



**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:**

**Zeghib Abdelhak, Debili Taha, Mayata Bader Dine**

**Thème**

*Diagnostic des moteurs à induction par l'analyse des harmoniques  
des courants statoriques (défaut rotorique)*

**Devant le jury composé de:**

**Dr.Himidani bilal**

....

**Président**

**Dr. Tomi jafer**

....

**Examineur**

**Dr. 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**

# *Dédicace*

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

*Je dédie ce travail :*

*À ma mère*

*À mon père*

*À mes frères et mes sœurs*

**Zeghib Abdelhak**

**Debili Taha**

**Mayata Bader Dine**

# ملخص

يتناول هذا البحث تشخيص العيوب في الآلات غير المتزامنة، مع التركيز على اكتشاف وتوصيف عيوب اللامركزية من خلال تحليل التوافقيات في التيارات الدوارة. يصف كيفية عمل هذه الآلات، وأنواع العيوب الرئيسية، والتقنيات الحديثة للتشخيص، بما في ذلك استخدام المستشعرات والذكاء الاصطناعي. تظهر النتائج التجريبية أن تحليل التوافقيات في التيار الثابت يمكن أن يكشف عن توقيعات محددة لمختلف العيوب، مما يحسن من ممارسات الصيانة الاستباقية وموثوقية الأنظمة الصناعية.

# *Résumé*

Ce mémoire examine le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones, avec un focus sur la détection et la caractérisation des défauts d'excentricité via l'analyse des harmoniques des courants rotoriques. Il décrit le fonctionnement de ces machines, les principaux types de défauts, et les techniques modernes de diagnostic, incluant l'utilisation de capteurs et l'intelligence artificielle. Les résultats expérimentaux montrent que l'analyse des harmoniques du courant statorique peut révéler des signatures spécifiques de divers défauts, améliorant ainsi les pratiques de maintenance proactive et la fiabilité des systèmes industriels.

# Summary

*This thesis examines the diagnosis of faults in asynchronous machines, focusing on the detection and characterization of eccentricity faults through the analysis of rotor current harmonics. It describes the operation of these machines, the main types of faults, and modern diagnostic techniques, including the use of sensors and artificial intelligence. Experimental results show that the analysis of stator current harmonics can reveal specific signatures of various faults, thereby improving proactive maintenance practices and the reliability of industrial systems.*

## NOTATION & SYMBOLES

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

**Ns** : nombre de spires statoriques par phase.

nombre de barres rotorique.

**F.m.m** : force manitomotrice.

**f** : la fréquence.

**I** : le courant

**Fs** : fréquence d'ondulation [ Hz.]

**Lsd** : L'inductance (magnétisante) de la phase "n" statorique [H].

**Lsq** : L'inductance d'une boucle rotorique.

**Isd** : Inductance propre statorique.

**Isq** : Inductance propre rotorique.

**P** : nombre de paires de pôles.

**I** : courant d'une phase.

**f<sub>sd</sub>** : le flux magnétique statorique .

**f<sub>sq</sub>** : le flux magnétique rotorique .

**I<sub>rm</sub>** : La valeur du courant maximal du rotor.

**M<sub>srh</sub>** : L'inductance mutuelle entre phases statorique et maille rotorique.

**R** : la résistance .

**I<sub>sa</sub> , I<sub>sb</sub>, I<sub>sc</sub>** : courants des phases statorique [A].

**V** : la tension [ V.]

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

**θ<sub>r</sub>** : 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>].

**θ** : Angle décrivant une position particulière dans l'espace, mesuré par rapport à une référence-fixée par rapport au stator.

**g** : glissement.

**f<sub>exc</sub>** : Fréquence d'excentricité.

**R** : nombre d'encoches au rotor,

**f<sub>c</sub>** : caractéristiques fréquences .

**MAS** : Machine asynchrone.

**FFT** : transformation de fourie rapide.

**TS** : d'une phase statorique [Ω].

**TH** : harmonique de temps.

**f<sub>re</sub>** : fréquence relative.

**f<sub>c</sub>** : la fréquence du convertisseur.

**MCSA** : Motor Current Signature Analysis.

**T** : période d'échantillonnage.

**RSH** : Rotor Slots Harmonics.

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

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

**f<sub>r</sub>** : fréquence rotorique

# SOMMAIRE

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Chapitre I Etat de l'art sur le diagnostic de défaut de la machine asynchrone .....</b> | <b>XI</b> |
| <b>I.1.Introduction .....</b>                                                              | <b>1</b>  |
| <b>I.2..La machine asynchrone.....</b>                                                     | <b>1</b>  |
| <b>I.3 .Constitution de la machine asynchrone .....</b>                                    | <b>2</b>  |
| <b>I.4 .Causes des défauts .....</b>                                                       | <b>3</b>  |
| <b>I.5 Stator .....</b>                                                                    | <b>3</b>  |
| <b>I.6. Rotor .....</b>                                                                    | <b>4</b>  |
| <b>I.7.Entrefer .....</b>                                                                  | <b>5</b>  |
| <b>I.8. Organe mécanique.....</b>                                                          | <b>5</b>  |
| <b>I.9.Principe de fonctionnement .....</b>                                                | <b>6</b>  |
| <b>I.10.Différents défauts dans la machine .....</b>                                       | <b>7</b>  |
| <b>I.11. Défauts statorique.....</b>                                                       | <b>8</b>  |
| <b>I.11.1.Court-circuit dans une phase.....</b>                                            | <b>8</b>  |
| <b>I.11.2.Court-circuit entre spires.....</b>                                              | <b>9</b>  |
| <b>I.12.Défaillances rotoriques.....</b>                                                   | <b>9</b>  |
| <b>I.12.1. Cassures de barres .....</b>                                                    | <b>9</b>  |
| <b>I.12.2 Ruptures de portions d'anneaux des cages.....</b>                                | <b>10</b> |
| <b>I.13.Excentricité statique et dynamique.....</b>                                        | <b>12</b> |
| <b>I.14.Défaillances mécaniques .....</b>                                                  | <b>12</b> |
| <b>I.14.1.Défauts roulements .....</b>                                                     | <b>12</b> |
| <b>I.14.2 .Conséquences des défauts.....</b>                                               | <b>14</b> |
| <b>I.15. Maintenance.....</b>                                                              | <b>15</b> |
| <b>I.15.1Maintenance Corrective.....</b>                                                   | <b>15</b> |
| <b>I.15.2.Maintenance Préventive.....</b>                                                  | <b>16</b> |
| <b>I.15.2.1Maintenance préventive systématique.....</b>                                    | <b>16</b> |
| <b>I.15.2.2Maintenance préventive conditionnelle .....</b>                                 | <b>16</b> |
| <b>I.16.Conclusion.....</b>                                                                | <b>17</b> |
| <b>Chapitre II Technique de Diagnostic des défauts de la machine asynchrone .....</b>      | <b>18</b> |
| <b>II.1. Introduction.....</b>                                                             | <b>19</b> |
| <b>II.2. Différents méthodes de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone.....</b> | <b>19</b> |

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II .2.1.Diagnostic à partir des méthodes internes (connaissance à priori) .....                         | 20 |
| II .2.1.1. Diagnostic par mesure de la température .....                                                | 20 |
| II .2.1.2.Diagnostic par mesure des vibrations.....                                                     | 20 |
| <hr/>                                                                                                   |    |
| II .2.2.Diagnostic chimiques .....                                                                      | 21 |
| II .2.3.Techniques magnétiques et électriques .....                                                     | 21 |
| II.2.3.1. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite.....                                  | 21 |
| II .2.3.2.Diagnostic par l'analyse des courants statoriques .....                                       | 22 |
| II .3. Technique de la FFT .....                                                                        | 23 |
| II .4. Transformée en ondelettes Discrète (DWT) .....                                                   | 24 |
| II .5. Harmonique.....                                                                                  | 26 |
| II .5. 1.Définition des harmoniques .....                                                               | 26 |
| II .5. 2.Origines et sources des harmoniques .....                                                      | 27 |
| II .5. 2.1 .Emission en tension.....                                                                    | 27 |
| II .5. 2.1.1.Alternateurs.....                                                                          | 27 |
| II .5. 2.1 .2.Transformateurs .....                                                                     | 27 |
| II .5. 2.1 .3. Alimentations statiques ininterrompibles (ASI) .....                                     | 28 |
| II .5. 2.2. Emission en courant.....                                                                    | 28 |
| II .5. 2.2. 1. Redresseur triphasé à thyristors.....                                                    | 28 |
| II .5. 2.3. 1.Charges non linéaires passives.....                                                       | 28 |
| II .5. 3.Problématique des harmoniques .....                                                            | 29 |
| II .5. 4.Causes et conséquence des harmoniques .....                                                    | 30 |
| II .5. 5.Solutions harmoniques générales .....                                                          | 31 |
| II .5. 5.1.Filtres passif.....                                                                          | 32 |
| II .5. 5.2.Filtres actifs .....                                                                         | 32 |
| II .5. 5.3.Filtres hybrides .....                                                                       | 32 |
| II .5. 6.Théorie générale sur les harmoniques de la machine asynchrone à cage<br>d'écureuil (MACÉ)..... | 33 |
| II .5.7.Étude du courant statorique avec ses harmoniques .....                                          | 35 |
| II .6. Conclusion .....                                                                                 | 37 |
| Chapitre III Résultats expérimentaux.....                                                               | 38 |
| III.Introduction.....                                                                                   | 39 |

|                                                                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>III.1.Diagnostic par analyse du courant rotorique .....</b>                                               | <b>39</b> |
| <b>III. 2 Banc d'essai et résultats expérimentaux.....</b>                                                   | <b>39</b> |
| <b>III .3 Régime sain .....</b>                                                                              | <b>41</b> |
| <b>III . 3.2 Régime avec défaut.....</b>                                                                     | <b>42</b> |
| <b>III . 3.3.Calcul la sensibilité relative .....</b>                                                        | <b>43</b> |
| <b>III . 3.4.Sensibilité relative des déferents charges ou tests pour chaque rang<br/>d'harmonique .....</b> | <b>45</b> |
| <b>III .4. Banc d'essai et résultats expérimentau.....</b>                                                   | <b>45</b> |
| <b>III .4.1.Régime sain .....</b>                                                                            | <b>46</b> |
| <b>III.4.2. Régime avec défaut.....</b>                                                                      | <b>47</b> |
| <b>III .4.3.Calcul la sensibilité relative .....</b>                                                         | <b>49</b> |
| <b>III .5.Calcul de l'amplitude de la sensibilité moyenne .....</b>                                          | <b>50</b> |
| <b>III .6.Conclusion.....</b>                                                                                | <b>51</b> |
| <b>Référence .....</b>                                                                                       | <b>53</b> |

## Liste des figures

|                                                                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>FigureI. 1.</b> Machine asynchrone .....                                                                                                                                                                          | 2  |
| <b>FigureI.2.</b> Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil ... ..                                                                                                                         | 2  |
| <b>Figure I.3.</b> Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone .....                                                                                                                              | 3  |
| <b>Figure.I.4 .</b> schéma présente l'enroulement du stator .....                                                                                                                                                    | 4  |
| <b>Figure.I. 5</b> rotor à cage.....                                                                                                                                                                                 | 4  |
| <b>Figure.I. 6.</b> rotor bobiné.....                                                                                                                                                                                | 4  |
| <b>Figure I.7.</b> Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrones .....                                                                                                                           | 5  |
| <b>Figure.I. 8.</b> Schéma présent principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone .....                                                                                                                           | 7  |
| <b>Figure.I. 9.</b> Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage .....                                                                                                                          | 7  |
| <b>Figure.I. 10.</b> Statistiques des pannes.....                                                                                                                                                                    | 8  |
| <b>Figure.I. 11.</b> ( a) court-circuit entre spires (b) : le courant de circulation (c) :court-circuitentre<br>deux faisceaux.....                                                                                  | 9  |
| <b>Figure.I.12.</b> Défaut d'une barre cassée.....                                                                                                                                                                   | 10 |
| <b>Figure.I. 13.</b> Schéma descriptif d'une barre et une portion d'anneaux.....                                                                                                                                     | 11 |
| <b>Figure.I. 14.</b> Rupture d'une et de deux portions d'anneaux.....                                                                                                                                                | 11 |
| <b>Figure.I. 15.</b> Défauts d'excentricité statique, dynamique et mixte .....                                                                                                                                       | 12 |
| <b>Figure.I.16.</b> Déférentes défaillances des roulements à billes.....                                                                                                                                             | 13 |
| <b>Figure II.1.</b> Pifférentes grandeurs de diagnostic dans une machine .....                                                                                                                                       | 20 |
| <b>Figure II.2.</b> Bobine exploratrice pour mesure du flux de fuite axial.....                                                                                                                                      | 22 |
| <b>Figure II.3.</b> Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique ..                                                                                                                  | 23 |
| <b>Figure II.4.</b> Principe de la décomposition par ondellette discrète (DWT).....                                                                                                                                  | 25 |
| <b>Figure II.5.</b> Représentation de l'Ondellete de Daubechies .....                                                                                                                                                | 26 |
| <b>Figure III.1.</b> Block diagram of the principle of thestator current spectrum method used to<br>havetheexperimental results in the laboratory of the faculty of the technology<br>(University of El Oued) .....  | 40 |
| <b>Figure III.2.</b> Spectre du courant rotorique régime sain.....                                                                                                                                                   | 42 |
| <b>Figure III.3.</b> Spectre du courant rotorique régime de défaut .....                                                                                                                                             | 43 |
| <b>Figure III.4.</b> Sensibilité relative excentricité .....                                                                                                                                                         | 44 |
| <b>Figure III.5.</b> Block diagram of the principle of thestator current spectrum method used to<br>havetheexperimental results in the laboratory of the faculty of the technology<br>(University of El Oued). ..... | 45 |
| <b>Figure III.6.</b> Sain 3 barrs casse .....                                                                                                                                                                        | 46 |
| <b>Figure III.7.</b> Defout rotorique 3 barrs casse.....                                                                                                                                                             | 48 |
| <b>Figure III.8.</b> Sensibilité relative. excentricité .....                                                                                                                                                        | 49 |
| <b>Figure III.9.</b> sensibilité moyenne des différentes harmoniques de temps du moteur avec<br>défauts d'excentricité 3 barrs casse Dans le changement de fréquence .....                                           | 50 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau II. 1:</b> Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique .....                                                                                                                     | 36 |
| <b>Tableau III. 1:</b> Amplitudes des différentes harmoniques du courant rotorique sain du moteur. ..                                                                                                                 | 42 |
| <b>Tableau III. 2:</b> Amplitudes des différentes harmoniques du courant rotorique défaut du moteur .....                                                                                                             | 43 |
| <b>Tableau III. 3:</b> sensibilité relative des différentes harmoniques de temps du moteur avec défaut d'excentricité.....                                                                                            | 44 |
| <b>Tableau III. 4:</b> Sain 3 barrs casse .....                                                                                                                                                                       | 47 |
| <b>Tableau III. 5:</b> Les résultats sont enregistrés dans le tableau représente la Amplitudes des différentes harmoniques du courant rotorique sain du moteur. Ce tableau montre les résultats des différentes ..... | 48 |
| <b>Tableau III.6:</b> Sensibilité relative des defout rotoique 3 barre casse .....                                                                                                                                    | 49 |
| <b>Tableau III.7:</b> sensibilité moyenne des différentes harmoniques de temps du moteur avec défauts d'excentricité et 3 barre casse Dans le changement de fréquence .....                                           | 50 |

## Introduction générale

Les moteurs à induction jouent un rôle crucial dans une vaste gamme d'applications industrielles grâce à leur robustesse, leur efficacité et leur coût réduit. Cependant, comme tous les systèmes mécaniques et électriques, ils sont sujets à divers types de défauts qui peuvent entraîner des temps d'arrêt significatifs et des coûts de maintenance élevés s'ils ne sont pas détectés et traités rapidement. Parmi les différentes techniques de diagnostic développées, l'analyse des harmoniques du courant statorique s'est révélée être un outil puissant pour la détection et le diagnostic des défauts dans les moteurs à induction, notamment en ce qui concerne les défauts statoriques.

Les défauts statoriques incluent des problèmes tels que des défaillances de l'isolation des enroulements statoriques, des bobines statoriques cassées ou desserrées, et des tensions déséquilibrées, qui peuvent fortement affecter la performance et la longévité du moteur à induction. L'analyse des harmoniques du courant statorique implique la surveillance des signaux électriques à l'intérieur du moteur pour identifier des motifs caractéristiques ou des anomalies indiquant la présence de tels défauts. Cette technique tire parti du fait que différents types de défauts introduisent des composants harmoniques spécifiques dans le spectre du courant statorique.

Les recherches sur le diagnostic des défauts dans les moteurs à induction ont commencé il y a plusieurs décennies, avec une focalisation initiale sur des méthodes traditionnelles telles que l'analyse spectrale dans le domaine temporel et fréquentiel. Dans les années 1980, l'attention s'est portée sur l'analyse des harmoniques du courant comme moyen de détection précoce des défauts. Les études ont montré que différents types de défauts génèrent des signatures harmoniques distinctes dans le courant statorique, permettant ainsi leur détection à des stades précoces .

Dans les années 1990, les progrès en technologie des capteurs et en techniques de traitement du signal ont amélioré la précision et l'efficacité des méthodes d'analyse. Au cours des deux dernières décennies, l'intégration des techniques d'apprentissage automatique et de l'intelligence artificielle a renforcé les capacités de diagnostic automatique et de prédiction des défauts avant leur occurrence .

