



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Électrotechnique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Machine Electrique

Présenté par :

1. Ahmed Ferhat
2. Abid Abd Elbasset

Intitulé :

***Diagnostic des défauts rotoriques des moteurs
à induction par AROMA***

AROMA: Advanced Residual Optimal Mapping Approach

<i>Dr : Kechida Rida</i>	Président
<i>Dr : Chikha El Said</i>	Examineur
<i>Dr : Allal Abderrahim</i> <i>Dr : Khachkhouch Ali</i>	Encadreur

Année académique : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ
وَالَّذِي يُضَوِّتُ لِلْجِبَالِ
شُجْرًا وَأَنْبُسًا فَهُمْ
رَكُوعٌ لِلَّذِي أُخْتَصِرُ
فِيهِ السُّجُودُ الْحَمْدُ
لِلَّهِ الَّذِي هُوَ أَعْلَمُ
بِمَا نُصَلِّى

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
1420

BONTONY





Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Allah Tout-Puissant de nous avoir donné le courage, la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur, Monsieur Allal Abderrahim, pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa contribution générale au développement de ce travail.

Nous remercions également nos enseignants de la faculté de technologie.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à tous nos proches et amis qui nous ont toujours soutenus et encouragés dans la réalisation de ce mémoire.



Dédicaces

Je dédie ce mémoire

*A tout ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont
toujours accordé*

Ames frères.

Je leur souhaite tout succès...tout le bonheur

A mes amis et mes camarades

*Pour une sincérité merveilleuse....jamais oubliable, en leur
souhaitant Tout le succès...tout le bonheur.*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du
Primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement
supérieur.*

A toute personne

Qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie

• ***FERHAT Ahmed***



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma mère avec toute mon affection.

A mon père avec toute ma reconnaissance.

A mes frères et mes sœurs.

A ma famille.

A tous mes amis.

✓ *ABID Abdelbasset*

Sommaire	
Contenu	Page
Remerciement	
Dédicaces	
Liste de figure	
Liste de tableau	
Liste de Symboles	
Liste abréviation	
Résumé	
Introduction Générale	
Chapitre: I : Etat de l'Art moteurs à induction et leurs défauts rotoriques	
<i>I.1 Introduction</i>	<i>5</i>
<i>I.2 machine asynchrone</i>	<i>5</i>
<i>I.2.1 Constitution de la machine asynchrone :</i>	<i>5</i>
<i>I.2.1.1 - stator</i>	<i>7</i>
<i>I.2.1.2 rotor à cage</i>	<i>8</i>
<i>I.2.1.3 organes mécaniques</i>	<i>8</i>
<i>I.2.2 Principe de fonctionnement</i>	<i>9</i>
<i>I.2.2.1 Fonctionnement à vide</i>	<i>10</i>
<i>I.2.2.2 Fonctionnement en charge</i>	<i>10</i>
<i>I.2.2.3 Caractéristique mécanique $T_n = f(n')$</i>	<i>10</i>
<i>I.2.3 La différence entre moteur synchrone et asynchrone</i>	<i>10</i>
<i>I.3 Défauts dus à la machine asynchrone</i>	<i>11</i>
<i>I.3.1 Défaillances d'ordre électriques</i>	<i>11</i>
<i>I.3.1.1 Défauts statoriques</i>	<i>11</i>
<i>I.3.1.2 Défauts rotorique</i>	<i>12</i>
<i>I.3.2 Défauts mécanique</i>	<i>13</i>
<i>I.3.2.1 Défauts de roulements</i>	<i>13</i>
<i>I.3.2.2 Défauts d'excentricité</i>	<i>14</i>
<i>I.4 Les pannes spécifiques à la partie tournante</i>	<i>14</i>
<i>I.4 .1 Déséquilibre et vibrations excessives</i>	<i>14</i>
<i>I.4 .2 Défaillance des roulements</i>	<i>15</i>
<i>I.4 .3 Problèmes d'engrenages</i>	<i>15</i>
<i>I.4 .4 Défauts du rotor et de l'arbre</i>	<i>15</i>
<i>I.4 .5 Problèmes liés à la vitesse de rotation</i>	<i>15</i>
<i>I.5 Les causes et les effets des défaillances spécifiques du rotor sur performance du moteu</i>	<i>16</i>
<i>I.5.1 Causes des défaillances du rotor</i>	<i>16</i>
<i>I.5.1.1 Court-circuit des barres rotorique(s)</i>	<i>16</i>
<i>I.5.1.2 Déséquilibre mécanique</i>	<i>16</i>

<i>I.5.1.3 Usure et dégradation thermique</i>	<i>16</i>
<i>I.5.2 Effets sur la performance du moteur</i>	<i>16</i>
<i>I.5.2.1 Diminution du couple et de la puissance</i>	<i>16</i>
<i>I.5.2.2 Augmentation des pertes et surchauffe</i>	<i>16</i>
<i>I.5.2.3 Vibrations et usure prématurée</i>	<i>16</i>
<i>I.6 Les méthodes traditionnelles de détection de ces défaillances</i>	<i>16</i>
<i>I.6.1 Analyse spectrale (FFT)</i>	<i>16</i>
<i>I.6.2 Analyse d'enveloppe</i>	<i>17</i>
<i>I.6.3 Méthodes complémentaires</i>	<i>17</i>
<i>I.7 Conclusion</i>	<i>17</i>
Chapitre: II : Techniques avancées pour le diagnostic de moteurs à induction	
<i>II.1 Introduction :</i>	<i>19</i>
<i>II.2 Méthodes de détection et de diagnostic des défauts de la machine asynchrone</i>	<i>19</i>
<i>II.2.1 Détection à partir des méthodes internes (connaissance a priori)</i>	<i>20</i>
<i>II.2.2 Détection à partir des méthodes externes (sans connaissance a priori)</i>	<i>21</i>
<i>II.2.2.1 Analyse des signaux vibratoires</i>	<i>22</i>
<i>II.2.2.2 Analyse du couple électromagnétique</i>	<i>23</i>
<i>II.2.2.3 Analyse du flux</i>	<i>23</i>
<i>II.2.2.4 Analyse du vecteur de Park</i>	<i>23</i>
<i>II.2.2.5 Diagnostic par les analyses chimiques</i>	<i>24</i>
<i>II.2.2.6 analyse de la température : La Thermographie</i>	<i>24</i>
<i>II.2.2.7 Analyse des courants statoriques</i>	<i>25</i>
<i>II.3 Les approches récentes de diagnostic des défauts les plus utilisées</i>	<i>25</i>
<i>II.3.1 Le diagnostic par la méthode NRHA</i>	<i>25</i>
<i>II.3.1.1 Courants statoriques du moteur</i>	<i>25</i>
<i>II.3.1.2 Spectre FFT directement par l'expression générale</i>	<i>27</i>
<i>II.3.1.2 Résultats expérimentaux et discussion</i>	<i>27</i>
<i>II.3.2 Diagnostic des défauts à l'aide de PVPA</i>	<i>28</i>
<i>II.3.2.2 Interprétations des résultats de simulation</i>	<i>30</i>
<i>II.3.3 Approche proposée de diagnostic basée sur L'AROMA</i>	<i>30</i>
<i>II.3.4 Diagnostic du défaut rotorique du MI par la méthode Hilbert-FFT</i>	<i>31</i>
<i>II.3.4.1 Méthode Hilbert-FFT (HFFT)</i>	<i>31</i>
<i>II.3.4.2 Méthodologie générale proposée pour diagnostiquer le défaut cassure de barre rotorique</i>	<i>32</i>
<i>II.3.5 Détection de défaut à l'aide de l'approche vectorielle de Hilbert Par</i>	<i>33</i>

