

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



## **Mémoire de Fin d'Études**

Présenté à

**L'Université d'Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued**

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

## **MASTER ACADEMIQUE**

En machines Electriques

Présenté par

**Allali Bachir Bey, Gori Ahmed Yacine, Lorbi Lakhdar**

# **Thème**

**Techniques avancées pour le diagnostic des machines électriques**

Soutenu le ../09/2020. Devant le jury composé de :

|                     |                         |            |
|---------------------|-------------------------|------------|
| Dr. ....            | Maitre de conférences A | Président  |
| Dr Allal Abderrahim | Maitre de conférences A | Rapporteur |
| Dr. ....            | Maitre de conférences B | Examineur  |

**Année Universitaire 2019/2020**



## **REMERCEMENT**

*Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département  
D'électrotechnique de l'université Hamma Lakhdar El oued .*

*Nos premiers remerciements à Dieu Tout-Puissant pour sa volonté, Sa  
santé et sa patience. Vous nous avez donné toutes ces longues années.*

*Par conséquent, nous tenons à remercier chaleureusement*

*Monsieur **Dr. Allal AbdeRRahim***

*Pour le suivi continu tout au long de la célébration de l'achèvement de ce  
travail, qui n'a cessé de nous donner ses conseils et ses Observations.*

*Nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui ont aidé et  
produit ce résumé, ainsi que tous ceux qui nous ont beaucoup et  
Grandement aidé à accomplir ce travail.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à tous nos amis et à  
L'université pour avoir soutenu pendant notre travail .*

## *DEDICACE*

*Nous dédions ce travail à:*

*Pour nos mères,*

*Pour nos parents,*

*Pour nos frères*

*Et à tous nos amis*

*El bey , yacine et lakhdar*

## الملخص

نظرا للاستعمال الكثير للآلات اللامتزامنة خاصة منها ذات القفص السنجابي حاولنا في هذه الدراسة معرفة طرق تشخيص هذه الأخيرة حتى نصل الى التشخيص الدقيق للآلة وذلك بالمقارنة بين طرق التشخيص المتقدمة التي تسرع من عملية الكشف عن الأعطاب و قصد تطوير التشخيص الانني للآلة.

## *Résumé*

En raison de l'utilisation fréquente des machines asynchrones, en particulier celles à cage d'écureuil, nous avons essayé dans cette étude de connaître la méthode de diagnostic la plus précise de la machine en faisant une étude comparative entre des méthodes de diagnostic avancées qui accélèrent le processus de détection précoce des défauts afin de faire avancer le diagnostic en temps réel de la machine.

## *Abstract*

Due to the frequent use of asynchronous machines, especially those with squirrel cage, in this study we have tried to know the most accurate diagnostic method of the machine by making a comparative study between advanced diagnostic methods which speed up the process of early fault detection to advance real-time machine diagnostic.

## *Liste de figures*

| <b>Figures</b>                                                                                                                                               | <b>Page</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>fig. I.1.</b> Distribution des défauts dans les différentes parties des moteurs asynchrones                                                               | <b>5</b>    |
| <b>fig. I.2.</b> Vue en éclaté de la machine asynchrone                                                                                                      | <b>5</b>    |
| <b>fig. I.3.</b> Stator d'une machine asynchrone                                                                                                             | <b>6</b>    |
| <b>fig. I.4.</b> Rotor bobiné                                                                                                                                | <b>7</b>    |
| <b>fig. I.5.</b> Rotor à cage d'écureuil                                                                                                                     | <b>8</b>    |
| <b>fig. I.6.</b> Rotor massif lisse                                                                                                                          | <b>8</b>    |
| <b>fig. I.7.</b> Proportion des défauts 1988                                                                                                                 | <b>10</b>   |
| <b>fig. I.8.</b> Pourcentage des défauts1995                                                                                                                 | <b>10</b>   |
| <b>fig. I.9.</b> Pourcentage des défauts 2008                                                                                                                | <b>11</b>   |
| <b>fig. I.10.</b> Rupture de barre                                                                                                                           | <b>13</b>   |
| <b>fig. I.11.</b> .Défauts du rotor à cage : rupture d'anneau de court-circuit.                                                                              | <b>14</b>   |
| <b>fig. I.12.</b> Représentation de l'excentricité statique, dynamique, et mixte.                                                                            | <b>15</b>   |
| <b>fig. I.13.</b> Dommages typiques de l'isolation conduisant à un court-circuit entre spires du stator enroulements dans les moteurs asynchrones triphasés. | <b>18</b>   |
| <b>fig. I.14.</b> Déférentes défaillances des roulements à billes                                                                                            | <b>20</b>   |
| <b>fig. II.1.</b> Les déférents points de mesure                                                                                                             | <b>26</b>   |
| <b>fig. II.2.</b> Capteur de température dans une plaque à bornes                                                                                            | <b>28</b>   |
| <b>fig. II.3.</b> Image colorée infrarouge thermique                                                                                                         | <b>28</b>   |
| <b>fig. II.4.</b> Diagnostic des défauts du stator dans le moteur à induction avec l'utilisation de différentes approches                                    | <b>38</b>   |
| <b>fig .III.1.</b> Spectre logarithmique expérimental du MCSA d'un moteur a deux barres cassées à faible charge                                              | <b>42</b>   |

|                                                                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>fig .III.2.</b> Spectre logarithmique expérimental du MCSA<br>d'un moteur a deux barres cassées à pleine charge.                               | <b>42</b> |
| <b>fig .III.3.</b> Spectre logarithmique expérimental de MSCSA<br>d'un moteur a deux barres cassées à faible charge.                              | <b>43</b> |
| <b>fig .III.4.</b> Spectre logarithmique expérimental de MSCSA<br>d'un moteur a deux barres cassées à pleine charge.                              | <b>45</b> |
| <b>fig .III.5.</b> Spectre logarithmique expérimental de PVPA<br>d'un moteur a deux barres cassées à faible charge.                               | <b>46</b> |
| <b>fig .III.6.</b> Spectre logarithmique expérimental de PVPA<br>d'un moteur a deux barres cassées à pleine charge.                               | <b>46</b> |
| <b>fig.III.7.</b> Spectre logarithmique expérimental de $PVSM_{P-H}$<br>d'un moteur a deux barres cassées à faible charge.                        | <b>47</b> |
| <b>fig.III.8.</b> Spectre logarithmique expérimental de $PVSM_{P-H}$<br>d'un moteur a deux barres cassées à plein le charge.                      | <b>48</b> |
| <b>fig.III.9.</b> Spectre logarithmique expérimental de HPVPA<br>d'un moteur a deux barres cassées à faible charge.                               | <b>49</b> |
| <b>fig.III.10.</b> Spectre logarithmique expérimental de HPVPA<br>d'un moteur a deux barres cassées à pleine charge.                              | <b>49</b> |
| <b>fig .III.11.</b> Courbes de sensibilité des différentes techniques avancées<br>de diagnostic pour deux barre cassée (Résultats de simulation). | <b>51</b> |

## *Liste des Tableaux*

| <b>Tableaux</b>                                                                                                        | <b>Page</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Tableau .II.1.</b> Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique                            | <b>32</b>   |
| <b>Tableau .III.1.</b> Fréquences caractéristiques des défauts                                                         | <b>42</b>   |
| <b>Tableau .III.2.</b> Classement des techniques de diagnostic d'après leurs sensibilités expérimentales Moteur (3 kW) | <b>51</b>   |



## *Liste des symboles*

|                                         |                                                             |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| kW                                      | Kilowatt                                                    |
| MW                                      | Mégawatt                                                    |
| k                                       | un entier positif                                           |
| $g$                                     | Glissement                                                  |
| $N_r$                                   | Nombre de barres rotoriques                                 |
| $p$                                     | Nombre de paires de pôles                                   |
| $f_s$                                   | Fréquence d'alimentation                                    |
| $v$                                     | Entier positif                                              |
| $i_{sa}(t)$ , $i_{sb}(t)$ , $i_{sc}(t)$ | Courant statorique de phase                                 |
| $i_{ds}$ et $i_{qs}$                    | Courant statorique biphasées                                |
| $h$                                     | Ordre harmonique temporel                                   |
| $f_r$                                   | Vitesse mécanique du rotor                                  |
| $i_{dP-H}$ , $i_{qP-H}$                 | Courant statorique biphasées Park-Hilbert                   |
| $\omega_s$                              | Vitesse de rotation                                         |
| $S_{\pm}$                               | (RSH)                                                       |
| $R_{\pm}$                               | (RBFH)                                                      |
| $E_{\pm}$                               | (EFH)                                                       |
| Fe                                      | Fréquence d'échantillonnage                                 |
| $T_a$                                   | Durée d'acquisition                                         |
| $\Delta f$                              | Résolution de fréquence                                     |
| Hz                                      | Hertz                                                       |
| <b>a</b>                                | Signature dont l'amplitude est la plus grande (avec + ou -) |
| $f_{cbr}$                               | Fréquence de cassure de barre rotorique                     |
| dB                                      | Amplitude de cassure de barre rotorique                     |
| $V_n$                                   | Tension nominale                                            |
| $I_n$                                   | Courant nominale                                            |
| $\omega_n$                              | Vitesse nominale                                            |

## *Liste des abréviations*

|                     |                                               |
|---------------------|-----------------------------------------------|
| MAS                 | Machine Asynchrone                            |
| FDI                 | ( Fault Détection and Isolation )             |
| MCSA                | ( Motor Current Signature Analysis )          |
| MMF                 | Force magnéto motive                          |
| TH                  | ( Time Harmonics )                            |
| RSH                 | ( Rotor Slot Harmonics )                      |
| RBFH                | ( Rotor Bar Fault Harmonics )                 |
| EFH                 | ( Eccentricity Fault Harmonics )              |
| FFT                 | ( Fast Fourier Transformation )               |
| HPVPA               | ( Hilbert Park's Vector Product Approach )    |
| MSCSA               | ( Motor square current signature analysis )   |
| PVSM                | ( Park's vector square modulus )              |
| PVSM <sub>P-H</sub> | ( Park–Hilbert Park's vector square modulus ) |
| PVPA                | ( Park's Vector Product Approach )            |

# *Sommaire*

| <b>Titre</b>                                                                          | <b>Page</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| REMIREMENT                                                                            |             |
| DEDICACE                                                                              |             |
| Résumé                                                                                |             |
| Liste de figures                                                                      |             |
| Liste des Tableaux                                                                    |             |
| Liste des symboles                                                                    |             |
| Liste des abréviations                                                                |             |
| Introduction générale                                                                 | <b>1</b>    |
| <br><b>CHAPITRE I ETAT DE L'ART</b>                                                   |             |
| I .1. Introduction                                                                    | <b>4</b>    |
| I.2 Intérêt du Diagnostic                                                             | <b>4</b>    |
| I.3. Constitution de la machine asynchrone                                            | <b>5</b>    |
| I.4. Terminologie dédiée au diagnostic                                                | <b>9</b>    |
| I.5. Étude statistique des différents défauts de la machine asynchrone                | <b>9</b>    |
| I.6. Causes et les conséquences des Défauts                                           | <b>11</b>   |
| I.7. Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil | <b>12</b>   |
| I.7.1 Défaillances du rotor                                                           | <b>12</b>   |
| I.7.1.1. Ruptures de barres                                                           | <b>13</b>   |
| I.7.1.2. Ruptures d'anneaux                                                           | <b>13</b>   |
| I.7.1.3. Excentricité statique et dynamique                                           | <b>14</b>   |
| I.7.2. Défaillances du stator                                                         | <b>15</b>   |
| I.7.2.1. Défauts d'isolant dans un enroulement                                        | <b>15</b>   |
| I.7.2.2. Court-circuit entre spires                                                   | <b>16</b>   |
| I.7.2.3. Court-circuit entre phases                                                   | <b>16</b>   |
| I.7.2.4. Court-circuit phase/bâti                                                     | <b>17</b>   |
| I.7.3. Défauts de circuit magnétique                                                  | <b>19</b>   |
| I. 7.4. Défaillances mécaniques                                                       | <b>19</b>   |
| 1.7.4.1. Défauts de roulements                                                        | <b>19</b>   |
| I.8. Conclusion                                                                       | <b>20</b>   |

## **CHAPITRE II TECHNIQUES DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES**

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II .1.Introduction                                                                        | 22 |
| II.2. Méthodes de diagnostic                                                              | 22 |
| II.2.1. Diagnostic par les méthodes internes                                              | 22 |
| II.2.2. Diagnostic par les méthodes externes                                              | 24 |
| II.2.3. Diagnostic par les Méthodes inductives                                            | 24 |
| II.2.4. Diagnostic par les Méthodes déductives                                            | 24 |
| II.3. Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone                       | 25 |
| II.4. Aperçu sur les méthodes de diagnostic                                               | 25 |
| II.4.1. Diagnostic par la méthode MCSA                                                    | 25 |
| II.4.2. Analyse des signaux vibratoires et acoustiques                                    | 26 |
| II.4.3. Analyse des flux                                                                  | 26 |
| II.4.4. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique                                 | 27 |
| II.4.5. Diagnostic à base de modèle qualitatif                                            | 27 |
| II.4.6. Diagnostic par analyse de la température : La Thermographie                       | 27 |
| II.4.7. Diagnostic par les analyses chimiques                                             | 28 |
| II.4.8. Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park                             | 28 |
| II .5. Les Techniques Avancées sur le Diagnostic de la Machine Asynchrone                 | 29 |
| II .5. 1. Harmoniques de courant de stator dans le moteur à induction                     | 29 |
| II .5.2. Étude du courant de stator avec ses harmoniques                                  | 31 |
| II .5.3. Détection de court-circuit entre spires dans le défaut d'enroulement du stator   | 33 |
| II .5.4. Théorie de la transformée de Hilbert                                             | 34 |
| II .5.5.Transformée de Fourier Rapide                                                     | 35 |
| II .5.6. Les approches de diagnostic les plus utilisées                                   | 35 |
| II .5.6.1. Erreur de détection à l'aide de l'approche vectorielle de Hilbert Park (HPVPA) | 35 |
| II .5.6.2. Analyse de la signature du courant carré du moteur (MSCSA)                     | 36 |
| II .5.6.3. Méthode Park – Hilbert (PVSM <sub>P-H</sub> )                                  | 37 |
| II .5.6.4. Approche des produits vectoriels de Park (PVPA)                                | 38 |
| II .6.Conclusion                                                                          | 39 |

## **CHAPITRE III ETUDE COMPARATIVES DES TECHNIQUES AVANCEES DE DIAGNOSTIC DE LA MAS**

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| III.1. Introduction                                              | 41 |
| III.2. Description de l'outil d'extraction du signal             | 41 |
| III.2.2. Paramètre et régime de fonctionnement du moteur utilisé | 41 |
| III.3. Etude comparative d'après le spectre logarithmique        | 42 |
| III.3.1. Discussion des résultats expérimentaux                  | 42 |
| III.3.2. Analyse comparative des résultats expérimentaux         | 50 |
| III.4. Conclusion                                                | 52 |
| CONCLUSION GENERALE                                              | 54 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES                                      | 56 |

# INTRODUCTION

## GENERALE

La machine électrique est l'organe principal dans les entraînements électriques et la conversion électromécanique des énergies. Par l'importance de son rôle dans les chaînes de production, elle devient aussi le maillon faible. C'est pour cette raison que la surveillance des machines électriques s'est fortement développée dans le monde industriel car la volonté d'améliorer la sûreté de fonctionnement de ces entraînements et par conséquent la durée de vie devient de plus en plus indispensable. Grâce à sa robustesse et son faible coût, le moteur asynchrone à cage occupe un rang privilégié. Ces dernières décennies, la détection précoce et le diagnostic des défauts affectant les moteurs à induction a fait l'objet de beaucoup de recherches [KER 17].

Parmi toutes les machines électriques tournantes utilisées dans les systèmes électromécaniques, notre choix a porté sur les moteurs à induction. La présence de ces derniers représente déjà plus de 80% dans les différentes chaînes de production, et d'autant plus, qu'ils ont tendance dans le futur à se substituer aux moteurs à courant continu à vitesse variable pour plusieurs raisons. Notre travail présente alors une contribution au diagnostic et à la détection précoce des dégradations les plus courantes auxquelles l'actionneur asynchrone et son environnement direct peuvent être soumis et où le temps d'arrêt est très critique, étant donné l'importance de leur rôle dans l'animation des procédés technologiques [KER 16].

Les techniques de diagnostic développées permettent d'accumuler des connaissances approfondies sur les défauts pouvant survenir à la machine lors de son fonctionnement. Avant de pouvoir définir et de développer la méthode de diagnostic proprement dite, il est tout d'abord nécessaire de définir la signification du mot diagnostic dans son sens le plus large possible. Le diagnostic consiste à détecter, à localiser et éventuellement à identifier les défaillances et défauts qui peuvent affecter un système. Le diagnostic s'intègre dans le cadre plus général de la surveillance et de la supervision. Il permet d'améliorer la qualité de vie d'un produit tout en réduisant les coûts d'entretien tout ceci en intervenant au cours de certaines phases bien définies du cycle [BAB 14].

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente les techniques avancées pour le diagnostic des machines électriques

Nous avons divisé ce mémoire en trois chapitres qui comprenaient les suivants:

**Chapitre 01 :** Dans ce chapitre, nous essayons de prendre connaissance des composants de la machine asynchrone afin de connaître les défauts qui nous donnent un regard sur le diagnostic précis de la machine.

**Chapitre 02 :** Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes de diagnostic récemment adoptées et classiques dans les cadres scientifiques, tout en mettant en avant les techniques de diagnostic avancées accompagnant la modernité de la machine.

**Chapitre 03:** En conséquence et résultats, nous avons fait une étude comparative pour connaître la technique précise la plus sensible et efficace techniques avancées de diagnostic de la machine avec la précision requise pour permettre de développer un système très fiable pour la surveillance de la chaîne de la production entraînée par ces machines asynchrones.

**CHAPITRE 1 :**

**ETAT DE L'ART**



### I.1. Introduction

Il est évident que ces moteurs conduisent à porter une attention de plus en plus sérieuse, quant à leur fonctionnement et à leur disponibilité. En effet, l'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise (cas des machines de forte puissance) sans oublier la perte de production occasionnée. Dans le domaine nucléaire, par exemple, il est indispensable d'assurer la sécurité des personnes et du matériel car aucun système, qu'il soit simple ou complexe, n'est à l'abri d'un dysfonctionnement [DID 04].

