



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Sciences et de La Technologies

Filière : Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

En : Machine électrique

Présenté par:

LATRI Tahar, BESSERIANI Abdelkrim, DIAAbdelghani

Thème

*Diagnostic des moteurs à induction par l'analyse  
des harmoniques du courant statorique  
(défaut d'excentricité)*

Devant le jury composé de :

Dr. HAMIDANI Billal	....	Président
Dr.TOUMI Jafer	....	Examineur
Pr. Allal Abderrahim	....	Superviseur

2023-2024

## Remerciement

Notre premier Remerciement va à Allah Soubhanhou  
Watahala.

Nous tenions à remercier vivement notre encadreur,  
Pr "Allal Abderrahim",  
pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa contribution  
générale à l'élaboration  
de ce travail.

Nous souhaiterons également remercier nos enseignants  
de la faculté de la technologie

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements  
à tous nos proches et amis qui nous ont toujours  
soutenu et encouragé pour la réalisation de ce mémoire.

# Dédicaces

Je dédie ce fruit de mon travail :

À ma mère et à mon père, qui méritent tout le crédit pour leur soutien inébranlable et leur amour inconditionnel. Ils ont toujours cru en moi et m'ont encouragé à chaque étape de mon parcours.

À mes frères et à toute ma famille, dont la présence chaleureuse et les encouragements constants m'ont permis de rester motivé et déterminé.

À tous mes amis, qui ont partagé avec moi des moments de joie et de difficulté, et dont l'amitié a été une source inestimable de réconfort et de motivation.

À tous mes professeurs, pour leur guidance et leur enseignement précieux, qui ont façonné mon savoir et mes compétences.

À tous mes collègues et au régiment spécial des «machines électriques», pour leur camaraderie et leur soutien professionnel. Leur collaboration a été essentielle dans la réalisation de ce travail.

À vous tous, un grand merci.

Besserianiabdelkrim

# *Dédicace*

*Avant tout, nous tenons à remercier le Bon Dieu,  
l'Unique, qui nous offre le courage et la volonté  
nécessaires pour réaliser ce travail malgré toutes  
les difficultés rencontrées.*

*Je dédie ce travail :*

*À ma mère*

*À mon père*

*À mes frères et mes sœurs*

*À ma femme et à mes enfants, chacun par son nom.*

*Tahar latri*

# Dédicace

*Louange à Dieu pour son amour et sa gratitude. Je n'aurais pas pu faire cela sans la grâce de Dieu. Aujourd'hui, j'offre mon succès à tous ceux qui ont œuvré avec moi pour accomplir ce parcours : à celui qui m'a appris que la vie est une lutte armée de science et de connaissance, à celui dont je porte le nom avec fierté, mon cher père, à mon ange dans la vie, ma mère qui m'a soutenu dans ses prières et veillées. À mes sœurs, source de ma force, et à mon frère, mon soutien. À ceux qui se réjouissent de mon succès et s'attristent de mes échecs, à ceux qui me manquent dans cette vie, je prie pour que Dieu les enveloppe de sa miséricorde. À moi-même, persévérante et ambitieuse, et à mes amis qui m'ont soutenu avec amour dans mes moments de faiblesse. À tous ceux qui ont contribué à mon éducation depuis le début jusqu'à la fin.*

*Dia abdelghani*

## ملخص

تسلط هذه المذكرة الضوء على أهمية كشف عيوب الانحراف في المحركات غير المتزامنة. يمكن أن تؤدي هذه العيوب إلى اهتزازات مفرطة وتآكل مبكر للمحامل ومشاكل ميكانيكية أخرى خطيرة. تظهر الدراسة فعالية تحليل التيار الثابت بواسطة FFT وتقنيات أخرى في كشف هذه العيوب، بما في ذلك التوافق الزمني. تؤكد النتائج التجريبية أن  $TH_{11} = 1.357$  هو مؤشر حساس وموثوق لمنع الفشل الكبير. تقدم هذه النهج استراتيجيات صيانة وقائية جديدة لضمان موثوقية المحركات غير المتزامنة في بيئات صناعية متطلبة. في الختام، تساهم هذه الدراسة في تحسين أداء وموثوقية الأنظمة الصناعية من خلال تقليل التوقفات غير المتوقعة وتكاليف الصيانة.

## Résumé

Ce mémoire souligne l'importance cruciale de détecter les défauts d'excentricité dans les machines asynchrones. Ces défauts peuvent causer des vibrations excessives, une usure prématurée des paliers et d'autres problèmes mécaniques graves. L'étude met en évidence l'efficacité de l'analyse du courant statorique par FFT et d'autres techniques pour détecter ces défauts, notamment l'harmonique de temps. Ces résultats expérimentaux confirment que  $TH_{11}=1.357$  est un indicateur sensible et fiable pour prévenir les défaillances majeures. Cette approche offre de nouvelles stratégies de maintenance proactive pour garantir la fiabilité des machines asynchrones dans des environnements industriels exigeants. En conclusion, cette étude contribue à améliorer la performance et la fiabilité des systèmes industriels en réduisant les temps d'arrêt imprévus et les coûts de maintenance.

## Abstract

This thesis highlights the crucial importance of detecting eccentricity faults in asynchronous machines. These faults can lead to excessive vibrations, premature bearing wear, and other serious mechanical issues. The study demonstrates the effectiveness of stator current analysis using FFT and other techniques in detecting these faults, including time harmonics. Experimental results confirm that  $TH_{11} = 1.357$  is a sensitive and reliable indicator for preventing major failures. This approach provides new proactive maintenance strategies to ensure the reliability of asynchronous machines in demanding industrial environments. In conclusion, this study contributes to improving the performance and reliability of industrial systems by reducing unexpected downtimes and maintenance costs.

## NOTATION & SYMBOLES

$s, r$ : Indice du stator, du rotor respectivement.

$N_s$ : nombre de spires statoriques par phase.

$N_r$ : nombre de barres rotorique.

$F.m.m$ : force manitomotrice.

$f$ : la fréquence.

$I$ : le courant [A].

$f_s$ : fréquence d'ondulation [Hz].

$L_{sd}$ : L'inductance (magnétisante) de la phase "n" statorique [H].

$L_{sq}$ : L'inductance d'une boucle rotorique.

$I_{sd}$ : Inductance propre statorique.

$I_{sq}$ : Inductance propre rotorique.

$P$ : nombre de paires de pôles.

$I$ : courant d'une phase.

$\psi_{sd}$ : le flux magnétique statorique.

$\psi_{sq}$ : le flux magnétique rotorique.

$I_{rm}$ : La valeur du courant maximal du rotor.

$M_{srh}$ : L'inductance mutuelle entre phases statorique et maille rotorique.

$R$ : la résistance .

$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$ : courants des phases statorique [A].

$V$ : la tension [V].

$u$ : la vitesse [tr/min].

$\theta_r$  : position du rotor [rd].

$d, q$  : indices pour les composantes de PARK directe et quadrature, respectivement.

$J$  : moment d'inertie [Kg.m<sup>2</sup>].

$\theta$  : Angle décrivant une position particulière dans l'espace, mesuré par rapport à une référence fixée par rapport au stator.

$g$  : glissement.

$f_{exc}$  : Fréquence d'excentricité.

$R$  : nombre d'encoches au rotor,

$f_c$  : caractéristiques fréquences.

**MAS** : Machine asynchrone.

**FFT** : transformation de fourie rapide.

**TH** : harmonique de temps.

$f_{re}$  : fréquence relative.

$f_c$  : la fréquence du convertisseur.

**MCSA** : MotorCurrent Signature Analysis.

**T** : période d'échantillonnage .

**RSH** : Harmoniques des emplacements du rotor.

**RBFH** : Défaut de barre de rotor harmoniques.

**EFH** : Défaut d'excentricité Harmoniques.

$f_r$  : fréquence rotorique.

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1: Ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil</b> .....	6
<b>Figure I.2. Stator du moteur asynchrone.</b> .....	7
<b>Figure I.3. Représentation rotor à cage.</b> .....	7
<b>Figure I.4 . Représentation rotor bobiné.</b> .....	8
<b>Figure I. 5 Statistique des défauts de la MAS.</b> .....	10
<b>Figure I. 6. Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte .</b> .....	12
<b>Figure I.7. Roulement à bille et défaut de cage à bille.</b> .....	14
<b>Figure II. 1. Différentes grandeurs de diagnostic dans une machine.</b> .....	20
<b>Figure II. 2. Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial.</b> .....	23
<b>Figure II. 3. Système d'alimentation d'une machine asynchrone par convertisseur avec neutre sorti.</b> .....	24
<b>Figure II. 4. Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique</b> .....	25
<b>Figure II. 5. Représentation temporelle vers fréquentielle.</b> .....	26
<b>Figure II. 6. Transformation en ondelette.</b> .....	27
<b>Figure II. 7. Image d'une onde déformée.</b> .....	28
<b>Figure III. 1. Diagramme de blocs du principe de la méthode du spectre de courant statorique utilisée pour obtenir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté de technologie (Université de El Oued).</b> .....	37
<b>Figure III. 2. Spectre du courant statorique régime sain (<math>A_{Ts1} \dots (A)</math> Test 1, avec 0% de la charge).</b> .....	38
<b>Figure III. 3. Spectre du courant statorique régime sain (<math>A_{Ts2} \dots (A)</math> Test 2, avec 15 % de la charge).</b> .....	39
<b>Figure III. 4. Spectre du courant statorique régime sain (<math>A_{Ts3} \dots (A)</math> Test 3 ,avec 45 % de la charge ).</b> .....	39
<b>Figure III. 5. Spectre du courant statorique régime de défaut (<math>A_{Td1} \dots (A)</math> Test 1, avec 0% de la charge).</b> .....	41
<b>Figure III. 6. Spectre du courant statorique régime de défaut (<math>A_{Td2} \dots (A)</math> Test 2, avec 15 % de la charge).</b> .....	41
<b>Figure III. 7. Spectre du courant statorique régime de défaut (<math>A_{Td3} \dots (A)</math> Test 3 ,avec 45 % de la charge ).</b> .....	41
<b>Figure III. 8. Sensibilité relative Test 1 avec 0% de la charge.</b> .....	44
<b>Figure III. 9. Sensibilité relative Test 2 avec 15% de la charge.</b> .....	44

<b>Figure III. 10. Sensibilité relative Test 3 avec 45% de la charge.</b> .....	44
<b>Figure III. 11.Sensibilité relative a TH<sub>1</sub>=50 Hz.</b> .....	45
<b>Figure III. 12.Sensibilité relative a TH<sub>2</sub>=150 Hz.</b> .....	46
<b>Figure III. 13.Sensibilité relative a TH<sub>3</sub>=250 Hz.</b> .....	46
<b>Figure III. 14.Sensibilité relative a TH<sub>4</sub>=350 Hz.</b> .....	46
<b>Figure III. 15.Sensibilité relative a TH<sub>5</sub>=450 Hz.</b> .....	47
<b>Figure III. 16.Sensibilité relative a TH<sub>6</sub>=550 Hz.</b> .....	47
<b>Figure III. 17.Sensibilité relative de la TH<sub>7</sub>=650 Hz.</b> .....	47
<b>Figure III. 18. Sensibilité moyenne des différentes harmoniques de temps du moteur avec défaut d' excentricité.</b> .....	48

# LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1: Avantages et inconvénients de la machine asynchrone .....</b>	<b>8</b>
<b>Tableau II. 1: Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique . .....</b>	<b>33</b>
<b>Tableau III. 1: Amplitudes des différentes harmoniques du courant statorique sain du moteur. ....</b>	<b>40</b>
<b>Tableau III. 2: Amplitudes des différentes harmoniques du courant statorique défaut du moteur. ....</b>	<b>42</b>
<b>Tableau III. 3: sensibilité relative des différentes harmoniques de temps du moteur avec défaut d' excentricité. ....</b>	<b>43</b>
<b>Tableau III. 4: Sensibilité moyenne des différentes harmoniques du moteur. ....</b>	<b>48</b>

# Sommaire

Introduction général.....	3
<a href="#"><u>Chapitre I: Diagnostic des défauts de la machine asynchrone</u></a>	
I.1.Introduction .....	5
I.2.Construction de la machine asynchrone .....	5
I.2.1. Stator .....	6
I.2.2.Rotor.....	7
I.2.3.Paliers .....	8
I.3.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.....	9
I.4.1. Défauts statoriques .....	10
I.4.1.1.Court-circuit entre spires .....	10
I.4.1.2. Court-circuit entre phases .....	10
I.4.2. Défauts rotoriques .....	11
I.4. 2.1.Rupture de barres.....	11
I.4.2.2. Ruptures d'anneaux.....	11
I.4.2.3.Défaut d'excentricité .....	11
4.2.3.1. Excentricité statique .....	12
4.2.3.2. Excentricité dynamique .....	12
4.2.3.3. Excentricité mixte .....	12
I.4.3.Défauts de roulements.....	13
I.5.Conséquences des défauts .....	14
I.6. Maintenance .....	15
I.6.2. Maintenance Préventive .....	15
I.6.2.2. Maintenance préventive conditionnelle .....	16
I.7. Définition et objectif du diagnostic .....	16
I.7.1. Définition .....	16
I.7.2. Objectif du diagnostic .....	17
I.7.3. Méthodes de diagnostic.....	17
I.7.3.1. Méthodes externes.....	17
I.7.3.2. Méthodes internes .....	17

I.7.3.3.Méthodes inductives .....	18
I.7.3.4 Méthodes déductives .....	18
I.8.Conclusion .....	18

## Chapitre II : Technique de Diagnostic des défauts de la machine asynchrone

II.1.Introduction .....	20
II.2.Aperçu sur les méthodes de diagnostic des défauts.....	20
II.3.Méthodes de diagnostic avec modèle.....	21
II.4.Méthodes de diagnostic sans modèle .....	21
4.1.Techniques mécaniques .....	21
4.1.1.Diagnostic par mesure de la température.....	21
4.1.2.Diagnostic par mesure des vibrations .....	21
II.4.2. Diagnostic chimique .....	22
II.4.3. Techniques magnétiques et électriques .....	22
4.3.1. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite .....	22
4.3.2.Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites .....	23
4.3.3.Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique .....	23
4.3.4.Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée .....	23
4.3.5.Diagnostic par l'analyse de la tension de neutre .....	24
4.3.6.Diagnostic par l'analyse du courant statorique .....	24
II.5. Techniques d'analyse des signaux : MCSA (Motor Current Signature Analysis) .	25
II.6. Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic.....	26
II.6.1. Transformée de Fourier rapide (FFT) .....	26
II.6.2.Transformation en ondelette.....	27
II.7.Description du phénomène harmoniques.....	27
II.8. Origine des harmoniques.....	27
8.1. Effets instantanés.....	28
8.2. Effets à long terme .....	29
II.9.Solutions harmoniques générales .....	29
9.1.Filtres passifs: .....	29
9.2.Filtres actifs:.....	30
9.3.Filtres hybrides: .....	30
9.4.Filtres harmoniques accordés: .....	30

II.10. Harmoniques du courant statorique des machines à induction.....	30
II.11. Etude du courant statorique avec ses harmoniques.....	32
II.12. Constat et discussion .....	34
II.13. Conclusion .....	34

Chapitre III : Résultats expérimentaux

III.1. Introduction .....	36
III.2. Diagnostic par analyse du courant statorique .....	36
III.3. Banc d'essai et résultats expérimentaux .....	36
3.2. Régime avec défaut.....	40
III.4. Calcul la sensibilité relative .....	43
III.4.1. Sensibilité relative des différents charges ou tests pour chaque rang d'harmonique: .....	45
III.5. Calcul de l'amplitude de la sensibilité moyenne .....	48
III.6. Discussion des résultats .....	48
III.7. Conclusion .....	49
Conclusion général .....	50
Bibliographie .....	51

### Introduction général

La machine asynchrone, également appelée "machine à induction", est une machine électrique à courant alternatif sans connexion électrique directe entre son stator et son rotor. Son fonctionnement repose sur l'interaction entre le champ magnétique produit par le stator et le courant induit dans le rotor, ce qui génère un couple électromagnétique. Contrairement aux machines synchrones, la vitesse de rotation de ces machines n'est pas nécessairement proportionnelle à la fréquence des courants qui les alimentent, d'où le terme "asynchrone". Bien qu'elles aient été supplantées par les machines synchrones dans les applications à forte puissance, les progrès de l'électronique de puissance ont redonné à ces machines un large éventail d'applications dans divers domaines.

Le premier chapitre de ce mémoire se concentre sur le diagnostic des défauts de la machine asynchrone. Ce chapitre débute par une présentation détaillée du fonctionnement fondamental de la machine asynchrone, mettant en lumière son architecture et son mode de fonctionnement. Ensuite, nous abordons les principaux types de défauts auxquels les machines asynchrones peuvent être confrontées, notamment la rupture du stator ou du rotor, les courts-circuits entre les spires, les problèmes d'isolation et les défauts des barres de rotor. Ces défauts peuvent entraîner des perturbations significatives dans le fonctionnement de la machine et nécessitent une analyse approfondie pour déterminer leur type, leur localisation et leur cause.

Le deuxième chapitre explore les techniques avancées de diagnostic des défauts dans les machines asynchrones. Nous soulignons l'importance de la détection précoce des défauts pour garantir la fiabilité opérationnelle et réduire les coûts de maintenance. Les méthodes modernes de surveillance et d'analyse des machines, telles que l'utilisation de capteurs pour collecter des données opérationnelles et l'application de techniques d'intelligence artificielle comme les réseaux neuronaux artificiels (ANN) et l'apprentissage en profondeur, sont explorés en détail. L'objectif principal est d'identifier les défauts dès leur apparition et de fournir des recommandations pour une maintenance proactive et efficace.

