



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Badji Mokhtar- Annaba

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT

DEPARTEMENT D'ELECTROMECHANIQUE

LABORATOIRE DES SYSTEMES D'ELECTROMECHANIQUE (LSELM)

جامعة باجي مختار- عنابة

كلية علوم الهندسة

قسم الإلكتروميكانيك

مخبر الأجهزة الكهروميكانيكية

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Thème

**Contribution au diagnostic des défauts mécaniques dans les machines
électriques triphasées à induction par l'analyse du vecteur d'espace courant**

Option

ELECTROMECHANIQUE

Par

LAHOUSNIA Nasreddine

Soutenue le 30 Mars 2021

DEVANT LE JURY

Président : Pr. BELHAMRA Ali
Examineur: Pr. BOURAS Slimane
Rapporteur : Pr. RACHEDI Mohamed Faouzi
Examineur : Pr. GHEMARI Zine
Examineur : Dr. BERRABAH Fouad

Université Badji-Mokhtar-Annaba
Université Badji-Mokhtar-Annaba
Université Badji-Mokhtar-Annaba
Université Mohamed Boudiaf-M'sila
Université Mohamed Boudiaf-M'sila

Résumé :

La surveillance et la détection des défauts améliorent la fiabilité et la disponibilité du système existant. Étant donné que les divers défauts se dégradent relativement lentement, il est possible de détecter les défauts à un stade précoce. Ainsi, pour des raisons de sécurité et d'économie, la MCSA a connu une croissance remarquable durant les deux dernières décennies. La plupart des études utilisant cette technique ne traitent que l'information fournie par une seule phase. Un point important concernant les approches monophasées est que l'information contenues dans chaque phase est légèrement différente d'une phase à l'autre en raison des déphasages initiaux, déséquilibre d'amplitude et / ou de phase, des composantes hautes fréquences, du bruit de mesure, etc. par conséquent l'analyse basée sur le courant d'une seule phase n'utilise qu'une partie de l'ensemble des informations disponibles dans le système triphasé. Par conséquent, ce travail vise l'amélioration de la détection de balourd grâce à la transformée du vecteur d'espace courant et comparer les résultats à l'analyse monophasée pour montrer les avantages de cette transformée au moyen de l'analyse des différents techniques de traitement de signal.

Mots clés : Diagnostic, défauts mécaniques, modélisation, moteurs triphasés, vecteur d'espace courant,

Abstract

Monitoring and detecting faults improves the reliability and availability of the existing system. Since the various defects degrade relatively slowly, it is possible to detect the defects at an early stage. For security and economic reasons, the MCSA has experienced remarkable growth in the past two decades. Most studies using this technique only deal with the information provided by a single phase. An important point concerning single-phase approaches is that the information contained in each phase is slightly different from one phase to another due to the initial phase shifts, amplitude and / or phase imbalance, high frequency components, noise measurement, etc. therefore the single-phase current analysis uses only part of the set of information available in the three-phase system. Consequently, this work aims at improving the imbalance detection thanks to the transform of the current space vector and compare the results with the single-phase analysis to show the advantages of this transform by means of the analysis of the different techniques of Signal processing.

Key words : Diagnosis, mechanical faults, modeling, three-phase motors, current space vector,

ملخص:

تعمل مراقبة واكتشاف الأعطال على تحسين موثوقية وتوافر النظام الحالي. نظرًا لأن العيوب المختلفة تتطور ببطء نسبيًا، فمن الممكن اكتشاف العيوب في مرحلة مبكرة. لأسباب أمنية واقتصادية، شهدت MCSA نموًا ملحوظًا في العقد الماضي. معظم الدراسات التي تستخدم هذه التقنية تتعامل فقط مع المعلومات المقدمة من طور واحد. هناك نقطة مهمة تتعلق بمقاربات الطور الواحد وهي أن المعلومات الواردة في كل طور تختلف قليلاً من طور إلى آخر بسبب التغيرات الأولية في الطور، واتساع و / أو اختلال الطور، ومكونات التردد العالي، وضوضاء القياس، إلخ. لذلك يستخدم التحليل الحالي أحادي الطور جزءًا فقط من مجموعة المعلومات المتاحة في نظام الأطوار الثلاث. وبالتالي، يهدف هذا العمل إلى تحسين الكشف عن عدم التوازن بفضل تحويل ناقل الفضاء للتيار ومقارنة النتائج مع تحليل الطور الواحدة لإظهار مزايا هذا التحويل عن طريق تحليل التقنيات المختلفة معالجة الإشارات.

كلمات مفتاحية: التشخيص، الأعطال الميكانيكية، النمذجة، المحركات ثلاثية الطور، ناقل الفضاء للتيار،

Remerciements

Avant tout, je remercie DIEU le Tout- puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à remercier Pr Belhamra Ali pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude aux membres du jury notamment le professeur Bouras Slimane de Université- Badji-Mokhtar-Annaba, le professeur Ghemari Zine et Docteur Berrabah Fouad de Université Mohamed Boudiaf M'sila pour avoir accepté d'examiner jury ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mon remerciement et ma gratitude à mon encadreur :

Pr. Mohammed Faouzi Rachedi qui m'a aidé pour rendre ce travail effectif.

Mes remerciements aussi au département de l'électromécanique de l'université d'Annaba et à tous les enseignants qui m'ont enseignés durant le cursus.

Enfin je remercie aussi toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin à la rédaction de cette thèse.

Dédicace

Je dédie ce modeste Travail A mes Chers et tendres Parents,

A Mes chers Frères, ma sœur et toute ma famille.

A tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce travail.

A mes amis.

*A mes collègues et tous ceux qui me connaissent et
m'aiment*

Nasreddine

Liste des symboles

m : Mass

g : Glissement

β : L'angle de contact de la bille avec la cage.

p : Nombre de paires de pôles

J : Moment d'inertie

Λ : La perméabilité de l'entrefer

g : Force gravitationnel

n_s : vitesse de synchronisme

n_r : vitesse de rotation

f_s : Fréquence de synchronisme

f_r : Fréquence de rotation

f_e : Fréquence d'échantillonnage

R_s : La résistance statorique de la machine.

F_s : Force magnétomotrice statorique

ω_s : vitesse angulaire

I_s : L'amplitude du courant statorique à la fréquence fondamentale

θ_r : L'angle mécanique

ω_r : La vitesse de l'arbre

ω_c : Pulsation associée au défaut

I_R^Φ : L'amplitude du courant statorique induit par le champ magnétique du rotor.

$i(t)$: Le vecteur d'espace courant statorique

$v(t)$: le vecteur d'espace des tensions d'alimentation

N_b : Le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles)

D_b : Diamètre des billes

D_c : Diamètre du centre des billes

$\Phi(t)$: Flux magnétique

C_{ch} : Couple de charge

C_{cst} : Couple constant

C_{mot} : Couple moteur

$C_{bal}(t)$: Oscillation du couple de charge

f_{osc} : Des oscillations de couple de fréquence

f_{Int} : Défauts sur la bague intérieure

f_{Ext} : Défauts sur la bague extérieure

f_{bille} : Fréquence caractéristique du défaut de bille

$F_R(t, \theta)$: Force magnétomotrice rotorique

$B(t, \theta)$: champ magnétique radial

Liste des abréviations

MCSA : Motorcurrent signature analysis

FFT : Fast Fourier Transform

TFD : Transformée de fourierdiscrete

TCFT : Transformée de fourier a court term

DSP : Densité spectrale de puissance

DWV : Distribution de Wigner-Ville

TO : transformée en ondelettes

TOD : transformée en ondelettes discrète

CS : Composantes symétriques

FMM : Force Magnétomotrice

VEC :Vecteur Espace Courant

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Fig.I.1	<i>Classification des approches de diagnostic sans modèle</i>	04
Fig.II.1	<i>Répartition des défauts dans les machines électriques du domaine industriel en 1982</i>	13
Fig.II.2	<i>Distribution des défauts dans les machines asynchrones de grande puissance</i>	14
Fig.II.3	<i>Schéma résume les types des défauts de la machine à induction</i>	14
Fig.II.4	<i>Représentation des différents défauts statoriques possible</i>	17
Fig.II.5	<i>Représentation des différents défauts rotoriques possible</i>	17
Fig.II.6	<i>Représentation de l'excentricité statique et dynamique</i>	19
Fig.II.7	<i>Représentation des différents types de désalignement</i>	21
Fig.II.8	<i>Structure d'un roulement à billes</i>	22
Fig.II.9	<i>boite de vitesse</i>	24
Fig.II.10	<i>Modélisation d'un défaut de balourd</i>	25
Fig.III.1	<i>Classification des différentes techniques de traitement de signal</i>	35
Fig.III.2	<i>Principe de la transformée de Fourier sur une fenêtre glissant (STFT)</i>	43
Fig.III.3	<i>Différents types d'ondelettes mères</i>	46
Fig.III.4	<i>Décomposition du signal en approximation et détail</i>	48
Fig.III.5	<i>Décomposition simple du signal s en approximations et détails</i>	49
Fig.III.6	<i>Décomposition du signal s en multi-niveaux</i>	50
Fig.III.7	<i>décomposition en ondelettes par paquets d'ordre 3</i>	51
Fig.VI.1	<i>Représentation schématique d'un déséquilibre mécanique par une masse m</i>	57
Fig.VI.2	<i>Calcul du courant par approche de Force Magnétomotrice et perméance de l'entrefer</i>	61

Fig.VI.3	<i>Référentiel tournant (R) et référentiel fixe (S)</i>	63
Fig.V.1	<i>Dispositif de base PT500</i>	66
Fig.V.2	<i>Schéma bloc du principe de mesure du courant</i>	67
Fig.V.3	<i>Constitution du carte Dspace a)Illustration de la carte DS1104 b) Dongle c) Illustration du Panneau de contrôle CP1104</i>	69
Fig.V.4	<i>Dispositif expérimental (composé d'une machine à induction de 0,37 kW alimentée par un onduleur) et d'un système d'acquisition Dspace 1104</i>	70
Fig.V.5	<i>Spectre DSP d'un courant monophasé dans un état sain et avec un déséquilibre de charge de 2,5 g</i>	72
Fig.V.6	<i>Spectre DSP d'un courant monophasé dans un état sain et avec un déséquilibre de charge de 4 g</i>	72
Fig.V.7	<i>Analyse spectrale du vecteur d'espace courant dans un état sain et avec un déséquilibre de charge de 2,5 g</i>	73
Fig.V.8	<i>Spectre DSP Analyse spectrale du vecteur d'espace courant dans un état sain et avec un déséquilibre de charge de 4 g</i>	73
Fig.V.9	<i>Énergie de décomposition du courant monophasé dans un état sain et avec un déséquilibre de charge de 2,5 g</i>	74
FigV.10	<i>Énergie de décomposition du courant monophasé dans un état sain et avec un déséquilibre de charge de 4 g</i>	75
FigV.11	<i>Énergie de décomposition du VEC pour un état sain et pour un déséquilibre de charge de 2.5 g</i>	75
FigV.12	<i>Énergie de décomposition du VEC pour un état sain et pour un déséquilibre de charge de 4 g</i>	75
FigV.13	<i>Spectre DSP d'un courant monophasé dans un état sain et avec un balourd de 2,5 g</i>	77
FigV.14	<i>Spectre DSP d'un courant monophasé dans un état sain et avec un balourd de 12 g</i>	77
FigV.15	<i>Analyse spectrale du VEC dans un état sain et avec un balourd de 2,5 g</i>	78
FigV.16	<i>Analyse spectrale du VEC dans un état sain et avec un balourd de 12 g</i>	78
FigV.17	<i>Énergie de décomposition du courant monophasé dans un état sain et avec un balourd de 2,5 g</i>	79
FigV.18	<i>Énergie de décomposition du courant monophasé dans un état sain et avec un balourd de 12 g</i>	79
FigV.19	<i>Énergie de décomposition du VEC pour un état sain et pour un balourd de 2.5 g</i>	79
FigV.20	<i>Énergie de décomposition du VEC pour un état sain et pour un balourd de 12 g</i>	80

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tab.VI.1	<i>Énergie de chaque 9ème échelle dans les cas sains et défectueux pour signal monophasé et le vecteur d'espace courant</i>	76
Tab.VI.2	<i>Énergie de chaque 9ème échelle dans les cas sains et défectueux pour signal monophasé et le vecteur d'espace courant</i>	80

Sommaire

Remerciement	I
Dédicace	II
Liste des tableaux	III
Liste des figures	IV
Résumé	V

Chapitre I : Etude et synthèse bibliographique

I.1 Introduction Générale	2
I.2 Etude et synthèse bibliographique	3
I.3 Motivation de la recherche	5
I.4 Énoncé du problème	6
I.5 Objectifs et contributions souhaités	8
I.6 Structure de la thèse	8

Chapitre II : Machine asynchrone et méthodes de diagnostic

II.1 Introduction.....	12
II.2 la machine asynchrone.....	12
II.3 Défauts de la machine asynchrone.....	13
II.2.1 Défauts d'origine électrique	
II.2.1.1. Défaillances au stator.....	15
II.2.1.2. Défaillances au rotor.....	17
II.2.2 Défauts mécaniques	
II.2.2.1 Défaut d'excentricité.....	18
II.2.2.2 Les défauts des flasques.....	19
II.2.2.3 Désalignement.....	19
II.2.2.4 Défauts de roulement.....	21
II.2.2.5 Défauts d'engrenage.....	23
II.2.2.6 Balourd	25
II.2.2.7 Défauts de la charge	
a. Classification des différents types de charge les plus rencontrés.....	26
b Exemples de fonctionnements perturbateurs.....	26

II.3	Moyens pour la surveillance du moteur à induction	
II.3.1	Analyse Thermographique	27
II.3.2	Analyse du couple électromagnétique	28
II.3.3	Analyse vibratoire	28
II.3.4	Analyse d'émission acoustique	29
II.3.5	Analyse des signaux électriques	30
II.3.6	Analyse de flux	31
II.4	Conclusion	32

Chapitre III : Techniques de traitement du signal

III.1	Introduction	34
III.2	Techniques de détection des défauts	34
III.3	Classification des signaux	36
III.3.1	Signaux déterministes	36
III.3.2	Signaux aléatoires	36
III.3.3	Paramétrage de l'échantillonnage	37
III.3.4	Résolution	37
III.4	Traitement du signal	
III.4.1	Analyse dans le domaine temporel	38
III.4.2	Analyse dans le domaine fréquentiel	38
III.4.2.1	Transformée de Fourier	39
III.4.2.2	Periodogramme	
	a. Périodogrammes simples	40
	b. Periodogramme modifié	41
III.4.3	Analyse dans le domaine temps-fréquence	41
III.4.3.1	Transformé de Fourier à Court Terme (TFCT)	41
III.4.3.2	La transformée de Wigner-Ville	43
III.4.3.3	Transformée d'ondelettes	43
III.5	Conclusion	52

Chapitre IV : Effets et Signature du balourd dans les courants triphasés

IV.1	Introduction	54
IV.2	Origines et effets d'un déséquilibre mécanique dans un système d'entraînement	54
IV.3	Effets d'un déséquilibre mécanique sur les différentes grandeurs électriques et mécaniques	55
IV.4	Transformation du vecteur d'espace	56

IV.5	Transmission du défaut vers le courant statorique.....	58
	IV.5.1 Effet sur le courant statorique.....	60
IV.6	Conclusion.....	64

Chapitre V : Expérimentation et analyse des résultats

V.1	Introduction.....	66
V.2	Description du banc d'essai	
	V.2.1 Description de l'appareil	66
	V.2.2 Système d'acquisition Dspace.....	67
V.3	Application de la densité spectrale de puissance.....	71
V.4	Application de décomposition par paquet d'ondelette.....	73
V.5	Implantation sur le 2ème moteur	76
V.5	Conclusion.....	82

	Conclusion Générale.....	84
--	---------------------------------	-----------

Références

	<i>bibliographiques.....</i>	86
--	-------------------------------------	-----------

***Chapitre I : ETUDE ET
SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE***

I.1 Introduction Générale

Les moteurs à induction sont aujourd'hui largement utilisés dans tous les types d'applications industrielles en raison de leur construction simple, grande fiabilité et de la disponibilité de convertisseurs de puissance utilisant des stratégies de contrôle efficaces. Ces moteurs peuvent fonctionner comme des moteurs ou des générateurs [1,2]. Un moteur à induction contient un stator et un rotor monté sur des roulements, et le rotor est séparé du stator par un entrefer. Les enroulements du stator et du rotor sont parcourus par un courant alternatif. Ce courant est fourni au bobinage du stator directement alors qu'il est alimenté au bobinage du rotor par induction.

Ces moteurs sont principalement utilisés en tant que dispositifs critiques pour les activités industrielles majeures et sont en général intégrés à divers appareils et applications disponibles dans le commerce. Tous les équipements basés sur cette motorisation facilitent généralement les compétences de base, importantes pour la réussite de certaines entreprises et la sécurité des opérateurs.

Le faible coût du moteur à induction et sa taille miniaturisée, sa robustesse et son fonctionnement flexible avec une alimentation minimale rendent ce système hautement efficace et utile dans le processus industriel moderne [3]. Bien que très fiables, ils sont soumis à différents modes de défaillance. En présentant son fonctionnement, cet appareil souffre d'un certain nombre de défauts [1]. Si un défaut n'est pas détecté durant sa naissance initiale ou s'il est autorisé à se développer davantage, cela peut entraîner une défaillance du système. Il existe une variété de défauts de la machine tels que les défauts d'enroulements statoriques, les cassures des barres rotoriques, l'excentricité et les défauts de roulement [4].

La surveillance et la détection des défauts améliorent la fiabilité et la disponibilité du système existant. Étant donné que les divers défauts se dégradent relativement lentement, il est possible de détecter les défauts à un stade précoce. Cela minimise les pertes de production, les gaspillages financiers et même interdit les pénalités catastrophiques. Les mécanismes de surveillance et de diagnostic des défauts sont nécessaires pour formuler une carte bien définie et qualifiée entre les signaux du moteur, ainsi que des indications de l'état de la machine à induction [1]. La classification des conditions du moteur, puis l'évaluation de la fréquence correspondante des défauts survenus à partir des signaux n'a jamais été un travail simple et, en fait, celles-ci sont influencées par de nombreux facteurs dans la machine.

1. Etude et Synthèse Bibliographique

Plusieurs méthodes d'identification des défauts ont été développées et appliquées efficacement pour détecter les défauts de la machine à différents stades 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 de surveiller le comportement des moteurs de différentes tailles. Traditionnellement, les procédures de maintenance dans l'industrie suivent deux approches. La première consiste à effectuer une maintenance à intervalle de temps fixe, où les ingénieurs profitent des cycles de production plus lents pour inspecter complètement tous les aspects de la machine. La seconde consiste à agir simplement en réponse à la défaillance des installations industrielles, chaque fois que cela se produit. Puis, tout en utilisant la technologie d'aujourd'hui, la nouvelle approche scientifique devenait possible pour la gestion de la maintenance. L'un des éléments clés de cette nouvelle approche est la maintenance prédictive via la surveillance de l'état de la machine.

Avec la mise en œuvre d'approches de traitement du signal hautement efficaces et avancées, la livraison des informations de diagnostic aux opérateurs devient très simple et facile, même bien avant la défaillance catastrophique de la machine. La question exigeante de cette approche est que ce mécanisme nécessite une supervision continue avec une présence humaine. L'automatisation du processus de diagnostic pourrait englober la progression logique des méthodologies de surveillance. Pour automatiser le processus de diagnostic, un certain nombre de techniques de diagnostic informatique ont récemment été proposées.

1.2 Etude et synthèse bibliographique

Dans le contexte de la surveillance, il est important de différencier la détection du défaut du diagnostic de celui-ci. La détection de panne est la décision de déterminer si le défaut est présent ou non, alors que le diagnostic fournit plus d'informations sur la cause première origine de la panne ou la localisation du défaut. Ces informations peuvent être utilisées pour minimiser les temps d'arrêt et planifier des actions de maintenance appropriées. Il existe généralement deux approches pour la surveillance et la détection des défauts dans les machines électriques :

- ✓ Approche modèle : Ces méthodes reposent sur l'utilisation de modèles du processus à surveiller incluant ou non l'influence des défauts et des perturbations sur l'état et la sortie. Le principe de ce type de diagnostic est de détecter, à partir de l'écart entre le comportement réel du système et son comportement prédit généré par son modèle, la

présence ou non d'une anomalie et d'identifier la défaillance si présente. Selon ce mécanisme de diagnostic, on distingue :

- ✓ la surveillance par les observateurs [1-3].
- ✓ la surveillance par estimation paramétrique [4, 5].
- ✓ la surveillance par redondance analytique (espace de parité) [6].

Approche signal : Les approches de diagnostic sans modèles ne nécessitent aucun modèle mathématique précis du système à surveiller. Les informations acquises sur le procédé considéré permettent de caractériser son fonctionnement [7, 8]. Ces informations, appelées indicateurs de défauts, sont analysées par des techniques de traitement du signal, des méthodes statistiques ou par des méthodes non statistiques à base de connaissance, comme représenté dans la figure 1.

Les méthodes sans modèle ont l'avantage de s'appuyer sur des connaissances du système reposant juste sur un retour d'expérience, ce qui est le mieux adapté à certaines applications industrielles complexes où la conception d'un modèle précis est difficile au contraire aux approche à base de modèle qui nécessite un modèle dynamique précis [9].

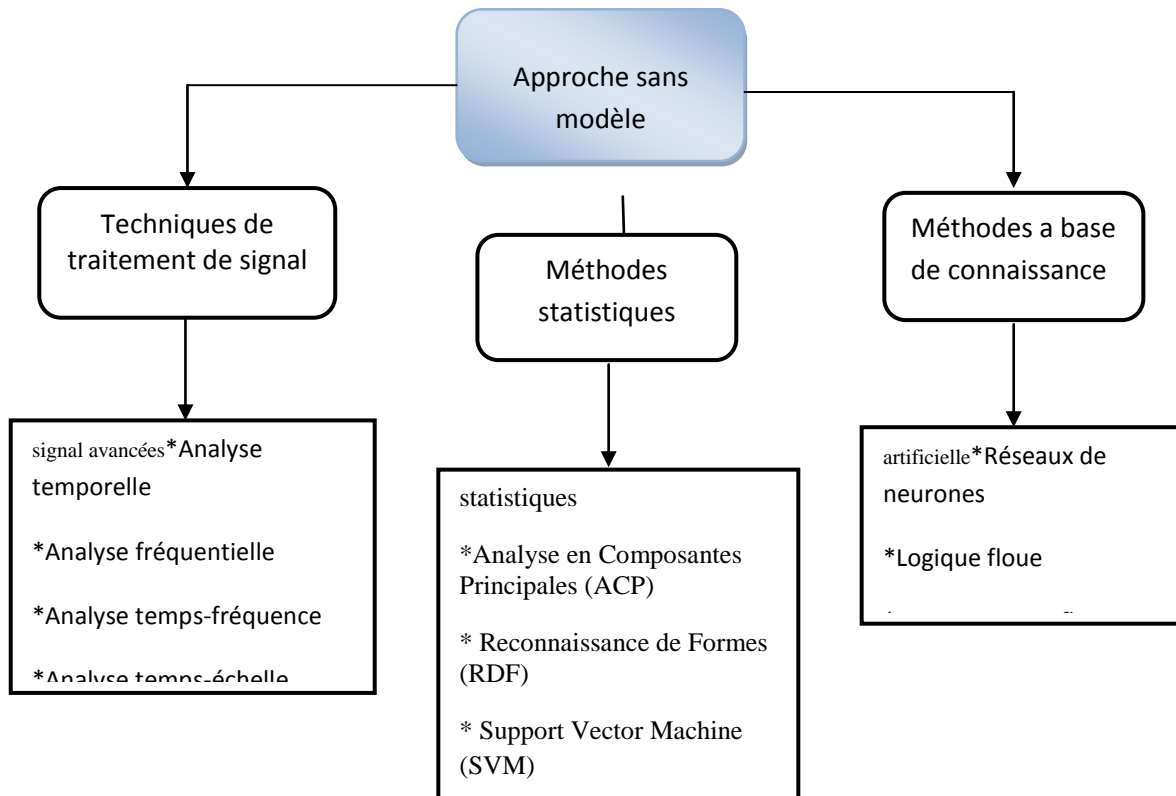


Figure I.1. Classification des approches de diagnostic sans modèle

Une approche signal est choisie dans ce travail, par conséquent, la détection et le diagnostic des défauts sont basés uniquement sur le traitement et l'analyse du signal mesuré.

I.3 Motivation de la recherche

Les techniques classiques de surveillance tel que l'analyse vibratoire et l'émission acoustique exigent généralement des équipements, tels que des capteurs spécifiques, un système de traitement et d'acquisition de données, en plus de l'analyse de données rendant ces techniques coûteuses. Parmi les autres inconvénients, citons l'accessibilité limitée en termes de montage de capteurs et de transducteurs, emplacement du capteur, sensibilité et interférence d'autres paramètres environnementaux et ambiants. De plus, lorsque des entraînements à vitesse variable sans capteur existent, les techniques conventionnelles peuvent ne pas être valides car ces systèmes modifient les paramètres d'alimentation et augmentent le niveau de bruit dû aux actions des régulateurs qui cachent les défauts [10].

Il existe donc un besoin des stratégies de détection fiables pour les défauts électriques et mécaniques dans les moteurs alimentés par réseau ou par onduleur utilisant uniquement des grandeurs électriques [11]. Les principaux avantages de l'utilisation des grandeurs électriques d'alimentation de la machine, et plus particulièrement les courants statoriques incluent [11 12]:

- Les signaux utilisés par le système de contrôle sont déjà disponibles sur le variateur et peuvent être analysés pour les objectifs de surveillance simultanément, sans addition des mesures.
- Le fait que la plupart des convertisseurs de fréquence soient basés sur un microprocesseur permet une intégration du système de surveillance. Les actionneurs peuvent être simplement connectés aux ordinateurs via le réseau ou localement, et les données peuvent être extraites directement pour une surveillance hors ligne et / ou en ligne.
- Les signaux traités sont principalement liés au système surveillé, ce qui réduit les interférences avec d'autres signaux d'équipement.
- Prévention de l'utilisation d'équipements et de capteurs supplémentaires, évite beaucoup de problèmes tels que l'espace, l'emplacement, la fiabilité, la précision et le bruit.
- Annuler la nécessité de modifier le système car tous les signaux sont déjà disponibles seulement les paramètres ont besoin d'être extraites de l'actionneur vers l'ordinateur de traitement lorsque une analyse à distance ou hors ligne est effectuée

- Dans la plupart des cas, les actionneurs sont connectés à la salle de contrôle via un réseau ce qui simplifie le processus de surveillance en ligne à distance tout en évitant d'autres frais.

L'utilisation des paramètres de contrôle pour identifier et localiser les différents défauts mécaniques sur le système en aval peut améliorer considérablement la disponibilité de la machine et augmenter la fiabilité du système de surveillance. En plus d'améliorer les performances de l'équipement, les coûts de surveillance sont considérablement réduits.

I.4 Énoncé du problème

Les grandeurs de base associées aux installations électromécaniques, telles que le courant et la tension, sont facilement mesurables en exploitant les transformateurs de tension et de courant déjà installés dans le cadre du système de commande et protection. Par conséquent, la surveillance du courant peut être mise en œuvre à distance dans le centre de commande du moteur à partir des moteurs surveillés [13] donc ce n'est pas très cher. Cette méthode consiste à détecter les défauts par l'étude de certaines composantes fréquentielles ou par la vérification de la variation de certaines composantes existantes. La MCSA (Motor Current Signature Analysis) est très utilisée car elle est simple, peu coûteuse et la partie expérimentale est facile à exécuter. Elle est très populaire dans la détection des défauts statoriques et plus particulièrement des défauts de court-circuit entre spires de l'enroulement statorique [14]. Cette méthode a été utilisée aussi pour la détection des défauts mécaniques tels que le balourd [9, 16, 17], roulement [18,19] et excentricité [20].

Parmi les défauts mécaniques qui peuvent affecter le moteur à induction, il existe le déséquilibre de charge ou balourd, ce défaut mécanique est l'un des défauts les plus fréquents dans la machine à induction [15]. Il est donc intéressant de détecter son apparition précoce car il peut accélérer la dégradation d'autres pièces mécaniques notamment les roulements. Pour cette raison, ce défaut a fait l'objet de plusieurs approches [9, 16,17] où les composantes spectrales actuelles aux fréquences $f_s \pm nfr$ ont prouvé leur efficacité en tant qu'indicateurs de défaut. M. Blödt *et al* ont présenté dans [9] un modèle basé sur l'approche par ondes magnétomotrices et de perméance et ont utilisés la distribution de Winger-Ville pour analyser les résultats obtenus. Néanmoins, la faiblesse de cette méthode de traitement du signal est la présence de termes croisés indiqués comme des amplitudes négatives pour certaines gammes de fréquences et l'interprétation du DWV peuvent être difficile si le signal contient plusieurs composants. Dans

[16], Fournier *et al* ont proposé une nouvelle méthode basée sur le kurtosis spectrale (SK) avec référence. Cependant, l'inconvénient de SK est que le procédé peut échouer dans la détection efficace de transitoires avec un faible rapport signal / bruit.