Dans ce chapitre, nous avons essayé de mettre en évidence les composants de la machine électrique, où nous avons effectué ce travail sur la machine asynchrone, car elle est la plus utilisée dans le monde industriel, tout en étudiant les défauts qui peuvent constituer un obstacle au bon fonctionnement de la machine. Tout cela est nécessaire pour les performances idéales de la machine.

### I.2 Intérêt du Diagnostic

Pendant leurs fonctionnements, les moteurs peuvent être exposés à différents environnements hostiles ou avoir des défauts de fabrications. Les différents défauts internes du moteur (courts-circuits entre spires, roulements, excentricité du rotor, ruptures de barres au rotor) et les différents défauts externes du moteur (coupure de phase, surcharge mécanique, rotor bloqué, surcharge électrique) peuvent se produire tôt ou tard [EL K 10].

Le problème des dysfonctionnements des machines électriques en général et des machines asynchrones en particulier a fait l'objet de nombreuses recherches, notre étude se concentrera donc sur la machine asynchrone étant sa robustesse mécanique, son faible coût et l'absence d'entretien constant. Une étude [THO 01] faite sur les pannes de machines asynchrones, a montrée que près de 40% sont liées aux roulements, 38% sont concentrées au niveau du stator et 10% au niveau du rotor, le reste (12%) touche d'autres parties de la machine (**fig. I.1**).

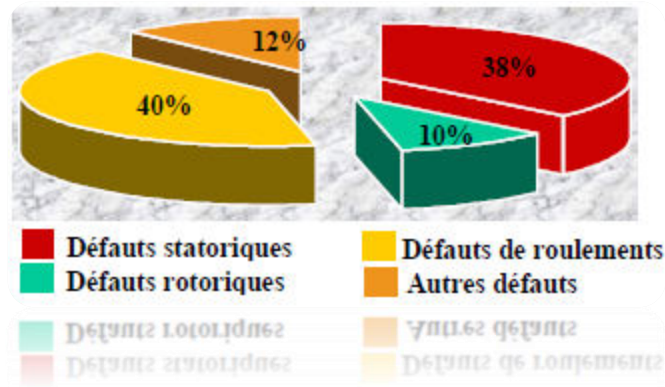


fig. I.1. Distribution des défauts dans les différentes parties des moteurs asynchrones [SAH 05]

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

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction, comprend un stator et un rotor, constitués des tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence [KER 17], on définit trois types de rotor: bobiné ou à cage d'écureuil ou à rotor massif. Toutefois, nous admettrons que sa structure est, électriquement, équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit.

Les principaux éléments constituant la machine asynchrone (en exemple à cage d'écureuil) sont illustrés dans la Figure ci-dessous :

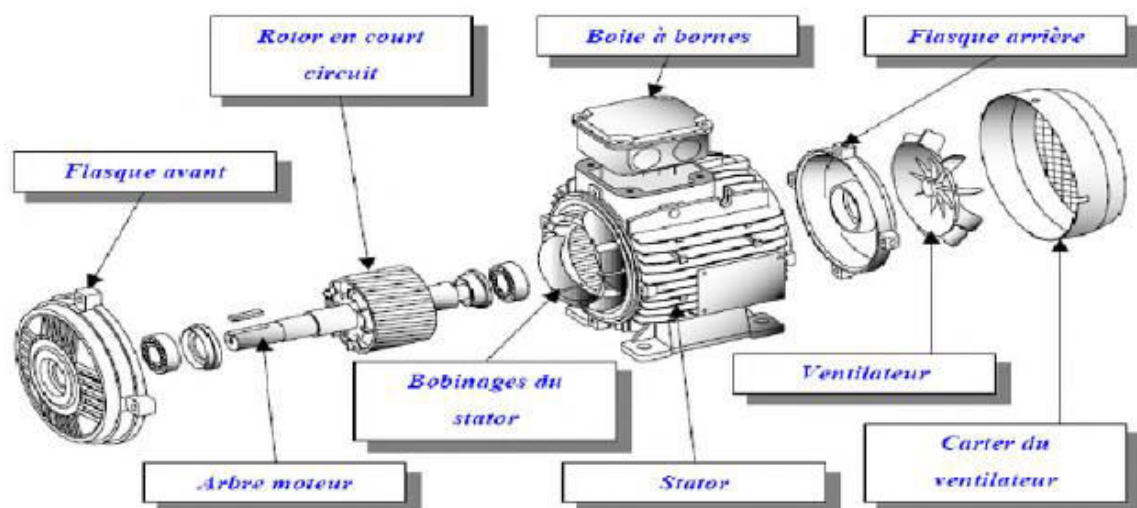


fig. I.2. Vue en éclaté de la machine asynchrone [ARK 17]

Les éléments expliqués sont les plus importants dans une machine asynchrone [ARK 17] :

**a) boîte à bornes** : elle renferme les bornes destinées aux différents couplages.

**b) Arbre moteur** : Il sert à transmettre le couple mécanique.

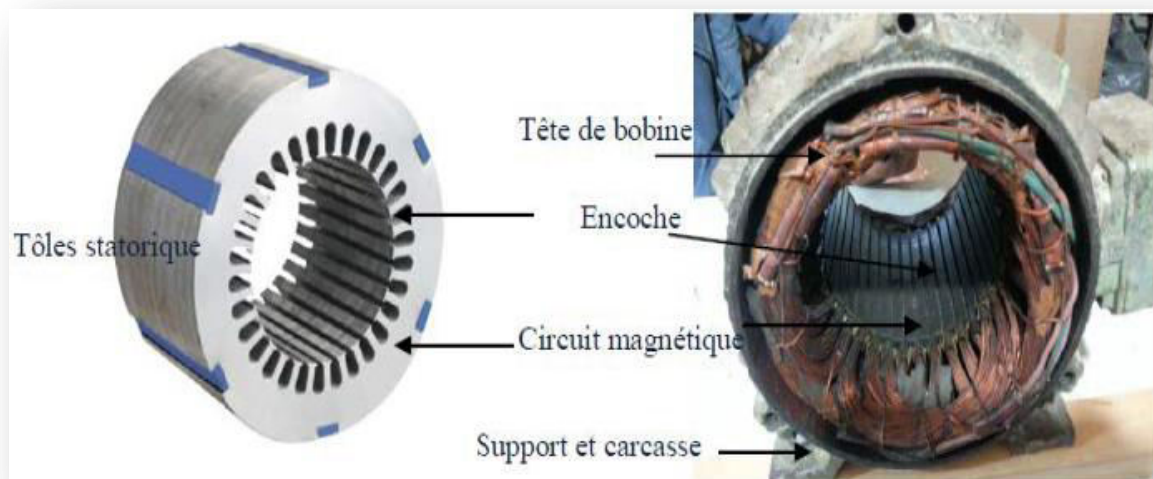
**d) Flasques** : Elles servent à positionner les paliers par rapport à la carcasse et protègent les organes internes de la machine.

**c) Paliers** : Sont des organes mécaniques qui permettent la rotation du rotor et assurent le maintien des différents sous-ensembles. Ils sont constitués de deux composants: les flasques et les roulements à billes [ABD 17].

**e) Ventilation** : Il sert à refroidir la machine.

**f) Stator** : Le stator consiste un empilage de tôles d'acier. Il a la forme d'un cylindre.

Les tôles comportent à leur périphérie intérieure des encoches dans lesquelles sont placés, à  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre, les enroulements d'un bobinage triphasé. Ces enroulements peuvent se raccorder en étoile ou bien en triangle.



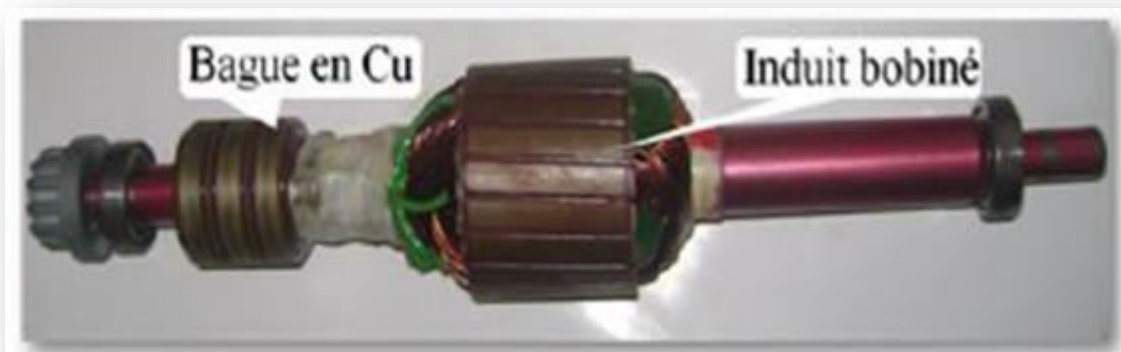
**fig. I.3.** Stator d'une machine asynchrone [BAZ 16]

**g) Rotor** : Le rotor est constitué d'une pile de tôles formant un cylindre plein ; ces tôles comportent à leurs périphéries extérieures des encoches destinées à recevoir les conducteurs. Un mince entrefer sépare le rotor du stator.

Les encoches rotoriques sont inclinées par rapport à l'axe longitudinal pour diminuer les harmoniques supérieures d'espace et réduire la réactance liée à la position de la variation angulaire rotor/stator.

On reconnaît trois types de rotor :

- le rotor bobiné : aussi appelé rotor à bague, l'enroulement triphasé relié en étoile ou en triangle, est connecté à trois bagues qui le rendent accessible de l'extérieur par l'intermédiaire des balais. On peut ainsi le court-circuiter comme cela se produit en marche normale, insérer des résistances dans le circuit lors du démarrage et dans certains cas spéciaux de fonctionnement ou y raccorder un convertisseur de courant à thyristors afin de régler le courant de démarrage et la vitesse en marche.



**fig. I.4.**Rotor bobiné [ARK 17]

- Le rotor à cage d'écureuil : Les encoches de ce type de rotor comportent des barres en cuivre ou en aluminium réunies (court-circuitées) entre elles par des anneaux. Dans le cas des moteurs de faible et de moyenne puissance, les cages sont en aluminium coulé sous vide partiel et pression. Ce procédé permet d'éviter la présence néfaste de bulles d'air dans les barres et d'obtenir en une seule opération les barres, les anneaux de chaque extrémité et parfois même les ailettes de ventilation [ZAM 08].



**fig. I.5.**Rotor à cage d'écureuil [ARK 17]

- Le rotor massif: Le rotor cylindrique massif est formé d'un noyau cylindrique en matériau ferromagnétique dont la présence est très intéressante et les performances du moteur sont optimales lorsque le diamètre de ce noyau vaut environ 80 à 90% de celui du rotor [RIO 89].

L'utilisation d'un rotor massif, en acier 35CD4, est l'alternative la plus simple et la moins chère pour des applications à grandes vitesses. Elle permet également d'obtenir des performances mécaniques avec une très bonne fiabilité. Toutefois ces avantages ont un impact sur le rendement qui, est en dessous des autres types de moteurs asynchrones. Ces moteurs sont principalement utilisés pour l'entraînement de compresseurs et de pompes [FRA 12].



**fig. I.6.**Rotor massif lisse [ARK 17]

### I.4. Terminologie dédiée au diagnostic [LOU 06]

**Défaut** : déviation non permise d'au moins d'une propriété ou d'un paramètre caractéristique du système par rapport aux conditions normal de fonctionnement.

**Panne ou défaillance** : interruption permanente de la capacité du système à remplir une fonction requise dans des conditions d'opérations spécifiées.

**Dysfonctionnement** : exécution d'une fonction de système au cours de laquelle le service rendu n'est pas délivré ou est délivré de manière incomplète.

**Symptôme** : changement d'une qualité observable par rapport à un comportement normal.

**Perturbation** : signal d'entrée non contrôlé dont la présence est non souhaitable mais considérée comme normale.

**Suivi** : fonction maintenant en permanence un historique des traitements effectués par le système de commande supervision et une trace des événements que perçoit le système.

**Détection de défauts** : détermination de la présence de défauts et l'instant d'occurrence de ces défauts.

**Localisation de défauts** : détermination du type de la localisation et de la date d'un défaut détecté. Elle consiste à remonter d'un ensemble de symptômes à un ensemble de composants défaillants.

**Identification de défauts** : détermination de la taille et du comportement temporel d'un défaut. C'est une fonction qui suit la localisation.

**Diagnostic** : détermination du type, de la taille, de la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut. C'est une fonction qui suit la détection et inclut les fonctions de localisation et l'identification.

**Surveillance** : ensemble de fonctions s'exécutant en temps réel ayant pour but de reconstituer l'état réel du procédé au sien des modèles utilisés par le système de conduite du procédé. Elle consiste à l'enregistrement de l'information ainsi qu'à la reconnaissance et l'indication des comportements anormaux.

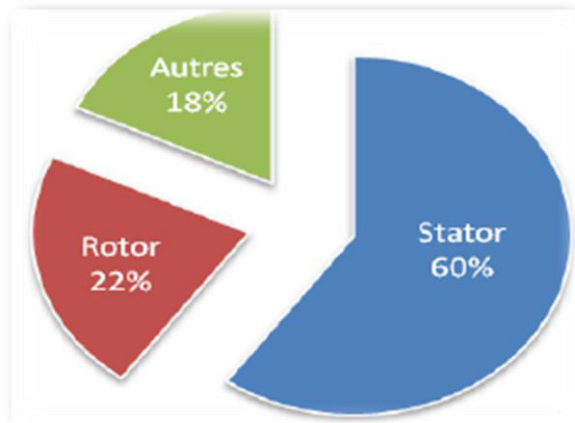
**Supervision** : représente la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriées en vue de maintenir son opération face à des défaillances.

### I.5. Étude statistique des différents défauts de la machine asynchrone

Statistiquement, il est difficile de donner des informations exactes des défaillances de machines asynchrone parce que les défauts ne sont pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance. De multiples études statistiques sur des

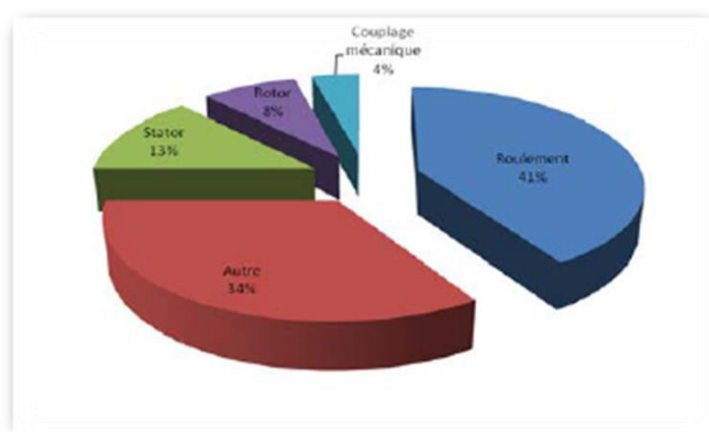
machines ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'à nos jours. Toutes ces statistiques mentionnées dans [KER 16] concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie.

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200 kW) a donné les résultats suivants (**fig. I.6**) [KER 16].



**fig. I.7.**Proportion des défauts 1988[KER 16]

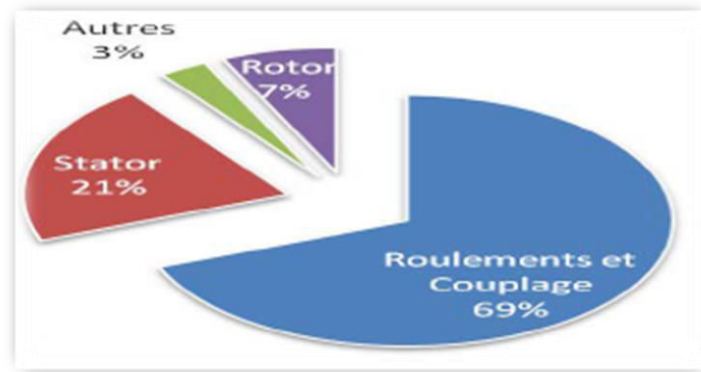
Une autre étude statistique [RAZ 03] faite en 1995 sur des machines de grande puissance (100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés la **fig. I.8**.



**fig. I.8.**Pourcentage des défauts 1995 [RAZ 03]

De même, une étude statistique, effectuée en 2008 par A. H. Bonnette sur les défauts de la machine asynchrone a donné les résultats sur la **fig. I.9**.





**fig. I.9.**Pourcentage des défauts 2008 [DID 04]

D'après les études statistiques de 2008 ; 1995 et de 1988, il est clair que les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines et en particulier pour celles de gros calibres. Ceci peut justifier le taux élevé des pannes suite aux dégradations des roulements, Par conséquent leur surveillance et leur maintenance s'avèrent indispensables.

### **I.6. Causes et les Conséquences des Défauts**

Les origines de ces défauts sont diverses et peuvent être classées en différentes catégories [TOM 96] :

- ❖ Origines électriques : détérioration des isolants, sollicitations en tension importante dues à l'utilisation des convertisseurs statiques, fortes variations de courant dans des circuits inductifs : ouvertures et fermetures de disjoncteurs, déclenchements de fusibles, répartition non homogène des tensions dans le bobinage ce qui implique une forte sollicitation des isolants d'où un vieillissement accéléré.
- ❖ Origines mécaniques : abrasion des matériaux isolants ou du cuivre, excentricité du stator par rapport au rotor, forces radiales et tangentielles dues à la présence de champs magnétiques indésirables, vibrations, usure par frottement pour les roulements.
- ❖ Origines thermiques : déséquilibre de l'alimentation, nombre de démarrages successifs importants, surcharge mécanique, vieillissements thermique naturel des isolants, mauvaise ventilation.
- ❖ Origines environnementales : poussières, humidité, graisse, acidité de l'air, température ambiante importante.



Tous les défauts évoqués précédemment conduisent à des effets génériques qui peuvent être regroupées en 3 catégories principales [BIG 94]- [BLO 09] :

- ❖ Les défauts qui entraînent une excentricité du rotor par rapport au stator : défauts de roulements, déformation du rotor ou de l'arbre, mauvais alignement, défaut de centrage.
- ❖ Les défauts qui entraînent des oscillations de couple : défauts en tout genre de la charge mécanique, défauts de roulements.
- ❖ Les défauts qui entraînent des perturbations de la répartition des forces magnétomotrices: défauts de court-circuit statoriques, rupture de connexions électriques au stator.

