

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 : Génie Electrique
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الكهربائية
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du diplôme de
Magister
Option : Commande et motorisation des véhicules électriques

Préparé au laboratoire de Génie Electrique LGEB de Biskra

**Détection des défauts statorique et rotorique dans la
machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et
ondelettes**

Présenté par :

Hakima CHERIF

Soutenu publiquement le 30/09/2014

Devant le jury composé de :

Dr. Salah-Eddine ZOUZOU	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. Arezki MENACER	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. Soury Mohamed MIMOUNE	Professeur	Examineur	Université de Biskra
Dr. Saïd DRID	Professeur	Examineur	Université de Batna

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma mère avec toute mon affection.

A mon père avec toute ma reconnaissance.

A mes frères et mes sœurs.

A ma famille.

A tous mes amis.

Hakima CHERIF

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, overlapping loops and a final downward stroke.

Remerciements

*Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du laboratoire
LGEB de Biskra.*

*Tout d'abord merci à dieu de m'avoir donné la force pour
Terminer ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Monsieur **Arezki Menacer** Professeur, à
l'Université de Biskra. Pour m'avoir encadré durant ma préparation de ce mémoire. Sa
grande disponibilité, sa grande vivacité et son engagement scientifique m'ont aidé à me
dépasser durant ces années.*

*Mes remerciements les plus sincères sont adressés à monsieur **ZOUZOU Salah -Eddine**
Professeur, à l'Université de Biskra Pour l'honneur qu'il ma fait en acceptant la présidence
du jury de ce mémoire.*

*Mes vifs remerciements vont aussi à monsieur **Souri Mohamed MIMOUNE**,
Professeur à l'Université de Biskra pour qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur de
participer à ce jury.*

*J'adresse mes respectueux remerciements a monsieur **Saïd DRID**, Professeur à
l'Université de Batna pour m'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je remercie mes enseignants à l'institut d'Électrotechniques de Biskra de poste de
graduation. Je tiens également à remercier Professeur ZOUZOU Salah -Eddine pour les
documentations et les informations qu'il m'a donné sur ce travail et tous les enseignants à
l'élaboration LGEB de Biskra.*

*Sans oublier monsieur **B.ZEGUEB** enseignant à l'Université d'EL oued,
A tout personne ayant participé de près ou de loin à réaliser ce travail, et tout
personnes dont nous avons oublié de citer.*

*Merci aussi à tous mes collègues et amis à l'Université de Biskra et EL oued. et de la
cité universitaire chetma 6 et Je leur exprime ma profonde sympathie et leur souhaite
beaucoup de chance pour leurs travaux*

Résumé:

Ce travail s'inscrit dans la thématique de la surveillance et diagnostic des défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence des défauts de types:

- court circuit entre spires,
- déséquilibre d'une phase de la tension d'alimentation,
- rupture des barres rotorique,
- Combiné ou mixte (court-circuit entre spires et rupture de barre) ou (déséquilibre d'une phase de la tension d'alimentation avec rupture de barre).

La thématique du diagnostic de défaut se base sur l'application de deux techniques de traitement de signal qui est une solution efficace pour le problème de diagnostic des défauts: l'une se base sur l'analyse spectrale du courant statorique (FFT) et la seconde sur l'analyse par ondelette qui offre une analyse très fine des signaux unidimensionnels et bidimensionnels. À travers une décomposition en ondelettes discrètes "multi niveau" ou "en paquet d'ondelettes" on peut extraire les informations nécessaires pour le pronostic du défaut en régime de fonctionnement variable de la machine.

Mots clés : Machine asynchrone, défaut rotorique, cassure de barres, court circuit inter spire, défaut de déséquilibre, défaut mixte, diagnostic, FFT, Ondelette.

Abstract:

This work fits into the theme of the monitoring and fault diagnosis of squirrel cage induction machine cage with faulty:

- inter turn short circuit,
- supply voltage imbalance,
- broken rotor bars,
- Mixed fault (short circuit and broken rotor bars) or (supply voltage imbalance with broken rotor bars).

The thematic fault diagnosis is based on the application of two techniques of signal processing which is an effective solution of the fault diagnosis problem: one is based from spectral analysis of the stator current using (FFT) and the second analysis from using the Wavelet technique, which offers a very detailed of one-dimensional and two-dimensional signals analysis. Through the decomposition into discrete "multilevel" wavelets or "wavelet packet" we can extract the necessary information for the prognostic fault at variable state operating of the machine.

Keywords: Asynchronous machine, rotor failure, broken rotor bars, inter turn short circuit, unbalance fault, mixed fault, diagnosis, FFT, Wavelet.

ملخص :

يندرج هذا العمل حول موضوع النمذجة في المحرك اللا تزامني ثلاثي الطور نوع قفص السنجاب و تشخيص ورصد الأعطاب التالية:

- دارة قصيرة بين الحلقات في الجزء الثابت
 - اختلال في توتر تغذية المحرك
 - كسر أعمدة الدوار
 - ومختلط (دارة قصيرة مع كسر أعمدة الدوار) و(اختلال في توتر التغذية مع كسر أعمدة الدوار).
- يستند موضوع تشخيص الأعطاب على طريقتين لمعالجة الإشارات, وهما يعتبران حلان ناجعان في التشخيص : الطريقة الأولى هي التحليل الطيفي لتيار الجزء الثابت (FFT), والثانية تقنية الموجات , والتي لديها تحليل دقيق جدا ذات البعد الواحد و البعدين للإشارة من خلال تحلل الموجات المنفصلة أو حزمة الموجات متعددة المستويات , وتستخدم لاستخراج المعلومات اللازمة من تيار الجزء الثابت للمحرك.

الكلمات المفتاحية : الآلة الغير متزامنة , كسر أعمدة الدوار . دارة قصيرة بين حلقات الجزء الثابت , عطب مختلط , اختلال في توتر التغذية التشخيص, FFT , الموجات.

Symboles et notations

U_s	tensions statoriques suivant les axes a_s, b_s, c_s .
$U_{\alpha\beta s}$	composante α et β des tensions statoriques.
$U_{dq s}$	Composante d et q des tensions statoriques.
i_s	Courants statoriques suivant les axes a_s, b_s, c_s .
$i_{\alpha\beta s}$	Composante α et β des courant statorique
$i_{dq s}$	Composante d et q des courant statorique
i_r	Courants rotoriques suivant les axes a_r, b_r, c_r .
$i_{\alpha\beta r}$	Composante α et β des courant rotorique
i_{dqr}	Composante d et q des courant rotorique
$i_{\alpha\beta m}$	Composante α et β du courant magnétisant
i_{dqm}	Composante d et q du courant magnétisant
ϕ_s	Flux statoriques suivant les axes a_s, b_s, c_s .
$\phi_{\alpha\beta s}$	Composante α et β du flux statorique
$\phi_{dq s}$	Composante d et q du flux statorique
ϕ_r	Flux statoriques suivant les axes a_r, b_r, c_r .
$\phi_{\alpha\beta r}$	Composante α et β du flux rotorique
ϕ_{dqr}	Composante d et q du flux rotorique
i_{cc}	Courant de court-circuit dans les spires court-circuitées
$i_{\alpha\beta cc}$	Composante α et β du courant de court-circuit dans les spires court-circuitées
$i_{dq cc}$	Composante d et q du courant de court-circuit dans les spires court-circuitées
ϕ_{cc}	Flux de la bobine de court-circuit B_{cc}
$\phi_{\alpha\beta cc}$	Composante α et β du flux de la bobine de court-circuit B_{cc}
$\phi_{dq cc}$	Composante d et q du flux de la bobine de court-circuit B_{cc}
R_{sx}	Résistance propre d'une phase statorique
R_{rx}	Résistance propre d'une phase rotorique
R_{cc}	Résistance de la bobine de court-circuit B_{cc}
L_{sx}	Inductance propre d'une phase statorique
L_{rx}	Inductance propre d'une phase rotorique
L_{cc}	inductance propre de la bobine de court-circuit B_{cc}
L_{psx}	Inductance principale d'une phase statorique
L_{prx}	Inductance principale d'une phase statorique
L_m	Inductance magnétisante
L_{fsx}	Inductance de fuite statorique
L_{frx}	Inductance de fuite rotorique

L_{sxy}	Inductance mutuelle entre phases statoriques
L_{rxy}	Inductance mutuelle entre phases rotoriques
$M_{sx,ry}$	Inductance mutuelle entre une phase statorique x et une phase rotorique y
M_{ccs}	inductance mutuelle entre une phase statorique et la bobine de court-circuit
M_{ccr}	inductance mutuelle entre une phase rotorique et la bobine de court-circuit
θ	angle électrique de la position du rotor
θ_{cc}	angle repérant la phase en défaut type court-circuit
θ_0	angle repérant la phase en défaut type rupture de barre
$P(\theta)$	Matrice de rotation d'angle θ
Q_{cck}	Quadripôle représentant un défaut de court-circuit sur la phase k
$Q(\theta_{cck})$	Matrice situant l'angle du bobinage en court-circuit
$Q(\theta_0)$	Matrice situant l'angle de la barre cassée au rotor
P	Nombre de paires de pôles
f_v	Coefficient de frottement visqueux
J	Moment d'inertie
G	Glissement
C_{em}	Couple électromagnétique
ω	Vitesse angulaire électrique du rotor
ω_{rep}	Vitesse angulaire du repère de référence
C_r	Couple résistant
n_{cc}	Nombre de spires court-circuitées au stator
η_{cck}	Pourcentage de spires court-circuitées dans la phase k
η_0	Pourcentage de barres cassées
n_{bc}	Nombre de barres cassées au rotor
n_b	Nombre total de barres au rotor
FFT	Transformation de fourie rapide
TO	Transformation d'ondelette
TOD	Transformation d'ondelette discrète
TOC	Transformation d'ondelette continue
MAS	Machine asynchrone

Liste des figures

Figure 1.1	Photo d'une machine asynchrone de 5,5 kW avec le stator et le rotor.	04
Figure 1.2	Principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes.	06
Figure 1.3	Représentation de l'excentricité statique et dynamique dans la machine asynchrone.	07
Figure 1.4	dimension du roulement à bille.	08
Figure 1.5	Représentation des différents défauts statoriques possible.	09
Figure 1.6	Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone.	09
Figure 1.7	mesures vibratoires sur la machine asynchrone.	11
Figure 1.8	Représentation temporelle vers fréquentielle.	13
Figure 1.9	Représentation temporelle vers ondelettes.	15
Figure 1.10	Quelques formes des ondelettes usuelles.	16
Figure 1.11	Boîtes Temps-fréquence des deux ondelettes ψ_{a_1, b_1} et ψ_{a_0, b_0}	17
Figure 1.12	Décomposition du signal S en approximations et détails	19
Figure 1.13	Décomposition simple du signal S en approximations et détails	19
Figure 1.14	Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux	21
Figure 1.15	Décomposition en paquet d'ondelettes d'ordre 3	22
Figure 2.1	Court-circuit de spires sur la phase b du stator	26
Figure 2.2	Enroulements triphasés avec défaut de court-circuit	27
Figure 2.3	Premier modèle de court-circuit dans le repère lié au stator de la machine asynchrone [BAC 02]	33
Figure 2.4	Modèle général de court circuit dans le repère de Park lié au rotor de la machine asynchrone	34
Figure 2.5	Courants statorique pour un défaut statorique de 25% de spires court-circuitées sur la phase a_s	36
Figure 2.6	Vitesse de la machine pour un défaut de 25 % des spires court-circuitées sur la phase a_s	37
Figure 2.7	Couple électromagnétique de la machine avec un défaut de court circuit de 25 % de spires	37
Figure 2.8	Courants statorique pour un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de la phase a_s	38
Figure 2.9	Vitesse de la machine pour un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de la phase a_s	38
Figure 2.10	Couple électromagnétique pour un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de la phase a_s	38
Figure 2.11	FFT des courants statorique à l'état : (a) : sain ; (b) : avec défaut de 25% spires court-circuitées à la phase a_s , et (c) : avec une machine alimenté par une tension déséquilibrée (déséquilibre 4% de tension de la phase a_s)	40
Figure 2.12	Analyse par TOD type multi niveau de la phase i_{as} en fonctionnement sain : à vide et en charge	43
Figure 2.13	Analyse par TOD type multi niveau de la phase i_{as} avec défaut court-circuit entre spires 25%.	43
Figure 2.14	Analyse par TOD pour une machine à alimentation déséquilibrée (déséquilibre de 4% sur la tension de la phase a_s)	43
Figure 2.15	Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db44)	44

Figure 2.16	Variation de l'énergie dans les 16 bandes de fréquence au 9 ^{ième} niveau (db44)	46
Figure 3.1	Modèle par dipôles élémentaires du rotor en défaut [ABE 99]	48
Figure 3.2	Premier modèle de la machine avec défauts rotoriques [BAC 02]	50
Figure 3.3	Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone.	52
Figure 3.4	Courants statorique de la machine avec défaut de rupture de barres au rotor	53
Figure 3.5	Vitesse de rotation de la machine avec défaut des barres cassées au rotor	53
Figure 3.6	Couple électromagnétique de la machine avec défaut des barres cassées au rotor	54
Figure 3.7	Spectre du courant statorique pour une machine en régime sain et avec défaut rotorique.	55
Figure 3.8	TOD type multi niveau du courant de la phase ias en fonctionnement sain : à vide et en charge	57
Figure 3.9	TOD type multi niveau du courant de la phase ias avec défaut d'une barre cassée au rotor	58
Figure 3.10	TOD type multi niveau du courant de la phase ias avec défaut de deux barres cassées au rotor	58
Figure 3.11	Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db44)	59
Figure 3.12	Variation de l'énergie dans les 16 bandes de fréquence au 9 ^{ième} niveau (db44)	60
Figure 4.1	Modèle de défaut simultané stator/rotor de la MAS [BAC 02b]	62
Figure 4.2	Courants statorique de la machine asynchrone en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et un court circuit de 116 spires dans la phase 'a' au stator	64
Figure 4.3	La vitesse mécanique de la machine asynchrone en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et de court circuit de 116 spires dans la phase 'a' au stator	65
Figure 4.4	Le couple électromagnétique de la machine asynchrone en présence en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et de court circuit de 116 spires dans la phase 'a' au stator	65
Figure 4.5	Courants statorique de la machine asynchrone en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% de la tension d'alimentation dans la phase 'a'.	66
Figure 4.6	La vitesse mécanique de la machine asynchrone en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% de la tension d'alimentation dans la phase 'a'	66
Figure 4.7	Le couple électromagnétique de la machine asynchrone en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% de la tension d'alimentation dans la phase 'a'	67
Figure 4.8	Analyse spectrale du courant statorique pour un défaut d'une barre cassée au rotor et 116 spires court-circuitées dans la phase 'a' au stator	68
Figure 4.9	Analyse spectrale du courant statorique pour un défaut d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% dans la tension d'alimentation à la phase 'a'.	68
Figure 4.10	TOD type multi niveau du courant de la phase ias en fonctionnement sain: à vide et en charge	70

Figure 4.11	TOD du courant de la phase ias en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% de la tension d'alimentation dans la phase 'a'	71
Figure 4.12	TOD du courant de la phase ias en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et de court circuit de 116 spires dans la phase 'a' au stator	71
Figure 4.13	Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db44)	72
Figure 4.14	Variation de l'énergie dans les 16 bandes de fréquence au 9 ^{ième} niveau (db44)	73

Liste de tableau

Tableau 1.1	Familles d'ondelettes	16
Tableau 2.1	Amplitude des spectres qui correspond la fréquence 150Hz à l'état de court-circuit entre spires et l'état d'alimentation déséquilibrée.	41
Tableau 2.2	Bandes de fréquences obtenues par la décomposition en multi niveau.	42
Tableau 2.3	Bandes de fréquences résultantes de la décomposition en paquet d'ondelettes.	45
Tableau 2.4	Bandes de fréquences résultantes de la décomposition en paquet d'ondelettes dans la bande [0-312.5Hz].	45
Tableau 3.1	Fréquences calculées et déduites, en cas d'un défaut d'une seule barre cassée.	56
Tableau 3.2	Fréquences calculées et déduites, en cas d'un défaut de deux barres cassées.	56
Tableau 4.1a	Fréquences des raies $(1 \pm 2kg)f_s$ dans le cas du défaut mixte d'une barre cassée au rotor et de court circuit de 116 spires au stator.	69
Tableau 4.1b	Fréquences des raies $(1 \pm 2kg)f_s$ dans le cas du défaut mixte d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation.	69
Tableau 4.1c	Amplitude des spectres qui correspond à la fréquence 150Hz dans le deux cas de défaut mixte.	69

Sommaire

Introduction générale	01
------------------------------	----

Chapitre I

Etat de l'art sur le diagnostic de défaut de la machine asynchrone

I.1 Introduction	04
I.2 Présentation du système d'étude	04
I.2.1 Constitution des machines asynchrone à cage	04
I.2.2 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone	05
I.3 Défaillances dans la machine asynchrone à cage	05
I.3.1 Défauts rotorique	06
I.3.1.1 Cassure des barres	06
I.3.1.2 Défauts d'excentricité	07
I.3.1.3 Défauts de roulement	07
I.3.2 Défauts statorique	09
I.4 Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone	09
I.5 Méthode de diagnostic et de détection des défauts dans la machine asynchrone	10
I.5.1 Méthodes sans modèle	10
I.5.1.1 Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques	10
I.5.1.2 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite	11
I.5.1.3 Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites	12
I.5.1.4 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique	12
I.5.1.5 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée	12
I.5.1.6 Diagnostic par analyse du courant statorique	12
I.5.1.7 Diagnostic par analyse du vecteur de Park	12
I.5.1.8 Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI)	13
I.5.2 Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic	13
I.5.2.1 Transformée de Fourier rapide (FFT)	13

I.5.2.2 Transformée en Ondelettes (TO)	14
I.5.2.2.1 Transformée en ondelettes continue (TOC)	15
I.5.2.2.2 Transformée en ondelette discrète (TOD)	17
I.5.2.2.3 Energie de la décomposition d'ondelette	22
I.5.3 Méthodes du diagnostic à base du modèle	23
I.6 Panorama des méthodes de modélisation des machines asynchrones	23
I.7 Conclusion	24

Chapitre II

Diagnostic du Défaut Statorique de la Machine Asynchrone

II.1 Introduction	25
II.2 Modèle de la machine asynchrone tenant compte du défaut statorique de type court-circuit	25
II.2.1 Modèle triphasé de la machine en défaut de court circuit	26
II.2.2 Modèle de défaut statorique de la machine asynchrone dans le repère de Park	30
II.2.3 Modélisation de la machine dans le repère de Park lié au stator	31
II.2.4 Modélisation dans le repère de Park lié au rotor	33
II.3 Représentation sous forme d'état du modèle du défaut de court circuit de la machine asynchrone	34
II.4 Résultat de la Simulation	36
II.5 Analyse spectrale du courant statorique par FFT	39
II.6 Analyse du courant statorique par la technique des ondelettes	41
II.6.1 Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelette	41
II.6.2 Analyse du courant statorique par la décomposition en paquet d'ondelettes	45
II.7 Conclusion	46

Chapitre III

Diagnostic du défaut rotorique de la Machine Asynchrone

III.1 Introduction	47
III.2 Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone	47
III.3 Modélisation du défaut de rupture des barres	49
III.3.1 Schéma équivalent	51
III.4 Représentation d'état du modèle de défaut rotorique	52
III.5 Résultat de la simulation	52
III.6 Analyse du courant statorique par la FFT	54
III.7 Analyse du courant statorique par la technique des ondelettes	57
III.7.1 Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelette	57
III.7.2 Analyse du courant statorique par la décomposition en paquet d'ondelettes	59
III.8 Conclusion	61

Chapitre VI

Diagnostic des défauts mixtes statorique et rotorique

IV.1 Introduction	62
IV.2 Modèle de défaut rotorique / statorique de la machine asynchrone	62
IV.3 Représentation d'état du modèle de défaut rotorique/statorique de la machine asynchrone	63
IV.4 Résultat de la simulation du modèle de défaut de la machine asynchrone	63
IV.5 Analyse du courant statorique par la FFT	67
IV.6 Analyse du courant statorique par la technique des ondelettes	70
IV.6.1 Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelette	70
IV.6.2 Analyse du courant statorique par la décomposition en paquet d'ondelettes	73
IV.7 Conclusion	74
Conclusion générale	75
Annexe	77
Bibliographie	78

Introduction générale

Introduction générale

Durant ce dernier siècle, l'accroissement optimal de la compétitivité mondiale en matière de production dans un contexte international très concurrentiel a poussé les industriels à chercher comment assurer et à maîtriser la disponibilité et la sûreté de fonctionnement de leurs outils de production. Ces exigences en matière de sûreté de fonctionnement ont fait émerger une nouvelle science de l'ingénieur qui est la surveillance des équipements industriels. Cette dernière englobe la détection et le diagnostic des défaillances. La détection d'une défaillance à pour but principal d'améliorer et d'augmenter la disponibilité des systèmes afin de réduire les coûts de la maintenance et d'éviter un arrêt brusque de la production. Par contre le diagnostic de défauts à pour rôle la localisation (déterminer quelle partie du système est affectée) et l'identification de ce défaut (quantification du défaut). Actuellement le domaine de diagnostic est devenu un outil essentiel de la maintenance corrective et par conséquent, les entreprises équipées par des systèmes de surveillance ont tendance de plus en plus à automatiser la procédure de maintenance.

La machine asynchrone, de part sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère du marché. Cette machine est largement utilisée dans la plupart des entraînements électriques dans plusieurs domaines industriels, notamment pour des applications à vitesse constante ou à vitesse variable. Comme toute autre machine, la machine asynchrone n'est pas à l'abri d'un dysfonctionnement. Elle peut être affectée par des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator, ou du rotor, ou les deux en même temps. Les causes des défauts peuvent être dues à un simple problème de fabrication ou à une utilisation non conforme de la machine. Parfois le milieu dans lequel la machine est utilisée peut être responsable à la détérioration de la machine (milieu corrosif, milieu chimique,...). De ce fait, un arrêt brusque dû à une anomalie quelconque peut engendrer des pertes financières (pertes de production, la remise en état de l'outil de production, les retards de livraison) et matériels inévitables. Par conséquent, il est recommandé de détecter de façon précoce un défaut afin d'y remédier dans des délais les plus brefs et minimiser les effets induits (arrêt d'une chaîne de production, pertes de produits, etc...). Ceci a poussé la majorité des industriels à doter leurs chaînes de production par des systèmes sophistiqués de détection et de diagnostic de défauts. Ces deux dernières fonctions ont pour objectif d'une part l'amélioration de la sécurité des êtres humains et des biens et d'autre part l'augmentation des gains de productivité résultant de l'accroissement de la disponibilité des équipements et d'une gestion efficace des opérations de

maintenance. Un système de surveillance n'a pas pour vocation de remplacer l'homme mais pour l'aider dans sa prise de décision finale.

Durant maintenant plus d'une vingtaine d'années, les exigences de sûreté de fonctionnement et de productivité des installations industrielles ont motivé, dans leur domaine applicatif respectif, un effort important de recherche et de développement pour la détection et le diagnostic des défauts.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente la détection des défauts statorique et rotorique 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). Pour mener cette étude, le mémoire est structuré en quatre chapitres:

Le premier chapitre, est consacré sur 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 différents méthodes de détection et diagnostique de ces défauts sont représentés.

Le second chapitre est réservé en premier lieu ; à la modélisation et la simulation du modèle de défaut de type court circuit entre spires de la machine asynchrone à cage dans le repère de Park. Ainsi, l'étude est menée pour le cas de la machine alimentée par une tension déséquilibrée en vue d'étudier l'effet du défaut sur le diagnostic. En second lieu ; la détection des deux défauts de court circuit et du déséquilibre de la tension en utilisant les méthodes de traitement de signal du courant statorique à base de l'FFT et l'ondelette discrète (TOD). d'ondelettes sont considérées: " multi niveau" et "paquet d'ondelette", ainsi un calcul de l'énergie emmagasiné dans chaque décomposition est effectué.

Le troisième chapitre, est consacré au diagnostic du défaut de type cassure de barre rotorique, pour cela en vue de réduire la complexité, un modèle de défaut dans le repère de Park de la machine asynchrone à cage est présenté. Deux techniques d'analyse spectrale du courant statorique sont utilisées en régime stationnaire à base FFT et non stationnaire à base de l'ondelette.

En quatrième chapitre, un modèle de diagnostic des défauts mixtes combiné (court-circuit entre spires et cassure de barres) est présenté. Ainsi, une simulation de deux types de défaut combiné "court circuit avec cassure de barres" et le déséquilibre de la tension d'alimentation et cassure de barres". La caractérisation de l'effet des défauts mixte est

réalisée en évaluant l'énergie dans les bandes de fréquence obtenue par l'analyse de l'ondelette "TOD" et par l'analyse spectral "FFT" du courant statorique.

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 le diagnostic de défaut
de la machine asynchrone

Etat de l'Art sur le Diagnostic de Défaut de la Machine Asynchrone

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, on essaye de décrire le comportement du système à étudier à savoir à la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Après avoir citer les différents défauts pouvant survenir dans la machine et leurs causes, on essaye d'abord parler brièvement les techniques de base couramment utilisées dans le domaine du diagnostic des défauts. Enfin une citation des méthodes de modélisation de la machine en vu le diagnostique des défauts rotorique et statorique sera effectuée.

I.2 Présentation du système à étudier

I.2.1 Constitution de la machine asynchrone à cage

La machine asynchrone souvent appelée machine à induction, comporte deux parties essentielles, l'une fixe appelée stator portant un bobinage triphasé logé dans les encoches et relié à la source d'alimentation et l'autre mobile ou rotor qui peut être soit bobiné soit à cage d'écureuil. Ces deux parties sont coaxiales et séparées par un entrefer (Figure. 1.1).

Dans ce chapitre, on considère le cas d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. Toutefois, on admette que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit.

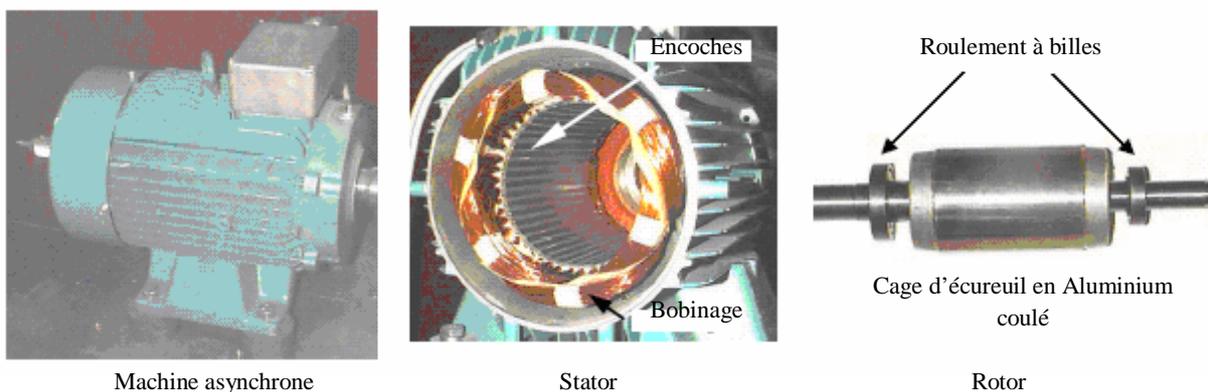


Figure 1.1: Photos d'une machine asynchrone, stator et rotor de la machine

I.2.2 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 enroulements 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:

$$n_1 = \frac{f}{P} \quad (1.1)$$

Où f : est la fréquence d'alimentation.

p : représente le nombre de paire de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_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.