Ces études ont basé sur l'analyse d'une seule phase. Un point important concernant les approches monophasées est que l'information contenues dans chaque phase est légèrement différente d'une phase à l'autre en raison des déphasages initiaux, déséquilibre d'amplitude et / ou de phase, des composantes hautes fréquences, du bruit de mesure, etc. par conséquent l'analyse basée sur le courant d'une seule phase n'utilise qu'une partie de l'ensemble des informations disponibles dans le système triphasé.

En plus des limitations des articles précédents [9, 16, 17], ils souffrent d'un inconvénient principal, à savoir qu'ils ne s'appuient que sur un signal de courant d'une seule phase comme moyen pour détecter le balourd. Cette analyse conduit à une mauvaise résolution car seulement une partie des informations contenues dans le système triphasé de la machine sera analysée. De plus, de petits déséquilibres d'amplitude et des décalages de phase sont présents dans les systèmes réels, ce qui induit une petite différence des informations fournies par chaque phase. Aussi, le spectre du courant statorique peut contenir des harmoniques hautes fréquences qui n'ont pas été filtrés de manière appropriée lors de l'acquisition du courant, ajoutant à cela des bruits de mesure et le faible rapport signal / bruit dans le cas de moteurs alimentés par onduleur.

En conséquence, les recherches récentes dans le domaine de la surveillance de l'état des systèmes triphasés se concentrent sur le développement de méthodes prenant en compte les quantités triphasées. Afin de combiner et de traiter efficacement l'information contenue dans les trois phases, plusieurs transformées triphasées ont été utilisées telles que la transformée de Fortescue [21] ou la transformée Clarke / Concordia [22]. Par exemple, la soi-disant approche du vecteur du Park étendu [23] calcule le module carré de cette composante afin d'estimer et d'analyser son amplitude instantanée pour détecter les ruptures de roulement. Vincent Choqueuse et al [13] ont présenté et discuté différentes techniques de démodulation multidimensionnelle. Cependant les étapes de démodulation de l'ISC à séquence positive proposées dans les articles précédents supposent que ce signal est un signal analytique monocomposant, ce qui est généralement faux. En effet, la présence d'harmoniques et / ou de déséquilibre électrique dans les signaux triphasés conduit à la présence de différents composants à fréquence positive et négative dans l'ISC de séquence positive, et enfin à des extra-oscillations dans les quantités démodulées. Le problème proposé est comment améliorer la détection de ce

défaut dans les machines électriques. Par conséquent, ce travail vise l'amélioration de la détection de balourd grâce à la transformée du vecteur d'espace courant et comparer les résultats à l'analyse monophasée pour montrer les avantages de cette transformée au moyen de l'analyse des différents techniques de traitement de signal.

I.5 Objectifs et contributions souhaités

Malgré, l'augmentation croissante des exigences industrielles en termes de fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité, il était important de disposer d'un certain nombre d'outils et de techniques permettant de diagnostiquer l'état de la machine. Ces outils et techniques de diagnostic sont basés sur la détection de la signature des défauts au niveau des grandeurs mesurables habituelles dans l'industrie (grandeurs électriques statoriques) soit par le biais de l'analyse du contenu harmonique de ces grandeurs soit encore par le biais de l'observation comportementale de la machine.

Notre objectif est de synthétiser un certain nombre de méthodes et techniques de diagnostic et d'établir des critères de choix pour leur utilisation afin d'apporter une contribution concrète dans ce domaine de recherche très avancés.

Par conséquent, ce travail vise l'amélioration de la détection des défauts de balourd grâce à la transformée du vecteur d'espace courant et comparer les résultats à l'analyse monophasée pour montrer les avantages de cette transformée au moyen de l'analyse des différents techniques de traitement de signal.

L'originalité de la thèse se résume comme suit :

Ce travail présente un résultat intéressant qui peut être utilisé dans un système expert pour la surveillance des machines tournantes.

Sachant que la détection précoce du défaut mécanique souvent considérée dans les approches classiques par l'analyse Du courant électrique d'une seule phase demeure insignifiant.

Le résultat se résume par le développement d'une nouvelle approche de la détection précoce des défauts mécaniques basée sur le vecteur d'espace qui prend en compte la nature triphasée et donc multi-composante des grandeurs électriques traitées.

I.1 Structure de la thèse

Pour atteindre les objectifs fixés, le travail présenté dans cette thèse est divisé en cinq chapitres, y compris le chapitre actuel, il sera structuré de la façon suivante:

Chapitre 02

Le deuxième chapitre de ce mémoire est consacré à l'étude des composants et du fonctionnement de la machine asynchrones. Après une brève introduction des constitutions de la machine et leurs principes de fonctionnement. Nous présentons les différents types de défauts qui peuvent apparaître dans les machines asynchrones, nous terminons ce chapitre par une analyse des différentes techniques de diagnostic actuellement appliquée à la machine asynchrone.

Chapitre03

Le chapitre 3 passe en revue les concepts importants du traitement du signal. Le traitement du signal est une étape clé pour la surveillance et le diagnostic des défauts du moteur. Le but de l'extraction d'entités est d'extraire les caractéristiques du signal cachées dans le domaine temporel d'origine. De nombreuses techniques de traitement du signal utiles ont été établies et appliquées dans des applications pratiques, telles que la transformée de Fourier rapide (FFT), la transformée de Fourier courte (STFT) et la transformée en ondelettes (TO) [2]. Un système de diagnostic basé sur Wavelet Packet Transform (WPT) pour l'extraction de caractéristiques a été développé. Dans ce système, les caractéristiques de la vibration du moteur et du signal de courant dans des conditions difficiles et des défauts sont extraites par une analyse multi-résolution sans perdre leurs propriétés d'origine.

Chapitre04

Nous étudions au chapitre 4, l'effet du défaut de balourd sur le fonctionnement de la machine et son influence sur les grandeurs mécaniques et électriques. Grâce à un modèle [8][35] que nous adopterons pour le défaut de balourd, nous constatons que ce défaut provoque des fluctuations du couple résistif. Ensuite, à partir de l'équation d'équilibre des couples, nous remontons, à travers les équations électriques, la propagation du défaut vers le courant statorique.

Chapitre05

Le travail pratique de cette recherche commence dans ce chapitre. Il indique quel équipement a été utilisé dans les expériences, comment le banc d'essai de moteur à induction a été construit et la procédure des expériences, comment les mesures requises ont été prises et comment les données acquises ont été stockées afin d'être traitées dans le chapitre suivant. Il montre également le moteur à induction en bon état et les signaux défectueux et comment les défauts ont été générés.

***Chapitre II : MACHINE
ASYNCHRONE ET METHODES
DE DIAGNOSTIC***

II.1 Introduction

La surveillance est définie comme l'évaluation continue de l'état de l'installation et de l'équipement tout au long de son durée de vie. La détection précoce de la défaillance du moteur fournit également un environnement de fonctionnement sécuritaire.

Il devient de plus en plus important d'utiliser des systèmes de surveillance complets pour l'évaluation continue de l'état de la machine électrique. En utilisant le contrôle de l'état, il est possible de fournir un avertissement adéquat d'une défaillance menaçante.

De plus, il est également possible de planifier les futurs travaux d'entretien et de réparation préventifs. Cela peut entraîner un temps d'arrêt minimal et des calendriers de maintenance optimaux. Le système de surveillance et de diagnostic permet à l'opérateur de disposer des pièces de rechange nécessaires avant le démontage de la machine. En améliorant la fiabilité, la sécurité et la productivité.

II.2 Machine asynchrone

Le moteur électrique est un dispositif électromécanique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Étant une partie très importante de l'industrie moderne, ces moteurs jouent un rôle essentiel dans des applications majeures telles que les systèmes de pompage, les ventilateurs, les systèmes élévateurs, les véhicules électriques, les concasseurs, les cimenteries et de nombreuses autres sections industrielles. Le moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil [29, 30].

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Ce dernier est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion [29].

II.3 Défaits de la machine asynchrone

Dans le monde d'aujourd'hui, la machine à induction est considéré comme un moteur tolérant aux défauts et un choix plus agréable pour les applications industrielles. L'installation, les défauts de fabrication et la tolérance, l'environnement de travail et le calendrier de maintenance sont les principaux facteurs responsables des défaillances des machines électriques tournantes. Les défauts des machines électriques peuvent être classés en défauts internes et externes qui sont ensuite classés en défauts mécaniques, électriques et environnementaux. Les défauts peuvent être induits au rotor, stator, roulement et autres défauts mécaniques en fonction de leur emplacement dans l'équipement, comme indiqué sur la figure II.3 [25 ; 27]. Ces défauts et leurs causes sont résumés dans le tableau 1. Les études statistiques des défaillances de la MI par l'Institution of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), l'ASEA Brown Boveri (ABB) et l'Electric Power Research Institute (EPRI) sont présentées sur la figure II.1. Tel que : 37% de défauts statoriques, 41% de défauts de roulements, 10% de défauts rotoriques et 12% d'autres types de défauts [25, 28-30]

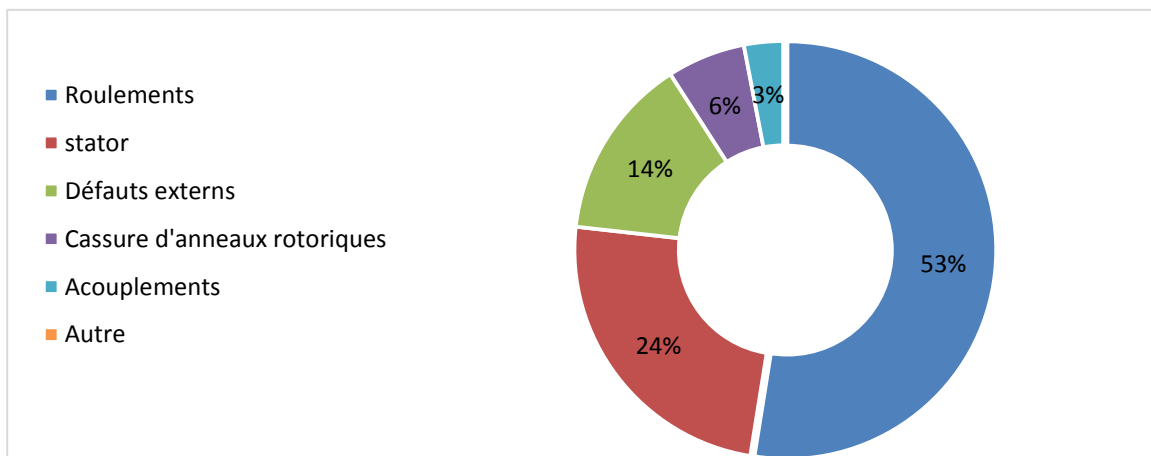


Figure II.1. Répartition des défauts dans les machines électriques du domaine industriel en 1982

Une autre étude statistique récente, effectuée par Bonnett [24] en 2008, sur des machines asynchrones de grande puissance travaillant dans l'industrie pétrochimique. Le résultat de cette enquête, présenté dans la figure II.2, montre que 69% de défauts se situent dans les roulements, 21% au stator, 7% au rotor et 3% aux accouplements d'arbre.

2. Machine Asynchrone et Méthodes de Diagnostic

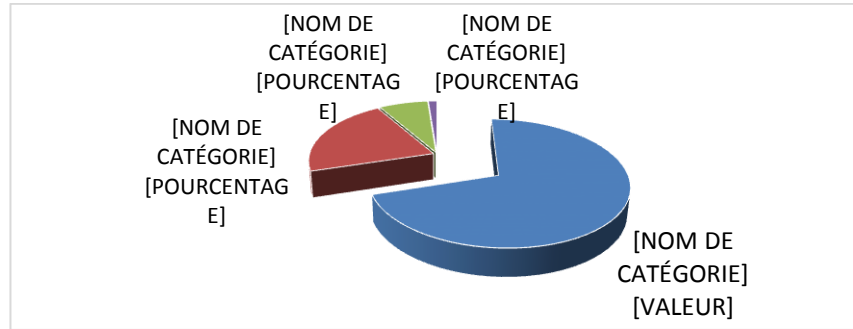


Figure II.2. Distribution des défauts dans les machines asynchrones de grande puissance

On peut résumer les types des défauts de moteur à induction par le schéma suivant [25, 27] :

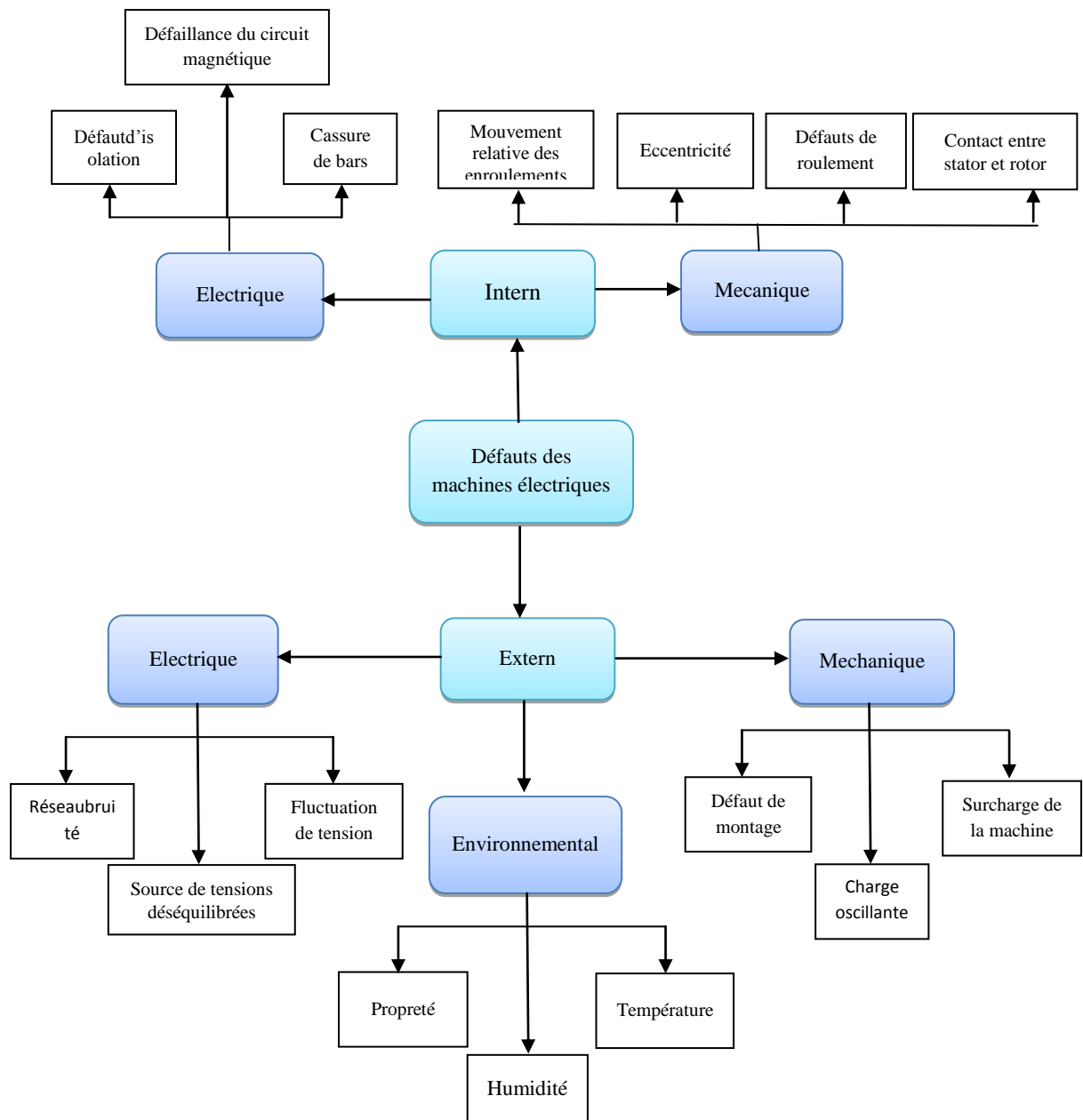


Figure II.3: Schéma résume les types des défauts de la machine à induction

II.3.1 Défauts d'origine électrique

Les défauts d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine. Ils ont deux catégories bien distinctes. Il y a ceux qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et d'autres au rotor.

II.3.1.1 Défaillances au stator

Le stator, comme son nom l'indique, est une pièce fixe et essentielle de tout moteur électrique qui entoure le bobinage qui produit le champ magnétique. On sait qu'environ 24% des défauts de moteur à induction sont dû à la défaillance de l'enroulement statorique [26]. Ces défauts débutent sous forme de pannes non détectées entre spires, puis conduisent à des phases catastrophiques, défauts de court-circuit entre phases ou entre phase et la terre qui conduisent à la fusion des conducteurs du stator.

Les défauts des enroulements de stator sont classés en cinq classes [27 ; 28] et sont illustrés à la figure II.4. Ces classes comprennent :

- Court-circuit entre spires
- Court-circuit entre bobines
- Court-circuit entre phases
- Court-circuit entre phase et la terre
- Défaut de circuit ouvert d'une phase

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. La surveillance pour diagnostiquer les défauts indiqués aux paragraphes (a) et (b) ci-dessus est la clé permettant d'éviter l'apparition des défauts en (c) pour les moteurs à induction, c'est-à-dire que le diagnostic du défaut de court-circuit entre spires est une précaution pour éviter des défauts successives. La quasi-totalité de ces défauts sont dus à la dégradation de l'isolant, ils se manifestent sous la forme :

A. Court-circuit entre spires

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement. D'autre part, il entraîne aussi une augmentation

des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases et dans le cas des machines asynchrones, il amplifie les courants dans le circuit rotorique [25, 29]. La contrainte thermique amenée par le courant de court-circuit risque d'entraîner la propagation du défaut à d'autres spires, ce qui peut conduire au déclenchement des protections électriques dans l'alimentation.

B. Court-circuit entre phases

Un court-circuit entre phases peut arriver en tout point du bobinage [30], mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt de la machine. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs. L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage.

C. Défaut de court-circuit entre phase et le bâti

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels) [29]. En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance.

Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [29].

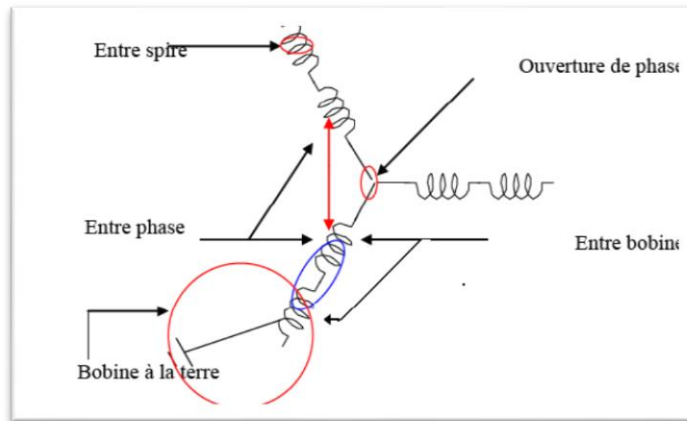


Figure II.4 Représentation des différents défauts statoriques possible

II.3.1.2 Défaillances au rotor

Les défauts au niveau de rotor représentent environ 5% à 10% du total des pannes au niveau du moteur à induction [31] et se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit (Figure II.5). Les causes de ces défauts sont similaires aux défauts du stator et correspondent principalement aux défauts de fabrication, contraintes thermiques, contrainte mécanique causée par des défauts de roulement, démarrages fréquents du moteur à la tension nominale, en raison de la fatigue du métal du rotor [32]. Ce type de défaut entraîne également un déséquilibre électrique dans les signaux de courant rotorique

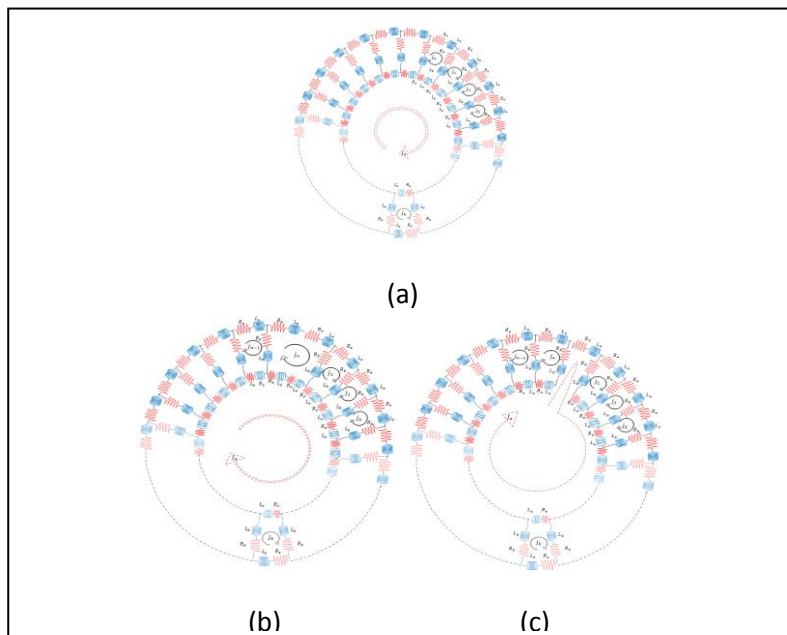


Figure II.5 Représentation des différents défauts rotoriques possible

Les défauts de cassure de barres rotoriques ne provoquent pas initialement la panne du moteur, mais il peut y avoir des effets secondaires graves. Premièrement les portions cassées de la barre choquent le noyau du stator surtout dans les moteurs de haute tension et tournant à grande vitesse. Cela peut causer de graves dommages mécaniques à l'isolation et entraîner la défaillance de l'enroulement. En outre le courant qui traverse la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes [33]. Ces barres sont alors surchargées, et les contraintes thermiques et électromécaniques engendrées peuvent conduire à leur rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine.

Remarques générales concernant les défauts électriques

Les défauts électriques affectent les composants électriques: enroulements de stator, enroulements de rotor, barres de rotor, etc. De tels défauts détériorent généralement la symétrie du circuit électrique triphasé. Pour le stator, le déséquilibre généré peut être mesuré directement dans les quantités statoriques. Les défauts du rotor génèrent des variations de couple et des modulations de courant statorique.

II.3.2 Défauts mécaniques

Dans la littérature, les défauts mécaniques tiennent une grande place dans les défauts du moteur. Dans cette catégorie de défaillances nous pouvons citer les défauts d'excentricité, de balourd, défauts de la charge ou encore les défauts de roulement. Nous allons définir brièvement ces défauts.

II.3.2.1 Défaut d'excentricité

Un défaut d'excentricité provoque une traction magnétique déséquilibrée radiale entre les circonférences du stator intérieur et du rotor extérieur. Cela endommage progressivement le moteur en raison du frottement du stator et du rotor, et endommage également l'enroulement statorique et la cage du rotor. De plus, toute excentricité dans le moteur à induction génère des contraintes mécaniques excessives ce qui induit la fatigue du roulement [34].

On distingue généralement trois types d'excentricité :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.

- l'excentricité qu'on pourrait qualifier globale, associant les deux cas précédemment cités.

Les symptômes causés par l'excentricité dans le moteur à induction peuvent être résumés comme suit :

- vibrations mécaniques.
- Asymétrie et déviation du flux de l'entrefer, les tensions et les courants de ligne.
- couple moyen décroissant.
- pertes croissantes et efficacité décroissante.
- température montante.

L'excentricité est responsable de multiples dommages sur les machines électriques. Elle est le résultat de la non-uniformité de l'entrefer. Ce qui signifie l'existence des forces magnétiques radiales déséquilibrées, autrement dit la traction magnétique déséquilibrée qui peut amener à une déformation du rotor causant ainsi un frottement avec le stator.

On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivant [35] :

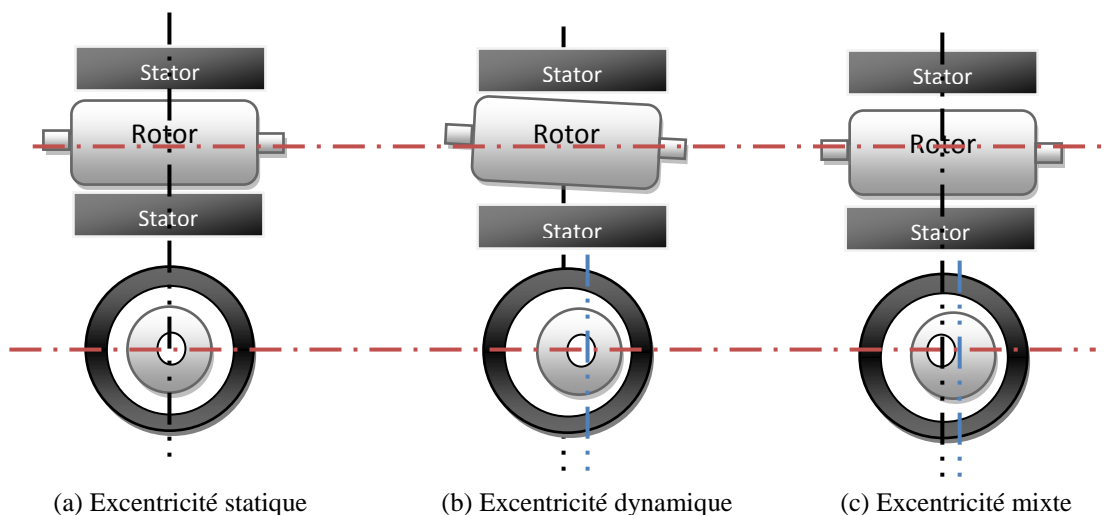


Figure II.6. Représentation de l'excentricité statique et dynamique

II.3.2.2 Les défauts des flasques

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [25].

II.3.2.3 Désalignement

Le désalignement est l'une des principales raisons de la réduction d'un équipement électromécanique. Il s'agit soit de deux arbres reliés par un accouplement, soit de deux roulements supportant le même axe. L'arbre du moteur et l'arbre récepteur d'une machine ne sont pas parfaitement alignés. Le but de l'alignement de deux machines est d'assurer que les axes des deux lignes d'arbres sont parallèles et confondus. On rencontre donc deux types de défauts d'alignement [36] :

- Désalignement parallèle : se produit lorsque les arbres ont le même angle d'orientation mais sont séparés verticalement les uns des autres.
- Désalignement angulaire : se produit lorsque l'axe de rotation de deux machines a un angle différent.

Le désalignement parallèle peut encore être divisé en désalignement horizontal et vertical, ce qui signifie que l'arbre du moteur est éloigné horizontalement de l'arbre récepteur, mais les deux arbres sont toujours dans le même plan horizontal et parallèle. Le désalignement vertical parallèle se produit lorsque l'arbre du moteur est éloigné verticalement de l'arbre récepteur, alors que les deux arbres sont toujours dans le même plan vertical et parallèle. Un désalignement angulaire similaire peut être divisé en un désalignement horizontal et vertical. Le désalignement horizontal angulaire se produit lorsque l'arbre du moteur fait un angle avec l'arbre de la pompe alors que les deux arbres sont toujours dans le même plan horizontal. Le désalignement vertical angulaire se produit lorsque l'arbre du moteur fait un angle avec l'arbre récepteur alors que les deux arbres sont toujours dans le même plan vertical. Des désalignements d'arbre peuvent être dus à diverses causes, telles que des changements de température dus au frottement dans les paliers, un montage incorrect du moteur et des équipements entraînés, ainsi que des forces de déformation dues au démarrage du moteur [37].

Si des composants tels que les accouplements, les roulements fonctionnent dans un état mal aligné, ces composants consomment plus d'énergie. Un mauvais alignement entraîne une augmentation de la température des accouplements et des roulements. Ces composants sont conçus pour fonctionner à certaines limites de température. Les températures élevées dues au désalignement conduisent donc à la défaillance des roulements et des accouplements [38].

