



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Études
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Faculté de la Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

Thème

Diagnostic des Défaits d'une Machine électrique
par la technique ondelette

Réalisé par :

BELDJANI Sarra

ZINE Abdelbasset

HIMA Chaker

Encadré par :

Dr. KECHIDA Ridha

Promotion 2021 /2022



Remerciements

*Remerciements à Dieu –le tout puissant– qui nous a aidés À réaliser ce
modeste travail.*

Nous tenons à remercier notre promoteur

Dr. KECHIDA Ridha

D'avoir accepté de nous encadrer et

*De nous suivre durant toute cette période. et son efficacité n'a ménagé
aucun effort pour mener à bien ce travail.*

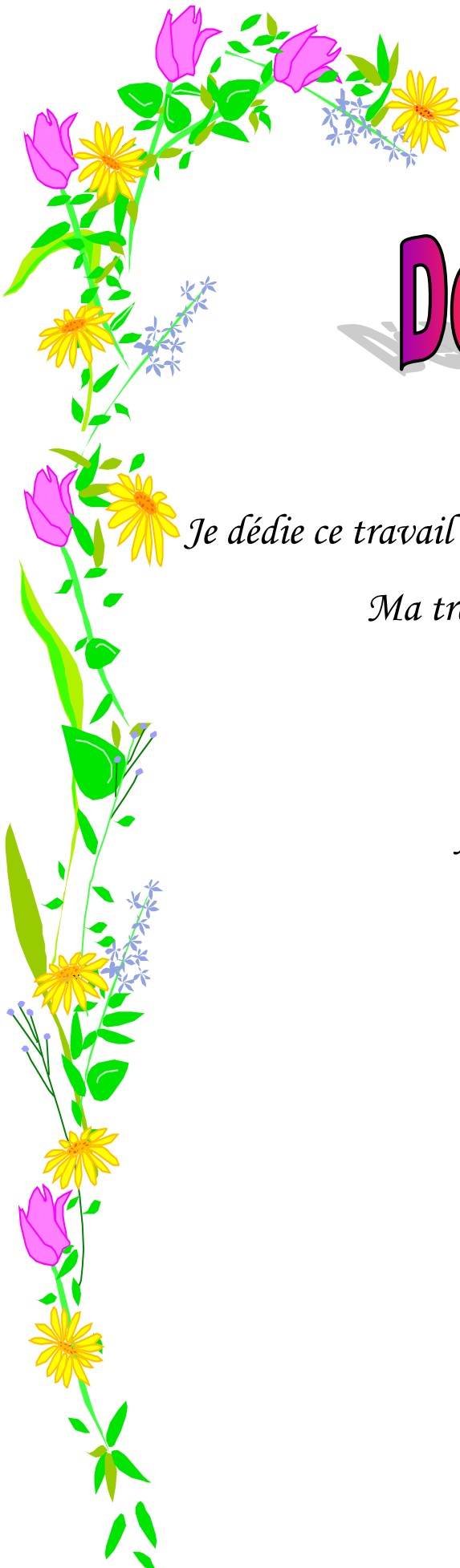
*Et enfin nous remercions l'ensemble, Nous remercions aussi tous les
enseignants du département d'Electrotechnique qui ont contribué à notre
formation.*

Sarra

Abdelbasset

Chaker





Dédicaces

Je dédie ce travail en signe de respect et de reconnaissance à:

Ma très chère mère et mon père

Mes sœurs

Mes frères

A toute ma famille

A tous mes amis

Sarra

Abdelbasset

Chaker



Résume

Ce travail rentre dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. La machine asynchrone à cage devient actuellement l'élément clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa robustesse et son faible coût. Malgré ces avantages, certains nombres de contraintes de natures très différentes peuvent affecter la durée de vie de cette machine, en occasionnant des pertes économiques considérables. Ceci impose la mise en œuvre d'un système de surveillance.

Dans cette logique, nous proposons dans ce travail une étude comparative entre le comportement de la machine saine et le comportement de la machine doté de défaut rotorique.

Deux méthodes sont utilisées pour la détection des défauts: la méthode classique à base de la transformée de Fourier et la méthode avancée à base de l'ondelette. Les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité de cette technique dans la possibilité d'extraire les signatures du courant statorique pour détecter et localiser les défauts en régime stationnaire.

Mots clés : machine asynchrone, diagnostic, de défaut rotorique, analyse spectrale, FFT, TOD

ملخص:

يندرج هذا العمل ضمن إطار تشخيص الأخطاء في الماكينات الكهربائية اللامتزامنة ذات القفص السنجايبثلاثية الأطوار. حاليا تعتبر الماكينة اللامتزامنة العنصر الفعال في أغلب التجهيزات الصناعية ذلك بفضل صلابتها وثمنها المنخفض نسبيا. وبالرغم من هذه الإيجابيات، قد تتعرض هذه الماكينة إلى أعطال مختلفة تؤثر على أدائها ومدى حياتها الافتراضية، مما يؤدي إلى خسائر اقتصادية معتبرة للمتعامل الصناعي، وهذا ما يفرض وضع نظام مراقبة لتفادي هذه الخسائر.

في هذا العمل نقترح دراسة مقارنة بين سلوك الماكينة في الحالة السليمة وفي حالة وجود كسر قضبان الدوار. يتم استخدام طريقتين لاكتشاف الخطأ: الطريقة الكلاسيكية القائمة على تحويل فورييه والطريقة المتقدمة القائمة على الموجة. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها بوضوح فعالية هذه التقنية في إمكانية استخراج توابع تيار الجزء الثابت لكشف وتحديد الأعطال في حالة الثبات.

الكلمات المفتاحية: الماكينات الكهربائية اللامتزامنة ذات القفص السنجايب، تشخيص، عطب في الجزء الدوار، تحويل فورييه، تحويل الموجات.

LISTE DE FIGURES

Chapitre I : Généralités du diagnostic des défauts dans la MAS

Figure I.1: constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.	02
Figure I.2: Stator de la machine asynchrone	03
Figure I.3: Représentation rotor à cage	04
Figure I.4: Représentation rotor bobiné	04
Figure I.5: Défauts statoriques	06
Figure I.6: Défaut de cassure de barre rotorique.	07
Figure I.7: Représentation de l'excentricité statique et dynamique dans la machine asynchrone.	08
Figure I.8: Dimension du roulement à bille.	9
Figure I.9: Distribution des défauts	10

Chapitre II : Modélisation et simulation de la MAS avec défaut rotorique

Figure II.1: Représentation électrique de la machine asynchrone	15
Figure II.2 : Principe de la transformation de Park	17
Figure II.3: Schéma électrique équivalent de la machine asynchrone dans le repère de Park	18
Figure II.4: Modèle par dipôles élémentaires du rotor en défaut	20
Figure II.5: Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone	21
Figure II.6: Simulation de la machine saine en charge ($C_r=3.5 \text{ N.m}$)	23
Figure II.7: Simulation de la machine avec rupture successive des barres '1 puis 2' à partir de $t=1\text{s}$	24

Chapitre III : Techniques des Ondelettes appliquées au MAS

Figure III.1: Fonction de base	28
Figure III.2: Quelques formes des ondelettes usuelles.	29
Figure III.3: Transformation de Fourier Temps – fréquence	29
Figure III.4: Organigramme de la méthodologie du diagnostic basé sur la TOD	31
Figure III.5: Spectres des courants statoriques	32
Figure III.6: Courant statorique issu par simulation	33
Figure III.7: Approximations et détails obtenus par l'ondelette db10	35
Figure III.8: Approximations et détails obtenus par l'ondelette db20	36
Figure III.9: Approximations et détails obtenus par l'ondelette db44	37
Figure III.10: Approximations et détails obtenus par l'ondelette dmey9	38

NOTATIONS et SYMBOLES

MAS	Machine Asynchrone
FFT	Transformation de fourrier rapide
TOD	Technique Ondelette Discrète
M_s	Mutuelle inductance entre phase statorique [H]
M_r	Mutuelle inductance inter-phases statoriques [H]
M_{sr}	Mutuelle inductance stator-rotor
L_r	Inductance cyclique rotorique [H]
L_s	Inductance cyclique statorique [H]
L_f	Inductance de fuite rotorique [H]
L_m	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor [H]
p	Le nombre de paire de pôles
V_{abc}	Tensions des phases statorique [V]
u_{ds}, u_{qs}	Composantes biphasées directe et en quadrature de la tension statorique [V]
C_e	Couple électromagnétique [N.m]
a	Angle électrique entre deux mailles rotorique [rad]
f	Coefficient de frottement
I_{as}, I_{bs}, I_{cs}	Courant des phases statorique [A]
i_{ds}, i_{qs}	Composantes biphasées directe et en quadrature du courant statorique [A].
Φ_s	Flux statorique [Wb]
Φ_r	Flux rotorique [Wb]
Φ_{abcs}	Flux des phases statorique [Wb]
Φ_{ds}, Φ_{qs}	Flux statorique dans le repère (d,q) [Wb]
Φ_{dr}, Φ_{qr}	Flux rotorique dans le repère (d,q) [Wb]
g	Glissement
P	Puissance active statorique [W]
B_s	Induction magnétique crée dans l'entrefer par le courant statorique [T]
J	Moment d'inertie [Kg.m ²]
[P]	Opération de Laplace
θ_r	L'angle électrique entre l'axe a_r et l'axe d [rad]
θ_s	L'angle électrique entre l'axe a_s et l'axe d [rad]

θ	La position angulaire du rotor par rapport au stator [rad]
R_r	Résistance de l'enroulement rotorique [Ω]
R_s	Résistance de l'enroulement statorique [Ω]
X	Vecteur d'état
U	Vecteur de commande
Ω_r	Vitesse de rotation mécanique [rad/s]
w_r	Vitesse angulaire de rotation [rad/s]
w_s	Pulsation électrique statorique [rad/s]
f_r	Fréquence rotoriques [Hz]
f_v	Fréquence caractéristique de vibration [Hz]
a, b	Référentielle fixe lié au stator
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement
d	Indice de l'axe direct
q	Indice de l'axe en quadrature

Sommaire

Remerciements	
Liste des figures	i
Notations et symboles	ii
Sommaire	iv
Introduction générale	01

Chapitre I : Etat de l'art sur diagnostic des défauts dans la MAS

I.1 Introduction	02
I.2 Constitution de la machine asynchrone	02
I.2.1 Le stator	02
I.2.2 Le rotor	03
I.2.3 Les organes mécaniques	04
I.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone	05
I.4 Défaillances dans la machine asynchrone à cage	05
I.4.1 Défauts rotoriques	06
I.4.1.1 Cassure des barres	06
I.4.1.2 Défauts d'excentricité	07
I.4.1.3 Défauts de roulement	08
I.4.2 Défauts statorique	09
I.5 Etude statistique des défauts	10
I.6 Méthode de diagnostique des défauts	11
I.6.1 Diagnostic par les méthodes externes	11
I.6.2 Diagnostic par les méthodes internes	12
I.6.3 Diagnostic par les Méthodes inductives	12
I.6.4 Diagnostic par les Méthodes déductives	13
I.7 Conclusion	13

Chapitre II :Modélisation et simulation de la MAS avec défaut rotorique

II.1 Introduction	14
II.2 Modélisation de la machine asynchrone	14
II.2.1 Modèle triphasé	15

II.2.2 Modèle diphasé de Park	17
II.2.2.1 Transformation triphasée/diphasé	17
II.2.2.2 Modèle d'état de la machine asynchrone	19
II.3 Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone	20
II.3.1 Modélisation du défaut de rupture des barres	21
II.3.1.1 Schéma équivalent	21
II.3.1.2 Représentation d'état du modèle de défaut rotorique	22
II.4 Résultats de simulation	22
II.4.1.Machine saine	22
II.4.2 Machine avec défaut rotorique	24
II.5 Conclusion	25

ChapitreIII :Techniques des Ondelettes appliquées au MAS

III.1 Introduction	26
III.2. La transformée deFourier	26
III.3 Transformée en Ondelettes	27
III.3.1Transformée en ondelettes continue TOC	27
III.3.2 Méthodes d'analyses Temps –fréquence	29
III.3.3 Méthodes de la transformée d'ondelette discrète (TOD)	30
III.4 Identification du défaut dans la machine asynchrone par l'analyse TOD	31
III.5 Analyse du spectre du courant statorique par FFT	31
III.6 Analyse des résultats par simulation	34
III.6.1 Machine avec défaut rotorique	34
III.6.2 Analyse spectrale du courant statorique par TOD (DWT) en régime permanent	34
III.7 Conclusion	38
Conclusion général	39
Annexes	40
Bibliographie	41

Introduction Générale

Introduction générale

Actuellement, la plupart des équipements industriels sont à base de machines asynchrones triphasées, du fait de leur robustesse et de leur faible coût.

En outre, le domaine d'application du moteur asynchrone à cage est très vaste. D'où une diversité d'exploitation dans différents secteurs stratégiques, nous citons entre autre : la traction ferroviaire, la propulsion électrique des navires, le pompage, la ventilation, les machines-outils, le nucléaire.

Toutefois, cette machine peut être affectée par des défauts potentiels qui se répercutent sur la sécurité de la production, la qualité du service et la rentabilité des installations. Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machines.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente la détection des défauts rotorque dans la machine asynchrone. Les outils d'analyse et diagnostic de défaut sont à base de l'utilisation du spectre par le biais de la transformée de Fourier (FFT) et de l'ondelette (TOD).

Ce présent mémoire s'articule autour des chapitres suivants :

Le premier chapitre, est consacré à l'état de l'art du diagnostic de défaut de la machine asynchrone. Une citation des divers défauts pouvant affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone ainsi que les différentes méthodes de détection et diagnostique de ces défauts sont représentés.

Le second chapitre est consacré à la présentation du modèle de la machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil, dédié à la simulation des divers défauts (rupture des barres). En premier lieu, nous présentons le développement du modèle de la machine asynchrone basée sur le schéma équivalent. Par l'intermédiaire d'une transformation généralisée, nous introduisons ensuite le modèle diphasé. Ainsi, on présente les résultats de simulation utilisant le modèle de la machine à l'état sain et avec défaut.

Le dernier chapitre comporte une comparaison entre l'analyse de Fourier et l'analyse des Ondelettes suivis d'une application pour la détection de défauts rotoriques. L'analyse et le traitement du défaut est réalisé à travers l'utilisation de l'analyse spectrale du courant statorique à base de la transformation de fourrier rapide (FFT) et l'ondelette discrète (TOD).

Enfin une conclusion générale où on présente une synthèse des résultats ainsi obtenus ainsi les perspectives future pour l'amélioration de ce travail.

Chapitre I

Etat de l'art sur diagnostic des défauts dans la MAS

I.1 Introduction

La machine asynchrone, connue également sous le terme anglo-saxon induction machine, est une machine à courant alternatif polyphasée ne disposant d'aucune connexion entre son rotor et son stator. L'interaction entre le champ créé par l'inducteur (généralement le stator) et le courant induit au niveau du bobinage ou bien des barres, selon le type de machine, de l'induit (généralement le rotor) engendre le couple électromagnétique.

Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent. Les machines asynchrones ont longtemps été fortement concurrencées par les machines synchrones dans les domaines de forte puissance mais avec l'avènement de l'électronique de puissance on les retrouve dans diverses applications et domaines

Dans ce chapitre, nous présentons les différents constituants de la machine asynchrone, les défauts qu'elle peut présenter ainsi que les différentes méthodes de diagnostic.

