

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière: Electrotechnique

Option: Commande Electrique

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

*Diagnostic des défauts de cassure de barres
rotoriques dans la machine asynchrone triphasée*

Présenté par :

ZERROUK Ahmed

Soutenu le: 03 Juin 2013

Devant le jury composé de :

Mme. GUERGAZI Aicha

MCB

Président

Mr. YAHIA Khaled

MCB

Encadreur

Mr. SAHRAOUI Mohamed

MCB

Examinateur

Année universitaire: 2012 / 2013

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui ont passés leur vie rêvant de voir ce jour-ci, à ceux qui mon entourés d'amour et de tendresse, à:

Au la fleur de ma vie... ma très chère mère en témoignage de ma profonde et ma grande reconnaissance pour sa tendresse, sa patience, son sacrifice tout au long de mes études.

Mon honorable et très cher père qui a sacrifié sa vie qu'on puisse se trouver à ce niveau et qui m'a été source de réussite.

Au mes très chers frères

Au mes très chers sœurs

A toute ma famille

A mes très chers amis.

REMERCIEMENTS

Avant tous je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, la patience, l'aide et la volonté de réaliser ce modeste travail.

*Je tiens à remercier vivement notre encadreur Mr: **YAHIA KHALED** qui a sacrifié un grand effort afin de me permettre de mener à bien le présent travail et à qui j'exprime ma gratitude et mon respect.*

*Nous remercions aussi les membres de jury, **Mme. GUERGAZI Aicha**, et **Mr. SAHRAOUI Mohamed**. Qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.*

Mes remerciements aux enseignants du département d'électrotechnique.

Enfin, je ne serai terminé sans exprimer mes remerciements à ma famille et mes amis.

Liste des Tableaux

Tableau IV.1 : Bandes fréquentielles des signaux de décomposition.	54
Tableau IV.2 : FSD, obtenu par db5, des méthodes utilisées en fonction du nombre de barres cassées en régime non stationnaire.	66
Tableau IV.3 : FSD, obtenu par db44, des méthodes utilisées en fonction du nombre de barres cassées en régime non stationnaire.....	67

Liste des figures

Figure I.1 : Stator de la machine asynchrone.	5
Figure I.2 : Rotor à cage (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux (bagues) de court-circuit.	6
Figure I.3 : Constitution du rotor bobiné.	6
Figure I.4 : Différents courts-circuits.	10
Figure I.5 : Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.	11
Figure I.6 : Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.	12
Figure I.7 : Photo d'une barre cassée [9].	12
Figure I.8 : Répartition des défauts pour une machine de moyenne puissance.	15
Figure I.9 : Répartition des défauts pour une machine de grande puissance.	16
Figure I.10 : Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.	17
Figure II.1 : Structure multi-enroulements du rotor.	22
Figure II.2 : Circuit électrique équivalent de la cage rotorique.	22
Figure II.3 : Champ produit par une maille rotorique.	27
Figure II.4 : Courants statoriques du moteur asynchrone à l'état sain.	30
Figure II.5 : courant statorique du moteur asynchrone à l'état sain.	30
Figure II.6 : Vitesse de rotation du moteur asynchrone à l'état sain.	31
Figure II.7 : Couple électromagnétique du moteur asynchrone à l'état sain.	31
Figure II.8 : Courant d'une barre rotorique du moteur asynchrone à l'état sain.	32
Figure II.9 : la FFT du courant statorique à l'état sain	32
Figure II.10 : Zoom de FFT du courant statorique à l'état sain.	33
Figure II.11 : Courant statorique du moteur asynchrone avec 4 BC.	33
Figure II.12 : Vitesse de rotation du moteur asynchrone avec 4 BC.	34
Figure II.13 : Couple électromagnétique du moteur asynchrone avec 4 BC.	34
Figure II.14 : Courant d'une barre rotorique du moteur asynchrone avec 4 BC.	35
Figure II.15 : FFT du courant statorique à l'état de 4 BC	35
Figure II.16 : Zoom de du courant statorique à l'état de 4 BC	36
Figure III.1 : Pavage de la transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG).	41
Figure III.2 : Pavage de la Transformée en ondelettes (TO).	45
Figure III.3 : Ondelette de Daubechies 4, db4 (a) et sa fonction d'échelle (b).	47

Figure III.4 : Principe de la décomposition par la transformée en ondelettes discrète au niveau n (FPB : Filtre Passe Bas, FPH : Filtre Passe Haut, 2 : décimation).	48
Figure III.5 : Principe de la décomposition par la transformée en paquets ondelette au niveau 3.	51
Figure IV.1 : courant statorique du moteur asynchrone avec une barre cassée en régime non stationnaire.	55
Figure IV.2 : puissance active instantanée (PAI) d'un moteur asynchrone fonctionnant avec une barre rotorique cassée en régime non stationnaire.	55
Figure IV.3 : module du vecteur de Park (MVP) du moteur asynchrone avec une barre cassée en régime non stationnaire.	56
Figure IV.4 : Signature du courant statorique i_a , obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, sain.	57
Figure IV.5 : Signature du courant statorique i_a , obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 01 BC.	57
Figure IV.6 : Signature du courant statorique i_a , obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 04 BC.	58
Figure IV.7 : Signature de la puissance active instantanée (PAI) obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, sain.	58
Figure IV.8 : Signature de la puissance active instantanée (PAI) obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 01 BC.	59
Figure IV.9 : Signature de la puissance active instantanée (PAI) obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 04BC.	59
Figure IV.10 : Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, sain.	60
Figure IV.11: Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 01BC.	60
Figure IV.12 : Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 04BC.	61
Figure IV.13 : Signature du courant statorique i_a , obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, sain.	61
Figure IV.14 : Signature du courant statorique i_a , obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 01 BC.	62

Figure IV.15 : Signature du courant statorique i_a , obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 04 BC.	62
Figure IV.16 : Signature de la puissance active instantanée (PAI) obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, sain.	63
Figure IV.17 : Signature de la puissance active instantanée (PAI) obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 01 BC.	63
Figure IV.18 : Signature de la puissance active instantanée (PAI) obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 04 BC.	64
Figure IV.19 : Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, sain.	64
Figure IV.20 : Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 01 BC.	65
Figure IV.21 : Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 04 BC.	65
Figure IV.22 : FSD, obtenu par db5 en fonction du nombre de barres cassées.	67
Figure IV.23 : FSD, obtenu par db44 en fonction du nombre de barres cassées.	68

Liste des Abréviations

S : Surface fermée.

Ω : Surface enfermée par un contour

μ_0 : Perméabilité magnétique de l'air.

H : Champ magnétique.

B : Induction magnétique.

ψ : Flux magnétique.

L_{BA} : Inductance mutuelle entre l'enroulement B et A .

L_b : Inductance de fuite d'une barre rotorique.

L_e : Inductance de fuite d'un segment d'anneau de court-circuit.

L_{mr} : Inductance de magnétisation d'une maille rotorique.

L_{Am} : Inductance de magnétisation d'une phase statorique.

L_{fA} : Flux de fuite d'une phase statorique.

ψ_{BA} : Flux mutuelle total entre deux enroulements A et B .

F_{mm} : Force magnétomotrice.

g : Epaisseur de l'entrefer, ou fonction d'entrefer.

g_0 : Epaisseur de l'entrefer de la machine symétrique.

P : Perméance de l'entrefer.

g : Glissement.

r : Rayon moyen de l'entrefer de la machine symétrique.

R : Rayon de l'entrefer.

R_b : Résistance d'une barre rotorique.

R_e : Résistance d'un anneau de court-circuit.

r_s : Résistance d'une phase statorique.

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.

$[R]$: Matrice globale des résistances de la machine.

$[V_s]$: Vecteur des tensions statoriques.

$[V_r]$: Vecteur des tensions rotoriques.

$[I_s]$: Vecteur des courants statoriques.

$[I_r]$: Vecteur des courants rotoriques.

Ω_r : Vitesse mécanique du rotor.

ω_s : Pulsation statorique.

φ : Ouverture angulaire.

θ_r : Position mécanique du rotor.

J : Densité de courant.

J_T : Moment d'inertie totale.

i : Courant électrique.

l : Longueur active de la machine.

w_{Ai} : Nombre de tours de la bobine i de l'enroulement A .

q : Nombre de bobines de l'enroulement A .

p : Nombre de bobines de l'enroulement B .

p : Nombre de paires de pôles.

N : Fonction d'enroulement.

N_s : Nombre de spires.

N_e : Nombre d'encoches statoriques.

N_b : Nombre de barres rotoriques.

n : Fonction de distribution.

n_{ws} : Ordre des harmoniques de temps de la FMM.

λ : Ouverture de la bobine.

β : Ouverture de l'encoche.

γ : Inclinaison de l'encoche.

α_s : Pas d'encoches statoriques.

α_r : Pas d'encoches rotoriques.

f_v : Coefficient de frottement visqueux.

f : Fréquence d'alimentation.

f_r : Fréquence rotorique.

f_{he} : Fréquence des harmoniques d'encoches rotoriques.

f_b : Fréquence caractéristique du défaut de barres.

l_d : Nombre de niveaux de la décomposition.

$f_{g,bc}$: Composante latérale gauche de cassure de barres rotoriques dans le spectre du courant statorique.

$f_{d, bc}$: Composante latérale droite de cassure de barres rotoriques dans le spectre du courant statorique.

$Env i_a$: Enveloppe du courant statorique i_a .

MVP : Module de vecteur de Park.

Phi : Angle de phase.

FP : Facteur de puissance.

PAI : Puissance active instantanée.

TFR : Transformée de Fourier rapide.

TOD : Transformée en ondelettes discrete.

TO : Transformée en ondelettes.

Sommaire

Introduction Générale	1
<i>Chapitre I : Etude Préliminaire sur le diagnostic de la machine asynchrone triphasée</i>	
I.1. Introduction	4
I.2. Constitution de la machine asynchrone	4
I.2.1. Le stator	4
I.2.2. Le rotor	5
I.2.2.1. Le rotor à cage	5
I.2.2.1. Le rotor bobiné	6
I.2.3. Les paliers	6
I.3. Définition des différents défauts de la machine asynchrone	7
I.3.1. Les causes des défauts	7
I.3.2. Les différents défauts	7
I.3.2.1. Les défauts de statorique	7
I.3.2.2. Les défauts rotoriques	10
I.3.2.3. Défauts aux paliers	13
I.3.3. Les effets des défauts	14
I.3.3.1. Effets de défauts statoriques (court-circuit)	14
I.3.3.2. Effets des défauts rotoriques	14
I.3.4. Conséquences des défauts	15
I.4. Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone	15
I.5. Les différentes méthodes du diagnostic	16
I.5.1. Diagnostic des défauts par l'analyse spectrale et le suivi des grandeurs mesurables ...	16
I.5.2. Analyse des courants statoriques	16
I.5.3. Analyses vibratoires de la machine	17
I.5.4. Analyse des flux	17

I.5.5. Analyse du couple électromagnétique.....	18
I.6. Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic	18
I.6.1. Transformée de Fourier Rapide (TFR).....	18
I.6.2. Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG).....	18
I.6.3. Transformée en ondelettes (TO)	19
I.7. Conclusion	19

Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage

II.1. Introduction	21
II.2 .Modèle multi-enroulements	21
II.2.1. Hypothèses simplificatrices	21
II.2.2. Equations des tensions	22
II.2.3. Equation mécanique.....	25
II.3 : Calcule des inductances sans prise en compte des harmoniques d'espace	25
a) -Inductances statoriques	25
b) -Inductances rotoriques	27
c) -Inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques	28
II.4. Modélisation de défaut de cassure de barres rotoriques	29
II.5. Résultats de simulation du moteur asynchrone	29
II.5.1. A l'état sain	29
II.5.2. A l'état de défaut de 4 barres cassées (4 BC)	33
II.6. Conclusion	36

Chapitre III : Méthodes de diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques

III.1. Introduction.....	39
III.2. Transformée de Fourier rapide (TFR)	39
III.3. Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG)	41
III.4. Transformée en ondelettes	42
III.4.1. Transformée en ondelettes continue (TOC)	42

III.4.1.1. Adaptabilité en temps et en fréquence.....	42
III.4.1.2. Atomes temps-fréquence	43
III.4.1.3. Résolution temps-échelle.....	44
III.4.2. Transformée en ondelette discrète (TOD).....	45
III.4.3. Transformée en paquets d'ondelette (TPO).....	49
III.5. Avantages de la transformée en ondelettes.....	50
III.6. Conclusion	52
<i>Chapitre IV: Diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques par la transformée en ondelettes discrète</i>	
IV.1. Introduction.....	54
IV.2 : Allures temporelles des grandeurs électriques utilisées dans le diagnostic.....	54
IV.3 : Analyse par la transformée en ondelettes discrète (TOD)	56
IV.4. Conclusion.....	68
Conclusion Générale	69
Bibliographie.....	70
Annexe.....	74

Introduction générale

Ce travail entre dans le cadre du diagnostic des défauts dans les machines électriques et spécialement le moteur asynchrone à cage d'écureuil. Le moteur asynchrone à cage est un composant clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa grande robustesse et son faible coût. Il est en effet, omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,...

Malgré le fait que la machine asynchrone à cage soit réputée pour être la plus robuste des machines électriques, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques 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 afin d'éviter les arrêts imprévus.

L'objectif principal de notre travail est l'étude des défauts de cassures de barres rotorique dans un moteur asynchrone triphasé à cage fonctionnant en régime non stationnaire.

Pour cela, notre mémoire sera organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous avons fait une synthèse bibliographique sur la machine asynchrone, et les différents défauts, et les différentes techniques de diagnostic.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des modèles de la machine asynchrone pour la simulation des ruptures de barres. Pour cela, nous utilisons le modèle multi-enroulement pour avoir un modèle plus proche de la réalité. Avec ce modèle on peut prendre en considération toutes les mailles formées par les barres de la cage, ce qui facilite la simulation d'une rupture de barre, tout en augmentant la résistance de la barre rompue.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une étude détaillée de la transformées en ondelettes (*TO*).

Dans le quatrième chapitre, nous présentons, respectivement, les résultats de simulation de diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés fonctionnant en régimes non stationnaire (couple de charge variable).

Ces défauts sont diagnostiqués en utilisant les signaux électriques du moteur analysés par la transformé en ondelettes discrète (*TOD*).

Enfin, on terminera ce mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I
ETUDE PRÉLIMINAIRE SUR
LE DIAGNOSTIC DE LA
MACHINE ASYNCHRONE
TRIPHASÉE

I.1. Introduction

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc.... L'apparition dans les années 1980 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 trois dernières décennies.

I.2. Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone 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 admettons que la structure du rotor à cage est électriquement équivalente à celle du rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit [1].

I.2.1. Le stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure I.1). 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 bobine 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 [19].

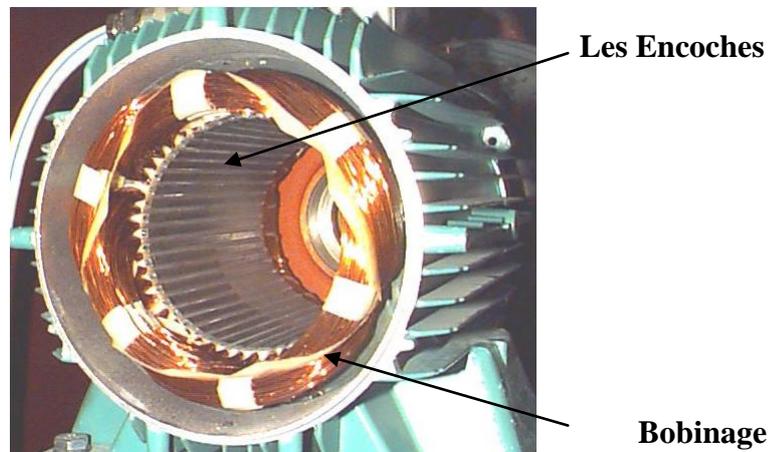


Figure I.1 : *Stator de la machine asynchrone.*

I.2.2. Le rotor

C'est par le rotor, la partie mobile, que la machine asynchrone se distingue de l'autre machine triphasée, la machine synchrone. De manière générale, le rotor est le siège de grandeurs électromagnétiques variables.

I.2.2.1. 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 (figure. I.2). 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 [1], [2].

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.

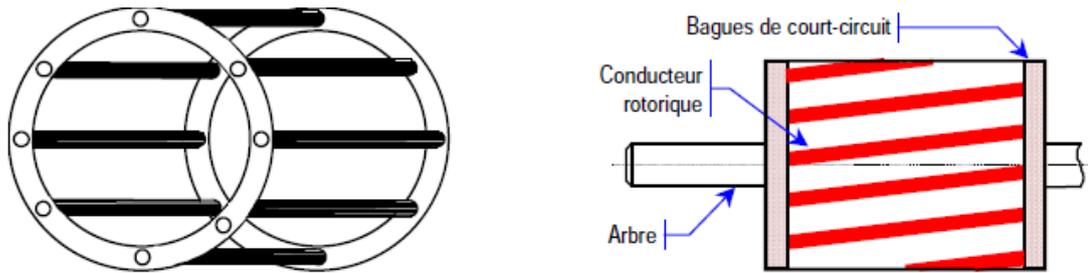


Figure I.2 : Rotor à cage (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux (bagues) de court-circuit.

I.2.2.1. Le rotor bobiné

Le rotor d'une machine bobiné est constitué de trois bobines (on parle aussi de rotor à bague). Chaque bobine est reliée à une bague. Les bagues permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor.

Le rotor est mis en court-circuit par l'extérieur au travers de trois bornes liées électriquement par des contacts glissants appelés bagues réalisées en laiton sur lesquelles s'appliquent des balais de graphite. Les trois enroulements rotoriques sont couplés en étoile à l'intérieur de la machine.

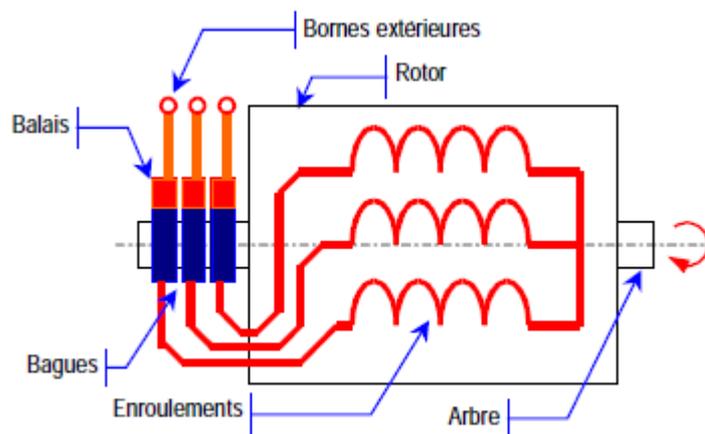


Figure I.3 : Constitution du rotor bobiné.

I.2.3. Les paliers

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil.

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 [3]:

- **les générateurs de panes:** 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)
- électromagnétique
- résiduel (déformation)
- dynamique (arbre de transmission)
- mécanique (roulement)
- environnemental (agression).

I.3.2. Les différents défauts

I.3.2.1. Les défauts de statorique

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 [4].

- ❖ 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 du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant.
- ❖ prématurément le matériau d'isolation.
- ❖ 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 rotorique. 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 [7].

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 statorique 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 [33].

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 [34].

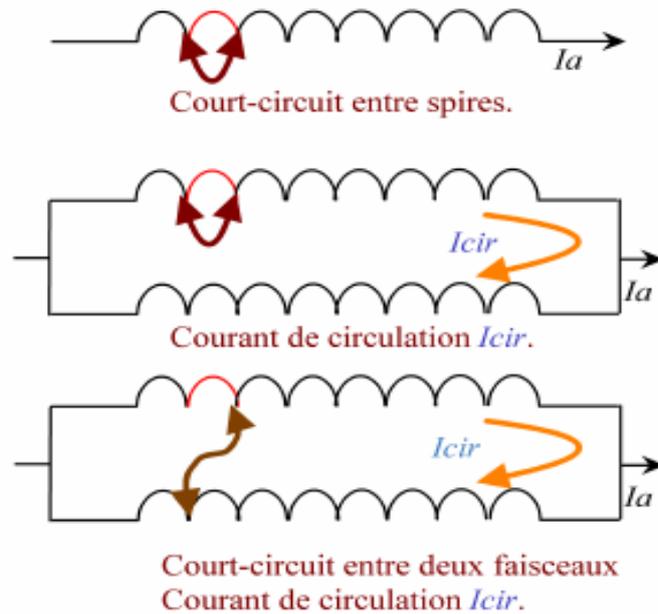


Figure I.4 : Différents courts-circuits.

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.

1.3.2.2. 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) [35]. Trois cas d'excentricité sont généralement distingués [5]:

- 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].

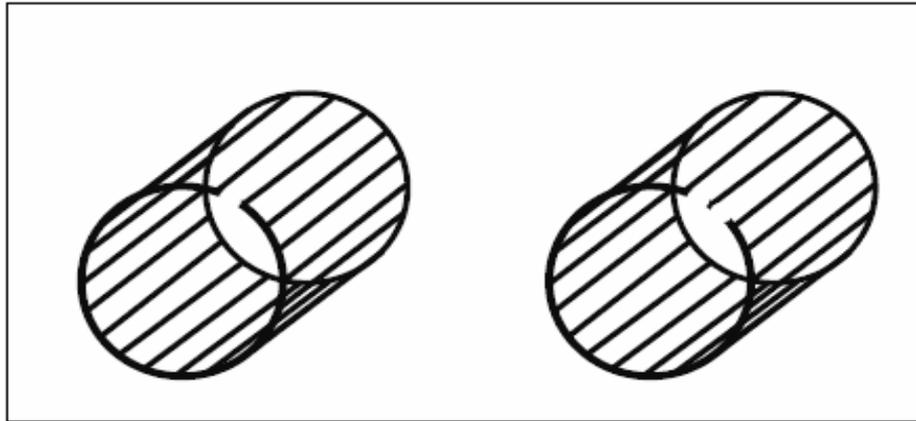


Figure I.6 : Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.

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 [31], [32]:

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

Ou :

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; $k = 1, 2, \dots$. De plus les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défailtantes.



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

1.3.2.3. 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),
- 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.3.3. Les effets des défauts

I.3.3.1. Effets de défauts statoriques (court-circuit)

Les courts-circuits des spires restent parmi les défauts les plus nocifs au bon fonctionnement de la machine asynchrone, ils sont généralement présents au niveau du stator. En effet une étude expérimentale a montré que la valeur de courant circulant dans les spires en court-circuit est de l'ordre de dix fois plus importante que celle du courant nominal absorbé par la machine. Ce courant important entraîne une augmentation considérable de la température au niveau du bobinage, qui engendre à son tour une dégradation continue des isolants, et par accumulation le bousillage de la machine. De part ce qui est cité auparavant, ce genre de défaut fait apparaître des perturbations au niveau du couple électromagnétique, synonyme d'une présence d'une composante supplémentaire du couple ce qui affecte à son tour les courants statoriques, ainsi la création d'un champ magnétique additionnel dans la machine de fréquence $\pm f_s$ (où f_s est la fréquence de synchronisme).

