



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane MIRA – BEJAIA  
Faculté De Technologie  
Département de Génie Électrique

## Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique  
Spécialité : Electromécanique

Thème :

*Maintenance prédictive basée sur  
l'analyse des courants d'alimentation  
d'une machine électrique*

Présenté par :

*HITOUCHE Dihia*

*LHABIB Samia*

Composition du Jury :

*Mr MEZIANI*

*Mr MAOUCHE*

*Mr IMAOUCHEN Yacine*

*Président*

*Examinateur*

*Encadreur*

*Année Universitaire 2019/2020*

# *Remerciements*

*Nous remercions Dieu le tout Puissant de nous avoir donné la force, la santé, le courage et la patience de pouvoir accomplir ce travail*

## ***A monsieur Y. Imaouchen***

*Pour avoir proposé et dirigé ce travail avec une grande rigueur scientifique, ses conseils et la confiance qu'il nous a accordé et qui nous a permis de réaliser ce travail*

## ***Au membre de jurys***

*D'avoir accepté et faire l'honneur d'examiner et de valoriser ce modeste travail*

*Nous tenant à exprimer notre profonde sympathie et remercier l'ensemble du personnel et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de nos études, tout particulièrement aux enseignants de la spécialité*

# *Dédicaces*

---

*J'ai le plaisir de dédier ce modeste travail aux personnes les plus  
chères au monde :*

*Mes très chers parents*

*Sans eux je ne serai pas là. Eux qui m'ont appris que la vie est un défi à vivre  
joyeusement et à ne jamais baisser le bras quel que soit les obstacles*

*A la mémoire de ma grande mère qui m'a toujours comblée d'amour.*

*A mes très chers grands parents*

*A mes sœurs et mon frère*

*A ma nièce Sara, mon neveu Ilias et leur père*

*A mes chers oncles et tantes*

*A mes cousins et cousines*

*Merci pour vos conseils, votre soutien, vos encouragements et surtout vos  
bénédictions et votre amour*

*A mes chers amis (e)*

*A mon cher binôme*

*A toute la promotion électromécanique 2019-2020*

*A toutes celles et ceux qui m'ont aidé et soutenue.*

*Dihia*

# *Dédicaces*

---

*J'ai le plaisir de dédier ce modeste travail aux personnes les plus  
chères au monde :*

*Mes très chers parents*

*Sans eux je ne serai pas là. Eux qui m'ont appris que la vie est un défi à vivre  
joyeusement et à ne jamais baisser les bras quel que soit les obstacles*

*A la mémoire de ma grande mère qui m'a toujours comblée d'amour.*

*A mes sœurs : Wahiba, Dalila.*

*A mes frères : yahia, Toufik.*

*A mes chers oncles et tantes*

*A mes cousins et cousines*

*A mes chers : Massilya, Naouel*

*A mon cher Azeddine*

*Merci pour vos conseils, votre soutien, vos encouragements et surtout vos  
bénédictions et votre amour*

*A mes chers amis (e)*

*A mon cher binôme*

*A toute la promotion électromécanique 2019-2020*

*A toutes celles et ceux qui m'ont aidée et soutenue.*

*Samia*

## TABLE DES MATIERES

<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	iv
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	v
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	vi
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1

### **Chapitre I : Identification des composants d'une machine asynchrone et les défaillances relatives**

I.1 Introduction .....	3
I.2 Composantes de la machine asynchrone .....	3
I.2.1 Rotor .....	3
I.2.2 Stator .....	4
I.2.3 Arbre .....	4
I.2.4 Paliers .....	5
I.2.4.1 Roulement .....	5
I.2.4.2 Flasque .....	5
I.2.5 Ventilateur .....	6
I.2.6 Carcasse .....	6
I.3 Défaillances des machines asynchrones .....	6
I.3.1 Défaut de roulement .....	7
I.3.2 Défaut de l'arbre .....	7
I.3.3 Défaut d'excentricité .....	7
I.3.4 Défaut du flasque .....	8
I.3.5 Défaut du stator .....	8
I.3.6 Défaut du rotor .....	9
I.4 Conclusion.....	9

### **Chapitre II : Technique de diagnostic des défaillances**

II.1 Introduction .....	10
II.2 Maintenance .....	10
II.3 Diagnostic .....	11
II.3.1 Technique de diagnostic .....	11

II.3.1.1 Analyse vibratoire .....	11
II.3.1.2 Analyse thermographique .....	13
II.3.1.3 Analyse du couple électromagnétique .....	13
II.3.1.4 Analyse acoustique .....	13
II.3.1.5 Analyse du flux .....	13
II.3.1.6 Analyse des courants .....	14
II.3.2 Méthode de diagnostic .....	14
II.3.2.1 Méthode interne .....	14
II.3.2.2 Méthode externe .....	14
II.4 Conclusion .....	15

**Chapitre III : Méthodes du traitement de signal électrique**

III.1 Introduction .....	16
III.2 Traitement de signal .....	16
III.3 Méthode de traitement de signal .....	16
III.3.1 Analyse temporelle .....	16
III.3.2 Analyse fréquentielle .....	17
III.3.2.1 Analyse spectrale .....	17
• Transformée de Fourier Discrète .....	18
III.3.2.2 Analyse cepstrale .....	18
III.3.2.3 Analyse d'enveloppe .....	19
III.3.3 Analyse temps-fréquence .....	19
III.3.3.1 Transformée de Fourier à Courts-Terms (TFCT) .....	19
III.3.3.2 Transformé d'ondelette .....	20
III.3.4 Simulation d'un signal du courant statorique .....	21
III.5 Conclusion .....	22

**Chapitre IV : Diagnostic des courants statoriques d'une MADA**

IV.1 Introduction .....	24
IV.2 Description de la machine étudiée (la MADA) .....	24
IV.3 Description et présentation du banc d'essais .....	25
IV.4 Diagnostic en présence d'un déséquilibre électrique au rotor .....	26

IV.4.1 Analyse spectrale .....	28
IV.4.2 Analyse d'enveloppe .....	30
IV.5 Conclusion .....	33
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>34</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>35</b>

## LISTE DES ABREVIATIONS

AFNOR : Association française de normalisation

AMRO : L'Analyse Multi Résolution en Ondelette

DER : Déséquilibre électrique rotorique

DFIG : Doubly Fed Induction Generator

DFIM: Doubly Fed Induction Motor

DWV: Wigner-Ville distribution

FFT : La Transformée de Fourier rapide (Fast Fourier Transform)

FP : fréquence porteuse

GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation

L & U: Lower & Upper

MADA: Machine asynchrone a double alimentation

MAS: Machine asynchrone

MCSA: Motor Current Signature Analysis

Moteur CC : moteur à courant continu

RMS : Root Mean Square ou Valeur Efficace

TFCT (ou STFT) : Transformée de Fourier à court terme (ou Short-Time Fourier Transform)

TFFG : Transformée de Fourier à Fenêtre glissante

TO : La transformée d'ondelette

**LISTE DES TABLEAUX :**

<b>TABLEAUX</b>	<b>DÉSIGNATION</b>	<b>PAGE</b>
<b>Tableau I.1</b>	Analyses vibratoires, signatures fréquentielles	<b>12</b>
<b>Tableau IV.1</b>	Courant Is, Fréquences porteuses (FP) et leurs bandes latérales à $\pm 2nsf$	<b>26</b>
<b>Tableau IV.2</b>	Fréquences caractéristiques des bandes latérales liées à la fréquence d'alimentation (FP)	<b>27</b>
<b>Tableau IV.3</b>	Fréquences caractéristiques des bandes latérales liées à la fréquence d'encoches (FP)	<b>28</b>
<b>Tableau IV.4</b>	Amplitudes correspondantes au premier harmonique de la fréquence de défaut (2sf) pour les différentes vitesses de rotation et DER	<b>32</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>FIGURES</b>	<b>DÉSIGNATION</b>	<b>PAGE</b>
<b>FIGURE I.1</b>	Rotor d'une machine asynchrone	<b>4</b>
<b>FIGURE I.2</b>	Stator d'une machine asynchrone	<b>4</b>
<b>FIGURE I.3</b>	Schéma d'un roulement à bille	<b>5</b>
<b>FIGURE I.4</b>	Ventilateur	<b>6</b>
<b>FIGURE I.5</b>	Pourcentage des défauts de la MAS	<b>6</b>
<b>FIGURE I.6</b>	Défaut dans un roulement	<b>7</b>
<b>FIGURE I.7</b>	Exemples des dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone	<b>8</b>
<b>FIGURE I.8</b>	Défaut d'un rotor a cage d'écureuil	<b>9</b>
<b>FIGURE I.9</b>	Classification des méthodes de la maintenance	<b>10</b>
<b>FIGURE III.1</b>	Analyse du signal simulé : représentation temporelle, analyse fréquentielle, analyse d'enveloppe et son spectrogramme calculé par la TFCT	<b>22</b>
<b>FIGURE IV.1</b>	Symbole d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA)	<b>24</b>
<b>FIGURE IV.2</b>	Schéma d'expérience sur le banc d'essai et les instruments d'acquisition des mesures électriques et mécaniques	<b>25</b>
<b>FIGURE IV.3</b>	Spectres des signaux mesurés sur la machine en état équilibré et sous trois sévérités DER (150, 225 et 300%) pour la vitesse de 1530 tr/m	<b>28</b>
<b>FIGURE IV.4</b>	Spectres des signaux mesurés sur la machine en état équilibré et sous trois sévérités DER (150, 225 et 300%) pour la vitesse de 1560 tr/m	<b>29</b>
<b>FIGURE IV.5</b>	Spectres des signaux mesurés sur la machine en état équilibré et sous trois sévérités DER (150, 225 et 300%) pour la vitesse de 1590 tr/m	<b>30</b>
<b>FIGURE IV.6</b>	Spectres d'enveloppe des signaux mesurés sur la machine en état équilibré et sous trois sévérités DER (150, 225 et 300%) pour la vitesse de 1530 tr/m	<b>31</b>
<b>FIGURE IV.7</b>	Spectres d'enveloppe des signaux mesurés sur la machine en état équilibré et sous trois sévérités DER (150, 225 et 300%) pour la vitesse de 1560 tr/m	<b>31</b>
<b>FIGURE IV.8</b>	Spectres d'enveloppe des signaux mesurés sur la machine en état équilibré et sous trois sévérités DER (150, 225 et 300%) pour la vitesse de 1590 tr/m	<b>32</b>
<b>FIGURE IV.9</b>	Figure 19. Évolution de l'amplitude à la fréquence du défaut (2sf) : (A) pour différentes vitesses de rotation en fonction de la sévérité du défaut, et (B) pour différentes sévérités du défaut en fonction de la vitesse de rotation	<b>33</b>

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le secteur industriel regroupe une large gamme d'entraînements électriques, vu sa richesse et sa diversité en matière d'application. Leurs défaillances peuvent entraîner de graves conséquences sur la sécurité des matériels et des personnes. Ces défauts ont des origines très variées, ils peuvent être dus : au vieillissement des constituants ; aux conditions d'utilisation ou tout simplement à un défaut de fabrication.

Actuellement la machine asynchrone est la plus utilisée dans les milieux industriels, et cela est dû à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, et sa robustesse mécanique. Tout au long de sa vie, l'appareil est exposé à de nombreux facteurs externes et internes (thermique, électrique, mécanique et d'environnement) qui influencent son potentiel ; son rendement et son efficacité, induisant ainsi diverses contraintes dans l'appareil, par conséquent, arrêt ou retardement de production. Il sera donc indispensable de prévoir ces défaillances et parvenir à les éviter, tout en développant des techniques d'identification ou des systèmes de détection prédictive de ces défauts à la naissance.