Grâce à l'utilisation de méthodes avancées de traitement du signal et d'algorithmes de diagnostic, il est possible de détecter ces signatures harmoniques avec une grande précision. De plus, l'intégration des capteurs et de l'intelligence artificielle améliore la capacité à surveiller et analyser l'état du moteur en temps réel, conduisant à des stratégies de maintenance plus efficaces et proactives .

Cette approche améliore non seulement la fiabilité et l'efficacité opérationnelle des systèmes industriels, mais réduit également les pannes inattendues et prolonge la durée de vie des machines. Par conséquent, l'étude et la mise en œuvre de l'analyse des harmoniques du courant statorique pour le diagnostic des défauts dans les moteurs à induction sont d'une importance capitale dans le domaine de la maintenance et de l'ingénierie industrielle [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8]

# **Chapitre I**

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

## **I.1. Introduction**

Le diagnostic revêt une importance capitale au sein d'un système de supervision, permettant d'évaluer en permanence le mode de fonctionnement actuel du système. Cette évaluation s'appuie à la fois sur une connaissance préalable des différents modes de fonctionnement et sur une observation instantanée de l'état présent du système. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour réaliser ce diagnostic, le choix étant déterminé par la manière dont la connaissance est représentée.

La première partie de ce chapitre examine les diverses causes de défaillance (électriques, mécaniques, etc.) susceptibles de survenir sur une machine asynchrone. Elle commence par rappeler la structure des machines électriques, en mettant particulièrement l'accent sur celle des machines asynchrones à cage d'écureuil. Nous aborderons principalement les défauts qui peuvent affecter à la fois le stator et le rotor ainsi que les enroulements de la machine.

## **I.2. Machine asynchrone :**

Le moteur asynchrone est largement privilégié dans les applications nécessitant des puissances supérieures à quelques kilowatts en raison de ses nombreux avantages, notamment sa densité de puissance, sa robustesse, sa facilité d'installation et son coût modéré. Son développement a été favorisé par l'avènement des variateurs dans les années 1980, permettant une variation de la fréquence de rotation sur une large plage. Cette technologie a trouvé des applications dans divers procédés industriels impliquant des convertisseurs statiques et des machines électriques telles que la traction électrique, les laminoirs, le levage, le pompage, entre autres.

Malgré sa réputation de robustesse, la machine asynchrone est sujette à des défaillances électriques ou mécaniques, comme toute autre machine électrique. Étant donné les conséquences potentiellement importantes et coûteuses qu'une défaillance peut entraîner dans les processus industriels, le diagnostic des défauts suscite un intérêt croissant depuis les deux dernières décennies.[1] et [2].

### I.3 .Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone, communément désignée sous le nom de machine à induction, se compose d'une partie fixe appelée stator et d'une partie mobile appelée rotor (Figure I.1). (Figure I. 2) Contrairement aux machines synchrones conventionnelles et aux machines à courant continu, seuls les enroulements du stator sont connectés à une source d'alimentation externe. Les enroulements du rotor sont en court-circuit sur eux- mêmes. Ainsi, la machine asynchrone ne comporte ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Le flux magnétique nécessaire à la production du couple électromagnétique dans le rotor est induit par la variation du flux magnétique dans le stator. Les circuits magnétiques du stator et du rotor sont constitués d'empilements de fines tôles ferromagnétiques découpées (Figure I.1)

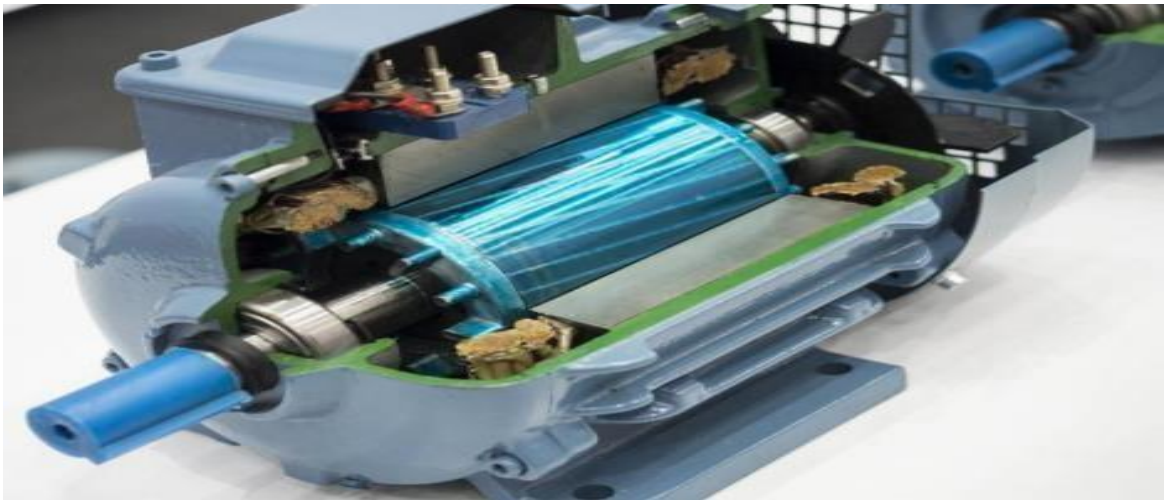


Figure I. 1 Machine asynchrone

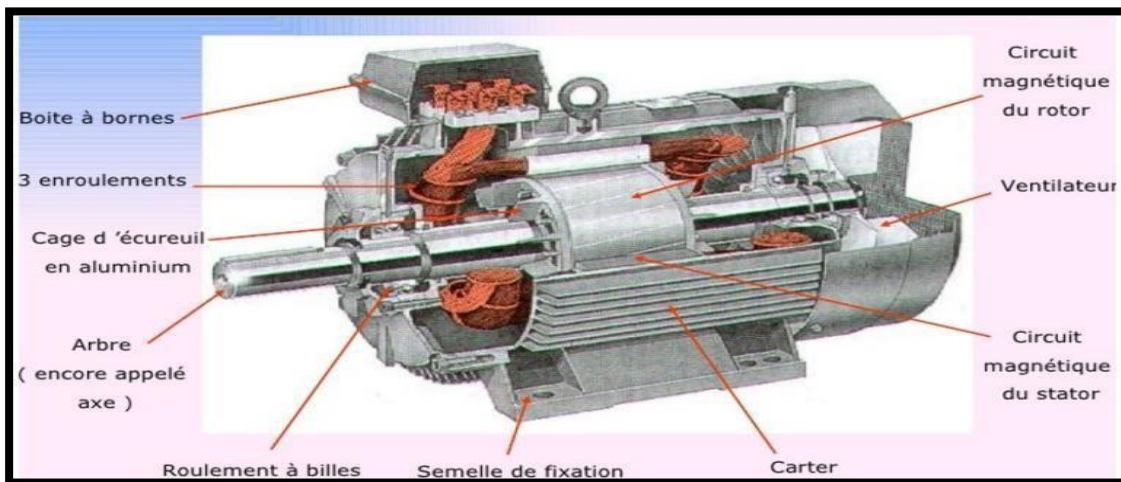


Figure I. 2 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

#### I.4. Causes des défauts :

Les causes des défauts peuvent être regroupées en trois catégories distinctes :

a) Les générateurs de pannes ou les initiateurs de défauts : ils comprennent des facteurs tels que la surchauffe du moteur, les défauts électriques (court-circuit), les problèmes mécaniques, les ruptures de fixations, les problèmes d'isolation, les surtensions d'alimentation, entre autres.

Les amplificateurs de défauts : ces éléments contribuent à aggraver les défauts existants et incluent des facteurs tels que les surcharges fréquentes, les vibrations mécaniques, les environnements humides, les perturbations de l'alimentation (instabilité de la tension ou de la fréquence), le chauffage permanent, le mauvais graissage, le vieillissement, etc.

b) Les vices de fabrication et les erreurs humaines : cette catégorie englobe les défauts de fabrication, la défectuosité des composants, les protections inadaptées, le mauvais dimensionnement de la machine, et autres [9][10]. (Figure I. 3)

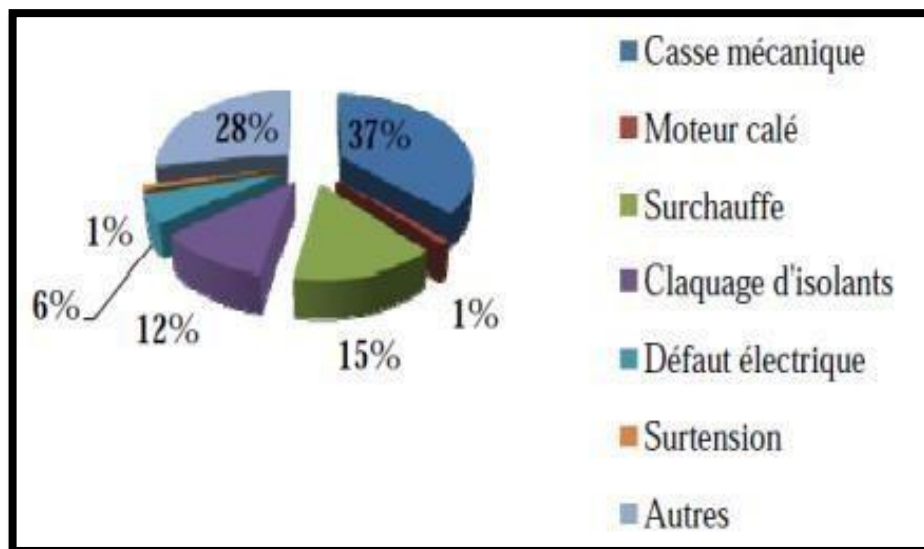


Figure I.3 Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone[9]

#### I.5. Stator

Le stator, qui constitue la partie fixe du moteur, est généralement abrité dans une

carcasse en fonte ou en alliage léger. À l'intérieur de cette carcasse, se trouve une couronne de fines tôles d'acier au silicium, typiquement d'une épaisseur d'environ 0,5 mm. Ces tôles sont isolées les unes des autres par oxydation ou par un vernis isolant afin de réduire les pertes par hystérésis et par courants de Foucault dans le circuit magnétique. Les tôles sont également dotées d'encoches destinées à accueillir les enroulements statoriques chargés de générer le champ tournant (trois enroulements dans le cas d'un moteur triphasé). Chaque enroulement est composé de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines détermine le nombre de paires de pôles du moteur, et donc sa vitesse de rotation. [4] (Figure I. 4)



**Figure I. 4 schéma présente l'enroulement du stator[9].**

## **I.6. Rotor**

(Figure I. 5 ) et (Figure I. 6) représente l'élément mobile du moteur, est formé d'un empilement de fines tôles isolées entre elles, configurées en un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Selon la technologie utilisée, on distingue deux principales familles de moteurs asynchrones : ceux équipés d'un rotor "à cage" et ceux dotés d'un rotor bobiné, également appelé rotor "à bagues" [4].



**Figure I. 5 rotor à cage [4].**



**Figure I. 6 rotor bobiné [4].**

## I.7. Entrefer

La partie amagnétique de l'entrefer, située entre le stator et le rotor, présente une épaisseur relativement mince, de l'ordre du millimètre. Cette faible épaisseur rend l'entrefer sensible aux variations induites par les encoches du stator. Ces variations engendrent ce que l'on appelle des harmoniques d'encoches. Pour atténuer ces harmoniques, les encoches sont comblées par des cales magnétiques qui assurent le maintien du bobinage[5].

## I.8. Organe mécanique

La carcasse remplit une fonction de support et d'enveloppe, assurant la protection contre les éléments extérieurs. L'arbre, quant à lui, constitue un organe de transmission, comprenant une partie centrale qui supporte le corps du rotor et est soutenu par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et permettent sa rotation libre. Le second palier est conçu pour permettre les dilatations thermiques de l'arbre. L'isolation électrique d'un des paliers permet d'éliminer les courants induits dans l'arbre dus aux asymétries des réluctances du circuit magnétique. En général, ces paliers sont équipés de roulements. Dans le cas des machines de petite et moyenne puissance, on trouve souvent un ventilateur de refroidissement (Figure I.7)

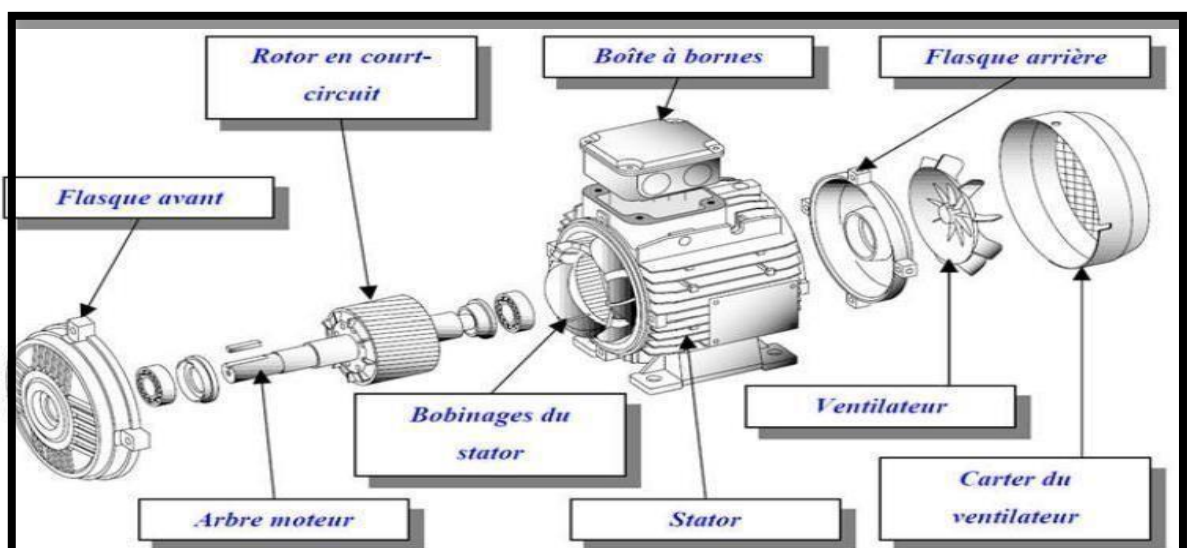


Figure I.7. Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone [5]

## I.9. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du moteur asynchrone repose sur l'interaction électromagnétique entre le champ tournant, créé par le courant triphasé provenant d'un réseau triphasé

équilibré de pulsation  $\omega$ , agissant sur les enroulements statoriques, et les courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque ses conducteurs sont traversés par le champ magnétique tournant (conformément à la loi de Lenz). Cette interaction électromagnétique entre les deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor (Figure I. 8) et (Figure I. 9)

Dans le moteur asynchrone, l'onde du champ tournant se propage dans l'entrefer de la machine à une vitesse de rotation appelée vitesse de synchronisme  $\Omega_s$ . Cette vitesse est liée à la fréquence d'alimentation  $f_s$  par l'expression suivante :

$$\Omega_s = \omega_s / p = 60 * f_s / p$$

$f_s$  : fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation [HZ].

$p$ : Le nombre de paires de pôles.

Un rotor en court-circuit, traversé par le champ tournant, génère des courants induits (courants de Foucault), exposant le rotor à des forces électromagnétiques de Laplace. L'ensemble de ces forces induit un couple moteur qui entraîne la rotation du rotor. Le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant, avec sa vitesse de rotation légèrement inférieure à celle du champ tournant ( $\Omega < \Omega_s$ ) [6], [7].

En effet, il existe toujours une différence de vitesse entre le stator et le rotor, appelée glissement ( $g$ ), qui est une caractéristique distinctive de la machine asynchrone. Ce glissement ( $g$ ) est défini comme l'écart de vitesse entre la vitesse de synchronisme ( $\Omega_s$ ) et la vitesse de rotation du rotor ( $\Omega$ ). Le glissement ( $g$ ) est alors exprimé par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

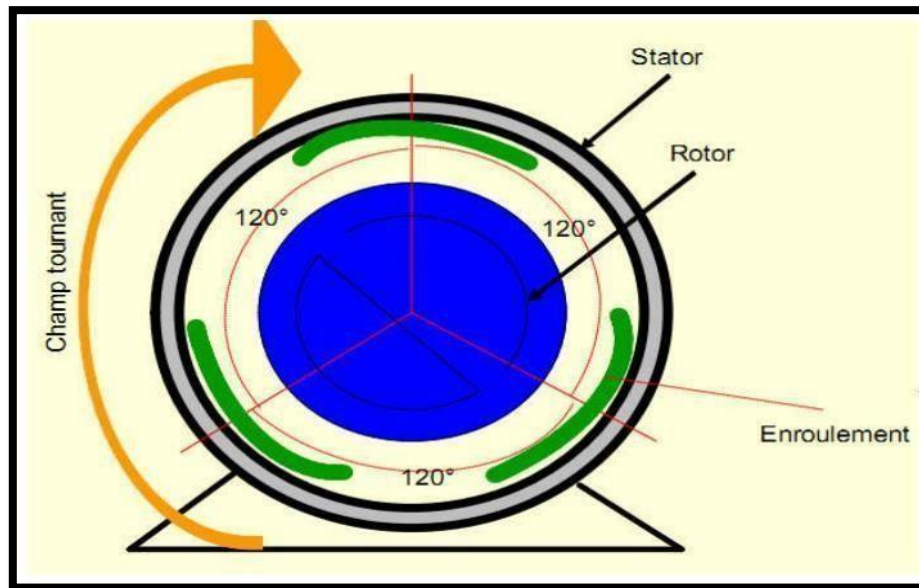


Figure I. 8 Schéma présent principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone [8].

