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

L'information temporelle ou spatiale disparaît dans l'espace des fréquences. Cette transformée est donc bien adaptée à l'analyse des signaux stationnaires. Pour analyser un signal, dont on ne connaît pas « à l'avance » les propriétés, il faut donc trouver une transformée qui renseigne sur le contenu fréquentiel tout en préservant la localisation temporelle afin d'obtenir une « bonne » représentation temps/fréquence du signal.

Une première idée peut être de limiter le domaine d'intégration par la multiplication du signal avec une fonction fenêtre g , fenêtre de Hanning, de Hamming, de Gauss... On obtient ainsi la transformée de Fourier à fenêtre glissante :

$$F^{glis}[f(t)] = \int_{-\infty}^{-\infty} f(t)g(s-t)e^{-j\omega t} dt$$

Avec, par exemple, $g(x) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{-\frac{x^2}{2}}$ (Gabor).

On pourra ensuite faire glisser la fenêtre, c'est-à-dire faire varier s .

II.2 Transformée en ondelettes :

II.2.1 Historique des ondelettes :

Les ondelettes sont nées lorsque les scientifiques ont eu besoin d'une analyse en fréquence et en temps. Au XIX^{ème} siècle, l'analyse de Fourier était la seule technique permettant la décomposition d'un signal et sa reconstruction sans perte d'information. Malheureusement, elle fournit une analyse en fréquence mais ne permet pas la localisation temporelle de changements abruptes, comme par exemple l'apparition d'un deuxième choc après qu'un premier choc ait été apparu.

En 1909 Alfred Haar a défini une fonction composée d'une courte impulsion négative suivie d'une courte impulsion positive, connue pour être la première ondelette (Ondelette de Haar). En 1946, Dennis Gabor, mathématicien hongrois, inventa une transformation de fonction analogue à celle de Joseph Fourier, appliquée sur une fenêtre temporelle exprimée par une fonction gaussienne.

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

En 1986, Yves Meyer, reconnu comme un des fondateurs de la théorie des ondelettes, rassembla toutes les découvertes précédentes, il en a dénombré 16, puis définit les ondelettes orthogonales. En 1986 Stéphane Mallat fit le lien entre les ondelettes et l'analyse multi résolution.

Enfin, en 1987, Ingrid Daubechies mit au point des ondelettes orthogonales appelées ondelettes de Daubechies, facilement implémentables, et utilisées dans le standard JPEG 2000.

II.2.2 Définition d'une ondelette :

Une ondelette (une petite onde) est une fonction élémentaire, à valeurs réelles ou complexes, très concentrée à la fois en temps et en fréquence [11].

Elle doit répondre à deux critères : [12]

- 1- Elle doit avoir un support compact, c'est-à-dire qu'elle se localise sur un petit intervalle de temps.
- 2- Elle doit être de moyenne nulle.

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

C'est la condition d'admissibilité car c'est cette condition qui a donné le nom d'ondelette.

La transformée en ondelettes d'un signal $s(t)$ est définie par la formule :

$$C_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \cdot \psi(t) dt \quad (\text{II.2})$$

La transformée en ondelettes d'un signal $s(t)$ est la famille $C_{a,b}$ des coefficients d'ondelettes qui dépend des deux paramètres a et b . Suivant les besoins de l'analyse du signal $s(t)$, les paramètres (a,b) peuvent être utilisés de façon continue (TOC) ou discrète (TOD).

Le coefficient d'ondelette $C_{a,b}$ d'un signal $s(t)$ dépend de la forme de celui-ci au voisinage du temps b . Quand $s(t)$ est à peu près constant (1) figure (II.1) autour d'un temps b , le produit de $s(t)$ par l'ondelette ψ (d'aire nulle) a une aire très petite, autrement dit $C_{a,b}$ est très petit. Quand au contraire, le fragment du signal autour d'un temps ' b ' est irrégulier (2) et que ses variations sont de « fréquence » comparable à celle de l'ondelette, l'aire du produit signal- ondelette (donc $C_{a,b}$) est généralement beaucoup plus grand [13].

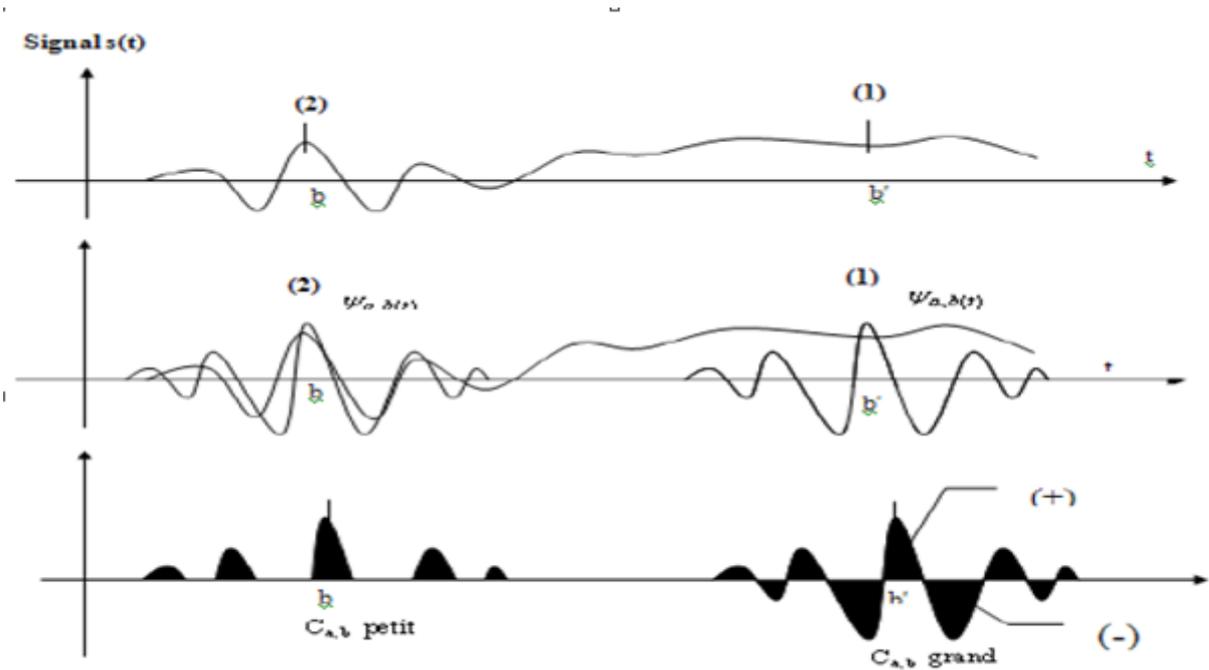


Figure II.1. Projection de l'ondelette sur le signal.

II.2.3 La famille d'ondelettes :

Il ya plusieurs ondelettes mères utilisées pour le calcul de la transformée en ondelette des signaux analysés. Chacune d'entre elles a un domaine d'application défini de la forme du signal étudié. Le tableau (II.1) contient les familles les plus usuelles [14]:

Nom des familles d'ondelettes	Nom court en Matlab
Ondelette de Haar	Haar
Ondelette de Daubechies	Db
Symlets	Sym
Coiflets	Coif
Ondelette biorthogonales	Bior
Ondelette de Meyer	Meyr
Ondelette de Battle et le Marié	Btln
Ondelette gaussienne	Gaus
Chapeau mexicain	Mexh
Ondelette de Morlet	Morl
Ondelette gaussienne complexe	Cgau

Ondelette de shannon complexe	Shan
Ondelette B-spline fréquentielle complexe	Fbsp
Approximation discrète de l'ondelette de Meyer	Dmey
Ondelette de Morlet complexe	cmor

Tableau II.1. Famille d'ondelettes.

II.2.3.1 Ondelette de Haar :

C'est Alfred Haar qui a construit en 1909 des bases considérées aujourd'hui comme le fondement de la théorie des ondelettes. Haar a défini une fonction $h(t)$ qui correspond à l'ondelette de Haar.

$$H(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ -1 & \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (II.3)$$

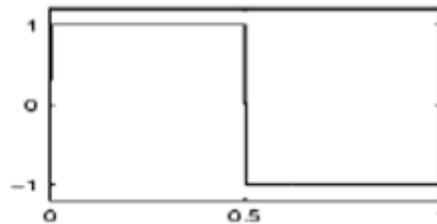


Figure II.2. Forme de l'ondelette de Haar.

II.2.3.2 Ondelettes de Daubechies :

Cette famille d'ondelettes à un paramètre permettant de manipuler des ondelettes orthogonales à support compact de régularité arbitraire. Pour N , c'est l'ordre de l'ondelette dbN .

Pour $N=1$, on a l'ondelette $db1$; c'est uniquement l'ondelette de Haar. La figure (II.3) montre les formes des ondelettes Daubechies pour différents ordres.