I.3.3.2. Effets des défauts rotoriques

En général les défauts les plus rencontrés au niveau du rotor de la machine asynchrone à cage d'écureuil sont respectivement, barre cassée, et cassure d'une portion d'anneau qui génèrent tous les deux des perturbations remarquables qui affectent le bon fonctionnement de la machine. Ce type de défauts entraînent une création d'un champ tournant de sens opposé à celui généré par le stator, à son tour crée des courants supplémentaires dans le bobinage statorique à des fréquences induites. Ces courants vont générer un couple oscillatoire car il aura interaction entre ces courants et le flux fondamental créé par l'alimentation statorique. Dès lors, ce couple additionnel issu du produit du flux par le courant est proportionnel à l'amplitude de courant et la fréquence $(1-2g)f$. La fréquence d'oscillation sera donc de $2gf$ et engendrera une oscillation de vitesse à cette fréquence dont l'amplitude dépendra de l'inertie du (moteur + charge). Cette oscillation de vitesse va générer une variation de flux, donc une force électromotrice de fréquence fondamentale plus deux supplémentaires liées aux

oscillations de vitesse. Celles-ci sont proportionnelles à l'amplitude de la variation de la vitesse et généreront deux courants additionnels de fréquence $(1-2g)f$ et $(1+2g)f$ [6].

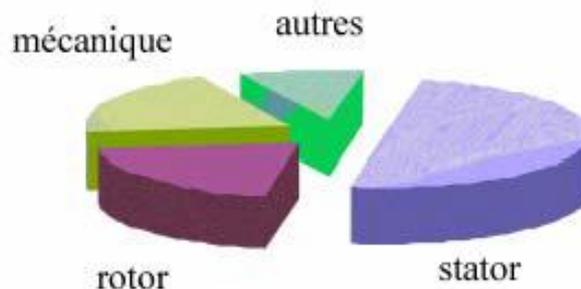
I.3.4. Conséquences des défauts

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, et par conséquent du rendement global.

I.4. Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

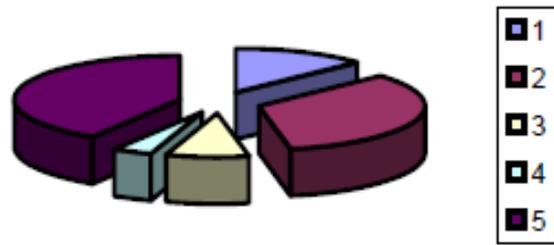
Une étude statistique est effectuée en 1998, par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels, sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50kW à 200kW) a donné les résultats suivants [10] :



Stator : 50 %, Rotor : 20 %, Mécanique : 18 %, Autres : 12 %

Figure I.8: Répartition des défauts pour une machine de moyenne puissance.

Une autre étude statistique a été faite sur les machines de grande puissance (de 100kW à 1MW) a donnée les résultats suivants [10] :



Stator : 13 %, Rotor : 08 %, Couplage mécanique : 04 %, Roulement : 41 %, Autres : 34 %

Figure I.9: Répartition des défauts pour une machine de grande puissance.

I.5. Les différentes méthodes du diagnostic

I.5.1. Diagnostic des défauts par l'analyse spectrale et le suivi des grandeurs mesurables

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres et ou de portions d'anneaux au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation. [12].

La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine.

Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone peuvent être des grandeurs électriques (plus particulièrement les courants de ligne), soit les grandeurs mécaniques (vibration, couple électromagnétique) [8].

I.5.2. Analyse des courants statoriques

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone [9].

Nous savons que le suivi de l'amplitude des composantes caractéristiques de fréquence dans le spectre du courant permet de se renseigner sur l'état de la cage rotorique. Par exemple le spectre du courant statorique lorsque la machine fonctionne avec un rotor sain et un rotor défaillant (une barre cassée). Nous apercevons une nette augmentation de l'amplitude de ces composantes, ce qui traduit la présence d'un défaut au sein de la cage d'écureuil.

I.5.3. Analyses vibratoires de la machine

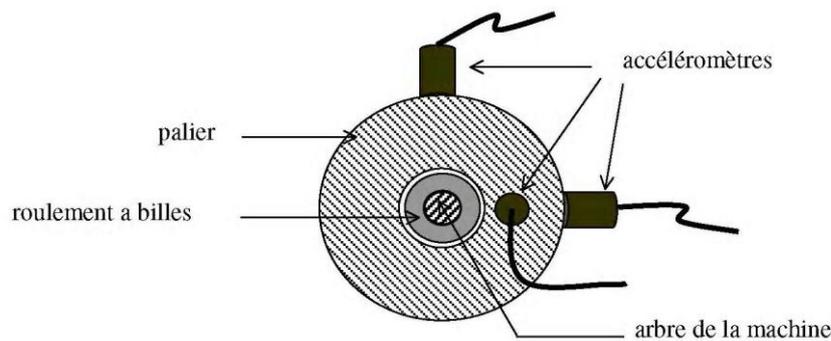


Figure I.10 : Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales. Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts fréquemment rencontrés, notamment ceux mécaniques [7]. Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients [15]:

- Problème d'accessibilité,
- Difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut.

De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant.

Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux.

I.5.4. Analyse des flux

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion est donc affectée par tout déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique au rotor ou au stator. Le flux d'entrefer, le flux embrassé dans les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés [9].

Ces grandeurs sont difficilement mesurables mais des études ont été menées pour extraire des signatures spécifiques à certains défauts. L'étude des variations de flux peut donc être une solution pour détecter et localiser un défaut à travers de l'utilisation de bobines exploratrices placées à l'extérieur de la machine, perpendiculairement à l'axe du rotor.

I.5.5. 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 [11].

I.6. Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic

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, la vitesse, le flux, les vibrations,...etc. Dans ce que suit, on présente brièvement les transformées de Fourier rapide (*TFR*), Fourier à fenêtre glissante (*TFFG*) et la transformée en ondelettes (*TO*).

I.6.1. 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. [22].

I.6.2. Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG)

Pour pallier le manque d'information sur le temps dans la transformée de Fourier, la TFFG est donc introduite. Cette méthode, pouvant être adaptée aux signaux non stationnaires, est très proche de l'analyse de Fourier classique. Son principe est de définir une fenêtre qui sera utilisée comme masque sur le signal, dans laquelle on considère que le signal est

localement stationnaire, puis on décale cette fenêtre le long du signal afin de l'analyser entièrement [16,17].

I.6.3. Transformée en ondelettes (TO)

La transformée en ondelettes est un outil récent de traitement de signal [16]. 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 [18]. 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 [20]. Plusieurs travaux utilisent la TO pour le diagnostic de défauts dans les machines asynchrone triphasée à cage.

I.7. Conclusion

Après avoir étudié et représenté les différentes parties constituant la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil à savoir (stator, rotor, paliers), nous sommes intéressés ensuite à synthétiser les défauts qui se produisent de manière intempestive au niveau de la machine, tout en mettant l'accent sur leurs genèses et effets ainsi sur leurs répartitions, c'est pour quoi nous avons abordé les études statistiques qui convergent vers le même résultats ; c'est bien la dominance des défauts statoriques par rapport aux autres pour des machines de moyenne puissance d'une part, et de l'autre, les défauts des roulements pour des machines de forte puissance.

En arrivant à comprendre même d'une manière approximative le comportement de ces différents défauts et de les cernés, engendre un apport de plus à l'industrie d'une manière générale.

CHAPITRE II
MODÉLISATION DE LA
MACHINE ASYNCHRONE
TRIPHASÉE À CAGE

II.1. Introduction

La machine asynchrone, avec tous ses avantages, peut présenter des défauts structurels variés, qu'ils soient de nature mécanique ou électrique, au niveau du stator ou du rotor. Parmi ces défauts, nous pouvons citer la rupture totale ou partielle des barres rotoriques, tout particulièrement au niveau de la brasure barre-anneau.

La mise au point d'une procédure de diagnostic, à base de modèles analytiques pour les machines asynchrones, nécessite la synthèse d'un modèle capable de tenir compte de sa structure et rendre compte du comportement transitoire de celle-ci.

Pour ce faire, il faut s'orienter vers le modèle multi-enroulements afin de pouvoir représenter individuellement les barres rotoriques pour une description mieux adaptée aux défauts.

La modélisation décrite dans ce chapitre, a pour objet de représenter les barres et les anneaux de court-circuit individuellement pour une machine asynchrone à cage.

II.2 .Modèle multi-enroulements

II.2.1. Hypothèses simplificatrices

Pour pouvoir nous concentrer sur la simulation des ruptures de barres et d'anneaux de court-circuit, nous avons modélisé le rotor par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, elles sont formées par deux barres adjacentes et les portions d'anneaux qui les relient. Chaque barre et segment d'anneau sont caractérisés par une résistance et une inductance (Figure II.1).

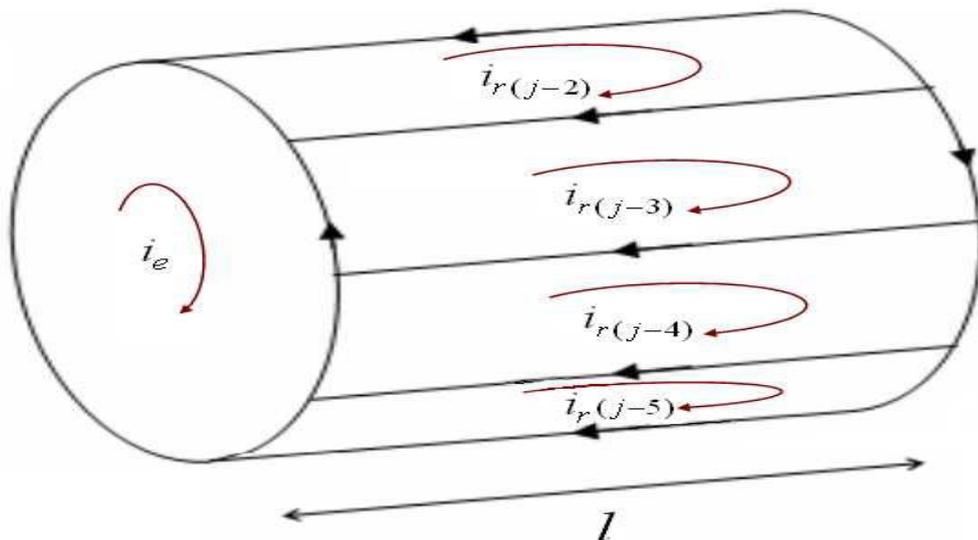


Figure II.11 : Structure multi-enroulements du rotor.

Notre modélisation s’est établie à partir des hypothèses simplificatrices classiques :

- entrefer lisse et constant (effet d'excentricité négligeable, champ radial);
- distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice statorique;
- effet pelliculaire nul - courants de Foucault négligeables hors des barres rotoriques - absence de l’influence de l’échauffement.
- La négligence de la saturation magnétique et son influence sur les circuits magnétiques (perméabilité relative du fer infinie).

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer : La constance des inductances propres – l’additivité des flux – la loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l’angle électrique.

Avec ces hypothèses, et en supposant un stator triphasé sain, de constitution symétrique, nous calculons les différents paramètres du modèle.

II.2.2. Equations des tensions

La figure II.2 montre le circuit électrique équivalent d’une maille rotorique, là où les barres rotorique et les portions d’anneaux de court-circuit sont représentées par leurs résistances et inductances de fuite correspondantes.

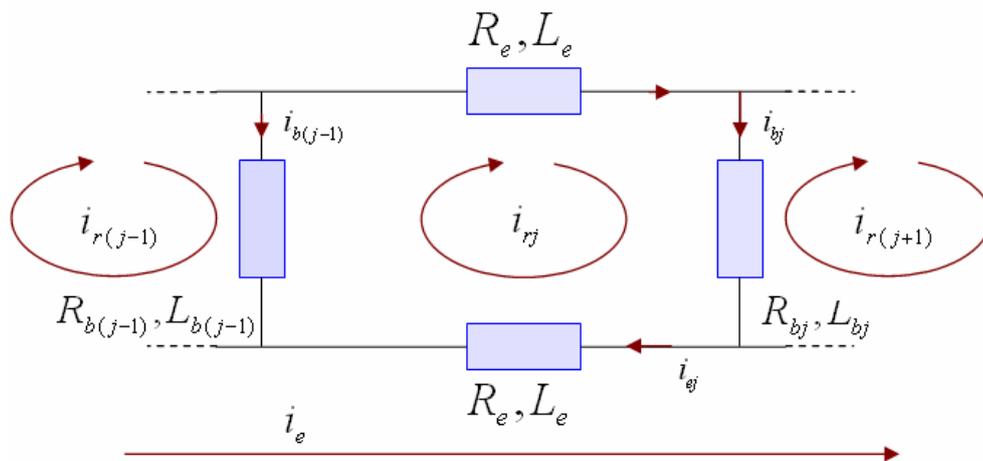


Figure II.12 : Circuit électrique équivalent de la cage rotorique.

En faisant référence à la figure II.2, les équations des tensions des trois phases statoriques et des $(N_b + 1)$ mailles rotoriques seront :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\psi_s]}{dt} \quad (II.1)$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\psi_r]}{dt} \quad (II.2)$$

$[\psi_s]$ et $[\psi_r]$ représentent les vecteurs regroupant les flux totaux à travers les enroulements statoriques et rotoriques respectivement $[I_s]$ et $[I_r]$ sont les courants correspondants, avec :

$$[\psi_s] = [L_{ss}][I_s] + [L_{sr}][I_r] \quad (II.3)$$

$$[\psi_r] = [L_{rs}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \quad (II.4)$$

$$[V_s] = [V_{sA} V_{sB} V_{sC}] \quad (II.5)$$

$$[V_r] = [V_{r1} V_{r2} \dots V_{rN_b} V_{re}]^T \quad (II.6)$$

$$[I_s] = [I_{sA} I_{sB} I_{sC}]^T \quad (II.7)$$

$$[I_r] = [i_{r1} i_{r2} \dots i_{rN_b} i_{re}]^T \quad (II.8)$$

tel que i_{rj} et i_{re} sont respectivement les courants de la maille rotorique et de l'anneau de court-circuit. V_{rj} et V_{re} sont les tensions correspondants avec, pour un rotor à cage (mailles court-circuitées), $V_{re} = 0$ et $V_{rj} = 0$; $j = 1, 2 \dots N_b$

Les matrices des résistances sont des matrices symétriques. $[R_s]$ est une matrice 3×3 , tandis que $[R_r]$ possède $(N_b + 1) \times (N_b + 1)$ éléments qu'on peut reconstituer à partir des lois relatives aux circuits électriques.

Soit dans ce cas:

$$[R_s] = r_s [I] \quad (II.9)$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{r1} + R_{rN_b} + 2R_e & -R_{r1} & 0 & \dots & -R_{rN_b} & \vdots & -R_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & -R_{r(j-1)} & R_{rj} + R_{r(j-1)} + 2R_e & -R_{rj} & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_{rN_b} & 0 & \dots & \dots & R_{r(N_b-1)} + R_{rN_b} + 2R_e & \vdots & -R_e \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -R_e & \dots & \dots & \dots & -R_e & \vdots & N_b R_e \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

Avec : $[I]$ la matrice identité, r_s la résistance d'une phase statorique, R_{rj} la résistance de la $j^{ème}$ barre rotorique et R_e la résistance d'un segment d'anneau de court-circuit.

Comme le montrent les expressions (II.11) et (II.12), les matrices des inductances statoriques et rotoriques sont des matrices 3×3 et $(N_b + 1) \times (N_b + 1)$ respectivement, exprimées en diagonale par les inductances propres de chaque enroulement, et dans le reste, par les inductances mutuelles entre enroulements (phases statoriques ou mailles rotoriques). Les expressions détaillées des éléments de chaque matrice seront exposées par la suite.

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_A & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_B & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{mr} + 2(L_b + L_\epsilon) & L_{r1r2} - L_b & \cdots & L_{r1r(N_b-1)} & L_{r1rN_b} - L_b & \vdots & -L_\epsilon \\ L_{r2r1} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_\epsilon) & \cdots & L_{r2r(N_b-1)} & L_{r2rN_b} & \vdots & -L_\epsilon \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{r(N_b-1)r1} & L_{r(N_b-1)r2} & \cdots & L_{mr} + 2(L_b + L_\epsilon) & L_{r(N_b-1)rN_b} - L_b & \vdots & -L_\epsilon \\ L_{rN_b r1} - L_b & L_{rN_b r2} & \cdots & L_{rN_b r(N_b-1)} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_\epsilon) & \vdots & -L_\epsilon \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -L_\epsilon & -L_\epsilon & -L_\epsilon & -L_\epsilon & -L_\epsilon & \vdots & N_b L_\epsilon \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Quant à $[L_{Sr}]$, elle comporte $3 \times (N_b + 1)$ éléments qui constituent les inductances mutuelles entre les phases statoriques et les mailles rotoriques. Et elle est donnée par :

$$[L_{Sr}] = \begin{bmatrix} L_{Ar1} & L_{Ar2} & \cdots \cdots \cdots & L_{Ar(N_b-1)} & L_{ArN_b} & 0 \\ L_{Br1} & L_{Br2} & \cdots \cdots \cdots & L_{Br(N_b-1)} & L_{ArN_b} & 0 \\ L_{Cr1} & L_{Cr2} & \cdots \cdots \cdots & L_{Cr(N_b-1)} & L_{ArN_b} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

La où L_{Arj} représente l'inductance mutuelle entre la phase statorique A et la $j^{ème}$ maille rotorique. Pour ce qui est de $[L_{rS}]$, elle est une matrice $3 \times (N_b + 1)$ qu'on obtient de la même façon en posant à la place des L_{Arj} les inductances mutuelles L_{rjA} . L'inductance mutuelle entre chaque phase statorique et l'anneau de court-circuit est négligée du fait qu'ils peuvent être assimilés à des bobines à axes perpendiculaires.

En regroupant les équations (II.1) dans (II.2) dans une même équation matricielle nous aboutissons à :

$$[V] = [R][I] + \frac{d([L].[I])}{dt} \quad (\text{II.14})$$

ce qui donne :

$$[V] = [R][I] + [I] \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \frac{d[L]}{d\theta_r} + [L] \cdot \frac{d[I]}{dt} \quad (\text{II.15})$$

$$[V] = [R][I] + [I]\Omega_r \frac{d[L]}{d\theta_r} + [L] \cdot \frac{d[I]}{dt} \quad (\text{II.16})$$

Tel que :

$$[V] = \begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix}, [I] = \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

$$\Omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.20})$$

θ_r est la position angulaire du rotor mesurée par rapport à une référence de phase fixe par rapport au stator. Elle est appelée aussi angle mécanique. Ω_r représente la vitesse mécanique de l'arbre de la machine.

II.2.3. Equation mécanique

Selon l'application à laquelle est désigné le moteur, il est possible de définir l'équation mécanique du mouvement associé par :

$$J_T \frac{d\Omega_r}{dt} + f_v \Omega_r = C_e - C_r \quad (\text{II.21})$$

Où C_e est le couple électromagnétique, C_r le couple résistant, f_v le coefficient de frottement visqueux et J_T le moment d'inertie total des parties tournantes.

Si $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont constantes, et $[L_{sr}] = [L_{rs}]$, le couple électromagnétique sera défini par :

$$C_e = \frac{1}{2} [I_s]^T \frac{d[L_{sr}]}{d\theta_r} [I_r] \quad (\text{II.22})$$

II.3 : Calcul des inductances sans prise en compte des harmoniques d'espace

a) -Inductances statoriques

On suppose que les enroulements statoriques sont idéalement distribués autour du périphérique de l'entrefer de sorte que l'induction résultante puisse être supposée sinusoïdale. Dans ce cas, l'expression de la FMM de la première phase statorique A sera [24] :

$$F_A(\varphi) = \frac{2N_s}{\pi p} i_A \cos(p\varphi), \quad (\text{II.23})$$

N_s est le nombre total des tours de chaque phase, p le nombre de paires de pôles, φ un angle décrivant une position particulière dans l'espace ; cet angle est mesuré par rapport à une référence fixe par rapport au stator i_A , et le courant traversant la phase A. La densité du flux radial créée dans l'entrefer tiendra l'expression:

$$B_A(\varphi) = \frac{2\mu_0 N_s}{\pi g_0 p} \cdot i_A \cos(p\varphi) \quad (\text{II.24})$$

où μ_0 désigne la perméabilité magnétique de l'air g_0 , et l'épaisseur de l'entrefer de la machine symétrique (entrefer constant).

Sachant que :

$$d\phi = B_A ds \quad (\text{II.25})$$

Par intégration de l'expression (II.25) autour d'un intervalle polaire, nous obtenons l'expression du flux magnétique dans l'entrefer par pôle tel que :

$$\phi = \int_0^l dz \int_{\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_A(\varphi) r d\varphi \quad (\text{II.26})$$

Etant donné que l'entrefer de la machine est supposé uniforme, et qu'on néglige toute asymétrie axiale, l'expression (II.26) se réduit à:

$$\phi = \frac{4\mu_0 N_s r l}{\pi g_0 p^2} \cdot i_A \quad (\text{II.27})$$

où r désigne le rayant moyen de l'entrefer de la machine symétrique, et l la longueur effective de la machine.

Le flux total traversant l'enroulement de la phase A dû au courant i_A est donné par :

$$\psi = \phi \cdot N_s = \frac{4\mu_0 N_s^2 r l}{\pi g_0 p^2} \cdot i_A \quad (\text{II.28})$$

L'inductance de magnétisation et le flux par unité de courant. Par conséquent, elle est égale à

$$L_{Am} = \frac{\psi_A}{i_A} = \frac{4\mu_0 N_s^2 r l}{\pi g_0 p^2}. \quad (\text{II.29})$$

L'inductance totale dans la phase A est égale à la somme de l'inductance de magnétisation et l'inductance de fuite correspondant au flux de fuite d'encoches, au flux de fuite des têtes de bobines...etc. Son expression est :

$$L_A = L_{Am} + L_{fA} \quad (\text{II.30})$$

Les enroulements statoriques étant identiques et symétriques, ce qui fait que :

$$L_A = L_B = L_C \quad (\text{II.31})$$

Et du fait qu'ils sont décalés de $3/2\pi$, les inductances mutuelles entre enroulements statoriques auront pour valeurs :

$$\begin{aligned}
L_{AB} &= L_{BA} = L_{Am} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = \frac{-L_{Am}}{2} \\
L_{BC} &= L_{CB} = L_{Am} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) = \frac{-L_{Am}}{2} \\
L_{AC} &= L_{CA} = L_{Am} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = \frac{-L_{Am}}{2}
\end{aligned} \tag{II.32}$$

b) -Inductances rotoriques

En définissant les flux rotoriques qui entrent en jeu, et en faisant référence à la représentation équivalente du rotor, il sera possible de donner l'expression des différentes inductances. La figure II.3 représente, en fonction de l'ouverture angulaire α_r , dans un référentiel lié au rotor, l'allure de l'induction magnétique dans l'entrefer, supposée radiale, produite par une maille rotorique. Cela en admettant que les barres rotoriques sont identiques, régulièrement décalées et séparées l'une de l'autre par un angle $\alpha_r = 2\pi/N_b$ (rad).