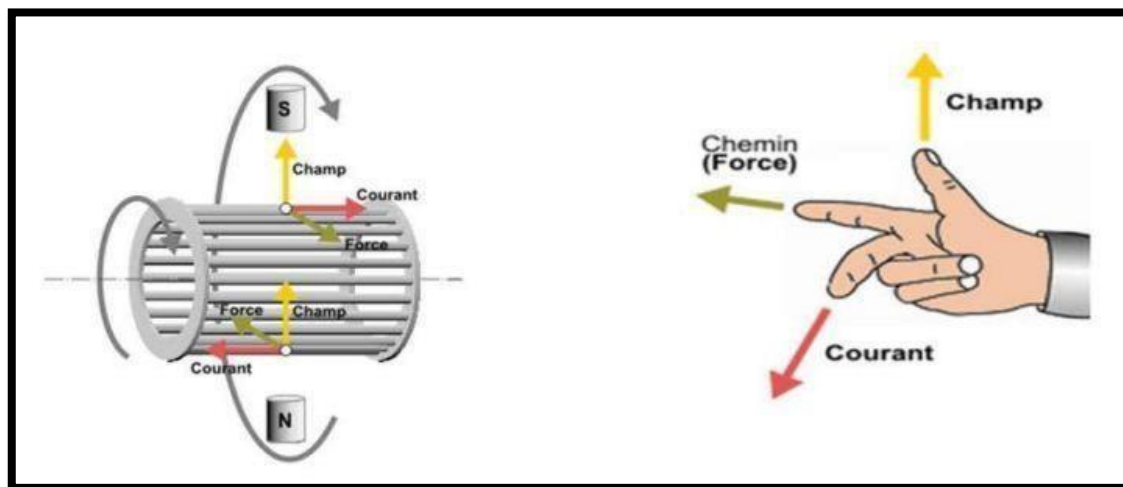
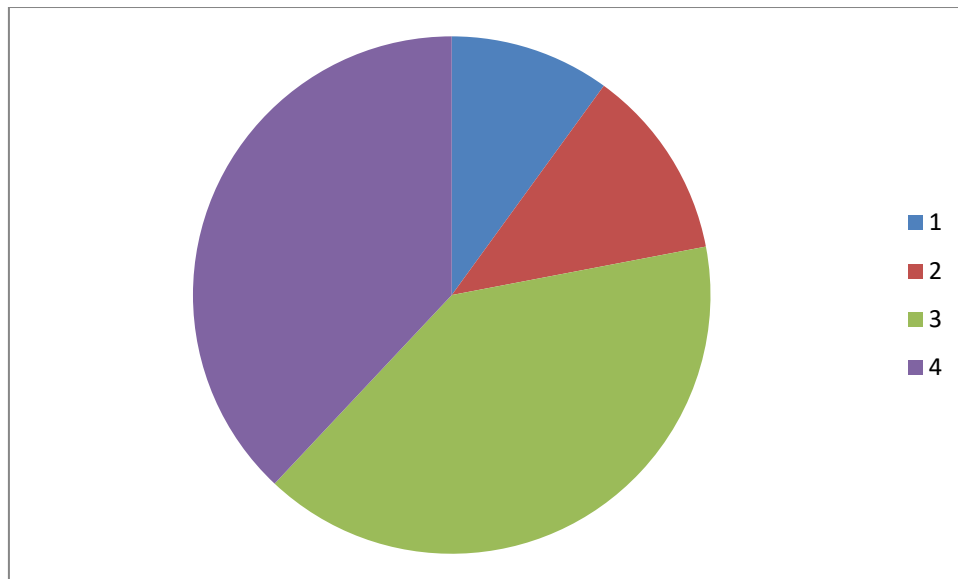


Figure I. 9 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage [6].

## I.10. Différents défauts dans la machine

On peut classer ces défaillances on quatre catégories (Figure I. 10)

1. Défaillances rotoriques. (10%)
2. Autre défaillances. (12%)
3. Défaillances mécaniques (roulements). (40%)
4. Défaillances statoriques. (38%)



**Figure I. 10 Statistiques des pannes**

## **I.11. Défaits statorique**

### **I.11 .1.Court-circuit dans une phase**

Les défaillances statoriques, telles qu'un court-circuit dans une phase, posent l'un des défis les plus importants en termes de tolérance [11]. Dans ce scénario, lorsque l'une des phases est affectée, la littérature décrit généralement la phase en question comme étant "perdue" dans le contexte d'une machine triphasée équipée d'un onduleur à trois bras. Cela entraîne l'arrêt de la machine en raison des conséquences physiques sur le moteur si l'alimentation est maintenue. La manifestation la plus significative de cette défaillance est l'apparition de courants de court-circuit, le principal problème étant le risque d'échauffement excessif pouvant aggraver la défaillance. L'ampleur des courants de défaut dépend directement du nombre de spires impliquées dans le court-circuit. Il est également important de noter que les spires en court-circuit génèrent un couple résistant en raison des courants induits par le flux d'excitation circulant et des interactions magnétiques de la machine en fonctionnement. Ce couple résistant nécessite une caractérisation afin d'anticiper ses effets sur le fonctionnement de la machine suite à la défaillance [12]. (Figure I. 11)

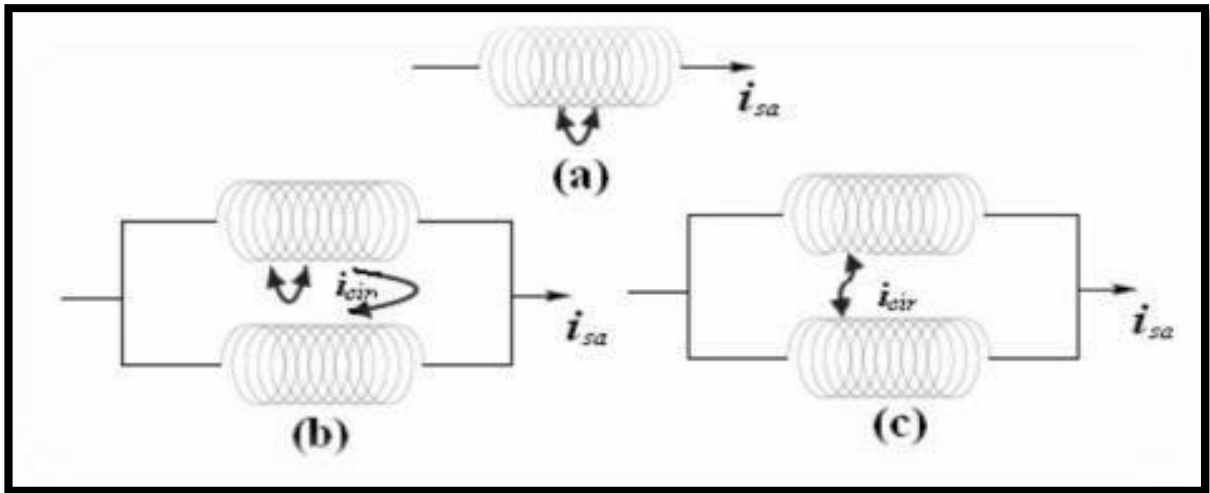


Figure I. 11 : (a) court-circuit entre spires (b) : le courant de circulation (c) :court-circuit entre deux faisceaux

### I.11.2.Court-circuit entre spires

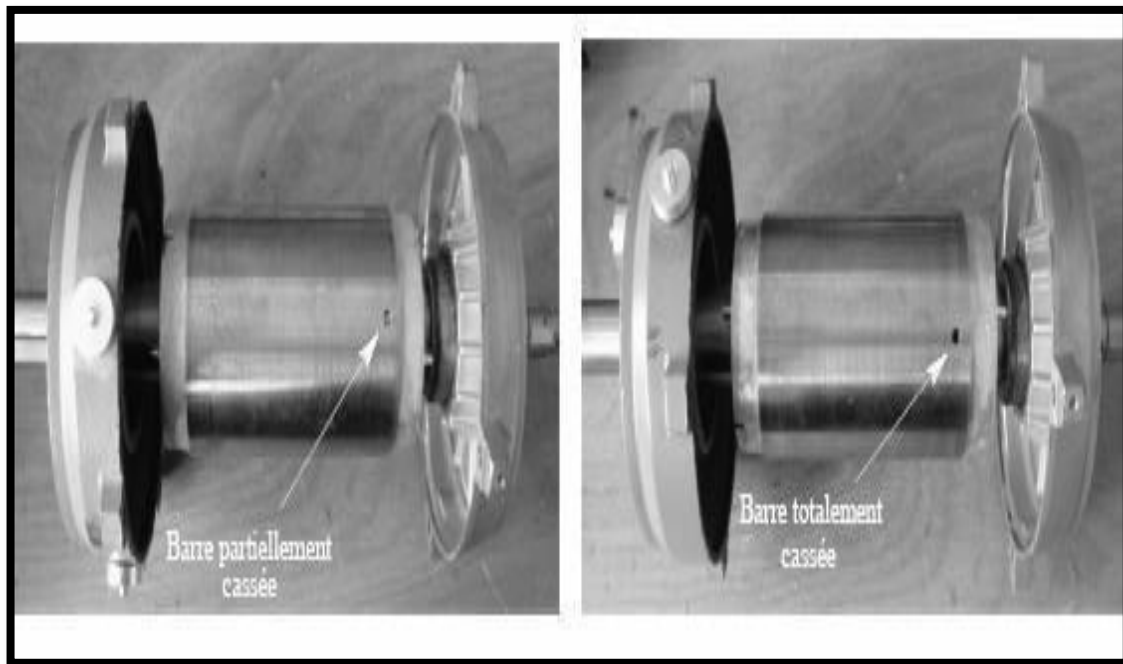
Un court-circuit entre les spires de la même phase est une défaillance assez courante. Cette défaillance est généralement due à un ou plusieurs défauts d'isolation dans l'enroulement concerné. Elle se traduit par une augmentation des courants dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, une modification du facteur de puissance et une amplification des courants dans le circuit rotorique. En conséquence, la température du bobinage augmente, ce qui entraîne une dégradation accélérée des isolants et peut éventuellement conduire à un défaut en cascade (apparition d'un deuxième court-circuit).

Cependant, le couple électromagnétique moyen fourni par la machine reste généralement inchangé, à l'exception d'une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [13].

## I.12. Défaillances rotoriques

### I.12.1.Cassures de barres

La rupture des barres d'une machine asynchrone est l'un des défauts les plus fréquemment étudiés en laboratoire en raison de sa facilité de reproduction. Lorsqu'une barre se rompt, elle entraîne une dissymétrie du rotor. Cette



**Figure I. 12 : Défaut d'une barre [14]**

dissymétrie se traduit par la création d'un champ tournant orienté dans le sens opposé à celui généré par le stator, et ce à la fréquence de glissement. Par conséquent, cela induit la génération d'un courant supplémentaire dans le bobinage statorique [14] (FigureI. 12)

### **I.12.2 Ruptures de portions d'anneaux des cages**

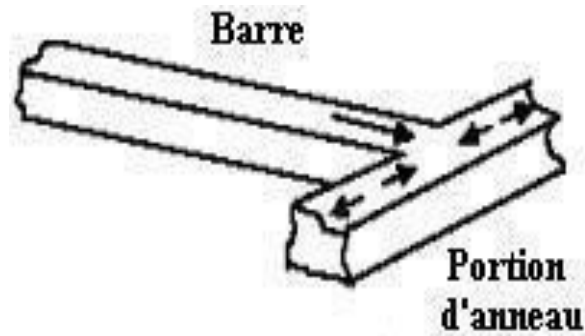
Ces défauts se manifestent au niveau du bobinage rotorique et sont parmi les plus courants. Ils surviennent sous forme de ruptures totales ou partielles d'une barre au niveau de l'anneau de la cage d'écureuil, ou de ruptures d'une portion de l'anneau. Ces défaillances se traduisent par une augmentation de la résistance équivalente d'un enroulement rotorique.

Les pannes rotoriques entraînent malheureusement des fluctuations dans le couple électromagnétique, ce qui provoque des oscillations de la vitesse de rotation de la machine. Cela peut également générer des défauts mécaniques supplémentaires dans la machine.

Après l'apparition de ce type de défauts, la machine continue de fonctionner, ce qui rend très difficile leur détection lorsque la machine est en état de défaut. Le courant

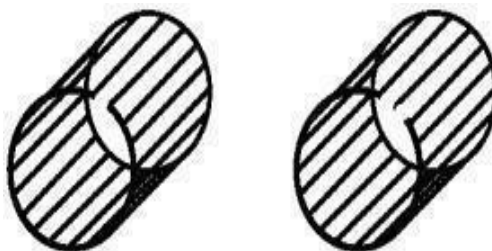
qui circule dans une barre cassée se répartit sur les autres barres, les surchargeant, ce

qui peut entraîner leur rupture. Par la suite, un plus grand nombre de barres peut se rompre dans la machine.( **Figure I. 13**)



**Figure I. 13 Schéma descriptif d'une barre et une portion d'anneaux[14]**

Les cassures de portions d'anneaux peuvent être causées soit par des bulles de coulée, soit par des dilatations entre les barres et les anneaux. Les portions d'anneaux en court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. Un dimensionnement inadéquat des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge du couple et donc du courant peuvent conduire à leur rupture. La rupture d'une portion d'anneau entraîne un comportement similaire à celui de la rupture de barres [15]. (**Figure I. 14**)



**Figure I. 14 Rupture d'une et de deux portions d'anneaux[15]**

### I.13. Excentricité statique et dynamique

Parfois, une machine électrique peut être confrontée à un décentrement du rotor, se manifestant par des oscillations de couple, c'est-à-dire un décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor. Ce phénomène est appelé excentricité, pouvant être de nature statique ou dynamique, et son origine peut être liée à un positionnement

incorrect des paliers lors de l'assemblage, à une défaillance des roulements (usure), à un déséquilibre de charge, ou à des défauts de fabrication (usinage) Trois cas d'excentricité sont généralement distingués [16] (Figure I. 15)

- ✓ L'excentricité statique : le rotor est déplacé par rapport au centre de l'alésage stator, mais il tourne toujours autour de son axe.
- ✓ L'excentricité dynamique : le rotor est positionné au centre de l'alésage, mais il ne tourne plus autour de son axe.
- ✓ L'excentricité mixte : elle associe les deux cas précédemment mentionnés.

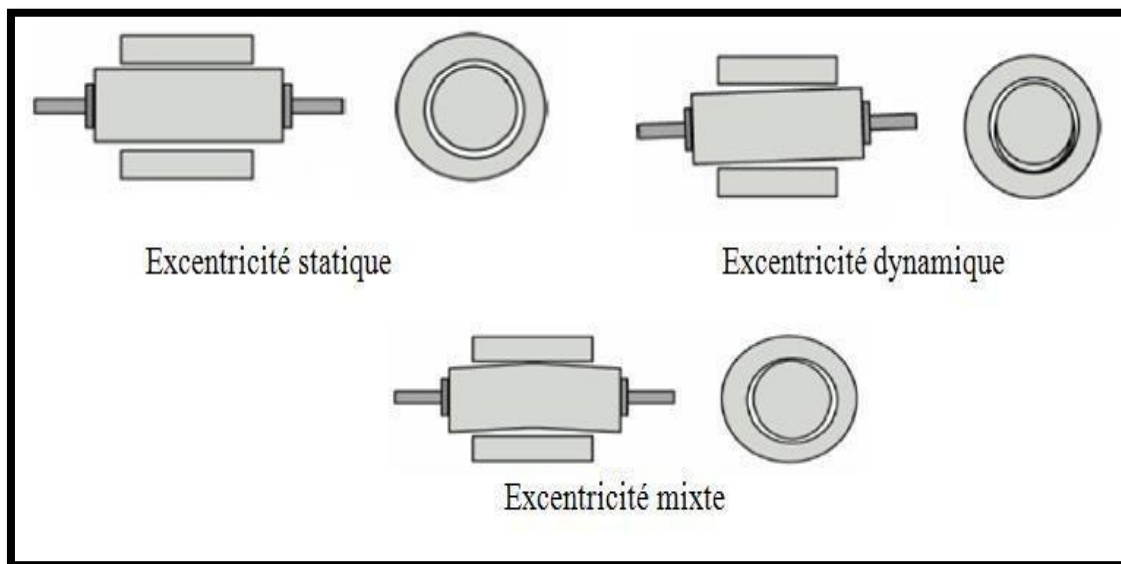


Figure I. 15 : Défauts d'excentricité statique, dynamique et mixte[16]

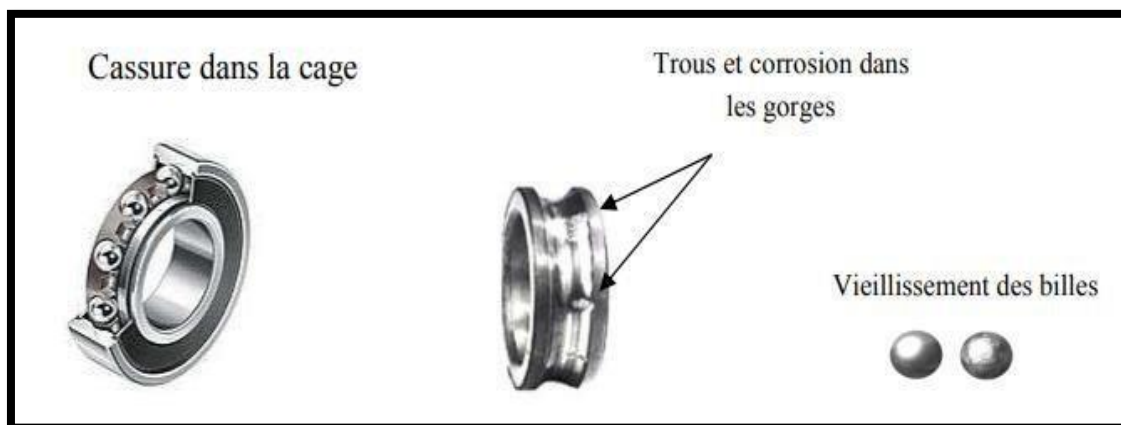
### I.14. Défaillances mécaniques

#### I.14.1. Défauts roulements

Les roulements à billes jouent un rôle crucial en tant qu'interface électromécanique entre le stator et le rotor pour assurer une rotation efficace du rotor. Dans l'article [16], l'auteur examine en détail la plupart des défauts rencontrés

dans les roulements des moteurs à induction, ainsi que les raisons de leur vieillissement. Comme précédemment exposé, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de forte puissance. Il est généralement attribuable à l'usure du roulement, notamment la dégradation des billes ou de la bande de roulement. Les causes possibles de cette usure comprennent (Figure I. 16 )

- Le vieillissement naturel du roulement.
- Des températures de fonctionnement élevées.
- La perte de lubrification et la contamination de l'huile par des particules métalliques provenant de la dégradation des billes ou de la bande de roulement.
- Des défauts de montage.
- Des courants d'arbres (court-circuit).
- Les conséquences directes de ces défaillances sur les roulements incluent :
  - Des creux dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
  - L'usure des billes.
  - La corrosion causée par l'eau.
  - Des problèmes de graissage, souvent liés à des variations de température.
  - décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge



**Figure I. 16 : Défaillances des roulements à billes[16]**

Dans le système, ce type de défaut se manifeste par des oscillations du couple de charge, une augmentation des pertes supplémentaires et un jeu entre la bague

interne et la bague externe du roulement, entraînant des vibrations dues aux déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut conduire au blocage complet du moteur. [16]

#### ➤ **autres défaillances mécanique**

au niveau du stator où il n'y a pas de pièces mobiles, a priori, les défaillances mécaniques ne devraient pas se produire. Cependant, des phénomènes d'oxydation

peuvent se produire dans l'environnement de la machine, en particulier en fonction du taux de salinité, ce qui peut influencer sur l'étanchéité et les contacts électriques.