I.2 Eléments de constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil [1]. Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la figure I.1.

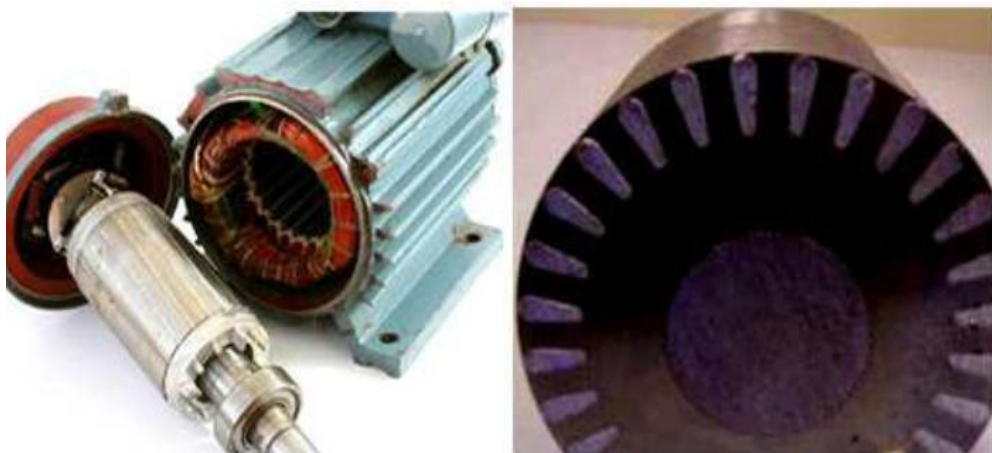


Figure I.1: constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [1].

I.2.1 Stator

Comme son nom l'indique, il représente la partie statique de la machine asynchrone. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. L'intérieur du stator comprend essentiellement :

- Un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique.
- Des enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases logés dans des encoches.

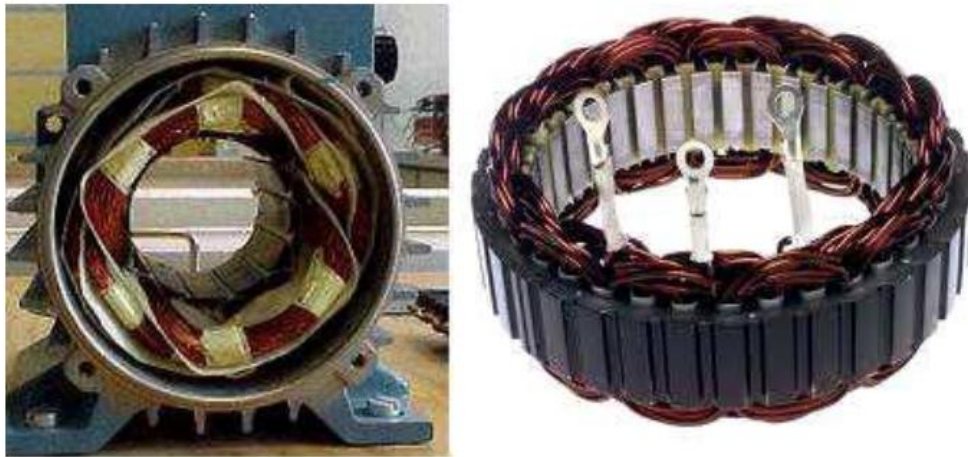


Figure I.2: Stator de la machine asynchrone [1].

I.2.2 Rotor

▪ Rotor à cage

Dans la machine asynchrone le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor la figure (I.3). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique, 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 [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.

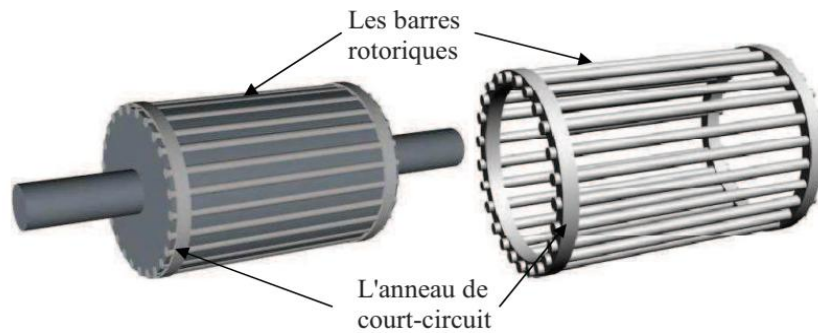


Figure I.3: Représentation rotor à cage [2].

▪ Rotor bobiné

Les tôles de ce rotor sont munies d'encoches où sont placés des conducteurs formant des bobinages. On peut accéder à ces bobinages par l'intermédiaire de trois bagues et trois balais. Ce dispositif permet de modifier les propriétés électromécaniques du moteur

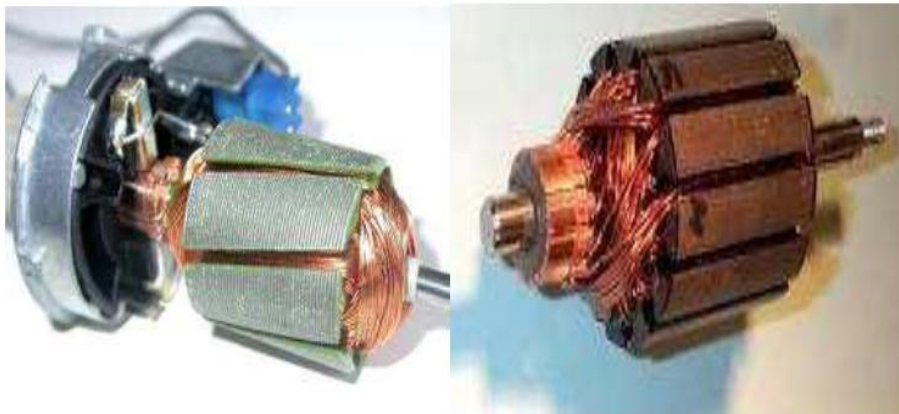


Figure I.4: Représentation rotor bobiné.

1.2.3 Les organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction plusieurs efforts:

- ❖ Efforts de flexion (force con-centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc....)
- ❖ Efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges.
- ❖ Efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent et transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre.

I.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit. Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique.

Lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. Lorsque le rotor tourne à une vitesse N_s différente du synchronisme, l'application de la loi de *FARADAY* à un des roulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier.

L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine.

Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est :

$$n_1 = \frac{f_s}{P} \quad (I.1)$$

Où:

f_s : est la fréquence d'alimentation,

p : représente le nombre de paire de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), c'est à dire lorsque $n \neq n_1$, car dans le cas contraire, c'est à dire lorsque $n = n_1$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

I.4 Les avantages et inconvénients de la machine asynchrone

Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone sont assez nombreux mais les principaux sont résumés dans le tableau I.1

Tableau I.1: Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone

Les avantages	Les inconvénients
❖ La robustesse. ❖ La simplicité de construction. ❖ Leurs bas coûts. ❖ Un rendement excellent.	❖ Non découplage naturel. ❖ Non linéarités.

I.5 Types des défauts dans la machine asynchrone à cage

La machine asynchrone est considérée comme robuste mais peut être soumise à des contraintes au cours de son fonctionnement: longue durée, conditions dures, ce qui provoque sa défaillance.

Les principaux défauts de la machine asynchrone peuvent être classés par catégories dans deux types : mécaniques et électriques.

I.5.1 Défauts statorique

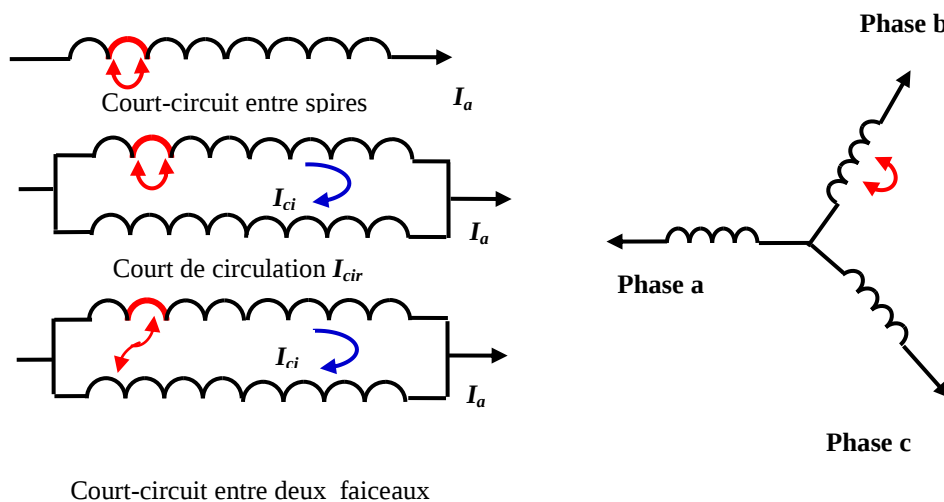
L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. On peut citer à titre d'exemple, les défauts de type courts-circuits entre-spices qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques.

Ce type de défaut peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique.

On peut citer aussi les courts-circuits qui apparaissent entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques. Les courts-circuits entre spires est donc le défaut le plus fréquemment en contré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est [4].

$$f_{cc} = \left| \frac{n}{p} (1 - g \pm k) \right| \quad (I.2)$$

Avec $n=1,2,3,\dots$ et $k=1,3,5,\dots$



a. Différents courts-circuits. b. Court-circuit entre deux spires de la phase 'b'

Figure I.5: Défauts Statorique [4].

I.5.2 Défauts rotoriques

I.5.2.1 Cassure des barres

La rupture des barres rotoriques d'une machine asynchrone est l'un des défauts les plus couramment étudiés, en raison de sa simplicité de réalisation. Ce défaut induit des modifications dans les courants statorique et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal.

En effet, lors du défaut d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produites et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences autour de la fréquence fondamentale f_s telles que [5]:

$$f_{abc} = f_s (1 \pm 2.K.g) \text{ avec } K = 1, 2, 3 \quad (I.3)$$

g : glissement,

f_s : fréquence d'alimentation statorique

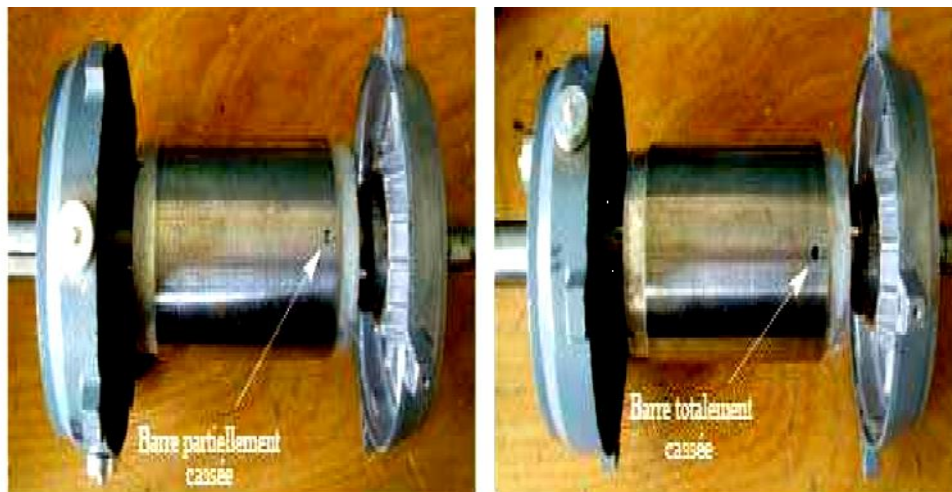


Figure I.6: Défaut de cassure de barre rotorique [5].

I.5.2.2 Défauts d'excentricité

L'excentricité de la machine asynchrone est la condition de l'entrefer inégal qui existe entre le stator et le rotor. Quand l'excentricité devient grande, les forces radiales résultantes (connues aussi comme Concentration Magnétique déséquilibrée) peuvent causer par le stator avec la bande de frottement du rotor, ce qui conduit à des dommages du stator et du rotor. La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries qui sont naturelles. Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer :

- l'excentricité statique.
- l'excentricité dynamique.
- L'excentricité mixte

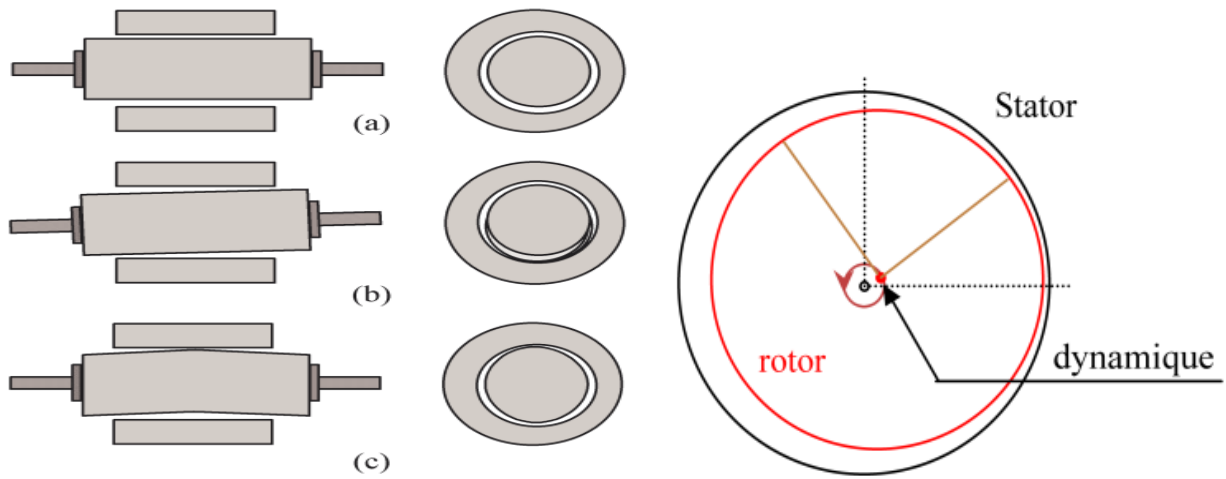
Les enroulements statorique sont électriquement modifiés, ce qui entraîne des effets dans le spectre des courants (Figure I.7) [6].

L'apparition des deux types d'excentricité au même temps est généralement appelée **excentricité mixte**.

L'excentricité dans la machine à induction augmente l'apparition des composantes additionnelles dans le spectre du courant, leurs fréquences sont données par des composantes fréquentielles suivantes :

$$f_{abc} = f_s \left(1 \pm K \cdot \frac{(1-g)}{p} \right) ; \text{avec } : K = 1, 2, 3 \quad (\text{I.4})$$

p: nombre de paire de pôles.



(a) L'excentricité statique, (b) Défaut de centrage, (c) Déformation du rotor, (d) L'excentricité dynamique
Figure I.7: Représentation de l'excentricité statique et dynamique dans la machine asynchrone [6].

I.5.2.3 Défauts de roulement

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants. En fonctionnement normal la défaillance est due à la fatigue commence par des petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface (Figure I.8). Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [7].

$$f_{roul} = |f_s - K \cdot f_v| \quad (\text{I.5})$$

Où:

k=1,2,3, est un entier et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations.