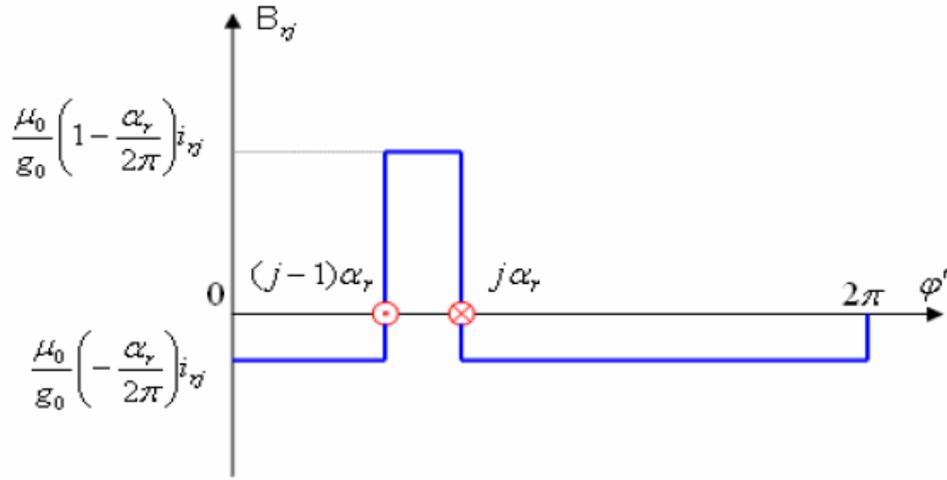


Figure II.13 : Champ produit par une maille rotorique.

Chaque maille rotorique est considérée comme étant une bobine à une spire parcourue par un courant i_{rj} , et qui sera le siège d'un flux propre ψ_{rjrj} tel que :

$$\psi_{rjrj} = \int_0^l dz \int_{(j-1)\alpha_r}^{j\alpha_r} \frac{\mu_0 r}{g_0} \left(1 - \frac{\alpha_r}{2\pi}\right) i_{rj} d\varphi. \tag{II.33}$$

Il en résulte que :

$$\psi_{rjrj} = \frac{\mu_0 r l}{g_0} \left(1 - \frac{\alpha_r}{2\pi}\right) \alpha_r i_{rj}. \tag{II.34}$$

Par conséquent, l'inductance de magnétisation est égale à :

$$L_{mrj} = \frac{\psi_{rjrj}}{i_{rj}} = \frac{2\pi\mu_0(N_b-1)rl}{g_0 N_b^2}. \tag{II.35}$$

L'inductance totale de la $j^{ème}$ maille rotorique s'obtient par la sommation de l'inductance de magnétisation de cette maille et les inductances de fuite des deux barres et des deux portions d'anneau de court-circuit formant la maille. Son expression sera :

$$L_{rj} = L_{mrj} + L_{bj} + L_{b(j+1)} + 2L_e = L_{mrj} + 2(L_b + L_e). \quad (\text{II.36})$$

Le flux traversant la $k^{ème}$ maille, produit par le courant i_{rj} circulant dans la maille j est donnée par :

$$\psi_{rkrj} = \int_0^l dz \int_{(k-1)\alpha_r}^{k\alpha_r} \frac{\mu_0 r}{g_0} \left(\frac{-\alpha_r}{2\pi} \right) i_{rj} d\varphi'. \quad (\text{II.37})$$

Pour $k \neq j$, on a :

$$\psi_{rkrj} = \frac{\mu_0 r l}{g_0} \left(\frac{-\alpha_r}{2\pi} \right) i_{rj} \alpha_r. \quad (\text{II.38})$$

De ce fait, l'expression de L_{rkrj} sera donnée par :

$$L_{rkrj} = \frac{\psi_{rkrj}}{i_{rj}}.$$

Tenant compte des inductances de fuites, il est possible de déduire les expressions des inductances mutuelles entre la $j^{ème}$ maille et les autres mailles du circuit rotorique.

$$L_{r(j+1)j} = \frac{\psi_{r(j+1)rj}}{i_{rj}} - L_{b(j+1)} = \frac{-2\pi\mu_0 r l}{g_0 N_b^2} - L_b \quad (\text{II.39})$$

$$L_{r(j-1)j} = \frac{\psi_{r(j-1)rj}}{i_{rj}} - L_{bj} = \frac{-2\pi\mu_0 r l}{g_0 N_b^2} - L_b \quad (\text{II.40})$$

Et pour les mailles non adjacentes on obtient:

$$L_{rkj} = \frac{\psi_{rkrj}}{i_{rj}} = \frac{-2\pi\mu_0 r l}{g_0 N_b^2} \quad (\text{II.41})$$

c) -Inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques

Pour transformation dans le repère lié au rotor, on a :

$$\varphi = \varphi' + \theta_r = \varphi' + \Omega_r t \quad (\text{II.42})$$

L'équation (II.18) de la densité du flux d'entrefer créée par le courant i_A , sera comme suit :

$$B_A(\varphi') = \frac{g_0 N_b^2}{\pi g_0 p} \cdot i_A \cos[p(\varphi' + \omega_r t)]. \quad (\text{II.43})$$

Le flux parcourant la maille rj sera :

$$\psi_{rjA} = \int_0^l dz \int_{(j-1)\alpha}^{j\alpha} B_A(\varphi') r d\varphi'. \quad (\text{II.44})$$

et tenant compte de (II.43), il résulte:

$$\psi_{rjA} = M \cdot i_A \cos \left[p \left(\frac{2(j-1)\pi}{N_b} + \Omega_r t \right) \right]. \quad (\text{II.45})$$

avec

$$M = \frac{4\mu_0 N_s r l}{\pi g_0 p^2} \sin\left(\frac{\pi p}{N_b}\right). \quad (\text{II.46})$$

Les inductances mutuelles entre la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique et les phases statoriques seront données par :

$$L_{rjA} = \frac{\psi_{rjA}}{i_A} = M \cdot \cos\left[p\left(\frac{2(j-1)\pi}{N_b} + \Omega_r t\right)\right]. \quad (\text{II.49})$$

$$L_{rjB} = \frac{\psi_{rjB}}{i_B} = M \cdot \cos\left[p\left(\frac{2(j-1)\pi}{N_b} + \Omega_r t\right) - \frac{2\pi}{3}\right]. \quad (\text{II.50})$$

$$L_{rjC} = \frac{\psi_{rjC}}{i_C} = M \cdot \cos\left[p\left(\frac{2(j-1)\pi}{N_b} + \Omega_r t\right) - \frac{4\pi}{3}\right]. \quad (\text{II.51})$$

II.4. Modélisation de défaut de cassure de barres rotoriques

Une cassure d'une barre peut être totale ou bien partielle. Partant de la structure multi-enroulements, la cassure partielle d'une barre est souvent modélisée par élévation de sa résistance à des taux reflétant le degré de sévérité voulu. Une cassure totale se traduit par l'annulation complète de la branche équivalente dans la structure multi-enroulements diminuant ainsi le nombre de mailles rotoriques à flux radiaux à (N_b-1) . Les mailles résultantes ne sont plus identiques ce qui impose une restructuration du modèle d'état [21]. Une forte augmentation de la résistance des barres rotoriques peut aussi modéliser leur cassure totale [22].

II.5. Résultats de simulation du moteur asynchrone

II.5.1. A l'état sain

Les paramètres du moteur utilisé pour la simulation sont présentés dans l'annexe C. La figure II.4 montre l'évolution des courants statoriques, i_a , i_b , i_c en régime permanent et la figure II.5 montre l'évolution du courant statorique aux régimes transitoire et permanent. La figure II.6 montre l'évolution de la vitesse de rotation et la figure II.7 montre l'évolution du couple électromagnétique. L'évolution du courant dans la première barre rotorique est montrée dans la figure II.8. Ces allures sont obtenues lors d'un démarrage à vide sous une tension nominale du moteur. A l'instant $t = 0.8$ s, nous procédons à un échelon de couple résistant de 50 Nm, le couple électromagnétique vient équilibrer le couple résistant et la vitesse de rotation diminue. Les courants statoriques et le courant rotorique de la première barre rotorique augmentent à des valeurs proportionnelles au couple résistant appliqué.

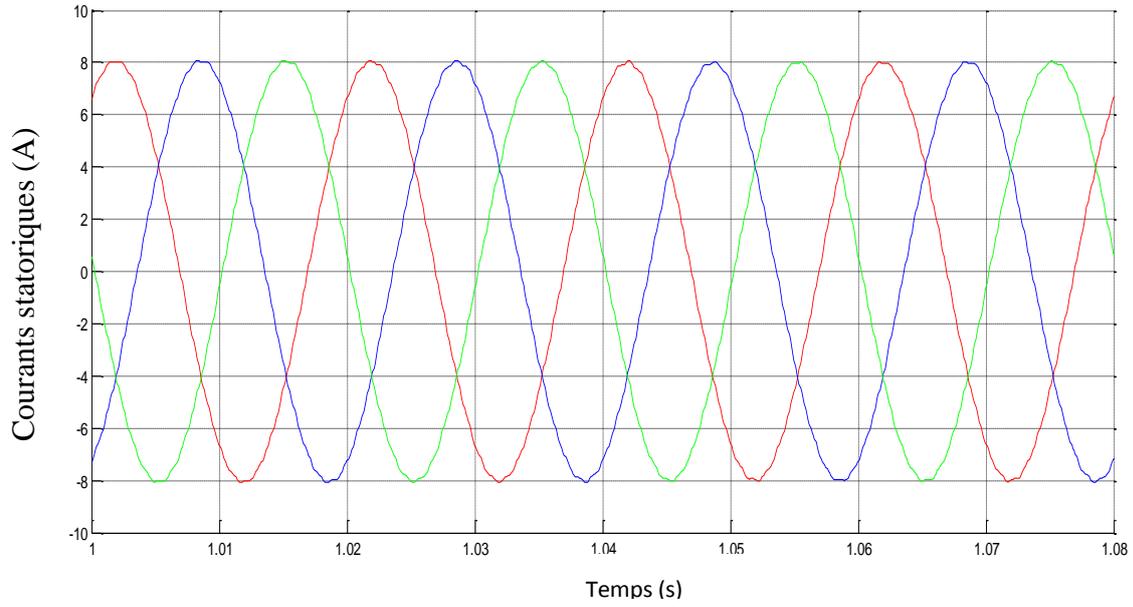


Figure II.14 : Courants statoriques du moteur asynchrone à l'état sain.

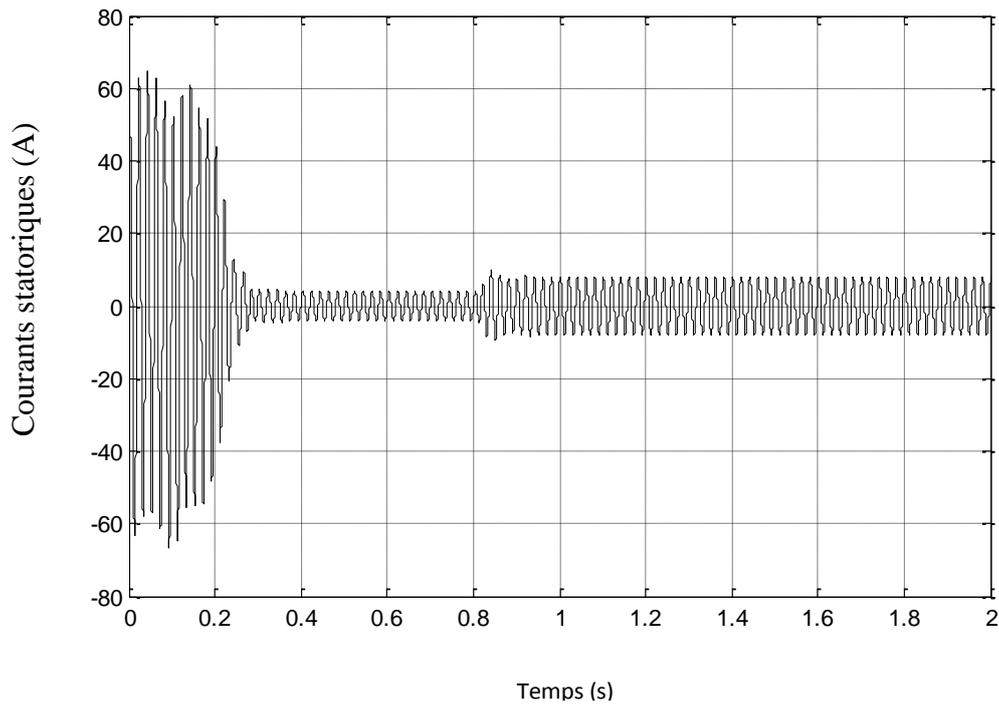


Figure II.15: courant statorique du moteur asynchrone à l'état sain.

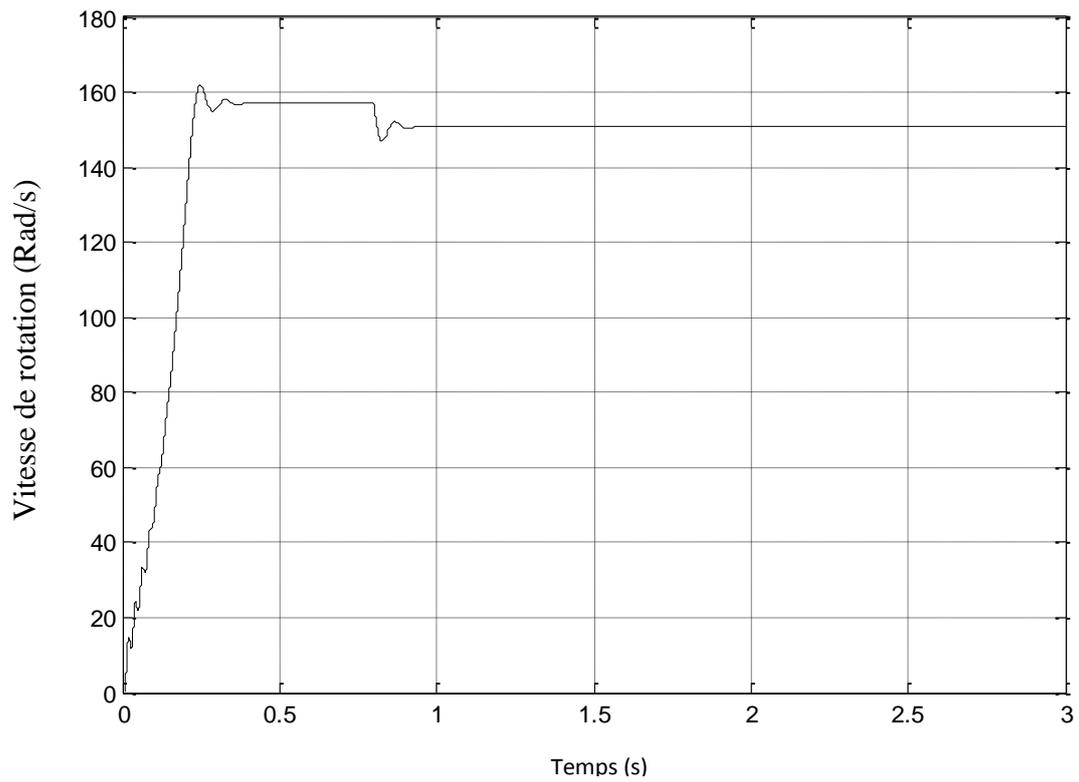


Figure II.16 : Vitesse de rotation du moteur asynchrone à l'état sain.

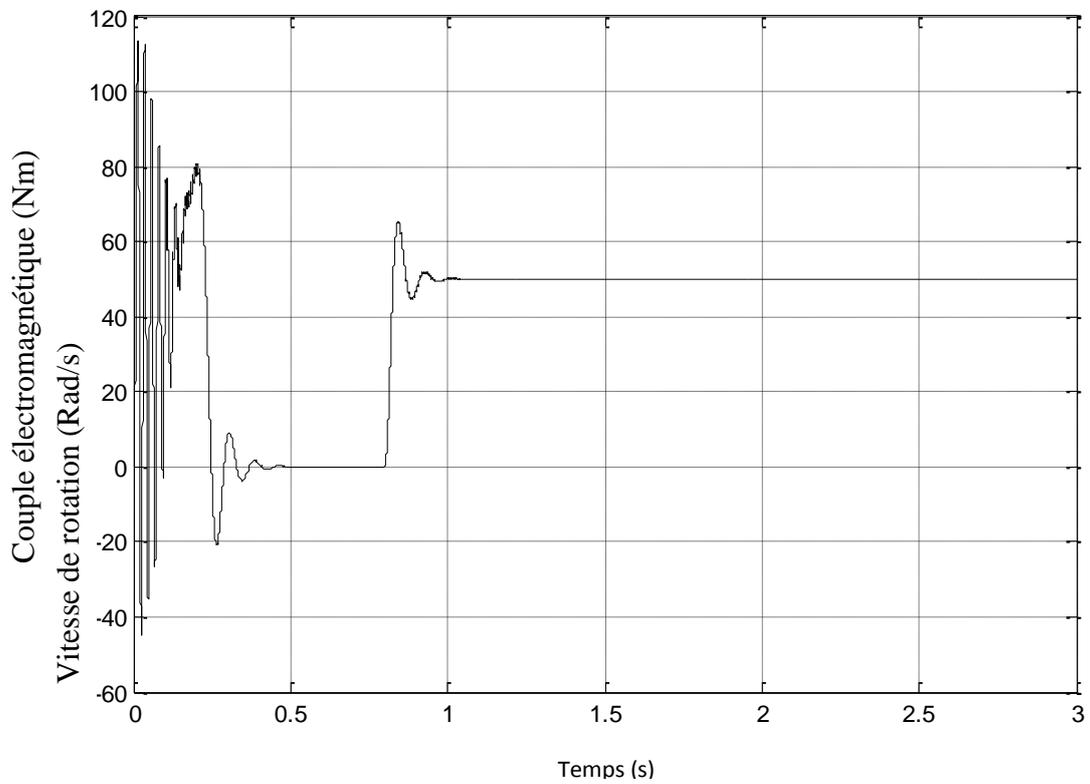


Figure II.17 : Couple électromagnétique du moteur asynchrone à l'état sain.

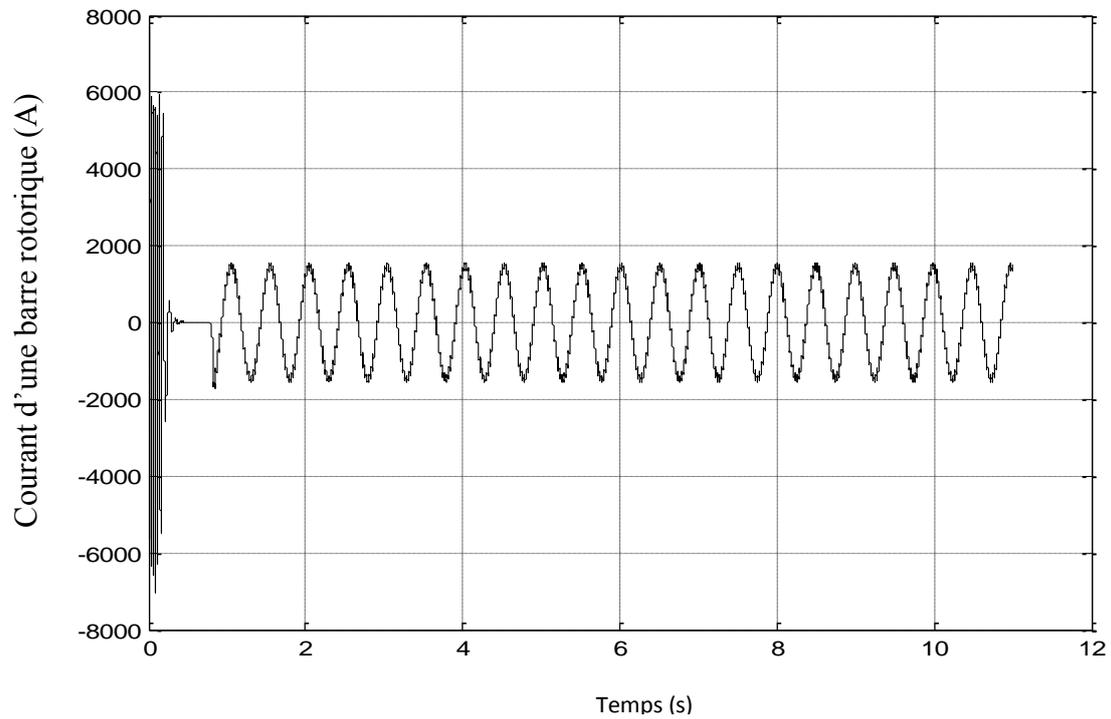


Figure II.18 : Courant d'une barre rotorique du moteur asynchrone à l'état sain.