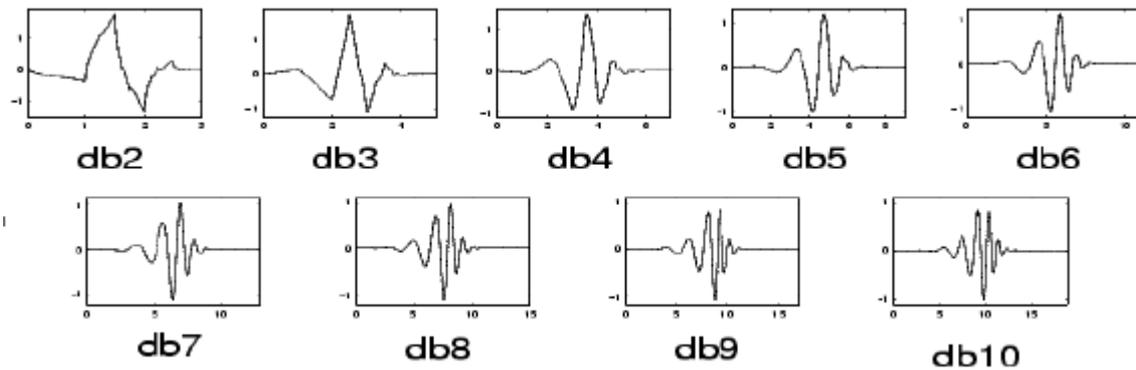


Figure II.3. Forme des ondelettes Daubechies.

Cette famille d'ondelettes possède les propriétés suivantes:

- Les ondelettes dbN sont asymétriques, en particulier pour les faibles valeurs de N , sauf l'ondelette de Haar.
- La régularité augmente avec l'ordre N .
- L'analyse est orthogonale.

II.2.3.3 Les symlets de Daubechies :

Daubechies a construit des ondelettes à support compact les plus symétriques possibles appelées Symlets; en effet, il n'existe pas d'ondelettes à support compact dans une analyse multi-résolution orthogonale qui soient symétriques, exceptées l'ondelette de Haar qui est antisymétrique.

Les symlets ont le même nombre m de moments nuls que les ondelettes de Daubechies pour un support donné: on a à nouveau $d = 2m$, et le nombre d'éléments non nuls du filtre est $2m$. Nous les nommerons $D6s$, $D8s$, etc... ; toujours en référence au support des fonctions de base.

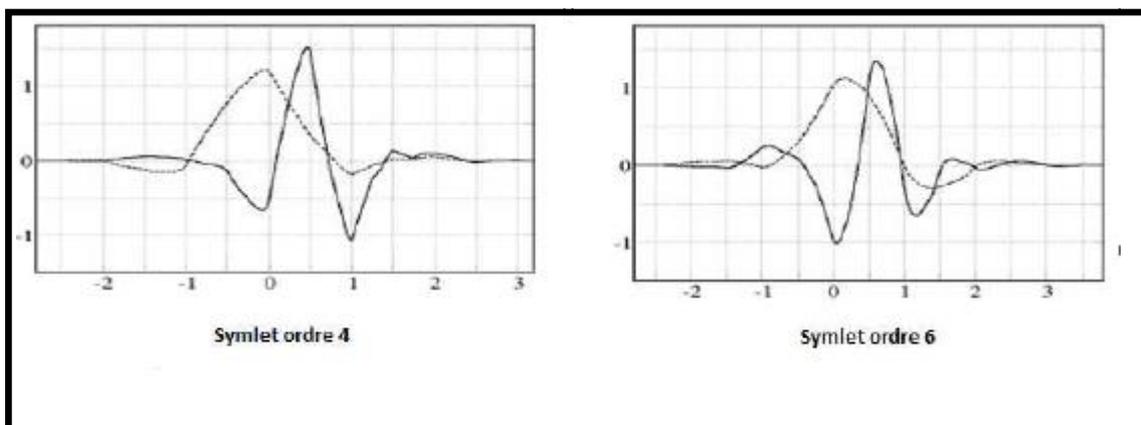


Figure II.4. Forme de l'ondelette Symlet.

II.2.3.4 Ondelette de Morlet :

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

$$\psi(x) = Ce^{\frac{x^2}{2}} \cos(5x) \quad (\text{II.4})$$

Où « C » est une constante de normalisation de reconstruction.

La figure (II.5) montre la forme de cette ondelette.

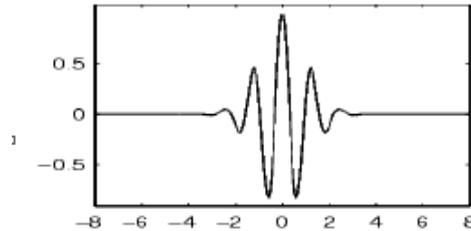


Figure.II.5. Ondelette de Morlet.

II.2.3.5 Ondelette chapeau mexicain :

C'est une fonction qui est proportionnelle à la dérivée seconde de la fonction de densité de probabilité gaussienne :

$$\psi(x) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\pi^{-\frac{1}{4}}\right) (1 - x^2)e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (\text{II.5})$$

Elle oscille très peu comme la figure (II.6) montre.

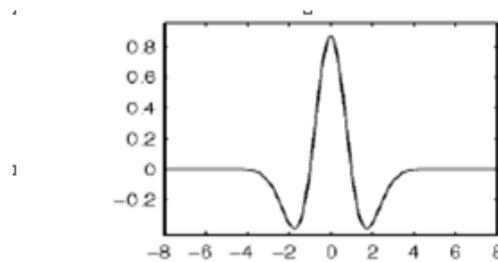


Figure II.6.Ondelette chapeau mexicain.

II.2.3.6 Ondelettes de Meyer :

L'ondelette de Meyer est l'une des premières ondelettes. Elle a été construite par Y.Meyer au milieu des années 1980. Il s'agit d'une ondelette orthogonale qui n'a pas un support compact [Michel 03]. La forme de cette ondelette est donnée par la figure(II.7) :

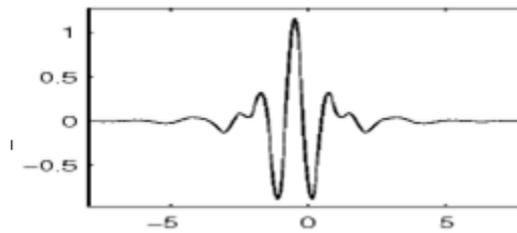


Figure II.7. Ondelette de Meyer.

La fonction est définie dans le domaine fréquentiel, sachant que :

$$\psi(x) = \begin{cases} 2\pi^{\frac{1}{2}} e^{\frac{jw}{2}} \sin\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \|\omega\| - 1\right) & \text{si : } \frac{2\pi}{3} \leq \|\omega\| \leq \frac{4\pi}{3} \\ 2\pi^{\frac{1}{2}} e^{\frac{jw}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \|\omega\| - 1\right) & \text{si : } \frac{4\pi}{3} \leq \|\omega\| \leq \frac{8\pi}{3} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Remarques

- Les ondelettes de Morlet ne permettent pas de construire une base orthogonale.
- Les ondelettes de Daubechies sont les plus couramment utilisées.
- Les ondelettes de Daubechies forment une famille infinie et sont notées db1, db2, db3,... dans la boîte à outils de Matlab. Une ondelette de Daubechies dbk utilise 2k coefficients et est donc calculée à partir de 2k points

II.2.4 Ondelettes et résolution temps-échelle :

Si l'on souhaite simplement analyser un signal non stationnaire, on peut produire sa représentation temps échelle en utilisant des vecteurs de facteurs d'échelle « a » et de décalage « b » très longs et variant selon un pas faible. La représentation obtenue contient alors beaucoup d'information redondante. Mis à part le problème du temps de calcul, cette redondance facilite souvent l'interprétation.

Plus le facteur de dilatation « a » est élevé, plus l'ondelette est étendue selon l'axe du temps, et plus elle est concentrée selon l'axe des fréquences. Par conséquent, la précision en temps et en fréquence est variable en fonction du facteur d'échelle.

Facteur d'échelle	Fréquence	Précision en temps	Précision en fréquence
Faible	Haute	Elevée	Faible
Elevé	Basse	Faible	Elevée

Tableau II. 2. la précision en fonction du facteur d'échelle.

Le pavage du plan temps échelle n'est donc pas régulier comme celui du plan temps fréquence.

En analyse avec transformée de Fourier à court terme « TFCT », la taille de la fenêtre est toujours la même figure (II.8), elle ne dépend pas de la fréquence. Autrement dit, la précision en temps et en fréquence est identique pour les hautes et les basses fréquences.