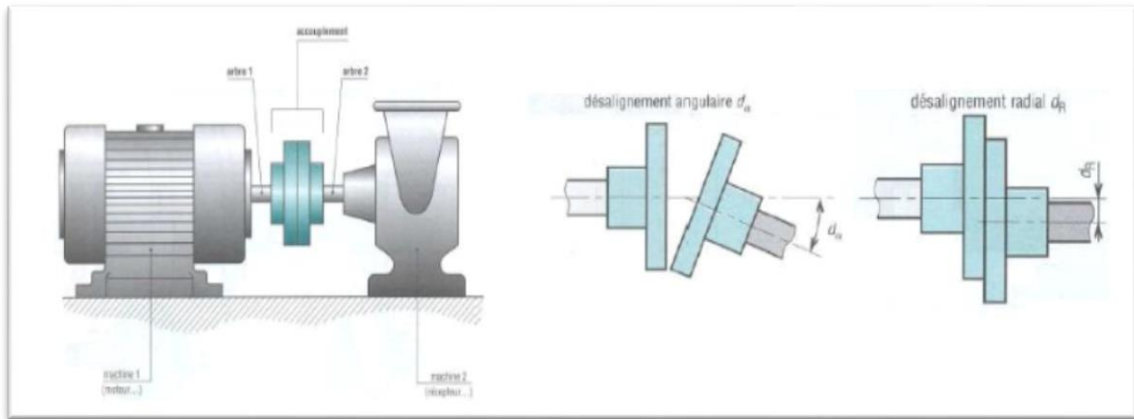


Fig. II.7. Représentation des différents types de désalignement

II.3.2.4 Défauts de roulement

Les roulements sont des organes indispensables pour la grande majorité des moteurs électriques. Ils sont responsables de la conversion d'énergie jouant ainsi le rôle d'interface électromécanique. Malheureusement, ce rôle les rend plus fragiles et peuvent donc être une source de pannes fréquentes. En effet, des études statistiques montrent que les défauts de roulement représentent de 40% à 50% du total des pannes de machines électriques et peuvent atteindre 52% dans certains secteurs industriels [1]. Il est donc logique, d'un point de vue industriel et scientifique, de concentrer les efforts de détection des pannes et de diagnostic de la machine asynchrone sur des roulements à billes, afin de préserver la sécurité du personnel, d'éviter tout arrêt de la chaîne de production et de pertes financières.

Les roulements sont constitués de quatre composants essentiels. Un organe externe, un organe interne, des organes roulants et un organe de lubrification. En fonction de l'application envisagée, les organes de roulement peuvent être des billes, des rouleaux ou des aiguilles. Chaque type de roulement possède des caractéristiques spécifiques en termes de charges radiales et axiales supportées, de vitesse limite ou encore de défaut d'alignement admissible. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel car il présente le meilleur rapport qualité-prix. La figure II.8 montre la construction typique d'un roulement à billes. Les billes sont liées par une cage qui assure une distance uniforme entre elles et empêche tout contact.

Les défauts de roulement peuvent se produire lors d'une fatigue des matériaux sous des conditions normales de fonctionnement. Au début, des fissures vont apparaître sur les pistes et sur les billes. Ensuite, des écaillages et des arrachements de matière peuvent accélérer

rapidement l'usure d'un roulement. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences[39].

$$f_{def} = f_s \pm k f_{rot} \quad (II.1)$$

Où $k=1.2.3, \dots$ est un entier et νf est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations.

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement nous pouvons distinguer les types de défauts suivants [40] :

- Défaut de bague extérieure,
- Défaut de bague intérieure,
- Défaut de billes,
- Défaut de cage

A chaque type de défaut de roulement, une fréquence caractéristique f_c peut être associée. Cette fréquence est équivalente à la périodicité d'apparition d'une anomalie due à l'existence du défaut. Les fréquences caractéristiques sont des fonctions de la géométrie du roulement et la fréquence mécanique du rotor f_r . Un calcul détaillé de ces fréquences peut être trouvé dans [16].

Pour les trois types de défauts considérés, f_c prend les expressions suivantes :

• **Défauts au niveau d'une bille**

$$f_{ball} = \frac{D_c}{D_b} f_{rot} \left(1 - \frac{D_b^2}{D_c^2} \cos^2 \beta \right) \quad (II.2)$$

Défauts sur la bague intérieure

$$f_I = \frac{N_b}{2} f_{rot} \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (II.3)$$

• **Défauts sur la bague extérieure**

$$f_O = \frac{N_b}{2} f_{rot} \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (II.4)$$

Où D_c : est le diamètre moyen du roulement, D_b : est le diamètre des billes, β : est l'angle de contact, N_b : est le nombre de billes du roulement.

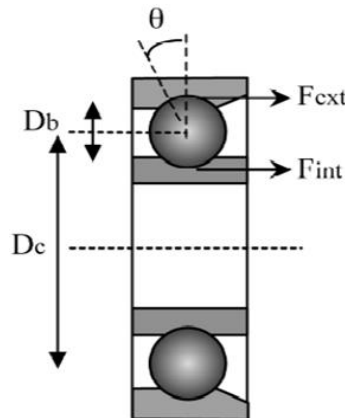


Figure II.8 : Structure d'un roulement à billes

Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme :

- ✓ contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable...
- ✓ corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, ...
- ✓ lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement,
- ✓ mauvais alignement du rotor,
- ✓ courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques,
- ✓ installation inexacte du roulement ; en forçant incorrectement le roulement sur l'arbre du rotor ou dans les flasques (dû au désalignement), des entailles seront formées sur les chemins de roulement.

II.3.2.5 Défauts d'engrenage

Dans une boîte de vitesses, des engrenages sont utilisés pour fournir des conversions de vitesse et de couple d'une source d'alimentation en rotation à un autre appareil. Il est largement utilisé dans les applications industrielles, civiles et militaires, par exemple dans les hélicoptères, les éoliennes, les chargeuses à chenilles et les fraiseuses. Dans les applications industrielles, les boîtes de vitesses peuvent fonctionner dans des conditions de fonctionnement constantes ou variables. Par exemple, la plupart des configurations d'éoliennes de moyenne et grande taille contiennent des boîtes de vitesses [41]. En effet, les pannes de boîte à engrenages contribuent à environ 20% du temps d'immobilisation des éoliennes. Les deux composants principaux d'une boîte à engrenages sont les engrenages et les roulements et la plupart des défaillances de la boîte à engrenages partent de défauts des roulements [41]. Les causes de défauts d'engrenages sont notamment les suivantes : erreurs de fabrication et d'installation, désalignement, surcharge de couple, usure de la surface et fatigue. Les défauts de roulement ont été détaillés dans la sous-section précédente, de sorte que cette sous-section ne traite que des défauts d'engrenage. Les deux modes de défaillance possibles qui sont plutôt communs dans les engrenages [42, 36] sont :

1. les engrenages s'usent uniformément, ce qui entraîne un jeu.
2. une ou plusieurs dents s'usent en raison d'un choc ou d'un défaut de fabrication, ce qui peut provoquer un choc lors de l'engrènement et de la dégradation ultérieure.

La figure 2.8 illustre graphiquement un engrenage, indiquant les principales variables nécessaires au calcul de la fréquence d'engrenage donnée par l'équation (II.5).

$$f_m = n f_{r1} = N f_{r2} \quad (\text{II.5})$$

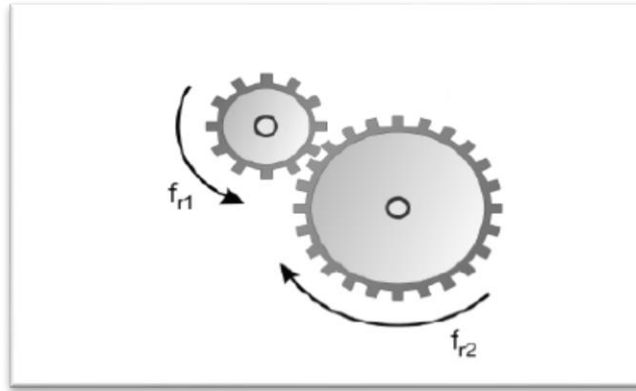


Figure II.9 : Engrenages

Où les variables sont :

f_m : La fréquence d'engrainement

f_{r1} et f_{r2} les fréquences de rotation d'entrée et de sortie

n et N le nombre de dents de chaque roue dentée

L'effet mécanique de la défaillance d'engrenage sur les courants statoriques d'une machine à induction a été modélisé sous la forme de variations de couple sur l'arbre du rotor induisant des modulations de phase [43]. Notant la fréquence fondamentale du stator par f_s , les principales fréquences de défauts caractéristiques correspondantes dans le spectre de courant sont données par [43, 41] :

$En1$: Engrenage 1

$En2$: Engrenage 2

ENG :Engrainement

$$\begin{aligned} f_{En1} &= |f_s \pm f_{r1}| \\ f_{En2} &= |f_s \pm f_{r2}| \\ f_{ENG} &= |f_s \pm f_m| \end{aligned} \quad (II.6)$$

Une fois encore, la signature des défauts d'engrenage consiste en une modulation des bandes latérales en quantités électriques.

II.3.2.6 Balourd:

Le balourd est la cause de vibrations la plus commune et la plus fréquemment rencontrée. C'est un déséquilibre massique autour de l'axe de rotation qui provient généralement du défaut d'usinage, d'assemblage et de l'échauffement dissymétrique du rotor lors du fonctionnement, il est connu de certains automobilistes qui demandent un équilibrage après le changement des pneumatiques pour s'affranchir de l'éventuelle gêne qu'il occasionnerait.

On ne peut réaliser la concentricité parfaite d'un rotor. De cet état imparfait de la concentricité, en rotation, il en résulte des forces centrifuges F qui déforment le rotor et engendrent des déséquilibres. Par l'expression suivante on détermine la force centrifuge [38] :

$$F = mrw^2 \quad (\text{II. 7})$$

Où m représente la masse qui balourd, r le rayon du rotor et w la vitesse de rotation de l'arbre

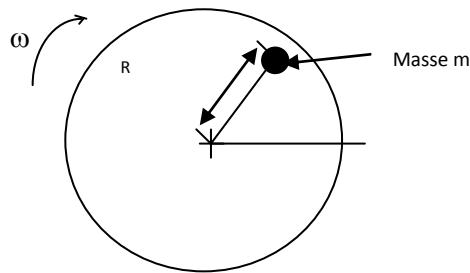


Figure II.10 : modélisation d'un défaut de balourd

II.3.2.7 Défauts de la charge

Il est à noter que la dynamique de la charge dispose d'une grande influence sur la détection et le diagnostic de d'autres défauts tels que la rupture d'une barre ou l'excentricité du rotor. L'introduction de perturbations ou d'oscillations par la charge pouvait masquer l'apparition des défauts du moteur

a. Classification des différents types de charge les plus rencontrés

On distingue [38]:

- charge à couple constant : le couple n'est pas fonction de la vitesse (ex : traction, convoyeur, tapis roulant,...).
- charge à couple variable : le couple varie en fonction de la vitesse (ex : pompe centrifuge, ventilateur,...).
- charge à puissance constante : tels que les broyeuses, les affûteuses, les bobineuses,...

La nature de l'application de la charge, quelle que soit son type, peut influencer d'une manière destructive le fonctionnement du variateur en amont. En l'occurrence, une mauvaise utilisation de l'ensemble moteur – charge peut engendrer des défaillances mécaniques du système.

b. Exemples de fonctionnements perturbateurs.

- Application successive et répétitive de surcharges qui peut causer une fatigue mécanique des roulements et de l'arbre du moteur.

- Des à-coups de couple et de charge qui se manifestent par des couples pulsatoires,
- Des démarrages en force répétitifs. La charge peut donc être le siège de mauvaises conditions de fonctionnement qui aboutissent à l'apparition de défauts tels que :
 - Déséquilibre de charge et oscillations du couple de charge,
 - Sur-couples accidentels,
 - à-coups de couple accidentels,
 - Perturbations mécaniques dues aux vibrations et phénomènes de résonance mécanique liés à la construction de la machine ou introduites par l'environnement extérieur,
 - Phénomène de balourd,
 - Désalignement des différents arbres en jeu pour assurer l'accouplement et la rotation,
 - Manque de lubrifiants,
 - Vitesse critique de rotation,
 - Rupture de la charge.

Tous ces défauts de la charge vont naturellement avoir une influence dégradante sur les grandeurs mécaniques mises en jeu au niveau de l'entraînement, à savoir le couple électromagnétique et la vitesse de rotation. En outre, et selon la stratégie de commande adoptée pour le pilotage de l'entraînement, les grandeurs électriques vont être aussi plus ou moins affectées [39].

II.4 Moyens pour la surveillance du moteur à induction

Le moteur à induction est un système électrique très symétrique en raison du champ magnétique sinusoïdal, de sorte que tout type de défaut modifie leurs propriétés symétriques. Les défauts des machines peuvent produire un ou plusieurs des symptômes suivants [40]:

- (1) Tensions et courants déséquilibrés.
- (2) l'augmentation des pulsations de couple.
- (3) Couple moyen réduit.
- (4) Réduction de l'efficacité.
- (5) Chauffage excessif.

Dans le but de détecter les signaux liés aux défauts ci-dessus, de nombreuses méthodes de diagnostic ont été développées. Ils peuvent être décrits comme suit

- (1) Diagnostic par mesure des grandeurs électrique.
- (2) Diagnostic par analyse vibratoire.
- (3) diagnostic par mesure du couple électromagnétique.

- (4) surveillance de la température.
- (5) diagnostic par analyse des signaux acoustiques.
- (6) diagnostic par analyse du flux.

La technique la plus intéressante est basée sur la surveillance électrique et vibratoire, principalement parce qu'elles sont facilement disponibles dans le système d'entraînement du moteur et pour le traitement ultérieur du signal.

II.4.1 Analyse Thermique

Cette technique implique classiquement la mesure de la température des zones spécifiques telles que le noyau du stator, les roulements et les enroulements. Ces mesures peuvent fournir des indications sur les changements survenant dans la machine. La mesure de la température est extrêmement efficace si elle est installée dans des emplacements choisis avec soin. Par exemple, la température des roulements est traditionnellement mesurée et, avec les mesures de vibrations, peut fournir l'approche standard pour l'évaluation de la condition de ces éléments.

Cependant, la mesure de la température est également soumise à des difficultés fondamentales afin de résoudre la confusion entre la détection de la température du point qui est facile à mesurer, mais fournit uniquement des informations locales et des mesures de température complètes plus difficile et risquent de superviser des points chauds locaux. Un autre problème avec cette méthode est la surveillance de la température des pièces actives et sous tension, telles que des enroulements de rotor et stator [26, 42].

La mesure de température ou thermique implique une mesure de température globale ou une estimation de paramètre. Les chercheurs ont développé deux modèles thermiques pour catégoriser les machines électriques.

Le modèle d'analyse par éléments finis et le modèle thermique à paramètres localisés. Le modèle d'analyse par éléments finis traite les problèmes de conduction thermique avec plus de précision et convient parfaitement aux problèmes de régime permanent ou transitoires des grandes machines où les asymétries sont une caractéristique commune, mais qui nécessitent beaucoup de calcul. Le modèle thermique à paramètres localisés est le plus populaire pour l'estimation de la température. Il est composé de différentes résistances thermiques [44].

L'analyse du signal de température du moteur à induction peut compléter efficacement les techniques de surveillance thermique, contribuant sensiblement à une meilleure

compréhension de la performance globale et à la prévention des défauts des moteurs. La mesure de la température avec le signal de vibration fournit l'approche standard pour l'évaluation de l'état des composants du système d'entraînement du moteur.

II.4.2 Analyse du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur. L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même la torsion de l'arbre, entraîne l'apparition d'harmoniques dans le spectre du couple. Donc il peut servir pour la détection des défauts électriques et mécaniques [45]. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient major de cette méthode

II.4.3 Analyse vibratoire

La surveillance basée sur l'analyse vibratoire est la méthode la plus utilisée pour détecter et diagnostiquer les défauts des moteurs à induction, en particulier les défaillances mécaniques. L'analyse vibratoire trouve donc une large application dans la surveillance des pompe centrifuges [46], ainsi pour la détection des différents défauts dans les moteurs électriques [47, 48]. Cette technique utilise des capteurs de vibration, tels que des accéléromètres de mesure de type piézorésistif ou sismique à spectre de fréquence linéaire. Les transducteurs sont souvent placés sur les roulements afin de détecter les défauts mécaniques. Cependant, en plaçant également des capteurs sur le stator, il est également possible de détecter des problèmes tels qu'un entrefer irrégulier, des défauts d'enroulement du stator ou du rotor, une alimentation asymétrique et des déséquilibres de la charge du moteur [49].

Cependant, l'interprétation du signal de vibration est un processus complexe qui nécessite une formation et une expérience spécialisées. Les spectres des machines tournantes contiennent plusieurs ensembles d'harmoniques ainsi que des bandes latérales résultant de diverses modulations. De plus, il y a peu de raisons pour lesquelles la technique de vibration n'est pas le premier choix normalement envisagé par les ingénieurs en surveillance. Il exige que les capteurs soient soigneusement fixés autour du châssis du système, interrompant souvent le

fonctionnement du moteur[50]. De plus, le montage de capteurs de vibrations n'est pas toujours réalisable dans la pratique. L'industrie du pétrole en mer, où les machines sont placées à des centaines de mètres d'eau à l'écart du centre de traitement de données, en est un exemple. Le dernier mais non le moindre de ces inconvénients est le coût, qui est un facteur important dans la surveillance des conditions, car les transducteurs de vibrations sont plus coûteux que les autres capteurs.

II.4.4 Emissions Acoustiques

L'utilisation d'émissions acoustiques (EA) pour la surveillance a considérablement progressé ces dernières années. Les machines génèrent généralement du bruit et créent des vibrations dues au contact de deux supports en mouvement. La méthodologie EA est utilisée pour analyser les formes d'onde acoustiques et / ou de bruit produites capturées par des microphones.

Les microphones sont sensibles et faciles à monter, et des informations appropriées et complètes peuvent être obtenues grâce aux larges plages de réponse en fréquence. Les émissions acoustiques peuvent être identifiées dans des gammes de fréquences de 20 kHz à 1 MHz et ont été détaillées à des fréquences allant jusqu'à 100 MHz. Cette technique s'est révélée être une option efficace pour les boîtes de vitesses, les roulements, les outils et les moteurs. De plus, comme l'acoustique est générée au niveau micro, la technique est très sensible et permet d'identifier les défauts développés à un stade plus précoce par rapport à certaines autres techniques de surveillance [51].

Cependant, du fait que les machines génèrent des bruits aériens, les performances d'onde acoustiques peuvent être contaminées par des signaux bruyants similaires générés par des machines voisines. Les effets incluent également des interférences provenant d'autres sources de son telles que le moteur d'entraînement, le générateur de charge et le ventilateur de refroidissement [50].

II.4.5 MCSA

Les défauts dans le moteur peuvent être détectés via ses quantités de bornes, telles que la tension, le courant et la puissance, mesurées à l'extérieur du moteur pour donner une indication de son état. Les signaux électriques associés au moteur à induction peuvent être mesurés en

puisant dans les transducteurs de tension et de courant existants qui sont toujours installés en tant que partie du système d'entraînement du moteur.

L'analyse du signal du courant moteur (MCSA) est l'une des procédures les plus utilisées pour détecter les défauts du moteur pour les raisons suivantes. Premièrement, la plupart des défauts mécaniques et électriques peuvent être détectés en analysant les composantes spectrales des signaux de courant du moteur. Deuxièmement, c'est une technique non invasive. Troisièmement, le courant du moteur peut être mesuré en ligne, ce qui rend la détection en ligne possible [52].

Le MCSA a été considéré comme l'une des techniques de diagnostic des défauts les plus répandues pour détecter les défauts les plus courants dans les machines tournantes électriques [53]. Des techniques MCSA ont été suggérées pour des performances fiables et pour améliorer l'efficacité des moteurs à induction de grande taille [54]. De nombreux chercheurs ont mis en œuvre avec succès la technique MCSA pour diagnostiquer les problèmes liés à la machine à induction [54–57]. La technique MCSA consiste à acquérir les signaux de courant et de tension du stator qui sont pris en compte pour l'analyse de signature de la machine à induction. Le courant appelé par un moteur idéal doit avoir une seule composante de fréquence d'alimentation. Les défauts du moteur vont moduler l'amplitude du courant pour produire des bandes latérales [53, 58]. De plus, cette méthode est considérée comme la méthode de détection de défaut la plus répandue car elle permet de détecter facilement les défauts courants de la machine, tels que les défauts de balourd [59]; des roulements [60,61], d'engrenage [57,62], désalignement [63] et excentricité [64].

Parallèlement à la croissance rapide de la littérature au cours de la dernière décennie, notamment un certain nombre d'enquêtes résumant les dernières découvertes et tendances dans le domaine [58,65], tandis que [66] a présenté une enquête sur les techniques existantes de détection des défauts liés au stator, notamment: défauts d'enroulement statorique, défauts de noyau de stator, surveillance de la température et protection thermique, et tests d'isolation d'enroulement de stator.

En conclusion, les avantages qui peuvent être obtenus en appliquant l'analyse MCSA par rapport à d'autres techniques de MC ont été résumés comme suit [67]:

- Économique, fiable et facile à utiliser.

2. Machine Asynchrone et Méthodes de Diagnostic

- possibilité de surveillance non intrusive à un endroit éloigné de l'équipement et, peut être utilisé dans des environnements hostiles.
- Des mesures rapides peuvent être effectuées aussi souvent que souhaité par du personnel relativement peu qualifié.
- Le spectre du courant moteur n'est pas affecté par l'emplacement du capteur ou de la sonde de courant.
- Amélioration de la gestion de la centrale et économie d'argent et de temps du personnel,
- peut être utilisé dans des endroits où les méthodes conventionnelles sont inapplicables, tels que les puits profonds dans l'industrie pétrolière.
- Aucun risque lié à la collecte de données, donc sécurité améliorée,
- Disponibilité accrue des machines, réduction des temps d'arrêt,
- Les heures de main-d'œuvre de maintenance sont économisées
- Meilleure capacité à gérer et à planifier la maintenance

II.4.6 Analyse du flux

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion peut être affectée par tout déséquilibre de type magnétique, électrique ou électromagnétique au niveau du rotor ou du stator. Le flux d'entrefer, le flux embrassé par les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés. Par exemple, le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des asymétries inséparables à leur fabrication. L'étude des variations de ce flux est donc considérée par beaucoup d'auteurs comme une solution pour détecter et localiser un défaut [29, 35]

II.5 Conclusion

En conclusion, les concepts de base du moteur à induction ont été présentés. Les types de défauts les plus couramment rencontrés associés aux moteurs à induction ont été identifiés et classés en défauts électriques et mécaniques. Ces défauts communs ont également été décrits. En outre, les paramètres les plus importants utilisés pour détecter ces défauts, à savoir le courant statorique ont également été identifiés et discutés brièvement, leur méthode de mesure et leur analyse de fréquence seront discutées plus tard. Le chapitre suivant présente les techniques de traitement du signal couramment utilisées pour les signaux de courant statorique.

***Chapitre III : TECHNIQUES DE
TRAITEMENT DU SIGNAL***

III.1 Introduction

Ce chapitre présente les méthodes de traitement du signal utilisées pour la surveillance du moteur à induction dans les chapitres suivants. Les signaux correspondent aux grandeurs physiques mesurées du variateur.

La méthode d'analyse de base des signaux périodiques est l'estimation de la densité spectrale de puissance du signal à l'aide des méthodes basées sur la transformée de Fourier. Les défauts mécaniques considérés conduisent souvent à des phénomènes périodiques supplémentaires. Ainsi, les mécanismes de défaillance produisent des fréquences supplémentaires ou une augmentation des fréquences existantes dans le courant, le couple, la vitesse ou les vibrations. L'analyse spectrale pour la surveillance et la détection des défauts est donc une approche évidente, utilisée dans la plupart des travaux existants.

Toutefois, si un entraînement de moteur à induction fonctionne dans des conditions de vitesse variables, la plupart des composantes fréquentielles varient dans le temps car ils dépendent presque toujours de la vitesse de rotation ou de la fréquence d'alimentation. Si ces variations sont lentes pendant l'intervalle d'observation, on peut supposer une quasi-stationnarité et les techniques de l'analyse spectrale classique peuvent encore être appliquées. Toutefois, lorsque les variations sont plus rapides, des méthodes de traitement du signal plus avancées sont nécessaires pour l'analyse du signal non stationnaire. Il existe deux approches populaires d'analyse de signal non stationnaire : l'analyse temps-fréquence et temps-échelle ou en ondelettes. Les principes des deux méthodes seront bientôt présentés. Dans la suite de ce travail, une autre approche originale de la détection de défaut basée sur le courant est étudiée.

Les grandes lignes du chapitre sont les suivantes : Premièrement, certains concepts de base du traitement du signal sont passés en revue, notamment l'analyse temporel, la transformée de Fourier, l'échantillonnage du signal. Dans ce qui suit, les concepts de base de l'analyse temps-fréquence sont exposés, ainsi que les représentations les plus importantes. La dernière partie de ce chapitre traite la transformée en ondelettes

III.2 Techniques de détection des défauts

Le traitement du signal est l'une des méthodes les plus importantes utilisées dans la détection des défauts, qui vise à trouver une transformation simple et efficace du signal original.

L'information importante contenue dans le signal peut être montrée et les caractéristiques dominantes peuvent être extraites pour la détection de défaut.

Les techniques les plus couramment utilisées pour la détection des défauts dans les machines électriques sont illustrées à la Figure III-1. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : les techniques conventionnelles, les techniques avancées et les techniques basées sur l'intelligence artificielle.

Les techniques de traitement du signal conventionnelles telles que : TFD, FFT et STFT sont les plus largement utilisées pour la détection de défauts et la surveillance et diagnostic au cours des dernières décennies. Ces techniques ont été appliquées au domaine fréquentiel, en supposant un signal stationnaire, et dans le domaine temps-fréquence conjoint pour les signaux non stationnaires. Des techniques avancées de traitement du signal, telles que les ondelettes, sont utilisées pour localiser et identifier les phénomènes dynamiques de courte durée. L'intelligence artificielle (IA) est l'étude d'états du système à travers l'utilisation de modèles informatiques. Les outils IA résolvent des problèmes d'ingénierie pratiques qui requièrent l'intelligence humaine.

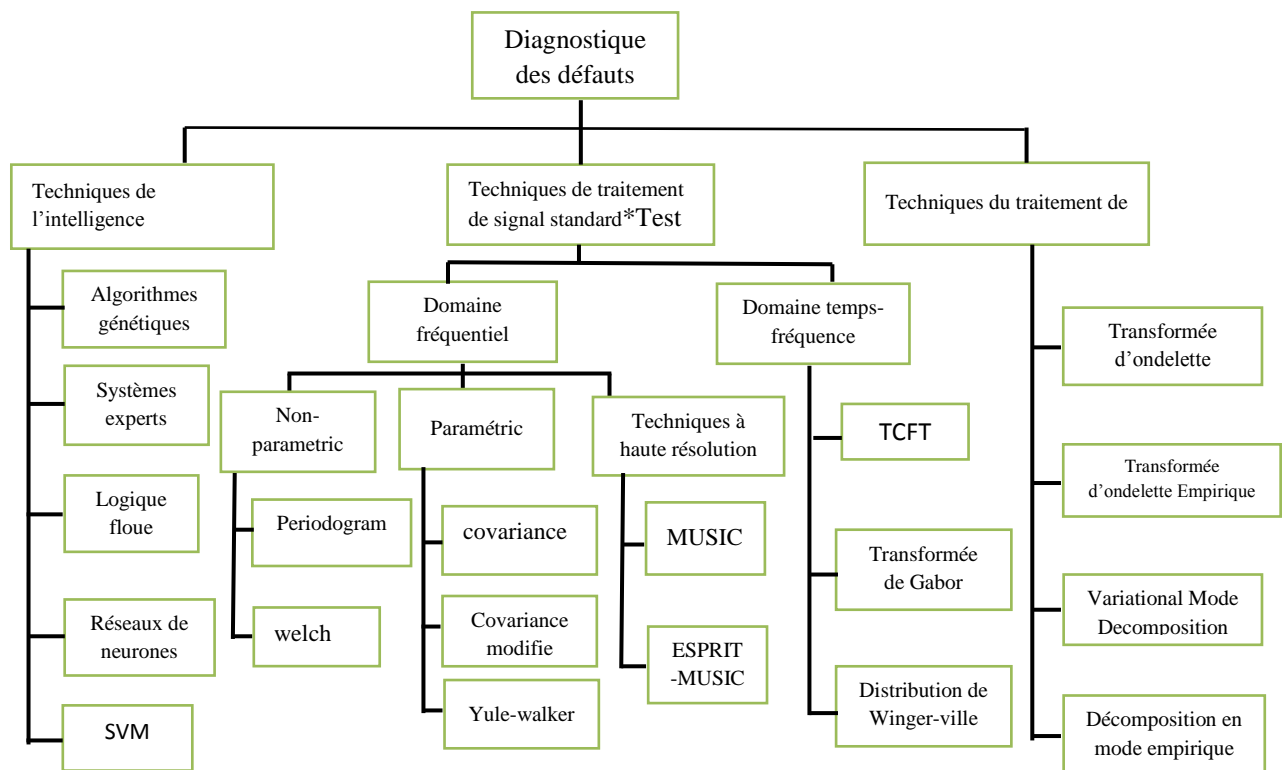


Figure III.1 Classification des différentes techniques de traitement de signal

III.3 Classification des signaux

Divers signaux peuvent être rencontrés ; il est donc utile de classer ces signaux en fonction de certaines propriétés. Le type de signal et la propriété sont importants pour le choix approprié de la méthode d'analyse de ce signal. Certaines techniques de traitement du signal seront efficaces pour une certaine classe de signaux. Les signaux peuvent être classés en deux catégories : déterministes et non déterministes.