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres du roulement. Les fréquences des vibrations qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont :

▪ **Défauts au niveau d'une bille**

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right)^2 \right] \quad (I.6)$$

▪ **Défauts sur la bague intérieure**

$$f_{b.int} = \frac{nb}{2} f_{rot} \left[1 + \left(\frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right) \right] \quad (I.7)$$

▪ **Défauts sur la bague extérieure**

$$f_{b.ext} = \frac{nb}{2} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right) \right] \quad (I.8)$$

avec :

nb : nombre de billes,

d : diamètre des billes,

D : diamètre de la cage

f_{ext} et f_{int} correspondent respectivement à la fréquence de passage des billes sur la partie défective de la bague extérieure ou intérieure, f_{bille} correspond à la fréquence de rotation de la bille défectueuse sur la bague extérieure ou intérieure, f_{cage} correspond à la fréquence de rotation de l'ensemble du train de billes

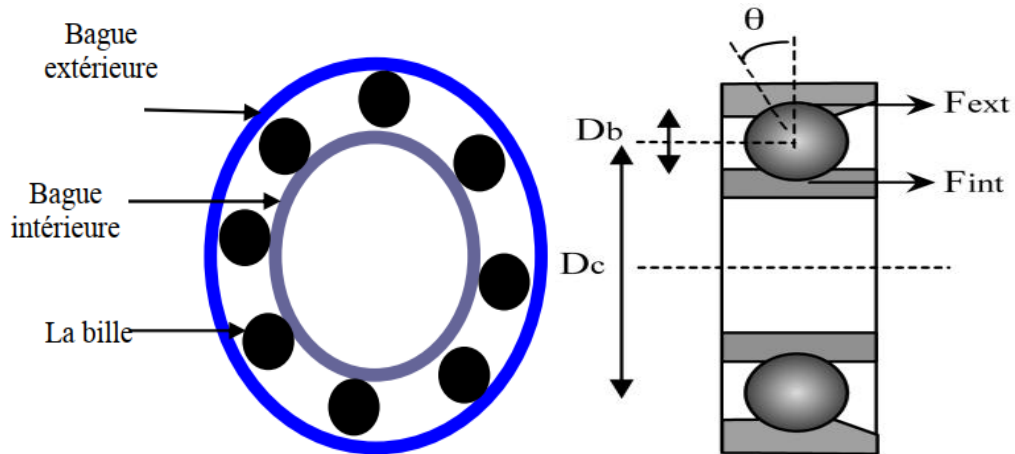


Figure I.8: Dimension du roulement à bille [7] [8].

Où D le diamètre d'un élément roulant, D_b la distance entre les centres des billes diamétralement opposées, nb est le nombre d'éléments roulants, θ angle de contact des billes avec les bagues du roulement et f_{rot} est la fréquence de rotation du rotor [8].

I.6 Etude statistique des défauts

Un défaut dans un composant peut résulter d'une usure normale, d'une mauvaise conception, d'un mauvais montage (désalignement), d'une mauvaise utilisation ou d'une combinaison de ces différentes causes. Si un défaut n'est pas détecté suffisamment tôt, il peut entraîner la dégradation complète de la machine.

Plusieurs études ont été effectuées sur la fiabilité des machines électriques réalisées par différents groupes industriels. L'étude principale, effectuée par la compagnie "General Electric", a été publiée dans EPRI (*Electric Power Research Institute*) en 1982 [9], elle couvre environ 5000 moteurs, dont approximativement 97% étaient des moteurs asynchrones triphasés à cage.

La figure (I.9) récapitule la distribution des défauts dans les moteurs examinés dans cette étude. Il faut noter que cette figure représente des données de machines fonctionnant dans différentes applications et dans différentes branches dans l'industrie. Il est connu que l'occurrence d'un type quelconque de défauts dépend fortement de l'application spécifique de la machine. Par exemple, il a été constaté que dans des machines asynchrones à cage, les défauts de la cage rotorique sont plus élevés que les défauts d'enroulement statorique pour les applications où la machine est fréquemment arrêtée et remise en marche sous une charge importante (machines à outils et les industries minières).

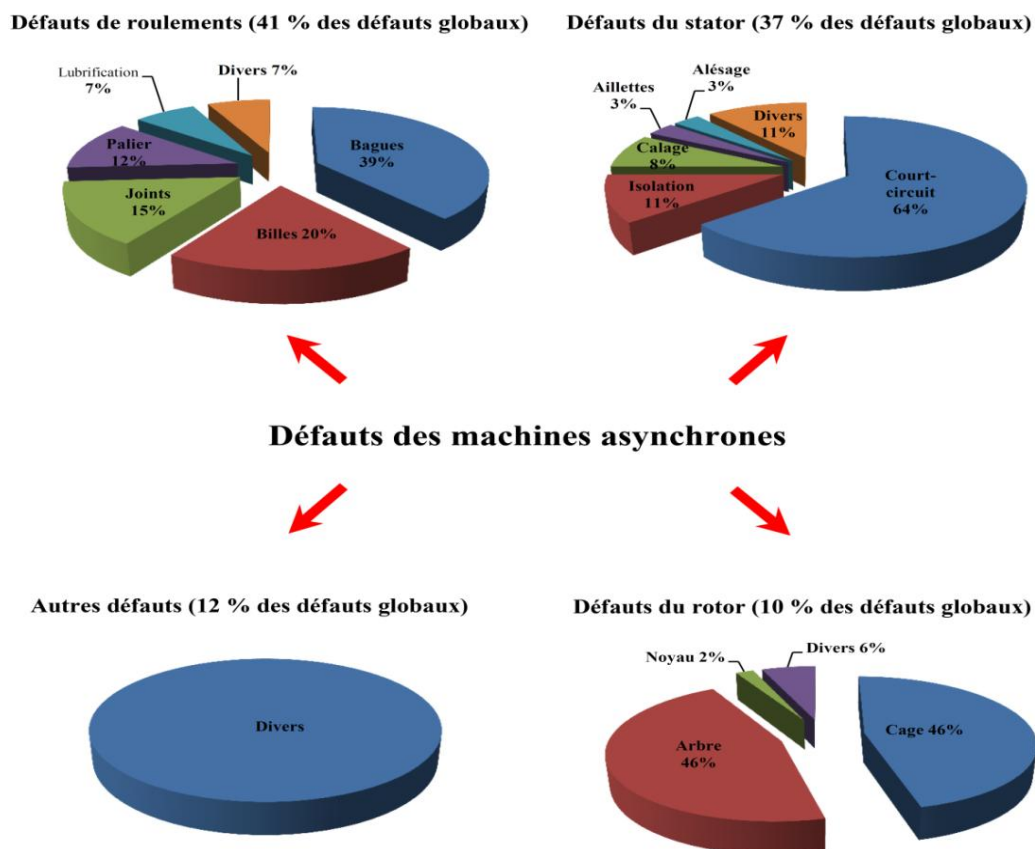


Figure I.9: Distribution des défauts [9].

I.7 Méthode de diagnostique des défauts

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses mais on peut les classer suivant deux axes :

- Les méthodes outils mathématiques qui permettent de modéliser les systèmes, les causes et les symptômes de défaillance, pour faciliter les démarches inductives et déductives, qui relèvent du domaine des méthodes de diagnostic interne.
- Les méthodes capables de reproduire sous forme informatique, les modes de raisonnement de l'homme. Ces derniers sont basés sur la discipline de l'intelligence artificielle et sont du domaine des méthodes de diagnostic externe.

On peut classer les méthodes de diagnostic en premier lieu dans les deux grandes familles: les méthodes internes et externes. et les méthodes inductives et déductives.

I.7.1 Diagnostic par les méthodes externes

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine par apprentissage afin de trouver les relations de cause à effet [10].

Dans ces méthodes de diagnostic le facteur déterminant est l'algorithme de classification.

❖ Méthodes basées sur l'analyse spectrale

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de la maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de cette installation.

D'après la littérature, les principales techniques du diagnostic utilisées sont les suivantes :

- **Diagnostic par mesure 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 [11].

L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur.

- **Diagnostic par la mesure de la puissance instantanée**

Il est clair que le niveau d'informations portées par le signal de la puissance est plus grand que celui donné par le courant d'une seule phase, ce qui représente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres. Cette méthode est utilisée pour la détection des défauts mécaniques ou encore les défauts électriques tels que les courts-circuits entre spires statoriques.

▪ Diagnostic par l'analyse du courant statorique

La mesure des signaux puis leurs traitements dans le domaine fréquentiel ne peuvent servir, que si les composantes fréquentielles définies pour chaque défaut sont connues. Il y a plusieurs techniques pour effectuer l'analyse des courants. La plus utilisée est de réaliser une analyse fréquentielle (FFT par exemple) directement sur les courants statoriques. Cette méthode, connue sous le nom de MCSA, est largement employée depuis ces dernières années [12].

I.7.2 Diagnostic par les méthodes internes

Le diagnostic de défaillances par des méthodes internes requiert un modèle du système à surveiller, et s'il n'y en pas, on élabore un qui convienne (fiable et suffisamment précis). Ce modèle peut varier selon les objectifs. Il peut être plus ou moins agrégé, représentatif d'un modèle de bon fonctionnement ou de fonctionnement caractéristique d'une ou plusieurs défaillances. Habituellement un modèle est une description formelle (Mathématique) du système à surveiller. Mathématiquement on peut avoir plusieurs modèles du même système comme en automatique par exemple, peuvent être à temps continu ou discret, descriptibles au moyen d'équations différentielles ou d'équations aux différences.

Un modèle peut aussi être très difficile à obtenir, de plus, il peut être plus ou moins approximatif [13]. Ces méthodes de diagnostic internes reposent sur la comparaison de mesures réelles sur le système à surveiller et des informations que fournit le modèle. Les écarts caractérisent le fonctionnement du système :

- à un écart nul, correspond un fonctionnement de type normal.
- à un écart non nul, correspond un fonctionnement de type défaillant.

Ces méthodes internes se classent en deux grandes catégories; les méthodes de redondance analytiques qui utilisent les techniques d'estimation d'état et les techniques d'estimations paramétriques qui ont pour but l'estimation des paramètres du modèle. Les méthodes internes de diagnostic se distinguent selon le modèle utilisé :

- Modèle de simulation
- Estimation paramétrique
- Modélisation des signaux

I.7.3 Diagnostic par les Méthodes inductives

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

I.7.4 Diagnostic par les Méthodes déductives

Les méthodes déductives doivent trouver quels sont les effets dans les systèmes. Une vérification des «effets trouvés par rapport aux effets possibles» permet de confirmer Ou d'infirmier l'existence du défaut.

Dans ce dernier cas, le raisonnement est appelé raisonnement mixte ou avant arrière. La connaissance "à priori" de la cause " défaut " implique la connaissance de certains effets [14].

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques rappels sur la machine asynchrone à cage d'écureillet ses différents éléments constitutifs. Ensuite, nous avons présenté les différents types de défautspouvant survenir dans une machine asynchrone. Pour chaque type de défauts, nous avons cité lescauses principales, les mécanismes et les symptômes produits. Les défauts de la machine électriquepeuvent être classifiés dans deux catégories : électrique ou mécanique,un des défauts les plusrencontrés étant rupture de barresrotorique. Enfin, la chapitre suivante sera consacrée à lamodélisation de la machine asynchrone avec et sans défaut.

Chapitre II

Modélisation et simulation de la MAS avec défaut rotorique

II.1 Introduction

La machine asynchrone à cage est connue par sa robuste, mais elle peut avoir des défauts rotorique (cassure de barre, excentricité) ou statorique (court-circuit), des nombres des techniques sont connues pour détecter ces défauts avant arrêt le fonctionnement, plus des techniques détections ces défauts analyse spectrale de courant statorique.

Pour cela nous utilisons le modèle de la machine asynchrone en défaut type de cassure de barre dans le repère de Park. Pour analyser le comportement du moteur asynchrone pendant le défaut cassure de barre, la machine asynchrone est simulé dans l'environnement *MATLAB/Simulink* lors que des régimes de fonctionnement (sain et avec défaut).

II.2 Modélisation de la machine asynchrone

L'étude du fonctionnement de la machine consiste classiquement à rechercher l'ensemble des équations reliant les variables internes aux grandeurs externes : tensions aux bornes de la machine, courants consommés et couple disponible [15]. Les différentes approches pour l'étude reposent sur la résolution des équations de l'électromagnétisme et de la mécanique. Les différences proviennent des hypothèses simplificatrices qu'il est possible de faire, en fonction du domaine de fréquence concerné, et de la topologie (structure physique) du système étudié, c'est-à-dire en fonction des objectifs de la modélisation.

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction, est constituée :

- ❖ D'une armature statorique fixe comportant trois enroulements identiques à p paires de pôles et décalés d'un angle électrique de $\frac{2\pi}{3p}$. Ces derniers sont logés dans des encoches et reliés à la source d'alimentation. Ce dispositif crée un champ tournant de vitesse de synchronisme $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$.

- ❖ D'une armature rotorique mobile dont la structure peut-être constituée de trois enroulement triphasés (rotor bobiné) raccordés en étoile à trois bagues sur les quelles frottent trois balais fixes accessibles par la plaque à bornes et mis en court-circuit pendant les régimes permanents.

- ❖ L'armature rotorique peut-être aussi (le plus souvent) un ensemble de conducteurs massifs intégrés aux tôles ferromagnétiques (rotor à cage d'écureuil).

- ❖ Le rotor possède dans ce cas un certain nombre d'encoches contenant chacune une barre conductrice, en cuivre ou en aluminium.

- ❖ Les barres sont ensuite réunies entre elles aux deux extrémités par deux anneaux conducteurs [16].

II.2.1 Modèle triphasé

Avant d'établir le modèle de la machine asynchrone en vue de sa commande, nous rappelons brièvement les hypothèses simplificatrices, désormais classiques, retenues :

- les circuits magnétiques sont non-saturés,
- les pertes fer sont négligées,
- il n'y a pas d'effet de peau,
- l'effet des encoches est négligé,
- la répartition de la force magnétomotrice est sinusoïdale.

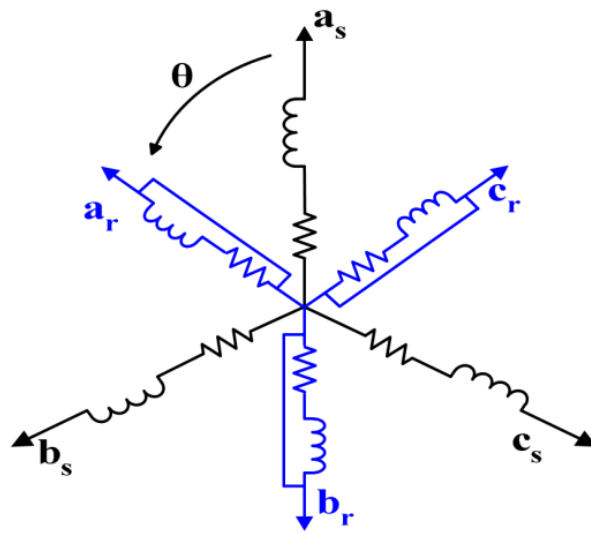


Figure II.1: Représentation des enroulements d'une MAS triphasée

La MAS est constitué par deux circuits couplés. Pour représenter le modèle d'une MAS dans un repère triphasé, il faut écrire les équations différentielles liant les tensions, les courants et les flux pour chaque enroulement du stator et du rotor selon le modèle présenté sur la figure (II.1). En appliquant la loi d'Ohm généralisée aux bornes de chacune des phases statorique et rotorique nous pouvons écrire les équations des tensions et des flux de la MAS :

$$\begin{bmatrix} u_s \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] & 0 \\ 0 & [R_r] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} [\varphi] = [L] \cdot [I] \dots\dots\dots (II.1)$$

et

$$[\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.2)$$

avec :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \text{ et } [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = M_{rs} \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(p\theta) & \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(p\theta) \end{bmatrix}$$

avec: $[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sp} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sp} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sp} \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} & M_r & M_r \\ M_r & L_{rp} & M_r \\ M_r & M_r & L_{rp} \end{bmatrix}$$

L'équation mécanique est définie par :

$$J \frac{d\Omega(t)}{dt} + f_v \Omega(t) = C_e(t) - C_r(t) \dots \dots \dots (II.3)$$

Le couple électromagnétique en fonction des trois courants statoriques et des trois courants rotoriques s'exprime sous la forme :

$$C_e = \frac{1}{2} \cdot [I]^T \cdot \frac{d[L]}{d\theta} \cdot [i] \dots \dots \dots (II.4)$$

Le modèle de représentation de la machine asynchrone que nous venons de présenter présente l'inconvénient d'être relativement complexe dans la mesure où les matrices contiennent des éléments variables en fonction de l'angle de rotation θ . Une solution pour obtenir des coefficients constants consiste à appliquer une transformation mathématique au système. Cette transformation est plus connue sous le nom de transformation de Park.