### **I.7. Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil**

Les machines électriques et les systèmes d'entraînement sont soumis à de nombreux types de défauts. Ces derniers peuvent être classés selon leurs causes en deux grandes familles **Internes** et **externes**, et on a présentée ces derniers selon les niveaux de construction de MAS

- Les défauts externes sont provoqués par les tensions d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine.
- Les défauts internes sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques, bobinages du stator et du rotor, entrefer mécanique, cage rotorique) [BOU 09] .

#### **I.7.1 Défaillances du rotor [BOU 09]**

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- thermique (surcharge,...)
- électromagnétique (force en induction magnétique)
- résiduel (déformation,...)
- dynamique (arbre de transmission,...)
- mécanique (roulement,...)
- environnemental (agression,...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

Rupture de barres

Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit

Excentricité statique et dynamique

### I.7.1.1. Ruptures de barres [ELK 92]

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.



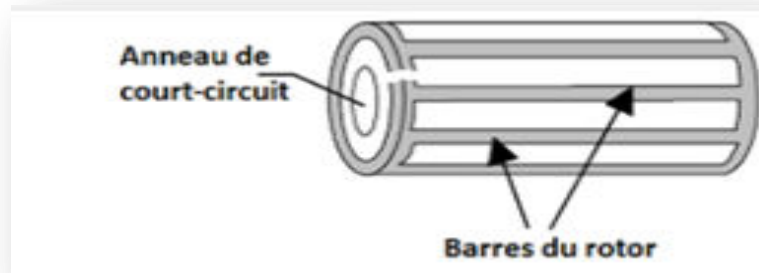
**fig. I.10.**Rupture de barre [BOU 09]

### I.7.1.2. Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter [YAH 95], ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une

détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [BOU 09].



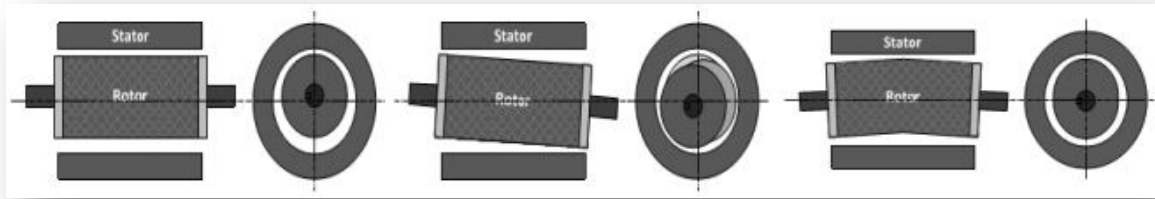
**fig. I.11.**Défauts du rotor à cage : rupture d'anneau de court-circuit. [BEL 18]

### I.7.1.3. Excentricité statique et dynamique

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement(usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Trois cas d'excentricité [SOB98] sont généralement distingués :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités.



**fig. I.12.**Représentation de l'excentricité statique, dynamique, et mixte. [BEL 18]

Ce défaut modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

### **I.7.2. Défaillances du stator**

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème [BOU 09]:

- électrique (augmentation d'ampérage)
- thermique (surcharge,...)
- mécanique (bobinage,...)
- environnemental (agression,...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

défaut d'isolant

court-circuit entre spires

court-circuit entre phases

court-circuit phase/bâti

défaut de circuit magnétique

#### **I.7.2.1. Défauts d'isolant dans un enroulement**

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se

traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique.

De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction [BOU 09].

Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- vibrations mécaniques.

vieillessement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de

vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.

- fonctionnement dans un environnement sévère.

### I.7.2.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique.

Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2<sup>ème</sup> court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [BOU 09].

### I.7.2.3. Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [BOU 09].

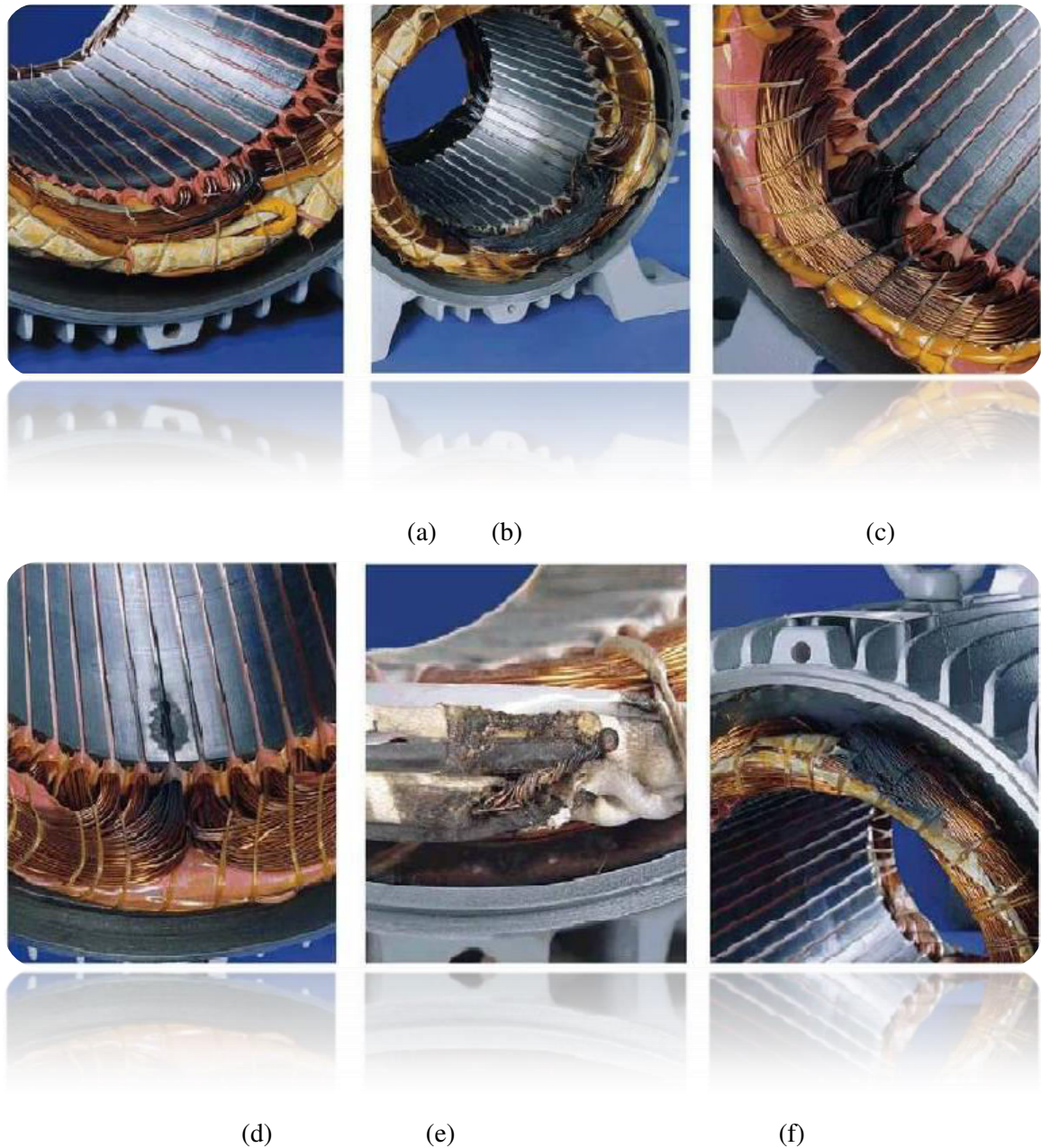
### I.7.2.4. Court-circuit phase/bâti

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels).

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance.

Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [BOU 09].





**fig. I.13.** Dommages typiques de l'isolation conduisant à un court-circuit entre spires du stator enroulements dans les moteurs asynchrones triphasés. (a) courts-circuits entre spires des spires de la même phase. (b) Enroulement court-circuité. (c) Courts-circuits entre l'enroulement et le noyau statorique à l'extrémité de l'encoche statorique. . (d) Court-circuits entre enroulement et noyau de stator au milieu de l'encoche du stator. (e) Court-circuit aux fils. (f) Court-circuit entre phases [ADE 06].

### I.7.3. Défauts de circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc.

### I. 7.4. Défaillances mécaniques

#### 1.7.4.1. Défauts de roulements

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. La plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement.

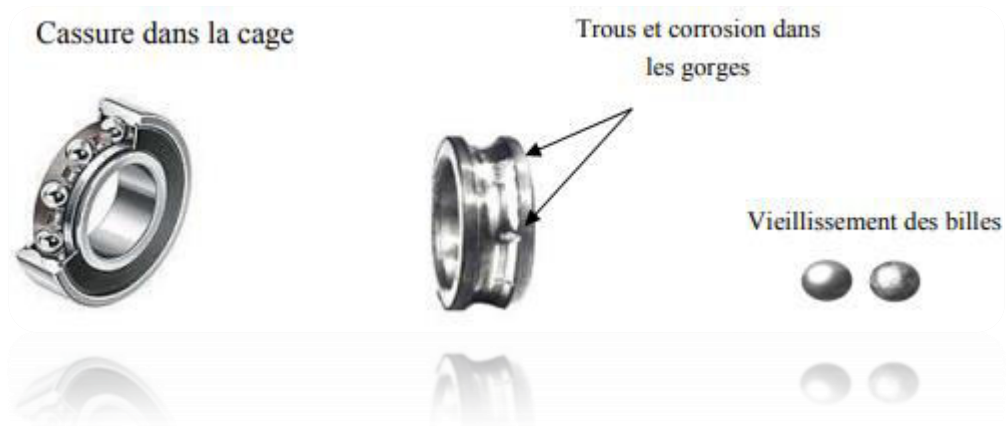
Ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles sont :

- l'usure due au vieillissement
- la température de fonctionnement élevée
- la perte de lubrification
- l'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement)
- le défaut de montage
- les courants d'arbres (Shaft Current)

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures
- l'ondulation de leur surface de roulement
- l'attaque des billes
- la corrosion due à l'eau
- défaut de graissage, problème dû à la température
- décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge





**fig. I.14.** Différentes défaillances des roulements à billes [BON 93].

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, ne apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur [BES 13].

### 1.8. Conclusion

Nous avons subdivisé ce chapitre en deux parties : la première concerne la constitution de la machine asynchrone ; la deuxième partie aborde des études statistiques, sur les défaillances des machines qui sont exposées dont le taux le plus élevé était ceux des défauts de roulements et du stator. Ainsi que la citation les principales défaillances qui peut subir les différentes parties de la machine asynchrone et que ces défauts pourraient entraîner dans la plupart du temps un arrêt intempestif de la machine.

Dans le chapitre suivant, nous allons abordé les méthodes utilisées dans le domaine du diagnostic des machines électriques en les présentant et en sachant comment travailler avec ces méthodes.

**CHAPITRE 2 :**

**TECHNIQUES**

**DE DIAGNOSTIC DES**

**MACHINES ELECTRIQUES**

### II .1.Introduction

En général, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers, que l'on retrouve souvent sous le nom : FDI (Fault Détection and Isolation). Le rôle d'une telle procédure est de fournir une information sur l'apparition d'un défaut et sa provenance le plus rapidement possible.

Les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70. En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications [DID 04].

. Dans ce chapitre, nous mettons en évidence certaines des méthodes qui fonctionnaient dans le domaine du diagnostic des machines électriques tout en mettant en évidence les méthodes développées dans ce domaine sous le nom de méthodes avancées, avec un aperçu des types de méthodes de diagnostic en général applicables dans les cadres scientifiques.

### II.2. Méthodes de diagnostic

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

- Les méthodes outils mathématiques qui permettent de modéliser les systèmes, les causes et les symptômes de défaillance, pour faciliter les démarches inductives et déductives, qui relèvent du domaine des méthodes de diagnostic interne.
- Les méthodes capables de reproduire sous forme informatique, les modes de raisonnement de l'homme. Ces derniers sont basés sur la discipline de l'intelligence artificielle et sont du domaine des méthodes de diagnostic externe.

On peut classer les méthodes de diagnostic en premier lieu dans les deux grandes Familles [ABE 02] :

- Les méthodes internes et externes
- Les méthodes inductives et déductives

#### II.2.1. Diagnostic par les méthodes internes

Le diagnostic de défaillances par des méthodes internes requiert un modèle du système à surveiller, et s'il n'y en pas, on élaborer un qui convienne (fiable et suffisamment précis). Ce modèle peut varier selon les objectifs. Il peut être plus ou moins agrégé, représentatif d'un modèle de bon fonctionnement ou de fonctionnement caractéristique d'une ou plusieurs défaillances. Habituellement un modèle est une description formelle (Mathématique) du système

à surveiller. Mathématiquement on peut avoir plusieurs modèles du même système comme en automatique par exemple, peuvent être à temps continu ou discret, descriptibles au moyen d'équations différentielles ou d'équations aux différences. Un modèle peut aussi être très difficile à obtenir, de plus, il peut être plus ou moins approximatif [ABE 02].

Ces méthodes de diagnostic internes reposent sur la comparaison de mesures réelles sur le système à surveiller et des informations que fournit le modèle. Les écarts caractérisent le fonctionnement du système:

- à un écart nul, correspond un fonctionnement de type normal.
- à un écart non nul, correspond un fonctionnement de type défaillant.

Ces méthodes internes se classent en deux grandes catégories ; les méthodes de redondance analytiques qui utilise les techniques d'estimation d'état et les techniques d'estimations paramétriques qui ont pour but l'estimation des paramètres du modèle. Les méthodes internes de diagnostic se distinguent selon le modèle utilisé :

**Modèle de simulation:** c'est une description de la structure physique et du comportement du système. Les modèles analytiques utilisés dans ce mode de diagnostic sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert. Les perturbations sont prisent en compte de manière additive à travers des matrices. Les défauts sont prisent en compte soit de la même manière soit en modifiant la structure même du modèle.

**Equation de parité:** une relation ou équation qui génère un résidu est appelée relation ou équation de parité. Les équations de parité primaire peuvent être obtenues à partir des équations qui décrivent la structure et le comportement du système et les équations de parité additionnelles sont obtenues par l'intermédiaire de transformations afin d'améliorer la tâche de diagnostic.

**Observateur :** Un modèle capable d'engendrer une approximation du vecteur d'état est appelé estimateur d'état ou observateur d'état. Le modèle est décrit sous une représentation de variables d'état. L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic.

**Estimation paramétrique :** La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique, consiste à déterminer les valeurs numériques des paramètres structuraux d'un modèle de connaissance qui gouverne le comportement dynamique du système. La première étape est donc, l'élaboration d'un modèle mathématique de complexité raisonnable pour caractériser la machine en fonctionnement sain et dégradé. Le type de défaut que l'on pourra détecter dépend du choix du modèle. En effet, les défauts statoriques ou rotoriques doivent être discriminés au niveau des paramètres physique estimés, pour qu'on puisse les détecter et les

localiser. Le modèle de Park est souvent utilisé en diagnostic pour l'estimation paramétrique. Les cassures de barres provoquent une augmentation dans la résistance rotorique apparente [BAC 02].

**Modélisation des signaux :** Dans cette méthode, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts. L'analyse spectrale plus particulièrement est utilisée depuis de très nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux défauts (rupture de barres, dégradations des roulements,...) se traduisent par l'apparition de fréquences caractéristiques directement liées à la vitesse de la machine.

### II.2.2. Diagnostic par les méthodes externes

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine par apprentissage. Le module de reconnaissance utilise les observateurs issues du système, des entrées et des sorties, afin de trouver les relations de cause à effet. Dans ces méthodes de diagnostic le facteur déterminant est l'algorithme de classification.

### II.2.3. Diagnostic par les Méthodes inductives

Ces méthodes de diagnostic correspondent à une approche montante ou recherche en avant. Il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système. Ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons afin de trouver le défaut.

### II.2.4. Diagnostic par les Méthodes déductives

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes. Les méthodes déductives doivent trouver quels sont les effets dans les systèmes. Une vérification des «effets trouvés par rapport aux effets possibles » permet de confirmer Ou d'infirmier l'existence du défaut. Ce qui justifie notre raisonnement [BOU 01].

Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou Arrière) soit une combinaison de raisonnements (avant et arrière). Dans ce dernier cas, le raisonnement est appelé raisonnement mixte ou avant arrière. La connaissance "à priori" de la cause " défaut " implique la connaissance de certains effets [ABE 02].

### II.3. Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

Le diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance. La procédure de diagnostic s'articule autour des étapes suivantes :

- Extraction des informations issues de capteurs de la machine pour obtenir des indicateurs de défauts ou résidus. Le résidu représente la différence entre l'observation et la valeur de référence. Avant de chercher la cause du défaut, il est important de valider l'information fournie par les résidus.

- la valeur du résidu doit être quantifiée afin de produire des symptômes. Le problème d'évaluation des résidus consiste à définir le seuil à partir duquel on déclarera le défaut.

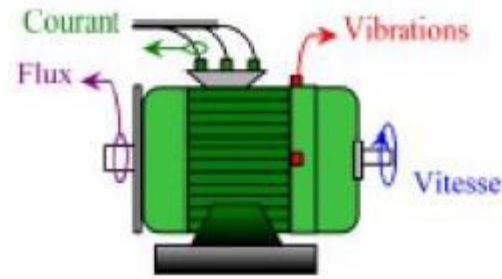
- la décision constitue la dernière étape de la tâche du diagnostic. A partir de la comparaison de la signature actuelle avec celle de l'expérience, il s'agit de déclarer, dans un premier temps, si l'élément est défaillant ou non. Dans un second temps, si l'élément est défaillant, il faut trouver la cause de l'anomalie [BES 13].

### II.4. Aperçu sur les méthodes de diagnostic

#### II.4.1. Diagnostic par la méthode MCSA

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

Les signatures des courants statoriques sont utilisées pour la détection des cassures de barres, on distingue aussi pour la détection de défaut d'excentricité et dans notre recherche on donne une validation à l'utilisation de cette technique pour la détection des défauts de mauvais branchement.



**fig. II.1.** Les différents points de mesure [KER 16].

L'analyse d'un signal donc est une source d'informations. En effet, la mesure d'un signal indique des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. La variation de ces signaux peut être reliée aux défauts.

Pour extraire les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut, généralement, on extrait l'amplitude ou les densités d'amplitude. Il existe toutefois d'autres possibilités qui consistent à déterminer les fonctions d'auto corrélation, les transformées de Fourier ou la densité spectrale [BES 13].