Il existe deux grandes familles utilisées dans le domaine du diagnostic à savoir les méthodes à base de modèle analytique, et les méthodes sans modèle. Les méthodes sans modèle sont basées sur l'extraction d'informations par le biais du traitement des signaux mesurés. Les signaux mesurables (les courants, les tensions, la vitesse, les vibrations, la température, les émissions sonores) peuvent fournir des informations significatives sur les défauts.

Le travail, présenté dans ce mémoire, repose sur le diagnostic des défauts dans la machine asynchrone à l'aide des méthodes de traitement du signal, en se basant sur l'analyse des courants statoriques mesurés par un ou plusieurs capteurs qui donnent une image sur le courant statorique. Cette méthode d'analyse a pris une place prépondérante dans les approches de détection et de diagnostic de défauts vu sa simplicité et son efficacité.

Dans le premier chapitre, nous présentons un rappel sur la constitution de la machine asynchrone et les différentes défaillances pouvant l'affecter et leurs origines. En ce qui concerne le deuxième chapitre, les différentes techniques de diagnostic sont exposées, à savoir l'analyse vibratoire, l'analyse acoustique, l'analyse du courant ...etc. Le troisième chapitre rappelle les principales méthodes de traitement des signaux électriques utilisées dans la détection des défauts liés à une machine asynchrone. Ensuite, on présentera une étude

de quelques signaux simulés sur MATLAB. Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus lors d'exploitation des méthodes d'analyse présentées dans les chapitres précédents, sur une génératrice asynchrone à double alimentation. L'analyse de ces signaux est effectuée par calcul du spectre de Fourier et analyse d'enveloppe.

## **Chapitre I : Identification des composantes d'une machine asynchrone et les défaillances relatives**

### **I.1 Introduction**

Le but essentiel des machines électriques est la transformation de l'énergie d'une forme vers une autre, l'une au moins de ces formes étant électrique, l'autre pouvant être électrique ou mécanique, via l'interaction des courants électriques et du champ magnétique qui résulte leurs fonctionnements.

On peut classer les machines électriques en trois catégories principales :

- Les machines génératrices : qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique ;
- Les machines transformatrices : La catégorie la plus importante, elle modifie la grandeur des courants et les tensions alternatives ;
- Les moteurs électriques : qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique.

Les composants des machines électriques se diffèrent d'un type de machine à une autre. Dans ce chapitre, nous allons étudier la machine asynchrone dont nous allons présenter ces différentes composantes et les défaillances qui sont liées à chaque composante.

La machine asynchrone (MAS) est très répandue dans l'industrie en raison de son faible coût, de sa robustesse et de ses performances de commande. Cela fait d'elle l'une des plus grosses consommatrices d'énergie au monde [1].

### **I.2 Composantes de la machine asynchrone**

#### **I.2.1 Rotor**

Le rotor, monté sur l'arbre moteur, se compose d'un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinée à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0,4 à 2 mm seulement comme présenté sur la figure I.1 [1].

Les rotors des machines asynchrones englobent deux types :

- les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique. Les phases rotoriques sont disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine, ce qui permet de profiter des caractéristiques de ce type de rotor à savoir le démarrage, le freinage et la variation de vitesse du moteur par insertion de résistance ;
- Les rotors à cage d'écureuil les enroulements sont constitués de barres en cuivre utilisées pour les gros moteurs ou en aluminium pour les moteurs de petite puissance.



Figure I.1 Rotor d'une machine asynchrone[2]

### I.2.2 Stator

Le stator est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine [3].



Figure I.2 Stator d'une machine asynchrone[2]

### I.2.3 Arbre

L'arbre de la machine électrique est un organe de transmission du mouvement de rotation. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor ; au circuit magnétique et aux enroulements tournants. L'arbre est lui-même supporté par un ou plusieurs paliers suivant la configuration de l'ensemble de la ligne d'arbre.

### I.2.4 Paliers

Les paliers, permettent la rotation de l'arbre rotorique, ils sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage [4].

#### I.2.4.1 Roulement

Les roulements sont des organes de base dans la machine asynchrone, sont conçus pour supporter le rotor ; maintenir un entrefer constant entre le rotor et le stator ainsi que le transfert des charges du rotor au carter du moteur. Les roulements sont classés selon la nature des charges qu'ils supportent, on distingue : des roulements axiaux et des roulements radiaux. Les plus utilisés dans l'industrie sont les roulements à billes.

Ils sont composés de :

- Deux bagues concentriques en acier, appelées bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles roulent les corps roulants) ;
- Des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal ;
- Une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine) [5].



Figure I.3 Schéma d'un roulement à billes [5]

#### **I.2.4.2 Flasque**

Ils ferment le carter moteur aux deux extrémités et sont réalisés en fonte grise ou en aluminium injecté. Les flasques sont centrés sur le carter et réunis entre eux par des tirants ou tiges d'assemblage.

#### **I.2.5 Ventilateur**

La transformation de l'énergie électrique ne peut s'effectuer sans pertes, l'énergie ainsi perdue étant transformée en chaleur. Pour éviter le risque de la surchauffe et la détérioration de la machine, la ventilation est nécessaire. Elle assure un refroidissement homogène des bobinages et une élimination des pertes interne de différentes sources de l'appareil.



Figure I.4 Ventilateur

#### **I.2.6 Carcasse**

Qui sert de support, elle assure la protection contre l'environnement extérieur et guide l'aire de ventilation [1].

### **I.3 Défaillances des machines asynchrones**

Les machines électriques, en particulier les machines asynchrones, sont soumises pendant leur fonctionnement aux défauts qui peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe.

- Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc).
- Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine.

Une étude statistique menée par IEEE révèle que certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres ; à savoir : défauts de roulement, stator, rotor, etc. [6]

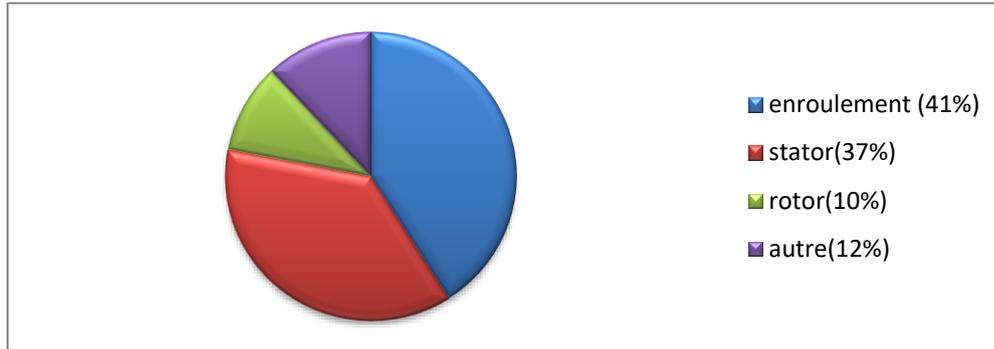
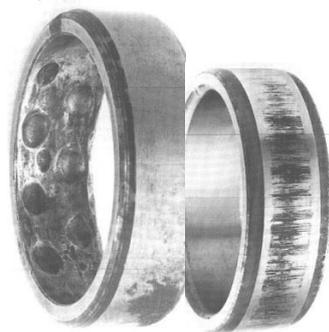


Figure I.5 Pourcentage des défauts de la MAS [6]

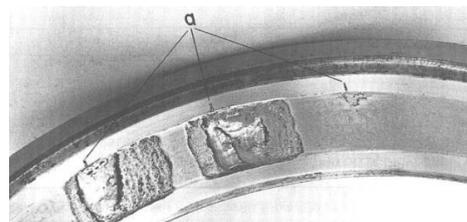
### I.3.1 Défaut de roulement

La raison principale des défaillances des machines provient en général des défauts des roulements à billes qui sont à la base de plusieurs causes, telles que la contamination du lubrifiant ; la charge excessive ; la température de fonctionnement élevée ; l'usure due au vieillissement ; le choix inapproprié des matériaux à l'étape de fabrication. Elles peuvent également être dues à la circulation des courants de fuite induits [7].

Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore ; l'apparition des vibrations, il affecte aussi la répartition du flux dans l'entrefer qui n'est plus alors constant (phénomène d'excentricité). Ceci se traduit donc par une évolution des grandeurs électromagnétiques et donc des courants dans la machine [8].



Défaut d'usures



Défaut d'écaillage

Figure I.6 Défaut dans un roulement [9]

### I.3.2 Défaut de l'arbre

L'utilisation d'un mauvais matériau lors de la construction de l'arbre de la machine engendre une fissure, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt de la machine. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre

de la machine, par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, provoquant ainsi une fatigue supplémentaire [10].

### **I.3.3 Défaut d'excentricité**

L'excentricité est le résultat de la non-uniformité d'entrefer, ce qui signifie l'existence de longueurs radiales différentes entre le stator et le rotor. Il existe trois types d'excentricités, statiques ; dynamique et mixte. La première caractérise le fait que le centre du rotor se trouve à une certaine distance de celui du stator, et la deuxième caractérise le fait que le centre du rotor tourne autour du centre du stator, par contre la troisième représente la somme des deux cas présentés dessus.

Les causes d'une excentricité sont multiples, elle peut être due à la flexion de l'arbre, à un phénomène d'usure ou au désalignement des roulements [11].

### **I.3.4 Défaut du flasque**

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont les 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 [10].

### **I.3.5 Défaut du stator**

Les défauts statoriques les plus courants sont : la mise en court-circuit d'une ou plusieurs spires de son bobinage, l'ouverture partielle ou totale d'une phase d'alimentation ou le déséquilibre de l'impédance de phase (variation de résistance ou suppression de spires).

Les courts-circuits statoriques commencent généralement par un court-circuit localisé entre plusieurs spires d'un même enroulement (court-circuit entre spires), suite à la dégradation du matériau isolant recouvrant les conducteurs. Ce type de phénomène peut de plus se dégénérer en courts-circuits généralisés, comme des courts-circuits entre phases ou entre phase et terre. Ces défauts sont généralement facilement détectables tant les effets qu'ils engendrent, sur les courants de phase notamment, sont importants. La figure I.7 représente deux exemples de dégâts provoqués par le défaut de court-circuit au stator [11].

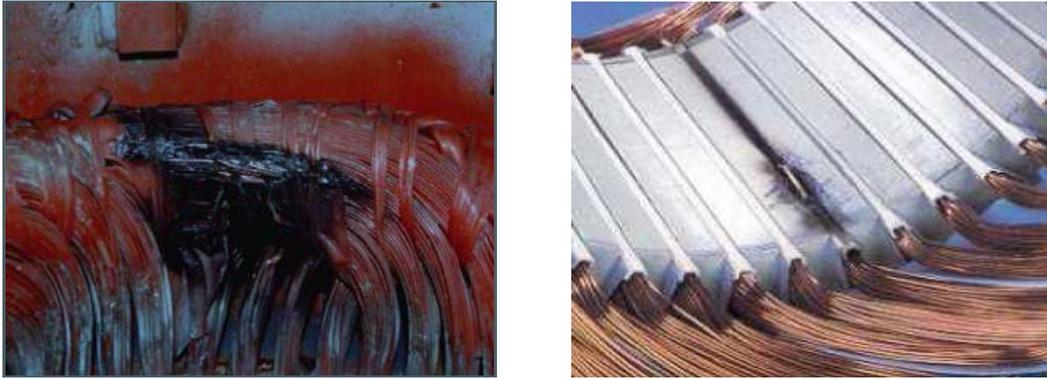


Figure I.7 Exemples des dégâts dus au défaut de court-circuit statorique d'un moteur asynchrone [11]

### I.3.6 Défaut du rotor

Un rotor peut être affecté par les mêmes défauts que le stator s'il s'agit d'un rotor bobiné. En revanche pour un rotor à cage d'écureuil, les défauts peuvent être une rupture de barre ou encore une rupture d'anneaux de court-circuit. Ces ruptures de barres ou portions d'anneau peuvent être dues à une surcharge mécanique ou encore à un échauffement local excessif ou tout simplement à un défaut de fabrication [10].