II.2.2 Modèle diphasé de Park

II.2.2.1 Transformation triphasée/diphasé

La représentation de Park ou représentation vectorielle, représente la projection des trois phases de la machine sur un repère biphasé orthogonal. En plus des simplifications dans la modélisation triphasée, dans le repère de Park, la machine est supposée électriquement équilibrée et on choisit de totaliser les fuites magnétiques au stator [18]. Le passage d'une représentation triphasée à une représentation biphasée d'écrite sur la figure (II.2), repose sur la conservation des forces magnétomotrices. Cette transformation est orthonormée.

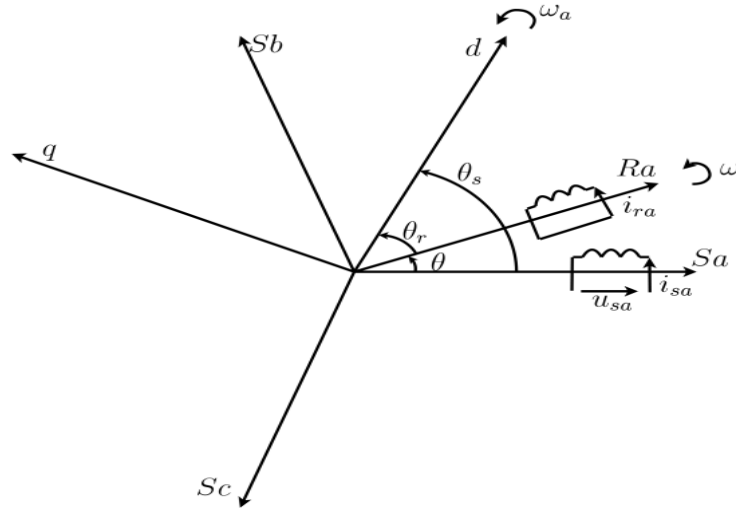


Figure II.2 : Principe de la transformation de Park[18].

Par définition, le système d'axes (d, q) tourne à la vitesse ω_a . Nous allons considérer, comme décrit sur la figure (II.2), l'enroulement équivalent du stator formé des deux bobinages d'axes en quadratures d et s_q tournant à la vitesse ω_a . De même, au rotor, on substitue deux bobinages r_d et r_q aux enroulements triphasés équivalents.

Pour la transformation d'une grandeur statorique, les matrices de passage sont les suivantes :

$$\begin{bmatrix} X_{sd} \\ X_{sq} \\ X_{so} \end{bmatrix} = [P_s] \begin{bmatrix} X_{sa} \\ X_{sb} \\ X_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$\begin{bmatrix} X_{sa} \\ X_{sb} \\ X_{sc} \end{bmatrix} = [P_s]^{-1} \begin{bmatrix} X_{sd} \\ X_{sq} \\ X_{so} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$[P_s] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Pour obtenir les matrices de passage des grandeurs rotoriques, il suffit de remplacer dans l'expression (II.7) θ_s par θ_r .

Dans un souci de simplification du modèle de la machine asynchrone, on choisit de totaliser les fuites magnétiques au stator. Par définition, le système d'axes (d, q) tourne à la vitesse ω_a . Il est intéressant de pouvoir changer de repère selon les besoins de l'utilisateur.

Il existe trois systèmes d'axes de référence ayant des spécificités distinctes :

❖ Si le référentiel est fixe par rapport au stator $\omega_a = 0$, on obtient un système électrique où les grandeurs statoriques sont purement alternatives et à la fréquence de l'alimentation. La simulation de la machine asynchrone dans ce repère n'exige donc aucune connaissance de la position du rotor, ce qui constitue un avantage pour la commande sans capteur de position.

❖ Si le référentiel tourne à la vitesse de synchronisme $\omega_a = \omega_s = 2\pi f_s$, on obtient un système électrique purement continu qui est très bien adapté aux techniques d'identification. Cependant la position du champ tournant doit être reconstituée à chaque instant d'échantillonnage.

❖ Si le référentiel est fixe par rapport au rapport au rotor $\omega_a = \omega$, les signaux électriques sont alors quasi-continus. La pulsation des grandeurs électriques est alors égale à $g\omega$ qui est faible dans les conditions réelles de fonctionnement. Lorsqu'on a accès à la position mécanique, ce repère privilégié du fait de la quasi-continuité des grandeurs électriques [19].

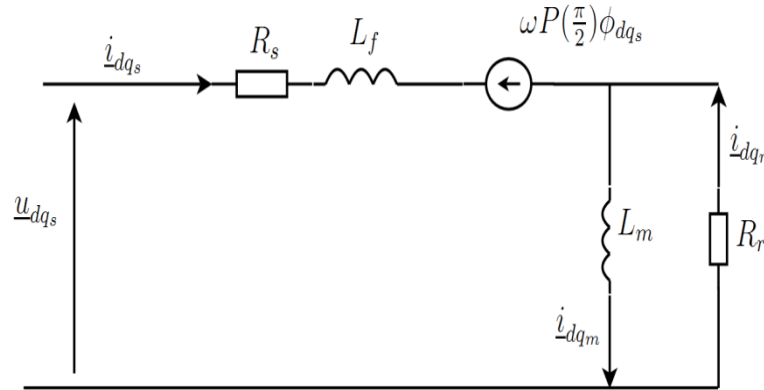


Figure II.3: Schéma électrique équivalent de la machine asynchrone dans le repère de Park [19].

La figure II.3 représente le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone en régime dynamique, avec les fuites totalisées au stator.

L'expression du couple C_e dans le repère de Park avec fuites ramenées au stator s'écrit :

$$C_e = p \frac{L_m}{L_r} (i_{qs} \varphi_{dr} - i_{ds} \varphi_{qr}) \quad (\text{II.8})$$

II.2.2.2 Modèle d'état de la machine asynchrone

Pour rappel, notre choix de repère est celui lié aux axes rotoriques, où les grandeurs sont les plus proches du continu. En associant le vecteur d'état qui contient les courants statoriques et les flux rotoriques ainsi que l'entrée et la sortie du système correspondant respectivement aux tensions et courants statoriques, on écrit le modèle d'état de la machine asynchrone :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(\omega)x(t) + B u(t) \\ Y = C x(t) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

avec

$$x = \begin{bmatrix} i_{ds} & i_{qs} & \phi_{dr} & \phi_{qr} \end{bmatrix}^T : \text{vecteur d'état}$$

$$u = \begin{bmatrix} U_{ds} & U_{qs} \end{bmatrix}^T, Y = \begin{bmatrix} i_{ds} & i_{qs} \end{bmatrix}^T : \text{entrée et sortie de la machine}$$

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_r}{L_f} & \omega & \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} & \frac{\omega}{L_f} \\ -\omega & -\frac{R_s + R_r}{L_f} & -\frac{\omega}{L_f} & \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} \\ R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} & 0 \\ 0 & R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

II.3 Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone

Dans le cadre du diagnostic, la mise au point d'un modèle est surtout motivée par les possibilités de simuler des défauts [20]. proposent une modélisation multi mailles du rotor de la machine asynchrone à cage d'écureuil faisant intervenir les paramètres électriques des barres et de l'anneau. Outre leur complexité, l'inconvénient de ces modèles est qu'ils nécessitent une connaissance approfondie des paramètres électriques de la machine. Dans le cas d'une approche paramétrique, ces modèles sont inappropriés en raison du nombre élevé des paramètres qui les régissent [21].

❖ Le modèle de défaut rotorique explique le déséquilibre à travers un minimum de paramètres qui sont l'image du défaut présent dans la machine. Ces paramètres permettent ainsi de quantifier et de localiser le défaut.

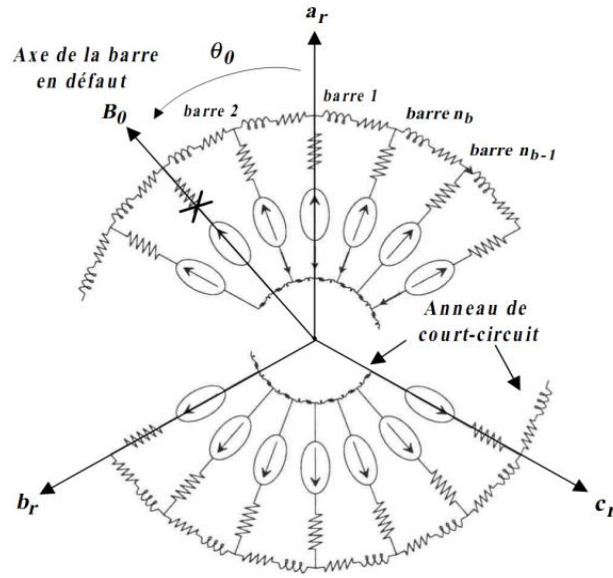


Figure II.4: Modèle par dipôles élémentaires du rotor en défaut [20] [21].

❖ Figure (II.4) illustre la modélisation conventionnelle du rotor par dipôles élémentaires avec une barre cassée. On suppose que le rotor en défaut est équivalent à un rotor sain, auquel nous ajoutons un bobinage supplémentaire parcouru par un courant fictif i_0 de défaut (se retranchant au courant de la barre en défaut). Par conséquent le modèle du mode différentiel comporte deux paramètres de défaut permettant la détection et la localisation du défaut de rupture des barres cassées au rotor.

❖ Angle électrique noté θ_0 repérant le "bobinage" en défaut par rapport à l'axe d (axe de l'encoche rotorique dont le courant induit est en phase avec la première phase statorique). Ce paramètre permet la localisation de la barre en défaut.

❖ Rapport de défaut noté η_0 égale au rapport du nombre de spires en défaut divisé par le nombre total de spires dans une phase triphasée rotorique fictive sans défaut. Ce paramètre permet de quantifier le déséquilibre et d'obtenir le nombre de barres cassées.

Nombre de spires au rotor étant fictif, pour un rotor de n_b barres, si on considère une spire rotorique comme étant une maille constituée de deux barres court-circuitées par deux portions d'anneaux, alors le nombre total de spires rotoriques est égal au nombre de barres au rotor.

Une phase fictive est constituée donc de $\frac{n_b}{3}$ barres. Pour n_{bc} barres cassées sur une phase, l'expression du rapport de défaut η_0 est donnée par [22]:

$$\eta_0 = \frac{3.n_{bc}}{n_b} \quad (\text{II.10})$$

II.3.1 Modélisation du défaut de rupture des barres

II.3.1.1 Schéma équivalent

La figure (II.5) représente le schéma électrique équivalent de la MAS avec défaut rotorique en régime dynamique avec fuites ramenées au stator. La rupture de barre au rotor ramène à un simple quadripôle résistif $R_{défaut}$ mis en série avec la résistance rotorique. L'expression de la matrice résistance équivalente au rotor est alors obtenue comme suit :

$$[R_{eq}] = [R_r] + [R_{défaut}] = [R_r] - \frac{\alpha}{1-\alpha} Q(\theta_0) [R_r] \quad (II.11)$$

avec:

$$\alpha = \frac{2}{3}\eta_0, [R_r] = R_r \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ et } Q(\theta_0) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0)^2 & \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) \\ \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) & \sin(\theta_0)^2 \end{bmatrix}$$

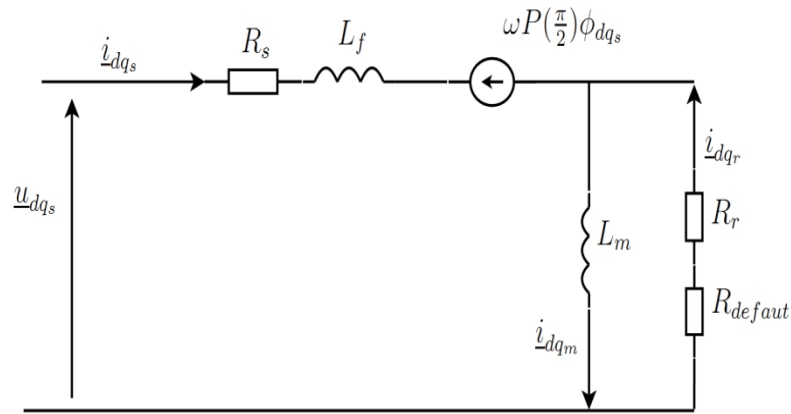


Figure II.5: Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone [22].