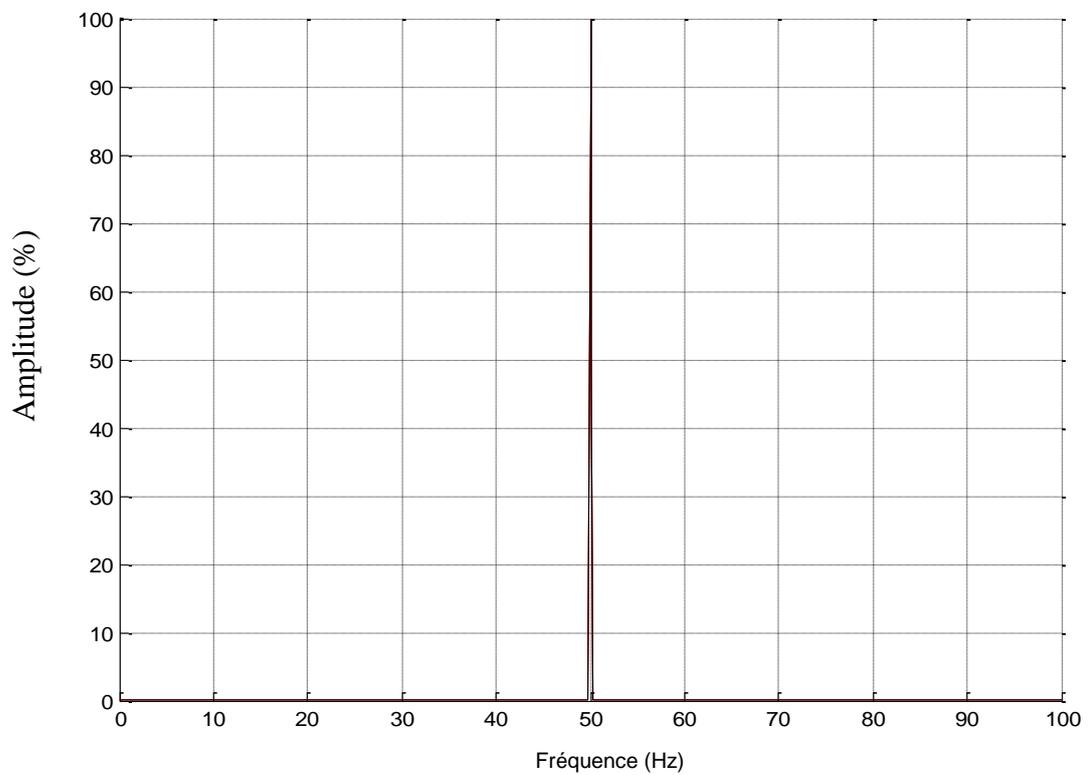


Figure II.19 : la FFT du courant statorique à l'état sain

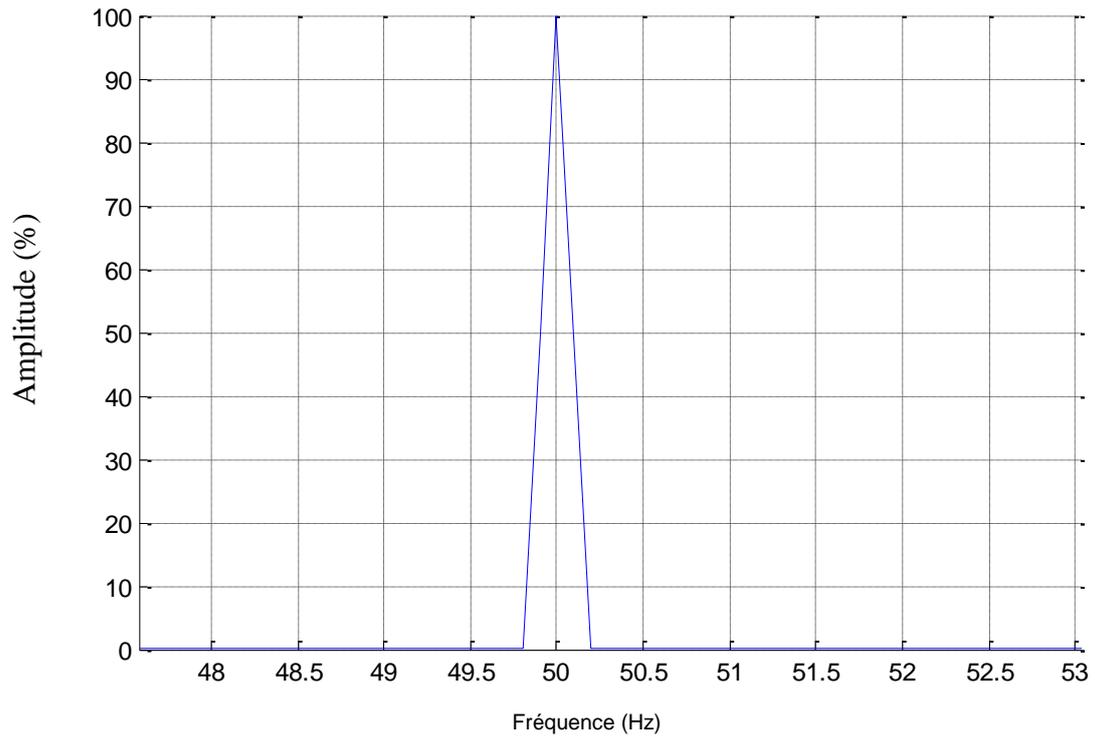


Figure II.20 : Zoom de FFT du courant statorique à l'état sain
II.5.2. A l'état de défaut de 4 barres cassées (4 BC)

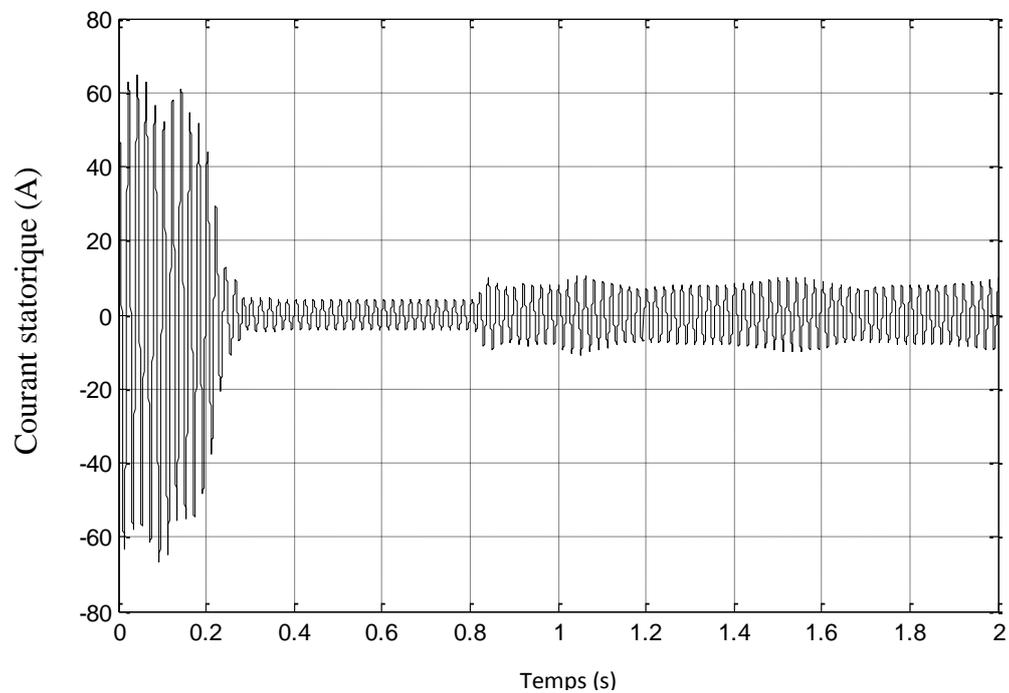


Figure II.21 : Courant statorique du moteur asynchrone avec 4 BC.

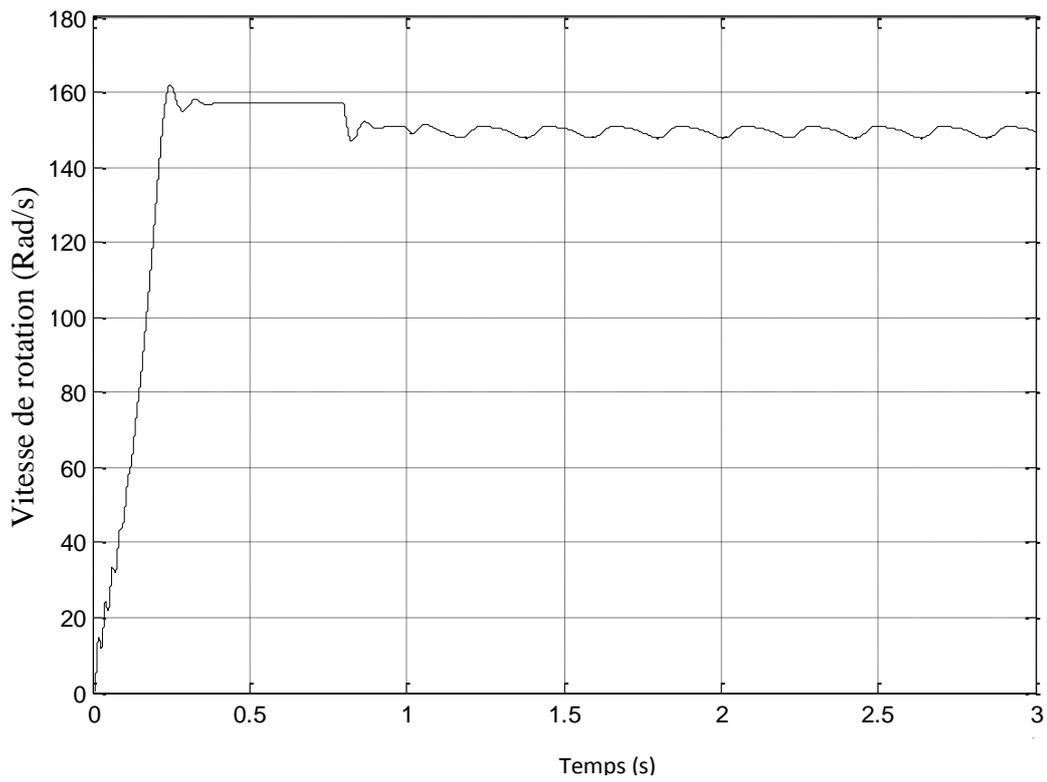


Figure II.22 : Vitesse de rotation du moteur asynchrone avec 4 BC.

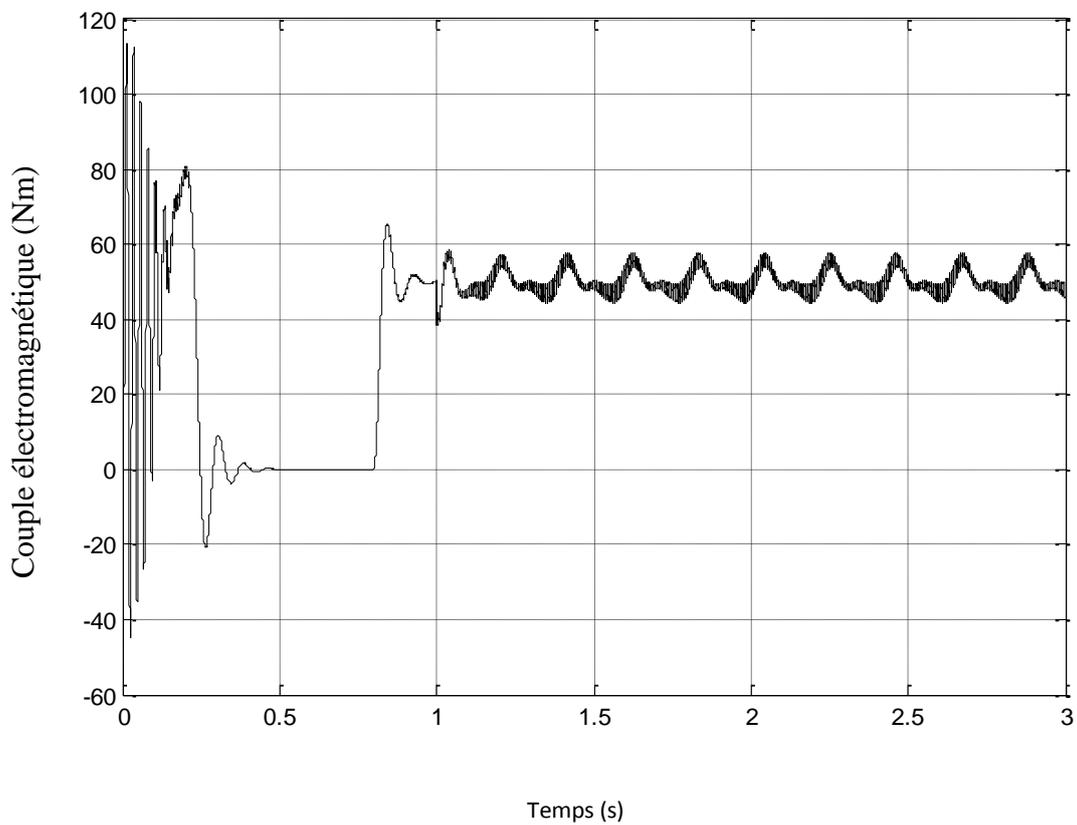
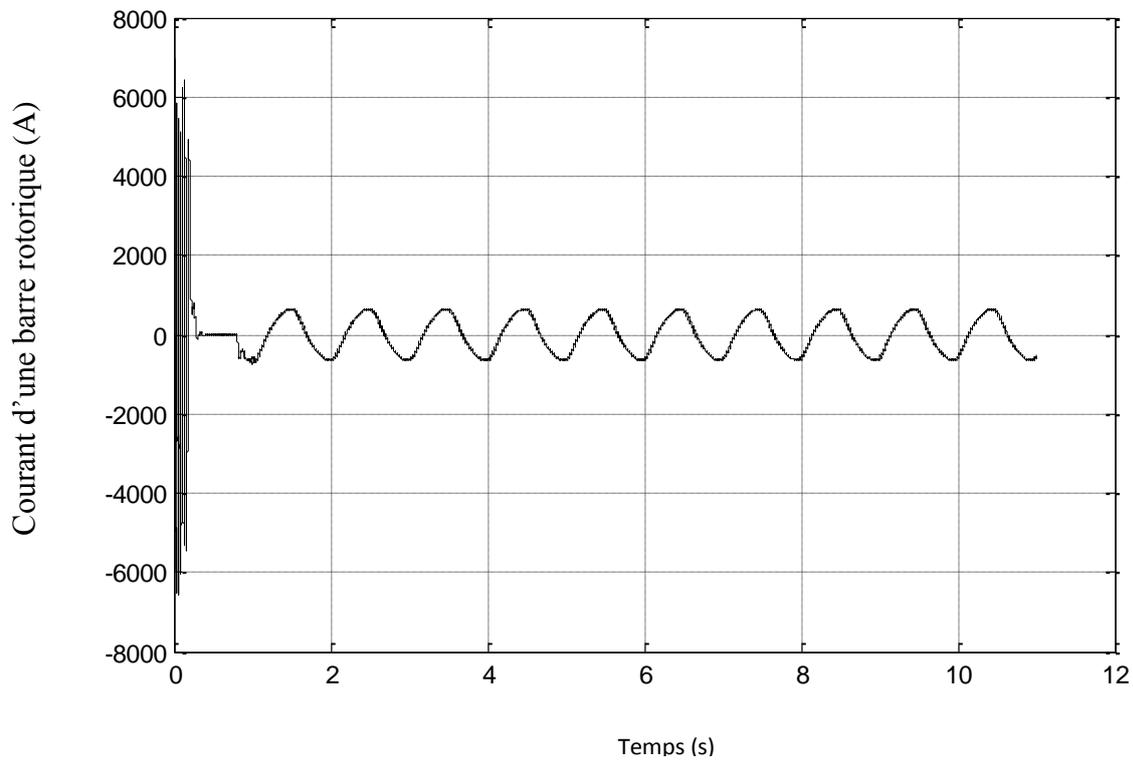
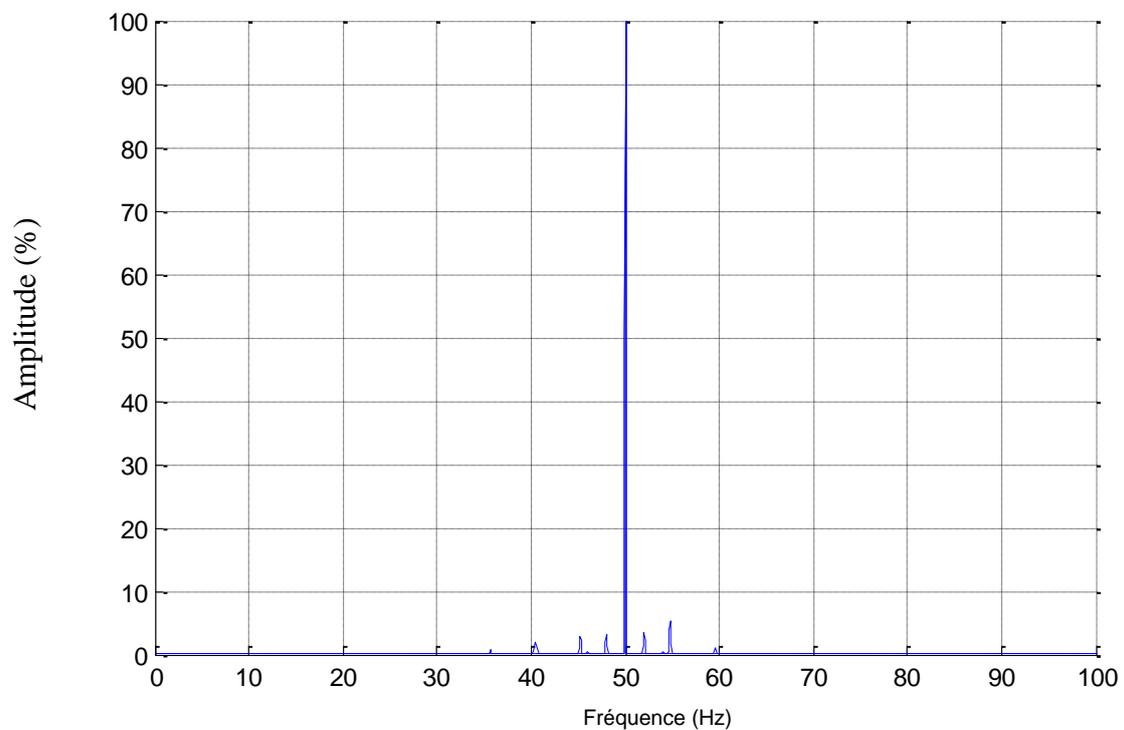


Figure II.23 : Couple électromagnétique du moteur asynchrone avec 4 BC.**Figure II.24 :** Courant d'une barre rotorique du moteur asynchrone avec 4 BC.**Figure II.25 :** FFT du courant statorique à l'état de 4 BC.

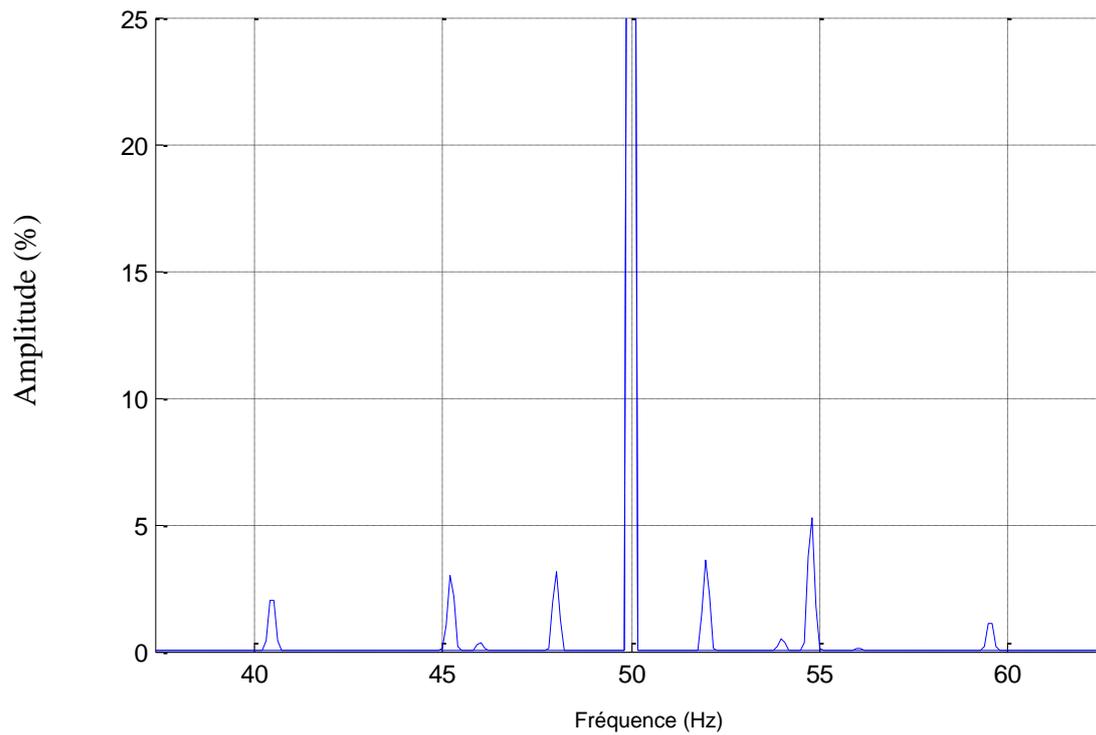


Figure II.26 : Zoom de la FFT du courant statorique à l'état de 4 BC.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle permettant la simulation de la machine asynchrone triphasée à cage. Ce modèle nous permet de bien modéliser les défauts de cassure de barres rotoriques. Le chapitre suivant sera consacré au développement des méthodes de diagnostic des machines asynchrones.

CHAPITRE III

MÉTHODES DE DIAGNOSTIC

DES DÉFAUTS DE CASSURE

DE BARRES ROTORIQUES

III.1. Introduction

En réflexion de la séismologie, Morlet a su que les impulsions souterraines modulées envoyées ont une durée trop longue en hautes fréquences pour séparer les retours des couches fines et étroitement alignées. Au lieu d'émettre des impulsions de durées égales, il a ainsi pensé à envoyer des formes d'onde plus courtes en hautes fréquences. De telles formes d'onde sont simplement obtenues en mesurant une fonction simple appelée une ondelette. Bien que Grossmann ait travaillé dans la physique théorique, il a identifié dans l'approche de Morlet quelques idées qui étaient près de son propre travail sur les états logiques de quantum. Presque quarante ans après Gabor, Morlet et Grossmann ont réactivé une collaboration fondamentale entre la physique théorique et le traitement des signaux, qui a mené à la formalisation de la transformée en ondelettes continue. Cependant, ces idées n'étaient pas totalement nouvelles pour les mathématiciens travaillant dans l'analyse harmonique, ou aux chercheurs de vision d'ordinateur étudiant le traitement d'image en multi échelles. C'était ainsi seulement le début d'une catalyse rapide qui a rassemblé des scientifiques de domaine très différent.

III.2. Transformée de Fourier rapide (TFR)

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 [25]:

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (\text{III. 1})$$

Son inverse est donnée par :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) e^{j2\pi f t} df \quad (\text{III. 2})$$

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

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x(kT) e^{\frac{-j2\pi f kT}{NT}} \quad (\text{III. 3})$$

et sa relation inverse est donnée par :

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{\frac{j2\pi f kT}{NT}} \quad (\text{III. 4})$$

La transformée de Fourier rapide (*TFR*) est un algorithme de calcul rapide de la TFD. L'algorithme de base de cette transformé utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2, ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la TFD, de $2N / \log(N)$.

Le signal sous sa forme fréquentielle $x(f)$ est le plus souvent étudié par l'analyse de la courbe $|x(f)|^2$ définissant l'amplitude du spectre à chaque fréquence. Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal $x(t)$. En effet, la TFR décompose le signal $x(t)$ sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux $\{e^{j2\pi f}\}$ $f \in R$. Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la TFR s'avère inadéquate. Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence. Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps. Dans le cas de l'existence de sauts, d'impulsions ou de changements de fréquence par exemple, la TFR ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent dans le signal [20, 37, 38].

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. Dans ce cas, c'est le changement instantané de la fréquence tout au long du temps qui nous intéresse et pas nécessairement la fréquence elle même. Il faut donc mettre à profit les caractéristiques et les propriétés statistiques du signal afin de faire apparaître les évènements le constituant.

Suite aux travaux fondamentaux de Gabor [26], Ville [27] et de Wigner [28] sur les représentations temps-fréquence (*RTF*), le sujet est quasiment devenu une discipline scientifique à part entière. Les RTF sont utilisés dans de nombreux domaines d'applications, pour la détection et pour la classification [29]. Plus récemment, la transformée en ondelettes a gagné en popularité et est devenue l'analyse la plus utilisée surtout dans le domaine industriel.

L'objectif commun de toutes ces représentations est d'offrir une description détaillée et pertinente des signatures temps-fréquence composant le signal. Dans ce qui suit, nous donnerons un bref aperçu sur la transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG), la distribution de Wigner-Ville (DWV) et la transformée en ondelettes (TO).

III.3. Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG)

Contrairement à la TF qui évalue le contenu fréquentiel d'un signal $x(t)$ en l'étudiant sur tout son domaine temporel, la transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG) estime le contenu fréquentiel du signal $x(t)$ dans une fenêtre localisée dans le temps [23]. Elle peut s'interpréter comme la projection du signal analysé sur des atomes temps-fréquences de Gabor. Ces atomes sont construits par une translation en temps d'une fenêtre unique $h(t)$ et une modulation $h_{b,f}(t) = h(t - b)e^{+j2\pi t f}$. L'énergie de $h_{b,f}$ est concentrée au voisinage de b sur un intervalle de longueur T_h . Sa transformée de Fourier s'obtient en translatant de f la transformée de Fourier \hat{h} de h :

$$h_{b,w}(w) = h(w - f)e^{-j2\pi t(w-f)}$$

L'énergie de $h_{b,w}$ est localisée au voisinage de la fréquence f sur un intervalle de largeur B_h . Dans le plan temps-fréquence (t, w) , l'étalement de l'énergie de l'atome est représenté par un rectangle d'Heisenberg. Ce rectangle a pour centre (b, f) avec une largeur temporelle T_h et une largeur fréquentielle de B_h (Figure. III.1).