### **I.14.2 .Conséquences des défauts :**

Les courants circulant dans les barres rotoriques entraînent des surchauffes et des contraintes mécaniques, conduisant éventuellement à des fissures et à la rupture des barres. Lorsqu'une barre se casse, elle peut accélérer la rupture des barres adjacentes par effet d'avalanche, pouvant même conduire à la destruction totale du rotor. Parallèlement, les efforts électrodynamiques sur les conducteurs des phases induisent des vibrations mécaniques qui détériorent l'isolation. Sur le plan électrique, les fronts de tensions générés par les convertisseurs statiques accentuent le phénomène de décharges partielles, réduisant ainsi la durée de vie de l'isolant. Du point de vue environnemental, l'humidité et les produits corrosifs ou abrasifs sont les facteurs les plus courants [17].

Au niveau de l'entrefer, les défauts se manifestent sous forme d'excentricité statique, dynamique ou mixte. 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 aussi bien d'une déformation du cylindre rotorique que d'une déformation du cylindre statorique [18]. L'excentricité mixte combine les deux premiers types.

Dans la cage, les défauts se traduisent par la rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit, souvent causée par une surcharge mécanique, un échauffement excessif local ou un défaut de fabrication, telles que des bulles d'air ou des soudures défectueuses [17].

Au niveau des paliers, le décentrage des flasques peut entraîner une excentricité statique, tandis que la détérioration des roulements à billes conduit généralement à une excentricité dynamique. Il convient de noter que plusieurs études statistiques ont été menées pour évaluer l'impact de chaque type de défaut sur la fiabilité de la machine, avec des pourcentages de prévalence cités dans diverses publications [19] - [20]. Bien que les résultats puissent varier d'une étude à l'autre, elles convergent toutes pour classer les défauts de paliers comme les plus fréquents, suivis par les défauts statoriques et, en dernier lieu, les défauts de la cage rotorique [17].

## **I.15. Maintenance**

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la disponibilité des systèmes industriels, c'est-à-dire de s'assurer que le système fonctionne lorsqu'il est sollicité. Cette responsabilité repose principalement sur la maintenance. Selon l'Association française de normalisation (AFNOR), la maintenance est définie comme « l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état permettant d'accomplir une fonction requise ».

Il existe deux grandes catégories de maintenance :

- Maintenance corrective

- Maintenance préventive

  - qui se divise en :

    - Systematique

    - Conditionnelle

### **I.15.1. Maintenance Corrective**

La maintenance corrective regroupe les activités effectuées après la défaillance d'un bien. En d'autres termes, elle intervient après la détection d'une panne. Ce type de maintenance s'applique généralement aux défaillances complètes et soudaines. Elle est souvent réservée aux équipements peu coûteux, non stratégiques pour la production, et dont les pannes ont un impact limité sur la sécurité.

### **I.15.2. Maintenance Préventive**

La maintenance préventive vise à réduire la probabilité de défaillance des équipements. Son objectif est d'éviter les pannes au cours de l'utilisation. Pour mettre en pratique ce type de maintenance, il est nécessaire de décomposer les sous-systèmes en composants (comme les roulements, circuits magnétiques, etc.). Les objectifs de la maintenance préventive sont les suivants :

1. Augmenter la durée de vie des équipements.
2. Réduire le budget de la maintenance.
3. Éliminer les causes des accidents graves

#### **I.15.2.1. Maintenance préventive systématique**

La maintenance systématique est un type de maintenance planifiée dans le temps, incluant des activités comme le graissage, la lubrification, le nettoyage, le dépoussiérage, et le calibrage. Son objectif est d'éviter les causes de défaillance et le vieillissement des composants du système. La maintenance préventive systématique s'applique généralement aux éléments dont le coût des pannes est élevé, mais dont le remplacement reste relativement abordable. Des exemples typiques incluent le changement régulier de l'huile, des filtres, des courroies de synchronisation, des roulements, et des paliers de rotation.

#### **I.15.2.2. Maintenance préventive conditionnelle**

La maintenance préventive conditionnelle est déclenchée par l'observation de symptômes (température, vibration, jeu excessif, etc.) permettant de prédire une défaillance imminente. Elle intervient juste avant qu'une panne ne survienne. Ce type de maintenance est réalisé dès qu'une mesure dépasse un seuil précis d'une grandeur physique (température, pression, etc.). La maintenance préventive conditionnelle s'adresse aux pièces des machines coûteuses à remplacer et pouvant être surveillées par des méthodes non destructives (vibration, analyse d'huile, température, courant, etc.). Autrement dit, on ne change l'élément que lorsqu'il présente des signes de vieillissement ou d'usure affectant ses performances. Cette maintenance nécessite une équipe hautement qualifiée en techniques de diagnostic.

Les outils et signaux utilisés dans la maintenance préventive conditionnelle incluent :

4. Mesure de température et thermographie infrarouge (alignement, roulements, paliers)
5. Mesure de pression (paliers)
6. Mesure de débit (paliers)
7. Analyse d'huile (roulements, paliers, engrenages)
8. Mesure de vibration (déséquilibre, roulements, paliers, engrenages, jeux, etc.)
9. Mesure du courant statorique, du couple, de la vitesse ou de la puissance

Selon ces définitions, si un composant est jugé défaillant, sa réparation ou son remplacement relève de la maintenance corrective. S'il est en état dégradé mais fonctionnel, sa réparation ou son remplacement relève de la maintenance préventive.

## **I.16. Conclusion**

Ce chapitre examine en profondeur l'état de l'art concernant la machine asynchrone, en mettant en évidence les différents types de défaillances ainsi que les méthodes de diagnostic et de détection associées. Les études statistiques montrent que les défauts mécaniques sont les plus fréquents dans ces machines et peuvent souvent entraîner des défaillances plus graves affectant d'autres composants.

Il est essentiel de développer des modèles triphasés spécifiques ou d'utiliser directement des résultats expérimentaux pour les machines asynchrones, notamment pour diagnostiquer et détecter les défauts tels que les ruptures de barres rotoriques et les excentricités, qui seront le sujet de notre mémoire. Le diagnostic joue un rôle crucial dans le maintien 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.

# **ChapitreII**

## **Diagnostic et Gestion des Défaits et Harmoniques en les Machines Asynchrones**

## **II.1. Introduction :**

Ce chapitre se concentre sur les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines asynchrones et sur les techniques de gestion des harmoniques associées. En explorant les méthodes internes de diagnostic, telles que la mesure de la température et des vibrations, ainsi que les diagnostics chimiques, magnétiques et électriques, ce chapitre met en lumière des approches essentielles pour évaluer l'état de santé des machines. Il examine également l'utilisation de techniques de traitement du signal telles que la FFT et la DWT, ainsi que l'impact des harmoniques sur les systèmes électriques, offrant ainsi une compréhension approfondie des défis et des solutions associés à la maintenance et à la fiabilité des machines asynchrones.

En fournissant un aperçu complet des méthodes de diagnostic des défauts et de gestion des harmoniques, ce chapitre souligne l'importance cruciale de ces techniques pour garantir la performance et la durabilité des systèmes électriques industriels. En mettant en évidence les différentes approches disponibles, des mesures internes aux solutions de traitement du signal et de gestion des harmoniques, il vise à fournir aux ingénieurs électriques une base solide pour évaluer, maintenir et améliorer les machines asynchrones dans divers environnements industriels.

## **II.2. Différents méthodes de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone**

Les moteurs asynchrones subissent diverses contraintes pendant leur fonctionnement, ce qui peut entraîner des défauts dans différentes parties du moteur. Pour détecter ces défauts, diverses techniques de diagnostic sont disponibles. Certaines reposent sur l'observation et la mesure, telles que la mesure du champ magnétique ou du bruit, tandis que d'autres se basent sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut, telles que le courant statorique, le couple et la vitesse [22] (**Figure II. 1.**)

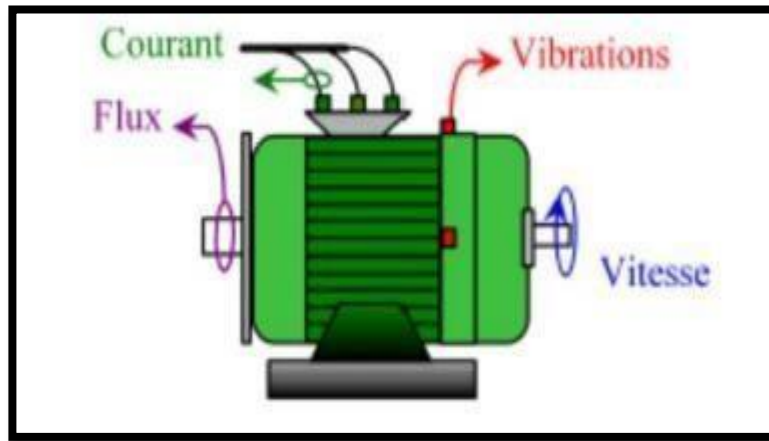


Figure II. 1 : Les différentes grandeurs de diagnostic dans une machine.  
[22]

## II .2.1.Diagnostic à partir des méthodes internes (connaissance à priori)

### II .2.1.1.Diagnostic par mesure de la température

La surveillance régulière des températures des supports fournit des informations précieuses. De même, l'observation des températures dans un liquide de refroidissement permet de détecter les problèmes de refroidissement et de contrôler la machine lorsqu'il est envisagé de la solliciter au-delà de sa capacité nominale. Les températures des bobines sont également cruciales pour déterminer la charge maximale que le moteur peut supporter et pour estimer la durée de vie restante de l'isolation des enroulements. Cependant, leur mesure est rare en raison des difficultés à isoler électriquement les capteurs des conducteurs sous haute tension. Parfois, des capteurs de température sont intégrés à l'isolant autour des points chauds des conducteurs, mais cela peut affaiblir l'intégrité de l'isolant. Il reste donc nécessaire d'utiliser des capteurs de température résistants à la chaleur, qui peuvent être montés sur les enroulements ou insérés dans l'isolant électriquement isolé par rapport à l'instrument de mesure [22].

### II .2.1.2.Diagnostic par mesure des vibrations

Le diagnostic vibratoire est une méthode éprouvée et largement utilisée pour détecter les défauts dans les machines électriques. Toutes ces machines génèrent du bruit et des vibrations, dont l'analyse peut fournir des indications sur leur état de fonctionnement. Habituellement, les mesures sont effectuées de manière sporadique ou lorsque des problèmes sont soupçonnés, en utilisant des accéléromètres ou des

capteurs de vitesse montés sur des boulons. Les sondes de déphasage sont également utilisées pour surveiller le mouvement de l'arbre. Par exemple, un désalignement entre les centres de support provoque un entrefer non uniforme, entraînant des vibrations à une fréquence double, tandis qu'un déséquilibre mécanique produit des vibrations à la fréquence de rotation, ces deux phénomènes étant liés à la réponse mécanique à cette fréquence. Les signaux de vibration captés contiennent des informations cruciales sur l'état de la machine. L'analyse spectrale de ces signaux permet d'identifier les différents défauts à l'origine de ces vibrations [22].

## **II .2.2.Diagnostic chimiques**

Plusieurs moteurs sont refroidis soit par air, soit au moyen d'un circuit fermé équipé d'un échangeur de chaleur refroidi par un fluide hydro-réfrigérant. La détérioration de l'isolation électrique à l'intérieur du moteur peut entraîner la production de gaz d'oxyde de carbone, qui se retrouve dans le circuit de refroidissement par air et peut être détecté par une méthode d'absorption infrarouge. L'air est aspiré du moteur à travers un tube vers un détecteur infrarouge à l'aide d'une pompe auxiliaire. Seuls les moteurs en fonctionnement sont échantillonnés, et la composition de l'air de chaque moteur est analysée pendant une durée de deux minutes. De plus, l'huile de roulement est régulièrement analysée, et une intervention est nécessaire si des signes de dégradation sont détectés. Il est à noter que la plupart de ces techniques nécessitent l'utilisation de capteurs qui doivent être installés au niveau de la machine, limitant ainsi leur applicabilité aux moteurs de grande puissance. Ces méthodes reposent généralement sur des mesures mécaniques, ce qui permet aux ingénieurs mécaniciens de les interpréter, même si les machines sont des moteurs électriques. Toutefois, la présence d'ingénieurs électriciens est nécessaire pour intervenir sur la partie électrique. C'est pourquoi les techniques de diagnostic évoluent de plus en plus vers l'utilisation de mesures électriques, en raison de leur accessibilité et de la simplicité des capteurs utilisés [8].

## **II .2.3.Techniques magnétiques et électriques**

### **II .2.3.1.Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite**

Le flux de fuite axial peut être détecté à l'aide d'une bobine exploratrice enroulée autour de l'arbre de la machine (Figure II. 2), ainsi que par un arrangement simple et

symétrique de bobines placées à l'extrémité de l'arbre, ou encore par d'autres dispositifs sensibles comme les sondes à effet Hall. Lorsqu'une bobine est enroulée autour de l'arbre d'une machine électrique, elle génère une force électromotrice (FEM) induite, qui est liée aux flux de fuite axiaux. Ces flux de fuite sont présents dans toutes les machines électriques en raison des asymétries dans les circuits électriques et magnétiques, dues aux variations du réseau électrique et aux tolérances lors du processus de fabrication. L'analyse spectrale de la tension induite peut être utilisée pour identifier les différentes asymétries et défauts. Les harmoniques présentes dans les flux de fuite axiaux du stator et du rotor sont directement liées aux harmoniques présents respectivement dans les courants du stator et du rotor. Une augmentation du flux de fuite axial est une conséquence directe d'un défaut. Cette augmentation du flux est une condition préalable à l'utilisation du flux de fuite axial comme technique de diagnostic, car celui-ci doit avoir une valeur significative [22].

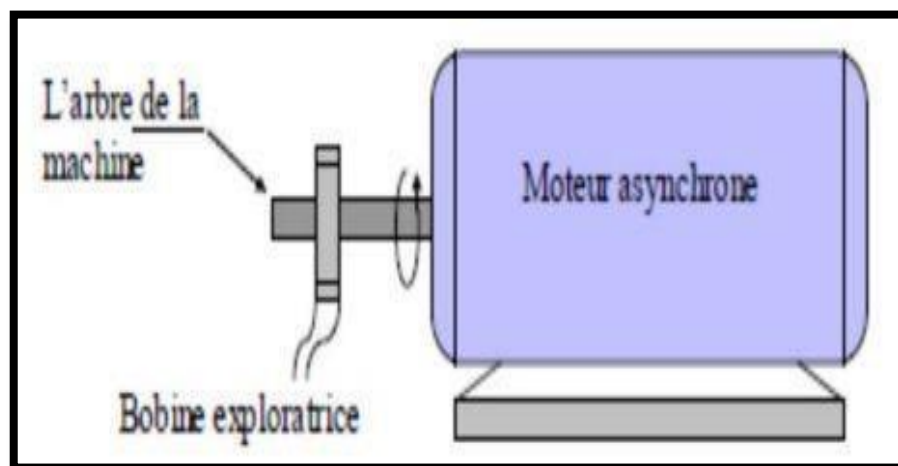


Figure II. 2 : Bobine exploratrice pour mesure du flux de fuite axial[22]

### II .2.3.2.Diagnostic par l’analyse des courants statoriques

Cette méthode constitue un outil efficace pour détecter les défauts mécaniques et électriques, offrant plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes. Elle ne nécessite ni l'installation d'un capteur au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant, mais simplement un capteur de courant tel qu'une sonde à effet Hall ou un transformateur de courant, qui fournit des informations sur le courant de phase statorique. Cette approche repose sur la surveillance du spectre du courant statorique. Dans un moteur sans défaut, seul le composant fondamental

apparaît dans le spectre du courant, indiquant une répartition sinusoïdale du flux magnétique mutuel (Fmm). Cependant, en présence d'une répartition non sinusoïdale de la Fmm, des harmoniques de l'encoche du rotor apparaissent en plus du fondamental, comme c'est le cas pour un moteur à cage [22].