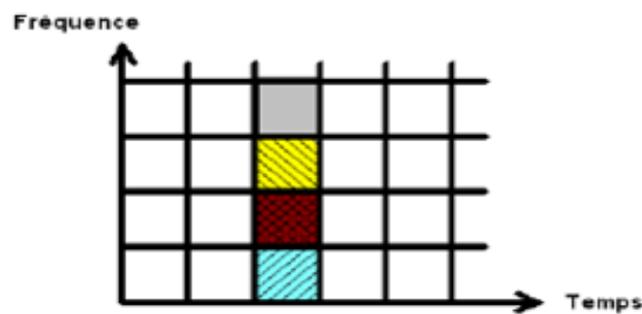


Figure II.8. Résolution temps-fréquence de la TFCT.

L'avantage de faire varier ces largeurs devient alors évident : on minimise le nombre de translations en temps et en fréquences de la fenêtre en optimisant la largeur de celle-ci. Ainsi, dans les basses fréquences, une grande largeur en fréquences n'est pas nécessaire ; on peut donc utiliser des rectangles plus larges en temps. Aux hautes fréquences, on va utiliser des rectangles plus larges en fréquences et plus localisés en temps.

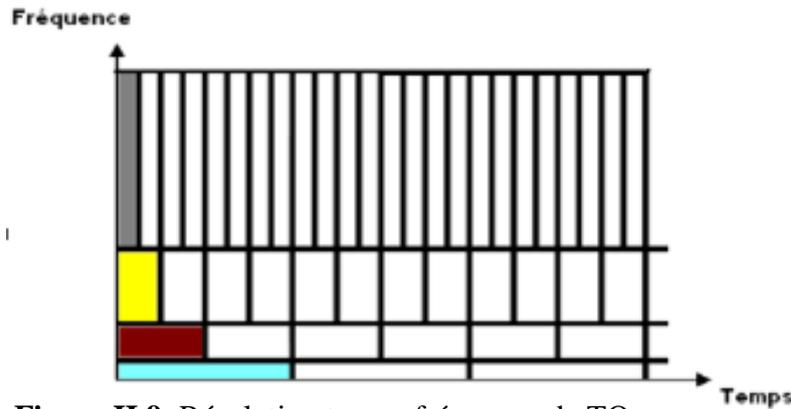


Figure II.9. Résolution temps-fréquence de TO.

Chaque case correspond à une valeur de la TO dans le plan temps fréquence.

- Aux basses fréquences, les tailles des cases sont plus courtes (ce qui correspond à de meilleures résolutions de fréquence, puisqu'il y a moins d'ambiguïté concernant la valeur exacte de la fréquence), mais leurs largeurs sont plus grandes (ce qui correspond à la résolution faible de temps, puisqu'il y a plus d'ambiguïté concernant la valeur exacte du temps) ;
- à des fréquences plus élevées la largeur des cases diminue, la résolution de temps est meilleure, et les tailles des cases augmentent, la résolution de fréquence devient plus faible. La résolution temporelle est donc plus importante pour les hautes fréquences que pour les basses fréquences. Inversement, la résolution fréquentielle est plus importante pour les basses fréquences que pour les hautes fréquences.

Les ondelettes permettent de pallier donc à l'inconvénient de la TFCT en adaptant la précision en fonction de la fréquence. Une résolution simultanée est obtenue par la transformée en ondelettes dans laquelle la fenêtre d'analyse peut avoir des durées différentes.

II.2.5 La transformée en ondelette :

L'idée de l'ondelette est de pouvoir faire varier les largeurs en temps et en fréquences d'une fonction tout en la translatant le long du signal comme dans la transformée de Fourier fenêtrée.

A partir de l'ondelette mère $\psi(t)$; on construit par translation et dilatation une famille de fonctions $\psi_{a,b}(t)$ qui en sont les atomes de base. Ces fonctions sont données par la relation :

$$\psi_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{II.7})$$

Le paramètre (b) de l'ondelette représente sa translation sur l'axe du temps, par contre le paramètre (a) donne le contrôle de la fréquence de l'ondelette, sachant que $a = \frac{1}{f}$;

'f' étant la fréquence [11].

- Si $a < 1$, l'ondelette $\psi_{(a,b)}$ devient très concentrée par rapport à l'ondelette mère $\psi_{(a,b)}$ et son contenu fréquentiel penchera vers les hautes fréquences du plan d'analyse.
- Si $a > 1$, l'ondelette $\psi_{a,b}(t)$ est très large, et le contenu fréquentiel penchera vers les basses fréquences du plan d'analyse [11].

Il y a plusieurs types de la transformée en ondelette ; les principaux, sont cités en ce qui suit.

II.2.5.1 La transformée en ondelette continue (TOC) ou (CWT) :

Elle est semblable à la transformée de Fourier à courte terme (TFCT), seulement la fenêtre glissante utilisée pour l'analyse est variable en fonction du temps

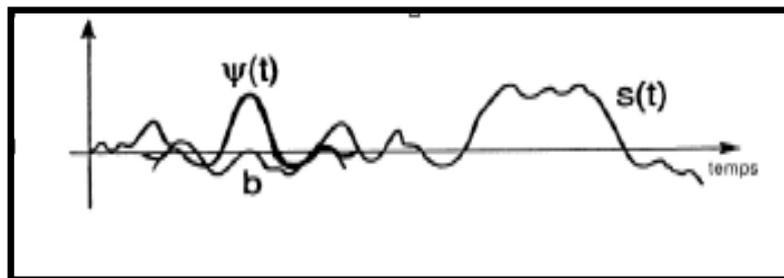


Figure II.10. Balayage de l'ondelette sur signal pour calculer 'TOC'.

La transformée en ondelette continue est une fonction de deux paramètres « a » pour les paramètres d'échelle, et « b » pour les paramètres de translation.

La transformée en ondelette continue d'une fonction $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$ est définie dans le domaine temporel par le produit scalaire suivant [15]:

$$Xro(a, b) = \langle x, \psi_{a, b} \rangle \quad (\text{II.8})$$

Alors

$$Xro(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (\text{II.9})$$

En effectuant le changement de variable $t = \frac{t}{a}$ on aura :

$$X_{ro}(a, b) = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} x(at) \psi\left(t - \frac{b}{a}\right) dt \quad (\text{II.10})$$

b : est le paramètre de localisation temporelle.

a : est le paramètre de localisation fréquentielle.

\sqrt{a} : permet d'assurer la même énergie pour l'ondelette dilatée.

II.2.5.2 La transformée en ondelette discrète (TOD) :

Du même aspect que pour la transformée de Fourier continue, il y en a aussi une transformée d'ondelette discrète, le choix logique pour ce faire, est de prendre des valeurs discrètes des paramètres d'échelle et de translation, autrement dit, c'est la version discrétisée de la transformée continue. L'expression de la TOD est obtenue tout en posant

$a = a_0^j$ et $b = nb_0 a_0^j$ avec $a_0 > 0$, $b_0 > 0$, on va avoir [16]:

$$\psi_{j,n}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^{-j} t - nb_0) \quad (\text{II.11})$$

Donc, pour toute fonction L^2 , la TFD est définie par :

$$C_f(j, n) = a_0^{-\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi(a_0^{-j} t - nb_0) dt \quad (\text{II.12})$$

Un cas particulier, prouvé par Shannon, $a_0=2, b_0=1$; on parle ici d'une TOD dyadique :

$$C_f(j, n) = 2^{-j/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi(2^{-j} t - n) dt \quad (\text{II.13})$$

Avec :

a_0 : est un paramètre de dilatation.

b_0 : est un paramètre de translation.

On appelle transformée en ondelette discrète toute base d'ondelette travaillant avec un facteur d'échelle $a=2^n$. Ce type de la transformée est pratique en implémentation sur tout système numérique [16].

II.3 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu général sur les méthodes destinées à l'analyse des signaux non stationnaires et non linéaires, en récurrence la méthode de la transformée en ondelette (TO).

Après avoir donné les notions de ces méthodes, un état de l'art sur leurs applications dans le domaine de diagnostic des défauts a été présenté. Ceci pour avoir une idée sur les algorithmes à suivre et utiliser, et les différentes méthodes combinées.

III.1 Introduction :

Bien que le signal du courant statorique soit un moyen intéressant pour surveiller aussi bien la partie électrique que mécanique de la machine asynchrone, ses caractéristiques ne sont pas évidentes sans un bon outil de traitement de signaux

C'est pourquoi, notre but de travail est d'appliquer une méthode, d'analyse spectrale du courant statorique pour le diagnostic des différents défauts de la machine asynchrone, appelée l'algorithme de MUSIC « Classification des signaux multiples (Multiple Signal Classification en anglais) » pour l'extraction des fréquences de signal à analyser.

III.2 Méthodes d'analyse spectrale à haute résolution (HR) :

L'origine des méthodes HR remonte aux travaux de Prony, publiés en 1795, qui visent à estimer une somme d'exponentielles par des techniques de prédiction linéaire. Plus récemment, cette approche a été approfondie par Pisarenko pour estimer des sinusoides.