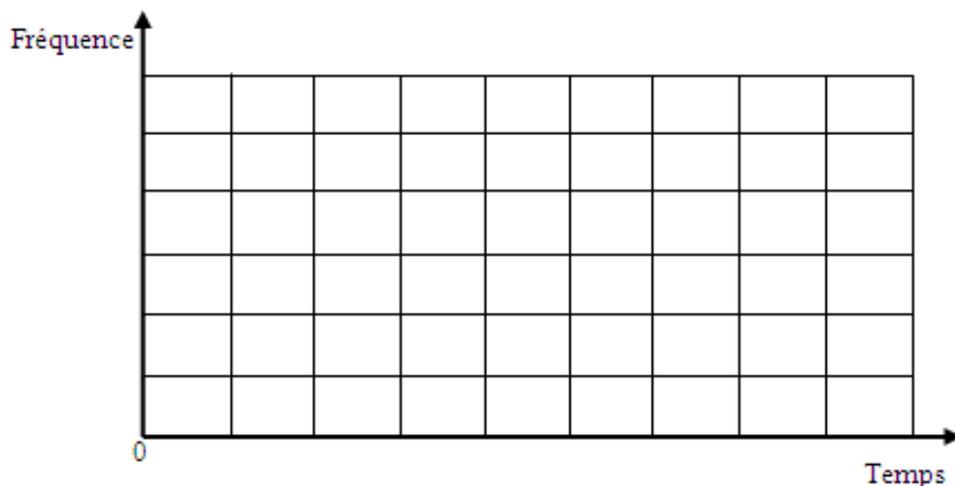


Figure III.127 : Pavage de la transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG).

Le principe de la TFFG consiste à effectuer une TF du signal $x(t)$ multipliée au préalable par la fenêtre $h(t - b)$. Chaque fenêtre h est lissée, bien localisée et de courte durée T_h pendant laquelle $x(t)$ est considéré comme stationnaire. h est en plus réelle, symétrique : $h(t) = h(-t)$ et normalisée à $\|h\| = 1$, afin d'avoir $\|h_{b,f}\| = 1$ pour tout $(b, f) \in \mathbb{R}^2$. L'application de la TFFG sur le signal $x(t)$ fournit une représentation à deux dimensions dépendant du temps et de la fréquence [68]. Sa formule est :

$$F_x(b, f) = \langle x, h_{b,f} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)h(t - b)e^{-j2\pi tf} dt \quad (\text{III. 5})$$

où la fonction qui associe $h(t - b)$ à b est la fenêtre qui sélectionne la durée T autour de l'instant b .

III.4. Transformée en ondelettes

III.4.1. Transformée en ondelettes continue (TOC)

III.4.1.1. Adaptabilité en temps et en fréquence

Si un signal $x(t)$ est la somme de plusieurs composantes dont les dérivées de fréquence instantanée sont très différentes, il est impossible de visualiser de façon concentrée toutes les composantes avec la TFFG. Dans ce cas, il serait nécessaire que la taille de la fenêtre soit variable suivant la position dans le plan temps-fréquence, et c'est justement le principe de la transformée en ondelettes. Les composantes d'un même signal n'évoluent pas forcément de la même manière, leur comportement varie selon qu'elles soient en hautes ou en basses fréquences. Naturellement, une composante de type basse fréquence nécessite par essence un temps d'observation suffisamment long pour pouvoir être correctement analysée. A l'inverse, une composante de type haute fréquence évolue rapidement et nécessite un temps d'observation plus réduit pour être analysée. C'est justement l'adaptabilité de l'analyse de la transformée en ondelettes qui permettra d'analyser différemment ces composantes. Il existe un grand nombre d'ondelettes offrant une grande diversité d'analyse. Il existe également diverses transformées continues ou discrètes. Ainsi, la transformée en ondelettes permet une représentation temps-échelle ou temps-fréquence du signal dans un même plan.

III.4.1.2. Atomes temps-fréquence

C'est comme une alternative à la transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG) que la transformée en ondelettes continue [23] a été développée afin de pallier les difficultés de résolution temps-fréquence. Morlet en 1983 [13], pour l'étude en haute résolution des signaux sismiques, propose une transformée où la taille de la fenêtre est variable, ceci grâce à un paramètre d'échelle. Cette transformée en ondelettes est une décomposition atomique dont les atomes sont issus d'une même fonction, l'ondelette mère, par opérations de translation et dilatation. Cette ondelette, appelée ainsi car représentant des oscillations, comme une onde, mais limitée en temps d'où le nom de la petite onde. Elle doit être bien localisée en temps et en fréquence. On conduit l'analyse en ondelettes de la même manière que l'analyse par la TFFG. Le signal est multiplié par une fonction semblable à la fonction de fenêtrage de la TFFG. La fenêtre modulée $h(t)e^{j2\pi ft}$ de la TFFG a été remplacée par une ondelette $\frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$. La translation est liée à la localisation de la fenêtre, à mesure que cette fenêtre est décalée sur l'étendue du signal. L'échelle peut s'interpréter comme l'inverse d'une fréquence $1/f$. De même que la TFFG, la transformée en ondelette permet de mesurer les variations temporelles des composantes spectrales de $x(t)$. Cependant, il existe une grande différence entre les deux transformées. Pour analyser des composantes transitoires de durées différentes, la transformée en ondelettes décompose les signaux sur une famille d'ondelettes translatées et dilatées. La largeur de la fenêtre est donc modifiée pour chacune des composantes spectrales individuellement, ce qui se traduit par une résolution temps-fréquence différente de celle de la TFFG. Ce dernier point est la caractéristique la plus significative de la transformée en ondelettes. Une famille d'atomes temps-échelle s'obtient à partir d'une ondelette unique, en la dilatant d'un facteur d'échelle a et en la translatant de b

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III. 6})$$

La transformée en ondelettes de $x \in L^2(\mathfrak{R})$ au temps t et à l'échelle a se calcule en projetant $x(t)$ sur la famille d'ondelettes, $\psi_{t/a}(s)$; $t \in \mathfrak{R}$ et $a \in \mathfrak{R}^+$. La représentation temps-échelle obtenue est appelée transformée en ondelettes continue (TOC), sa définition est :

$$T_x(b, a) = \langle x, \psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{III. 7})$$

Sa version fréquentielle est donnée par :

$$T_x(b, a) = |a|^{1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \psi^*(af) e^{j2\pi f b} df \quad (\text{III. 8})$$

La fonction $b \rightarrow \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)$, dans l'équation (II. 34), sélectionne la durée $aT\psi$ autour de b , $T\psi$ étant la durée de l'ondelette ψ . Pour une ondelette $\psi(f)$ de fréquence centrale $0f$, la fonction $f \rightarrow \psi^*(af)$, dans l'équation (II.35), sélectionne par contre la bande $B\psi$ étant la largeur de la bande de l'ondelette ψ . Le module de $T_x(b, a)$ mesure alors l'amplitude du signal dans la fenêtre centrée sur $(b, f) = (b, \frac{f_0}{a})$ et de dimension $(aT\psi, \frac{B\psi}{a})$ dans le plan temps-fréquence. L'image $|T_x(b, a)|^2$ est appelée le scalogramme. La transformée est donc une fonction de deux paramètres, la translation temporelle b et l'échelle a . $\psi(f)$ est l'ondelette mère, et doit être localisée aussi bien en temps qu'en fréquence. Pour cela elle doit satisfaire certaines conditions d'admissibilité [23]:

– $\psi(f)$ doit être absolue et de carré intégrable :

$$\int |H(f)|^2 \frac{df}{|f|} = 1 \quad (\text{III. 9})$$

Cette première propriété impose que l'ondelette $\psi(f)$ ait un spectre $H(f)$, dont la décroissance soit au moins en $|f|^{-2}$.

– elle doit être de moyenne nulle, autrement dit, le spectre de $\psi(f)$ s'annule à l'origine:

$$\int \psi(f) dt = H(0) = 0 \quad (\text{III. 10})$$

III.4.1.3. Résolution temps-échelle

Contrairement au comportement rigide de la TFFG, la transformée en ondelettes adopte un comportement dynamique, lié au zoom adaptatif de l'échelle a , pour suivre les singularités et les irrégulières du signal analysé. Avec une ondelette ψ réelle, les variations brutales du signal $x(t)$ produisent de grands coefficients d'ondelettes et la singularité locale est liée à la décroissance de $T_x(b, a)^2$ lorsque a tend vers 0 [20].

La notion de représentation temps-échelle ou espace-échelle permet de voir la transformée en ondelettes comme un microscope mathématique, le zoom étant l'échelle et l'optique, l'ondelette. Le paramètre échelle est très similaire à la notion d'échelle pour les cartes géographiques. En tant qu'opération mathématique, les grandes échelles, ou basses fréquences, dilatent le signal et correspondent à des vues plus globales non détaillées du signal. Les petites échelles, ou hautes fréquences, correspondent à des vues détaillées et donnent des informations détaillées sur un motif caché dans le signal.

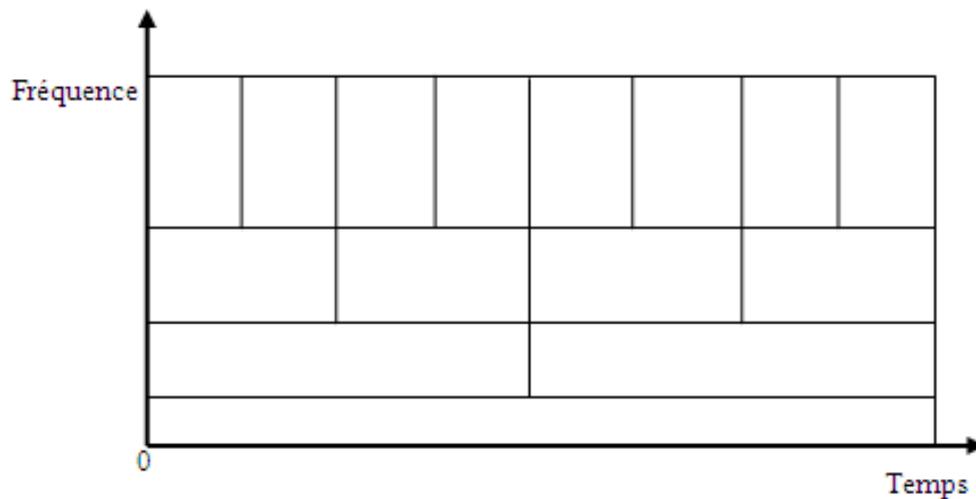


Figure III.28 : Pavage de la Transformée en ondelettes (TO).

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 (Figure III.2).

III.4.2. Transformée en ondelette discrète (TOD)

Pour mettre en oeuvre 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 (III.11). b_0 dépend de l'ondelette choisie.

$$(b, a) = (nb_0 a_0^m, a_0^m), b_0 > 0, a_0 > 1, m \in \mathbf{Z} \quad (\text{III.11})$$

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 (III.12).

$$\psi_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) = a_0^{-\frac{m}{2}} \psi(a_0^{-m}t - nb_0) \quad (\text{III.12})$$

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

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

Dans la formalisation de l'analyse multi-résolution, deux choix de discrétisation sont possibles. Le premier consiste en une décomposition continue où a est très proche de 1 et b 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 ($a=2, b=1$) correspond à un échantillonnage dyadique du plan temps-fréquence (transformée en ondelettes discrète, *TOD*) [23].

La *TOD* n'est envisageable qu'à la condition que les ondelettes soient orthogonales. L'orthogonalité signifie que l'information capturée par une ondelette est totalement décorrélée de celle capturée par une autre. Cela permet de ne garder que l'information nécessaire et suffisante afin d'assurer la réversibilité. Une ondelette mère orthogonale et sa fonction d'échelle permettent d'effectuer une analyse multi-résolution orthogonale : les espaces de détail et d'approximation sont alors orthogonaux, c'est-à-dire que la projection des vecteurs de la base de l'un des espaces sur l'autre donne zéro. Chaque ondelette et sa fonction d'échelle associée sont également orthogonales [20]. Une famille très populaire a été créée par Ingrid Daubechies [39]. L'ondelette de Daubechies d'ordre 4 (db4) et sa fonction d'échelle sont illustrées sur la figure III.3.

Une des raisons du succès de la transformée en ondelette est son implantation matérielle efficace. La méthode la plus répandue pour implanter une transformée en ondelette est l'utilisation de bancs de filtre sous forme d'une structure pyramidale, technique qui

provient des travaux de Mallat [18]. Deux filtres FIR (Finite Impulse Response) calculent à chaque niveau les coefficients d'ondelette (les détails) et les coefficients d'échelle (les approximations), ils possèdent alors des caractéristiques respectivement passe-haut et passe-bas. Pour garder le même nombre d'échantillons en sortie et en entrée, les produits de convolution issus des filtres sont sous-échantillonnés par un facteur deux. Seule la sortie du filtre passe-bas, c'est-à-dire l'approximation, est de nouveau traitée par les deux filtres. Cette structure pyramidale est illustrée sur la figure III.4. La transformée inverse peut être obtenue en faisant tourner l'algorithme à l'envers et en utilisant une autre paire de filtres FIR. Les quatre filtres (deux pour la décomposition et deux pour la reconstruction) associés au sous-échantillonnage forment un banc de filtres conjugués en quadrature.

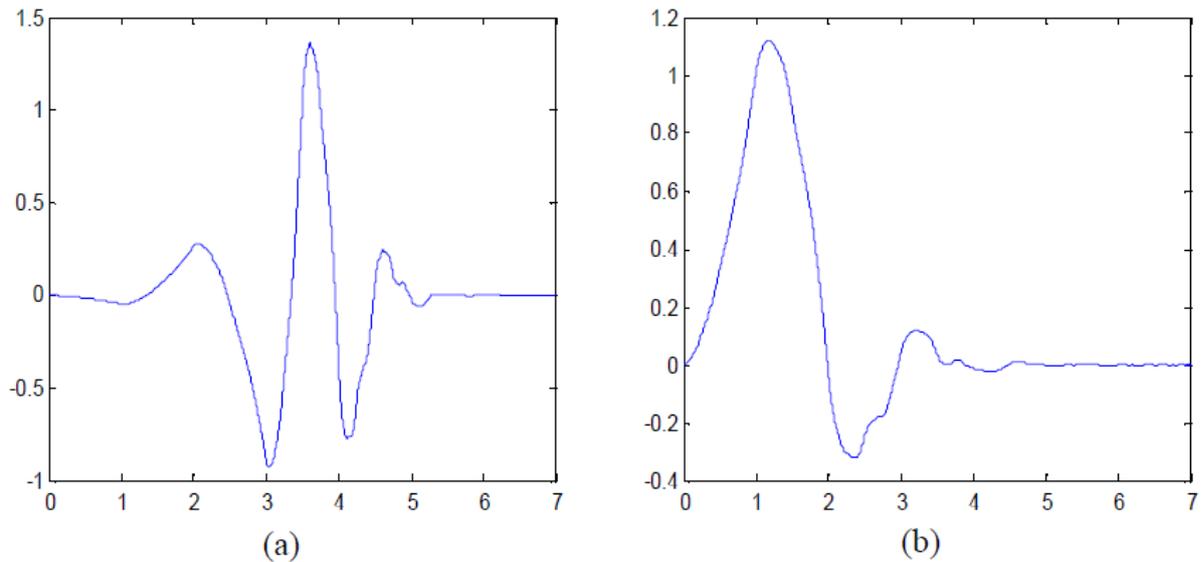


Figure III.329 : Ondelette de Daubechies 4, db4 (a) et sa fonction d'échelle (b).

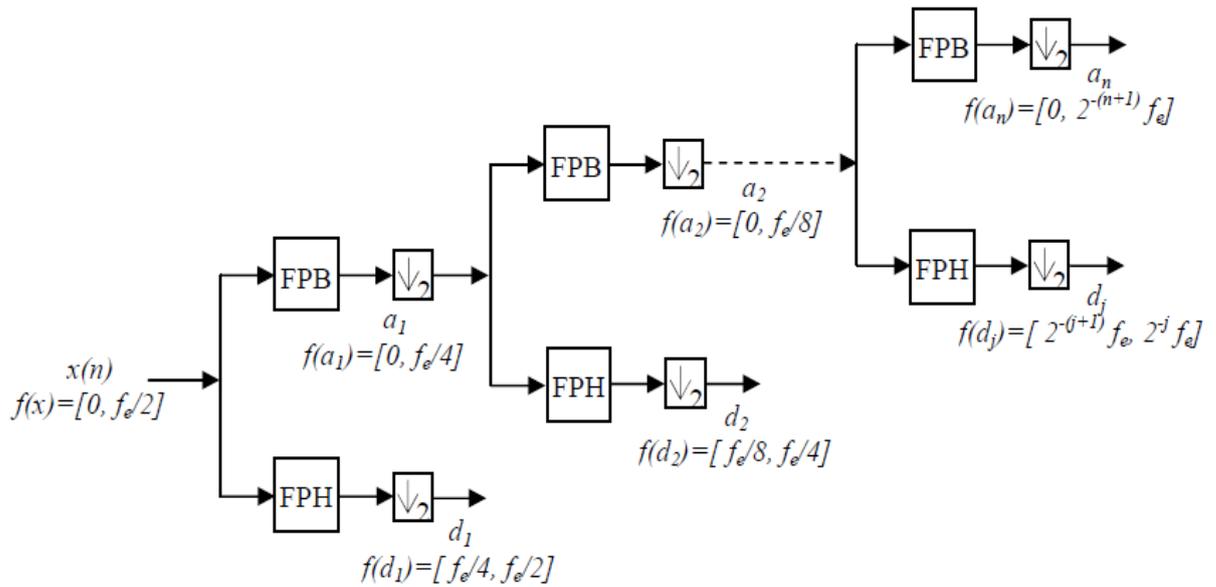


Figure III.430 : Principe de la décomposition par la transformée en ondelettes discrète au niveau n (FPB : Filtre Passe Bas, FPH : Filtre Passe Haut, 2 : décimation).

Etant donné un signal discret $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, la TOD le décompose en différents signaux de détail d_j et d'approximation a_n . Les fréquences correspondants aux signaux de détail d_j et d'approximation a_n sont données par :

$$f(d_j) \in [2^{-(j+1)} f_e, 2^{-j} f_e] \text{ Hz}, f(a_n) \in [0, 2^{-(j+1)} f_e] \text{ Hz} \quad \text{(III. 14)}$$

Les signaux d'approximation et de détail donnent l'évolution temporelle des composantes de fréquence du signal original x , qui sont contenues dans ses bandes de fréquence. Le processus de filtrage n'est pas idéal ce qui conduit à un certain chevauchement entre les bandes de fréquences adjacentes. Selon l'application de la TOD, cet effet peut entraîner une distorsion si certaine composante de fréquence du signal est proche de la limite d'une bande. L'utilisation des fonctions d'ondelettes avec des filtres d'ordre élevé peut surmonter ce problème en diminuant la largeur de la bande de chevauchement. La réponse en fréquence des fonctions d'ondelettes db5 et db44 sont présentés dans la figure II.5. Il est bien clair que db5 a la plus grande bande de chevauchement par rapport à la db44.

Avant l'application de la TOD, le type de l'ondelette mère et le nombre de niveaux de la décomposition doivent être préalablement sélectionnés. Le choix de l'ondelette mère est lié aux coefficients des filtres utilisés dans le processus de filtrage de la TOD [15].

Au cours des dernières décennies, plusieurs familles d'ondelettes avec différentes propriétés mathématiques ont été développées. L'ondelette mère peut être choisie en fonction du compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul.

Le nombre de niveaux de la décomposition est déterminé par la fréquence d'échantillonnage f_e et les composantes basses fréquences à extraire. A cet effet, la condition donnée en (III.15) doit être vérifiée. Cette condition implique que la limite inférieure de la bande de fréquence qui contient la composante caractéristique de défaut est inférieure à cette fréquence de défaut.

$$l > \frac{\log\left(\frac{f_e}{f_b}\right)}{\log(2)} - 1 \quad (\text{III.15})$$

Les énergies correspondants aux signaux de détail d_j et d'approximation a_n peuvent être calculées par (III.16) et (III.17), respectivement [38]:

$$E(a_n) = \sqrt{\frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} (a_n)^2 [i]} \quad (\text{III.16})$$

$$E(d_j) = \sqrt{\frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} (d_j)^2 [i]} \quad (\text{III.17})$$

III.4.3. Transformée en paquets d'ondelette (TPO)

Les transformées en ondelettes imposent une « trame » de résolutions : depuis l'ondelette mère, en appliquant les dilatations successives pour construire la base d'ondelettes, un ensemble de fonctions est conçu dont les résolutions en temps et en fréquences sont liées entre elles. Le principe des paquets d'ondelette est d'adapter les résolutions temps-fréquence en fonction du signal étudié [23] :

- pour les ondelettes, la résolution temporelle est a priori optimale pour une fréquence donnée.
- pour les paquets d'ondelette, la résolution est adaptée au contenu de la carte temps-fréquence: la résolution temps-fréquence peut être choisie a posteriori en fonction des types de signaux étudiés.

Comme pour les transformées en ondelette discrètes orthogonales, les paquets d'ondelette nécessitent l'emploi d'ondelettes orthogonales. Le principe de la décomposition en paquets d'ondelette est de réitérer le processus de décomposition d'un signal en approximation et en détail non plus uniquement sur les coefficients d'approximation mais aussi sur ceux de détails. On dispose alors d'un plus grand nombre d'espaces de projection. La figure III.5 représente l'algorithme pyramidal étendu permettant d'obtenir les coefficients. Cet arbre de décomposition peut être vu comme un tableau de coefficients où les cellules de chaque ligne se décomposent en deux sous arbres correspondant à des sous-espaces orthogonaux.

Pour respecter l'objectif d'orthogonalité, sont considérées valides les décompositions qui forment une base complète dans le sens horizontal de ce tableau sans superpositions dans le sens vertical. L'arbre de décomposition obtenu donne le choix de la décomposition: décomposition complète, coefficients d'ondelette classique, ou encore toute décomposition orthogonale valide.

III.5. 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 [24] :

- 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 transformée en ondelette peut représenter complètement et efficacement un signal quelconque avec peu de coefficients.