Enfin, le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux issus de cette étude. Nous examinons spécifiquement l'étude des harmoniques du courant statorique, qui offre un aperçu précieux de l'état de la machine. L'analyse des harmoniques dans des conditions normales et défectueuses permet d'identifier les signatures spécifiques associées à différents défauts, tels que l'excentricité du rotor. Cette analyse détaillée des performances du moteur en présence de défauts fournit des informations précieuses pour améliorer les pratiques de diagnostic et de maintenance.

En conclusion, ce mémoire vise à approfondir la compréhension du diagnostic des défauts dans les machines asynchrones et à proposer des solutions pratiques pour assurer leur fiabilité et leur efficacité opérationnelle

***Chapitre I***  
***Diagnostic des***  
***défauts de la machine asynchrone***

## I.1.Introduction

Les machines asynchrones, également connues sous le nom de moteurs asynchrones, sont des dispositifs électromécaniques largement utilisés pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Contrairement aux moteurs synchrones.

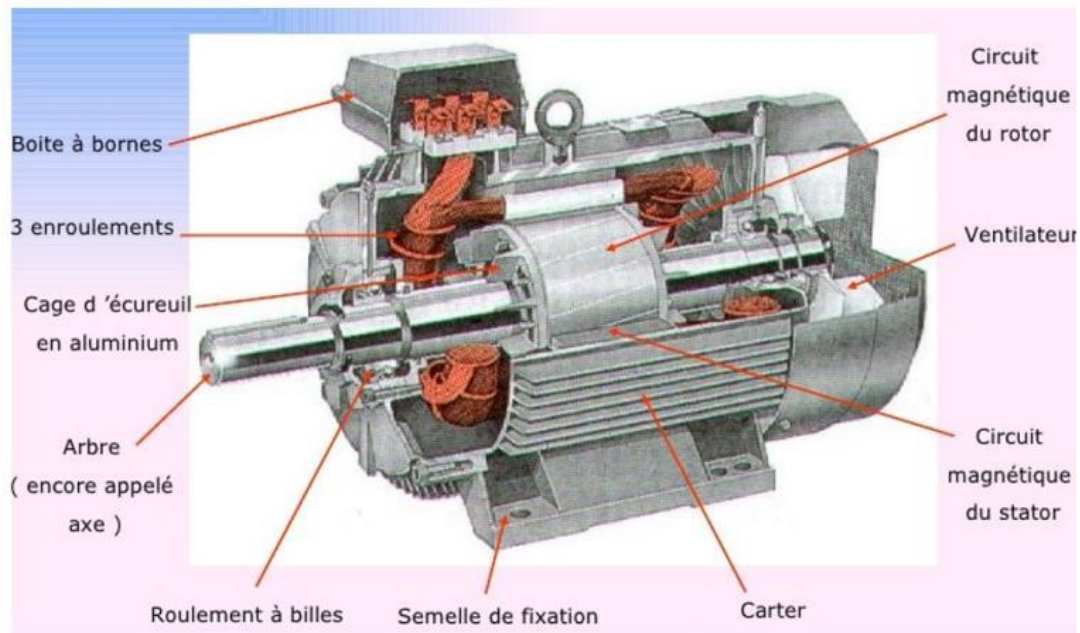
Ces moteurs sont couramment utilisés dans une variété d'applications industrielles, commerciales et résidentielles en raison de leur simplicité de construction, de leur fiabilité et de leur faible coût.

Dans ce chapitre, nous examinerons en détail les différents composants de la machine asynchrone, les défauts potentiels qu'elle peut présenter, ainsi que les diverses méthodes de diagnostic et les types des maintenances disponibles.[1]

## I.2.Construction de la machine asynchrone

Le moteur asynchrone, également connu sous le nom de moteur à induction, est un moteur électrique à courant alternatif caractérisé par l'absence de connexion entre son stator et son rotor. Son nom "asynchrone" découle de la différence de vitesse de rotation entre le rotor et le champ magnétique tournant du stator. Son fonctionnement repose sur le principe de l'induction électromagnétique. La Figure (I.1) présente une vue éclatée illustrant la composition du moteur asynchrone.

Il se compose principalement de deux parties distinctes : le stator et le rotor. Le stator, qui constitue la partie fixe du moteur, comprend des enroulements (bobinages) logés dans une carcasse en acier et connectés à une plaque à bornes pour le branchement au réseau électrique. Le rotor, quant à lui, est la partie mobile du moteur et peut être de type à cage d'écureuil ou à rotor bobiné. Les paliers, quant à eux, assurent le support et la rotation de l'arbre du rotor.



**Figure I.1: Ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil**

### I.2.1. Stator

Le stator d'un moteur asynchrone constitue sa partie fixe et est fabriqué à partir d'une carcasse en acier renfermant un empilement de fines tôles isolées entre elles par oxydation ou vernis. Ces tôles forment un cylindre creux percé de trous à sa périphérie intérieure, créant ainsi des encoches alignées. Ces encoches servent à loger les bobinages, généralement triphasés, qui sont ensuite imprégnés de vernis pour assurer une isolation complète. La Figure (I.2) illustre ce processus.

Le stator d'une machine triphasée comprend généralement trois enroulements, correspondant à six bornes. Ses composants principaux sont :

- La carcasse en acier
- Les paliers
- Les flasques
- Le ventilateur
- Le cache du ventilateur

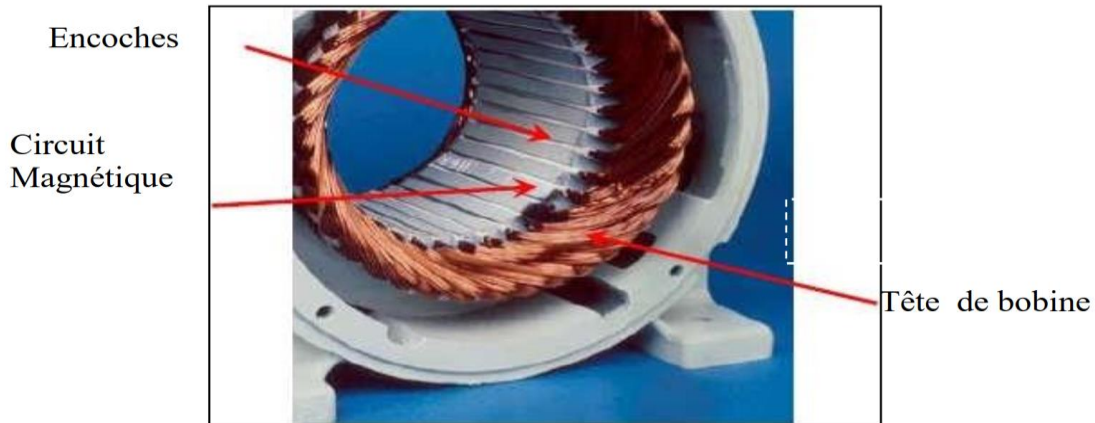


Figure I.2: Stator du moteur asynchrone.[2]

### I.2.2. Rotor

Il ya deux types de rotor :

- Rotor à cage:** dans le cas du rotor à cage d'un moteur asynchrone, les anneaux de court-circuit facilitent le passage des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont réparties de manière régulière et forment le circuit du rotor, comme illustré dans la Figure (I.3). Cette cage est placée à l'intérieur d'un circuit magnétique, et les conducteurs sont généralement fabriqués en coulant un alliage d'aluminium ou en utilisant des barres massives de cuivre préformées, qui sont ensuite insérées et fixées dans les tôles du rotor. Habituellement, il n'y a pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques. Cependant, leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, à moins qu'il n'y ait une rupture de barre.

Comparé au rotor bobiné, le rotor à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à fabriquer et donc moins coûteux. De plus, il offre une plus grande robustesse. C'est pourquoi il constitue la majorité des moteurs asynchrones utilisés actuellement.

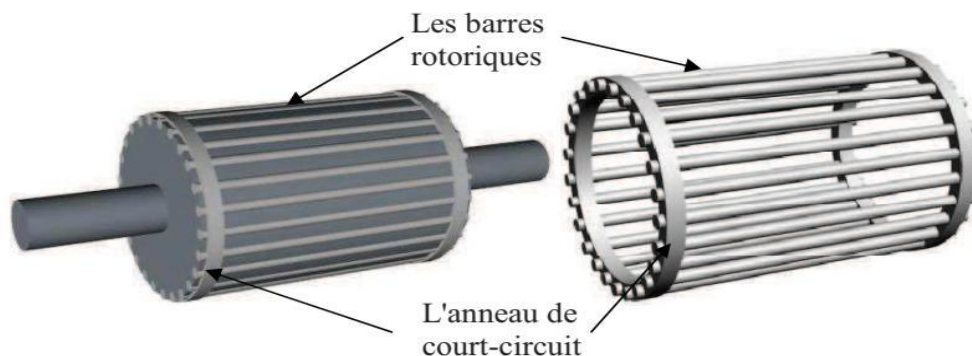


Figure I.3: Représentation rotor à cage.

● **Rotor bobiné:** Les tôles de ce rotor comportent des encoches où sont insérés des conducteurs pour former des bobinages. Ces bobinages sont accessibles via trois bagues et trois balais. Ce dispositif permet de modifier les propriétés électromécaniques du moteur (Figure.I.4). [1]



**Figure.I.4: Représentation rotor bobiné.**

### I.2.3. Paliers

Les paliers, qui servent à soutenir et faire tourner l'arbre du rotor, sont composés de flasques et de roulements à billes qui sont montés à chaud sur l'arbre. Les flasques, fabriqués en fonte, sont fixés sur le carter statorique à l'aide de boulons ou de tiges de serrage, comme illustré dans la Figure (I.1). Une fois assemblé, cet ensemble constitue la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Les avantages et inconvénients de la machine asynchrone sont nombreux, mais les principaux sont résumés dans le tableau suivant (Tableau I.1) :

**Tableau I.1: Avantages et inconvénients de la machine asynchrone [3]**

Avantages	Inconvénients
Structure simple	Non découplage naturel
Robuste et facile à construire	Non linéarités
Cout réduit	
Absence d'un système de bagues et balais	

### I.3.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Le fonctionnement de la machine asynchrone repose entièrement sur les principes de l'induction électromagnétique. Elle est souvent comparée à un transformateur à champ magnétique tournant, où le stator est assimilé à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit. Ce fonctionnement est basé sur l'interaction électromagnétique entre le champ tournant, créé par le courant triphasé alimentant le stator depuis le réseau, et les courants induits dans le rotor lorsque ses conducteurs sont traversés par ce champ tournant.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse différente de la vitesse de synchronisme, l'application de la loi de Faraday à l'un des enroulements du rotor montre l'apparition d'une force électromotrice, générant ainsi un courant limité par l'impédance de l'enroulement. L'interaction entre ce courant et le champ tournant produit des forces agissant sur les brins du rotor, générant ainsi le couple de la machine.

Si le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est déterminée par la formule :

$$n_1 = \frac{f}{p}; \text{ où } f \text{ est la fréquence d'alimentation ;}$$

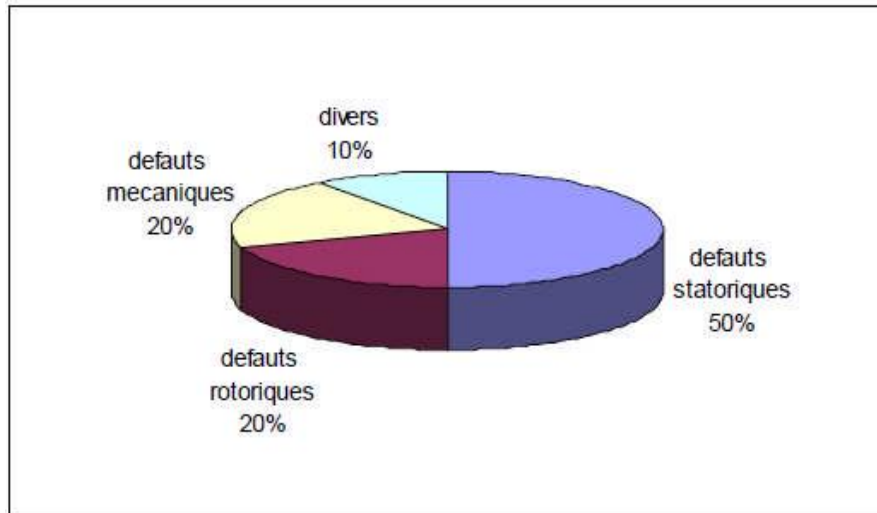
et  $P$ : représenté nombre de paire de pole.

L'interaction électromagnétique entre les deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant ( $n_1$ ) diffère de celle du rotor ( $n$ ), c'est-à-dire lorsque  $n \neq n_1$ . Dans le cas contraire, lorsque  $n = n_1$ , le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement du rotor. Le rapport  $g = \frac{n_1 - n}{n_1}$  est appelé glissement de la machine asynchrone. [4]

### I.4.Défauts de la machine asynchrone

Comme tout système physique, la machine asynchrone à cage d'écureuil peut parfois présenter différents types de défauts, qui peuvent être d'origine électrique, mécanique, ou une combinaison des deux. Généralement, ces défauts peuvent être regroupés en quatre catégories principales comme le montre la Figure (I.5):

- Défauts au niveau du stator.
- Défauts au niveau du rotor.
- Défauts mécaniques.
- Défauts d'origines diverses.



**FigureI.1: Statistique des défauts de la MAS. [5]**

### **I.4.1.Défauts statoriques**

Les problèmes rencontrés au niveau du stator peuvent être attribués principalement à l'une des catégories suivantes :

- thermique (comme la surcharge),
- électrique (tel que le diélectrique),
- mécanique (tel que les problèmes de bobinage),
- et environnemental (comme l'agression).

Parmi les défauts les plus courants observés au niveau du stator, on trouve notamment :

1. Les courts-circuits entre spires.
2. Les courts-circuits entre phases.

#### **I.4.1.1.Court-circuit entre spires**

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquemment rencontré, souvent causé par un ou plusieurs défauts d'isolation dans l'enroulement concerné. Ce type de défaillance entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, ainsi qu'une légère variation d'amplitude sur les autres phases. Il peut également modifier le facteur de puissance et amplifier les courants dans le circuit rotorique .

Les courts-circuits entre spires de la même phase peuvent se produire au niveau des têtes de bobines ou dans les encoches.

#### **I.4.1.2. Court-circuit entre phases**

Ce type de défaillance peut survenir à n'importe quel point du bobinage, cependant, les conséquences peuvent varier en fonction de son emplacement. Cette particularité rend l'analyse de l'impact de ce défaut sur le système difficile. Les courants

statoriques deviennent totalement déséquilibrés en présence de ce défaut, et ce déséquilibre est proportionnel à la gravité du défaut. Les courants circulant dans les barres ainsi que dans les anneaux sont accrus lorsque ce défaut se manifeste. La détection de ce type de défaut peut se baser sur le déséquilibre des courants de phase.

### **I.4.2. Défauts rotoriques**

Les problèmes qui peuvent se manifester au niveau du rotor peuvent être attribués à diverses causes, notamment :

- Thermiques, tels que la surcharge
- Électromagnétiques, comme les forces dans le circuit magnétique
- Résiduels, par exemple les déformations
- Dynamiques, incluant les problèmes avec l'arbre de transmission
- Mécaniques, tels que des problèmes avec les roulements
- Environnementaux, comprenant diverses agressions

Parmi les défauts les plus fréquemment observés et localisés au niveau du rotor, on peut citer :

- Rupture de barres
- Rupture d'une partie de l'anneau de court-circuit
- Excentricité statique et dynamique

#### **I.4. 2.1. Rupture de barres**

L'un des défauts les plus courants sur le rotor est la rupture ou la cassure des barres. Cette défaillance entraîne une diminution de la valeur moyenne du couple électromagnétique et une augmentation des oscillations d'amplitude. Ces oscillations se traduisent par des fluctuations de la vitesse de rotation, générant ainsi des vibrations mécaniques et un fonctionnement anormal de la machine.

#### **I.4.2.2. Ruptures d'anneaux**

Ces ruptures peuvent être attribuées à des bulles de coulée ou à des dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Lorsqu'une partie de l'anneau se rompt, cela perturbe la répartition des courants dans les barres du rotor, provoquant ainsi un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui observé lors de la rupture des barres. [5]

#### **I.4.2.3. Défaut d'excentricité**

Le défaut d'excentricité se manifeste par une asymétrie dans l'entrefer à vide entre le stator et le rotor d'une machine électrique. Un certain niveau d'excentricité est généralement présent dans ces machines, avec des spécifications de tolérance variant selon les fabricants et les utilisateurs.

Certains spécifient un niveau maximal admissible de 5%, tandis que d'autres tolèrent jusqu'à 10% de la largeur d'entrefer. Cependant, les fabricants visent généralement à maintenir un niveau d'excentricité très faible pour réduire les vibrations, le bruit et les forces radiales résultantes.