En comparaison, les méthodes HR modernes reposent sur les propriétés particulières de la matrice de covariance du signal. Ainsi, l'étude de son rang permet de séparer l'espace des données en deux sous-espaces, l'espace signal engendré par les sinusoides, et l'espace bruit qui est son complémentaire orthogonal. Les méthodes HR issues de cette décomposition en sous-espaces sont connues pour être plus robustes que les techniques de prédiction linéaire. C'est le cas des méthodes de MUSIC et ROOT-MUSIC (qui reposent sur l'espace bruit), de l'algorithme Tœplitz (Approximation Method), ainsi que l'algorithme ESPRIT et de ses variantes TLS-ESPRIT et PRO-ESPRIT (qui reposent sur l'espace signal). [4]

En fait, toutes ces méthodes d'estimation peuvent être appliquées à un modèle de signal plus générale.

Dans cet ensemble de méthodes nous distinguons deux familles :

- HR spécifique « exemple méthode de **Root-MUSIC** ».

Les HR générales utilisent des algorithmes simples et la résolution est améliorée par rapport aux méthodes directes de Fourier, mais et vu que ces méthodes utilisent tout l'espace propre de la matrice de covariance, il en résulte un biais sur l'estimation.

L'espace propre de la matrice de corrélation peut être décomposé en deux sous-espaces orthogonaux : sous-espace signal (source) et sous-espace bruit. Ces méthodes spécifiques sont plus robustes vis-à-vis du bruit et permettent d'avoir une très bonne résolution.[18]

III.2.1 Algorithme « MUSIC » :

La méthode « MUSIC » a été initialement proposée de manière indépendante par Schmidt Bienvenue et Kopp dans le domaine de traitement d'antennes au cours des années 1980. L'algorithme MUSIC exploite les propriétés de la décomposition en vecteurs propres de la matrice d'auto-corrélation en rapport avec le vecteur des observations. Cette décomposition permet de séparer l'espace des observations en deux espaces vectoriels orthogonaux: le sous-espace de signal et son complément orthogonal, ou bien le sous-espace bruit.[19]

III.2.2 Méthode ROOT–MUSIC :

La méthode ROOT-MUSIC est un outil puissant pour la détection de fréquence du signal immergé dans un bruit mais son principal inconvénient est le temps de calcul long lorsque l'ordre des dimensions du signal est grand ou un grand nombre d'échantillons sont demandés.

Pour cette raison, cette méthode peut être utilisée seulement dans le diagnostic hors ligne. Il est connu que lorsque le signal à traiter peut être mis sous la forme d'une somme d'exponentielles complexe pondérées, les méthodes les plus performantes pour l'extraction de l'information utile sont les méthodes dites MHR « Multiple HighRésolution, la méthode ROOT –MUSIC qui fait partie de cette famille, cherche à séparer l'espace initiale en deux sous espace vectoriels orthogonaux : le sous espace signal et son complément orthogonal, le sous espace bruit.

Nous supposons que le courant de stator $I_s(n)$ est comme suit :

$$I_s(n) = \sum_{i=1}^L I_i e^{j(2\pi \frac{f_i}{f_e} n + \Phi_i)} + W(n) \quad (\text{III.1})$$

Avec:

- I_i, f_i et Φ_i : Sont l'amplitude, la fréquence et la phase aléatoire de la sinusoïde complexe i (composants harmonique).
- $n=0, 1, 2, \dots, (N-1)$.
- $W(n)$: Le bruit.
- f_e : La fréquence d'échantillonnage.
- N : Nombre d'échantillonnage.
- L : Nombre de sinusoïdes ou des sources.

La matrice d'auto-corrélation du signal de bruit est la somme des matrices d'auto-corrélation du signal \mathbf{i}_s et le bruit \mathbf{W} définit comme suit :

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_S + \mathbf{R}_W = E[\mathbf{i}_s(n) \cdot \mathbf{i}_s^H(n)] + E[\mathbf{w}(n) \cdot \mathbf{w}^H(n)] = \mathbf{S} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{S}^H + \sigma_w^2 \cdot \mathbf{I} \quad \text{(III.2)}$$

- $\mathbf{i}_s(\mathbf{n}) = [\mathbf{i}_1, \dots, \mathbf{i}_L]$ Vecteur d'observation.
- $(\cdot)_H$ Est l'opérateur de transposition-conjugaison c'est-à-dire le vecteur complexe transposé et conjugué (hermitien transposé en anglais).
- $\mathbf{E}[\cdot]$ L'espérance mathématique.
- \mathbf{I} : Etant la matrice identité de la taille $(N \times N)$.
- $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_i, \dots, \mathbf{s}_L]$; \mathbf{S}_i : Vecteur sources.

$$\mathbf{S}_i = [1 \quad e^{j.2\pi \cdot \frac{f_i}{f_e}} \quad e^{j.4\pi \cdot \frac{f_i}{f_e}} \quad \dots \quad \dots \quad e^{j.2\pi \cdot (N-1) \cdot \frac{f_i}{f_e}}]^T \quad \text{(III.3)}$$

- \mathbf{A} : est la matrice de puissance des harmoniques

$$\mathbf{A} = \text{diag} [I_1^2 \quad I_2^2 \quad \dots \quad \dots \quad I_L^2] \quad \text{(III.4)}$$

- σ_w^2 : la variation du bruit blanc
- \mathbf{I}_i : la matrice d'identité.

La décomposition en valeurs propres de la matrice d'auto-corrélation \mathbf{R}_i est donnée par :

$$\mathbf{R}_i = \sum_{k=1}^N \lambda_k \cdot \mu_k \cdot \mu_k^H = \underbrace{\mathbf{U}_S \cdot \mathbf{D}_S \cdot \mathbf{U}_S^H}_{\mathbf{R}_S} + \underbrace{\mathbf{U}_W \cdot \mathbf{D}_W \cdot \mathbf{U}_W^H}_{\mathbf{R}_W} \quad \text{(III.5)}$$

Où:

λ_k, μ_k : vecteurs et valeurs propres de \mathbf{R}_i .

$$\begin{cases} \mathbf{U}_S = [u_1 \dots u_l] ; \mathbf{D}_S = \text{diag} [\lambda_1 \lambda_l] . \text{(III.6)} \\ \mathbf{U}_W = [u_{l+1} \dots u_N] ; \mathbf{D}_W = \sigma_w^2 \cdot \mathbf{I}_{N-l} . \end{cases}$$

Les matrices \mathbf{U}_S et \mathbf{U}_W sont composées par les valeurs propres de vecteurs propres disposées dans l'ordre décroissant. L'équation (III.5) montre cela, nous pouvons diviser ces vecteurs propres en deux groupes ou sous-espaces :

L vecteurs propres correspondant à L les plus grandes valeurs propres (sous-espaces de signal E_s), et $N-1$ vecteurs propres de bruit qui idéalement ont des valeurs propres égales à σ_w^2 (sous-espace de bruit E_b).

Les matrices diagonales D_s et D_w contiennent les valeurs propres λ_k correspondant aux vecteurs propres ; car les valeurs propres du bruit sont égales à la variation du bruit, la matrice D_w peut être écrite comme montré dans l'équation (6, en comparant les équations (2), (5) et (6) nous pouvant écrire :

$$R_i \cdot U_w = U_w \cdot D_w = \sigma_w^2 \cdot D_w = S \cdot A \cdot S^H \cdot U_w + \sigma_w^2 \cdot U_w \quad (\text{III.7})$$

Ce qui implique que :
$$\begin{cases} S^H \cdot U_w = 0 \text{ avec } S_i \in E_s ; i = 1, \dots, L \\ \forall U \in E_b \end{cases}$$

La méthode de **Root-Music** emploie le principe de cette orthogonalité entre le sous-espace de signal et le sous-espace de bruit. Les fréquences d'estimation requis $Z_i = e^{j \cdot 2\pi \cdot \frac{f_i}{f_e}}$ Sont les racines d'équations (III.7) et la quelle peut être exprimée comme suit :

$$U(z) = \sum I_k \cdot Z_i^{-K}$$

$$K=0$$

$$S_i^H \cdot U_i^H \cdot U_w \cdot S_i = 0 \quad \text{avec } i = 1, 2, L \quad (\text{III.8})$$

Les matrices de (III.4) vont en paires (c-à-d si Z_i est une racine, $1/Z_i$ est aussi). Ces L racines les plus proches du cercle unité correspondent aux harmoniques possibles selon :

$$f_i = \frac{f_e}{2\pi} \cdot \arg(Z_i) \quad \text{avec } i = 1, 2, \dots, L \quad (\text{III.9})$$

III.2.3 Estimation de puissances d'harmoniques:

Savoir ceci :

$$R_s = S \cdot A \cdot S^H = \sum_{k=1}^L (\lambda_k + \sigma_w^2) u_k \cdot u_h^k \quad (\text{III.10})$$

Il est plus facile à inverser R_s qu'à inverser S . par conséquent les puissances d'harmoniques peuvent être estimées par la méthode suivante :

$$Q = A^{-1} = \frac{1}{S^{H.S.R_s^{-1}}} \quad (\text{III.11})$$

Là où:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_s^{-1} = \sum_{k=1}^L \frac{1}{\lambda_k + \sigma_w^2} \cdot u_k \cdot u_k^H \\ \sigma_w^2 = \frac{1}{N-L} \sum_{k=L+1}^N \lambda_k \end{array} \right. \quad (\text{III.12})$$

Le problème d'identification est résolu en sachant les fréquences et les puissances des divers harmoniques. En outre, le rang (l'ordre) de sous-espace qui nous permet d'estimer le positionnement de fréquences. En raison de la longueur finie de données, nous ne pouvons pas avec précision calculer la matrice de corrélation.