III.3.1 Signaux déterministes

Les signaux peuvent d'abord être classés en fonction de leur nature déterministe ou aléatoire. Les signaux déterministes (périodique ou non périodique) sont mathématiquement reproductibles. Par conséquent, les signaux déterministes peuvent être décrits par une expression mathématique. Cela implique que les valeurs futures du signal peuvent être prédites à partir des valeurs passées. Les signaux non périodiques se composent d'une part des signaux pseudopériodiques formés d'une somme de sinusoides de périodes différentes et d'autre part des signaux transitoires dont l'existence est limitée dans le temps [67].

- a) **Périodiques** : un signal est dit périodique si les variations de son amplitude se reproduisent régulièrement au bout d'une période T constante.

On a donc pour tout
$$x(t + T) = x(t) \quad t \in \mathbb{R} \quad (\text{III. 1})$$

La fréquence d'un signal périodique est le nombre de périodes par seconde. Elle s'exprime en hertz (Hz). La fréquence en hertz est donc égale à l'inverse de la période exprimée en secondes : $f = 1/T$

- b) **Non périodiques** : un signal est dit non périodique s'il n'est pas périodique, mais, existe à tout instant « t ».

III.3.3 Signaux aléatoires :

Contrairement aux signaux déterministes, les signaux aléatoires ou stochastiques ne peuvent pas être décrits par une expression mathématique déterministe. Ils peuvent être considérés comme des réalisations de processus stochastiques. Ils sont classés en deux types qui sont :

- a) **Stationnaires** : ce sont des signaux dont les caractéristiques statistiques sont indépendantes de l'origine du temps.

b) **Non stationnaires** : ce sont des signaux qui ont les caractéristiques contraires à celles des Stationnaires [68, 69].

III.3.3 Paramétrage de l'échantillonnage:

Un échantillon discret est l'ensemble des valeurs d'un signal continu prises aux instants $t_i = t_0 + i\Delta t$: étant un entier positif. La discrétisation d'un signal induit une perte d'information qui peut être préjudiciable au diagnostic. Cette perte d'information est liée au nombre de composantes des fréquences élevées qu'introduit le processus de discrétisation (théorème de Shannon).

L'application du théorème de Shannon permet d'éviter le recouvrement spectral mais pour cela il faut choisir [70] : $f_e \geq 2.56$

f_{max} : Fréquence maximale du signal.

En pratique, la valeur couramment choisie pour la fréquence d'échantillonnage est :

$$f_e = 2.56$$

Le temps d'acquisition T_{acq} qui correspond à la durée d'observation du signal est :

$$T_{acq} = N_e \cdot T_e = N_e / f_e = N_e / 2.56 f_{max} \quad (III.2)$$

N_e : Nombre de points enregistrés

T_e et f_e : Période et fréquence d'échantillonnage

III.3.4 Résolution :

Pour réaliser de bonnes mesures, il est nécessaire de choisir une résolution appropriée dans la bande de fréquences de travail [71]. Une résolution est satisfaisante lorsqu'elle permet de dissocier des fréquences voisines. Elle dépend de la fréquence d'échantillonnage et du nombre de points N_e et du nombre de lignes de l'analyseur.

$$\Delta f = \frac{\text{fréquence pleine échelle}}{\text{nombre de lignes}} \quad (III.3)$$

$$\text{nombre de lignes} = N_e / 2.56$$

Autrement dit
$$\Delta f = \frac{f_e}{N_e} = \frac{1}{N_e \cdot T_e} \quad (III.4)$$

N_e : nombre de points enregistrés. T_e : période d'échantillonnage.

f_e : fréquence d'échantillonnage.

Une mauvaise résolution peut engendrer un mauvais diagnostic notamment si les pics des fréquences sont proches.

III.4 Traitement du signal

III.4.1 Analyse dans le domaine temporel

Dans la surveillance, les paramètres statistiques les plus couramment utilisés pour l'évaluation du signal sont le carré moyen (RMS), une mesure de l'énergie contenue dans le signal, le facteur de crête (FC), le rapport entre la valeur maximale et la valeur RMS, et Kurtosis (K). En utilisant des données brutes, le traitement du signal dans le domaine temporel est classique, rapide et simple. Ils jouent un rôle critique pour la détection des défauts, le diagnostic et le pronostic. Cependant, ces techniques ne sont pas adaptées pour les signaux bruités. Il pourrait nécessiter des techniques de prétraitement pour améliorer les signaux avant l'évaluation des indicateurs. Parmi les caractéristiques du domaine temporel, les indicateurs statistiques sont largement utilisés grâce à leurs relations strictes avec les défauts naissants. En fait, les valeurs Moyenne, Variance, Min, Max, Skewness (SKE) et Kurtosis sont évaluées en fonction des signaux de vibration et de courant [72]. La valeur quadratique moyenne (RMS) est également efficace pour la détection d'un défaut de palier localisé en évaluant le contenu de puissance dans la signature vibratoire [73-75]. D'autre part, les facteurs qui représentent la forme globale des signaux, tels que le facteur de crête (CF), la valeur crête à crête (PP), le facteur de forme (FF) et le facteur d'impulsion (FI), sont puissants pour capturer les changements dans les signaux de courant [72] lorsque des anomalies se produisent. Dans [76], les auteurs combinent les indicateurs scalaires conventionnels tels que RMS, K, CF et Peak pour créer de nouveaux indicateurs qui visent à prédire les défaillances futures et à suivre les défauts depuis les premiers signes de dégradation jusqu'à la fin de la durée de vie. Les valeurs de ces paramètres changent à la fois en présence d'un défaut et à mesure que son intensité augmente. Par exemple, la valeur observée du RMS du signal de courant d'un moteur à induction défectueux devrait être très différente de la valeur d'un moteur sain. Ainsi, en comparant les valeurs RMS mesurées avec les valeurs déterminées en utilisant le courant d'un moteur en bon état, la présence et la gravité d'un défaut peuvent être détectées. En règle générale, les valeurs RMS sont plus utiles lorsque la défaillance s'est développée.

III.4.2 Analyse dans le domaine fréquentiel

Il a été constaté que le domaine fréquentiel du signal mesuré est plus utile que le domaine temporel pour déterminer l'état du moteur. Ainsi, le signal du domaine temporel est transformé en domaine fréquentiel ; Traditionnellement, cela a été fait en utilisant la transformée de Fourier ou transformation rapide de Fourier (FFT). Il a été constaté que des défauts tels qu'un

désalignement, une excentricité et de nombreux autres défauts génèrent des bandes latérales de modulation dans le spectre. L'amplitude de ces bandes latérales fournit souvent des informations utiles sur l'état du moteur.

III.4.2.1 Transformée de Fourier

Classiquement, c'est la méthode la plus utilisée. Il s'agit d'une méthode non paramétrique, qui est adapté bien à l'analyse des phénomènes stationnaires.

La transformée de Fourier analyse le contenu fréquentiel d'un signal, elle permet donc le passage entre deux domaines de représentations complémentaires; temporelle et fréquentielle. Basée sur les travaux du physicien Français Jean Baptiste Joseph Fourier, elle permet ce passage grâce à l'intégrale qui porte son nom et qui s'exprime, pour une fonction $f(t)$, par :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{III.8})$$

La transformée de Fourier est en fait une projection de la fonction à analyser $f(t)$ sur l'espace des sinus et cosinus représenté par les exponentielles complexes. Dans le cas d'un signal physique $s(t)$, celui-ci est connu sur un temps de longueur finie et de façon discrète. La version discrète de la transformée de Fourier peut s'écrire sous la forme :

$$S(K) = \sum_{i=1}^{N_e} s(i)e^{-2\pi kj \frac{i}{N_e}} \quad (\text{III.9})$$

Un algorithme rapide de cette transformée a été introduit par les Américains Cooley et Tuky en 1965. Appelé *Transformée de Fourier Rapide* ou *FFT (Fast Fourier Transform)*, il est à l'origine de l'extension de l'analyse de Fourier dans plusieurs domaines, notamment l'analyse spectrale en diagnostic vibratoire.

La FFT rapide permet de ramener le calcul de la transformée de Fourier discrète de N^2 à $N \cdot \log(N)$ opérations. Cette réduction de la complexité de calcul a suffi à faire passer facilement résolubles de nombreux problèmes liés à l'analyse spectrale. Pour une meilleure visualisation d'une analyse fréquentielle, la FFT est utilisée au travers d'une fenêtre glissante d'observation [08]. Malgré sa célébrité et son succès, la FFT reste inadaptable pour les signaux non stationnaires et elle montre assez vite ses limitations, perte de localisation temporelle [30 78, 79].

III.4.2.2 Periodogram

La densité spectrale de puissance $DSP(f)$ d'un processus du temps discret est défini comme la transformée de Fourier de son fonction d'auto-corrélation. Le DSP peut être calculé

directement et indirectement. L'approche directe évalue l'amplitude au carré de la FFT de l'ensemble de données suivie d'une moyenne ; ces estimations DSP sont connus périodogrammes. L'approche indirecte effectue une autocorrélation de l'ensemble de données de signal suivi par la FFT pour estimer les DSP, elles sont appelée scorelograms. Le périodogramme est le plus simple à calculer [08, 80, 81].

a. Périodogrammes simples

L'analyse d'un signal f dans le domaine fréquentiel consiste à estimer sa densité spectrale de puissance (DSP) à partir de la transformée de Fourier discrète. La fonction DSP indique la répartition de l'énergie du signal par rapport à la fréquence. Le périodogramme $P_{ps}(f)$ est la méthode la plus simple et la plus utilisée pour l'estimation de la DSP. Cette méthode non paramétrique peut être obtenue à partir de la fonction d'auto corrélation qui ne nécessite aucune connaissance préalable du signal. Elle est définie comme le carré de la longueur des données du signal, transformée en transformée de Fourier discrète, divisée par le nombre d'échantillons N .

La densité spectrale de puissance "DSP" $P^{\wedge}(f)_{ps}$ de la suite $p(f)_s$, repose sur l'équation suivante :

$$P_{ps}(f) = \lim_{N \rightarrow \infty} E \left[\frac{1}{(2N+1)} \left| \sum_{n=-N}^N p_s(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \right] \quad (\text{III-10})$$

Avec $-\frac{1}{2T} \leq f \leq \frac{1}{2T}$ et T est la période d'échantillonnage. La nécessité d'appliquer l'espérance mathématique E provient du caractère aléatoire des signaux. En pratique, pour un ensemble de données $p(n)_s$ disponibles de $n = 0$ à $N - 1$, le calcul de la DSP s'effectue avec la relation

$$P_{ps}(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} p_s(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \quad (\text{III-11})$$

L'estimation de la DSP peut être vue comme un filtrage du signal d'entrée par un banc de filtres du type passe-bande, dont chaque filtre élémentaire possède la réponse fréquentielle $H(f)$ donnée par la relation :

$$H(f) = \frac{\sin(N\pi(f-f_0))}{N\sin(\pi(f-f_0))} e^{j(N-1)\pi(f-f_0)} \quad (\text{III-12})$$

Le signal de sortie d'un filtre élémentaire est ensuite échantillonné et son amplitude est élevée au carré pour déterminer la puissance de sa bande spectrale. La largeur de bande à $-3[\text{dB}]$ de ces filtres est d'environ $\frac{1}{N}$. Lorsque N tend vers l'infini, la puissance de sortie du filtre correspond à celle d'une composante spectrale de fréquence f_0 du signal d'entrée.

b. Periodogramme modifié

Il est utilisé dans le cas où le nombre d'échantillons N est limité. Il peut être vu comme la multiplication terme à terme de la totalité du signal par la suite $\omega(n) = II_{\{0, \dots, N-1\}}(n)$. On donne à cette dernière le nom de fenêtre rectangulaire. Ce fenêtrage introduit des ondulations parasites dans le spectre fréquentiel résultant. Par conséquent, il est courant d'utiliser des fenêtres dites de pondérations pour permettre une meilleure visualisation des composantes du spectre fréquentiel. L'expression de la DSP est donnée par l'équation suivante

$$P_{ps}(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \omega(n) p_s(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \quad (\text{III-13})$$

Le terme $\omega(n)$, rajouté dans l'équation, représente l'expression mathématique de la fenêtre de pondération choisie. Les fenêtres de pondération les plus connues sont : Hamming, Hanning, et Blackmann. Chacune d'elle permet de choisir le rapport souhaité entre la largeur du lobe principal et l'atténuation de la hauteur du lobe secondaire du spectre fréquentiel [82]

III.4.3 Analyse dans le domaine temps-fréquence

Ni l'analyse spectrale ni l'analyse temporelle ne peuvent à elles seules fournir une image complète des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un signal. Pour les signaux stationnaires, cela ne pose pas vraiment de problème car, par définition, leur comportement ne change pas. Cependant, pour les signaux non stationnaires, des informations simultanées sur le temps et la fréquence sont importantes. Pour caractériser des signaux non stationnaires, des techniques combinées temps-fréquence sont utilisées. Ceux qui ont gagné en popularité ces dernières années sont : la transformation de Fourier à court terme (TFCT), la distribution de Wigner-Ville (DWV) et la transformation en ondelettes (TO).

III.4.3.1 Transformé de Fourier à Court Terme (TFCT)

La transformée de Fourier est une représentation globale du signal, elle ne permet pas d'analyser son comportement fréquentiel local, ni sa régularité locale. En 1946, Gabor a introduit une extension de la transformée de Fourier qui consiste à multiplier la fonction à analyser $f(t)$ par une fonction $g(t)$ qui porte le nom de fenêtre. Cette transformée est appelée *Transformée de Fourier fenêtrée* ou à court terme (*Short Term Fourier Transform*). Mathématiquement elle s'exprime par :

$$F_{fen}(a, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) g(t - \tau) e^{-jat} dt \quad (\text{III.14})$$

La STFT utilise une fenêtre temporelle g pour séparer le signal principal en petites parties. Chaque partie est alors supposée être un signal stationnaire et la transformée de Fourier

(FT) est appliquée à chaque partie individuellement [83]. Étant donné que le signal principal est divisé en petits intervalles de temps, il peut produire une distribution de spectre différente pour les différentes fenêtres temporelles. La longueur de la fenêtre est donc choisie afin de vérifier l'hypothèse de stationnarité. Ce choix influence directement la résolution de la décomposition : si la fenêtre g est grande, la résolution temporelle est petite mais la résolution fréquentielle est élevée, et Inversement. [Donc, si une grande résolution fréquentielle est nécessaire, alors il faut utiliser une fenêtre d'analyse grande, Ce concept est présenté sur la figure III.2 [84].

Lorsqu'on utilise des fonctions de fenêtre très courtes, l'efficacité de la technologie TCFT diminuera car, à mesure que les segments temporels deviennent très petits et que la quantité d'informations diminue, le contenu du spectre résultant diminue [83].

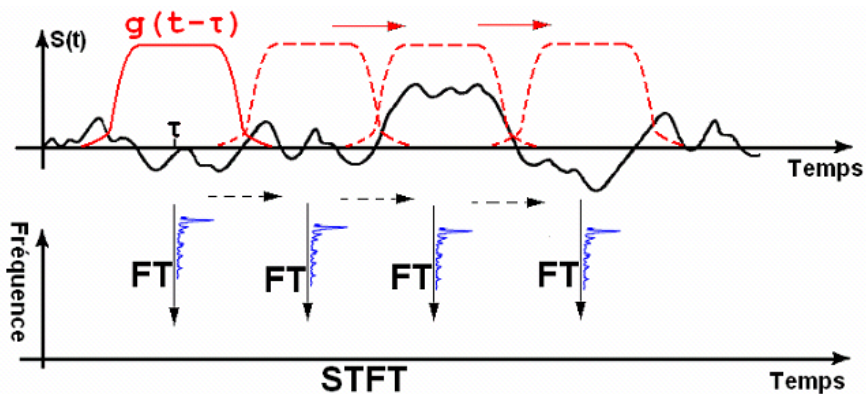


Fig. III.2 : Principe de la transformée de Fourier sur une fenêtre glissant (TFCT) [84].

Les inconvénients majeurs de cette transformation sont [85] :

- Une fois qu'une taille de fenêtre particulière a été sélectionnée, elle ne peut plus être modifiée, mais de nombreux signaux peuvent nécessiter plus de précision dans la détermination de la fréquence à un moment ou à un autre,
- Le principe d'incertitude signifie qu'il est impossible d'obtenir simultanément de bonnes résolutions dans les domaines temporel et fréquentiel.

III.4.3.2 La transformée de Wigner-Ville

La distribution de Wigner-Ville (DWV) est un autre type d'analyse dans le domaine temps-fréquence. Celui-ci fut présenté pour la première fois en 1932 par Wigner pour étudier des problèmes de mécanique quantique et, quinze ans plus tard, le scientifique français (Ville) appliqua la distribution de Wigner au traitement du signal. Aujourd'hui, on l'appelle généralement la distribution de Wigner-Ville. La distribution de Wigner-Ville (DWV) est une

extension de la TFFG. Cette distribution à beaucoup de propriétés utiles pour l'analyse des signaux non stationnaires ou transitoires elle est définie par [86]:

$$W_s(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (\text{III.15})$$

Avec : $x(t)$ signal complexe quelconque.

III.4.3.3 Transformée d'ondelettes

Les transformées en ondelettes analysent un signal simultanément dans des domaines de temps et de fréquence. Les transformées en ondelettes sont très utiles pour analyser des signaux non stationnaires, non périodiques, intermittents et transitoires. Par conséquent, un certain nombre de techniques à base d'ondelettes sont développées et mises en œuvre pour la manipulation de signaux. Les transformées en ondelettes sont utilisées pour étudier divers phénomènes physiques tels que l'analyse du climat, l'analyse des marchés financiers, la surveillance cardiaque, la surveillance et la protection des machines tournantes, le débruitage du signal sismique et des images astronomiques, la caractérisation de la surface des fissures et de l'intermittence turbulente, la compression des enregistrements d'images vidéo et de signaux médicaux, etc. Les ondelettes sont de petites ondes de courte durée. Celles-ci ont une énergie finie et se décomposent rapidement dans le temps. Les ondelettes ont également une caractéristique oscillante, qui vient avec la localisation dans le temps et la fréquence. Ces caractéristiques de base rendent les ondelettes parfaitement adaptées à la représentation du signal.

a. Définition d'une ondelette:

L'ondelette est une forme d'onde qui a une durée limitée et avec une valeur moyenne égale à zéro. La transformation en ondelettes permet d'appliquer une analyse multi-résolution sur le signal étudié. L'analyse multi-résolution de la transformation en ondelettes équivaut à une décomposition atomique temps-échelle. Chacun des atomes peut s'interpréter comme étant une projection locale du signal analysé et est obtenu à partir d'une ondelette $\psi(t)$ unique par une translation en temps et une dilatation. Partant d'une fonction bien localisée, dans le plan temps-échelle [87]. La transformée d'ondelettes (TO) est une technique efficace pour la détection de défauts dans les machines et est largement reconnue comme étant utile pour la surveillance. La TO est adapté à l'analyse des signaux stationnaires et transitoires.

Les représentations temps-fréquence telles que TFCT donnent une résolution fixe dans le domaine temps-fréquence une fois la fonction fenêtre est déterminée. La transformée d'ondelettes d'un signal temporel est une extension du signal en termes d'une famille de fonctions générées à partir d'une seule fonction appelée noyau d'ondelettes. La transformée de Fourier classique déplace les données d'un domaine temporel vers un domaine fréquentiel avec des fonctions sinusoïdes, qui donnent les caractéristiques moyennes du signal. L'ondelette remplace les sinusoïdes de la transformée de Fourier par une famille de translations et de dilatations d'une même fonction appelée ondelette.

L'une des caractéristiques importantes de cette transformée est qu'elle peut réduire ou élargir la fenêtre temporelle selon que la fréquence est haute ou basse. C'est une différence importante entre les ondelettes et les autres méthodes temps-fréquence. En conséquence, la transformée d'ondelettes est capable de résoudre des phénomènes transitoires de très courte durée dans la dimension temporelle, ce qui le rend approprié pour l'analyse de signaux non stationnaires. Les ondelettes est donc une technique potentiellement bien adaptée à la détection des défaillances précoces des moteurs à induction.

b. Propriété d'une ondelette mère :

- **Support compact :** La plupart des ondelettes sont à support compact dans le domaine temporel, c'est-à-dire qu'elles sont à durée finie et se distinguent par leur atténuation rapide. Un support compact permet une complexité de calcul réduite, une meilleure résolution dans le domaine temporel mais donne une résolution réduite en domaine fréquentiel. Comme exemple, on peut citer les ondelettes de Daubechies, Symlets, Coiflets, etc. Par dualité, les ondelettes à bande étroite sont des ondelettes à support compact dans le domaine fréquentiel mais pas dans le domaine temporel.
- **Régularité :** La régularité de la fonction est directement liée au niveau de lissage de cette fonction. La régularité d'une ondelette est la propriété permettant de localiser les singularités dans un signal. On peut noter qu'il existe un lien entre la régularité et les moments nuls. Autant on a des moments nuls autant le signal est régulier [88].
- **Symétrie :** Comme la fonction de mise à l'échelle peut être considérée comme un opérateur de filtrage, il est important que sa réponse en phase ne soit pas fortement dégradée. Dans le traitement du signal, il est souhaitable que le filtre soit en phase

linéaire afin de maintenir un retard constant. comme le nombre de moments nuls, la symétrie de l'ondelette conditionne la régularité de celle-ci sur un intervalle.

- Orthogonalité : L'orthogonalité d'une ondelette est la propriété permettant d'éliminer la redondance d'informations

c. Sélection d'ondelettes mères

Plusieurs ondelettes ayant différentes fonctions et propriétés mathématiques qui ont été développées. Les ondelettes comprennent des ondelettes à support infini, telles que Mexican Hat, Morlet et Meyer, et des ondelettes à support compact, telles que Haar, Daubechies, Coiflet, Symlets [89]. Certaines de ces familles sont illustrées à la Figure III-3.

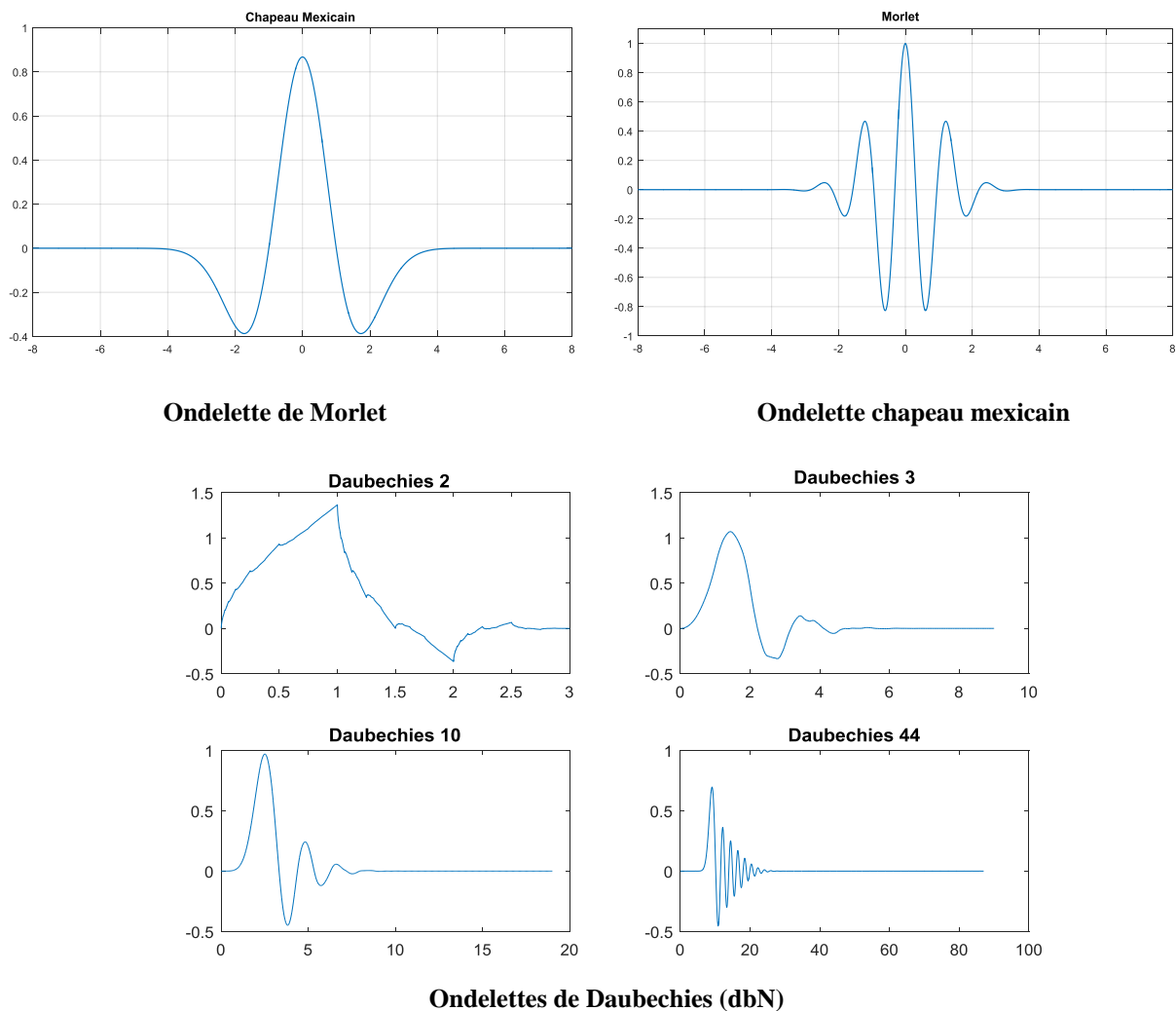


Figure III.3 Différents types d'ondelettes mères

Dans certains domaines scientifiques, certaines familles montrent de meilleurs résultats pour des applications particulières. Dans le cas d'ondelettes à support compact, il existe des ondelettes mères d'ordre supérieur (avec un grand nombre de coefficients) et des ondelettes

mères d'ordre inférieur. Les ondelettes d'ordre inférieur entraînent un chevauchement entre les bandes de fréquences adjacentes. L'ondelette mère de Daubechies est couramment utilisée dans l'analyse TOD pour analyser les défauts du moteur [89, 90].

d. Transformée d'ondelette continue

La Transformée d'ondelette continue (TOC) est une technique efficace pour la détection de défauts dans les machines et est largement reconnu comme étant utile pour la surveillance des conditions des machines à induction. La TOC est adapté à l'analyse des signaux stationnaires et transitoires.

La transformée d'ondelette continue sépare les signaux en un ensemble de fonctions élémentaires, appelées ondelettes. Les ondelettes sont des ensembles ou des familles de fonctions qui définissent sa forme de base, puis chacune d'elles est définie par une dilatation, qui contrôle le paramètre d'échelle, et une translation, qui contrôle la position de l'ondelette dans le temps. Mathématiquement, la transformée d'ondelette continue du signal continu $x(t)$ est définie par [89] :

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III.16})$$

Où $\psi(t)$ est l'ondelette mère, b le facteur de translation et a ($a>0$) le facteur de dilatation. Le facteur $\frac{1}{\sqrt{a}}$ est utilisé pour la normalisation d'énergie. La transformée en ondelettes continue est étendue par une famille de fonctions du noyau, qui sont des versions traduites et dilatées de l'ondelette mère, appelées ondelettes filles et exprimées sous la forme:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \quad (\text{III.17})$$

Où $\psi_{ab}(t)$ représente l'ondelette fille et $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ l'ondelette mère traduite et dilatée. Les paramètres de mise à l'échelle et de décalage a et b changent continuellement, de sorte que la taille de la fonction d'ondelettes $\psi_{ab}(t)$ varie. Ceci est en contraste avec le TCFT où la taille de la fenêtre est fixée.