Pour illustrer le principe de cette méthode, considérons le cas d'une asymétrie du rotor dans un moteur asynchrone. La présence de ce défaut génère un courant de défaut dans le rotor, induisant une Fmm pulsatoire avec une fréquence d'ondulation ( $gf$ ). Cette Fmm produit dans l'enroulement statorique une harmonique composée de deux composantes : la première avec une fréquence de  $(1 - 2g)f$  et la deuxième avec une fréquence de  $(1 + 2g)f$  [8] (Figure II. 3).

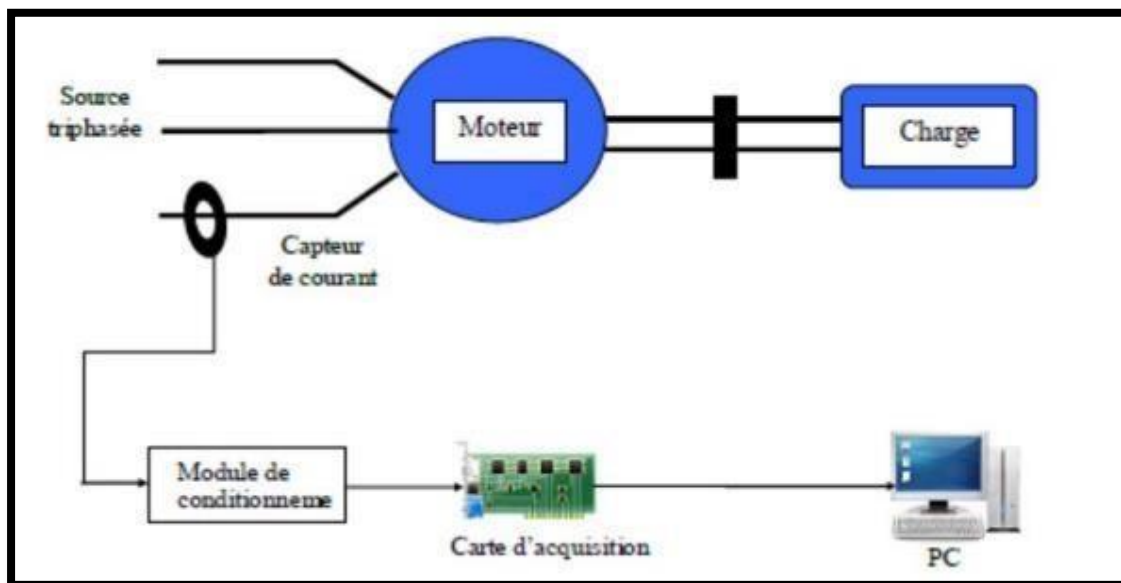


Figure II. 3 : Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique[22]

### II .3. Technique de la FFT

La FFT (Fast Fourier Transform) est un moyen efficace de réduire le nombre d'opérations arithmétiques nécessaires à la transformée discrète de Fourier. Son importance croît avec l'évolution du traitement numérique des signaux, ainsi qu'avec la possibilité de l'utiliser pour des signaux analogiques ou plus généralement pour des fonctions continues dans de nombreux domaines scientifiques.

Cette méthode est très simple à utiliser car elle ne nécessite pas l'introduction d'appareils de mesure à l'intérieur de la machine électrique. Elle consiste simplement à analyser le courant statorique du moteur [23], [24], [25].

## II .4. Transformée en ondelettes Discrète (DWT)

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la dernière, la TOD utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. On appelle transformée en ondelettes discrète dyadique toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur d'échelle  $u = 2$ . Il est clair que la transformée en ondelettes discrète est pratique en implémentation sur tout système numérique (PC, DSP, CARTE à  $\mu P...$ ).

L'analyse en multi-résolution permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue de la plus fine à la plus grossière. L'ondelette discrète est donnée comme suit :

$$DWT_{\Psi}f(m, k) = \frac{1}{\sqrt{(a_0)^2}} \sum_n x(n) \Psi \left( \frac{k - n \cdot b_0(a_0)^m}{(a_0)^{m^2}} \right) \quad \text{II. 1}$$

Où

$\Psi$  Est l'ondelette mère,  $n$  et  $m$  indiquent la localisation de fréquence et la localisation temporelle,  $(a_0)^m$  et  $n \cdot b_0 \cdot (a_0)^m$  sont les paramètres de dilatation et de translation. [30]

Le principe de la DWT peut être expliqué comme suit : La transformation en ondelettes peut aussi être considérée comme un processus de décomposition du signal en approximations et en détails. Le signal d'origine  $X(t)$  traverse une paire de filtres complémentaires, passe-haut et passe-bas, et émerge en tant que deux signaux respectivement le signal d'approximations  $A$  et le signal de détails comme le montre la figure II.4. Ce processus, étant réversible et sans perte de données, permet de compresser et de réduire l'information à niveau choisi.

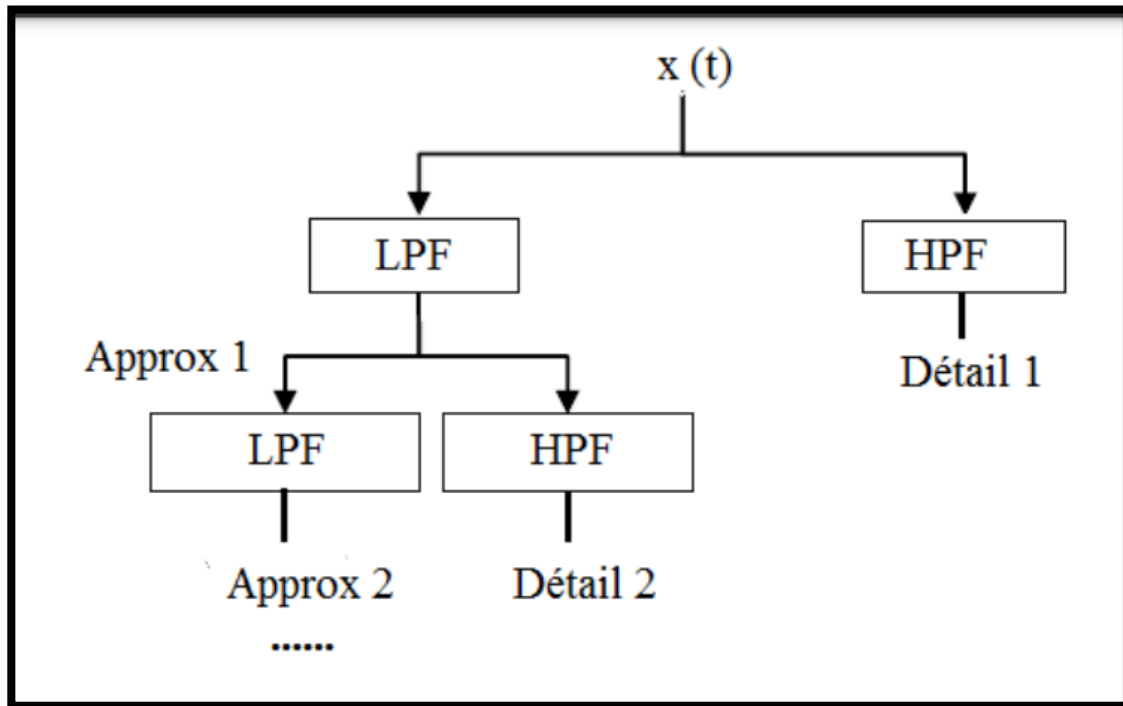


Figure II. 4 Principe de la décomposition par ondelette discrète (DWT)  
[30]

Nous choisissons l'ondelette de mère complexe de Daubechies 4 (db4) pour l'analyse par ondelette discrète. On a ce choix parce que la db4 permet, en présence de pollution, de déceler les phénomènes transitoires tels que les impulsions sur le signal du courant de fuite qui sont causées par l'apparition de décharges électriques à la surface de l'isolateur.

La représentation temporelle de l'ondelette mère complexe db4 est donnée par la Figure II.5. Son expression mathématique est donnée comme suit:

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} * (e^{-jmt} - e^{-\frac{m^2}{2}}) \quad \text{II. 2}$$

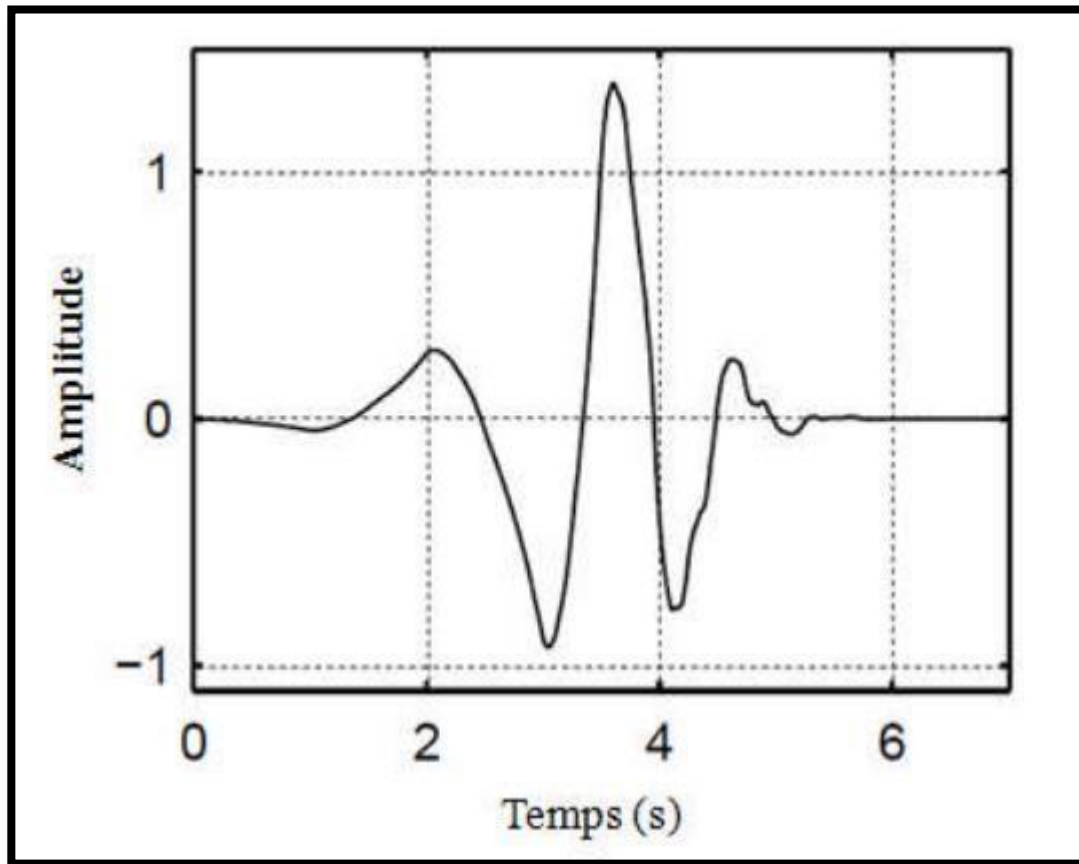


Figure II. 5 Représentation de l'Ondellete de Daubechies[30]

## II .5. Harmonique

### II .5. 1.Définition des harmoniques

Les équipements électriques non linéaires tels que les fours à arc, les éclairages, les convertisseurs, les redresseurs et les onduleurs absorbent des courants non sinusoïdaux lorsqu'ils sont connectés aux impédances du réseau, entraînant ainsi une distorsion des formes d'ondes de tension et de courant d'alimentation. Cette distorsion se manifeste par l'émergence de fréquences harmoniques.

La distorsion harmonique représente une forme de pollution du réseau électrique qui peut poser des problèmes lorsque la somme des courants harmoniques dépasse certaines valeurs limites. Généralement, les fréquences harmoniques considérées dans un réseau électrique sont comprises entre 100 Hz et 2500 Hz, correspondant aux rangs 2à50.

Le rang harmonique est défini comme le rapport entre la fréquence harmonique et celle du fondamental (habituellement la fréquence industrielle de 50 ou 60 Hz). [27]

$$h = \frac{f_h}{f_1}$$

**II. 3**

## **II .5. 2.Origines et sources des harmoniques**

Dans la plupart des cas, les harmoniques de tensions ou de courants présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation des charges non linéaires, tels que les convertisseurs statiques. [28]

### **II .5. 2.1 .Emission en tension**

L'émission harmonique en tension due aux matériels du réseau entre pour une faible part, et avec des taux généralement faible, dans la distorsion du réseau. Elle est due aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation des circuits magnétiques...) des bobinages des machines tournantes, des moteurs, des transformateurs.

#### **II .5. 2.1 .1.Alternateurs**

Les alternateurs des centrales de production fournissent une tension d'alimentation qui contient très peu d'harmoniques ( 0.5% selon la norme harmonique IEEE 519 (1992)). Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde. Sur un groupe électrogène, le taux de distorsion harmonique en tension est généralement inférieur à 5% à vide et inférieur à 1% lorsque le groupe électrogène débite à pleine puissance sur une charge linéaire.

#### **II .5. 2.1 .2.Transformateurs**

Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours inférieur au pourcent. [29]

### **II .5. 2.1 .3.Alimentations statiques ininterrompibles (ASI)**

Ces dispositifs ont des performances très intéressantes pour la protection du matériel contre les creux de tension et les coupures. En revanche, ils ont parfois des limitations dans le domaine harmonique qu'il convient de connaître pour bien les maîtriser. En effet, le réseau protégé alimente généralement des charges non linéaires comme du matériel informatique. Pour une ASI d'une puissance de 80KVA, le taux de distorsion harmonique en tension est inférieur à 4% pour une charge linéaire, est inférieur à 7% pour une charge non linéaire

En général, le taux de distorsion harmonique en tension diminue avec l'augmentation de la puissance de l'ASI.

Il faut bien noter qu'en charge, le taux de tension harmonique est dû essentiellement aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires qui sont alimentées par l'ASI.

### **II .5. 2.2. Emission en courant**

Les charges non linéaires consomment un courant qui n'est pas sinusoïdal. Elles représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux.

#### **II .5. 2.2. 1.Le redresseur triphasé à thyristors**

Le redresseur triphasé à thyristors, ou pont de Graëtz, constitue l'un des montages de l'électronique de puissance les plus répandus dans le secteur industriel. Il représente 55% de la puissance des matériels électroniques de puissance. Dans le domaine de la vitesse variable, les redresseurs triphasés à thyristors sont la principale source de pollution harmonique dans le secteur industriel. [28]

#### **II .5. 2.3. 1.Les charges non linéaires passives**

On distingue trois types de charges passives non linéaires. Ce sont, d'une part, les lampes et les petits moteurs dans les secteurs tertiaire, domestique et industriel et, d'autre part, les fours à arc dans le secteur industriel. [29]

##### **➤ Les lampes**

Deux types de lampes produisent des courants harmoniques : Les lampes fluorescentes et les lampes à vapeur haute pression. Elles représentent les deux tiers de la puissance consommée par l'éclairage. La génération d'harmoniques dans ces lampes est liée à la nature fortement non linéaire du phénomène entraînant l'illumination, ainsi qu'à la présence d'un ballast.

#### ➤ **Les appareils à arc électrique**

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de MW, et les machines de soudure à l'arc, à courant alternatif ou continu [29,28].

### **II .5. 3.Problématique des harmoniques :**

La problématique des harmoniques, également connue sous le nom de pollution harmonique, ne constitue pas un phénomène récent. Toutefois, en raison de la croissance du nombre de charges non linéaires connectées au réseau, cette problématique s'est largement répandue. Ces charges non linéaires induisent une distorsion du courant, et par conséquent de la tension, ce qui peut entraîner un dysfonctionnement des dispositifs connectés au réseau. Ainsi, il est essentiel d'éliminer ou de repousser ces harmoniques vers les fréquences les plus élevées. [30]

Un récepteur d'énergie est considéré comme une charge perturbatrice pour le réseau électrique s'il absorbe des courants non sinusoïdaux, des courants déséquilibrés, ou s'il consomme de la puissance réactive. Les deux premiers types de perturbations peuvent altérer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque son impédance n'est pas négligeable. Quant au troisième type, il diminue la capacité de production ou de transmission de la puissance active des générateurs, des transformateurs et des lignes électriques.

Les harmoniques de courant, une fois injectées par des charges non linéaires, se propagent à travers le réseau électrique en altérant la forme d'onde des tensions aux différents points du réseau. Cette propagation n'est limitée que par les bifurcations (points de division des courants) et les impédances du réseau, qui dépendent généralement de la fréquence des courants harmoniques. La présence des harmoniques de courant se manifeste principalement à travers leurs effets sur la

tension du réseau. [30]

## **II .5. 4.Causes et conséquence des harmoniques**

Les dispositifs électroniques de puissance intégrés dans l'appareil sont à l'origine des harmoniques. Pour alimenter les composants électroniques en courant continu, l'appareil dispose d'un bloc d'alimentation avec un redresseur à l'entrée qui crée des courants harmoniques. Ceux-ci proviennent, par exemple, des ordinateurs, des convertisseurs de fréquence, etc. D'autres consommateurs génèrent des distorsions de courant en raison de leur mode de fonctionnement et produisent également des surtensions. Ce sont, par exemple, les lampes fluorescentes, les lampes à décharge, les machines à souder et les dispositifs avec un noyau magnétique impénétrable. Toutes les charges qui génèrent des distorsions de courant sinusoïdal par rapport aux normes produisent des harmoniques et sont appelées charges non linéaires. [31]

Les effets indésirables des harmoniques : Les tensions et courants harmoniques se superposent à l'onde fondamentale et influencent les dispositifs et systèmes utilisant ces dimensions.