Le rapport $g = \frac{n_1 - n}{n_1}$ est appelé glissement de la machine asynchrone.

I.3 Défaillances 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 : langue 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. Les sources des défauts de la machine peuvent être internes, externes ou dues à l'environnement. Les défauts internes peuvent être

classifiés concernant leurs origines c'est à dire électrique et mécanique. Habituellement, d'autres types de défauts de roulement et de refroidissement se rapportent aux défauts de rotor parce qu'ils appartiennent aux pièces mobiles. La figure (1.2) présente l'arbre de défaut de la machine asynchrone où les défauts sont classifiés selon leur emplacement: rotorique et statorique [BOU 08].

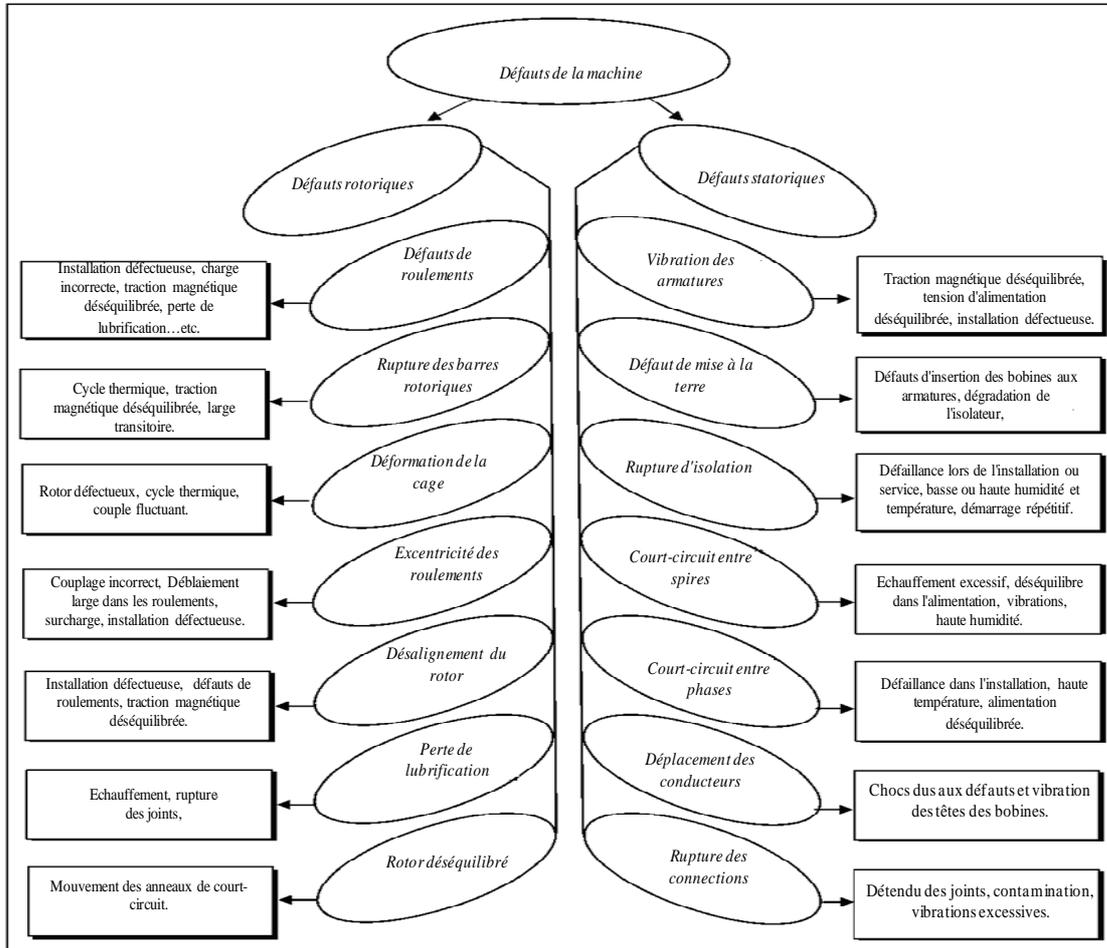


Figure 1.2: Principaux défauts dans la machine asynchrone et leurs causes

I.3.1 Défauts rotorique

I.3.1.1 Cassure des barres

La rupture des barres rotorique d'une machine asynchrone est 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 fondamentales f_s telles que [MEN 07]:

$$f_{brc} = f_s(1 \pm 2.k.g) \quad \text{avec } k = 1,2,3,\dots \quad (1.2)$$

g : glissement,

f_s : Fréquence d'alimentation statorique

I.3.1.2 Défauts d'excentricité

La variation d'épaisseur de l'entrefer entraîne des variations dans la densité du flux d'entrefer. Les enroulements statorique sont électriquement modifiés, ce qui entraîne des effets dans le spectre des courants [MEN 07]. Il existe deux types d'excentricité:

- **Excentricité statique**: déformation du corps du stator, positionnement incorrecte du rotor,
- **Excentricité dynamique**: le centre du rotor n'est plus confondu avec le centre de rotation.

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:

$$f_{exc} = f_s \left(1 \pm k \cdot \frac{(1-g)}{P} \right) \quad \text{avec } k = 1,2,3,\dots \quad (1.3)$$

p: nombre de paire de pôles.

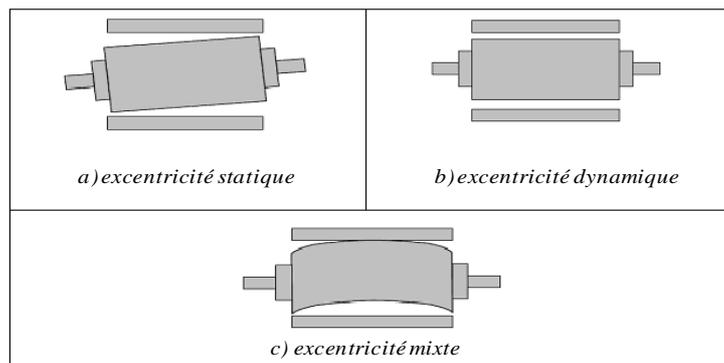


Figure1.3 : Représentation de l'excentricité statique et dynamique dans la machine asynchrone

I.3.1.3 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 (figure 1.4). 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. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [BOU07].

$$f_{roul} = |f_s - k \cdot f_v| \quad (1.4)$$

Où $k=1.2.3, \dots$ 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**

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right)^2 \right] \quad (1.5)$$

- **Défauts sur la bague intérieure**

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (1.6)$$

- **Défauts sur la bague extérieure**

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (1.7)$$

Où BD le diamètre d'un élément roulant, PD la distance entre les centres des billes diamétralement opposées, n_b est le nombre d'éléments roulants, β angle de contact des billes avec les bagues du roulement et f_{rot} est la fréquence de rotation du rotor [BOU 07]

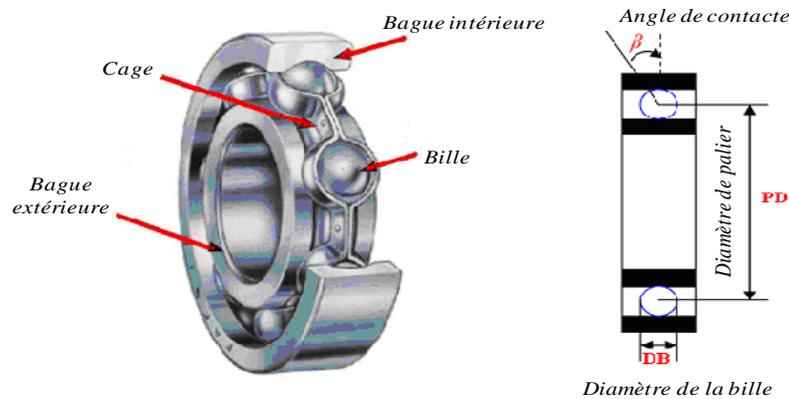


Figure1.4: Dimension du roulement à bille

I.3.2 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 inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défauts 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 rencontré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est [NAN 05] :

$$f_{cc} = f_s \left[\frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right] \quad (1.8)$$

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

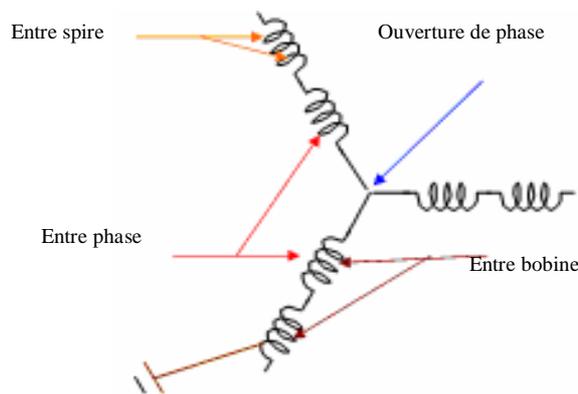


Figure 1.5: Représentation des différents défauts statoriques possible



Figure 1.6: Exemples de dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone

I.4 Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

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

➤ extraction des informations issues de capteurs de la machine pour obtenir des indicateurs de défauts ou résidus. Le résidu représente la différence entre l'observation et la valeur de référence. Avant de chercher la cause du défaut, il est important de valider l'information fournie par les résidus.

➤ la valeur du résidu doit être quantifiée afin de produire des symptômes. Le problème d'évaluation des résidus consiste à définir le seuil à partir duquel on déclarera le défaut.

➤ la décision constitue la dernière étape de la tâche du diagnostic. A partir de la comparaison de la signature actuelle avec celle de l'expérience, il s'agit de déclarer, dans un premier temps, si l'élément est défaillant ou non. Dans un second temps, si l'élément est défaillant, il faut trouver la cause de l'anomalie [MEN 07].

I.5 Méthode de diagnostic et de détection des défauts dans la machine asynchrone

I.5.1 Méthodes sans modèle

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs X physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal.

Les méthodes se basant sur l'analyse des signaux d'acquisition ont l'avantage d'être indépendante des fluctuations internes du système. Ainsi, l'information contenue dans les signaux n'est pas affectée par une éventuelle erreur de modélisation.

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

I.5.1.1 Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique [HAN 03]. D'après [CAM 86], [WIL 00], [CAR 98], les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1.9)$$

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

$$\psi_s = F_{mm} \cdot P \quad (1.10)$$

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

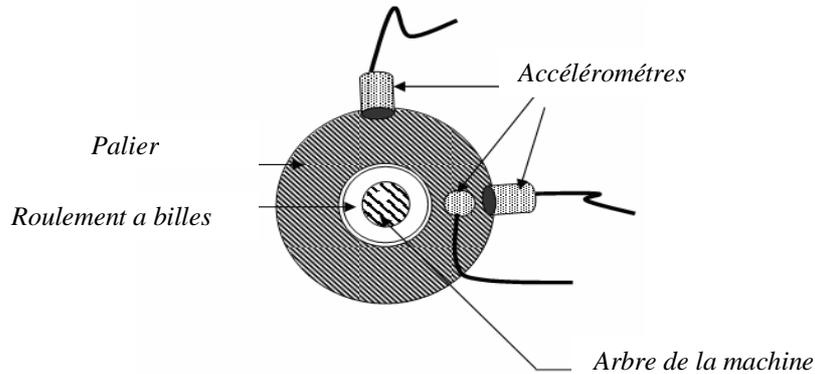


Figure1.7: Mesures vibratoires sur la machine asynchrone

I.5.1.2 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéale sans défauts, les courants et les tensions statorique sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de la tension induite dans cette bobine, peut être exploité pour détecter les différents défauts [SAH 03].

I.5.1.3 Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statorique pendant la déconnexion de la machine

du réseau. En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées [KHE 09].

I.5.1.4 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans la machine, 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 [HSU 95].

L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé de la machine [SAH 03].

I.5.1.5 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

La puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statorique. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [SAH 03].

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans la machine asynchrone a fait l'objet de nombreux travaux [MAI 92], [LEG 96].

I.5.1.6 Diagnostic par analyse du courant statorique

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace) [GHO 05].

I.5.1.7 Diagnostic par analyse du vecteur de Park

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir:

La première utilise les grandeurs biphasées i_{ds} et i_{qs} , qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de lissajou: $i_q = f(i_d)$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut [SAH 10].

La deuxième est appelée Vecteur de Park Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park $\left(\sqrt{i_d^2(t) + i_q^2(t)}\right)$. Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement [SAH 10].

I.5.1.8 Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (AI)

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle (IA). Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisent un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance. Parmi ces méthodes, on peut citer [MEN 07]:

- logique floue,
- réseaux neuronaux,
- reconnaissance des formes.

I.5.2 Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic

I.5.2.1 Transformée de Fourier rapide (FFT)

Considérons le signal $X(t)$ à temps continu. Si X est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence f est la suivante [ORA 88] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi f t} dt \quad (1.11)$$

Son inverse est donnée par:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{-2\pi f t} df \quad (1.12)$$

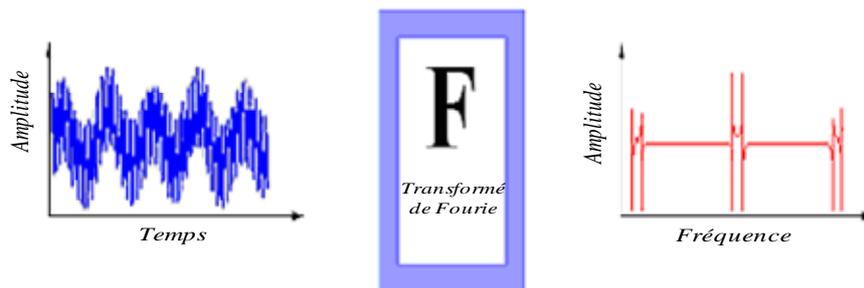


Figure 1.8: Représentation temporelle vers fréquentielle

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

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x(kT) e^{-\frac{2\pi j k T f}{NT}} \quad (1.13)$$

et sa relation inverse est donnée par:

$$x(kT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{-j\frac{2\pi f k T}{NT}} \quad (1.14)$$

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

Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal $x(t)$. En effet, la FFT décompose le signal $x(t)$ sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux $\{e^{2\pi j k T}\}_{f \in R}$. Malheureusement, ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la FFT s'avère inadéquate.

Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence. Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps. Dans le cas de l'existence de sauts d'impulsions ou de changements de fréquence par exemple, la FFT ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent dans le signal [CUS 08], [KIA 09]. Ces phénomènes sont non stationnaires et du fait qu'ils sont brefs et souvent à caractère oscillatoire, leur contenu spectral est difficile à mettre en évidence.

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

I.5.2.2 Transformée en Ondelette (TO)

La transformée en Ondelette est un outil récent de traitement de signal [MAL98]. 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 [MAL89]. Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse Temps-fréquence classique.



Figure 1.9: Représentation temporelle vers ondelettes

I.5.2.2.1 Transformée en ondelettes continue (TOC)

La transformée continue en ondelettes (TOC), réalise une projection sur une base de fonctions dont la construction diffère de celle de la Transformée de Fourier à Court Terme et auxquelles on réserve classiquement le terme d'ondelettes. Les ondelettes sont construites à partir d'une "ondelette mère" $\psi(t)$ à l'aide d'un opérateur de translation temporelle et d'un opérateur de changement d'échelle [HIT 99].

$\psi(t)$ est une fonction de moyenne nulle telque:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \tag{1.15}$$

Cette dernière est dilatée avec d'un facteur d'échelle " a" et translatée par "b"

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{1.16}$$

Il y a plusieurs ondelettes mères utilisées pour le calcul de la transformée en ondelette des signaux analysés. Le tableau (1.1) contient les familles les plus usuelles:

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

Tableau 1.1: Familles d'ondelettes

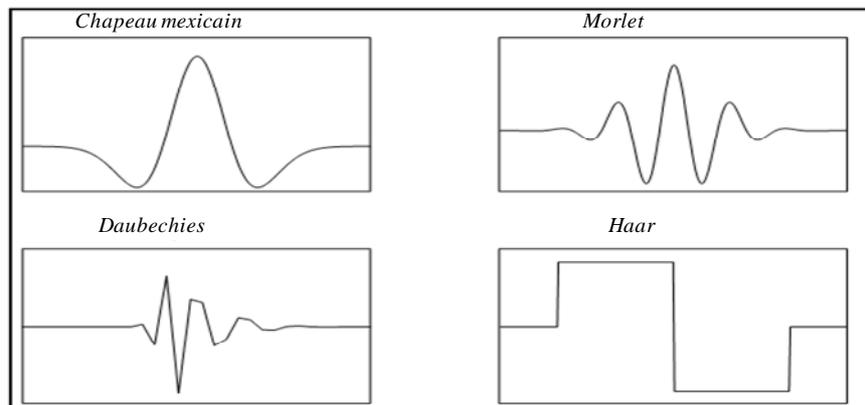


Figure 1. 10: Quelques formes des ondelettes usuelles

La 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.

La transformée continue en ondelettes est définie par [HIT 99]:

$$T_x(a,b) = \langle x, \psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1.17)$$

Sa version fréquentielle est donnée par:

$$T_x(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \psi^*(af) e^{j2\pi fb} df \quad (1.18)$$

La transformée prend les deux arguments a et b qui sont respectivement des coefficients de dilatation et de translation. En faisant varier ces arguments, on peut couvrir complètement le plan temps-fréquence avec des boîtes; on obtient ainsi une représentation complète et redondante du signal à analyser.

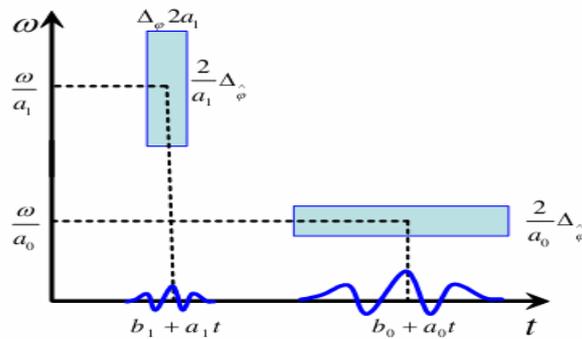


Figure 1.11: Boîtes Temps-fréquence des deux ondelettes ψ_{a_1, b_1} et ψ_{a_0, b_0}

Quand l'échelle a diminue, le support du temps est réduit mais la diffusion de fréquence augmente et couvre un intervalle qui est décalé vers des hautes fréquences.

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.

I.5.2.2 Transformée en ondelette discrète (TOD)

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la différence de cette dernière, la TOD utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. On appelle transformée en ondelettes discrète dyadique toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur

d'échelle $a = 2^i$. Il est clair que la transformée en ondelettes discrète est pratique en implémentation sur tout système numérique (PC, DSP, CARTE a μ P...) [BEN 05].

Il est à noter que la transformée en ondelette continue TOC est aussi implantable sur les systèmes digitaux avec un lourd calcul provenant de la nature continue du facteur d'échelle et de la dilatation (Toutes les valeurs sont possibles) [BOU 08].

L'analyse en multi-résolution permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue de la plus fine à la plus grossière.

Soit ϕ la fonction échelle. Elle doit être dans L^2 et ayant une moyenne non nulle. On forme une base de fonctions d'échelle pour tout $i \in \mathbb{Z}$ comme suit:

$$\phi_{i,j}(t) = 2^{-i/2} \phi(2^{-i}t - j) \quad (1.19)$$

et de la même manière la base d'ondelette:

$$\psi_{i,j}(t) = 2^{-i/2} \psi(2^{-i}t - j) \quad (1.20)$$

Le facteur d'échelle dyadique mène à:

$$\phi(t) = \sum_j 2h(j)\phi(2t - j) \quad (1.21)$$

$$\psi(t) = \sum_j 2g(j)\psi(2t - j) \quad (1.22)$$

Les équations (1.21) et (1.22) représentent la décomposition de la fonction échelle et de l'ondelette en combinaisons linéaires de la fonction échelle à la résolution haute directement.

On note que $h(j)$ et $g(j)$ sont les filtres passe bas et passe haut respectivement lors d'une décomposition par ondelettes.

La transformation en ondelettes peut aussi être considérée comme un processus de décomposition du signal en approximations et en détails. Le signal d'origine $f(t)$, traverse deux filtres complémentaires, passe-haut et passe-bas et émerge en tant que deux signaux respectivement le signal d'approximations A et le signal de détails D comme le montre la figure (1.12) [BOU11].

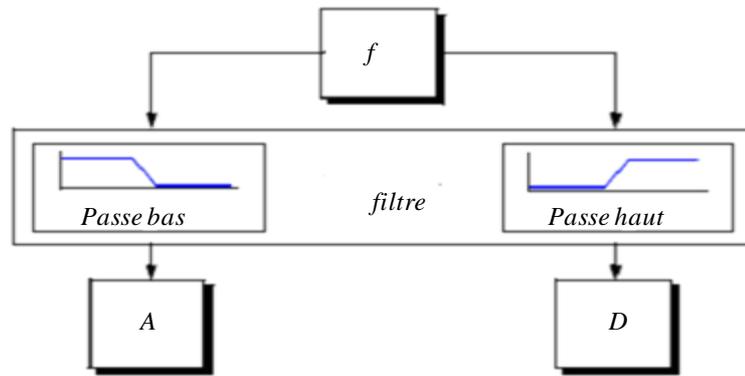


Figure 1.12: Décomposition du signal f en approximations et détails

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

• **Décomposition simple**

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

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

Pour donner deux vecteurs respectivement CA (Coefficients ondelette d'approximation) et CD (Coefficients ondelette de détails). Tous deux sont de taille approximativement égale à la moitié du vecteur d'origine. Ceci est du au fait de l'opération de décimation par 2 (*down sampling*) [BOU 11].

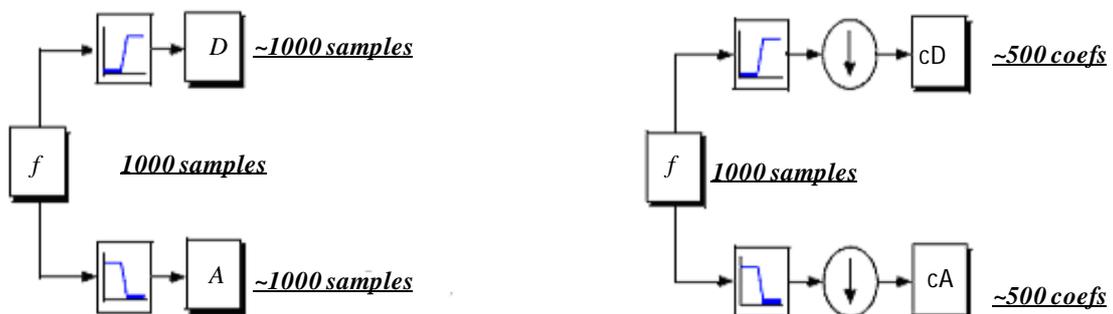


Figure 1.13: Décomposition simple du signal f en approximations et détails

- **Décomposition multi niveaux**

L'algorithme de Mallat permet de décomposer le signal f en plusieurs niveaux comme illustré sur la figure (1.14). Le processus de décomposition peut être réitéré, avec des approximations successives étant décomposées alternativement, de sorte qu'un signal soit décomposé en beaucoup de composants de hautes résolutions. Ceci s'appelle l'arbre de décomposition en ondelettes. Puisque le processus d'analyse est itératif, dans la théorie il peut être continué indéfiniment. En réalité, la décomposition peut procéder seulement jusqu'à ce que les différents détails se composent d'un échantillon ou d'un Pixel simple. Dans la pratique, on choisira un nombre approprié de niveaux basés sur la nature du signal à décomposer, ou sur un critère approprié tel que l'entropie [BOU 08].

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

Les coefficients A_j et D_j sont calculés en utilisant l'algorithme de décomposition d'arbre laissant stockée l'information de base du signal fréquence aussi bien que les discontinuités.

Pour décomposer un signal dans la bande de fréquence entière, une décomposition en ondelettes peut être utilisée. Après la décomposition par périodes, nous obtiendrons 2^l bandes de fréquence chacune avec la même largeur de bande:

$$\left[\frac{(i-1)f_n}{2}, \frac{if_n}{2} \right], i = 1, 2, \dots, 2^l \quad (1.23)$$

telle que f_n est la fréquence de *Nyquist* dans la bande i de fréquence. D'après la relation Eq.1.23, on peut représenter les différents niveaux de décomposition avec leurs bandes de fréquences (figure 1.14) [BOU 08].

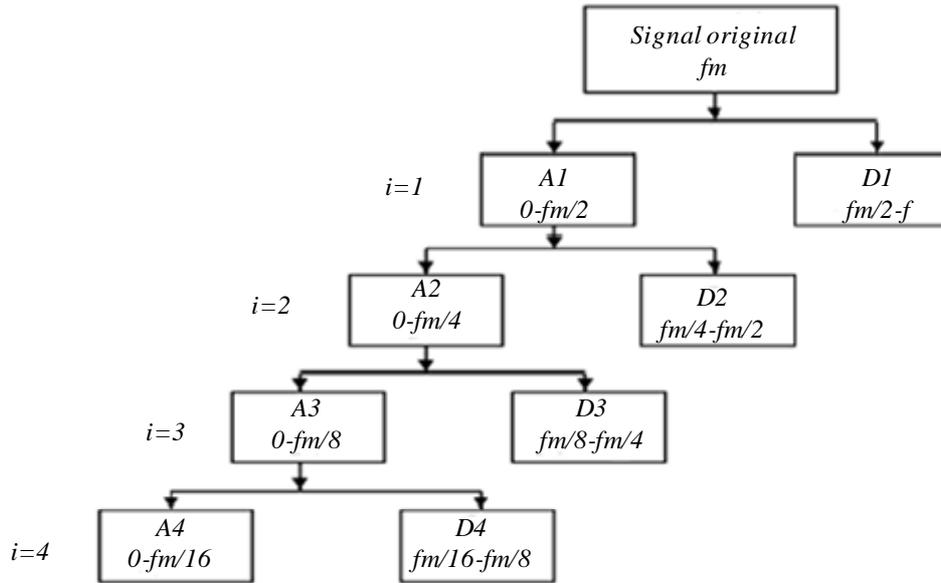


Figure 1.14: Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux

D'après l'arbre de décomposition (figure.1.14), on peut estimer le signal original à n'importe quel niveau par la somme des signaux approximation et de détail. Pour une décomposition en quatre niveaux, le signal original est reconstruit en chaque niveau comme suit :

$$\begin{cases}
 i = 1, f(n) = A_1(n) + D_1(n) \\
 i = 2, f(n) = A_2(n) + D_2(n) + D_1(n) \\
 i = 3, f(n) = A_3(n) + D_3(n) + D_2(n) \\
 i = 4, f(n) = A_4(n) + D_4(n) + D_3(n) \\
 i = k, f(n) = A_k(n) + D_k(n) + D_{k-1}(n)
 \end{cases} \quad (1.24)$$

- **Décomposition par paquet d'ondelettes**

La méthode par paquet d'ondelette est une généralisation de la décomposition en ondelette discrète qui offre une gamme plus riche des possibilités pour l'analyse du signal.

Dans l'analyse en ondelette, un signal est décomposé en approximation et détail. L'approximation est alors elle-même coupée en approximation et détail de deuxième niveau, et le processus est répété. Pour une décomposition de n-niveau, il y a (n+1) manières possibles de décomposer ou coder le signal.

Dans l'analyse par paquet d'ondelettes, les détails aussi bien que les approximations peuvent être décomposés. Ceci rapporte plus de 2^{2n-1} de différentes décompositions du signal. L'arbre de décomposition en paquet d'ondelettes est représenté dans la figure (1.15)[BOU08].