### **II.4.2. Analyse des signaux vibratoires et acoustiques**

L'analyse des défaillances des moteurs électriques par les signaux vibratoires et acoustiques permet une détection de quasiment tous les défauts, notamment ceux mécaniques, pouvant se produire sur le processus. Cette analyse peut être réalisée à partir de capteurs, généralement des accéléromètres, placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales. Pour surveiller l'état des roulements, des recherches utilisent un capteur laser pour lire directement les déplacements causés par les défauts de roulement. Dans ces méthodes, il faut que le capteur de déplacement laser soit placé sur la surface d'appui, ce qui n'est généralement pas facile à mettre en oeuvre [BEL 13].

### **II.4.3. Analyse des flux**

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion peut être affectée par tout déséquilibre de type magnétique, électrique ou électromagnétique au niveau du rotor ou du stator. Le flux d'entrefer, le flux embrassé par les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés.

Par exemple, le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leur fabrication. L'étude des variations de ce flux est donc

considérée par beaucoup d'auteurs comme une solution pour détecter et localiser un défaut.

Une méthode dans la référence utilise le flux pour la détection des barres cassées, il place des spires d'une part sur l'enveloppe extérieure du moteur pour mesurer l'étendue du flux de fuite des têtes de bobine et d'autre part de l'arbre du rotor pour mesurer le niveau du flux axial. Il montre ensuite les spectres mesurés à partir des signaux issus de ce dernier type de capteur dans le cas d'un moteur sain et dans celui où une des barres du rotor est cassée. [BES 13]

### II.4.4. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans la machine, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique.

L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé de la machine [SAD 15].

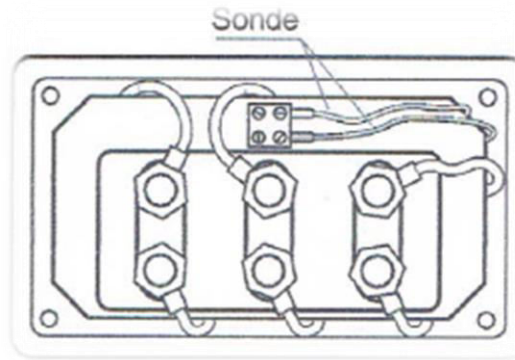
### II.4.5. Diagnostic à base de modèle qualitatif

Il est souvent difficile de développer des modèles mathématiques permettant de représenter la dynamique du système de manière exacte. D'autre part, il est plus aisé de manipuler des descriptions générales des systèmes. C'est dans ce contexte que des approches de diagnostic de défauts, basées sur des connaissances sur le système réel, ont été développées. Ces méthodes sont dites qualitatives ou encore heuristiques. L'information heuristique peut être exprimée de plusieurs manières, telles que l'utilisation de termes linguistiques (petit, grand, moyen...) ou les observations de l'opérateur humain ou encore l'arbre de défaillance, qui représente les connexions entre les symptômes et les défauts. D'autres approches de méthodes qualitatives ont été proposées telles que l'utilisation des systèmes experts et des chaînes de retour pour suivre le système [BES 13].

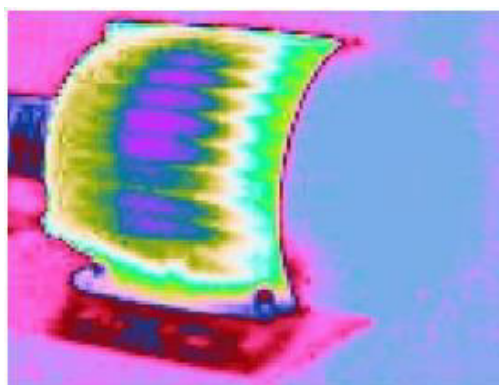
### II.4.6. Diagnostic par analyse de la température : La Thermographie

Un capteur peut être monté sur l'enroulement ou noyé (intégré) dans l'isolant ou placé dans la plaque à bornes est un bon indicateur de la surchauffe de la machine qui est un signe de défauts, (**fig. II.2.**). En plus, récemment des techniques par visualisation des images thermiques par infrarouge sont utilisées pour le diagnostic des différents défauts, (**fig. II.3.**) [BAZ 16].

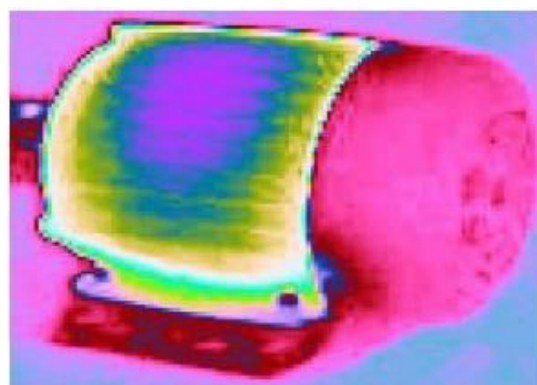




**fig. II.2.**Capteur de température dans une plaque à bornes [BAZ 16]



(a) moteur sain



(b) moteur en défaut avec 40% court-circuit de la bobine d'une phase

**fig. II.3.** Image colorée infrarouge thermique [BAZ 16]

### II.4.7. Diagnostic par les analyses chimiques

La plus part des moteurs sont refroidis par l'air, ou le plus souvent à l'aide d'un circuit fermé avec échangeur de chaleur refroidi à l'eau, la dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air de refroidissement et qui peut être détecter par une technique d'absorption infrarouge. Dans certains cas, l'huile de roulement est analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents [BES 13].

### II.4.8. Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir :

La première utilise les grandeurs biphasées  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$ , qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de Lissajous :  $i_q = f(i_d)$ . Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut.

La deuxième est appelée Vecteur de Park Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park. Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement. [SAD 15].

### II.4.9. Méthodes basées sur l'intelligence artificielle

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment, ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle. Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisent un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance. Parmi ces méthodes, on peut citer [SAD 15]:

- logique floue,
- réseaux neuronaux,
- reconnaissance des formes.

## II.5. Les Techniques Avancées sur le Diagnostic de la Machine Asynchrone

Les méthodes de diagnostic pour la nouvelle génération sont avancées. Les méthodes utilisées dans le passé devraient être développées sur ces derniers, en plus d'être considérées comme une extension d'autres méthodes de diagnostic, car nous travaillerons à mettre en évidence des méthodes de diagnostic avancées dans des cadres scientifiques spécifiques.

### II.5.1. Harmoniques de courant de stator dans le moteur à induction

Le champ d'entrefer d'un moteur à induction alimenté par une forme d'onde d'alimentation en tension sinusoïdale comprend une large gamme d'harmoniques spatiales différentes [BOU 06]. L'analyse suivante suppose que ces harmoniques de flux d'entrefer résultent de l'interaction de la perméance d'entrefer avec ondes de force magnéto motive harmonique (MMF) [HUP 04]- [JOK 11]. Sachant que seules les harmoniques dues à les entailles sont considérées ici (harmoniques de fente du rotor). Dans [BOU 06]- [HUP 04], les harmoniques des fentes du rotor (RSH) générés dans le courant de ligne de stator sont présentés pour une machine saine à des fréquences données par Eq. (1)

$$f_{RSH}(k, g) = |(1 \pm \frac{kN_r}{p}(1 - g))f_s|_{r_i, 2, 3} \quad (1)$$

Où,  $k$ : est un entier positif, "1" est une harmonique fondamentale ,  $g$ : est le glissement,

$N_r$ : Nombre de barres rotoriques,  $p$ : est le nombre de paires de pôles,  $f_s$ : Fréquence d'alimentation .

Pour un enroulement de stator formé de trois bobines identiques et alimenté par un système de tension équilibrée, un doit trouver, seuls les courants (induits par induction), le rang est impair, et n'est pas un multiple de Trois. Par conséquent, nous notons que seule la RSH qui est sa commande appartient à l'ensemble suivant peut être détecté [BOU 06]:

$$G = \{((\frac{kN_r}{p} \pm 1)_{k-1, 2, 3, \dots}) \cap (6v \pm 1)_{v-1, 2, 3, \dots}\} \quad (2)$$

$v$ : est un entier positif

Par contre, et dans la pratique, il y a toujours un certain déséquilibre statorique des différents origines (problèmes de tension d'alimentation ou asymétrie résiduelle dans les enroulements statoriques ou neutre connexion); dans ce cas, toutes les harmoniques, même celles ayant un rang multiple de trois seront présent dans le spectre du courant statorique. Enfin, nous pouvons voir que pour un fonctionnement sain, le courant statorique d'une cage de moteur à induction se compose de deux séries d'harmoniques [ALL 16]:

1-Une série d'harmoniques du temps (TH) de fréquence:

$$f_{TH}(h) = hf_s \text{ ou } TH = hf_s \quad (3)$$

2-Une série d'harmoniques de fentes de rotor (RSH) de fréquence:

$$f_{RSH}(h, k, g) = (h \pm \frac{kN_r}{p}(1 - g))f_s \text{ ou } S^\pm = |(hf_s \pm kN_r f_r)| \quad (4)$$

Où,  $h = 1, 3, 5, \dots$  est l'ordre harmonique temporel.

Et dans la pratique, nous avons également d'autres harmoniques appelées (Rotor Bar Fault Harmonics) (RBFH), en raison des asymétries inhérentes à la cage du rotor. Par contre, on remarque l'excentricité

Harmoniques de défaut (EFH) en raison du niveau inhérent d'excentricité mixte. Nous pouvons voir que pendant un fonctionnement sain, le courant statorique d'une cage de moteur à induction se compose de deux autres série d'harmoniques donnée par [SAH 14]- [SAH 10]- [ZOU 10]- [KEC 13]:

3- Une série d'harmoniques de défaut de barre de rotor ((RBFH) de fréquence

$$f_{RBFH}(h, k, g) = |(h \pm 2kg)f_s| \text{ ou } R^\pm = |(h \pm 2kg)f_s| \quad (5)$$

4- Une série d'harmoniques de défaut d'excentricité (EFH) de fréquence

$$f_{EFH}(h, k, g) = |(h \pm \frac{kN_r}{p}(1 - g))f_s| \text{ ou } E^\pm = |(hf_s \pm kN_rf_r)| \quad (6)$$

Où:  $f_r = (\frac{N_r}{p}(1 - g)f_s)$  : est la vitesse mécanique du rotor. (Voir **Tableau .II.1.**).

### **II .5.2. Étude du courant de stator avec ses harmoniques**

Nous allons concentrer notre étude autour des courants de phase. Parce que notre travail et nos mathématiques les calculs sont basés essentiellement sur les harmoniques fondamentales et toutes les harmoniques existantes. Ainsi, le courant instantané circulant dans la phase "a", "b" et "c" de notre triphasé moteur asynchrone [SAH 14]- [DID 10] est donné par (Eq.7):

$$\begin{cases} i_{sa}(t)_{sain} = I_F \cos(2\pi f_s t) \\ i_{sb}(t)_{sain} = I_F \cos\left(2\pi f_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{sc}(t)_{sain} = I_F \cos\left(2\pi f_s t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (7)$$

Et nous remplacerons les harmoniques mentionnées ci-dessus dans les expressions données par [SAH 14]-[DID 10]. Ces équations deviennent comme suit l'équation (8)

**Tableau .II.1.** Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique

[SAH 14] - [SAH 10] - [ZOU 10]- [ALL 16]

| Types harmoniques                           | L'expression générale de leurs fréquences<br>Spectre actuel: | Leurs causes                                                                                    |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Harmoniques temporelles (TH):               | $TH = hfs$                                                   | Imposé par la source d'alimentation ou résiduel asymétrie dans les enroulements du stator       |
| Emplacement du rotor Harmoniques (RSH)      | $S_{\pm} =  (hfs \pm Nrfr) $                                 | Imposé par la structure du rotor (discret répartition des barres de rotor dans le rotor fentes) |
| Défaut de barre de rotor Harmoniques (RBFH) | $R_{\pm} =  (h \pm 2kg)fs $                                  | En raison de la cage de rotor inhérente asymétries                                              |
| Défaut d'excentricité Harmoniques (EFH)     | $E_{\pm} =  (hfs \pm kfr) $                                  | En raison de la cage de rotor inhérente asymétries                                              |

$$\begin{aligned}
 i_{sa}(t)_{\text{sain}} &= \sum_{h=1}^m [\hat{I}_{THh} \cos(2\pi THt) + \sum_{k=1}^n [\hat{I}_{S^{\pm}h} \cos(2\pi S^{\pm}t) + \hat{I}_{R^{\pm}k} \cos(2\pi R^{\pm}t) \\
 &\quad + \hat{I}_{E^{\pm}k} \cos(2\pi E^{\pm}t)]] \\
 i_{sb}(t)_{\text{sain}} &= \sum_{h=1}^m [\hat{I}_{THh} \cos(2\pi THt - \frac{2\pi}{3}) + \sum_{k=1}^n [\hat{I}_{S^{\pm}h} \cos(2\pi S^{\pm}t - \frac{2\pi}{3}) \\
 &\quad + \hat{I}_{R^{\pm}k} \cos(2\pi R^{\pm}t - \frac{2\pi}{3}) + \hat{I}_{E^{\pm}k} \cos(2\pi E^{\pm}t - \frac{2\pi}{3})]] \\
 i_{sc}(t)_{\text{sain}} &= \sum_{h=1}^m [\hat{I}_{THh} \cos(2\pi THt - \frac{4\pi}{3}) + \sum_{k=1}^n [\hat{I}_{S^{\pm}h} \cos(2\pi S^{\pm}t - \frac{4\pi}{3}) \\
 &\quad + \hat{I}_{R^{\pm}k} \cos(2\pi R^{\pm}t - \frac{4\pi}{3}) + \hat{I}_{E^{\pm}k} \cos(2\pi E^{\pm}t - \frac{4\pi}{3})]]
 \end{aligned} \tag{8}$$

La transformation du Park est utilisée pour transformer les courants statoriques du système triphasé (A-B-C) au système biphasé (D-Q). L'expression de transformation est telle que présentée par [SRI 06]-[PET 13]-[AMA 17]:

$$i_{sd}(t) = (\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}})i_{sa}(t) - (\frac{1}{\sqrt{6}})i_{sb}(t) - (\frac{1}{\sqrt{6}})i_{sc}(t) \quad (9)$$

$$i_{sq}(t) = (\frac{1}{\sqrt{2}})i_{sb}(t) - (\frac{1}{\sqrt{2}})i_{sc}(t) \quad (10)$$

Dans un état idéal, lorsque seules les harmoniques fondamentales existent, les  $i_{sq}(t)$  et  $i_{sd}(t)$  in Les équations (9) et (10) ont des significations physiques et sont simplifiées à l'état d'équilibre telles que [ZAR 09]:

$$i_{sd}(t)_{\text{sain}} = \frac{\sqrt{6}}{2} \hat{I}_{TH1} \sin(2\pi f_s t) \quad (11)$$

$$i_{sq}(t)_{\text{sain}} = \frac{\sqrt{6}}{2} \hat{I}_{TH1} \cos(2\pi f_s t) \quad (12)$$

Mais, dans des conditions anormales, avec les harmoniques indésirables telles que les harmoniques impaires courant du stator dû à l'asymétrie de la structure du moteur et / ou de l'alimentation [SRI 06]-[ZAR 09], et après la remplacement dans leurs équations, on retrouve les expressions suivantes:

$$i_{sd}(t)_{\text{sain}} = \frac{\sqrt{6}}{2} \left[ \sum_{h=1}^m \left[ \hat{I}_{THh} \sin(2\pi THt) + \sum_{k=1}^n \left[ \hat{I}_{S^{\pm}h} \sin(2\pi S^{\pm}t) + \hat{I}_{R^{\pm}k} \sin(2\pi R^{\pm}t) \right] + \hat{I}_{E^{\pm}k} \sin(2\pi E^{\pm}t) \right] \right] \quad (13)$$

$$i_{sq}(t)_{\text{sain}} = \frac{\sqrt{6}}{2} \left[ \sum_{h=1}^m \left[ \hat{I}_{THh} \cos(2\pi THt) + \sum_{k=1}^n \left[ \hat{I}_{S^{\pm}h} \cos(2\pi S^{\pm}t) + \hat{I}_{R^{\pm}k} \cos(2\pi R^{\pm}t) \right] + \hat{I}_{E^{\pm}k} \cos(2\pi E^{\pm}t) \right] \right] \quad (14)$$

### II .5.3. Détection des défauts rotoriques

Lorsqu'un défaut rotorique se produit, il produit du MMF, qui est opposé au principal MMF produit par les enroulements de phase [SRI 06]. Cette déformation de l'entrefer de compensation MMF, va certainement générer des harmoniques dans le courant du stator avec des composantes de fréquences caractéristiques [SRI 06]- [KUM 12], de sorte que les notes suivantes peuvent être extrait:

- a) - Tous les TH augmentent de manière significative en raison d'un court-circuit entre les spires.
- b) - Cette faille a considérablement augmenté la majorité des RSH
- c) - Les amplitudes de RBFH, qui représentent les signatures théoriques des barres de rotor cassées, sont également augmentées notamment en raison du court-circuit entre les spires.
- d) - Toutes les amplitudes d'EFH qui représentent les signatures théoriques de l'entrefer excentricité, sont également fortement augmentées [SAH 14]-[SAH 10]-[AYD 11].