<i>II.3.6 Analyse de la signature du courant carré du moteur MSCSA</i>	<i>35</i>
<i>II.3.7 Méthode Park-Hilbert (PVSM_{P-H})</i>	<i>36</i>
<i>II.4 Conclusion</i>	<i>36</i>
<i>Chapitre: III : Résultats expérimentaux de diagnostic basée sur AROMA</i>	
<i>III.1.Introduction</i>	<i>38</i>
<i>III.2.Configuration expérimentale</i>	<i>38</i>
<i>III.3.Analyse des signaux</i>	<i>38</i>
<i>III.4.Approche proposée de diagnostic basée sur L'AROMA</i>	<i>38</i>
<i>III.5:Résultats expérimentaux</i>	<i>39</i>
<i>III.6:Amplitude de l'harmonique la plus sensible</i>	<i>47</i>
<i>III.7:Résultats expérimentaux La technique AROMA</i>	<i>48</i>
<i>III.8. Conclusion</i>	<i>52</i>
<i>Conclusion générale</i>	
<i>Référence</i>	

Liste de figures

Chapitre: I : Etat de l'Art moteurs à induction et leurs défauts rotoriques	
<i>Fig. I.1 : Machine à induction</i>	6
<i>Fig. I.2 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage</i>	6
<i>Fig. I.3: Vue schématique en perspective du stator</i>	7
<i>Fig. I.4: Stator du moteur asynchrone</i>	7
<i>Fig. I.5:Rotor à cage</i>	8
<i>Fig. I.6 : Vue schématique en Perspective du rotor</i>	8
<i>Fig. I.7 : Principe du fonctionnement d'un moteur</i>	9
<i>Fig. I.8 : Caractéristique mécanique du moteur</i>	10
<i>Fig. I.9 : moteur synchrone et asynchrone</i>	11
<i>Fig. I.10 : représente d'un court-circuit dans une bobine</i>	12
<i>Fig. I.11 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil</i>	13
<i>Fig I.11: Roulement à bille</i>	13
<i>Fig.I.12: Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte</i>	14
Chapitre: II : Techniques avancées pour le diagnostic de moteurs à induction	
<i>Fig. II.1:Principe général de diagnostic à base de modèle</i>	20
<i>Fig. II.2:Principe de la surveillance par analyse spectrale</i>	22
<i>Fig. II.3:Capteur de température dans une plaque à bornes</i>	24
<i>Fig. II:4:Image colorée infrarouge thermique</i>	25
<i>Fig. II.5:Schéma bloc représentant le diagnostic par la méthode NRHA</i>	26
<i>Fig. II.6: Spectres zoomés du NRHA pour moteurs défectueux</i>	28
<i>Fig. II.7:Diagnostic des défauts dans le moteur à induction à l'aide de</i>	29
<i>Fig. II.8: Spectre de simulation de la PVPA pour un moteur en charge (100%)</i>	30
<i>Fig. II.9:Schéma illustratif du processus de diagnostic utilisant la méthode AROMA</i>	31
<i>Fig. II.10: Cadre général de la méthode de détection de défaut de cassure de barre rotorique</i>	33
<i>Fig. II.11:Diagnostic des défauts du stator dans le moteur à induction avec l'utilisation de différentes approches</i>	34
Chapitre: III : Résultats expérimentaux de diagnostic basée sur AROMA	
<i>Fig III.1.: Spectre FFT pour 20% de la charge nominale</i>	39
<i>Fig III. 2: Spectre FFT pour 60% de la charge nominale</i>	41
<i>Fig III. 3: Spectre FFT pour 100% de la charge nominale</i>	43
<i>Fig III. 4 :Spectre FFT résiduel pour 20% de la charge nominale</i>	46
<i>Fig III.5 :Spectre FFT résiduel pour 60% de la charge nominale</i>	46
<i>Fig III. 6 :Spectre FFT résiduel pour 100% de la charge nominale</i>	46
<i>Fig. III.7.Schéma illustratif du processus de diagnostic utilisant la méthode</i>	47
<i>Fig. III.8. La technique AROMA pour un IM fonctionnant à 20% de la charge.</i>	48
<i>Fig. III.9. La technique AROMA pour un IM fonctionnant à 60% de la charge.</i>	48
<i>Fig. III.10. La technique AROMA pour un IM fonctionnant à 60% de la charge.</i>	48
<i>Fig. III.11 .indice de diagnostic résiduel la méthode d'AROMA</i>	50
<i>Fig. III.12 .Sévérte de défaut liée à la charge</i>	51
<i>Fig III. 13. Organigramme de la méthode de détection des pannes AROMA.</i>	52

Liste de Tableau

Chapitre: III : Résultats expérimentaux de diagnostic basée sur L'AROMA

TABLEAU.III.1 : Analyse des harmoniques latéraux et des courants de défaut selon le taux de charge dans un moteur asynchrone 45

TABLEAU.III.2 : Caractéristiques des machines utilisées 62

Liste des symboles

n_0 : vitesse à vide.

n_s : vitesse de synchronisme.

C_u : couple à vide.

C_0 : couple résistant à vide.

C_r : couple résistant.

f_{cc} : Fréquence de court-circuit.

f_s : Fréquence d'alimentation.

f_r : fréquence de rotation.

g : Glissement.

p : Nombre de paires de pôles.

f_{brc} : fréquence des bandes latérales dues à la rupture de barres du rotor.

f_v : fréquences caractéristiques des vibrations.

f_{rou} : fréquence de roulement.

f_{exc} : fréquence liée à l'excentricité.

$i_{sa}(t), i_{sb}(t), i_{sc}(t)$: Courant statorique de phase.

$i_d(t), i_q(t)$: Courant statorique biphasées.

i_{dP-H}, i_{qP-H} : Courant statorique biphasées Park-Hilbert.

\hat{I}_F : courant maximal de phase.

i_m : valeur maximale du vecteur de Park du courant.

h : Ordre harmonique tempore.

S^\pm : (RSH).

R^\pm : (RBFH).

E^\pm : (EFH).

Δf : résolution en fréquence .

f_e : fréquence d'échantillonnage.

t_a : temps d'acquisition.

ωt : fréquence angulaire.

N_r : Nombre de barres rotoriques.

Liste des abréviations

MI : moteurs à induction.

NRHA: normalized residual harmonic analysis method.

AROMA : Advanced Residual Optimal Mapping Approach .

EFH : Eccentricity fault harmonics.

FFT : Fast Fourier transform.

RBFH : Rotor bar fault harmonics.

RSH : Rotor Slot Harmonics.

RSHS : Series of frequency.

TH : Time harmonics.

PVPA : Park's Vector Product Approach.

HPVPA : Hilbert Park's Vector Product Approach.

MSCSA : Motor square current signature analysis.

PVSMP-H : Park–Hilbert Park's vector square.

HFFT : Transformée de Hilbert avec transformée de Fourier rapide.

Résumé

Cette étude vise à traiter le problème des défaillances pouvant affecter les moteurs à induction , en particulier lorsqu'ils fonctionnent dans des conditions sévères qui nuisent à leurs performances. Pour faciliter la détection précoce de ces défaillances, l'étude propose une nouvelle méthode de diagnostic basée sur l'analyse de quatre types d'harmoniques : les harmoniques des encoches du rotor, les harmoniques temporelles, les harmoniques d'excentricité et les harmoniques des défauts de barres de rotor, en utilisant la technique de la transformée de Fourier rapide (FFT). Les résultats ont montré que les harmoniques temporelles (TH) sont les plus sensibles pour détecter les défauts du rotor, avec des valeurs résiduelles mesurées à 0.736 A en pleine charge et 0.971 A en demi-charge Elle a atteint 0.700 A sous faible charge. Une méthode appelée AROMA a également été développée. Elle repose sur la comparaison entre les signaux réels du moteur et un signal de référence sain, ce qui permet de déterminer précisément la gravité du défaut, atteignant 11.676 A en pleine charge et 8.494 A en demi-charge Et 6.128 A sous faible charge.

Cette approche s'est révélée très efficace pour améliorer la précision du diagnostic, contribuant ainsi à réduire les arrêts imprévus et les coûts de maintenance, ce qui représente une avancée significative pour optimiser les performances des moteurs en environnement industriel.