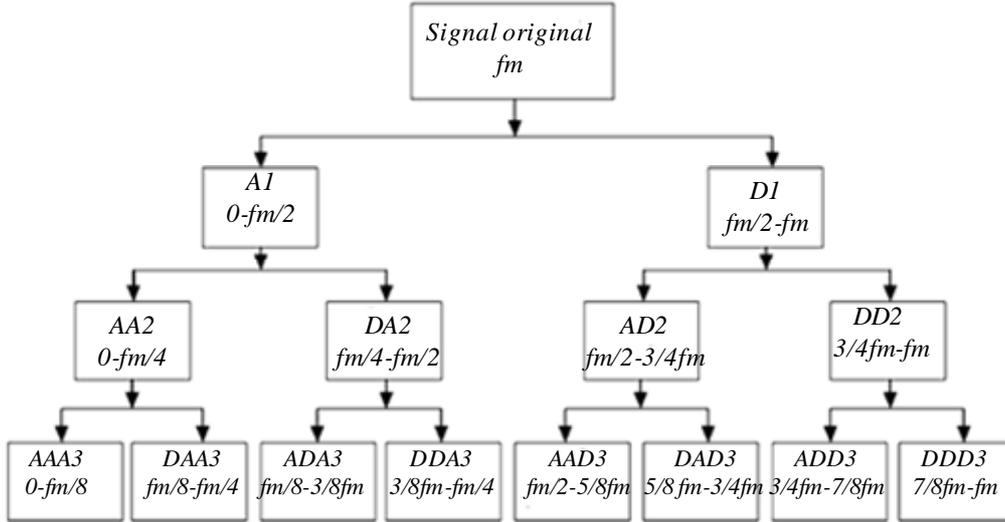


Figure 1.15: Décomposition en paquet d'ondelettes d'ordre 3

De la même façon que la décomposition en ondelettes, le signal original dans la décomposition en paquet d'ondelettes est estimé par la somme des signaux d'approximation et de détail à chaque niveau.

$$\begin{cases}
 i = 1, f(n) = A_1(n) + D_1(n) \\
 i = 2, f(n) = AA_1(n) + DA_2(n) + AD_2(n) + DD_2(n) \\
 i = 3, f(n) = AAA_3(n) + DAA_3(n) + ADA_3(n) + DDA_3(n) + AAD_3(n) \\
 \quad \quad \quad + DAD_3(n) + ADD_3(n) + DDD_3(n)
 \end{cases} \quad (1.25)$$

Le paquet d'ondelettes décompose le signal original qui est stationnaire ou non stationnaire dans des bandes de fréquence indépendantes. Il n'y a aucune information redondante dans les bandes de fréquence décomposées. C'est une approche efficace d'analyse basée sur la multi-résolution et peut être proposée comme méthode de diagnostic de défaut [BOU 08].

I.5.2.2.3 Energie de la décomposition d'ondelette

Après la différentiation, l'extraction du fondamental du courant statorique ou n'importe quel prétraitement, le diagnostic du défaut est basé sur l'observation et la comparaison entre les niveaux de décomposition qui contiennent l'information du défaut pour différentes machines à diagnostiquer.

Quand le défaut des barres rotoriques, portion d'anneau de court-circuit, court-circuit au niveau des enroulements statorique de la machine asynchrone apparaît, l'information de défaut du signal du courant statorique est incluse dans chaque bande de fréquence résultante de la décomposition en ondelettes ou en paquet d'ondelettes. En calculant l'énergie associée à

chaque niveau ou à chaque nœud de décomposition, on peut construire un outil de diagnostic très efficace [BOU 08].

La valeur propre d'énergie de chaque bande de fréquence est définie par :

$$E_j = \sum_{k=1}^{k=n} D_{j,k}^2(n) \quad (1.26)$$

tel que j est le niveau de décomposition.

Les valeurs propres d'énergies des niveaux des décompositions contiennent l'information des signaux dans un moteur asynchrone, le tracé de ces valeurs peut être utilisé pour diagnostiquer les défauts dans la machine asynchrone à cage d'écurcule et on peut également identifier le degré de défaut. La déviation de certaine valeur propre indique la sévérité du défaut.

I.5.3 Méthodes du diagnostic à base du modèle

Deux approches peuvent être utilisées pour diagnostiquer les défauts à partir des modèles paramétriques.

- La première repose sur le suivi des paramètres électriques caractérisant les modèles. Il s'agit de détecter un écart entre l'évolution des paramètres au cours d'un fonctionnement sain et celle suivie par le système en présence de défauts. L'identification des paramètres peut se faire hors ligne. Elle se base alors sur un algorithme d'optimisation de l'erreur entre les paramètres du modèle et ceux du système étudié [LUJ 99], [KHE 94]. Les paramètres peuvent être aussi identifiés en cours de fonctionnement à l'aide d'observateurs étendus. Le plus couramment utilisé est le Filtre de Kalman [KAL 61], [NAI, 00].

- La deuxième approche consiste à analyser les résidus générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller. Le modèle de processus est constitué de relations de contraintes dynamiques liant deux types de variables des variables inconnues (variables internes, perturbations, entrées inconnues, ...) et des variables connues (consignes, variables mesurées). Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsqu'une défaillance survient. La difficulté majeure consiste à faire la liaison entre le résidu établi et un défaut particulier [GAO 12].

I.6 Panorama des méthodes de modélisation de la machine asynchrone

Les modèles décrivant le fonctionnement de la machine asynchrone en présence de défauts peuvent être groupés en **modèles physiques** et en **modèles comportementaux**:

➤ **Modèles physiques** se basent sur les lois de l'électromagnétisme pour décrire le fonctionnement de la machine. Ces modèles peuvent varier en complexité et/ou en précision

selon la méthode de modélisation utilisée. Les méthodes les plus utilisées dans ce cadre de modélisation sont [BAZ 09]:

- La méthode des éléments finis,
- La méthode des réseaux de perméance,
- La méthode des circuits électriques magnétiquement couple.

➤ **Modèles de comportement** modifient les modèles issus de la Physique en y introduisant des paramètres supplémentaires qui permettent la détection et, dans certains cas, la localisation du défaut observe [SCH 99], [BAC 02]. Ces modèles comportementaux peuvent être directement utilisés dans les procédures de diagnostic, dans ce cadre de modélisation nous pouvons citer [BAZ 09]:

- Les modèles compacts électrique et thermique servant au diagnostic par estimation paramétrique.
- La mémorisation de la forme des signaux captés aux niveaux de machines saines et en défauts, afin de les exploiter ultérieurement pour le diagnostic par reconnaissance des formes.

Dans ce mémoire, nous avons choisi de présenter le modèle de Park rencontré pour le diagnostic.

I.7 Conclusion

Après quelques rappels sur la constitution de la machine asynchrone, ainsi que sur les défaillances pouvant affecter cette machine (excentricité, court-circuit, rupture des barres....), on a présenté les différentes techniques de diagnostic de la machine asynchrone à cage d'écureuil, et nous avons vu que la détection d'un défaut, qu'il soit mécanique ou électrique, sont basées sur le contenu spectral de signaux et le plus souvent à partir du courant absorbé par la machine asynchrone.

La connaissance des éléments de construction de la machine asynchrone à cage permet de trouver un modèle dédié à la simulation donnant ainsi une image approximative de l'état de la machine lors de ses régimes de fonctionnement (sain ou avec défaut) et qui fera l'objet du second chapitre.

Chapitre II

Diagnostic du défaut statorique de la machine asynchrone

Diagnostic du Défaut Statorique de la Machine Asynchrone

II.1 Introduction

Le court-circuit des spires constitue le défaut le plus nuisible et le plus fréquemment rencontré au stator des machines électriques. Dans ce chapitre, on présentera le modèle du défaut de type court circuit entre spires de la machine asynchrone triphasé à cage dans le repère de Park, ainsi, on étudie l'effet provoqué par le déséquilibre de la tension d'alimentation par rapport au défaut de court-circuit. Les techniques de détection des défauts considérées sont à base de l'analyse spectrale du courant statorique utilisant la transformée de Fourier rapide FFT en régime stationnaire et la transformée de l'Ondelette (TOD) en régime variable non stationnaire.

II.2 Modèle de la machine asynchrone tenant compte du défaut statorique de type court-circuit

Il s'agit de modéliser une machine active équivalente dont le stator et le rotor sont toujours constitués de trois phases identiques parcourues par des courants triphasés. Pour prendre en compte l'existence de spires en court-circuit au stator de la machine asynchrone, on introduit une bobine supplémentaire court-circuitée dont le nombre de spires est n_{cc} égal au nombre de spires en défaut dans la machine [SCH 99]. Ainsi, en présence du déséquilibre statorique provoqué par le défaut, la machine comporte donc en plus des bobinages triphasés statoriques d'axes (a_s, b_s, c_s) et rotoriques d'axes (a_r, b_r, c_r) un bobinage en court circuit qui est à l'origine du champ stationnaire par rapport au stator créé lors du défaut [BAC 02].

La figure (2.1) illustre le stator d'une machine asynchrone à une paire de pôles avec un défaut de court circuit sur la phase b_s du stator. L'effet du défaut fait apparaître dans la machine un nouveau bobinage B_{cc} dont le nombre de spires est égal au nombre de spires en court-circuit de direction égale à $\frac{2\pi}{3}$ (direction de la phase b_s). Afin de bien caractériser ce défaut, il est nécessaire d'introduire deux paramètres [BAC 02]:

- L'angle électrique noté θ_{cc} repérant le bobinage en court-circuit par rapport à l'axe de référence de la phase a_s . Ce paramètre permet la localisation du bobinage en défaut et ne peut

prendre que les trois valeurs 0 , $\frac{2\pi}{3}$ ou $\frac{4\pi}{3}$ correspondant respectivement à un court-circuit sur les phases a_s , b_s ou c_s .

- Le rapport de court-circuit noté η_{cc} égal au rapport du nombre de spires en court-circuit sur le nombre total de spires dans une phase statorique sans défaut.

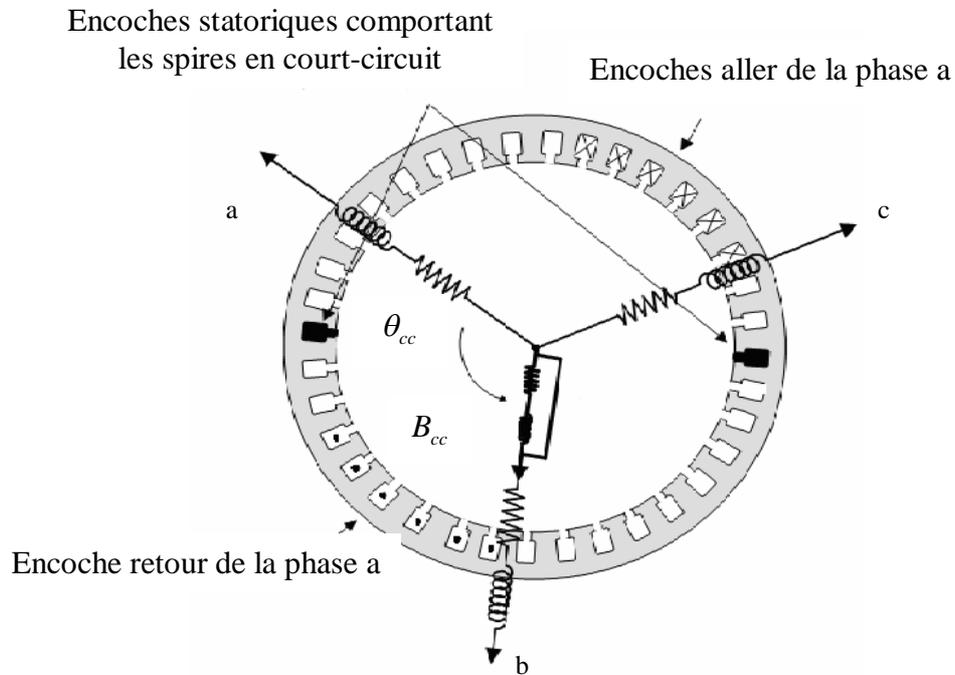


Figure 2.1: Court-circuit de spires sur la phase b du stator

Selon le modèle établi en référence [BAC 02], on exprime donc les différentes équations de tensions et de flux de la machine asynchrone en présence d'un défaut statorique de type court-circuit par l'introduction des paramètres électriques de la bobine en court-circuit "B_{cc}".

II.2.1 Modèle triphasé de la machine en défaut de court circuit

On considère que la machine asynchrone à cage d'écureuil est constituée de trois enroulements identiques, à p paires de pôles et décalés d'un angle électrique de $\frac{2\pi}{3}$, logés symétriquement dans les encoches du stator et alimentée directement à travers le réseau électrique triphasé. Pour le rotor, nous admettons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné court-circuité, ainsi, il est assimilable à trois enroulements identiques parfaitement symétriques en court-circuit.

Ainsi, Les bobinages statoriques sont notés par (a_s, b_s, c_s) et au rotor (a_r, b_r, c_r). L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, la vitesse angulaire est donc

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}.$$

Lorsqu'un court-circuit de spires au stator apparaît, l'application du théorème d'Ampère montre qu'il se crée en plus du champ tournant, une excitation magnétique stationnaire notée H_{cc} de pulsations ω_s due au nouveau bobinage court-circuité B_{cc} parcouru par un courant de court-circuit i_{cc} (Figure.2.2) [SCH 99].

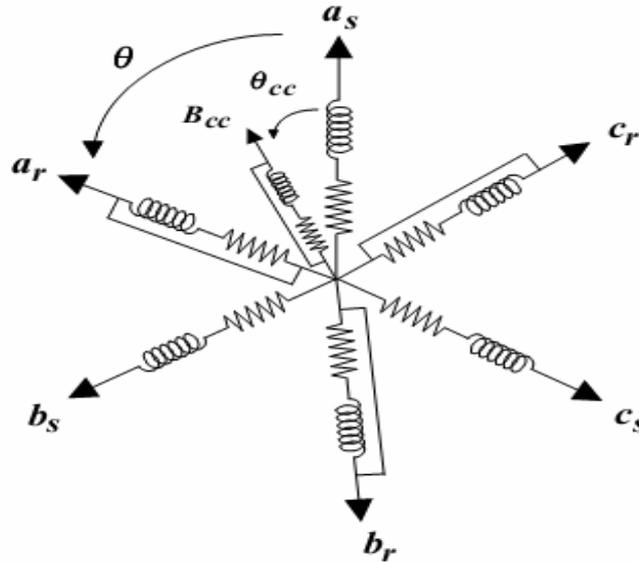


Figure 2.2 : Enroulements triphasés avec défaut de court-circuit

Le modèle de la machine asynchrone est établi en tenant compte des hypothèses simplificatrices de base suivantes

- La machine est considérée symétrique et à entrefer constant,
- La répartition dans l'entrefer de la force magnétomotrice et du flux est considérée sinusoïdale,
- Le circuit magnétique est considéré non saturé et de perméabilité constante,
- Les pertes fer par hystérésis et par courant de Foucault, l'effet de dentures sont considérées négligeables,
- L'effet des encoches est supposé négligeable,
- La réduction de spires qui intervient dans une phase à la suite d'un court-circuit est supposée négligeable.

En utilisant l'hypothèse de la linéarité, cette situation est donc équivalente à un fonctionnement "commun" produisant un champ tournant et d'un fonctionnement "différentiel" à l'origine d'un champ supplémentaire orienté selon l'axe de la bobine en défaut

[BAC 02]. Les différentes équations de tensions et de flux de la machine asynchrone en présence du défaut de court-circuit s'écrivent alors:

$$\begin{cases} \underline{u}_s = [R_s] \underline{i}_s + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_s \\ 0 = [R_r] \underline{i}_r + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_r \\ 0 = R_{cc} i_{cc} + \frac{d}{dt} \phi_{cc} \end{cases} \quad (2.1)$$

et

$$\begin{cases} \underline{\phi}_s = [L_s] \underline{i}_s + [M_{sr}] \underline{i}_r + [M_{scc}] i_{cc} \\ \underline{\phi}_r = [M_{rs}] \underline{i}_s + [L_r] \underline{i}_r + [M_{rcc}] i_{cc} \\ \phi_{cc} = [M_{ccs}] \underline{i}_s + [M_{ccr}] \underline{i}_r + [L_{cc}] i_{cc} \end{cases} \quad (2.2)$$

avec:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & R_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rc} \end{bmatrix},$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{psa} + L_{fsa} & -\frac{L_{sab}}{2} & -\frac{L_{sac}}{2} \\ -\frac{L_{sab}}{2} & L_{psb} + L_{fsb} & -\frac{L_{sbc}}{2} \\ -\frac{L_{sac}}{2} & -\frac{L_{sbc}}{2} & L_{psc} + L_{fsc} \end{bmatrix}, \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_{pra} + L_{fra} & -\frac{L_{rab}}{2} & -\frac{L_{rac}}{2} \\ -\frac{L_{rab}}{2} & L_{prb} + L_{frb} & -\frac{L_{rbc}}{2} \\ -\frac{L_{rac}}{2} & -\frac{L_{rbc}}{2} & L_{prc} + L_{frc} \end{bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} M_{s_a r_a} \cos(\theta) & M_{s_a r_a} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{s_a r_a} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{s_b r_b} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{s_b r_b} \cos(\theta) & M_{s_b r_b} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ M_{s_c r_c} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{s_c r_c} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{s_c r_c} \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}] = [M_{rs}]^T$$

R_{sx}, R_{rx} : Résistance propre d'une phase statorique et rotorique respectivement,

L_{psx} et L_{fsx} : Inductances principale et de fuite statorique respectivement,

$L_{psx} + L_{fsx}$: Inductance propre d'une phase statorique,

L_{prx} et L_{frx} : Inductances principale et de fuite rotorique respectivement,

$L_{prx} + L_{frx}$: Inductance propre d'une phase rotorique,

L_{sxy}, L_{rxy} : Mutuelle inductance entre deux phases statorique et rotorique respectivement,

$M_{s_x r_y}$: Mutuelle inductance entre une phase statorique x et une phase rotorique y,

M_{scc}, M_{rcc} : Mutuelle inductance entre une phase statorique ou rotorique et la bobine en court-circuit,

$\theta = P\theta_{m\acute{e}canique}$: Angle électrique de la position du rotor,

P : nombre de paire de pôles.

Ainsi, en satisfaisant les hypothèses ci-dessus, on peut écrire:

$$\begin{cases} R_{sx} = R_s \\ R_{ry} = R_r \\ L_{psx} = L_{pry} = L_{sxy} = L_{rxy} = M_{s_x r_y} = L_p \end{cases} \quad (2.3)$$

Pour élaborer un modèle simplifier de la machine, on totalise les fuites magnétiques au stator. Ceci qui permet de réduire le nombre de paramètres dynamique de la machine, ainsi, on peut écrire:

$$\begin{cases} L_{fry} = 0 \\ L_{fsx} = L_f \end{cases} \quad (2.4)$$

Selon [BAC 01], les mutuelles inductances sont décrites par:

$$\begin{cases} M_{sr}(\theta) = \frac{3}{2} L_p T_{32} P(\theta) T_{23} \\ M_{rs}(\theta) = M_{sr}(\theta)^T = \frac{3}{2} L_p T_{32} P(-\theta) T_{23} \end{cases} \quad (2.5)$$

avec :

$$T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos(\frac{2\pi}{3}) & \cos(\frac{4\pi}{3}) \\ \sin(0) & \sin(\frac{2\pi}{3}) & \sin(\frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}, \quad T_{32} = T_{23}^T$$

et

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{\pi}{2}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} : \text{Matrice de rotation d'angle } \theta$$

R_{cc} : Résistance de la phase en court-circuit (de la bobine B_{cc}) qui s'écrit de manière simple en fonction de la résistance R_s des trois phases statoriques sans défaut:

$$R_{cc} = \eta_{cc} R_s \quad (2.6)$$

avec

$$\eta_{cc} = \frac{n_{cc}}{n_s} = \frac{\text{Nombre de spires en court - circuit}}{\text{Nombre de spires sur une phase saine}}$$

On peut écrire les différentes inductances et mutuelles de la phase du court-circuit (de la bobine B_{cc}) comme suites:

$$L_{cc} = \eta_{cc}^2 (L_p + L_f) \quad (2.7)$$

$$\begin{cases} [M_{ccs}] = \eta_{cc} L_p [\cos(\theta_{cc}) \cos(\theta_{cc} - \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta_{cc} + \frac{2\pi}{3})] \\ = \sqrt{\frac{3}{2}} \eta_{cc} L_p [\cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc})] T_{23} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$[M_{scc}] = [M_{ccs}]^T = \sqrt{\frac{3}{2}} \eta_{cc} L_p T_{32} [\cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc})]^T \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} [M_{ccr}] = \eta_{cc} L_p [\cos(\theta_{cc} - \theta) \cos(\theta_{cc} - \theta - \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta_{cc} - \theta + \frac{2\pi}{3})] \\ = \sqrt{\frac{3}{2}} \eta_{cc} L_p [\cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc})] P(\theta) T_{23} \end{cases} \quad (2.10)$$

$$[M_{rcc}] = [M_{ccr}]^T = \sqrt{\frac{3}{2}} \eta_{cc} L_p T_{32} P(-\theta) [\cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc})]^T \quad (2.11)$$

II.2.2 Modèle de défaut statorique de la machine asynchrone dans le repère de Park

Le principe de cette transformation repose sur le fait qu'un champ tournant créé par un système triphasé équilibré peut l'être aussi à l'identique par un système biphasé de deux bobines décalées de $\pi/2$ dans l'espace, alimentées par des courants déphasés de $\pi/2$ dans le temps. On se donne pour objectif que les forces magnétomotrices et la puissance instantanée soient conservées. Pour simplifier l'étude analytique de la machine, il est très important de fixer le repère. Il existe trois choix importants de système d'axes de référence ayant des spécificités distinctes. Nous pouvons fixer le repère au stator, au rotor ou au champ tournant. Il est donc intéressant de pouvoir changer de repère selon les besoins de l'utilisateur. Ainsi, pour un référentiel noté (x) tournant à une vitesse ω_{rep} par rapport au stator de la machine asynchrone.

➤ Référentiel fixe par rapport au stator

Ce référentiel s'appelle repère de Park lié au stator. La simulation de la machine dans ce repère n'exige aucune connaissance sur la position du rotor. Il est souvent utilisé dans l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation [BOU 06]. Dans ces conditions nous avons: $\omega_{rep} = 0$.

➤ Référentiel fixe par rapport au champ tournant :

Ce référentiel tourne à la vitesse de synchronisme $\omega_{rep} = 2\pi f$ où f est la fréquence d'alimentation de la machine. C'est le repère lié au champ tournant. L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent [BAG 05].

➤ **Référentiel fixe par rapport au rotor**

C'est le repère de Park liée au rotor. Il est utilisé lorsqu'on a accès à la position mécanique, du faite de la quasi-continuité des grandeurs électriques. Nous avons dans ce cas [BEN 09]: $\omega_{rep} = \omega$.

Il est à noter que la transformation triphasé-biphasé est effectuée uniquement sur les grandeurs du régime sain (axes triphasés équilibrés de la machine). Le principe du modèle de défaut établi étant de découpler le mode commun (modèle triphasé équilibré) du mode différentiel correspondant à la bobine en défaut, le déséquilibre agit uniquement sur ce dernier. Ainsi, en présence d'un court-circuit, la machine devient certes non équilibrée du fait de la présence d'un champ supplémentaire au stator mais ce déséquilibre est directement traduit par le bobinage de défaut B_{cc} [BAC 02].

Dans notre étude, pour plus de simplicité, on établit en premier lieu un modèle lié au stator et en second lieu, on change le repère lié au rotor où le référentiel est fixe par rapport au rotor, les signaux électriques sont alors quasi-continus.

II.2.3 Modélisation de la machine dans le repère de Park lié au stator

On définit les grandeurs électriques ramenées au stator comme suit:

$$\begin{cases} \text{grandeurs statorique} : \underline{x}_{\alpha\beta_s} = T_{23} \underline{x}_s \\ \text{grandeurs statorique} : \underline{x}_{\alpha\beta_r} = T_{23} \underline{x}_r \end{cases}$$

Les grandeurs de court-circuit sont localisées sur une direction fixe au stator, leurs projections sur les axes α_s et β_s permettent de leur associer des vecteurs stationnaires par rapport au stator [BAC 02]:

$$i_{\alpha\beta_{cc}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} i_{cc} \qquad \phi_{\alpha\beta_{cc}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} \phi_{cc} \qquad (2.12)$$

Ainsi, les équations (2.1 et 2.2) des tensions et des flux deviennent :

$$\begin{cases} \underline{U}_{\alpha\beta_s} = R_s i_{\alpha\beta_s} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{\alpha\beta_s} \\ 0 = R_r i_{\alpha\beta_r} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} - \omega P \left(\frac{\pi}{2} \right) \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} \\ 0 = R_{cc} i_{\alpha\beta_{cc}} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}} \end{cases} \qquad (2.13)$$

$$\begin{cases} \underline{\phi}_{\alpha\beta_s} = (L_m + L_f)\underline{i}_{\alpha\beta_s} + L_m\underline{i}_{\alpha\beta_r} + \sqrt{\frac{2}{3}}\eta_{cc}L_m\underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} = L_m(\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r}) + \sqrt{\frac{2}{3}}\eta_{cc}L_m\underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}} = \sqrt{\frac{2}{3}}\eta_{cc}L_mQ(\theta_{cc})(\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r}) + (\frac{2}{3}L_m + L_f)\eta_{cc}^2Q(\theta_{cc})L_m\underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \end{cases} \quad (2.14)$$

avec :

$$L_m = \frac{3}{2}L_p : \text{Inductance magnétisante.}$$

$$Q_{cc} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) & \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc})^2 & \cos(\theta_{cc})\sin(\theta_{cc}) \\ \cos(\theta_{cc})\sin(\theta_{cc}) & \sin(\theta_{cc})^2 \end{bmatrix}$$

θ_{cc} : L'angle électrique repérant le bobinage en court-circuit

Par ressemblance avec l'étude du schéma équivalent ramené au primaire des transformateurs et en négligeant l'inductance de fuite ramenée au stator devant l'inductance magnétisante dans l'expression du flux de court-circuit en(2.14), les équations en (2.14) de la machine asynchrone en défaut statorique deviennent :

$$\begin{cases} \underline{\phi}_{\alpha\beta_s} = \underline{\phi}_{\alpha\beta_f} + \underline{\phi}_{\alpha\beta_m} = L_f\underline{i}_{\alpha\beta_s} + L_m(\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} - \tilde{\underline{i}}_{\alpha\beta_{cc}}) \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} = \underline{\phi}_{\alpha\beta_m} = L_m(\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} - \tilde{\underline{i}}_{\alpha\beta_{cc}}) \\ \tilde{\underline{\phi}}_{\alpha\beta_{cc}} = \eta_{cc}Q(\theta_{cc})\underline{\phi}_{\alpha\beta_m} \end{cases} \quad (2.15)$$

avec :

$$\tilde{\underline{i}}_{\alpha\beta_{cc}} = -\sqrt{\frac{2}{3}}\eta_{cc}\underline{i}_{\alpha\beta_{cc}}, \quad \tilde{\underline{\phi}}_{\alpha\beta_{cc}} = \sqrt{\frac{2}{3}}\underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}}$$

Les termes $\underline{\phi}_{\alpha\beta_f}$ et $\underline{\phi}_{\alpha\beta_m}$ s'apparentent au flux de fuite statorique et au flux magnétisant de la machine. Le flux magnétisant est associé aux lignes de champ magnétique se refermant par le stator et le rotor à l'origine du couple électromagnétique [SCH 99].