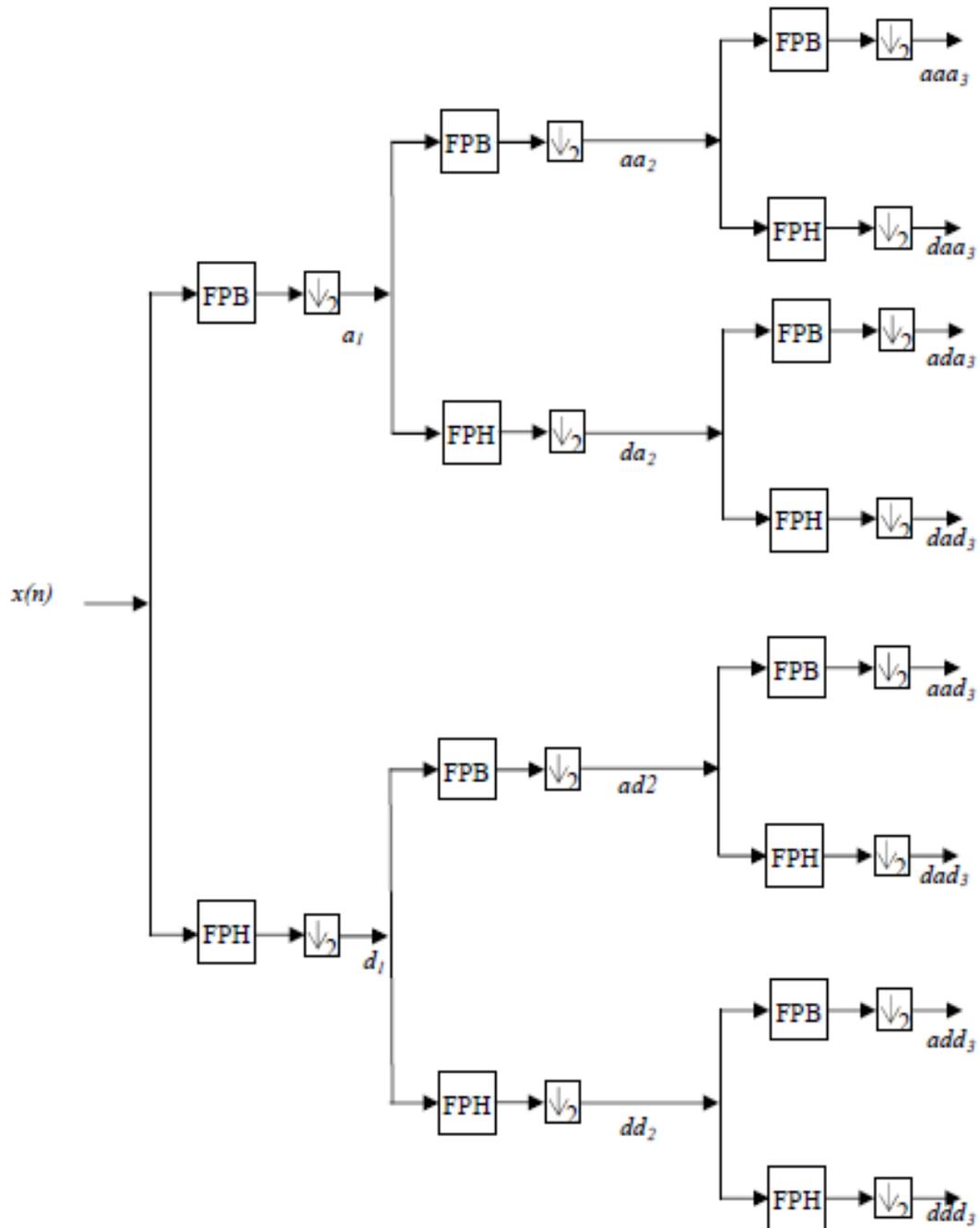


Figure III.5 31: Principe de la décomposition par la transformée en paquets ondelette au niveau 3.

III.6. Conclusion

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

Le chapitre suivant sera consacré au diagnostic du de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone en régime non stationnaire utilisant la transformée en ondelettes discrète (*TOD*).

CHAPITRE IV
DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS
DE CASSURE DE BARRES
ROTORIQUES PAR LA
TRANSFORMÉE EN
ONDELETTES DISCRETE

IV.1. Introduction

Ce chapitre expose les résultats de simulation du diagnostic du défaut de cassure de barres rotoriques du moteur asynchrone triphasé à cage en régime non stationnaire (couple de charge variable). Ce défaut est diagnostiqué en utilisant les signaux du courant statorique instantané i_a , la puissance active instantanée (*PAI*) et le module du vecteur de Park (*MVP*) analysés par la transformée en ondelettes discrète (*TOD*).

La simulation du défaut de cassure de barres s'obtient par l'augmentation de la résistance de la barre concernée par le défaut.

Les signaux intéressants et leurs bandes de fréquences sont présentés dans Tableau. IV.1

Tableau IV.1 : *Bandes fréquentielles des signaux de décomposition.*

Signal	Bande fréquentielle
d 12	1.22-2.44
d 11	2.44-4.88
d 10	4.88-9.76
d 9	9.76-19.53

IV.2 : Allures temporelles des grandeurs électriques utilisées dans le diagnostic

Les figures IV.1-IV.3 représentent les allures temporelles de simulation du courant statorique instantané i_a , la puissance active instantanée (*PAI*) et le module du vecteur de Park (*MVP*) du moteur asynchrone triphasé fonctionnant sous une charge linéairement variable avec une barre rotorique cassée. 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.

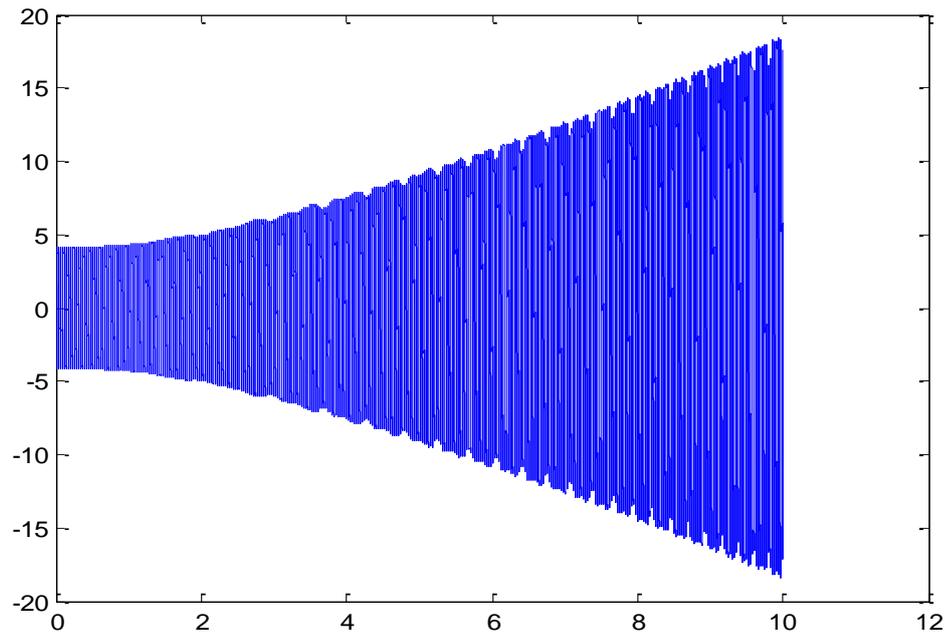


Figure IV.132 : *courant statorique du moteur asynchrone avec une barre cassée en régime non stationnaire.*

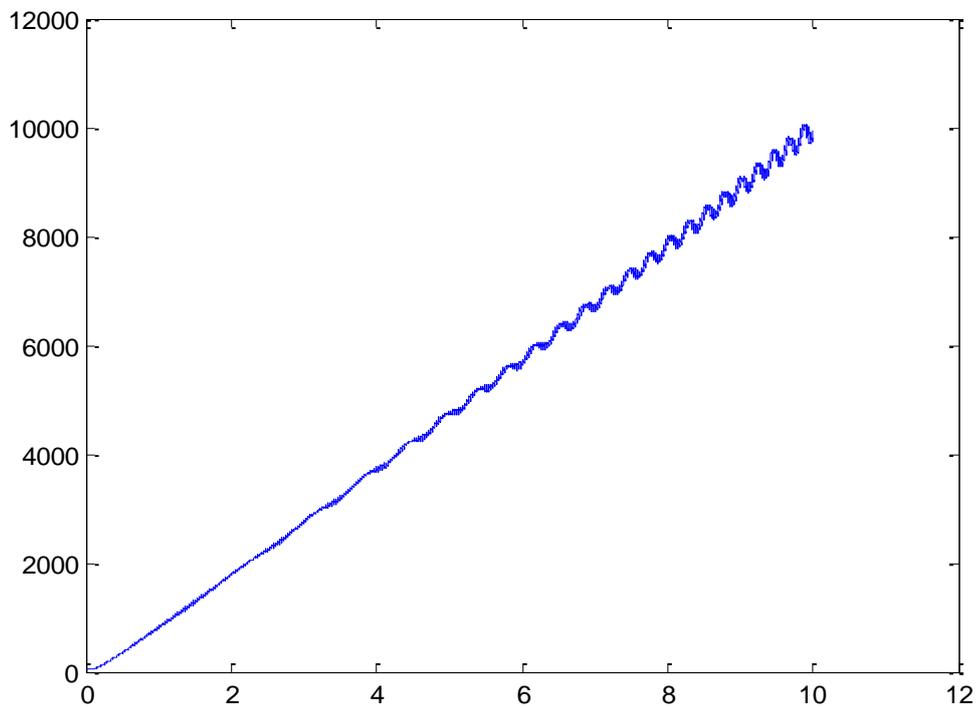


Figure IV.233 : *puissance active instantanée (PAI) d'un moteur asynchrone fonctionnant avec une barre rotorique cassée en régime non stationnaire.*

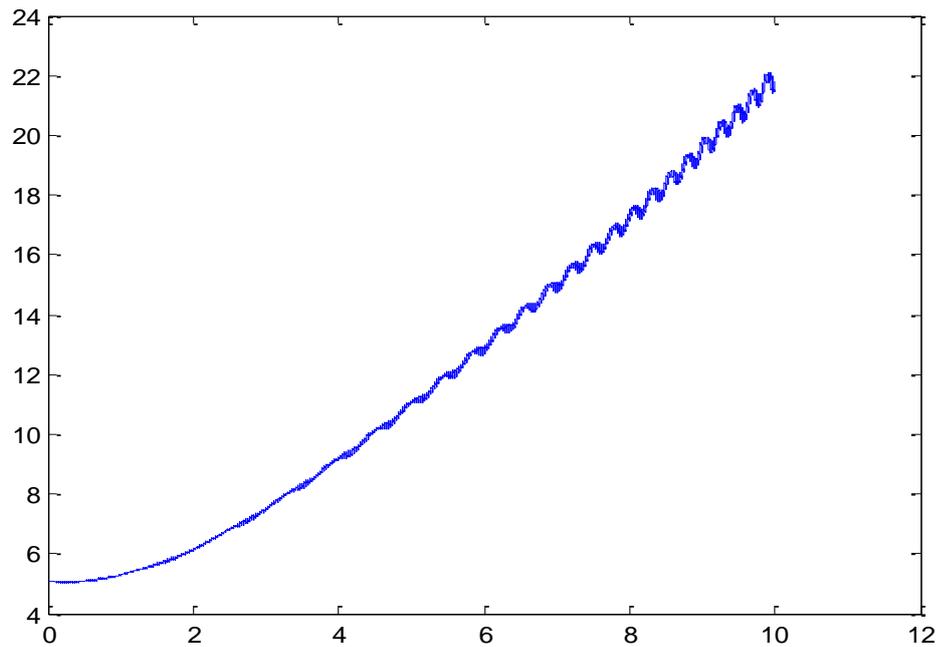


Figure IV.34 : *module du vecteur de Park (MVP) du moteur asynchrone avec une barre cassée en régime non stationnaire.*

IV.3 : Analyse par la transformée en ondelettes discrète (TOD)

Les figures suivantes, montrent, respectivement, les résultats de simulation des signaux de détail d9, d10, d11 et d12 obtenus par la décomposition en ondelettes en utilisant db5 et db44 des signaux du courant statorique ia de la PAI et du MVP à l'état sain ainsi que défectueux.

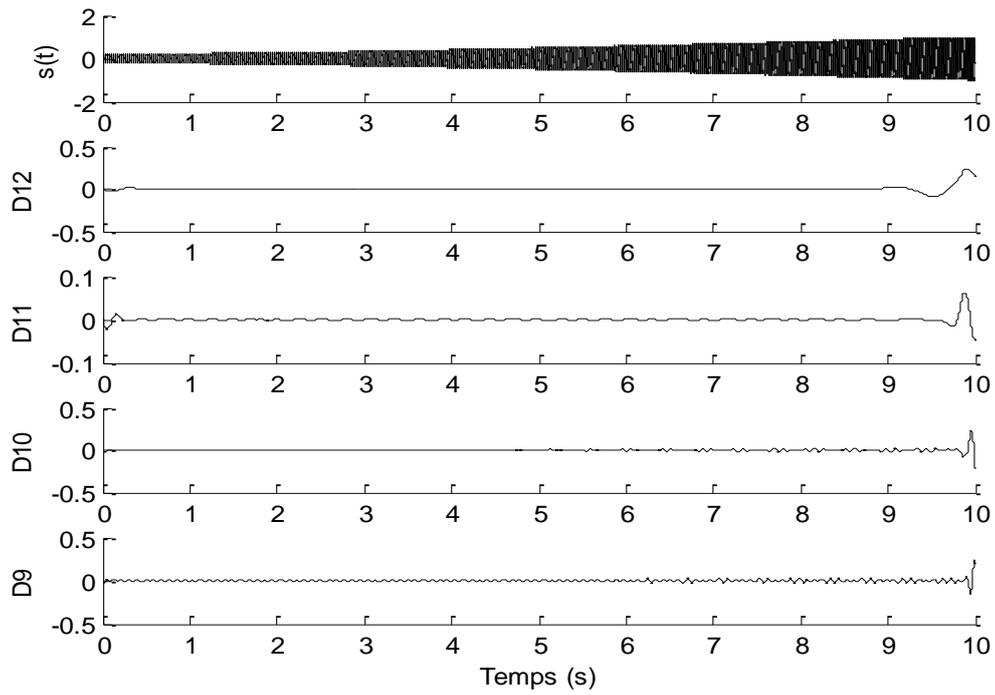


Figure IV.435 : Signature du courant statorique i_a , obtenue par $db5$, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, sain.

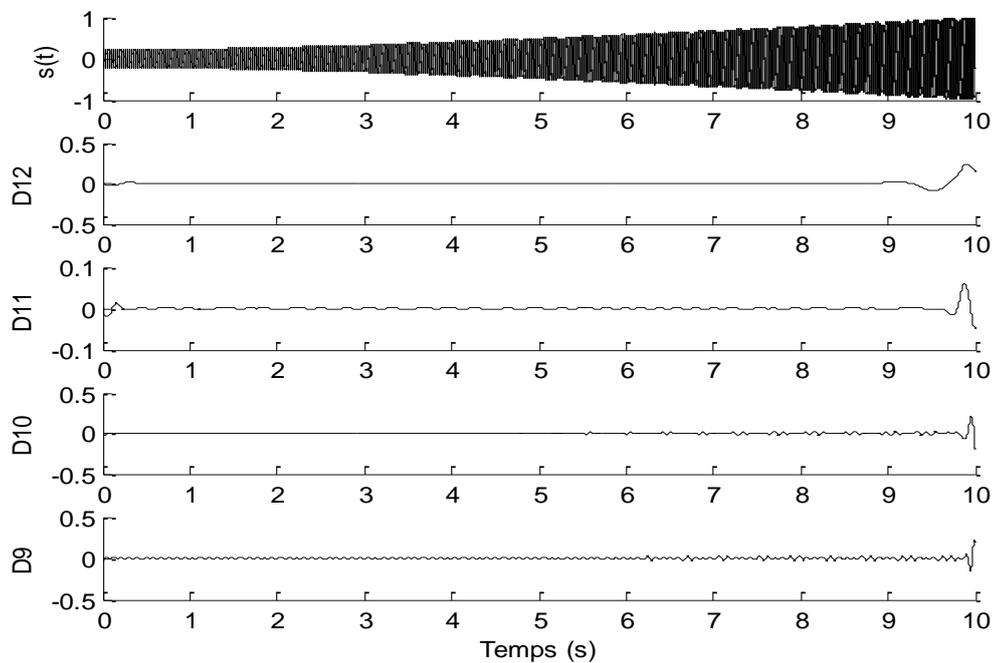


Figure IV.536 : Signature du courant statorique i_a , obtenue par $db5$, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 01 BC.

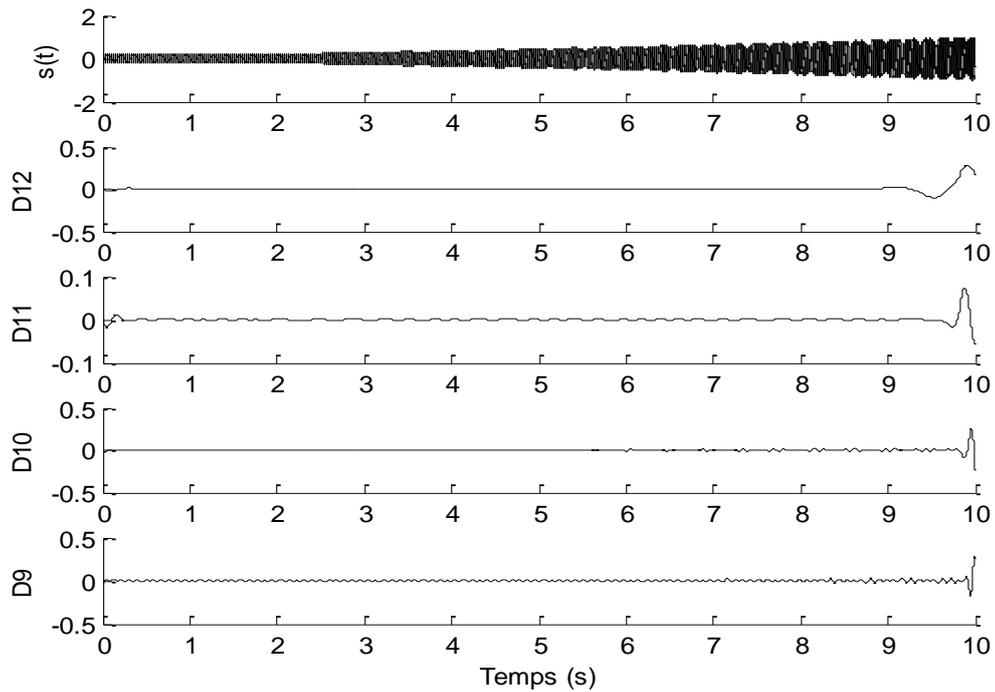


Figure IV.637 : Signature du courant statorique i_a , obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 04 BC.

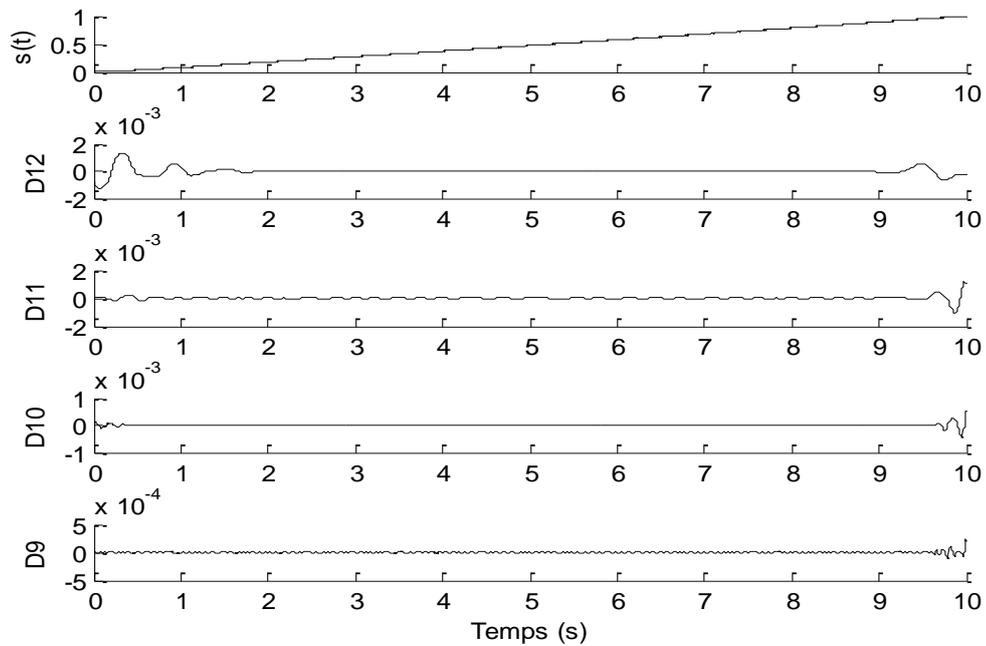


Figure IV.738 : Signature de la puissance active instantanée (PAI) obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, sain.

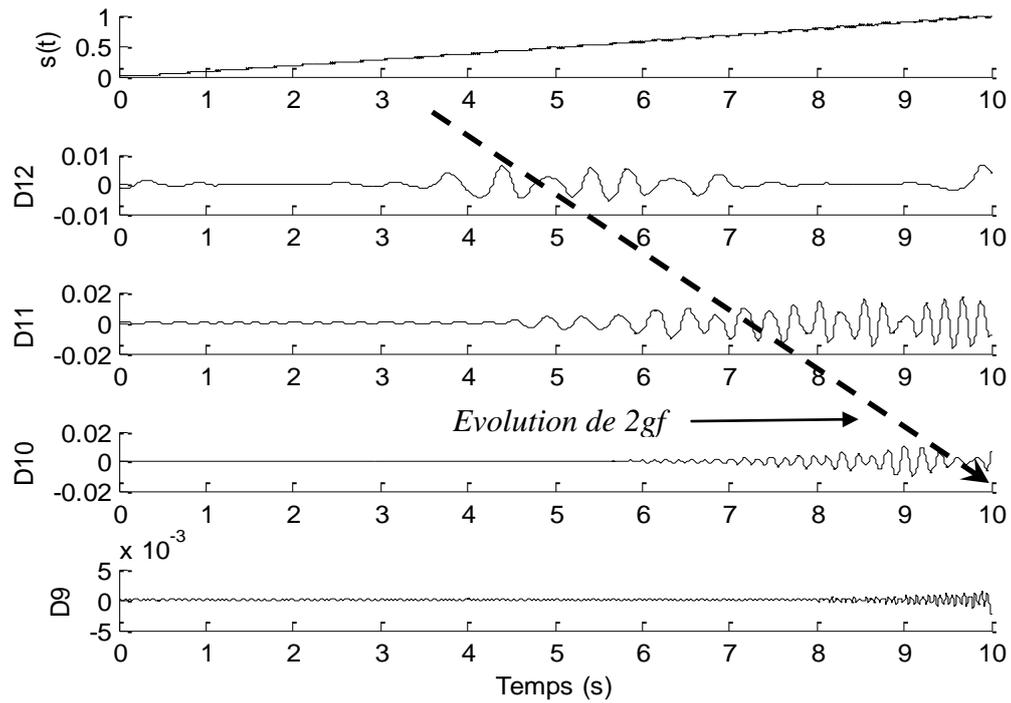


Figure IV.839 : Signature de la puissance active instantanée (PAI) obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 01 BC.

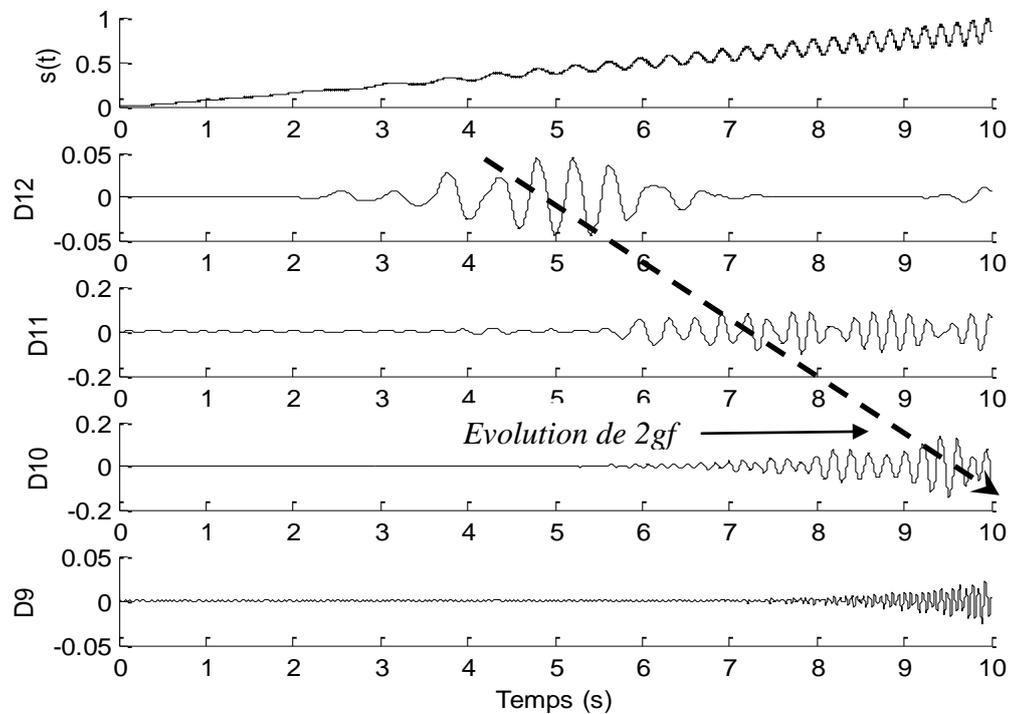


Figure IV.940 : Signature de la puissance active instantanée (PAI) obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 04 BC.