Dans cette étude, la très faible augmentation du glissement pendant le défaut sera ignorée:

(  $g' \approx g$  ). Donc, l'expression du courant statorique lors d'un court-circuit entre spires dans l'enroulement statorique la faute est:

$$i_{sa}(t)_{\text{Défectueux}} = \sum_{h=1}^m [\hat{I}'_{THh} \cos(2\pi THt) + \sum_{k=1}^n [\hat{I}'_{S^{\pm}h} \cos(2\pi S^{\pm}t) + \hat{I}'_{R^{\pm}k} \cos(2\pi R^{\pm}t) + \hat{I}'_{E^{\pm}k} \cos(2\pi E^{\pm}t)]] \quad (15)$$

#### II .5.4. Théorie de la transformée de Hilbert

La transformée de Hilbert est un opérateur linéaire qui prend un signal  $s(t)$  et produit une transformée  $H(t)$  dans le même domaine. L'opérateur peut être considéré comme une convolution dans le domaine temporel définie par l'équation suivante [ALL 17]-[DJE 12]:

$$\tilde{S}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (16)$$

La forme complexe du signal est connue sous le nom de signal analytique. Le complexe unique la représentation d'un signal réel  $s(t)$  est donnée par [AHA 12]:

$$\tilde{S}(t) = \tilde{S}(t)_{\text{Re}} + j\tilde{S}(t)_{\text{Im}} \quad (17)$$

En utilisant le théorème de la valeur moyenne, nous pouvons évaluer [AHA 12]:

$$\tilde{S}(t) = \frac{1}{\pi t} \otimes S(t) \quad (18)$$

Par conséquent, la transformée de Hilbert est obtenue si le signal d'origine,  $s(t)$ , est convolué avec  $\frac{1}{\pi t}$ , si le signal est de la forme,  $a(t) \cdot \cos\phi(t)$  Qui est comme un vrai signal et peut être écrit comme [AHA 12]:

$$\tilde{S}(t) = \tilde{S}(t)_{\text{Re}} + j\tilde{S}(t)_{\text{Im}} = a(t)\cos \Phi(t) + jH[a(t)\cos \Phi(t)] \quad (19)$$

$$\text{Ou, } \tilde{S}(t) = a(t)[\cos \Phi(t) + j \sin \Phi(t)] \quad (20)$$

$$\text{Ou, } \tilde{S}(t) = a(t)e^{j\Phi(t)} \quad (21)$$

La transformée de Hilbert produit une série chronologique complexe. L'enveloppe, qui est la magnitude de cette série chronologique complexe, est une représentation de l'estimation de la modulation contenue dans le signal dû aux bandes latérales (l'amplitude instantanée  $a(t)$ ), tel que défini par l'équation suivante [BAC 12]- [DJE 12]:

$$a(t) = \sqrt{\tilde{S}(t)_{\text{Re}}^2 + \tilde{S}(t)_{\text{Im}}^2} \quad (22)$$

La fonction de modulation de phase (phase instantanée)  $\Phi(t)$  est exprimée comme [BAC 12]:

$$\Phi(t) = \arctan \frac{\tilde{S}(t)_{\text{Im}}}{\tilde{S}(t)_{\text{Re}}} \quad (23)$$

### **II .5.5.Transformée de Fourier Rapide**

Cette transformation se prêtant à l'analyse des phénomènes stationnaires des systèmes en régimes permanents donne la description du signal temporel dans le domaine fréquentiel avec une résolution fréquentielle constante sur une échelle linéaire de fréquence. L'un des inconvénients majeurs des techniques spectrales basées sur la transformées de Fourier rapides (FFT) est qu'elles ne fournissent des résultats utiles que si le fonctionnement à vitesse de rotation et couple de charge de la machine est constante. La nécessité de trouver d'autres techniques de traitement de signal pour les signaux non stationnaires devient donc nécessaire [BEL 18].

### **II .5.6. Les approches de diagnostic les plus utilisées**

#### **II .5.6.1. Détection de défaut à l'aide de l'approche vectorielle de Hilbert Park (HPVPA)**

Mathématiquement, l'approche vectorielle de Hilbert Park (HPVPA) est définie par le équations précédentes (16) - (23).

La transformée de Hilbert d'un courant statorique, appelé signal analytique, est donnée par le expression suivante [SAH 14]-[SAH 10]:

$$i_{sa}(t) \xrightarrow{T} \tilde{i}_{za}(t) = \tilde{i}_{\text{Re}}(t) + j\tilde{i}_{\text{Im}}(t) \quad (24)$$

L'amplitude instantanée selon l'équation (22), d'un courant statorique est obtenue par l'équation ci-dessous [SAH 14]-[SAH 10]:

$$|\tilde{i}_{sa}(t)| = \sqrt{\tilde{i}_{\text{Re}}(t)^2 + \tilde{i}_{\text{Im}}(t)^2} \quad (25)$$

Cette approche se construit donc principalement sur les étapes suivantes:



1) Détermination de l'amplitude instantanée pour chaque courant statorique:  $|\tilde{i}_{sa}(t)|$ ,  $|\tilde{i}_{sb}(t)|$  et  $|\tilde{i}_{sc}(t)|$

2) Calcul des composants suivants:  $i_{dP-H}$  et  $i_{qP-H}$

$$\begin{aligned} i_{dP-H} &= \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)|\tilde{i}_{sa}(t)| - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)|\tilde{i}_{sb}(t)| - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)|\tilde{i}_{sc}(t)| \\ i_{qP-H} &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)|\tilde{i}_{sb}(t)| - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)|\tilde{i}_{sc}(t)| \end{aligned} \quad (26)$$

3) Enfin, l'approche vectorielle de Hilbert Park (HPVPA) est obtenue par les méthodes suivantes:

Analyse d'expression FFT (voir **fig. II.4.**):

$$\mathbf{HPVPA} = i_{dP-H} \times i_{qP-H} \quad (27)$$

#### II .5.6.2. Analyse de la signature du courant carré du moteur (MSCSA)

L'approche MCSA utilise l'analyse du spectre d'un courant de phase d'un stator de moteur. La proposition de l'approche est basée principalement sur l'analyse du spectre du courant de phase du stator carré. Dans ce approche proposée MSCSA, pour un moteur sain, le spectre du courant carré a un composante fondamentale à la fréquence  $2fs = \frac{(2\omega s)}{(2\pi)}$  avec un composant DC,

[PIR 12]:

$$\text{MSCSA} = i_{sa}^2(t) \quad (28)$$

Le calcul analytique est simplifié et seules les harmoniques dont l'amplitude est important sera pris en considération. Ainsi, les harmoniques:  $\hat{I}_{R^{\pm k}} \cdot \hat{I}_{E^{\pm k}}, \hat{I}_{R^{\pm k}} \cdot \hat{I}_{S^{\pm k}}$  et  $\hat{I}_{S^{\pm k}} \cdot \hat{I}_{E^{\pm k}}$  sera négligé. Par conséquent, nous calculons successivement et séparément les expressions suivantes:

$$\begin{aligned} \text{a)} h = 1, TH = f_s, k = 1R^{\pm} &= (1 \pm 2g)f_s \\ \text{b)} h = 1, TH = f_s, k = 1S^{\pm} &= |f_s \pm N_r f_r| \\ \text{c)} h = 1, TH = f_F, k = 1E^{\pm} &= |f_s \pm k f_r| \end{aligned} \quad (29)$$

$$i_{sa}(t)_{\text{sain}} = \hat{I}_{TH1} \cos(2\pi f_s t) + \hat{I}_{R^{-k}} \cos(2\pi(1 - 2g)f_s t) + \hat{I}_{R^{+k}} \cos(2\pi(1 + 2g)f_s t) \quad (30)$$

Le courant de phase carré instantané est donné par [PIR 12] et après remplacement dans son équation, nous trouvons notre expression suivante:

$$\begin{aligned}
 MSCSA = i_{sa}^2(t)_{sain} = & \left( \frac{\hat{I}_{TH1}^2}{2} + \frac{\hat{I}_{R-k}^2}{2} + \frac{\hat{I}_{R+k}^2}{2} \right) \\
 & + \left( \frac{\hat{I}_{TH1}^2}{2} + \hat{I}_{R-k} \hat{I}_{R+k} \right) \cos(2\pi(2f_s)t) + (\hat{I}_{TH1} \hat{I}_{R-k} + \hat{I}_{TH1} \hat{I}_{R+k}) \cos(2\pi s(2f_s)t) \\
 & + \hat{I}_{R-k} \hat{I}_{R+k} \cos(2\pi s(4f_s)t) + \hat{I}_{TH1} \hat{I}_{R-k} \cos(2\pi(1-g)(2f_s)t) \\
 & + \hat{I}_{TH1} \hat{I}_{R+k} \cos(2\pi(1+g)(2f_s)t) + \frac{\hat{I}_{R-k}^2}{2} \cos(2\pi(1-2g)(2f_s)t) \\
 & + \frac{\hat{I}_{R+k}^2}{2} \cos(2\pi(1+2g)(2f_s)t)
 \end{aligned} \tag{31}$$

L'équation 31 montre une composante continue, une composante de fréquence  $2f_s$  et des composantes harmoniques à fréquences  $(1 \pm kg)2f_s, (1 \pm 2kg)2f_s$ . Le spectre de ce courant carré, présenté sur la figure 5, contient des composants supplémentaires aux fréquences  $2gkfs$  [PIR 12]- [ALL 12].

#### II .5.6.3. Méthode Park – Hilbert (PVSM<sub>P-H</sub>)

Mathématiquement, la méthode de Park – Hilbert est définie par des équations. (24) - (26) et utilisé par [SAH 14]-[SAH 10] mais l'Eq. (27) est modifié par l'expression suivante (voir **fig. II.4.**):

$$PVSM_{P-H} = \left( \sqrt{\hat{i}_{dP-H}^2 + \hat{i}_{qP-H}^2} \right)^2 \tag{32}$$

#### II .5.6.4. Approche des produits vectoriels de Park (PVPA)

Notre dernier article [ALL 16]-[ALL 17] où nous avons utilisé «l'approche produit de Park (PVPA) pour Diagnostic des moteurs à induction »est principalement basé sur le produit de  $i_d$  avec un courant  $i_q$  (voir **fig. II.4.**):

$$PVPA = i_{sd}(t) \cdot i_{sq}(t) \tag{33}$$

Nous simplifierons le calcul analytique et nous ne prendrons en considération que Harmoniques de défaut d'excentricité avec :

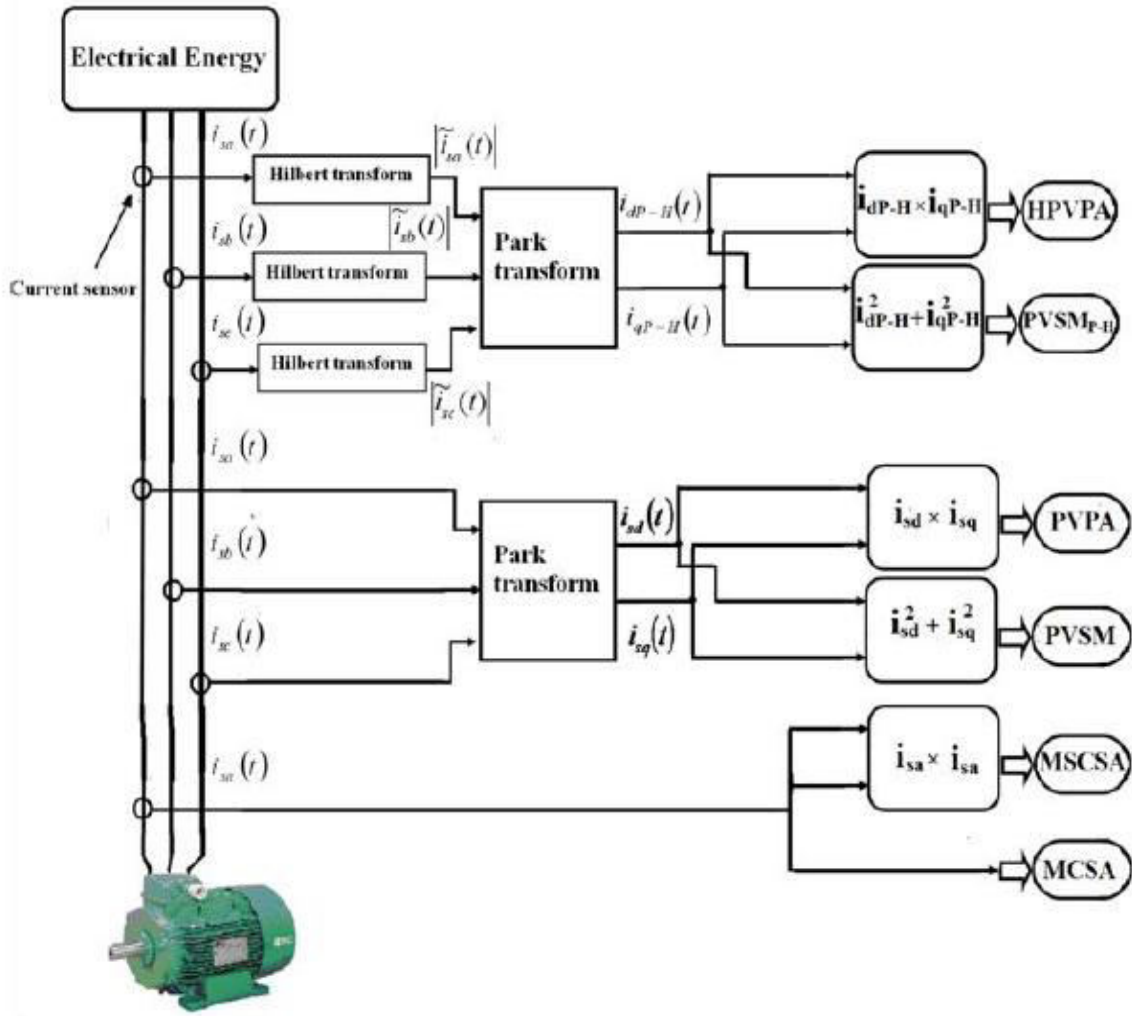
$$i_{sd}(t)_{sain} = \frac{\sqrt{6}}{2} (\hat{I}_{TH1} \sin(2\pi f_s t) + \hat{I}_{E-1} \sin(2\pi(f_s - f_r)t) + \hat{I}_{E+1} \sin(2\pi(f_s + f_r)t)) \tag{34}$$

$$i_{zq}(t)_{sain} = \frac{\sqrt{6}}{2} (\hat{I}_{TH1} \cos(2\pi f_s t) + \hat{I}_{E-1} \cos(2\pi(f_s - f_r)t) + \hat{I}_{E+1} \cos(2\pi(f_s + f_r)t)) \tag{35}$$

Dans cette situation, le PVPA est donné

$$\begin{aligned}
 i_{sd}(t) \cdot i_{sq}(t) &= \frac{3}{4} \hat{I}^2 \pi_{11} \sin(2\pi(2f_s)t) + \frac{3}{4} \hat{I}^2 E^{-1} \sin(2\pi(2(f_s - f_r))t) \\
 \text{par: } &+ \frac{3}{4} \hat{I}^2 E' + \sin(2\pi(2(f_s + f_r))t) - \frac{3}{2} \hat{I}_{TH1} \hat{I}_{E^{-1}} \sin(2\pi(2f_s - f_r)t) \\
 &+ \frac{3}{2} \hat{I}_{TH1} \hat{I}_{E'1} \sin(2\pi(2f_s + f_r)t) \\
 &+ \frac{3}{2} \hat{I}_{E^{-1}} \hat{I}_{E'1} \sin(2\pi(2f_r)t) + \frac{3}{2} \hat{I}_{TH1} (\hat{I}_{E^{-1}} - \hat{I}_{E+1}) \sin(2\pi(f_r)t)
 \end{aligned} \tag{36}$$

Eq. (37) a une composante à la fréquence  $s$   $2f$ , des composantes de bande latérale à  $(2f_s \pm f_r)$  et  $2(f_s \pm f_r)$  et les composants supplémentaires à  $f_r, 2f_r$ . La figure 7 présente le spectre de la PVPA et ces harmoniques avec  $f_r = f_s((1 - g)/p)$  est une fréquence de rotor et  $p$  est un nombre de paires de pôles.



**fig. II.4.** Diagnostic des défauts du stator dans le moteur à induction avec l'utilisation de différentes approches [ALL 19].

### II .6.Conclusion

Le diagnostic des machines électriques a connu un développement remarquable en termes de diversité et de modernité, nous avons donc essayé de connaître les principes qui sous-tendent le processus de diagnostic en plus de connaître des méthodes de diagnostic modernes avancées. qui étaient le thème du présent chapitre pour mettre en valeur ses méthodes avancées avec un exposé théorique de chacune d'elle.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons une étude comparative entre les différentes méthodes de diagnostic, montrant la sensibilité expérimentale précise de chaque méthode par rapport aux autres techniques avancées.

**CHAPITRE 3 :**

**ETUDE COMPARATIVES**

**DES TECHNIQUES**

**AVANCEES DE**

**DIAGNOSTIC DE LA MAS**

### III.1. Introduction

Le diagnostic se fait, dans les équipements électriques, pour analyser les différentes grandeurs telles que : le courant, le bruit, la température, les vibrations, etc.

La surveillance permet de remarquer les variations probables de ses grandeurs qui sont la conséquence directe et claire d'un mode de fonctionnement anormal dû aux défauts.

La détection précoce de ce passage vers un nouveau régime de fonctionnement non désiré, nous permet d'anticiper la défaillance totale de nos équipements et d'éviter les risques.

Nous présenterons, dans ce chapitre, une étude comparative, par l'analyse spectrale des signaux temporels dans le domaine fréquentiel, en utilisant la transformée de Fourier rapide « Fast Fourier Transformation » (FFT), qui est utilisée depuis des décennies pour la détection des anomalies surtout dans les ME : principalement les cassures de barres. Ces nouvelles techniques d'analyse spectrale est, en particulier, utilisée dans les ME, alimentées directement par le réseau électrique, et qui fonctionnent en régime permanent [MAG 06] [ALL 10].

### III.2. Description de l'outil d'extraction du signal

Les différents défauts qui affectent la MAS vont donner naissance à une influence sur les signaux issus de cette ME par la modulation de leurs amplitudes aux fréquences caractéristiques de ces défauts. Il faut prendre avec soin une résolution très satisfaisante pour faire paraître clairement les différentes raies additionnelles les bandes latérales pour pouvoir analyser aisément et diagnostiquer notre ME [RAZI 03] [ALL10].

A titre d'exemple, nous allons faire des essais avec notre banc expérimental qui a un MAS avec deux barres cassées en pleine charge puis en faible charge .

On va choisir pour cela, une fréquence d'échantillonnage :  $F_e = 1000$  Hz, une durée d'acquisition de  $T_a \approx 10$  secondes, ce qui implique que le nombre total d'échantillonnage ( $N_e = F_e * T_a$ ) : la résolution de nos résultats est égale donc  $\Delta f = F_e / N_e = 0.1$  Hz.

#### III.2.2. Paramètre et régime de fonctionnement du moteur utilisé

Le moteur utilisé, est triphasé, 3 kW, 50 Hz, 2 pôles, à cage d'écureuil avec 28 bars au rotor et 360 spires en série par phase (voir l'annexe). **Laboratoire génie électrique université Biskra**

Les **fig .III.1. - fig.III.10.** montrent l'évolution des signatures et leurs amplitudes et leurs fréquences spécifiques des différentes approches en fonction de l'état du moteur et en prenant:

- 1) – Défaut rotorique: - 2 barres cassées
- 2) - Moteur sous différentes conditions de fonctionnement :
  - à faible charge (25%) avec  $g = 0,015$
  - à pleine charge (100%) avec  $g = 0,035$ .