Ainsi, en l'équation (2.13) du bobinage en défaut ramenée au primaire s'écrit:

$$\tilde{\underline{i}}_{\alpha\beta_{cc}} = \frac{2}{3} \frac{\eta_{cc}}{R_s} Q(\theta_{cc}) \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{\alpha\beta_m} \quad (2.16)$$

En négligeant les chutes de tension dues à R_s et L_f devant les tensions d'entrée $\underline{U}_{\alpha\beta_s}$, on peut approcher les tensions aux bornes du quadripôle de court-circuit par les tensions d'entrées statoriques [SCH 99]. Les courants de ligne sont alors la somme des courants dus au court circuit et à des courants consommés par le modèle classique de Concordia. Ainsi, il

devient possible d'exprimer simplement l'équation du bobinage en défaut dans le repère statorique [BAC 02]:

$$\tilde{i}_{\alpha\beta_{cc}} = \frac{2}{3} \frac{\eta_{cc}}{R_s} Q(\theta_{cc}) U_{\alpha\beta_s} \quad (2.17)$$

La figure (2.3) représente le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone en régime dynamique à fuites totalisées au stator, tenant compte du défaut de court-circuit [BAC 02].

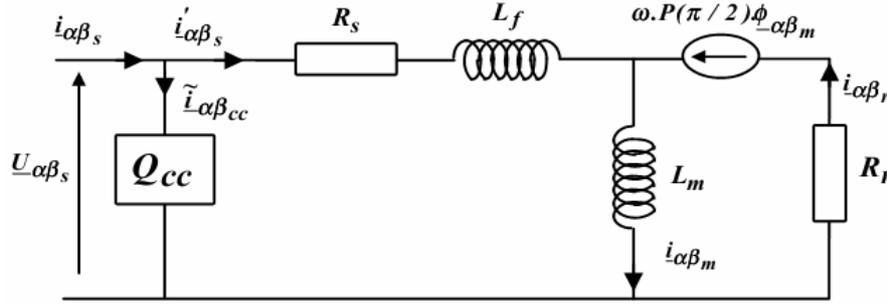


Figure 2.3: Premier modèle de court-circuit dans le repère lié au stator de la machine asynchrone [BAC 02]

II.2.4 Modélisation dans le repère de Park lié au rotor

Le passage des coordonnées (α, β) aux nouvelles coordonnées (d, q) de Park (repère lié au rotor) se fait en appliquant la transformation suivante:

$$\underline{x}_{dq} = P(-\theta) \underline{x}_{\alpha\beta}$$

Les équations électriques de la machine en présence du défaut de court-circuit statorique dans le repère de Park lié au rotor peuvent être écrites:

$$\begin{cases} \underline{U}_{dq_s} = R_s \underline{i}'_{dq_s} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_s} + \omega P(\frac{\pi}{2}) \underline{\phi}_{dq_s} \\ 0 = R_r \underline{i}_{dq_r} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_r} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} \underline{\phi}_{dq_s} = (L_f + L_m) \underline{i}'_{dq_s} + L_m \underline{i}_{dq_r} \\ \underline{\phi}_{dq_r} = L_m (\underline{i}'_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r}) \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\begin{cases} \underline{i}_{dq_s} = \underline{i}'_{dq_s} + \underline{i}_{dq_{cc}} \\ \underline{i}_{dq_{cc}} = \frac{2}{3} \frac{\eta_{cc}}{R_s} P(-\theta) Q(\theta_{cc}) P(-\theta) \underline{U}_{dq_s} \end{cases} \quad (2.20)$$

Le mode différentiel est modélisé par le quadripôle Q_{cc} qui étant indépendant de la dynamique du mode commun. Il serait judicieux de généraliser le modèle de défaut pour tenir compte des défauts simultanés sur plusieurs phases en dédiant à chaque phase un quadripôle de court-circuit [BAC 01b]. Comme les trois phases sont référées par les angles $0, 2\pi/3$ et

$4\pi/3$, il suffit donc de définir trois bobinages de court-circuit dont les rapports sont respectivement η_{cc_1}, η_{cc_2} et η_{cc_3} correspondant aux phases (a_s, b_s, et c_s) du stator [BAC 02a]. Ce qui revient donc à mettre en parallèle trois quadripôles Q_{cc_k} prenant en charge l'explication d'éventuels bobinages en défaut. Chaque quadripôle sera donc parcouru par un courant $i_{dq_{cc_k}}$ dont l'expression est:

$$i_{dq_{cc_k}} = \frac{2}{3} \frac{\eta_{cc_k}}{R_s} P(-\theta) Q(\theta_{cc_k}) P(\theta) \underline{U}_{dqs} \quad (2.21)$$

avec :

$Q(\theta_{cc_k})$: Matrice situant l'angle du bobinage en court-circuit.

La figure (2.4) représente le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone dans le repère de Park avec fuites totalisées au stator tenant compte d'un éventuel défaut de court-circuit sur une des trois phases [BEN 09].

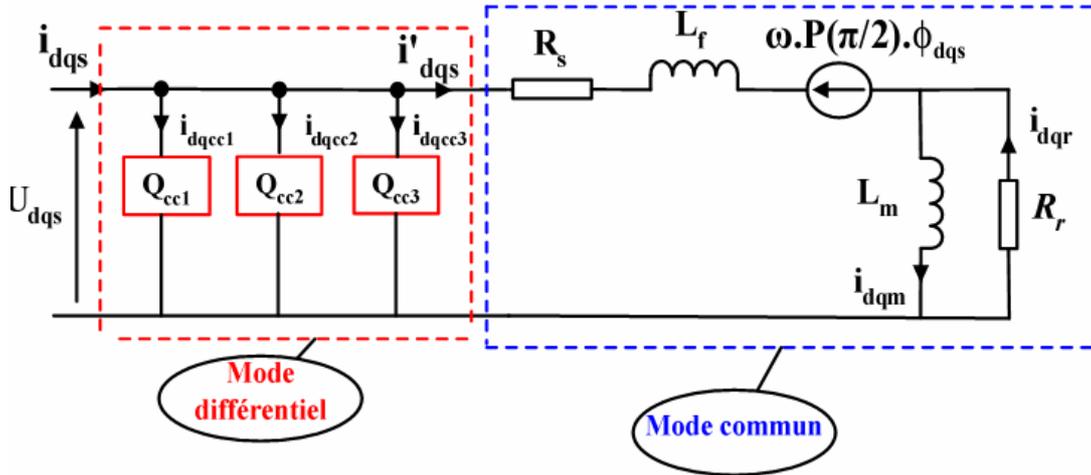


Figure 2.4: Modèle général de court-circuit dans le repère de Park lié au rotor de la machine asynchrone

II.3 Représentation sous forme d'état du modèle du défaut de court circuit de la machine asynchrone

Le modèle d'état de la machine asynchrone tenant compte du défaut de court-circuit s'obtient en associant le vecteur d'état formé des courants statorique et des flux rotorique avec une entrée et sortie constituée respectivement par des tensions et des courants statorique d'axe d et q . Le modèle d'état de la machine asynchrone peut être donc défini par le système d'équations non linéaires suivant [BEN 09]:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(\omega)X(t) + Bu(t) \\ Y(t) = CX(t) + Du(t) \end{cases} \quad (2.22)$$

avec :

$$X = [i'_{ds} \quad i'_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr}] u = [U_{ds} \quad U_{qs}] \text{ et } Y = [i_{ds} \quad i_{qs}]^T$$

et

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_r}{L_f} & \omega & \frac{R_r}{L_m L_f} & \frac{\omega}{L_f} \\ \omega & -\frac{R_s + R_r}{L_f} & -\frac{\omega}{L_f} & \frac{R_r}{L_m L_f} \\ R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} & 0 \\ 0 & R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \sum_{k=1}^3 \frac{2}{3} \frac{\eta_{cc_k}}{R_s} P(-\theta) Q(\theta_{cc_k}) P(\theta)$$

En ajoutant au système (2.22), l'équation mécanique, nous obtenons le modèle complet de la machine en présence du défaut de court-circuit dans le repère de Park liée au rotor.

L'équation mécanique est donnée par:

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_r - f_v \Omega_m \quad (2.23)$$

avec:

J : moment d'inertie du rotor,

f_v : Coefficient de frottement visqueux,

C_r : couple de charge.

L'expression du couple électromagnétique dans le repère de Park avec fuites ramenées au stator est donné par:

$$C_{em} = p (i_{qs} \phi_{dr} - i_{ds} \phi_{qr}) \quad (2.24)$$

Le modèle de la machine dans le repère de Park est donc non linéaire à cause de la présence de la vitesse dans les équations électriques du système d'état.

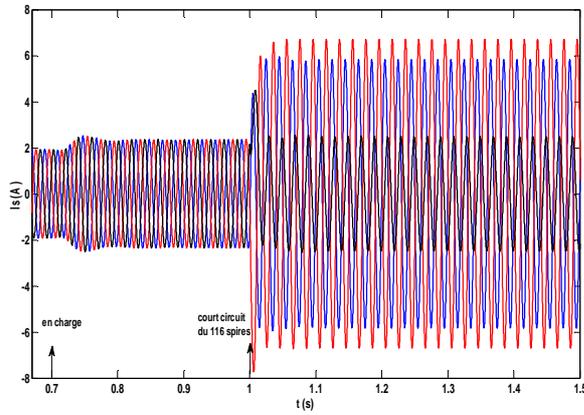
II.4 Résultat de la Simulation

Une fois le modèle de la machine est établi. On peut aborder l'aspect lié à la simulation sous l'environnement Matlab/Simulink, ce qui offre la possibilité d'observer le comportement du moteur sous différents états défectueux: court-circuit entre spires au stator et déséquilibre de l'alimentation de la machine.

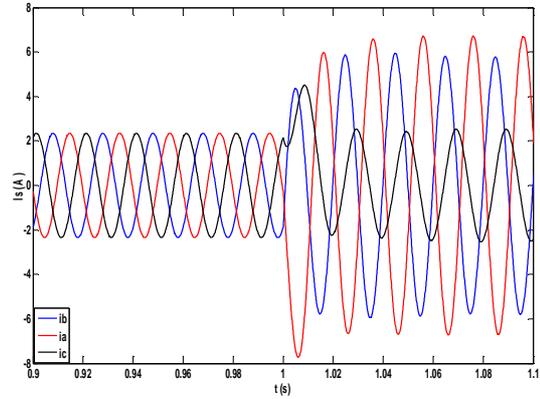
Les paramètres de la machine utilisée en simulation sont donnés à l'annexe.

• *Cas d'un défaut court-circuit entre spire*

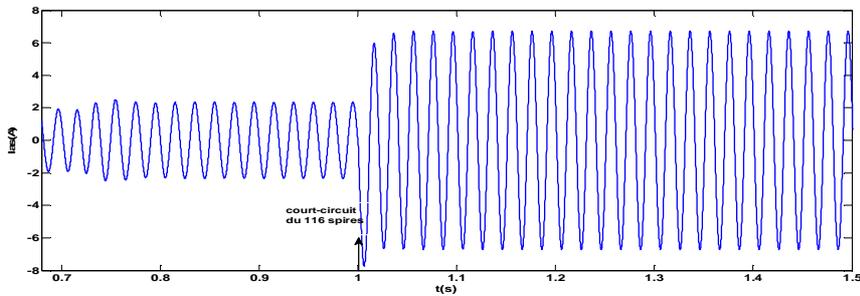
La simulation du modèle d'état de la machine asynchrone tenant compte du défaut de court circuit entre spires se fait dans le référentiel de Park lié au rotor et que l'alimentation se fait directement à travers le réseau et à charge moyenne.



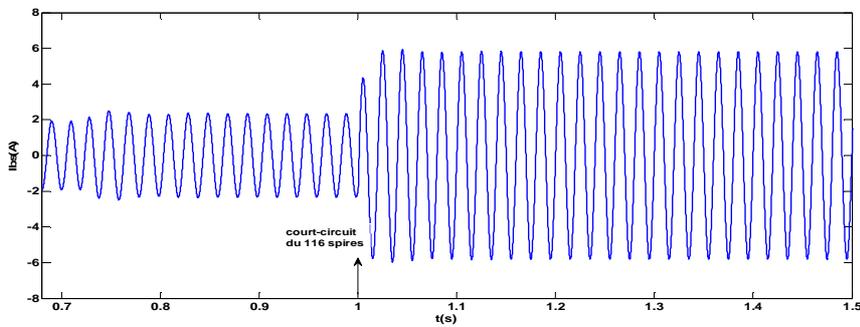
(a) : Courants statorique



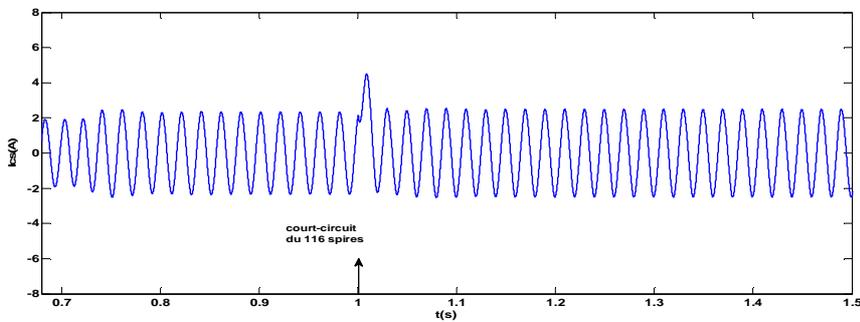
(b) : Zoom des courants statorique



(c) : Courant statorique de la phase 'a'.



(d) : Courant statorique de la phase 'b'.



(e) : Courant statorique de la phase 'c'.

Figure 2.5 : Courants statorique pour un défaut statorique de 25% de spires court-circuitées sur la phase a_s

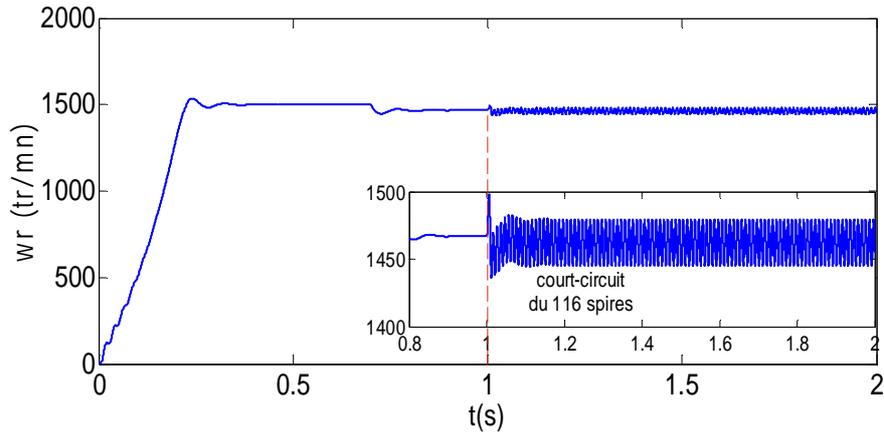


Figure 2.6 : Vitesse de la machine pour un défaut de 25 % des spires court-circuitées sur la phase a_s

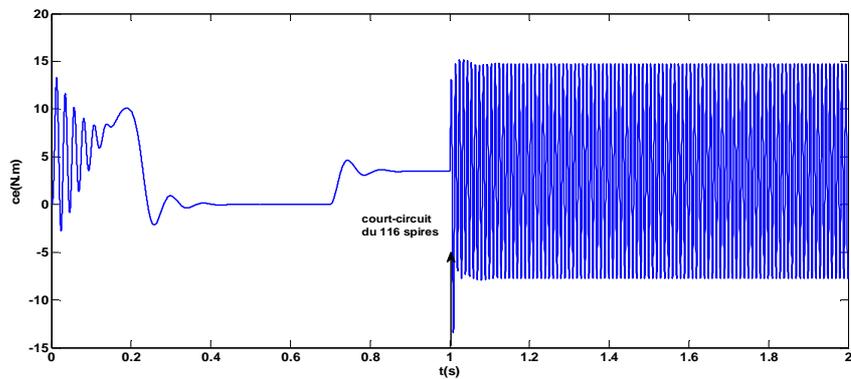


Figure 2.7 : Couple électromagnétique de la machine avec un défaut de court circuit de 25 % de spires

La figure (2.5) représente les trois courants statorique pour un défaut de court circuit de 116 spires (soit de 25 %) à l'instant $t=1s$ dans la phase a_s . Un déséquilibre se manifeste sous forme d'une augmentation importante au niveau du courant de la phase où s'est produit le défaut et d'une augmentation moins importante pour les deux autres phases (figures 2.5a, 2.5c, 2.5d et 2.5e). Cette augmentation se produit suivant une permutation circulaire directe. En plus du déséquilibre du courant, on remarque aussi un déséquilibre au niveau des déphasages illustrés sur la figure 2.5b qui n'est plus égal à 120° comme en fonctionnement sain. Le défaut de court circuit des spires dans la phase a_s affecte aussi la vitesse de rotation figure 2.6 et le couple électromagnétique figure 2.7 où ils apparaissent des oscillations qui sont importantes au niveau du couple provoqué par le déséquilibre du courant statorique.

- *Cas d'une machine asynchrone saine et une alimentation déséquilibrée*

Dans ce cas on considère que la machine est saine, un défaut de déséquilibre de 4% de la tension d'alimentation est réalisé.

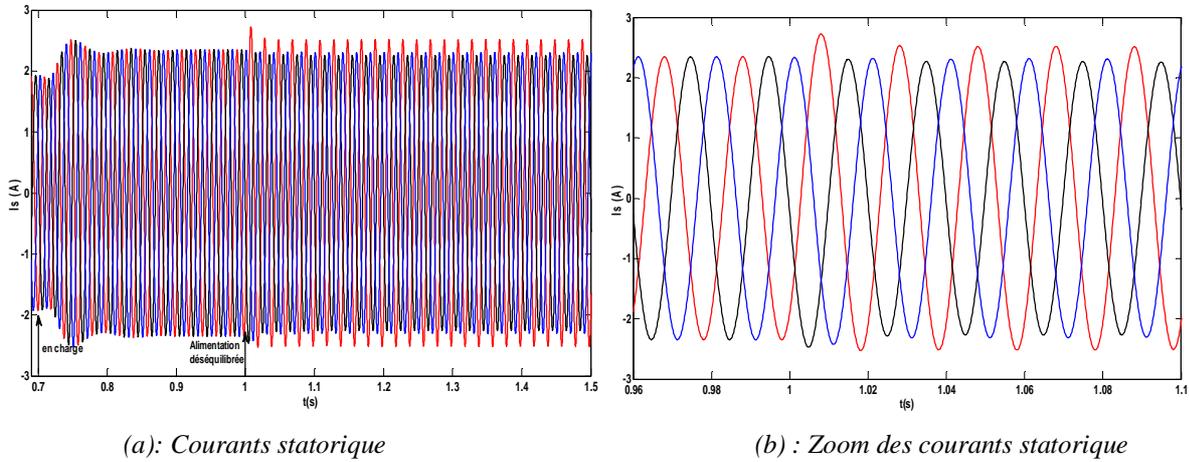


Figure 2.8 : Courants statorique pour un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de la phase a_s

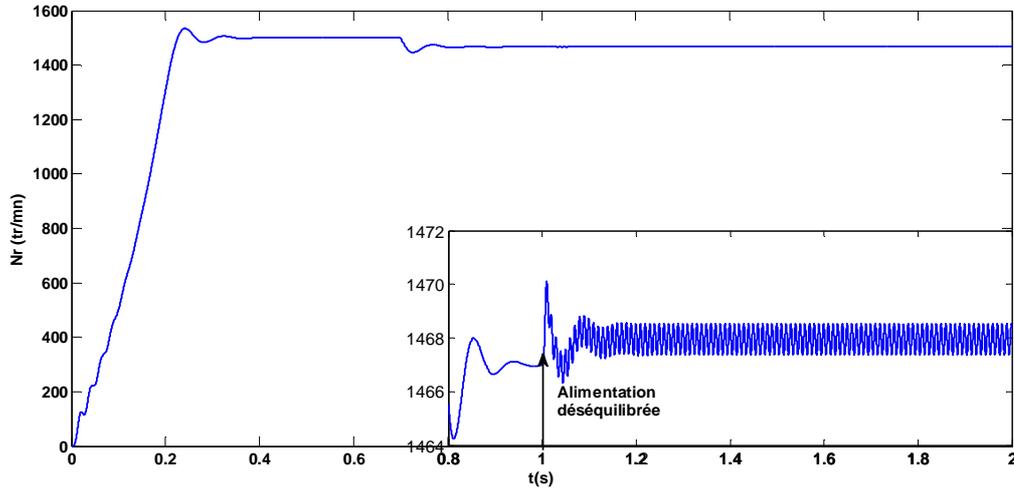


Figure 2.9 : Vitesse de la machine pour un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de la phase a_s

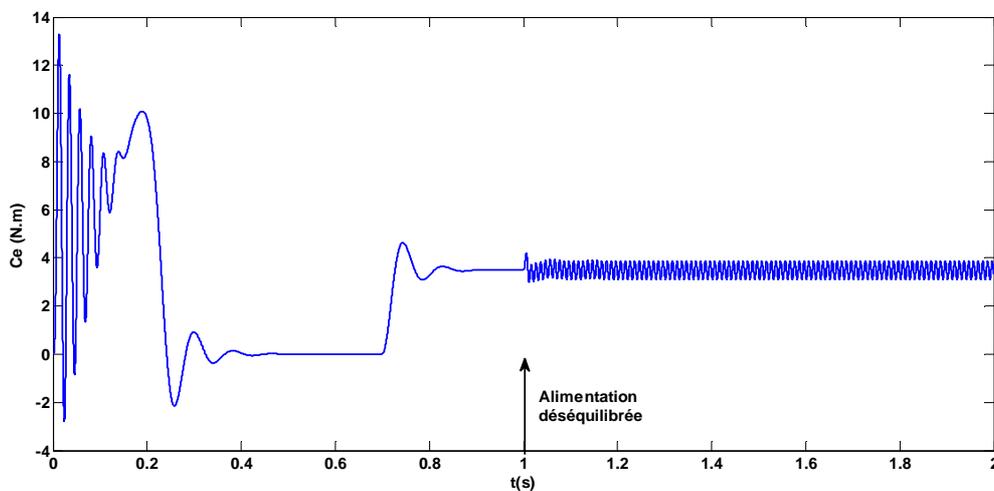


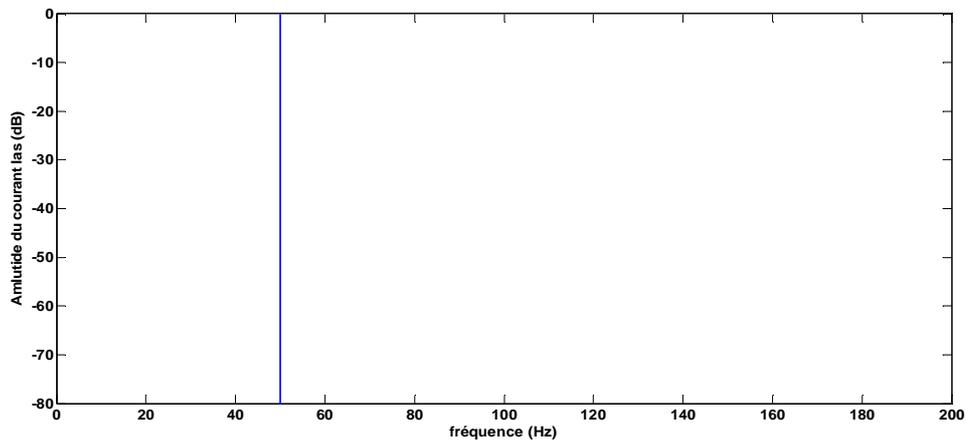
Figure 2.10: Couple électromagnétique pour un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de la phase a_s

La figure (2.8) représente les trois courants statorique pour un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de la phase a_s à l'instant $t=1s$. Un déséquilibre se manifeste sous forme d'une augmentation un peu que le défaut court-circuit au niveau du courant de la phase où s'est produit le déséquilibre de tension et les deux autres restent équilibrés. On remarque aussi les déphasages entre les courants reste inchangé (figure 2.8.a), contrairement au défaut provoqué par le court circuit des spires.

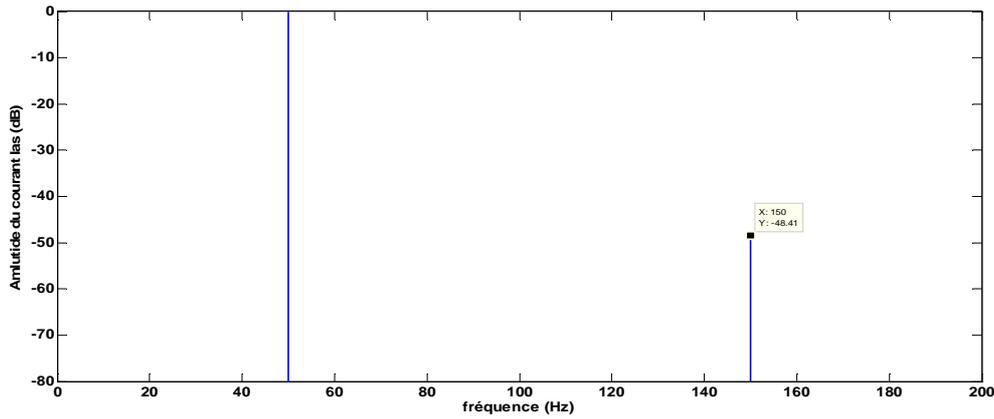
Le déséquilibre de tension dans la phase a_s affecte également la vitesse de rotation figure 2.9 ainsi que le couple électromagnétique figure 2.10 par l'apparitions des pulsations et des vibrations qui sont importantes au niveau du couple provoqué par le déséquilibre du courant statorique, ce qui provoque l'augmentation de la température de fonctionnement de la machine, ce qui affecte l'efficacité énergétique et réduit la durée de vie de l'isolation des enroulements de la machine.

II.5 Analyse spectrale du courant statorique par FFT

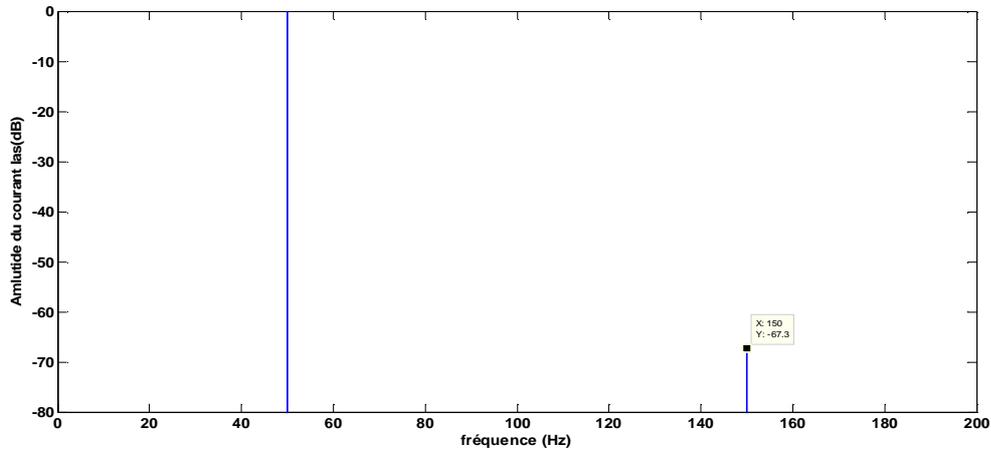
L'analyse spectrale (FFT) du courant statorique se réalise avec un fenêtrage de type Hanning, la période d'échantillonnage est de 10^{-4} pour le cas d'une machine saine et avec défaut de court circuit entre spires au stator et d'un déséquilibre sur les tensions d'alimentation avec charge moyenne 3.5N.m (figure 2.11).