Ces forces pourraient créer une bande de frottement entre le stator et le rotor, risquant d'endommager la machine. Comparativement à d'autres types de machines de taille et de performances similaires, les machines synchrones sont particulièrement sensibles aux problèmes d'excentricité, car l'entrefer dans une machine à induction est généralement beaucoup plus petit. Les dissymétries dans la géométrie du rotor peuvent se manifester naturellement et se regroupent généralement en trois catégories principales (Figure I.6):[6]

1. Excentricité statique .
2. Excentricité dynamique .
3. Excentricité mixte .

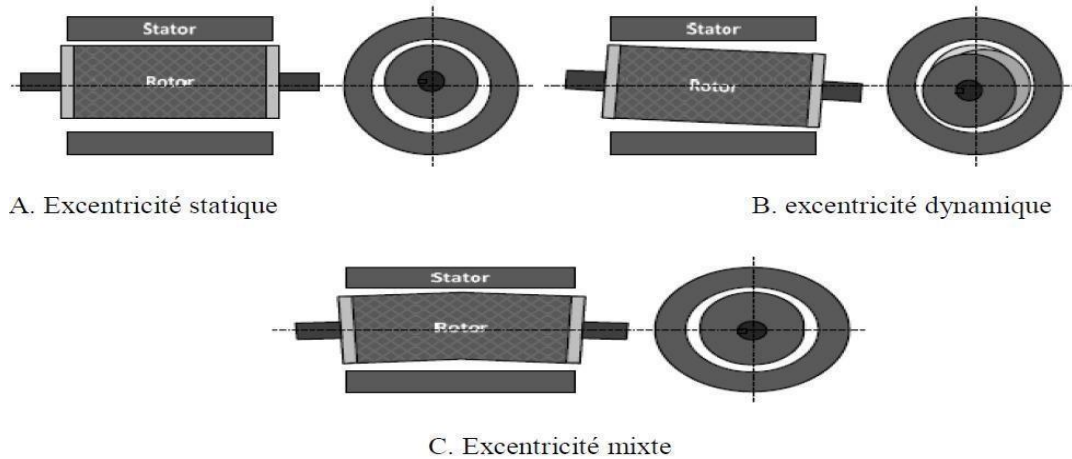


Figure I.2: Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte .[7]

#### 4.2.3.1. L'Excentricité statique

L'excentricité statique se produit lorsque le centre de rotation de l'arbre du rotor ne coïncide pas avec le centre géométrique du stator.

#### 4.2.3.2. L'Excentricité dynamique

L'excentricité dynamique se caractérise par un centre de rotation du rotor distinct du centre géométrique du stator, mais également par le fait que le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator.

#### 4.2.3.3. L'Excentricité mixte

L'excentricité mixte est une combinaison des deux cas présentés précédemment. Les fréquences induites, proches du fondamental, sont déterminées par la relation suivante:

$$f_{exc} = f_s \left( 1 \pm k \left( \frac{1-g}{p} \right) \right) \dots \dots (\text{Hz}) \quad (\text{I.1})$$

où:  $f_{exc}$  = Fréquence d'excentricité  $k$   
 $= 1, 2, 3, \dots, k \in \mathbb{N}$

$g$  = le glissement,  $p$  = nombre de paires de pôles,

Cette approche présente l'avantage de ne pas exiger une connaissance détaillée de la conception de la machine asynchrone, car elle ne contient pas de termes liés à sa structure interne.

Une autre méthode consiste à utiliser une équation compacte qui relie les défauts tels que les barres cassées, l'excentricité et les encoches au rotor. Cette équation permet de mettre en évidence les harmoniques de fréquence associés à ces défauts, lesquels dépendent largement du nombre de paires de pôles de la machine.  $f_{exc} =$

$$f_s \left( n_{ws} \pm (kR \pm n_d) \left( \frac{1-g}{p} \right) \right) \dots \text{(Hz)} \quad (\text{I.2})$$

où:

$f_{exc}$  = Fréquence d'excentricité  $k = 1, 2, 3, \dots, k \in \mathbb{N}$

$g$  = le glissement,

$p$  = nombre de paires de pôles,

$R$  = nombre d'encoches au rotor,

$n_{ws} = 1, 3, 5, \dots, n_{ws} \in \mathbb{N}$

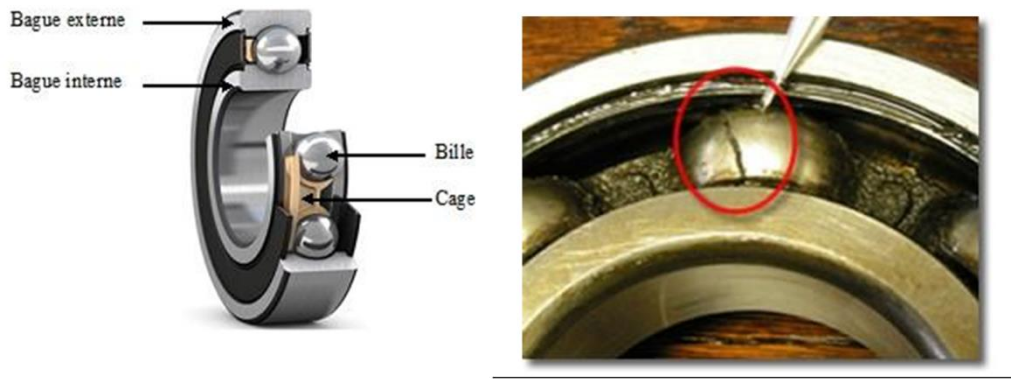
$n_d \in \mathbb{N}$

$f$  = fréquence d'alimentation

Dans le cas " l'excentricité statique  $n_d = 0$  ", alors que pour l'excentricité dynamique,  $n_d$  peut prendre les valeurs : 1, 2, 3, ... ( $n_d$  est connu sous le nom «ordre d'excentricité »). le coefficient  $n_{ws}$  représente l'harmonique de temps lié à l'alimentation du moteur asynchrone.

### I.4.3. Défauts de roulements

Les roulements à billes revêtent une importance capitale dans le bon fonctionnement de toute machine électrique rotative. Les anomalies dans ces roulements peuvent résulter d'un choix inadéquat des matériaux lors de la fabrication. De plus, des problèmes de rotation à l'intérieur du logement du roulement, provoqués par une détérioration, des éclats ou des fissures, peuvent engendrer des dysfonctionnements au sein de la machine (Figure I.7).



**Figure I.3: Roulement à bille et défaut de cage à bille.**

L'expression suivante représente les harmoniques contenus dans le spectre du courant statorique

$$f_r = |f_s + kf_v| \quad (\text{I.3})$$

Où :  $k=1, 2, \dots$ ,

$f_v$  = fréquences caractéristiques des vibrations. [8]

### I.5. Conséquences des défauts

Les courants circulant dans les barres rotoriques entraînent un surchauffement et des contraintes mécaniques, pouvant provoquer des fissures puis une rupture des barres. Cette rupture, par effet d'avalanche, peut accélérer la rupture des barres adjacentes, entraînant éventuellement la destruction totale du rotor. De même, les forces électrodynamiques exercées sur les conducteurs des phases peuvent induire des vibrations mécaniques qui endommagent l'isolant. Sur le plan électrique, les surtensions générées par le convertisseur statique accentuent les décharges partielles, réduisant ainsi la durée de vie de l'isolant. En ce qui concerne les origines environnementales, l'humidité et les produits corrosifs ou abrasifs sont les plus courants.

Au niveau de l'entrefer, les défauts se traduisent par une excentricité statique, une excentricité dynamique ou une combinaison des deux. L'excentricité statique est généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. L'excentricité dynamique peut résulter d'une déformation du cylindre rotorique ou d'une combinaison des deux premiers.

Avant la cage, les défauts se manifestent par la rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit. Ces ruptures peuvent être causées par une surcharge mécanique, un échauffement local excessif ou des défauts de fabrication tels que des bulles d'air ou des soudures défectueuses.

En ce qui concerne les paliers, le désalignement du flasque conduit généralement à une excentricité statique, tandis que l'usure des roulements à billes entraîne le plus souvent une excentricité dynamique.

Il est important de noter que plusieurs études ont été menées pour quantifier l'impact de chaque type de défaut sur la fiabilité de la machine.

Les pourcentages de ces défauts varient d'une étude à l'autre, mais toutes convergent pour classer les défauts de paliers comme les plus fréquents, suivis des défauts statoriques et enfin des défauts à la cage rotorique. [9]

## **I.6. Maintenance**

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la disponibilité des systèmes industriels, c'est-à-dire, d'assurer que le système fonctionne lorsqu'on le sollicite. La responsabilité de cette tâche repose sur la maintenance. Selon l'association française de normalisation (AFNOR), la maintenance est « ensembles des activités destinées à maintenir ou à établir un bien dans un état pour accomplir une fonction requise » .

Il y a deux grandes classes de la maintenance :

- Maintenance corrective ;
- Maintenance préventive : - systématique ;  
- conditionnelle.

### **I.6.1. Maintenance Corrective**

C'est un ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien. Autrement dit, la maintenance corrective est effectuée après la détection d'une panne : Elle devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines. Ce type de maintenance sera réservé aux matériels peu coûteux, non stratégiques pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité.

### **I.6.2. Maintenance Préventive**

Ce type de maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des équipements au cours de l'utilisation. La mise en pratique de ce type de maintenance nécessite la décomposition des sous-systèmes en composants (roulement, circuit magnétique, etc...). Les buts de la maintenance préventive, sont:

- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Diminuer le budget de la maintenance.
- Supprimer les causes des accidents graves.

#### **I.6.2.1. Maintenance préventive systématique**

La maintenance systématique est un type de maintenance planifiée dans le temps (graissage, lubrification, nettoyage, dépolluissage, calibrage,...).

Il s'agit là d'éviter les causes de défaillances et de vieillissement des composantes du système. Généralement, la maintenance préventive systématique s'adresse aux éléments dont le coût des pannes est élevé, mais ne revenant pas trop cher en changement (les meilleur exemples sont le changement systématique de l'huile, des filtres, changement de la courroie de synchronisation, des roulements, des paliers de rotation ...).

### I.6.2.2. Maintenance préventive conditionnelle

C'est un type de maintenance déclenché suite à un symptôme observable (température vibration, jeu excessif, ...) permettant de prédire une défaillance prochaine. Il s'agit là d'intervenir juste avant que la panne ne survienne. La maintenance préventive conditionnelle est réalisée dès lors qu'une mesure dépasse une valeur précise (seuil) d'une grandeur physique (température, pression...).

La maintenance préventive conditionnelle s'adresse aux pièces des machines coûtant chers en remplacement et pouvant être surveillées par des méthodes non –destructives (vibration, huile, température, courant, etc.). Autrement dit, on ne change l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure affectant les performances du fonctionnement. La maintenance préventive conditionnelle nécessite une équipe de maintenance de niveau technologique plus élevé formée en méthodes du diagnostic.

Les outils ou bien les signaux qui peuvent être utilisés par la maintenance préventive conditionnelle sont :

- mesure de température, thermographie infrarouge (lignage, roulements, paliers)
- mesures de pression (paliers) ;
- mesure de débit (paliers) ;
- analyse d'huile (roulements, paliers, engrenages) ;
- mesure de vibration (déséquilibre, roulements, paliers, engrenages, jeux, etc.) ;
- mesure du courant statorique, du couple, de la vitesse ou de la puissance.

D'après ces définitions, il apparaît donc que si un composant d'un système est jugé défaillant, sa réparation ou son remplacement doit être considéré comme de la maintenance corrective ; si celui-ci est jugé non défaillant mais en état dégradé, sa réparation ou son remplacement doit être considéré comme de la maintenance préventive. [10]

## I.7. Définition et objectif du diagnostic

### I.7.1. Définition

La définition du diagnostic selon la norme AFNOR et CEI stipule que : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test ». Cette définition résume les deux tâches essentielles du diagnostic :

- Observer les symptômes de la défaillance ;
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur les observations.

### **I.7.2. Objectif du diagnostic**

L'objectif d'un système de diagnostique est de prévoir l'apparition d'un défaut le plus rapidement possible et le plus précisément possible. Pour pouvoir expliquer ce principe avec plus de précision, nous allons tout d'abord définir ce que nous entendons par défaut, puis nous rappellerons les fonctions du diagnostique telles que la détection, la localisation, et l'identification des défauts.

### **I.7.3. Méthodes de diagnostic**

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

- L'usage des outils mathématiques qui permettent de modéliser les systèmes, les causes et les symptômes de défaillance, pour faciliter les démarches inductives et déductives, qui relèvent du domaine des méthodes de diagnostic interne
- L'usage des méthodes capables de reproduire sous forme informatique, les modes de raisonnement de l'homme. Ces derniers sont basés sur la discipline de l'intelligence artificielle et sont du domaine des méthodes de diagnostic externe. On peut classer les méthodes de diagnostic en premier lieu dans les deux grandes familles :
  - les méthodes internes et externes.
  - les méthodes inductives et déductives.

#### **I.7.3.1. Méthodes externes**

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine acquise par apprentissage, ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux que fournit la machine lors de son fonctionnement, les signaux utilisables peuvent être:

Flux d'entrefer, puissance instantanée, courant statorique et vibration acoustique.

#### **I.7.3.2. Méthodes internes**

La connaissance du modèle permet de décrire les relations de cause à effet, ces méthodes requièrent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèle mathématique, ces méthodes utilisent un modèle pour reproduire le comportement du système . On distingue ces méthodes suivant le modèle utilisé:

- Modèles de simulation : les modèles analytiques utilisés dans ce mode sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert.
- Observateurs : un module capable d'engendrer une approximation du vecteur d'état est appelé : estimateur d'état ou observateur d'état. Le modèle est décrit sous une représentation de variables d'état. L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic.
- Estimation paramétrique : c'est la détermination des vecteurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système.

- Modélisation des signaux : dans cette méthode, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts, l'analyse spectrale est très utilisée pour détecter des défaillances dans les machines électriques.

### **I.7.3.3.Méthodes inductives**

Elles correspondent à une approche montante ou recherche en avant, il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système, ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leur combinaison afin de trouver le défaut .

### **I.7.3.4 Méthodes déductives**

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes, la méthode déductive doit trouver quels sont les effets dans le système. Une vérification des effets trouvés par rapport aux effets possibles permet de confirmer l'existence d'un défaut. Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou arrière) soit une combinaison de raisonnement (avant et arrière) dans ce dernier cas le raisonnement appelé mixte ou avant arrière ..[9]

## **I.8.Conclusion**

Ce chapitre explore en profondeur l'état de l'art de la machine asynchrone, mettant en lumière les divers types de défaillances ainsi que les méthodes de diagnostic et de détection associées. Les études statistiques présentées soulignent que les défauts mécaniques sont les plus courants dans ces machines, et ils peuvent souvent être à l'origine de défaillances plus graves affectant d'autres composants. Il apparaît crucial de développer des modèles triphasés spécifiques ou prendre directement des résultats expérimentaux pour la machine asynchrone, notamment pour diagnostiquer et détecter les défauts tels que les ruptures de barres rotoriques et les excentricités qui sera le sujet de notre mémoire. Le diagnostic joue un rôle essentiel dans la préservation de la performance et de la fiabilité de ces machines en permettant une détection précoce des anomalies et une intervention appropriée pour prévenir des défaillances majeures.

***Chapitre II***  
***Technique de Diagnostic des***  
***défauts de la machine asynchrone***

## II.1.Introduction

La détection et l'analyse des défauts dans les machines asynchrones sont cruciales pour garantir leur fonctionnement efficace et fiable dans les environnements industriels. L'identification précoce des défauts et la compréhension de leurs causes sont essentielles pour améliorer la disponibilité des machines, éviter les temps d'arrêt imprévus et minimiser les coûts de maintenance. Les défauts électriques courants dans les machines asynchrones incluent la rupture du stator ou du rotor, les courts-circuits entre les spires de la même phase, la perte ou les dommages d'isolation et la rupture de barres de cage derotor. L'objectif du diagnostic et de l'analyse des défauts est de déterminer le type, l'emplacement et la cause du défaut. Ce processus implique généralement la surveillance de divers indicateurs de performance de la machine, tels que les vibrations, les courants électriques, la température, la pression, la vitesse et la fréquence. Les données opérationnelles sont collectées à partir de la machine et analysées à l'aide de techniques d'analyse de signal et de méthodes d'intelligence artificielle telles que les réseaux neuronaux artificiels (ANN) et l'apprentissage profond. Ce chapitre explorera la détection des erreurs, en commençant par le diagnostic et puis en les analysant dans les dispositifs asynchrones.

## II.2.Aperçu sur les méthodes de diagnostic des défauts

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur.

Pour remédier au problème de détection des défauts, il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure (mesure de champ magnétique, mesure de bruit) d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut (courant statorique, couple et vitesse) comme le montre la Figure (II.1).

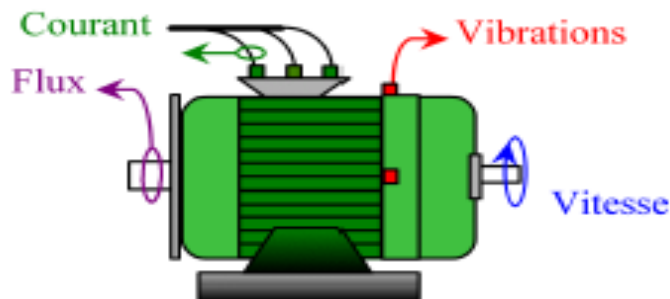


Figure II. 1:Différentes grandeurs de diagnostic dans une machine.