Mots clés : moteur à induction , défauts du rotor , maintenance, AROMA

المخلص

تهدف هذه الدراسة إلى معالجة مشكلة الأعطال التي قد تصيب المحركات الحثية، خاصة عند تشغيلها في ظروف قاسية تؤثر على أدائها. ولتسهيل الكشف المبكر عن هذه الأعطال، تقترح الدراسة طريقة تشخيصية جديدة تعتمد على تحليل أربعة أنواع من التوافقيات: توافقيات فتحات الدوار، التوافقيات الزمنية، توافقيات الانحراف، وتوافقيات أعطال قضبان الدوار، وذلك باستخدام تقنية التحويل السريع الفورية (FFT). أظهرت النتائج أن التوافقيات الزمنية (TH) كانت الأكثر حساسية لاكتشاف أعطال الجزء الدوار، حيث تم تسجيل قيم متبقية بلغت 0.736 أمبير عند الحمل الكامل و 0.971 أمبير عند نصف الحمل وبلغت 0.700 أمبير عند الحمل الضعيف. كما تم تطوير نهج AROMA ، الذي يعتمد على مقارنة الإشارات الفعلية للمحرك بإشارة مرجعية سليمة، ما مكن من تحديد شدة العطل بدقة، والتي وصلت إلى 11.676 أمبير في حالة الحمل الكامل و 8.494 أمبير في نصف الحمل و 6.128 أمبير عند الحمل الضعيف. تُظهر هذه الطريقة فعالية كبيرة في تحسين دقة التشخيص، مما يساعد في تقليل فترات التوقف غير المخطط لها ويقلل من تكاليف الصيانة، وهو ما يُعد خطوة مهمة نحو تحسين أداء المحركات في البيئات الصناعية.

الكلمات المفتاحية : المحركات الحثية ، الجزء الدوار ، الصيانة ، AROMA



Introduction
générale

Introduction générale :

Les moteurs asynchrones constituent un pilier fondamental dans de nombreuses applications industrielles grâce à leur robustesse et à leur haute efficacité. Toutefois, leur exposition à divers types de pannes, qu'elles soient électriques ou mécaniques, peut entraîner une dégradation des performances, une augmentation des coûts de maintenance ou même un arrêt soudain de l'activité. Cette étude vise à mettre en lumière l'importance du diagnostic des défauts des moteurs asynchrones et à présenter les méthodes les plus récentes pour leur détection précoce.

Le mémoire a pour objectif d'offrir une vision globale sur ce sujet, et se divise en trois chapitres abordant l'aspect théorique, technique, ainsi que l'application pratique. Le premier chapitre traite des bases techniques des moteurs à induction . Il y explique la structure de la machine, son principe de fonctionnement ainsi que ses caractéristiques d'exploitation. Ce chapitre définit également les types de pannes les plus courantes : les pannes électriques, comme les courts-circuits ou la dégradation de l'isolation, et les pannes mécaniques, telles que les vibrations ou le déséquilibre des parties rotatives. Il examine également l'impact de ces pannes sur la performance du moteur, qui se manifeste généralement par une baisse de puissance, une augmentation des vibrations et de la température, ainsi qu'une réduction de la durée de vie de la machine. De plus, le chapitre aborde les méthodes traditionnelles de détection des pannes, telles que l'analyse spectrale (FFT) et l'analyse d'enveloppe, posant ainsi les bases nécessaires pour comprendre les outils classiques avant de discuter des méthodes modernes.

Le deuxième chapitre présente des techniques avancées de diagnostic, reposant sur des analyses variées et sensibles. Il explore les méthodes d'analyse vibratoire permettant la détection des défauts mécaniques, ainsi que l'analyse électromagnétique, qui détecte les variations du champ magnétique causées par des pannes internes. Ce chapitre couvre également l'analyse thermique par imagerie infrarouge pour identifier les zones chaudes suspectes, et l'analyse du signal de courant électrique afin d'extraire des indicateurs de défauts précoces. Il introduit également des approches innovantes comme la technique AROMA, le traitement Hilbert-FFT et la méthode NRHA, des outils modernes visant à améliorer la sensibilité et la précision du diagnostic.

Le troisième chapitre est consacré à une application pratique de la technique AROMA pour la détection de défauts moteurs. Il présente une expérience en laboratoire dans laquelle un moteur asynchrone est soumis à différentes conditions de charge afin de tester l'efficacité de cette technique. Le chapitre illustre la manière de collecter et d'analyser les données

expérimentales en cours de fonctionnement, et expose les résultats obtenus sous forme graphique et statistique. En outre, il traite de l'analyse de la gravité des pannes et de leur évaluation selon différents niveaux de sévérité, mettant en valeur la capacité de la technique AROMA à identifier les défauts et à en déterminer précisément l'impact.



Chapitre I:

Etat de l'Art

moteurs à induction et leurs

défauts rotoriques

1.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons une vue d'ensemble des moteurs asynchrones, qui constituent l'un des piliers fondamentaux des systèmes électriques et industriels grâce à leur conception simple et à leur grande efficacité. Nous commencerons par offrir une définition complète de ces moteurs, en mettant en lumière leurs composants principaux et le rôle de chacun dans la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique.

Le rotor est l'un des éléments centraux du moteur à induction, car il contribue directement à ses performances et à son efficacité. Dans ce chapitre, nous aborderons également les principales défaillances susceptibles d'affecter cette partie, en examinant leurs causes potentielles et leur impact sur le fonctionnement du moteur, ainsi que les méthodes et techniques utilisées pour diagnostiquer et prévenir ces défaillances.

Cette étude vise à renforcer la compréhension théorique et pratique des moteurs asynchrones et des défaillances du rotor, contribuant ainsi à l'amélioration des stratégies de maintenance, à la réduction des coûts d'exploitation et à l'augmentation de la fiabilité des systèmes industriels.

1.2 machine asynchrone :

Le moteur asynchrone est l'une des machines les plus couramment utilisées dans les applications nécessitant des puissances supérieures à quelques kilowatts, en raison de ses nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa simplicité d'installation, son faible coût, etc. L'introduction, dans les années 1980, de variateurs permettant de modifier la fréquence de rotation sur une large gamme a favorisé son développement. Ainsi, elle trouve une place importante dans la conception de nombreux processus industriels combinant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, lavage, pompage, etc.).

Bien que la machine asynchrone soit réputée pour sa robustesse, elle peut, comme toute machine électrique, rencontrer des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. En raison des conséquences potentielles et des coûts importants associés à l'apparition d'un défaut dans les processus industriels, le diagnostic des défauts a suscité un intérêt croissant au cours des deux dernières décennies [1].

1.2.1 Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone, couramment désignée sous le nom de moteur à induction, est constituée essentiellement de deux éléments : le stator et le rotor. Ces deux parties sont réalisées à partir de fines tôles d'acier au silicium, comportant des encoches destinées à accueillir les enroulements électriques.

Le stator, qui est la partie fixe de la machine, porte les enroulements reliés directement à la source d'alimentation. Le rotor, solidaire d'un arbre de rotation, se décline en deux types selon l'accessibilité de ses enroulements : un rotor bobiné, dont les enroulements sont accessibles, ou un rotor à cage d'écureuil, dont les enroulements sont en court-circuit permanent.

Dans le cadre de ce travail, nous considérerons que le rotor possède une structure électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont court-circuités [2].



Fig. I.1 : Machine à induction

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la Figure I.2.

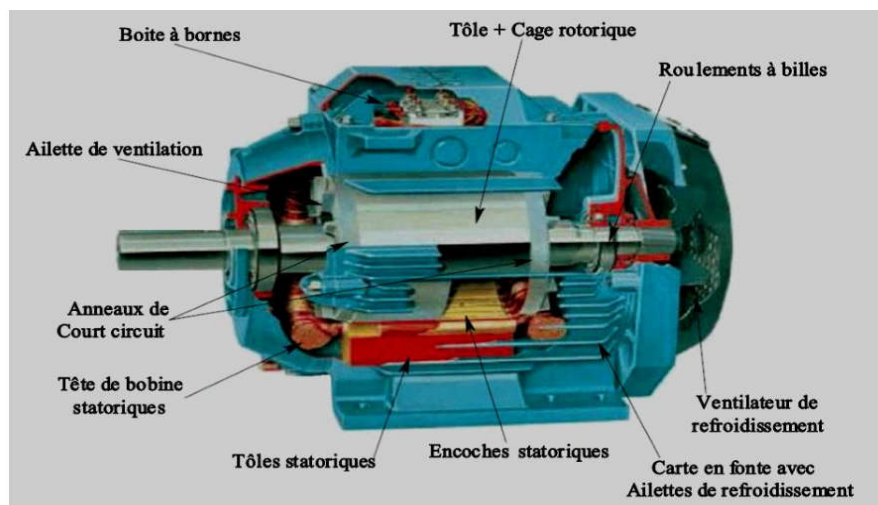


Fig. I.2 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

I.2.1.1 - stator :

Le stator est constitué d'un enroulement de fils répartis dans les encoches du circuit magnétique. Ce dernier est composé d'un empilage de tôles métalliques, dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure I.3). Le bobinage statorique se divise en deux parties : les **conducteurs d'encoches** et les **têtes de bobines** [4]. Les conducteurs d'encoches ont pour rôle de générer le champ magnétique dans l'entrefer, à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines, quant à elles, assurent la fermeture des courants en organisant la circulation des courants entre les conducteurs d'encoches. L'objectif est d'obtenir une distribution de courant à la surface de l'entrefer aussi sinusoïdale que possible, afin de réduire les ondulations du couple électromagnétique.