(a): Spectre du courant de la phase a_s : Cas de la machine saine



(b): Spectre du courant de la phase a_s pour une machine en défaut court-circuit entre spires (25%)



(c): Spectre du courant de la phase a_s pour un déséquilibre de 4% de la tension de la phase a_s

Figure 2.11 : FFT des courants statorique à l'état : (a) : sain ; (b) : avec défaut de 25% spires court-circuitées à la phase a_s , et (c) : avec une machine alimenté par une tension déséquilibrée (déséquilibre 4% de tension de la phase a_s)

La figure (2.11) représente les spectres du courant i_{as} pour une machine à charge moyenne à l'état saine et en défaut de types court-circuit entre spire et déséquilibre sur la tension d'alimentation.

À l'état sain, on n'observe aucune raie latérale autour de la fondamentale 50 Hz (Figure 2.11a).

Durant le défaut de court-circuit entre spires à la phase a_s (Figures 2.11b), on remarque une seule nouvelle composante de fréquence visible dans les spectres au voisinage du fondamentale à 150 Hz [JOK 00], [GHO 05].

Lors d'un déséquilibre de la tension d'alimentation de la phase a_s (figure 2.11c), on remarque aussi une seule composante de fréquence voisine au fondamental correspondant à 150 Hz. La différence entre les deux derniers résultats (2.11b et 2.11c) juste sur l'amplitude des spectres qui correspond la fréquence 150Hz, comme indiqués sur le tableau suivant:

g=2.50%	Amplitude (dB)	
	Etat de court-circuit entre spires	Etat d'alimentation déséquilibrée
Fréquence		
150Hz	-48.41	-67.3

Tableau 2.1: Amplitude des spectres qui correspond la fréquence 150Hz à l'état de court-circuit entre spires et l'état d'alimentation déséquilibrée.

La composante 150 Hz dans le cas d'un court-circuit entre spire peut être considéré comme un résultat de l'asymétrie dans l'enroulement statorique qui fait apparaître du courant la fréquence située à 150Hz [JOK 00].

Les signatures du défaut de court-circuit entre spires ressemblent à des signatures d'un déséquilibre sur la tension d'alimentation et l'asymétrie dans l'enroulement statorique rend le pronostic de défaut par l'analyse par FFT (problème de similitude) un peu délicat. L'utilisation d'autres techniques de diagnostic paraît nécessaire pour remédier à ce problème.

II.6 Analyse du courant statorique par la technique des ondelettes

La transformée en Ondelette (Wavelet) est une technique avancée, utilisée pour améliorer l'analyse du signal du courant statorique et de permettre la détection d'une manière précoce les défauts d'une machine asynchrone en régime stationnaire et variable.

Dans ce partie en applique la transformée en ondelettes discret (TOD) aux signaux du courant statorique. L'extraction des informations des signaux nécessite des choix judicieux pour certains paramètres tels que, la fréquence d'échantillonnage des signaux expérimentaux, le type de l'ondelette, l'ordre de l'ondelette et le niveau de décomposition. Le choix de l'ondelette mère type "Daubechies" en raison que la fonction d'échelle réduit au minimum le recouvrement entre les bandes de fréquence qui ne peuvent pas être évitées. En fait, le recouvrement n'affecte pas l'exécution de diagnostic dans une vraie application mais il aide à améliorer l'analyse de l'approximation et des détails.

Deux types d'ondelettes discrets sont utilisées: décomposition multi niveaux et décomposition par paquet d'ondelettes.

II.6.1 Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelette

La décomposition en multi niveau du courant statorique est réalisée à l'aide de l'ondelette mère Daubechies44 (db44), le niveau de décomposition nécessaire est calculée d'après la relation:

$$N_{ls} = \text{int} \left(\frac{\log \left(\frac{f_e}{f_s} \right)}{\log(2)} \right) + 2 \quad (2.26)$$

Avec f_s : fréquence du réseau, f_e : fréquence d'échantillonnage.

Connaissant $f_s=50\text{Hz}$ et $f_e=10\text{kHz}$, on peut calculer le nombre de décompositions appropriés qu'est égales à :

$$N_{ls} = \text{int} \left(\frac{\log \left(\frac{10^4}{50} \right)}{\log(2)} \right) + 2 = 9 \text{ niveaux}$$

Le tableau (2.2) indique les différentes bandes de fréquence obtenues par la décomposition en ondelettes multi niveau.

Niveau	Bandes de fréquences Approximation		Bandes de fréquences Détail	
J=1	A1	0-5000	D1	5000-10000
J=2	A2	0-2500	D2	2500-5000
J=3	A3	0-1250	D3	1250-2500
J=4	A4	0-625	D4	625-1250
J=5	A5	0-312.5	D5	312.5-625
J=6	A6	0-156.25	D6	156.25-312.5
J=7	A7	0-78.125	D7	78.125-156.25
J=8	A8	0-39.0625	D8	39.0625-78.125
J=9	A9	0-19.531	D9	19.531-39.0625

Tableau 2.2 : *Bandes de fréquences obtenues par la décomposition en multi niveau*

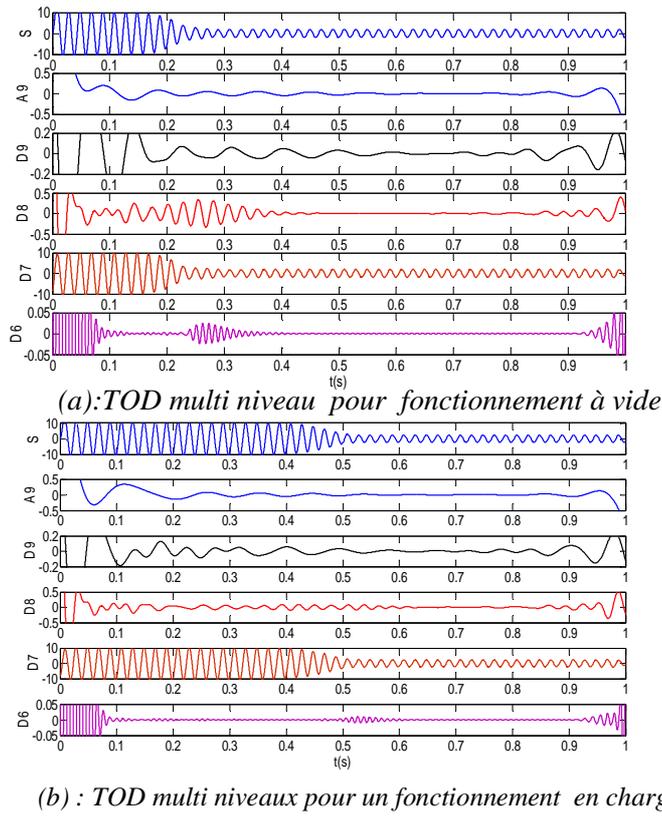


Figure 2.12: Analyse par TOD type multi niveau de la phase ias en fonctionnement sain : à vide et en charge

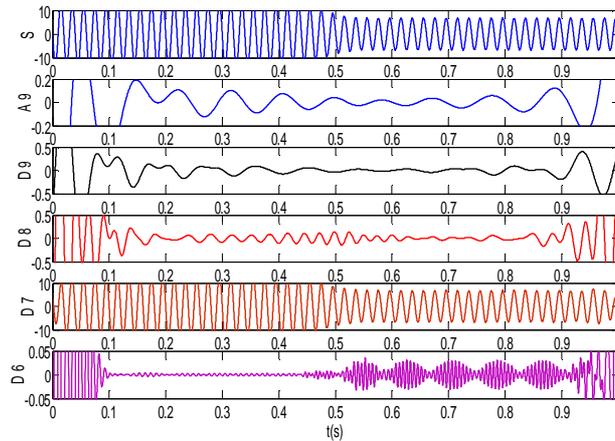


Figure 2.13 : Analyse par TOD type multi niveau de la phase ias avec défaut court-circuit entre spires 25%

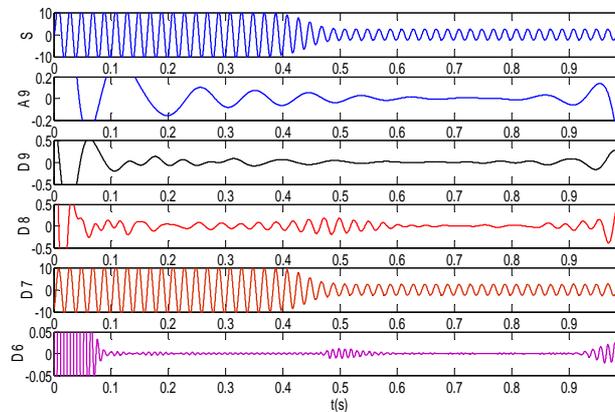


Figure 2.14 : Analyse par TOD pour une machine à alimentation déséquilibrée (déséquilibre de 4% sur la tension de la phase a_s)

Les figures (2.12, 2.13 et 2.14) représentent respectivement les résultats d'analyse du courant statorique de la phase a_s par l'ondelette type décomposition multi niveau. Pour des fonctionnements sain (à vide et en charge) et avec des défauts de types court-circuit entre spires (25%) et du déséquilibre d'alimentation sur une tension de la phase a_s . Dans tous les cas considéré, l'ondelette est utilisée en régime variable où la machine est considéré à l'état initial avec défaut et démarre en charge.

La comparaison des signaux de détail et d'approximation pour une machine avec défauts (court-circuit entre spires et déséquilibre d'alimentation) montre que l'amplitude des coefficients D6, D7, D8, D9 et A9 est augmentée par rapport à celui dans le cas de à la machine saine, cette augmentation dans les signaux D6, D7, D8, D9 et A9 est due à l'effet que les bandes de fréquence correspondantes sont affectées par les différents types de défauts. Ainsi, on remarque qu'il y a des différences plus claires entre le cas de court-circuit et le déséquilibre d'alimentation contrairement à l'analyse par FFT.

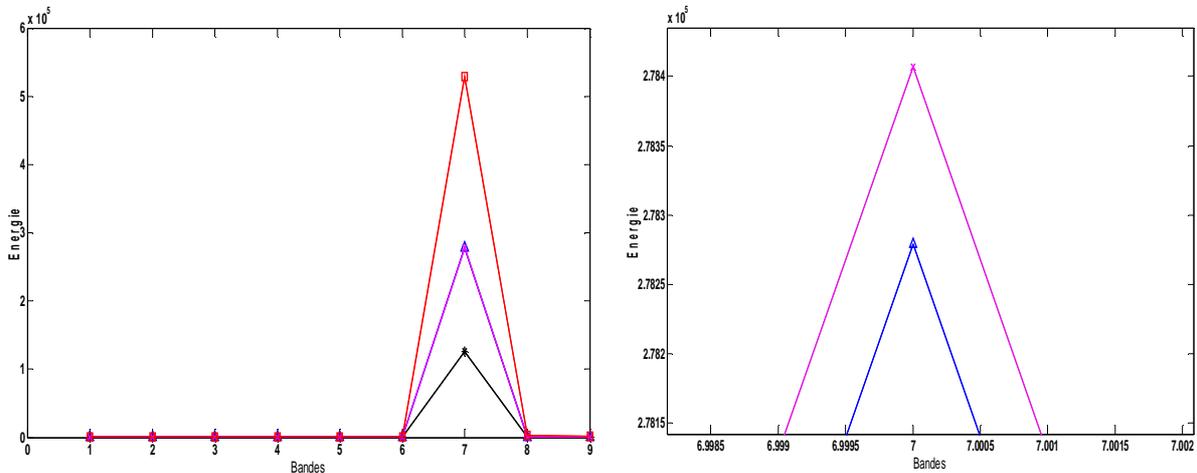


Figure 2.15 : Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db44)

*: Machine saine à vide, Δ : Machine saine en charge, \times : machine saine alimentée par une tension déséquilibrée de 4% de la tension de la phase a_s , \square : Machine avec défaut de court-circuit entre spires 25% sur la phase a_s

La figure (2.15) montre la variation de l'énergie dans les bandes de fréquence de décomposition de l'ondelette multi niveau pour le cas d'une machine saine à vide et en charge et avec défauts: court-circuit entre spires (25% sur la phase a_s) et déséquilibre d'alimentation (déséquilibre de 4% sur la tension de la phase a_s).

Le calcul de l'énergie emmagasinée dans chaque niveau de décomposition confirme l'augmentation observée dans les signaux de détail et d'approximation surtout dans le niveau7 qui correspond à la bande située au voisinage et au dessous du fondamental. On voit clairement l'effet du défaut de court-circuit entre spires et du déséquilibre d'alimentation sur l'énergie emmagasinée dans le niveau7, cette augmentation diffère selon le type du défaut, soit le défaut de court-circuit entre spires ou le déséquilibre d'alimentation. L'augmentation de l'énergie est considérable pour le défaut du court-circuit entre spires que pour le

déséquilibre d'alimentation. Ainsi, on remarque aussi que l'énergie dans le cas de la machine saine et en charge est plus proche du cas de déséquilibre d'alimentation.

II.6.2 Analyse du courant statorique par la décomposition en paquet d'ondelettes

La décomposition en paquet d'ondelettes présente une analyse multi résolutionnelle très fine du signal original. Les tableaux 2.3 et 2.4 indiquent les bandes de fréquences en Hertz correspondantes à la décomposition en paquet d'ondelettes à ondelette mère db44 du courant statorique en 9 niveaux

0-10000					
0-5000				5000-10000	
0-2500		2500-5000			
0-1250	1250-2500	2500-3750	3750-5000		
0-625	625-1250	1250-1875	1875-2500		
0-312.5	312.5-625				

Tableau 2.3: Bandes de fréquences résultantes de la décomposition en paquet d'ondelettes.

Dans la machine asynchrone à cage fonctionnant sous réseau de 50 Hz, la zone significative de fréquence se trouve au dessous de 400Hz et d'après le tableau 2.3 on s'intéresse seulement à la bande de fréquence (0-312.5Hz).

0-312.5					
0-156.25			156.25-312.5		
0-78.125	78.125-156.25		156.25-234.37		234.37-312.5
0-39.0625	39.0625-78.125	78.125-117.18	117.18-156.25	156.25-195.31	195.31-234.37
					234.37-273.4
					273.4-312.5
0-19.531	19.531-39.0625	39.0625-58.5	58.5-78.125	78.125-97.62	97.62-117.18
					117.18-136.68
					136.68-156.25
					156.25-175.75
					175.75-195.31
					195.31-214.81
					214.81-234.37
					234.37-253.87
					253.87-273.4
					273.4-292.87
					292.87-312.5

Tableau 2.4: Bandes de fréquences résultantes de la décomposition en paquet d'ondelettes dans la bande [0-312.5Hz].

La variation de l'énergie dans les bandes de fréquence pour les quartes cas est représentée sur la figure 2.16

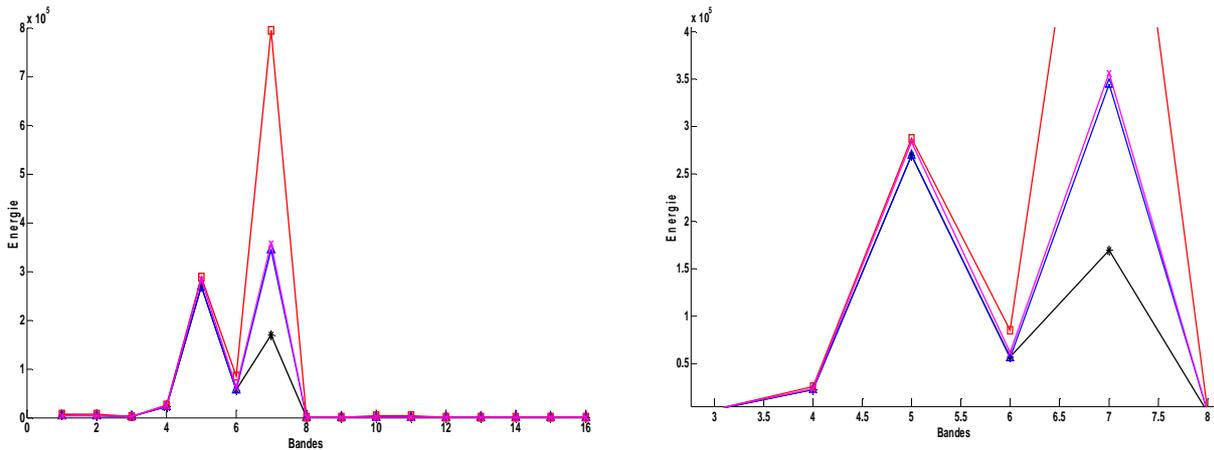


Figure 2.16: Variation de l'énergie dans les 16 bandes de fréquence au 9^{ème} niveau (db44)

*: Machine saine à vide, Δ : Machine saine en charge, \times : machine saine alimentée par une tension déséquilibrée de 4% sur la tension de la phase a_s , \square : Machine avec défaut de court-circuit entre spires 25% à la phase i_{as} .

D'après la figure 2.16, on remarque que l'énergie emmagasinée dans les 16 bandes de fréquence obtenues au 9^{ème} niveau de décomposition dans le cas d'un défaut de court-circuit entre spires statorique est supérieure à l'énergie en cas d'un déséquilibré de tension ou sain (à vide et en charge). L'énergie emmagasinée dans les 16 bande en cas d'un déséquilibre d'alimentation est plus proche au cas sain de la machine en charge. La transformée en paquet d'ondelettes représente alors un outil très efficace pour le diagnostic, cette efficacité est due à l'effet que la transformée en paquet d'ondelettes mène à une résolution très fine des signaux analysés.

II.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de la machine asynchrone à cage en vue du pronostic du défaut de court circuit entre spires au stator de la machine asynchrone. Un modèle simple, essentiellement sensible au changement d'état de la machine a été établi, ce qui a permis d'étudier et d'analyser l'effet du défaut de court circuit et du déséquilibre d'alimentation de la machine par le biais du spectre du courant statorique, en utilisant deux technique à base l'FFT et l'ondelette (TOD).

L'analyse par la transformée d'ondelettes constitue donc un outil très efficace pour la détection du défaut de court circuit entre spires.

Le modèle de défaut rotorique de type cassure ou rupture des barres ainsi son diagnostic par l'analyse spectrale et les techniques des ondelettes fera l'objet du troisième chapitre.

Chapitre III

Diagnostic du défaut rotorique de la machine asynchrone

Diagnostic du Défaut Rotorique de la Machine Asynchrone

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présentera au début le modèle de défaut rotorique de type rupture de barre de la machine asynchrone triphasé à cage d'écurueil dans le repère de Park en vue de réduire la complexité du modèle, ensuite on utilise en vue la détection de ce défaut deux méthodes de traitement du signal l'une à base de la FFT utilisée en régime permanent et la seconde à base de l'ondelette discrète (multi niveau et paquet d'ondelette) en régime transitoire et permanent.

III.2 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. [ABE99], [MAK97],[VAS94] proposent une modélisation multi mailles du rotor de la machine asynchrone à cage d'écurueil 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 [BAC 02].

Comme dans le cas de la modélisation des courts-circuits au stator, 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.

La figure (3.1) illustre la modélisation conventionnelle du rotor par dipôles élémentaires avec une barre cassée [ABE 99], [MAN 96].

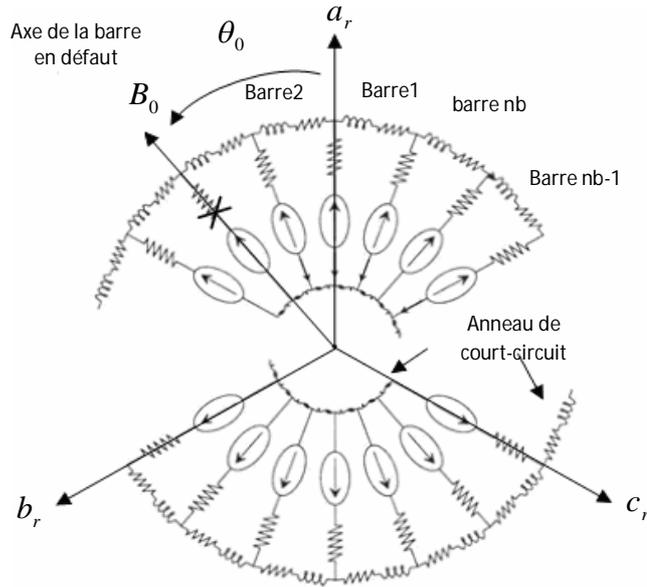


Figure 3.1: *Modèle par dipôles élémentaires du rotor en défaut [ABE 99]*

En effectuant le même raisonnement fait dans le cas de défaut au stator, 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.

➤ L'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.

➤ Le 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.

Le 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 η_{bc} barres cassées sur une phase, l'expression du rapport de défaut η_0 est donnée par [BEN 09]:

$$\eta_0 = \frac{3.n_{bc}}{n_b}.$$

III.3 Modélisation du défaut de rupture des barres

De même que les défauts statoriques, les équations de tension et de flux de la bobine en défaut B_0 exprimées dans le repère biphasé d'axe d et q lié au rotor sont les suivantes:

$$0 = \eta_0 i_0 + \frac{d\phi_0}{dt} \quad (3.1)$$

$$\phi_0 = \frac{2}{3} \eta_0^2 L_m i_0 + \sqrt{\frac{2}{3}} \eta_0 L_m [\cos(\theta_0) \quad \sin(\theta_0)] (i_{dq_s} + i_{dq_r}) \quad (3.2)$$

avec : $\eta_0 = \frac{\text{Nombre de spires fictives en défaut}}{\text{Nombre total de spires fictives sur une phase}}$
 θ_0 : angle repérant le défaut

Le courant i_0 dans le bobinage représentant le défaut est donc à l'origine du champ magnétique H_0 stationnaire par rapport au rotor et dirige selon l'axe θ_0 . Ce champ magnétique est à l'origine du flux ϕ_0 . En projetant i_0 et ϕ_0 sur les axes d et q de Park, on leur associe les vecteurs stationnaires [BAC 02]:

$$\underline{i}_{dq_0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) \\ \sin(\theta_0) \end{bmatrix} i_0, \quad \underline{\phi}_{dq_0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) \\ \sin(\theta_0) \end{bmatrix} \phi_0 \quad (3.3)$$

Donc, l'ensemble des équations de la machine au stator, au rotor et au bobinage B_0 dans le repère rotorique est donne par:

$$\begin{cases} \underline{U}_{dq_s} = R_s \underline{i}_{dq_s} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_s} + P \omega \left(\frac{\pi}{2}\right) \underline{\phi}_{dq_s} \\ \underline{0} = R_r \underline{i}_{dq_r} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_r} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} \underline{\phi}_{dq_s} = L_f \underline{i}_{dq_s} + L_m (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \eta_0 \underline{i}_{dq_0}) \\ \underline{\phi}_{dq_r} = L_m (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r}) + \sqrt{\frac{2}{3}} \eta_0 L_m \underline{i}_{dq_0} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\begin{cases} 0 = \eta_0 R_r \underline{i}_{dq_0} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_0} \\ \underline{\phi}_{dq_0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \eta_0 L_m Q(\theta_0) (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \eta_0 \underline{i}_{dq_0}) \end{cases} \quad (3.6)$$

avec:

$$Q(\theta_0) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0)^2 & \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) \\ \cos(\theta_0) \sin(\theta_0) & \sin(\theta_0)^2 \end{bmatrix}$$

Par analogie avec le schéma équivalent du transformateur ramène au primaire, les équations de flux de la machine asynchrone en défaut rotorique deviennent:

$$\begin{cases} \underline{\phi}_{dq_s} = \underline{\phi}_{dqf} + \underline{\phi}_{dqm} = L_f \underline{i}_{dq_s} + L_m (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} - \tilde{\underline{i}}_{dq_0}) \\ \underline{\phi}_{dq_r} = \underline{\phi}_{dqm} = L_m (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} - \tilde{\underline{i}}_{dq_0}) \\ \tilde{\underline{\phi}}_{dq_0} = \eta_0 Q(\theta_0) \underline{\phi}_{dqm} \end{cases} \quad (3.7)$$

avec :

$$\tilde{\underline{i}}_{dq_0} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \eta_0 \underline{i}_{dq_0}, \quad \tilde{\underline{\phi}}_{dq_0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \underline{\phi}_{dq_0}$$

De même, on peut écrire l'équation de tension du bobinage en défaut ramenée au primaire par:

$$\tilde{\underline{i}}_{dq_0} = \frac{2 \eta_0}{3 R_r} Q(\theta_0) \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dqm} = R_0^{-1} \frac{d \underline{\phi}_{dqm}}{dt} \quad (3.8)$$

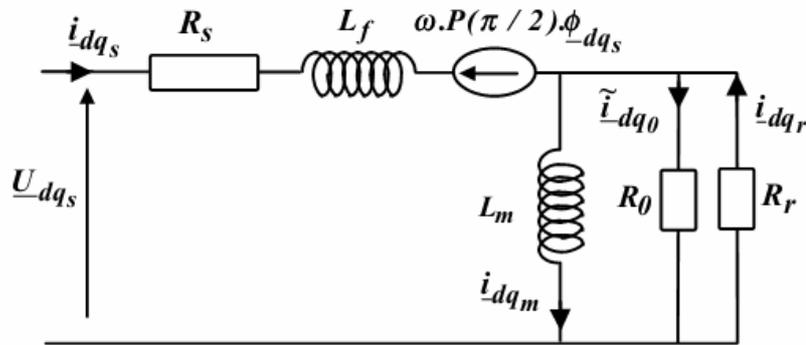


Figure 3.2 : Premier modèle de la machine avec défauts rotoriques [BAC 02].

La figure (3.2) représente le schéma équivalent de la machine asynchrone en défaut de rupture de barres dans le repère de Park lié au rotor.

III.3.1 Schéma équivalent

D'après l'équation (3.8), la bobine B_0 repères en tant le défaut se ramène à un simple quadripôle résistif mis en parallèle avec l'inductance magnétisante et la résistance rotorique. Dans le repère de Park, la mise en équation d'état d'un tel système reste complexe; il s'avère plus judicieux d'établir le schéma équivalent de la machine avec résistance rotorique et résistance de défaut totalisé au rotor. Ainsi, la résistance équivalente R_{eq} est la mise en parallèle de la résistance rotorique R_r , la résistance de défaut R_0 . L'expression de la matrice résistance équivalente au rotor est alors obtenue comme suit [BAC 02]:

$$\begin{aligned} R_{eq}^{-1} &= R_r^{-1} + R_0^{-1} \\ &= R_r^{-1} + \frac{2}{3}\eta_0 R_r^{-1} Q(\theta_0) \end{aligned} \quad (3.9)$$

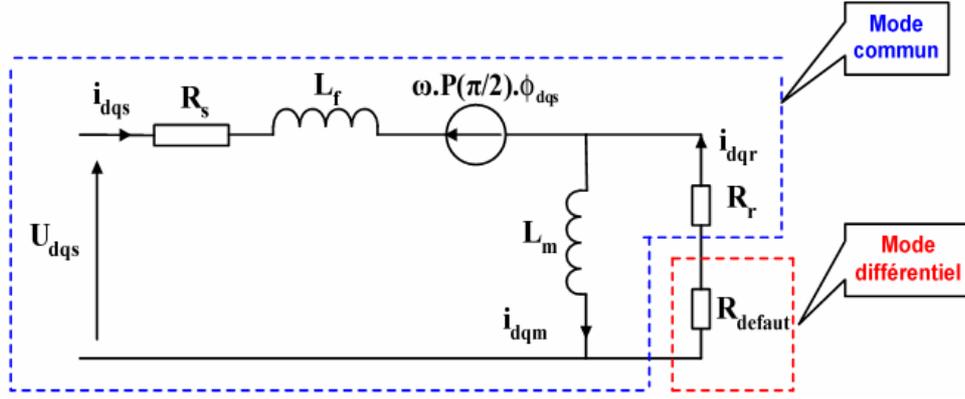
En inversant pour obtenir l'expression de la matrice résistance équivalente:

$$\begin{aligned} [R_{eq}] &= [R_r] + [R_{défaut}] \\ &= [R_r] - \frac{\alpha}{1-\alpha} Q(\theta_0) [R_r] \end{aligned} \quad (3.10)$$

avec :

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

La figure (3.3) représente le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone avec défaut rotorique, les fuites ramenées au stator. La rupture de barre au rotor est représentée par la résistance équivalente au rotor qui ce dernier est la mise en série de la résistance saine R_r et d'une matrice résistance de défaut $R_{défaut}$.