E. Transformation en ondelettes discrète

Pour la transformée en ondelettes discrète (TOD), l'idée principale est la même que dans le cas de TOC, mais sa mise en œuvre est considérablement plus facile et plus rapide. L'ondelette discrète est simplement une version échantillonnée de la transformation en ondelettes continue, et la plupart des informations qu'elle fournit sont redondantes en ce qui concerne la reconstruction du signal. Mais cette redondance nécessite beaucoup de temps de

calcul. Les ondelettes discrètes résolvent ce problème en fournissant des informations suffisantes à la fois pour l'analyse et la synthèse du signal d'origine avec une réduction significative du temps de calcul.

Un moyen rapide d'obtenir les coefficients TOD directs consiste à utiliser la structure de groupe de filtres illustrée à la figure III.4. Les coefficients d'approximation à un niveau inférieur sont transférés via un filtre passe-haut ($h[n]$) et un filtre passe-bas ($g[n]$), suivis d'un sous-échantillonnage par deux pour calculer le détail D (à partir du filtre passe-haut), et les coefficients d'approximation A (à partir du filtre passe-bas) à un niveau supérieur comme le montre la figure suivante [90]

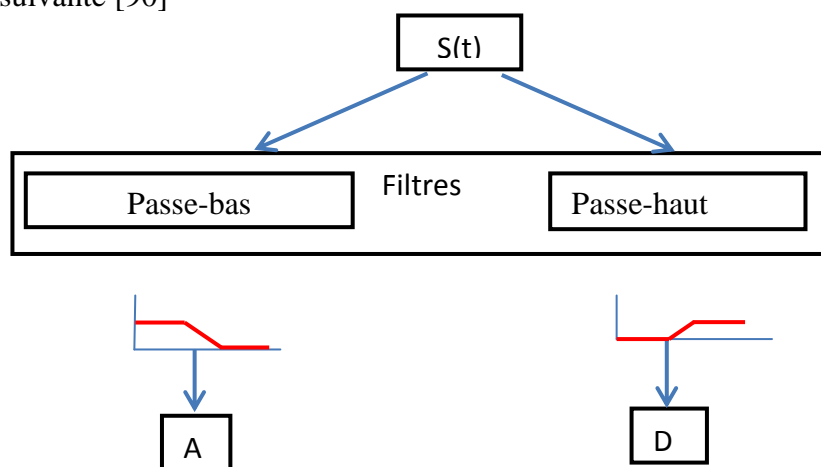


Figure III.4 Décomposition du signal en approximation et détail

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

Décomposition simple :

Une décomposition simple peut être appliquée sur un signal original en le divisant en deux signaux respectivement, un signal de haute fréquence (Coefficients ondelette de détails CD) et un autre signal de basse fréquence (Coefficients ondelette d'approximation CA). Tous les deux sont de taille approximativement égale à la moitié du vecteur d'origine. Ceci est dû au fait de l'opération de décimation par 2 (down sampling) (Figure III.5) [89].

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

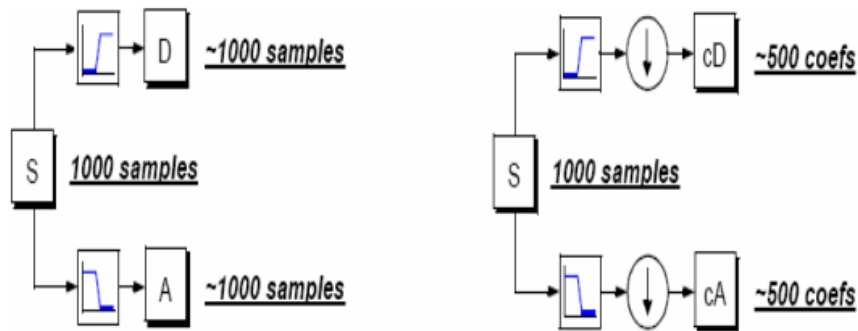


Figure III.5 Décomposition simple du signal s en approximations et détails

Décomposition multi niveaux :

Dans la décomposition multi-niveaux, en utilisant des techniques de filtrage numériques, une représentation d'échelle de temps du signal numérique est obtenue. En effet, le signal numérique passe par des filtres passe-bas et passe-haut successifs avec différentes fréquences de coupure aux différentes échelles. Ceci est l'algorithme de Mallat qui permet de décomposer le signal S en plusieurs niveaux. Le processus de décomposition peut être réitéré, avec des approximations successives étant décomposées alternativement, de sorte qu'un signal soit décomposé en beaucoup de composants de hautes résolutions. Ceci s'appelle l'arbre de décomposition en ondelettes. Puisque le processus d'analyse est itératif, dans la théorie il peut être continué indéfiniment. En réalité, la décomposition peut procéder seulement jusqu'à ce que les différents détails se composent d'un échantillon ou d'un Pixel simple.

Dans la pratique, on choisira un nombre approprié de niveaux basés sur la nature du signal à décomposer, ou sur un critère approprié tel que l'entropie [87, 89].

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

Les coefficients A_j et D_j sont calculés en utilisant l'algorithme de décomposition d'arbre laissant stockée l'information de base du signal fréquence aussi bien que les discontinuités. Pour décomposer un signal dans la bande de fréquence entière, une décomposition en ondelettes peut être utilisée. Après la décomposition par périodes, nous obtiendrons 2^l bandes de fréquence chacune avec la même largeur de bande :

$$\left[\frac{(i-1)f_n}{2}, \frac{if_n}{2} \right] i = 1, 2, \dots, 2^l \quad (\text{III.18})$$

Telle que $n f$ est la fréquence de *Nyquist* dans la bande i de fréquence. D'après la relation Eq.1.23, on peut représenter les différents niveaux de décomposition avec leurs bandes de fréquences (figure III.6) [87].

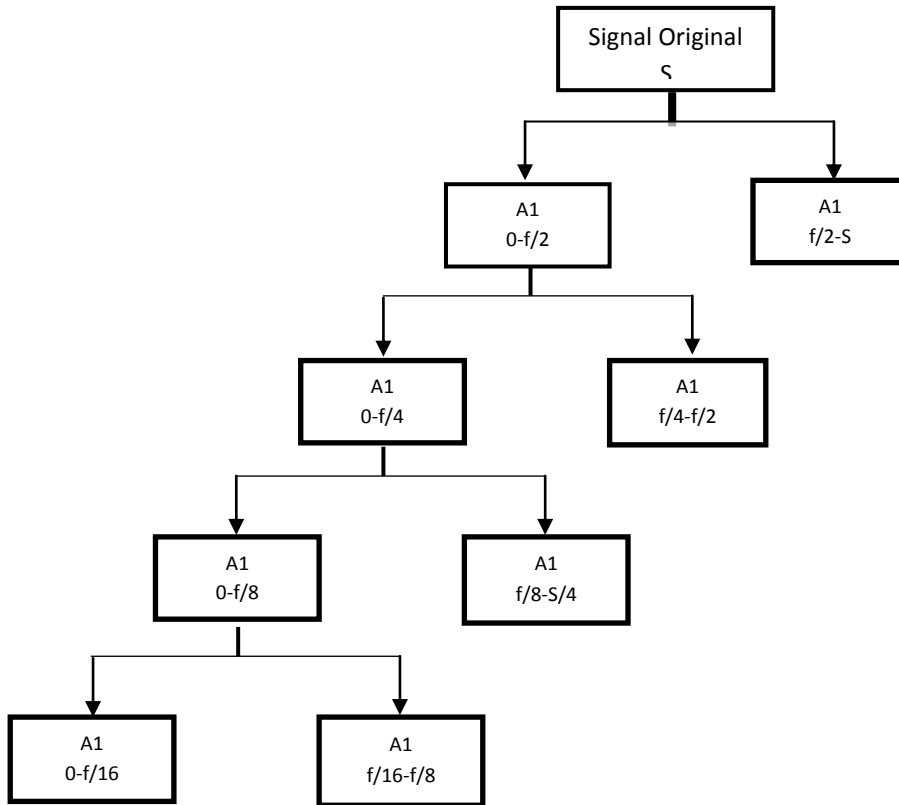


Figure III.6 Décomposition du signal s en multi-niveaux

D'après l'arbre de décomposition (figure III.6), on peut estimer le signal original à n'importe quel niveau par la somme des signaux approximation et de détail. Pour une décomposition en quatre niveaux, le signal original est reconstruit en chaque niveau comme suit :

$$\begin{cases} i = 1, f(n) = A_1(n) + D_1(n) \\ i = 2, f(n) = A_2(n) + D_2(n) + D_1(n) \\ i = 3, f(n) = A_3(n) + D_3(n) + D_2(n) \\ i = 4, f(n) = A_4(n) + D_4(n) + D_3(n) \\ i = k, f(n) = A_k(n) + D_k(n) + D_{k-1}(n) \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

F. Décomposition par paquet d'ondelettes :

Alors que la TOD fournit l'analyse du signal avec une résolution de fréquence temporelle plus flexible, comme décrit, son inconvénient est que la résolution de fréquence est plutôt réduite dans la région des hautes fréquences. Par conséquent, il se rencontre à certaines difficultés de discrimination entre les signaux ayant des composantes proches de haute fréquence.

La méthode par paquet d'ondelettes est une extension du TOD. Dans l'analyse en ondelette, un signal est décomposé en approximation et détail. L'approximation est alors elle-même coupée en approximation et détail de deuxième niveau, et le processus est répété. Pour une décomposition de n-niveau, il y a (n+1) manières possibles de décomposer le signal. Dans l'analyse par paquet d'ondelettes, les détails aussi bien que les approximations peuvent être décomposés. Ceci rapporte plus de 2^{2n+1} de différentes décompositions du signal. L'arbre de décomposition en paquet d'ondelettes est représenté dans la figure III.7 [91, 92].

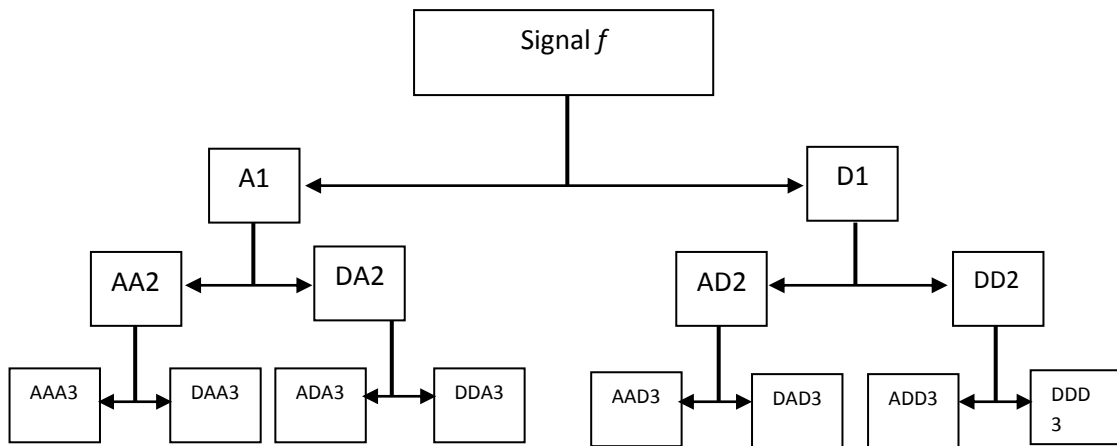


Figure III.7 : décomposition en ondelettes par paquets d'ordre 3

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

$$\begin{cases} i = 1, f(n) = A1(n) + D1(n) \\ i = 2, f(n) = AA2(n) + DA2(n) + AD2(n) + DD2(n) \\ i = 3, f(n) = AAA3(n) + DAA3(n) + ADA3(n) + DDA3(n) + AAD3(n) + DAD3(n) + ADD3(n) + DDD3(n) \end{cases} \quad (III.20)$$

Spécification du niveau de décomposition

Le nombre de niveaux de décomposition est déterminé par les composantes de fréquence à la fréquence à suivre. Plus le niveau de fréquence à extraire est faible, plus le nombre de niveaux de décomposition est élevé. [59] Le niveau de décomposition est donné par [93, 94] :

$$N = \text{int} \left(\frac{\log(f_s/f_e)}{\log(2)} \right) + 1 \quad (\text{III.21})$$

Énergie de décomposition

Après la différenciation, l'extraction du courant de stator fondamental, le diagnostic de défaillance est basée sur l'observation et la comparaison entre les niveaux de décomposition qui contiennent l'information de défaut pour des machines à diagnostiquer.

Lorsque le défaut du balourd, les informations de défaut sont incluses dans chaque bande de fréquence résultant de la décomposition ou ondelettes par paquets d'ondelettes en calculant l'énergie associée à chaque niveau de décomposition ou de chaque nœud, un peut construire un outil de diagnostic très efficace [94, 95].

La valeur appropriée de l'énergie de chaque bande de fréquences est défini par :

$$E_j = \sum_{k=1}^{k=n} D_{j,k}^2 (n) \quad (\text{III.22})$$

Où j est le niveau de décomposition. Basé Sur la valeur propre de l'énergie, le vecteur est donnée par :

$$V = \left[\frac{E_0}{E}, \frac{E_1}{E}, \dots, \frac{E_{2m-1}}{E} \right] \quad (\text{III.23})$$

Tel que :

$$E = \sum_{j=0}^{2m-1} |E_j|^2 \quad (\text{III.24})$$

Les Valeurs propres de l'énergie des niveaux de décomposition contiennent des signaux d'information dans un moteur asynchrone, le tracé de ces valeurs peuvent être utilisés pour diagnostiquer les défauts, et peuvent également identifier le degré de défaut, la déviation d'une certaine valeur indique appropriée la gravité du défaut.

III.5 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons présenté une étude de l'état de l'art portant sur les bases théoriques des différentes techniques de traitement de signal en mode progressif, de la transformée de Fourier aux ondelettes. Après avoir rappelé la transformée de Fourier, L'analyse du spectre par FFT trouve ses limites par son incapacité de reconnaissance des signaux non stationnaires. Une solution à ce problème a été introduite : la transformée de Fourier à court terme et distribution de Winger-Ville. Il existe des limitations lors de l'utilisation des techniques TFCT et DWV pour diagnostiquer et classer les défauts. Ce n'est pas le cas pour les ondelettes qui ont trouvé leur supériorité par rapport aux outils précédents. La littérature est riche par plusieurs méthodes et applications sur le thème de l'ondelette (biomédical, sismographie, traitement d'image, ...), ainsi que dans la détection des défauts dans les machines électriques.

Les prochains chapitres sont réservés pour notre contribution dans le domaine de la détection de défaut du balourd.

***Chapitre IV : Effets et Signature
du balourd dans les courants
triphases.***

VI.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous recherchons une meilleure compréhension des effets de balourd sur la machine et comment s'effectue le transfert des informations mécaniques vers les grandeurs électriques. Il existe un certain nombre de papiers témoignant de la détection et le diagnostic de défaut de balourd, basés sur l'analyse des courants d'alimentation de la machine. Une des raisons principalement invoquée dans la littérature scientifique est que le défaut de balourd induit des oscillations du couple de charge. Or dans ce qui suit nous montrons qu'à partir des courants statoriques, il est possible de détecter la présence d'un défaut de balourd.

VI.2 Origines et effets d'un déséquilibre mécanique dans un système d'entraînement

Le balourd ou le déséquilibre mécanique est le défaut le plus courant dans les machines tournantes. Il s'agit d'une répartition inégale de la masse autour de l'axe de l'arbre. La force produite par le balourd est une force fluctuante due à la rotation de l'arbre qui peut rapidement conduire à une défaillance par rapport à une charge statique. Cette force centrifuge, issue de ces défauts de « non-concentricité » ou d'ajustage engendre des vibrations qui nuisent au bon fonctionnement des applications entraînées et qui peuvent accélérer la dégradation de certains éléments mécaniques qui les composent, en particulier les roulements.

$$F = mr \omega^2 \quad (\text{IV.1})$$

où ' F ' est la force de balourd, ' m ' est la masse de balourd placée dans le rotor, ' r ' est la distance radiale et ' ω^2 ' est la vitesse de rotation.

On voit que les trois paramètres tels que masse, rayon et vitesse de rotation sont directement proportionnels à la force de balourd. Le paramètre dominant est la vitesse de rotation. Même une faible quantité de masse de déséquilibre peut produire une force de déséquilibre supérieure à une vitesse élevée. Ainsi, la machine doit être équilibrée à sa vitesse de fonctionnement. Il existe deux types fondamentaux de déséquilibre, le déséquilibre statique dans lequel les forces sont dans un plan et le déséquilibre dynamique dans lequel les forces sont dans des plans différents [96]. Cette défaillance peut provenir premièrement de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage. Mais aussi le balourd peut apparaître au cours du fonctionnement du système. Son origine varie selon le type d'application et nous pouvons notamment citer :

- une altération mécanique (perte d'ailette, érosion ou encrassement...).

– d'une altération thermique ou d'une déformation suite à des dilatations différentes des matériaux constituant le rotor ou encore à des différences de température localisées (balourd thermique) [34 53].

VI.3 Effets d'un déséquilibre mécanique sur les différentes grandeurs électriques et mécaniques

L'équilibre mécanique dans le moteur à induction implique toute la structure du rotor qui est composée de plusieurs parties, y compris un arbre, les tôles de rotor, les barres rotoriques, les connecteurs d'extrémité, les ventilateurs. Ces nombreux éléments doivent être contrôlés dans leur conception et fabriqués pour obtenir un équilibre de précision stable. Lorsqu'un moteur est correctement équilibré et aligné, l'amplitude de fréquence, associée au défaut, change à peine et reste limitée à un certain niveau. Un déséquilibre mécanique est présent dans un système tournant lorsque la masse de celui-ci n'est pas uniformément répartie autour de son axe de rotation [97]. Le balourd résultant peut alors être modélisé par une masse m située à une distance R de l'axe de rotation, comme l'illustre la figure IV.1.

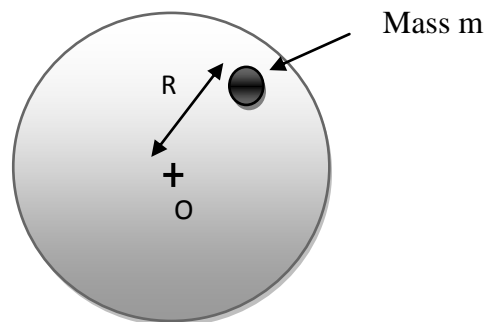


Figure IV.1 Représentation schématique d'un déséquilibre mécanique par une masse m

Cette masse, qui modélise l'asymétrie du système par rapport à son centre de rotation. Cette force provoque par conséquent une oscillation du couple de charge aperçu par le moteur à la fréquence de rotation f_r . Cette oscillation, notée $C_{bal}(t)$, est exprimée par l'équation (IV.2).

$$C_{bal}(t) = m \cdot g \cdot R \cdot \cos(\theta) = m \cdot g \cdot R \cdot \cos(2\pi f_r t) \quad (IV.2)$$

La plupart des effets néfastes associés à la présence d'un balourd sont provoqués par la force centrifuge. De plus, ce signal vibratoire oscille à la fréquence de rotation; ces vibrations sont augmentées, l'amplitude de la fréquence de rotation augmente et il en va de même avec ses harmoniques.

4. Effets et Signature du Balourd dans les courants triphasés

Cette oscillation provoque l'apparition de signatures caractéristiques dans les grandeurs électriques (courants) et mécaniques (vitesse, vibrations) mesurées sur le système, en particulier sur la fréquence instantanée des courants. Dans les moteurs asynchrones, cette vitesse est légèrement inférieure à la vitesse synchrone, n_s , qui est liée à la fréquence d'alimentation électrique.

VI.4 Transformation du vecteur d'espace

Traditionnellement, l'analyse des systèmes triphasés est effectuée grâce aux composantes symétriques car elles permettent d'extraire facilement les informations caractéristiques d'un tel système. La transformation du vecteur d'espace est dérivée de celle des composantes symétriques. Ce paragraphe présente un bref historique sur les transformations des composantes symétriques, et leur lien avec le vecteur d'espace.

Afin de combiner et de traiter efficacement l'information contenue dans les trois phases au cours de la première moitié des années 1900, divers auteurs ont travaillé au développement de l'approche des composants symétriques (CS). Plusieurs transformées triphasées sont actuellement utilisées, telles que la transformée de Fortescue [21], la transformée de Clarke / Concordia [22] ou la transformée de Park [98].

En 1918, Fortescue a proposé une méthode de décomposition de tout système non équilibré à n phases en un ensemble de n systèmes symétriques appelés composants symétriques. Comme le type le plus courant de système polyphasé est un système triphasé, cette méthode s'applique le plus souvent à l'utilisation d'une transformée matricielle triphasée. La transformation proposée considère l'ensemble des phases triphasées (x_1 , x_2 et x_3 , en tension ou en courant). Plus tard, Lyon reprend la transformation de Fortescue et l'applique à des grandeurs dépendant du temps quelles que soient les conditions, sinusoïdales ou non [99]. Cette transformée générale et instantanée est donnée par :

$$\begin{pmatrix} x_a(t) \\ x_i(t) \\ x_0(t) \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{pmatrix} \quad (\text{IV.3})$$

Où $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, j étant la racine carrée de -1 . Le coefficient de normalisation $2/3$ est choisi de manière à conserver les amplitudes entre les systèmes triphasés avant et après transformation.

Selon Fortescue, tout système triphasé non équilibré peut être résolu à sa fréquence fondamentale en une somme de trois systèmes symétriques :

4. Effets et Signature du Balourd dans les courants triphasés

- Ensemble x_d de la composante séquence positive : système équilibré de trois phaseurs de valeurs égales, décalés de $2/3$ radians et dans le même ordre de phase que le système d'origine.
- Ensemble x_i de la composante inverse : système équilibré de trois phaseurs égaux en amplitude, décalés de $2/3$ radians et en séquence de phases inverse du système d'origine.
- x_0 Ensemble de la composante homopolaire: trois phaseurs égaux en amplitude et sans décalage de phase entre eux.

Si le système triphasé d'origine est parfaitement équilibré et alimenté en étoile, seul le CS à séquence positive existe et les autres CS sont nuls. Ainsi, le CS à séquence positive quantifie la quantité d'équilibre dans les signaux triphasés, tandis que les composantes à séquence négative et à séquence zéro quantifient le déséquilibre électrique [100, 101].

Les composants symétriques instantanés reflètent les changements dans la tension d'alimentation et il est donc utilisé pour détecter la perturbation dans le système d'alimentation [9]. Les composantes des séquences positives et négatives instantanées sont calculées par eq (IV.3) :

$$\begin{bmatrix} i_p(t) \\ i_n(t) \\ i_0(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ i_3(t) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.4})$$

L'équation (IV.3) présente la forme matricielle des composantes symétriques instantanées qui peuvent être simplifiées selon la nature des mesures. Premièrement, les courants statoriques sont des variables à valeur réelle, donc les vecteurs instantanés positifs et négatifs correspondants $i_p(t)$ et $i_n(t)$ sont conjugués complexes l'un de l'autre ; ils portent les mêmes informations et sont redondants. De plus, la machine étant câblée en étoile, la somme des trois courants du stator est nulle et le vecteur homopolaire instantané est nul pour toujours.

Ainsi, le système triphasé d'origine ne peut être décrit que par la composante de séquence positive $i_p(t)$ qui sera notée $i(t)$ dans le reste comme suit :

$$i(t) = \frac{2}{3} [i_1(t) + ai_2(t) + a^2i_3(t)] \quad (\text{IV.5})$$

VI.5 Transmission du défaut vers le courant statorique

Les défauts de la machine à induction conduisent à divers effets sur les paramètres intrinsèques et les quantités électriques de la machine, qui peuvent être classées en trois grandes catégories :

4. Effets et Signature du Balourd dans les courants triphasés

- Défauts conduisant à l'excentricité entre le stator et rotor: défauts de palier, désalignement d'arbre, défauts de roulements.
- Défauts conduisant à des perturbations dans la force magnétomotrice: défauts de court-circuit du stator, connexions électriques brisés dans le stator.
- Défaillances induisant des oscillations de couple : défaut de charge mécanique et défauts de palier ; défauts de roulements. Ces variations se rapportent souvent à la position mécanique du rotor. Les oscillations de couple de charge donnent ainsi lieu à des oscillations de la vitesse mécanique.

Ces effets sont visibles dans les quantités électriques du stator par induction. Les auteurs dans [91] ont montré qu'ils généraient des modulations d'amplitude et de phase de ces quantités, conduisant à des bandes de modulation dans les signaux électriques.

Comme les effets des défauts mécaniques étant souvent liés à la vitesse de l'arbre ω_r ou à la position angulaire θ_r , ω_c peut souvent être égal à ω_r ou à un multiple entier de ω_r . Plus généralement, en fonction de la présence d'une boîte de vitesses dans l'entraînement, ω_c peut être n'importe quel multiple rationnel de ω_r .

Nous allons détailler l'approche proposée dans [9] et l'employer pour le vecteur d'espace, permettant d'identifier clairement les signatures sur les courants statoriques. Cette approche est basée sur une étude des modulations des forces magnétomotrices rotoriques et statoriques, comme le montre la figure IV.2. Les hypothèses simplificatrices de ce modèle sont les suivantes [102,104] :

- Les calculs de champ magnétique sont basés sur les équations de Maxwell simplifiées utilisées dans des conditions quasi stationnaires.
- Les noyaux du stator et du rotor ont une perméabilité du fer μ_r infinie, les effets de saturation sont négligés.
- La longueur de la machine est supposée infinie, les effets de bords sont négligés, ce qui ramène à une étude bidimensionnelle.

Par ailleurs, afin de simplifier les calculs et aider à comprendre le modèle, l'alimentation est supposée sinusoïdale de fréquence f_s . La distribution spatiale des conducteurs statoriques est également supposée sinusoïdale. Enfin les effets des encoches rotoriques sont négligés.

4. Effets et Signature du Balourd dans les courants triphasés

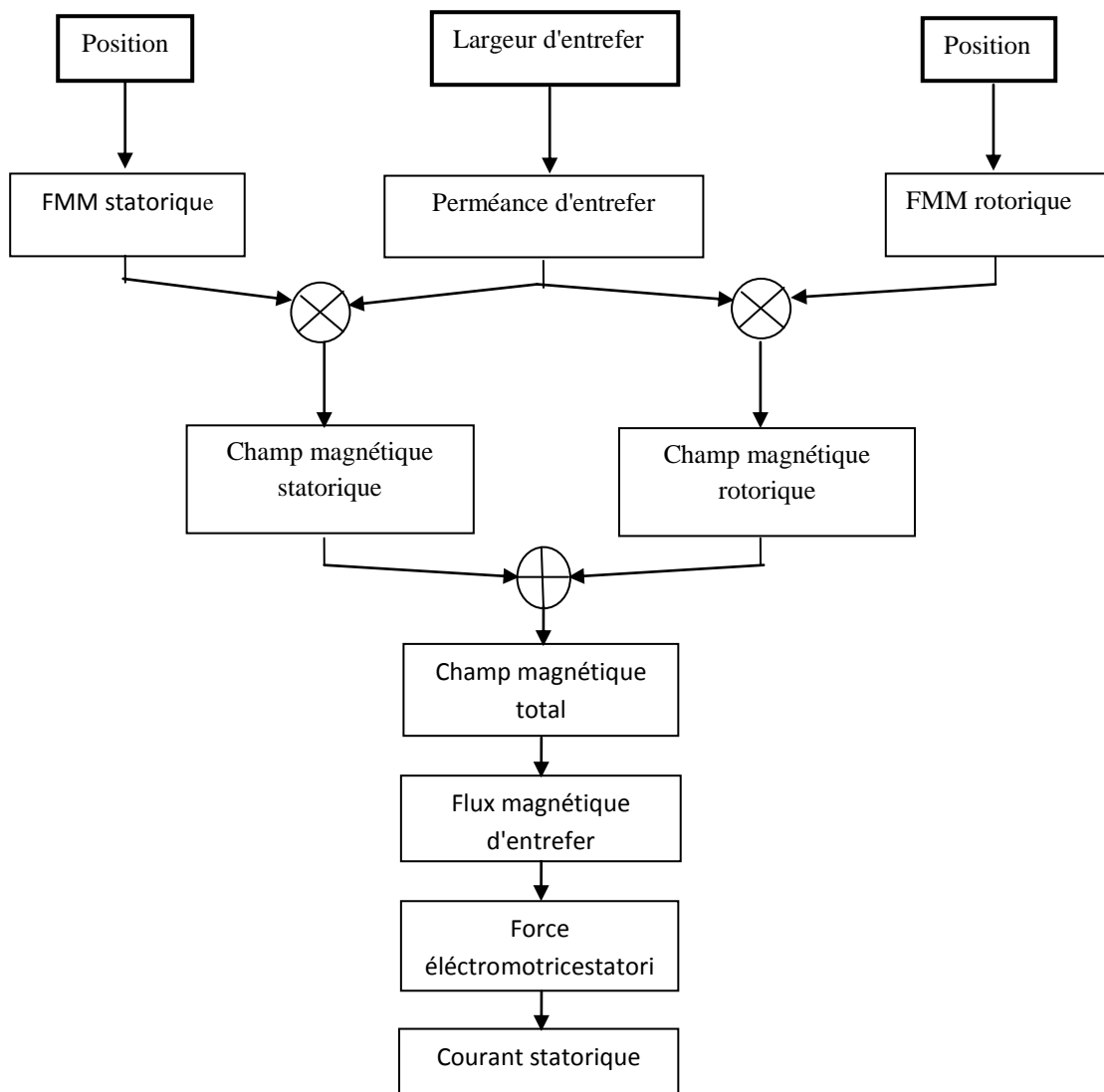


Figure VI.2 Calcul du courant par approche de Force Magnétomotrice et perméance de l'entrefer.