### II.3.Méthodes de diagnostic avec modèle

Ces méthodes sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance a priori du système. Elles peuvent s'appuyer sur le suivi d'évolution des paramètres caractéristiques du système étudié. Une comparaison entre un dispositif surveillé et un modèle de référence fait apparaître des différences comportementales de certaines grandeurs caractéristiques liées au fonctionnement de la machine. Ces différences sont appelées résidus. Ces résidus sont alors utilisés comme entrées d'un processus de détection des défauts:

- **surveillance à base des observateurs (estimateurs):** ce modèle est décrit sous une représentation de variable d'état ;
- **surveillance par projection dans l'espace de parité :** cette méthode consiste à vérifier l'exactitude des équations mathématiques du modèle en se basant sur les sorties du procédé;
- **surveillance par estimation paramétrique:** c'est la détermination des vecteurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système .[2]

### II.4.Méthodes de diagnostic sans modèle

Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : les techniques mécaniques, les techniques chimiques et les techniques magnétiques et électriques . [1]

#### 4.1.Techniques mécaniques

##### 4.1.1.Diagnostic par mesure de la température

Les températures des supports sont surveillées sur des bases de routine, et fournissent des informations utiles. Un volume de liquide refroidissant, débouché sur des températures, est aussi précieux pour l'indication des problèmes de refroidissement et pour le contrôle lorsqu'il est proposé de faire opérer la machine au-delà de sa puissance. Les températures des bobines sont aussi impératives pour la détermination de la limite pour laquelle le moteur peut être chargé et pour l'estimation de la durée de vie rémanente de l'isolation des enroulements. Elles sont rarement mesurées à cause des problèmes d'obtention de l'isolation électrique contre les conducteurs de haute tension, bien que les détecteurs de température soient parfois intercalés dans l'isolant renfermé sur le point surchauffé du conducteur, mais cela affaiblit l'intégrité de l'isolant. Il demeure donc une nécessité pour le capteur de fortes températures avec lequel peut être monté sur les enroulements ou inséré dans l'isolant électriquement isolé par rapport à son instrument de mesure.[3]

##### 4.1.2.Diagnostic par mesure des vibrations

Les signaux de vibrations détectés contiennent des informations essentielles sur l'état de la machine. L'analyse spectrale de ces signaux nous renseigne sur les différents défauts qui sont à l'origine de ces vibrations.[4] Les vibrations de la machine peuvent

être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques, rotoriques et l'excentricité).

Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode. [5]

## II.4.2. Diagnostic chimique

Plusieurs moteurs sont refroidis par l'air ou à l'aide d'un circuit fermé avec un échangeur de chaleur hydro réfrigéré. La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air refroidissant et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge. L'air est tiré du moteur à travers le tube vers le détecteur infrarouge par une pompe auxiliaire. Seuls les moteurs en service sont échantillonnés et la forme de l'air de chaque moteur est analysée pendant deux minutes.

L'huile de roulement est aussi analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents.

À ce stade, on peut conclure que la plupart des techniques précitées exigent l'emploi des capteurs, qui doivent être placés au niveau de la machine. C'est pour cette raison elles peuvent être utilisées que pour les machines de grande puissance. Ces techniques sont basées généralement sur l'utilisation des grandeurs mécaniques, afin que les ingénieurs mécaniciens puissent faire leur interprétation. Bien que les machines soient des moteurs asynchrones. La présence des ingénieurs électriciens est nécessaire pour intervenir dans la partie électrique et pour cette raison les techniques de diagnostic sont de plus en plus orientées vers l'emploi des grandeurs électriques vu leur accessibilité et la simplicité du capteur utilisé. [4]

## II.4.3. Techniques magnétiques et électriques

### 4.3.1. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator et du rotor ce qui affecte la répartition du champ magnétique dans toute la machine. Plusieurs auteurs se sont penchés à l'exploitation du flux axial. En fait, si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de cette tension induite, peut être exploité pour détecter les différents défauts statoriques ou rotoriques. [5] L'analyse spectrale de la tension induite peut être utilisée pour identifier les

différentes asymétries et défauts. Le contenu d'harmoniques des flux de fuites axiaux du stator et du rotor est directement en relation avec les harmoniques contenus respectivement dans les courants du stator et du rotor. La conséquence directe d'un défaut est l'augmentation du flux de fuite axial. Cette augmentation du flux est la condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite axial comme une technique de diagnostic, c'est-à-dire ce dernier doit avoir une valeur importante comme le montre la Figure (II.2)

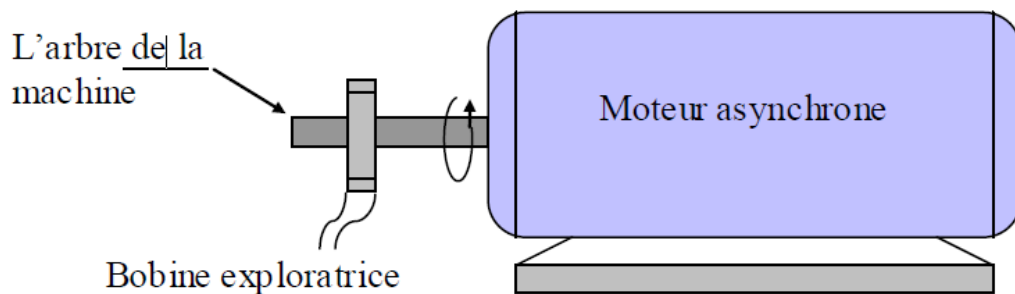


Figure II. 2: Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial.[4]

#### 4.3.2. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

En 1999 J. Milimonfared a proposé une autre technique pour la détection des défauts rotoriques dans les machines asynchrones. Cette technique, est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques, pendant la déconnexion du moteur du réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. Cependant, l'application de cette technique est impossible lorsqu'il s'agit d'un moteur appartenant à une chaîne de production.

#### 4.3.3. Diagnostic par l'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. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient majeur de cette méthode.

#### 4.3.4. Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée

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

spires statorique. Dans cette direction, M. Drif et al. ont démontrés l'efficacité de l'utilisation de la puissance apparente pour la détection d'un défaut d'excentricité.

#### 4.3.5. Diagnostic par l'analyse de la tension de neutre

Cette méthode a démontré son efficacité quant à la détection des défauts statoriques, ainsi que les défauts rotoriques. Cependant, l'utilisation de cette technique devient un peu compliquée dans le cas où le neutre de la machine est très loin par rapport à celui de la source. [5] Les constructeurs de machines peuvent donner accès au neutre de la machine asynchrone même si celle-ci est alimentée par un onduleur monté directement (Figure II.3). Dans ce cas la tension entre neutres peut être mesurée et analysée. Toutefois, d'après les résultats expérimentaux, et contrairement au courant, les composants harmoniques à considérer en cas de rupture de barres font intervenir seulement la fréquence du convertisseur.

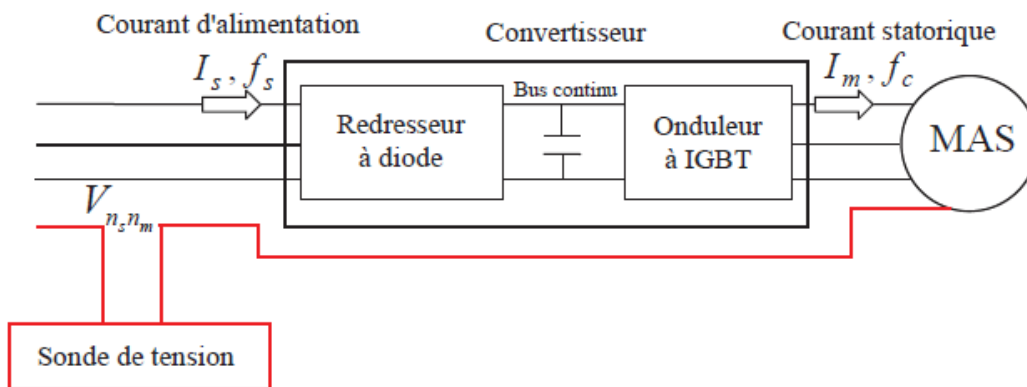


Figure II. 3: Système d'alimentation d'une machine asynchrone par convertisseur avec neutre sorti. [6]

Les composants harmoniques avec leurs fréquences relatives  $f_h$  (RBPF =  $nb ft$  (Rotor Bar Pass Frequency)) sont de nouveau donnés par :

$$f_{sh} = [3h - (3h - 1)s \mp 2ks] f_c \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$h=1,3,5,7$$

$$k=0,1,2..$$

#### 4.3.6. Diagnostic 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 de phase statorique. C'est cette méthode de diagnostic qui sera utilisée comme outil de diagnostic dans la recherche des différents défauts dans ce travail. Cette

méthode est basée sur la comparaison entre le spectre de courant de stator sain et le spectre de courant de stator défectueux. Les nouvelles composantes de fréquence apparaissent lorsque le moteur a souffert d'un défaut. La technique d'analyse spectrale du courant de stator (MCSA) est l'une des méthodes utilisées pour diagnostiquer de manière précise différents défauts dans les moteurs à induction. [7]

Dans le cas d'une répartition non sinusoïdale de la Fmm en plus du fondamental apparaît des harmoniques de l'encoche rotorique, cas d'un moteur à cage. [4]

Pour montrer le principe de cette méthode, on considère le cas d'une asymétrie rotorique d'un moteur asynchrone, l'existence de ce défaut engendre un courant de défaut dans le rotor. Ce courant produit une Fm pulsatoire dont la fréquence d'ondulation est ( $f_s$ ), cette Fm produit dans l'enroulement statorique une harmonique à deux composantes, la première ayant la fréquence  $(1-2s)f$  et la deuxième ayant la fréquence  $(1+2s)f$  (Figure II.4)

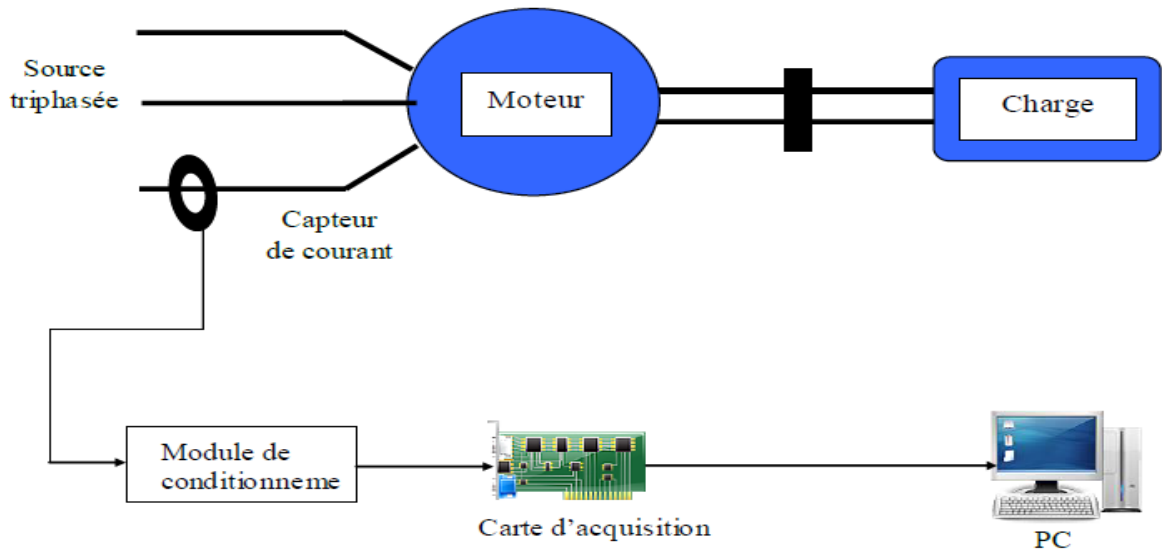


Figure II. 4: Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique. [3]

## II.5. Techniques d'analyse des signaux : MCSA (Motor Current Signature Analysis)

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

mesure d'un signal indique des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. La variation de ces signaux peut être reliée aux défauts.

Pour extraire les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut, généralement, on extrait l'amplitude ou les densités d'amplitude. Il existe toutefois d'autres possibilités qui consistent à déterminer les fonctions d'auto corrélation, les transformées de Fourier ou la densité spectrale. [8]

## II.6. Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic

L'apparition d'une défaillance sur un système étudié engendre et/ou la modification d'harmoniques au niveau des spectres des signaux. De nombreux outils de traitement du signal sont utilisés afin de caractériser les origines des défauts à partir des spectres.

### II.6.1. Transformée de Fourier rapide (FFT)

Considérons le signal  $X(t)$  à temps continu. Si  $X$  est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence  $f$  est la suivante "Figure (II.5) " :

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

$$X(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) e^{-2\pi f t} dt \quad (\text{II.3})$$



**Figure II. 5: Représentation temporelle vers fréquentielle.**

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

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{K=0}^{K=N-1} x(KT) e^{-\frac{2\pi f k t}{NT}} \quad (\text{II.4})$$

et sa relation inverse est donnée par:

$$x(KT) = \frac{1}{N} \sum_{K=0}^{K=N-1} x\left(\frac{f}{NT}\right) e^{-j\frac{2\pi f K t}{NT}} \quad (\text{II.5})$$

## II.6.2. Transformation en ondelette

La transformée en Ondelette est un outil récent de traitement de signal. Son principe repose sur la décomposition d'un signal dans une base de fonctions particulières. De ce point de vue, elle est tout à fait comparable à l'analyse de Fourier. Cependant, les ondelettes sont des fonctions oscillantes au sens large, rapidement amorties, contrairement aux fonctions sinusoïdales de l'analyse de Fourier. Par ailleurs, les ondelettes possèdent la propriété de pouvoir être bien localisées en temps ou en fréquence, ce qui les différencie principalement de l'analyse Temps-fréquence classique, comme la montre la Figure (II.6).

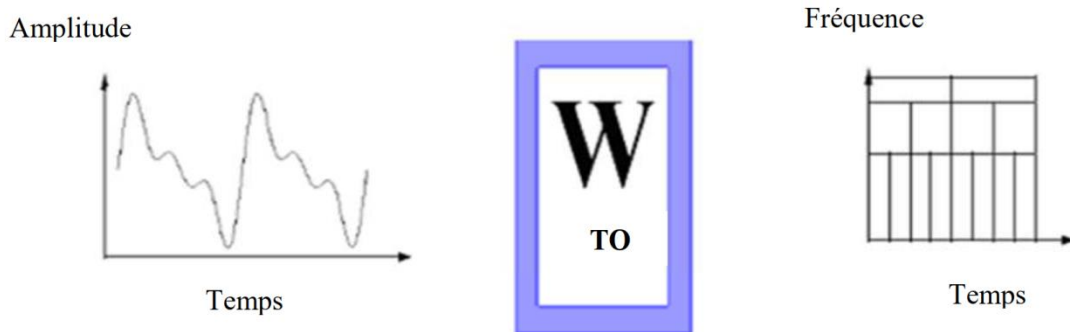


Figure II. 6: Transformation en ondelette.[9]

## II.7. Description du phénomène harmoniques

Les réseaux électriques et presque tous les appareils qui y sont connectés sont soumis à de nombreuses perturbations depuis l'arrivée sur le marché de composants électroniques de puissance tels que les thyristors, les triacs ou les transistors haute puissance. Ces composants ont permis le développement de convertisseurs statiques qui régulent et transforment l'énergie électrique d'une forme à une autre. Ces convertisseurs, par rapport au réseau, sont considérés comme des charges non linéaires. Ils injectent des courants harmoniques dans le réseau électrique. Un harmonique est une onde multiple produite par une autre onde. Cette dernière a une amplitude et une fréquence. La fréquence fondamentale utilisée dans nos réseaux électriques est de 50 Hz. Les harmoniques ont une valeur correspondant à des multiples pairs ou impairs de 50 Hz. Ainsi, la fréquence du cinquième harmonique est de 250 Hz (5 x 50 Hz). Son amplitude peut être mesurée en volts ou en ampères.

## II.8. Origine des harmoniques

La figure II.7 montre l'image d'une onde déformée. Les dispositifs suivants sont des sources d'harmoniques :

- Les convertisseurs statiques basés sur des composants électroniques (diodes, transistors, etc.) génèrent des courants harmoniques, ce qui affecte le facteur de puissance. Cependant, il convient de noter que les charges symétriques ne génèrent pas d'harmoniques d'ordre pair. Le spectre harmonique diminue progressivement, le

3ème harmonique étant prédominant pour les charges monophasées, atteignant jusqu'à 80% du fondamental.

- L'éclairage utilisant des lampes à décharge et des tubes fluorescents génère des courants harmoniques.
- Pour les fours à arc à courant alternatif, l'arc est non linéaire, asymétrique et instable. Les spectres contiennent des harmoniques impaires et paires, ainsi qu'un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). Il convient de mentionner que les fours à arc à courant continu sont généralement alimentés par des redresseurs, et l'arc est plus stable que dans le courant alternatif.
- Les inducteurs saturés (comme dans le cas des transformateurs non chargés soumis à une surtension permanente) ont une impédance dépendant de l'amplitude du courant qui les traverse, provoquant des distorsions dans ce courant.
- Les machines tournantes génèrent des harmoniques d'ordre élevé avec des amplitudes négligeables. [11]

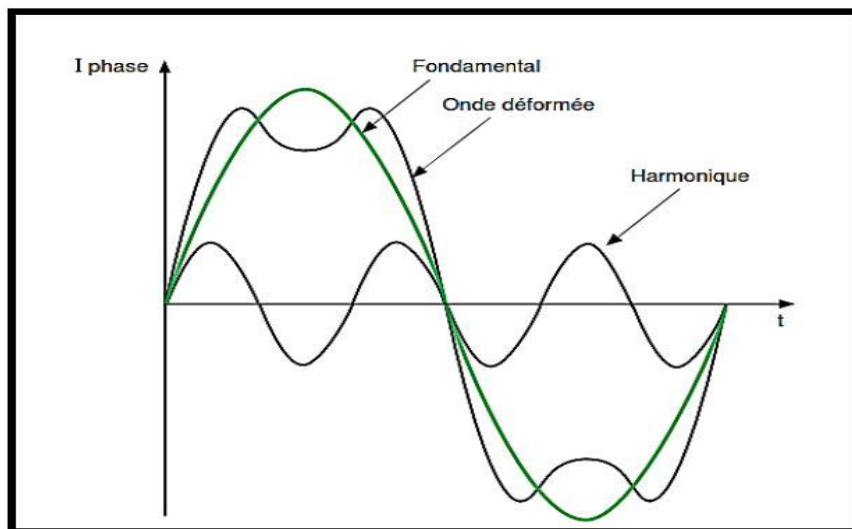


Figure II. 7: Image d'une onde déformée. [10]

### 8.1. Effets instantanés

Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement de l'équipement. Il s'agit de:

- a) Pertes d'énergie :** Les courants harmoniques provoquent des pertes supplémentaires dans les conducteurs et l'équipement par effet Joule.
- b) Perturbation des lignes de faible courant :** Les dispositifs à faible courant sont perturbés lorsqu'ils sont utilisés à côté d'une ligne électrique à haute puissance. C'est le cas par exemple des téléphones portables, il est difficile d'entendre.
- c) Déclenchement intempestif et arrêts d'usine :** Les disjoncteurs dans une installation sont soumis à des pics de courant dus aux harmoniques. Ces pics de courant peuvent provoquer des déclenchements intempestifs, et entraîner des pertes de production ainsi que des coûts liés au temps de redémarrage de l'installation.
- d) Vibrations, bruits :** Les courants harmoniques provoquent des vibrations, des bruits acoustiques, surtout dans les dispositifs électromagnétiques (transformateurs, inducteurs). Les couples mécaniques pulsés, dus aux champs tournants harmoniques,

provoqueront des vibrations dans les machines tournantes. Ils peuvent entraîner une destruction du matériau.

