

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider- Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département : Génie électrique



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم: الهندسة الكهربائية

Réf :.....

المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat en science en : Génie Electrique
Option : Automatique

Analyse Fréquentielle Par Les Ondelettes Pour Le Diagnostic Des Systèmes Dynamiques

Présentée par :

BENTRAH Wafa

Soutenue publiquement le : **29 / 04 /2019**

Devant le jury composé de :

Dr.TOUMI Abida	MCA	Président	Université . Biskra
Pr. SBAA Salim	Prof	Rapporteur	Université . Biskra
Pr.TERKI Nadjiba	Prof	Co - Rapporteur	Université. Biskra
Dr.REZAOUI Med Mounir	MCA	Examineur	Université. Djelfa
Dr.CHEMSA Ali	MCA	Examineur	Université .Eloued

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes parents en témoignage de tout mon amour.

A toute ma famille.

A tous mes collègues et mes amies.

Remerciements

Cette thèse n'aurait pu se dérouler et s'achever sans le soutien, la présence et l'aide précieuse de deux personnes qui ont toujours su me conseiller et m'aider:

Monsieur **Salim SBAA**, directeur de thèse qui a été un formidable support pour m'avoir encadré et encouragé tout au long de ce travail de recherche. J'ai surtout apprécié sa grande compétence scientifique, ses conseils et suggestions ont été pour moi autant d'aides inestimables, que ce mémoire reste pour lui un témoignage constant de toute ma reconnaissance.

Madame **Nadjiba TERKI**, mon codirecteur, qui a dirigé aussi cette thèse je ne peux que vous direz un énorme merci pour tout : la patience, l'écoute, la présence discrète, des conseils judicieux, l'humanité, les discussions enrichissantes et surtout le support moral.

Je remercie par ailleurs monsieur **Noureddine BESSOUS**, Dr. à l'Université d'El-Oued, pour ses conseils, son soutien, ses encouragements et ses qualités humaines.

Mes sincères remerciements s'adressent également à Mlle. **Abida TOUMI**, maître de conférences (A) à l'université de Biskra, à M. **Med Mounir REZAOUI**, maître de conférences (A) à l'université de Djelfa et à M. **Ali CHEMSSA**, Maître de Conférence (A) à l'université d'Eloued pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de participer à ce jury. J'apprécie vos remarques pertinentes et vos questions qui ont montrés votre intéressement au sujet. Je tiens à noter que

vos commentaires m`on aide à prendre davantage de recul sur le travail accompli. Merci encore une fois pour vos investissements en temps en jugeant le travail et en étant présent à la soutenance.

Wafa BENTRAH

ملخص

يصف هذا العمل تطبيقًا جديدًا وفعالًا لتحويل الموجات المتكيفة لاكتشاف عيوب المدحرجات على مستوى تيار الجزء الثابت في المحرك. يعتمد هذا التحويل على نظام الرفع اللاخطي المكوّن من ثلاث خطوات: تنبؤ ثابت متبوعًا بتحديث متفاوت المسافات و التنبؤ اللاإضافي. تُستخدم تقنية التحويل هذه في مجموعة من التطبيقات المتنوعة لمعالجة الإشارات الرقمية وإرسال أو تخزين عينات البيانات لا سيما ضغط الصوت أو دقة القياسات الفيزيائية . و التي تستخدم بشكل عام من قبل الباحثين في مجال معالجة الصور ومع ذلك سندرس إمكانية تطبيقها ومدى فعاليتها في مجال تشخيص الآلات الكهربائية ذات المحركات الدورانية وقد تم التعرف على العديد من العيوب في المحرك التعريفي كعيوب المدحرجات، و عيوب الجزء الدوار والعيوب الخارجية بالإضافة إلى ذلك ، سوف نستغل النتائج التجريبية في هذه الدراسة عن طريق تحليل التيار الكهربائي للمحرك الغير متزامن تحت شرطين: الأول هو الحصول على البيانات من آلة ليس بها خلل أو عيب والثاني هو الحصول على البيانات من آلة بها خلل أي حدث بها عيب . هذه الدراسة هي مقارنة بين طرق التحليل الحالية المتمثلة في تقنية التحويل إلى موجات متقطعة وبين طريقة الرفع اللاخطي ثلاثي الخطوات.

الكلمات المفتاحية :

مخطط الرفع ، تحويل الموجات المتكيفة ، تحويل الموجات المتقطعة ، تحويلات فورييه ، التشخيص ، الطيف، العيوب، عيوب المدحرجات.

Résumé

Ce travail décrit une nouvelle et efficace application de la transformée en ondelettes adaptative pour la détection des défauts de roulement sur le courant du stator du moteur à induction. Cette transformation est basée sur un schéma de lifting non linéaire en trois étapes: une prédiction fixe suivie d'une mise à jour variant dans l'espace et d'une prédiction sans additif. Cette technique de transformation est utilisée dans une nombreuse d'applications dans le traitement du signal numérique et la transmission ou le stockage de données échantillonnées (notamment la compression du son, ou des mesures physiques de précision). Cette transformation est généralement utilisée par les chercheurs dans le domaine du traitement d'image. Cependant nous allons dans cette étude l'utiliser pour voir son efficacité dans le domaine du diagnostic en machine électrique dans les moteurs à induction.

De nombreuses défaillances dans le moteur à induction ont été identifiées comme des défauts de palier, des défauts de rotor et des défauts externes. De plus, nous exploiterons les résultats expérimentaux. Cette étude analyse le courant statorique d'un moteur asynchrone pour deux conditions: la première est une acquisition de données d'une machine saine. La seconde est une machine défectueuse de la bague extérieure et la bague intérieure.

L'objectif de cette étude est de faire une comparaison entre les méthodes d'analyse actuelles (ASCM-TOD) et le schéma de lifting adaptatif pour confirmer l'efficacité du dernier (lifting non-linéaire en trois étapes). Nous avons étudié les défauts de roulement par diverses techniques mentionnées ci-dessus.

Mots clés:

Schéma lifting, transformée en ondelettes adaptative, défauts, transformées de Fourier rapides (TFR), diagnostic spectral, défaut de la bague extérieure, défaut de la bague intérieure.

Abstract

This work describes a novel and effective application of the adaptive wavelet transform for the detection of bearing faults on induction motor stator current. This transform is based on a three-step nonlinear lifting scheme: a fixed prediction followed by a space-varying update and a no additive prediction. This transformation technique is used in a diversity of applications in digital signal processing and the transmission or storage of sampled data (notably the compression of the sound, or physical measurements of accuracy).

This transform is generally used by researchers in the field of image processing. However we are going in this study to use in order to see its effectiveness in the field of diagnosis in electrical machine in induction motors.

Many faults in induction motor have been identified as bearing defects, rotor defects and external defects. In addition, we will exploit the experimental results. This study analyzes the stator current of an induction motor for two conditions: the first is a data acquisition of a healthy motor. The second is a defective motor of an outer race fault and inner race fault.

The objective of this study is to make a comparison between the current analysis methods (MCSA-DWT) with the adaptive lifting scheme to confirm the effectiveness of the last one (the three -step nonlinear lifting). We have studied the bearing faults by various techniques mentioned above.

Key-Words:

Lifting schemes, adaptive wavelet transform, faults, fast Fourier transforms (FFT), spectrum diagnostic, inner raceway fault, outer raceway fault.

LISTES DES FIGURES

Chapitre I

Figure I-1 : Etudes statistiques (ES) de répartition des défauts	8
Figure I-2 : Répartition des défauts	8
Figure I-3 : Répartition des défauts liés au stator.....	9
Figure I-4 : Répartition des défauts liés au rotor.....	9
Figure I-5 : Constituants du moteur asynchrone.....	11
Figure I-6 : Circuit magnétique du stator et rotor d'un moteur à induction.....	11
Figure I-7 : Le carter du stator d'un moteur à induction.....	12
Figure I-8 : Circuit magnétique et enroulement du stator d'un moteur à induction	13
Figure I-9 : Rotor à cage d'écureuil	14
Figure I-10 : Photographie du rotor et des parties cassée de la barre.....	18
Figure I-11 : Roulement à billes.....	20
Figure I-12 : Type d'excentricité.....	21

Chapitre II

Figure II-1 : Banc de filtres d'analyse-synthèse	32
Figure II-2 : Organigramme de la méthodologie de diagnostic basée sur la TOD	33
Figure II-3 : Photos d'un roulement défectueux dans la bague intérieure	39
Figure II-4 : Photo du banc d'essai expérimental	40
Figure II-5 : Schéma électrique de principe de l'acquisition des signaux	41
Figure II-6 : Analyse par TOD du courant statorique i_s pour un fonctionnement à vide (bague intérieure) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).....	42
Figure II-7 : Analyse par TOD du courant statorique i_s pour un fonctionnement en charge (bague intérieure) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).....	43
Figure II-8 : Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide.....	44
Figure II-9 : Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge.....	44

Figure II-10 : Le détail d5 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par TOD à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence: 43.75-287.5 Hz.....	45
Figure II-11 : Le détail d6 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par TOD en charge ($s=0.04$) pour la bande de fréquence: 143.75-287.5 Hz.....	46

Chapitre III

Figure III-1 : Principe du schéma lifting	50
Figure III-2 : Les trois étapes du Schéma lifting.....	50
Figure III-3 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence:0-150 Hz.....	53
Figure III-4 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence:150-300Hz.....	54
Figure III-5 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence:300-450Hz.....	54
Figure III-6 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence:450-600Hz.....	55
Figure III-7 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) autour des <i>HEP</i>	55
Figure III-8 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s = 0,044$) pour la bande de fréquence:0-150Hz.....	59
Figure III-9 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s = 0,044$) pour la bande de fréquence:150-300Hz.....	59

Figure III-10 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s=0,044$) pour la bande de fréquence:300-450Hz.....	60
Figure III-11 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s = 0,044$) pour la bande de fréquence:450-600Hz.....	60
Figure III-12 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s= 0,044$) autour des HEP.....	61
Figure III-13 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s\approx 0$) pour la bande de fréquence: 0-150 Hz	65
Figure III-14 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s\approx 0$) pour la bande de fréquence:150-300Hz.....	65
Figure III-15 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s\approx 0$) pour la bande de fréquence:300-450Hz.....	66
Figure III-16 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s\approx 0$) pour la bande de fréquence:450-600Hz.....	66
Figure III-17 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s\approx 0$) autour des <i>HEP</i>	67
Figure III-18 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s= 0,04$) pour la bande de fréquence:0-150H.....	70
Figure III-19 : Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s=0,04$) pour la bande de fréquence:150-300Hz.....	70

- Figure III-20 :** Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s = 0,04$) pour la bande de fréquence:300-450Hz.....71
- Figure III-21 :** Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s = 0,04$) pour la bande de fréquence:450-600Hz.....71
- Figure III-22 :** Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s = 0,04$) pour la bande de fréquence:600-750 Hz.....72

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I-1 : Synthèse des signatures des défauts.....	24
--	----

Chapitre II

Tableau II-1 : Bandes fréquentiel : signal décomposé en ondelettes.....	35
---	----

Chapitre III

Tableau III-1 : Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague extérieure à vide ($s \approx 0$).....	56
Tableau III-2 : Exemples des fréquences supplémentaires [0-750].....	57
Tableau III-3 : Les valeurs des <i>HEP</i>	58
Tableau III-4 : Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague extérieure ($s = 0.044$).....	62
Tableau III-5 : Exemples des fréquences supplémentaires [0-750].....	63
Tableau III-6 : Les valeurs des <i>HEP</i>	64
Tableau III-7 : Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague intérieure ($s \approx 0$).....	68
Tableau III-8 : Exemples des fréquences supplémentaires [0-750].....	69
Tableau III-9 : Les valeurs des <i>HEP</i>	69
Tableau III-10 : Exemples des fréquences supplémentaires [0-750].....	73
Tableau III-11 : Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague extérieure ($s = 0.04$).....	74

LISTE DES ABREVIATIONS

DDF : Détection et diagnostic des défauts.

MI : Machine à induction.

DE : Défaut d'excentricité.

EF: Air-gap eccentricity fault.

DR : Défauts de roulement.

BF : Bearing fault.

DCB: Cassures de barre.

BRBF: Broken rotor bar fault.

BE: Bague extérieure.

BI: Bague intérieure.

TFR: Transformée de Fourier rapide.

MCSA: Motor Current Signature Analysis.

ASCM: Analyse les Signatures de Courant statorique.

TOD: Transformée en ondelettes discrètes.

DWT : Discrete Wavelet Transform.

ES: Etude statistique.

ϕ : Flux magnétique.

I_{induit} : Courant induit.

f_{bext} : Fréquence caractéristique du défaut de la bague externe du roulement.

f_{bint} : Fréquence caractéristique du défaut de la bague interne du roulement.

f_{bill} : Fréquence caractéristique du défaut de la bille du roulement.

f_{cage} : Fréquence caractéristique du défaut de la cage du roulement.

$f_{carac-ext}$: Fréquence caractéristique du défaut de la bague externe dans le spectre du courant statorique.

$f_{carac-int}$: Fréquence caractéristique du défaut de la bague interne dans le spectre du courant statorique.

f_s : Fréquence d'alimentation statorique.

S : Glissement.

f_r : Fréquence de rotation du rotor.

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
<i>Chapitre I: Etat de l'art d'un moteur à induction et ses défauts possibles</i>	<i>6</i>
I.1 Introduction	7
I.2 Etude statistique de répartition des défauts de la machine asynchrone	7
I.2.1 Défauts statoriques.....	9
I.2.2 Défauts rotoriques.....	9
I.3 Le moteur asynchrone	10
I.3.1 Le stator.....	11
I.3.1.1 La carcasse ou le carter.....	13
I.3.1.2 Circuit magnétique et enroulements.....	13
I.3.2 Le rotor.....	11
I.3.2.1 L'arbre de transmission.....	11
I.3.2.2 un circuit magnétique.....	11
I.3.2.3 Des conducteurs.....	11
I.4 Différents types de défauts dans un moteur à induction	15
I.4.1 Défauts du stator.....	16
I.4.1.1 Défauts d'enroulement statoriques.....	16
I.4.1.2 Défauts liés au cœur du stator.....	16
I.4.2 Défauts rotorique.....	17
I.4.2.1 Défauts d'enroulement rotorique.....	16
I.4.2.2 Défauts de cassures partielles ou totales des barres.....	16
I.4.2.3 Défauts de palier et de boîte de vitesses.....	16
I.4.2.4 Les défautd d'excentricité.....	20
I.5 Condition de surveillance et de sa nécessité	21
I.5.1 Maintenance de panne.....	21
I.5.2 Maintenance à temps fixe.....	22
I.5.3 Maintenance conditionnelle.....	22
I. 6 Synthèse des signatures spectrales des défauts de la machine asynchrone	23
I.7 Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic	24

I.8 Conclusion.....	26
<i>Chapitre II:Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la TOD.....</i>	27
II.1 Introduction.....	28
II. 2 Motivation de l'utilisation de la transformation en ondelettes discrète.....	29
II.2.1 La transformée en ondelettes.....	29
II.2.1.1 La transformée en ondelettescontinue TOC.....	30
II.2.1.2 La transformée en ondelettes discrète TOD.....	31
II.3 Identification des défauts basée sur la TOD.....	32
II.3.1 Capture des courants de phase dans des conditions saines et défectueuses.....	33
II.3.2 Application du TOD.....	36
II.3.2.1 Selection de l'ondelette mère.....	34
II.3.2.2 Spécification du nombre de niveaux de décomposition.....	34
II.3.3 Analyse des signaux d'ondelettes.....	37
II.3.3.1 Analyse qualitative.....	36
II.3.3.1 .1 Analyse physique.....	36
II.3.3.1.2 Déterminationdes bandes de fréquences.....	36
II.3.3.1 .3 Détermination du type de défaut.....	37
II.3.3.2 Analyse quantitative.....	37
II.3.4 Conclusion du diagnostic	37
II.4 Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement « la bague intérieure ».....	37
II.4.1 Défauts de roulement.....	38
II.4.1.1 Défaut de la bague intérieure du roulement.....	38
II. 4. 2 Les détails du Banc d'essai expérimental.....	39
II.5. La technique d'ondelettes pour les défauts de roulement de la bague intérieure.....	41
II.6 Conclusion.....	46
<i>Chapitre III:Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la Transformée de lifting adaptative.....</i>	48
III.1 Introduction.....	49

III.2 Les ondelettes de deuxième génération.....	49
III.2.1. Schéma lifting adaptatif non linéaire à trois étapes.....	50
III.3. Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par le schéma lifting adaptatif à trois étapes.....	52
III.3.1 Défaut de la bague extérieure du roulement.....	52
III.3.2. Défaut de la bague intérieure du roulement.....	64
III. 4 Conclusion	74
<i>Conclusion générale.....</i>	76
<i>Références bibliographiques.....</i>	83

Introduction générale

Malgré que les moteurs à induction sont les machines électriques les plus couramment utilisées dans l'industrie en raison de leur faible coût, petite taille, robustesse et opération avec une source disponible facilement de courant, les échecs se produisent et peuvent perturber gravement les processus industriels et même conduire à des accidents désastreux, ils sont soumis à différents modes de défaillances /défauts. Ces défauts peuvent être liées à la machine elle-même ou dus aux conditions de fonctionnement. Ces défauts peuvent être dus aux forces mécaniques ou électriques agissant sur la machine à induction.

Nombreux types de défauts de machines ont été étudiés tels que les défauts du stator: Y compris le défaut de court-circuit entre phases du stator ou entre bobines de même phase, défaut du circuit magnétique... et les défauts du rotor qui se constitue d'un : défaut de la barre ou court-circuit, défaut de roulement, défaut d'excentricité statique et / ou dynamique. Plusieurs méthodes d'identification des fautes ont été développées et appliquées efficacement pour détecter les défauts de la machine à différentes étapes en utilisant différentes variables de la machine, telles que le courant, la tension, la vitesse, la température et les vibrations. Ainsi, pour des raisons de sécurité et d'économie, il est essentiel pour surveiller le comportement de moteurs de différentes tailles.

Ces machines font face à diverses contraintes pendant les conditions de fonctionnement. Ces contraintes peuvent conduire à certains modes de défaillances / fautes. Par conséquent, la surveillance devient nécessaire pour éviter les défaillances catastrophiques. Diverses techniques de surveillance des défauts pour les moteurs à induction peuvent être classées dans la catégorie des techniques basées sur les techniques de traitement et les techniques de calcul souple.

Parmi ces nombreuses techniques et pour de nombreuses machines, trois d'entre elles sont principalement étudiées en raison de leurs bonnes performances de diagnostic de pannes. Le premier est l'analyse des signatures de courant statorique en utilisant la TFR (ASCM -TFR).

Introduction générale

C'est une technique largement utilisée pour la détection des défauts dans les machines asynchrones. Elle donne de bons résultats pour des fonctionnements à forte puissance ou à couple constant mais des difficultés apparaissent pour les fonctionnements à couple de charge, vitesse de rotation et tensions d'alimentation variables. La nécessité de trouver d'autres techniques de traitement de signal pour les signaux non stationnaires devient donc nécessaire. Le deuxième est l'analyse des signatures de courant statorique par la transformée en ondelettes discrète (ASCM -TOD). Enfin, l'analyse des signatures de courant statorique par la technique de lifting adaptative.

Problématique et Objectifs de la Thèse

La détection et l'identification des pannes dans les systèmes dynamiques, c'est-à-dire leur diagnostic, a été un sujet important de recherche dès les débuts de l'automatique moderne. En effet dans beaucoup d'applications il s'agira souvent, au-delà de considérations purement économiques, d'assurer la sécurité des personnes et de préserver leur environnement. C'est notamment le cas pour beaucoup d'applications liées aux domaines de l'énergie, de l'eau, de l'air et des transports.

Les moteurs à induction sont l'une des machines électriques couramment utilisées dans l'industrie en raison de diverses raisons techniques et économiques. Généralement nous avons remarqué et grâce à une étude bibliographique que le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones s'attache particulièrement à l'analyse fréquentielle des signaux indicateurs de défauts.

L'objectif de ce travail de recherche s'attache particulièrement à l'analyse fréquentielle des signaux indicateurs de défauts. Par ailleurs, il reste donc nécessaire de développer des filtres de détection, d'isolation et d'estimation de ces défauts par un certain nombre de méthodes et techniques de diagnostic et d'établir des critères de choix pour leurs utilisations. Pour ces raisons, ce travail porte une comparaison entre les méthodes d'analyses du courant : ASCM - TOD et ASCM - schéma lifting non linéaire en trois étapes afin d'accéder à une décision précieuse en se basant sur les résultats expérimentaux obtenus à partir de banc d'essai.

Structure de la Thèse

La structure de cette thèse traduit cette démarche:

Dans le premier chapitre, nous allons rappeler le contexte de notre étude : une synthèse très générale de la problématique pour rendre compte de l'étude menée, nous présenterons d'abord, à travers une analyse bibliographique, l'état de la recherche dans ce domaine.

✓ Le deuxième chapitre sera consacré aux résultats expérimentaux dédiés à l'analyse fréquentielle des défauts de roulement par la transformé en ondelette discret.

✓ Le troisième chapitre sera consacré aux résultats expérimentaux dédiés à l'analyse fréquentielle des défauts de roulement par la méthode de lifting adaptative.

✓ Une conclusion générale donnera une synthèse du travail effectué, Pour évaluer l'efficacité, la fiabilité de la méthode utilisé et résumera les principaux résultats obtenus.

Etude et synthèse bibliographique

Dans les industries, les moteurs électriques en particulier le moteur à induction sont largement utilisés dans de nombreuses applications. Afin de renforcer et d'augmenter la productivité, la fiabilité et la sécurité des installations industrielles, un contrôle permanent des moteurs est essentiel. Pour cette raison, les recherches sur la surveillance de la santé des moteurs asynchrones ont été largement étudiées et sont devenues une tâche difficile. Dans la littérature, plusieurs récentes revues sont disponibles pour la détection et le diagnostic des défauts (DDF) des machines asynchrones. Dans [1] et [2], [3], [4] ces méthodes dédiées aux défauts d'enroulement du stator sont étudiés, respectivement. D'un autre côté, des études ont été fait sur des systèmes d'entraînement à moteur qui comprennent diverses machines électriques, électronique de puissance étaient donnés dans [5] et [6].

Les principaux composants des machines à induction MI sont le noyau et les tôles du stator, le noyau et les tôles du rotor, les enroulements du stator, les enroulements ou les barres du rotor, le matériau isolant, l'arbre, les paliers et le boîtier.

Les principaux majeures types de défauts étudié par les méthodes de DDF sont (défauts d'excentricités (DE): Air-gap eccentricity fault (EF), défauts de roulements (DR): Bearing fault (BF) et cassures de barre (DCB): Broken rotor bar fault(BRBF).

Introduction générale

Le défaut d'excentricité est un défaut mécanique lorsque l'espacement entre le stator et le rotor varie de manière significative. Il existe trois types de DE [7]: l'excentricité statique, l'excentricité dynamique et l'excentricité mixte des deux précédentes. Le désalignement est une raison courante pour l'excentricité statique, qui pourrait éloigner le centre physique du rotor du centre statorique. D'autre part, il est plus probable que ce soit causé par des noyaux ovales, un arbre coudé et des roulements usés.

Les paliers sont utilisés pour supporter les rotors et pour réduire la friction rotative, ils peuvent tomber en panne même avec une utilisation correcte du moteur en raison de la fatigue et de l'usure. Lubrification insuffisante, charge élevée, opération durable, température ambiante élevée, etc. peut accélérer le DR. Un DR provient de types distribués, tels que la rugosité et l'ondulation du chemin de roulement, puis se développe à des types locaux, tels que les fissures, les fosses et les éclats [8]. En fonction de l'emplacement de la panne locale, il peut être constitué en quatre types : une bague extérieure (BE), une bague intérieure (BI), des éléments roulants de formes diverses (billes) et une cage qui maintient les éléments roulants à une organisation régulière.

Un autre type de défauts mécaniques dans la machine asynchrone c'est le DCB, qui a été largement étudié dans la littérature. DCB est principalement causé par une forte contrainte thermique générée par un grand courant de rotor ainsi que par d'autres facteurs électriques, mécaniques et environnementaux. Une fois qu'une barre de rotor est cassée, les barres de rotor adjacentes devront absorber les contraintes supplémentaires de la barre cassée. Ce fait accélère les défaillances ultérieures dans les autres barres adjacentes. [9], [10]

Les défauts dans les MI génèrent des caractéristiques anormales de domaines indifférents, qui sont utilisés comme indicateurs de défaut. Ces caractéristiques indicatives des défauts peuvent être extraites des signaux de tension, courant, magnétique, mécanique (vibration), chimique, acoustique, etc.

Les indicateurs de défaut dans le domaine fréquentiel sont les plus populaires et les mieux compris car ils peuvent être détectés de manière réalisable par la transformée de Fourier rapide (TFR). Parmi tous les signaux de retour, le (s) courant (s) du (des) MI est (sont) principalement utilisé (s), car les capteurs de courant sont relativement peu coûteux et faciles à utiliser et sont déjà installés dans de nombreux systèmes de commande. L'application de la

Introduction générale

TFR sur la source de courant du stator conduit à la fameuse méthode d'DDF, ASCM sous l'abréviation Anglaise MCSA (Motor Current Signature Analysis).

La richesse d'informations dans le courant statorique, permet de l'exploiter par différentes techniques. Parmi elles, on trouve la transformée en ondelettes discrètes (TOD ou en Anglais DWT), qui est dernièrement très utilisée sous plusieurs formes, surtout, dans l'aspect de filtrage. Le schéma de lifting est introduit par Sweldens comme un outil puissant pour construire des ondelettes biorthogonales dans le domaine spatial [11,12]. Il fournit beaucoup de flexibilité pour la construction d'ondelettes biorthogonales, et peut être utilisé pour construire des ondelettes adaptatives par la conception d'un opérateur de prédiction et d'une mise à jour.

*Chapitre I : Etat de l'art d'un
moteur à induction et ses
défauts possibles*

I.1 Introduction

Les moteurs à induction jouent un rôle important dans le fonctionnement sûr et efficace des installations industrielles en raison de leurs nombreux avantages, tels que la simplicité de construction ainsi que la fiabilité et le coût relativement bas. La détection des défauts des moteurs asynchrones est analysée à l'aide de signaux détectés par l'un de leurs trois principaux composants: le stator, le rotor et les paliers. Parmi ces composants, beaucoup d'efforts sont consacrés aux défaillances de barres de rotor des moteurs à induction. Si le nombre de barres cassés augmente, atteignant des conditions de fonctionnement inacceptables; par conséquent, l'importance d'un diagnostic correct est nécessaire [13].

Les défauts de roulement représentent plus de 40% de tous les défauts de la machine à induction, et leurs détections sont souhaitées pour éviter les dommages des processus industriels [14]. Bien que les défauts de rotor semblent moins significatifs que les défauts de paliers en termes quantitatifs, la plupart des défaillances de paliers sont causées par un désalignement de l'arbre, l'excentricité du rotor et d'autres défauts liés au rotor [15]. Ces défauts produisent certains symptômes tels que des tensions d'entrefer déséquilibrées et des courants de ligne, des pulsations de couple, un couple moyen réduit...etc.

Dans ce chapitre, nous décrirons la machine asynchrone avec un bref rappel sur les études de répartition des défauts. Nous donnerons ensuite les éléments de constitution de cette machine, suivie de principe de fonctionnement et les différents types des défauts de la machine asynchrone. Nous finirons par une conclusion.