Dans le cas du balourd, on considère uniquement l'effet des oscillations de couple. Nous montrons dans cette partie l'influence des variations de couple sur le courant électrique. Ces variations entraînent également des oscillations dans le couple électromécanique afin que la machine garde un régime de fonctionnement stable. Il a été démontré, que des signatures caractéristiques apparaissent sur les courants statoriques. Des oscillations de couple de fréquence f_{osc} induisent des composantes latérales de courant statorique à $f_s \pm f_{osc}$ [16,17]. La machine asynchrone est alors considérée comme un capteur pour la détection des oscillations de couple. Dans ce qui suit, l'effet de la variation périodique du couple sur la vitesse mécanique et la position mécanique du rotor est étudié. Cela implique deux opérations d'intégration, c'est-à-dire que les amplitudes des termes d'ordre supérieur de la série de Fourier avec des fréquences plus élevées sont considérablement atténuées. Par conséquent, seul le premier terme des

4. Effets et Signature du Balourd dans les courants triphasés

composantes variables de la série de Fourier est pris en compte dans ce qui suit, ce qui équivaut à considérer une variation de couple de charge sinusoïdale.

Dans le cas d'un stator triphasé d'une machine idéale, la distribution de courant surfacique est parfaitement sinusoïdale. Nous obtenons donc une force magnétomotrice statorique F_s qui ne contient que l'onde fondamentale.

$$F_s(t, \theta) = F_s e^{j(2\pi f_s t - p\theta)} \quad (IV.6)$$

Cette onde fondamentale tourne à la vitesse angulaire ω_s et possède une périodicité mécanique p égale au nombre de paires de pôles de la machine. Par la suite, nous désignerons cette périodicité mécanique comme le nombre de paires de pôles de l'onde.

En présence d'un défaut, le couple de charge C_{ch} peut être écrit comme la somme d'une partie constante et d'une partie qui représente des faibles variations de couple engendrées par le défaut comme suit :

$$C_{ch}(t) = C_{cst} [1 + \Delta C(t)] \quad \text{avec} \quad |\Delta C(t)| \ll 1 \quad (IV.7)$$

Tel que
$$\Delta C(t) = \Delta C \cos(2\pi f_c t + \varphi) \quad (IV.8)$$

L'équation d'équilibre des couples (IV.7) nous permet de calculer la vitesse de la machine :

$$\omega_r(t) = \frac{1}{J} \int (C_{mot} - C_{ch}) dt \quad (IV.9)$$

Où J est l'inertie totale de la machine et de la charge. En fonctionnement permanent sans oscillations de couple de charge, le couple électromagnétique fourni par le moteur C_{mot} est égal au couple de charge constant $C_{ch} = C_{cst}$.

Comme le terme oscillant a une moyenne nulle, cela est également vrai si les variations de couple de charge périodiques considérées sont présentes. En régime permanent, le couple moteur C_{mot} (couple électromagnétique) est égal à la partie constante C_{cst} du couple de charge et la vitesse angulaire est égale à ω_{r0} ; la vitesse angulaire $\omega_r(t)$ s'exprime donc comme :

$$\omega_r(t) = \frac{1}{J} \int -C_{cst} \cos(\omega_c t) dt + const = -\frac{C_{cst}}{J\omega_c} \sin(\omega_c t) + \omega_{r0} \quad (IV.10)$$

La constante d'intégration est la vitesse angulaire en régime permanent notée ω_{r0} . La vitesse mécanique en présence d'oscillations de couple de charge est donc constituée d'une composante constante ω_{r0} et d'une autre variable sinusoïdale. Compte tenu de l'équation mécanique de la machine, le couple de charge oscillant conduit à des oscillations périodiques de

4. Effets et Signature du Balourd dans les courants triphasés

période $1/f_c$ de la vitesse rotorique. L'angle mécanique θ_r du rotor s'obtient en intégrant la vitesse :

$$\theta_r(t) = \int \omega_r(t)dt = \frac{C_{cst}}{J\omega_c} \cos(\omega_c t) + \omega_{r0}t + const \quad (IV.11)$$

$$\theta_r(t) = \frac{C_{cst}}{4\pi^2 J f_c^2} \cos(2\pi f_c t) + \omega_{r0}t$$

La FMM statorique va induire un système de courants triphasé équilibré au rotor, générant lui-même une FMM rotorique. La force magnétomotrice (F.M.M.) rotorique dans un référentiel lié au rotor (R) (figureIV.4) est une onde avec p paires de pôles, tournant à la fréquence des courants induits rotoriques. Cette fréquence est égale à $g\omega_s$, donc :

$$F_r^{(R)} = F_{r,1} \cos(p\theta - g\omega_s t) \quad (IV.12)$$

avec g = glissement

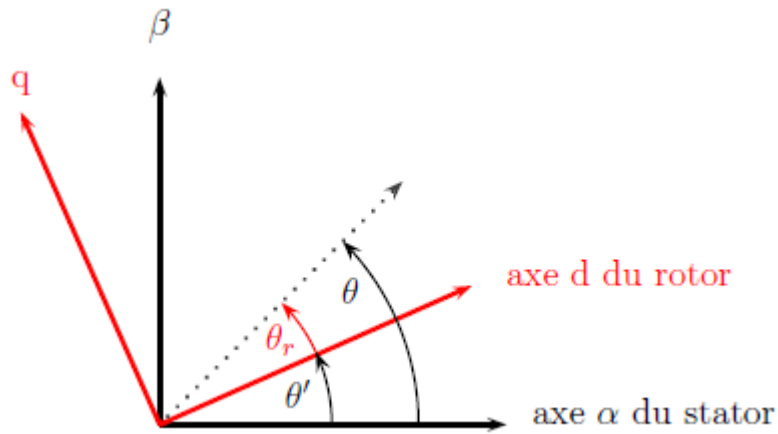


Figure IV.3: Référentiel tournant (R) et référentiel fixe (S)

Après la transformation dans le référentiel fixe (S) lié au stator avec $\theta = \theta' + \theta_r$, la F.M.M. rotorique s'écrit :

$$F_r = F_{r,1} \cos(p\theta - p\theta_r - g\omega_s t) = F_{r,1} \cos\left(p\theta' - p\frac{C_{cst}}{4\pi^2 J f_c^2} \cos(2\pi f_c t) - p\omega_{r0}t - g\omega_s t + \varphi\right) \quad [11] \quad (IV.13)$$

$\omega_{r0}t$ représente la vitesse mécanique angulaire du rotor, définie par :

$$\omega_{r0} = \frac{1}{p}(1 - g)\omega_s \quad (IV.14)$$

Dans le cas d'un couple oscillant, θ_r sera remplacé par $\theta_r(t)$. la FMM rotorique devient :

$$F_R(t, \theta) = F_R e^{j(2\pi f_s t + \frac{pC_{cst}}{J} \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t \Delta C(u) du dv - p\theta)} \quad [11] \quad (IV.15)$$

Où F_R est un nombre complexe constant et J est l'inertie totale du système mécanique formé par l'arbre de l'entraînement.

4. Effets et Signature du Balourd dans les courants triphasés

L'équation (IV.15) montre clairement l'effet des variations de couple mécanique, qui modulent en phase de la FMM rotorique. En effet, on obtient une exponentielle complexe de fréquence instantanée variable, ces variations étant engendrées par les variations de couple $\Delta C(t)$ définies en (IV.8), et inversement proportionnelles à l'inertie mécanique J du système.

La FMM totale $F_{tot}(t, \theta)$ présente dans la machine est définie comme la somme des deux grandeurs données par les équations (IV.6) et (IV.15) : [8,11]

$$F_{tot}(t, \theta) = F_s e^{j(2\pi f_s t - p\theta)} + F_R e^{j(2\pi f_s t + \frac{pC_{cst}}{J} \int_{t_0}^t \int_{\theta_0}^{\theta} \Delta C(u) du dv - p\theta)} \quad (IV.16)$$

VI.5.1 Effet sur le courant statorique

Le champ magnétique radial $B(t, \theta)$ dans l'entrefer de la machine s'exprime comme le produit de la FMM totale donnée en (IV.12) par la perméance magnétique d'entrefer $\Lambda(t, \theta)$.

Si l'effet d'encoches et la saturation de fer sont négligés, la perméabilité de l'entrefer est supposée constante. Par conséquent, la densité de flux dans l'entrefer prend l'expression suivante : [8,11]

$$B(t, \theta) = F_s \cdot \Lambda \cdot e^{j(2\pi f_s t - p\theta)} + F_R \cdot \Lambda \cdot e^{j(2\pi f_s t + \frac{pC_{cst}}{J} \int_{t_0}^t \int_{\theta_0}^{\theta} \Delta C(u) du dv - p\theta)} \quad (IV.17)$$

Le fondamental de cette onde est donc une somme de deux composantes : La composante résultante de la FMM rotorique est modulée en phase à la fréquence caractéristique du défaut, la composante de la FMM statorique est inchangée. La modulation de la FMM se traduit donc de la même façon sur l'induction dans l'entrefer.

Le flux magnétique est défini par l'intégrale de l'induction magnétique B sur une surface A . On obtient le flux statorique par intégration du champ magnétique total sur la position angulaire, où les bornes d'intégration dépendent de la structure des enroulements de la machine. Cette intégration n'agissant pas sur la variable temporelle, le flux va conserver les mêmes caractéristiques fréquentielles que le champ magnétique précédent, et seules les amplitudes des différentes composantes seront modifiées.

Le vecteur d'espace courant statorique $i(t)$ est finalement obtenu en utilisant l'équation électrique de la machine :

$$i(t) = \frac{V(t)}{R_s} - \frac{1}{R_s} \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (IV.18)$$

4. Effets et Signature du Balourd dans les courants triphasés

Où $v(t)$ est le vecteur d'espace des tensions d'alimentation et R_s est la résistance statorique de la machine. En reportant l'équation (IV.16) dans (IV.17), on obtient l'expression suivante pour $i(t)$: [8,11]

$$i(t) = I_s e^{j2\pi f_s t} + I_R^\phi e^{j\left(2\pi f_s t + \frac{pC_{cst}}{J} \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t \Delta C(u) du dv - p\theta\right)} \quad (IV.19)$$

I_s : Est l'amplitude du courant statorique à la fréquence fondamentale

I_R^ϕ : Est l'amplitude du courant statorique induit par le champ magnétique du rotor.

ϕ : déphasage des courants rotoriques par rapport aux courants statoriques.

L'équation (IV.18) correspond aux variations de couple dues à un simple défaut mécanique tel qu'un balourd mécanique ou un problème de couplage mécanique.

Le terme $i(t)$ résulte du FMM statorique I_s et n'est pas modulé. De plus, le terme $I_R^\phi(t)$, qui est une conséquence directe du FMM rotorique, indique une modulation de phase due aux oscillations de couple de charge considérées.

Le vecteur d'espace courant $i(t)$ est donc formé par la somme de deux exponentielles complexes d'origine physique et de caractéristiques différentes. La première exponentielle complexe est due à l'alimentation de la machine. Elle a une amplitude I_s très importante, une fréquence f_s , et n'est modulée ni en amplitude ni en phase. Elle ne porte donc aucune information sur la présence éventuelle d'un défaut mécanique. La seconde exponentielle complexe est induite par le flux généré par le stator. Son amplitude I_R^ϕ est bien moins importante que la précédente, et sa fréquence est également de f_s . Cette exponentielle complexe est modulée en phase uniquement en cas des variations du couple mécanique, et est donc sensible à la présence de ces variations. La conclusion de cette étude qualitative est que le déséquilibre de charge provoque des modulations de phase dans le courant de stator de vecteur spatial correspondant.

VI.6 Conclusion

Le chapitre 4 examine la détection des défauts mécaniques à l'aide de quantités électriques triphasées et donne le développement théorique de la méthode proposée [11]. Il divise les défauts mécaniques en deux catégories: les défauts qui induisent des modulations de fréquence et les défauts qui induisent des modulations d'amplitude et de fréquence. Une approche différente est proposée pour chacun des deux cas, en tenant compte des particularités de chaque situation. Cependant, les deux approches sont basées sur l'utilisation de CS à séquence positive uniquement, une décision basée sur l'étude théorique du contenu des CS.

*Chapitre V : Détection de défauts
mécaniques - résultats
expérimentaux*

V.1 Introduction

Ce chapitre décrit l'aspect expérimental qui permet de valider le modèle proposée précédemment pour la surveillance et la détection des défauts de la machine à induction. Il présente les résultats expérimentaux du défaut de balourd. L'efficacité des approches d'analyse et de détection des défauts proposées est évaluée sur des mesures expérimentales des courants statoriques. Pour les techniques d'extraction d'entités, deux catégories principales sont considérées : l'analyse spectrale (DSP) et l'ondelette par paquet d'ondelette (DPO). Les performances du critère de gravité du défaut sont également évaluées dans ce chapitre par analyse d'ondelette par parquet d'ondelette.

V.2 DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI



Figure V.1 Dispositif de base PT500

V.2.1 Description de l'appareil

Le système de diagnostic des machines GUNT PT_500 peut être utilisé pour simuler certains types des défauts et étudier ses effets sur le spectre des courants. Les composants clés de l'unité de base sont les éléments mécaniques (embrayage, paliers et arbre avec rotors), le moteur d'entraînement à vitesse variable via convertisseur de fréquence et tachygénérateur, et l'unité d'affichage et de commande avec affichage numérique de la puissance et de la vitesse.

La plaque de base du moteur est montée sur un chariot, ce qui permet d'aligner le moteur. La grande plaque de base en aluminium avec fentes de positionnement permet un assemblage rapide, flexible et précis des composants du système. Un couvercle de protection transparent offre la sécurité nécessaire pendant le fonctionnement et permet une vision claire du système pendant les expériences.

A. Groupe moteur

Le banc d'essai est composé d'un moteur triphasé avec encodeur, il est monté sur la deuxième extrémité de l'arbre, il est monté sur une plaque de base dispositif d'alignement qui permet d'aligner horizontalement l'axe du moteur.

B. Appareil de commande

La commande du moteur s'effectue à l'aide de l'appareil de commande qui renferme un convertisseur de fréquence destiné à régler progressivement la vitesse de rotation. L'appareil de commande contient l'indicateur de vitesse de rotation et un indicateur pour la puissance absorbée du moteur.

Afin de pouvoir simuler des vibrations avec l'appareil de base et de réaliser des essais en rapport avec le thème " équilibrage et alignement", les pièces suivantes figurent dans les éléments du banc d'essai :

- 1 accouplement élastique à griffes,
- 1 accouplement élastique à bras,
- 1 arbre long,
- 1 arbre court,
- 2 supports de palier couplets avec palier,
- 2 disques de masse avec kits de serrage,
- Des petites pièces sous forme de pièces de masse pour l'équilibrage.

Les acquisitions sont faites à l'aide d'une carte qui nous a permet de relier le banc d'essai avec l'ordinateur d'une part, et prendre les mesures d'autre part pour visualiser les signaux acquis.

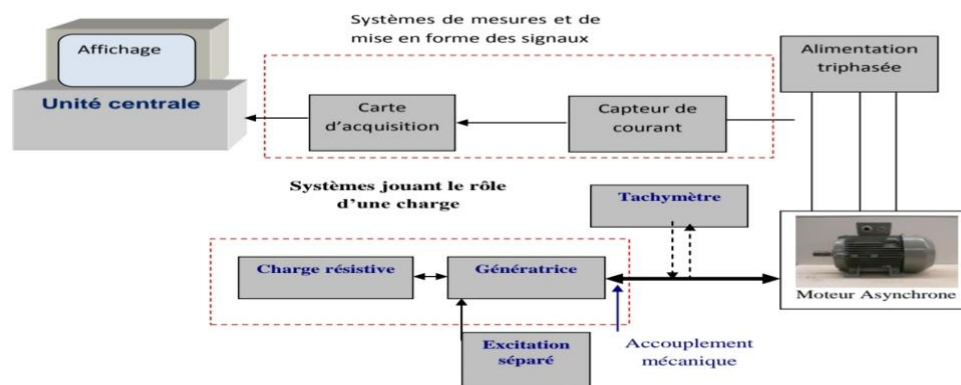


Figure V.2 Schéma bloc du principe de mesure du courant

V.2.2 Système d'acquisition DSPACE

Les systèmes dSPACE sont utilisés partout où des systèmes de contrôle mécatroniques rapides sont conçus et testés. Ils permettent d'optimiser un processus de développement notamment le développement permanent d'unités de contrôle en ingénierie automobile. Les produits de dSPACE sont utilisés dans diverses applications. Dans le contexte du contrôle des machines, l'unité de calcul doit être capable d'effectuer certains calculs à des fréquences assez élevées. De plus, sa structure doit permettre d'exécuter plusieurs tâches à des fréquences de récurrences différentes. En outre, dans le domaine de la recherche il est souvent nécessaire de pouvoir tester différents algorithmes de commandes en un temps de développement minimal, donc avec un environnement adapté aux outils que nous utilisons déjà, en particulier Matlab/Simulink. Ces considérations nous ont amené à retenir la solution dSPACE et le jeu de logiciel temps réel pour Simulink qui permet d'exécuter un bloc en temps réel. Cette unité de commande (PC) peut être utilisée sur tout banc dont le convertisseur est équipé de la carte de synchronisation. Toutefois, il nous a fallu réaliser quelques adaptations logicielles et matérielles avant d'arriver à ces résultats.

Le système dSPACE est composé de trois composants: la carte contrôleur DS1104 elle-même, un panneau de dérivation permettant de connecter les lignes de signaux à la carte contrôleur DS1104 et des outils logiciels permettant de faire fonctionner la carte DS1104 dans l'environnement de schéma de principe SIMULINK. Un schéma fonctionnel de la carte contrôleur DS1104 est illustré à la Figure V.3.

Le DS1104 possède huit convertisseurs N / A 16 bits, chacun avec une plage de sortie de ± 10 V, ainsi qu'il contient huit canaux A / N. Les quatre premiers canaux partagent un seul convertisseur analogique-numérique 16 bits via un multiplexeur analogique. Les quatre canaux restants disposent chacun d'un convertisseur A / N 12 bits dédié, permettant l'échantillonnage simultané de quatre signaux d'entrée analogiques. La plage d'entrée pour les huit canaux est de ± 10 V. Elle se compose également d'une E / S numérique parallèle à 20 bits sélectionnable à un bit pour l'entrée ou la sortie, de deux ports PWM et de deux canaux de codeur incrémental permettant de capter le signal du codeur du récepteur moteur pour mesurer la vitesse du rotor. Les périphériques externes comprennent toutes les interfaces et le matériel de mesure nécessaires pour contrôler les entraînements à moteur. Ils sont connectés à la carte contrôleur de R & D DS1104 via le panneau de connexion. La Figure V.3 montre le panneau de dérivation pour la carte contrôleur de dSPACE DS1104.

5. Détection de défauts mécaniques - résultats expérimentaux



(a)

(b)



(c)



(d)

Figure V.3. Constitution du Dspace Acquisition

a) Illustration de la carte DS1104 b) Dongle

c) Illustration du Panneau de contrôle DS1104 d) capteur de courant a effet hall

Programmation temps réel de la carte DS1104

La programmation temps réel de la carte DS1104 nécessite une bonne connaissance de l'environnement de contrôle de la carte DSPACE.

Pour le prototypage de fonctions sous MATLAB, l'utilisateur crée des modèles de commande sous Simulink. Grâce à la fonction BUILD MODEL les modèles sont traduits

5. Détection de défauts mécaniques - résultats expérimentaux

depuis l'extension *.MDL vers les codes en *.C et les bibliothèques #include en *.H tout en utilisant la boîte à outils REAL TIME WORKSHOP (RTI) de SIMULINK. L'autre avantage est d'implémenter un grand nombre de fonctions et d'outils en un temps minimum, ce qui est plus pratique que la programmation manuelle en langage C. En tapant rti1104 dans l'interpréteur de MATLAB, la bibliothèque pour la création de modèles sous SIMULINK est obtenue.

Il existe différentes bibliothèques et chaque bloc représente une série de composants contenant une variété de programmes MATLAB qui, après BUILD seront assemblés pour être ensuite compilés et exécutés puis chargés et liés au processeur temps- réel de la carte DS1104.

Après avoir lancé l'acquisition sous le logiciel Controldesk, et activer le mode Animation, chaque variable est associée à sa fenêtre d'utilisation tel que le plotter de visualisation (bouton de réglage). Cela nous permettra de contrôler (piloter) facilement la simulation pendant l'acquisition du signal en temps-réel et sans avoir à modifier la valeur des variables associées.

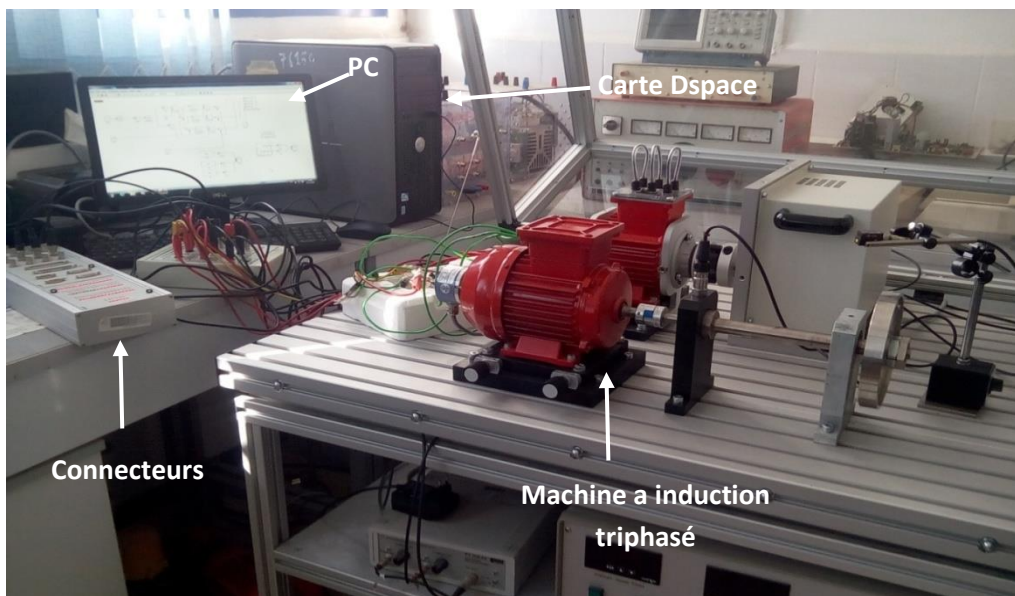


Figure V.4 Dispositif expérimental (composé d'une machine à induction de 0,37 kW alimentée par un onduleur et d'un système d'acquisition de données Dspace 1104)

Les tests ont été effectués dans deux cas: pour un moteur sain ; et en présence d'un déséquilibre de charge où un poids m a été installé à une distance de 60 mm du centre du disque. Tests effectués en condition défectueuse sous deux niveaux de déséquilibre de charge différents (2,5 g et 4 g), pour montrer les performances des techniques proposées.

5. Détection de défauts mécaniques - résultats expérimentaux

Tous les signaux obtenus sont analysés par la densité spectral de puissance (DSP) et la décomposition par paquet d'ondelette (DPO) sous des formes monophasée et vecteur d'espace courant (VEC), ce qui conduit à quatre ensembles de spectres pour comparaison:

Deux pour la machine saine:

- Le spectre DSP des signaux de courant de phase et de vecteur d'espace courant.
- Analyse de vecteurs propres de la DPO d'un vecteur de courant de phase et d'espace courant.

En outre, deux autres ensembles uniquement pour le vecteur d'espace courant:

- La DSP du vecteur d'espace dans des conditions saines et défectueuses des deux niveaux de déséquilibre de charge.
- Le spectre DPO du vecteur d'espace dans des conditions saines et défectueuses en augmentant les niveaux de déséquilibre de charge.

V.3 Application de la densité spectrale de puissance

Dans ce paragraphe, l'analyse spectrale est appliquée sur les courants statoriques sous deux formes différentes, le monophasé et le vecteur d'espace courant. Les DSP du courant monophasé dans un état sain et avec un déséquilibre de charge pour les deux niveaux 2,5 g et 4 g sont présentés dans les figures V.5 et V.6 respectivement, tandis que les figures V.7 et V.8 présentent les spectres DSP du VEC dans un état sain et dans le cas de 2,5 g et déséquilibre de charge 4g respectivement.

Le premier point abordé dans cette section concerne la comparaison entre ces spectres. D'après les figures V.5 et V.6, nous pouvons remarquer l'apparition de composants supplémentaires à 0 Hz et 156 Hz, ce qui est égal à $f_{def} = f_s \pm n f_r$ où $n = 1, 2$, ce qui est cohérent avec d'autres études. Malheureusement, d'une part, ces composants supplémentaires ne se distinguent qu'à peine des conditions saines et défectueuses avec deux niveaux de déséquilibre de charge. En remarquant les figures V.5 et V.6; il est difficile de distinguer les différences entre les états sains et défectueux (seulement 5 dB de différence entre l'état sain et un déséquilibre de charge de 2,5 g et 6 dB pour un déséquilibre de charge de 4 g). En revanche, il n'y a pas de différence notable entre les deux niveaux de déséquilibre de charge (seulement 1 dB de différence entre 2,5g et 4g de déséquilibres de charge) qui; rend la discrimination entre eux très ambiguë.

5. Détection de défauts mécaniques - résultats expérimentaux

Ce n'est pas le cas lors de l'analyse des courants statoriques à travers le vecteur d'espace. En effet, une augmentation significative des composants à 0 Hz et 104 Hz entre un moteur sain et une machine défectueuse qui présente un déséquilibre de charge de 2,5 g est clair (différence d'environ 10 dB à 0 Hz) et moins remarquable sur le composant 156 Hz (5 dB). En présence d'un déséquilibre de charge de 4 g, les composants supplémentaires se distinguent davantage à 0 Hz et 156 Hz (une augmentation d'environ 18 dB sur la composante 0 Hz et 10 dB sur la composante 156 Hz), ce qui équivaut à $f_{bal} = f_s \pm n f_r$ avec $n = 1,2$. En plus de l'existence d'une différence remarquable entre les deux niveaux de déséquilibre de charge (différence d'environ 10 dB entre 2,5 g et 4 g sur 0 Hz, et 5 dB sur 156 Hz).