II.3.1.2 Représentation d'état du modèle de défaut rotorique

On remarque à partir de la figure (II.5) le modèle de la machine asynchrone avec défaut rotorique et le même que celui de la machine en fonctionnement sain sauf que la résistance rotorique est remplacée par la résistance équivalente. La machine asynchrone peut être donc décrite par le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}}(t) = A(\omega) \underline{x}(t) + B \underline{u}(t) \\ \underline{Y} = C \underline{x}(t) \end{cases} \quad (II.12)$$

Avec:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} i_{ds} & i_{qs} & \phi_{dr} & \phi_{qr} \end{bmatrix}^T, \underline{u} = \begin{bmatrix} U_{ds} & U_{qs} \end{bmatrix}^T \text{ et } \underline{Y} = \begin{bmatrix} i_{ds} & i_{qs} \end{bmatrix}^T$$

et

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -([R_s] + [R_{eq}])L_f^{-1} - \omega.P(\pi/2) & ([R_{eq}].L_m^{-1} - \omega.P(\pi/2))L_f^{-1} \\ [R_{eq}] & -[R_{eq}].L_m^{-1} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

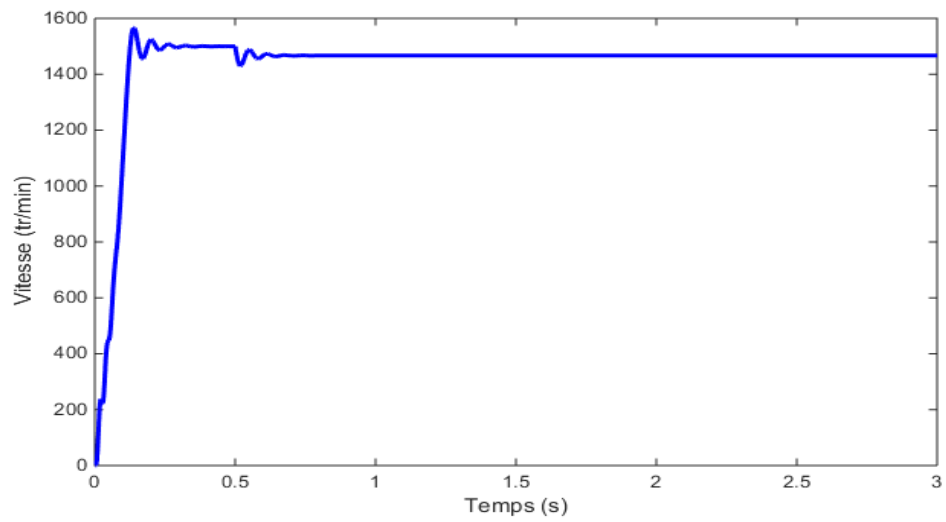
$$[R_{eq}] = [R_r].\left(I - \frac{\alpha}{1+\alpha}Q(\theta_0)\right) \text{ où } \alpha = \frac{2}{3}\eta_0$$

II.4 Résultats de simulation

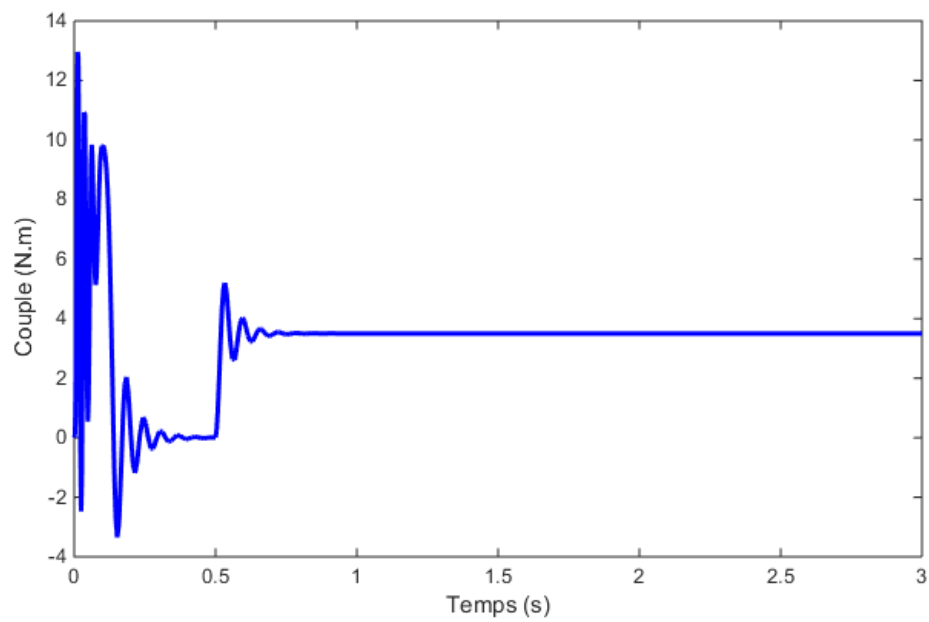
Une fois le modèle de la machine asynchrone à cage établi, nous pouvons aborder l'aspect lié à la simulation de celle-ci en utilisant *MATLAB/SIMILINK*. Cela permet de mettre en évidence le comportement du moteur asynchrone dans le cas où le rotor est sain et dans le cas où le rotor est défaillant. Les paramètres électriques nécessaires à la simulation du modèle de la machine sont donnés à l'annexe.

II.4.1 Machine saine

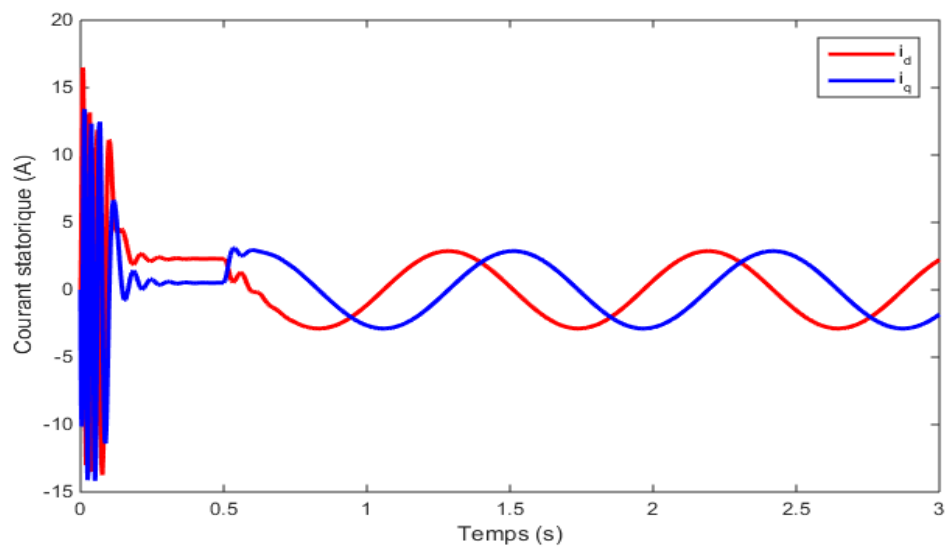
Pour illustrer le comportement du modèle simulé, un couple nominal de 3.5Nm est appliqué à la machine à l'instant $t=0.5s$. La simulation du modèle du moteur asynchrone avec un rotor sain donne, pour la vitesse la courbe de la figure (II.6.a). Le couple électromagnétique, est présenté à la figure (II.6.b). Le courant statorique est représenté sur la figure (II.6.c). Toutes ces courbes correspondent bien à un fonctionnement normal d'un moteur asynchrone, sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée.



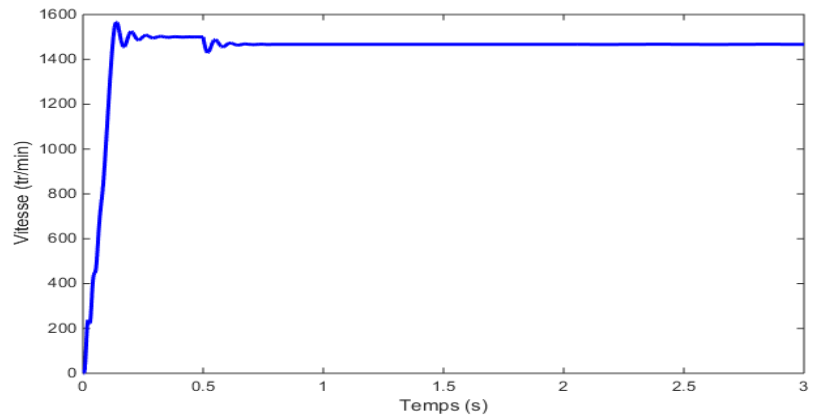
a. Vitesse de rotation (tr/min)



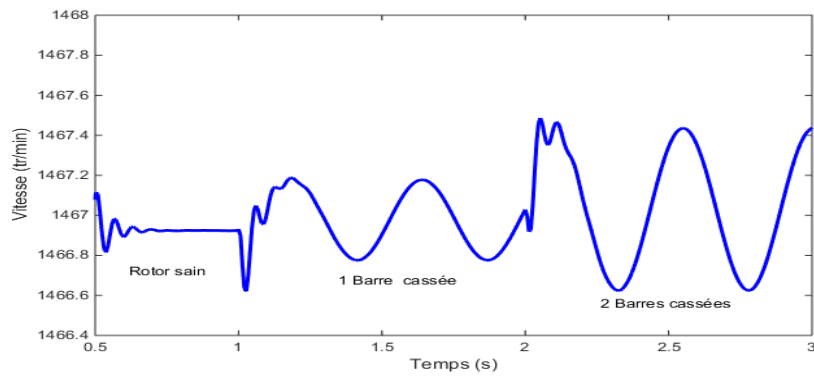
b. Couple électromagnétique (Nm)

c. Courant statorique i_{ds} , i_{qs} (A)Figure II.6: Simulation de la machine saine en charge ($C_r=3.5$ N.m)

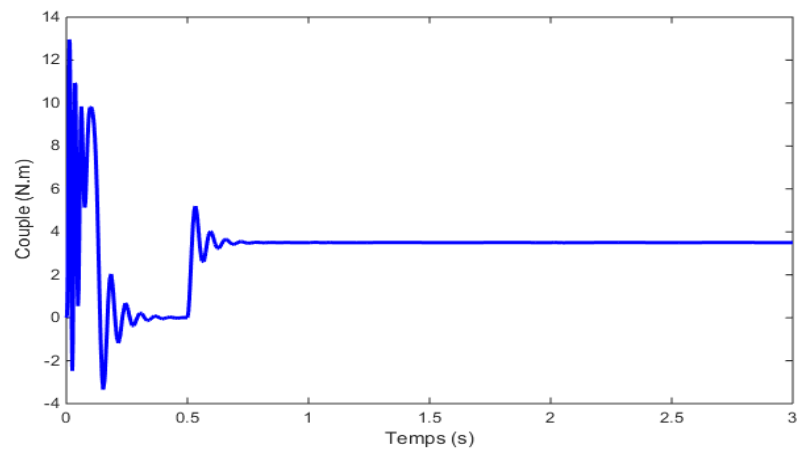
II.4.2 Machine avec défaut rotorique



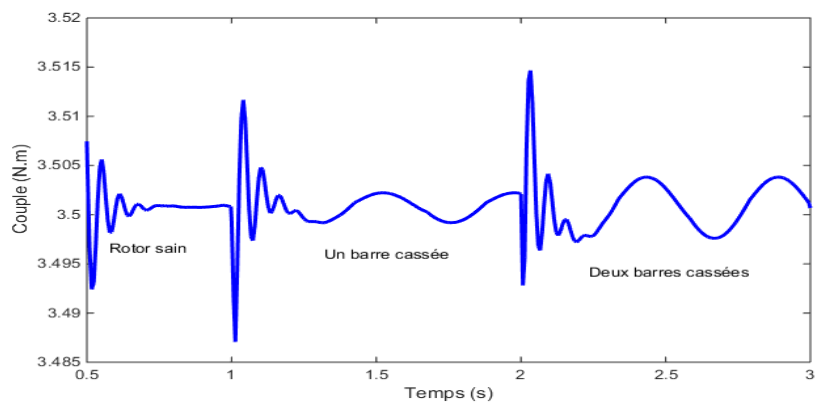
a. Vitesse de rotation (tr/min)



a.1 Vitesse de rotation agrandie



b. Couple électromagnétique (N.m)



b.1. Couple électromagnétique a grande

Figure II.7: Simulation de la machine avec rupture successive des barres '1 puis 2' à partir de $t=1s$

La figure (II.7) montre l'évolution du couple électromagnétique ainsi que la vitesse de rotation, sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdal équilibréeestprésence un défaut. pour un couple résistant égale 3.5Nm est appliqué à la machine à l'instant $t=0.5s$. La vitesse chute alors à 1466.5 tr/min (figure II.7.a).

En régime établi, on introduit à l'instant $t=1s$ un défaut de type défaut rotorique.

A $t= 1 s$, nous simulons la rupture un barre. La figure (II.7.b1) montre que le couple présente bien une ondulation à cette pulsation. Cette variation de couple sera la cause d'une variation périodique de vitesse (figure II.7.a1).

A $t= 2 s$, on simule la rupture de deux barres cassées. Ceci se traduit sur le couple et la vitesse par une augmentation de l'amplitude des oscillations.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le modèle de la machine asynchrone sans ou avec défaut rotorique. Le passage à un modèle diphasé équivalent en utilisant une transformation généralisée nous a permis la réduction de l'ordre du système. Grâce à ce modèle nous avons pu faire un gain économie notable de temps de simulation. A l'aide de ce modèle nous avons pu mettre en évidence les phénomènes liés à la rupture des barres au rotor comme l'ondulation du couple et de la vitesse ainsi que la modulation de l'amplitude du courant statorique.

Nous pouvons conclure que les résultats obtenus, afin de déterminer la composition fréquentielle de ce signal et par conséquent de trouver les harmoniques caractérisant les cassures de barres.

Chapitre III

Techniques des Ondelettes appliquées au MAS

III.1 Introduction

Beaucoup de méthodes d'analyse du signal ont été proposées pour le diagnostic de défauts, parmi ces méthodes on trouve la FFT (*Fast Fourier Transform*), une des méthodes les plus utilisées et les mieux établies. Malheureusement, les méthodes basées sur la FFT ne sont pas appropriées à l'analyse des signaux non-stationnaires et ne peuvent pas indiquer l'information inhérente dans ces signaux. Habituellement, les composants non stationnaires contiennent des informations abondantes sur les défauts de la machine.

L'approche alternative d'un signal non-stationnaire est la transformée en ondelettes, qui a l'avantage de capter la variation en temps des propriétés (fréquences et amplitudes instantanées) contenues dans les signaux. En d'autres termes, la TO permet de décrire le signal dans le domaine temps-échelle et donc de palier l'inconvénient de la transformation de Fourier car le désavantage de la perte de l'information temporelle.

III.2 Transformée de Fourier

L'objectif de cette section n'est pas de fournir une description détaillée de l'analyse de Fourier et de ses fondements, description que l'on pourra trouver dans la littérature. Il s'agit plutôt de présenter cette méthode d'analyse afin de pouvoir situer l'intérêt de l'analyse en ondelettes [23].

La transformée de Fourier (TF) est l'un des outils les plus utilisés par la communauté du Traitement du Signal. Elle permet, en décomposant le signal selon un ensemble de sinusoides, de passer du domaine *temps* au domaine *fréquence*. La transformée de Fourier de $x(t)$ dans L_2 est donnée par :

$$X(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2j\pi V \cdot t} dt \quad (\text{III.1})$$

La transformée de Fourier inverse représente $x(t)$ comme une sommation de sinusoides :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(V) e^{2j\pi V \cdot t} dV \quad (\text{III.2})$$

En vertu du principe d'incertitude, un signal ne peut être localisé finement à la fois dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel. Par exemple, plus un signal est localisé dans le temps, plus son spectre soit étendu.

Dans l'analyse de Fourier, le spectre $X(V)$ fait disparaître toute l'information du domaine temporel : le début et la fin du signal ne sont plus localisables.

La fréquence associée à un signal est inversement proportionnelle à sa période. Donc, si l'on veut obtenir des informations sur un signal basse-fréquence, l'intervalle sur lequel on doit l'observer doit être grand. Inversement, un signal haute fréquence peut être observé sur un intervalle de temps court. Il serait donc intéressant de disposer d'une méthode d'analyse qui puisse prendre en compte la fréquence du signal à analyser.

Cependant, cette analogie est tempérée par l'existence de valeurs négatives qui en rendent l'interprétation délicate. Des procédures de lissage (fréquentiel et temporel) par fenêtrage permettent de réduire les interférences entre les différentes composantes fréquentielles du signal. La représentation temps fréquence a permis ainsi de mettre en évidence la modulation de fréquence linéaire en fonction du temps. Le temps de calcul d'une représentation temps-fréquence peut être prohibitif. De plus l'inter présentation d'une image est souvent difficile.

III.3 Transformée en ondelettes

Le terme ondelette désigne une fonction qui oscille sur un intervalle de longueur finie. Au-delà, la fonction décroît très vite vers zéro.

Historiquement, les premières ondelettes introduites par *Haar* constituaient une base de fonctions orthogonales. Les ondelettes de *Haar* présentent la particularité de ne pas être dérivables. Plus tard, de nouvelles fonctions orthogonales ont été introduites.