I.2 Etude statistique de répartition des défauts de la machine asynchrone

Il est impossible de maintenir ou de rétablir un système industriel dans son état de fonctionnement normal malgré l'utilisation des différentes stratégies de maintenance soit la maintenance corrective ou la maintenance préventive ou la maintenance prédictive pour éviter les problèmes se produisant le plus souvent dans ce système et aussi ceux dont les effets sont les plus graves.

Plusieurs études statistiques sur des machines asynchrone ont été faites depuis les années 80 jusqu'à nos jours. Dans la littérature, nombreux statistiques ont été menées à grande échelle concernant les défauts sur les machines asynchrones de grande puissance (100 kW à 8 MW) aux caractéristiques très différentes afin de connaître leurs répartitions [16], [17], [18] et [19].

Les résultats obtenus à partir de ces différentes études statistiques sont représentés sur la figure (I.1).

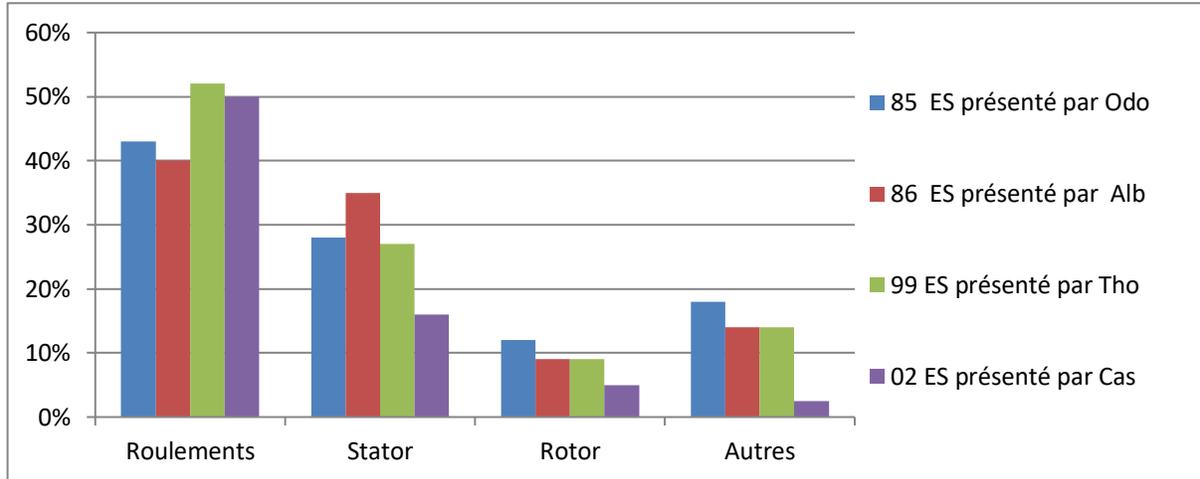


Figure I.1. Etudes statistiques (ES) de répartition des défauts

Les résultats obtenus de ces études statistiques sont différents d'une étude à l'autre. D'après ces statistiques nous remarquons que la majorité des défaillances affectent les roulements à billes avec un pourcentage important liées aux défaillances au stator sans oublier les défauts au rotor qui semblent se produire moins fréquemment.

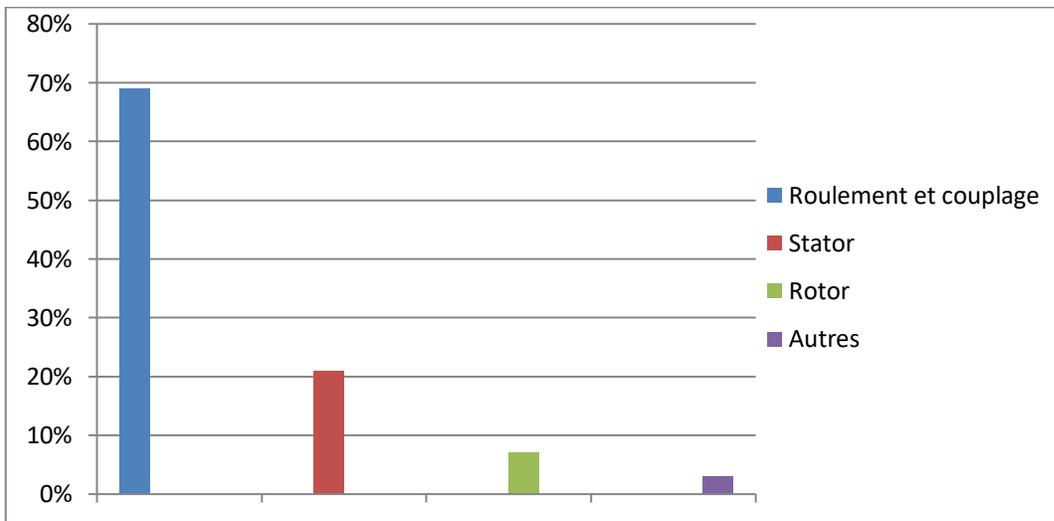


Figure I.2. Répartition des défauts [20]

La figure (I.2) présente d'autre étude statistique sur les défauts de la machine asynchrone a été effectuée en 2008 par A. H. Bonnett et all [20].

D'autre part, nous ne sommes intéressés qu'à deux types de défauts à savoir le défaut statorique et le défaut rotorique:

1.2.1 Défauts statoriques

Selon la figure (I.3) la majeure partie des défauts liés au stator des machines asynchrones est due à des défauts d'isolement par rapport à la terre [21].

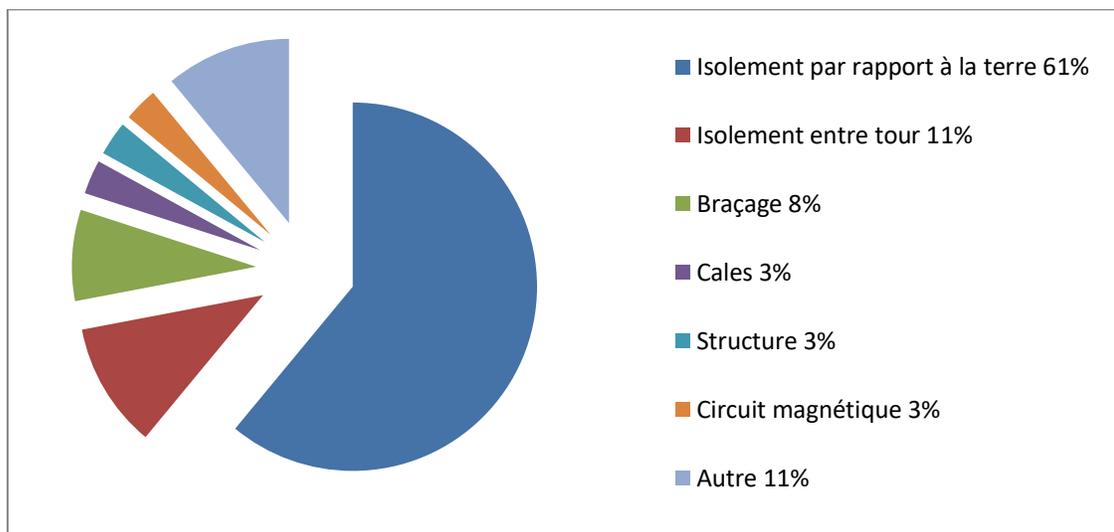


Figure I.3. Répartition des défauts liés au stator

1.2.2 Défauts rotoriques



Figure I.4. Répartition des défauts liés au rotor

La première source de défauts liés au rotor à des relations directes à la cage [22] figure (I.4).

Dans un moteur à induction la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique, se produit des pertes qui sont les suivantes:

- Pertes de frottement : 5-15%
- Pertes de fer ou de noyau : 15-25%
- Pertes du stator : 25-40%
- Pertes de rotor : 15-25%
- Pertes de charge parasite : 10-20%.
- L'efficacité du moteur à pleine charge varie d'environ 85 à 97%.

I.3 Le moteur asynchrone

Un moteur asynchrone figure (I.5), appelée également moteur à induction comprend un circuit magnétique interconnectant deux circuits électriques qui sont placés sur les deux parties principales de la machine:

1. La partie fixe appelée le stator.
2. La partie tournante appelée le rotor.

En plus les deux parties principales, un moteur à induction est constitué d'autres organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

Cette machine est un dispositif de conversion d'énergie électromécanique, elle permet la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. [23]

Généralement, le stator et le rotor sont constitués de deux circuits:

1. Un circuit électrique pour transporter le courant est fabriqué normalement de cuivre ou d'aluminium isolé.
2. Un circuit magnétique, représenté sur la figure (I.6), pour porter le flux magnétique en matériau magnétique laminé en acier.

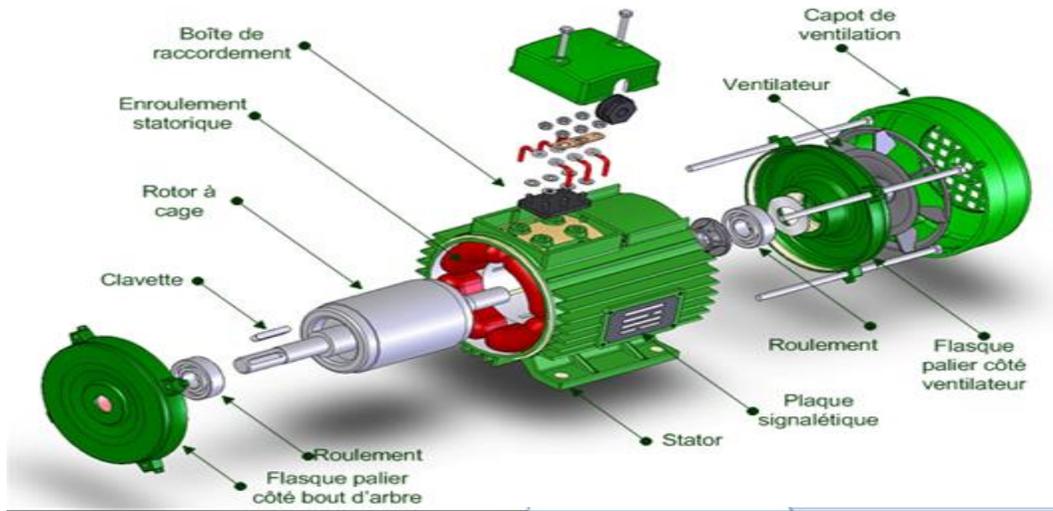


Figure I.5. Constituants du moteur asynchrone

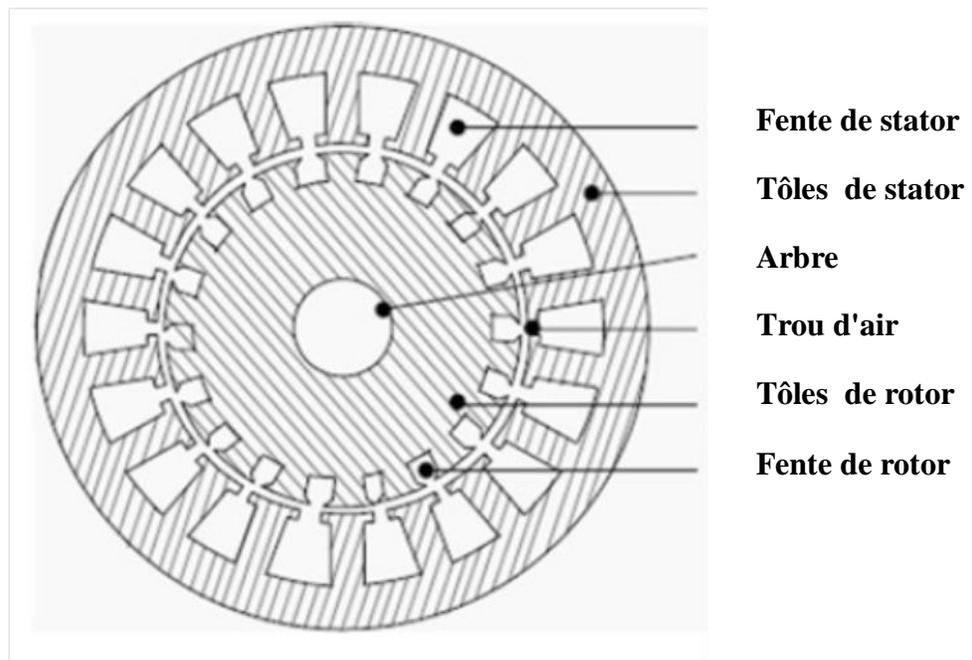


Figure I.6. Circuit magnétique du stator et rotor d'un moteur à induction

1.3.1 Le stator

Le stator, est la partie fixe extérieure du moteur, il permet la génération d'un champ magnétique tournant. Il se compose de 3 parties :

- La carcasse.

- Le circuit magnétique.
- Les enroulements.

A propos du stator on parle souvent d'inducteur et parfois de primaire.

1.3.1.1 La carcasse ou le carter

La carcasse sert de support, joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre les agents extérieurs. Elle agit aussi comme échangeur thermique en diffusant la chaleur due aux pertes et en guidant l'air de ventilation. Il est fait de fonte ou de fonte d'alliage d'aluminium ou de tôle d'acier soudée. Figure (I.7)



Figure I.7. Le carter du stator d'un moteur à induction

1.3.1.2 Circuit magnétique et enroulements

Le couple C développé dans une machine électrique est proportionnel au produit du flux magnétique ϕ par le courant induit I_{induit} . Il est exprimé par la relation :

$$C = K I_{induit} \phi \quad (I.1)$$

Il existe donc deux constituants principaux pour le stator du moteur asynchrone :

-Un ensemble de conducteurs chargés de véhiculer les courants électriques et répartis dans les encoches à la périphérie du stator.

-Un circuit magnétique dont les fonctions principales sont :

- La canalisation des lignes d'induction.
- Le maintien en position des conducteurs.
- La conduction thermique des conducteurs vers les zones de refroidissement.
- Afin de limiter les pertes thermiques dans le circuit magnétique, celui-ci est constitué de tôles.
- Ferromagnétiques revêtues de vernis isolants limitant la circulation des courants de Foucault.

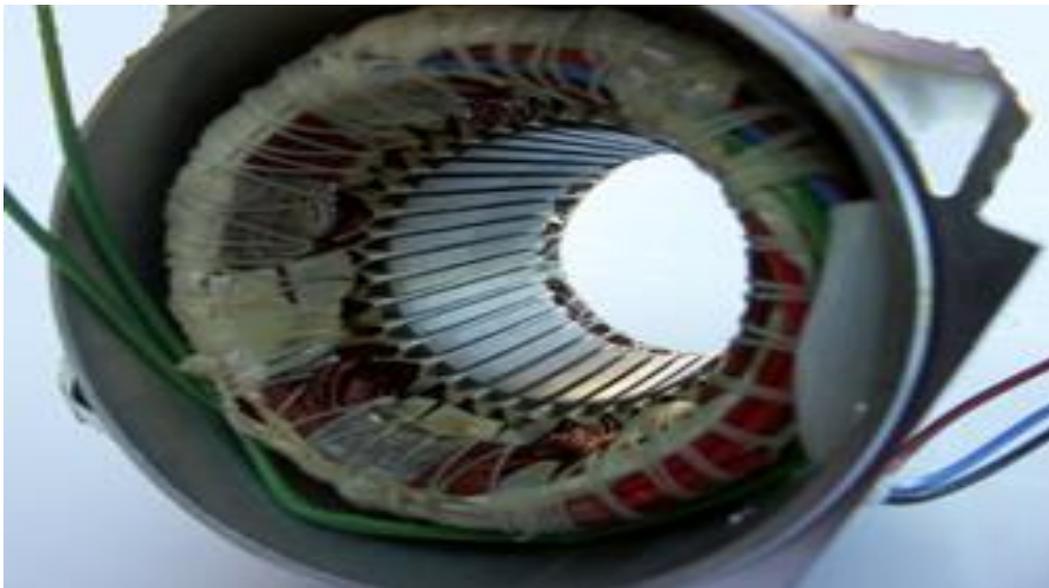


Figure I.8. Circuit magnétique et enroulement du stator d'un moteur à induction

1.3.2 Le rotor

C'est la partie mobile du moteur. A propos du rotor on emploie souvent le terme d'induit ou parfois de secondaire.

Les moteurs à induction d'enroulement de rotor sont classés en deux groupes [24]:

- Moteur à induction à cage d'écureuil représenté sur la figure (I.9)
- Moteur à induction à rotor bobiné.

Il est composé de trois parties :

1.3.2.1 L'arbre de transmission

Qui sert comme un support au circuit magnétique et aux conducteurs (enroulements tournants pour un rotor bobiné ou cage d'écurueil).

1.3.2.2 Un circuit magnétique

Le circuit magnétique permettant de guider les lignes de flux induites par le stator. Ce circuit magnétique est constitué de tôles ferromagnétiques revêtues de vernis isolants limitant la circulation des courants de Foucault, ce qui permet de réduire les pertes thermiques.

1.3.2.3 Des conducteurs

Ils placés dans les encoches du circuit magnétique dans lesquels les courants induits circulent. En pratique pour réaliser un moteur industriel, afin d'éviter les vibrations et régulariser le couple on applique certains principes :

Le nombre de conducteurs du rotor (barres de la cage d'écurueil) est différent du nombre d'encoches du stator, exemple :- 24 encoches au stator.

- 16 conducteurs au rotor.

Les conducteurs sont légèrement inclinés par rapport à l'axe du rotor afin d'améliorer la régularité du couple, en particulier dans la phase de démarrage.



Figure I.9. Rotor à cage d'écurueil

I.4 Différents types de défauts dans un moteur à induction

Cette section présente une description complète les plus courants défauts dans les machines à induction. Ces défauts sont classés en fonction de leur emplacement.

Les moteurs à induction sont robustes, peu coûteux, peu d'entretien, de taille raisonnablement petite, raisonnablement efficace et fonctionnant avec une alimentation facilement disponible. Ils sont fiables dans les opérations, mais ils sont soumis à différents types de défauts indésirables.

Les défauts dans les moteurs à induction peuvent être classés comme suit:[25]

- ***Défauts électriques:***

Les défauts sous cette classification sont la fourniture de déséquilibre tension ou courant, monophasé, sous ou sur tension de courant, défaut à la terre, surcharge, défaut de court-circuit entre spires.

- ***Défauts mécaniques:***

Les défauts d'origine mécanique sont: la cassure de barre, déséquilibre de masse, l'excentricité d'espace d'air, défauts de roulement, la défaillance d'enroulement rotorique et la défaillance d'enroulement statorique.

- ***Défauts environnementaux:***

La température ambiante et l'humidité externe affectera les performances du moteur à induction. Les vibrations de machine, pour n'importe quelle raison telle que le défaut d'installation, le défaut de base, etc., affectera également la performance.

La défaillance du stator peut être de différentes sortes et différents types de défauts peuvent survenir dans le rotor lui-même. Lorsque le moteur n'accélère pas jusqu'à sa nominale vitesse mais tourne à près de sa septième synchrone vitesse, il est également considéré comme un défaut d'un moteur à induction.

Dans un moteur à induction, de multiples défauts peuvent se produire simultanément et dans ce cas, la détermination du problème initial est assez difficile. Les effets de tels défauts dans le moteur à induction se traduisent par des courants et des tensions de stator déséquilibrés, des oscillations de couple, une réduction du rendement et du couple, une

surchauffe et des vibrations excessives [26]. De plus, ces défauts moteurs peuvent augmenter l'amplitude de certaines composantes harmoniques des courants et des tensions. Les performances du moteur à induction peuvent être affectées par l'un des défauts.

1.4.1 Défauts du stator

Les défauts statoriques peuvent être divisés en deux types:

1. Défauts d'enroulement statorique.
2. Défauts liés au cœur du stator.

1.4.1.1 Défauts d'enroulement statoriques

Selon une étude de fiabilité du moteur de l'IEEE et de l'Electric Power Research Institute [27], les défauts du stator sont principalement responsables de 37% des défaillances dans un moteur à induction. De nombreux travaux ont indiqué que la majorité des défaillances d'enroulement du stator du moteur à induction résultent de la destruction de l'isolation de tour. Dans la plupart des cas, cette défaillance commence par une défaillance (entre tour qui se développe et atteint les défaillances majeures, telles que les défaillances bobine à bobine, les défaillances entre phases ou les défaillances phase-terre sont causant finalement la panne du moteur.

Très souvent, l'enroulement statorique d'une machine à induction est soumis à des contraintes induites par divers facteurs, tels que des surcharges thermiques, des vibrations mécaniques et des pics de tension provoqués par des variateurs de fréquence.

Les causes les plus fréquentes des défaillances d'enroulement du stator sont les suivantes:

- Les causes dues aux températures élevées de bobinage.
- Les causes dues aux contaminations causées par l'huile, l'humidité, etc.
- Les causes dues aux courts-circuits.
- Les causes dues aux contraintes de démarrage.
- Les causes dues aux décharges électriques.
- Les causes dues à la fuite des systèmes de refroidissement. [28]

1.4.1.2 Défauts liés au cœur du stator

Les problèmes de noyau du stator sont rares par rapport à des problèmes d'enroulement du stator ne sont généralement pas une grosse préoccupation pour les petites machines [29]. Cependant, le processus de réparation / reconstruction est plus coûteux dans le cas de la défaillance du cœur du stator, car elle nécessite généralement le remplacement complet du cœur. Par conséquent, il y a été intéressé à identifier les causes des problèmes de base et à trouver des moyens de surveiller afin de détecter et d'empêcher la défaillance du cœur du stator.

Les noyaux de stator de la machine à induction sont construits à partir de lamelles d'acier isolées minces avec une vue minimiser les pertes par courants de Foucault à une efficacité opérationnelle supérieure. Dans le cas de moyennes ou grandes machines, le noyau est comprimé après que les empilements de noyau sont empilés afin d'empêcher les feuilles de stratification individuelles de vibrer et de maximiser la conductance thermique dans le cœur.

1.4.2 Défauts rotoriques

Les défauts de rotor les plus communs dans une machine à induction peuvent être classés comme:

1. Défauts d'enroulement rotorique.
2. Défauts de cassures partielles ou totales des barres: rupture de barreaux.
3. Défauts de roulement.
4. Les défauts d'excentricité statique ou dynamique.

1.4.2.1 Défauts d'enroulement rotorique

Des spires de court-circuit dans les enroulements de rotor de la machine à induction provoquent des problèmes opérationnels tels que des niveaux de vibration élevés; par conséquent, une détection précoce est essentielle. Normalement, la résistance des enroulements sur les pôles opposés est identique. La chaleur produite par l'effet de Joule est répartie symétriquement autour du forgeage du rotor. Si l'isolation entre les spires est endommagée, l'enroulement du rotor devient court-circuité.

La résistance de la bobine endommagée diminue et si les pôles sont connectés en série, moins de chaleur est générée que dans la bobine symétrique sur le pôle opposé. Le corps du rotor subit ainsi un échauffement asymétrique qui produit un arc thermique dans le corps du rotor, provoquant des vibrations. Les forces magnétiques déséquilibrées sur le rotor produites par le changement de la force magnétomotrice (MMF) de l'enroulement contribuent à l'augmentation des vibrations [30].

1.4.2.2 Défauts de cassures partielles ou totales des barres: rupture de barreaux

La cage d'écurueil d'un moteur à induction est constituée de barres de rotor et de bagues d'extrémité. Si une ou plusieurs barres sont partiellement fissurées ou complètement cassées, alors le moteur est considéré comme ayant une cassure de barre. La Figure (I.10) montre le rotor et les parties de la barre cassée.

Dans des conditions de fonctionnement normales, de fortes contraintes mécaniques et thermiques sont présentés, en particulier si la machine est continuellement arrêtée et redémarrée ou si la machine est fortement chargée. Il est bien connu que le courant du rotor pendant le démarrage peut être jusqu'à dix fois de courant normal à pleine charge et que les importants effets de ces courants sont représentés par de très grandes contraintes thermiques dans le circuit du rotor.

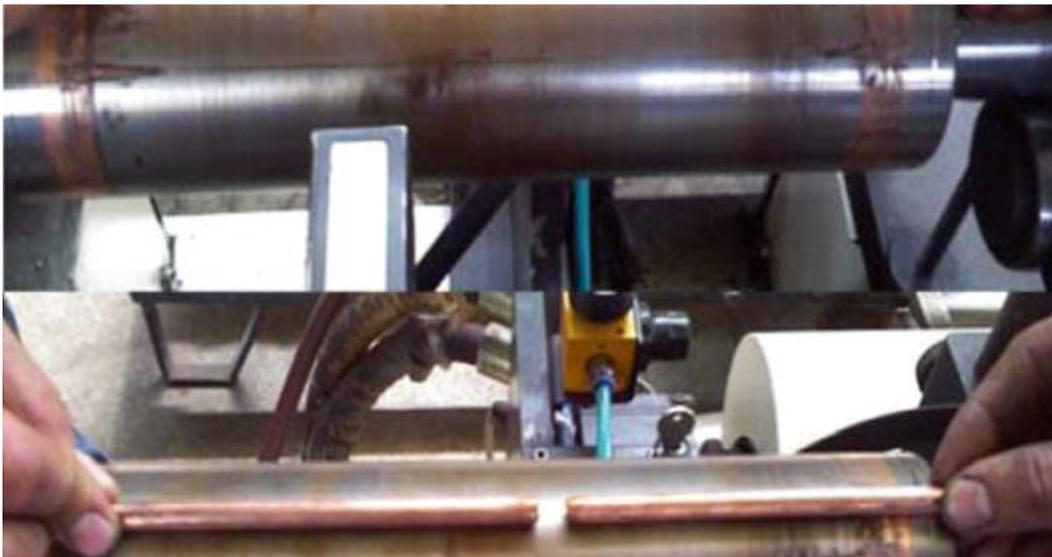


Figure I.10. Photographie du rotor et des parties cassées de la barre [16]

La période de démarrage est également caractérisée par un minimal refroidissement et des forces mécaniques maximales qui sollicitent excessivement les barres de rotor.

La barre fissurée augmentera en résistance et surchauffera à la fissure. La barre se cassera complètement et un arc se produira pendant la pause. Cet arc endommagera alors les tôles du rotor autour de la barre défectueuse. Les barres voisines porteront un courant accru et être soumis à des contraintes accrues, provoquant éventuellement la cassure de ces barres. Enfin, les barres cassées peuvent se soulever vers l'extérieur à cause des forces centrifuges et endommager l'enroulement du stator [31].

Donc les causes principales de la cassure de barre du rotor d'un moteur à induction peuvent être mentionnées comme suit:

- défauts de fabrication
- contraintes thermiques
- contrainte mécanique causée par des défauts de palier
- démarrages fréquents du moteur à la tension nominale
- en raison de la fatigue du métal de la barre de rotor.

1.4.2.3 Défauts de palier et de boîte de vitesses

Comme indiqué dans [32] EPRI (1982), les défauts de palier peuvent représenter de 42% à 50% de toutes les pannes, les roulements de moteurs peuvent coûter entre 3% et 10% du coût réel du ce moteur [33]. Les défauts associés aux roulements à billes figure (I.11) peuvent être classés dans les catégories suivantes: défauts de roulement à bague extérieur, défauts de roulement à bague intérieur et défauts à rangée de billes gardées par une cage.