III.4 Méthode d'extraction des paramètres Root-MUSIC :

III.4.1 Analyse du courant statorique :

Un spectre de courant statorique contient l'information potentielle de défaut. Des composants de fréquence ont été déterminés pour chaque défaut indiqué. Ces fréquences sont dérivées de la construction physique de la machine. Il est important de noter que, comme dans le cas d'analyse de bruit, plus le défaut progresse, ses composants continuent à augmenter avec du temps.

La techniques d'analyse le courant du moteur pour détecter les défauts (défaut d'excentricité par exemple) consiste à étudier les composants de bande latérale autour de la fréquence fondamentale f , (c'est-à dire ligne fréquence). Les défauts provoquent un ordre des bandes latérales données par:

$$f_b = f_s [1 \pm (k \cdot N_b (1 - g))] \quad (\text{II-13})$$

f_b : Fréquences de bande latérale liées au défaut. $k= 1, 2, 3 \dots$ f_s : Fréquence d'alimentation.

g : le glissement (Motors slip), donné par: $g = \frac{n_s - n_r}{n_s} = 1 - \frac{n_r}{n_s}$

- n_r : la vitesse mécanique relative du moteur (La vitesse synchrone de moteur).
- n_s : vitesse du moteur liée à la fréquence f_s .

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} \text{ (En tr/mn).}$$

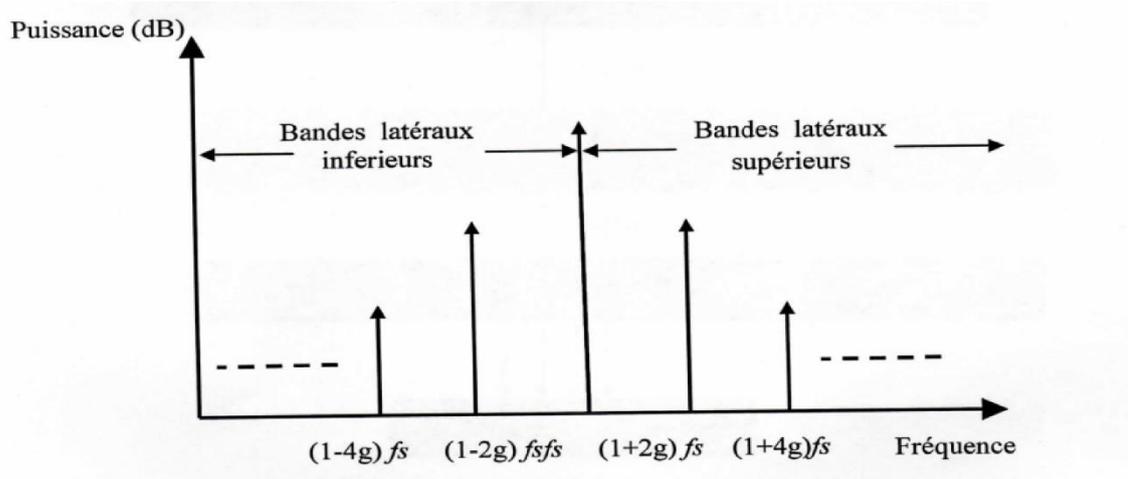


Figure III.1. les fréquences de bande latérale autour de la fréquence fondamentale.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu que la détection des défauts se base sur l'extraction des fréquences et puissances du courant statorique à base d'une méthode dite **Root -MUSIC** qui se résume sur l'analyse spectrale à haute résolution. Nous avons remarqué que cette méthode reste la meilleure pour obtenir une meilleure résolution fréquentielle par rapport à une autre technique d'extraction de paramètres et d'autre part l'application de cette méthode va être traduite en un programme écrit sous MATLAB.

IV.1 Introduction :

L'emploi direct des coefficients d'ondelettes sans recours à la reconstruction des signaux à partir de ces coefficients se révèle un outil de détection efficace, alliant de bonnes performances à un faible coût de calcul. En effet, si M est le nombre de points du signal, alors l'algorithme de décomposition discrète d'analyse et de reconstruction vaut $2.O(M)$, tandis qu'en utilisant seulement l'algorithme d'analyse sur les coefficients, le coût de calcul est réduit de moitié.

Dans notre cas, le principe retenu pour la détection est l'application d'algorithmes de ROOT-MUSIC sur les coefficients d'ondelettes (et non sur les signaux reconstruits) des niveaux d'échelle préalablement choisis. La détection à partir des coefficients repose sur la recherche de la coïncidence en temps, à travers plusieurs échelles, de coefficients d'ondelettes significatifs. La décomposition dyadique peut cependant mener à un décalage important dans la localisation des changements.

IV.2. Résultat expérimentaux du diagnostic des défauts de barres

Selon l'élément affecté chaque défaut de barre possède une fréquence caractéristique qui se reflète dans le courant statorique à des fréquences bien déterminées.

Un moteur à cage d'écureuil est accouplé à une génératrice à courant continu formant le banc d'essai pour effectuer les tests.

La chaîne de mesure comporte un capteur de courant à effet Hall et la carte son comme une carte d'acquisition et un analyseur de spectre comme moyen de vérification. L'ensemble est relié à un ordinateur pour le traitement et la visualisation des signaux captés comme illustré par la figure (IV.1).



Figure IV.1. Banc d'essai destiné au diagnostic des défauts.

(1) : Moteur asynchrone 1.5 KW.	(4) : Oscilloscope
(2) : Génératrice à c-c 3 KW.	(5) : Tachymètre.
(3) : Analyseur de spectre.	(6) : Capteur de courant à effet Hall

IV.2.1. Caractéristiques du moteur asynchrone utilisé

Les mesures utilisées pour le teste de notre système sont effectués au laboratoire de surveillance des entrainements électriques du département d'électrotechnique Université des sciences et de la technologie d'Oran « Mohamed Boudiaf ».

- Une source triphasée : la machine est alimentée par le courant triphasé du réseau. On travaille à vitesse de rotation constante donc à glissement constant.
- Moteur asynchrone à cage d'écureuil utilisé possède les paramètres suivants :

Constructeur	AZAZGA (ALGERIE)
Puissance	1.5 KW
Tension nominale	380 V
Branchement	(Δ)
Courant nominale	7 A
Cos (φ)	0.83
Nombre de pôle	4
Nombre de barres rotoriques	28
Vitesse nominale	1410tr/mn
Classe d'isolation	F

Tableau IV.1. Caractéristiques du moteur asynchrone.

IV.3. Simulation

IV.3.1. Application pratique de l'ondelette stationnaire (swt) pour calculer les Coefficients d'approximation et de détails

On va faire une décomposition simple des signaux des essais sur un moteur sain, un défaillant et un sain avec variation de charge. À l'aide de l'ondelette mère Daubechies 45 'db45' on observe clairement les signaux dits « approximation » et les signaux dits « détails ».

IV.3.2. Analyse des coefficients d'ondelette par l'algorithme ROOT-MUSIC

On va représenter les spectres correspondant à l'application de la Root-MUSIC sur les coefficients d'ondelette des différents défauts de barres, premièrement par la fréquence d'encoche on détermine le glissement pour omettre l'effet des défauts de barres, deuxièmement, la prise en compte de ces effets conformément à l'analyse préétablie. En revanche, une nouvelle série d'harmoniques se manifeste clairement.

On peut voir dans le zoom les raies de fréquences « PSH » (harmoniques principaux d'encoches) de fréquences obéissant à la loi : $f_{ex} = f_s [1 \pm (k \cdot N_b (1 - g))]$

Avec :

K : entier positif (k=1 ,3 ,5 ,7...), Nb: nombre de barres rotoriques,

P : nombre de pôles, g : le glissement tel que : $g = \frac{ns - nr}{ns}$

f_s : la fréquence d'alimentation

Pour les paramètres et les conditions de test pour le diagnostic suivants :

Un nombre de pôles p=4

Un nombre de barres Nb=28

Un glissement de 0.04 (ns=1500 tr/mn et nr=1410 tr/mn)

On a suivi les étapes suivantes :

1. Détermination de fréquence d'encoche (F_{hpr}).
2. Calcul de glissement.
3. Estimation des fréquences inférieures et fréquences supérieures au fondamentale en fonction du glissement.
4. Localisation de fréquence droite (F_d) et fréquence gauche (F_g) par rapport au fondamentale puis les puissances correspondantes Pd et Pg respectivement.