Figurer 3.3 : Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone.

III.4 Représentation d'état du modèle de défaut rotorique

On remarque à partir de la figure (3.3) 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:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(\omega)X(t) + Bu(t) \\ Y(t) = CX(t) + Du(t) \end{cases} \quad (3.10)$$

avec:

$$X = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr}]^T, u = [U_{ds} \quad U_{qs}]^T \text{ et } Y = [i_{ds} \quad i_{qs}]^T$$

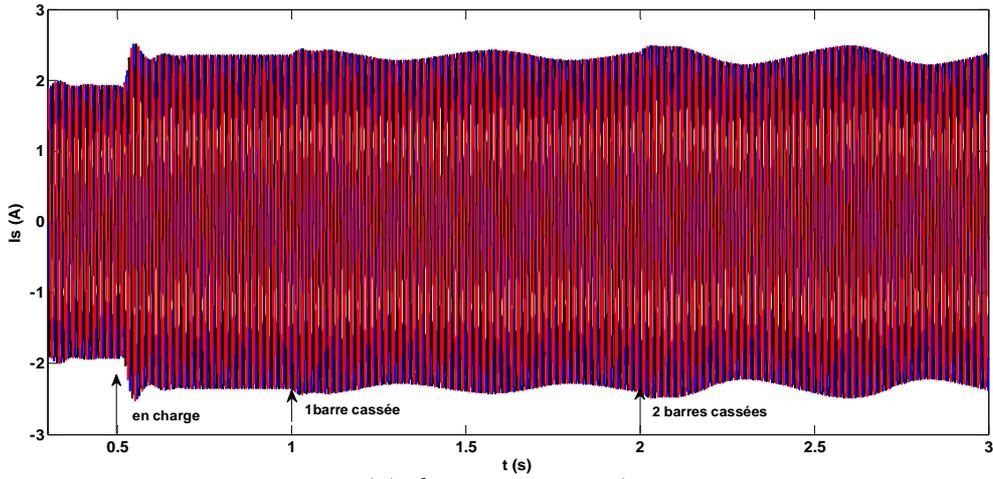
et

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -([R_s] + [R_s])L_f^{-1} - \omega P(\frac{\pi}{2}) & (([R_{eq}]L_m^{-1}) - \omega P(\frac{\pi}{2}))L_f^{-1} \\ [R_{eq}] & -[R_{eq}]L_m^{-1} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

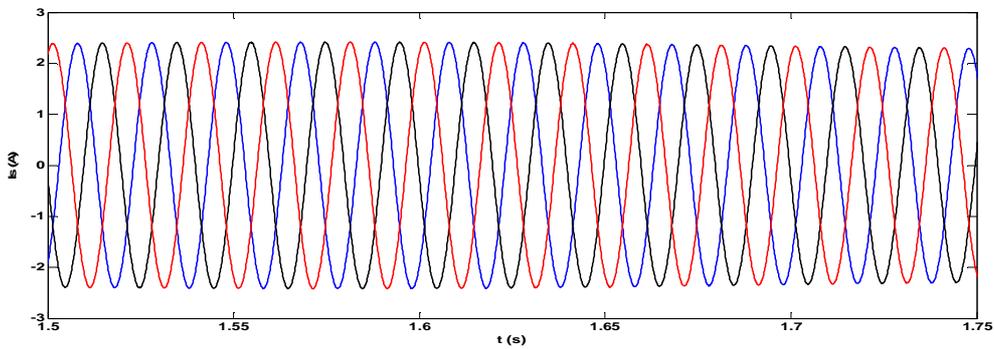
$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad [R_{eq}] = [R_r] \left(1 - \frac{\alpha}{1 + \alpha} Q(\theta_0) \right)$$

III.5 Résultat de la simulation

La simulation de la machine est effectuée au début en fonctionnement à vide, la charge de 3.5N.m est appliquée à t=0.5s, le défaut d'une barre est introduit à t=1s, le second défaut de barre est introduit à t=2s. Les résultats obtenues sont comme suit:

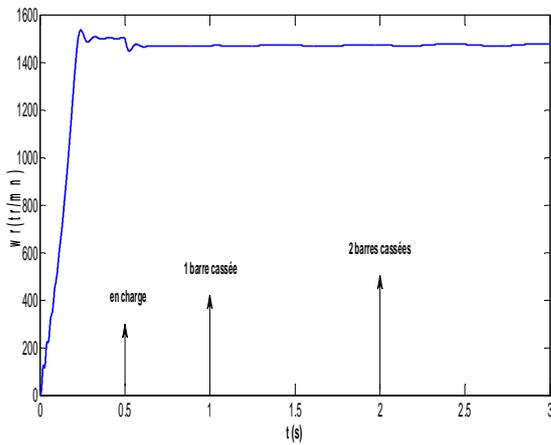


(a) : les courants statoriques

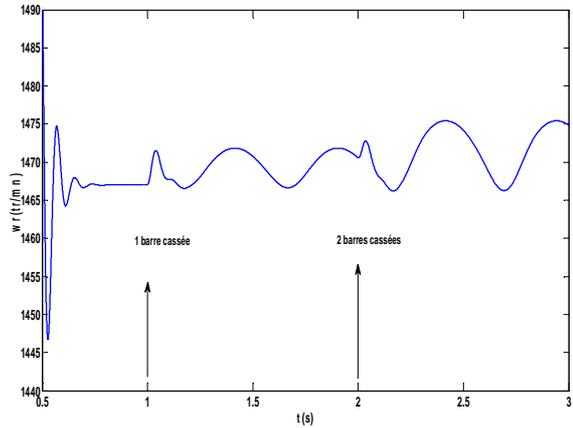


(b) : zoom de courants statoriques.

Figure 3.4: Courants statorique de la machine avec défaut de rupture de barres au rotor.

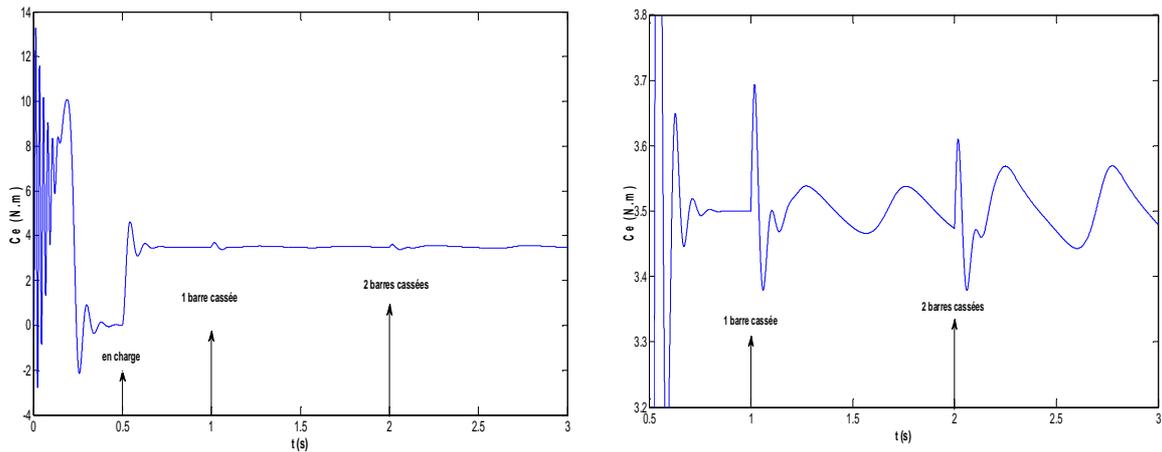


(a) : la vitesse de rotation au défaut rotorique.



(b) : Zoom de la vitesse de rotation

Figure 3.5: Vitesse de rotation de la machine avec défaut des barres cassées au rotor



(a :) Couple électromagnétique lors d'un défaut rotorique. (b): Zoom du couple électromagnétique

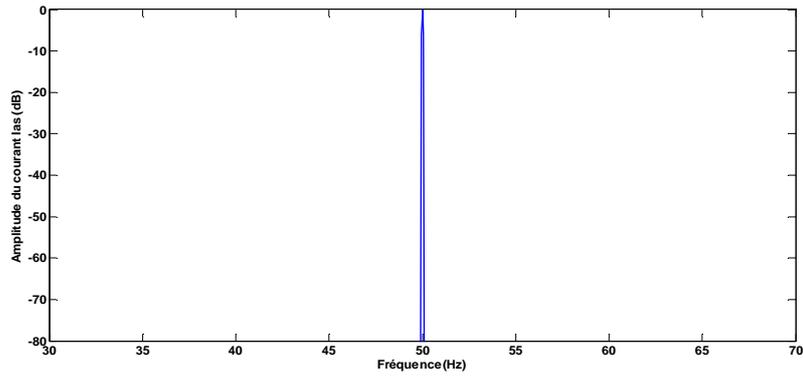
Figure 3.6: Couple électromagnétique de la machine avec défaut des barres cassées au rotor

D'après la figure (3.4a), on constate que lors d'un défaut de rupture de barres au rotor, il y a apparition d'ondulations identiques sur les trois courants statorique, l'amplitude de cette ondulation est proportionnelle au nombre de barres cassées dont on remarque que l'amplitude des oscillations augmente avec l'augmentation du nombre de barres cassées. On remarque aussi que les courants statorique restent toujours déphasés par 120° entre eux (figure 3.4b).

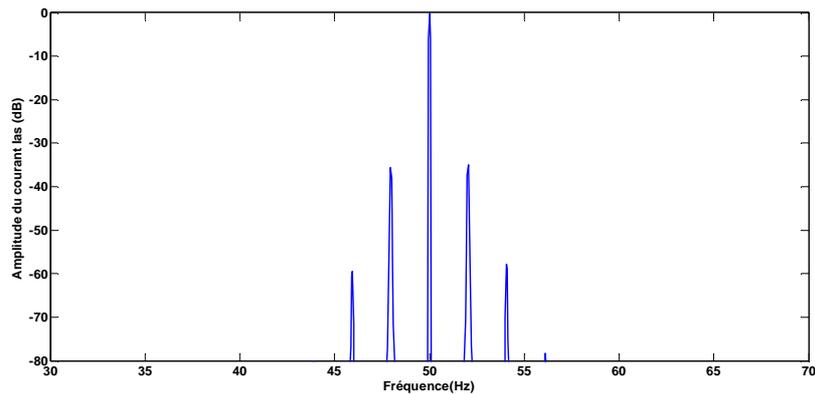
De même, le défaut rotorique fait apparaître des ondulations au niveau de la vitesse et du couple électromagnétique comme le montre respectivement la figure (3.5) et (3.6). Les ondulations du couple fait augmenter la vibration du moteur et accélèrent la détérioration de ce dernier.

III.6 Analyse du courant statorique par la FFT

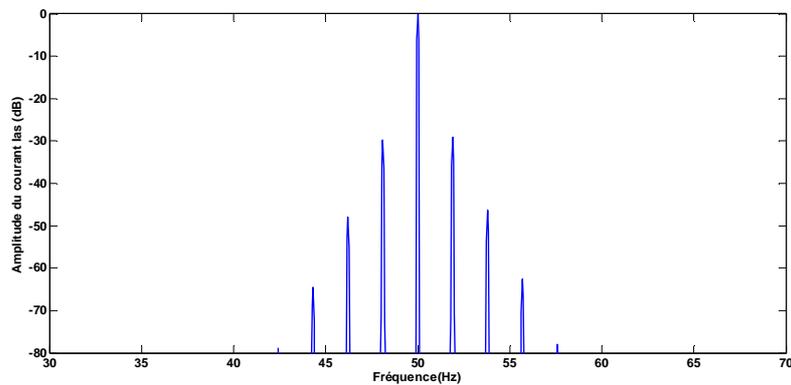
On considère que la machine est alimentée directement à travers un réseau triphasé avec une charge moyenne de 3.5N.m. L'analyse spectral par la FFT est effectuée sur le courant d'une phase statorique pour un rotor sain et avec défaut des barres cassées, avec un fenêtrage de type "Hanning", l'acquisition s'est effectuée à une période d'échantillonnage de 10^{-4} sur une durée totale de 20s. Ces résultats sont représentés sur la figure (3.7).



(a) : Machine saine



(b) : Machine avec une seule barre cassée



(c) : Machine avec deux barres cassées

Figure 3.7: Spectre du courant statorique pour une machine en régime sain et avec défaut rotorique.

En fonctionnement sain de la machine, on n'observe aucune raie latérale autour du fondamentale à 50 Hz (figure 3.7a), qui représente le contenu spectral du courant statorique en régime permanent. En fonctionnement avec défaut d'une et deux barres cassées (figures 3.7 b et 3.7c), il y a une apparition des raies latérales au voisinage du fondamentale correspondant aux raies de défaut. On constate l'apparition de raies en symétrie autour de la fréquence fondamentale. La différenciation entre une et deux barres cassées ne semble pas évidente même si l'amplitude des raies augmente avec celle du défaut.

La cassure d'une barre rotorique crée dans l'entrefer de la machine, un champ tournant inverse de fréquence gfs . L'interaction de ce champ tournant avec la vitesse rotorique crée une composante de fréquence $(1-2g)fs$ dans le spectre du courant statorique. La présence de cette harmonique dans le courant statorique induit une oscillation au niveau du couple électromagnétique de la machine de fréquence $2gfs$. Cette oscillation du couple crée inévitablement une oscillation de la vitesse rotorique à la même fréquence qui induit une nouvelle composante de fréquence $(1+2g)fs$ dans le spectre du courant statorique. Et par un processus identique, on obtient une série d'harmoniques de fréquences données par $(1\pm 2kg)fs$ avec $k = 1, 2, 3, \dots$

Dans les deux tableaux ci-dessous (tableau 3.1 et 3.2), on a résumé les fréquences des harmoniques induites dans les courants statoriques déduite et calculer suite à un défaut de barres (une et deux barres cassées). Ces fréquences f_s sont calculées de la formule $(1\pm 2kg)fs$ et déduites avec l'allure de FFT directement.

$g=2.04\%$ $f_s=50\text{Hz}$	$(1-4g)f_s$	$(1-2g)f_s$	$(1+2g)f_s$	$(1+4g)f_s$
$f_{calculer}$ (Hz)	45.93	47.96	52.4	54.07
$f_{déduite}$ (Hz)	45.95	47.95	52.05	54.05
Amplitude(dB)	-59.42	-35.66	-34.93	-57.87

Tableau 3.1: Fréquences calculées et déduites, en cas d'un défaut d'une seule barre cassée

$g=1.90\%$	$(1-6g)f_s$	$(1-4g)f_s$	$(1-2g)f_s$	$(1+2g)f_s$	$(1+4g)f_s$	$(1+6g)f_s$
$f_{calculer}$ (Hz)	44.31	46.20	48.10	51.89	53.79	55.69
$f_{déduite}$ (Hz)	44.32	46.21	48.11	51.89	53.79	55.68
Amplitude(dB)	-64.54	-47.89	-29.79	-29.1	-46.35	-62.49

Tableau 3.2: Fréquences calculées et déduites, en cas d'un défaut de deux barres cassées

Selon ces tableaux, on remarque que les fréquences $(1\pm 2.k.g).fs$ des raies latérales déduites des courbes de l'analyse spectrale correspondent aux valeurs théoriques (calculées) de ces fréquences. Ainsi, on constate que les raies de défaut de deux barres augmente plus que défaut à une seule barre cassées, ce dernier est plus illustré surtout à l'harmonique

$(1 \pm 6g)f_s$ que au défaut d'une seule barre est très petite qui on ne peut être vu, par contre au défaut de deux barres il est très claire.

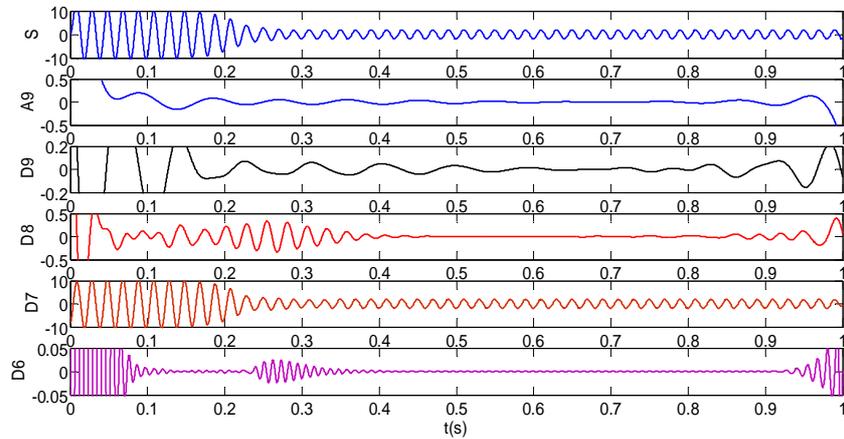
III.7 Analyse du courant statorique par la technique des ondelettes

En vu la détection du défaut rotorique (cassure de barre). L'analyse du courant statorique est effectuée par deux types d'ondelette discret à savoir la décomposition multi niveaux et la décomposition par paquet d'ondelettes.

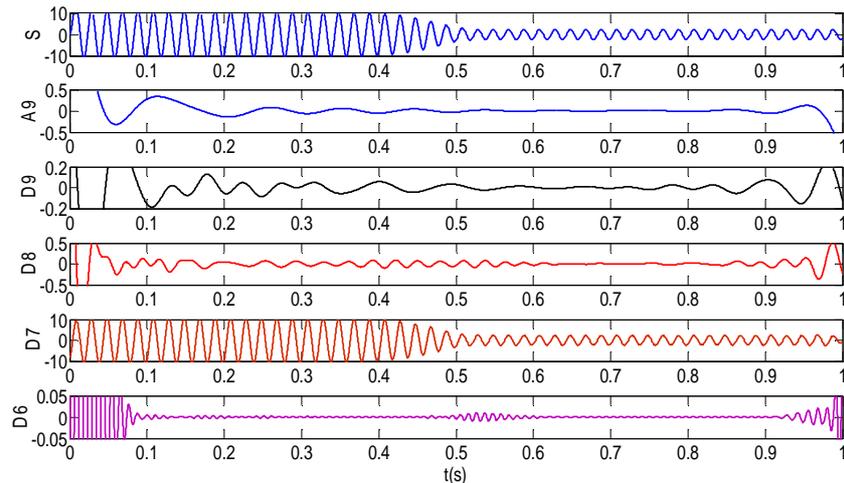
Les résultats obtenus sont effectués pour une période d'échantillonnage de 10^{-4} sur une durée totale de 1s.

II.7.1 Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelettes

Le choix de l'ondelette de type Daubechies 44 (db44) comme ondelette mère et la fréquence d'échantillonnage $f_e=10\text{KHz}$, donc le nombre des décompositions égale 9.



(a): TOD multi niveau à fonctionnement à vide



(b) : TOD multi niveau à fonctionnement en charge

Figure 3.8: TOD type multi niveau du courant de la phase ias en fonctionnement sain : à vide et en charge

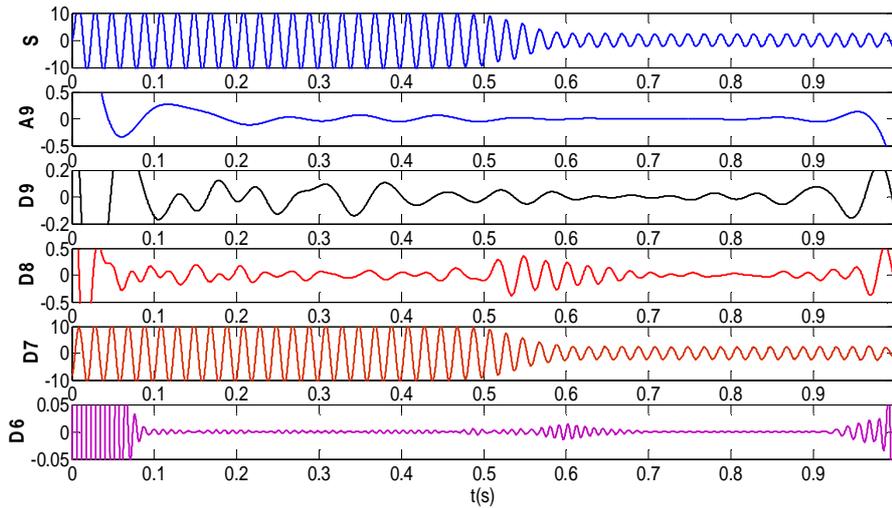


Figure 3.9: TOD type multi niveau du courant de la phase i_{as} avec défaut d'une barre cassée au rotor

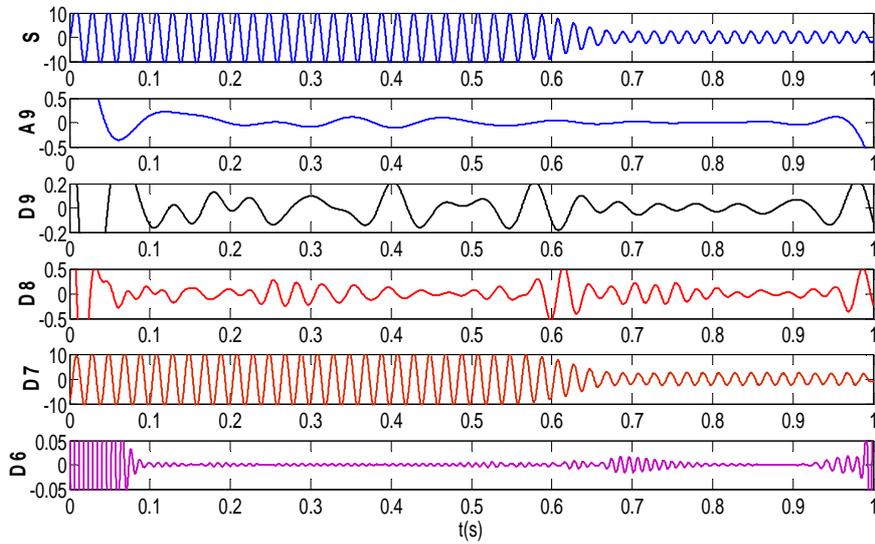


Figure 3.10: TOD type multi niveau du courant de la phase i_{as} avec défaut de deux barres cassées au rotor

Les figures (3.8), (3.9) et (3.10) représentent les signaux de détail et d'approximation (D9, D8, D7, D6 et A9) obtenus par la décomposition en multi niveau courant statorique i_{as} pour un fonctionnement sain (à vide et en charge) et avec défaut d'une seule et deux barres cassées au rotor. Dans tous les cas, l'application de l'ondelette s'effectue en régime variable dont on considère que la machine présente un défaut à l'état initial et démarre en charge

On compare les signaux de détail et d'approximation obtenus pour les machines avec défauts, les figures (3.9 et 3.10) avec l'état sain de la machine (à vide et en charge) les figures (3.8a et 3.8b). On remarque des perturbations qui se manifestent sous forme d'oscillation aux coefficients (D9, D8, D7, D6 et A9), augmentée à l'état de défaut par rapport au cas sain de la machine.

Cette augmentation dans les signaux (D9, D8, D7, D6 et A9) est due à l'effet que les bandes de fréquence correspondantes sont affectées par les différents types de défauts.

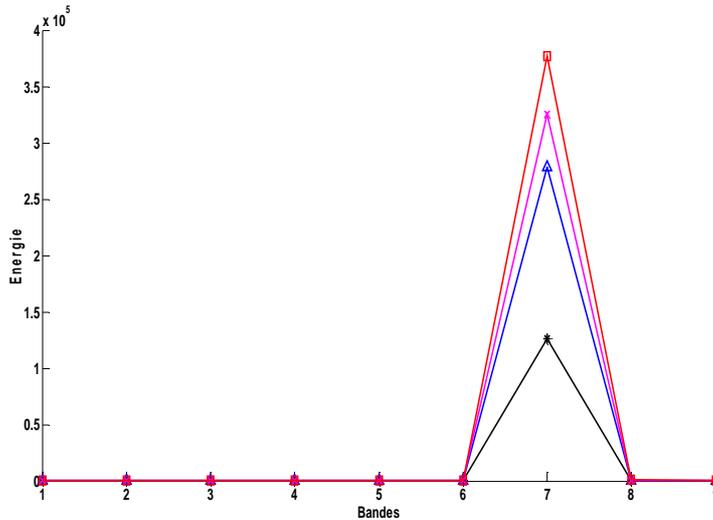


Figure 3.11 : Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db44)

**: Machine saine à vide, Δ : Machine saine en charge, \times : Machine avec défaut de cassure d'une barre au rotor, \square : Machine avec défaut de deux barres cassées au rotor*

La figure (3.11) montre la variation d'énergie associée à chaque niveau de décomposition de l'ondelette multi niveau dans le cas de la machine saine: à vide et en charge et avec défaut: cassure d'une et deux barres au rotor.

Le calcul de l'énergie emmagasinée dans chaque niveau de décomposition confirme l'augmentation observée dans les signaux de détail et d'approximation et surtout dans le niveau 7 qui correspond à la bande qui se trouve au voisinage et au dessous du fondamental.

On voit clairement l'effet de défaut rotorique sur l'énergie emmagasinée dans le niveau 7, cette augmentation diffère selon le type de défaut, dans les deux cas de cassure d'une et deux barres au rotor l'énergie augmente par rapport à celle de la machine saine (à vide et en charge). L'énergie dans le cas d'une rupture et de deux barres rotoriques augmente d'une façon remarquable par rapport au cas de la machine saine à vide et en charge. Ainsi, on remarque l'énergie augmente avec l'augmentation du nombre de barres cassées.

III.7.2 Analyse du courant statorique par la décomposition en paquet d'ondelettes

La figure (3.12) indique la variation de l'énergie associée à chaque bande de fréquence obtenue par la décomposition en paquet d'ondelettes pour les signaux de détail et d'approximation qui sont inclus dans la bande [0-312.5Hz].

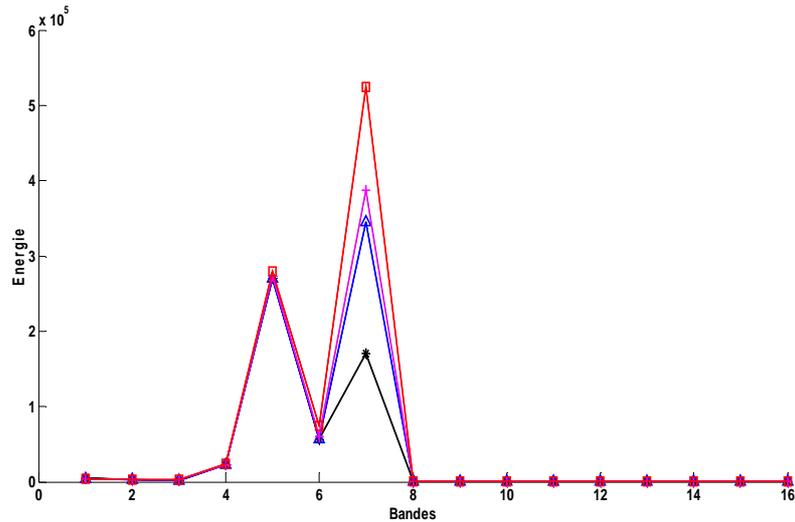


Figure 3.12 : Variation de l'énergie dans les 16 bandes de fréquence au 9^{ième} niveau (db44)
*: Machine saine et à vide, Δ : Machine saine et en charge, \times : Machine avec défaut cassure d'une barre au rotor,
 \square : Machine avec défaut de deux barres cassées au rotor

D'après la figure (3.12), on remarque que l'énergie emmagasinée dans les 16 bandes de fréquence obtenues au 9^{ième} niveau de décomposition en paquet d'ondelettes dans les cas de la machine avec défaut de deux barres cassées est supérieure à l'énergie dans le cas de défaut d'une barre cassée. Ainsi, les énergies de deux défauts précédentes sont supérieures à l'énergie dans le cas de la machine saine (à vide et en charge). La transformée en paquet d'ondelettes représente également un outil très efficace pour la détection du défaut de cassure de barre, cette efficacité est due à l'effet que la transformée en paquet d'ondelettes mène à une résolution très fine des signaux analysés. La décomposition en paquet d'ondelettes confirme les résultats obtenus par la décomposition en multi niveau, la non-stationnarité est détectée dans toutes les bandes de fréquence.