### III.3. Etude comparative d'après le spectre logarithmique

#### III.3.1. Discussion des résultats expérimentaux

La **fig .III.1.** nous présente le spectre MCSA et nous permet de voir clairement les fréquences spécifiques des signatures pour chaque type de défauts données dans la partie théorique de ce présent travail qui confirme l'exactitude des équations mathématiques.

D'autre part, Les **fig .III.1. - fig.III.10.** nous permettent de voir aussi les signatures caractéristiques des différents défauts de diverses techniques récentes déjà utilisées, représentées ci-dessus.

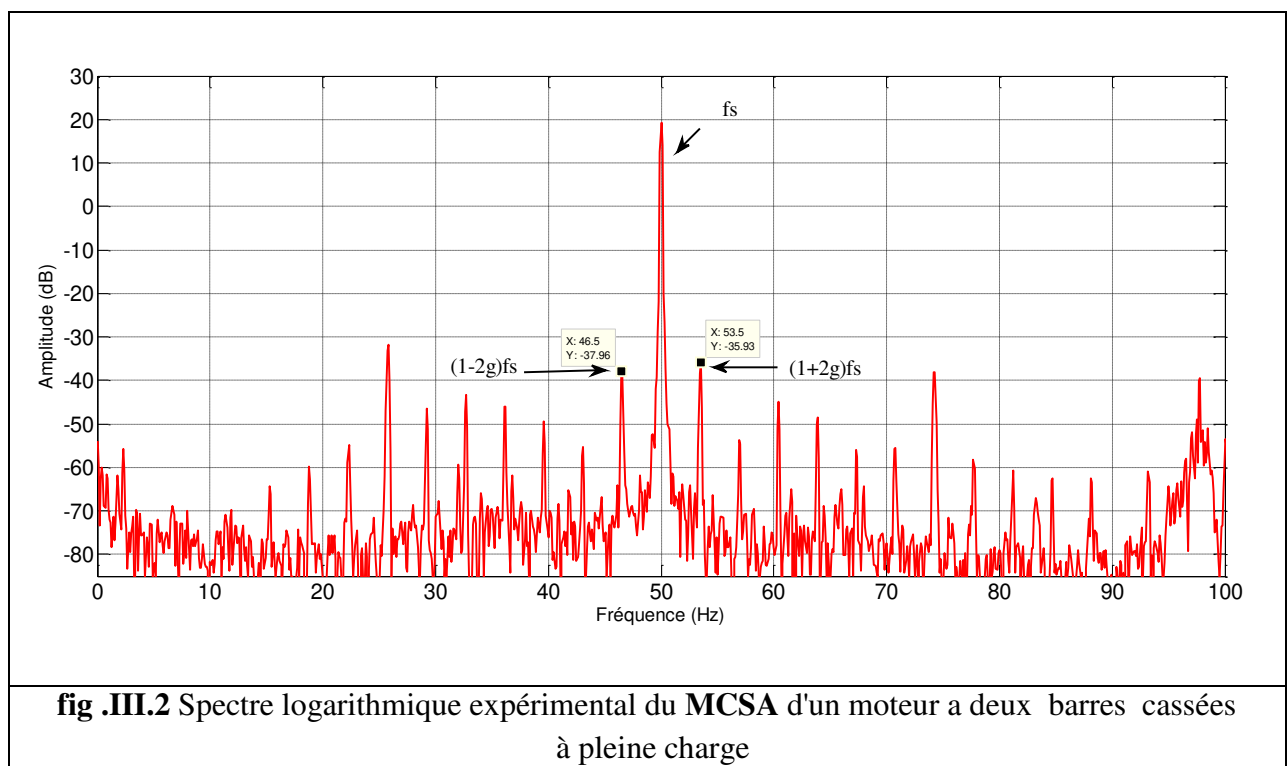
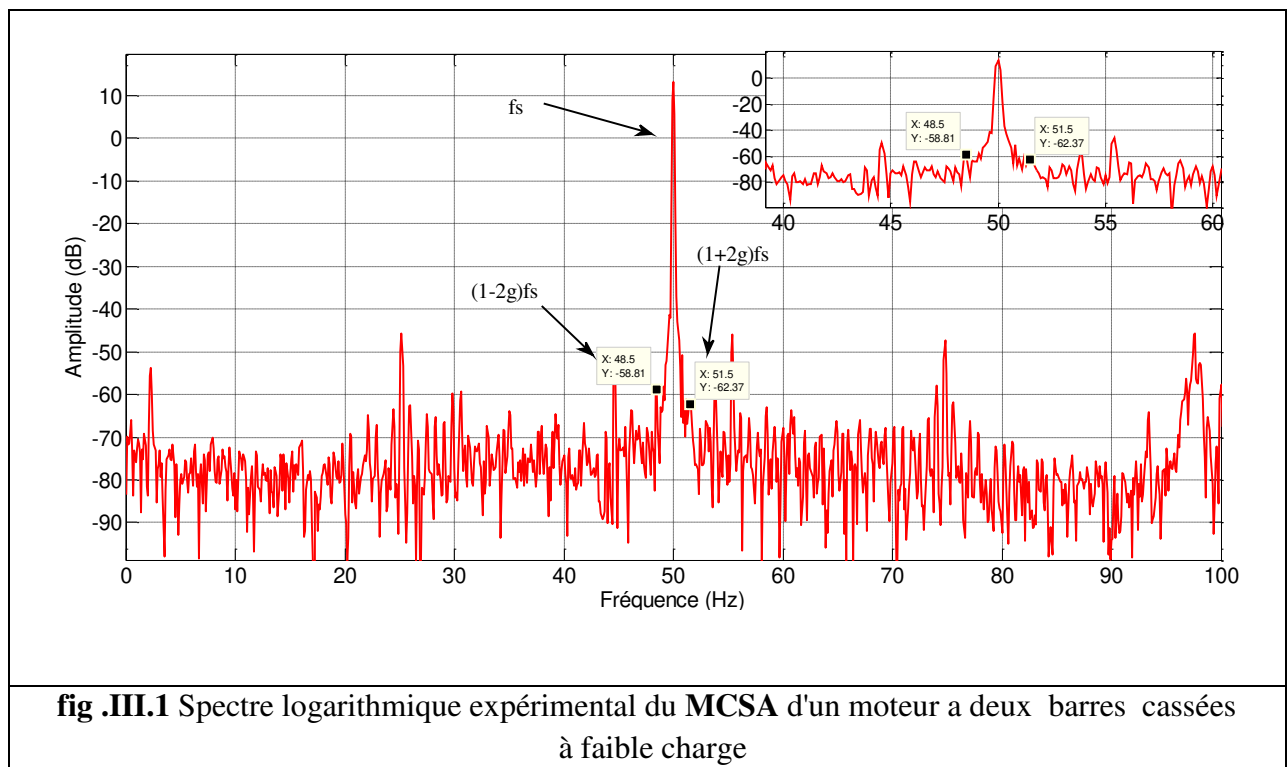
Pour montrer la sensibilité des nouvelles approches ou méthodes **l'une par rapport aux autres** techniques, nous avons fait une étude comparative entre les différentes approches afin de savoir : quelle approche jouit-elle de la meilleure sensibilité ? Les différentes techniques sont présentées dans la **Les fig .III.1. - fig.III.10.**

Afin de faire une bonne comparaison entre ces approches, nous devons aussi choisir les fréquences spécifiques de signatures dont l'amplitude est la plus grande.

Les fréquences des signatures caractéristiques des défauts statoriques ou rotoriques sont donnés dans Tab. III.1. qui suit:

**Tableau .III. 1** Fréquences caractéristiques des défauts

| Approches                              | Défaut rotorique<br>Cassure de barres |
|----------------------------------------|---------------------------------------|
| PVPA [ALL 16]                          | $(2 \pm 2g)f_s^a$                     |
| H PVPA [ALL 19]                        | $(8 \pm 2g)f_s^a$                     |
| PVSM <sub>P-H</sub> [SAH 14] [SAHR 10] | $2gf_s^a$                             |
| MSCSA [PIR 12]                         | $(2 \pm 2g)f_s^a$                     |
| MCSA                                   | $(1 \pm 2g)f_s^a$                     |





D'après le **Tab. III.1** et la **fig.III.1**, la fréquence de la signature de MCSA dont l'amplitude la plus grande est théoriquement égale à  $f_{cbl} = (1 + 2g)f_s$

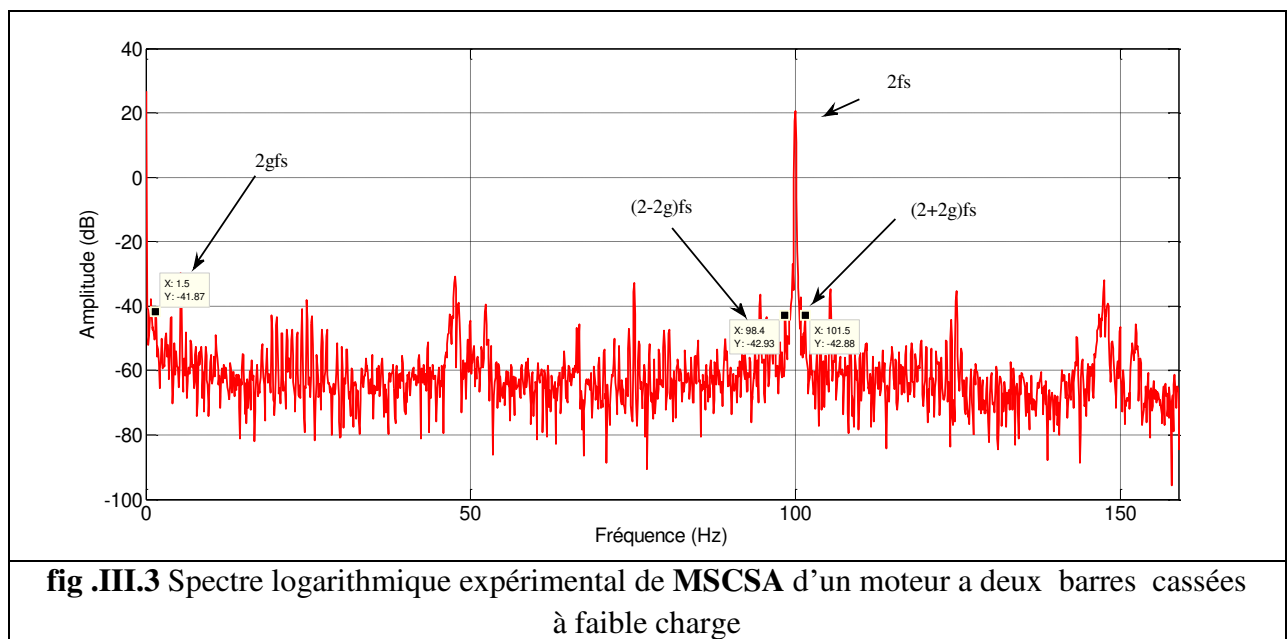
\* A faible charge le glissement vaut  $g = 0.015$ , la fréquence dont la signature est :

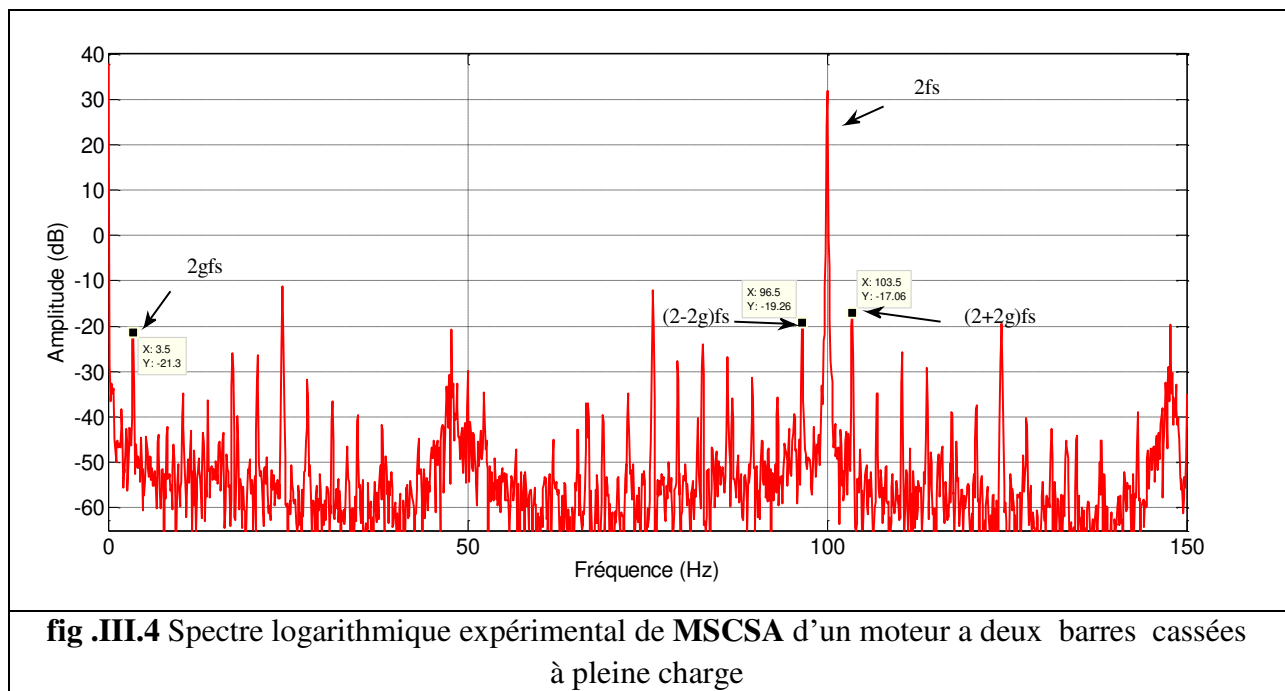
$$f_{cbl} = 51.5 \text{ Hz}$$

- Cassure de deux barres dont l'amplitude : -62.37 dB

\* A pleine charge , le glissement égale  $g=0.035$ , la fréquence vaut :  $f_{cbl} = 53.5 \text{ Hz}$ , la fréquence trouvée selon la **fig.III.2** :

- Cassure de deux barres dont l'amplitude : -35.93dB





D'après le **Tab. III.1** et **la fig.III.3**, la fréquence de la signature de MSCSA dont l'amplitude la plus grande est théoriquement égale à  $f_{c.b.t} = (2 + 2g)f_s$

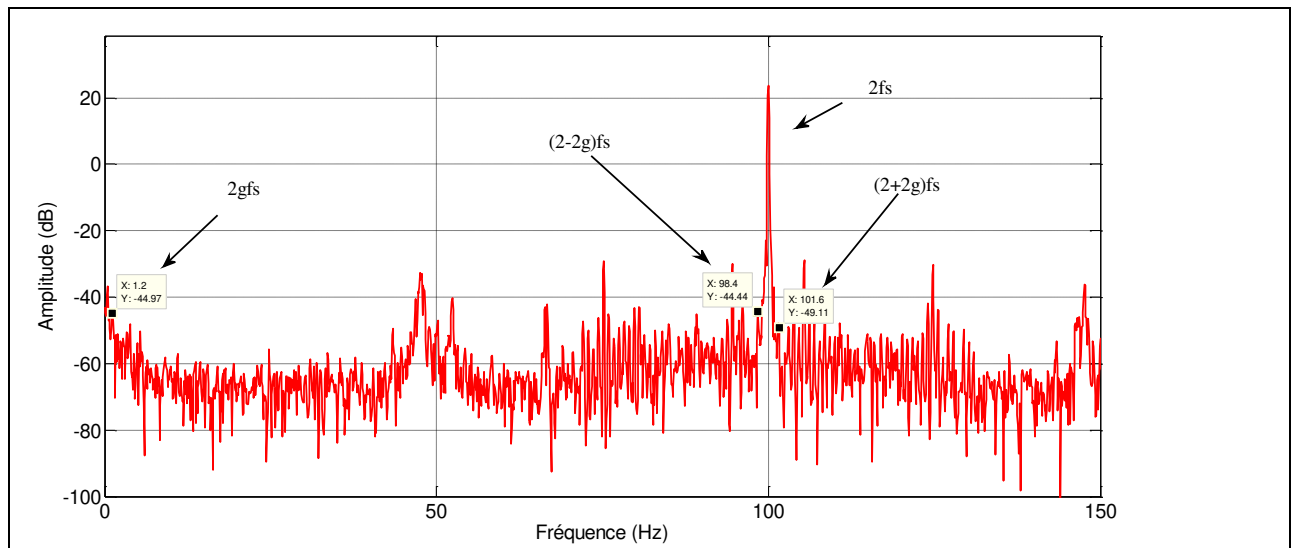
\* A faible charge le glissement vaut  $g = 0.015$ , la fréquence dont la signature est :

$$f_{c.b.t} = 101.5 \text{ Hz}$$

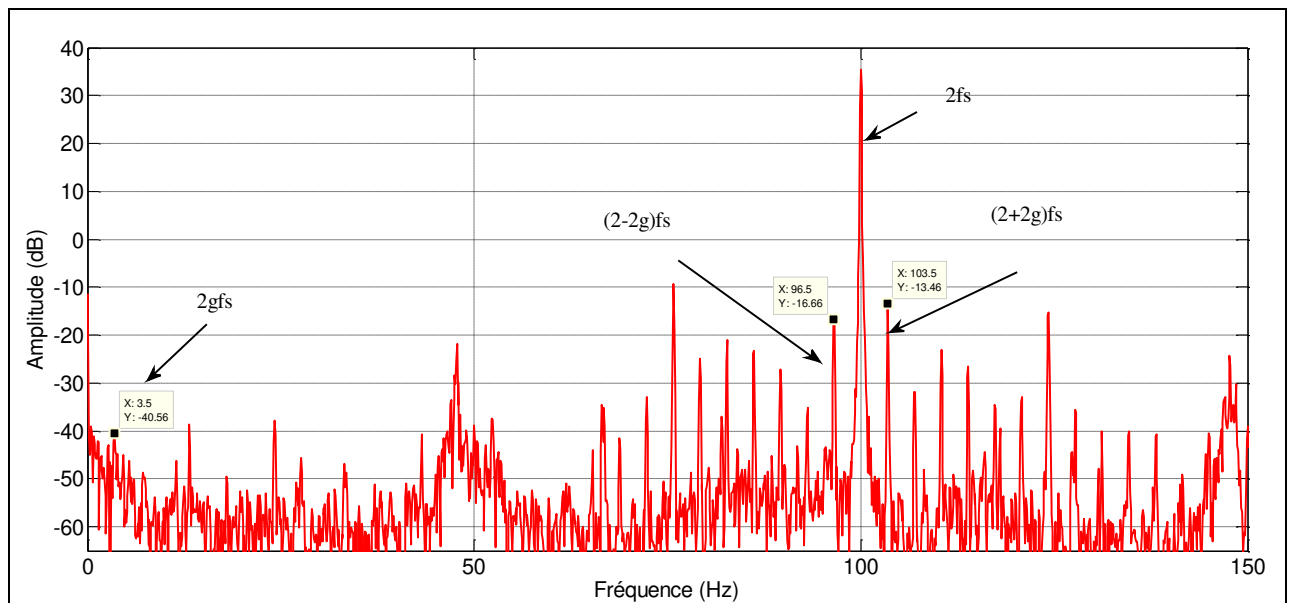
- Cassure de deux barres dont l'amplitude : -42.88 dB