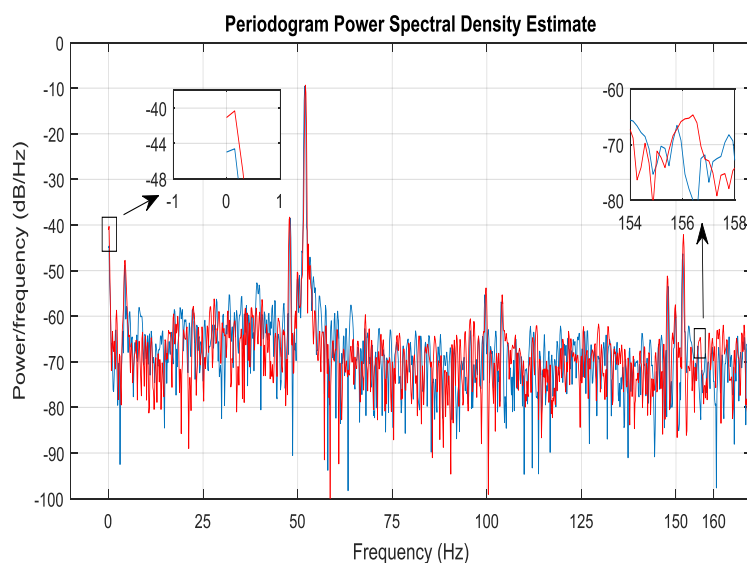


Figure V.5 Spectre DSP d'un courant monophasé dans un état sain et avec un déséquilibre de charge de 2,5 g

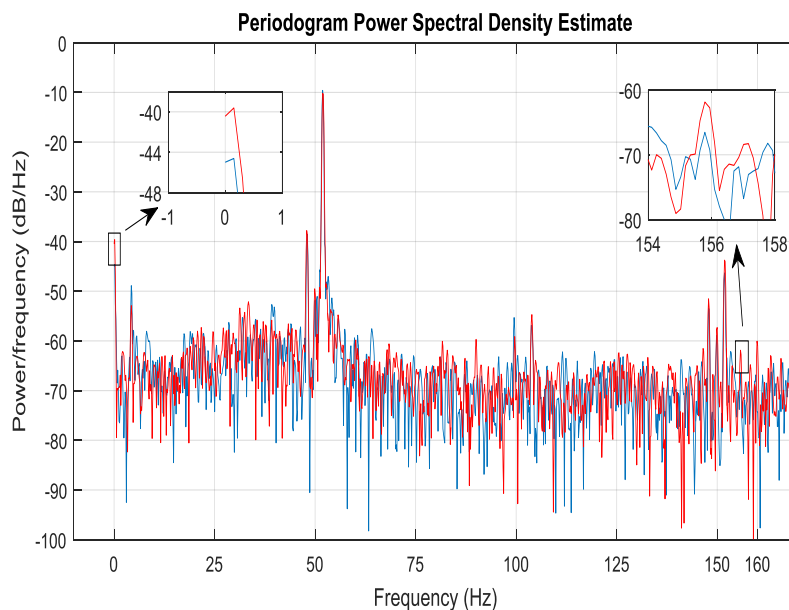


Figure V.6 Spectre DSP d'un courant monophasé dans un état sain et avec un déséquilibre de charge de 4 g

5. Détection de défauts mécaniques - résultats expérimentaux

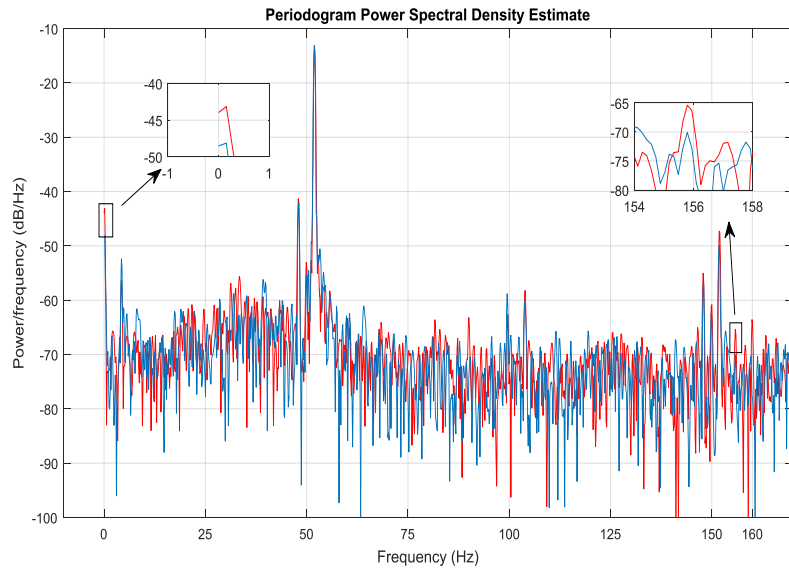


Figure V.7 Analyse spectrale du vecteur d'espace courant dans un état sain et avec un déséquilibre de charge de 2,5 g

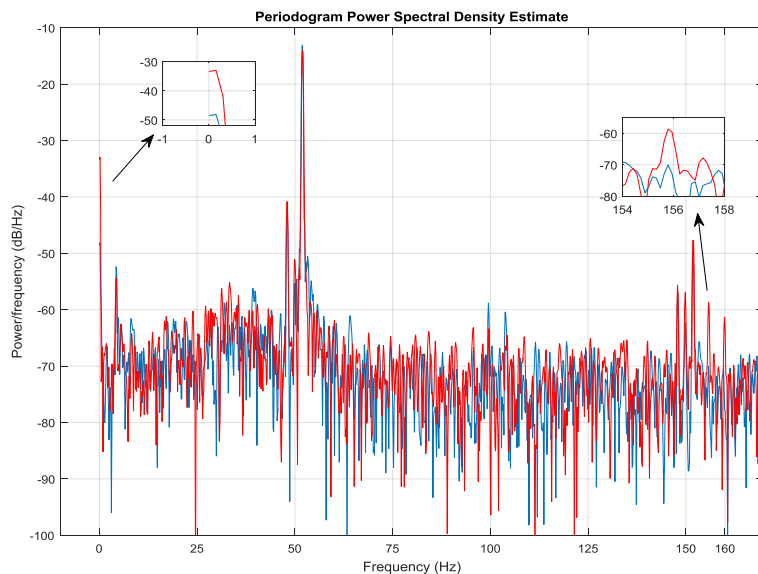


Figure V.8 PSD Analyse spectrale du vecteur d'espace courant dans un état sain et avec un déséquilibre de charge de 4 g

V.4 Application de décomposition par paquet d'ondelette

La deuxième approche est focalisée sur l'analyse du courant statorique monophasé pour un moteur sain et défectueux tel que présenté dans les figures V.9 et V.10, ainsi que sur le VEC dans des conditions saines et défectueuses (figures V.11 et V.12) par PDO qui calcule l'énergie dans ces signaux.

La décomposition à plusieurs niveaux du courant statorique est effectuée à l'aide de l'ondelette mère daubechies44 (db44). Il existe plusieurs ondelettes mères utilisées pour calculer

5. Détection de défauts mécaniques - résultats expérimentaux

la transformée en ondelettes des signaux analysés. Chacun d'eux a un champ d'application défini. Daubechies44 (db44) est souvent utilisé comme ondelette mère car cette fonction minimisera le chevauchement entre les bandes de fréquences qui ne peut être évité. La relation suivante donne le niveau de décomposition nécessaire:

$$N = \text{int} \left(\frac{\log(f_e/f_s)}{\log(2)} \right) + 2 \quad (\text{V.1})$$

f_s : Fréquence fondamentale de la machine $f_s = 52$; f_e : Fréquence d'échantillonnage $f_e = 5 * 10^3$.

$$N = \text{int} \left(\frac{\log(5000/52)}{\log(2)} \right) + 2 = 8 \text{ Niveaux} \quad (\text{V.2})$$

En observant les figures V.9 et V.10, une augmentation de la quantité d'énergie est visible entre l'état sain et défectueux pour un signal de courant monophasé, notamment au 8^{ème} niveau démontrant donc la présence d'un défaut. Cette augmentation diffère selon le poids ajouté sur le disque et augmente en fonction de la gravité du défaut. Cependant, la même observation pour l'analyse spectrale est notée, il n'y a pas de différence significative entre des conditions saines et défectueuses.

D'après les figures V.11 et V.12 qui représentent le VEC d'un moteur sain et défectueux pour des niveaux de balourd de 2,5 g et 4 g respectivement. On peut observer la même chose mais la différence entre des conditions saines et défectueuses est plus visible, cela est justifié par le fait que VEC élimine les composants supplémentaires qui créent plus d'énergie dans les bandes de fréquences et donc la différence entre moteur sain et défectueux est réduite.

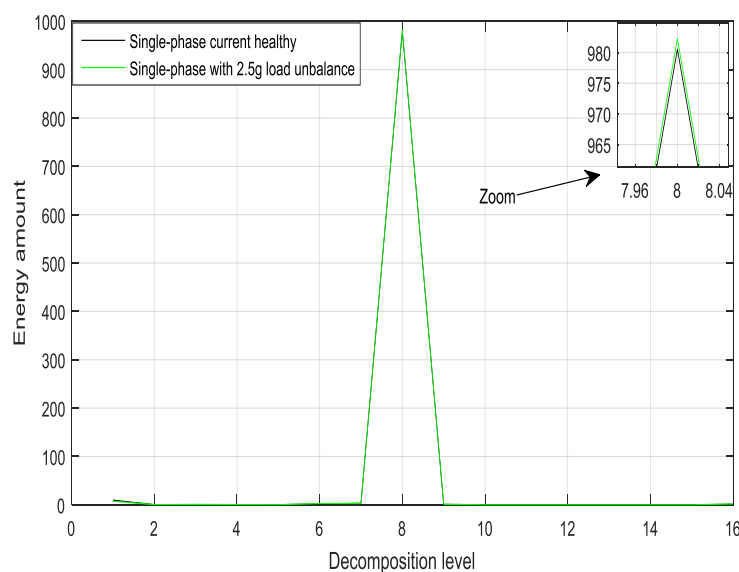


Figure V.9. Énergie de décomposition du courant monophasé dans un état sain et avec un déséquilibre de charge de 2,5 g

5. Détection de défauts mécaniques - résultats expérimentaux

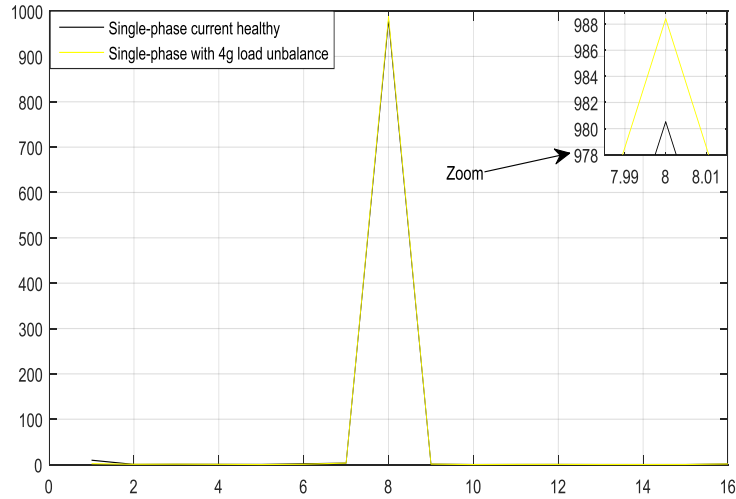


Figure V.10. Énergie de décomposition du courant monophasé dans un état sain et avec un déséquilibre de charge de 4 g

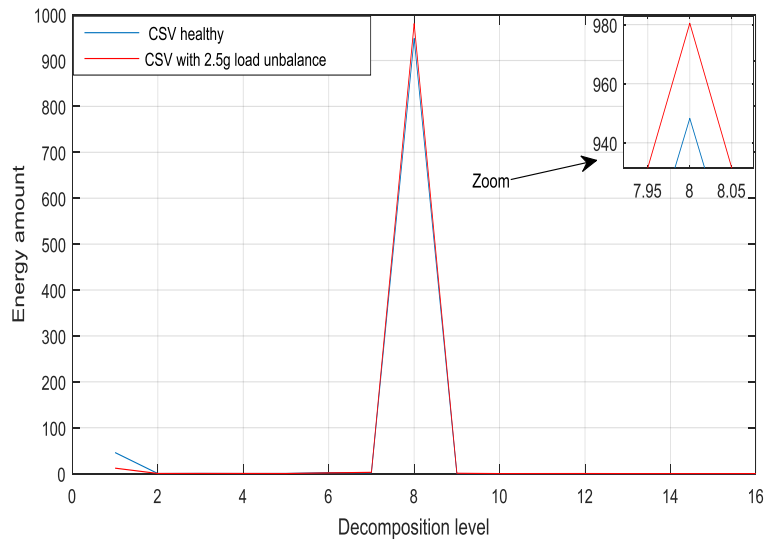


Figure V.11 Énergie de décomposition du VEC pour un état sain et pour un déséquilibre de charge de 2.5 g

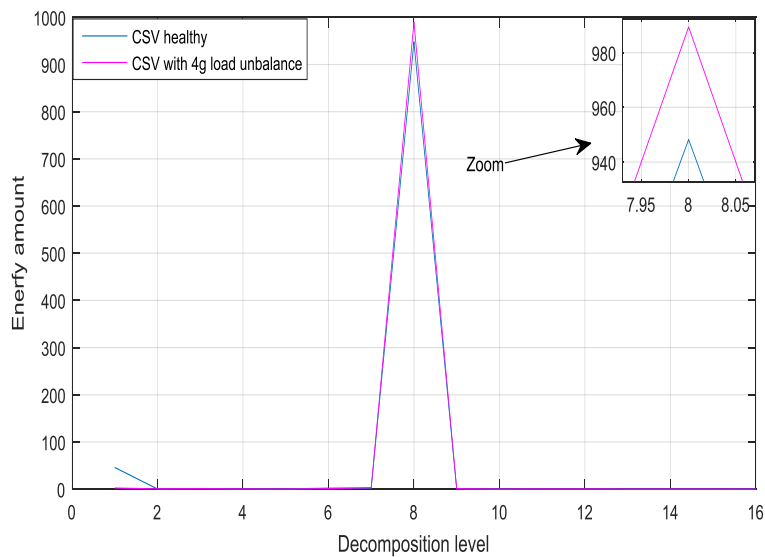


Figure V.12 Énergie de décomposition du VEC pour un état sain et pour un déséquilibre de charge de 4 g

5. Détection de défauts mécaniques - résultats expérimentaux

Le tableau V.1 résume le calcul d'énergie de 8 premières bandes de courant monophasé par paquet d'ondelettes pour trois conditions (sain, déséquilibre de charge de 2,5 g et 4 g).

Node Level	Énergie du courant statorique monophasé			Énergie du vecteur d'espace courant		
	Monophasé sain	Signal monophasé balourd de 2,5 g	Signal monophasé balourd de 4 g	VEC sain	VEC pour un balourd de 2.5 g	VEC pour un balourd de 4 g
(1,9)	9.65	7.57	1.97	45.91	11.94	2.28
(2,9)	0.31	0.4	0.64	0.21	0.37	0.56
(3,9)	0.61	0.66	0.83	0.46	0.42	0.91
(4,9)	0.47	0.36	0.54	0.23	0.38	0.4
(5,9)	0.3	0.26	0.1	0.35	0.26	0.22
(6,9)	1.72	2.47	0.66	2	1.65	0.96
(7,9)	3.18	2.78	3.32	1.83	2.84	3.07
(8,9)	980.5	982.2	988.4	948.2	980.4	989.4
(9,9)	0.89	1.04	1.01	0.2	0.76	0.81
(10,9)	0.09	0.1	0.01	0.03	0.11	0.11
(11,9)	0.2	0.09	0.36	0.09	0.17	0.36
(12,9)	0.25	0.09	0.41	0.08	0.23	0.41
(13,9)	0.1	0.08	0.13	0.07	0.1	0.12
(14,9)	0.08	0.11	0.09	0.1	0.09	0.12
(15,9)	0.09	0.07	0.12	0.04	0.08	0.11

Tableau V.1. Énergie de chaque 9ème échelle dans les cas sains et défectueux pour signal monophasé et le vecteur d'espace courant

Selon les résultats du tableau V.1, les niveaux d'énergie dans la fréquence de la 8ème bande montrent la différence entre le VEC (dans les cas sains et défectueux) et le courant monophasé. Les valeurs du tableau confirment que le traitement des trois courants statoriques par le biais de la transformation vectorielle spatiale améliore les capacités de détection du déséquilibre de charge, ce qui peut donc faciliter la distinction entre les états sains et défectueux et, d'autre part, améliore la discrimination entre les différents niveaux de gravité des défauts. . Cette amélioration peut faciliter la classification en cas d'utilisation de classificateurs d'intelligence artificielle.

V.5 Implantation sur le 2ème moteur

Afin de vérifier l'application et la validation de la méthode proposée, un autre moteur à induction est utilisé dans la même configuration. Le moteur est Lukas Nuelle. Possède les

5. Détection de défauts mécaniques - résultats expérimentaux

paramètres suivants: 300 W; 2 paires de pôles, 230 V / 400 V; 1,7 A / 1 A. La fréquence de rotation est $f_r = f_s / 2$ ce qui signifie $f_r = 25$ Hz.

Les courants statoriques sont acquis pour 3 conditions : machine saine, déséquilibre de charge 2g et déséquilibre de charge 12g par le système d'acquisition de données Dspace 1104 avec une fréquence d'échantillonnage de 5 kHz.

A partir des figures 13-16 qui présentent l'analyse spectrale, on peut remarquer l'apparition de composants supplémentaires à 25Hz et 75 Hz qui correspond à $f_{def} = f_s \pm f_r$. De plus, il est observé que le traitement des signaux de courants statoriques par le VEC a conduit à des résultats plus significatifs par rapport à l'analyse monophasée.

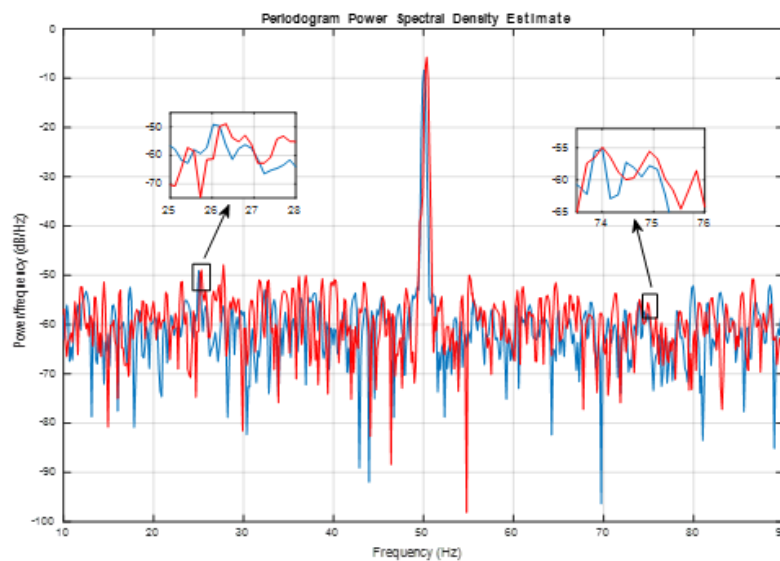


Fig V.13 Spectre DSP d'un courant monophasé dans un état sain et avec un balourd de 2,5 g

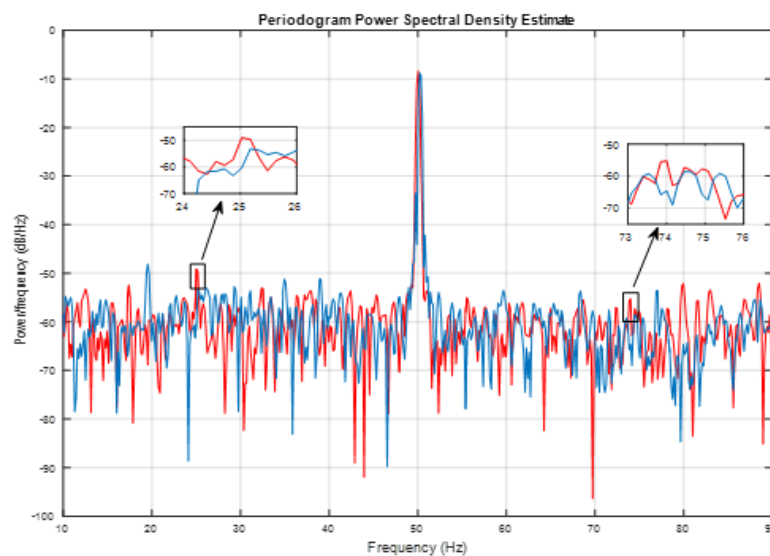


Fig V.14 Spectre DSP d'un courant monophasé dans un état sain et avec un balourd de 12 g

5. Détection de défauts mécaniques - résultats expérimentaux

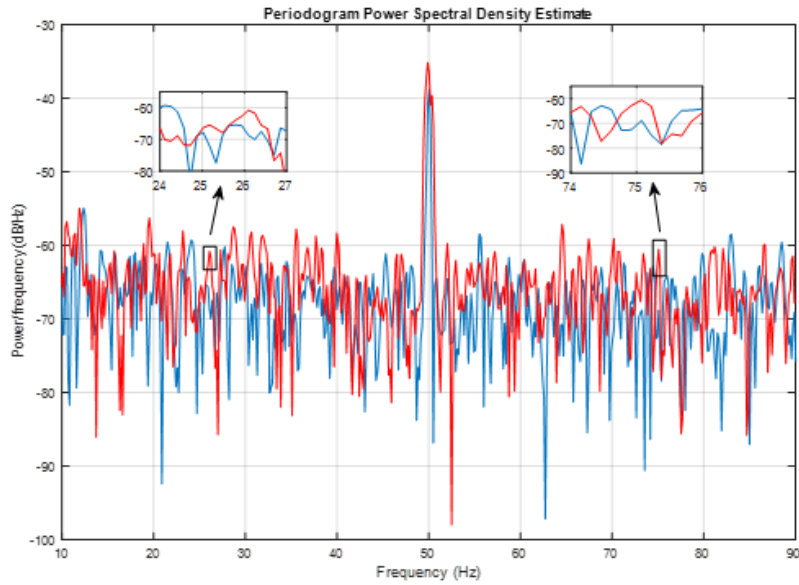


Fig V.15 Analyse spectrale du VEC dans un état sain et avec un balourd de 2,5 g

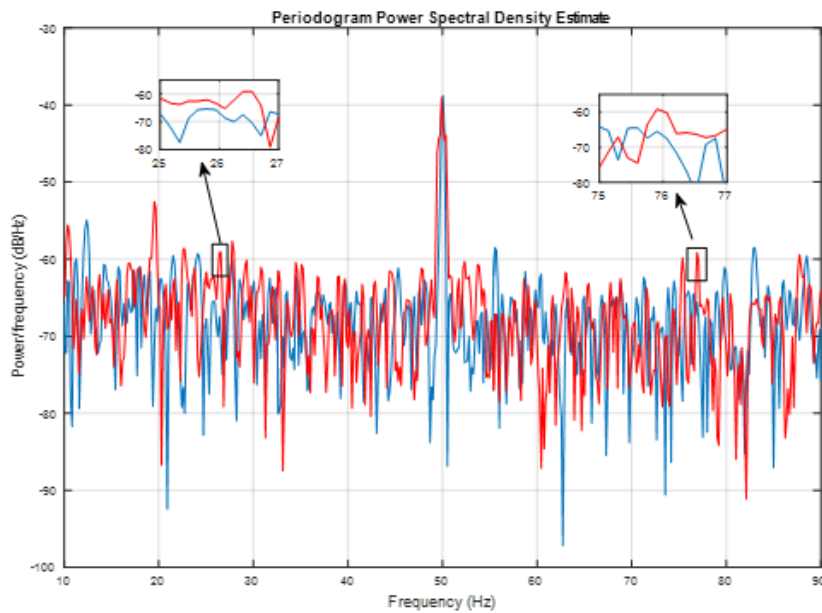


Fig V.16 Analyse spectrale du VEC dans un état sain et avec un balourd de 12 g

Pour l'analyse en ondelettes, les mêmes résultats peuvent être constatés. En effet ; on constate une augmentation de la quantité d'énergie entre les cas sains et défectueux. Toutefois ; l'augmentation d'énergie est plus significative et se distingue dans le cas du vecteur d'espace courant.

5. Détection de défauts mécaniques - résultats expérimentaux

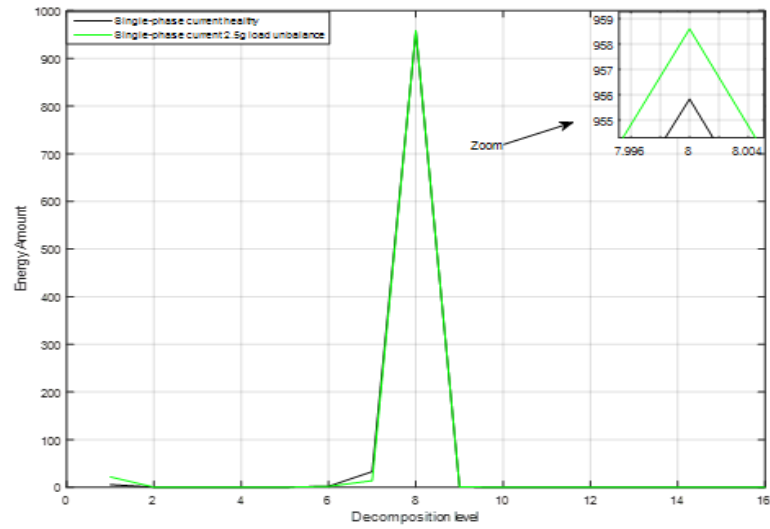


Fig V.17 Énergie de décomposition du courant monophasé dans un état sain et avec un balourd de 2,5 g

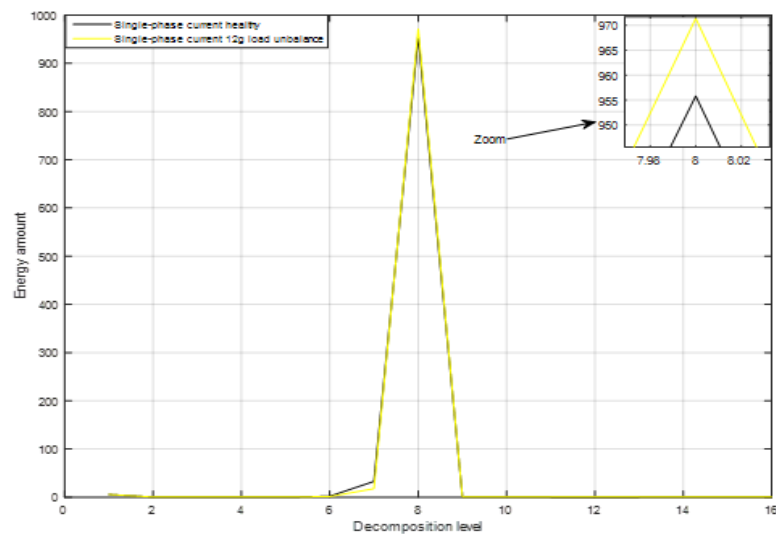


Fig V.18 Énergie de décomposition du courant monophasé dans un état sain et avec un balourd de 12 g

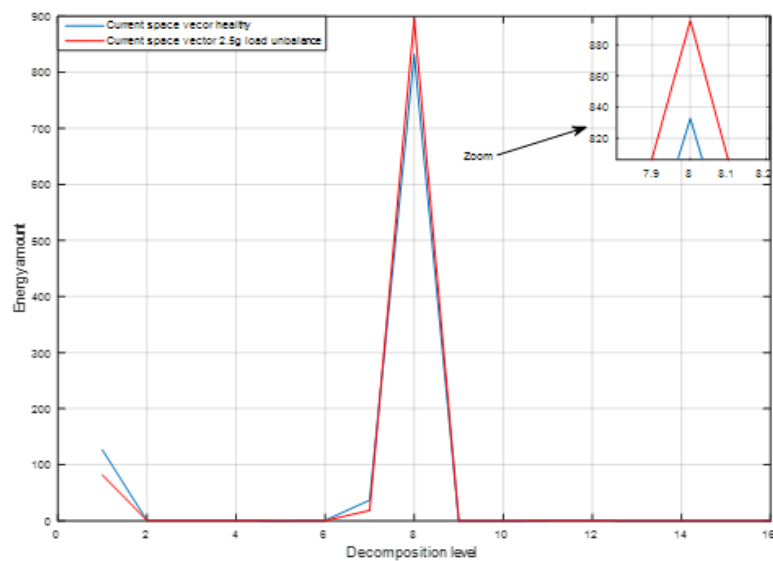


Fig V.19 Énergie de décomposition du VEC pour un état sain et pour un balourd de 2.5 g

5. Détection de défauts mécaniques - résultats expérimentaux

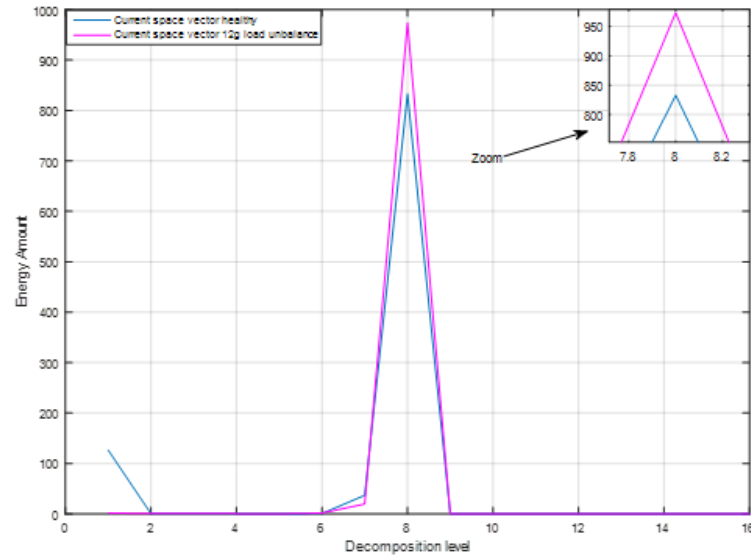


Fig V.20 Énergie de décomposition du VEC pour un état sain et pour un balourd de 12 g

Niveau du nœud	Énergie du courant statorique monophasé			Énergie du vecteur d'espace courant		
	Monophasé sain	Signal monophasé pour balourd de 2,5 g	Signal monophasé pour balourd de 12 g	VEC sain	Signal du VEC pour balourd de 2,5 g	Signal du VEC pour balourd de 12 g
(1,9)	5.64	21.75	5.66	126.4	81.8	1.84
(2,9)	0.37	0.36	0.39	0.57	0.62	0.47
(3,9)	0.67	0.46	0.45	0.58	0.8	0.69
(4,9)	0.38	0.44	0.47	0.47	0.6	0.64
(5,9)	0.41	0.28	0.34	0.13	0.14	0.22
(6,9)	2.04	1.91	1.29	0.73	0.26	1.74
(7,9)	32.85	18.87	17.6	36.83	18.51	19.64
(8,9)	955.8	958.6	971.4	832.8	895.6	989.4
(9,9)	0.79	1	1.01	0.33	0.09	0.31
(10,9)	0.17	0.17	0.18	0.06	0.38	0.08
(11,9)	0.2	0.24	0.2	0.32	0.43	0.15
(12,9)	0.12	0.21	0.23	0.35	0.15	0.17
(13,9)	0.24	0.18	0.15	0.12	0.1	0.11
(14,9)	0.18	0.1	0.26	0.1	0.1	0.12
(15,9)	0.2	0.15	0.17	0.11	0.12	0.07

Tableau V.2. Énergie de chaque 9^{ème} échelle dans les cas sains et défectueux pour signal monophasé et le vecteur d'espace courant pour le 2^{ème} moteur.