III.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de la machine asynchrone à cage tenant compte du défaut de rupture de barres, le modèle simple est essentiellement sensible au changement d'état de la machine, ensuite, le diagnostic est réalisé pour la détection du défaut par deux techniques de traitement de signale la première est la FFT qui est une méthode classique , elle nous a donné de bon résultat pour la détection du défaut de cassures de barres mais cela a pris longtemps et il faut d'être en régime stationnaire par contre la deuxième technique d'ondelette discrète qui nous donné bon résultat surtout par l'énergie de décomposition soit par le TOD type multi niveau ou paquet d'ondelette à durée courte et en régime non- stationnaire.

L'étude du diagnostic du défaut mixte ou combiné en régime stationnaire et variable nécessite un modèle de simulation qui tient compte simultanément de deux défauts (statorique / rotorique) ainsi sa détection fera l'objet du quatrième chapitre.

Chapitre IV

Diagnostic des défauts mixtes statorique et rotorique

Diagnostic des Défauts Mixtes Statorique et Rotorique

IV.1 Introduction

Dans le industriel, les défauts mixtes (statorique et rotorique) en cours de fonctionnement de la machine sont rarement présents. En effet, les mouvements vibratoires et les frottements consécutifs dus à une rupture de barres peuvent endommager d'une part les conducteurs d'encoches au stator et d'autre part, un échauffement anormal du à un défaut statorique peut être à l'origine d'une rupture de soudure, et par conséquent d'un défaut rotorique. Ainsi, il est préférable, dans une optique de surveillance généralisée de la machine d'envisager un diagnostic de défaut stator/rotor simultané. Dans ce chapitre, on présentera au début le modèle qui tient compte du défaut stator/rotor simultané de la machine asynchrone triphasé à cage et enfin on appliquera présentera les techniques du diagnostic et détection de ce type de défaut par le biais de l'analyse spectrale à base de la FFT et de l'odelette discrète (TOD).

IV.2 Modèle de défaut rotorique / statorique de la machine asynchrone

On présente un modèle global tenant compte du défaut simultané stator/rotor de la machine asynchrone à cage. Ce modèle tient compte du défaut de court-circuit des spires au stator et de rupture de barres au rotor (figure 4.1).

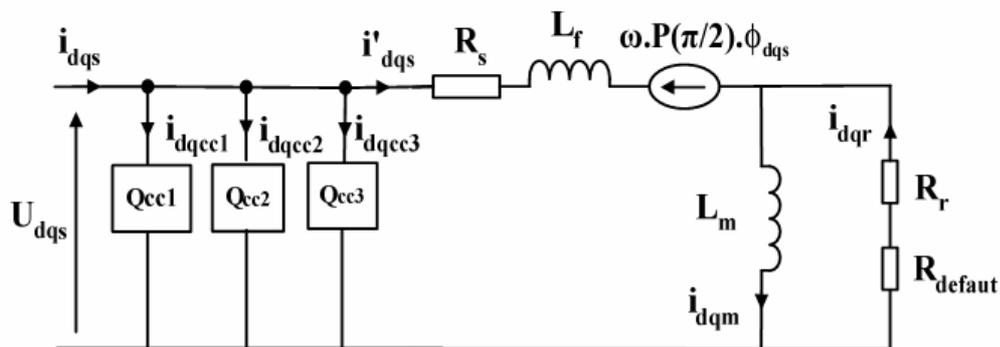


Figure4.1: Modèle de défaut simultané stator/rotor de la MAS [BAC 02b]

Ce modèle fait intervenir le fonctionnement sain de la machine (modèle de Park), les courts-circuits de spires au stator à travers des quadripôles de court-circuit et de la la rupture de barres au rotor à travers la matrice résistance de défaut [BEN 09].

IV.3 Représentation d'état du modèle de défaut rotorique/statorique de la machine asynchrone

La représentation d'état du modèle de défaut simultané stator/rotor dans le repère de Park lié au rotor est la combinaison des deux modèles étudiés précédemment, il est donné par le système (1.4).

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(\omega)X(t) + Bu(t) \\ Y(t) = CX(t) + Du(t) \end{cases} \quad (4.1)$$

avec :

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -([R_s] + [R_s])L_f^{-1} - \omega P(\frac{\pi}{2}) & (([R_{eq}]L_m^{-1}) - \omega P(\frac{\pi}{2}))L_f^{-1} \\ [R_{eq}] & -[R_{eq}]L_m^{-1} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \sum_{k=1}^3 \frac{2}{3} \frac{\eta_{cc_k}}{R_s} P(-\theta) Q(\theta_{cc_k}) P(\theta)$$

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

IV.4 Résultat de la simulation du modèle de défaut de la machine asynchrone

Pour étudier et analyser l'effet du défaut mixte rotorique/statorique sur les caractéristiques de la machine asynchrone à cage, on simule le modèle de la machine dans le référentiel de Park lié au rotor avec deux types de défauts à savoir le court-circuit entre spires au stator et de cassure de barre au rotor et le déséquilibre de la tension d'alimentation avec le défaut de cassure de barre rotorique.

- Cas d'un défaut mixte de type court-circuit entre spire statorique et cassure de barre rotorique

La simulation du défaut mixte stator/rotor est effectuée en régime établi à l'instant $t = 1\text{s}$ où on introduit un défaut de cassure d'une et un court circuit de 116 spires sur la phase as. Les résultats de simulation sont donnés par les figures (4.2, 4.3 et 4.4)

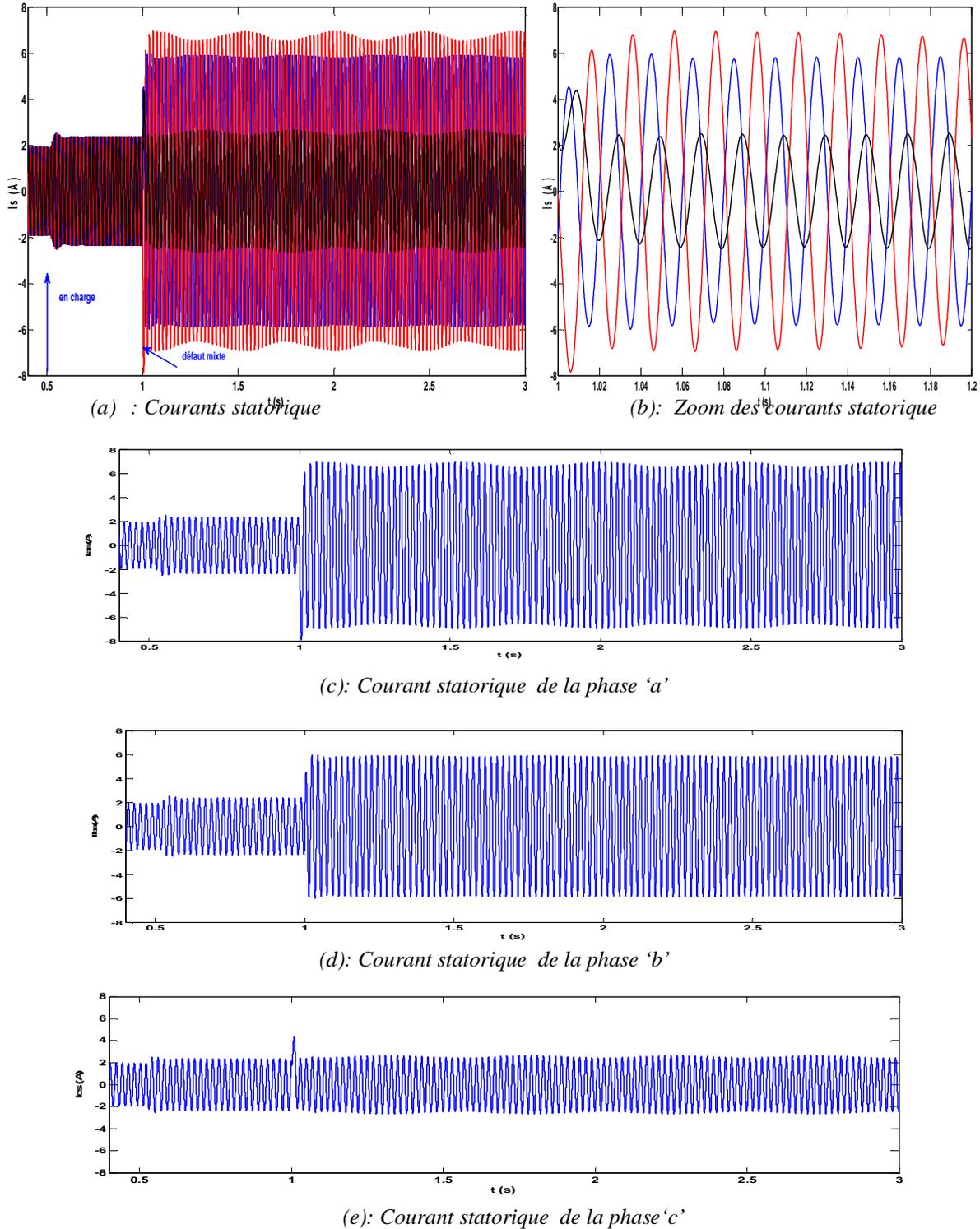


Figure 4.2: Courants statorique de la machine asynchrone en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et un court-circuit de 116 spires dans la phase 'a' au stator

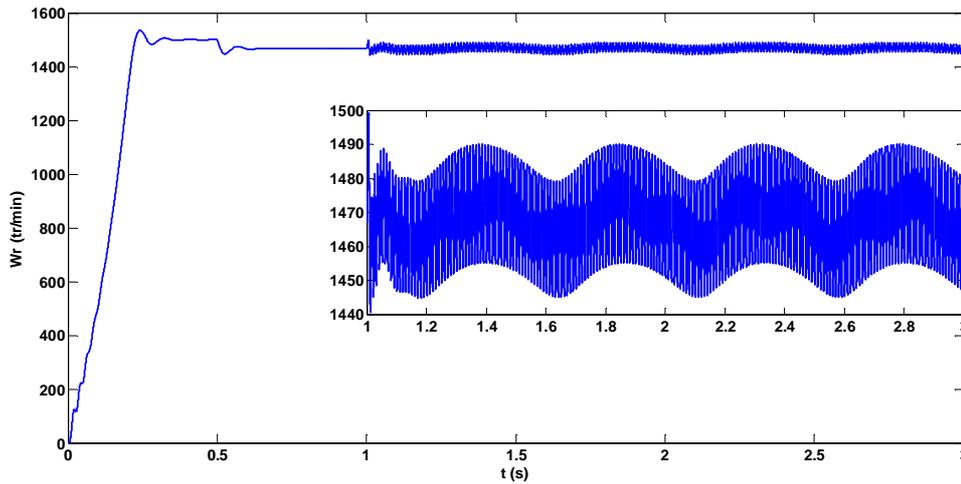


Figure 4.3 : la vitesse mécanique de la machine asynchrone en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et de court circuit de 116 spires dans la phase 'a' au stator

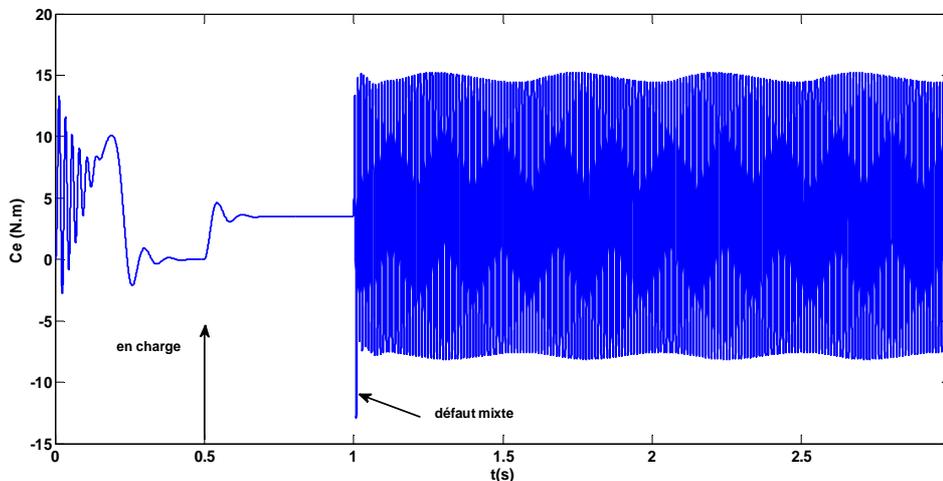


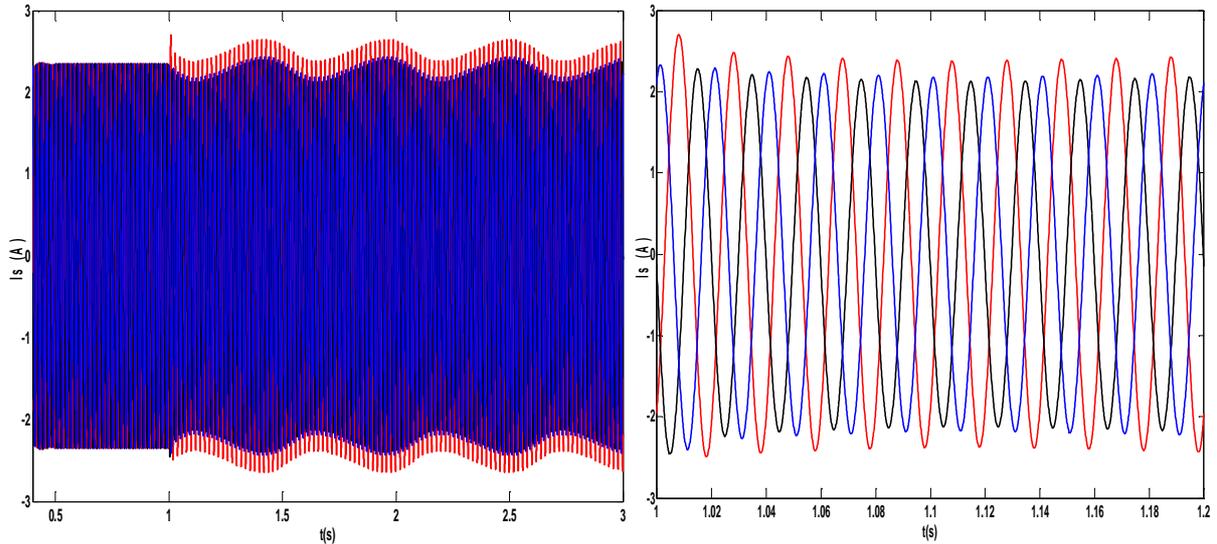
Figure 4.4 : Le couple électromagnétique de la machine asynchrone en présence en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et de court circuit de 116 spires dans la phase 'a' au stator

L'effet du défaut mixte stator/ rotor (25% de spires court-circuitées ou 16 spires sur la phase as et un défaut d'une barre cassée) se manifeste à travers à travers les mêmes de simulation phénomènes sur toutes les grandeurs électriques et mécanique de la machine. La figure (4.2) illustre les courants de ligne où on remarque une augmentation importante du courant dans la phase as où s'est produit le défaut (provoqué par le défaut statorique) et une présence des ondulations identique sur les trois courants (provoqué par le défaut rotorique). On remarque aussi un déséquilibre au niveau des déphasages des courants statorique illustré sur la figure (4.2b).

Ainsi, le défaut mixte influe aussi sur la vitesse de rotation (figures 4.3) et sur le couple électromagnétique (figures 4.4) où ils apparaissent des oscillations et des ondulations importantes au niveau de la vitesse et du couple, ce qui fait augmenter les vibrations ainsi un échauffement de la machine, ce qui accélère la défaillance de la machine.

- Cas d'un défaut mixte de type déséquilibre de la tension d'alimentation et cassure de barre rotorique

La simulation du défaut mixte est effectuée en régime établi à l'instant $t = 1s$ où on introduit un défaut de déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation de la phase as et d'une cassure d'une barre au rotor. Les résultats de simulation sont donnés par les figures (4.5, 4.6 et 4.7)



(a) : Courants statorique

(b) : Zoom des courants statorique

Figure 4.5: Courants statorique de la machine asynchrone en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% de la tension d'alimentation dans la phase 'a'.

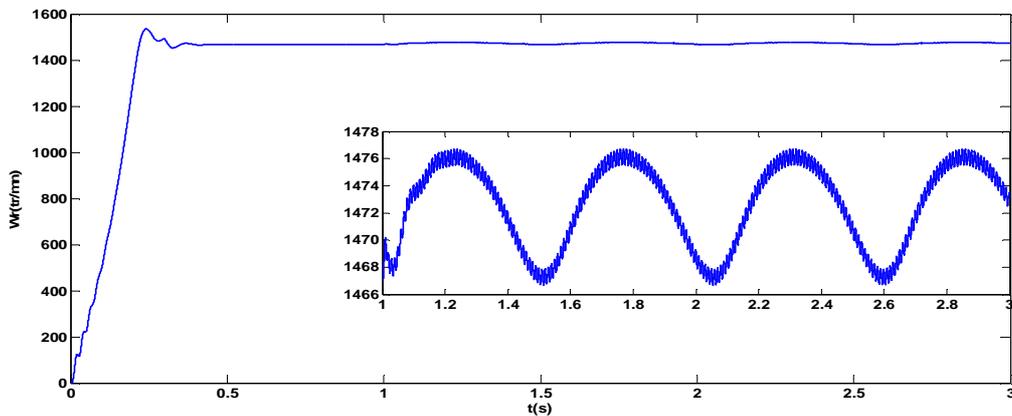


Figure 4.6 : la vitesse mécanique de la machine asynchrone en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% de la tension d'alimentation dans la phase 'a'

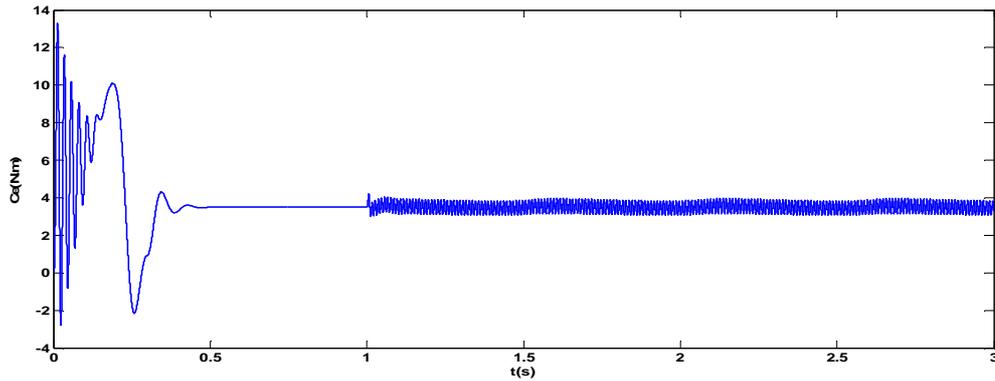


Figure 4. 7: *Le couple électromagnétique de la machine asynchrone en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% de la tension d'alimentation dans la phase 'a'*

La figure (4.5a) représente les trois courants statorique lors du défaut mixte. Un déséquilibre des courants se manifeste sous forme d'une augmentation un peu que le défaut de court-circuit au niveau du courant de la phase où s'est produit le déséquilibre de tension ainsi une présence des ondulations identiques sur les trois courants provoquées par le défaut de cassure de barre rotorique. On remarque aussi un équilibre au niveau des déphasages illustrés sur la figure (4.5b), contrairement au cas du défaut mixte de court-circuit et de cassure d'une barre.

Ainsi, ce défaut affecte également la vitesse de rotation et le couple électromagnétique comme illustré sur les figures (2.6 et 2.7) où ils apparaissent des pulsations et des vibrations importantes au niveau du couple provoqué par le déséquilibre du courant statorique, ce qui provoque une élévation de la température de fonctionnement de la machine, ce qui réduit son efficacité énergétique et la durée de vie de l'isolation des enroulements.

IV.5 Analyse du courant statorique par la FFT

L'analyse spectrale du courant d'une phase statorique est réalisée par FFT avec un fenêtrage de type Hanning. Les résultats de l'analyse est effectuée pour deux défauts mixtes: le premier est la cassure d'une barre rotorique avec le court circuit de 116 sur la phase 'as' au stator et le deuxième défaut est celui du déséquilibre de la tension d'alimentation sur la phase a_s avec une cassure d'une barre rotorique.

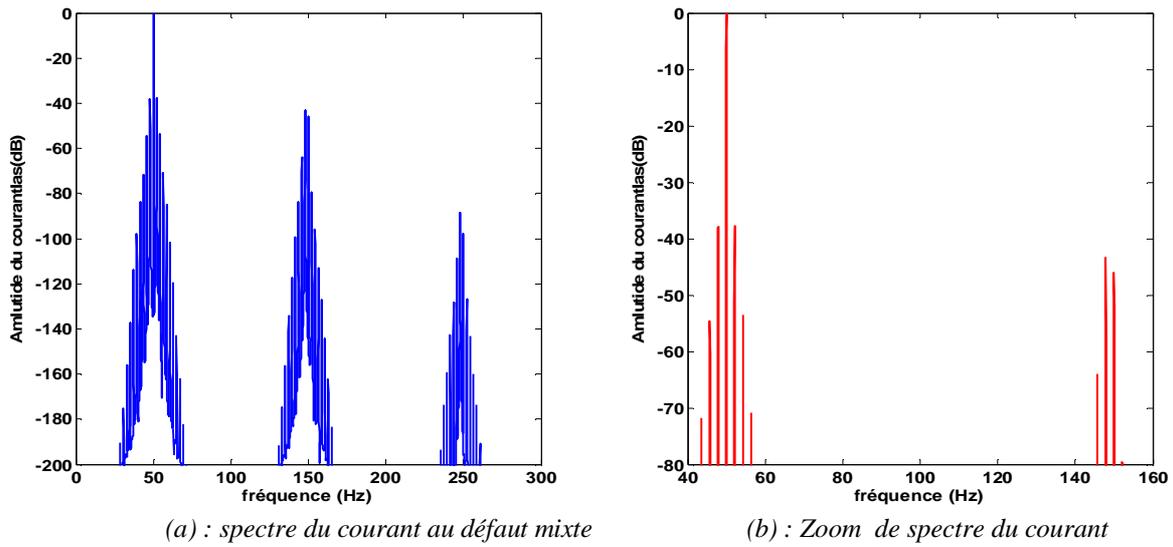


Figure 4.8: Analyse spectrale du courant statorique pour un défaut d'une barre cassée au rotor et 116 spires court-circuitées dans la phase 'a' au stator

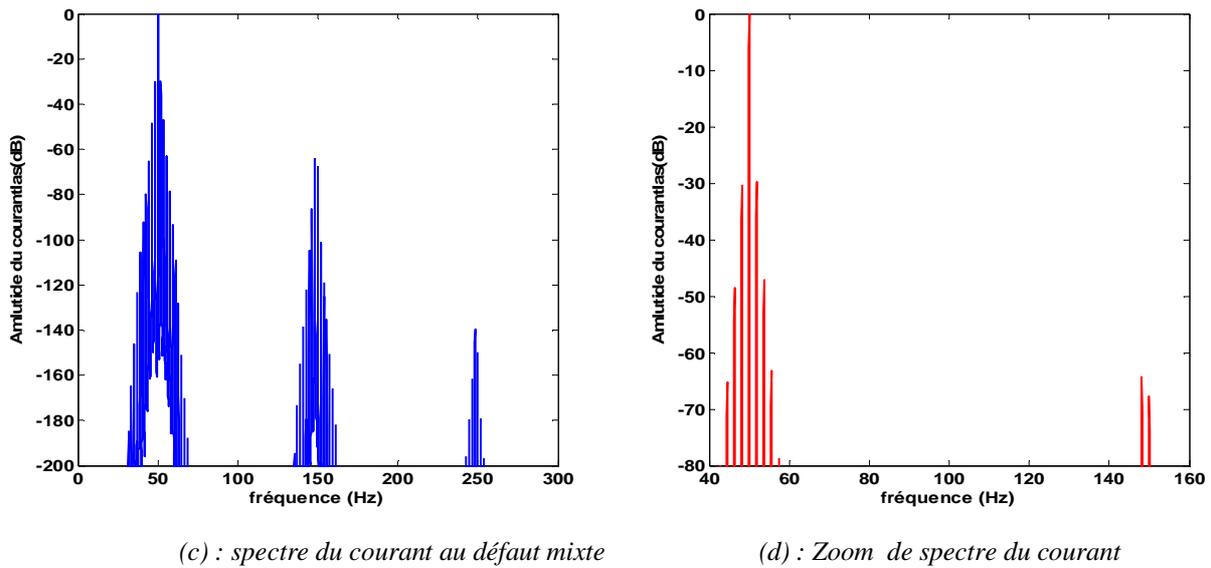


Figure 4.9: Analyse spectrale du courant statorique pour un défaut d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% dans la tension d'alimentation à la phase 'a'.

Les figure (4.8) et (4.9) montrent la présence des harmoniques sur le spectre du courant statorique de la machine fonctionnant à moyenne charge de 3.5N.m et avec deux cas des défauts mixtes. La figure (4.8) illustre le cas de défaut d'une barre cassées au rotor avec 116 spires court-circuitées à la phase 'a' au stator simultanément et l'autre (la figure(4.9)) illustre le cas de défaut d'une barre cassée au rotor et déséquilibre 4% de tension d'alimentation à la phase 'a', simultanément.

Dans le deux cas de défaut, on peut voir des raies latérales au voisinage du fondamentale (50Hz) correspondant aux raies de défaut, dont on constate des raies à la forme $(1 \pm 2kg)f_s$ (cas du défaut rotorique). Ainsi, l'apparition de la raie de 150Hz, correspondant au défaut de court circuit entre spire et au déséquilibre de la tension d'alimentation.

On remarque que les raie qui apparaissent, sont identiques à ceux obtenues c'est les au chapitres II et III pendant l'application du défaut statorique et rotorique mais la déférence ici l'apparition les deux forme de raies simultanément.

Dans les trois tableaux ci-dessous (tableau : 4.1a ,4.1b et 4.1c), on résume les fréquences des harmoniques induisent dans les courants statoriques ias suite au deux cas de défaut mixte statorique et rotorique, dont les deux tableaux (4.1a et 4.1b) suivent les raie à la forme $(1 \pm 2kg)f_s$ (cas de défaut rotorique) et le dernier suis l'amplitude qui correspond la frequence150Hz (cas du défaut statorique).