Des différentes contraintes agissant sur un palier peuvent entraîner un bruit audible excessif, un fonctionnement irrégulier, une précision de travail réduite et le développement de vibrations mécaniques et par conséquent une accrue usure. Il y a plus de vingt ans, peu de défaillances de paliers étaient induites électriquement mais au début des années 90 une étude de [34] a montré que les défaillances de paliers sont environ 12 fois plus fréquentes dans les moteurs alimentés par convertisseur que dans les moteurs directs. Cependant, les problèmes mécaniques restent la principale cause de défaillance des paliers comme discuté dans [33].



Figure I.11. Roulement à billes

1.4.2.4 Les défauts d'excentricité

L'excentricité de la machine est définie comme une condition de l'entrefer asymétrique qui existe entre le stator et le rotor [35]. La présence d'un certain niveau d'excentricité est courante dans les machines électriques tournantes; certains fabricants et utilisateurs spécifient un niveau maximal admissible de 5%, alors que dans d'autres cas, un niveau maximal de 10% de la longueur d'entrefer est autorisé par les utilisateurs [36]. Cependant, les constructeurs essaient normalement de maintenir le niveau d'excentricité total encore plus bas afin de réduire les vibrations, le bruit et de minimiser la traction magnétique déséquilibrée [37].

La figure (I.12) présente les deux types d'excentricité d'entrefer: l'excentricité statique et l'excentricité dynamique.

Dans le cas d'une excentricité statique, la position de la longueur minimale d'entrefer radial est fixe dans l'espace, alors que dans le cas d'excentricité dynamique le centre du rotor n'est pas au centre de la rotation et la position de l'entrefer minimal tourne avec le rotor.

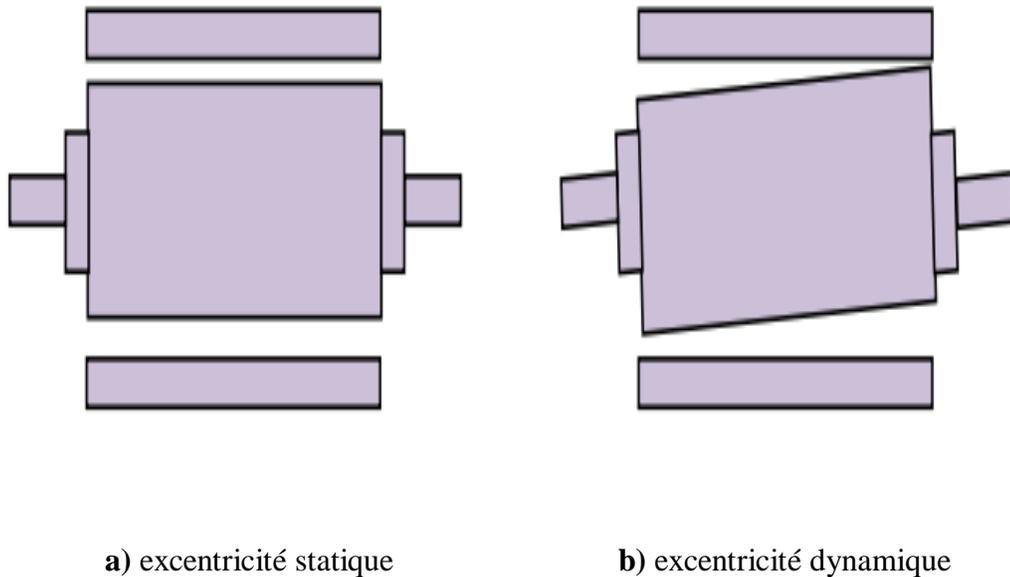


Figure I.12. Type d'excentricité

I.5 Condition de surveillance et de sa nécessité

Des statistiques donnent une idée concernant l'utilisation d'un grand nombre de moteurs à induction, mais ils ont quelques limitations dans leurs conditions de fonctionnement. Si ces conditions dépassent, une défaillance prématurée peut se produire dans le stator et / ou le rotor. Cette défaillance, dans de nombreuses applications dans l'industrie, peut même arrêter tout le processus industriel, résultant une perte de temps de production et d'argent. Par conséquent, il est important d'éviter toute défaillance du moteur à induction. Les opérateurs et les techniciens de moteurs à induction sont sous la pression continue pour empêcher les temps d'arrêt imprévus et aussi pour réduire le coût de maintenance des moteurs.

La maintenance des moteurs électriques peut se faire sous trois formes: maintenance de panne, maintenance à temps fixe et maintenance conditionnelle.

I.5.1 Maintenance de panne

Dans la maintenance de panne, la stratégie consiste à «faire fonctionner le moteur jusqu'à ce qu'il tombe en panne», ce qui signifie que des mesures de maintenance ne sont prises que lorsque le moteur tombe en panne. Dans ce cas, le moteur peut fonctionner longtemps avant que la maintenance ne soit effectuée, mais en cas de panne, il est nécessaire de remplacer toute la machine, ce qui est beaucoup plus coûteux que le remplacement ou la réparation des pièces

défectueuses du moteur. En outre, il provoque une perte de productivité en raison de temps d'arrêt.

1.5.2 Maintenance à temps fixe

Dans le cas d'une maintenance à temps fixe, le moteur doit s'arrêter pour une inspection, ce qui entraîne de longs temps d'arrêt. Des personnes formées et expérimentées techniquement sont également requises pour reconnaître correctement chaque défaut. Tous ces éléments nécessitent la maintenance conditionnelle du moteur.

1.5.3 Maintenance conditionnelle

Dans cette forme de maintenance, le moteur est autorisé à fonctionner normalement et l'action est prise dès le premier signe d'un défaut naissant [38-39]. Dans cet état et lorsqu'une anomalie a été identifiée, l'opérateur de l'installation doit disposer de suffisamment de données pour prendre la meilleure décision possible quant à la marche à suivre. Si les données sont insuffisantes, il reste un risque de mauvais diagnostic de défaut qui conduit à un remplacement inapproprié des composants, et si la racine du problème n'est pas correctement identifiée, le remplacement ou toute autre action déjà prise succombera au même sort.

Les signaux du moteur concerné sont continuellement transmis au système d'acquisition de données et la santé du moteur est continuellement évaluée pendant son fonctionnement pour lequel il est également appelé surveillance d'état en ligne du moteur, et il est donc possible d'identifier les défauts même pendant qu'ils se développent.

L'opérateur / technicien peut se préparer à la maintenance préventive et peut, à l'avance, prendre des dispositions pour les pièces de rechange nécessaires à la réparation. Ainsi, la surveillance de l'état peut optimiser le programme de maintenance et minimiser les temps d'arrêt des moteurs [9], augmentant ainsi la fiabilité du moteur. Les avantages de l'utilisation de la surveillance de l'état peuvent être mentionnés comme suit:

- Peut prédire la panne du moteur.
- Peut optimiser la maintenance du moteur.
- Peut réduire les coûts de maintenance.
- Peut réduire les temps d'arrêt de la machine.

- Peut améliorer la fiabilité du moteur.

I. 6 Synthèse des signatures spectrales des défauts de la machine asynchrone

L'analyse du courant statorique est l'une des méthodes les plus utilisées, elle est basée sur le courant du stator. Cette méthode porte l'abréviation ASCM (Analyse les Signatures de Courant du Moteur ou en anglais Motor Current Signature Analysis 'MCSA').

Nous proposons de résumer toutes les fréquences caractéristiques de chaque défaut au tableau (I.1). [68]

Avec : k : un entier, s : Glissement .

f_s : Fréquence d'alimentation statorique.

$\nu = 1, 2, 3, \dots, n_d$: l'ordre de l'excentricité

n_{os} : l'ordre des harmoniques de temps de la force magnétomotrice f_r : Fréquence de rotation du rotor.

p : nombre de pôles, n_b : nombre de bords rotoriques

Type de défaut	Signatures spectrales des défauts du Courants statoriques
Cassure de barres	$f_{cb} = (1 \pm 2ks)f_s \quad (I.1)$ <p>D'autres composantes spectrales peuvent apparaître dans le spectre du courant statorique à des fréquences données par l'expression suivante [36] :</p> $f_{cb} = \left[\frac{k}{p/2} (1-s) \pm s \right] f_s \quad (I.2)$ $\frac{k}{p/2} = 1, 3, 5, 7, \dots$
Excentricité Statique	$f_{ExcS} = \left[\left(\frac{kn_b}{p} \right) (1-s) \pm n_{os} \right] f_s \quad (I.3)$ $n_d = 0$

Excentricité Dynamique	$f_{ExcD} = \left[\left(\frac{kn_b \pm n_d}{p} \right) (1-s) \pm n_{os} \right] f_s \quad (I.4)$ $n_d = 1, 2, 3, \dots$
Excentricité Mixte	$f_{Mixte} = f_s \pm kf_r \quad (I.5)$
Bague extérieure	$f_{carac-be} = vf_s \pm kf_{be} \quad (I.6)$
Bague intérieure	$f_{carac-bi} = vf_s \pm kf_{bi} \quad (I.7)$
Cage	$f_{carac-cage} = vf_s \pm kf_{cage} \quad (I.8)$
Bille	$f_{carac-bille} = vf_s \pm kf_{bille} \quad (I.9)$

Tableau I.1. Synthèse des signatures des défauts.

I.7 Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic

Les exigences techniques ont favorisé l'avancement continu des technologies de traitement du signal telles que la transformée de Fourier rapide, la transformée de Fourier de court terme la transformée en ondelettes, etc. qui ont établi une base pour la surveillance des conditions et le diagnostic des défaillances des machines tournantes. [40-41].

La transformée de Fourier (TF) [42,43] et la transformée de Fourier de court terme (TFCT) [44,45] sont traitées comme des types de transformée de produit interne qui analysent les contenus dans le signal sur une base triangulaire prédéterminée. En tant qu'un pont entre l'analyse du domaine temporel et celle du domaine fréquentiel, la transformée de Fourier est la méthode de traitement du signal la plus utilisée [46]. Mais la transformée de Fourier ne peut pas fournir d'informations sur les caractéristiques locales dans le domaine fréquentiel et ses relations correspondantes dans le domaine temporel [46]. Pour résoudre le problème, Gabor a proposé une méthode d'analyse localisée plus efficace en temps et en fréquence, le (TFCT) et pourrait être considérée comme un spectre local du signal dans une fenêtre fixe [47]. Malgré les formidables réalisations de (TFCT) dans le diagnostic des défauts mécaniques, son

efficacité est encore entravée par la limitation inévitable de la base triangulaire unique, ce qui indique que la transformée de Fourier serait bien dans la détection de caractéristique harmonique, mais pas la caractéristique d'impulsion habituelle de défaillance de la machine rotative basée sur le principe du produit interne.

Contrairement à FT, la transformée en ondelettes (TO) a plus de choix sur la fonction de base pour correspondre à un symptôme de défaut spécifique, ce qui est bénéfique pour l'extraction de caractéristiques de défauts [48,49]. La théorie des ondelettes provient de l'idée de dilatation et de traduction et WT est aussi un type de transformée de produit interne qui analyse les contenus non stationnaires dans le signal par une base d'ondelettes prédéterminée [49]. Selon l'étude de Randall, la similitude entre la base de l'ondelette et le contenu non stationnaire des signaux joue un rôle décisif dans sa réussite [50]. De plus, en raison de l'avantage de l'analyse multi-résolution, la TO a déjà montré son utilité dans le diagnostic des défaillances des machines tournantes [51]. Traditionnellement, la transformée en ondelettes peut être catégorisée en tant que transformée en ondelettes continue (TOC), transformée en ondelettes discrète (TOD) et transformée par paquets d'ondelettes (TPO) [52]. Cependant, toutes ces méthodes de transformée en ondelettes sont piégées dans la sélection de la base d'ondelettes car une base d'ondelettes inappropriée employée dans une application influencera directement la précision du diagnostic de défaut, en particulier pour le diagnostic de fautes faibles.

Lifting scheme (LS), initialement proposé par Sweldens, se révèle être un moyen flexible et systématique de construire une base d'ondelettes de deuxième génération, qui est également basée sur les ondelettes dyadiques [53]. Une base d'ondelettes biorthogonales est une ondelette où la transformée en ondelettes associée est inversible mais pas nécessairement orthogonale. La conception d'ondelettes biorthogonales permet plus de degrés de liberté que les ondelettes orthogonales. Un degré supplémentaire de liberté est la possibilité de construire des fonctions d'ondelettes symétriques [53]. En raison de la construction dérivée dans le domaine temporel et ne reposant pas sur le TF comme outil de conception pour l'ondelette, LS fournit beaucoup plus de flexibilité et de liberté pour la construction d'ondelettes biorthogonales [54]. De plus, il peut être utilisé pour construire des ondelettes adaptatives via la conception d'un opérateur de prédiction et d'un opérateur de mise à jour [54]. L'étape de prédiction sur la base de l'opérateur de prédiction fournit le signal de détail, qui montre la différence entre le signal d'origine et le

résultat de prédiction et l'opérateur de mise à jour produit un signal d'approximation, qui offre une représentation générale du signal original [54].

Comparé à la transformée en ondelettes classique, le schéma de lifting présente également plusieurs autres avantages, par exemple simple, moins de calcul et de mémoire, des échantillons irréguliers et des transformations en ondelettes entières à entières [55]. Malgré les avantages de TOD dans le diagnostic des défaillances mécaniques, son efficacité est en effet entravée par quelques limitations inévitables [56]. Une base d'ondelettes unique qui est sélectionnée pendant TOD ne peut pas extraire les caractéristiques avec plusieurs types de formes, ce qui conduit à échouer dans le diagnostic des défauts composés des machines tournantes. Mais en fait, en raison de la corrélation des structures et de la complexité de l'équipement, la pratique de l'ingénierie indique puissamment que les défauts apparus dans les machines tournantes apparaissent généralement comme la faute composée.

I.8 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous nous sommes intéressés à répertorier (synthèse bibliographique) les principales défaillances qui peuvent affecter les différentes parties de la machine asynchrone. L'objectif du diagnostic est l'identification des défauts d'un système à partir de l'étude de leurs effets occasionnés. Le diagnostic s'inscrit dans les solutions de surveillance des systèmes dans le but de prendre les décisions adéquates quant à leurs poursuites de fonctionnement suite à des défauts apparus et diagnostiqués ; ces décisions adéquates pouvant aller de la poursuite en fonctionnement normal ou de la mise en mode dégradé, si seules les performances du système sont impactées, à la mise à l'arrêt du système si sa sécurité ou celle de son environnement sont impactées.

Chapitre II:

Résultats expérimentaux dédiés

à l'analyse des défauts de

roulement par la TOD

II.1 Introduction

La transformée en ondelette (TO) "Wavelet Transform" sous l'abréviation anglaise (WT) est un puissant outil d'analyse d'un signal qui a été utilisé avec succès dans de nombreuses domaines pendant plus d'une décennie. C'est une transformation d'un signal d'une forme à une autre, cela ne change pas le contenu d'information présent dans le signal. L'analyse multi-résolution MRA est l'une des branches les plus actives de la théorie de la transformée en ondelettes (WT). Cette analyse fournit un moyen efficace d'examiner les caractéristiques d'un signal à différentes bandes de fréquence. Cette fonctionnalité peut être essentielle pour la reconnaissance de formes. D'où il va bien adapter aux problèmes d'identification et de classification des défauts dans un moteur à induction. La transformée en ondelettes présente une représentation temps-fréquence du signal.

La transformée de Fourier à court terme (TFCT) ou transformée de Fourier locale (en anglais Short-Time Fourier Transform (STFT)) donne une résolution constante à toutes les fréquences, tandis que la transformée en ondelette utilise une technique multi-résolution par laquelle les différentes fréquences sont analysées avec différentes résolutions. La transformée en ondelettes a été développée pour surmonter la transformée de Fourier à court terme (TFCT), qui peut également être utilisée pour analyser les signaux non-stationnaire. Récemment, les applications des transformées en ondelettes dans la détection et le diagnostic de défauts du moteur à induction ont été présentés dans [57, 58 et 59]. Dans [60], la technique de la transformée en ondelettes discrète est appliquée à diagnostic de l'état du moteur à induction en utilisant des courants statoriques transitoires. L'approche est basée sur l'identification des motifs caractéristiques introduits par les composantes de défaut dans les signaux d'ondelettes obtenu à partir de la transformée en ondelettes discrète des courants statoriques transitoires.

Un nouvel algorithme pour l'analyse de signature de courant de moteur utilisant des ondelettes a été présenté dans [61]. Dans ce chapitre, on va étudier la technique de l'ASCM-TOD par l'exploitation de courant statorique qui est utilisée pour l'analyse et la détection de défaut de roulement soit le défaut de la bague extérieure ou le défaut de la bague intérieure.

II. 2 Motivation de l'utilisation de la transformation en ondelettes discrète

L'analyse multi-résolution d'ondelettes (en anglais MRA) est une puissante et nouvelle méthode d'analyse de signal bien adapté aux signaux générés par défaut [63 ,64 ,65]. Le fenêtrage de la transformée en ondelettes est ajusté automatiquement pour les basses et hautes fréquences, c'est-à-dire qu'il utilise des intervalles de courts temps pour les composants à haute fréquence et intervalles de longs temps pour les composants à basse fréquence, par conséquent, chaque fréquence des composants sont traités de la même manière sans nécessiter de réinterprétation des résultats cela donne à la transformée en ondelettes un support beaucoup plus important pour l'analyse des signaux avec des composants transitoires localisés. La localisation temps-fréquence signifie que les coefficients d'ondelettes plus énergétiques sont localisés, ceci est utile pour l'extraction de caractéristiques. Il est bien adapté pour le problème de localisation des défauts dans les machines électriques.

La transformée de Fourier a été l'outil principal d'analyse dans le domaine fréquentielle dans beaucoup d'applications. Cependant, elle ne peut pas fournir des informations temps-fréquence précises d'un signal, car cette dernière n'est valable que pour les signaux stationnaire dans leur composant fréquentielles inchangés au court du temps, contrairement aux signaux de défaut qui sont d'une façon générale non stationnaire. Ce problème est en partie résolu par la transformée de Fourier de court terme, où la base de fonction est localisée en multipliant avec une fenêtre temporelle centrée à des instants différent. STFT peut décrire les composantes de fréquence d'un signal à un moment donné. Néanmoins, en tant que fenêtre est utilisée pour toutes les fréquences, la résolution de la STFT ne peut pas varier pour différentes fréquences. Dans la transformée en ondelettes contrairement à la STFT, la longueur de la fenêtre est immobile ce qui est particulièrement décrit dans de nombreuses applications.

II.2.1 La transformée en ondelettes

L'expression du mot *ondelette* signifie une fonction à la base de la décomposition en ondelettes, décomposition similaire à la transformée de Fourier à court terme, utilisée dans le traitement du signal. Les ondelettes des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties qui sont en même temps satisfont la nécessité de localisation temporelle et

Chapitre II : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la TOD

fréquentielle, elles sont localisées en temps (par translation) et en fréquence (par dilatation). Le signal peut être donc reproduit avec précision en utilisant l'analyse par ondelettes [66].

II.2. 1.1 La transformée en ondelettes continue TOC

Une transformée en ondelettes est dite continue lorsque les paramètres structurels (les translations et les dilatations) des fonctions utilisées peuvent prendre n'importe quelle valeur de l'ensemble des réels R (les dilatations doivent néanmoins être positives). [67]

On définit ainsi la transformée en ondelette continue (TOC) d'une fonction f (appartient à $L^2(R)$) par :

$$W_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle \quad (\text{II.1})$$

Où le symbole \langle, \rangle correspond au produit scalaire dans $L^2(R)$.

Avec $\psi_{a,b}$ de $L^2(R)$ est une ondelette de la famille d'ondelettes:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{a^{1/2}} \psi\left(\frac{1}{a}(x-b)\right) \quad (a,b) \in R^2 \quad (\text{II.2})$$

ψ : Appelée ondelette mère c'est une fonction de base d'énergie finie (appartient à $L^2(R)$).

Les coefficients a et b désignent respectivement le facteur d'échelle pour la dilatation de ψ et les paramètres de translation, ce qui correspond à un changement de phase dans le domaine de Fourier.

En utilisant l'identité de Parseval, on peut aussi l'écrire par :

$$W(a,b) = (2\pi)^{-1} \langle \hat{f}, \hat{\psi}_{ab} \rangle \quad (\text{II.3})$$

Si l'ondelette ψ satisfait la condition d'admissibilité suivante :

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(w)|^2}{w} dw < +\infty \quad (\text{II.4})$$

Où $\hat{\psi}$ est la transformée de Fourier de ψ .

Alors la transformée en ondelette continue $W(a,b)$ admet une inverse donnée par la relation :

$$f(x) = \frac{1}{C_\psi} \int_{\mathbb{R}^2} W_f(a,b) \psi_{a,b}(x) \frac{da}{a^2} db \quad (\text{II.5})$$

Nous remarquons que la TOD convertie une fonction à une variable en une fonction à deux variables. La représentation d'une fonction par sa TOD est redondante et la transformée inverse n'est pas toujours unique. De plus, toutes les fonctions $W(a,b)$ ne sont pas forcément la TOD de la fonction f .

L'avantage de cette caractérisation par rapport à la transformée de Fourier est qu'elle ne donne pas seulement une information sur le type de singularité mais aussi sa localisation dans le temps.

II.2. 1.2 La transformée en ondelettes discrète TOD

Dans le cas discret, nous choisissons de restreindre les valeurs des paramètres a et b à une grille discrète. Dans ce cas nous fixons un pas de dilatation $a_0 > 1$ et $b_0 > 0$ et en posant $a = a_0^m$ et $b = nb_0 a_0^m$ avec m et $n \in \mathbb{Z}$. Les bases d'ondelettes sont définies par les fonctions [68].

$$\psi_{m,n}(x) = a_0^{-\frac{m}{2}} \psi(a_0^{-m}x - nb_0) \quad (\text{II.6})$$

Par suite, la décomposition en ondelettes et la transformée inverse sont déterminées par les équations suivantes :

$$W_f(m,n) = \langle f, \psi_{m,n} \rangle = \int_{\mathbb{R}} f(x) \psi_{m,n}^*(x) dx \quad (\text{II.7})$$

$$f = \sum_{(m,n) \in \mathbb{Z}^2} W_f(m,n) \psi_{m,n} \quad (\text{II.8})$$

Ainsi, la transformée en ondelette associée à la fonction $f \in L^2(\mathbb{R})$ est un ensemble discret de coefficient $W_f(m,n)$.

Chapitre II : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la TOD

Yves Meyer [69] a construit une transformée en ondelette dyadique pour laquelle $a_0=2$ et $b_0=1$, a montré que pour des fonctions particulières ψ de $L^2(\mathbb{R})$, la famille :

$$\psi_{m,n}(x) = 2^{-\frac{m}{2}} \psi(2^{-m}x - n) \quad \forall (m,n) \in \mathbf{Z}^2 \quad (\text{II.9})$$

$\psi_{m,n}$ Constitue une base orthonormée de $L^2(\mathbb{R})$.

Le schéma de codage en sous-bandes est utilisé depuis longtemps en traitement du signal: on décompose un signal C_{j+1} en deux composantes, l'une qui contient les basses fréquences C_j , l'autre qui contient les hautes fréquences d_j . Par similarité le filtre h_0 est le filtre passe-bas, et le filtre h_1 est le filtre passe-haut. Pour la reconstruction, on utilise les filtres \tilde{h}_0 et \tilde{h}_1 .

La figure (II.1) représente le schéma de codage.

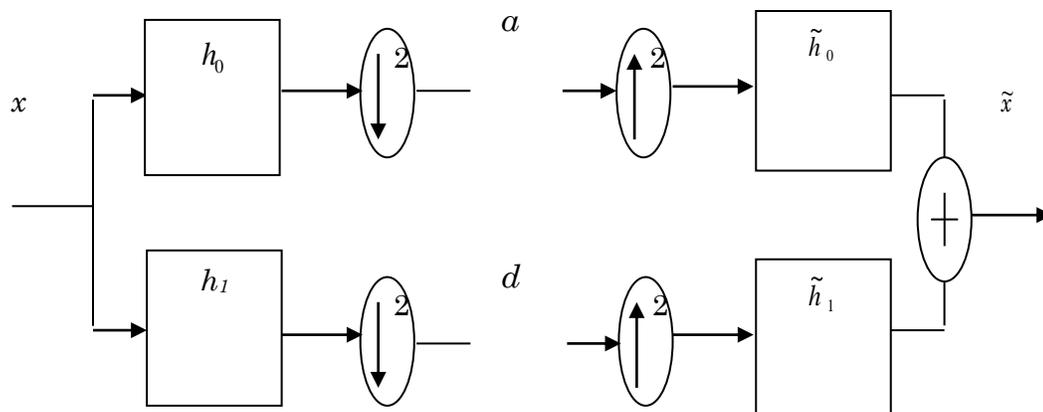


Figure II.1. Banc de filtres d'analyse-synthèse.

II.3 Identification des défauts basée sur la TOD

Pour le diagnostic des défauts de roulement d'un moteur à induction par l'exploitation de courant statorique. La figure (II.2) montre un schéma avec les étapes à suivre en application de la méthodologie basée sur la transformée en ondelettes discrète (TOD)

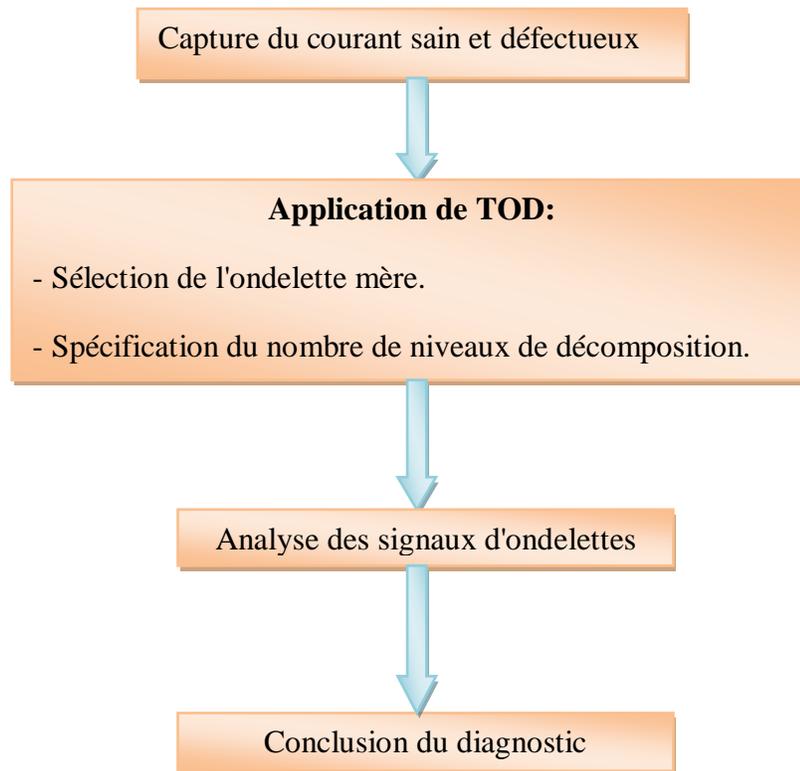


Figure II.2. Organigramme de la méthodologie de diagnostic basée sur la TOD

II.3.1 Capture des courants de phase dans des conditions saines et défectueuses

La première étape à effectuer pour le diagnostic de défauts par les ondelettes discrètes consiste à capturer le courant dans les différentes conditions d'un moteur à induction. Prend en considération, lors de la capture du signal de courant, la fréquence d'échantillonnage f_e joue un rôle important, il faut tenir compte le critère de Nyquist $f_e > 2f_{\max}$ avec f_{\max} est la fréquence maximale générée par les défauts importants, une fréquence d'échantillonnage très élevée n'est pas obligatoire pour l'application de la méthode, puisque la plupart des composants de défaut importants se trouvent généralement dans la région des basses fréquences. Notre acquisition des données a été effectuée par une fréquence d'échantillonnage de 10 KHz et un temps d'acquisition de 10 s. Ces fréquences d'échantillonnage permettent de bonnes analyses de résolution.