5. Détection de défauts mécaniques - résultats expérimentaux

Les résultats du tableau confirment également les résultats précédents qui avaient été atteints dans le cas du premier moteur.

Enfin, on peut conclure que les mêmes résultats sont obtenus pour le deuxième moteur ce qui confirme l'applicabilité de cette technique pour l'amélioration de la détection de balourd. Pour résumer, à partir des résultats obtenus, les conclusions suivantes sont tirées:

- L'analyse du vecteur d'espace courant conduit aux mêmes résultats que l'analyse monophasée (les bandes latérales sont présentes aux mêmes fréquences dans le spectre DSP monophasé et vecteur d'espace courant).
- Le vecteur d'espace courant augmente la résolution du signal en éliminant les composants supplémentaires contenus dans le signal monophasé.

V.6 Conclusion

Dans ce chapitre, la présence d'un déséquilibre de charge dans le moteur à induction est étudiée à travers une surveillance des courants statoriques. Le but de cette étude est l'application du vecteur d'espace courant et l'extraction de ses avantages par rapport à l'analyse monophasée. De nombreuses expérimentations ont été menées sur le dispositif expérimental dans les cas sains et défectueux pour atteindre cet objectif. L'ensemble de données résultant a été analysé par deux méthodes de traitement du signal, la densité spectrale de puissance et la décomposition des paquets d'ondelettes.

Les résultats obtenus ont montré que; le traitement des informations fournies par les signaux de la machine à induction via le vecteur d'espace courant plutôt qu'un courant monophasé présente plusieurs avantages importants: Le traitement de toutes les informations fournies par le système triphasé. L'utilisation du vecteur d'espace courant conduit aux mêmes résultats que l'analyse monophasée en termes de détection de balourd, mais avec plus de précision. L'application de la décomposition des paquets d'ondelettes avec la transformation de vecteur d'espace offre une analyse très délicate des signaux de la machine à induction, ce qui permet donc de construire un outil très efficace pour diagnostiquer une machine asynchrone.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les vastes applications du moteur à induction dans les applications industrielles ont exigé la nécessité d'une surveillance continue de leur état. Le diagnostic des défauts basé sur les courants statoriques est au centre de cette recherche. Le but de cette recherche était de faire progresser le domaine de la surveillance et du diagnostic des défauts des moteurs à induction et de proposer une méthode pour combiner les signaux électriques triphasés. La méthode proposée repose sur l'utilisation de la transformation triphasée et des composants symétriques instantanés (CSI) résultants.

Le premier chapitre présente une problématique avec une perspective sur la surveillance des machines électriques et justifie la motivation du travail de recherche.

Le deuxième chapitre donne le contexte théorique de la thèse. Une synthèse détaillée de la littérature est présentée pour résumer les techniques de pointe liées aux méthodes proposées dans cette recherche. La première partie de la littérature fournit les types fondamentaux des défauts qui affectent le moteur à induction. Deuxièmement, elle donne un aperçu des approches actuelles pour le diagnostic des défauts du moteur à induction et plus particulièrement la signature des défauts dans les courants électriques.

Après avoir présenté, dans le chapitre 2, un état de l'art sur les défauts et les approches actuelles pour le diagnostic de ces défauts. Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une étude de l'état de l'art portant sur les différentes méthodes de traitement du signal. Nous avons balayé quelques méthodes utilisées comme des outils de base pour le diagnostic et la détection des défauts. Dans la littérature, on trouve plusieurs applications et méthodes sur le thème de l'ondelette dans le but de résoudre les problèmes de diagnostic des défauts des machines à induction.

Le chapitre 4 présente l'étude de l'effet de la transformation (VEC) vecteur espace courant. Sur la base d'un modèle adopté, l'effet de l'application de la transformation triphasée est étudié. Ce chapitre s'est concentré sur l'étude d'une modélisation analytique du courant statorique en présence de défaillances mécaniques. Une conséquence des défauts mécaniques a été prise en compte: les oscillations périodiques de couple et de vitesse de charge. En utilisant l'approche de la force magnétomotrice et de l'onde de perméance, un modèle simplifié

représentant l'effet de balourd est utilisé pour montrer des modulations de la phase fondamentale à la fréquence caractéristique de défaut. De plus, le résultat signifie qu'un diagnostic de défaut est possible si la méthode d'analyse peut distinguer l'amplitude de la modulation de phase.

Au chapitre 5, la détection de balourd est mise en évidence à l'aide de signaux expérimentaux acquis sur un banc d'essai ou deux expériences ont été considérées qui ont abouti à des niveaux des défauts différents. Le défaut concernant le déséquilibre massique induit uniquement des perturbations du couple de charge. Dans ce cas, les indicateurs de défaut proposés se sont avérés capables pour détecter le défaut mécanique.

Les résultats obtenus ont montré que; le traitement des informations fournies par les signaux de la machine à induction via le vecteur d'espace courant plutôt qu'un courant monophasé présente plusieurs avantages importants: Le traitement de toutes les informations fournies par le système triphasé. L'utilisation du vecteur d'espace courant conduit aux mêmes résultats que l'analyse monophasée en termes de détection de déséquilibre de charge, mais avec plus de précision. L'application de la décomposition des paquets d'ondelettes avec la transformation de vecteur d'espace offre une analyse très délicate des signaux de la machine à induction, ce qui permet donc de construire un outil très efficace pour diagnostiquer une machine asynchrone.

Perspectives

Ces travaux n'ont montré la validité pratique de cette approche qu'en cas de déséquilibre de charge en régime permanent. Afin d'améliorer la présente étude, elle peut être élargie en considérant d'autres types de défauts et d'autres outils avancés de diagnostic et de classification (réseaux de neurones, logique floue et neuro-floue), en plus une étape de diagnostic peut être ajoutée. Les méthodes de détection peuvent être binaires, pour classer les situations comme saines ou défectueuses ou plus avancées. En effet, il serait très intéressant non seulement de détecter le défaut, mais aussi de caractériser son importance, son évolution et l'état général de santé des composants surveillés. Une étude théorique du lien entre les indicateurs de défaut et l'état de santé des composants peut également être réalisée.

Liste des publications :

- Article de revue internationale :

- N. Lahouasnia, M. F Rachedi, D. Drici, S. Saad “Load Unbalance Detection Improvement in Three - Phase Induction Machine Based on Current Space Vector Analysis” Journal of Electrical Engineering & Technology (2020) 15:1205–1216, <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00403-y>

- Articles de conférences internationales:

- N. Lahouasnia; M. F Rachedi; T. Deghboudj “Detection of Broken Rotor Bar Defect in Squirrel Cage Induction Machine” International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), Alger, 2019.
- N. Lahouasnia, M. F Rachedi, N. Grabsia, N. Benamira “Exploitation of electrical signals for the diagnosis of bearing defects in electromechanical machines” 5TH International Conference on Advances in Mechanical Engineering, Istanbul, 2019.
- N. Lahouasnia, M. F Rachedi, T. Deghboudj, N. Benamira “ Detection and diagnosis of broken bar defect in three-phase asynchronous motor” 5TH International Conference on Advances in Mechanical Engineering, Istanbul, 2019.

*Références
Bibliographiques*

Références

- [1] D.Toumi, M. Segulier, B. Mohamed Tadjine “Observer-based fault diagnosis and field oriented fault tolerant control of induction motor with stator inter-turn fault” Archives OF Electrical Engineering Vol. 61(2), pp. 165-188 (2012) DOI 10.2478/v10171-012-0015-1
- [2] S. Huang, H. Yu “Intelligent fault monitoring and diagnosis in electrical machines” Measurement journal 2013
- [3] A.Chahmi, A.Djoudi. “Diagnosis of the Induction Machine by the Kalman Filter” The 5th International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2017), Oct 2017, Boumerdes, Algeria.
- [4] R. Gopi Krishna, P. Kripakaran “Diagnosis of induction motor fault by parameter estimation technique” International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 6, Issue 1, January 2017
- [5] S. Bachir, S.Tnani, Jean-Claude Trigeassou, G.Champenois “Diagnosis by Parameter Estimation of Stator and Rotor Faults Occurring in Induction Machines” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 3, 2006
- [6] M. Khov, “Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents: Détection des courts-circuits par suivi paramétrique,” Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009.
- [7] D. Crombez, “Analyse de signaux vibratoires pour le diagnostic de défauts : Application sur les boîtes de vitesses automobiles,” Université de Rouen, 2011.
- [8] G. Didier « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances » Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.
- [9] M. Blödt, M. Chabert, J.Regnier, J.Faucher, “Mechanical Load Fault Detection in Induction Motors by Stator Current Time-Frequency Analysis’ IEEE Transactions On Industry Applications, VOL. 42, NO. 6, Dec 2006
- [10] P. A Delgado-Arredondo, D. Morinigo-Sotelo, R.A Osornio-Rios, J.G Avina-Cervantes, H. Rostro-Gonzalez, R de J Romero-Troncoso Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals Mech. Syst. Signal Process. (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.06.032i>
- [11] P. Gronjon, M. Vieira, S. Sieg-Zieba “Surveillance du désalignement d’un moteur asynchrone par l’a analyse du vecteur d’espace courant”.2011 GIPSA-Lab, CETIM.
- [12] J. maitre “Reconnaissance des défauts de la machine asynchrone : application des modèles d’intelligence artificielle » Thèse du doctorat ; L’université du Québec À Chicoutimi, 2017.
- [13] N. Mehala, “Condition monitoring and fault diagnosis on induction motors using motor current signature analysis,” Kurukshetra, October 2010.
- [14] Rakesh A. Patel, M. Alam “Stator Inter-turn Fault Detection using MCSA” International Journal of Current Engineering and Technology Vol.5, No.3 2015.

- [15] Y. Gritli, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, C. Rossi, F. Filippetti, Diagnosis of mechanical unbalance for double cage induction motor load in time-varying conditions based on motor vibration signature analysis, *International Conference on Renewable Energy Research and Applications Madrid, Spain, 20-23 October 2013*.
- [16] E. Fournier, A. Picot, J. Regnier, M. T Yamdeu, J-M Andrejak, and P. Maussion, “Current-Based Detection of Mechanical Unbalance in an Induction Machine Using Spectral Kurtosis with Reference” DOI 10.1109/TIE.2014.2341561, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*
- [17] M. Salah, K. Bacha, A. Chaari, Comparative investigation of diagnosis media for induction machine mechanical unbalance fault, *ISA Transactions* 52, 888–899, 2013
- [18] El Houssin El Bouchikhi, V. Choqueuse, M. Benbouzid, “Induction machine faults detection using stator current parametric spectral estimation,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, pp 447-464, 2014.
- [19] Y. Amirat, M.E.H. Benbouzid, T. Wang, K. Bacha, G. Feld; “EEMD-based notch filter for induction machine bearing faults detection”; *Applied Acoustics* 133, 202–209, 2018.
- [20] Alwan, H. O, Farhan, N.M., S-Al-Sabbagh, Q, “Detection of Static Air-Gap Eccentricity in Three Phase induction Motor by Using Artificial Neural Network (ANN). *International Journal of Engineering Research and Application*. Vol 7(5) pp 15-23, 2017.
- [21] C. L. Fortescue, Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* XXXVII (2) (1918) 1027–1140. doi:10.1109/T-AIEE.1918.4765570.
- [22] E. Clarke, “Circuit Analysis of A-C Power Systems”, New York : J. Wiley & Sons, Inc., 1943.
- [23] J. L. H. Silva, A. J. M. Cardoso, “Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park’s vector approach”, in: 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005., 2005, pp. 6 pp.–. doi:10.1109/IECON.2005.1569315.
- [24] A. H. Bonnett and C. Yung, “Increased efficiency versus increased reliability,” *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 14, no. 1, pp. 29–36, 2008.
- [25] S. Kerfali « Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone » Thèse de Doctorat Université Badji Mokhtar Annaba 2016
- [26] O. Imoru, A. A. Jimoh, Y. Hamam « Origin and Manifestation of Electrical Machine Faults–A review » The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE) 2014
- [27] A. Choudhary, D. Goyal, S. Letha Shimi, A.Akula “Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review” *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2018, <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9286-z>
- [28] W. Bentrah « Analyse Fréquentielle Par Les Ondelettes Pour Le Diagnostic Des Systèmes Dynamiques » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider- Biskra, 2019.

- [29] S. Bensedjai ‘Contribution à l’amélioration de la sûreté d’exploitation des moteurs à induction’ Thèse de Doctorat Université Badji Mokhtar Annaba 2016.
- [30] N. BESSOUS ‘Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones’ Thèse de *magister* Université Mentouri de Constantine
- [31] S. ZOUZOU ‘Détection des défauts statoriques dans la machine synchrone à aimants permanents par les techniques avancées’ thèse de *magister* Université Mohamed Khider – Biskra 2015.
- [32] H. Arabacı, O. Bilgin ‘Automatic detection and classification of rotor cage faults in squirrel cage induction motor’ *Neural Comput&Appl* (2010) 19:713–723 DOI 10.1007/s00521-009-0330-7
- [33] S.Zolfaghari, S.Bahari Mohd Noor, M. Rezazadeh Mehrjou, M.Hamiruce Marhaban, N. Mariun ‘Broken Rotor Bar Fault Detection and Classification Using Wavelet Packet Signature Analysis Based on Fourier Transform and Multi-Layer Perceptron Neural Network’ *applied sciences journal* 25 December 2017
- [34] S. Nandi, T. ChelvanIlamparithi, Sang Bin Lee and D. Hyun ‘Detection of Eccentricity Faults in Induction Machines Based on Nameplate Parameters’ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 58, Issue: 5, May 2011), Page(s): 1673 - 1683
- [35] F. BABAA ‘Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : "Application au diagnostic des défauts statoriques’ Thèse de Doctorat, Université Constantine 2014
- [36] A. Bourase « Détection Prédicative des Anomalies des Moteurs de Moyenne Tension lors des Défauts Combinés » thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba 2015
- [37] A.M. Trzynadlowski, E. Ritchie, Comparative investigation of diagnostic media for induction motors: a case of rotor cage faults. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2000. 47(5): p. 1092-1099.
- [38] Y.Amirat, M.E.H.Benbouzid, B. Bensaker, R. Wamkeue, Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Wind Energy Conversion Systems, *IEEE Conference Publications*, Vol. 2, (2007).
- [39] K. MERAH ‘Diagnostic des défauts de roulement d’un moteur par analyse vibratoire « Etude comparative avec l’analyse du courant statorique’ Mémoire Magistère 2016.
- [40] M.Djeddi, P. Granjon, B.Leprettre ‘Bearing Fault Diagnosis in Induction MachineBased on Current Analysis Using High-ResolutionTechnique” 2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Poland,DOI: 10.1109/DEMPED.2007.4393066
- [41] A.Bouzida « diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes. Thèse de Magister .Ecole Nationale Polytechnique d’Alger. Algérie 2008
- [42] R.A Ashnibha ‘ An investigation into current and vibration signatures of three phase induction motors’ Thèse de doctorat université Manchester Metropolitan Septembre 2012

- [43] O. Ondel, "Diagnostic par reconnaissance des formes: Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone," Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 2006.
- [44] N. Mehala, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motor using Motor Current Signature Analysis", These de Doctorat, Electrical Engineering Department, NIT Kurukshetra, October 2010.
- [45] A. Allal « Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones » Université Ferhat Abbas – Sétif 2010.
- [46] R.S. Beebe 'Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring' Elsevier Science & Technology Books avril 2004
- [47] C.Jin, A.P. Ompusunggu, Z Liu, H.D. Ardakani, F Petré, Jay Lee1 "A Vibration-Based Approach for Stator Winding Fault Diagnosis of Induction Motors: Application of Envelope Analysis' Annual Conference Of The Prognostics And Health Management Society 2014
- [48] I. Sudhakar, S AdiNarayana, M. AnilPrakash. "Condition Monitoring of a 3-Ø Induction Motor by Vibration Spectrum analysis using FFT Analyzer- a Case Study" 5th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016).
- [49] R.A. Leonard, and W.T. Thomson, "Vibration and stray flux fault monitoring for unbalanced supply and inter-turn winding diagnosis in induction motors. Br. J. NDT, 1986: p. 211–215
- [50] A.Garcia-Perez, R.J.Romero-Troncoso, E.Cabal-Yopez, R.A.Osornio-Rios, J.A.Lucio-Martinez, "Application of high-resolution spectral analysis for identifying faults in induction motors by means of sound, J.Vib.Control. Vol 18, 2011, pp 1585–1594, <http://dx.doi.org/10.1177/1077546311422925>.
- [51] A. Glowacz "Acoustic based fault diagnosis of three-phase induction motor" Applied Acoustics, Vol 137, (2018), pp 82–89
- [52] Z. Ye, W. Bin. "A review on induction motor online fault diagnosis. Power Electronics and Motion Control Conference Proceedings, Vol. 3, Pages: 1353-1358, 2000.
- [53] El Houssin El Bouchikhi, V. Choqueuse, M.Benbouzid. "Induction Machine Diagnosis using Stator Current Advanced Signal Processing. International Journal on Energy Conversion, 2015, 3 (3), pp.76-87.
- [54] W.T. Thomson On-line motor current signature analysis prevents premature failure of large induction motor drives. Maint Asset Manag 24(3):30–35, 2009.
- [55] El Houssin El Bouchikhi, V. Choqueuse, M.Benbouzid. Induction machine faults detection using stator current parametric spectral estimation. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, pp.447-464.
- [56] A. Sapena-Bano, J. Martinez-Roman, R. Puche-Panadero, M. Pineda-Sanchez, J. Perez-Cruz, M. Riera-Guasp « Induction machine model with space harmonics for the diagnosis of rotor

eccentricity, based on the convolution theorem” *Electrical Power and Energy Systems* 117 (2020) 105625

[57] A. Bouras, S. Bouras, A.E. Hadjadj, S. Kerfali, “Gearbox degradation diagnosis using supplementary approaches based on the stator current analysis: experimental research, *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, 22 (2), 191–206, 2016.

[58] Jawad Faiz, S.M.M. Moosavi “Eccentricity fault detection – From induction machines to DFIG—A review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55 (2016) 169–179.

[59] R.R. Obaid, T.G. Habetler, and R.M. Tallam, “Detecting load unbalance and shaft misalignment using stator current in inverter-driven induction motors,” *DOI: 10.1109/IEMDC.2003.1210643*.

[60] Elhoussin Elbouchikhi, V. Choqueuse, M.Benbouzid « Induction machine bearing faults detection based on a multi-dimensional MUSIC algorithm and maximum likelihood estimation” *ISA Transactions* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2016.03.007>

[61] [M. Singh](#), [A.G Shaik](#) « Faulty bearing detection, classification and location in a three-phase induction motor based on Stockwell transform and support vector machine” [Measurement, Volume 131](#), 2019, Pages 524-533.

[62] F. Li, X. Pang, Z. Yang “Motor current signal analysis using deep neural networks for planetary gear fault diagnosis” *Measurement* 145, 2019, pp 45–54.

[63] C. Verucchi , J. Bossio, G. Bossio, G. Acosta « Misalignment detection in induction motors with flexible coupling by means of estimated torque analysis and MCSA” *Mechanical Systems and Signal Processing* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.04.035i>

[64] B.L. RajalakshmiSamaga, K.P. Vittal “Comprehensive study of mixed eccentricity fault diagnosis in induction motors using signature analysis” *Electrical Power and Energy Systems* 35 (2012), pp 180–18.

[65] El Houssin El Bouchikhi, Vincent Choqueuse, Mohamed Benbouzid. Condition Monitoring of Induction Motors Based on Stator Currents Demodulation. *International Review of Electrical Engineering-IREE*, 2015, 10 (6), pp.704-715.

[66] R. M. Tallam, S. B. Lee, G. C. Stone, G. B. Kliman, J.-Y. Yoo, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “A survey of methods for detection of stator-related faults in induction machines,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 43, no. 4, pp. 920–933, 2007.

[67] S.A CHAIB, A. Boussaidi “Détection et caractérisation des défauts des roulements par l’analyse spectrale” *Mémoire de Master Université M’hamed Bougara Boumerdes* 2016.

[68] M Blodt, "Condition Monitoring of Mechanical Faults in Variable Speed Induction Motor Drives: Application of Stator Current Time-Frequency Analysis and Parameter Estimation," *Toulouse*, 2006.

[69] P. Arquès, « Diagnostic prédictif de l’état des machines », Edition Masson, Paris 1996.

- [70] A. Boulenger, C.Pachaud ‘Analyse vibratoire en maintenance’ 3e édition 2007 Edition Dunod
- [71] AFNOR, "Surveillance des machines par analyse des vibrations ", Isbn: 2123090123,(1995).
- [72] S. Shukla, R.N Yadav, J. Sharma, S. Khare, Analysis of statistical features for fault detection in ball bearing. In 2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICIC) (pp. 1–7), 2015.
- [73] A Boudiaf, A. Moussaoui, A. Dahane, I. Atoui « A Comparative Study of Various Methods of Bearing Faults Diagnosis Using the Case Western Reserve University Data” J Fail. Anal. AndPreven. DOI 10.1007/s11668-016-0080-7
- [74] M.K. Pradhan, Pankaj Gupta “ Fault detection using vibration signal analysis of rolling element bearing in time domain using an innovative time scalar indicator” *Int. J. Manufacturing Research, Vol. 12, No. 3, 2017*
- [75] SRiaz, HElahi, K.Javaid, T.Shahzad “Vibration Feature Extraction and Analysis for Fault Diagnosis of Rotating Machinery-A Literature Survey” *Asia Pacific Journal of Multidisciplinary Research Vol. 5 No.1, 103-110 February 2017*
- [76] S. SADOK., B. Badri, M. Thomas. "“TALAF” and “THIKAT” as Innovative Time-Domain Indicators for Tracking Ball Bearings,.” Proceedings of the 14th Seminar on Machinery Vibration, Vancouver, Canada, October. 2006.
- [77] P. Gupta, M. K Pradhan “Fault detection analysis in rolling element bearing: A review” 5th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016), 2017 pp 2085–2094.
- [78] A. Djebala ‘Application de la transformée par ondelettes à l’étude et l’analyse vibratoire des systèmes mécaniques’ thèse de doctorat université Badji Mokhtar Annaba 2008
- [79] H. Cherif « Détection des défauts statorique et rotorique dans lamachine asynchrone en utilisant l’analyse par FFT et ondelettes » Thèse de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra2014.
- [80] El Houssin El Bouchikhi, V. Choqueuse, M.Benbouzid; “Induction machine diagnosis using stator current advanced signal processing. International journal on energy conversion, Vol 3 (3), pp.76-87, 2015.
- [81] M. Blödt, M. Chabert, J. Regnier, and J. Faucher, “Mechanical Load Fault Detection in Induction Motors by Stator Current Time-Frequency Analysis”IEEE Transactions on Industry Applications Volume: 42, Issue: 6, Nov.-dec. 2006
- [82] M. AYAD « Recherche de signatures robustes des défauts dans une machine tournante a travers l’analyse de signaux vibratoires’ Université Ferhat Abbas – Sétif – 1 –2015.
- [83] I. ATTOUI « Contribution au diagnostic de défauts d’une génératrice asynchrone dans une chaine de conversion d’énergie éolienne » thèse de doctorat université Badji Mokhtar Annaba 2015.

- [84] N. HAMDAD « Transformée de Huang-Hilbert: Application à la détection des défauts » thèse de de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2013.
- [85] B. Smail « Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur » thèse de doctorat université Batna 2, 2016.
- [86] K. Thameur « Diagnostic des défauts de fissures d'engrenages par l'analyse cyclo stationnaire » Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2015.
- [87] A. Bouzida, "Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes. Mémoire de Magister .Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Algérie 2008
- [88] T. ABID « Analyse du signal ECG par les ondelettes » mémoire magister. Université Badji Mokhtar Annaba 2008.
- [89] K. Ravikumar, S. Tamilselvan 'On the Use of Wavelets Packet Decomposition for Time Series Prediction' 1, 2 Mathematics Section, Faculty of Engineering and Technology Annamalai University, Annamalaiagar – 608002 Tamilnadu, India.
- [90] S. Boudrim, “ Méthodes ondelettes et bayésiennes pour le diagnostic: application aux machines asynchrones” Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas de Sétif. Algérie 2011.
- [91] Z. Zhang, Y Wang · K. Wang 'Fault diagnosis and prognosis using wavelet packet decomposition, Fourier transform and artificial neural network” Journal of Intelligent Manufacturing volume 24, pages 1213–1227, 2013.
- [92] M. Y. Gokhale, Daljeet Kaur Khanduja 'Time Domain Signal Analysis Using Wavelet Packet Decomposition Approach' Int. J. Communications, Network and System Sciences, 2010.
- [93] H. Merabet, T. Bahi, “Diagnosis and Detection of Eccentricity Faults in a Doubly-Fed Induction Generator,” *Electrotechnicà, Electronicà, Automaticà* (EEA), Vol. 64, no 3, pp 60-67, 2016.
- [94] Z.Zhang, Y. Wang, K. Wang, “Fault diagnosis and prognosis using wavelet packet decomposition, Fourier transform and artificial neural network,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol 24, no.6, pp 1213–1227,2013.
- [95] D.Drici, H.Merabt, S.Aouabdi, A. Boudiaf, “Detection of broken bar fault in squirrel cage induction motor using wavelet packet analysis,” *Electrotechnicà, Electronicà, Automaticà*, vol 64 no.3, pp 60-67, 2018.
- [96] S. K. Ahamed, M. Mitra, S. Sengupta and A. Sarkar “Identification of Mass Unbalance in Rotor of an Induction Motor Through Envelope Analysis of Motor Starting Current at no Load” *Journal of Engineering Science and Technology Review* 5 (1) (2012) 83-89.
- [97] S. DIOUF « Contribution au diagnostic industriel de défauts de roulement et de balourd par techniques neuronales application à la machine asynchrone à cage » thèse de doctorat, Université Paris XII Val DE Marne-Creteil, 2007.

- [98] G. C. Paap, Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations, *IEEE Transactions on Power Systems* 15 (2), pp 522–528, (2000), doi:10.1109/59.867135
- [99] G. Cablea, P. Granjon, C. Bérenguer, “Method for computing efficient electrical indicators for offshore wind turbine monitoring,” presented at CM 2014 / MFPT 2014, *The Eleventh IntConfe on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies*. (10-12 June 2014) Manchester UK.
- [100] G. Rajamany , S. Srinivasan, K. Rajamany, R.K. Natarajan “Induction Motor Stator Interturn Short Circuit Fault Detection in Accordance with Line Current Sequence Components Using Artificial Neural Network” *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2019, <https://doi.org/10.1155/2019/4825787>
- [101] M. Blodt, P. Granjon, B. Raison, J. Regnier, “Mechanical fault detection in induction motor drives through stator current monitoring - theory and application examples,” in *Fault Detection*, W. Zhang, Ed. InTech, 2010.
- [102] NABTI KHALIL “Contribution à la commande de la machine asynchrone par DTC et logique floue » Thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine 2006.
- [103] Daekyu Jang and Junghwan Chang “ Influences of Winding MMF Harmonics on Torque Characteristics in Surface-Mounted Permanent Magnet Vernier Machines” *Energies* **2017**, 10, 580; doi:10.3390/en10040580
- [104] B. TRAJIN « Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones » Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.