La mise en œuvre de ces fonctions est reconnue dans le cadre de l'analyse multi- résolution de signaux [24]. Les structures obliques (frames en anglais) ont été introduites par *Morlet* dans le but de trouver des bases de fonctions (non nécessairement orthogonales) pour représenter des signaux. Ces structures oblique sont fait l'objet des travaux de *Daubechies* qui a développé un support théorique aux résultats de *Morlet*.

Les structures oblique sont des expressions analytiques simples, et toute fonction de carrés sommables peut être approchée, avec la précision voulue, par une somme finie d'ondelettes issues d'une structure oblique. Cette propriété est équivalente à celle de l'approximation universelle pour les réseaux de neurones [25].

III.3.1 Transformée en ondelettes continue TOC

Fondamentalement, la transformée en ondelettes se calcule de la même façon que la transformée de Fourier fenêtrée [26] : on regarde la corrélation, au sens du produit scalaire sur $L_2(R)$, entre le signal à analyser et une famille de fonctions $\{\psi_{a,b}(t), a \in R^*, b \in R\}$ bien localisées en temps et en fréquence :

$$C_x(a,b) = \left\langle x, \psi_{a,b} \right\rangle = \int_g x(t) \psi_{a,b}^* dt \quad (III.3)$$

Cette transformation est en théorie infiniment redondante puisque l'ondelette est tradatée de manière continue, ce pendant existe des méthodes pour diminuer cette redondance ; l'une de ces méthodes consiste en l'emploi de la transformée en ondelettes discrète.

Les coefficients $C_x(a,b)$ s'interprètent comme la projection du signal $x(t)$ sur la famille $\{\psi_{a,b}(t)\}$ des fonctions obtenues par dilatation de a et translation de b de l'ondelette mère .

$$\psi : \psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III.4})$$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

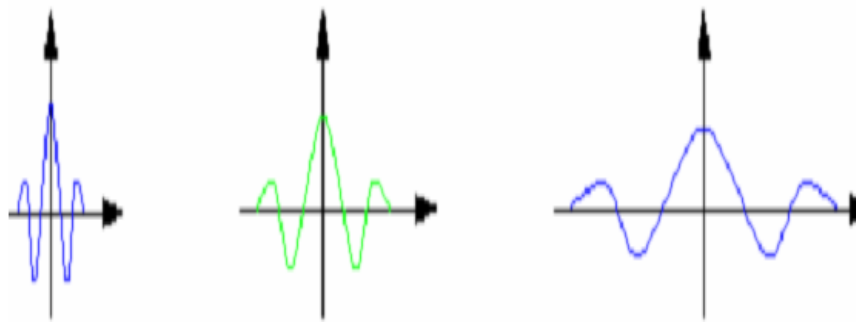


Figure III.1: Fonction de base [26].

$$\|\psi_{a,b}\|_2^2 = \int_R |\psi_{a,b}(t)|^2 dt = 1 \quad (\text{III.5})$$

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

On multiplie le signal et la fonction analysante et l'on calcule l'intégrale du produit. C'est un processus assez simple:

Parmi une grande famille des ondelettes, on trouve (Figure III.2):

- ❖ Ondelette **gaussienne complexe**.
- ❖ Ondelette **Complexe de Morlet**.
- ❖ Ondelette **gaussienne**.
- ❖ Ondelette **chapeau mexicain**.
- ❖ Ondelette de **Meyer**.
- ❖ Ondelette de **Meyer avec une fonction auxiliaire**.
- ❖ Ondelette de **Morlet**.
- ❖ Ondelette **complexe de Shannon**.

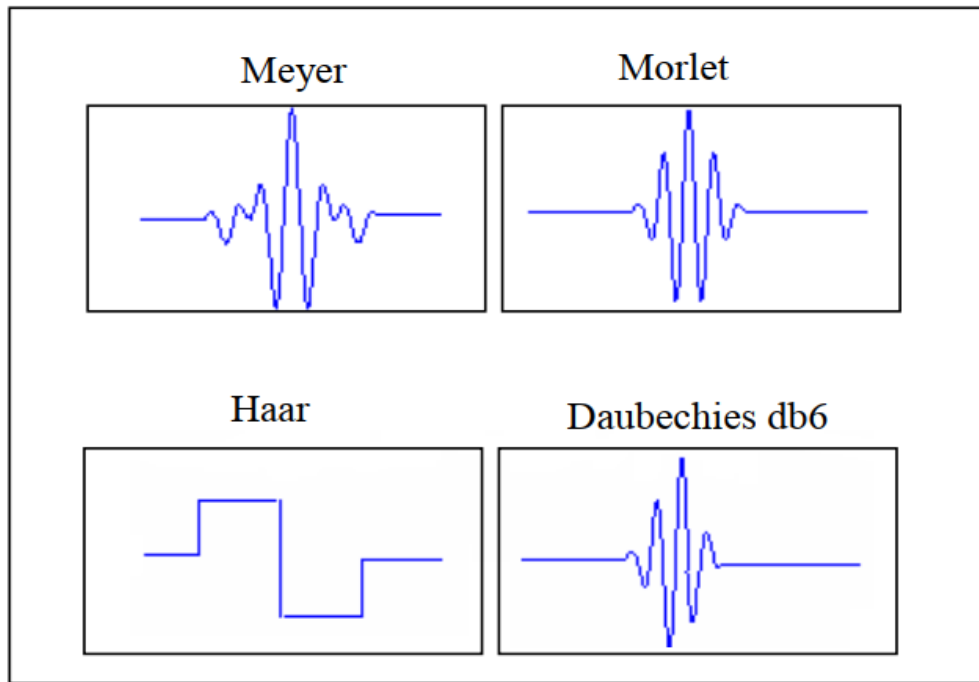


Figure III.2: Quelques formes des ondelettes usuelles [26].

III.3.2 Méthodes d'analyses Temps –fréquence

Les méthodes d'analyse temps – fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non stationnaires [27]. Plus généralement, elles s'appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel où les propriétés statistiques évoluent au cours du temps. Pour décrire cette évolution temporelle, il faut réaliser une analyse spectrale évolutive, d'où les méthodes temps-fréquence. Par miles techniques de l'analyse temps fréquence, la transformation de *Wigner –Ville* permet des diagnostics précis. Cette transformation est une fonction réelle qui définit une distribution d'énergie dans le plan temps-fréquence. Elle peut être interprétée comme une densité spectrale instantanée[28]. Donc la transformée de Fourier à fenêtres glissantes peut être comparée à une analyse à banc continue de filtre uniforme, c'est à dire la largeur de bande constante, par conséquent le rapport $\Delta f/f$ est variable.

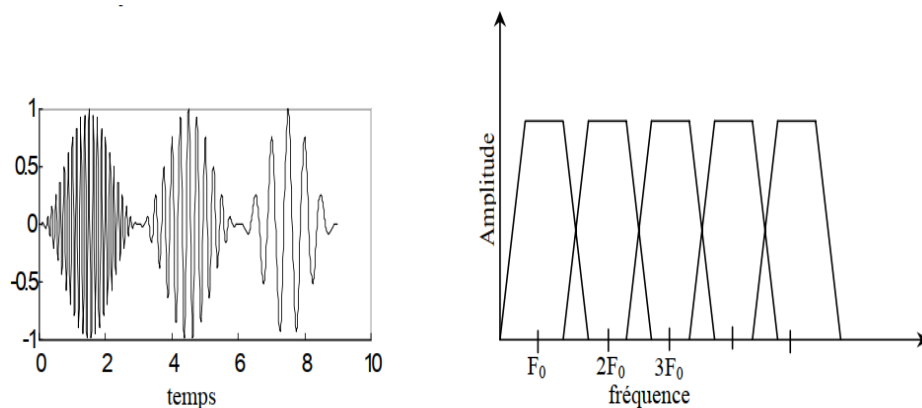


Figure III.3: Transformation de Fourier Temps –fréquence[27].

III.3.3 Méthodes de la transformée d'ondelette discrète (TOD)

L'utilisation de la transformée en ondelette discrète TOD revient à passer le signal sous un microscope mathématique. Le filtrage en cascade permet de visualiser chaque partie du signal avec une résolution adaptée à son échelle [29].

L'application de la TOD dans le domaine du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone à cage d'écureuil est en général : une application de la TOD aux signaux électriques tels que les courants statoriques, tensions statoriques, vitesses ...etc.

La signature à partir de l'analyse du courant statorique représente une source très riche en informations concernant les défauts qui se manifestent souvent dans la machine asynchrone, à cet effet la majorité des travaux du diagnostic sont fondus sur l'analyse du courant statorique soit dans sa partie transitoire ou dans sa partie permanente [31].

Avant l'application de la TOD à l'analyse des signaux de défauts, un choix judicieux de plusieurs paramètres sera effectué : *type d'ondelette, nombre de niveaux, fréquence d'échantillonnage...etc.*

❖ Sélection de l'ondelette mère

Une étape importante est la sélection de l'ondelette mère pour effectuer l'analyse. L'ondelette mère qui sera sélectionnée est liée aux coefficients des filtres utilisés dans le procédé de filtrage inhérent au TOD (DWT). Dans de nombreux cas, le choix d'une ondelette mère est justifié tout simplement en raison qu'elle donne de bons résultats.

Dans le domaine du diagnostic de défaut dans les machines asynchrones, le choix s'est porté sur la famille des *Daubechies*, qui semble la mieux adaptée pour une telle analyse [31]. L'ondelette *Daubechies* (db44) est utilisée souvent comme un courant statorique transitoire ou permanent (cas sain, cas d'un court-circuit statorique ou cassure des barres rotoriques,...) application de la TOD:

- ❖ Sélection d'ondelette mère,
- ❖ Spécification du nombre de niveau de détail,
- ❖ Analyse du signal par ondelette sur le diagnostic ondelette mère.

Les ondelettes de *Daubechies* forment une famille infinie et sont notées db1, db2, db3,... dans la boîte à outils de *Matlab*.

III.4 Identification du défaut dans la machine asynchrone par l'analyse TOD

La figure III.4 illustre le schéma des étapes à suivre afin d'utiliser correctement la transformée en ondelette discrète (TOD); la méthodologie est utilisée pour le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone.

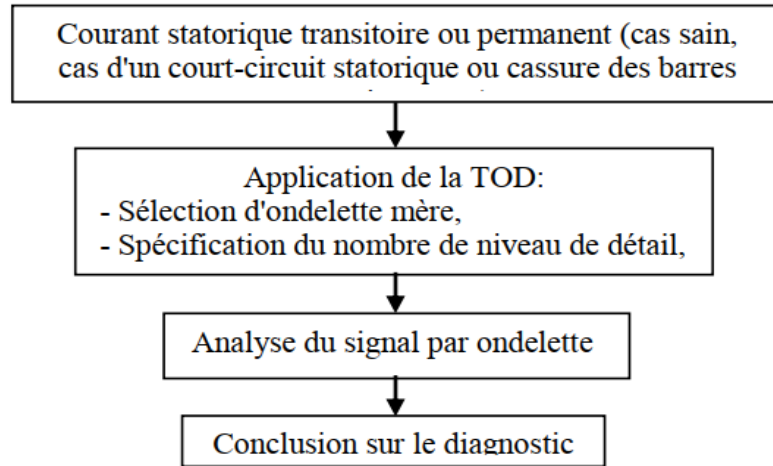


Figure III.4: Organigramme de la méthodologie du diagnostic basé sur la TOD

III.5 Analyse du spectre du courant statorique par FFT

Lors d'une rupture de barre, il est difficile d'analyser directement le courant statorique. Ce dernier ne présente en effet qu'une faible modulation. Cette caractéristique porte essentiellement sur trois points:

- la largeur et la hauteur du lobe principal,
- la hauteur du premier lobe secondaire,
- l'atténuation des lobes secondaires, Pour cela, on utilise la fenêtre de hanning.

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

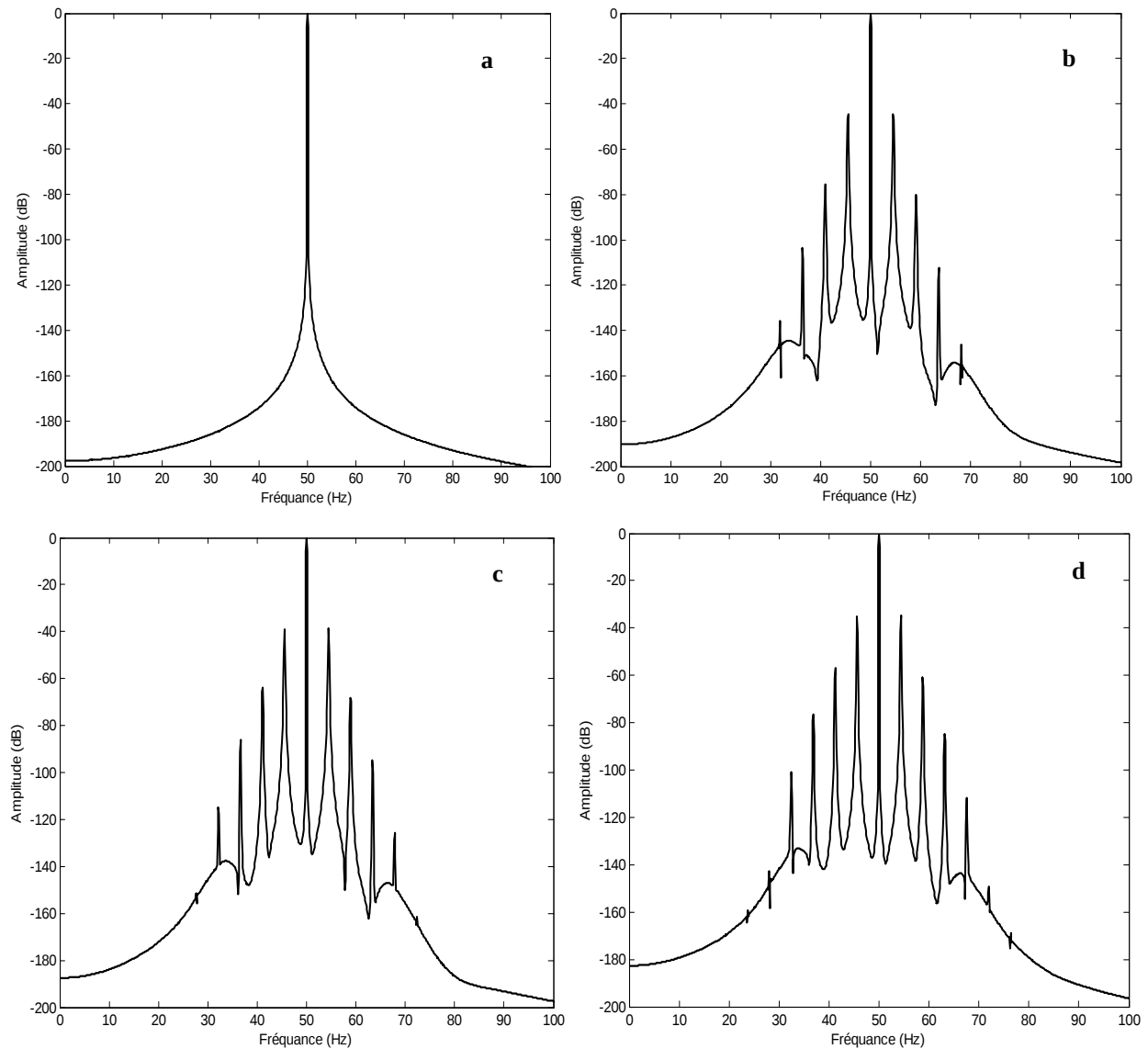


Figure III.5: Spectres des courants statoriques:
a) Machine saine, b) Machine avec une barre cassée,
c) Machine avec deux barres cassées d) Machine avec trois barres cassées

Des résultats de simulation relatifs à l'analyse par FFT du courant statorique en régime permanent à charge nominal sont présentés dans le cas du moteur sain et avec défaut de cassures des barres. La figure (III.5, a) présente le spectre de fréquence du courant statorique autour de la fréquence du réseau de 50Hz, du moteur à l'état sain. Aucune raie latérale de part et d'autre de la raie du fondamentale (figure III.5). Si on augmente le nombre des barres cassées, on observe une augmentation des raies (figure III.5- c, d).