Les harmoniques ont différents effets selon le récepteur :

- Effets instantanés.
- Conséquences à long terme telles que la surchauffe.

### **Effets Instantanés :**

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

a) Pertes d'énergie : Les courants harmoniques provoquent dans les conducteurs et les équipements des pertes supplémentaires par effet Joule.

b) Perturbation des lignes de faible courant : Les dispositifs à faible courant sont perturbés lorsqu'ils sont utilisés à proximité d'une ligne électrique à haute puissance. C'est le cas par exemple des téléphones mobiles, où il est difficile d'entendre.

c) Déclenchements intempestifs et arrêts d'usine : Les disjoncteurs d'une installation sont soumis à des pics de courant dus aux harmoniques. Ces pics de courant peuvent entraîner des déclenchements intempestifs gênants et induire 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, notamment dans les dispositifs électromagnétiques (transformateurs, inducteurs). Des couples mécaniques pulsatoires, dus aux champs tournants harmoniques, provoqueront des vibrations dans les machines rotatives. Ils peuvent entraîner une destruction du matériel.

### **Effets à Long Terme :**

Ils apparaissent après une exposition prolongée au phénomène et résultent en une perte partielle de fonctionnalité ou une destruction complète du dispositif. [32]

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 provoquant sa surcharge. Et peut conduire à sa panne.

b) Augmentation de température dans les conducteurs et équipements électriques : 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 créent uniquement 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 .5. 5.Solutions harmoniques générales**

Étant donné que les harmoniques se présentent sous forme d'ondes avec une fréquence et une amplitude définies, la solution la plus efficace consiste à les filtrer à l'aide de techniques de filtrage passif ou actif. [33]

### **II .5. 5.1.Filtres passif**

Les filtres passifs sont conçus à l'aide de composants passifs tels que des inducteurs, des condensateurs et des résistances afin d'atténuer des fréquences harmoniques spécifiques. Ils sont généralement connectés en parallèle avec la charge ou l'équipement générant les harmoniques. Ces filtres peuvent être classés en différents types :

- Filtres passe-bas : Ils réduisent les harmoniques de haute fréquence tout en permettant aux composantes fondamentales de fréquence plus basse de passer.
- Filtres passe-haut : Ils autorisent le passage des composantes de fréquence plus élevée tout en atténuant les harmoniques de fréquence plus basse.
- Filtres passe-bande : Ils laissent passer une bande spécifique de fréquences tout en atténuant les harmoniques en dehors de cette bande.
- Filtres notch : Ils sont conçus pour cibler et atténuer des fréquences harmoniques spécifiques tout en laissant passer les autres fréquences sans altération.

### **II .5. 5.2.Filtres actifs**

Les filtres actifs font usage de dispositifs électroniques de puissance, tels que des thyristors ou des transistors bipolaires à grille isolée (IGBTs), ainsi que de systèmes de contrôle pour éliminer activement les harmoniques. Ils génèrent un courant compensatoire qui annule le courant harmonique, réduisant ainsi efficacement la distorsion harmonique. Ces filtres offrent une plus grande souplesse et adaptabilité par rapport aux filtres passifs, permettant un ciblage précis des harmoniques et une compensation dynamique selon les variations des conditions de charge.

### **II .5. 5.3.Filtres hybrides**

Les filtres hybrides combinent des techniques de filtrage passif et actif afin de 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. [34]

Ces filtres sont spécialement conçus pour atténuer une fréquence harmonique précise

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 convient de 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 la charge et le niveau d'atténuation harmonique requis. L'expertise en ingénierie et une analyse méticuleuse du profil harmonique sont essentielles pour déterminer la solution de filtrage la plus adaptée à une application spécifique

## II .5. 6. Théorie générale sur les harmoniques de la machine asynchrone à cage d'écureuil (MACÉ)

Le champ d'entrefer d'un moteur à induction alimenté par un courant sinusoïdal est riche en différentes harmoniques. L'analyse montre que ces harmoniques du flux d'entrefer sont dues aux interactions de la perméance de l'entrefer et des harmoniques de la force magnétomotrice (f.m.m.). (II.3) a été démontré que les harmoniques des encoches du rotor ("Harmoniques des Encoches du Rotor" (HER)) sont générées dans la ligne de courant du stator pour une machine saine à des fréquences données par

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

Nous remarquons que l'expression mathématique (II.4) du flux direct et (II.5) du flux indirect montre clairement que, en plus de la composante fondamentale, il existe également une série d'harmoniques appelées harmoniques des encoches du rotor d'ordre "h" et aux fréquences  $k = 1,2,3 \dots h = 1,3,5 \dots$  [35].

$$\Psi_{sd} = L_{sd}I_{sd} + \sum_{h \in G} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} N_r M_{srh} I_{rm} \cos(2\pi f_{sh}t \pm h\varphi_h - \gamma) \quad \text{II. 5}$$

$$\Psi_{sq} = L_{sc}I_{sq} + \sum_{h \in G} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} N_r M_{srh} I_{rm} \sin(2\pi f_{sh}t \pm h\varphi_h - \gamma) \quad \text{II. 6}$$

$I_{rm}$  : la valeur du courant de rotor maximal

Notez également que la dérivée de l'expression mathématique du flux direct du stator (II.7) montre qu'elle sera nulle sauf dans le cas où "h" appartient à l'ensemble "G". Dans ce cas seulement, les HER de l'ordre "h", qui appartiennent à l'ensemble "G", peuvent être détectées telles que [36]:

(II.7)

$$G = \left\{ \left( \left( \begin{array}{c} kN_r \\ \hline \pm 1 \\ p \end{array} \right)_{k=1,2,3,\dots} \right) \cap (6v \pm 1)_{v=1,2,3,\dots} \right\}$$

Cependant, dans la réalité, il est très difficile de trouver une source d'alimentation parfaitement équilibrée, voire impossible, ainsi qu'un enroulement bien centré et une géométrie idéalement symétrique. Un déséquilibre dans les tensions entraînera la création de courants de séquence négative (champ inverse) dans les enroulements du stator, ce qui engendrera d'autres fréquences harmoniques dans les enroulements du stator. Cela nous donne finalement des harmoniques non seulement multiples de 3 mais aussi impairs tels que :  $f_s$  ,  $3f_s$  ,  $5f_s$  ,  $9f_s$  , .... Nous obtenons des harmoniques tant pour un fonctionnement sain que défectueux comme indiqué dans (II.8) [35].

En général, nous avons deux séries d'harmoniques :

- 1- Une série d'harmoniques temporelles "Time harmonics" (TH) créées par la non-asymétrie de la f.m.m avec des fréquences caractéristiques ( $k = 0$ ) [37], [38]:
- 2- Une série d'harmoniques des encoches du rotor (RSH) avec des fréquences caractéristiques [35]:

$$f_{RSH}(h, k, s) = \left| \left( h \pm \frac{k \cdot N_r}{p} (1 - s) \right) f_s \right| \text{ or } S^\pm = (h f_s \pm k N f_r)$$

II. 8

avec  $h=1,3,5\dots$

Ainsi, nous pouvons généraliser notre étude, de la manière précédemment effectuée, sur le déséquilibre naturel de la fabrication du rotor qui révèle une série d'harmoniques "Harmoniques de Défaut de Barre de Rotor" (RBFH) qui ressemblent à celles du défaut théorique de rupture de barre de rotor. De plus, il existe également le défaut naturel, d'excentricité statique et celui dynamique, qui produit l'excentricité mixte. Cela entraîne également une série

d'harmoniques d'excentricité mixte "Harmoniques de Défaut d'Excentricité" (EFH) [37], [38].

- 3- Une série d'harmoniques de Défaut de Barre de Rotor (RBFH) avec des fréquences caractéristiques (II.9) [38]:

$$4- f_{RBFH}(h, k, s) = |(h \pm 2ks)f_s| \quad (II.9)$$

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

- 5- Une série d'harmoniques de Défaut d'Excentricité Mixte (EFH) de fréquences caractéristiques (II.10) [35]:

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

$f_r$ : is the rotor frequency

## II .5.7. Étude du courant statorique avec ses harmoniques

Nous allons concentrer notre étude sur les courants de phase, car ce travail est essentiellement basé sur l'analyse du spectre des harmoniques existantes. Ainsi, nous allons remplacer les harmoniques mentionnées ci-dessus (II.11) - (II.12) dans les expressions données par les courants instantanés circulant dans les trois phases "a", "b" et "c" de notre moteur asynchrone. Ces équations sont données par (II.11) [37], [39]:

$I^T_{THh}, I_s \square k, I_R \square k, I^E k$  sont, respectivement, le courant de phase d'alimentation maximum pour TH, RSH, RBFH et EFH (ampères) (voir Tableau II.1), et enfin,  $t$  : représente le temps réel (en secondes).

avec  $m = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$  et  $n = 1, 2, 3, 4$

$$\begin{aligned}
i_{sa} t_{\text{sain}} &= \sum_{h=1}^n \left[ I_{TH_h} \cos \left( 2\pi TH_h t \right) + I_{S_{h,k}}^{\pm} \cos \left( 2\pi S_h t \right) + \sum_{k=1}^m I_{R_{h,k}}^{\pm} \cos \left( 2\pi R_{h,k} t \right) \right] \\
i_{sa} t_{\text{défaut}} &= \sum_{h=1}^n \left[ I_{E_{h,k}}^{\pm} \cos \left( 2\pi E_{h,k} t \right) + I'_{TH_h} \cos \left( 2\pi TH_h t \right) + I'_{S_{h,k}}^{\pm} \cos \left( 2\pi S_h t \right) + \sum_{k=1}^m I'_{R_{h,k}}^{\pm} \cos \left( 2\pi R_{h,k} t \right) \right]
\end{aligned} \tag{II.10} \tag{II.11}$$

| Types d'harmoniques.                           | Leurs fréquences caractéristiques. | Leurs causes.                                                                                      |
|------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Harmoniques temporelles (TH)                   | $TH = hf_s$                        | Imposées par la source d'alimentation ou l'asymétrie de l'enroulement                              |
| Harmoniques des encoches du rotor (RSH)        | $S^{\pm} =  (hf_s \pm N_r f_r) $   | Causes : Structure du rotor (distribution discrète des barres du rotor dans les encoches du rotor) |
| Harmoniques de défaut de barre de rotor (RBFH) | $R^{\pm} =  (h \pm 2ks)f_s $       | Causes : Asymétrie du rotor de la cage du rotor                                                    |
| Harmoniques de défaut d'excentricité (EFH)     | $E^{\pm} =  (hf_s \pm kf_r) $      | Causes : En raison de l'excentricité mixte naturelle du rotor                                      |

Tableau II. 1 Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique [35]

## **II .6. Conclusion**

Ce chapitre a exploré en détail les différentes méthodes de diagnostic des défauts dans les machines asynchrones, ainsi que les techniques de gestion des harmoniques associées. En commençant par les méthodes internes de diagnostic, telles que la mesure de la température et des vibrations, nous avons mis en évidence l'importance de ces approches pour détecter les anomalies précoces et évaluer l'état de santé des machines. Nous avons ensuite examiné les diagnostics chimiques, magnétiques et électriques, mettant en lumière des techniques spécifiques telles que la mesure du flux magnétique axial de fuite et l'analyse des courants statoriques, qui offrent une compréhension approfondie des conditions de fonctionnement des machines.

En explorant également les techniques de traitement du signal telles que la FFT et la DWT, ainsi que les effets des harmoniques sur les systèmes électriques, ce chapitre a souligné les défis et les solutions associés à la maintenance et à la fiabilité des machines asynchrones. En mettant en évidence les différentes approches disponibles pour atténuer les harmoniques, telles que les filtres passifs, actifs et hybrides, ainsi que les théories générales sur les harmoniques spécifiquement liées aux machines asynchrones à cage d'écureuil, nous avons fourni un aperçu complet des stratégies de gestion harmonique. Ces connaissances constituent une base solide pour les ingénieurs électriques dans leur quête d'optimisation des performances et de la durabilité des systèmes électriques industriels.

# **Chapitre III**

## **Résultats expérimentaux**

### **III.Introduction**

Dans ce chapitre, nous examinons l'étude des harmoniques du courant rotorique, 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, notamment l'excentricité. Le but de cette analyse est d'examiner les phénomènes observés sur les performances du moteur.

#### **III.1.Diagnostic du courant statorique**

Cette méthode constitue un outil puissant pour détecter la présence de défauts mécaniques et électriques. Elle offre plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes, car elle n'exige ni l'introduction de capteurs au sein de la machine ni l'utilisation d'équipements coûteux et encombrants. En effet, un simple capteur de courant, tel qu'une sonde à effet Hall ou un transformateur de courant, suffit pour obtenir une représentation du courant de phase statorique .

Cette méthode de diagnostic sera employée dans ce travail pour identifier différents défauts. Elle repose sur la comparaison entre le spectre du courant statorique sain et celui du courant rotorique défectueux. De nouvelles composantes de fréquence apparaissent lorsque le moteur présente un défaut.

La technique d'analyse spectrale du courant rotorique (MCSA) est l'une des méthodes les plus précises pour diagnostiquer divers défauts dans un moteur électrique. Elle permet de détecter et d'analyser avec précision les anomalies présentes, assurant ainsi une meilleure maintenance et une optimisation des performances du moteur.

## **Expérience rotorique excentrice**

### **III. 2 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 logicielle nommée **PASCO Capstone**.

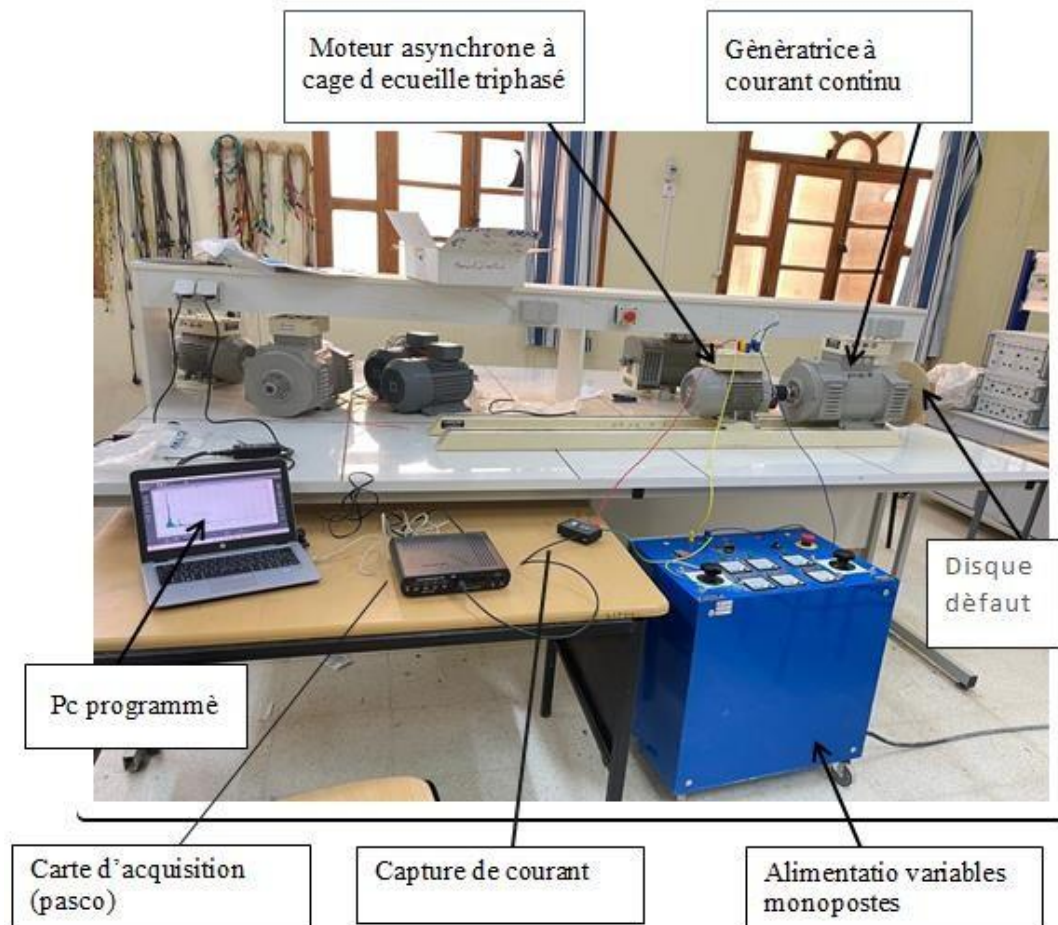


Figure (III.1): Diagramme en bloc du principe de la méthode du spectre de courant du stator utilisé pour avoir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté de technologie (Université d'El Oued)

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

**Moteur asynchrone à cage d'écaille triphasé** : Ce moteur servait de dispositif principal sous investigation portant les caractéristiques suivantes :  $\Delta$  ;  $V=230\text{ v}$   $P=1.5\text{kw}$ ,  $F= 50\text{hz}$ ,  $A$   $I= 11.2\text{c} /5.9\text{A}$  et  $N=1426\text{ tr/min}$ .