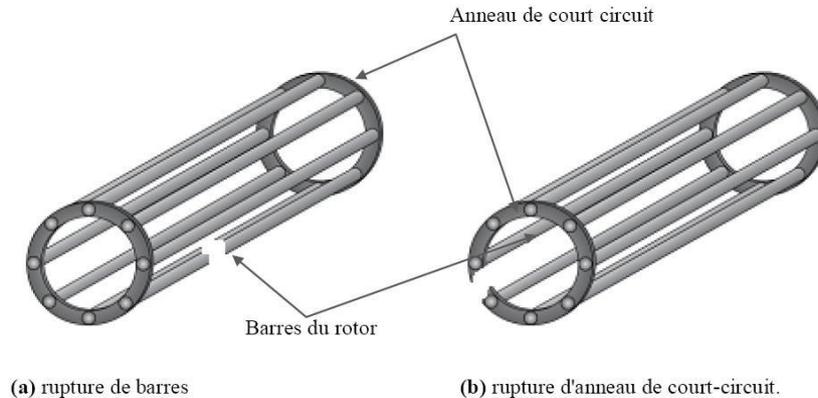


Figure I.8 Défaut d'un rotor a cage d'écureuil [12]

## I.4 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous nous sommes intéressés aux différents composants de la machine asynchrone et les défaillances qui affectent ces composants durant son fonctionnement.

Afin d'éviter un arrêt inattendu de la machine, causé par ces différents défauts, les chercheurs se sont focalisés sur la détection qui se base principalement sur la surveillance et

le diagnostiques des paramètres divers. C'est pourquoi nous présentons dans le prochain chapitre les techniques permettant de déceler les différentes anomalies.

## Chapitre II : Technique de diagnostic des défaillances

### II.1 Introduction

Au fil du temps, l'utilisation d'un appareil conduit à plusieurs pannes et défauts qui affectent le fonctionnement et le rendement de ce dernier. En effet, la maintenance nécessite de connaître les régimes de fonctionnement des systèmes, alors que la surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance, dans le but de garantir le bon fonctionnement de ces systèmes. Parmi les différents types qu'englobe la maintenance, on cite « la maintenance prédictive » qui représente un moyen préventif pour éviter et/ou réduire ces pannes et ces défauts. Elle est basée sur le diagnostic et la surveillance des différents paramètres de la machine. Ce qui sera détaillé ci-dessous.

### II.2 Maintenance

L'AFNOR, par la norme NFX60-010, définit la maintenance comme : « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ».

La définition de la maintenance fait donc apparaître trois notions :

- Maintenir qui suppose un suivi et une surveillance ;
- Rétablir qui sous-entend l'idée d'une correction de défaut ;
- État qui précise le niveau de compétence et les objectifs attendus de la maintenance.

#### ✚ Différent type de maintenance

Il existe deux façons complémentaires d'organiser les actions de maintenance :

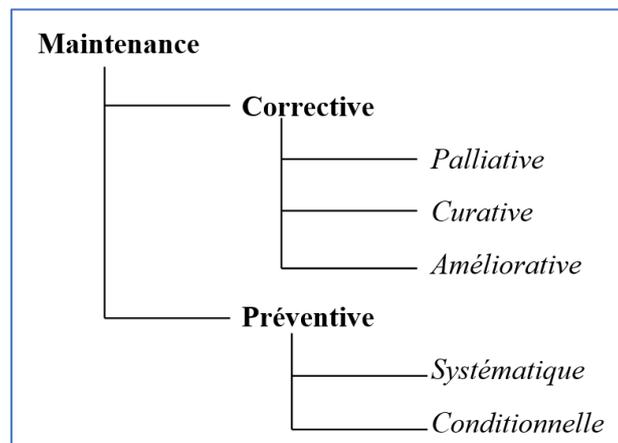


Figure II.1 Classification des méthodes de la maintenance

## **II.3 Diagnostic**

Est le processus d'évaluation d'un état de fonctionnement donné, il intègre différentes étapes : détection de l'état de fonctionnement, évaluation des causes de l'occurrence de cet état (identifier et analyser ces causes) et décision d'action pour modifier ce dernier.

### **II.3.1 Technique de diagnostic**

La surveillance et le diagnostic consistent à une détection et une analyse des signaux, contenant des informations spécifiques qui caractérisent la dégradation de la machine, à savoir des paramètres qui sont classés en, mécanique (vibration acoustique), thermique (température), électromagnétique (le flux) et électrique (les courants).

Ci-dessous, une brève description de ces paramètres :

#### **II.3.1.1 Analyse vibratoire**

La vibration d'une machine soumise à une force périodique peut être décrite en termes de déplacement, de vitesse ou d'accélération. La vitesse du mouvement vibratoire correspond à la variation de son déplacement pour une unité de temps. L'accélération représente une variation de la vitesse par unité de temps. Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, et son amplitude [13].

L'analyse vibratoire est l'un des plus importants moyens de tests pour comprendre l'état de la machine. Toutes les machines électriques produisent du bruit et des vibrations. Leur analyse peut être employée pour fournir des informations sur l'état de la machine. L'analyse se fait par la comparaison avec une valeur de référence.

Cette analyse permet une détection de la majorité des défauts, notamment ceux mécaniques, pouvant se produire sur le processus (Les défauts de roulement ; d'excentricité et de déséquilibre des rotors.....).

Cette analyse peut être réalisée à partir de capteurs, généralement des accéléromètres, placés sur les paliers. Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients :

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

- Le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs. Ceci laisse cette technique employée uniquement pour les grandes machines [14,15].

Le tableau ci-dessous (Tableau I.1) résume les caractéristiques de l'analyse vibratoire des défauts [15] :

Tableau I.1 : Analyses vibratoires, signatures fréquentielles

<b>Types de défaut</b>	<b>Signatures (par analyse vibratoire)</b>	<b>Commentaires</b>
Ruptures des barres Ruptures de portions d'anneaux	$fr \pm 2 \cdot g \cdot fs$ ( $g$ : le glissement)	Les vibrations axiales augmentent avec le nombre de barres cassées
Excentricité Statique Dynamique	Excentricité statique : $2 \cdot fs$ ou des composants à $Nr \cdot fr \pm fs$  Excentricité dynamique: $fr \pm 2 \cdot g \cdot fs$ ou $fr$	L'excentricité dynamique est fonction du temps et de l'espace ; L'excentricité statique est fonction de l'espace seulement
Désalignement	$Fr$ et $2 \cdot fr$ Principalement	Vibrations plus importantes dans la direction axiale
Déséquilibre mécanique	$Fr$	Au niveau de la charge notamment Vibrations plus importantes dans la direction axiale
Défaillances des paliers	$n \cdot fe$ et $n \cdot fi$ $fi \pm n \cdot fr$ avec : $n$ un nombre entier : 1,2,...	Bagues externes Bagues internes Ces composantes fréquentielles sont modulées par la vitesse

### **II.3.1.2 Analyse thermographique**

Toute machine électrique dissipe une certaine quantité de chaleur due aux pertes, soit mécanique, électrique ou magnétique. L'élévation de cette température apparaît dès l'apparition du défaut. La mesure de celle-ci peut donc donner accès à sa prévision.

Le diagnostic par mesure de température requiert en premier lieu la modélisation du comportement thermique de la machine électrique. Le modèle devrait simuler le comportement thermodynamique du stator et du rotor dans les états permanent et transitoire, y compris le transfert de chaleur à partir des enroulements du moteur au fer, et du fer vers l'air ambiant. Ce modèle devrait aussi tenir compte du type de construction de la machine. L'analyse de température nécessite une installation des capteurs au niveau de la machine [14].

### **II.3.1.3 Analyse du couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique développé dans la machine provient de l'interaction entre le champ statorique et le champ rotorique. Il permet la détection de défauts lors du fonctionnement de la machine. Cette méthode d'analyse peut détecter des déséquilibres engendrés par des barres de rotor cassées et des courts-circuits au stator... Le couple électromagnétique peut-être soit estimé ou mesuré [16,17].

### **II.3.1.4 Analyse acoustique**

La surveillance acoustique est réalisée en mesurant et en analysant le spectre de bruit acoustique généré par la machine asynchrone. Il est basé sur les mesures sonores. Lorsque des défauts apparaissent dans les machines leurs bruits changent. La surveillance acoustique a une forte relation avec la surveillance des vibrations pour détecter les défauts naissants dans les applications industrielles. Ces défauts détectés par des capteurs transforment le signal sonore en signal électrique [18].

### **II.3.1.5 Analyse du flux**

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion est donc affectée par tous déséquilibres magnétiques, mécaniques, électriques ou électromagnétiques au rotor et au stator [19].

Le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leur fabrication. L'étude des variations de flux peut donc être une solution pour

détecter et localiser un défaut à travers l'utilisation de bobines exploratrices placées à l'extérieur de la machine, perpendiculairement à l'axe du rotor.

En surveillant le flux, il est souvent possible d'identifier de nombreux défauts tels que des barres rotoriques cassées, court-circuit dans les enroulements statoriques et perte d'une phase. Il est particulièrement utile pour l'estimation de la vitesse, car il contient une forte composante à la fréquence de glissement [19].

### **II.3.1.6 Analyse des courants**

L'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux, de par sa capacité à détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques et son pouvoir à être facilement accessible. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter pour chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace) [19].

## **II.3.2 Méthode de diagnostic**

### **II.3.2.1 Méthode interne**

Cette méthode est particulièrement utilisée par les automaticiens, repose sur un modèle mathématique du système. Ce modèle comporte quelques paramètres. Lors du fonctionnement, les paramètres sont estimés et comparés aux grandeurs théoriques, le différentiel étant la signature du défaut. Si ce différentiel dépasse un certain seuil, la présence du défaut est signalée à l'utilisateur. On distingue trois types [20,21]:

- Technique d'estimation d'état ;
- Technique de génération de résidus ;
- Technique d'identification.

### **II.3.2.2 Méthode externe**

Le système de diagnostic par les méthodes externes est très répandu dans les applications industrielles, à cause de la difficulté liée à l'obtention de modèles physiques du procédé ou de ses composants. Ces méthodes reposent sur une reconnaissance de signatures déjà observées. Les signatures de défauts sont obtenues par modélisation ou par mesure sur maquette. Parmi les méthodes externes, nous trouvons [21]:

- La méthode par intelligence externe ;
- Méthode par traitement du signal.

## **II.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons cité les différentes techniques de diagnostic utilisées dans l'industrie pour la détection des signaux de différentes défaillances qui peuvent affecter la machine. Ces signaux sont traités par la méthode externe, plus précisément la méthode de traitement du signal, ce que nous allons détailler dans le chapitre qui suit.

## **Chapitre III : Méthodes de traitement de signal électrique**

### **III.1 Introduction**

Le contrôle et le diagnostic sont aujourd'hui d'importance dans la plupart des secteurs industriels. Ils consistent à mesurer des signaux physiques sur des machines, des installations industrielles..., puis grâce à leurs analyses, il s'agit de délivrer un diagnostic sur leur état mécanique.