Le tableau III.1, présente une synthèse des effets du nombre de barres cassées sur les amplitudes des composantes $(1 \pm 2k) f_s$.

Tableau III.1: du nombre de barres cassées sur les amplitudes des composantes $(1 \pm 2k)f_s$

Etat du moteur / $g \approx 0.046$	$(1-2g).f_s$	$(1+2g).f_s$	$(1-4g).f_s$	$(1+4g).f_s$
1 barre cassée (dB)	-45.09	-46.01	-76.74	-80.39
2 barres cassées (dB)	-39.86	-39.43	-64.70	-68.62
3 barres cassées (dB)	-35.94	-35.07	-57.29	-61.22

III.6 Analyse des résultats par simulation

Le traitement des signaux est réalisé à l'aide de logiciel *MATLAB* qui offre un outil de traitement par la technique des ondelettes (*WAVELET TOOLBOX*), cette boîte d'outils permettra de réaliser les différentes applications.

III.6.1 Machine avec défaut rotorique

Dans cette étude, on présente plusieurs cas de tests de simulation pour relever les signatures des courants statoriques de la machine asynchrone à l'état sain et avec défaut. Un essai en fonctionnement en charge et un essai au démarrage avec charge sont envisagés. Les différents signaux relevés sont représentés sur les figures III.6.

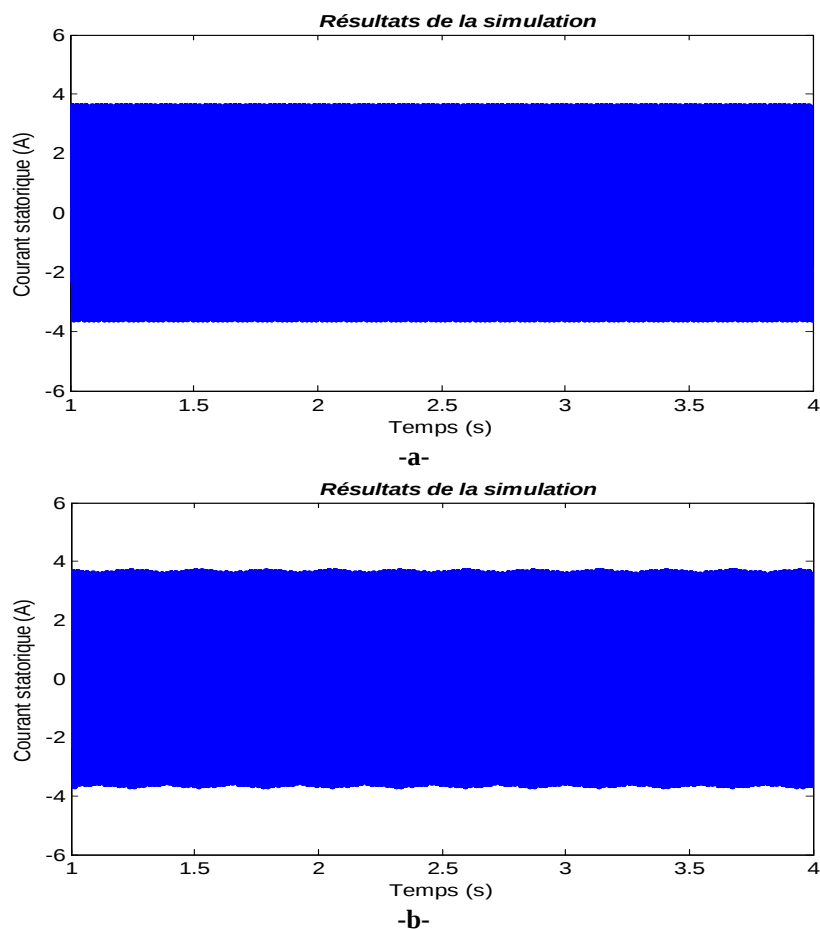


Figure III.6: Courant statorique issu par simulation:
 -a- Machine saine, -b- Machine avec deux barres adjacentes cassées

Les résultats illustrant les allures du courant statorique obtenus par simulation en régime permanent pour l'état sain de la machine (Fig. III.6.a) et avec défaut de cassure de deux barres adjacentes rotoriques (Fig. III.6.b). Le couple de charge appliqué est de valeur moyenne de 7N.m.

III.6.2 Analyse spectrale du courant statorique par TOD (DWT) en régime permanent

En utilisant l'équation. III.7, le calcul du nombre de niveau de décomposition recommandé ou nécessaire pour une fréquence d'échantillonnage de 10 KHz et pour la fréquence de la raie du fondamental égale 50 Hz est donné par:

$$N_f = \text{int} \left(\frac{\log(10000 / 50)}{\log(2)} \right) + 2 = 9 \text{ niveau} \quad (\text{III.6})$$

Le tableau III.2 illustre les différentes bandes de fréquences obtenues par la décomposition en ondelettes discrète. D'après le tableau III.2, les détails qui seront affectés par les harmoniques situées à $(1 \pm 2.kg).f_s$ sont: d7 [39.06-78.12 Hz], d8 [19.53 - 39.06 Hz] et a7 [0-78.12Hz].

Le choix de l'ondelette (type et ordre) adapté à l'analyse du signal n'est pas aisé pour arriver à une optimisation de l'objectif escompté. Dans le souci de répondre au choix du type d'ondelette et de son ordre et afin de mettre plus en l'analyse des signaux en fonction de leur importance.

Tableau III.2: Bande des fréquences obtenues par la décomposition en TOD.

Niveau	Bandes de fréquences de détails		Bandes de fréquences d'approximations	
J=9	d9	9.765-19.53 Hz	a9	0-19.53 Hz
J=8	d8	19.53-39.06 Hz	a8	0-39.06 Hz
J=7	d7	39.06-78.12 Hz	a7	0-78.12 Hz
J=6	d6	78.12-156.25 Hz	a6	0-156.2 Hz
J=5	d5	156.25-312.50 Hz	a5	0-312.5 Hz
J=4	d4	312.50-625 Hz	a4	0-625 Hz
J=3	d3	625-1250 Hz	a3	0-1250 Hz
J=2	d2	1250-2500 Hz	a2	0-2500 Hz
J=1	d1	2500-5000 Hz	a1	0-5000 Hz

L'application d'un certain types d'ondelettes avec différents ordres sont utilisées dans l'analyse du signal du courant statorique de la machine à l'état sain et avec défauts de deux barres cassées à savoir l'ondelette mère "*Daubechies*": db10, db20, db44 et "*Discrete Meyer*": dmey9.

Les figures (III.7 à III.8) montrent les analyses des signaux de détails et d'approximation (d8 et a7) obtenues par la décomposition en multi niveau du courant statorique obtenu par simulation. L'effet du défaut de deux barres cassées n'apparaît pas dans la bande de détail d7 ([39.06-78.12 Hz]), en raison qu'il contient de la fréquence fondamentale (50 Hz).

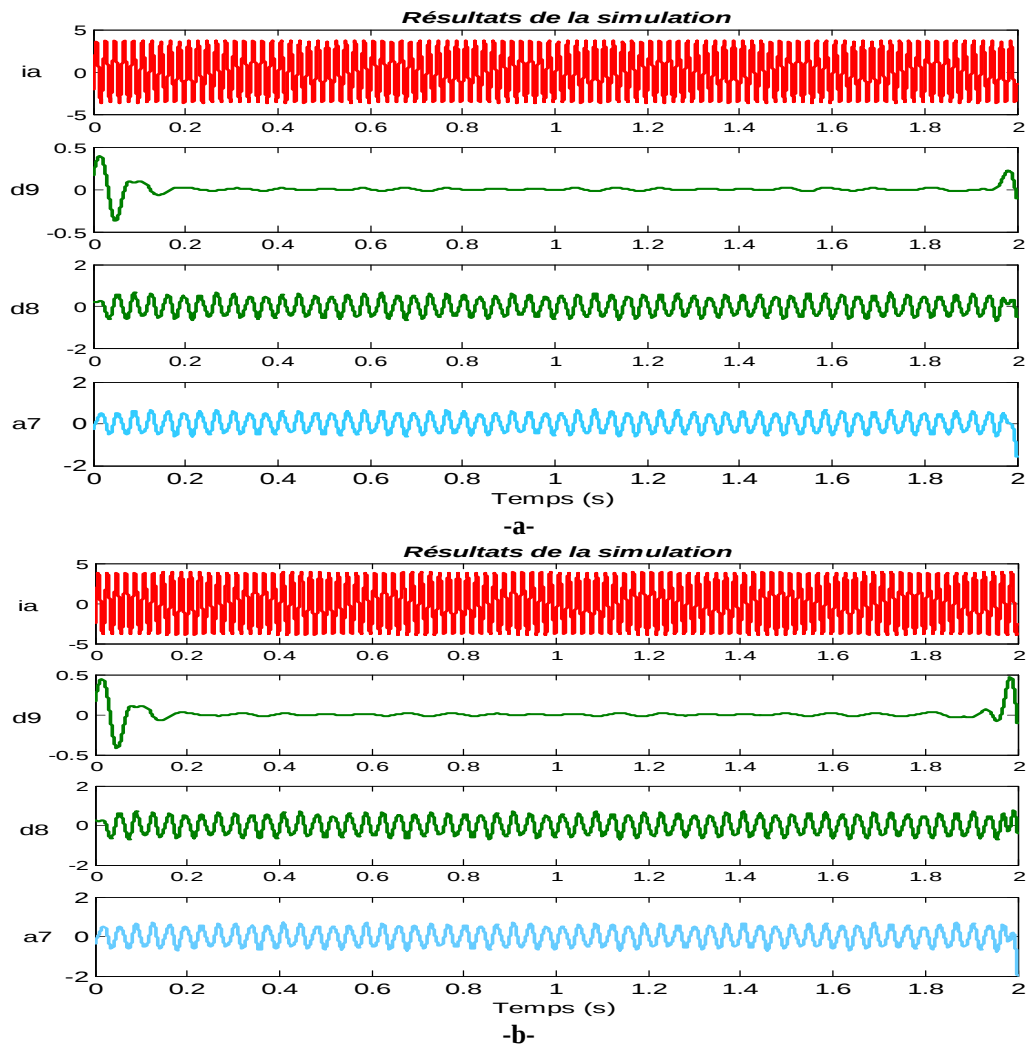
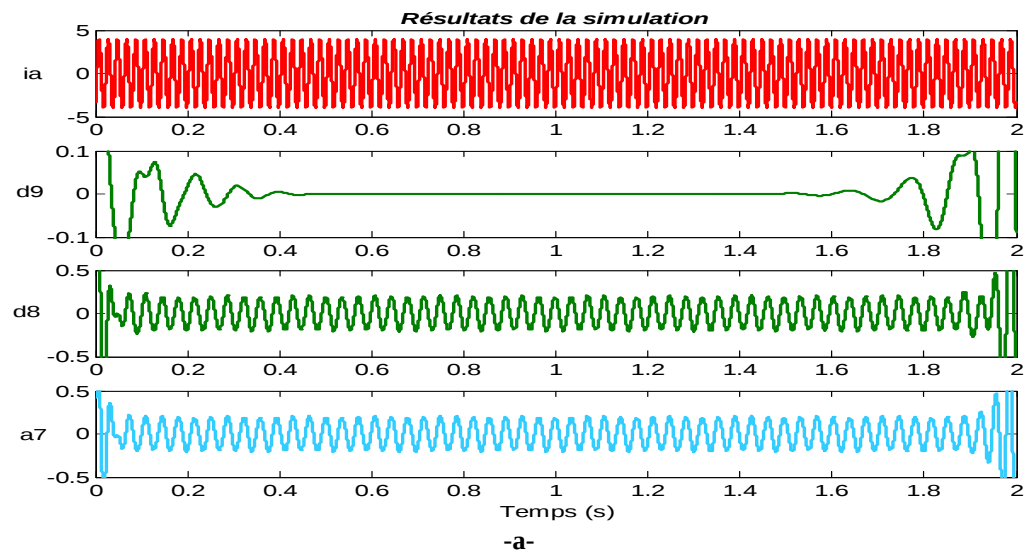


Figure III.7: Approximations et détails obtenus par l'ondelette **db10**:
 -a- Machine saine, -b- Machine avec deux barres adjacentes cassées



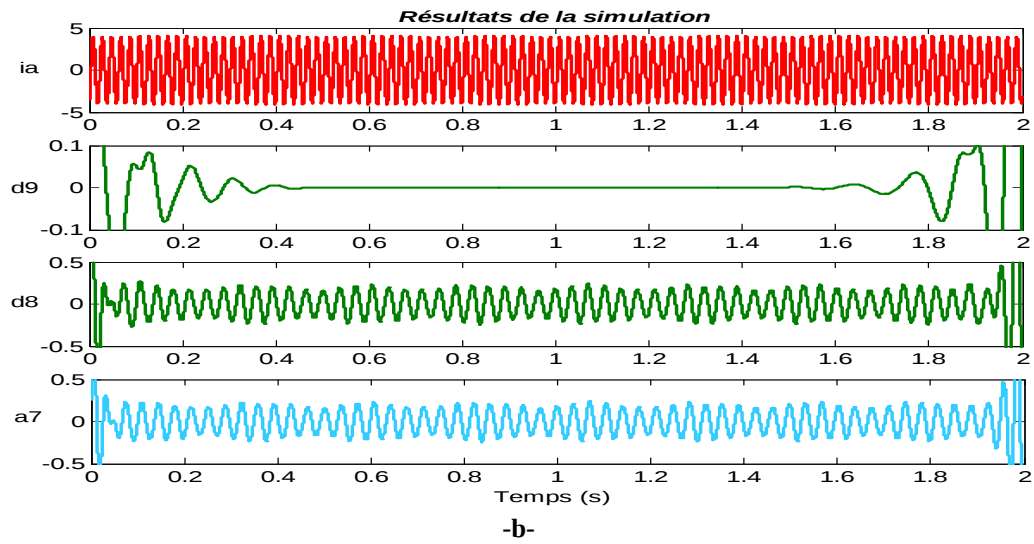


Figure III.8: Approximations et détails obtenus par l'ondelette **db20**:
-a- Machine saine, -b- Machine avec deux barres adjacentes cassées