**Génératrice à courant continu** : caractéristiques suivantes : L'induit  $255 /6\text{A}$  – L'inducteur  $94 /0.48\text{A}$ , Puissance  $P=1500\text{ w}$ ,  $V = 1500\text{ tr /min}$

**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.

**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.

**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 ,.....

**Alimentations variables monopostes:** Les alimentations variables monopostes sont des dispositifs qui fournissent une tension et un courant ajustables à un seul point de sortie, permettant de tester et de développer des appareils électroniques en modifiant précisément ces paramètres selon les besoins.

**Disque défaut:** C'est un défaut d'un disque qui entrave le mouvement de rotation du centre. The experiment was conducted in two stages, one with a healthy engine and the other with a faulty one. A comprehensive test was performed to ensure the accuracy and reliability of the experimental results. The purpose of this experiment was to confirm the validity of the results and to minimize any errors that could occur during the information extraction process. The experiment aimed to determine the most effective optimal time through experimentation. By analyzing the harmonics present in the electrical signals obtained from the engines, we sought to discover the most sensitive time compatibility.

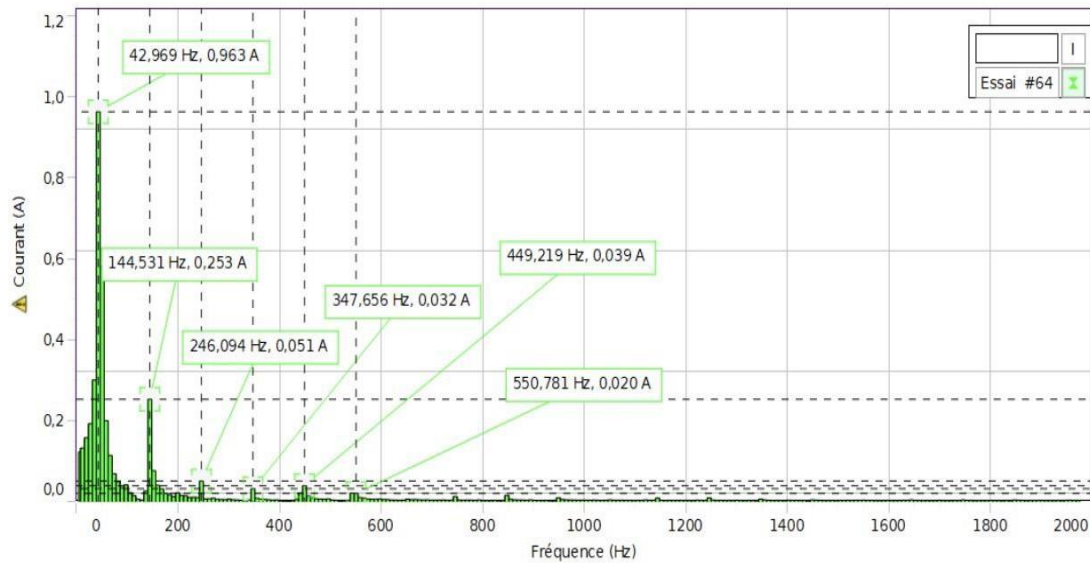
Les résultats obtenus étaient les suivants

### **III .3 Régime sain**

Nous avons mené une expérience pour confirmer et comparer les résultats au cours de l'expérience. Les résultats dans le cas d'un moteur sain sont les suivants

**La figure III .2.** La représentation spectrale du courant statorique en régime sain montre l'évolution du courant électrique en fonction de la fréquence. On observe une diminution significative des trois premières valeurs d'amplitude, tandis que les autres valeurs ont légèrement diminué.

**Tableau III .1.** Représente la capacité de compatibilité différente du courant constant acoustique du moteur. Ce tableau montre les résultats de l'expérience



**Figure (III.2): Spectre du courant statorique régime sain**

**Tableau (III.1): Amplitudes des 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> |
|--------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Fréquences TH <sub>h</sub> = f <sub>s</sub> (Hz) | 50              | 150             | 250             | 350             | 450             | 550              |
| Courant(A)                                       | 0,963           | 0,253           | 0.051           | 0.032           | 0,039           | 0,020            |

TH<sub>1</sub> : Le premier test a le meilleur rendement dans l'expérience.

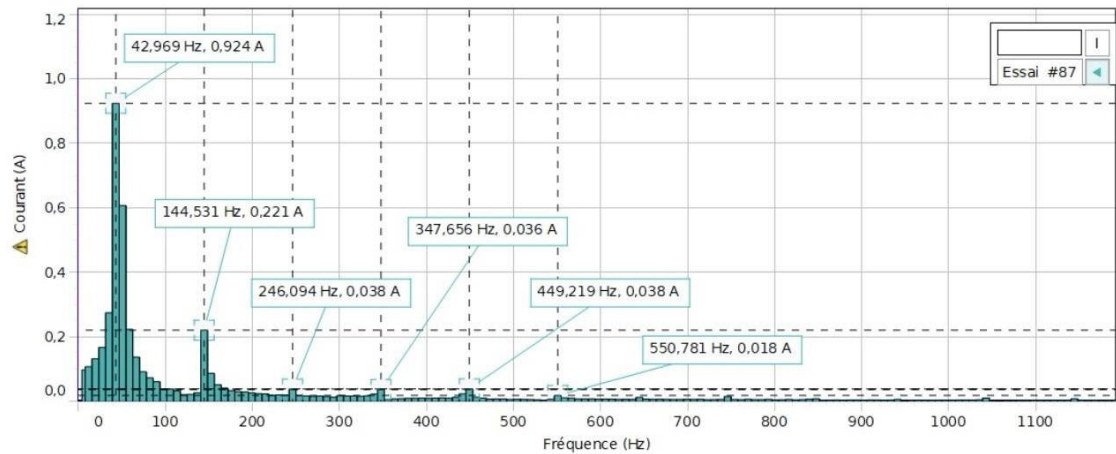
### III . 3.2 Régime avec défaut

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

La figure III . 3 montre le spectre de fréquence du courant en cas de moteur défectueux. Les résultats montrent les pics suivants :

On peut voir que le pic le plus élevé est à une fréquence de 42,969 Hz avec un courant de 0,924 et descend à la valeur la plus basse de 0,018

Tableau III .2 représente la capacité harmonique des différents courants du rotor défectueux du moteur. Il montre les résultats de la variation des valeurs actuelles.



**Figure (III. 3): Spectre du courant statorique régime de défaut**

**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> |
|--------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Fréquences TH <sub>h</sub> = f <sub>s</sub> (Hz) | 50              | 150             | 250             | 350             | 450             | 550              |
| Amplitudes TH                                    | 0.924           | 0,221           | 0,038           | 0,036           | 0,0038          | 0,018            |

### Remarque

Nous remarquons que les harmoniques différents dans les différentes rangées montrent une capacité variable pendant le test. Parfois, la capacité de ces harmoniques augmente par rapport au système sain à faible charge, tandis que d'autres fois, il n'y a pas de différence significative ou même une diminution de la capacité.

Augmentation de l'ordre harmonique.

### III . 3.3. 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 figure et tableau

(III.1)

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

$S_r$  : Sensibilité relative.

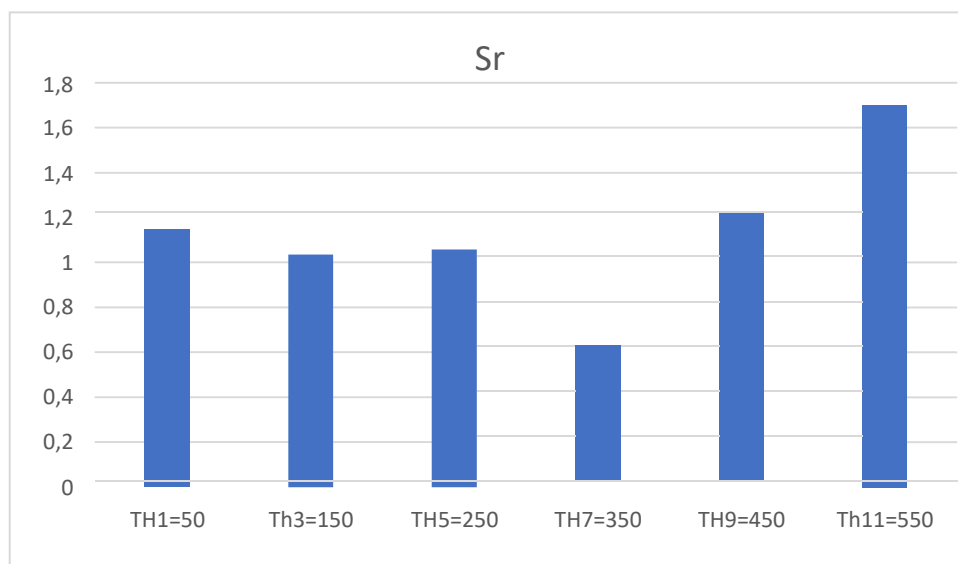
$A_{TH_d}$ : Amplitude du courant statorique en régime de défaut .

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

**Tableau III. 3 : Sensibilité relative à la compatibilité du temps du moteur avec le défaut de déviation**

| 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> |
|-----------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Fréquences<br>TH <sub>h</sub> = f <sub>s</sub> (Hz) | 50              | 150             | 250             | 350             | 450             | 550              |
| Sensibilité relative                                | 1.146           | 1.035           | 1.058           | 0.625           | 1.179           | 1.7              |

**Figure (III. 4): Sensibilité relative excentricité**



### - Discussion des résultats

Nous observons que les sensibilités varient selon les différents niveaux au cours de l'expérience. Elles diminuent progressivement de TH1 jusqu'à atteindre leur minimum en TH7, puis augmentent de nouveau à partir de TH9 jusqu'à atteindre leur maximum en TH11.

### III . 3.4.Sensibilité relative des différents charges ou tests pour chaque rang d'harmonique:

D'après les figures précédentes, l'évolution de la sensibilité en fonction des valeurs de charge est visible. Nous avons examiné chaque ordre harmonique de la sensibilité relative au cours de l'expérience. Nous avons constaté que l'harmonique de rang 11 peut être le plus sensible

## Expérience rotorique 3 barrs casse

### III.4. 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**.

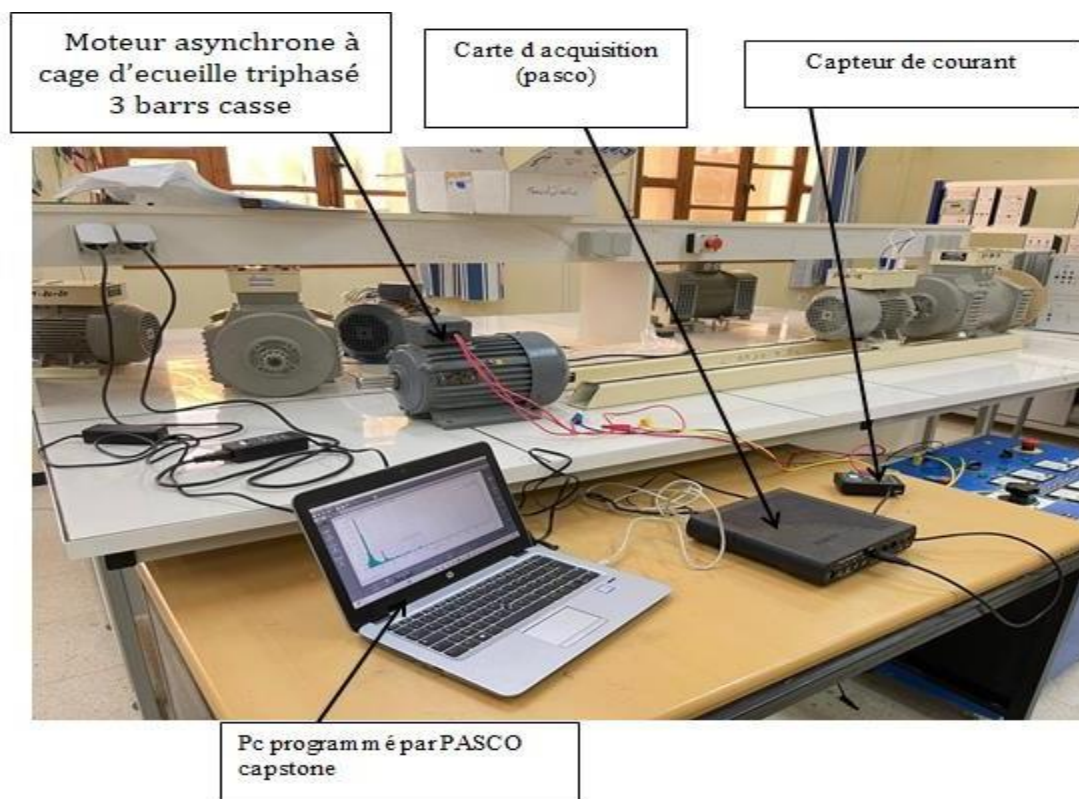


Figure III. 5: Diagramme en bloc du principe de la méthode du spectre de courant du stator utilisé pour avoir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté de technologie (Université d'El Oued).

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

**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.

**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

**Moteur asynchrone à cage d'ecueille triphasé 3 bare casse** : Ce moteur servait de dispositif principal sous investigation portant 3 bare casse 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  $N=2890\text{ tr/min}$ .

**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 sensibl

Les résultats obtenus étaient les suivants:

### III .4.1.Régime sain.

Nous avons mené expérience pour confirmer et comparer le résultats pendant l'expérience.

Les résultats dans le cas d'une moteur sain sont les suivants:

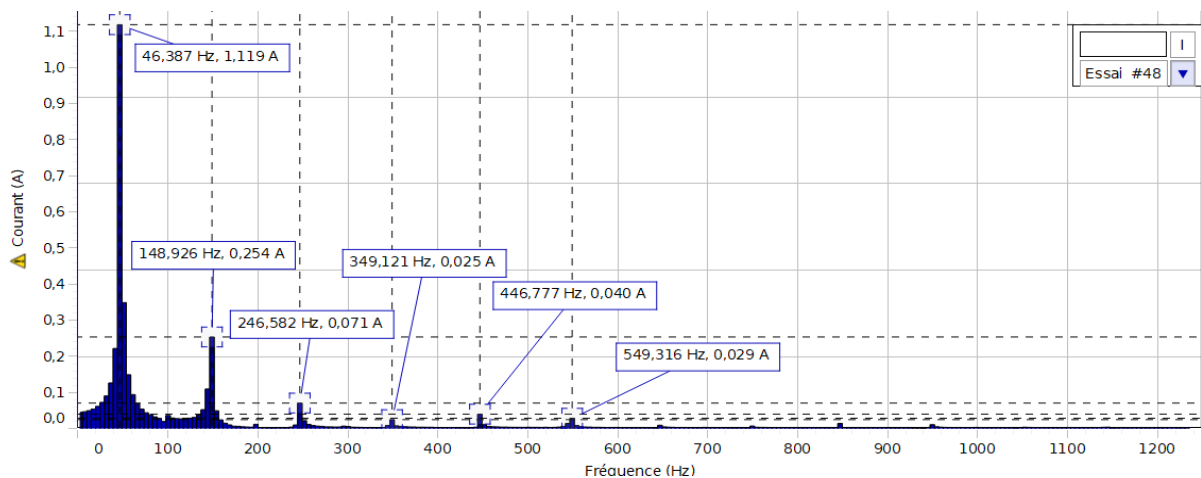


Figure III. 6 : Sain 3 barrs casse

**Figure III .6** montre le spectre de fréquences du courant dans le cas d'un moteur en bon état. Les résultats montrent les pics suivants :

On peut observer que le pic le plus élevé est à une fréquence de 46.387 Hz avec un courant de 1.119 A.

**Tableau III .4 .Sain 3 barrs casse**

| 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> |
|-----------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Fréquences<br>TH <sub>h</sub> = f <sub>s</sub> (Hz) | 50              | 150             | 250             | 350             | 450             | 550              |
| TH                                                  | 1,119           | 0,254           | 0,071           | 0,025           | 0,040           | 0,029            |

### Analyse

[1] Le graphique montre le spectre de fréquences du courant (Courant) dans le système électrique à différentes fréquences (Fréquence). Des pics spécifiques sont identifiés à des fréquences précises avec les courants correspondants, comme suit:

[2] À une fréquence de 46.387 Hz, le courant est de 1.119 A

[3] À une fréquence de 148.926 Hz, le courant est de 0.254 A.

[4] À une fréquence de 246.582 Hz, le courant est de 0.071 A.

[5] À une fréquence de 349.121 Hz, le courant est de 0.025 A.

[6] À une fréquence de 446.777 Hz, le courant est de 0.040 A.

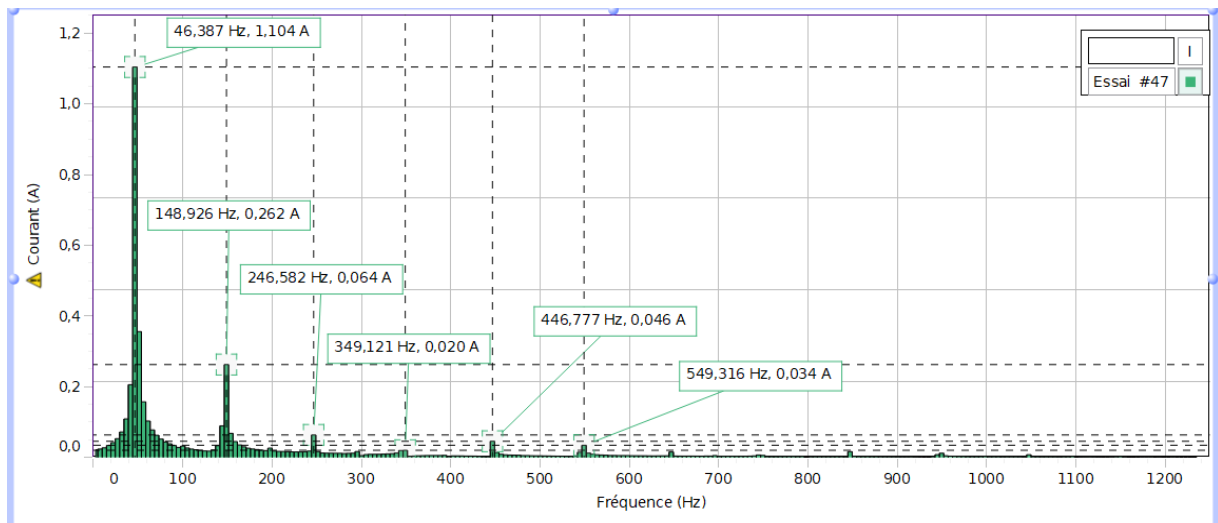
[7] À une fréquence de 549.316 Hz, le courant est de 0.029 A.