A. Moteur sain

La figure représente les coefficients d'approximation (Ca) (Basses fréquences) et de détails (Cd) (Hautes fréquences) de moteur sain.

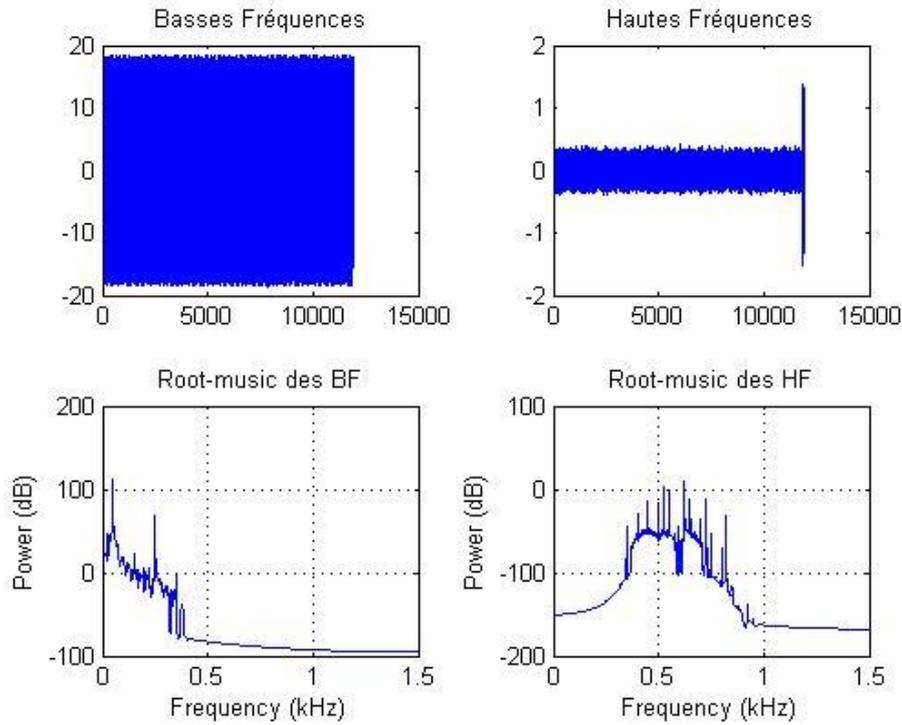


Figure IV.2. Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas de moteur sain.

Résultats obtenus

Résultats	F_d	F_g	P_d	P_g
Essais 1	54.66	45.31	0.37	0.92

Tableau IV.2. Fréquences et Puissances cas de moteur sain.

B. Défaut de barre :

Les figures représentent les coefficients d'approximation (C_a) (Basses fréquences) et les détails (C_d) (Hautes fréquences) de défaut de barre.

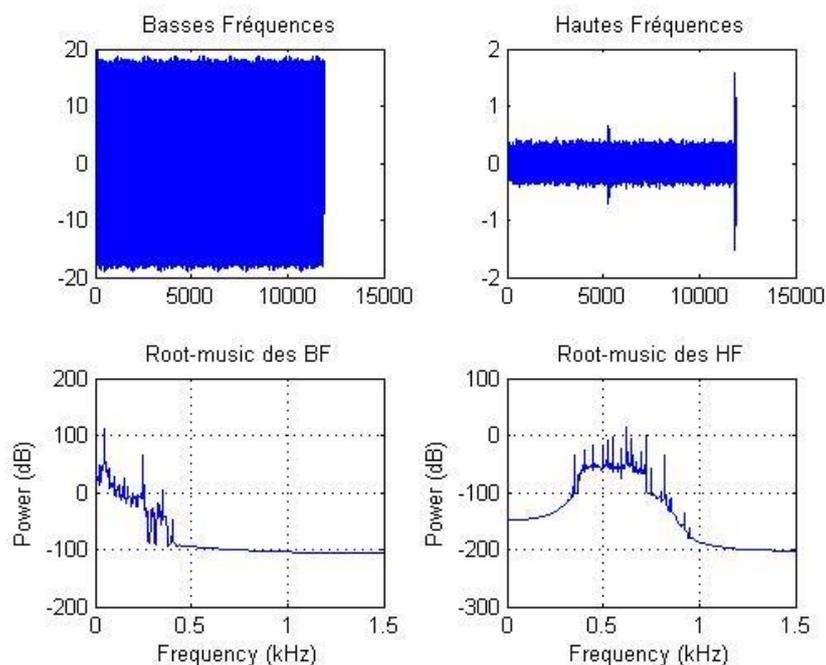


Figure IV.3. Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d'un défaut de barre (1).

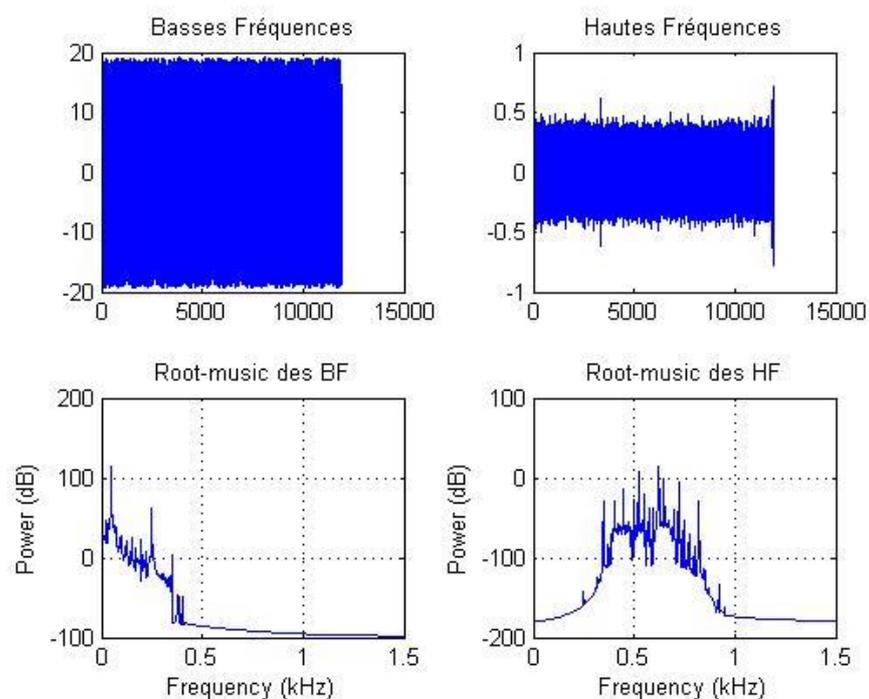


Figure IV.4. Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d'un défaut de barre (2).

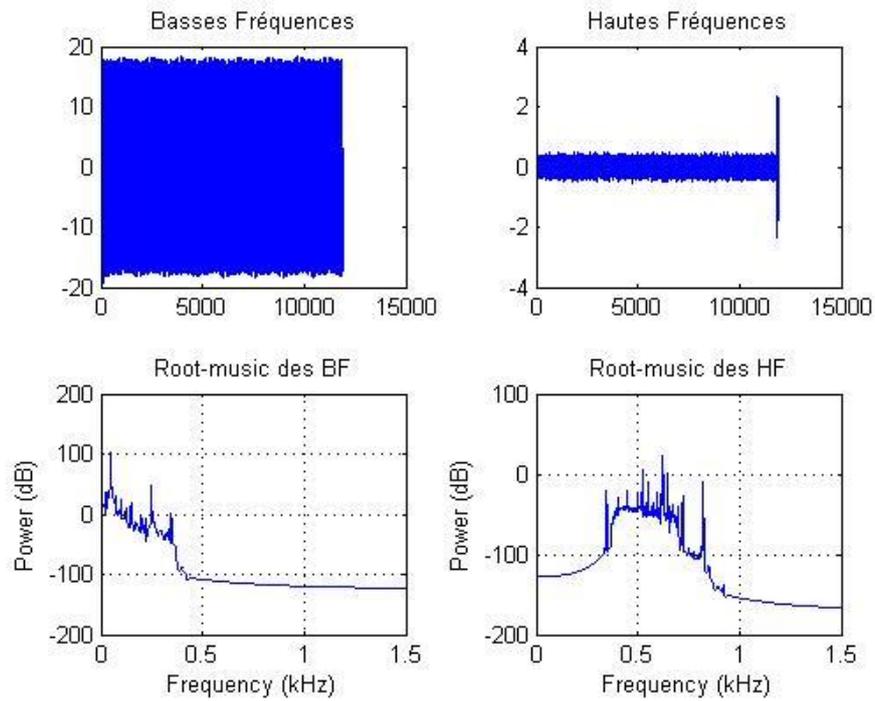


Figure IV.5. Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d'un défaut de barre (3).