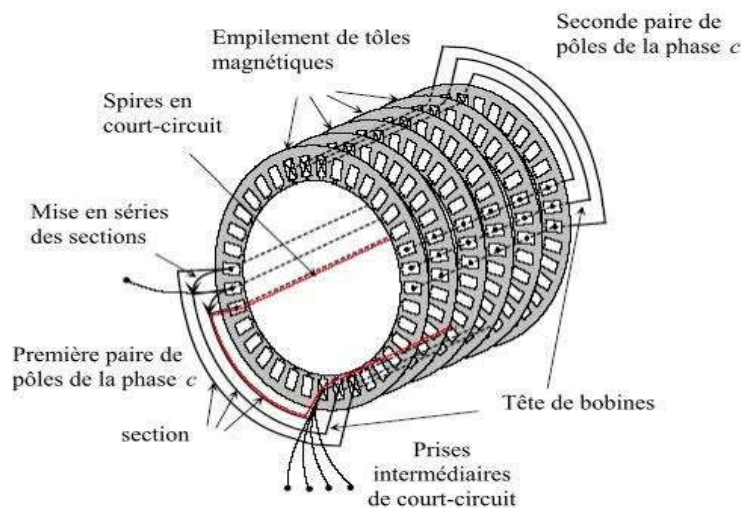


Fig. I.3: Vue schématique en perspective du stator

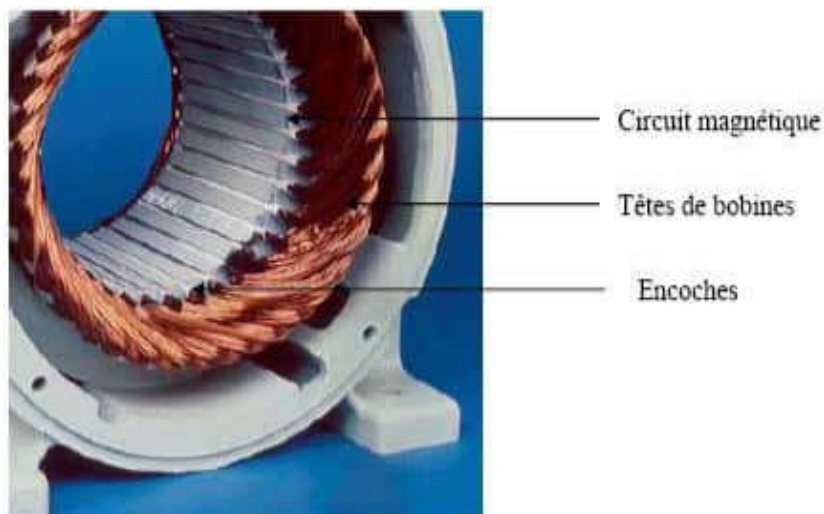


Fig. I.4: Stator du moteur asynchrone

1.2.1.2 rotor à cage :

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure I.5) et (figure I.6). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor[4]. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [7]. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).



Fig. I.5:Rotor à cage .

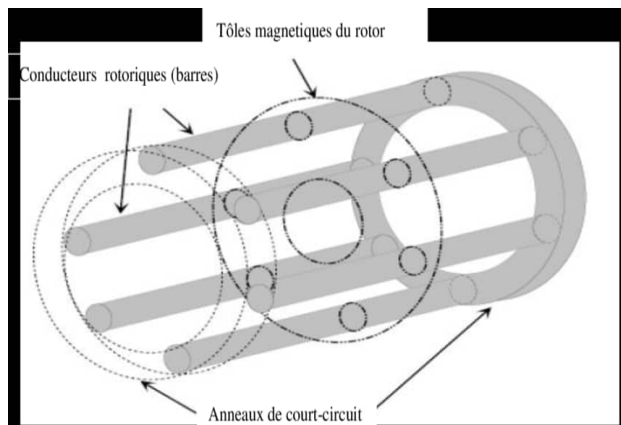


Fig. I.6 : Vue schématique perspective du rotor.

1.2.1.3 organes mécaniques :

La carcasse a pour fonction de soutenir l'ensemble, servant d'enveloppe protectrice contre l'environnement extérieur. L'arbre, quant à lui, est un élément de transmission. Il se compose d'une partie centrale qui supporte le corps du rotor, et d'une extrémité sur laquelle est fixé un demi-accouplement. En général, il est fabriqué en acier moulé ou forgé. Sa conception dépend des efforts de flexion (tels que la force centrifuge qui agit sur lui, l'attraction magnétique

radiale, etc.), des efforts radiaux et tangentiels générés par les forces centrifuges, ainsi que des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent ou transitoire). L'arbre est soutenu par un ou plusieurs paliers, qui soutiennent le rotor et permettent sa rotation libre. Le second palier est conçu pour être libre afin de compenser les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique d'un des paliers permet d'éliminer les courants dans l'arbre, causés par les dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ces paliers sont généralement équipés de roulements pour les machines de petite et moyenne puissance. Afin de permettre la variation de vitesse des moteurs électriques et la conversion de l'énergie, de nombreuses machines sont associées à un convertisseur. De nos jours, on retrouve des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques dans de nombreux procédés industriels (comme le pompage, le levage, etc.). Cela permet d'alimenter les moteurs avec des tensions et des courants à fréquence variable, servant à contrôler la machine en fonction du couple ou de la vitesse [4].

1.2.2 Principe de fonctionnement :

L'étude du fonctionnement du moteur asynchrone consiste à admettre qu'un stator formé de trois bobines avec des axes décalés de 120° et alimentées par un réseau triphasé équilibré, crée dans l'entrefer du moteur un champ magnétique, tournant à la fréquence de synchronisme n_s . Un rotor en court-circuit, balayé par ce champ tournant, est traversé par des courants induits (courants de Foucault). Le rotor donc soumis à des forces électromagnétiques de Laplace. L'ensemble de ces forces crée un couple moteur qui entraîne le rotor en rotation. Ce dernier tourne dans le même sens que le champ tournant, mais sa fréquence de rotation est nécessairement inférieure à celle du champ tournant d'où l'appellation d'asynchrone.

En effet, si les deux fréquences de rotation étaient égales, il n'y aurait plus création de courants induits dans le rotor et donc plus de couple moteur. Ceci résulte de la loi de Lenz qui énonce que la f.é.m. induite s'oppose toujours par ses effets à la cause qui lui donne naissance [8].

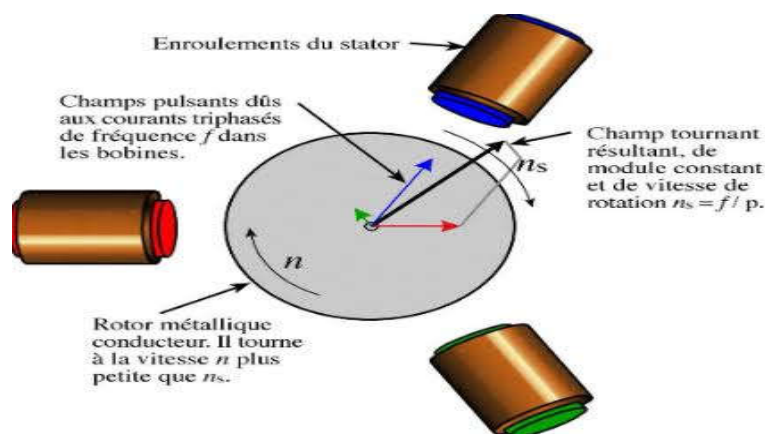


Fig. I.7 : Principe du fonctionnement d'un moteur

1.2.2.1 Fonctionnement à vide :

Le régime à vide c'est lorsque le moteur n'entraîne pas de charge.