Cette démarche permet de garantir et d'assurer la sécurité des biens et des personnes, de respecter les contraintes d'environnement, d'optimiser les opérations de maintenances et aussi d'assurer la disponibilité des machines. Dans ce chapitre nous allons traiter les méthodes de surveillances qui se base sur traitements des signaux (analyse temporelle, analyse fréquentielle et analyse temps fréquence).

### **III.2 Traitement de signal**

Le traitement du signal est une discipline indispensable de nos jours. Il a pour objet l'élaboration ou l'interprétation des signaux porteurs d'informations. Son but est donc de réussir à extraire un maximum d'informations utiles sur un signal.

### **III.3 Méthode de traitement de signal**

Le traitement de signal est basé sur l'exploitation du signal mesuré à l'aide des capteurs placés au voisinage de l'organe à surveiller. Il existe une multitude de méthodes : temporelle, fréquentielle et temps-fréquence. Ces méthodes sont complémentaires pour un meilleur diagnostic. Dans ce qui suit, on présente ces différentes méthodes :

#### **III.3.1 Analyse temporelle**

L'une des techniques les plus faciles et les moins coûteuses. Permet de détecter plusieurs phénomènes : la modulation d'amplitude et la variation de l'amplitude instantanée du signal. On retrouve classiquement la valeur RMS (root mean square) qui mesure l'énergie moyenne du signal ; la valeur crête à crête qui mesure le maximum d'amplitude entre les valeurs extrêmes du signal. Cependant, ces indicateurs représentent un inconvénient où ils ne donnent pas des renseignements sur l'état exact de dégradation du système, de ce fait

d'autres indicateurs sont apparus : le kurtosis qui permet d'analyser les répartitions d'amplitude dans un signal, le facteur crête et le facteur de forme [6,10].

$$\text{Crête (Peak) :} \quad \text{Peak} = \sup_{1 < i < N} |x_i| \quad (\text{III.1})$$

$$\text{RMS :} \quad \text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{III.2})$$

$$\text{Facteur crête :} \quad \text{Fc} = \frac{\text{Peak}}{\text{RMS}} \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Le kurtosis :} \quad \text{Ku} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (\text{III.4})$$

La représentation temporelle peut être suffisante dans les cas où la forme du signal et la nature du traitement restent simples, mais les signaux peuvent être complexes en raison de la nature de l'information qu'ils portent, ou en raison du traitement qu'ils doivent subir. Dans ces cas l'analyse fréquentielle intervient.

### III.3.2 Analyse fréquentielle

La surveillance effectuée par l'utilisation des indicateurs scalaires (analyse temporelle) permet de statuer d'une manière grossière sur la présence des éventuels défauts affectant la machine en question. Pour la détermination exacte de la nature du défaut, il faut impérativement faire appel à des outils plus évolués, à savoir, les méthodes fréquentielles (transformée de Fourier, analyse cepstrale, analyse d'enveloppe, ...).

Les méthodes fréquentielles sont basées sur la transformée de Fourier. La connaissance des fréquences caractéristiques permet d'identifier et de localiser les défauts issus des composants mécaniques en analysant leur spectre. Elles sont souvent utilisées pour les machines complexes [22].

#### III.3.2.1 Analyse spectrale

L'analyse en fréquence est devenue l'outil fondamental pour le traitement des signaux électriques et mécaniques. Elle s'appuie sur la transformée de Fourier (III.5) qui permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître le contenu spectral d'énergie ou de puissance, présent dans le signal à la fréquence

$f$ , et donc de détecter la présence d'un défaut générant un choc périodique à une fréquence de défaut [11].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2j\pi ft} dt \quad (\text{III.5})$$

où :  $X(f)$  : est la transformée de Fourier.

$T$  : est la variable temps.

$f$  : est la variable fréquence

### ✚ Transformée de Fourier Discrète

La transformée de Fourier est l'outil mathématique permettant d'obtenir une représentation fréquentielle des signaux déterministes. Elle a pour but de représenter l'amplitude, la phase, l'énergie ou la puissance d'un signal en fonction de sa fréquence notée «  $f$  » et permet ainsi son analyse spectrale ou harmonique. La transformée de Fourier est l'analyse d'un signal sous forme d'une infinité de composantes sinusoïdales complexes.

La transformée de Fourier a été largement utilisée dans le domaine de diagnostic des défauts pour localiser les fréquences caractéristiques de défauts. Dans la pratique, plus particulièrement pour des signaux numériques, on utilise la transformée de Fourier discrète rapide (Fast Fourier Transform, FFT) [11], elle est définie par :

$$X(K\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(n\tau)e^{-j2\pi K\frac{n}{N}} \quad (\text{III.6})$$

où :

$X(K\Delta f)$  : La transformée de Fourier discrète rapide.

$\tau$  : La période d'échantillonnage du signal temporel.

$n$  : Le numéro de l'échantillon.

### III.3.2.2 Analyse cepstrale

C'est la représentation de la transformée de Fourier du spectre. L'image obtenue est une courbe en fonction du temps. Mathématiquement, le cepstre d'un signal  $x(t)$  est la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de sa transformée de Fourier directe (III.6) :

$$C[S(t)] = TF - 1 \log(TF[S(t)])2 \quad (\text{III.7})$$

L'analyse cepstrale est utilisée pour la détection de défauts de type instationnaire. Il permet d'identifier et de quantifier toutes les composantes périodiques (peignes de raies ou familles de bandes latérales de modulation) contenues dans un spectre [7, 12].

### **III.3.2.3 Analyse d'enveloppe**

L'analyse d'enveloppe est une méthode qui permet de détecter des chocs périodiques à partir des résonances de structure (carters, paliers, bagues de roulement). En effet, les défauts de type choc excitent les hautes fréquences des structures, ainsi un phénomène de modulation se produit entre la fréquence de défaut (basse fréquence) et la résonance de structure (haute fréquence). Après avoir démodulé le signal, le spectre d'enveloppe fera donc mieux apparaître les raies d'impulsions dues au défaut. En pratique, pour obtenir le spectre du signal d'enveloppe, il faut suivre les étapes suivantes [9]:

- Déterminer les fréquences de résonance ;
- Filtrer, avec un filtre passe bande, le signal temporel autour des fréquences de résonance ;
- Calculer le signal d'enveloppe à l'aide de la transformée d'Hilbert ;
- Calculer le spectre d'enveloppe à l'aide de la transformée de Fourier.

### **III.3.3 Analyse temps-fréquence**

En utilisant les deux représentations d'un signal électrique/mécanique dans les deux domaines précédents, plusieurs indicateurs peuvent être obtenus. Mais quand le contenu spectral du signal change dans le temps, les indicateurs extraits dans un seul domaine (temporel ou spectral) ne sont pas suffisants pour représenter le signal. Plusieurs méthodes ont été proposées pour remédier à ce problème. La transformée de Fourier à court terme (TFCT) ou bien encore connue sous le nom de Short-Time Fourier Transform (STFT), la distribution Wigner-Ville (DWV), ou la technique à base d'ondelette, sont les distributions temps -fréquence la plus utilisée [22, 23].

#### **III.3.3.1 Transformée de Fourier à court terme (TFCT)**

Cette méthode permet d'analyser les signaux variables dans le temps de façon aperiodique. Mathématiquement, elle présente une distribution linéaire du temps et de la fréquence. Les distributions de temps (ou de la fréquence) sont normalement utilisées pour diagnostiquer les défauts dans les systèmes mécaniques. Ces distributions peuvent être

extraites avec précision des fréquences désirées d'un signal non stationnaire. La TFCT d'un signal continu dans le temps  $X(t)$  est définie comme suit :

$$TFCT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j2\pi f t} dt \quad (III.8)$$

Où  $w(t)$  est la fonction fenêtre dont la position a été traduite dans le temps.

Si la variation d'un signal au cours d'analyse est relativement lente, il peut être supposé que le signal soit stationnaire dans l'ensemble du calcul de la TFCT. Le nombre de calculs TFCT nécessaire dépend de la longueur du signal échantillonné et de la taille de la fenêtre utilisée pour segmenter le signal. Malgré sa simplicité de mise en œuvre et sa performance raisonnable, cette méthode reste limitée par le fait que la longueur de la fenêtre temporelle influence la fréquence de résolution. L'augmentation de la largeur de la fenêtre conduit à une amélioration de la fréquence de résolution. Cela signifie que l'information provenant des signaux non stationnaires appartenant à cette largeur risque de se perdre. Ce rapport intrinsèque entre le temps et la fréquence de la résolution devient plus critique lorsque la TFCT qui traite les signaux dans la fréquence est en évolution constante [24].

### **III.3.3.2 Transformé d'ondelette**

Contrairement à la TFCT, la transformée d'ondelette (TO) est une méthode de traitement de signaux possédant une résolution adaptative à la taille de l'objet ou du détail analysé. De même que pour la transformée de Fourier cette technique décompose le signal dans une base de fonction particulière, sauf que ces fonctions « appelées ondelettes », contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier, sont des fonctions oscillantes au sens large et peuvent être rapidement amorties.

Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, une ondelette dilatée observe les composantes basses fréquences nécessitant une large fenêtre temporelle, alors qu'une ondelette contractée observe les composantes hautes fréquences où une haute résolution temporelle est requise.

Les éléments de base de la Transformée en Ondelettes sont des fonctions localisées en temps autour d'un paramètre 'b' et oscillant à une fréquence 'a'. Et sont générées par translation 'b' et dilatation 'a' à partir d'une fonction, l'ondelette mère de moyenne nulle, comme montrée dans l'équation (III.9) :

$$\Psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III.9})$$

La transformée en Ondelettes d'une fonction  $(t)$  est définie au moyen du produit scalaire montré par l'équation (III.10) conduisant à une représentation temps-échelle en fonction des variables décalage et échelle.

$$X_{TOC}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) * \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{III.10})$$

Une discrétisation de la transformée est possible en posant  $2^m$  et  $n2^m$  aux lieux des paramètres 'a' et 'b', avec 'm' et 'n' des entiers, comme montré dans l'équation (III.11)

$$X_{TOD}(n,m) = 2^{\frac{-m}{n}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) * \Psi^*(2^{-m}(t-n)) dt \quad (\text{III.11})$$

Dans le cadre des signaux numériques, L'analyse multi Résolution en Ondelette (AMRO) est largement utilisée, permettant de décomposer un signal, en sous-bandes fréquentielles, sans perte ou redondance d'informations.

Cette technique génère à chaque niveau un coefficient d'approximation contenant l'information (basses fréquences), et un coefficient de détail contenant l'information (hautes fréquences) du signal d'origine [23].

### III.3.4 Simulation d'un signal du courant statorique

Un exemple de simulation d'un défaut au rotor d'une machine asynchrone est donné par la formule (III.13). Évidemment, n'importe quelle oscillation dans le couple de charges à un multiple de la fréquence de rotation  $f_r$  induira les fréquences correspondantes dans le spectre du courant statorique à [4] :

$$f_{\text{défaut}} = (1 \pm 2ks)f \quad (\text{III.12})$$

avec  $f$  : fréquence d'alimentation,  $s$  : glissement et  $k = 1, 2, 3 \dots$  ce signal est constitué d'une modulation  $(f \pm 2ksf)$  de trois fréquences de défaut 3, 6 et 9 Hz, autour de la fréquence porteuse de 50 Hz.

$$x(t) = \cos(2\pi 50 t)[1 + 0.2 \cos(2\pi 3 t) + 0.15 \cos(2\pi 6t) + 0.1 \cos(2\pi 9t)] \quad (\text{III.13})$$

Le signal  $x(t)$  est analysé dans le domaine fréquentiel, ensuite dans le domaine du temps-fréquence, afin d'estimer les fréquences du défaut. Les résultats de ces analyses sont présentés sur la Figure III.1, comme nous pouvons le constater, le spectre ainsi que le spectrogramme du signal  $x(t)$  montrent des bandes latérales de fréquences autour de la fréquence d'alimentation 50 Hz ( $f \pm 2ksf$ ). Pour déterminer les fréquences de défaut, le signal est démodulé en utilisant l'analyse d'enveloppe. Ainsi, les trois fréquences sont facilement isolées et sont bien claires sur le spectre d'enveloppe.