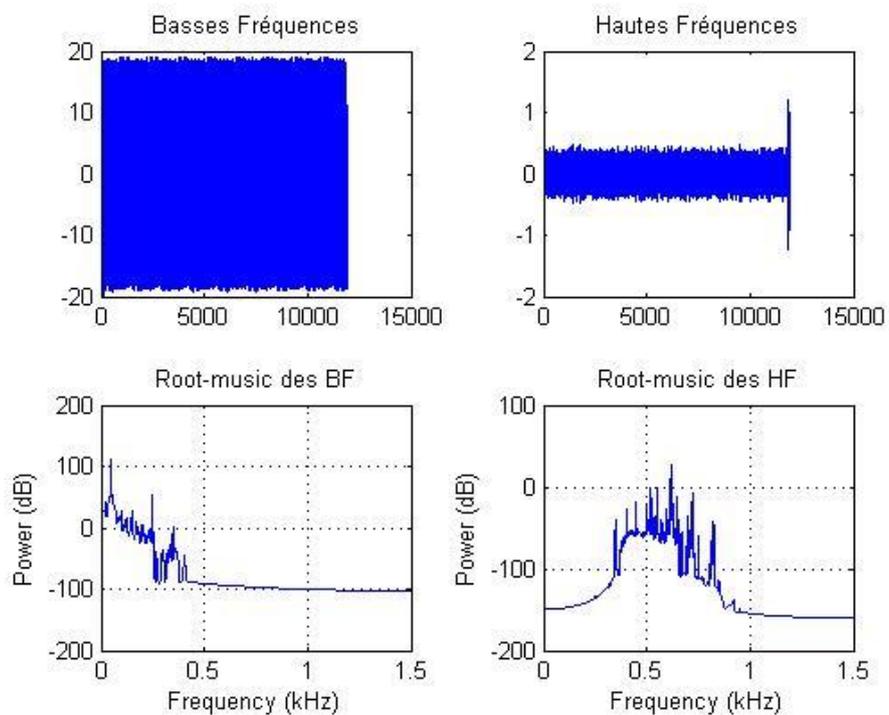


Figure IV.6. Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d'un défaut de barre (4).

Résultats obtenus

	F_d	F_g	P_d	P_g
Essai 01	55.20	46.49	0.34	1.41
Essai 02	55.09	46.33	0.17	1.75
Essai 03	54.42	45.67	0	2.41
Essai 04	53.95	45.19	0.78	1.04

Tableau IV.3. Fréquences et Puissances en cas des défauts de barre.**Commentaire**

Les figures (IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5) représentent respectivement les résultats d'analyse de courant statorique de la phase Ia par l'ondelette mère Daubechies 45 et par la méthode ROOT-MUSIC pour des fonctionnements sains, avec les défauts de barre (1), (2), (3) et (4).

La comparaison des signaux de détail et d'approximation pour une machine avec défaut montre que l'amplitude des coefficients C_a et C_d est augmentée par rapport à celui de la machine saine. Cette augmentation dans les signaux est due à l'effet que les bandes de la fréquence correspondante sont affectées par les différents types de défauts. Ainsi, on remarque des différences plus claires entre les signaux des différents défauts représentés précédemment.

C. Variation de charge :

Les figures représentent les coefficients d'approximation (C_a) (Basses fréquences) et les détails (C_d) (Hautes fréquences) de variation de charge.

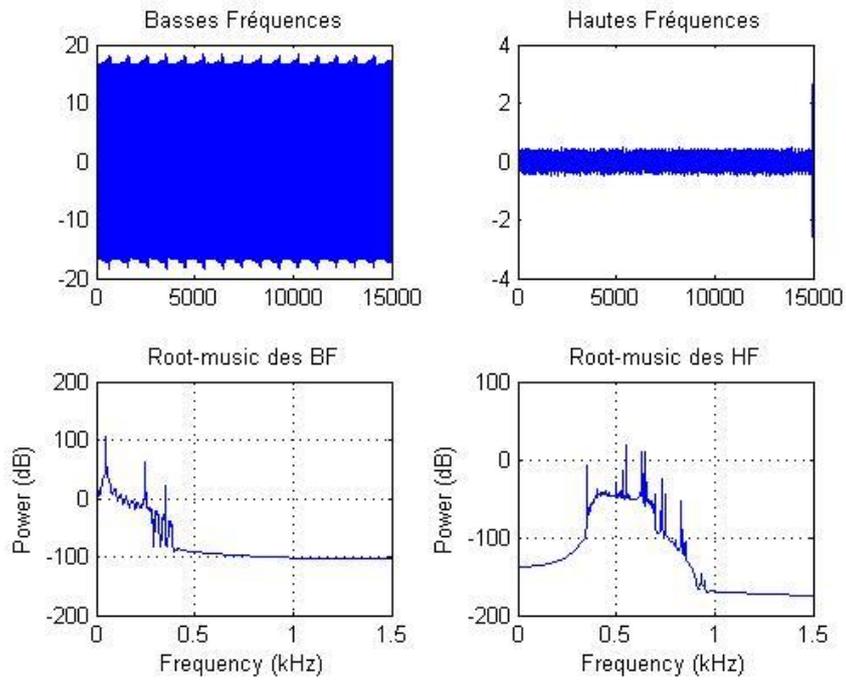


Figure IV.7. Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d’une variation de charge (1).

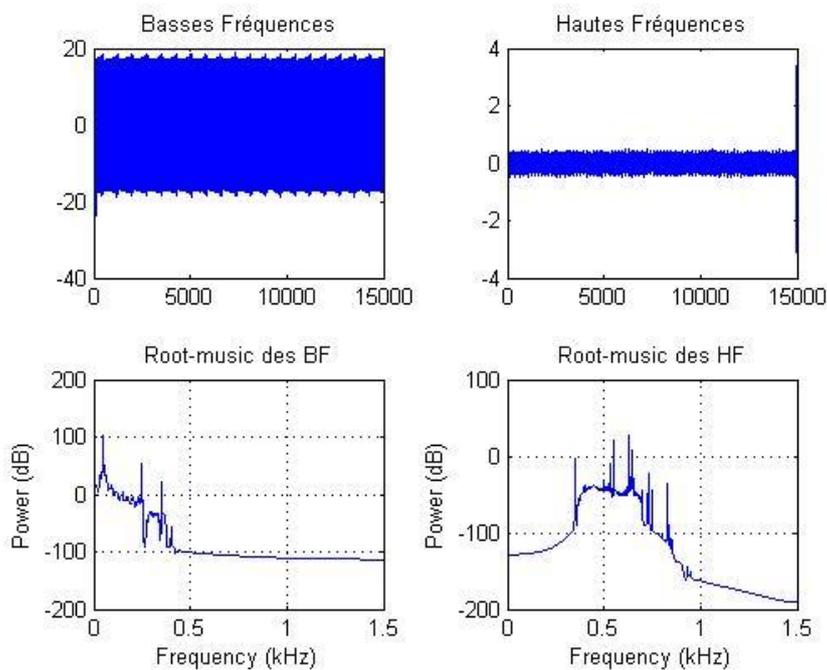


Figure IV.8. Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d’une variation de charge (2).

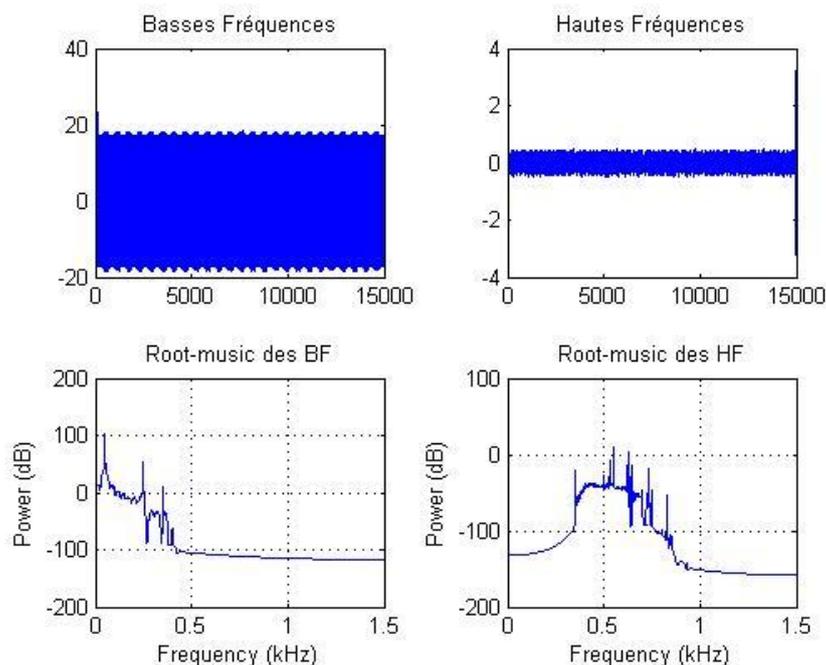


Figure IV.9. Analyse par ondelettes et Root-MUSIC du courant statorique cas d'une variation de charge (3).