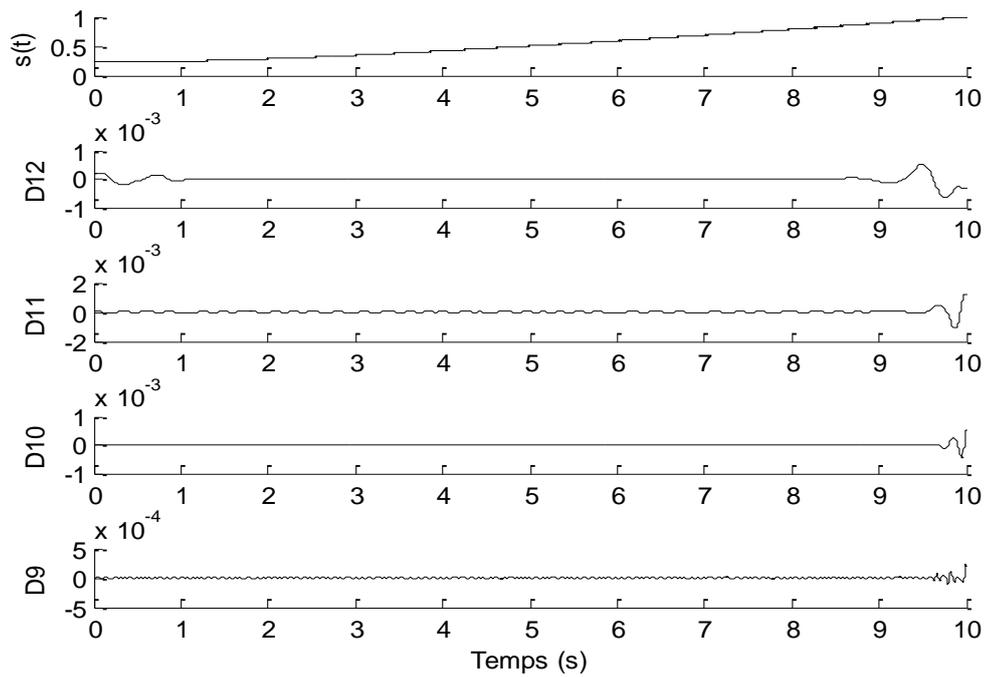


Figure IV.410 : Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, sain.

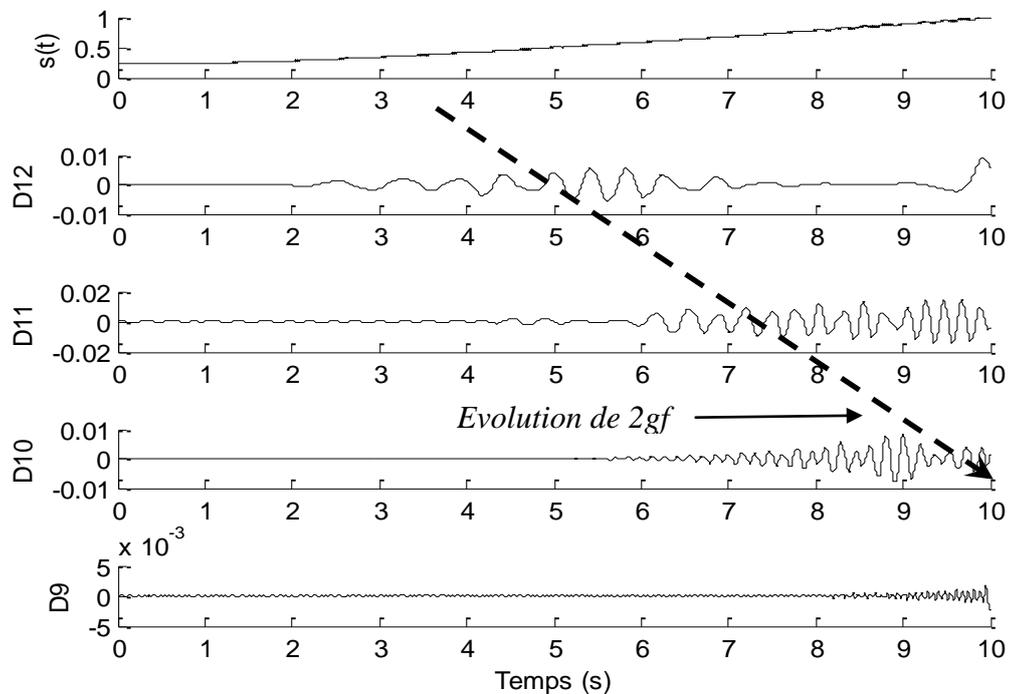


Figure IV.1142: Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 01BC.

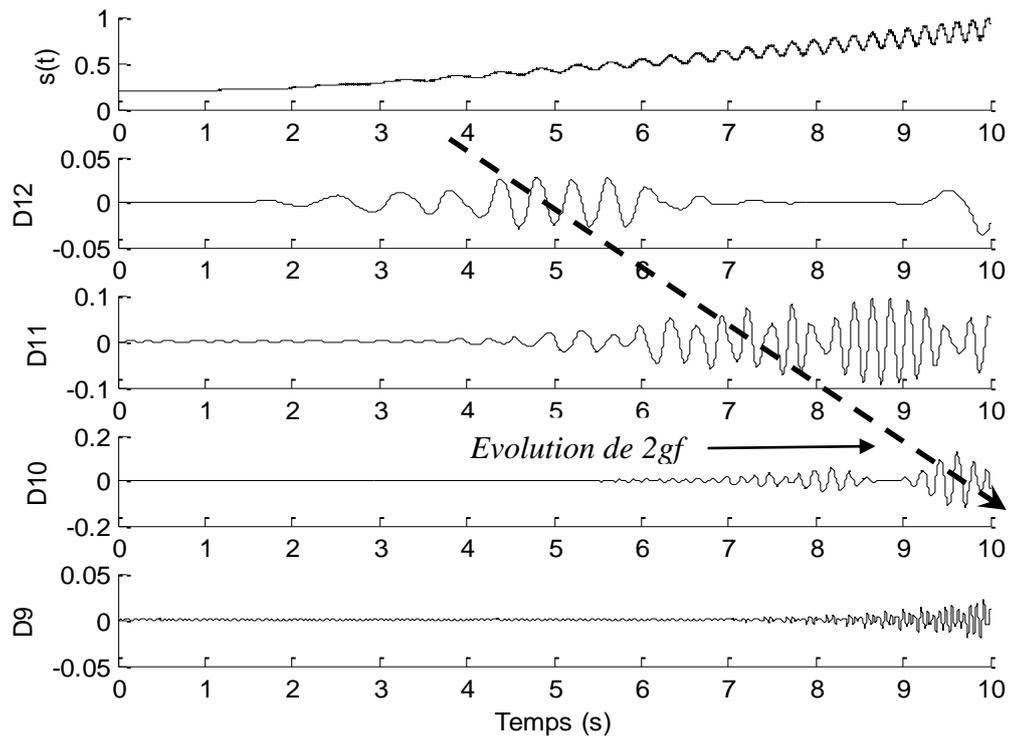


Figure IV.1243: Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db5, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 04BC.

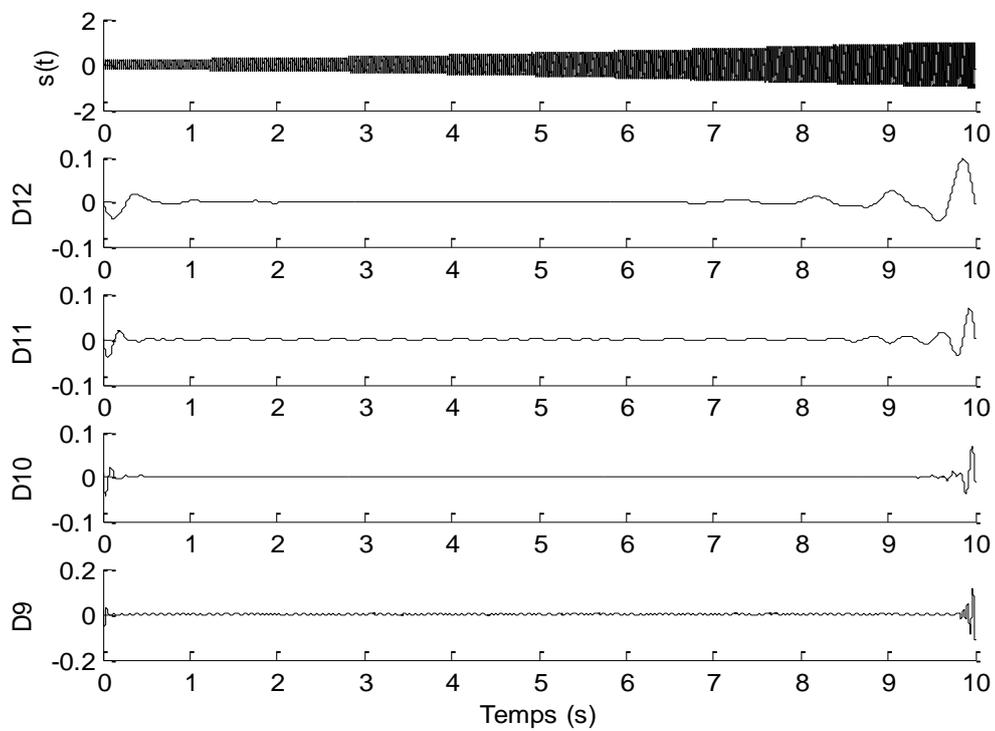


Figure IV. 13 44: Signature du courant statorique i_a , obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, sain.

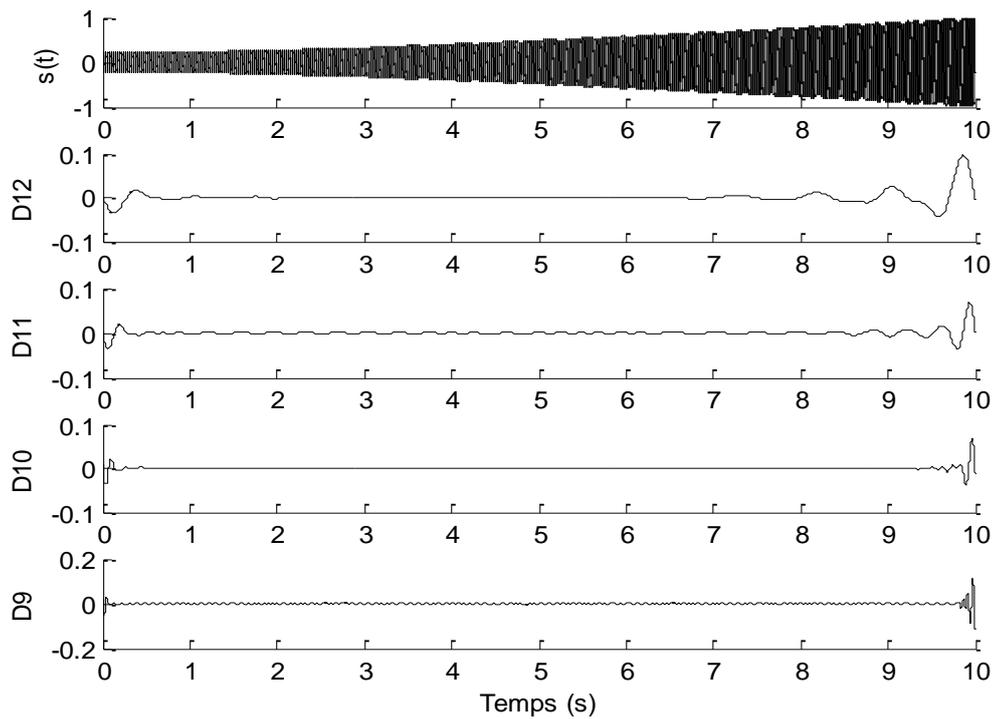


Figure IV.1445 : Signature du courant statorique i_a , obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 01 BC.

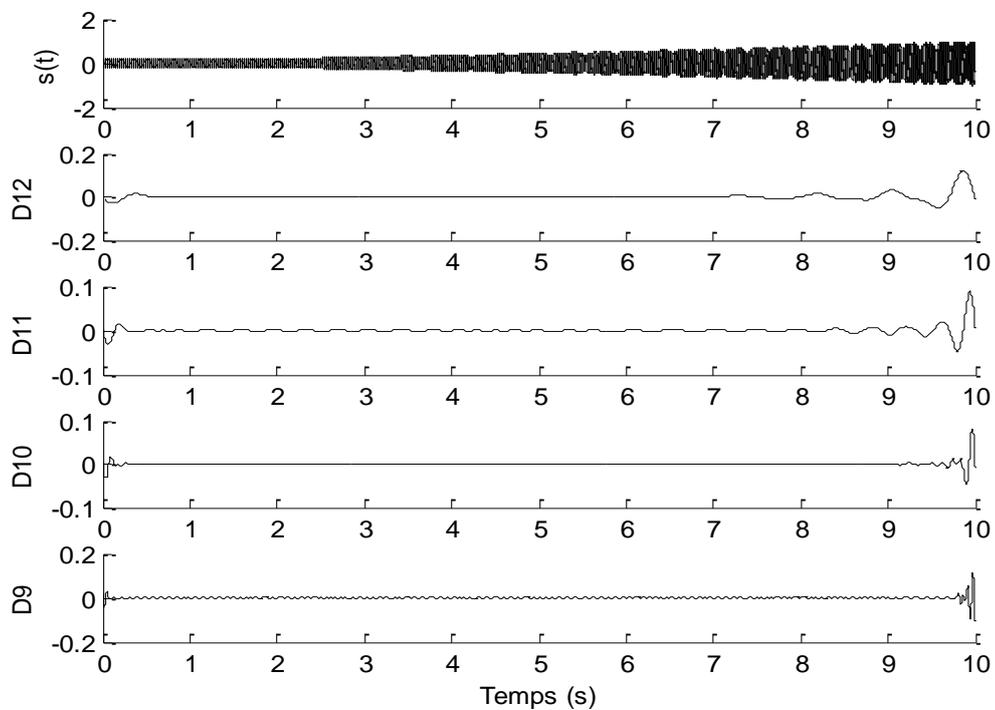


Figure IV.1546 : Signature du courant statorique i_a , obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 04 BC.

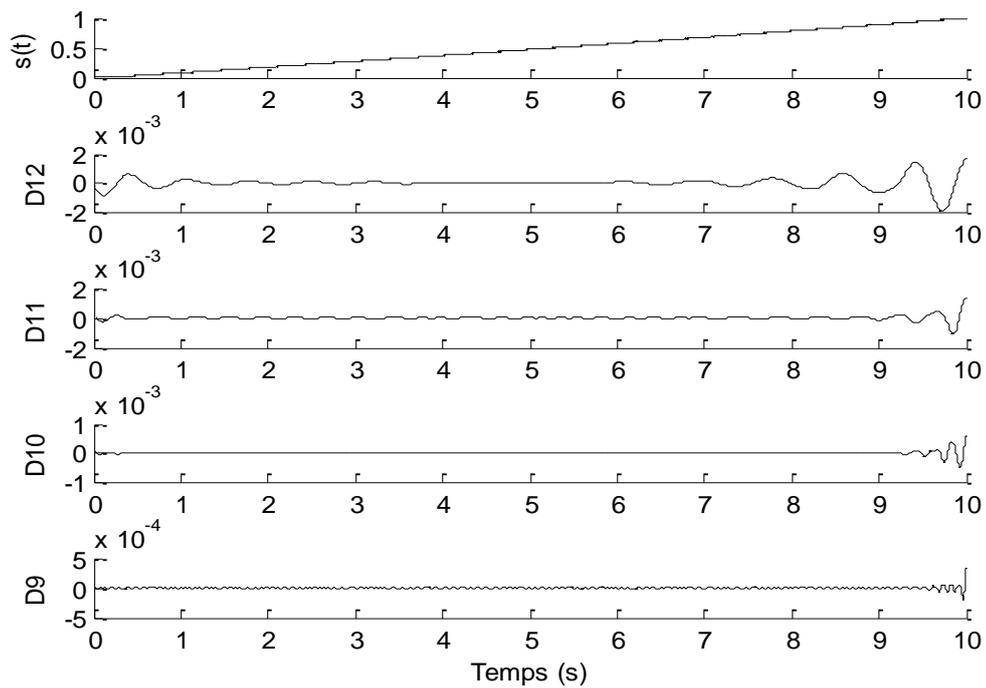


Figure IV.1647 : Signature de la puissance active instantanée (PAI) obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, sain.

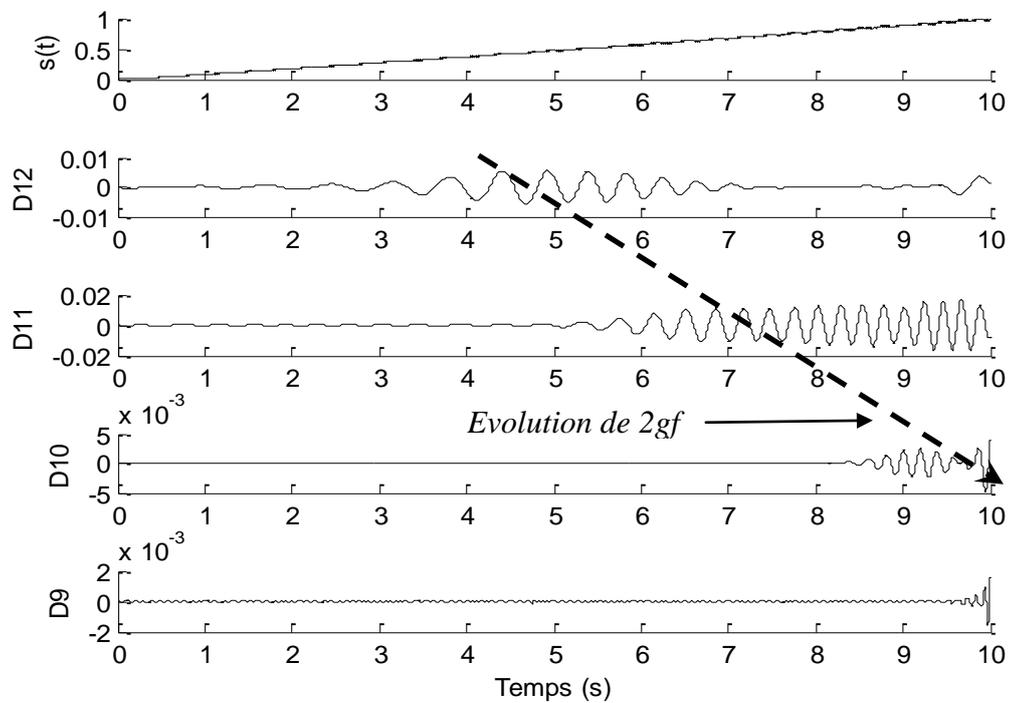


Figure IV.1748 : Signature de la puissance active instantanée (PAI) obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 01 BC.

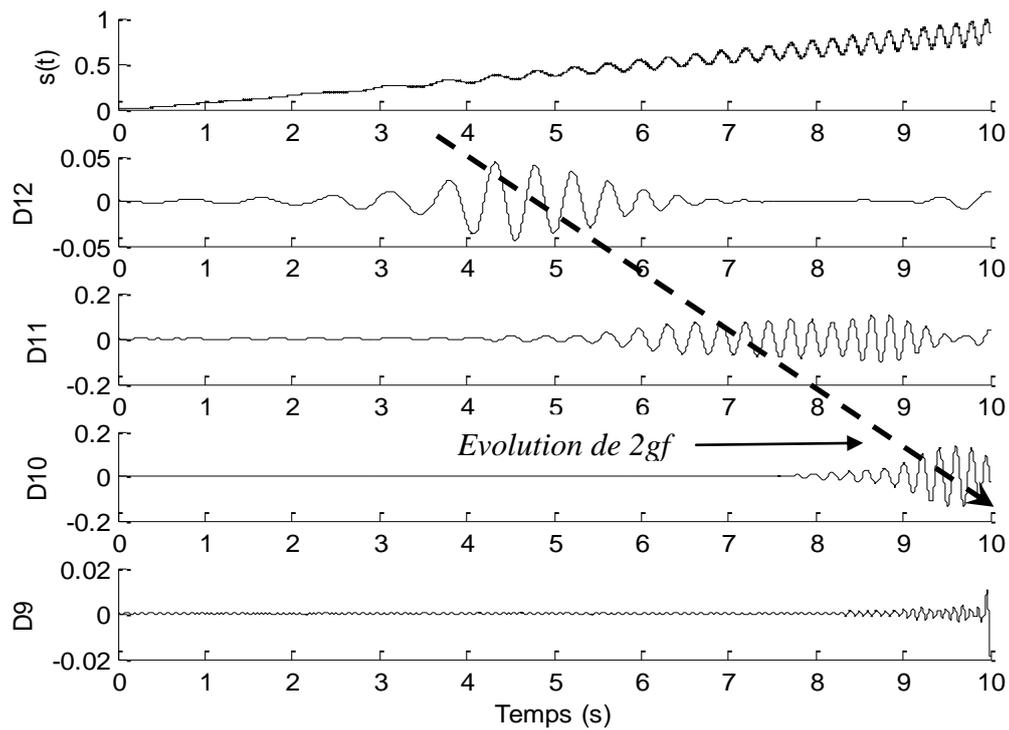


Figure IV.1849 : Signature de la puissance active instantanée (PAI) obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 04 BC.

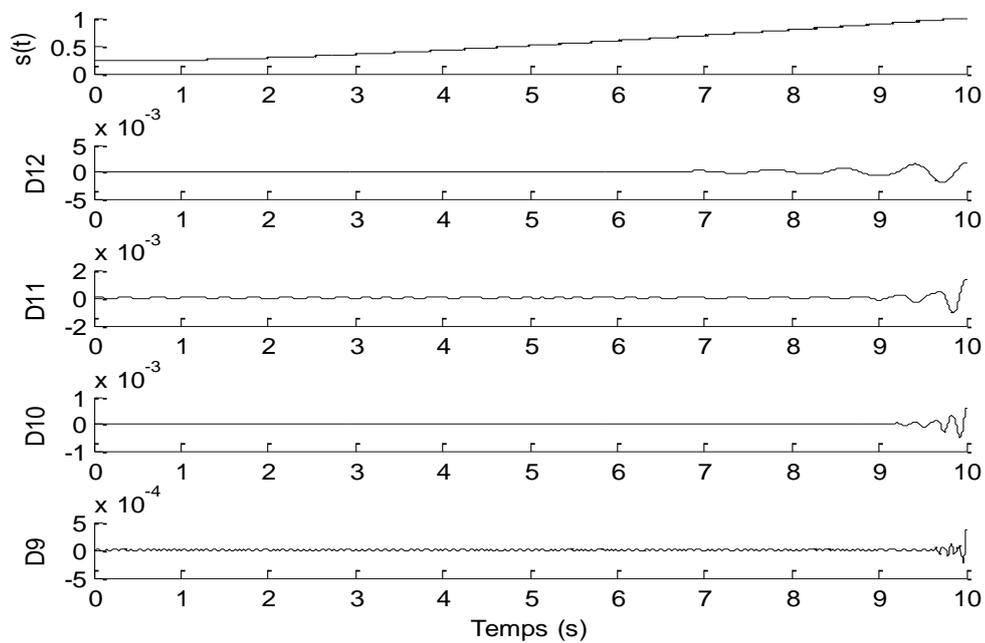


Figure IV.1950 : Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, sain.