### 8.2. Effets à long terme

Ils apparaissent après une exposition prolongée au phénomène et résultent par une perte partielle de fonctionnalité ou une destruction complète du dispositif.

a) Chauffage, vieillissement : Il existe un risque de résonance avec le circuit amont (inductance du réseau), suite à la circulation de certains rangs harmoniques. Ce phénomène peut entraîner un facteur d'amplification du courant dans le condensateur le surchargeant. Et peut conduire à sa rupture.

b) Augmentation de la température dans les conducteurs et l'équipement électrique: Les conducteurs électriques transportent les courants harmoniques qui produisent, par effet Joule, un chauffage des conducteurs de la même manière que le courant fondamental. Malheureusement, les harmoniques ne contribuent pas au transfert de puissance active, elles ne créent que des pertes électriques et contribuent à la dégradation du facteur de puissance de l'installation. Les condensateurs sont particulièrement sensibles à la circulation des courants harmoniques car leur impédance diminue proportionnellement au rang des harmoniques présentes dans le signal déformé.

c) Effets sur le conducteur neutre : Dans un système équilibré, les composantes homopolaires dans le conducteur neutre sont nulles. Cependant, ce n'est pas le cas dans les systèmes avec des charges non linéaires. En fait, les courants homopolaires des harmoniques avec des multiples de trois s'additionneront dans le conducteur neutre. L'intensité de ces courants superposés peut sérieusement endommager le câble neutre.

## II.9. Solutions harmoniques générales

Puisque les harmoniques sont des ondes ayant une fréquence et une amplitude, la solution la plus efficace est de les filtrer en utilisant des techniques de filtrage passif ou actif.

**9.1. Filtres passifs:** Les filtres passifs sont conçus en utilisant des composants passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances pour atténuer des fréquences harmoniques spécifiques. Ils sont généralement connectés en parallèle avec la charge ou l'équipement générant des harmoniques.

Les filtres passifs peuvent être catégorisés en différents types:

- Filtres passe-bas : Ces filtres atténuent les harmoniques de haute fréquence tout en permettant aux composantes fondamentales de basse fréquence de passer.
- Filtres passe-haut : Les filtres passe-haut permettent aux composantes de haute fréquence de passer tout en atténuant les harmoniques de basse fréquence.
- Filtres passe-bande : Ces filtres permettent à une bande spécifique de fréquences de passer tout en atténuant les harmoniques en dehors de cette bande.
- Filtres en encoche : Les filtres en encoche sont conçus pour cibler et atténuer des fréquences harmoniques spécifiques tout en permettant aux autres fréquences de passer sans être affectées.

**9.2.Filtres actifs:** Les filtres actifs utilisent des dispositifs électroniques de puissance, tels que des thyristors ou des transistors bipolaires à grille isolée (IGBT), ainsi que des systèmes de contrôle pour éliminer activement les harmoniques. Les filtres actifs génèrent un courant de compensation qui annule le courant harmonique, réduisant ainsi efficacement la distorsion harmonique. Les filtres actifs offrent plus de flexibilité et d'adaptabilité par rapport aux filtres passifs. Ils peuvent être réglés pour cibler des harmoniques spécifiques et fournir une compensation dynamique lorsque les conditions de charge changent.

**9.3.Filtres hybrides:** Les filtres hybrides combinent des techniques de filtrage passif et actif pour fournir une atténuation harmonique améliorée. Ils utilisent des composants passifs pour filtrer des harmoniques spécifiques et des composants actifs pour un contrôle et une compensation précis.

**9.4.Filtres harmoniques accordés:** Les filtres harmoniques accordés sont conçus pour atténuer une fréquence harmonique spécifique en introduisant un circuit accordé en parallèle qui crée un chemin de faible impédance à cette fréquence, détournant efficacement le courant harmonique du système électrique. Il est à noter que le choix et la conception de la technique de filtrage appropriée dépendent de facteurs tels que les fréquences harmoniques présentes, les caractéristiques de charge et le niveau souhaité d'atténuation harmonique. L'expertise en ingénierie et une analyse minutieuse du profil harmonique sont essentielles pour déterminer la solution de filtrage la plus efficace pour une application spécifique. [10]

## II.10.Harmoniques du courant statorique des machines à induction

Les harmoniques du courant statorique des machines à induction font référence aux fréquences supplémentaires présentes dans la forme d'onde du courant en plus de la fréquence fondamentale. La fréquence fondamentale est celle à laquelle la tension du stator est appliquée à la machine, généralement 50 ou 60 Hz selon la région. Les harmoniques sont causées par les non-linéarités dans le circuit magnétique de la machine et les variations de charge. La présence d'harmoniques peut indiquer des défauts dans la machine tels que des barres de rotor cassées, une excentricité ou des défauts du stator. L'analyse des harmoniques du courant statorique peut fournir des informations précieuses pour la surveillance de l'état et le diagnostic des défauts des machines à induction.

Le champ d'entrefer d'une machine à induction est composé de diverses harmoniques spatiales distinctes lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale. L'analyse qui suit fait l'hypothèse que ces harmoniques de flux d'entrefer résultent de l'interaction entre les ondes MMF harmoniques et la présence de l'entrefer. Ici, seules les harmoniques résultant des harmoniques de fente du rotor (RSHs) sont prises en compte. Des recherches ont montré que les harmoniques de fente du rotor sont générées dans le courant de ligne statorique d'une machine saine à des fréquences .

$$f_{RSH}(k, s) = \left| \left( 1 \pm \frac{kN_r}{P} (1-s) \right) f_s \right|_{k=1,2,3,\dots} \quad (\text{II.6})$$

Dans cette déclaration concernant un moteur asynchrone triphasé, on implique un système de tension équilibré alimentant un enroulement statorique composé de trois bobines identiques. Il est important d'identifier uniquement les courants produits lorsque l'ordre harmonique est impair et non un multiple de trois. Le seul courant de glissement rotorique détectable est celui dont l'ordre correspond à l'une des configurations suivantes.

$$G = \left\{ \left( \left( \frac{kN_r}{P} \pm 1 \right)_{k=1,2,3,\dots} \right) \cap (6v \pm 1)_{v=1,2,3,\dots} \right\} \quad (\text{II.7})$$

Dans des situations pratiques, il n'est pas rare de rencontrer des degrés variables de déséquilibre du stator dans les moteurs à induction, qui peuvent provenir de divers facteurs tels que des irrégularités dans l'alimentation en tension, une asymétrie résiduelle dans les enroulements du stator, ou des problèmes de connexion neutre. Ces facteurs peuvent entraîner la présence de tous les harmoniques dans le spectre du courant, y compris ceux ayant des rangs multiples de trois. Dans un moteur à induction fonctionnant normalement avec un rotor en cage d'écureuil, le courant de stator est généralement composé de deux ensembles d'harmoniques.

- Séries d'harmoniques temporelles de fréquence (**TH**).

$$f_{TH}(h) = hf_s \text{ ou } TH = hf_s$$

- Séries d'harmoniques des fentes du rotor de fréquence (**RSH**).

$$f_{RSH}(h, k, s) = \left| \left( h \pm \frac{kN_r}{P} (1-s) \right) f_s \right| \text{ ou } (\text{II.8})$$

$$S^\pm = |(hf_s \pm kN_r f_r)|$$

• Où h est un ordre harmonique de temps, h = 1, 3, 5, et k = 1, 2, 3, 4, .... Il peut y avoir d'autres harmoniques présentes dans le courant statorique d'un moteur à induction, telles que les harmoniques de défaut de barres de rotor (RBFHs) et les harmoniques de défaut d'excentricité (EFHs) mentionnées dans la question. Les harmoniques peuvent servir d'outils de diagnostic efficaces pour détecter et localiser les défauts et les anomalies de conception du moteur, car ils en sont souvent la cause.

Pour un moteur à induction sain avec un rotor en cage d'écureuil, il existe deux ensembles supplémentaires d'harmoniques présents dans le courant statorique:

- Séries d'harmoniques de défaut de barres de rotor (RBFHs) de fréquence

$$f_{RBFH}(h, k, s) = |(h \pm 2.ks)f_s|_{\text{ou}} \quad (\text{II.9})$$

$$R^\pm = |(h \pm 2.ks)f_s|$$

- Séries d'harmoniques de défauts d'excentricité (EFHs) de différentes fréquences.

$$f_{EFH}(h, k, s) = \left| \left( h \pm \frac{k}{p}(1-s) \right) f_s \right| \quad (\text{II.10})$$

- Séries d'harmoniques de défaut d'excentricité (EFHs) à différentes fréquences:

$$E^\pm = |(hf_s \pm kf_r)|$$

$$f_r = 24 \text{ Hz} ; \text{ Il s'agit de la fréquence de rotation } . f_r = \left( \frac{1}{p}(1-s) \cdot f_s \right)$$

### II.11. Etude du courant statorique avec ses harmoniques

Pour analyser le comportement de la machine asynchrone et détecter d'éventuels défauts, il est nécessaire de considérer non seulement la composante fondamentale du courant statorique mais également tous ses harmoniques. L'analyse du contenu harmonique du courant statorique est essentielle pour le diagnostic des défauts et la surveillance de l'état des machines asynchrones. Les courants de phase sont l'objet de l'analyse ultérieure. Le fondamental et tous les harmoniques du courant servent de base pour les calculs mathématiques dans ce cas. C'est pourquoi, dans un scénario parfait, fournit la valeur actuelle à un moment spécifique du courant traversant la phase A du stator.

$$i_{sa}(t)_{\text{healthy}} = \hat{I}_F \cos(2\pi f_s t) \quad (\text{II.11})$$

Les équations (1) à (6) impliquent l'addition d'harmoniques. fait référence au courant de crête du composant de base (ou de l'harmonique temporelle ayant une valeur de (1)) de l'alimentation de phase.

$$i_{sa}(t)_{\text{sain}} = \sum_{h=1}^n \left[ \hat{I}_{TH_h} \cos(2\pi TH_h t) + \hat{I}_{S_{h,k}^\pm} \cos(2\pi S_{h,k}^\pm t) + \sum_{k=1}^m \left[ \hat{I}_{R_{h,k}^\pm} \cos(2\pi R_{h,k}^\pm t) + \hat{I}_{E_{h,k}^\pm} \cos(2\pi E_{h,k}^\pm t) \right] \right] \quad (\text{II.12})$$

$$i_{sa}(t)_{\text{défaut}} = \sum_{h=1}^n \left[ \hat{I}'_{TH_h} \cos(2\pi TH_h t) + \hat{I}'_{S_{h,k}^\pm} \cos(2\pi S_{h,k}^\pm t) + \sum_{k=1}^m \left[ \hat{I}'_{R_{h,k}^\pm} \cos(2\pi R_{h,k}^\pm t) + \hat{I}'_{E_{h,k}^\pm} \cos(2\pi E_{h,k}^\pm t) \right] \right] \quad (\text{II.13})$$

Les variables  $\hat{I}_{TH_h}$ ,  $\hat{I}_{S_{h,k}^\pm}$ ,  $\hat{I}_{R_{h,k}^\pm}$ , et  $\hat{I}_{E_{h,k}^\pm}$  représentent le courant maximal en ampères pour les harmoniques temporelles (TH), les harmoniques des fentes du rotor (RSH), les harmoniques de défaut de barres de rotor (RBFH) et les harmoniques de défaut d'excentricité (EFH), respectivement, dans des conditions de fonctionnement saines comme indiqué dans le Tableau 2, la Figure 2 et la Figure 3. Les variables  $m = 1,3,5,7,9, \dots$ ,  $n = 1,2,3,4, \dots$ ,  $t$  correspondent à des mesures en temps réel en secondes.

Dans le présent travail, le glissement n'a augmenté que légèrement lors d'une défaillance. En conséquence, l'équation suivante pour le courant statorique a été dérivée dans le cas de défauts du stator ou du rotor :

$$(s' \approx s) \text{ mais } (s' \neq s), \text{ avec } \hat{I}'_{TH_h} \neq \hat{I}_{TH_h}, \hat{I}'_{S_{h,k}^\pm} \neq \hat{I}_{S_{h,k}^\pm}, \hat{I}'_{R_{h,k}^\pm} \neq \hat{I}_{R_{h,k}^\pm} \text{ et } \hat{I}'_{E_{h,k}^\pm} \neq \hat{I}_{E_{h,k}^\pm}$$

Ici,  $\hat{I}'_{TH_h}$ ,  $\hat{I}'_{S_{h,k}^\pm}$ ,  $\hat{I}'_{R_{h,k}^\pm}$ , et  $\hat{I}'_{E_{h,k}^\pm}$  l'est le courant de phase d'alimentation maximal pour TH, RSH, RBFH et EFH en cas de défaillance, respectivement. "s" représente le glissement en cas de fonctionnement normal, "s'" dans le cas d'une défaillance, et  $f'_r = \left( \frac{1}{p} \cdot (1 - s') \right) f_s$  est la fréquence de rotation dans le cas d'un défaut.

**Tableau II. 1: Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique .[17-21]**

Types de harmoniques	Leur caractéristique fréquences	Leur causes
Time harmonics (TH):	$TH = hf_s$	Imposé par la source d'alimentation ou asymétrie d'enroulement
Rotor Slot Harmonics (RSH)	$S_{\pm} =  (hf_s \pm N_r f_r) $	Causé par la structure du rotor (distribution discrète du rotor barres dans les fentes du rotor)
Rotor Bar Fault Harmonics (RBFH)	$R_{\pm} =  (h \pm 2k_s)f_s $	En raison de l'asymétrie de le rotor de la cage du rotor
Eccentricity Fault Harmonics (EFH)	$E_{\pm} =  (hf_s \pm kf_r) $	En raison du mélange naturel excentricité du rotor

## II.12. Constat et discussion

Nous avons remarqué parmi tous les harmoniques étudiés que les harmoniques de temps sont les plus sensibles.

- Harmoniques de temps
- Harmoniques des fentes statoriques
- Harmoniques d'excentricité naturelle
- Harmoniques de défaut de barres cassées naturelles

Pour cette raison, notre étude se concentrera sur l'harmonique de temps. L'étude expérimentale dans le chapitre 3 qui suit proposera une nouvelle méthode pour le diagnostic des circuits des machines à induction en utilisant les harmoniques de temps comme indices de diagnostic .

## II.13. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons utilisé et présenté différentes méthodes de diagnostic pour les machines à induction, telles que l'analyse du courant statorique par FFT, le diagnostic avec la méthode d'ondelette ou avec le flux statorique et les réseaux de neurones, entre autres. Nous avons concentré notre étude sur les harmoniques provenant de la machine à induction et avons montré ces différentes harmoniques après une analyse approfondie. Nous avons constaté que l'harmonique de temps est le plus sensible et le plus utilisé dans la recherche pour diagnostiquer les machines à induction. Par conséquent, dans le chapitre suivant, nous allons nous concentrer sur l'étude du diagnostic avec l'harmonique de temps en utilisant des résultats expérimentaux pour faire le diagnostic des défauts d'excentricité.

# *Chapitre III*

## *Résultats expérimentaux*

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous examinons l'étude des harmoniques du courant statorique, ce qui permet de représenter les différentes courbes du courant statorique. Cette modulation est réalisée dans différentes conditions de fonctionnement : la machine en bon état et avec un défaut. Ensuite, nous présentons l'analyse détaillée des différents défauts du rotor (excentricité). Le but de cette analyse est d'analyser les phénomènes observés sur les performances du moteur.