\* A pleine charge , le glissement égale  $g=0.035$ , la fréquence vaut :  $f_{c.b.t} = 103.5 \text{ Hz}$ , la fréquence trouvée selon **la fig.III.4** :

- Cassure de deux barres dont l'amplitude :-17.06 dB



**fig .III.5.** Spectre logarithmique expérimental de PVPA d'un moteur a deux barres cassées à faible charge



**fig .III.6.** Spectre logarithmique expérimental de PVPA d'un moteur a deux barres cassées à pleine charge

D'après le **Tab. III.1** et la **fig.III.5**, la fréquence de la signature de **PVPA** dont l'amplitude la plus grande est théoriquement égale à  $f_{c.b.t} = (2 + 2g)f_s$

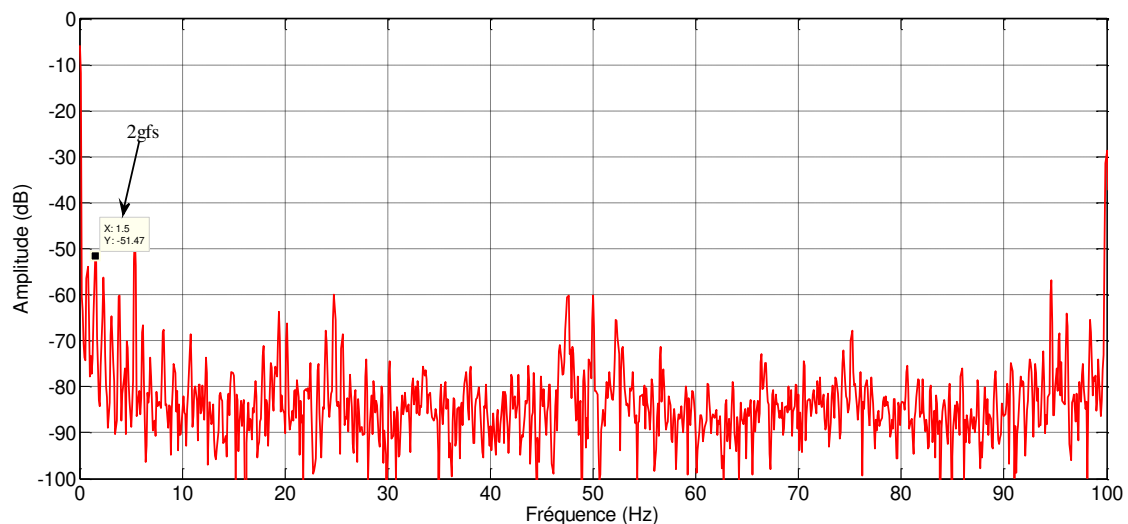
\* A faible charge le glissement vaut  $g = 0.015$ , la fréquence dont la signature est :

$$f_{c.b.t} = 101.5 \text{ Hz}$$

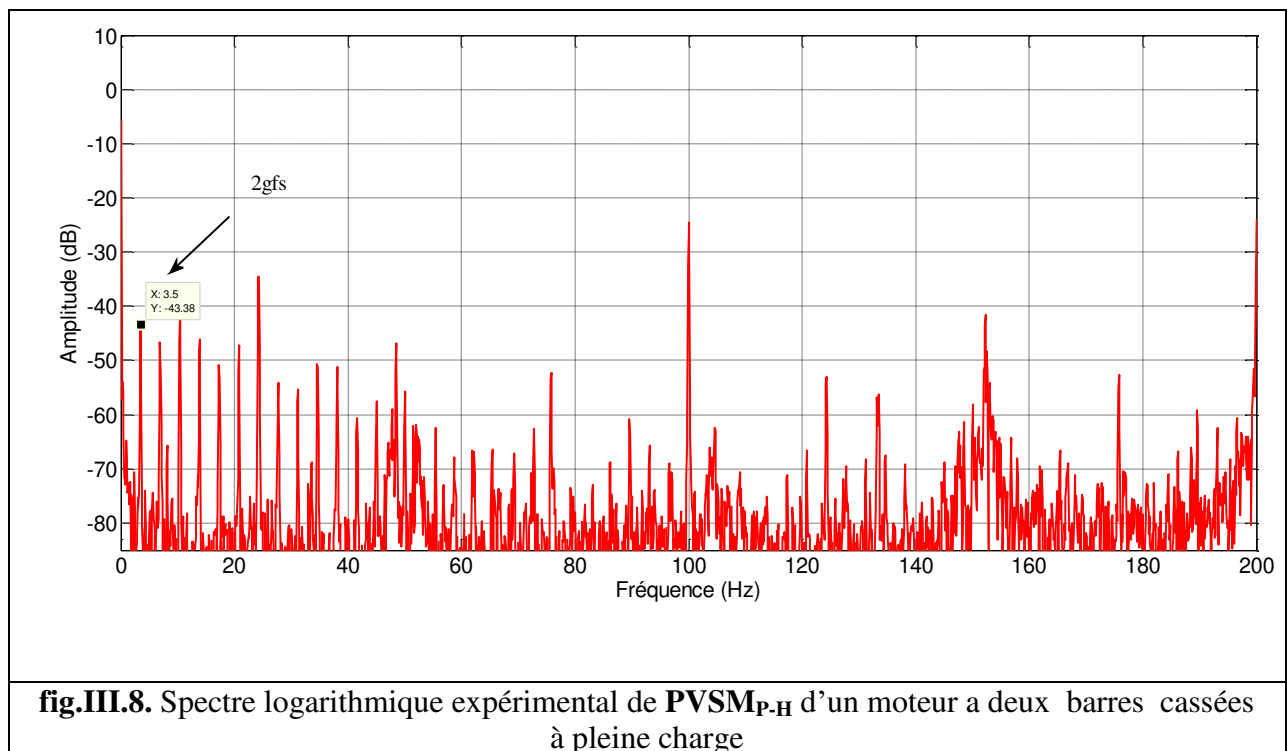
- Cassure de deux barres dont l'amplitude : -49.11 dB

\* A pleine charge , le glissement égale  $g=0.035$ , la fréquence vaut :  $f_{c.b.t} = 103.5 \text{ Hz}$ , la fréquence trouvée selon la **fig.III.6** :

- Cassure de deux barres dont l'amplitude :-13.46 dB



**fig.III.7.** Spectre logarithmique expérimental de **PVSM<sub>P-H</sub>** d'un moteur à deux barres cassées à faible charge



**fig.III.8.** Spectre logarithmique expérimental de  $PVSM_{P-H}$  d'un moteur à deux barres cassées à pleine charge

D'après le **Tab. III.1** et la **fig.III.7**, la fréquence de la signature de  $PVSM_{P-H}$  dont l'amplitude la plus grande est théoriquement égale à  $f_{c.b.t} = 2gf_s$

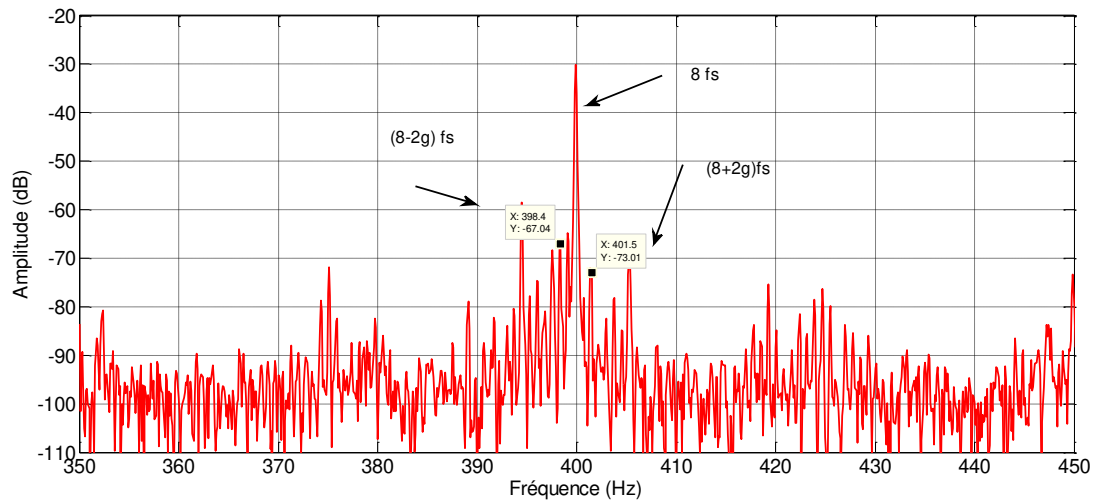
\* A faible charge le glissement vaut  $g = 0.015$ , la fréquence dont la signature est :

$$f_{c.b.t} = 1.5 \text{ Hz}$$

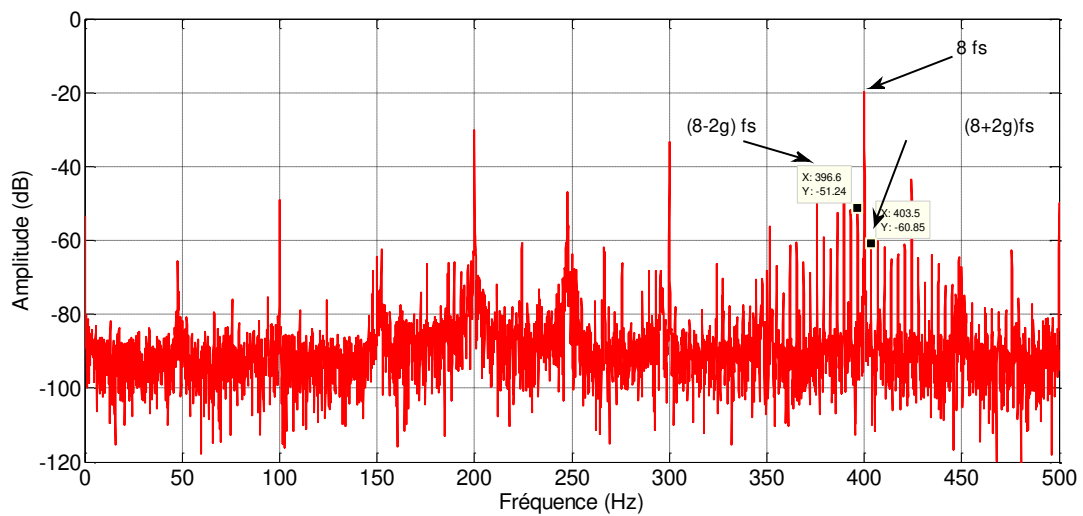
- Cassure de deux barres dont l'amplitude : -51.47 dB

\* A pleine charge, le glissement égale  $g=0.035$ , la fréquence vaut :  $f_{c.b.t} = 103.5 \text{ Hz}$ , la fréquence trouvée selon la **fig.III.8.** :

- Cassure de deux barres dont l'amplitude : -43.38 dB



**fig.III.9.** Spectre logarithmique expérimental de **HPVPA** d'un moteur a deux barres cassées à faible charge



**fig.III.10.** Spectre logarithmique expérimental de **HPVPA** d'un moteur a deux barres cassées à pleine charge

D'après le **Tab. III.1** et la **fig.III.9**, la fréquence de la signature de  $PVSM_{P-H}$  dont l'amplitude la plus grande est théoriquement égale à  $f_{c.bt} = (8 + 2g)f_s$

\* A faible charge le glissement vaut  $g = 0.015$ , la fréquence dont la signature est :

$$f_{c.bt} = 401.5 \text{ Hz}$$

- Cassure de deux barres dont l'amplitude : -73.01 dB

\* A pleine charge , le glissement égale  $g=0.035$ , la fréquence vaut :  $f_{c.bt} = 403.5 \text{ Hz}$ , la fréquence trouvée selon la **fig.III.10**.

- Cassure de deux barres dont l'amplitude :-60.85 dB

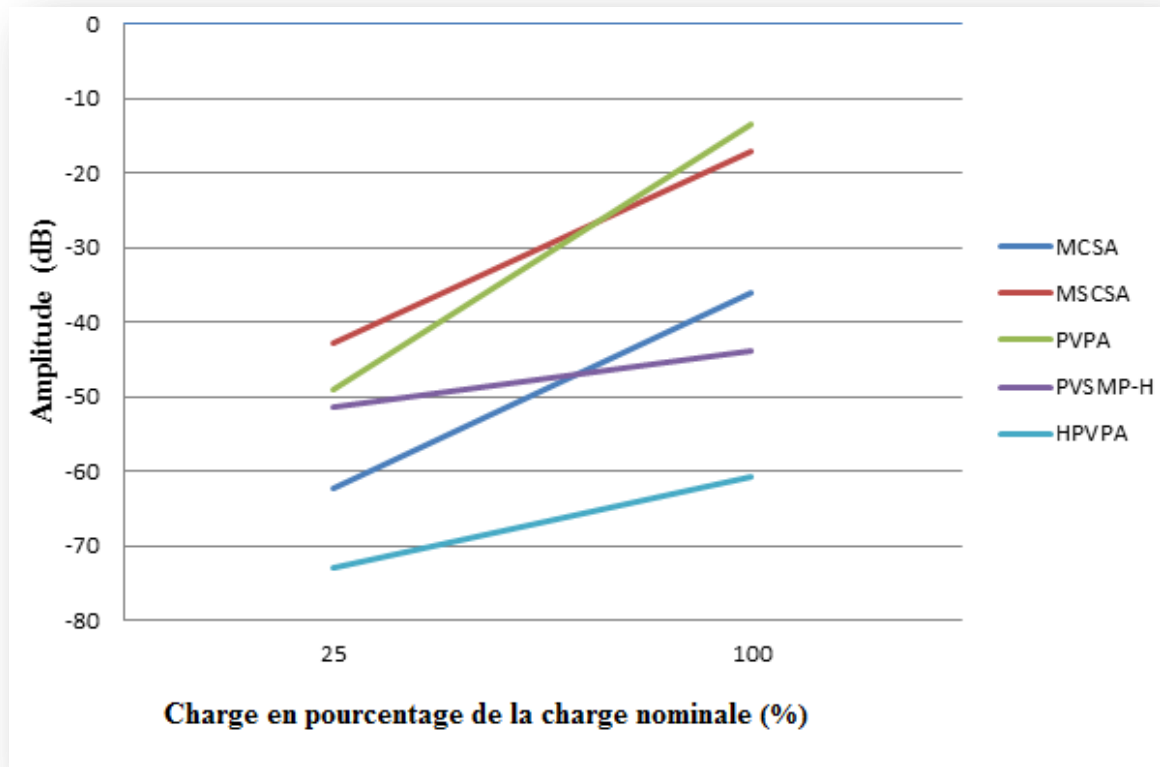
#### III.3.2. Analyse comparative des résultats expérimentaux

Après avoir obtenu tous les signatures spécifiques des différentes approches de divers défauts de la MAS ,en choisissant les signatures dont l'amplitude est la plus grande, nous dressons des graphes illustratives qui montrent la sensibilité de chaque méthode pour chaque type de défaut.

Le **fig .III.11**, nous montrent clairement ce travail de comparaison entre ces différentes techniques réalisées précédemment.

En mettant l'accent sur l' approche PVPA qui jouit d'une sensibilité presque elle domine toutes les autres méthodes de diagnostic à l'exception de MSCSA dans le cas où il y aurait un défaut rotorique de cassure de deux barres, mais cette dernière a une grande handicap dans le cas de pleine charge où il y aurait des défauts rotorique.

Pour ces raisons mentionnées ci-dessus, nous pouvons dire que l' approche PVPA a la meilleure sensibilité : sensibilité aux défauts rotoriques en précis dans le cassure des barres, (voir **Tab.III.2**).



**fig .III.11.** Courbes de sensibilité des différentes techniques avancées de diagnostic pour deux barre cassée (Résultats de simulation).

**Tableau.III.2.** Classement des techniques de diagnostic d’après leurs sensibilités expérimentales Moteur (3 kW).

| Techniques De Diagnostic | Défaut rotorique (Deux barres cassées) |               | Classement des techniques avancées de diagnostic |
|--------------------------|----------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------|
|                          | faible charge                          | pleine charge |                                                  |
| PVPA                     | 2                                      | 1             | 1                                                |
| MSCSA                    | 1                                      | 2             | 2                                                |
| MCSA                     | 3                                      | 4             | 3                                                |
| PVSM <sub>P-H</sub>      | 4                                      | 3             | 4                                                |
| HPVPA                    | 5                                      | 5             | 5                                                |

**Remarque:**

On note que la sensibilité en pleine charge (charge nominale) domine celle à faible charge



Le **Tab.III.2.** nous montre clairement le classement des différentes approches d'après leur sensibilité où nous trouvons l'approche **PVPA** position 1 puis **MSCSA** position 2 trônent ce tableau dans lequel il y a des techniques récemment élaborée.

Pour avoir encore l'exactitude de notre étude puisqu'elle est validée expérimentalement.

En analysant le classement final, nous pouvons voir les résultats logiques qui diffèrent selon la technique utilisée. Nous avons conclu que les méthodes PVPA puis MSCSA ont successivement la première puis la deuxième position de sensibilité. D'autre part, nous avons observé les méthodes classique MCSA puis PVSM<sub>P-H</sub> ont également la successivement la troisièmes puis la quatrième position de sensibilité, mais leur sensibilité est divergente. Enfin, à partir de l'expérience, nous avons conclu que la méthode HPVPA a une sensibilité médiocre pour les défauts rotoriques cinquième position mais elle jouit d'une excellente sensibilité pour les défauts statoriques d'après [ALL 19].