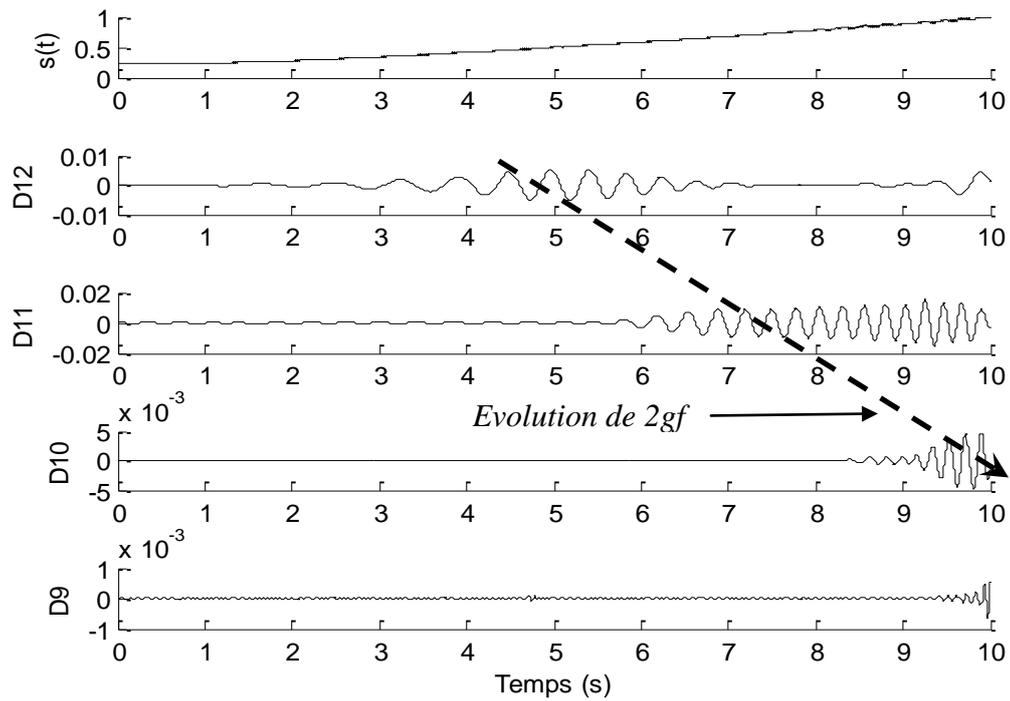


Figure IV.2051 : Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 01 BC.

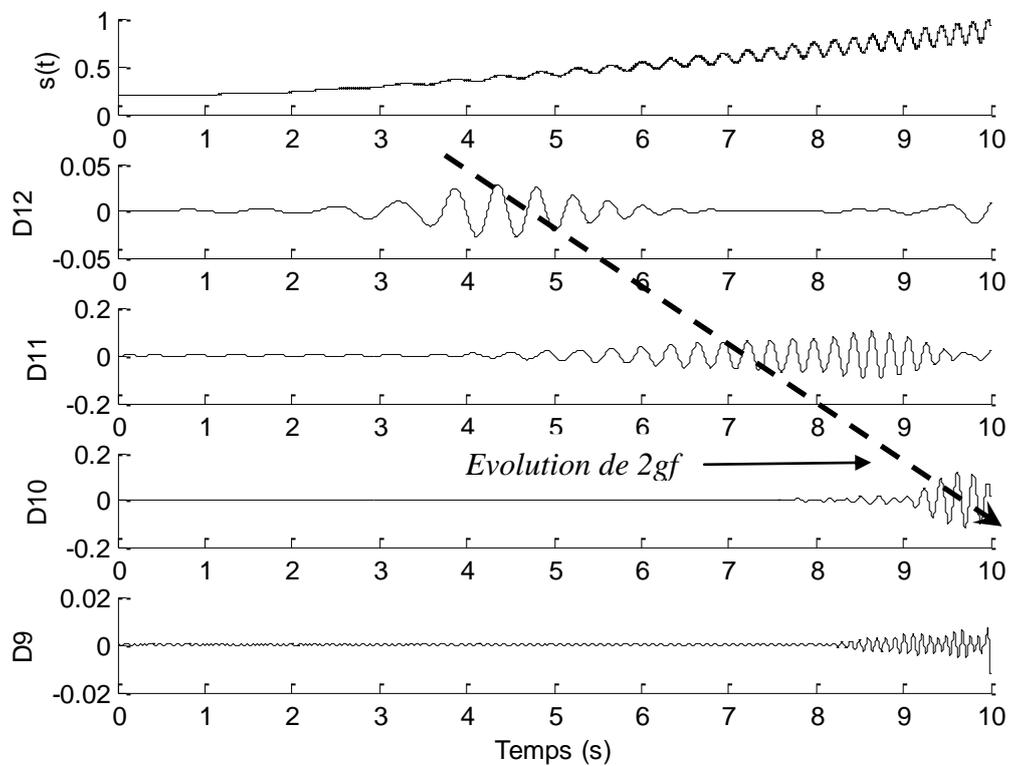


Figure IV.521 : Signature du module de vecteur de Park (MVP), obtenue par db44, pour un moteur asynchrone en régime non stationnaire, avec 04 BC.

L'augmentation des oscillations est clairement observée dans le cas de quatre barres cassées. En effet, selon les valeurs du glissement (valeurs du couple de charge), ces oscillations se déplacent de d_{12} (pour des faibles valeurs de glissement) à d_{10} (pour des valeurs proches de glissement nominal). La présence et la façon d'évolution particulière de ces oscillations permettent de prendre une décision préliminaire sur la présence de défaut de cassure de barres rotoriques. Une fois cette décision préliminaire de l'état du moteur a été prise, il est conseillé de définir un facteur de sévérité de défaut (*FSD*) afin d'évaluer le degré de défaillance dans le moteur. Ce *FSD* est défini par le rapport de la composante caractéristique de défaut $2gf$ et la composante continue (pour la méthode du courant statorique i_a , il s'agit du rapport de la somme des composantes ($1 \pm 2gf$) et la composante fondamentale à (50 Hz). Ce *FSD* est calculé pour toutes les méthodes utilisées afin d'établir une étude comparative en donnant la méthode la plus sensible au défaut de cassure de barres. Comme on peut le constater, la valeur du *FSD* augmente avec l'augmentation de nombre des barres cassées pour toutes les méthodes utilisées. Ce qui en fait un bon indicateur de l'état de santé de la cage rotorique. Tableau IV.1 et Tableau IV.2 montrent les valeurs de ce *FSD* pour les cinq cas (sain, une, deux, trois et quatre barres cassées). Ce *FSD* permet de détecter la présence des barres cassées avec une grande fiabilité. Il est évident que la valeur du *FSD* est augmentée avec l'augmentation de nombre de barres cassées pour toutes les méthodes utilisées (db5, db44).

Tableau IV.2 : *FSD*, obtenu par db5, des méthodes utilisées en fonction du nombre de barres cassées en régime non stationnaire.

Nombre de barres cassées	<i>Ia</i> (%)	<i>PAI</i> (%)	<i>MVP</i> (%)
0	2.0969	1.0758e-004	8.4368e-005
1	2.1549	0.0126	0.0083
2	2.5168	0.0891	0.0539
3	2.7600	0.3145	0.2021
4	3.7142	0.8289	0.5087

Tableau IV.3 : *FSD, obtenu par db44, des méthodes utilisées en fonction du nombre de barres cassées en régime non stationnaire.*

<i>Nombre de barres cassées</i>	<i>Ia (%)</i>	<i>PAI (%)</i>	<i>MVP (%)</i>
0	0.8217	1.5964e-004	1.1162e-004
1	0.8599	0.0125	0.0072
2	2.9839	0.0978	0.0521
3	3.3032	0.3023	0.1550
4	1.5816	0.8870	0.4742

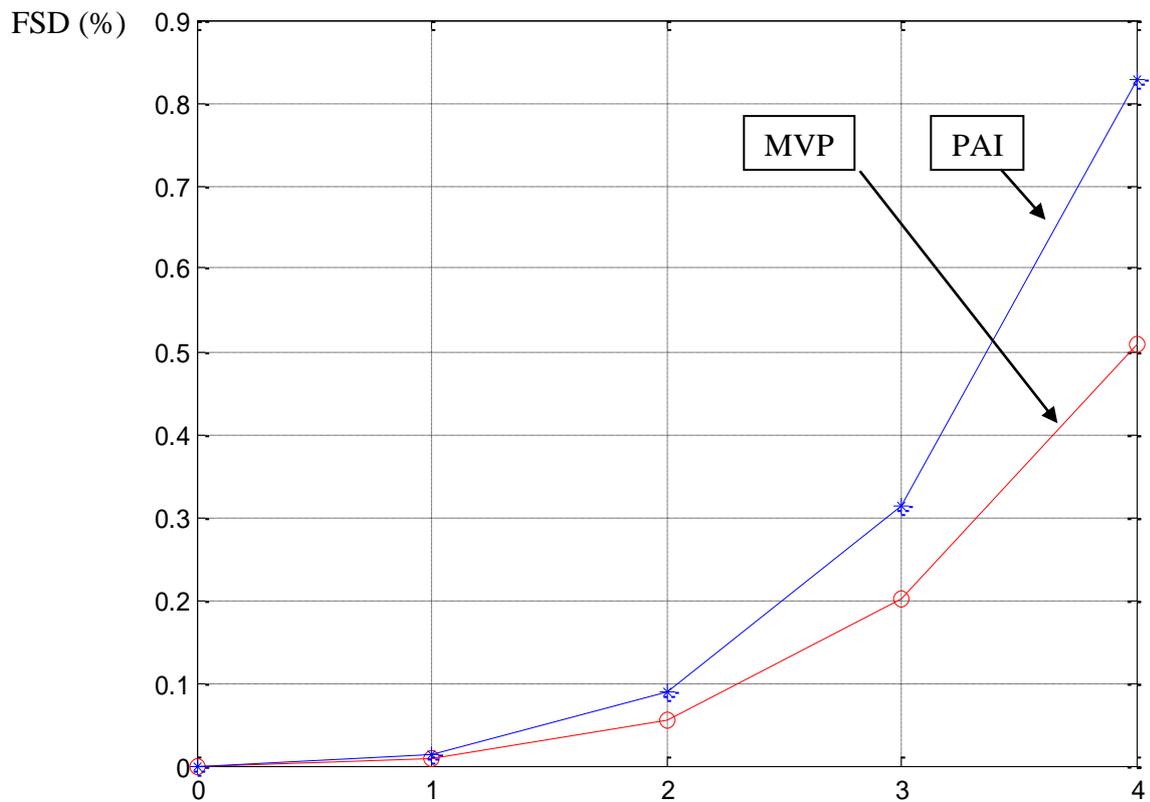


Figure IV.22 53: *FSD, obtenu par db5 en fonction du nombre de barres cassées.*

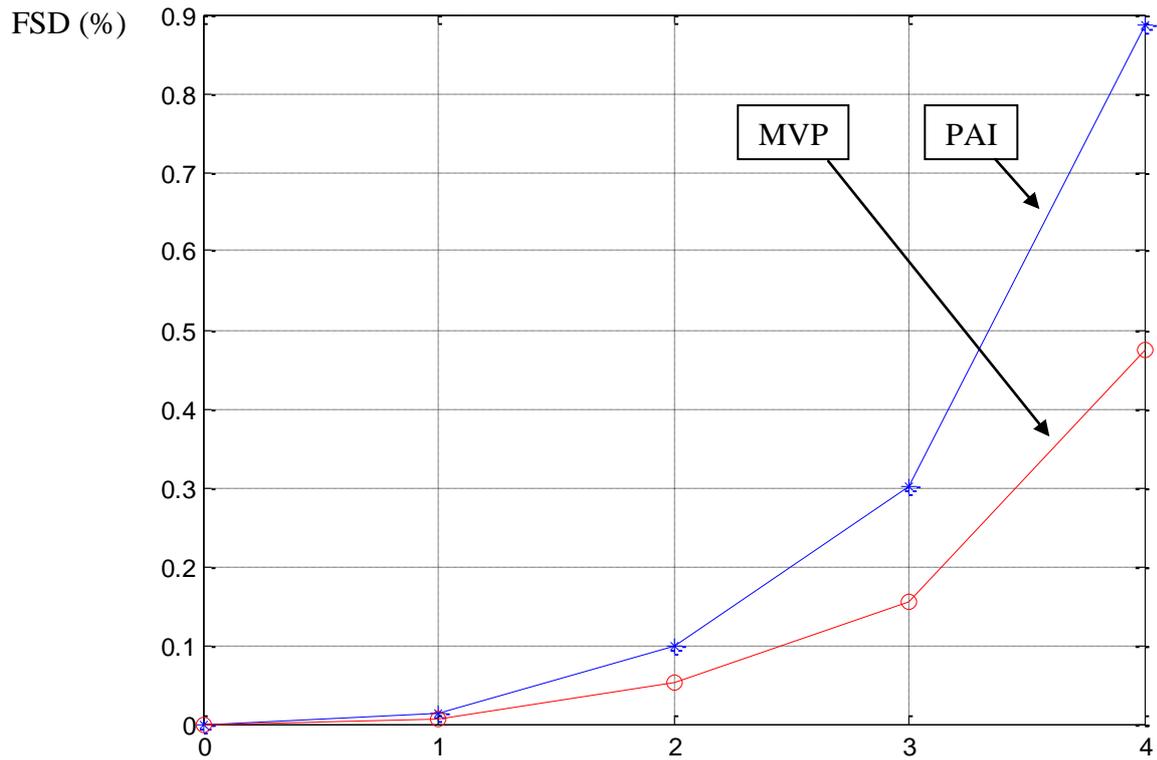


Figure IV.2354 : FSD, obtenu par db44 en fonction du nombre de barres cassées.

IV.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude détaillée sur l'application de la TOD pour le diagnostic de défaut de cassure de barres rotoriques dans un moteur asynchrone en utilisant les signaux du courant statorique instantané i_a , la puissance active instantanée (PAI) et le module du vecteur de Park (MVP) en régime non stationnaire (couple de charge variable).

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur le diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques dans la machine asynchrone triphasée en utilisant la transformée en ondelettes discrète (TOD).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les principaux éléments constituant de la machine asynchrone à cage d'écureuil, les différents défauts de cette machine avec leurs causes ainsi que les différentes méthodes de détection de défauts.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté un modèle permettant la simulation de la machine asynchrone triphasée à cage. Ce modèle nous a permis de bien modéliser et simuler les défauts de cassure de barres rotoriques. Les résultats de simulation ont confirmé les performances de notre modèle.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté une étude plus détaillée de la transformée en ondelettes (TO) où nous avons tirés les avantages de cette méthode au régime non stationnaire par rapport aux méthodes classiques.

Dans le quatrième chapitre nous avons étudiée l'application de la transformée en ondelettes discrète (TOD) pour le diagnostic de défaut de cassure de barres rotoriques dans un moteur asynchrone en utilisant les diverses grandeurs électriques du moteur. L'étude a été effectuée pour un régime de fonctionnement non stationnaire (couple de charge variable). L'analyse par la TOD 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. La méthode de la TOD a l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance des valeurs instantanées du glissement du moteur.

Bibliographie

- [1] **A. Bouguerne**, "Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones", Mémoire Magister, Université de Constantine, 2009.
- [2] **L. Kerszenbaum et C. F. Landy**, "The existence of large inter bar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and en-ring faults" IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-103, n°7, pp.1854- 1862, July 1984.
- [3] **Bonnett, A.H; Soukup, G.C** "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors", Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume: 28, Issue: 4, July-Aug. 1992, pp.921 – 937, 1992.
- [4] **M.A. Abed**, "Contribution à L'étude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone",Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, mars 2002.
- [5] **O. Ondel**, "Diagnostique par Reconnaissance des Formes: Application a un Ensemble Convertisseur-Machine ", Thèse de Doctorat, L'Ecole Centrale de Lyon, Octobre 2006.
- [6] **B. Samir et D. Zoheir**. "Diagnostic de défauts de la MAS à Rotor à Cage d'écureuil ", Projet de fin d'étude. ENP. Juin 2006.
- [7] **R. Casimir**, "Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes", Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, CEGELY, 2003.
- [8] **M. Nezar**, "Diagnostic des associations convertisseurs statiques machine asynchrone en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle", Thèse de doctorat, université de Batna, 2006.
- [9] **G. Didier**, "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2004.
- [10] **H. RAZIK**, "le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillances, un état de l'art", La revue 3EI n0 29- Juin, pp.48-52, 2002.
- [11] **E.S. Hamdi**, "Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage ", Thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2006.

- [12] **K. Abdelfattah**, "Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts", Mémoire magister université FERHAT ABBAS – SETIF UFAS 11 / 04 / 2009.
- [13] **J. Morlet**, "Sampling theory and wave propagation," *Acoustic Signal/Image Processing And Recognition, Springer-Verlag , Vol. F1, NATO ASI, pp. 233–261, 1983.*
- [14] **N. Lahcène**, "Diagnostic de défauts au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil", Mémoire de magister. Mai-2005.
- [15] **J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, M. P. M. Palomares**, "Validation of a New Method for the Diagnosis of Rotor Bar Failures via Wavelet Transform in Industrial Induction Machines," *IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 42, No. 4, pp. 990 996, Jul./Aug.2006.*
- [16] **E. Schaeffer**, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts", Thèse de doctorat, Université de Nantes, 1999.
- [17] **A. H. Bonnett, G. C. Soukup**, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No 4, pp. 921-937, Jul/Aug. 1992.*
- [18] **S. G. Malat**, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 2, No. 7, Jul. 1989.*
- [19] **E. SCHAEFFER**, " Diagnostic des machines asynchrones modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts". Thèse de doctorat, Université De Nantes 1999.
- [20] **R. Polikar**, "The wavelet tutorial", Available: <http://users.rowan.edu/polikar/wavelets/wttutorial.html>
- [21] **A. Ghoggal**, "Diagnostic de la machine asynchrone triphasée: modèle dédié à la détection des défauts", Thèse de Magistère, Université de Batna, Algérie, May 2005.

- [22] **Y. Khaled**, "Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée par une Approche signal ", Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra 2010.
- [23] **S.G. Mallat**, "A wavelet tour of signal processing", second ed., Academic Press, 1998.
- [24] **E. Ritchie, X. Deng**, "Dunamic model of three-phase squirrel cage induction motors with rotor faults", in *Proceeding of ICEM94, B.6 Modelling and Simulation*, Paris, France, pp. 694-698, 1994.
- [25] **E. Oran Brigham**, "Fast Fourier transform and its applications", Prentice Hall, 1988.
- [27] **F. Coulon**, "Théorie et traitement des signaux", Vol. VI, Presses polytechniques romandes, 1990.
- [28] **J. Ville**, "Théorie et applications de la notion de signal analytique", Câbles et Transm., Vol. 2A, No.1, pp. 61–74, 1948.
- [29] **E.P. Wigner**, "On the quantum correction for thermodynamic equilibrium". *Physics Review*, Vol.40, No. 5, pp. 749–760, 1932.
- [30] **M. Davy**, "Noyaux optimisés pour la classification dans le plan temps-fréquence – Proposition d'un algorithme constructif et d'une référence bayésienne basés sur les méthodes MCMC – Application au diagnostic d'enceintes acoustiques". Thèse de doctorat, Université de Nantes, Sep. 2000.
- [31] **M. E. K. Oumaamar, F. Babaa, A. Khezzar, M. Boucherma, F. Meibody-Tabar**, "Novel method of broken rotor bars diagnosis in induction machine by D.C supply", 6th international symposium on advanced electro mechanical motion systems electromotion, Sept 2005.
- [32] **M. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys**, "Induction motors' faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 14, n° 1, pp.14-22, January 1999.
- [33] **J. Penman, J. Sedding, H.G. Loyed, B.A. Fink**, "Detection and localisation of interturn short circuits in the stator winding of operating motors", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 9, no. 4, pp. 652-658, December 1994.

- [34] **T. Boumegoura**, " Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic ", Thèse Doctorat, Ecole centrale de Lyon, Mars 2001.
- [35] **B. Noureddine**, "Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones". Université MENTOURI de CONSTANTINE diplôme de magister en Electrotechnique.
- [36] **M. G. Joksimovic, J. Penman, N. Arthur**, "The detection of inter-turn short circuits in the stator winding of operating motors", *IEEE Transaction on Industry Electronics*, Vol. 47, No.5pp.1078-108, Oct. 2000.
- [37] **J. Cusido, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, A. Garcia**, "Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 2, pp. 633–643, Feb. 2008.
- [38] **S. H. Kia, H. Henao, G. A. Capolino**, "Diagnosis of broken-bar fault in induction machines using discrete wavelet transform without slip estimation," *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 45, No. 4, pp. 107– 121, Jul/ Aug. 2009.
- [39] **I. Daubechies**, "Ten Lectures on Wavelets," *SIAM, Philadelphia, PA*, 1992.

Annexe

Les paramètres de la machine asynchrone triphasée utilisée dans les essais de simulation sont [21,36]:

Puissance nominale	11 kW
Fréquence nominale	50 Hz
Nombre de paire de pôles	2
Nombre de barres du rotor	40
Nombre des encoches du stator	48
Nombre de tours par bobine	28
Longueur de l'entrefer	0.11 m
Résistance d'une barre rotorique.	31 $\mu\Omega$
Résistance d'un anneau de court-circuit	2.2 $\mu\Omega$
Rayon de l'entrefer	0.082 m
Epaisseur de l'entrefer	0.0008 m
Resistance de phase statorique	1.75 Ω
Moment d'inertie	0.0754 kg. m ²

RESUMES

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.

Notre étude porte sur la présentation de la machine asynchrone et les différents défauts qu'ils peuvent réduire le bon fonctionnement de cette dernière. Une modélisation en multi-enroulements et la méthode de la transformée en ondelettes ont été présentées afin d'améliorer le diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques de la machine asynchrone à cage.

Mots-clés: Machine asynchrone, Diagnostic, Défauts, Modèle multi-enroulements, Transformée en ondelettes discrète (TOD), Cassure de barres rotoriques.

ملخص

لقد أصبحت الآلة اللامتزامنة الأكثر استعمالا في العديد من المجالات الصناعية, لذلك وضعت أبحاث مختلفة لدراستها من أجل التحكم بها وحمايتها وصيانتها واكتشاف أعطابها. إن دراستنا هذه تصف الآلة اللامتزامنة ومختلف الأعطاب التي قد تصيبها واستعمال التحويل الموجي المتقطع (TOD) للمقادير الكهربائية للآلات غير متزامنة من أجل تشخيص اعطاب امكسار الأقطاب في حالة التشغيل تحت عزم متغير. الكلمات المفتاحية: الآلة اللامتزامنة, التشخيص, الأعطاب, التحويل الموجي المتقطع, انكسار الأقطاب.