Résultats obtenus

	F_d	F_g	P_d	P_g
Essai 01	53.81	45.79	1.05	0.18
Essai 02	53.36	45.81	0.69	0.72
Essai 03	54.82	44.98	1.48	0

Tableau IV.4. Fréquences et Puissances en cas des variations de charge.

IV.3.3. Comparaison entre le spectre de défaut et le spectre en cas de variation de Charge

Les résultats obtenus nous montrent clairement que l'amplitude de l'harmonique de défaut de barre est plus élevée par rapport à ce de variation de charge.

Interprétation des résultats :

Les analyses spectrales à haute résolution et par ondelettes nous ont permis de mettre en évidence l'existence du défaut. Il s'est avéré que la surveillance de l'amplitude des composants de fréquence présents dans le spectre fréquentiel des coefficients

d'ondelette du courant statorique permet de détecter les défauts et l'écho de la variation de charge par la présence des harmoniques.

D'après ce qu'on a vu, on constate que le mariage des ondelettes et Root-MUSIC peut plus ou moins réaliser la séparation entre les défauts de barre et la variation de la charge dans un moteur asynchrone.

IV.4.Conclusion

On conclut dans ce chapitre, et d'après les résultats de simulation obtenus que :

La méthode à haute résolution Root-Music permet d'obtenir des résultats très significatifs pour l'identification des défauts de barres et la variation de charge dans un moteur asynchrone à cage d'écureuil, elle a une bonne efficacité sur les coefficients d'ondelette de détails (Hautes fréquences) et les coefficients d'ondelette d'approximation (Basses fréquences).

Conclusion générale :

Le travail dont nous avons rendu compte dans ce mémoire s'insère dans l'optique de l'amélioration de la précision des méthodes de la détection des défauts de barres dans un moteur asynchrone à base de la transformée en ondelette et l'algorithme ROOT-MUSIC.

Ce travail nous a permis de découvrir l'importance de ces méthodes dans la découverte de la différence entre les harmoniques d'un défaut de barres et ceux suscités par une charge variable. En effet, l'amplitude de l'harmonique de défaut de barres est largement grande par rapport à ce de variation de charge.

Le système ainsi conçu offre la possibilité d'automatiser le diagnostic des défauts affectant les moteurs à cage, par l'emploi de la méthode du spectre de hautes fréquences (coefficients de détail) et l'analyse spectrale à haute résolution. Ceci montre que l'association des techniques d'analyse fréquentielle à celles du traitement de signal à haute résolution est un outil efficace pour la maintenance prédictive vu les avantages que procurent ces techniques ou les défauts de barres naissants sont détectables. Ces résultats encourageants ouvrent de nouveaux horizons dans le domaine de la surveillance en ligne des machines électriques.

Enfin, dans un cadre plus général du diagnostic et de la surveillance des machines électriques, il faut élargir cette étude pour d'autres types de défaut et pour d'autre type de machines.

Programme principale :

```
function [Fg,Pg,Fd,Pd]=bcassewave(Fe,fichier,typew)
IP=input('Combien de fréquences et de puissances voulez-vous
avoir:', 's');
p=eval(IP);
L=2*p;
[Ca,Cd] = Anawavelet(typew,fichier);
clearvars all -except Fe Ca Cd
N=length(Ca);
% Te=1/Fe s;
X=corrmtx(Ca,4*L); % Calcul de la matrice d'autocorrelation
[fl,Pl]= rooteig(X,L,Fe); %Estimation des fréquences et puissances
subplot(223)
peig(X,L,N,Fe);
title('Root-music des BF')
Fl=fl(fl>=0);
[Pmax,rang]=max(Pl); % Puissance du fondamentale et son
rang
F0=Fl(rang); % Le fondamentale
clearvars all -except Fe fl Pl Cd
Y=corrmtx(Cd,4*L); % Calcul de la matrice
d'autocorrelation
[fh,Ph]= rooteig(Y,L,Fe); %Estimation des fréquences et
puissances
subplot(224)
peig(Y,L,N,Fe);
title('Root-music des HF')
Fh=fh(fh>0);
Fc=Fh((Fh>=(12*F0)) & (Fh<=(13*F0)));
[y,ordre]=max(Ph((Fh>=(12*F0)) & (Fh<=(13*F0))));
Fhpr=Fc(ordre); %Fréquence d'encoche pour un nombre de barres
rotoriques
s=1-(1/14)*((Fhpr/F0)+1); %nb=28 et un nombre de pairs de pôles
p=2
Inf=F0*(1-2*s)
Sup=F0*(1+2*s)
i1=dsearchn(Fl,Inf);
Fg=Fl(i1);
Pg=Pl(i1);
i2=dsearchn(Fl,Sup);
Fd=Fl(i2);
Pd=Pl(i2);
```

Analyse par ondelettes de courant statorique :

```
function [Ca,Cd] = Anawaveletvc(typew,fichier)
[D_low,D_high]=wfilters(char(typew));
load(char(fichier))
%i=ia(1:6000);
L = wmaxlev((length(ia))/10,typew);
N=(floor((length(ia)/10)/(2^L))*2^L
[ca,cd] = swt(ia(1:N),L,D_low,D_high);
Ca=ca(2,:);
Cd=cd(2,:);
subplot(221)
plot(Ca)
title('Basses Fréquences')
subplot(222)
plot(Cd)
title('Hautes Fréquences')
```

Bibliographie

- [1] "Présentation des avaries. Machines électriques tournantes cahier des préventions.CP2, Allianz ,1988.
- [2] O. V. Thorsen, M. Dalva, "A survey of faults in induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.31, no.5, pp.1186-1196, September 1995.
- [3] H. Yahoui, J. Seetohul, G. Grellet, A. Jammal, "Detection of broken bar or end-ring fault in asynchronous machines by spectrum analysis of the observed electromagnetic torque through supply cable" Revue Européenne de Diagnostic et Sécurité de Fonctionnement, Vol.5, no.4, 1995.
- [4] M. S. Naït-Saïd, M. E. H. Benbouzid et A. Benchaib, "Detection of broken bars in induction motors using an extended kalman filter for rotor resistances sensorless estimation" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.15, no.1, pp.66-70, Mars 2000.
- [5] L. Kerszenbaum et C.F. Landy, "The existence of large inter bar current in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and end-ring faults" IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-103, n°7, pp.1854- 1862, July 1984.
- [6] N. M. Elkasabgy, A. R. Eastham, G. E. Dawson, "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.28, no.1, Part 1, pp. 165-171, Jan.-Fév. 1992
- [7] P. O'Donnell, "Report of larger reliability survey of industrial and commercial installations, Part 1", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA21, N°4, July/August 1985 pp 853 – 864.
- [8] T.J. Sobczyk, A. Izvorski, "Recognition of rotor eccentricity of induction motor based on the Fourier spectra of phase currents" Proc. ICEM'98, pp.408–413, Vol.1, September 2 - 4 1998 Istanbul Turkey
- [9] V. Devanneaux, H. Kabbaj, B. Dagues et J. Faucher, "An accurate model of squirrel cage induction machines under static, dynamic or mixed eccentricity" Proc. IEEE SDEMPED 2001 – Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, pp.121-126, 1-3 Septembre 2001 Grado, Italie.
- [10] A. H. Bonnett, "Cause and analysis of Anti-Friction Bearing Failures in A.C Induction Motors" IEEE Transactions on Industry Applications, pp 14 - 23, Sept/Oct 1993.
- [11] Ayad Mouloud : "Étude comparative d'algorithmes de la transformée en ondelettes: Application à l'analyse des signaux empiriques ». Thèse de
-

Bibliographie

- [12] Albert Cohen: « Les bases d'ondelettes », Technique de l'ingénieur AF 210, 2002.
- [13] Yves Meyer, Stéphane Jaffard, Olivier Rione : « L'analyse par ondelettes ». Pour la science. Septembre 1987. Mensuel N°119, pp. 28-37.
- [14] Michel Misiti, Yves Misiti: « Les ondelettes et leurs applications ». Edition Hermes, Paris 2003.
- [15] Mahgoun Hafida: « Analyse et caractérisations des signaux vibratoires cyclostationnaire ».Thèse de magister, IOMP, Université Ferhat Abbas Sétif, 2000.
- [16]Boulenger A., PachaudC: « Aide mémoire : Surveillance des machines par analyse des vibrations ».Edition Dunod, Paris 2009.
- [17] M.J.Bastiaans,T.Alieva et L.Stankovic: On rotated time-frequency kernels. IEEE Signal Processing Letters, 9(11):378–381, 2002.
- [18] PDF: Sébastien Gadat Algorithmes de Support Vecteur Machines,,Laboratoire de Statistique et probabilité UMR 5583CNRS-UPS,www.lsp.ups-tlse.fr/gadat
- [19] PDF: Arnaud Revel« Support Vector Machines », ,revel.arnaud@gmail.com
-