II.3.2 Application du (TOD)

Avant l'application de la transformée en ondelettes discrète (TOD), nous devons d'abord sélectionner le type d'ondelette mère et le nombre de niveaux de décomposition.

II.3.2.1 Sélection de l'ondelette mère

Une étape importante est la sélection de l'ondelette mère pour effectuer l'analyse. L'ondelette mère sélectionnée est liée aux coefficients des filtres utilisés dans le processus de filtrage inhérent au TOD [70, 71]. Il existe plusieurs familles d'ondelettes avec des propriétés mathématiques différentes [72]. Ces ondelettes sont des ondelettes à support infini (Gaussian, Mexican Hat, Morlet, Meyer, etc.) et des ondelettes à support compact (ondelettes orthogonales telles que Daubechies ou Coiflet, ondelettes biorthogonales), etc. Dans le domaine du diagnostic des défauts d'un moteur à induction, certaines familles ont montré de meilleurs résultats pour des applications particulières.

Cependant, il convient de noter que, dans le cas d'ondelettes à support compact, une fois la famille d'ondelettes sélectionnée, il est conseillé d'effectuer le traitement par ondes en utilisant une ondelette mère de haut niveau; c'est une ondelette avec un filtre associé avec un grand nombre de coefficients. Si une ondelette de rang inférieur est utilisée, la réponse en fréquence s'empire et le chevauchement apparaît entre les bandes de fréquence adjacentes.

Le choix de la meilleure ondelette reste un problème, il dépend de l'application. Une ondelette peut être optimale pour certaines applications et mauvaise pour d'autres. L'analyse du choix de l'ondelette mère a été effectuée sur la base des tests. Le choix est basé sur l'appréciation de l'erreur qui existe entre le signal d'origine (référence) et le signal calculé.

Les ondelettes de Daubechies avec des commandes supérieures à 20 ont montré des résultats satisfaisants. Dans notre cas, nous avons utilisé Daubechies -44 comme ondelettes mères pour les analyses de TOD.

II.3.2.2 Spécification du nombre de niveaux de décomposition

Le nombre de niveaux de décomposition est déterminé par les composantes basses fréquences. La bande de fréquence extraite devient plus faible si le nombre de niveaux de décomposition du TOD augmente comme c'est indiqué dans le tableau (II.1).

niveaux	Signal	Bande de fréquence de $f_e = 10000 \text{ Hz}$
d_1	signal de détail	2500-5000
d_2		1150-2500
d_3		575-1150
d_4		287,5-575
d_5		143,75-287,5
d_6		71,87-143.75
d_7		35.87-71.875
a_7	signal d'approximation	0-35.87

Tableau II.1. Bandes fréquentiel : signal décomposé en ondelettes

Typiquement, pour l'extraction des composantes de fréquence provoquées par les asymétries de rotor ou même des excentricités, le nombre de niveaux de décomposition doit être égal ou supérieur à celui du signal de détail contenant la fréquence fondamentale. Ce nombre de niveaux de décomposition n_f est donné par [72].

$$n_f = \text{integer} \left[\frac{\log \left(\frac{f_e}{f_s} \right)}{\log(2)} \right] \quad (\text{II.10})$$

Par exemple, en considérant $f_e = 10000 \text{ Hz}$ et $f_s = 50 \text{ Hz}$, l'application de (II.10) conduit à $n_f = 7$.

Une fois l'ondelette mère et le nombre de niveaux de décomposition sélectionnés, il est possible d'effectuer le TOD du signal analysé donc l'indicateur du défaut peut se trouver dans n'importe quel niveau et détail.

II.3.3 Analyse des signaux d'ondelettes

L'étape suivante consiste à étudier les signaux d'ondelettes issus du TOD. Deux types d'analyses différents et complémentaires doivent être effectués, à savoir une analyse qualitative et une analyse quantitative.

II.3.3.1 Analyse qualitative:

L'analyse qualitative a pour but de détecter la présence des motifs caractéristiques provoqués par l'évolution des composantes de défaut entre les spires du stator pendant le défaut de roulement par des oscillations apparaissant dans les signaux d'ondelettes. Plus précisément, cette étape comprend trois phases décrites comme suit :

II.3.3.1.1 Analyse physique :

Afin de déterminer l'évolution transitoire théorique des composants liés aux défaillances à détecter. L'évolution sera justifiée en amplitude et en fréquence.

II.3.3.1.2 Détermination des bandes de fréquences :

Chaque signal analysé par d'ondelette reproduit sont évolution dans la bande fréquentielle correspondante qui lui associée. Par conséquent, connaissant ces bandes permet de détecter la présence de la composante liée aux pannes à travers les oscillations apparaissant dans les signaux d'ondelettes couvrant les bandes fréquentielles. Ces oscillations seront arrangées de

Chapitre II : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la TOD

manière caractéristique, en fonction de variation de l'amplitude et de la fréquence de la composante de défaillance.

II.3.3.1.3 Détermination du type de défaut :

La détermination du type de défaut dépend du composant caractéristique résultant des oscillations dans le signal analysé par ondelette.

II.3.3.2 Analyse quantitative:

Une fois l'état de la machine préalablement diagnostiquée, en utilisant l'identification qualitative des composants caractéristiques, il convient de calculer les paramètres de quantification définis pour le défaut correspondant afin d'évaluer le degré de défaillance de la machine.

Ces paramètres peuvent également être utilisés pour générer des signaux d'alerte dans des systèmes surveillés non supervisés. Bien que les alertes basées sur des paramètres quantitatifs ne soient pas aussi fiables que l'identification d'un modèle caractéristique, elles ont l'avantage d'être beaucoup plus faciles à mettre en œuvre.

II.3.4 Conclusion du diagnostic

Une fois que les schémas qualitatifs associés à un défaut particulier ont été détectés et que la gravité de l'échec a été quantifiée, la conclusion du diagnostic peut être atteinte.

II.4 Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement « la bague intérieure »

Dans cette section, la transformée en ondelettes discrète est utilisée pour diagnostiquer la machine à induction dans des conditions de fonctionnement saines et défectueuses (à vide et en charge). Une interprétation détaillée des signaux résultant du traitement par la TOD est fournie pour chaque cas. Pour chaque mode de fonctionnement, plusieurs enregistrements ont été réalisés.

II.4.1 Défauts de roulement

Généralement, un roulement à éléments roulants est un arrangement de deux bagues concentriques avec un ensemble de billes où les rouleaux tournent dans les chemins de roulement entre la bague intérieure et la bague extérieure. Les défauts de roulement [73,74, 75, 76] peuvent être classés comme «distribués» ou «locaux». Les défauts distribués incluent les désalignements des bagues, les ondulations, rugosité de surface et éléments de roulement hors dimensions. Les défauts localisés comprennent des éclats, des piqûres et des fissures sur les surfaces de roulement. Ces défauts localisés créent une série de vibrations d'impact au moment où un rouleau en mouvement passe sur la surface d'un défaut dont la période et l'amplitude sont calculées en fonction de la position, de la vitesse et de la dimension du roulement de l'anomalie.

Les dimensions des roulements et la vitesse de rotation de la machine permettent de déterminer les fréquences caractéristiques associées aux chemins de roulement et aux billes ou aux rouleaux. Le type de roulement dans notre étude est les roulements à billes qui sont constitués de quatre éléments : une bague externe, une bague interne et une rangée de billes gardées par une cage, ainsi que de la graisse pour un mouvement souple.

Le roulement de notre machine a une bague extérieure fixe en contact avec le stator, et une bague intérieure tournante en contact avec le rotor. Par ailleurs, les billes sont en contact avec les deux pistes des deux bagues.

II.4.1.1 Défaut de la bague intérieure du roulement:

L'objectif visé est la détection du défaut de la bague intérieure par la transformée de lifting adaptative du courant statorique, ce défaut est créé comme le représente la figure (II.3).

Le défaut de roulement apparaît dans la plupart des cas par des bruits, des ondulations sur le contour de la surface des billes, par différentes causes. Le défaut de roulement de la bague intérieure est l'un des défauts qui cause un problème au : couple, vitesse de rotation et le courant statorique.



Figure. II.3. Photos d'un roulement défectueux dans la bague intérieure.

En effet, les fréquences présentées dans ce spectre sont principalement les rayons du spectre liés à la fréquence du défaut de la bague intérieure par:[77]

$$f_{carac-b\ int} = |vf_s \pm kf_{b\ int}| \quad (II.11)$$

Avec $f_{carac-b\ int}$ est la fréquence caractéristique du défaut de la bague intérieure dans le spectre du courant du stator. f_s : la fréquence d'alimentation statorique et $f_{b\ int}$: la fréquence caractéristique du défaut de la bague intérieure.

$$f_{carac-b\ int} = |vf_s \pm kf_{b\ int}|$$

$$f_{b\ int} = 0.6N_b \cdot f_r$$

$$f_{carac-int} = f_s + 0.6N_b \cdot f_r \quad (II.12)$$

II. 4. 2 Les détails du Banc d'essai expérimental

Dans notre cas, Le banc d'essai expérimental figure (II.4) a été réalisé au sein du laboratoire de génie électrique Biskra (LGEB).Le moteur utilisé dans l'étude expérimentale est appliqué pour analyser des courants, des tensions ou du couple.

L'expérimentation a nécessité un banc d'essai composé essentiellement d'un moteur asynchrone à cage. [78]

Chapitre II : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la TOD

Le moteur asynchrone de l'expérimentation est caractérisé par :

- La tension nominale entre phase : 380 V
- La fréquence d'alimentation : 50 Hz
- Le nombre de paires de pôles : $p = 2$
- Le nombre d'encoches au rotor : 28
- Le nombre d'encoches au stator : 36
- La puissance nominale : 3kw
- Les enroulements au stator sont couplés en étoile.

L'acquisition des signaux pour le diagnostic par un capteur de courant relié à un oscilloscope. Cet appareil permet l'acquisition du signal avec une fréquence d'échantillonnage de 10 KHz à un temps d'acquisition de 10 s. La visualisation du signal sur l'écran du PC, se fait à l'aide d'un logiciel. Le courant statorique est acquis au moyen de la carte d'acquisition en temps réel DSPACE DS1104 intégrée à l'oscilloscope. Le traitement des données est fait en utilisant le logiciel MATLAB à des fins d'analyse des signaux.



Figure. II.4. photo du banc d'essai expérimental

Les signaux ont été relevés, lors des différents modes de fonctionnement, à l'aide d'un système d'acquisition.

La figure (II.5) représente le schéma électrique du dispositif :

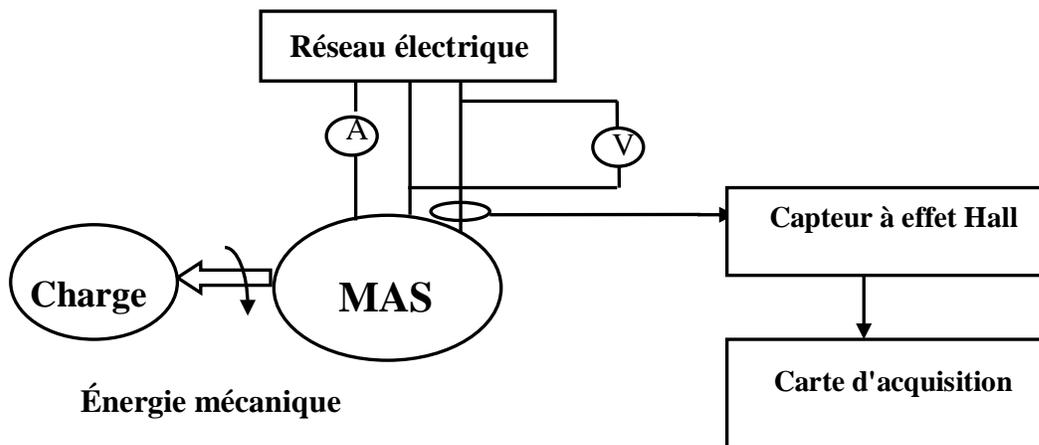


Figure. II.5. Schéma électrique de principe de l'acquisition des signaux

Toutes les acquisitions ont été réalisées en régime permanent sur une durée de 10 secondes, avec une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz. Soit 100.000 points pour chacun des signaux mesurés.

II.5. La technique d'ondelettes pour les défauts de roulement de la bague intérieure

Figures (II.6) et (II.7) montrent le courant statorique sain et défectueux (signal original) et les signaux résultant du TOD de défaut de la bague intérieure à vide et en charge c'est-à-dire le signal d'approximation (a7), et les signaux de détail (d1... d7).

Le signal d'approximation a7 ne montre aucun motif pertinent une fois que l'oscillation initiale due au transitoire électromagnétique est éteinte. Cela signifie qu'il n'y a pas de composantes basses fréquences significatives (inférieurs à 35,87 Hz) dans le signal.

Le signal de détail d7 reproduit pratiquement le courant en bonne santé analysé. En effet, pour la fréquence d'échantillonnage utilisée, la bande de fréquences correspondant à ce signal est [35.87, 71.87] Hz (voir tableau II.I) est inclut donc la composante fondamentale du courant.

L'étude et l'analyse dans cette partie s'intéressent à l'effet du défaut de la bague intérieure dans les machines asynchrones en utilisant la technique de la TOD.

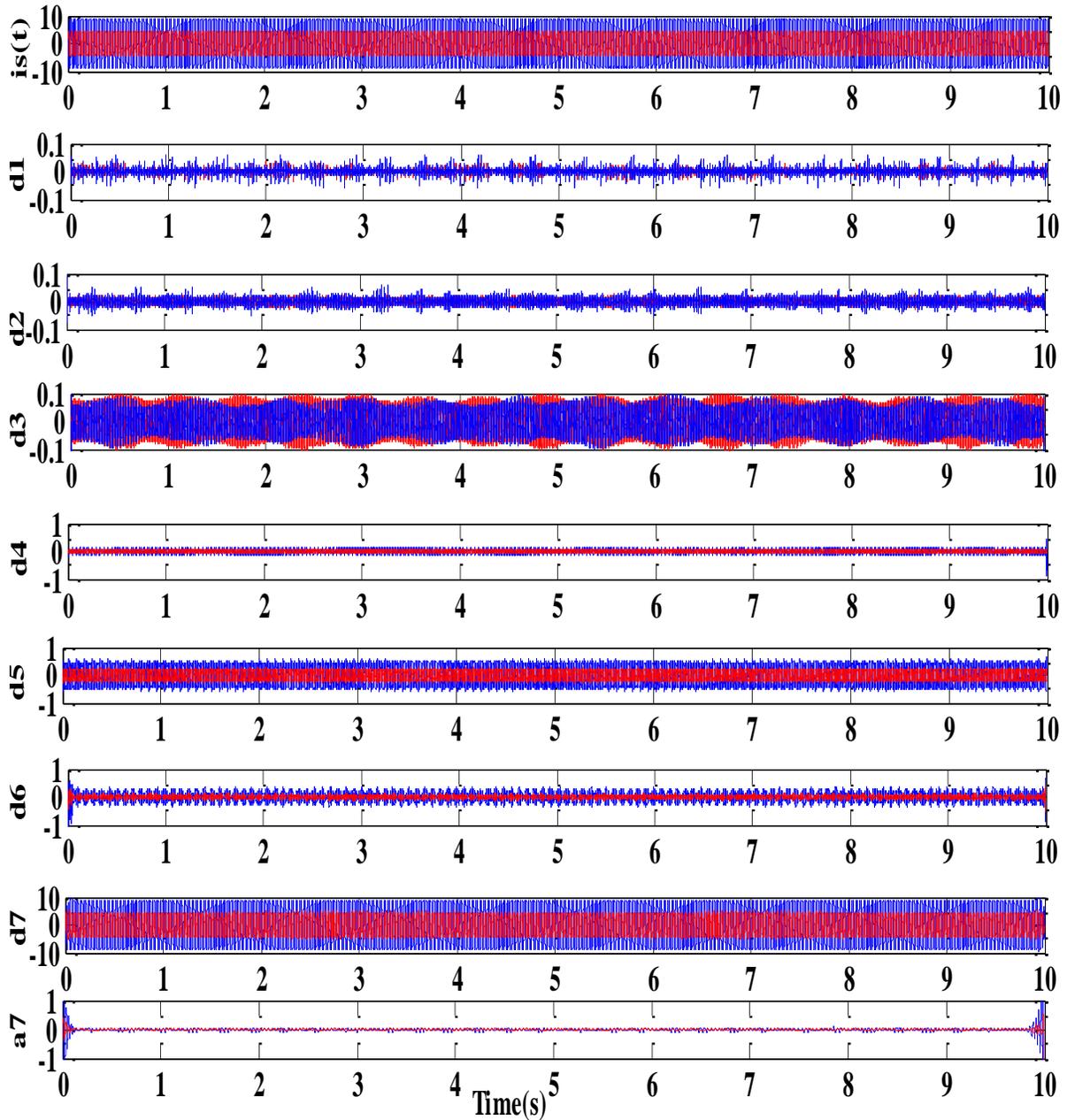


Figure. II.6. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement à vide (bague intérieure) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

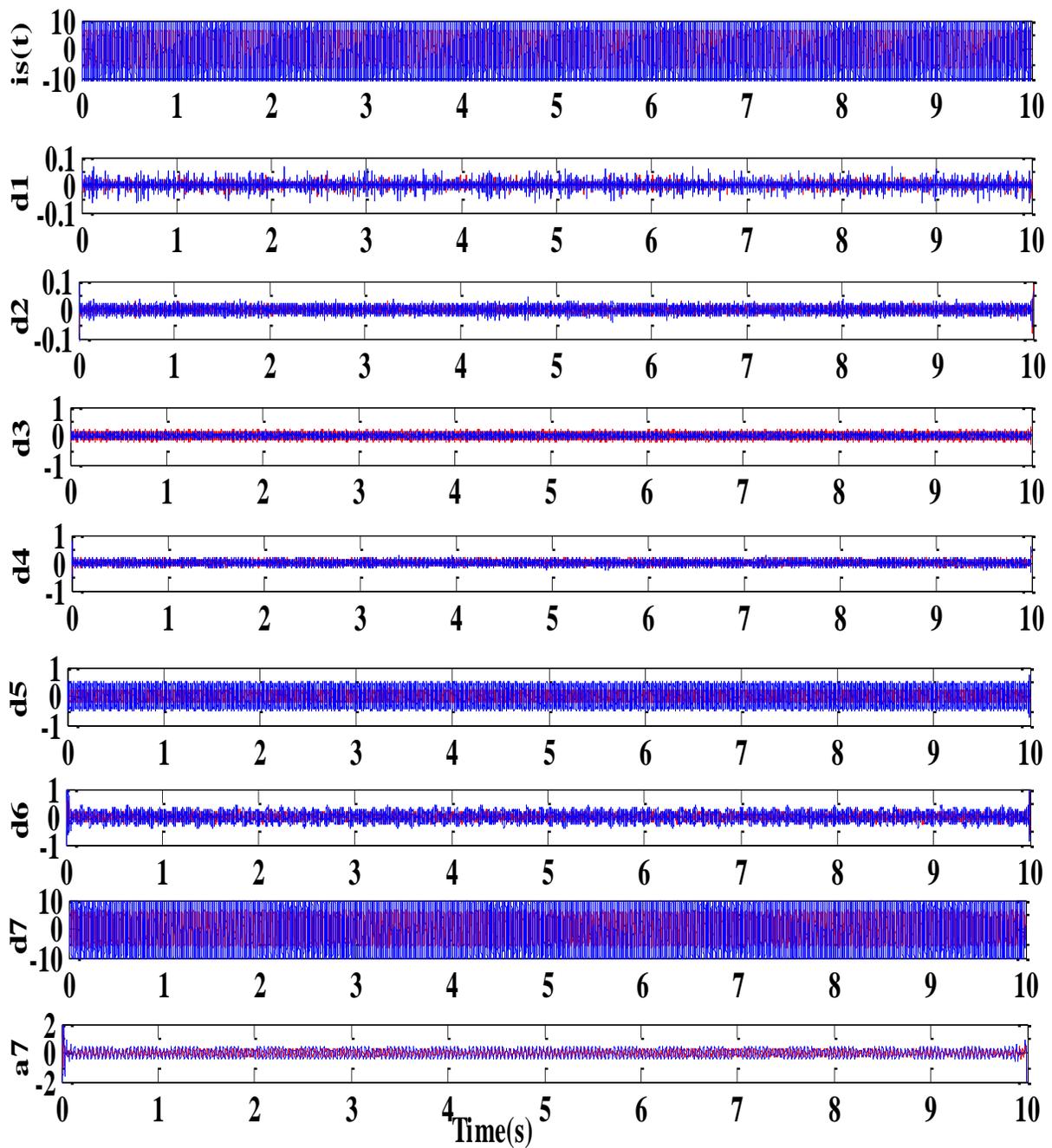


Figure. II.7. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement en charge (bague intérieure) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

Chapitre II : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la TOD

Puisque notre étude est une étude fréquentielle et à partir de la variation d'énergie on peut sélectionner les détails qui contiennent les fréquences de défaut de la bague intérieure.

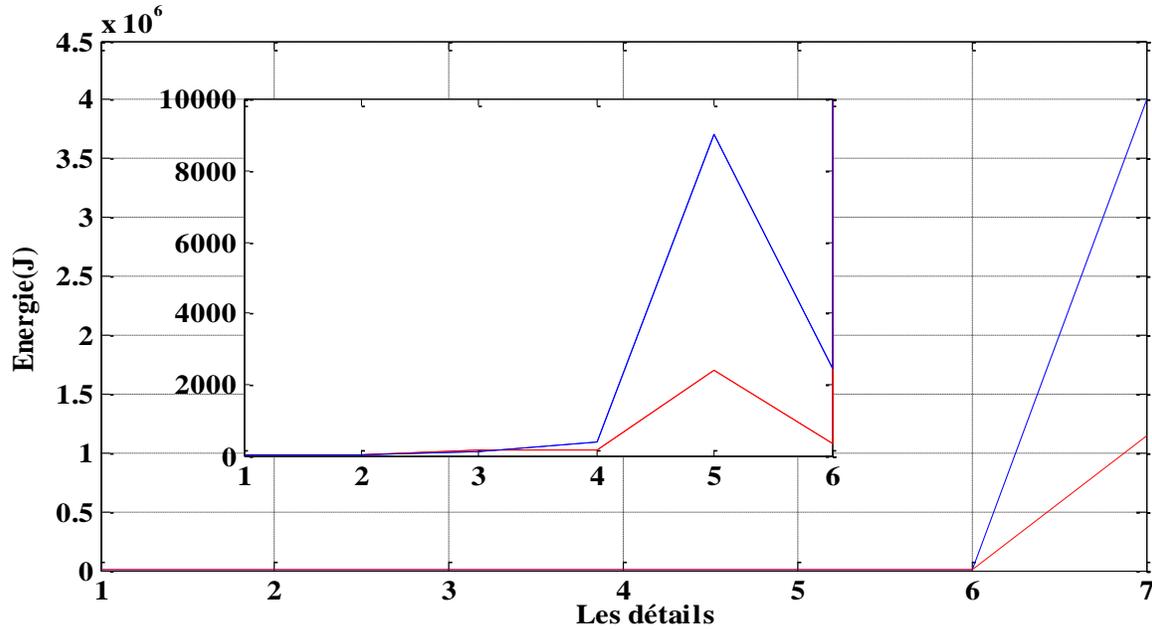


Figure. II.8. variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide

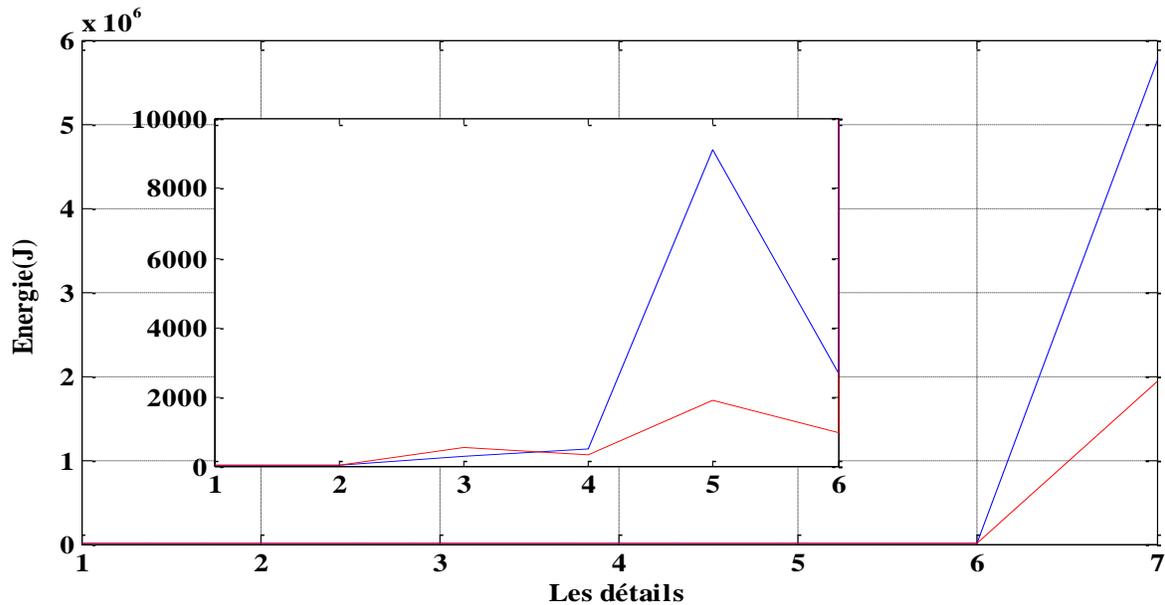


Figure. II.9. variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge

Chapitre II : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la TOD

Figure (II-8) et (II-9) montrent la variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide et en charge.

Les oscillations entraînent une augmentation de l'énergie des signaux d'ondelettes impliqués, qui peuvent servir de base pour définir les paramètres de quantification de la gravité du défaut.

Nous analysons le détail 5 les caractéristiques de défaut de fréquences du signal on utilisant la TOD.

Pour faire un bon diagnostic, on peut passer à l'analyse spectrale pour confirmer les signatures du défaut.

Le signal de détail d5 reproduit pratiquement le courant de défaut de la bague intérieure du stator du moteur à induction analysé figure (II-10) et (II-11). En effet, pour la fréquence d'échantillonnage utilisée, la bande de fréquences correspondante à ce signal est donc la quel [143.75-287.5] Hz.

L'observation des deux spectres montre l'efficacité de la méthode de diagnostic appliquée. Les fréquences caractéristiques de défauts ont été calculées en fonction de l'équation (II.11) et (II.12).