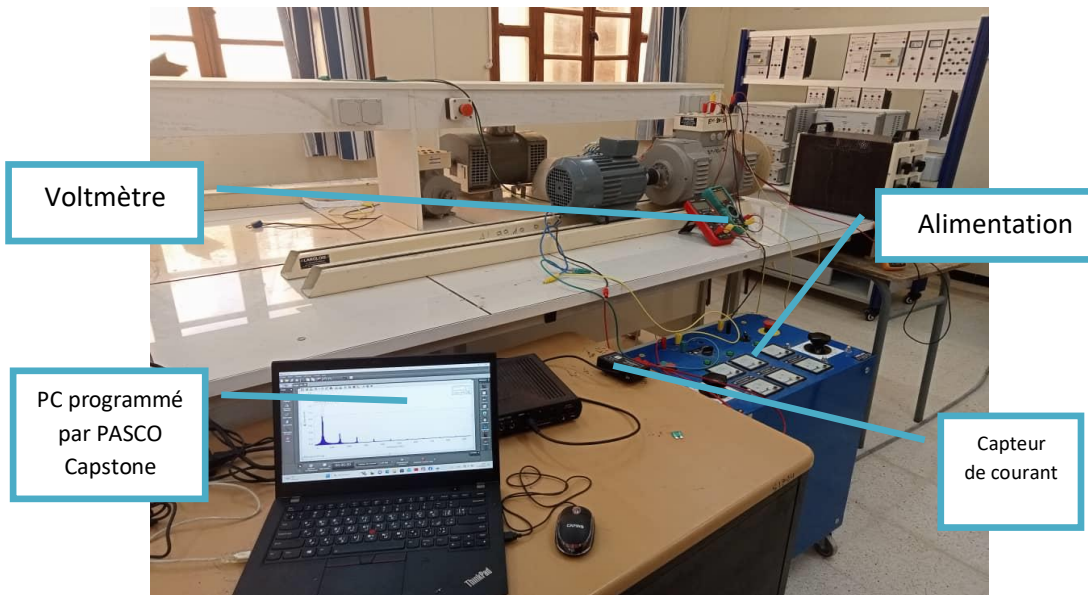
### III.2. Diagnostic par analyse du courant statorique

Cette méthode est un outil puissant pour détecter la présence de défauts mécaniques et électriques. Elle présente plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes car elle ne nécessite pas l'introduction d'un capteur au niveau de la machine ou l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant mais seulement un capteur de courant (sonde à effet Hall ou transformateur de courant) qui donne une image sur le courant de phase statorique. C'est cette méthode de diagnostic qui sera utilisée comme outil de diagnostic dans la recherche des différents défauts dans ce travail. Cette méthode est basée sur la comparaison entre le spectre du courant statorique sain et le spectre du courant statorique défectueux. Les nouvelles composantes de fréquence apparaissent lorsque le moteur a subi un défaut. La technique d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA) est l'une des méthodes utilisées pour diagnostiquer avec précision divers défauts dans un moteur électrique.

### III.3. Banc d'essai et résultats expérimentaux

Dans le laboratoire de la Faculté de Technologie (Université d'El Oued), nous, en tant qu'étudiants, avons réalisé une expérience sous la direction de notre superviseur. L'expérience portait sur l'analyse des moteurs électriques à l'aide de différents équipements et outils. Notre banc d'essai (Figure III.1) utilise un logiciel nommé **PASCO Capstone**.





**Figure III. 1: Diagramme deblocs du principe de la méthode du spectre de courant statorique utilisée pour obtenir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté de technologie (Université de El Oued).**

Les principaux composants utilisés dans l'expérience étaient les suivants :

- 1. Moteur asynchrone à cage d'écaille triphasé :** Ce moteur servait de dispositif principal sous investigation portant les caractéristiques suivantes :  $V=220/380\text{v}\Delta/Y$ ,  $P=3\text{kW}$ ,  $F=50\text{Hz}$ ,  $A I= 11.2\text{c}/6.5\text{A}$  et  $N=2890\text{ tr/min}$ .
- 2. Génératrice à courant continu :** caractéristiques suivantes :  $L'$ induit  $255/6\text{A}$  –  $L'$ inducteur  $94/0.48\text{A}$ , Puissance  $P=1500\text{ w}$ ,  $V = 1500\text{ tr/min}$
- 3. Capteur de courant :** Le capteur de courant était utilisé pour donner l'image du courant électrique circulant à travers le moteur pendant les différents fonctionnements.
- 4. Carte d'acquisition (PASCO) :** La carte d'acquisition, de marque PASCO, était utilisée pour capturer et faire le traitement des données électriques obtenues du moteur à partir du capteur de courant.
- 5. PC programmé par PASCO Capstone :** Un ordinateur personnel équipé du logiciel PASCO Capstone comme interface pour visualiser le courant statorique collecté et traité dans la fenêtre fréquentielle FFT , la fenêtre de temps ,.....

L'expérience a été réalisée en deux phases :

Une avec un moteur sain et une autre avec un moteur défectueux. Pour chaque phase, un total de trois tests ont été effectués pour assurer l'exactitude et la fiabilité des résultats expérimentaux. Le but de ces tests était de confirmer la cohérence des données et de minimiser toute l'erreur qui aurait pu survenir lors du processus d'extraction des données. L'expérience visait à identifier l'harmonique de temps

le plus sensible grâce à une procédure de trois tests: faible charge, moyenne charge et pleine charge. En analysant les harmoniques présentes dans les signaux électriques obtenus à partir des moteurs, nous avons cherché à détecter l'harmonique de temps le plus sensible. Les résultats obtenus étaient les suivants :

### 3.1. Régimesain

Nous avons mené trois expériences pour confirmer et comparer les résultats pendant l'expérience. Les résultats dans le cas d'une moteur sain sont les suivants:

- **La Figure (III.2)** représente la Spectre du courant statorique régime sain ( $A_{Ts1}.....(A)$  Test 1, avec 0% de la charge). La courbe représente l'évolution du courant électrique en fonction de la fréquence. On remarque que les trois premières valeurs de l'amplitudes ont démunie de manière significative tandis que les autres valeurs ont légèrement diminué.
- **La Figure (III.3)** montre la Spectre du courant statorique régime sain ( $A_{Ts2}.....(A)$  Test 2, avec 15 % de la charge). Un changement de 15 % de la charge diminue également, de sorte que l'on remarque une diminution significative dans les trois premières valeurs, et la diminution se poursuit légèrement dans le reste des valeurs.
- **La Figure (III.4)** représente la Spectre du courant statorique régime sain ( $A_{Ts3}.....(A)$  Test 3, avec 45 % de la charge). Dans le cas de 45% de la charge, on remarque que les valeurs diminuent petit à petit
- **Tableau (III.1)** représente la Amplitudes des différentes harmoniques du courant statorique sain du moteur. Ce tableau montre les résultats des trois expériences avec les charges suivants : 0 %, 15 % et 45 %.

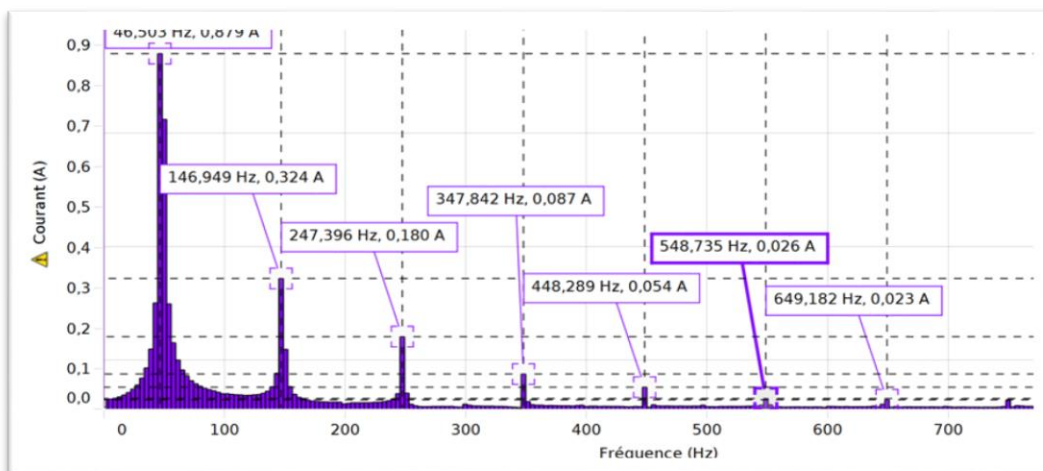


Figure III. 2: Spectre du courant statorique régime sain ( $A_{Ts1}.....(A)$  Test 1, avec 0% de la charge).

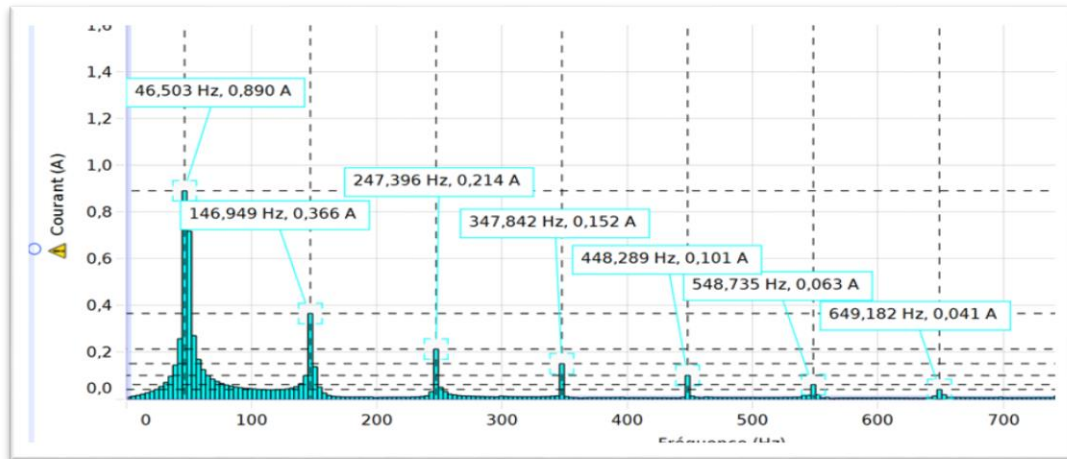


Figure III. 3: Spectre du courant statorique régimesain ( $A_{Ts2}....(A)$  Test 2, avec 15 % de la charge).

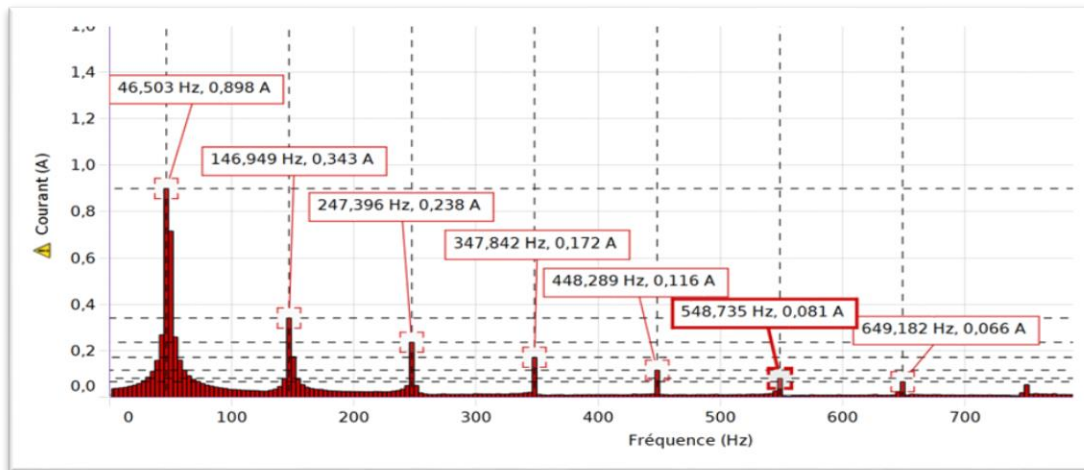


Figure III. 4: Spectre du courant statorique régimesain ( $A_{Ts3}....(A)$  Test 3, avec 45 % de la charge ).

Les résultats sont enregistrés dans le tableau suivant (Tableau III. 1):

**Tableau III. 1: Amplitudes des différentes harmoniques du courant statorique sain du moteur.**

Rang harmonique de temps	TH <sub>1</sub>	TH <sub>3</sub>	TH <sub>5</sub>	TH <sub>7</sub>	TH <sub>9</sub>	TH <sub>11</sub>	TH <sub>13</sub>
Fréquences TH <sub>h</sub> = f <sub>s</sub> (Hz)	50	150	250	350	450	550	650
Amplitudes	A <sub>TS-1</sub>	A <sub>TS-3</sub>	A <sub>TS-5</sub>	A <sub>TS-7</sub>	A <sub>TS-9</sub>	A <sub>TS-11</sub>	A <sub>TS-13</sub>
A <sub>TS1</sub> (A) Test 1, avec 0% de la charge	0.879	0.234	0.180	0.087	0.054	0.026	0.023
A <sub>TS2</sub> (A) Test 2, avec 15 % de la charge	0.890	0.366	0.214	0.152	0.101	0.063	0.041
A <sub>TS3</sub> (A) Test 3 ,avec 45 % de la charge	0.898	0.343	0.238	0.172	0.116	0.081	0.066

A<sub>TS-1</sub>:Amplitude Test avec régime sain pour l'harmonique rang 1

Avec le rang de l'harmonique  $h = 1,3,5,7,9,11,13 \dots$

Fréquence d'alimentation  $f_s = 50$  Hz

### 3.2. Régime avec défaut

Nous avons mené trois expériences dans le cas d'une machine défectueuse pour confirmer et comparer les résultats. Les résultats dans le cas d'un moteur défectueux sont les suivants:

- **La Figure (III.5)** représente la Spectre du courant statorique régime de défaut (A<sub>Td1</sub>....(A); Test 1, avec 0% de la charge), la courbe illustre comment le courant varie en fonction de la fréquence, démontrant que cette variation diminue progressivement depuis une valeur maximale(0.868) jusqu'à presque disparaître(0.027).
- **La Figure (III.6)** montre la Spectre du courant statorique régime de défaut (A<sub>Td2</sub>....(A); Test 2, avec 15 % de la charge), Le changement de courant dans ce cas est décroissant d'une valeur(0.909) à une autre(0.046).
- **La Figure (III.7)** représente la Spectre du courant statorique régime de défaut (A<sub>Td3</sub>....(A) ;Test 3 ,avec 45 % de la charge ). Dans ce cas, on observe une diminution progressive de la valeur du courant (0.916) jusqu'à atteindre zéro.
- **Tableau (III.2)** représente l'Amplitudes des différentes harmoniques du courant statorique défaut du moteur . Ce tableau présente les résultats de la variation des valeurs de courant à différentes charges, allant de faibles à moyennes à élevées.

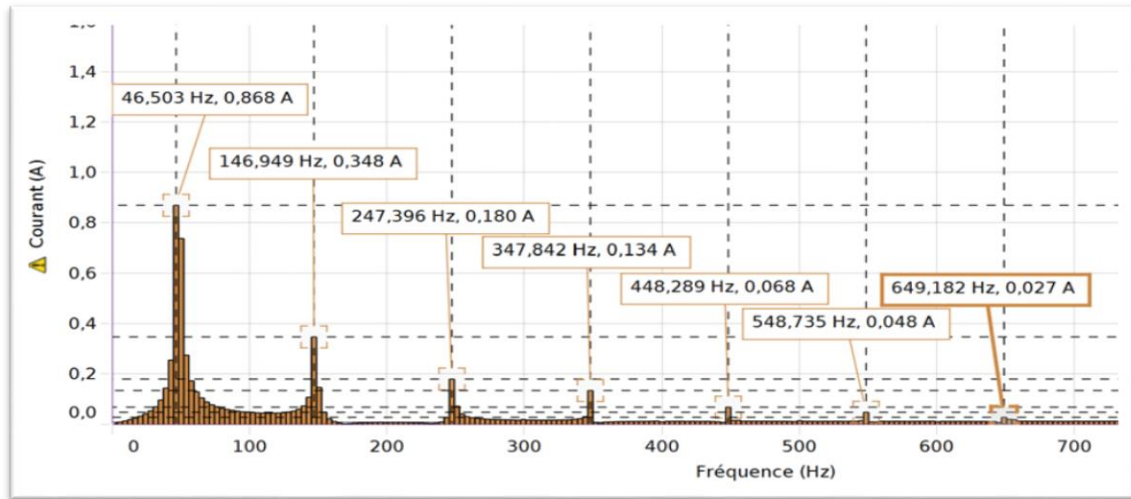


Figure III. 5: Spectre du courant statorique régime de défaut (A<sub>Td1</sub>....(A) Test 1, avec 0% de la charge).

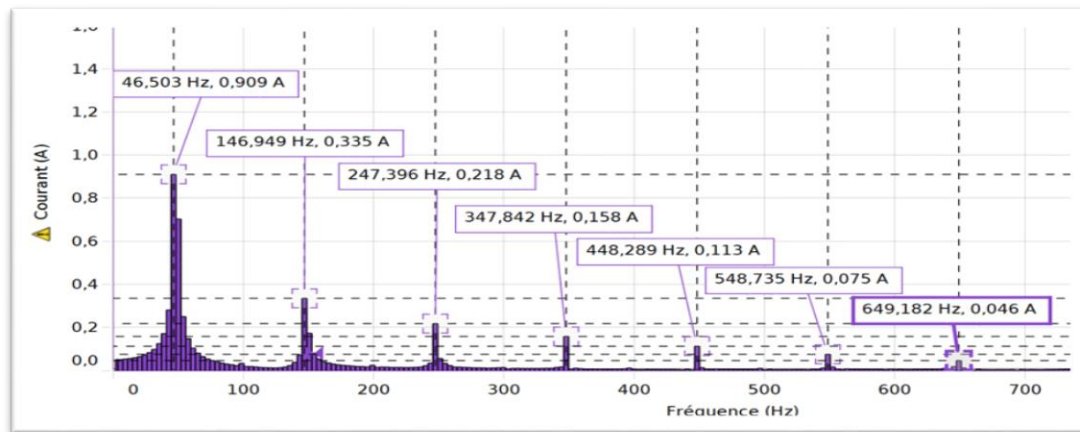


Figure III. 6: Spectre du courant statorique régime de défaut (A<sub>Td2</sub>....(A) Test 2, avec 15% de la charge).