Le spectrogramme sert à estimer la variation des fréquences de défaut, puisque ces fréquences varient en fonction de la vitesse de rotation des machines. Comme c'est le cas au démarrage ou à l'arrêt de ces machines. Dans notre étude, nous nous contentons d'étudier les défauts lors des vitesses de rotation constantes.

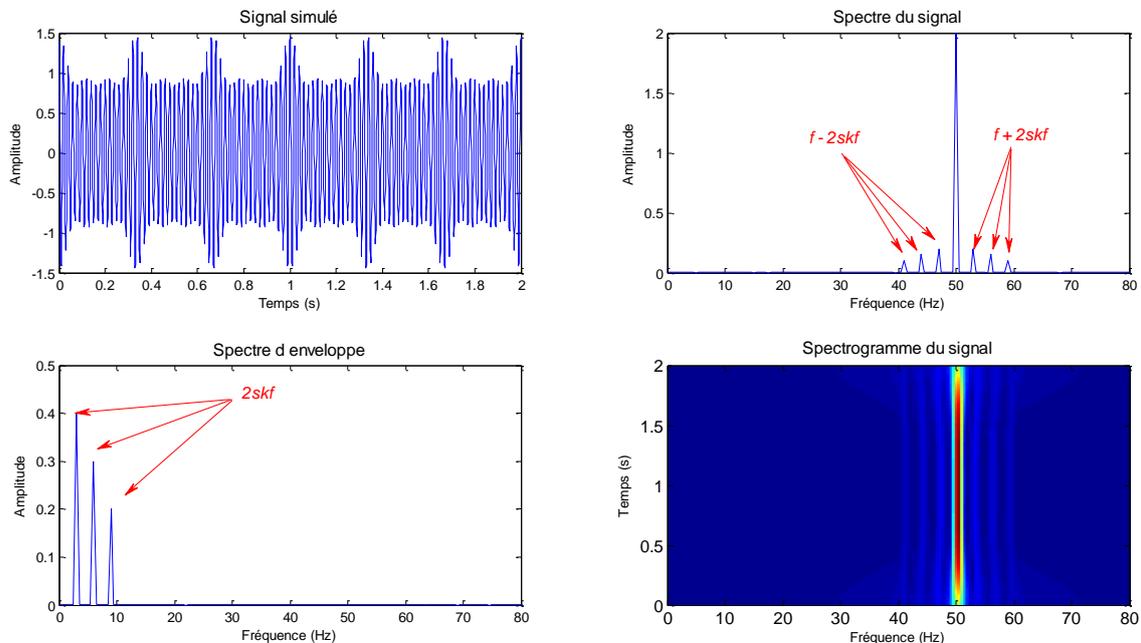


Figure III.1 Analyse du signal simulé : représentation temporelle, analyse fréquentielle, analyse d'enveloppe et son spectrogramme calculé par la TFCT

### III.4 Conclusion

Ce chapitre rappelle les principes de base de l'analyse et le traitement de signal appliqué à la maintenance prédictive, qu'elle soit temporelle (RMS, facteur crête, kurtosis...), fréquentielle (spectrale, enveloppe) ou temps-fréquence (TFCT, ondelette), tout en soulevant l'intérêt de leur utilisation.

L'analyse des signatures électriques est l'un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une politique de maintenance prévisionnelle de l'outil de production industrielle.

Les objectifs d'une telle démarche sont de :

- réduire le nombre d'arrêts de la machine ;
- fiabiliser l'outil de production ;
- augmenter son taux de disponibilité ;
- mieux gérer le stock de pièces de rechange.

## **Chapitre IV : Diagnostic des courants statoriques d'une MADA**

### **IV.1 Introduction**

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total.

Ce chapitre présente la prévision et la mesure du signal d'une machine asynchrone à double alimentation sous le déséquilibre électrique du rotor (DER), à différents niveaux de défaut par l'analyse du courant statorique, cette méthode est un outil puissant pour détecter la présence des défauts mécaniques et électriques. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes, parce qu'elle ne demande ni l'introduction d'un capteur au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant, mais seulement un capteur de courant (sonde à effet de hall ou transformateur de courant) qui donne une image sur le courant statorique.

### **IV.2 Description de la machine étudiée (la MADA)**

La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobine alimentée par ses deux armatures. Elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode génératrice appelée GADA ou DFIG (Doubly Fed Induction Generator) dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens, ou en mode moteur appelé DFIM (Doubly Fed Induction Motor) pour des applications d'entraînement à vitesse variable. Le schéma de la figure IV.1 représente le symbole d'une MADA.

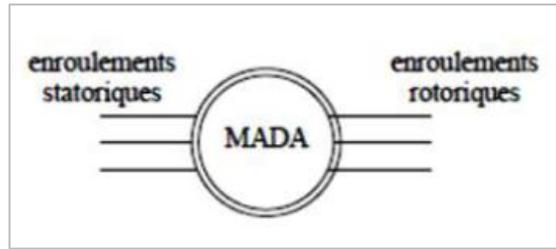


Figure IV.1 Symbole d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA)[24]

Elle a le surnom de « machine généralisée » vue sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor via une interface électronique, il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance. Elle est excitée simultanément au stator et au rotor respectivement, avec deux fréquences imposées par deux sources d'alimentations [24].

### IV.3 Description et présentation du banc d'essais

Dans l'objectif de mener une étude expérimentale sur le déséquilibre électrique rotorique qui peut survenir sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), l'université de Durham (Angleterre) a effectué des recherches expérimentales sur un banc d'essai, illustré sur la Figure 12. Ce banc est constitué principalement d'une GADA industrielle (ou DFIG) à 4 pôles, triphasée, 240 V, 50 Hz, 30 kW. La résistance de phase nominale du rotor du générateur était de  $0.066 \Omega$ . La GADA était couplée mécaniquement à un moteur CC de 40 kW, utilisé pour entrainer la GADA à une vitesse constante prédéterminée pendant les expériences.

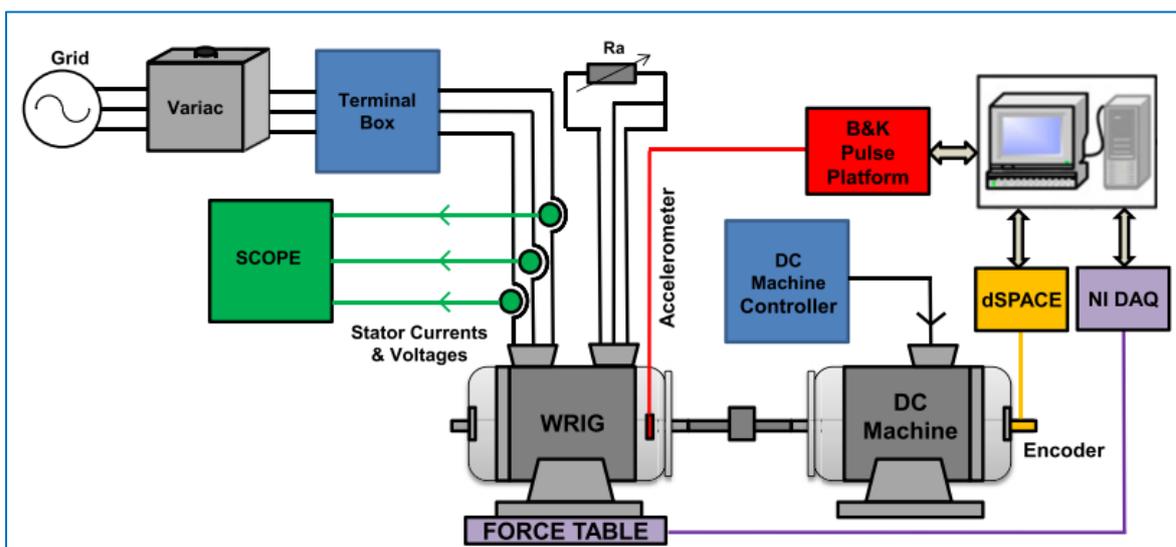


Figure IV.2 Schéma d'expérience sur le banc d'essai et les instruments d'acquisition des mesures électriques et mécaniques [25]

Les enroulements du stator de la génératrice étaient connectés au réseau via un transformateur variable triphasé, tandis que les enroulements du rotor étaient en court-circuit. Les conditions de déséquilibre électrique du rotor (DER) ont été émulées en introduisant une résistance supplémentaire dans un enroulement de phase du rotor. Une résistance externe de  $R_a \approx 0.198\Omega$  est ajoutée à une phase du rotor pour créer le DER de 300%. Les essais ont été menés pour trois vitesses différentes (1530tr/min, 1560tr/min et 1590tr/min) afin de capturer différents aspects du comportement de la machine, tel que la variation de la charge. Les signaux surveillés ont été enregistrés pendant le fonctionnement du générateur avec un capteur du courant statorique à effet hall.

Les spectres ont été examinés sur une bande passante de 0-450Hz pour les signaux des courants statoriques  $I_s$ . Dans notre cas, nous avons sélectionné les signaux mesurés et calculé leurs spectres et spectres d'enveloppe à l'aide du logiciel Matlab pour les différents cas de vitesse avec différentes conditions [25].

#### **IV.4 Diagnostic en présence d'un déséquilibre électrique au rotor**

Le stator, plutôt soumis à des contraintes électriques que mécaniques, présente essentiellement comme les : court-circuit, surtensions, surcharges, et déséquilibres. Ces derniers créent un champ inverse au champ tournant. Les spectres des courants électriques de la machine dans des conditions équilibrées sont définis par un ensemble de fréquences caractéristiques, appelées fréquences porteuses (FP). Elles sont décrites par les équations du tableau IV.1 [25].

Tableau IV.1 Courant  $I_s$ , Fréquences porteuses (FP) et leurs bandes latérales à  $\pm 2nsf$

Grandeur mesurée	Expressions analytiques	
	Rotor équilibré (FP)	Rotor déséquilibré (FP $\pm 2nsf$ )
Courant statorique $I_s$	$ i \pm 6k(1 - s) f$	$ (i \pm 2ns) \pm 6k(1 - s) f$

Ces fréquences sont un artefact de la conception du générateur et du contenu harmonique d'alimentation, et dépendent du : glissement ( $s$ ) du rotor, fréquence d'alimentation ( $f$ ), ordre des harmoniques d'alimentation ( $i$ , ou  $i = 1,2,3\dots$ ) et nombre de paires de pôles du champ magnétique dans l'entrefer ( $k$ , où  $k = 1,2,3\dots$ ). Les expressions FP du tableau IV.1 contiennent deux sous-groupes distincts :

- Porteuses d'harmoniques liées à la fréquence d'alimentation (H), artefacts d'harmoniques d'alimentation invariants par rapport à la vitesse du rotor, correspondant à  $k = 0$  ;
- Porteuses d'harmoniques liées à la fréquence d'encoches (S), fréquences interharmoniques dépendant de la vitesse du rotor due à l'encoche, correspondant à  $k \neq 0$  et  $i \neq 0$  pour le courant.