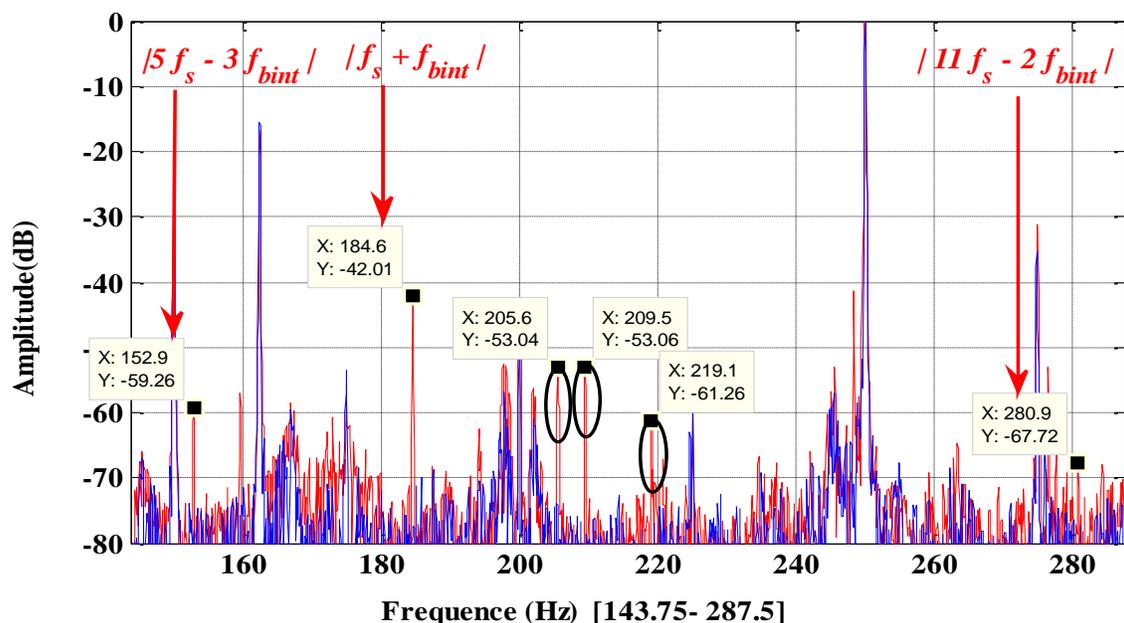


Figure. II.10. Le détail d5 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par TOD à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence: 143.75-287.5 Hz.

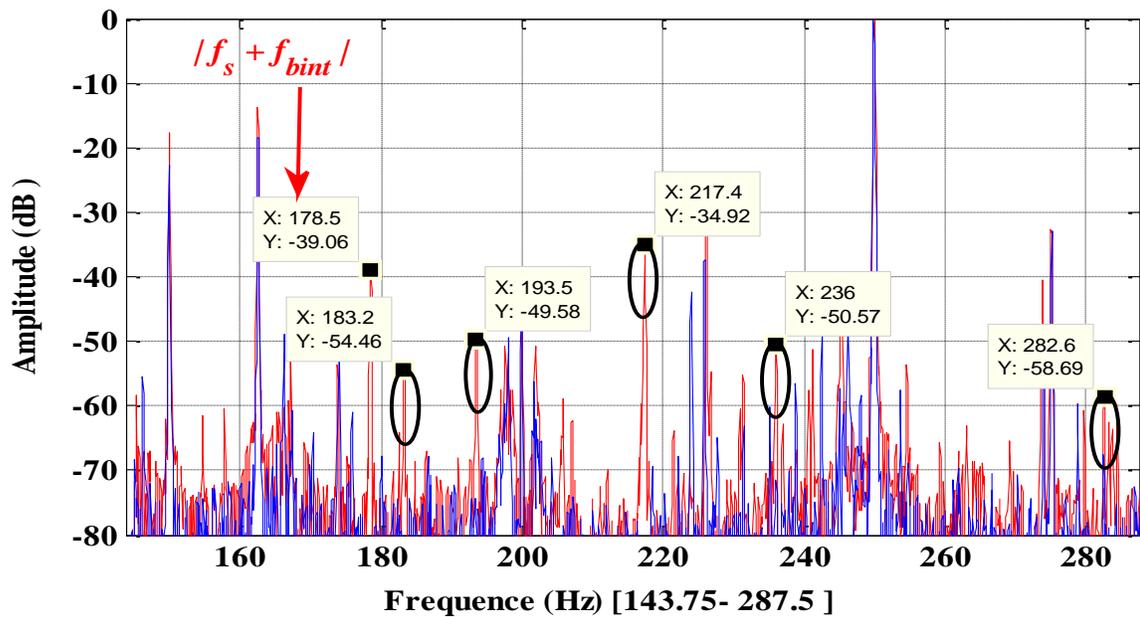


Figure.III.11. Le détail d6 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par TOD en charge ($s=0.04$) pour la bande de fréquence: 143.75-287.5 Hz

D'après le spectre présenté dans les figures, on peut vérifier les harmoniques les plus importants comme un exemple:

$$f_{carac-b\ int} = f_s + 0.6N_b \cdot f_r$$

$$f_s = 50 \text{ Hz}, N_b = 9, f_r = \frac{1-S}{P} \cdot f_s = 24.9 \text{ Hz parce que } (S=0.004) \text{ et } P=2, f_r = 134.46 \text{ Hz}$$

$$f_{carac-b\ int} = 50 + (0.6).9.(24.9)$$

$$\text{Donc } f_{carac-int} = 184.46 \text{ Hz}$$

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, la technique de transformation en ondelettes discrète est appliquée pour localiser les défauts de roulement de stator d'un moteur à induction. Cette technique est basée sur l'analyse des courants de phase de stator dans des conditions saines et défectueuses. En utilisant l'analyse de transformée en ondelettes discrète utilisant daubechies -44 comme ondelette mère, les signaux d'approximation et les signaux de détail des motifs de défaut de la

Chapitre II : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la TOD

machine sont générés. A partir de ces signaux, la gravité de la condition de défaut peut être déterminée.

Dans l'analyse TOD en utilisant et par la phase de stator, il est évident que les machines soumises à un défaut peuvent être diagnostiquées à l'aide des caractéristiques provoquées par les composants de défaut de la bague intérieure. Les oscillations après le transitoire initial ne sont pas observées en cas de condition saine, mais certaines oscillations après le transitoire initial sont notifiées en cas de condition défectueuse. Ainsi, l'étude de l'analyse et les résultats présentés dans ce travail prouvent l'efficacité de la technique de transformation en ondelettes discrète dans le diagnostic des défauts moteurs à induction.

Chapitre III:

Résultats expérimentaux dédiés

à l'analyse des défauts de

roulement par la

Transformée de lifting

adaptative

III.1 Introduction

Les ondelettes de deuxième génération est considéré comme une implémentation alternative de la TOD classique. Plus précisément, le mécanisme de construction d'une fonction d'ondelettes à partir de la translation et la dilatation d'une fonction fixe est remplacé par l'utilisation de la fonction de lifting qui est une technique générale et flexible [80].

Le but du schéma lifting SL, introduit par Sweldens [81], qui a été démontré que de telles structures offrent des propriétés intéressantes. SL garantit notamment une reconstruction sans perte nécessaire dans certaines applications spécifiques.

Grâce à son calcul rapide le lifting permet d'exécuter les calculs sur place, sa mise en œuvre facile c.à.d. la transformée est mise en œuvre sans la moindre référence au domaine de Fourier [82] et son efficacité parce que le lifting calcule simultanément les bandes basses et hautes fréquences .L'application de SL pour le diagnostic des pannes des machines à induction ont été vus de plus en plus au cours des dernières années. [83, 84, 85, 86]

III.2 Les ondelettes de deuxième génération

Les ondelettes de première génération sont un outil puissant et les domaines d'application sont nombreux. Néanmoins elles sont formulées dans le moule d'une analyse multi résolution, bien adapté dans un cadre théorique d'analyse fonctionnelle (bases inconditionnelles d'espaces fonctionnels, caractérisation d'espaces fonctionnels basée sur les coefficients de détail, etc.) mais trop restrictif dans certaines applications pratiques. Ces limitations proviennent essentiellement de :

- l'invariance par translation (uniformité), qui rend difficile ou impossible la création d'ondelettes sur des autres domaines que la droite réelle, comme par exemple la sphère, ou même tout simplement un intervalle de R ;
- l'invariance par changement d'échelle, qui revient à utiliser les mêmes filtres à tous les niveaux (stationnarité).

Pour palier ces problèmes et étendre le domaine d'application des techniques multi résolution, la notion d'ondelettes de seconde génération a été introduite. On ne trouve pas de définition précise de ce que sont les ondelettes de deuxième génération, mais la caractéristique

fondamentale est de ne plus supposer que les fonctions d'échelle soient issues d'une seule et même fonction mère. [87]

III.2.1. Schéma lifting adaptatif non linéaire à trois étapes

Le schéma lifting [88, 89, 90] s'effectue en trois étapes présentée dans la figure (III.1):

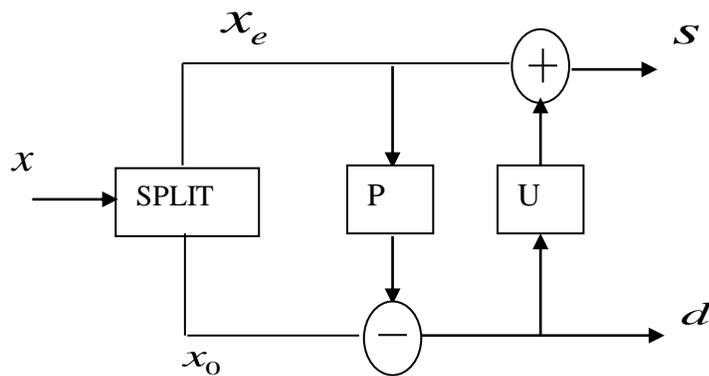


Figure III.1 Principe du schéma lifting

Dans notre cas on considère le schéma lifting illustré par la figure (III.2)

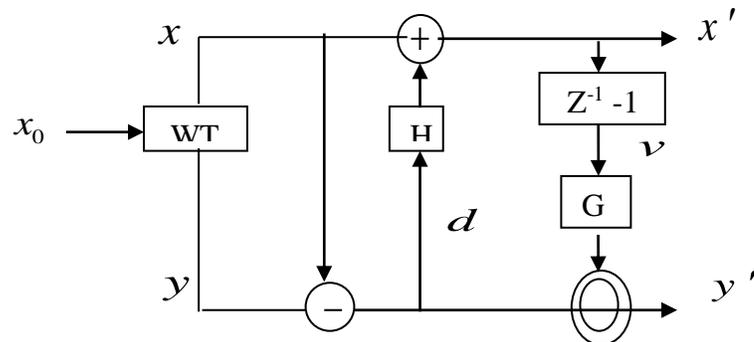


Figure. III.2. Les trois étapes du Schéma lifting

Ici :

L'application de la transformée polyphasée au signal original x_0 va la partitionner en deux sous-ensembles disjoints : $x_0(2n)$ (l'ensemble des échantillons pair) et $x_0(2n-1)$ (l'ensemble des échantillons impair).

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

Cette séparation est appelée "Lazy Wavelet Transform" WT

$x(n) = x_0(2n)$, $y(n) = x_0(2n-1)$ et H, G sont des opérateurs de seuillage défini sur tout $u \in R$ par :

$$H(u) = \begin{cases} \frac{1}{2}u & \text{si } |u| \leq T \\ \alpha \frac{T}{2} \text{sign}(u) & \text{si non} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$$G(u) = \begin{cases} u & \text{si } |u| > T' \\ \alpha' T' & \text{si non} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Avec

T, T' : Sont des seuils à valeurs positifs.

$\alpha, \alpha' \in \{0,1\}$: Deux constantes qui déterminent le type de seuillage.

Le signal d'approximation x' est donnée par :

$$x'(n) = x(n) + H(d(n)) \quad (\text{III.3})$$

Où

$d(n) = y(n) - x(n)$ Le signal de détail

Comme indiqué dans la figure(III.2) le signal détail y est obtenu par l'étape de prédiction non-additive de lifting. Noter que la norme soustraction a été remplacée par un opérateur non-linéaire défini comme

$$t \ominus u = \frac{t}{\beta + |u|}, \beta \geq 1 \quad (\text{III.4})$$

Pour $t, u \in R$, le signal détail y' est donné par :

$$y'(n) = \frac{d(n)}{\beta + |G(v(n))|} \quad (\text{III.5})$$

Où

$$v(n) = x'(n-1) - x'(n) \quad (\text{III.6})$$

Ici, $v(n)$ peut être considéré comme une estimation de $d(n)$.

III.3. Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par le schéma lifting adaptatif à trois étapes

Le diagnostic des défauts de roulement est l'un des actuels sujets dont nous avons été intéressés par l'analyse caractéristiques des composantes fréquentielles dans le détail du spectre de courant du stator dans différentes conditions (à vide et en charge) avec de nombreuses expériences.

III.3.1 Défaut de la bague extérieure du roulement

Pour un bon suivi, et pour ne pas perdre aucune information, on a présenté les spectres sous forme de bandes séparées qui nous permet une bonne vision.

Les figures (III.3, III.4, III.5, III.6, III.7) montrent le détail "d2" du spectre de courant du stator obtenu par la méthode de lifting adaptative dans une machine saine et défectueuse à vide ($s = 0.004 \approx 0$) pour différentes bandes de fréquence. On observe clairement, la présence d'harmoniques dues au défaut de la bague extérieure dans le spectre du courant du stator dans le cas défectueux.

Le spectre confirme facilement l'état défectueux du moteur en notant les fréquences caractéristiques du défaut d'excentricité mixte est situé approximativement dans la moitié de la fréquence fondamentale d'alimentation, quelle que soit la variation du glissement de fonctionnement à vide d'une amplitude de (-61,31) dB et d'une amplitude de (-58,15) dB.

Les composantes fréquentielles caractéristiques du défaut d'excentricité mixte dans l'intervalle [0-150 Hz] de la figure (III.3), on remarque précisément la présence des rayons centrés autour du fondamental, dont les fréquences sont en concordance avec la formule des fréquences caractéristiques de l'équation (III.7) et (III.8). Les valeurs peuvent être écrites comme suit:

$$f_{carac-bext} = \left| v f_s \pm k f_{bext} \right| \quad (III.7)$$

$$f_{bext} = 0.4 N_b f_r \quad (III.8)$$

Exemples de calcul des fréquences caractéristiques:

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

$$f_{\text{carac-bext}} = f_s + 0.4N_b \cdot f_r$$

Avec $f_s = 50$ Hz, $N_b = 9$, $f_r = \frac{1-S}{P} f_s = 25$ Hz parce que ($S=0.004 \approx 0$) et $P=2$,

$$f_{\text{bext}} = 90 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{carac-bext}} = 50 + (0.4) \cdot 9 \cdot (25)$$

$$f_{\text{carac-bext}} = 140 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{carac-ext}} = f_s - 0.4N_b \cdot f_r = 40 \text{ Hz},$$

$$f_{\text{carac-ext}} = 3f_s - f_{\text{bext}} = 60 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{carac-bext}} = |5f_s - f_{\text{bext}}| = 160 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{carac-bext}} = |9f_s - 3f_{\text{bext}}| = 180 \text{ Hz}$$

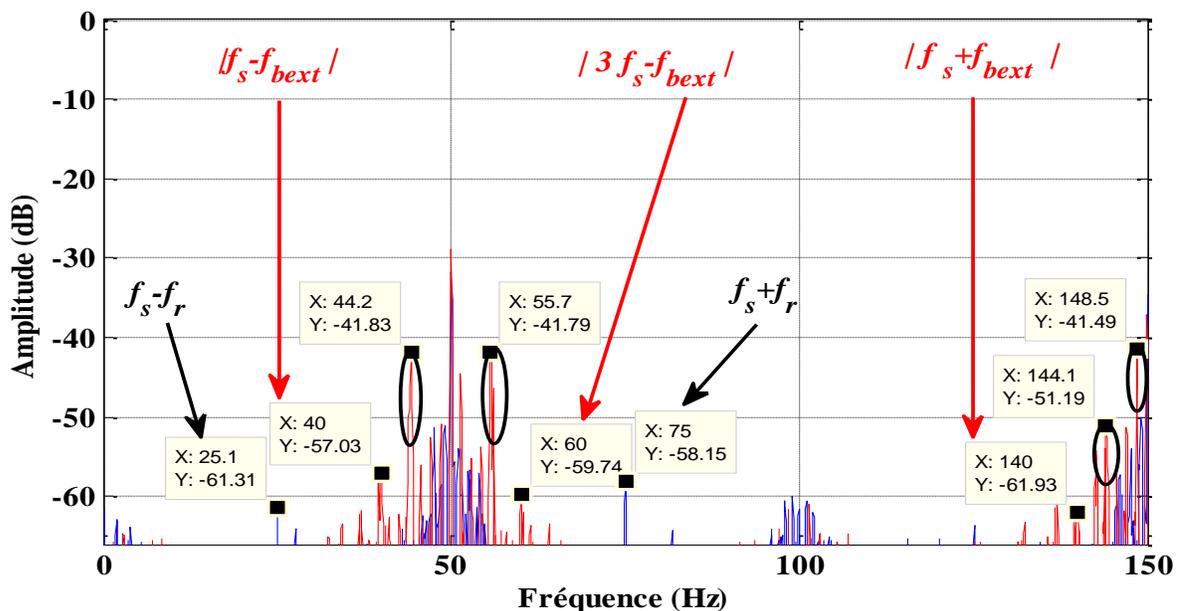


Figure. III.3. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence:0-150 Hz

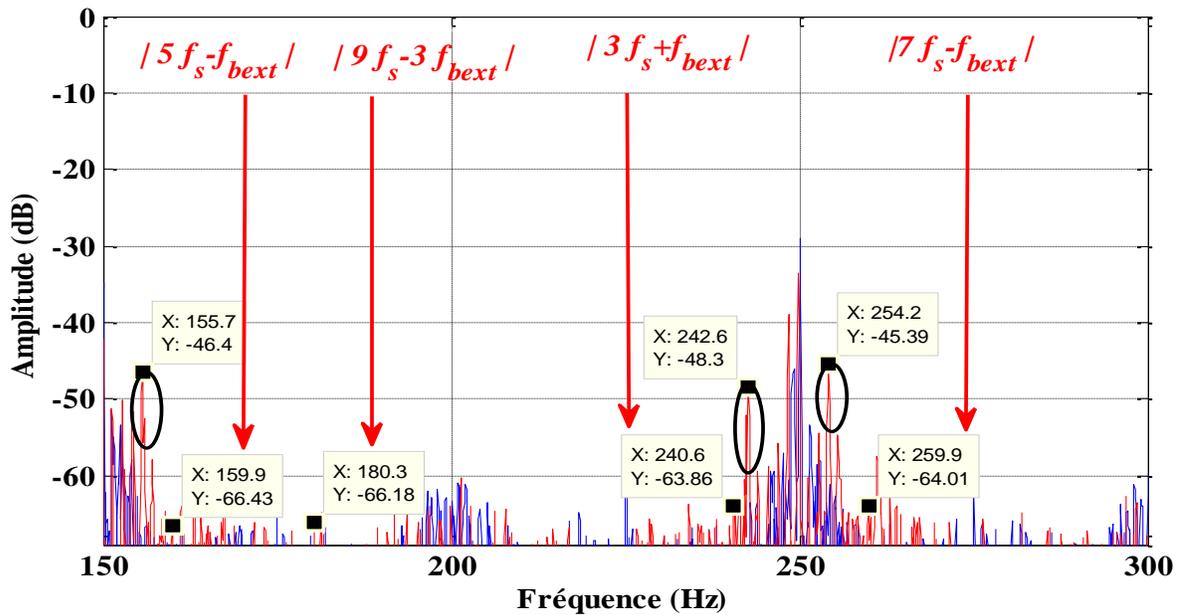


Figure. III.4. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence: 150-300 Hz

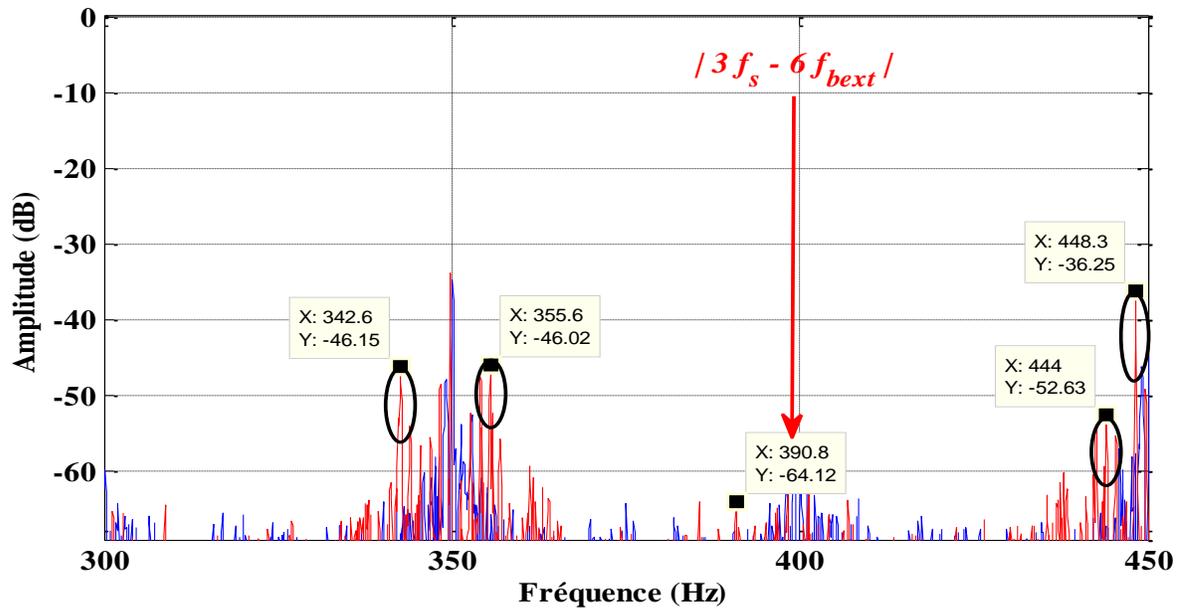


Figure. III.5. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence: 300-450 Hz

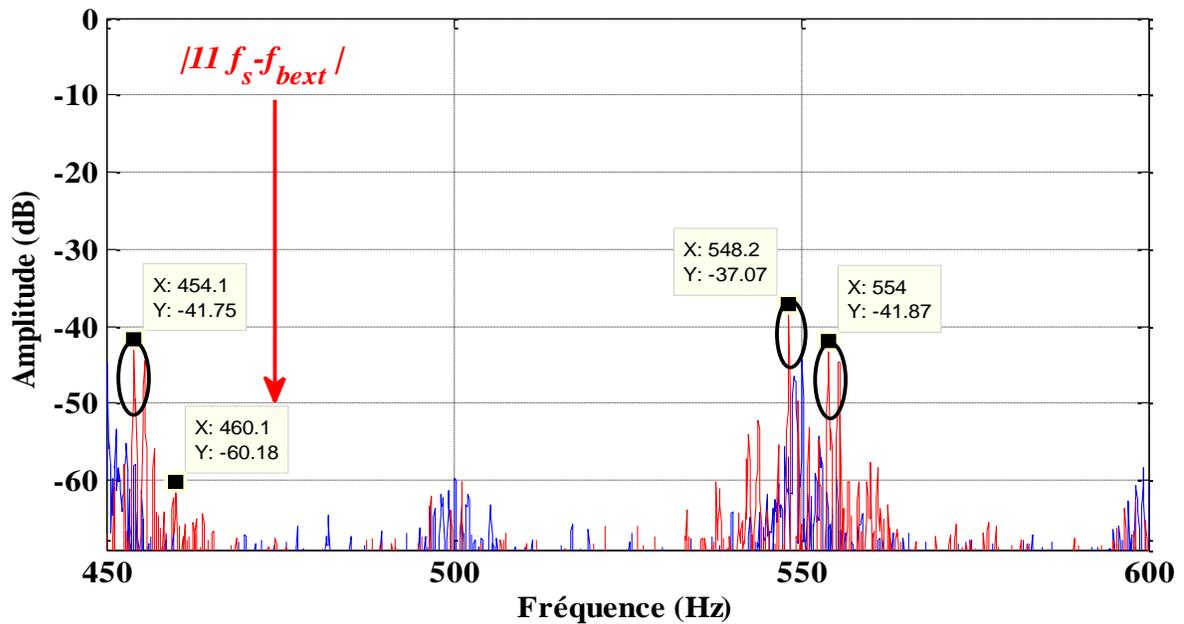


Figure. III.6. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence: 450-600 Hz

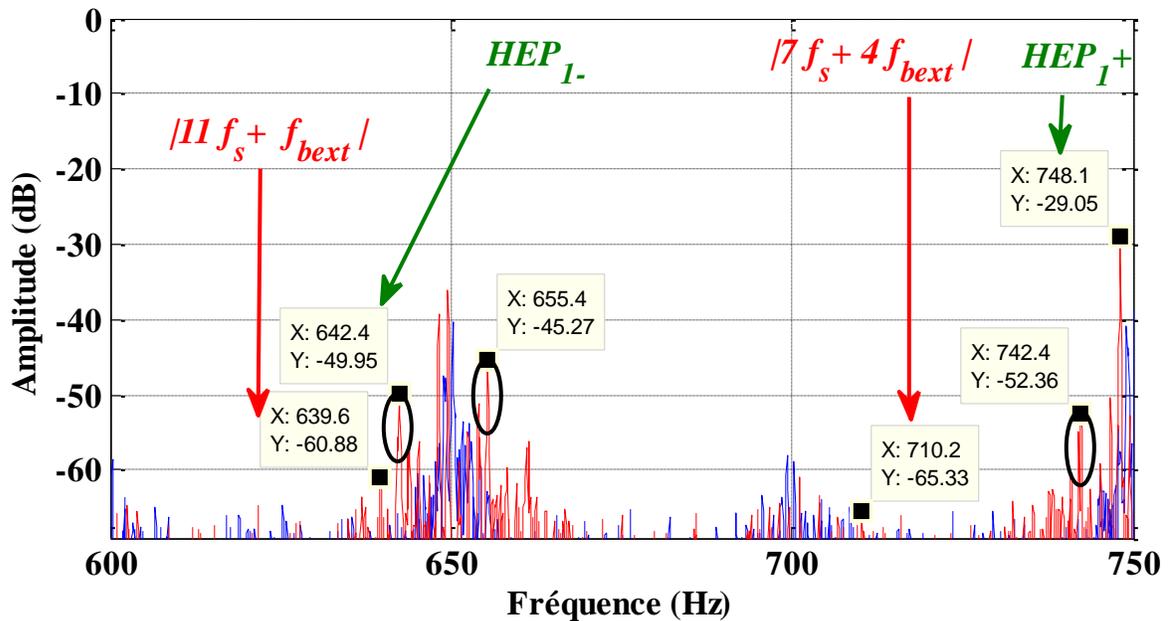


Figure. III.7. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par le méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) autour des HEP.