#### III.4.Conclusion

A partir de cette étude comparative, nous avons fait cette comparaison entre les méthodes techniques avancées. Cette comparaison est faite en utilisant le spectre logarithmique, dans un premier temps, à partir des résultats expérimentaux avec un moteur de 3 kW. Finalement nous avons trouvé techniques avancées PVPA et MSCSA dans les premières positions de sensibilité avec l'avantage que le PVPA est plus sensible dans les conditions nominales (charge nominale). Les autres résultats expérimentaux du classement final montrent selon le **Tab.III.2** nous avons observé que les méthodes classique MCSA puis PVSM<sub>P-H</sub> ont également la successivement la troisièmes puis la quatrième position. Enfin la méthode HPVPA a une sensibilité médiocre pour les défauts rotoriques puisqu'elle occupe la cinquième position mais elle jouit d'une excellente sensibilité pour les défauts statoriques d'après d'autres études faites. Cette étude nous montre clairement la meilleure méthode dans le but de l'exploiter industriellement surtout dans les secteurs important tel que de la nucléaire ou de la chimie.

# CONCLUSION GENERALE

# *CONCLUSION GENERALE*

Les machines électriques sont considérées comme le principal moteur des industries, comme en témoigne la renaissance des pays européens, qui suivent toujours le rythme des développements des grands pays.

Les problèmes auxquels sont confrontés les investisseurs dans l'industrie, en particulier dans le domaine de la programmation et de la réparation des défauts, accordent une grande importance aux travailleurs de ce domaine, car l'esprit doit contrôler quelque chose qui a été fabriqué par eux, de sorte que les ingénieurs et les chercheurs ont commencé à démanteler les caractéristiques de la machine à travers des théories physiques qui travaillent pour contrôler la machine. Ces sciences ont amené même les grands pays à attacher la plus haute importance à la création de laboratoires de recherche à un rythme industriel orienté vers l'investissement humain, ce qui a fait l'élément humain apprend la nécessité de fabriquer cette machine, en particulier dans le domaine industriel.

L'évolution du développement dans le monde industrialisé a mis tout le monde en concurrence dans le domaine de l'industrie, car elle cherche à développer la machine dans sa modernité encore plus rigide et résistante aux conditions naturelles résultant d'une mauvaise utilisation de la main-d'œuvre ou de phénomènes naturels tels que les températures élevées, la poussière sur les vents et la pluie qui peuvent s'infiltrer sur les chantiers. Fournir des moyens de prévention et de sécurité pour le composant humain d'une part et la machine elle-même, en plus de connaître les défauts constatés dans les pièces de la machine et de travailler sur le développement de méthodes de diagnostic allant des méthodes classiques aux méthodes avancées coûtant des êtres humains dangereux en plus du contrôle à distance et d'une connaissance précise de la qualité des dommages et du traitement rapide par peur des dommages D'autres. Tout cela nous a incités à nous efforcer de fournir un exemple concret afin de contribuer à l'enrichissement de la recherche scientifique pour trouver la meilleure technique avancée récemment proposée pour le diagnostic de ces machines, telle que : HPVPA (2019) PVPA(2016) PVSM<sub>P-H</sub> (2014) , MSCSA(2013) , et la méthode classique MCSA pour les défauts rotoriques.

Cette étude nous a permis de comparer des méthodes techniques avancées. Cette comparaison a été faite en utilisant le spectre logarithmique, dans un premier temps, des résultats expérimentaux avec un moteur de 3 kW, et finalement nous avons trouvé des techniques PVPA et MSCSA avancées aux premières positions de sensibilité avec l'avantage que le PVPA est plus

sensible dans des conditions nominales (charge nominale). D'autres résultats expérimentaux pour le classement final selon Tab III.2 sont présentés, nous avons observé que les méthodes classiques MCSA puis PVSMP-H occupent également respectivement la troisième et la quatrième place. Enfin, la méthode HPVPA a une sensibilité modérée aux défauts de rotor puisqu'elle se classe 5ème mais présente une excellente sensibilité aux défauts de stator selon d'autres études qui ont été menées. Car cette étude nous permet d'adopter des méthodes que l'on peut qualifier d'avancées du fait de la possibilité de les employer industriellement, notamment dans des secteurs très sensibles et avec une plus grande prudence, comme l'énergie nucléaire ou la chimie qui font partie des énergies à haute sensibilité car elles font partie des énergies qu'il faut traiter avec le plus haut degré de vigilance et de prudence. Être préoccupant en raison des substances dangereuses utilisées dans leurs formulations.

## *REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*

- [ABD 17] ABDELKEBIR ADEL. "Diagnostic d'un moteur à Induction en utilisant la transformée en ondelettes" .Master électrotechnique Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2017.
- [ABE 02] ABED. A " Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone", thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy, 2002.
- [ADE 06] ADERIANO M. da SILVA, BS. "Induction motor Fault diagnostic and monitoring methods " Une thèse soumise à la Faculté de l'École supérieure, Université Marquette, en exécution partielle des exigences pour le diplôme de maîtrise en génie électrique et informatique, Milwaukee, Wisconsin Mai 2006.
- [AHA 12] S. K. AHAMED, M. MITRA , S. SENGUPTA ,et AL., "Identification of mass-unbalance in rotor of an induction motor through envelope analysis of motor starting current at no load", Revue du Journal of Engineering Science and Technology, Vol 5 (No.1), 2012 ,p 83-89 .
- [ALL 12] A. ALLAL , B. CHETATE , D. BENATTOUS , "The Instantaneous Power Approach for Rotor Cage Fault Diagnosis in Induction Motor", 6 ème symposium sur les hydrocarbures et la chimie ISHC6,2012, (Zeralda, Alger).
- [ALL 10] ALLAL ABDERRAHIM «Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones » Thèse de Magister en Electrotechnique Univ FERHAT ABBAS –SETIF 2010.
- [ALL 16] A. ALLAL, B. CHETATE , "A new and best approach for early detection of rotor and stator faults in induction motors coupled to variable loads", Frontières de l'énergie, Vol 10 (No.2),2016, P 176-191.DOI: 10.1007/s11708-015-0386-2
- [ALL 17] A. ALLAL, "Nouvelles méthodes et techniques de diagnostic des machines asynchrones à rotor en cage d'écureuil (New methods and diagnostic techniques asynchronous machines of squirrel cage rotor) ) ", Thèse de doctorat en sciences, université de Boumerdes, Algérie, 2017 (en français).
- [ALL 19] ALLAL A et CHETATE B, "High sensitivity detection of the stator short-circuit faults in induction motor using Hilbert Park's vector product", J. Fundam. Appl. Sci., 2019, 11(2), 994-1022.
- [AMA 17] A. B. AMAR , "Direct Torque Control of a Doubly Fed Induction Generator", Journal international d'Energetica, Vol 2 (No.1), 2017 ,p 11-14.
- [ARK 17] ARKOUB .N et BODE DERE S. B. " Amélioration des performances du démarrage d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil avec insertion des pièces ferromagnétiques dans les encoches rotoriques". Master en électrotechnique. Université Abderrahmane Mira Bejaia 2017.
- [AYD 11] I. AYDIN, M. KARAKOSE, E. AKIN , "A new method for early fault detection and diagnosis of broken rotor bars", Conversion et gestion de l'énergie, Vol 52 (No.4) , 2011, P 1790–1799 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.11.018>
- [BAB 14] F. BABAA, "Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone Application au diagnostic des défauts statoriques", Thèse de Doctorat, université de Mentouri, Constantine, Alger, 2014.
- [BAC 02] SMAIL BACHIR, JEAN CLAUDE TRIGEASSAU,SLIM TNANI " Diagnostic des défauts statorique et rotoriques par identification paramétrique sans capteur de vitesse" , Conférence internationale francophone d'automatique Nantes8-10 juil 2002.
- [BAC 12] K. BACHA, S. BEN SALEM, A. CHAARI , "An improved combination of Hilbert and Park transforms for fault detection and identification in three-phase induction motors" , Systèmes d'alimentation électrique et d'énergie,Vol 43 (No.1),2012, p1006–1016. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.06.056>

- [BAZ 16]** BAZI SMAIL, " Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur", Ingénieur d'État en Électrotechnique de, Université de Batna 2016.
- [BEL 13]** BELBECHE ADEL " Modélisation, Diagnostic et Commande d'une Machine Asynchrone avec Rupture d'une Phase ", Diplôme Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Université de Batna 2013.
- [BEL 18]** BELACEL MOHAMMED. BOUDINA SEID, " Modélisation et simulation les défauts rotoriques d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil". Master 2 Electromécanique. Université Akli mohand Oulhadj – Bouira 2018.
- [BES 13]** NOUREDDINE BESSOUS, "Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones", magister en Electrotechnique, université de Constantine Algérie 2013.
- [BIG 94]** R. BIGRET, J. L. FERON, "Diagnostic, maintenance, disponibilité des machines tournantes", ELSEVIER MASSON, Décembre 1994.
- [Blo 09]** M. BLODT, J. REGNIER, et J. FAUCHER, "Distinguishing load torque oscillations and Bloeccentricity faults in induction motors using stator current Wigner distributions", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 45, no. 6, pp. 1991–2000, November/December 2009.
- [BON 93]** A. H. BONNET, "Cause and analysis of Anti-Friction Bering Failures in A.C Induction Motors" IEEE Transactions on Industry Application, pp 14 - 23, Sept/Oct 1993.
- [BOU 01]** TAREK BOUMEGOURA . " Recherche de Signatures Electromagnétiques des défauts dans une machine asynchrone et Synthèse d'observateurs en vue du diagnostic " Thèse de Doctorat , E.C.L. 2001-08.
- [BOU 06]** M. BOUCHERMA, M. Y. KAIKAA ,A. KHEZZAR , "Park model of squirrel cage induction machine including space harmonics effect", Journal of Electrical Engineering , Vo 1 57 (No.4), 2006, p 193-199 .
- [BOU 09]** ABLA BOUGUERNE, "diagnostique automatique des défauts des moteurs asynchrones", mémoire de magister Electrotechnique, université de Constantine, algerie2009.
- [DID 04]** DIDIER G., " Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ", Thèse de doctorat, Université Nancy 1, France, 2004.
- [DID 10]** G. DIDIER, E. TERNISEN, O. CASPARY, et AL. , "A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis", Systèmes mécaniques et traitement du signal, Vol 21(No.2), 2007, p 1127-1142. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.03.002>
- [DJE 12]** A. DJEBALA,N. OUELAA, C. BENCHAAABANE , et AL. , "Application of the wavelet multi- resolution analysis and Hilbert transform for the prediction of gear tooth defects", Meccanica, Springer Netherlands, Vol 47 (No.7), 2012, p 1601-1612. DOI: 10.1007/s11012-012-9538-1
- [EL K 10]** O.M. EL KAMEL "Surveillance et diagnostic des defauts rotoriques de la machine a induction avec differents types d'alimentation" these de doctorat, Universite Mentouri-Constantine, 2010.
- [ELK 92]** N. M. ELKASABGY, A. R. EASTHAM, G. E. DAWSON, " Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.28, no.1, Part 1, pp. 165-171, Jan.-Fév. 1992.
- [FRA 12]** FRATILA MIRCEA . "Contribution à la prise en compte des pertes fer dans la modélisation des machines électriques par éléments finis". Ingénierie assistée par ordinateur. Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2012.
- [GLO 13]** Z. GLOWACZ, J. KOZIK , " Detection of synchronous motor inter-tern faults based on spectral analysis of Park's vector", Arch. Metall. Mater., Vol 58 (No.1), 2013 ,p 19-23. <https://doi.org/10.2478/v10172-012-0144-y>
- [HUP 04]** J. HUPPUNEN , "High-speed solid-rotor induction machine electromagnetic calculation and desing",. Thèse de doctorat en sciences, Université de technologie de Lappeenranta, Finlande, 2004.

- [JOK 11] G. JOKSIMOVIC, J. RIGER , T. WOLBANK , et AL., "Stator line current spectrum content of a healthy cage rotor induction machine", Dans *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED)*, IEEE International Symposium on. Sept, IEEE, 2011, p 113-118. <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2011.6063610>
- [KEC 13] R. KECHIDA A. MENACER, , H. TALHAOUI , " Approach signal for rotor fault detection in induction Motors", *Journal d'analyse et de prévention des pannes*, Vol 13 (No.3), 2013,p 346-352.
- [KER 16] KERFALI SAMIR, "Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone", thèse de doctorat,. université d'Annaba Algérie 2016.
- [KER 17] KERROUM BADREDDINE, " Etude et Diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction", mémoire de Master Electromécanique, université d'Annaba Algérie 2017.
- [KUM 12] A. KUMAR ",A new method for early detection of inter-turn shorts in induction motors" , 2eme Conférence internationale sur les systèmes électriques et énergétiques,2012 , (Singapore), IACSIT Press,2012, vol. 56, p. 41.
- [LOU 06] LOURES R, "Surveillance et diagnostic des phases transitoires des systèmes hybrides basés sur l'abstraction des dynamiques continues par réseau de pétri temporel flou", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2006.
- [MAG 06] A.MAGHRAOUI, A.DÉBOUCHA, "Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage". Diplôme Ingénieur d'Etat en Electromécanique UNIVERSITE DE M'SILA (Algerie) 2006.
- [PET 13] M. U. PETUSHKOV, " Analysis of defects in the rotor asynchronous motor during star", *Revue internationale de recherche appliquée et fondamentale*, (No.1), 2013, p 1-1.
- [PIR 12] V. F. PIRES, M. KADIVONGA , J. F. MARTINS ,et AL. ",Motor square current signature analysis for induction motor rotor diagnosis" , *Measurement*, Vol 46 (No.2), 2013, p 942–948. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.10>.
- [RAZ 03] RAZIK H., " Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone ", Groupe de Recherches en Electrotechnique et Electronique, Université de Henri Poincaré Nancy, France, 2003.
- [RAZI 03] H. RAZIK et G. DIDIER, "On the Monitoring of the Defects of Squirrel Cage Induction Motors" Article accepté pour présentation en 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, June 23th-26th, Bologna, Italy 0-7803-7967-5/03/\$17.00 ©2003 IEEE
- [RIO 89] F. RIOUX-DAMIDAU, C.RIOUX, A.GUERAUD , " Machines asynchrones à rotor massif composite " *revue de physique Appl* 24 p 1039-1047,Nov 1989.
- [SAD15] SADKI NOUR ELHOUDA, " Simulation des défauts statorique d'un moteur a asynchrone", mémoire master en Electrotechnique, université Ouargla 2015.
- [SAH 05] M. SAHRAOUI , A. GHOGGAL, A. ABOUBOU, S. E. ZOUZOU, " Modèle Mathématique Dédie a la Simulation des Courts-Circuits Entre Spires des Enroulements Statoriques dans les Moteurs à Induction", 2ème Séminaire National sur les Systèmes Electromécaniques, (SNSEM'05), Octobre 2005,Université Mohamed Khider,( Biskra- Algérie). p 1-10.
- [SAH 10] M. SAHRAOUI , S. E. ZOUZOU, A. GHOGGAL ,et AL. , "A new method to detect inter-turn short- circuit in induction motors",19eme Conférence internationale sur la machine électrique (ICEM, 2010), septembre 2010, (Rome, Italie), IEEE, 2010 ,p 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2010.5607854>
- [SAH 14] M. SAHRAOUI , A. GHOGGAL, S. GUEDIDI , et AL. , "Detection of inter-turn short-circuit in induction motors using Park–Hilbert method", *International Journal of System Assurance Engineering and Management* , Vol 5 (No.3),2014,p 337-351. DOI:10.1007/s13198-013-0173-6

- [SAHR 10]** SAHRAOUI MOHAMED, "Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones", Thèse De Doctorat en Science En Electrotechnique Université Biskra. Algerie.2010
- [SOB 98]** T. J. SOBCZYK, A. LZWORSKI, "Recognition of rotor eccentricity of induction motor based on the fourier spectra of phase currents" Proc. ICEM'98, pp. 408 – 413 , Vol 1, september 2 - 4 1998 Istanbul Turkey.
- [SRI 06]** T. SRIBOVORNMONGKOL , "Evaluation of motor online diagnosis by FEM simulations", Mémoire de master, Royal Institute of Technology Stockholm, Suède, 2006.
- [THO 01]** W. T. THOMSON, M. FENGER, "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults", IEEE Industry Application Magazine, July/August 2001, pp. 26-34.
- [TOM 96]** Maintenance industrielle, TOME L , Méthodes et outils AFNOR, 1996.
- [YAH 95]** H. YAHOU, J. SEETOHUL, G. GRELLET, A. JAMMAL, "Detection of broken bar or endring fault in asynchronous machines by spectrum analysis of the observed electromagnetic torque through supply cable" Revue Européenne de Diagnostic et Sûreté de Fonctionnement, Vol.5, no.4, 1995.
- [ZAM 08]** ZAMECHE.A et ZIANI.A , "Etude et modélisation du moteur asynchrone à encoches profondes". Mémoire d'ingéniorat en électrotechnique, université de Bejaia 2008.
- [ZAR 09]** J. ZAREI , J. POSHTAN , "An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection", Tribol. Int., Vol 42(No.2), 2009, p 213-219. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.06.002>
- [ZOU 10]** S. E. ZOZOU. , M. SAHRAOUI , A. GHOGGAL, et AL. , "Detection of inter- turn short-circuit and broken rotor bars in induction motors using the partial relative indexes: application on the MCSA", 19 éme., Conférence internationale sur la machine électrique (ICEM, 2010),septembre2010,(Rome,Italie),IEEE,2010,p1-6.  
<https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2010.5607874>



## Annexe 1

Pour nos résultats expérimentaux, nous avons utilisé une machine dans le Laboratoire génie électrique université Biskra avec ses caractéristiques détaillées sont données comme suit :

**Tableau A.2.** Paramètres du moteur (MAS) (essais expérimentaux)

| Symboles   | Paramètres                  | Valeurs     |
|------------|-----------------------------|-------------|
| $V_n$      | Tension nominale            | 230/380 V   |
| $I_n$      | Courant nominale            | 6.40 A      |
| $\omega_n$ | Vitesse nominale            | 1430 tr/min |
| $N_r$      | Nombre de barres rotoriques | 28          |
| $p$        | Nombre de paire de pôle     | 2           |
| $f_s$      | Fréquence d'alimentation    | 50 Hz       |