Le déséquilibre électrique au rotor (DER) donne naissance à des bandes latérales supplémentaires de  $\pm 2nsf$  autour des composantes FP existantes dans les spectres du courant  $I_s$ . Où  $n$  prends une valeur entière, c.-à-d.  $n = 1, 2, 3 \dots$ . La troisième colonne du Tableau IV.1 résume les expressions analytiques décrivant le contenu spectral possible du signal MADA tournant avec un défaut DER, dérivées en tenant compte des bandes latérales  $2nsf$  autour des FP, c'est-à-dire  $FP \pm 2nsf$ . Les équations des bandes latérales induites par le défaut DER peuvent être résolues en deux sous-groupes distincts selon qu'elles correspondent à des bandes latérales harmoniques d'alimentation (HL et HU) ou à des bandes latérales d'harmoniques à la fréquence d'encoches (SL et SU), où les indices L et U (Lower&Upper) désignent des valeurs inférieures et supérieures des bandes latérales à  $2sf$  autour des composantes FP, respectivement.

Selon les paramètres de la machine du banc d'essai, nous calculons les fréquences caractéristiques des bandes latérales liées à la fréquence porteuse (FP) ; soit la fréquence d'alimentation qui est de 50 Hz, soit la fréquence des encoches qui est de 268 Hz. Par exemple, les tableaux IV.2 et IV.3 donnent une prévision des valeurs de quelques fréquences modulées ( $FP \pm 2nsf$ ) autour des deux fréquences porteuses pour une vitesse de rotation de 1590 tr/min.

Tableau IV.2 Fréquences caractéristiques des bandes latérales liées à la fréquence d'alimentation (FP)

<i>i</i>	<i>k</i>	Harmoniques de fréquence d'alimentation (FP) HI		Bandes latérales autour des FP			
		FP	Hz	FP-2sf	Hz	FP+2sf	Hz
1	0	HI <sub>1</sub>	50	HI <sub>1L</sub>	44	HI <sub>1U</sub>	56
3	0	HI <sub>3</sub>	150	HI <sub>3L</sub>	144	HI <sub>3U</sub>	156
5	0	HI <sub>5</sub>	250	HI <sub>5L</sub>	244	HI <sub>5U</sub>	256
7	0	HI <sub>7</sub>	250	HI <sub>7L</sub>	344	HI <sub>7U</sub>	356

Tableau IV.3 Fréquences caractéristiques des bandes latérales liées à la fréquence d'encoches (FP)

<i>i</i>	<i>k</i>	Harmoniques de fréquence d'encoches (FP) SI		Bandes latérales autour des FP			
		FP	Hz	FP-2sf	Hz	FP+2sf	Hz
1	1	Sl <sub>1</sub>	268	Sl <sub>1L</sub>	262	Sl <sub>1U</sub>	274
1	1	Sl <sub>2</sub>	368	Sl <sub>2L</sub>	362	Sl <sub>2U</sub>	374

#### IV.4.1 Analyse spectrale

Pour analyser les signaux du courant mesurés au stator sur le banc d'essai pour différentes vitesses de rotation (1530, 1560 et 1590 tr/min) et différentes sévérités du défaut (0, 150, 225 et 300%), nous avons calculé les spectres des signaux en premier lieu. Ceci nous permet d'identifier les fréquences des modulations autour des fréquences porteuses et de faire une analyse des différentes amplitudes correspondantes et de déterminer si elles sont proportionnelles à la sévérité du défaut.

L'analyse spectrale a été réalisée en utilisant l'algorithme de la transformée de fourrier pour identifier les composantes de fréquence des défauts. Les spectres calculés pour les signaux de mesures à différents états de la machine, saine et défectueuse, sont montrés sur les Figures IV.3, IV.4 et IV.5, pour les trois vitesses de rotation respectives.

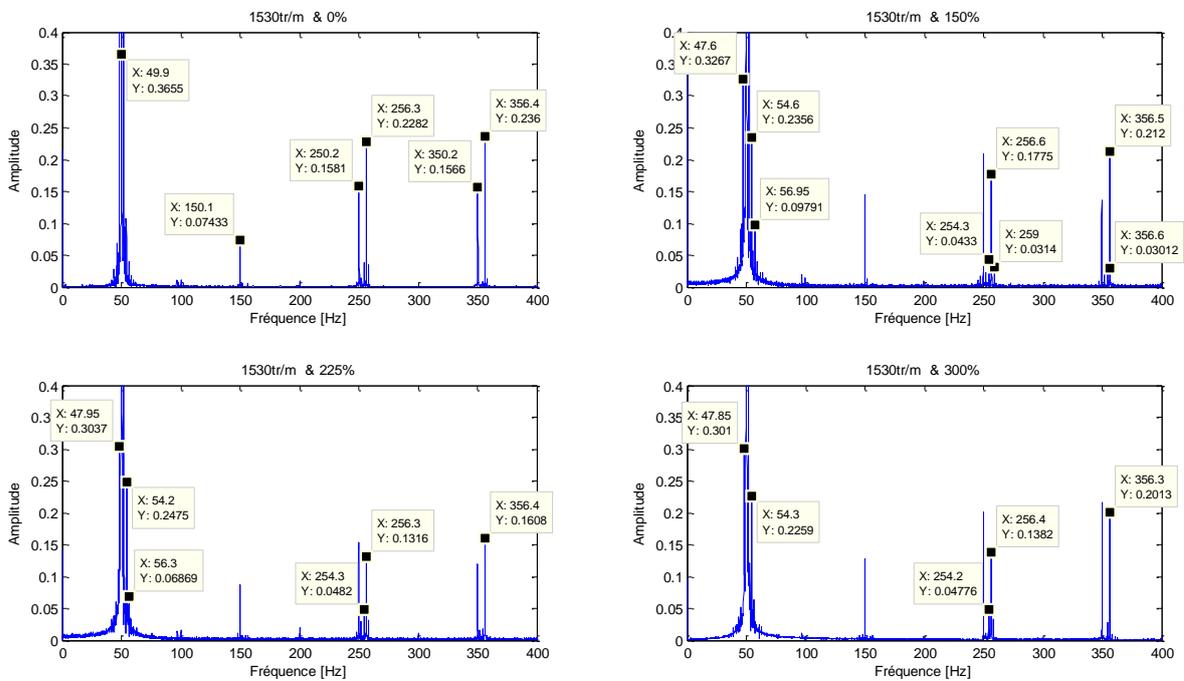
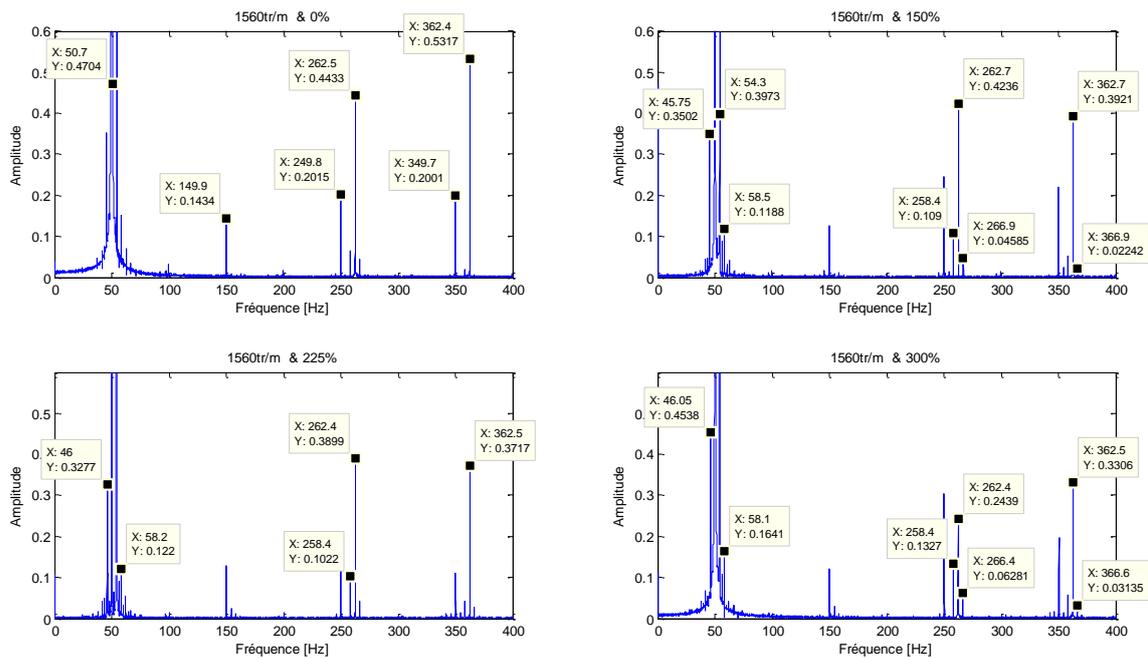


Figure IV.3 Spectres des signaux mesurés sur la machine en état équilibré et sous trois sévérités DER (150, 225 et 300%) pour la vitesse de 1530 tr/m

Sur les spectres calculés à 0% de DER pour les trois vitesses, nous pouvons voir des composantes de fréquence à  $FP \pm 2sf$  qui sont présentes, mais de faibles amplitudes dans les spectres de la machine saine qui sont due à des déséquilibres électriques rotoriques causés par l'excentricité naturelle. Les spectres calculés à 150% ,225%, 300% de DER montrent que les composantes fréquentielles augmentent en amplitude avec l'augmentation du déséquilibre électrique au rotor à des fréquences  $FP \pm 2sf$ . Ces amplitudes sont montrées sur les figures.

Ce constat est valable pour les amplitudes des bandes latérales autour des deux fréquences porteuses (fréquence d'alimentation, et fréquence d'encoches) et cela montre aussi que la variation de vitesse, c.-à-d. la variation de la charge, influence sur les amplitudes de ces bandes latérales. Cependant, nous ne pouvons confirmer la relation proportionnelle de l'évolution de ces amplitudes par rapport à la sévérité de défaut DER et la variation de la charge. Pour cela nous procédons à la démodulation de ces fréquences qui caractérisent le défaut, et nous analyserons les spectres d'enveloppe obtenus.