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

Le tableau ci-dessous représente quelques valeurs de comparaison entre la théorie et l'état expérimental à vide ($s \approx 0$)

La formule des fréquences caractéristiques	Valeurs théoriques (Hz)	Méthode de lifting	
		Valeurs Experimental (Hz)	Amplitudes (dB)
$f_{carac-bext} = vf_s \pm kf_{bext} $			
$f_{carac-bext} = f_s - f_{bext} $	40 Hz	40 Hz	-57.03 Db
$f_{carac-bext} = f_s + f_{bext} $	140 Hz	140 Hz	-61.93 dB
$f_{carac-bext} = 3f_s - f_{bext} $	60 Hz	60 Hz	-59.74 dB
$f_{carac-bext} = 5f_s - f_{bext} $	160 Hz	159.9 Hz	-66.43 dB
$f_{carac-bext} = 9f_s - 3f_{bext} $	180 Hz	180.3 Hz	-66.18 dB
$f_{carac-bext} = 3f_s + f_{bext} $	240 Hz	240.6 Hz	-63.86 dB
$f_{carac-bext} = 7f_s - f_{bext} $	260 Hz	259.9 Hz	-64.01 dB
$f_{carac-bext} = 3f_s - 6f_{bext} $	390 Hz	390.8 Hz	-64.12 dB
$f_{carac-bext} = 11f_s - f_{bext} $	460 Hz	460.1 Hz	-60.18 dB
$f_{carac-bext} = 11f_s + f_{bext} $	640 Hz	639.6 Hz	-60.88 dB
$f_{carac-bext} = 7f_s + 4f_{bext} $	710 Hz	710.2 Hz	-65.33 dB

Tableau III.1. Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague extérieure à vide ($s \approx 0$)

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

D'après ces figures on observe la présence des harmoniques supplémentaires des défauts sur les différentes bandes.

Le tableau (III.2) présente quelques exemples de ces harmoniques sur les bandes fréquentielles [0-750]:

Les fréquences supplémentaires (Hz)	Valeurs expérimentales des amplitudes (dB)
44.2 Hz	-41.83 dB
55.7 Hz	- 41.79 dB
144.1 Hz	- 51.19 dB
148.5 Hz	- 41.49 dB
155.7 Hz	- 46.4 dB
242.6 Hz	- 48.3 dB
254.2 Hz	- 45.39 dB
342.6 Hz	- 46.15 dB
355.6 Hz	- 46.02 dB
448.3 Hz	- 36.25 dB
548.2 Hz	- 37.07 dB
554 Hz	- 41.87 dB
655.4 Hz	- 45.27 dB
742.4 Hz	- 52.36 dB

Tableau. III.2. Exemples des fréquences supplémentaires [0-750]

Il est également possible d'indiquer les harmoniques d'encoches principale dans le détaille d2 du spectre de courant du stator (*HEP* ou *PSHs* «Principal slot harmonic » en Anglais) peuvent être calculés théoriquement par le tableau suivant:

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

L'équation à vide (s=0.004) $\nu = 1 \text{ and } \lambda = 1$ $HEP_s = \left(\frac{\lambda n_b (1-s)}{P} \pm \nu \right) f_s$	Valeurs théoriques (Hz)	Méthode de lifting	
		Valeurs Experimental (Hz)	Amplitudes (dB)
$HEP_1^- = (14(1-s) - 1) f_s$	647.2Hz	648.2Hz	-39.2dB
$HEP_1^+ = (14(1-s) + 1) f_s$	747.2Hz	748.1Hz	-29.05dB

Tableau. III. 3. Les valeurs des *HEP*

Cette comparaison des résultats expérimentaux avec les formules de fréquences caractéristiques du défaut de la bague extérieure permet d'assurer l'efficacité de la méthode de diagnostic par l'application basée sur une transformée en ondelettes adaptative construite avec un schéma de lifting non linéaire en trois étapes notamment au niveau des amplitudes , on remarque que l'analyse des spectres expérimentaux sains montre l'absence du défaut fréquentiel caractéristique dans le spectre du d2 du courant statorique.

En cas de pleine charge, nous analyserons le courant du stator en machine saine (bleue) et défectueuse (rouge).

L'opération de diagnostic par la transformée en ondelettes adaptative du courant permet d'effectuer des suivis d'indicateurs acceptables du défaut de la bague extérieure.

Figure (III.8, III. 9, III.10, III.11, III.12) du détail d2 du spectre actuel montre la présence d'une série d'harmoniques qu'est vérifiée par l'équation (III.7) sur les bandes illustrées.

De plus, nous donnerons quelques exemples des fréquences caractéristiques.

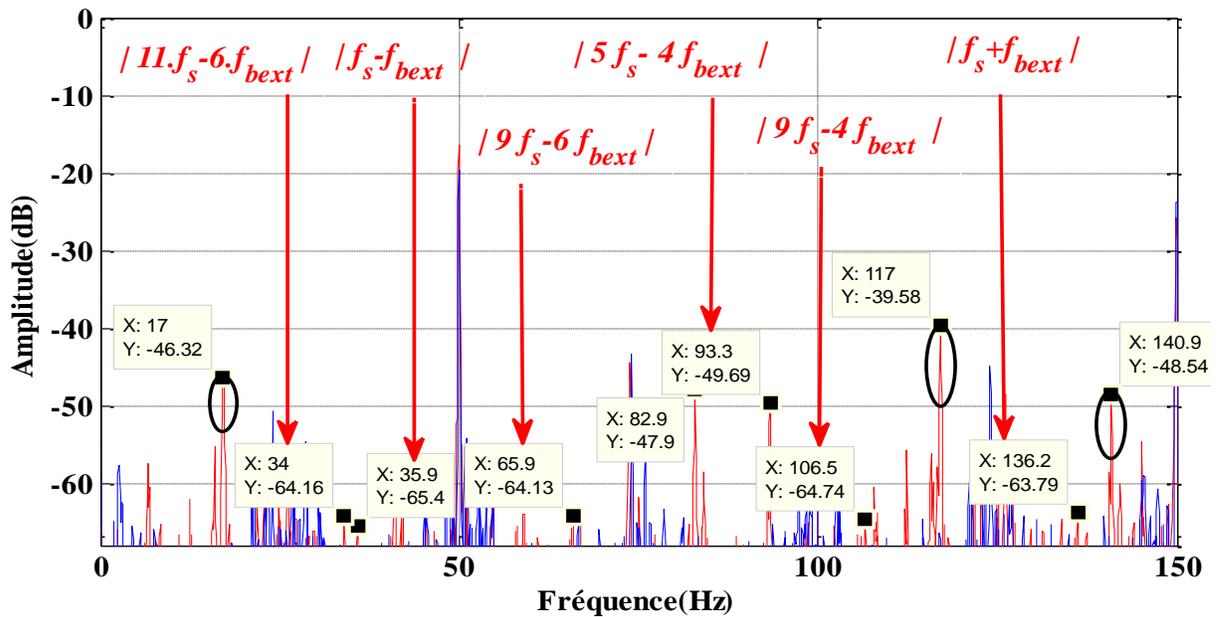


Figure. III.8. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s = 0,044$) pour la bande de fréquence: 0-150 Hz

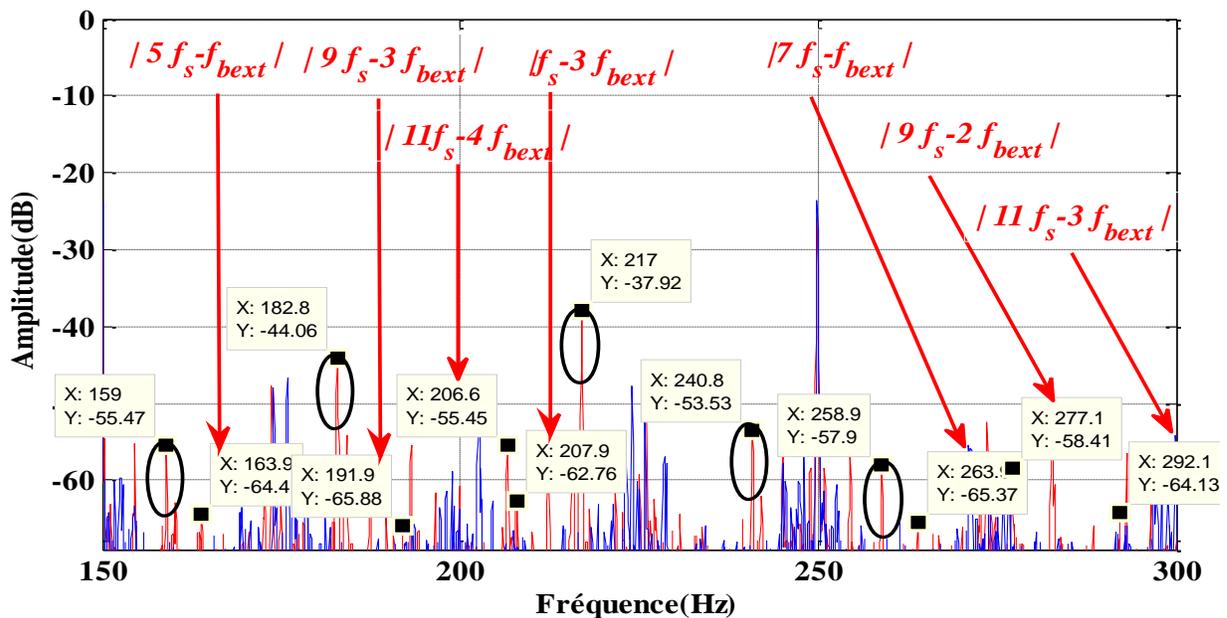


Figure. III.9. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s = 0,044$) pour la bande de fréquence: 150-300 Hz

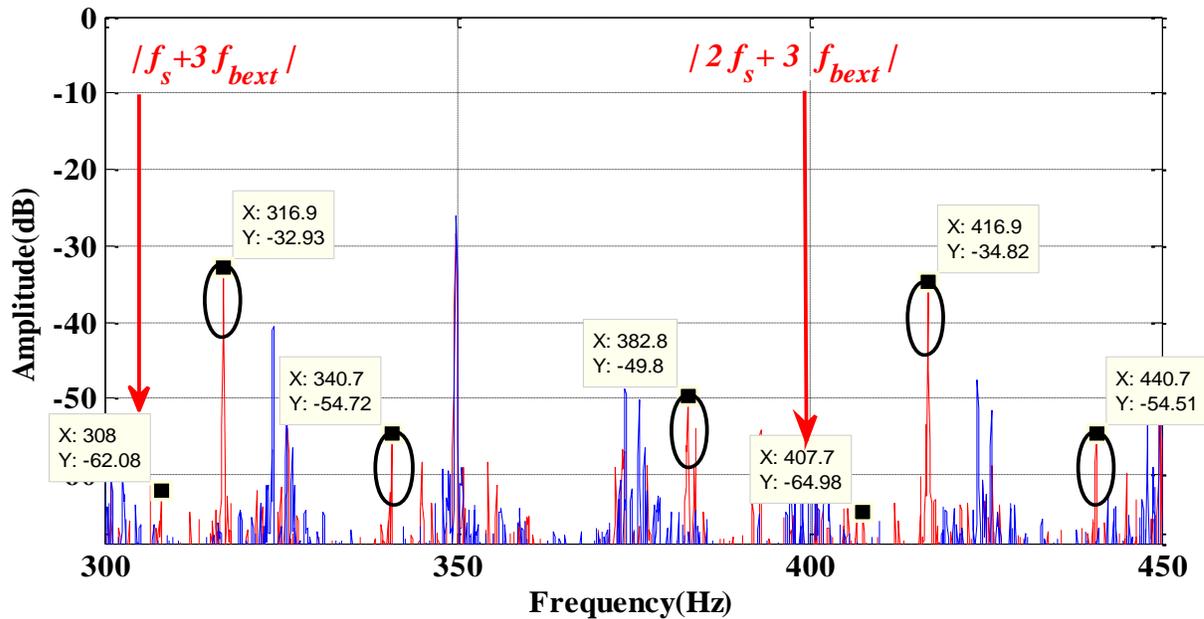


Figure.III.10. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s = 0,044$) pour la bande de fréquence: 300-450 Hz

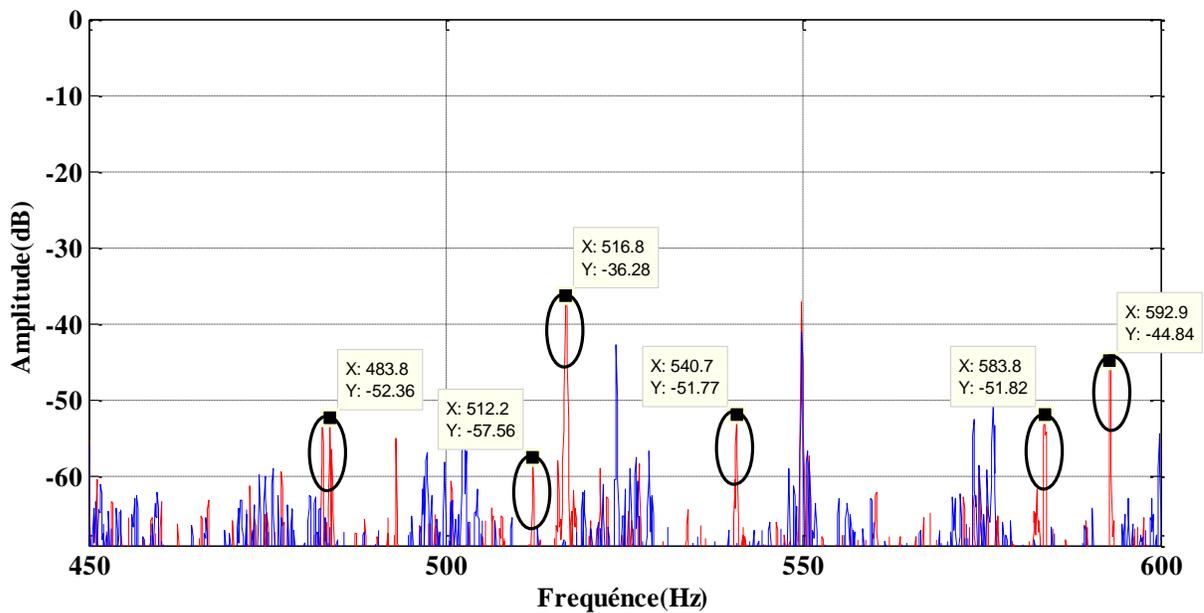


Figure. III.11. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s = 0,044$) pour la bande de fréquence: 450-600 Hz

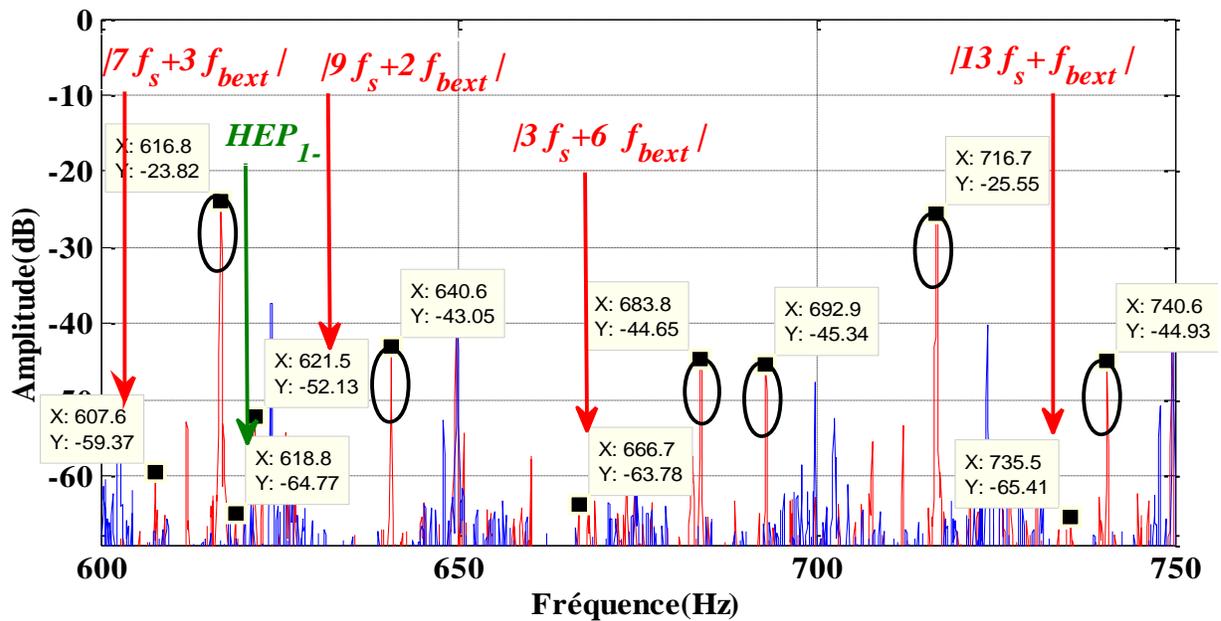


Figure.III.112. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à pleine charge ($s = 0,044$) autour de HEP.

Le détail d2 du spectre de courant du stator de la machine à induction, comme on l'a vu, en présence d'un défaut est très riche en harmoniques.

Le tableau (III. 4) résume et compare la fréquence théorique de ce défaut s'il existe expérimentalement.

La formule des fréquences caractéristiques	Valeurs théoriques (Hz)	Méthode de lifting	
		Valeurs Experimental (Hz)	Amplitudes (dB)
$f_{carac-or} = vf_s \pm kf_{or} $			
$f_{carac-or} = f_s - f_{or} $	36.04 Hz	35.9 Hz	-65.4 dB
$f_{carac-or} = f_s + f_{or} $	136.04 Hz	136.2 Hz	-63.79 dB

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

$f_{carac-or} = 11f_s - 6f_{or} $	33.76 Hz	34 Hz	-64.16 dB
$f_{carac-or} = 5f_s - 4f_{or} $	94.16 Hz	93.3 Hz	-49.69 dB
$f_{carac-or} = 9f_s - 6f_{or} $	66.24 Hz	65.9 Hz	-64.13 dB
$f_{carac-or} = 9f_s - 4f_{or} $	105.84 Hz	106.5 Hz	-64.74 dB
$f_{carac-or} = 5f_s - f_{or} $	163.96 Hz	163.9 Hz	-64.4 dB
$f_{carac-or} = 9f_s - 3f_{or} $	191.88 Hz	191.9 Hz	-65.88 dB
$f_{carac-or} = 11f_s - 4f_{or} $	205.84 Hz	206.6 Hz	-55.45 dB
$f_{carac-or} = f_s - 3f_{or} $	208.12 Hz	207.9 Hz	-62.76 dB
$f_{carac-or} = 7f_s - f_{or} $	263.96 Hz	263.9 Hz	-65.77 dB
$f_{carac-or} = 9f_s - 2f_{or} $	277.92 Hz	277.1 Hz	-58.41 dB
$f_{carac-or} = 11f_s - 3f_{or} $	291.88 Hz	292.1 Hz	-64.13 dB

Tableau. III.4. Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague extérieure ($s = 0.044$).

On peut présenter quelques exemples de ces harmoniques sur les bandes fréquentielles [0-750] causées par ce défaut dans le tableau (III.5) suivant :

Les fréquences supplémentaires (Hz)	Valeurs expérimentales des amplitudes (dB)
17 Hz	-46.32 dB
117 Hz	- 39.58 dB

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

140.9 Hz	- 48.54 dB
159 Hz	- 55.47 dB
182.8 Hz	- 44.06 dB
217 Hz	- 37.92 dB
240.8 Hz	- 53.53 dB
316.9 Hz	- 32.93 dB
340.7 Hz	- 54.72 dB
382.8 Hz	- 49.8 dB
416.9 Hz	- 34.82 dB
440.7 Hz	- 54.51 dB
483.8 Hz	- 52.36 dB
512.2 Hz	- 57.56 dB
516.8 Hz	- 36.28 dB
540.7 Hz	- 51.77 dB
616.8 Hz	- 23.82 dB
640.6 Hz	- 43.05 dB
683.8 Hz	- 44.65 dB
740.6 Hz	- 44.93 dB

Tableau. III.5. Exemples des fréquences supplémentaires [0-750]

En plus des calculs théoriques obtenus dans le tableau ci-dessous, on peut dire que les fréquences obtenues expérimentalement démontrent l'existence des harmoniques d'encoche principale (Principal slot harmonic).

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

L'équation à (s=0.044) $\nu = 1 \text{ and } \lambda = 1$ $HEP = \left(\frac{\lambda n_b (1-s)}{P} \pm \nu \right) f_s$	valeurs Théorique (Hz)	Méthode de Lifting	
		Experimental Values(Hz)	Amplitudes (dB)
$HEP_1^- = (14(1-s) - 1) f_s$	619.2Hz	618.8 Hz	-64.77dB

Tableau. III.6. Les valeurs des *HEP*

À partir de ce tableau, nous pouvons dire que les bandes de fréquences que nous avons analysées sont susceptibles d'apporter des informations sur l'existence de défaut de la bague extérieur.

III.3.2. Défaut de la bague intérieure du roulement:

Les différents modes de fonctionnement du moteur réalisés pour valider la procédure de diagnostic sont: un fonctionnement à vide avec un roulement sain et défectueux et un fonctionnement en charge avec un roulement sain et défectueux.

Dans cette première étape, nous allons analyser le courant statorique dans le cas d'un fonctionnement à vide.

Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode de lifting adaptative à vide (s≈0) pour les différentes bandes de fréquence sont montrées dans les figures (III.13, III.14, III.15, III.16, III.17) .

Le diagnostic par la méthode de lifting adaptative du courant permettra de réaliser un suivi efficace des indicateurs du défaut de la bague intérieure. On remarque précisément la présence des rayons centrés autour du fondamental, dont les fréquences sont en concordance avec la formule des fréquences caractéristiques de l'équation (II.11).

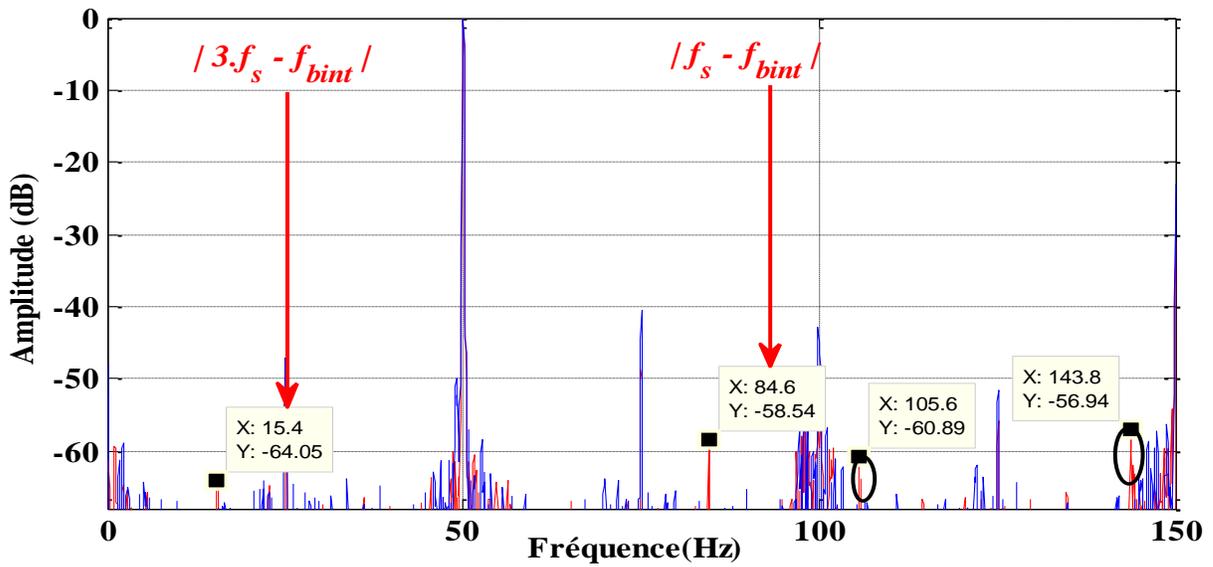


Figure. III.13. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence: 0-150 Hz

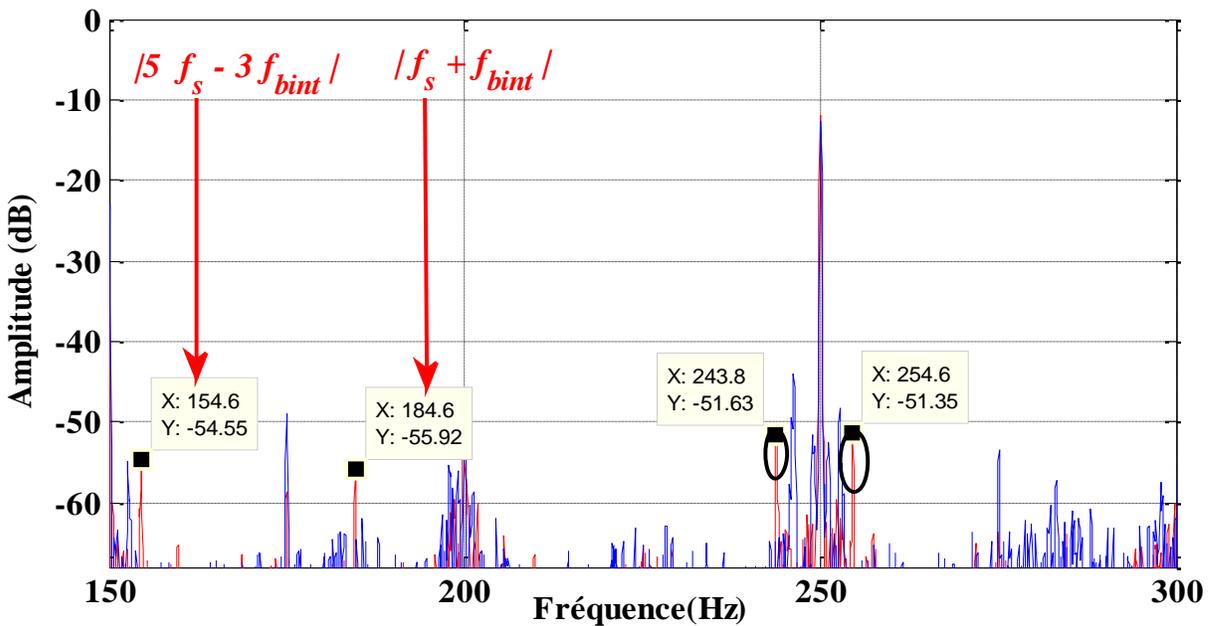


Figure. III.14. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence: 150-300 Hz

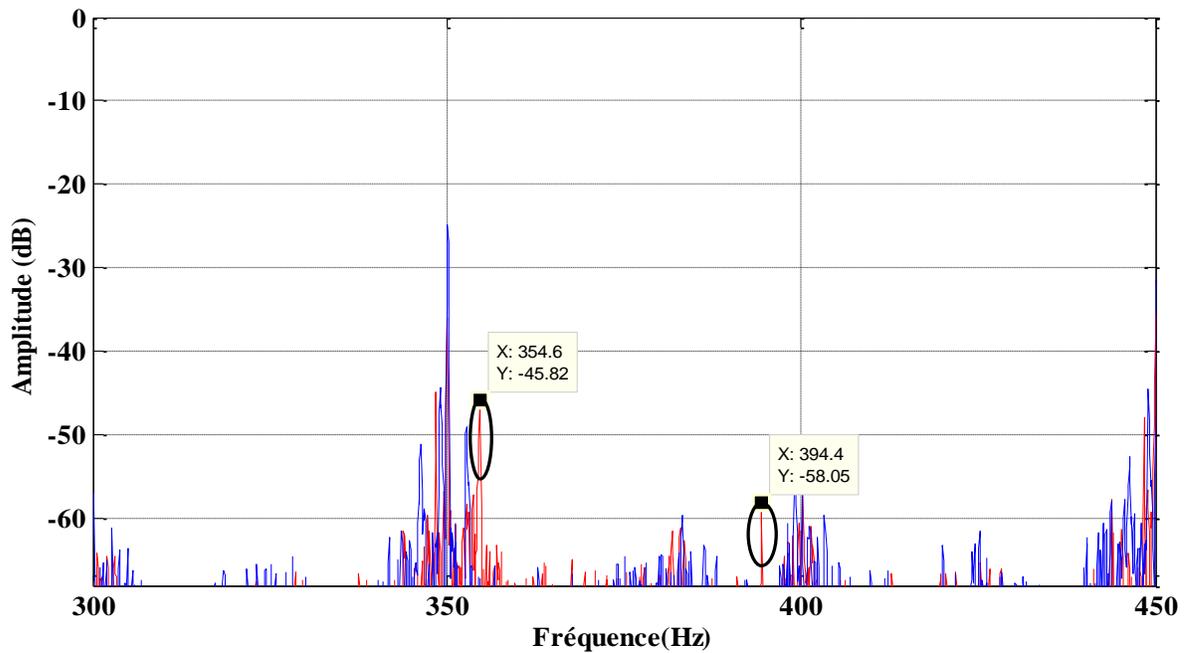


Figure.III.15. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence: 300-450 Hz