Conséquence : le glissement est nul est le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

A vide: $g \approx 0$ par conséquent $n_0 = n_s$ et $C_u = C_0$

Le facteur de puissance à vide est très faible ($\cos \varphi < 0,2$) et le courant absorbée reste fort (P : puissance active est petit et Q : puissance réactive est grande). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (servant à créer le champ magnétique)[8].

1.2.2.2 Fonctionnement en charge :

Le moteur est maintenant chargé, c'est-à-dire que l'arbre de ce dernier entraîne une charge résistante qui s'oppose au mouvement du rotor.

En régime permanent, ou régime établi : $C_u = C_r$ [8].

1.2.2.3 Caractéristique mécanique $T_n = f(n')$:

Le point de fonctionnement se trouve sur l'intersection de la caractéristique mécanique du moteur et de la courbe qui caractérise le couple résistant de la charge. La caractéristique mécanique du moteur dans sa partie utile est un segment de droite. Pour la tracer, il suffit de deux points. Le premier est généralement donné par l'étude d'un cas de fonctionnement précis, le second se déduit de l'essai à vide. Dans cet essai, le couple utile est nul, il est associé à une fréquence de rotation considérée comme égale à la fréquence de synchronisme[8].

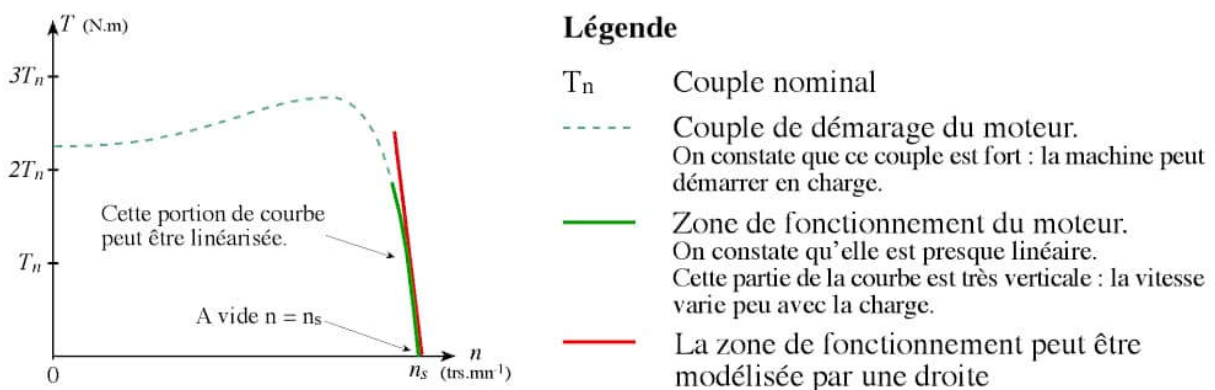


Fig. I.8 : Caractéristique mécanique du moteur

1.2.3 La différence entre moteur synchrone et asynchrone :

les points de différences les plus importantes entre un moteur synchrone et un moteur asynchrone sont:

a) le rotor d'un moteur synchrone est constitué d'un aimant permanent alimenté par un courant continu, et le rotor d'un moteur asynchrone est un cylindre en matériau ferromagnétique fixé au stator par des paliers. Il comporte un enroulement constitué de conducteurs en court-circuit

parcourus par des courants induits par le champ magnétique créé par les courants statoriques. C'est la principale différence avec une machine synchrone, laquelle a un rotor avec un champ magnétique provenant d'aimants permanents ou de bobines alimentées en courant continu.

b) la vitesse de rotation de l'arbre d'un moteur et égale a la vitesse du champ tournant (pas de glissement), et pour un moteur asynchrone le glissement n'est pas nul et on a :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (I.1)$$

c) le moteur synchrone peut jouer le rôle d'un compensateur d'énergie réactive (Q) .

d) lorsqu'il est chargé le moteur asynchrone absorbe de courant supérieur au courant nominal ainsi que le moteur synchrone se décroche lorsque le couple dépasse une certaine limite.

e) au niveau de démarrage le moteur synchrone nécessite un système de démarrage

f) le moteur asynchrone est le plus utilisé dans l'industrie (coût de fabrication, maintenance, variation de vitesse) [9].

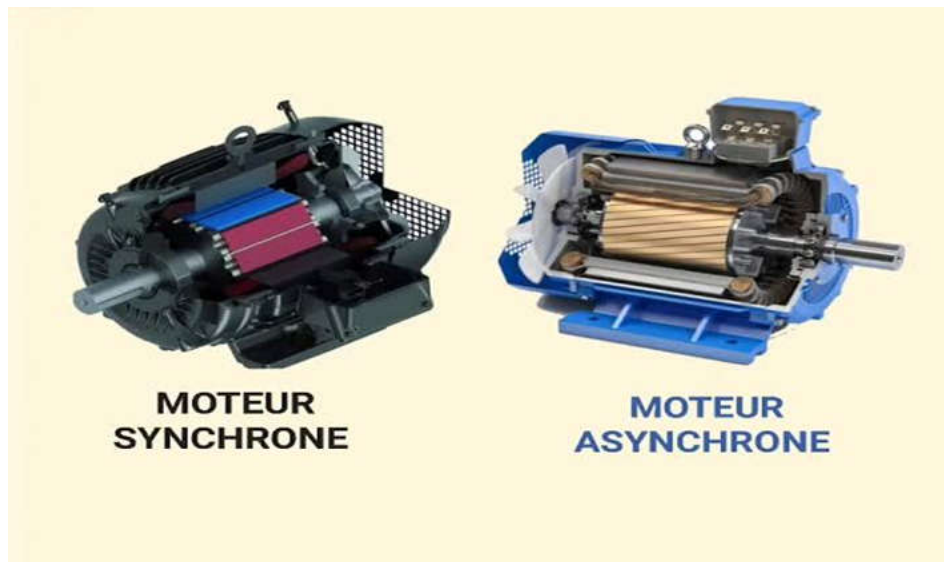


Fig. I.9 : moteur synchrone et asynchrone

1.3 Défauts dûs à la machine asynchrone :

Les défauts qui apparaissent dans une machine asynchrone peuvent être divisés en deux parties : défauts mécaniques et défauts électriques. Ces défauts engendrent plusieurs problèmes, où dans des certains cas, ils causent l'arrêt intempestif de la machine, nous devons donc accorder une attention particulière à ces défauts [10].

1.3.1 Défaillances d'ordre électriques

1.3.1.1 Défauts statoriques

Parmi les principales causes de défaillance du stator, on peut citer les suivantes [11] :

- Thermique (surcharge) ;

- Électrique (diélectrique) ;
- Mécanique (bobinage) ;
- Enivrement (agression).

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électrique statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, par exemple : les défauts de type court-circuit [12].