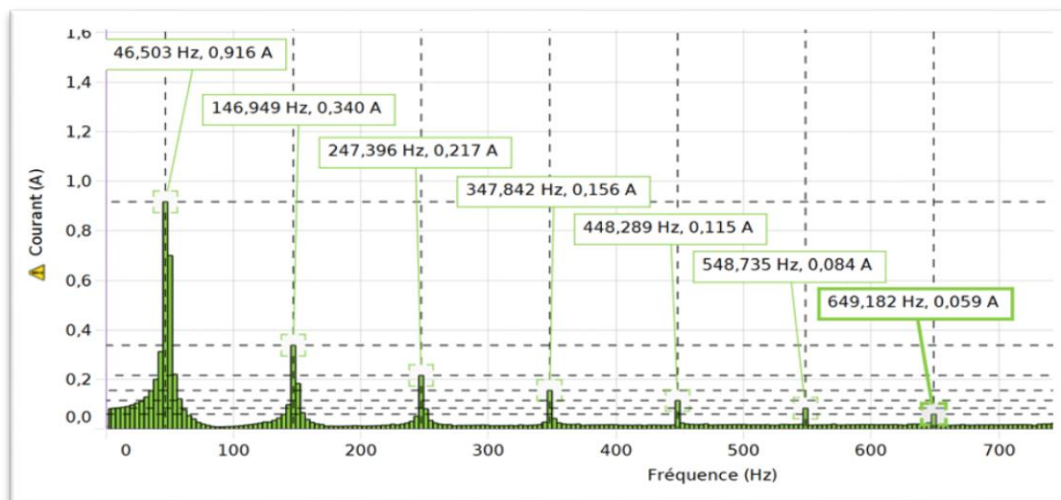


Figure III. 7: Spectre du courant statorique régime de défaut (A<sub>Td3</sub>....(A) Test 3, avec 45% de la charge).

Les résultats sont enregistrés dans le tableau suivant (Tableau III. 2) :

**Tableau III. 2: Amplitudes des différentes harmoniques du courant statorique défaut du moteur.**

Rang harmonique de temps	TH <sub>1</sub>	TH <sub>3</sub>	TH <sub>5</sub>	TH <sub>7</sub>	TH <sub>9</sub>	TH <sub>11</sub>	TH <sub>13</sub>
Fréquences TH <sub>h</sub> = f <sub>s</sub> (Hz)	50	150	250	350	450	550	650
Amplitudes	A <sub>Td-1</sub>	A <sub>Td-3</sub>	A <sub>Td-5</sub>	A <sub>Td-7</sub>	A <sub>Td-9</sub>	A <sub>Td-11</sub>	A <sub>Td-13</sub>
A <sub>Td1</sub> (A) Test 1, avec 0% de la charge	0.868	0.348	0.180	0.134	0.068	0.048	0.027
A <sub>Td2</sub> (A) Test 2, avec 15 % de la charge	0.909	0.355	0.218	0.158	0.113	0.075	0.046
A <sub>Td3</sub> (A) Test 3, avec 45 % de la charge	0.916	0.340	0.217	0.156	0.115	0.084	0.059

A<sub>Td-1</sub>: Amplitude Test avec régime avec défaut pour l'harmonique de temps rang 1

Avec le rang de l'harmonique  $h = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 \dots$

Fréquence d'alimentation  $f_s = 50$  Hz

### Remarque

Nous remarquons que les différentes harmoniques à différents rangs montrent des amplitudes variables lors des différents essais à faible charge, charge moyenne et pleine charge. Parfois, l'amplitude de ces harmoniques augmente par rapport au régime sain pour faible charge tandis que d'autres fois, il n'y a pas de grande différence ou même une diminution de l'amplitude.

Augmentation pour harmonique rang:

- pour faible charge : 7, 9, 11 et 13.
- pour charge moyenne : 1, 5, 7, 9, 11 et 13.
- pour pleine charge : 1, 11.

Amplitude fixe pour harmonique rang:

- pour faible charge : 5.
- pour charge moyenne : 0.
- pour pleine charge : 0.

Diminution de l'Amplitude pour harmonique rang:

- pour faible charge : 1
- pour charge moyenne : 3
- pour pleine charge : 3, 5, 7, 9, 13

### III.4. Calcul la sensibilité relative

Pour cette étape, nous calculerons la sensibilité relative. Nous trouvons également plusieurs résultats que nous pouvons additionner, organiser et comparer graphiquement comme le montrent les Figures(III.8), (III.9), (III.10) et le Tableau(III.3) :

$$S_r = \frac{A_{TH_d}}{A_{TH_s}} \quad (III.1)$$

$S_r$  : Sensibilité relative.

$A_{TH_d}$  : Amplitude du courant statorique en régime de défaut .

$A_{TH_s}$  : Amplitude du courant statorique en régime sain.

**Tableau III. 3: sensibilité relative des différentes harmoniques de temps du moteur avec défaut d' excentricité.**

Rang d'harmonique "h"	1	3	5	7	9	11	13
Fréquence (Hz)	50	150	250	350	450	550	650
Amplitudes	$S_{rT1-1}$	$S_{rT1-3}$	$S_{rT1-5}$	$S_{rT1-7}$	$S_{rT1-9}$	$S_{rT1-11}$	$S_{rT1-13}$
Amplitude Test 1 avec 0 % de la charge	0.987	1.074	1.000	1.540	1.259	1.846	1.173
Amplitude Test 2 avec 15% de la charge	1.021	0.915	1.018	1.039	1.118	1.190	1.121
Amplitude Test 3 avec 45% de la charge	1.020	0.991	0.911	0.906	0.991	1.037	0.893

$S_{T-T1-1}$ : Sensibilité Relative Test 1 pour l'harmonique de temps Rang 1

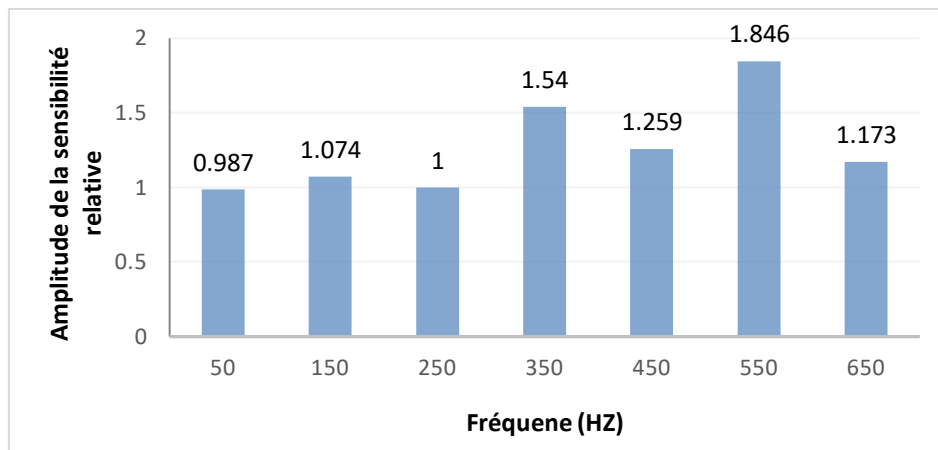


Figure III. 8: Sensibilité relative Test 1 avec 0% de la charge.

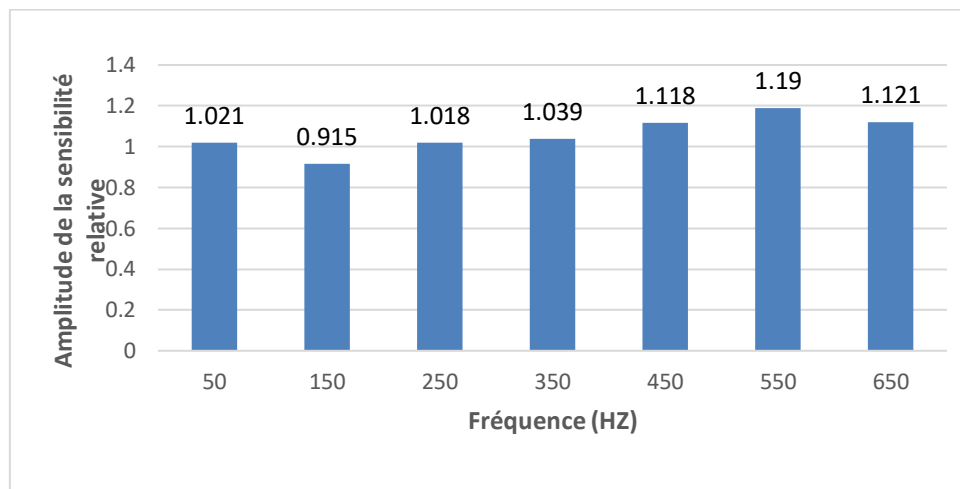


Figure III.9: Sensibilité relative Test 2 avec 15% de la charge.

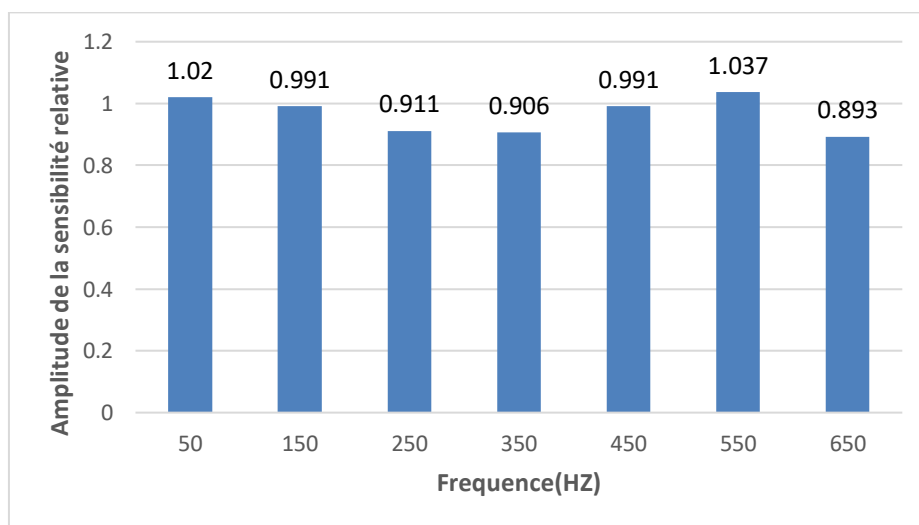


Figure III. 10: Sensibilité relative Test 3 avec 45% de la charge.

### - Discussion des résultats

Nous observons que les différentes sensibilités relatives à différents rangs présentent des amplitudes variables lors des essais à faible charge, charge moyenne et pleine charge. Parfois, la sensibilité relative de ces harmoniques augmente par rapport au régime de référence pour faible charge, tandis que dans d'autres cas, il n'y a pas de grande différence ou même une diminution de la sensibilité relative.

Pour les rangs dont la sensibilité relative augmente :

- Pour la faible charge : 7, 9, 11 et 13.
- Pour la charge moyenne : 1, 5, 7, 9, 11 et 13.
- Pour la pleine charge : 1 et 11.

Pour les rangs dont la sensibilité relative reste constante :

- Pour la faible charge : 5
- Pour la charge moyenne : 0
- Pour la pleine charge : 0

Pour les rangs dont la sensibilité relative diminue :

- Pour la faible charge : 1.
- Pour la charge moyenne : 3.
- Pour la pleine charge : 3, 5, 7, 9, 13.

#### III.4.1. Sensibilité relative des différents charges ou tests pour chaque rang d'harmonique:

Dans les figures suivantes: (III.11), (III.12), (III.13), (III.14), (III.15), (III.16) et (III.17) montrent l'évolution des valeurs de sensibilité au diverses valeurs de charge utilisées dans l'expérience, qui sont de 0 %, 15 %, et 45 % à chaque fois à une certaine fréquence. Nous avons examiné chaque rang d'harmonique pour la sensibilité relative lors des différents tests à faible charge, charge moyenne et pleine charge afin d'identifier les changements dans ces harmoniques pour chaque rang avec les différentes charges. Nous avons remarqué que l'harmonique de temps au rang "11" pourrait être la plus sensible.

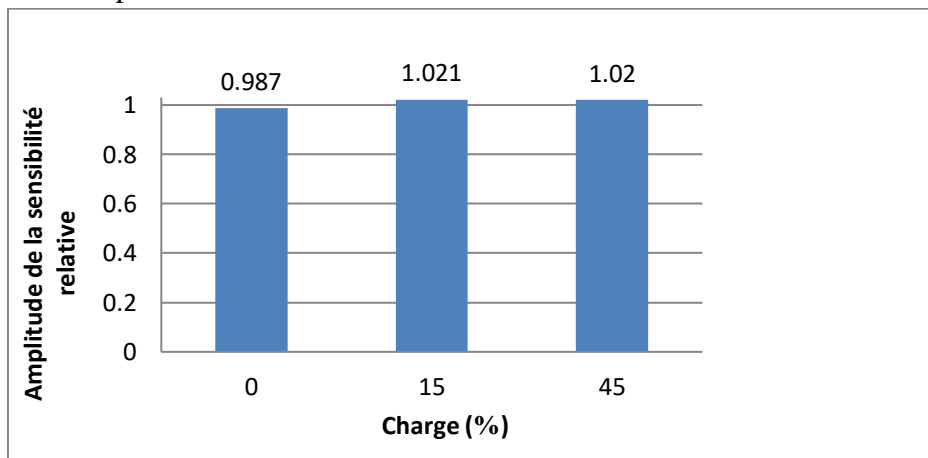


Figure III. 11: Sensibilité relative a $TH_1=50$  Hz.

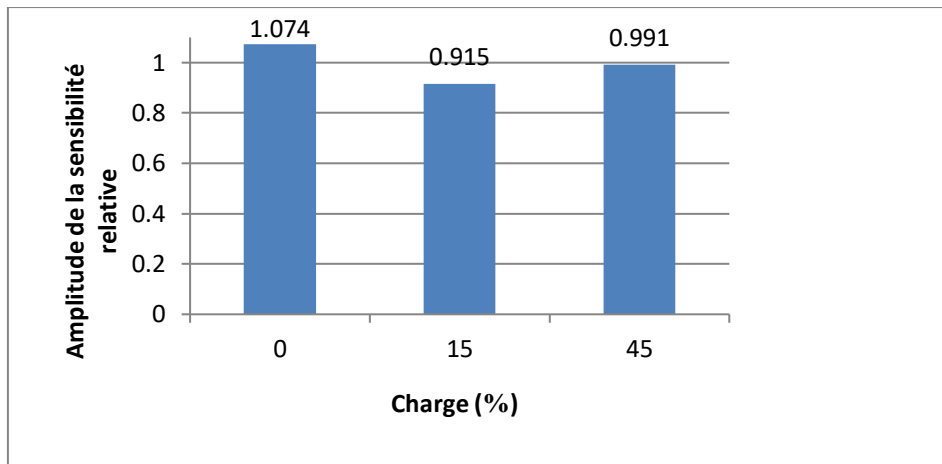


Figure III.12: Sensibilité relative a TH<sub>2</sub>=150 Hz.

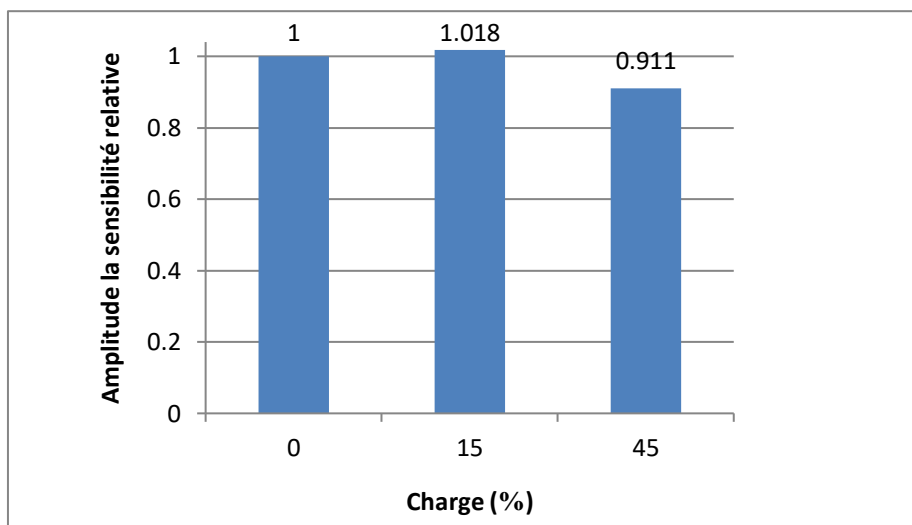


Figure III.13: Sensibilité relative a TH<sub>3</sub>=250 Hz.

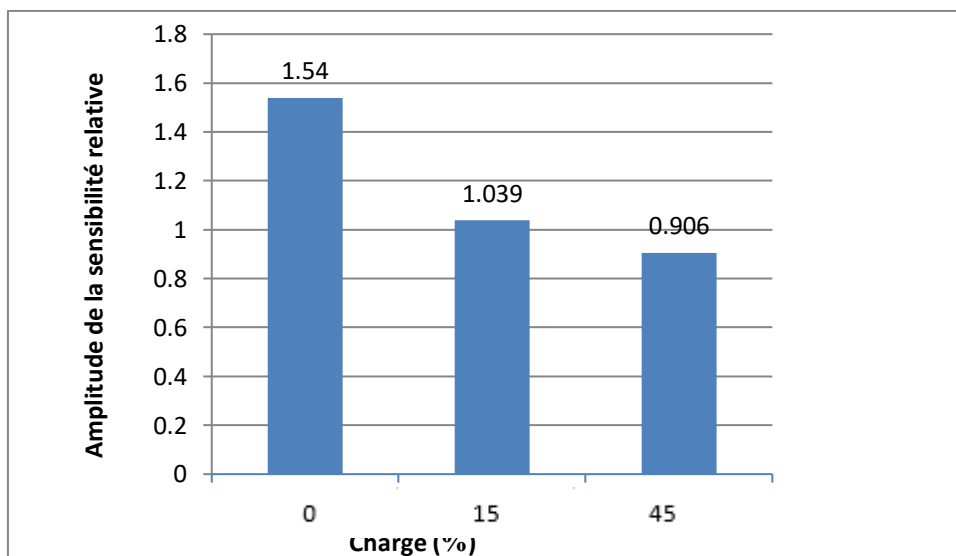


Figure III.14: Sensibilité relative a TH<sub>4</sub>=350 Hz.