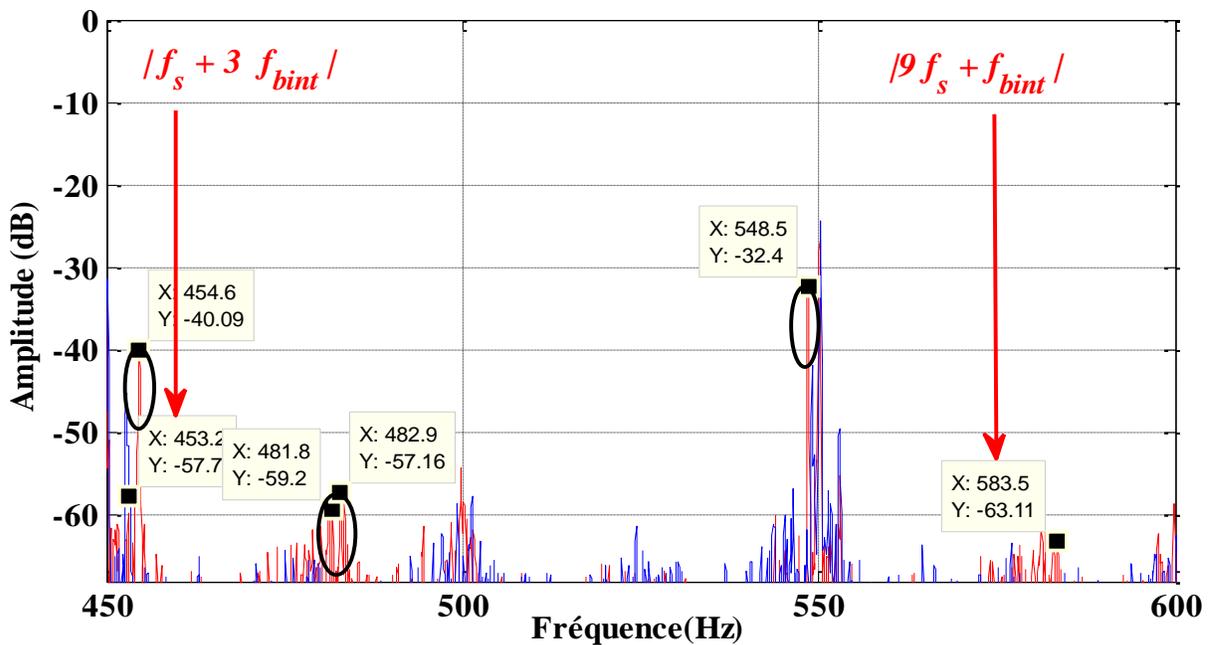


Figure.III.16. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence: 450-600 Hz

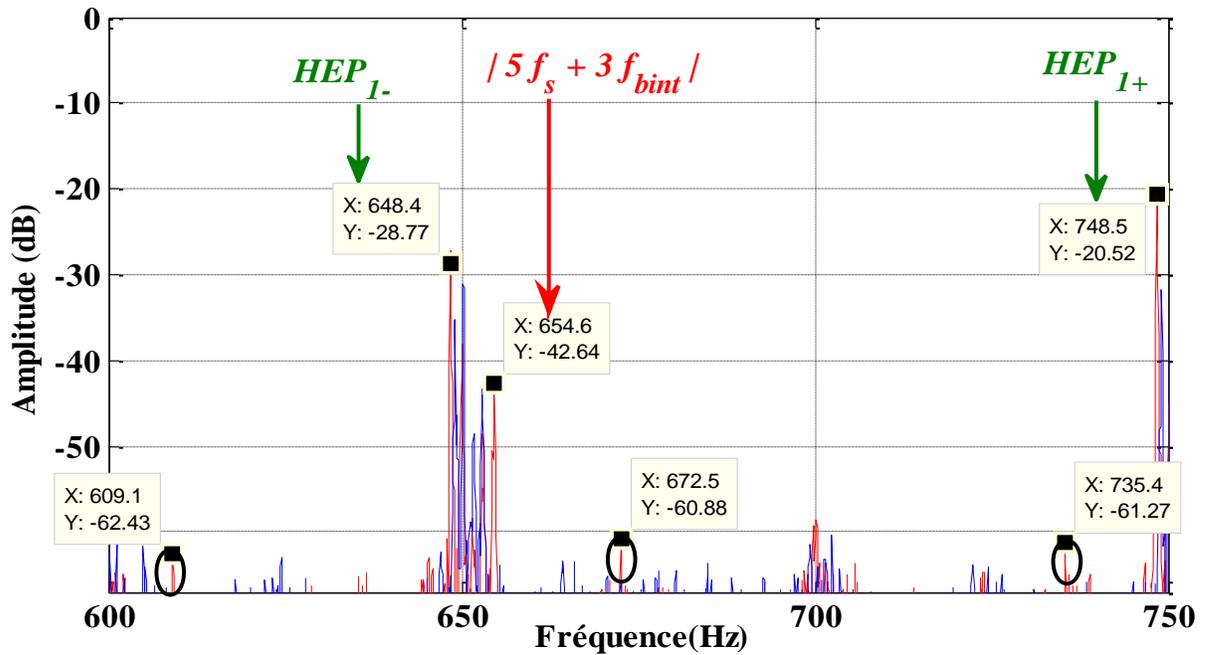


Figure. III.17. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative à vide ($s \approx 0$) pour la bande de fréquence: 600-750 Hz

Le tableau (III.7) résume et compare la fréquence théorique du défaut de la bague interne s'il existe expérimentalement.

La formule des fréquences caractéristiques	Valeurs théoriques (Hz)	Méthode de lifting	
		Valeurs Experimental (Hz)	Amplitudes (dB)
$f_{carac-bint} = vf_s \pm kf_{bint} $			
$f_{carac-bint} = f_s - f_{bint} $	84.46 Hz	84.6 Hz	-58.54 dB
$f_{carac-bint} = f_s + f_{bint} $	184.46 Hz	184.6 Hz	-55.92 dB
$f_{carac-bint} = 3f_s - f_{bint} $	15.54 Hz	15.4 Hz	-64.04 dB
$f_{carac-bint} = 5f_s - 3f_{bint} $	153.38 Hz	154.6 Hz	-54.55 dB

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

$f_{carac-bint} = f_s + 3f_{bint} $	153.38 Hz	453.2 Hz	-57.7 dB
$f_{carac-bint} = 9f_s + f_{bint} $	584.46 Hz	583.5 Hz	-63.11 dB
$f_{carac-bint} = 5f_s + 3f_{bint} $	653.38 Hz	654.6 Hz	-42.64 dB

Tableau. III.7. Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague intérieure ($s \approx 0$)

À partir de ce tableau, on peut dire que les bandes fréquentielles que nous avons analysées, sont susceptibles d'apporter des informations sur l'existence du défaut de la bague intérieure. La figure (III-20) représente le spectre du courant sous un fonctionnement en charge, dont le glissement est égal à 0.004 ($s \approx 0$). Elle montre qu'autour de l'harmonique fondamental, existe d'autres harmoniques particuliers du spectre pouvant confirmer qu'il y a un défaut de roulement de la bague intérieure.

D'après ces figures on observe la présence des harmoniques supplémentaires des défauts sur les différentes bandes.

Le tableau (III.8) présente quelques exemples de ces harmoniques sur les bandes fréquentielles [0-750]:

Les fréquences supplémentaires (Hz)	Valeurs expérimentales des amplitudes (dB)
105.6 Hz	-60.89 dB
143.8 Hz	- 56.94 dB
243.8 Hz	- 51.63 dB
254.6 Hz	- 51.35 dB
354.6 Hz	- 45.82 dB
481.8 Hz	- 59.2 dB
482.9 Hz	- 57.16 dB

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

548.5 Hz	- 63.11 dB
609.1 Hz	- 62.43 dB
672.5 Hz	- 60.88 dB
735.4 Hz	- 61.27 dB

Tableau. III.8. Exemples des fréquences supplémentaires [0-750]

Il est également possible d'indiquer les *HEP* dans le détail d2 du spectre de courant du stator afin que les harmoniques de la fente du rotor puissent être calculées théoriquement par le tableau III.9.

L'equation à vide (s=0.004) $\nu = 1 \text{ and } \lambda = 1$ $HEP = \left(\frac{\lambda n_b (1-s)}{P} \pm \nu \right) f_s$	Valeurs théoriques (Hz)	Méthode de lifting	
		Valeurs Experimental (Hz)	Amplitudes (dB)
$HEP_1^- = (14(1-s) - 1) f_s$	647.2Hz	648.4Hz	-28.77dB
$HEP_1^+ = (14(1-s) + 1) f_s$	747.2Hz	748.5Hz	-20.52dB

Tableau. III.9. Les valeurs des HEP

Dans cette partie, l'analyse de la machine asynchrone est réalisée avec la présence d'un défaut de roulement à bague intérieure de moteur sain et défectueux dans le cas d'un fonctionnement en charge.

L'objectif de ce paragraphe est la détection des signatures caractérisant le défaut de la bague intérieure suivant la formule des fréquences caractéristiques de l'équation (II.12).

D'après le spectre du courant statorique présenté dans les figures, on remarque que ce spectre est riche en harmoniques. Figure (II.18, II.19, II.20, II.21, II.22) du détail d2 du spectre actuel

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

montre la présence d'une série d'harmoniques est vérifiée par l'équation (III.7) sur les bandes illustrées.

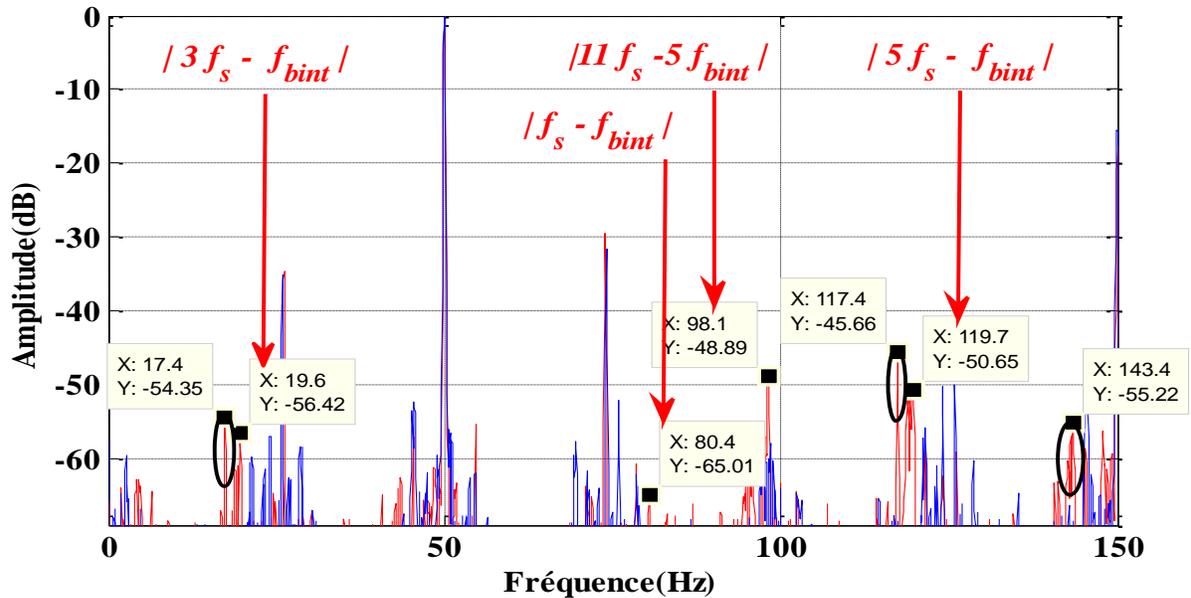


Figure.III.18. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative en charge ($s = 0.04$) pour la bande de fréquence: 0-150 Hz

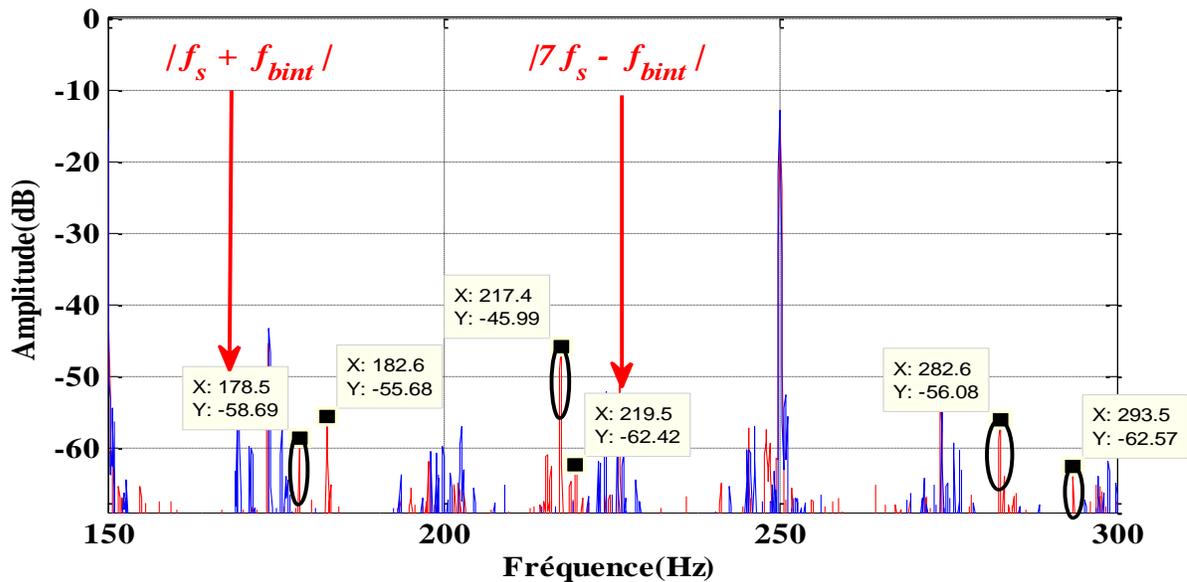


Figure. III.19. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative en charge ($s = 0.04$) pour la bande de fréquence: 150-300 Hz

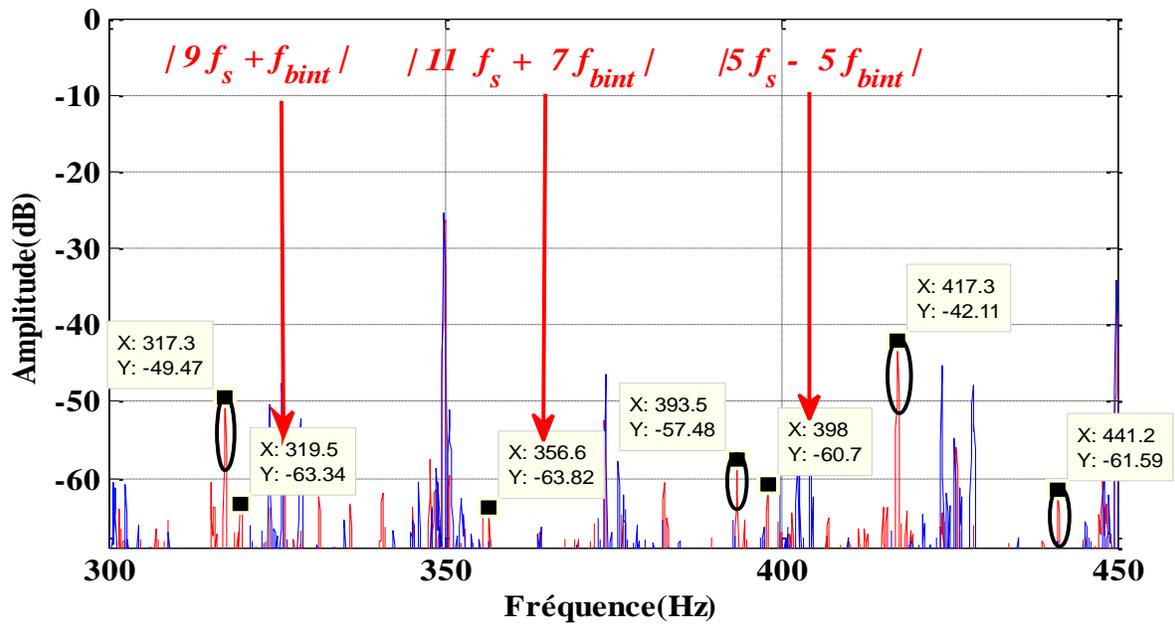


Figure. III.20. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative en charge ($s = 0.04$) pour la bande de fréquence: 300-450 Hz

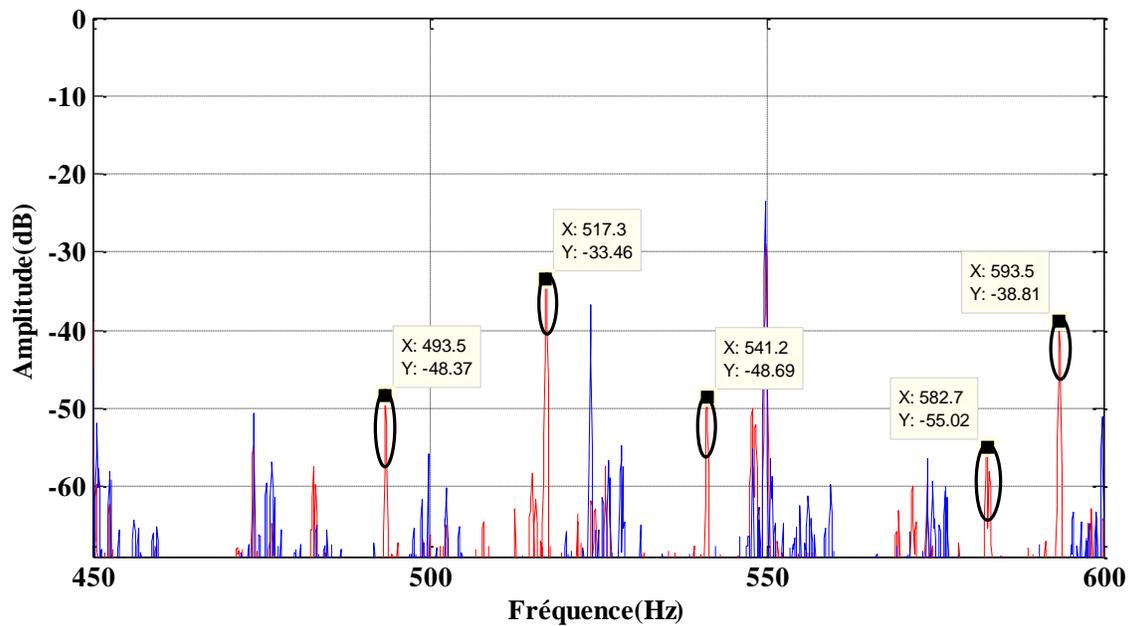


Figure. III.21. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative en charge ($s = 0.04$) pour la bande de fréquence: 450-600 Hz

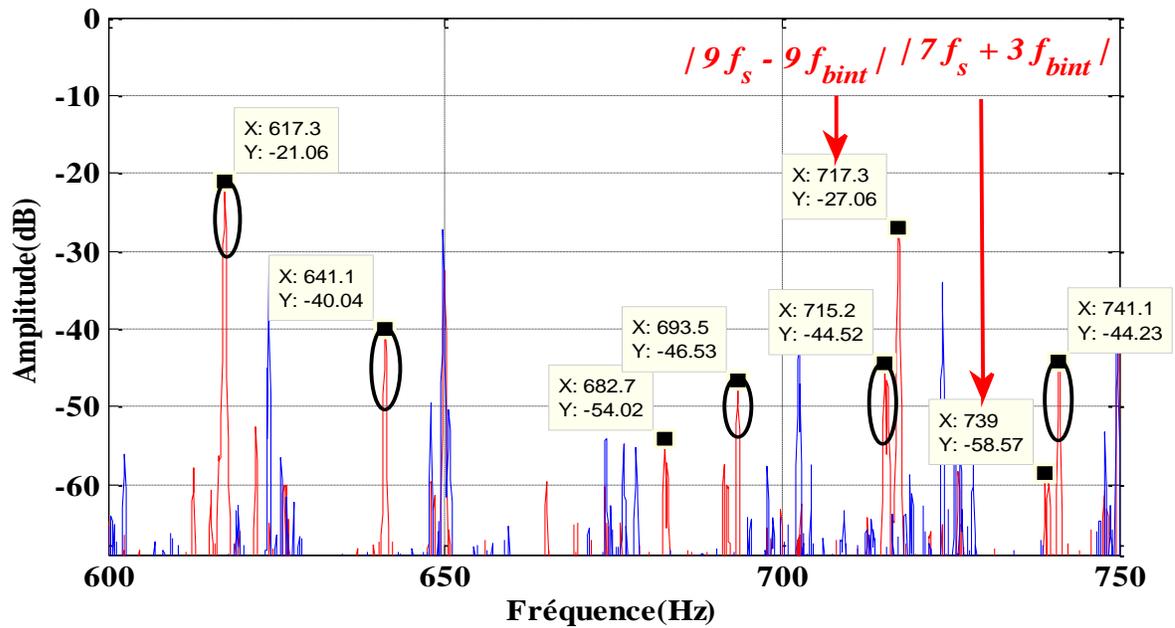


Figure. III.22. Le détail d2 du spectre de courant du stator de moteur sain (bleu) et défectueux (rouge) par la méthode lifting adaptative en charge ($s = 0.04$) pour la bande de fréquence: 600-750 Hz

D'après ces figures on remarque la présence des harmoniques supplémentaires des défauts sur les différentes bandes.

Les fréquences caractéristiques du défaut de la bague intérieure à vérifier, sont les fréquences indiquées au tableau (III.10) sur les bandes fréquentielles [0-750]:

Les fréquences supplémentaires (Hz)	Valeurs expérimentales des amplitudes (dB)
17.4 Hz	-54.35 dB
117.4 Hz	- 45.66 dB
143.4 Hz	- 55.22 dB
182.6 Hz	- 55.68 dB
217.4 Hz	- 45.99 dB
282.6 Hz	- 56.08 dB
293.5 Hz	- 62.57 dB

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

317.3 Hz	- 49.47 dB
393.5 Hz	- 57.48 dB
417.3 Hz	- 42.11 dB
441.2 Hz	- 61.59 dB

Tableau. III.10. Exemples des fréquences supplémentaires [0-750]

Il est clair que l'influence du degré de sévérité du défaut, se traduit par une déformation du courant. De plus, en fonction du spectre du courant du stator et de l'équation (II.11), nous donnerons quelques exemples des fréquences caractéristiques.

Le tableau (III-11) résume quelques harmoniques supplémentaires des défauts sur les différentes bandes.

La formule des fréquences caractéristiques	Valeurs théoriques (Hz)	Méthode de lifting	
		Valeurs Experimental (Hz)	Amplitudes (dB)
$f_{carac-bint} = vf_s \pm kf_{bint} $			
$f_{carac-bint} = f_s - f_{bint} $	79.6 Hz	80.4 Hz	-65.01 dB
$f_{carac-bint} = f_s + f_{bint} $	179.6 Hz	178.5 Hz	-58.69 dB
$f_{carac-bint} = 3f_s - f_{bint} $	20.4 Hz	19.6 Hz	-56.42 dB
$f_{carac-bint} = 11f_s - 5f_{bint} $	98 Hz	98.1 Hz	-48.89 dB
$f_{carac-bint} = 5f_s - f_{bint} $	153.38 Hz	119.7 Hz	-50.65 dB
$f_{carac-bint} = 7f_s - f_{bint} $	220.4 Hz	219.5 Hz	-62.42 dB

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

$f_{carac-bint} = 9f_s + f_{bint} $	320. Hz	319.5 Hz	-42.64 dB
$f_{carac-bint} = 11f_s + 7f_{bint} $	357.2 Hz	356.6 Hz	-63.82 dB
$f_{carac-bint} = 5f_s - 5f_{bint} $	398 Hz	398 Hz	-60.7 dB
$f_{carac-bint} = 9f_s - 9f_{bint} $	716.4 Hz	717.3 Hz	-27.06 dB
$f_{carac-bint} = 7f_s + 3f_{bint} $	738.8 Hz	739 Hz	- 58.57 dB

Tableau. III.11. Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague intérieure ($s = 0.04$).

À partir de ce tableau, nous pouvons dire que les bandes de fréquences que nous avons analysées sont susceptibles d'apporter des informations sur l'existence de défaut de la bague intérieur.

On remarque que l'amplitude des harmoniques dans le spectre des signaux, est généralement lisible et claire.

III. 4 Conclusion

L'information importante dans les signaux peut être exploitée flexiblement par une nouvelle application basée sur l'application du schéma de lifting non linéaire développé en trois étapes citées auparavant. Les résultats de cette technique confirment l'efficacité de la dernière (lifting non linéaire à trois étapes) avec de valeurs d'amplitudes considérables. Cette méthode assure que les résultats obtenus sont bien projetés avec la formule des fréquences caractéristiques de défaut; les détails sont riches avec des harmoniques supplémentaires qui ont des amplitudes importantes.

Chapitre III : Résultats expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts de roulement par la transformée de lifting adaptative

En plus de la sensibilité au courant statorique des défauts, les tests expérimentaux du défaut mécanique (roulement) nous ont permis d'obtenir des résultats intéressants par lifting adaptative.

Conclusion générale

La maintenance et la surveillance des machines asynchrones deviennent nécessaires afin de rentabiliser les installations industrielles et contribuer à obtenir un meilleur gain de productivité. Pour cela il s'avère important de développer des outils de diagnostic prédictif des défauts de la machine. Pour aborder l'étude, nous avons établi un état de l'art de la machine asynchrone et des défauts pouvant y intervenir dans cette dernière.

De nombreuses techniques permettant de les identifier montrent que la majorité des travaux se concentrent sur le diagnostic, c'est-à-dire sur la présence ou non l'un des défauts du moteur à induction grâce à la détection de caractéristiques fréquentielles spécifiques. Parmi elles, le lifting non linéaire en trois étapes qui est l'une des méthodes les plus sensibles aux défauts des machines tournantes et la méthode d'analyse des signatures du courant

Certains défauts dans les machines tournantes sont caractérisés par des phénomènes physiques, se traduisant par des perturbations différentes sur les signaux à traiter; c'est le cas dans les défauts de la rupture de barres, excentricité et le défaut de roulement.