**Figure IV.4 Spectres des signaux mesurés sur la machine en état équilibré et sous trois sévérités DER (150, 225 et 300%) pour la vitesse de 1560 tr/m**

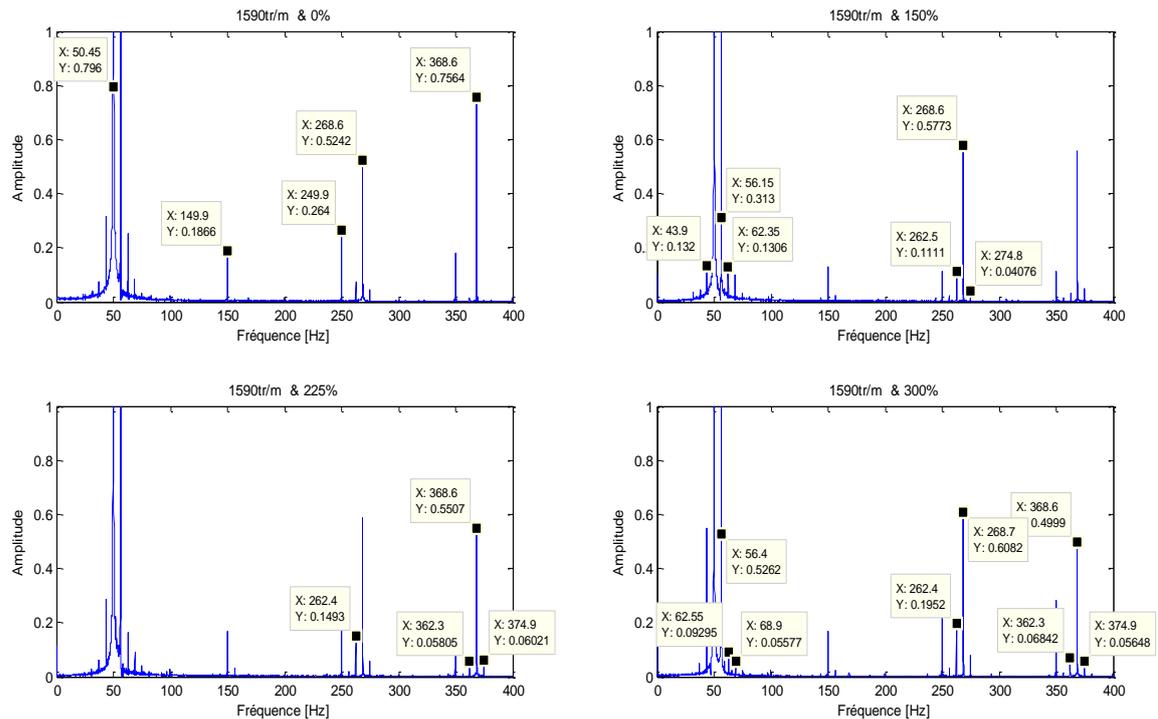


Figure IV.5 Spectres des signaux mesurés sur la machine en état équilibré et sous trois sévérités DER (150, 225 et 300%) pour la vitesse de 1590 tr/m

#### IV.4.2 Analyse d'enveloppe

Les spectres du courant statorique fournissent des informations sur l'état de la machine, mais ces informations ne sont pas suffisantes. Afin de trouver la fréquence démodulée, on utilise l'analyse d'enveloppe. Les spectres d'enveloppe calculés pour les signaux de mesure à différents états de la machine, saine et défectueuse, sont montrés sur les Figures IV.6, IV.7 et IV.8, pour les trois vitesses de rotation respectives.

Considérant le rotor défectueux, les fréquences de défaut (2sf) sont clairement évidentes sur les spectres d'enveloppe, on peut facilement observer la présence d'un défaut au niveau du rotor. Par comparaison avec l'état sain, nous observons des pics d'amplitude importants, d'où nous pouvons remarquer que la variation de la gravité de DER influence sur l'apparition des pics d'amplitude, et de même pour la variation de vitesse telle que nous déduisons que plus que la charge, et la vitesse, augmente plus on aura des amplitudes plus élevées.

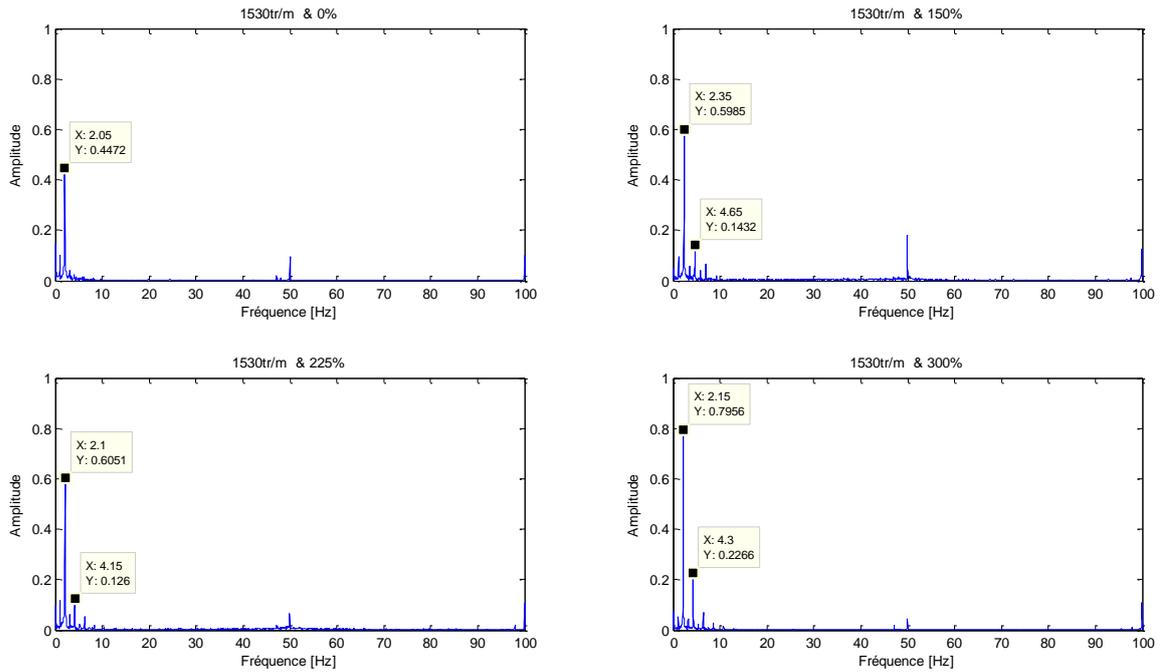


Figure IV.6 Spectres d'enveloppe des signaux mesurés sur la machine en état équilibré et sous trois sévérités DER (150, 225 et 300%) pour la vitesse de 1530 tr/m

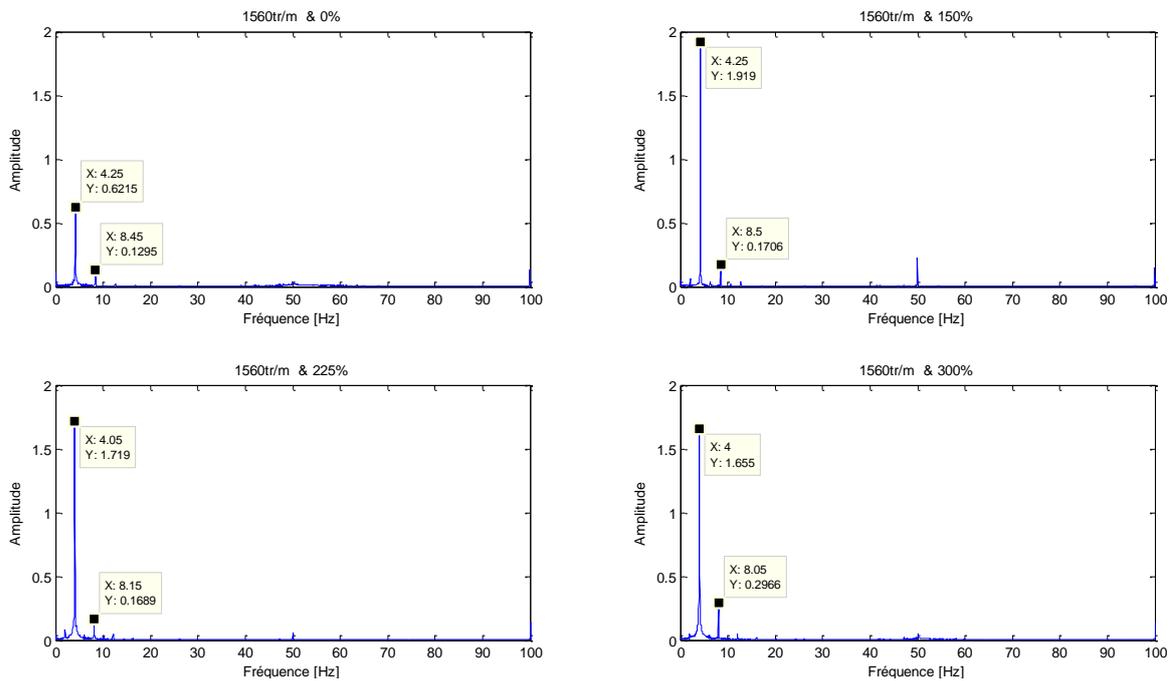


Figure IV.7 Spectres d'enveloppe des signaux mesurés sur la machine en état équilibré et sous trois sévérités DER (150, 225 et 300%) pour la vitesse de 1560 tr/m

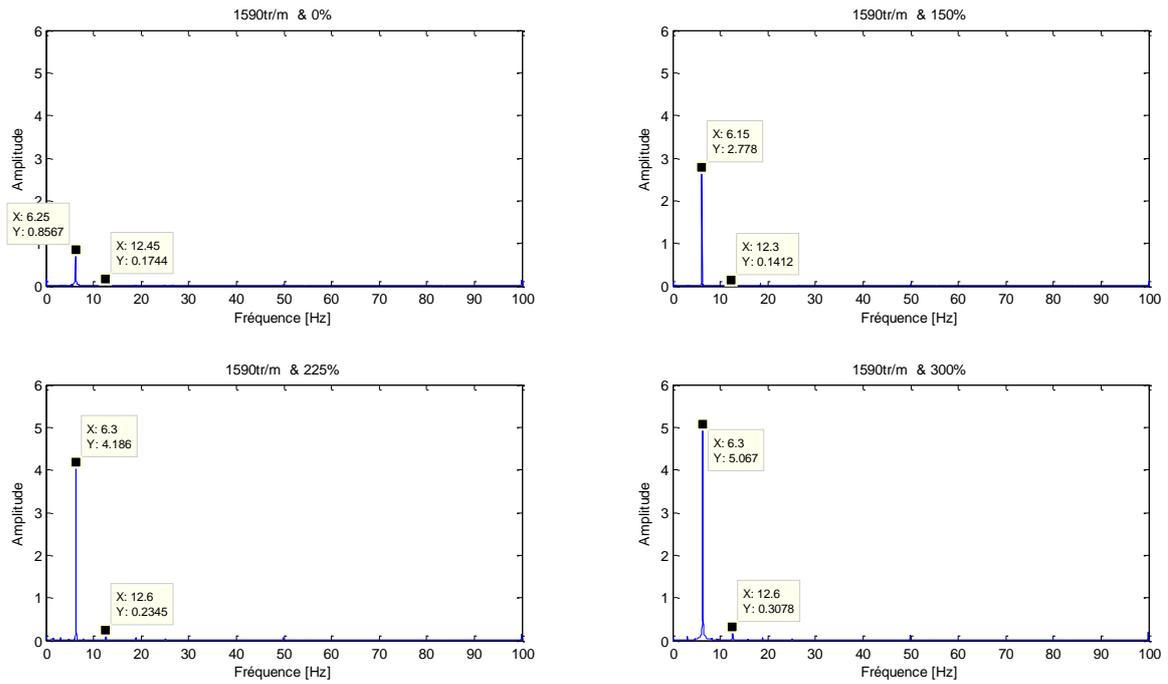


Figure IV.8 Spectres d'enveloppe des signaux mesurés sur la machine en état équilibré et sous trois sévérités DER (150, 225 et 300%) pour la vitesse de 1590 tr/m

Le tableau IV.4 montre les valeurs des amplitudes correspondantes à la fréquence du premier harmonique ( $2sf$ ) en fonction de la vitesse et de la gravité du défaut. Ces valeurs montrent bien que les amplitudes du premier harmonique de la fréquence du défaut ( $2sf$ ) augmentent avec l'augmentation de la gravité du déséquilibre électrique et avec l'augmentation de la vitesse de rotation, et la charge.

Tableau IV.4 Amplitudes correspondants au premier harmonique de la fréquence de défaut ( $2sf$ ) pour les différentes vitesses de rotation et DER

Vitesse de rotation (tr/min)	Amplitude du premier harmonique ( $2sf$ )		
	1530	1560	1590
Machine sans défaut 0%	0.4472	0.6215	0.8554
Machine avec 150% de DER	0.5985	1.919	2.778
Machine avec 225% de DER	0.6051	1.719	4.186
Machine avec 300% de DER	0.7956	1.655	5.067

Sur la Figure IV.9 sont tracées les variations de ces amplitudes en fonction de la gravité du défaut DER et la vitesse de rotation (la charge). On voit clairement que ces amplitudes croient avec la gravité du défaut DER et l'augmentation de la charge. Il s'est avéré que la gravité DER et de la charge du générateur sont bien les facteurs qui influence la capacité de reconnaissance des défauts des bandes latérales à  $2sf$  identifiées.