$g=2.13\%, f_s= 50 \text{ Hz}$	$(1 - 6g)f_s$	$(1 - 4g)f_s$	$(1 - 2g)f_s$	$(1 + 2g)f_s$	$(1 + 4g)f_s$	$(1 + 6g)f_s$
$f_{calculer} \text{ (Hz)}$	43.6	45.73	47.87	52.13	54.26	56.40
$f_{deduite} \text{ (Hz)}$	43.63	45.74	47.89	52.13	54.26	56.37
Amplitude(dB)	-71.8	-54.58	-37.61	-37.84	-70.86	-70.86

Tableau 4.1a : Fréquences des raies $(1 \pm 2kg)f_s$ dans le cas du défaut mixte d'une barre cassée au rotor et de court- circuit de 116 spires au stator

$g=1.84\%, f_s= 50 \text{ Hz}$	$(1 - 6g)f_s$	$(1 - 4g)f_s$	$(1 - 2g)f_s$	$(1 + 2g)f_s$	$(1 + 4g)f_s$	$(1 + 6g)f_s$
$f_{calculer} \text{ (Hz)}$	44.47	46.31	48.16	51.84	53.68	55.53
$f_{deduite} \text{ (Hz)}$	44.47	46.32	48.16	51.84	53.68	55.53
Amplitude (dB)	-65.25	-48.48	-30.44	-29.8	-47.03	-63.13

Tableau 4.1b: Fréquences des raies $(1 \pm 2kg)f_s$ dans le cas du défaut mixte d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% sur la tension d'alimentation

	Amplitude (dB)	
Fréquence	Cas de court-circuit entre spires avec une barre cassée	cas d'un déséquilibrée d'alimentation avec une barre cassée
150Hz	-46.05	-67.76

Tableau 4.1c : Amplitude des spectres qui correspond à la fréquence 150Hz dans le deux cas de défaut mixte

D'après les résultats des trois tableaux, on peut constater qu'il y a une grande similitudes entre les signatures des deux cas de défaut mixte, ce qui rend le pronostic de défaut un peu

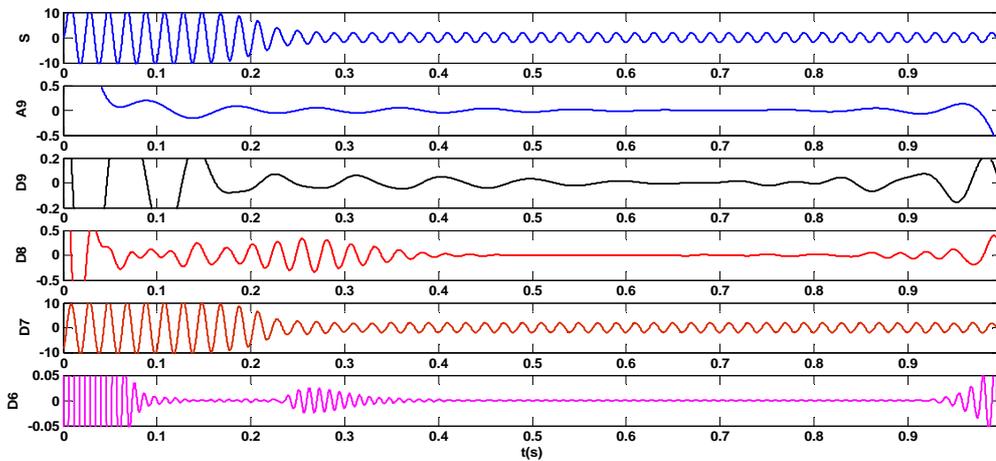
délicat, surtout par l'analyse à base de l'FFT (problème de similitude). L'utilisation d'une autre technique de diagnostic paraît nécessaire pour remédier à ce problème.

IV.6 Analyse du courant statorique par la technique des ondelettes

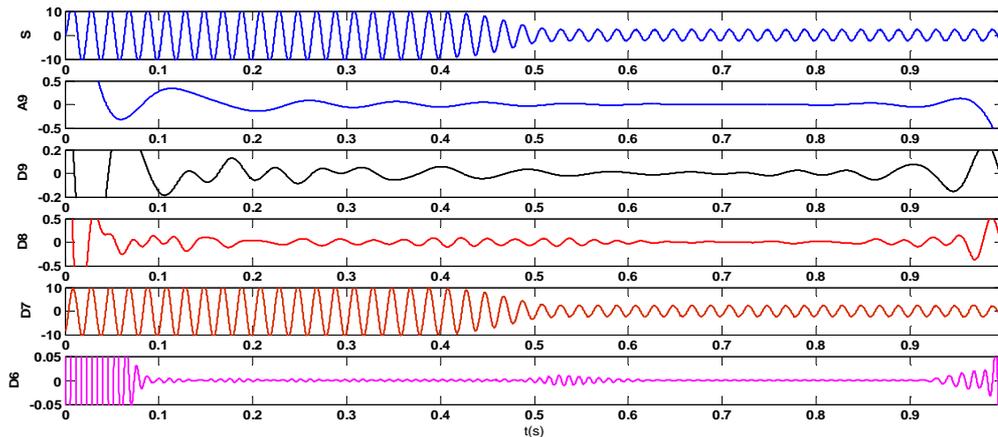
Pour la détection du défaut mixte, l'analyse du courant statorique est effectuée par deux types d'ondelette discret : la décomposition multi niveau et la décomposition par paquet d'ondelettes.

II.6.1 Analyse du courant statorique par la décomposition multi niveau d'ondelettes

On choisit l'ondelette de type Daubechies 44 (db44) comme une ondelette mère et la fréquence d'échantillonnage $f_e=10\text{KHz}$, donc le nombre des décompositions égale 9.



(a): TOD multi niveau en fonctionnement sain et à vide de la machine



(b) : TOD multi niveau sain et en charge de la machine

Figure 3.10: TOD type multi niveau du courant de la phase ias en fonctionnement sain : à vide et en charge

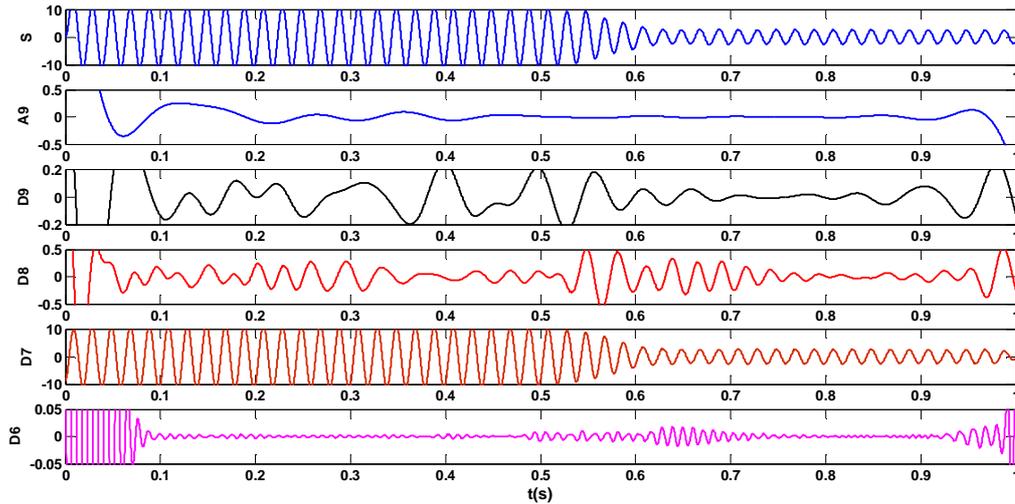


Figure 4.11: TOD du courant de la phase i_{as} en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% de la tension d'alimentation dans la phase 'a'

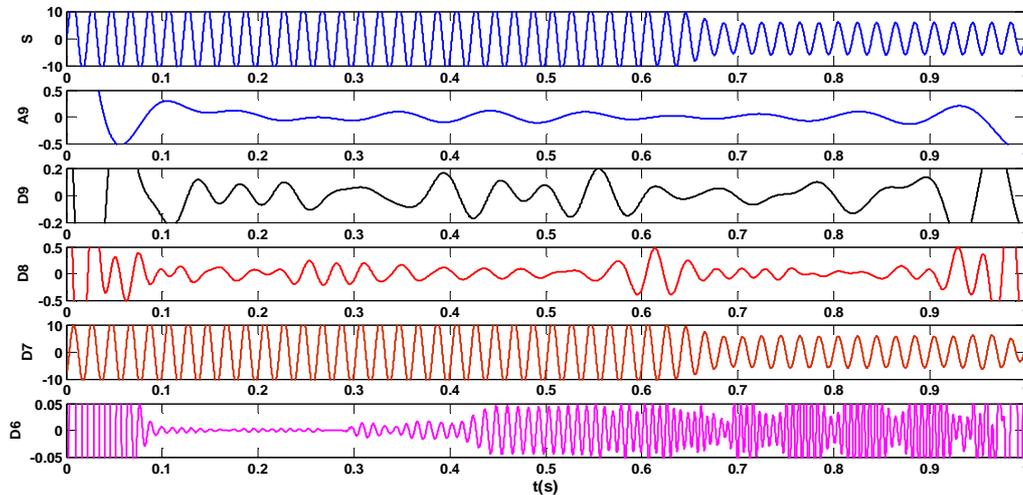


Figure 4.12: TOD du courant de la phase i_{as} en présence des défauts d'une barre cassée au rotor et de court-circuit de 116 spires dans la phase 'a' au stator

Les figures (4.10, 4.11 et 4.12) représentent respectivement les résultats d'analyse du courant statorique de la phase a_s par l'ondelette type décomposition multi niveau. Pour des fonctionnements sains (à vide et en charge) et en fonctionnement avec défauts mixtes : déséquilibre de 4% de la tension d'alimentation sur la phase a_s et de cassure d'une barre au rotor et d'un court-circuit entre spires à la phase a_s avec une cassure d'une barre. Dans tous les cas, on applique l'ondelette en régime variable dont on considère la machine dans les cas des défauts démarre en charge et avec défaut au début.

On compare les signaux de détail et d'approximation obtenus pour les cas de machines avec défauts. L'amplitude des coefficients D6, D7, D8, D9 et A9 est augmentée par rapport au cas sain surtout dans le cas de défaut de court-circuit entre spires avec une cassure d'une

barre. Cette augmentation est due à l'effet que les bandes de fréquence correspondantes sont affectées par les différents types de défauts. Ainsi, on remarque qu'il y a des différences plus claires entre le cas de défaut mixte de court-circuité avec cassure de barre (figure 4.12) et le déséquilibre d'alimentation avec une cassure de barre (figure 4.11) contrairement à ce que on a vu dans l'analyse par la FFT précédemment.

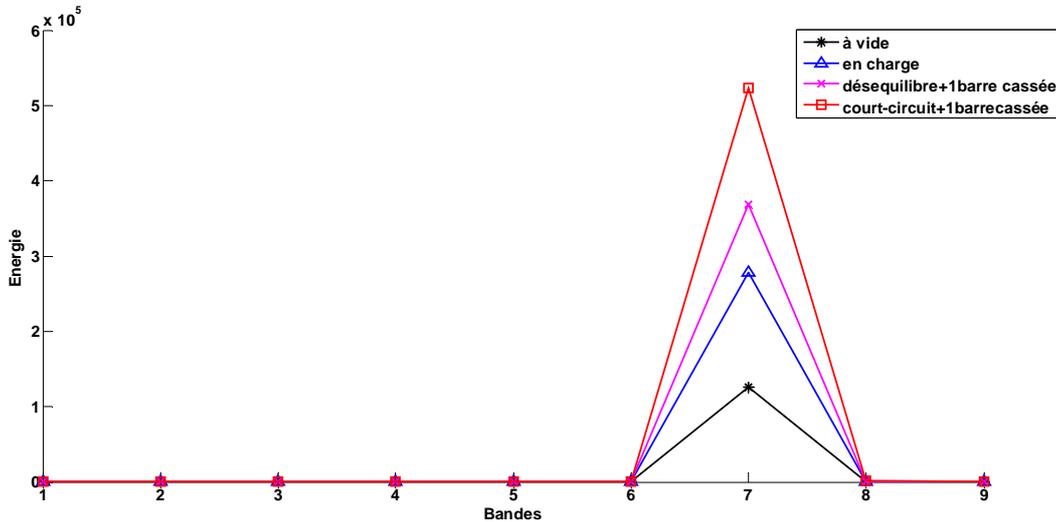


Figure 4.13 : Variation de l'énergie dans les bandes de fréquence (db44)

*: Machine saine à vide, Δ: Machine saine en charge, ×: machine présence des défauts d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% de la tension d'alimentation dans la phase 'a',
 □ : Machine avec des défauts d'une barre cassée au rotor et de court circuit de 116 spires dans la phase 'a' au stator

La figure (4.13) représente la variation de l'énergie dans les bandes de fréquence de décomposition de l'ondelette multi niveau dans le cas de la machine saine : à vide et en charge et avec deux défauts mixtes court-circuit entre spires (25% à la phase a_s) avec cassure d'une barre et déséquilibre d'alimentation avec cassure d'une barre.

L'énergie emmagasinée dans chaque niveau de décomposition confirme l'augmentation observée dans les signaux de détail et d'approximation et surtout dans le niveau7 qui correspond à la bande de voisinage et au dessous du fondamental. L'effet du défaut mixte (statorique/rotorique) se manifeste clairement par l'énergie emmagasinée dans le niveau7, soit dans le cas court-circuit et cassure de barre ou dans le cas d'un déséquilibre d'alimentation avec cassure de barre, cette augmentation diffère selon le type de défaut, dans les deux cas de défaut mixte, l'énergie dans le cas d'un court-circuit entre spires et cassure de barre augmente d'une façon remarquable par rapport au cas de la machine saine (a vide et en charge) et même

pour le défaut déséquilibre d'alimentation et cassure de barre. Donc la différence ici plus claire entre le défaut mixte de court-circuit et mixte de déséquilibre d'alimentation.

IV.6.2 Analyse du courant statorique par la décomposition en paquet d'ondelettes

La figure (4.14) montre la variation de l'énergie associée à chaque bande de fréquence obtenue par la décomposition en paquet d'ondelettes pour les signaux de détail et d'approximation qui sont inclus dans la bande [0-312.5Hz].

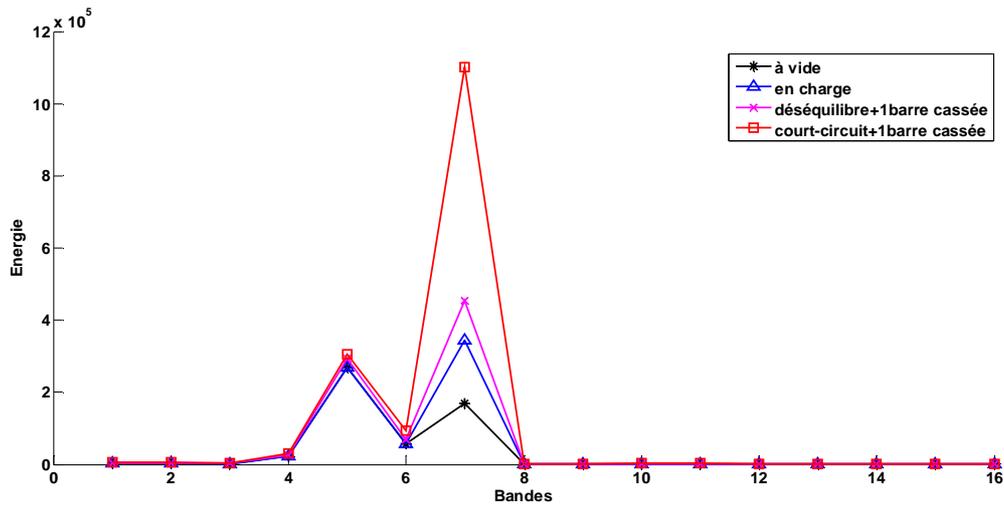


Figure 4.14 : Variation de l'énergie dans les 16 bandes de fréquence au 9^{ème} niveau (db44)

*: Machine saine à vide, Δ: Machine saine en charge, x: machine présence des défauts d'une barre cassée au rotor et d'un déséquilibre de 4% de la tension d'alimentation dans la phase 'a',
 □ : Machine avec des défauts d'une barre cassée au rotor et de court circuit de 116 spires dans la phase 'a' au stator

D'après la figure (4.14), on remarque que l'énergie emmagasinée dans les 16 bandes de fréquences obtenues au 9^{ème} niveau de décomposition dans le cas de défaut mixte court-circuit entre spires et une barre cassée est supérieure à l'énergie dans le cas de machine alimentée par une tension déséquilibrée avec une barre cassée et le cas de la machine saine (à vide et en charge).

On peut voir les différences entre les cas soit sain au avec différents types de défauts très clair. Par le biais de ce résultat, la transformée en paquet d'ondelettes représente également un outil très efficace pour le diagnostic.

IV.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et la simulation de la machine asynchrone à cage avec un défaut mixte statorique /rotorique simultané (court-circuit et cassure de barre au même temps), le modèle simple est essentiellement sensible au changement d'état de la machine. Deux types de défauts mixtes sont réalisés à savoir le "court-circuit avec une barre cassée" et "le déséquilibre d'alimentation avec une barre cassée". Le pronostic du défaut pour l'évaluation de l'effet des deux défauts mixtes déferénces est effectués par l'analyse du courant statorique en utilisant deux techniques de traitement de signal "FFT" et "l'ondelette discret (TOD)".

Les résultats montrent l'efficacité de l'ondelette paquet dans la détection du défaut mixte en régime variable.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a été consacré à la modélisation et à l'utilisation des méthodes de diagnostic en vue de la surveillance des entraînements électriques, et plus particulièrement la machine asynchrone à cage d'écureuil.

L'étude est basée sur deux objectifs principaux, le premier est la modélisation et la simulation des défauts statorique, rotorique et mixte (statorique et rotorique simultanément) et le second c'est l'utilisation de deux méthodes d'analyse du signal en vue du diagnostic et la détection des défauts dans la machine, l'une à base de la transformation de Fourier rapide (FFT) et l'autre est la transformation d'ondelette (TOD).

Pour mener cette étude, une modélisation et la simulation dans le repère de Park des défauts de court circuit entre spire de la phase as et du déséquilibre de la tension d'alimentation sont présentés, un modèle simple de défaut basé sur l'association de modèle réellement représentatifs des défauts avec le mode commun (sain) et le mode différentiel (de défaut). Deux techniques de détections sont utilisées où l'effet du défaut se manifeste par l'analyse FFT du courant statorique à travers l'apparition des raies de défaut à la fréquence de 150Hz pour les deux types de défauts; ce qui rend le pronostic délicat (ressemblance). L'utilisation de l'analyse par ondelette discrète (TOD), "multi niveau" et "paquet d'ondelette" qui se base sur la décomposition du signal du courant à des signaux d'approximation et de détail et à travers le calcul de l'énergie emmagasinée dans chaque décomposition on a pu remédier le problème de confusion entre les deux types de défauts.

Un second 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. La mise en œuvre du modèle de défaut est considérée simple tenant en compte du déséquilibre de la matrice de résistance rotorique en situation de défaut. 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. Les résultats obtenus aussi par l'analyse du courant statorique par deux types d'ondelette (multi niveau et paquet d'ondelettes) sont acceptable et motivante surtout en régime variable (régime non stationnaire).

Un modèle de défaut mixtes ou combiné de type statorique et rotorique simultanés est établi à savoir le court-circuit entre spires ou le déséquilibre d'une phase de la tension d'alimentation et la rupture de barre rotorique.

L'analyse du défaut combiné par la FFT du courant statorique montre la présence des raies qui caractérisé le défaut rotorique type rupture de barre et aussi l'apparition de la raie de 150Hz qui correspond soit au défaut de court circuit entre spire ou au déséquilibre de la tension d'alimentation.

Le problème de similitude entre le défaut du court circuit et du déséquilibre de la tension d'une phase d'alimentation posé par l'analyse du courant statorique par FFT est résolu par l'analyse du courant statorique à travers les oscillations et de l'énergie de décompositions. En régime stationnaire et variable.

En perspective, pour améliorer notre étude du diagnostic des défauts de la machine, l'étude pourrait être élargit en considérant d'autre type des défauts (excentricité, roulements....) et d'autre outil de diagnostic et de détection avancées (réseaux neurones, logique floue, neuro flou) ou par estimation paramétriques surtout en régime variable.

Annexe

Les paramètres de la machine asynchrone triphasée utilisée sont :

Puissance nominale	1.1 kW
Fréquence nominale	50 Hz
Tension nominal	400/230 V
Courant nominal	2.6/4.3 A
Vitesse nominale	1425 tr/mn
Nombre de paire de pôles	2
Nombre de barres au rotor	28
Nombre des encoches du stator	48
Nombre de spires par phase	464

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [**ABE 99**] A. ABED, L. BAGHLI, H. RAZIK & A. REZZOUG "Modelling induction motors for diagnosis purposes" EPE'99, Lausanne, Suisse, pp.1-8, September 1999.
- [**ABE 02**] A. ABED, "Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, mars 2002.
- [**ANT 06**] 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.
- [**BAC01a**] S. BACHIR, S. TNANI, J.C. TRIGEASSOU, and G. CHAMPENOIS "Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines", European Power Electronics EPE'01, Aout 2001, Graz (Autriche).
- [**BAC01b**] S. BACHIR, S.TNANI, T. POINOT, J.C. TRIGEASSOU, "Stator Fault Diagnosis in Induction Machines by Parameter Estimation", IEEE SDEMPED'01, 1-3 September 2001, pp.235-239, Grado-Italie.
- [**BAC 02a**] S. BACHIR, S. TNANI, J.C. TRIGEASSOU, "Diagnostic en ligne des défauts statoriques sur la machine asynchrone", Colloque GEVIQ'2002 – Marseille 12&13 Juin 2002.
- [**BAC 02**] S. BACHIR, "Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique", Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, Décembre 2002.
- [**BAG 99**] L. BAGHLI, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones, et des algorithmes génétiques", Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 14 janvier 1999.
- [**BAG 05**] L. BAGHLI, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", IUFM de Lorraine, 2005.
- [**BAZ 09**] S.Bazine, "Conception et implémentation d'un Méta-modèle de machines asynchrones en défaut". Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, juin 2009.
- [**BEN 05**] R. Benzid. "Ondelettes et Statistiques d'Ordre Supérieur Appliquées aux Signaux Uniet Bidimensionnels", Thèse Doctorat, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, Septembre 2005.
- [**BEN 09**] Monia ben khader bouzid, "Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par réseaux de neurones", Thèse de doctorat, Génie Electrique, Tunis, 27 Janvier 2009.

- [BOU 01]** T. BOUMEGOURA, "Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic", Thèse de Doctorat de l'Ecole centrale de Lyon, France, Mars 2001.
- [BOU 05]** M. BOUZID, N. MRABET, K. JELASSI, S. MOREAU "Faulty Inter-turns Short-Circuit Phase Detector by Neural Network" Artificial and Computational Intelligence for Decision, Control, and Automation (ACIDCA), 06 November 2005 Tozeur Tunisia.
- [BOU 06]** M. BOUHARAKET, "Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique", Thèse de Doctorat d'Université de Batna, Algérie, 15 février 2006.
- [BOU 07]** R. Bousseksou Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic. Mémoire de Magister. Université Mentouri Constantine. Algérie 2007.
- [BOU 08]** A. Bouzida, "Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes. Mémoire de Magister .Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Algérie 2008
- [BOU 11]** S. Bourdim, "Méthodes ondelettes et Bayésiennes pour le diagnostic : Application aux machines asynchrones". Mémoire de Magister .Université Ferhat Abbas de Sétif .Algérie 2011.
- [CAM 86]** J. R. Cameron and al. "Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap eccentricity in Large Induction Motors", I EE Proceedings, Vol. 133, Pt. B, No. 3, May 1986, pp. 155-163.
- [CAR 98]** Caryn M. Riley, Student Member, IEEE, Brian K. Lin, Thomas G. Habetler, Senior Member, IEEE, and Randy R. Schoen, Member, IEEE, "A Method for Sensorless On-Line Vibration Monitoring of Induction Machines", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 34, No. 6, Nov. /Dec. 1998.
- [CUS 08]** 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.
- [GAO 12]** M. Gaouaoui Diagnostic par reconnaissance des formes : Application à la machine asynchrone. Thèse de Magister. Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Algérie 2012
- [GHO 05]** A. Ghoggal, "Diagnostic de la machine asynchrone triphasée: modèle dédié à la détection des défauts, " Thèse de Magistère, Université de Batna, Algérie, May 2005.
- [HEN 03]** H. Henao, and al. "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, No. 5, pp. 1272-1279, Sep./Oct. 2003.

- [HIT 99] E.Hitti "Sélection d'un banc optimal de filtres à partir d'une décomposition en paquets d'ondelettes. Application à la détection de sauts de fréquences dans des signaux multicomposantes", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, France, novembre 1999.
- [HSU 95] J. S. Hsu, "Monitoring of Defects in Induction Motors Through Air-Gap Torque Observation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No.5, Sept./Oct. 1995, pp. 1016-1021.
- [JOK 00] M. G. Joksimovic, J. Penman and N. Arthur, "The detection of inter-turn short circuits in the stator winding of operating motors," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 47, no. 5, October 2000, pp. 1078-1084.
- [KAL 61] R. E. Kalman and R. S. Bucy, "New results in linear filtering and prediction theory", Transactions of ASME Journal of Basic Engineering, Vol.83D, pp. 35-45, March 1961.
- [KIA 09] 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.
- [KHE 94] M. Khelif, "Contribution à l'étude et la prédiction des défauts de vieillissement par fatigue thermique des composants d'électronique de puissance", Thèse de doctorant, Ecole Centrale de Lyon, CEGELY, 1994.
- [KHE 09] A.Khatir. Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts .Thèse de Magister .Université Ferhat Abbas de Sétif .Algérie 2009.
- [LEG 96] S. E. Legowski, A and al., "Instantaneous Power as Medium for the Signature Analysis of Induction Motors". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No.4, July/August 1996, pp. 904-909.
- [LUJ 99] L. Ljung, "System identification: Theory for the user", 2nd ed., PTR Prentice Hall Saddle River, N.J., 1999.
- [MAI 92] R. Maier, "Protection of Squirrel-Cage Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, March/April 1992, pp. 376-380.
- [MAL 89] S. G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 2, No. 7, Jul. 1989.
- [MAL 98] S.G. Mallat, "A wavelet tour of signal processing," second ed., Academic Press, 1998.
- [MEN 07] A. Menacer, "Contribution à l'identification des paramètres et des états d'une machine à induction pour diagnostic et développement de commande robuste: robustesse vis-à-vis de défauts", Thèse de doctorat, Université de Batna, Décembre 2007.

- [MOR 99] S. MOREAU, "Contribution à la modélisation et à l'estimation paramétrique des machines électriques à courant alternatif : application au diagnostic", Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, Novembre 1999.
- [NAI 00] M. S NAÏT-SAÏD, M. E. H. BENBOUZID et A. BENCHAIIB "Detection of broken bars in induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensorless estimation" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.15, no.1, pp. 66-70, Mars 2000.
- [NAN 05] S. Nandi, H.A. Toliyat, and Xiaodong Li, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors-A Review", IEEE Transaction on Energy conversion, Vol. 20, No.4, December 2005.
- [ORA 88] E. Oran Brigham, "Fast Fourier transform and its applications," Prentice Hall, 1988.
- [SAH 03] M. Sahraoui, "Contribution aux diagnostics des machines asynchrones triphasées à cage," Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider, Biskra, Décembre 2003.
- [SAH 10] M. Sahraoui, " Etude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones," Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Déc. 2010.
- [SCH 99] E. SCHAEFFER, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, France, décembre 1999.
- [WIL 00] W. R. Finley, M. M. Hodowanec, W. G. Holter, "An analytical approach to solving motor vibration problems," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 363, No. 5, pp. 1467-1480. Sept. /Oct. 2000.