D'autres types de court-circuit du stator se distinguent en :

- D'un court-circuit entre spires ;
- D'un court-circuit entre deux phases ;
- D'un court-circuit entre phase et carcasse ;

La figure (I.10) représente d'un court-circuit dans une bobine [13] :

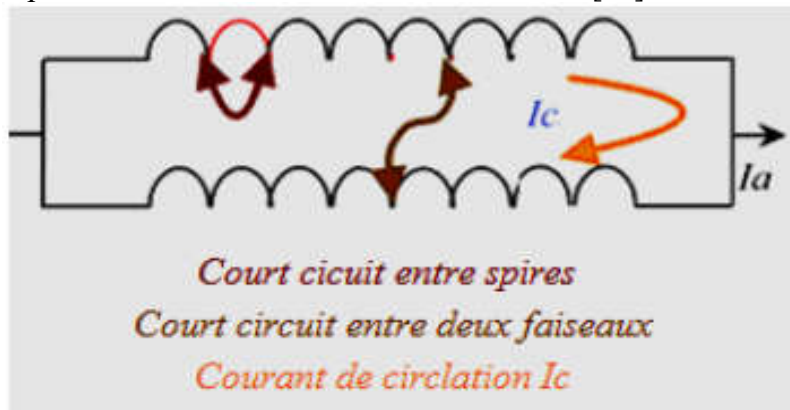


Fig. I.10 : représente d'un court-circuit dans une bobine

L'équation suivante représente la fréquence d'un défaut de type court-circuit [14] :

$$f_{cc} = f_s \left\{ \frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right\} \quad (I.2)$$

f_{cc} : Fréquence de court-circuit ;

f_s : Fréquence d'alimentation ;

$n=1, 2, 3, \dots$

$k=1, 3, 5, \dots$

p : Nombre de paires de pôles

1.3.1.2 Défauts rotorique :

La figure (I.11) montre le rotor d'une machine asynchrone où ces barres conductrices sont régulièrement réparties et forment le circuit du rotor [11,14].



Fig. I.11 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil

La présence de défauts de rupture de barre rotorique dans une machine asynchrone génère une asymétrie du rotor, ce qui provoque des raies spectrales supplémentaires autour de la fréquence fondamentale (f_s), la relation de la fréquence est donné sous la forme [15] :

$$f_{brc} = f_s(1 \pm 2kg)$$

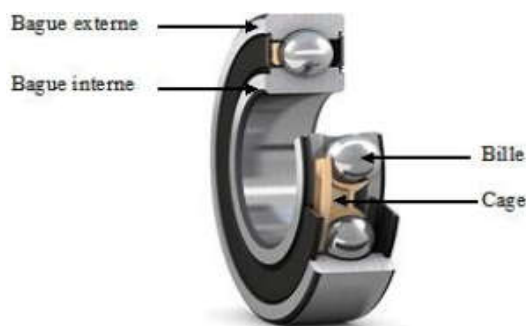
Avec : $k=1, 2, \dots$,

I.3.2 Défauts mécanique :

Plus de 40% des défauts d'un moteur asynchrone sont d'ordre mécanique. Parmi les plus importants de ces défauts, nous pouvons trouver : des défauts de roulements, des défauts d'excentricité.... [16].

I.3.2.1 Défauts de roulements :

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machine électrique rotative. Les défauts des roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériaux à l'étape de fabrication, les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine [17].



(a) roulement à bille



(b) défaut de cage à bille

Fig I.12: Roulement à bille

L'expression suivante représente les harmoniques contenus dans le spectre du courant statorique [14] :

$$f_{rou} = |f_s + kf_v| \quad (I.3)$$

Où :

$k=1, 2, \dots$

f_v : Est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations.

I.3.2.2 Défauts d'excentricité :

La variation de la longueur de l'entrefer entraîne des variations dans la densité du flux d'entrefer [18].

On distingue trois catégories d'excentricité [10] :

- **L'excentricité statique** : est due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator.
- **L'excentricité dynamique** : le rotor possède un axe de rotation qui tourne autour de l'axe géométrique du stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.
- **L'excentricité mixte** : représente la somme des deux cas (statique et dynamique).

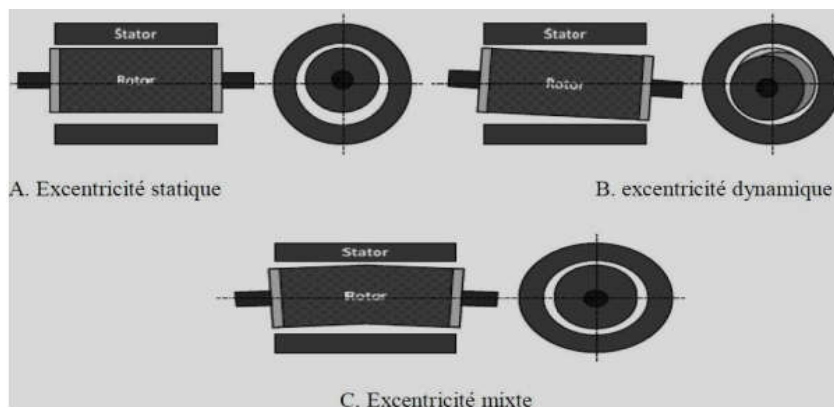


Fig.I.13: Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte [19].

Les fréquences des défauts sont données par [14] :

$$f_{exc} = f_s \left[1 \pm \frac{(1-g)}{p} \right] \quad (I.4)$$

Avec : $k=1, 2, 3, \dots$,

I.4 Les pannes spécifiques à la partie tournante :

I.4.1 Déséquilibre et vibrations excessives :

- **Déséquilibre statique ou dynamique** : Un rotor mal équilibré génère des vibrations qui, si elles ne sont pas corrigées, peuvent entraîner une usure prématurée des roulements et des

fixations.

- **Résonance** : Des fréquences de vibration proches des fréquences naturelles du système peuvent amplifier les vibrations, endommageant ainsi la structure de la partie tournante.

1.4.2 Défaillance des roulements :

- **Usure ou défaut de lubrification** : Le manque de lubrification ou une lubrification inadaptée favorise l'usure des roulements, pouvant mener à des grincements, des échauffements excessifs et, dans le pire des cas, à leur rupture.
- **Fissures ou déformations** : Les charges cycliques et les vibrations répétées peuvent provoquer des fissures dans les bagues intérieure ou extérieure des roulements.

1.4.3 Problèmes d'engrenages:

- **Usure ou endommagement des dents** : Une usure excessive, un mauvais alignement ou des défauts de fabrication peuvent entraîner des chocs, des vibrations et des ruptures partielles dans les engrenages.
- **Jeu anormal** : Un jeu trop important entre les engrenages peut provoquer des impacts répétés et accentuer les phénomènes de fatigue.

1.4.4 Défauts du rotor et de l'arbre :

- **Fissures dues à la fatigue** : La sollicitation mécanique constante peut entraîner la formation de fissures dans le rotor ou l'arbre, compromettant leur intégrité.
- **Déformations** : Les surcharges ou un chauffage excessif peuvent déformer ces éléments, perturbant leur rotation et générant des vibrations supplémentaires.

1.4.5 Problèmes liés à la vitesse de rotation :

- **Survitesse ou sous-vitesse** : Des variations anormales de la vitesse, qu'il s'agisse d'une accélération trop rapide ou d'un régime inférieur au seuil nécessaire, peuvent provoquer des contraintes mécaniques excessives et favoriser l'apparition de défauts.
- **Rotation inverse** (dans certains cas spécifiques) : Une inversion accidentelle du sens de rotation peut endommager les accouplements et les systèmes de transmission. La détection précoce de ces défauts est souvent assurée par une **analyse vibratoire** qui permet d'identifier la signature vibratoire de chaque type de panne et d'agir avant qu'une défaillance majeure ne se produise [20].

I.5 Les causes et les effets des défaillances spécifiques du rotor sur performance du moteur:***I.5.1 Causes des défaillances du rotor :******I.5.1.1 Court-circuit des barres rotorique(s) :***

Une rupture ou un court-circuit au niveau des barres du rotor augmente la résistance interne, modifie la distribution du champ magnétique et altère le couple produit par le moteur.

I.5.1.2 Déséquilibre mécanique :

Un rotor dont la répartition de masse est inégale provoque des vibrations excessives. Ces vibrations génèrent une usure prématurée des roulements et des composants mécaniques, pouvant entraîner une défaillance globale.

I.5.1.3 Usure et dégradation thermique :

Une surchauffe due à une surcharge ou à un refroidissement insuffisant peut altérer les propriétés des matériaux du rotor (par exemple, une démagnétisation des aimants dans les moteurs à

aimants permanents), réduisant ainsi l'efficacité et la stabilité du moteur. [21]

I.5.2 Effets sur la performance du moteur :***I.5.2.1 Diminution du couple et de la puissance :***

Les défauts rotorique(s) perturbent la création d'un champ magnétique optimal, ce qui se traduit par une baisse du couple et donc une réduction de la puissance fournie.