[8] On peut observer que le pic le plus élevé est à une fréquence de 46.387 Hz avec un courant de 1.119 A, ce qui suggère que ces fréquences pourraient être liées à la fréquence de fonctionnement principale ou à des harmoniques importantes dans le système. Les autres fréquences et les pics plus petits indiquent la présence d'harmoniques ou de signaux latéraux moins influents.

### III.4.2. Régime avec défaut

Nous avons mené des expériences sur une machine défectueuse pour confirmer et comparer

les résultats. Les résultats pour un moteur défectueux sont les suivants:



**Figure III .7. Defaut rotorique 3 barrs casse**

La figure III. 7 montre le spectre de fréquences du courant dans le cas d'un moteur défectueux. Les résultats montrent les pics suivants :

On peut observer que le pic le plus élevé est à une fréquence de 46.387 Hz avec un courant de 1.104 A.

Tableau III . 5. Les résultats sont enregistrés dans le tableau représente la Amplitudes des différentes harmoniques du courant statorique sain du moteur. Ce tableau montre les résultats des différentes

| 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> |
|-----------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Fréquences<br>TH <sub>h</sub> = f <sub>s</sub> (Hz) | 50              | 150             | 250             | 350             | 450             | 550              |
| Amplitudes(TH)                                      | 1,104           | 0,262           | 0,064           | 0,020           | 0,046           | 0,034            |

### Remarque

Nous observons que les harmoniques dans les différentes rangées présentent une capacité variable au cours du test. Parfois, la capacité de ces harmoniques augmente par rapport à celle du système sain sous faible charge. D'autres fois, il n'y a pas de différence significative ou même une diminution de la capacité.

Augmentation de l'ordre harmoniqu

### III .4.3.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.2)

$$S_r = \frac{A_{THd}}{A_{THs}} \quad (III.2)$$

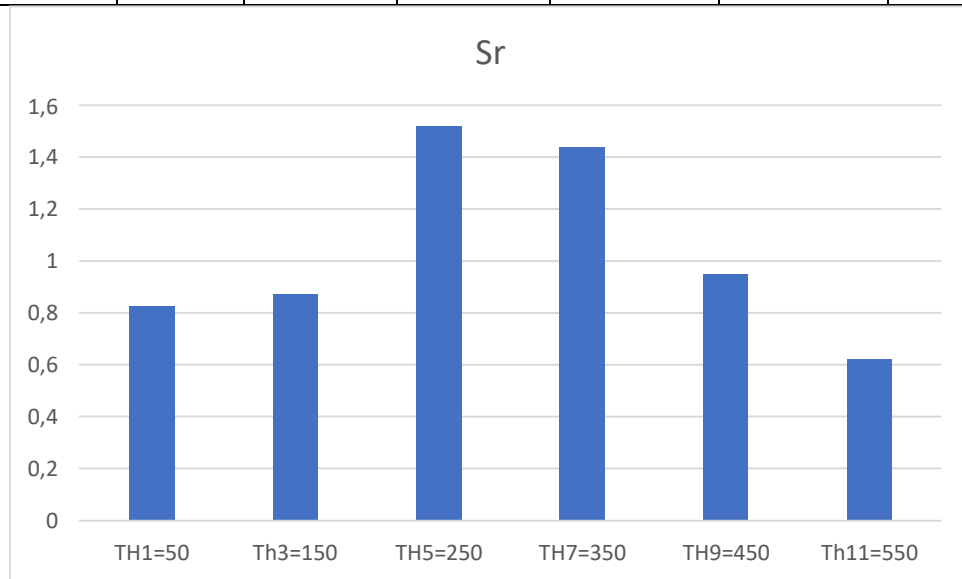
$S_r$  : Sensibilité relative.

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

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

**Tableau III. 6 . Sensibilité relative des defaut rotoique 3 barre casse**

| 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> |
|--------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Fréquences TH <sub>h</sub> = f <sub>s</sub> (Hz) | 50              | 150             | 250             | 350             | 450             | 550              |
| Amplitudes(Sr)                                   | 0.825           | 0,870           | 1.52            | 1.44            | 0.95            | 0,62             |
|                                                  |                 |                 |                 |                 |                 |                  |



**Figure III. 8 .Sensibilité relative. des defaut rotoique 3 barre casse**

#### Discussion des résultats

**Figure III.9:** sensibilité moyenne des différentes harmoniques de temps du moteur avec défaut d' excentricité

### 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.7 et comparer graphiquement, comme dans les figures III.9 (III.3)

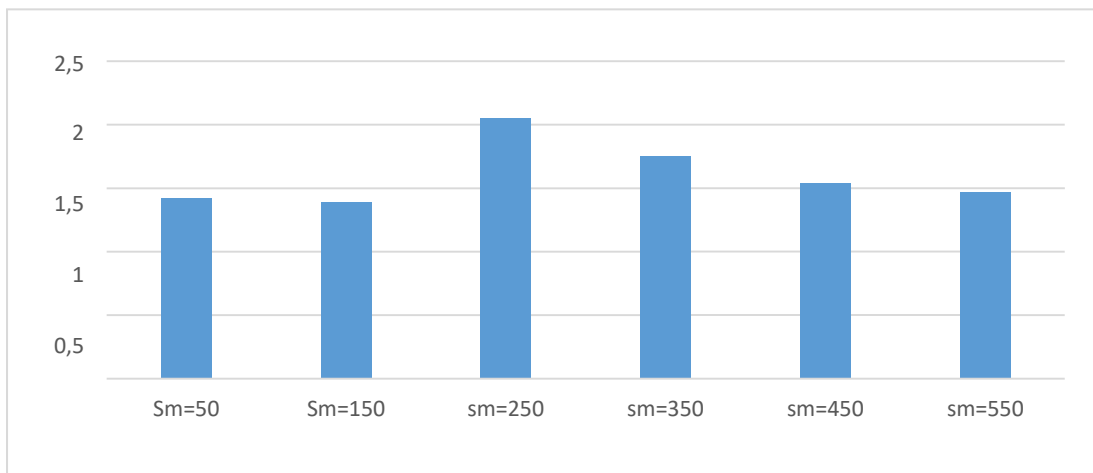
(III.3)

$$S_{moy} = \frac{TH_{dbc} + TH_{dex}}{2}$$

$S_{moy}$  : sensibilité moyenne

**Tableau III.7. :sensibilité moyenne des différentes harmoniques de temps du moteur avec défauts d' excentricité et 3 barre casse Dans le changement de fréquence**

| 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> |
|--------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Fréquences TH <sub>h</sub> = f <sub>s</sub> (Hz) | 50              | 150             | 250             | 350             | 450             | 550              |
| $S_{moy}$                                        | 1,423           | 1,3875          | 2,049           | 1,7525          | 1,5395          | 1,47             |



**Figure III. 9 . sensibilité moyenne des différentes harmoniques de temps du moteur avec défauts d' excentricité et 3 barre casse Dans le changement de fréquence**

## **Discussion des résultats**

Dans plusieurs expériences antérieures, l'analyse de l'amplitude moyenne du courant, comme illustré dans le tableau III, montre que l'harmonique temporelle TH5 se distingue par sa sensibilité supérieure par rapport aux autres harmoniques. Cette observation suggère que TH5 pourrait être crucial pour détecter les variations et les défauts du courant rotorique dans les machines à induction. En raison de sa sensibilité accrue, TH5 est un candidat prometteur pour développer des méthodes de diagnostic avancées, améliorant ainsi la surveillance et la maintenance préventive des machines électriques.

## **III .6.Conclusion**

En résumé, notre étude a consisté en une analyse approfondie des résultats expérimentaux obtenus à partir de divers tests et conditions de fonctionnement du moteur à induction. Nous avons examiné individuellement chaque harmonique temporelle, 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 temporelle de rang 5 (TH5) présente la sensibilité la plus élevée parmi toutes les harmoniques examinées. Cette observation suggère que l'harmonique TH5 pourrait servir efficacement d'indicateur 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 TH5 offre une réponse distinctive aux défauts d'excentricité, ce qui en fait un outil précieux pour la surveillance et le diagnostic des moteurs électriques.

En conclusion, notre étude met en évidence l'importance de l'harmonique temporelle TH5 comme indicateur sensible des 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 approfondi l'importance essentielle de la détection et de la caractérisation des défauts d'excentricité dans les machines asynchrones. Les défauts d'excentricité, tels que les désalignements entre le rotor et le stator, sont des problèmes majeurs dans ces machines, pouvant causer des vibrations excessives, une usure prématurée des paliers, des surchauffes et des défaillances mécaniques graves. Pour aborder ce problème, il est crucial 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 exploré diverses techniques de diagnostic, en mettant en avant l'efficacité de l'analyse du courant statorique par FFT, des méthodes d'ondelettes et des harmoniques temporelles pour détecter les défauts d'excentricité. Notamment, il a été constaté que l'harmonique temporelle  $TH5=2.049$  présente la plus grande sensibilité pour détecter ces défauts, offrant ainsi une nouvelle perspective pour améliorer les méthodes de diagnostic.

Les résultats expérimentaux ont confirmé que l'harmonique  $TH5=2.049$  est un indicateur sensible et fiable pour la détection des 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 assurer la fiabilité opérationnelle et la durabilité des machines asynchrones dans des environnements industriels exigeants.

En conclusion, cette étude souligne l'importance cruciale 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.

## Référence

- [1]. Benbouzid, M. E. H. (2000). A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *\*IEEE Transactions on Industrial Electronics\**, 47(5), 984-993
- [2].. Thomson, W. T., & Fenger, M. (2001). Current signature analysis to detect induction motor faults. *\*IEEE Industry Applications Magazine\**, 7(4), 26-34.
- [3].. Bellini, A., Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C., & Kliman, G. B. (2008). Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis. *\*IEEE Transactions on Industry Applications\**, 38(5), 1312-1321.
- [4].. Nandi, S., Toliyat, H. A., & Li, X. (2005). Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review. *\*IEEE Transactions on Energy Conversion\**, 20(4), 719-729.
- [5].. de Moraes Villela Neto, J., & da Silva, A. M. (2010). Artificial intelligence applied to the diagnosis of faults in electric motors. *\*Engineering Applications of Artificial Intelligence\**, 23(1), 74-83.
- [6].. Kliman, G. B., & Stein, J. (2004). Methods of motor current signature analysis. *\*Electric Machines & Power Systems\**, 20(5), 463-474.
- [7].. El Hachemi Benbouzid, M., & Vieira, M. (2003). A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *\*IEEE Transactions on Industry Applications\**, 38(2), 452-459.
- [8].. Schoen, R. R., Habetler, T. G., Kamran, F., & Bartfield, R. D. (1995). Motor bearing damage. detection using stator current monitoring. *\*IEEE Transactions on Industry Applications\**, 31(6), 1274-1279.
- [9] Didier G " Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances " Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.
- [10] O  
ndel O "Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone" Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006.
- [11] :  
Mabrouk Abd Elhamid « Contribution Au Diagnostic De La Machine Asynchrone En Présence De Variation De Charge » Thèse de doctorat, Doctorat en Science En Electrotechnique Université Mohamed Khider – Biskra Soutenue publiquement le 25 / 05 /2017
- [12] :  
MOHAMED EL KAMEL OUMAAR« Surveillance et diagnostic des défauts rotorique et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée », thèse de doctorat, Université de Lorraine, Mars 2012
- [13] :  
HAKIMA CHERIF « Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes », Mémoire de Magistère, Université de Biskra, sep 2014.

- [14] Y  
. Laamari, "Diagnostic des défaillances dans les systèmes électromécaniques" Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016.
- [15] B  
.Yacine ,B.Samir, "Diagnostic des machines électriques par la méthode des éléments finis" Thèse de master, Université Mohamed Boudiaf –M'sila , 2018.
- [16] H  
.MOUFIDA, «Modélisation Des Défaillances Et Leur Diagnostic Par La Méthode De Reconnaissance Des Formes Floue» Thèse De Magister », universitéBadji Mokhtar-Annaba, 2013.
- [17] K  
HATRAOUI ABDERREZAK, ZAID MANSOUR «Diagnostic Des Machines Asynchrones Triphasées», Thèse de MASTER ACADEMIQUE , UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar D'El-oued soutenu en Mai 2017.
- [18] GHOGGAL ADEL « dagnostic de la machine Asynchrone triphase :dédié à la détection des défauts »Thèse de Magister , Université de Batna , Soutenue 2005.
- [19] KHATIR ABDEL FATAH «Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts»Thèse de Magister , Université ferhatabbas –setif UFAS(Algérie) , Soutenue 11 / 04 / 2009.
- [20] G.DIDIER «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances » Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré ,Nancy I,2004.
- BENHAMED ABDELGHANI,BRIK ABDESSATTAR «Diagnostic des défauts rotoriques du moteur asynchrone triphasé par l'utilisation du modèle multi- enroulements», Mémoire de Fin d'Études En vue de l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hamma Lakhdar D'El-oued ,soutenu en Mai 2017.
- [21] E.SCHAEFFER «diagnostic des machines asynchrones :modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défaut » Thèse de doctorat.Université de Nantes 1999.
- [22] MOHAMED EL KAMEL OUMAAMAR «surveillance et diagnostic des défaut 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.
- [23] TIDJANI ABD EL JAOUAD, AI AMOUDI BADREDDINE «Identification paramétrique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil par la technique «optimisation d'essaim de particules»» Mémoire Master Académique université kasdimerbah ouargla Soutenu publiquement Le :02/06/2016.
- [24] BELHAMDI SAAD « Prise en Compte D'un Défaut Rotorique Dans la Commande d'un

Moteur Asynchrone »Thèse de Magister , Université MohamedKhider Biskra, Soutenue 2005.

[25] BELHAMDI SAAD «Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande», Thèse présentée en vue del’obtention Du diplôme de Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider – Biskra, Soutenue publiquement le 08/05/2014.

[26] M. ETIENNE FOURNIER «protocole de diagnostic des entrainements asynchrones par références: application a la détection des déséquilibres mécaniques etdes défauts de courroie», these doctorat de l'université de Toulouse jeudi 26 novembre2015.

[27] BENNEDJAI SOUMAYA «Contribution à l’amélioration de la sûreté d’exploitation des moteurs à induction», Thèse Présentée en vue de l’obtention dudiplôme de : Doctorat universite badji mokhtar annaba, Année : 2015/2016

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

[29] : RIDHA ZAITER « Commande directe du couple DTC d'une machine asynchrone avec défaut », Mémoire de Magister, Université de Biskra juin 2013.

[30]. G. Didier, "Modélisation et diagnostic de la MAS en présence de défaillance" Thèse de doctorat, 2004, Université D’Henri Poincaré, Nancy-I, France.

[31]. S. Emmanuel, "Diagnostic des MAS : Modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts ",Thèse de doctorat,1999,Ecole central de Nantes France

[32]. M. Sahraoui " Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage"Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie, 2003.

[33] S. BOURDIM, « Méthodes ondelettes et Bayésiennes pour le diagnostic: Application aux machines asynchrones », Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS-Setif UFAS (ALGERIE), 2011.

[34] T.Gauroud. « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des reseaux de distribution d’énergie électrique». Thèse de doctorat de l'université de Nantes, janvier 1997

[35] S. Karimi, « continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage ‘FPGA in the loop’ : application au filtre actif parallèle. Thèse de doctorat, Université Henri Poicaé, Nancy-I.

[36] N.K.Nguyen, « Approche neuromimétique pour l’identification et la commande des systèmesélectriques : application au filtrage actif et aux actionneurs synchrones. Thèse de doctorat,

Université de Haute-Alsace, 2010. »

[37] R.P.Bouichard, G.Olivier , « Électrotechnique : deuxième édition » ; AGMV Marquis Quebec, Canada, 2001

[38] aïcha abed, docteur de l'université henri poincaré, nancy-i en génie électrique contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone.

[39] a. h. bonnett and c. yung, "increased efficiency versus increased reliability," industry applications magazine, ieee, vol. 14, pp. 29-36, 2008.

[40] saidji rebiha, abdellouad samia, « l'impact des défauts de l'onduleur triphasé sur le diagnostic du moteur asynchrone », mémoire de master, université des sciences et de la technologie d'oran mohamed boudiaf, algérie, juin 2017.

[41] -vaseghi babak, «contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre spires». thèse de doctorat, l'institut national polytechnique lorraine 3 décembre 2009.

[42] :sahoui mohamed & benachour ouassim .modélisation et diagnostic de la cassure des barres rotoriques d'une machine asynchrone.2018.

[43] 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 2002.

[44]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.

[45]- SACI FawziModèles multi enroulements de la MAS dédiés au DiagnosticCMémoirePrésenteeenvue del'obtention du diplôme deMaster enElectrotechnique2014