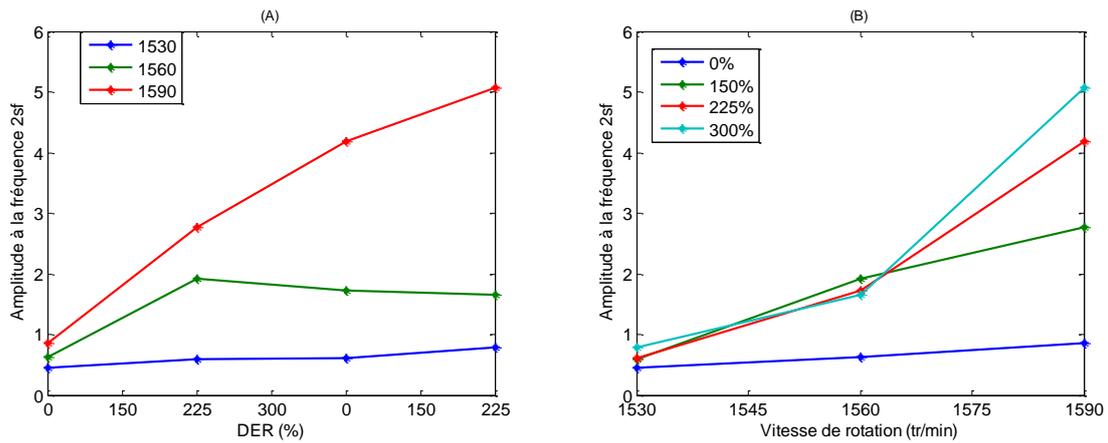


Figure IV.9 Évolution de l'amplitude à la fréquence du défaut (2sf) : (A) pour différentes vitesses de rotation en fonction de la sévérité du défaut, et (B) pour différentes sévérités du défaut en fonction de la vitesse de rotation

## IV.5 Conclusion

Le diagnostic des défauts par l'analyse du courant statorique, a été l'objet de notre étude, cette approche reste largement la méthode la plus utilisée pour plusieurs raisons, notamment à cause de l'accessibilité du courant statorique et la disponibilité des capteurs de courant souvent embarqués dans les systèmes de commande.

Les méthodes d'analyses utilisées dans ce chapitre sont l'analyse spectrale, et l'analyse d'enveloppe. L'analyse spectrale a montré que la présence du défaut de déséquilibre électrique modifie le spectre du courant en aggravant l'amplitude des harmoniques porteuses (harmonique d'alimentation ou d'encoche) et les bandes latérales spécifiques du courant, permettant, ainsi, une reconnaissance claire des défauts, donc on peut les considérer comme des indicateurs de fiabilité de diagnostic. Par ailleurs, l'analyse d'enveloppe, classée parmi les techniques les plus efficaces, nous a montré la présence de la raie spectrale qui correspond au défaut de déséquilibre électrique, ainsi que l'influence de la charge et de la gravité du défaut. Par conséquent, il est impératif de détecter ces anomalies à un stade précoce afin d'éviter des dégâts plus importants sur la machine et les équipements qui lui sont reliés.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

En maintenance prédictive, la détection précoce d'un défaut constitue l'une des étapes les plus importantes. De nos jours, beaucoup de techniques de diagnostic des équipements industriels ont été proposées par les chercheurs. Souvent, on fait appel à un outil universel, l'analyse de la signature électrique. Cela consiste à mesurer les courants circulant dans les câbles de raccordement de la machine. L'analyse des courants a fait ses preuves en permettant de détecter pratiquement les défauts susceptibles d'apparaître sur les machines électriques à l'aide des capteurs.

Dans notre étude, nous avons exposé les principales défaillances de la machine asynchrone triphasée, puis on a rappelé les éléments théoriques des méthodes de traitement du signal dans le domaine temporel ou fréquentiel. Afin de confirmer les expressions théoriques déjà établies, nous avons commencé par un essai avec une machine saine afin d'établir la présence d'une défaillance puis la machine a été modifiée par un déséquilibre électrique au niveau du rotor dans le but de simuler les défauts électriques.

L'étude analytique de défaut nous a permis d'analyser et d'expliquer l'influence du déséquilibre électrique au rotor sur le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation. Une analyse spectrale par la transformée de Fourier rapide est appliquée sur les signaux du courant statorique, afin de déterminer la composition fréquentielle de ces signaux et par conséquent, trouver les harmoniques caractérisant le défaut. Il s'est avéré que la détection des défauts est plus aisée si l'on applique l'analyse d'enveloppe sur les signaux du courant statorique. Nous avons, d'ailleurs, montré l'influence de la charge et la gravité du défaut sur les composantes spectrales caractérisant un défaut de déséquilibre électrique au rotor d'une génératrice à double alimentation.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] B.Raison, détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique, Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, septembre 2000
- [2] R. Casimir, Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes. Thèse de doctorat, École doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, décembre 2003
- [3] S. Bachir, Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique. Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, décembre 2002
- [4] G. Didier, Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances, Thèse de doctorat, Université Nancy 1, France, 2004
- [5] C. Mokhtar, Recherche de signatures électromagnétiques des défauts rotoriques dans la machine asynchrone par la méthode E.S.P.R.I.T, mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magistère, Université d'ORAN
- [6] Y Imaouchen, Mesure et analyse des vibrations des machines électriques tournantes Thèse de doctorat, Université de Bejaia, novembre 2015
- [7] M. El Badaoui. Contribution au Diagnostic vibratoire des Réducteurs complexes à Engrenages par l'Analyse Cepstrale. Thèse de Doctorat Université Jean Monnet St Etienne préparée au LASPI, juillet 1999.
- [8] Jean HENG, Pratique de la maintenance, 4<sup>ème</sup> édition Dunod, 2017
- [9] C.Breneur. Éléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements. Thèse de Doctorat, INSA-Lyon, 2002.
- [10] J. Antoni, M. Sidahmed, Contrôle et diagnostic à partir des signaux acoustiques et vibratoires, acoustiques & techniques n° 38, 2004  
[https://www.bruit.fr/revues/78\\_10455.PDF](https://www.bruit.fr/revues/78_10455.PDF)
- [11] Ziani Ridha, Contribution à l'analyse et à la classification automatique des défauts mécaniques, Thèse de doctorat à l'université Ferhat Abbas, 2015
- [12] MR HARIR MILOUD, étude des défauts dans la machine asynchrone à cage d'écureuil par l'emploi de la fonction d'enroulement modifiée. Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister 2008/2009, Université d'Oran Mohamed Boudiaf
- [13] F. Landolsi, cours de Techniques de surveillance, support de cours département de génie mécanique, ISET de Nabeul, Tunisie, 2010

- [14] J.A.Farooq, Étude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents, Thèse de doctorat, Université de Belfort, 2008
- [15] P.J. Travner, B.G. Gaydon and D.M. Ward, monitoring generator and large motors, I.E.E. Proceeding B. - Electric Power Applications, volume 133 (3), May 1986
- [16] J.P Caron et JP Hautier, Modélisation et Commande de La Machine asynchrone, Édition Technique, Paris, 1995
- [17] A. Lebaroud, Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la Machine asynchrone associée à des sources variables, thèse de doctorat, université de Constantine, 2006.
- [18] Y.Traichi, on induction machine faults detection using advanced parametric signal processing techniques, thèse de doctorat de l'Université de Bretagne occidentale - Brest, 2017
- [19] G. B. Kliman, J. Stein, 'Methods of Motor Current Signature Analysis', Journal of Electric Machines and Power Systems, Volume 20 (5), 1992
- [20] Jean-Claude Trigeassou, Diagnostic des machines électriques, Édition Lavoisier, Paris, 2011
- [21] E. F. Kherkhachi, Diagnostic du système isolant des machines électriques par identification paramétrique, Thèse de doctorat, université de Nantes, octobre 2015
- [22] O. DJEBILI, Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants : Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement, Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, septembre 2013
- [23] I. KHELFI, Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificielle thèse de doctorat, Université BADJ MOKHTAR –ANNABA, 2013
- [24] BEKAKRA Youcef, étude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (mada) par différentes techniques avancées. Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister, Centre Universitaire d'El-oued Institut de Sciences et Technologie, juin 2010
- [25] D. Zappala, N. Sarma, S. Djurovic, C.J. Crabtree, A. Mohammad, P.J. Tavner, Electrical & mechanical diagnostic indicators of wind turbine induction generator rotor faults, Renewable Energy, vol 131, pages 14-24, 2019

## Résumé

De nos jours la détection des défauts dans les machines électriques est devenue un enjeu très important, cela rentre dans le domaine de la maintenance prédictive. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la détection d'un déséquilibre électrique dans le rotor d'une machine asynchrone à double alimentation. Nous avons opté pour l'utilisation de l'analyse des courants électriques. Cette technique joue un rôle majeur dans l'appréciation de l'état de fonctionnement de la machine, et ce par la détection de l'influence du déséquilibre électrique sur le contenu spectral des courants statoriques. Pour analyser les signaux du courant, nous avons utilisé les techniques de traitement de signal classiques, qui sont basées sur la transformée de Fourier et l'analyse d'enveloppe. Les résultats obtenus sont clairs et effectifs, ce qui montre que ces outils de traitement sont fiables et sont très appropriés pour le diagnostic des machines électriques.

**Mots clés :** machines électriques, maintenance prédictive, l'analyse des courants électriques, transformée de fourrier.

## Abstract

Nowadays, the detection of faults in electrical machines has become a very important issue, it comes within the field of predictive maintenance. In this work, we are interested in the detection of an electrical imbalance in the rotor of a double-fed induction machine. We have opted to use the analysis of electric currents. This technique plays a major role in the assessment of the operating state of the machine, by detecting the influence of the electrical imbalance on the spectral content of the stator currents. To analyze the current signals, we used classical signal processing techniques, which are based on Fourier transform and envelope analysis. The obtained results are clear and effective, which shows that these processing tools are reliable and are very suitable for the diagnosis of electrical machines.

**Key words:** electrical machines, predictive maintenance, analysis of electrical currents, fourrier transform.

## ملخص

في الوقت الحاضر ، أصبح اكتشاف الأعطال في الآلات الكهربائية مسألة مهمة للغاية، فهي تأتي في مجال الصيانة التنبؤية. في هذا العمل، نحن مهتمون باكتشاف اختلال التوازن الكهربائي في الدوار لآلة مزدوجة التغذية غير متزامنة. اخترنا استخدام تحليل التيارات الكهربائية. تلعب هذه التقنية دورًا رئيسيًا في تقييم حالة تشغيل الماكينة، من خلال الكشف عن تأثير عدم التوازن الكهربائي على المحتوى الطيفي للتيارات الثابتة لتحليل الإشارات الحالية، استخدمنا تقنيات معالجة الإشارات الكلاسيكية، والتي تعتمد على تحويل فورييه وتحليل الغلاف. النتائج التي تم الحصول عليها واضحة وفعالة ، مما يدل على أن أدوات المعالجة هذه موثوقة ومناسبة جدًا لتشخيص الآلات الكهربائية.

**الكلمات الدالة:** الآلات الكهربائية، الصيانة التنبؤية، تحليل التيارات الكهربائية، تحويل فورييه.