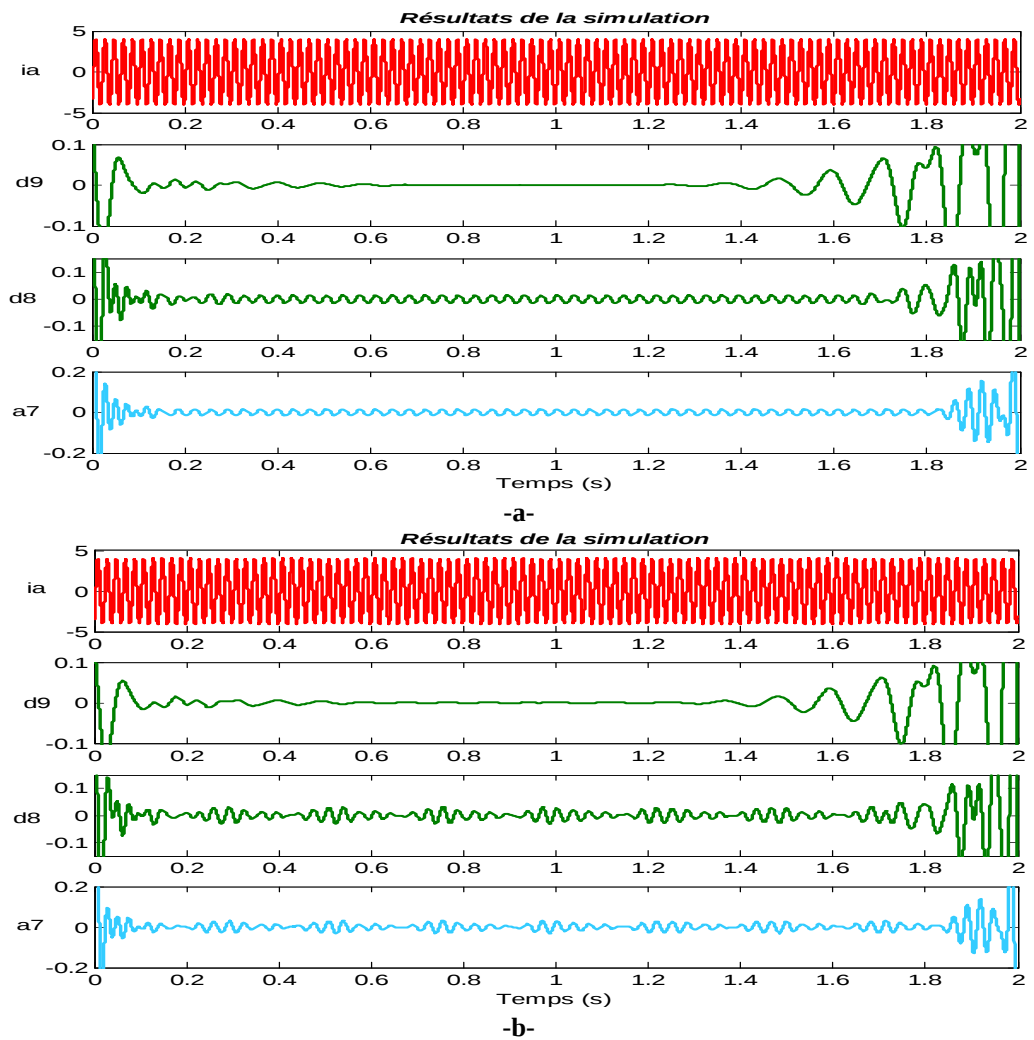


Figure III.9: Approximations et détails obtenus par l'ondelette **db44**:
-a- Machine saine, -b- Machine avec deux barres adjacentes cassées

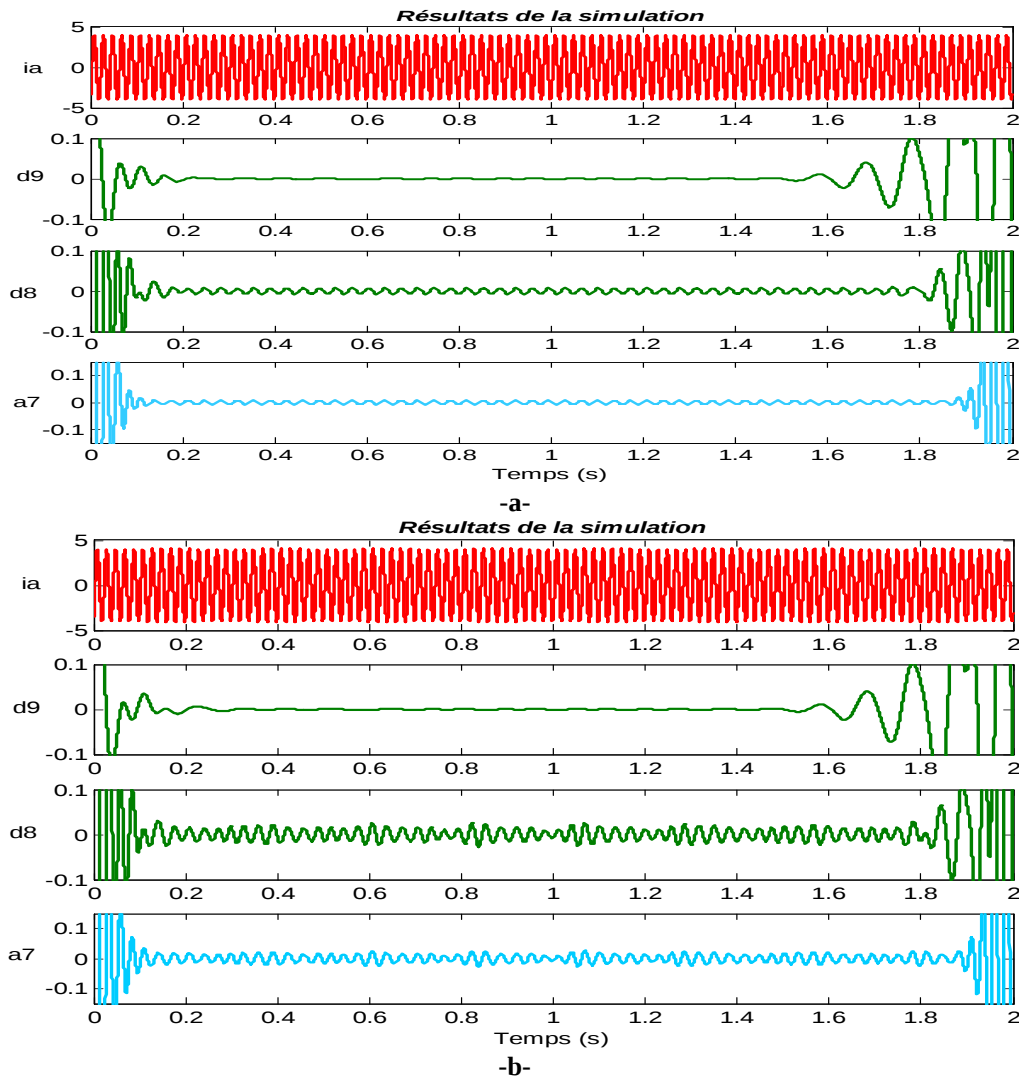


Figure III.10: Approximations et détails obtenus par l'ondelette dmey9:
 -a- Machine saine, -b- Machine avec deux barres adjacentes cassées

Les figures (III.7a à III.8a) sont obtenues pour un fonctionnement sain de la machine où l'analyse par TOD. La TOD montre que les signaux de détails et d'approximation (d8 et a7) associés à des bandes de fréquences inférieures à 78 Hz n'ont pas de variation importante, par contre les signaux de détails et d'approximation obtenus pour la machine avec défaut de cassure de deux barres adjacentes (Figure.III.9b à III.10b) ont des amplitudes des coefficients (d8 et a7) qui sont augmentées par rapport au cas de la machine saine.

L'augmentation de l'amplitude des signaux (d8 et a7) sont dues à l'effet que les bandes de fréquences correspondantes sont affectées par le défaut rotorique. La comparaison entre les performances des familles *Daubechies*, c.à.d. entre les ordres db10, db20 et db44 qui sont choisis d'une manière aléatoire montre que l'analyse par db10 où le composant principal du courant statorique dans le détail d8 et l'approximation a7 ne montre aucune modification sur la caractéristique de la bande latérale du signal. Ce problème est minimisé lors de l'utilisation db44 ou dmey9 comme illustré sur les figures III.9 et III.10.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on présente une application physique basées sur la transformée en ondelettes discrète pour le diagnostic des défauts type cassure de barre dans la machine asynchrone à cage d'écureuil. La transformée en ondelette donne la résolution variable de temps pour des bandes de fréquence de court terme tandis que transformée de Fourier donne des résolutions constantes. L'application de la TOD pour traiter et analyser le courant statorique de la machine qui peut être utilisée pour le diagnostic de la rupture totale ou partielle des barres rotoriques de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Les applications de la technique des ondelettes ont couvert presque chaque aspect du diagnostic de défaut.

Conclusion Général

Conclusion générale

Le travail présent dans ce mémoire c'est la modalisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en prenant en considération les défauts rotoriques. Nous avons développé un modèle à base de la transformation de Park pour simuler les comportements de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Le type de défaut au rotor a été étudié à travers la mise au point de modèles de défaut de cassure de barre de la machine.

Les résultats obtenus montrent que la FFT peut indiquer la présence du défaut de rupture de barre par la présence des raies vis-à-vis le fondamentale.

L'application de la transformée en ondelette dans le domaine du diagnostic des machines asynchrones à cage a été déjà développée. Les approches proposées, basées sur la transformée en ondelettes discrète du signal, peuvent être prolongées pour le diagnostic et la discrimination entre d'autres types de défauts dans les machines électriques.

En perspective, pour améliorer notre étude du diagnostic des défauts statoriques et défauts mécaniques et le défaut de roulement de la machine asynchrone et de détection avancées comme logique floue avec une implémentation pratique

ANNEXES

Annexe

Les paramètres de la machine asynchrone utilisée sont :

P_n	Puissance nominale	1.1	k.w
V_n	Tension nominale	220/380	V
I_n	Courant nominale	2.6/4.3	A
f_s	Fréquence d'alimentation	50	Hz
P	Nombre de paires de pôles	2	Pole
Ω	Vitesse nominale	1425	tr/min
Cr	Couple résistant	7	N.m
R_s	Résistance statorique	1.2	Ω
R_r	Résistance rotorique	1.8	Ω
L_s	Inductance statorique	0.1554	H
L_r	Inductance rotorique	0.1568	H
J	Inertie du moteur	0.070	$Kg.m^2$
M	Inductance mutuelle	0.150	H
F	Coefficient de frottement	0	SI
N_e	Nombre d'encoches statoriques	48	
nb	Nombre de barres au rotor	28	
nc	Nombre de spires par phase	464	

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] A. Bouraiou "DIAGNOSTIC DE DEFAUTS PAR LOGIQUE FLOUE " thèse de magister, Universite Badji Mokhtar, Annaba, 2010.
- [2] S. Kerfali "Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défaits De la Machine Asynchrone" thèse de doctorat, Université Badji-Mokhtar, Annaba, 2016.
- [3] M. BEDBOUDI " Commande et diagnostic des défauts de la machine asynchrone " thèse de doctorat, Université Badji-Mokhtar, Annaba, 2016.
- [4] D. Zellouma "Commande Directe du Couple sans Capteur Mécanique d'une Machine Asynchrone : Application au Diagnostic des Défaits statoriques" mémoire de master; Université d'EL-OUED, 2019.
- [5] A. Chahmi "Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic" thèse de doctorat, Université des sciences et technologie, Oran, 2017.
- [6] N. Bessous "Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones" thèse de magister en Electrotechnique, Université Mentouri, Constantine, 2007.
- [7] M. AMMAR "Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques: applications aux moteurs asynchrones" thèse de doctorat, université de Skikda, 2012.
- [8] A.H. Bonnett, C. Yung "Increased efficiency versus increased reliability", IEEE industry Applications Magazine, p.1077-2618, January-February 2008.
- [9] Y. Nacera "Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter- spires et des cassures de barres et d'anneaux" thèse de magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2009.
- [10] S. Bazi "Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défaits dans un Système Machine à Induction-Convertisseur" Ingénieur d'État en Électrotechnique, Université de Batna, 2016.
- [11] M. Sahraoui "Etude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones" thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2010.
- [12] A. Lachraf, H.M.E Rahal Ouail "Détection Des Défaits d'Excentricité Rétorque dans

- les systèmes électromécanique «application aux moteurs asynchrones»" , mémoire de master; Université d'EL-OUED, 2020.
- [13] M. Harir "Etude des Défaits dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée" thèse de magister, université Mohamed BOUDIAF d'Oran, 2009.
- [14] F. Babaa "Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone: Application au diagnostic des défauts statoriques" thèse de doctorat, Université Constantine, 2014.
- [15] K. Zaidi "Modélisation Des Défaits Dans Les Systèmes Électromagnétiques Par Calcul De Champ Magnétique" mémoire de master; Université Mohamed Khider, Biskra, 2018.
- [16] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones: modèles et outils paramétriques dédiées à la simulation et à la détection de défauts" thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 1999.
- [17] S. Bachir "Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique" thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2002.
- [18] S. Bachir, J. C. Trigeassou & S. Tnani, "Stator faults diagnosis by parameter estimation without speed sensor", ICEM'02, Bruges, Belgique, 26-28 Aout, 2002.
- [19] I.B.A. Bazine "Identification en boucle fermée de la machine asynchrone: Application à la détection de défauts" thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2008.
- [20] R. Kechida "Utilisation du contrôle direct de flux statorique et de filtre de Kalman en vue du contrôle direct du couple (DTC) d'un moteur asynchrone: application au diagnostic des défauts" thèse de magister, Université d'EL-OUED, 2010.
- [21] H. Talhaoui "Contrôle par mode glissant: Observation et estimation paramétrique d'une machine à induction avec défauts" thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2016.
- [22] R. Kechida "Contrôle et diagnostic d'une machine à induction sans capteur en utilisant des techniques avancées d'analyse et de traitement" thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2017.
- [23] S. Boukhercha, Z. Dilmi "Diagnostic de défauts de la MAS à Rotor à Cage d'écureuil"

- diplôme D'Ingénieur d'État en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie, 2006.
- [24] M. Oumaamar "Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques de la machine à induction avec différents types d'alimentation" thèse de Doctorat en sciences, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [25] A. Hireche "Diagnostic des défauts de cassure de barres dans les machines asynchrones par la technique du rotor bloqué" mémoire de master, Université Mohamed Khider, Biskra 2018.
- [26] B. Trajin "Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones" thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1 Décembre 2009.
- [27] B.V. Phuong "Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite application a l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur a vide" thèse de doctorat, l'institut National polytechnique, Université de Grenoble, 2007.
- [28] A. Abed. "Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone", thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy, 2002.
- [29] A. Djebala, N. Ouelaa, N. Hamzaoui, "Optimisation de l'analyse multi résolution en ondelettes des signaux de choc. Application aux signaux engendrés par des roulements défectueux", *Mécanique & Industries*, Vol.8, No.4, pp.379-389, 2007.
- [30] E. Ritchie, E. Xiaolan Deng, and T. Jokinen, "Diagnosis of rotor faults in squirrel casein. motors using a fuzzy login approach", in *Proc. ICEM'94*, vol. 2, Paris, France, 1994, pp. 348–352.
- [31] P. Boškoski, Đ. Juričić, "Fault detection of mechanical drives under variable operating conditions based on wavelet packet Rényi entropy signatures", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.31, pp.369–381, 2012.