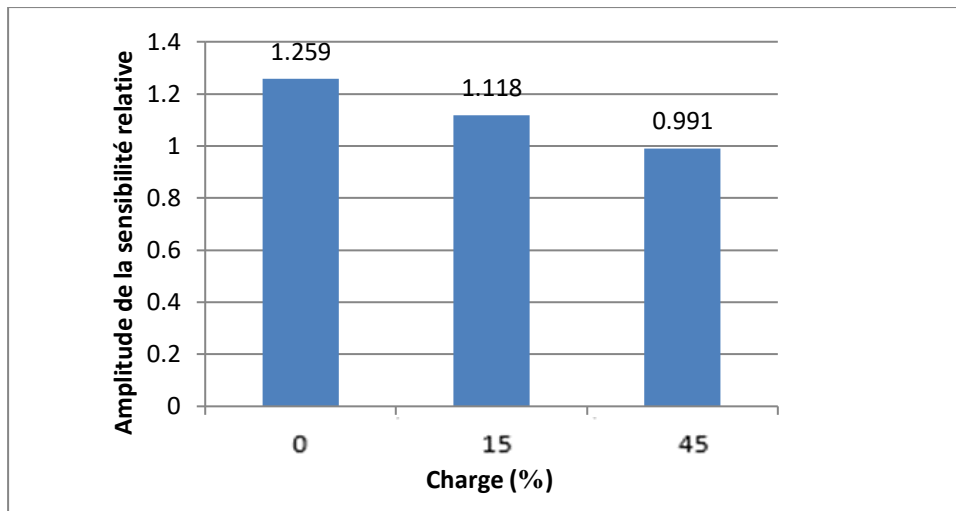


Figure III.15: Sensibilité relative aTH<sub>5</sub>=450 Hz.

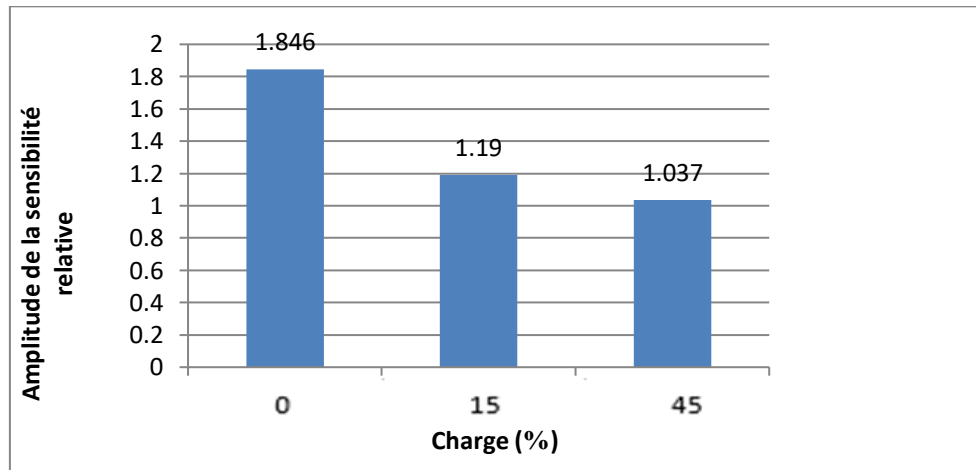


Figure III.16: Sensibilité relative aTH<sub>6</sub>=550 Hz.

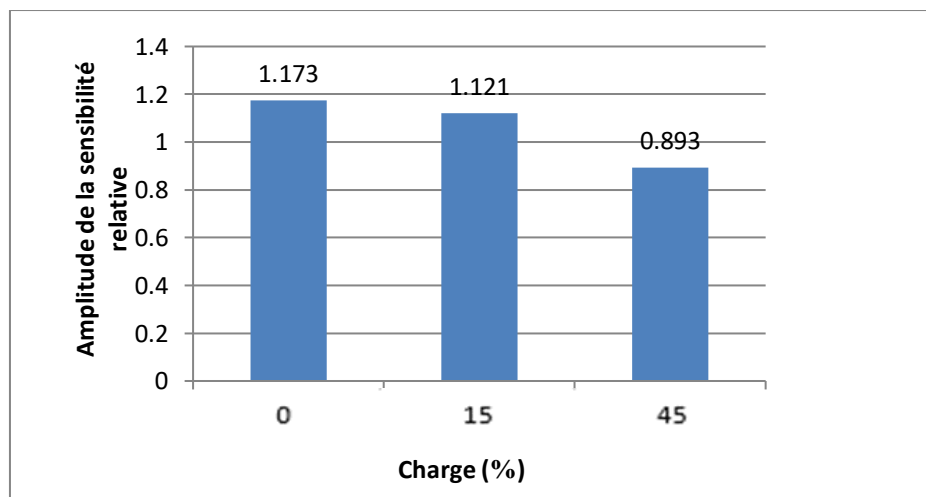


Figure III.17: Sensibilité relative de laTH<sub>7</sub>=650 Hz.

### III.5. Calcul de l'amplitude de la sensibilité moyenne

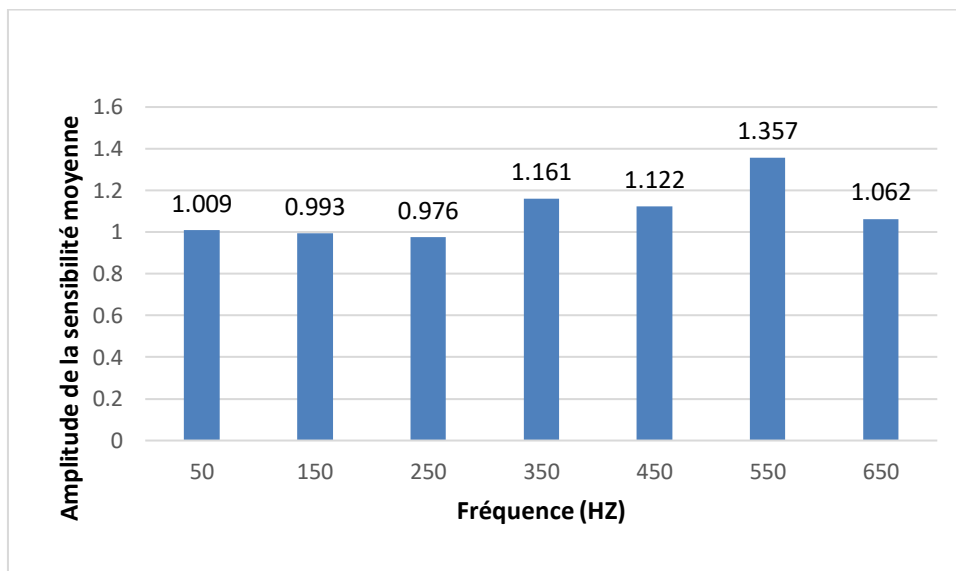
Pour cette étape, nous calculerons l'amplitude moyenne. Nous trouvons également plusieurs résultats que nous pouvons additionner, organiser dans le Tableau(III. 4) et comparer graphiquement, comme dans les Figures(III.18) :

$$S_{\text{moy}} = \sum_{k=1}^3 [S_r] \div 3 \text{ (III.2)}$$

$S_{\text{moy}}$  : sensibilité moyenne

**Tableau III. 4: Sensibilité moyenne des différentes harmoniques du moteur.**

Rang d'harmonique "h"	1	3	5	7	9	11	13
Fréquence (Hz)	50	150	250	350	450	550	650
$S_{\text{moy}}$	1.009	0.993	0.976	1.161	1.122	1.357	1.062



**Figure III. 18: Sensibilité moyenne des différentes harmoniques de temps du moteur avec défaut d' excentricité.**

### III.6. Discussion des résultats

Dans plusieurs expériences précédentes, l'analyse de l'amplitude moyenne du courant, comme illustré dans le tableau III, met en évidence que l'harmonique temporelle TH6 se distingue par sa sensibilité supérieure par rapport aux autres harmoniques. Cette constatation suggère que TH6 pourrait jouer un rôle clé dans la détection des variations et des défauts du courant statorique dans les machines à induction. La sensibilité accrue de TH6 en fait un candidat prometteur pour le développement de méthodes de diagnostic avancées visant à améliorer la surveillance et la maintenance préventive des machines électriques.

### III.7. Conclusion

En résumé, notre étude a impliqué une analyse approfondie des résultats expérimentaux obtenus à partir de divers tests et conditions de fonctionnement du moteur à induction. Nous avons examiné chaque harmonique de temps individuellement, en étudiant leurs variations d'amplitude et en utilisant la sensibilité relative comme mesure clé pour identifier les changements significatifs. Notre analyse a révélé que l'harmonique de temps au rang 11 présente la sensibilité la plus élevée parmi toutes les harmoniques examinées. Cette constatation suggère que l'harmonique  $TH_{11}=1.357$  pourrait servir efficacement d'indice de diagnostic pour détecter les défauts d'excentricité dans les moteurs à induction. En utilisant la sensibilité relative et la sensibilité moyenne calculée pour différentes charges, nous avons démontré que  $TH_{11}$  offre une réponse distinctive aux défauts d'excentricité, ce qui en fait un outil précieux pour la surveillance et le diagnostic des moteurs électriques.

Conclusion, notre étude met en lumière l'importance de l'harmonique de temps  $TH_{11}$  comme indicateur sensible pour les défauts d'excentricité dans les moteurs à induction, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles méthodes de diagnostic améliorées pour garantir la fiabilité et la durabilité de ces systèmes industriels essentiels.

### Conclusion général

Ce mémoire a exploré en profondeur l'importance cruciale de détecter et de caractériser les défauts d'excentricité dans les machines asynchrones. Les défauts d'excentricité, tels que les désalignements entre le rotor et le stator, sont parmi les principaux problèmes rencontrés dans ces machines, pouvant entraîner des vibrations excessives, une usure prématurée des paliers, des surchauffes et des défauts mécaniques plus graves. Pour relever ce défi, il est essentiel de développer des modèles triphasés spécifiques et d'utiliser des résultats expérimentaux pour identifier efficacement les signaux caractéristiques des défauts d'excentricité.

L'étude a examiné différentes techniques de diagnostic, mettant en évidence l'efficacité de l'analyse du courant statorique par FFT, des méthodes d'ondelettes et Harmonics de temps pour détecter les défauts d'excentricité. En particulier, nous avons constaté que l'harmonique de temps TH11=1.357 présente la sensibilité la plus élevée pour détecter ces défauts, offrant ainsi une nouvelle perspective pour améliorer les méthodes de diagnostic.

Nos résultats expérimentaux ont confirmé que l'harmonique TH11=1.357 est un indicateur sensible et fiable pour détecter les défauts d'excentricité, permettant une intervention précoce et ciblée pour prévenir les défaillances majeures des machines asynchrones. Cette approche ouvre la voie à de nouvelles stratégies de maintenance proactive, basées sur une compréhension approfondie des défauts d'excentricité, visant à garantir la fiabilité opérationnelle et la durabilité des machines asynchrones dans les environnements industriels exigeants.

En conclusion, cette étude met en lumière l'importance critique du diagnostic spécifique des défauts d'excentricité dans les machines asynchrones, offrant des perspectives prometteuses pour l'amélioration continue de la maintenance prédictive. Ces découvertes contribuent à renforcer la performance et la fiabilité des systèmes industriels, tout en réduisant les temps d'arrêt imprévus et les coûts de maintenance associés aux défauts mécaniques des machines asynchrones.

## Bibliographie

[1] Thème Master (Diagnostic des Défaits d'une Machine électrique par la technique ondelette) Réalisé par :BELDJANI Sarra- ZINE Abdelbasset- HIMA Chaker Université EchahidHamma Lakhdar d'ElOued

[2]ThèmeMaster(Diagnostic des défauts du moteur à induction par analyse spectrale du courant ) Réalisé par : Mokhbi Fatima Zahra - Abid Aicha Centre Universitaire AbdelhafidBoussouf–Mila

[3]Proposé par : RouighiMounir-KhelfaouiAbderrahim(Diagnostic de la machine asynchrone tenant compte de la nature de la charge entraînée)Université Mohamed Khider- Biskra

[4]These Magister(Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes) Réalisé par : HakimaCHERIF Université Mohamed Khider – Biskra

[5]Thème Magister (Diagnostic et Commande d'une Machine Asynchrone à Base d'Observateur) Etude expérimentale: Abdelmadjid GOUICHICHE Université Ibn Khaldoun Tiaret

[6]TheseMaster (Détection et diagnostic des défauts d'excentricité du moteur asynchrone) Présenté par : ELGHOUL WalidUniversité Mohamed Khider – Biskra

[7] Thèse Master( Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones) Réalisé par: \*LABIOD LAID \*BOUTADJINE FARES .Université EchahidHammaLakhder d'ElOued

[8]Thèse Master (Diagnostic d'un défaut rotorique dans les moteurs asynchrones triphasés à cage par RNA) Réalisé par :Benyahia Oussama -Belazzoug Walid - Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

[9]Thèse Master( Diagnostique des defaults rotoriques de la machine asynchrone par la technique du periodogramme ). Présente par : BENATTA Wissam-RAHMANI Fatma Zohra-CHENNI Kheyra.Centre universitaire SALHI Ahmed -NAAMA

[10]Thème Doctorat (Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones) Réalisé par : SAHRAOUI Mohamed Université Mohamed KHIDER Biskra

II.[1]Thèse Master( Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones) Réalisé par: \*LABIOD LAID \*BOUTADJINE FARES .Université EchahidHammaLakhder d'ElOued

II.[2]Thème Doctorat (Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des techniques intelligentes) Réalisé par : BESSAM Bisma. Université Mohamed Khider – Biskra

II.[3]Mr HARIR MILOUD «Etude des Défaits dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée » Thèse de Magister

en Electrotechnique option : Commande Electrique Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF 2008/2009.

II.[4] KHATRAOUI ABDERREZAK, ZAID MANSOUR «Diagnostic Des Machines Asynchrones Triphasées», Thèse de MASTER ACADEMIQUE , UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar D'ElOued soutenu en Mai 2017.

II.[5] BENNEDJAI SOUMAYA «Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction», Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de : Doctorat université badjimokhtarannaba, Année : 2015/2016.

II.[6] MOHAMED EL KAMEL OUMAAMAR «surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée» Thèse de doctorat, Université de Lorraine, Soutenue publiquement le 19 Mars 2012 devant la commission d'examen.

II.[7] BESSOUS NOUREDDINE «Experimental Exploitation for the Diagnosis to the Induction Machine under a Bearing Fault – using MCSA» IEEE 2015.

II.[8] Noureddine BESSOUS, (Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones), magister en Electrotechnique, université de Constantine Algérie 2013.

II.[9] CHELAGHEMA Mohamed Lamine «Pronostic des défauts statoriques et rotoriques des machines asynchrones», Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de : Master Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel, Année :-2019 2018.

II.[10] Atmane Bouzegag; Ousamalchakra Badra, Ibrahim Slimani «Diagnosis of rotor faults in asynchronous machines using harmonic current», Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de : Master Université Echahid Hamma Lakhdar- El Oued, Année 2022-2023 .

II.[11] [www.pinterest.com](http://www.pinterest.com) consulté le 28/04/2024.

II.[12] [www.pinterest.com](http://www.pinterest.com) adapté consulté le 28/04/2024.

II.[13] Sahouimohamed&benachourouassim (modélisation et diagnostic de la cassure des barres rotoriques d'une machine asynchrone).2018.

II.[14] H.Razik, "le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art," la revue 3ei, vol. 29, pp. 48-52, juin 200

II.[15] N.halem, "modélisation des machines asynchrones triphasées à cage en vue du diagnostic par la méthode des éléments finis", thèse de doctorat, université de biskra, algérie, 2015.

II.[16] SACI Fawzi (Modèles multi enroulements de la MAS dédiés au Diagnostic) Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique 2014.

II.[17] Abderrahim, A., Zakaria, L., Khechekhouche, A., Siqueira, A. M. de O., Campos, J. C. C., & Lamamra, K. (2024). (Comparative analysis of harmonic sensitivity for stator fault diagnosis in induction motors). The Journal of Engineering and Exact Sciences, 10(4), 18212. <https://doi.org/10.18540/jcecvl10iss4pp18212>.

II.[18] Abderrahim, A., A., Khechekhouche, A., & Driss, Z. (2020). (Induction machines Diagnosis by the time's harmonics). *International Journal of Energetica*, 5(2), 32-36. doi:<http://dx.doi.org/10.47238/ijeca.v5i2.136>.

II.[19] Abderrahim A., Khechekhouche, A., (2022). Diagnosis of induction motor faults using the motor current normalized residual harmonic analysis method ,*International Journal of Electrical Power & Energy Systems* ,Volume 141,2022,108219,<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108219>.

II.[20] Allal, Abderrahim (Nouvelles méthodes et techniques de diagnostic des machines asynchrones à rotor en cage d'écuréuil) [ressource textuelle, sauf manuscrits] / Abderrahim Allal; Dir. Hocine Labar.-[s.l.] : [s.n],2017.-200 p. : ill. ; 30 cm + CD-Rom. Bibliogr. p.189-197. Annexes ;Doctorat : Universite M'Hamed Bougara : Faculté des hydrocarbures et de la chimie : 2017.

II.[21] ALLAL, Abderrahim ; KHECHEKHOUCHE, Abderrahmane; DRISS, Zied. Induction machines diagnosis by the time's harmonics. *International Journal of Energetica*, [S.l.], v. 5, n. 2, p. 32-36, dec. 2020. ISSN 2543-3717. Available at: <<https://www.ijeca.info/index.php/IJECA/article/view/136>>. Date accessed: 13 may 2024. doi: <http://dx.doi.org/10.47238/ijeca.v5i2.136>.