L'existence de ces défauts peut être de faibles ou fortes amplitudes lorsque le défaut est naissant. Le défaut évolue rapidement, surtout, pour un fonctionnement en charge.

Pour cette raison, il est nécessaire de les détecter à une phase précoce, pour pouvoir éviter des dégâts, il faut planifier une maintenance efficace et sécurisé le système d'utilisation.

Durant les trois dernières décennies, la technique de TO est concurrencée dans le milieu industriel. Cette technique est utilisée dans plusieurs domaines. Dernièrement, elle a été utilisée pour détecter les défauts dans les machines tournantes.

La technique est validée pour des signaux expérimentaux obtenus à partir de la MAS. Les résultats, obtenus dans une certaine mesure, génèrent des avantages et des inconvénients.

En termes de sensibilité et au début de la révélation de défaut, toutes les méthodes temps fréquence étaient plus fiables et descriptive pour indiquer les symptômes du défaut. En raison de la capacité commune d'illustrer à la fois le temps et l'information de fréquence, ainsi que

Conclusion générale

dotée d'un système de localisation temps-fréquence, il y a une amélioration de la sensibilité de ce technique pour la détection précoce des défauts.

La technique de TOD est très efficace et très sensible à tous les défauts. L'ASCM-TOD a l'avantage, également, d'être utiliser en régime non-stationnaire. Parmi les inconvénients de cette dernière, est la difficulté d'identifier d'une manière précise le type du défaut.

La comparaison entre les deux techniques montre que la méthode de lifting non linéaire à trois étapes est la plus efficace par rapport la technique L'ASCM-TOD cette comparaison était au niveau de l'amplitude et au niveau de détail.

1. Types d'adaptation possible de schéma lifting adaptatif

Le schéma lifting adaptatif est une version modifiée du lifting classique, l'adaptation consiste à choisir entre plusieurs filtres, suivant l'information locale du signal, il existe deux structures de lifting adaptatives: soit on commence par la prédiction puis la mise à jour, soit on procède par l'application de l'opérateur de mise à jour puis la prédiction voir la figure 1.

L'idée initiale serait d'écrire :

$$h = x_0 - P_{adap}(x_e) \tag{1}$$

$$l = x_e + U(h) \tag{2}$$

Où

$$P_{adap}(x_e)(n) = \sum x_e(k)F_n(n-k) \tag{3}$$

L'ordre de F_n dépendant de la régularité de x_e en n .

Réaliser ceci dans le cadre classique pas de prédiction puis pas de mise à jour est faisable, mais cela présente au moins deux inconvénients :

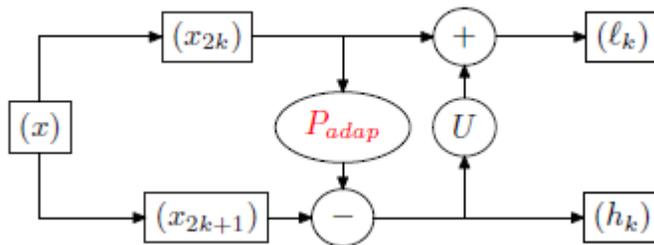


Figure.1. Schéma de principe du lifting, avec étape de prédiction non-linéaire avant la mise à jour

La structure de mise à jour avant la prédiction figure 2 est mieux adaptée afin d'éviter les problèmes de la stabilité et la synchronisation.

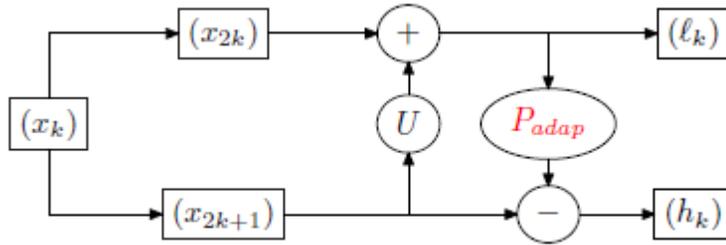


Figure .2. Schéma de principe du lifting, avec étape de mise à jour en premier, puis avec une étape de prédiction non-linéaire.

2. Décomposition avec mise à jour adaptative

Nous rappelons dans cette section les travaux de Piella, Heijmans et Pesquet-Popescu décrivant une transformée en ondelettes adaptative sous forme lifting, inversible et basée sur une étape de mise à jour adaptative et une étape de prédiction fixe présenté dans la figure 3 L'adaptabilité du schéma repose sur le choix entre différents filtres de mise à jour, dépendant de l'information locale fournie par les sous bandes d'entrée. Décrivons tout d'abord la structure générale de la décomposition.

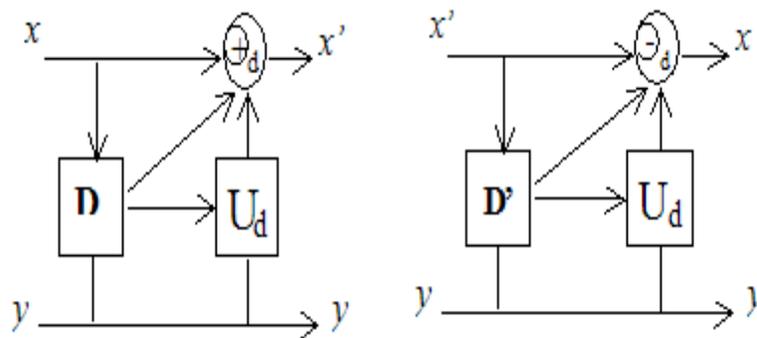


Figure.3. Structure du schéma lifting avec mise à jour adaptative.

3. Structure générale

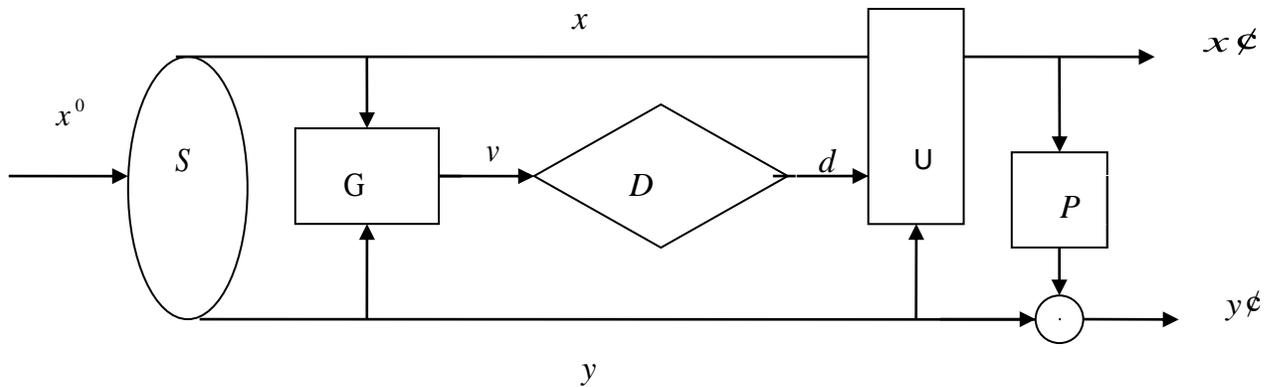


Figure.4 .schéma lifting avec mise à jour adaptatif

A partir de cette figure on peut constater que le schéma lifting avec mise à jour adaptatif contient les différentes opérations suivantes:

- Opération de partage S du signal d'entrée en différentes bandes (on assume que nous avons qu'une seule bande d'approximation x et k bandes détail $y^{(1)}, \dots, y^{(k)}$; par contre l'illustration dans la figure montre qu'une seule bande détail.

- Opération d'estimation de la carte de décision D qui basée sur un vecteur gradient.

- une étape de mise à jour adaptative, ou l'adaptabilité apparaît à partir du dépendance de U dans la sortie d du carte de décision D .

- une étape de prédiction P est fixe.

Dans ce cas le signal d'entrée $x^0 : Z^d \otimes R$ est partagé en deux signaux x, y , où y peut comporter plus d'un sous-ensemble : $y^{(1)}, \dots, y^{(k)}$ avec la décomposition $x^0 \otimes (x, y)$ est inversible et qu'il est ainsi possible de reconstruire x^0 à partir de ses composantes (x et y).

4. Ondelette de Daubechies

Définition

Les ondelettes orthonormales à support compact sont définies à partir du théorème suivant énoncé par Daubechies.

Théorème

Soit h la réponse impulsionnelle d'un filtre tel que :

$$\sum_n |h(n)| |n|^\varepsilon < +\infty \quad \forall \varepsilon > 0 \quad (4)$$

$$\sum_n h(n-2k)h(n-2l) = \delta(k,l) \quad (5)$$

$$\sum_n h(n) = \sqrt{2} \quad (6)$$

Où

$\delta(k,l)$ Est le symbole de Kronecker.

Supposons que $H(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(n)e^{-in\omega}$ soit un polynôme trigonométrique. On définit :

$$g(n) = (-1)^n h(1-n) \quad (7)$$

$$\hat{\Phi}(\omega) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \prod_{j=1}^{+\infty} (H(2^{-j}\omega)) \quad (8)$$

$$\psi(x) = \sqrt{2} \sum_n g(n)\Phi(2x-n) \quad (9)$$

Alors Φ est la fonction d'échelle d'une analyse multi-résolution et ψ est l'ondelette associée.

Intérêt

Les ondelettes à support compact de Ingrid Daubechies sont particulièrement intéressantes dans la mesure où on peut choisir la régularité voulue en imposant un certain nombre de moments nuls : la régularité augmente avec N . de plus, étant à support compact, le calcul de la transformée en ondelettes est exacte.

Inconvénient

Les ondelettes à support compact ne sont pas symétriques ce qui introduit un déphasage. Ceci peut être problématique dans certains problèmes comme la détection de frontières.

5. Ondelettes biorthogonales

La notion de biorthogonalité a été introduite en 1987 par Tchamithian et d'ondelettes biorthogonales, en 1992 par Cohen et All. Les ondelettes biorthogonales permettent d'introduire une certaine souplesse par rapport aux ondelettes orthonormales. En effet, la base permettant l'analyse (décomposition en coefficients d'ondelettes) ne sera pas la même que celle permettant la synthèse (reconstruction de la fonction) d'où des conditions moins strictes pour la construction des ondelettes.

Intérêt

Les ondelettes biorthogonales sont à support compact et peuvent être symétriques. De plus les conditions sur les filtres sont plus souples que pour les ondelettes orthonormales.

Inconvénient

La transformée nécessite deux ondelettes. De plus, elles peuvent toutes deux avoir des régularités très différentes.

Références bibliographiques

- [1] P. Zhang, *A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors*, IEEE Trans Ind Appl , (2011). **47**(1): p.34-46.
- [2] A. Gandhi, *Recent advances in modeling and online detection of stator interterm faults in electrical motors*, IEEE Trans Ind Electron , (2011) .**58**(5) : p. 64-75.
- [3] K.M. Siddiqui , K. Sahay, V.K. Giri , G. Narendra , *Diagnosis of air gap eccentricity fault in the inverter driven induction motor drives by transformative techniques*, Engineering and Material Sciences, (2016), p.127-131.
- [4] N. Bessous, S. E. Zouzou, W. Bentrach, S. Sbaa, M. Sahraoui, *Diagnosis of bearing defects in induction motors using discrete wavelet transform*, International Journal of System Assurance Engineering and Management,(2016), p.1-9.
- [5] G.Capolino et al, *Modern diagnostics techniques for electrical machines, power electronics, and drives*, IEEE Trans Ind Electron, (2015).**62** (3): p. 38-45.
- [6] M.Riera-Guasp et al, *Advances in electrical machine, power electronics, and drive condition monitoring and fault detection: state of the art*, IEEE Trans Ind Electron,(2015). **62**(3) :p.46-59.
- [7] D. Hyun, S. Lee, J. Hong , S. Bin Lee, S. Nandi ,*Detection of air gap eccentricity for induction motors using the single-phase rotation test*, IEEE Trans Energy Convers , (2012). **27**(3):p.689-96.
- [8] M.D. Prieto, G. Cirrincione, AG. Espinosa, JA. Ortega, H. Henao, *Bearing fault detection by a novel condition monitoring scheme based on statistical time features and neural networks*, IEEE Trans Ind Electron, (2013). **60**(8):p. 398-407.
- [9] S.Grubic, J. Restrepo, TG. Habetler, *Online surge testing applied to an induction machine with emulated insulation breakdown*, IEEE Trans Ind Appl , 2013.
- [10] R.Bertrand, *Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique*, Thèse de doctorat, 2000.
- [11] P. Krause, *Analysis of electric machinery*, 1986.
- [12] G.Didier, *Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances*, Thèse de doctorat, 2004.
- [13] S. Ergin, A. Uzuntas, M. Bilginer Gulmezoglu, *Detection of stator, bearing and rotor faults in induction motors*, Sci Verse Science direct, Procidia Engineering 30, (2012) ,p. 1103-109.

- [14] W. Zhou, T. G. Habetler , R. G. Harley, et L. Bin, *Incipient Bearing Fault Detection via Stator Current Noise Cancellation using Wiener Filter*, IEEE Int. Symp. on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives,(2007),p. 11-16.
- [15] B. K. Aravindh, G. Saranya, R. Selvakumar, R. S. Swetha, M. Saranya, E. P. Sumesh, *Fault detection in induction motor using WPT and multiple SVM*, Int. Journal of Control and Automation, (2010). **3**(2): p. 9-20.
- [16] P. Odonnell, *Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations*, Part I, IEEE Transactions on industry applications, (1985). **21**(4): p. 853-864.
- [17] P.F. Albrecht, J.C. Appiarius, R.M. McCoy, E.L. Owen et D.K. Sharma, *Assessment of the reliability of motors in utility applications - updated*, IEEE Transactions on energy conversion,(1986).**1**(1): p. 39-46.
- [18] O.V. Thorsen et M. Dalva, *Failure identification and analysis for high voltage induction motors in the petrochemical industry*, IEEE Transactions on industry applications, vol. 35, no. 4, Juillet/Août 1999, pp. 810-818.
- [19] R. Casimir, E .Boutleux, G .Clerc, F. Chappuis, *A decision system to detect failures in induction motors*, Systems, Man and Cybernetics, International, Conference, IEEE (2002), **5**: p .6-9 .
- [20] A. H. Bonnett and C. Yung , *Increased Efficiency Versus Increased Reliability*, Industry Applications Magazine, IEEE, (2008). **14**: p. 29-36.
- [21] A. Ceban, *Méthode globale de diagnostic des machines électriques*, Thèse de doctorat, 2012.
- [22] R. Bertrand, *Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique*, Thèse de doctorat, 2000.
- [23] G. Didier, *Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances*, Thèse de doctorat, 2004.
- [24] M. Say, *The performance and design of alternating current machines*, M/S Pitman, London, and ISBN 81-239-1027-4.
- [25] G. Singh, S. Al Kazzaz, *Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research a survey*, Electr Power Syst Res, (2003).**64** (2): p.145-158.
- [26] A. Boudiaf , A. Djebala , A. Bendjma , H. Balaska, A. Dahane, *A summary of vibration analysis techniques for fault detection and diagnosis in bearing*, IEEE Modeling, Identification and Control(ICMIC), 2016, p. 37-42.

- [27] O. Thorsen, M. Dalva , *A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries*, IEEE Trans Ind Appl,(1995).**31**(5):p. 1186-1196.
- [28] S. S. Refaat, H. Abu-Rub, *ANN-based diagnosis of incipient stator winding turn faults for three-phase induction motors in the presence of unbalanced supply voltage*, Annual Conference Industrial Electronics Society, Yokohama, Japan, IEEE 2015.
- [29] P. J. Tavner, A. F. Anderson, *Faults in Large Generators*, IEEE Proceedings on Electric Power Applications, (2005).**152**(6):p. 1427-1439.
- [30] J. Ramirez-Nino, A. Pascacio, *Detecting Interturn Short Circuits in Rotor Windings*, IEEE Comp Appl on Electric Power Applications, (2001).**14** (4):p. 39-42.
- [31] N. Paterson, *The Analysis and Detection of Faults in Three Phase Induction Machines Using Finite Element Techniques*, Doctoral Thesis, Robert Gordon University, Wetherby British Library, Aberdeen, 1998, UK.
- [32] Electric Power Research Institute, *Improved Motors for Utility Applications*, Publication EL-2678, final report, 1982.
- [33] S. Barker, *Avoiding Premature Bearing Failure with Inverter Fed Induction Motors*, Power Engineering Journal, (2000).**14**(4):p. 182-189.
- [34] I. Kerszenbaum, *Shaft Currents in Electric Machines Fed by Solid-State Drives*, IEEE Conference on Industrial and Commercial Power Systems, 1992, p. 71-79.
- [35] P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines*, Oxford, Clarendon, 1993, p. 378.
- [36] W. T. Thomson, R. J. Gilmore, *Motor Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives–Fundamentals, Data Interpretation, and Industrial Case Histories*, Proceedings of the 32nd Turbo machinery Symposium, (2013), p. 145-156.
- [37] P. J. Tavner, A. F. Anderson, *Faults in Large Generators*, IEEE Proceedings on Electric Power Applications, (2005).**152**(6): p. 1427-1439.
- [38] B. Corne , B. Vervisch, C. Debruyne, J. Knockaert, J. Desmet, *Comparing MCSA with vibration analysis in order to detect bearing faults A case study*, International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), (2015).p. 1366-1372.
- [40] H. L. Sun, Z.J. He, Y.Y. Zi, *Multiwavelet transform and its applications in mechanical fault diagnosis*, Mech Syst Signal Process, (2014).**43** (1-2):p.1-24.

- [41] G.G. CAI, X.F. Chen, Z.J. He, *Sparsity enabled signal decomposition using tunable Q-factor wavelet transform for fault feature extraction of gearbox*, Mech Syst Signal Process, 2013.**41**(1–2):p.4-53.
- [42] S.R. Qin, Y.M. Zhong, *Research on the unified mathematical model for FT, STFT and WT and its applications*, Mech Syst Signal Process, (2004). **18**(6): p. 1335-1347.
- [43] K. Ding, W.Y. Zhu, Z.J. Yang, *Parameter estimation accuracy of FFT and FT discrete spectrum correction*, J Mech Eng, (2010).**46**(7): p .68-73.
- [44] S.V. Narasimhan, S. Pavanalatha, *Estimation of evolutionary spectrum based on short time Fourier transform and modified group delay*, Signal Process, (2004).**84**(11) :p.2139-2152.
- [45] G.K. Nilsen, *Recursive time–frequency reassignment*, IEEE Trans Signal Process, (2009).**57**(8):p.3283-3287.
- [46] X. P. Liu, J. Shi, X. J. Sha, *A general frame work for sampling and reconstruction in function spaces associated with fractional Fourier transform*, Signal Process, (2015).**107**:p.319-326.
- [47] D. Baccar, D. Söfker, *Wear detection by means of wavelet-based acoustic emission analysis*, Mech Syst Signal Process, (2015).**60** (61):p. 198-207.
- [48] A.C. Binojkumar, B. Saritha, G. Narayanan, *Experimental Comparison of Conventional and Bus-Clamping PWM Methods Based on Electrical and Acoustic Noise Spectra of Induction Motor Drives*, IEEE Transactions on Industry Applications, (2016).p. 4061-4073.
- [49] L. Saidi, *The deterministic bispectrum of coupled harmonic random signals and its application to rotor faults diagnosis considering noise immunity*, Applied Acoustics (2017).**122**:p.72-87.
- [50] R.B. Randall, *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Automotive and Aerospace Applications*, Wiley, (2011).
- [51] A. E. Mabrouk, S. E. Zouzou, S. Khelif, *On-line fault diagnostics in operating threephase induction motors by the active and reactive currents*, Int J Syst Assur Eng Managm, (2017).
- [52] A. Bouzida, *Experimental analysis of dynamic eccentricity in induction machine using motor current signature analysis and discrete wavelet transform*, Revue Romaine des Sciences Techniques - Serie Électrotechnique et Énergétique, (2017).**62**(2): p.142-147.

- [53] N. Bessous, Z. S. Eddine, W. Bentrach, S. Sbaa, *Detection and Diagnosis of Static Eccentricity Fault in Induction Machines Using the MCSA and DWT Method*, International Conference on Electrical Sciences and Technologies CISTEM, Marrakesh, Morocco, (2016)
- [54] Z.S. Wang, S.R. Bian , M. Lei , *Feature extraction and classification of load dynamic characteristics based on lifting wavelet packet transform in power system load modeling*, Int J Electr Power Energy Syst, (2014).**62**: p.353-363.
- [55] R.Q. Ran, R.X.Gao, X.F.Chen, *Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: a review with applications*, Signal Process, (2014). **96**: p.1-15.
- [56] S. Duvvuri, K. Detroja, *Model-based stator interturn short-circuit fault detection and diagnosis in induction motors*, The 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), (2015).p. 167-172.
- [57] B.Bessam, A. Menacer, M. Boumehraz, H. Cherif, *A novel method for induction motors stator inter-turn short circuit fault diagnosis based on wavelet energy and neural network*, In Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), (2015).p. 143-149.
- [58] K. Deekshit, K. C. G. Rao , M. Venu , R. S. Rao , *Sreenivasu Estimation of bearing faults in induction motor by MCSA is using Daubechies wavelet analysis*, IEEE Intern Conf,(2014).
- [59] R.Yan, R.X. Gao, X. Chen, *Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: a review with applications*, Signal Process, (2014),**96** : p. 1-15.
- [60] D. Wang, Y .Zhao, C. Yi, K. I. Tsui, J. Lin, *Sparsity guided empirical wavelet transform for fault diagnosis of rolling element bearings* , Mechanical Systems and Signal Processing , (2018).**101**:p. 292-308.
- [61] N. Bessous, Z. S. Eddine, S. Mohamed, *Experimental exploitation for the diagnosis to the induction machine under a bearing fault-using MCSA*, 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), (2015) .p. 1-4.
- [62] M. Farajzadeh-Zanjani, R. Razavi-Far, M. Saif, L.Rueda, *Efficient feature extraction of vibration signals for diagnosing bearing defects in induction motors* , Neural Networks (IJCNN), (2016). p. 4504-4511
- [63] P .He, Y. Y.Zi, B. Q. Zi, *Automatic fault feature extraction of mechanical anomaly on induction motor bearing using ensemble super-wavelet transform*, Mech Syst Signal Process. (2015). p.457-480.

- [64] J. Hamouche, D. Diallo, C. Delpha, *Discrimination des défauts de roulements par une analyse spectrale globale*, Symposium de Génie Électrique, (2014).
- [65] F. Immovilli, C. Bianchini, M. Cocconcelli, A. Bellini, R. Rubini, *Bearing fault model for induction motor with externally induced vibration*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, (2013) .p. 3408-3418.
- [66] R.R. Coifman, Y. Meyer, S. Quake, *Signal processing and compression with wavelet packets*, Wavel Appl, (1994). **442**: p.363-379.
- [67] Z.A. Song, Y.F. Song, *A Method of Gear Fault Diagnosis Based on CWT and ANN, Business Intelligence and Financial Engineering*, Beijing, China, (2009).
- [68] K. Yahia, *Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée par une Approche Signal*, Thèse de Doctorat en sciences, Université de Mohamed Khider, Biskra, (2012).
- [69] Y. Meyer, *Ondelettes et Opérateurs I : Ondelettes*, (1990).
- [70] S.Mallat, *A theory for multiresolution signal decomposition : The wavelet representation*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, (1989), **11**.
- [71] S. Mallat, *A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet presentation*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, (1989). **11**.
- [72] J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, M. P. M. Palomares, *Validation of a new a method for the diagnosis of rotor bar failures in induction machines*, IEEE Transactions on Industry Applications, **42**: p. 990-996.
- [73] A. Boudiaf, A. Djebala, H. Bendjma, A. Balaska, A. Dahane, *A summary of vibration analysis techniques for fault detection and diagnosis in bearing*, Modelling, Identification and Control (ICMIC), IEEE, (2016) .p. 37-42.
- [74] L. Frosini, C. Harlisca, L. Szabó, *Induction machine bearing fault detection by means of statistical processing of the stray flux measurement*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, (2015). **62**:p. 1846-1854.
- [75] M. Ojaghi, M. Sabouri, *Dynamic modeling and simulation of induction motors with different bearing faults*, Electrical Machines and Systems (ICEMS), The 18th International Conference, (2015) .p. 726-731.
- [76] R. K .Patel, S. Agrawal, N. C. Joshi, *Induction motor bearing fault identification using vibration measurement*, Engineering and Systems (SCES), IEEE, (20 12) .p. 1-5.

- [77] G. B. Kliman, W. J. Premerlani, B. Yazici, R. A. Koegl, J. Mazereeuw , *Sensorless , online Motor diagnostics* , Computer Applications Power,(1997). **10**:p. 39-43.
- [78] N. Bessous, Z. S. Eddine, W. Bentrach, S. Sbaa, *A Comparative Study between the FFT and DWT Method Applied to a Bearing Fault in Induction Motors –Results Dedicated to the Industry* , WSEAS, Transactions on systems and control, (2015).
- [79] A. Prudhom , J. Antonino-Daviu, H. Razik , V. Climente-Alarcon, *Time-frequency vibration analysis for the detection of motor damages caused by bearing currents*, Mechanical Systems and Signal Processing , (2015).
- [80] H.K .Jiang, Y. Xia, X.D. Wang, *Rolling bearing fault detection using an adaptive lifting multiwavelet packet with a 11/2 dimension spectrum*, Mech Syst Signal Process, (2013).**24**(12) : p.1-10.
- [81] W. Sweldens, *The lifting scheme: a construction of second generation wavelets*, SIAMJ Math Anal. (1998).**29**(2): p.511-546.
- [82] R. Zhou, W .Bao, *Mechanical equipment fault diagnosis based on redundant second generation wavelet packet transform*, Digit Signal Process, (2010). **20** (1): p. 276-288.
- [83] B.Q.Chen, Z.S.Zhang , *Pseudo non-dyadic second generation wavelet tight frame for machine fault diagnosis*, Proceedings of IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Minneapolis, MN,(2013).
- [84] Z.P. Meng, Y.G.Xu, G.L. Zhao, *Fault diagnosis of rolling bearing based on dual-tree complex wavelet transform and AR power spectrum*, Adv Mater Res, (2013). p .271-276.
- [85] H. Naimi, A.B.H. Adamou, L. Mitiche , *Medical image denoising using dual tree complex thre sholding wavelet transform and Wiener filter*, J. King Saud Univ. Comput Inf Sci, (2015).**27**(1) : p. 40-45.
- [86] G. Piella, G. Pau, B. Pesquet-Popescu, *Adaptive lifting schemes combining seminorms for lossless image compression*, Proc of the IEEE Int Conf on Image Processing, Gênes, Italie, Septembre (2005).
- [87] S. Mallat, *Une exploration des signaux en ondelettes*, Les Éditions de l'École Polytechnique, (2000).
- [88] G. Piella, B.Pesquet-Popescu , *A three-step nonlinear lifting scheme for lossless image compression*, IEEE Signal Processing Letters,(2007).

Références bibliographiques

- [89] G. Piella, B. Pesquet-Popescu, H. J. A. M. Heijmans, *Adaptive update lifting with a decision rule based on derivative filters*, IEEE Signal Processing Letters, (2002) **9**(10) : p.329-332.
- [90] H. J. A. M. Heijmans, B. Pesquet-Popescu, G. Piella, *Building non redundant adaptive wavelets by update lifting*, Applied and Computational Harmonic Analysis, (2005). **18**: p. 252-281.