I.5.2.2 Augmentation des pertes et surchauffe :

Les défauts entraînent une circulation de courant anormale et des pertes énergétiques supplémentaires (effet Joule), ce qui peut provoquer une surchauffe et accélérer la dégradation de l'isolation et des autres composants.

I.5.2.3 Vibrations et usure prématurée :

Les déséquilibres mécaniques augmentent les vibrations, ce qui endommage les roulements et peut entraîner des pannes mécaniques en cascade [21].

I.6 Les méthodes traditionnelles de détection de ces défaillances:***I.6.1 Analyse spectrale (FFT) :***

La transformée de Fourier permet de décomposer le signal vibratoire en ses composantes fréquentielles. Chaque défaut (déséquilibre, défaut de roulement, désalignement, défaut d'engrenage, etc.) génère des fréquences caractéristiques. Par exemple, un déséquilibre produit un pic à la fréquence de rotation fondamentale et ses harmoniques.

I.6.2 Analyse d'enveloppe :

Pour détecter des défauts de faible intensité (souvent sur les roulements), on utilise l'analyse d'enveloppe. Cette méthode permet de mettre en évidence les modulations du signal dues aux chocs intermittents causés par des défauts localisés.

I.6.3 Méthodes complémentaires :

- L'inspection visuelle ou l'analyse thermographique peut être utilisée en complément pour repérer des signes d'usure ou de surchauffe.
- Dans certains cas, l'analyse du courant (signature de courant) du moteur peut aussi aider à identifier des anomalies mécaniques dans la partie tournante.

Ces approches, largement employées dans la maintenance prédictive, permettent d'intervenir avant que le défaut n'entraîne une panne majeure. [22]

I.7 Conclusion

En conclusion, ce chapitre démontre que les moteurs asynchrones constituent des éléments essentiels dans les systèmes industriels, puisqu'ils reposent sur des principes de fonctionnement garantissant la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique avec une grande efficacité. L'analyse des défaillances de la partie rotor souligne également l'importance d'un diagnostic précoce des difficultés opérationnelles, ce qui permet de développer des stratégies de maintenance préventive et d'améliorer la performance globale du moteur. Cette compréhension sert de base à la mise en œuvre de solutions techniques innovantes dans les prochains chapitres, contribuant à renforcer la durabilité et l'efficacité des systèmes existants.



Chapitre II:

*Techniques avancées pour le
diagnostic des moteurs à
induction*

II.1 Introduction :

Dans ce deuxième chapitre, nous examinerons les bases théoriques et les cadres scientifiques qui constituent le fondement de l'application des techniques de diagnostic avancées pour les moteurs à induction. Le diagnostic précoce et précis des défaillances est une exigence fondamentale pour garantir la continuité des performances et réduire les périodes d'arrêt dans les systèmes industriels, compte tenu du rôle essentiel que jouent les moteurs à induction dans les différents processus de fonctionnement.

Nous commencerons par définir les principes de base du fonctionnement des moteurs à induction ainsi que les mécanismes d'apparition des défaillances, en présentant les principaux facteurs qui influent sur leur efficacité et leur dépendance aux conditions opérationnelles. Nous aborderons également les transformations technologiques qui ont contribué au développement des méthodes de diagnostic, en mettant en lumière les techniques reposant sur l'analyse des signaux, la modélisation mathématique et les algorithmes intelligents tels que les techniques d'apprentissage automatique.

L'objectif de ce chapitre est de fournir une vue d'ensemble complète des méthodes traditionnelles et modernes de diagnostic des moteurs à induction, en comparant leur efficacité et les défis qui leur sont associés. À travers l'analyse de la littérature et des études antérieures, nous visons à identifier les lacunes de la recherche actuelle et à proposer des pistes de développement futur, en adéquation avec les exigences de l'industrie moderne.

En conclusion, ce chapitre constitue un pont reliant les concepts théoriques aux applications pratiques, ouvrant ainsi la voie aux chapitres suivants qui aborderont l'étude expérimentale et l'application des modèles de diagnostic sur des échantillons réels.

II.2 Méthodes de détection et de diagnostic des défauts de la machine asynchrone:

Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses études ont été menées afin de développer des méthodes permettant de détecter les défaillances et de comprendre la relation de cause à effet associée, dans le but d'améliorer la fiabilité du moteur asynchrone. L'objectif de la recherche des signatures ou des indicateurs de défauts est de caractériser le comportement du système en identifiant précisément le type et l'origine de chaque défaut. Cette approche permet d'assurer une discrimination fine des pannes ou anomalies susceptibles de se produire à différents niveaux du processus, garantissant ainsi une chaîne de production de plus en plus fiable. Il existe diverses méthodes de détection et de diagnostic, et le choix de l'approche à adopter dépend de l'information recherchée concernant le système, ainsi que de la complexité intrinsèque de ce dernier. [23]

II.2.1 Détection à partir des méthodes internes (connaissance a priori):[23]

Les méthodes mentionnées proviennent principalement du domaine de l'automatique et reposent sur l'hypothèse d'une connaissance préalable du système étudié. Elles consistent à suivre l'évolution des paramètres caractéristiques du système ou à analyser la divergence entre le modèle théorique et le processus réel. En comparant les paramètres mesurés ou calculés avec ceux associés à un mode de fonctionnement normal (sans défaut), il devient possible d'identifier la présence potentielle d'anomalies ou de défaillances. Trois approches principales peuvent être utilisées pour le diagnostic des défauts à partir de modèles paramétriques :

1. La surveillance par observateurs.
2. La surveillance basée sur la méthode des résidus.
3. La surveillance par estimation paramétrique.

Le principe général de ces méthodes est illustré par la Fig. II.1.

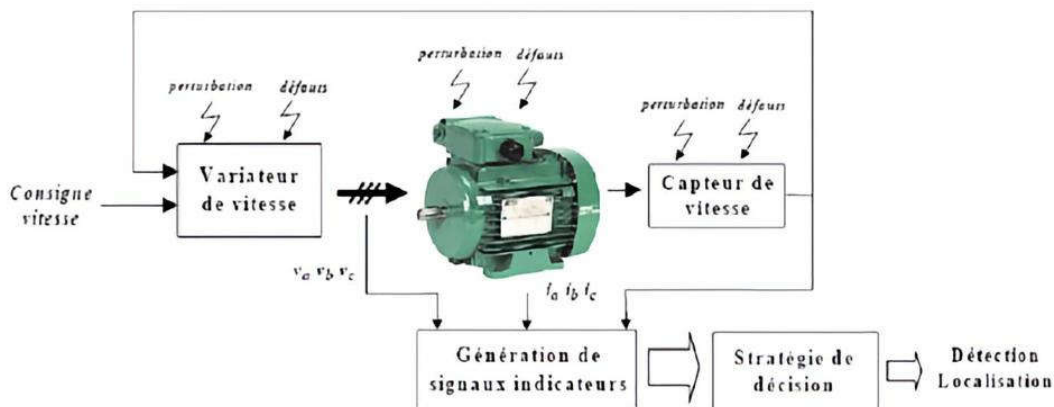


Fig. II.1:Principe général de diagnostic à base de modèle

Les observateurs sont généralement utilisés dans la synthèse des lois de commande des machines à induction. Ils sont choisis et calculés en fonction du critère de stabilité et de performances. Un défaut se traduisant par la rupture des hypothèses d'équilibre du modèle, il peut se révéler dans la rupture des grandeurs observées par rapport aux grandeurs mesurées, la comparaison de la sortie réelle avec la sortie observée peut donc fournir des informations exploitables pour la détection et la localisation des défauts.

Comme pour les observateurs, la méthode des résidus consiste à analyser les résidus générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller [24]. Ce modèle est de manière générale constitué d'un ensemble de relations de contraintes dynamiques liant deux types de variables :

des variables inconnues (variables internes, perturbation, entrée inconnue) et variables connues (consigne, variables mesurées). Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsqu'une défaillance survient.

Concernant la détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique, Il s'agit de détecter un écart entre l'évolution des paramètres physiques au cours de fonctionnement sain et celle suivie par le système en présence des défauts. Elle se base alors sur un algorithme d'optimisation de l'erreur entre les paramètres du modèle et ceux de système étudié. Les paramètres peuvent aussi être identifiés en cours de fonctionnement à l'aide d'observateurs étendus. Le plus couramment utilisé est le filtre de Kalman [25]. En tant qu'un algorithme l'identification en temps réel, le filtre de Kalman étendu délivre un modèle adaptatif, capable de prendre en compte les évolutions normales des paramètres de la machine telles que la variation des résistances (en fonction de la température) ou encore la variation des inductances (en fonction du niveau de saturation). Le point essentiel dans l'efficacité de cette méthode est le choix du modèle de connaissance correspondant au type de défaut que l'on voudra détecter [26].

II.2.2 Détection à partir des méthodes externes (sans connaissance a priori): [23]

Les méthodes mentionnées reposent sur l'analyse spectrale des signaux ou des mesures générées par la machine pendant son fonctionnement, telles que les courants, le couple estimé et les flux. Le principe fondamental de ces méthodes réside dans l'existence de caractéristiques fréquentielles distinctes associées à un fonctionnement normal ou défaillant du système. La première étape consiste à acquérir une connaissance détaillée du système en état de fonctionnement normal, soit par mesure directe, soit par des modèles numériques. La deuxième étape consiste à simuler des défauts de manière "artificielle", également via des modèles numériques. La signature d'un défaut, c'est-à-dire son impact sur certaines grandeurs, est ensuite identifiée.

Une observation est réalisée sur un convertisseur réel [27], et une analyse est effectuée sur les grandeurs mesurées dans une démarche de traitement du signal, visant à reconnaître des signatures de défauts préalablement établies. Les méthodes que nous explorons sont principalement axées sur l'analyse fréquentielle des grandeurs suivantes :

1. La surveillance des vibrations à l'aide de capteurs de vibrations (comme les accéléromètres).
2. La surveillance du couple électromagnétique.
3. La surveillance du flux.

Analyse du courant de phase, notamment par la méthode MCSA (Motor Current Signature Analysis), étant donné que les machines sont souvent équipées de capteurs de courant.

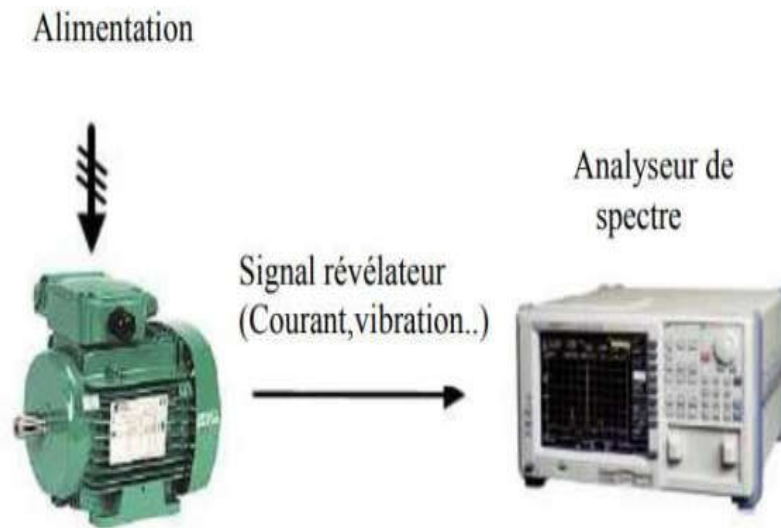


Fig. II.2: Principe de la surveillance par analyse spectrale

Les grandeurs mesurées sont analysées du point de vue spectrale. En effet, en ce qui concerne la détection de la présence d'un défaut dans la machine asynchrone, les méthodes de diagnostic sont classiquement basées sur l'analyse fréquentielle des signaux en utilisant une transformée de Fourier. En effet, une comparaison de l'amplitude des composantes signataires de défaut avec un seuil de référence (seuil calculé lorsque la machine est saine) est utilisée pour détecter la présence d'une anomalie.

II.2.2.1 Analyse des signaux vibratoires:

L'analyse vibratoire d'une machine peut être réalisée à l'aide d'accéléromètres positionnés sur les paliers, permettant de mesurer les vibrations dans les directions verticale, axiale et radiale. Comme pour les courants, les vibrations fournissent des informations cruciales sur la présence de défauts mécaniques courants [28]. Toutefois, cette méthode présente certaines limitations, notamment en raison de l'accessibilité restreinte et des difficultés liées aux connexions mécaniques des accéléromètres nécessaires pour effectuer des mesures proches du défaut. De plus, le coût des accéléromètres reste relativement élevé comparé à d'autres types de capteurs, tels que ceux mesurant la vitesse ou le courant. Afin de contourner ces inconvénients, les recherches actuelles se concentrent sur la détection et la localisation des défauts à travers l'analyse d'autres types de signaux [29].

II.2.2.2 Analyse du couple électromagnétique:

Lorsqu'une rupture de barre apparaît, le spectre fréquentiel du couple électromagnétique laisse apparaître des composantes supplémentaires. L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même la torsion de l'arbre entraîne l'apparition d'harmoniques dans le spectre du couple. Les oscillations du couple provoquées par certains défauts rotoriques peuvent servir à détecter ceux-ci [30]. Il a été montré par une analyse théorique et des essais comment le spectre du couple se trouve modifié lorsqu'un des deux anneaux d'une cage est cassé. Les fréquences d'encoches présentées dans le spectre du couple sont données par [28]

II.2.2.3 Analyse du flux:

Dans une machine idéale sans défauts, les courants et les tensions du stator sont parfaitement équilibrés, ce qui entraîne l'annulation du flux de fuite axial. Toutefois, la présence d'un défaut quelconque provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator, générant ainsi des flux de fuite axiaux dont l'intensité dépend du degré de gravité du défaut. En plaçant une bobine autour de l'arbre de la machine, une force électromotrice induite sera observée. L'analyse du contenu spectral de la tension induite dans cette bobine permet de détecter différents types de défauts. [29]

II.2.2.4 Analyse du vecteur de Park:

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des moteurs asynchrones triphasés. Une des plus connues et des plus appropriées repose sur le calcul des courants dits de Park [26]. En fonction des courants de phases $i_{sa}(t), i_{sb}(t), i_{sc}(t)$ les courants de Park $i_d(t), i_q(t)$ peuvent être calculés grâce aux relations suivantes:

$$i_d(t) = \frac{2\sqrt{3}}{3} i_{sa}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sc}(t) \quad (\text{II.1})$$

$$i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sc}(t) \quad (\text{II.2})$$

En présence d'une barre cassée, le courant absorbé par le moteur asynchrone contient des composantes latérales de part et d'autre de sa composante fondamentale dont les fréquences sont données par la relation: $(1 \pm 2kg).fs$ (II.3)

Ces composantes seront, par conséquent, aussi présentes dans les courants de Park $i_d(t), i_q(t)$. Dans ces conditions, il est très simple de montrer que le spectre du module $\sqrt{i_d(t)^2 + i_q(t)^2}$ contient une composante continue générée par la composante fondamentale du courant statorique plus des composantes de fréquence $2kg \cdot f_s$. De cette façon, le spectre des courants de Park, en éliminant préalablement la composante continue, ne contiendra que les composantes spécifiques au défaut de la machine [31]. Il sera alors plus facile de détecter ces composantes et de diagnostiquer la présence d'un défaut rotorique. [26]

II.2.2.5 Diagnostic par les analyses chimiques

La plupart des moteurs sont refroidis par l'air ou, plus fréquemment, à l'aide d'un circuit fermé équipé d'un échangeur de chaleur refroidi à l'eau. La dégradation de l'isolation électrique du moteur génère des gaz d'oxyde de carbone, qui se retrouvent dans le circuit de refroidissement à air et peuvent être détectés par une méthode d'absorption infrarouge. Dans certains cas, l'huile de roulement est régulièrement analysée, et des interventions sont nécessaires si des produits indiquant une dégradation sont détectés [32].

II.2.2.6 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.3). En plus, récemment des techniques par visualisation des images thermiques par infrarouge sont utilisées pour le diagnostic des différents défauts, (Fig.II.4) [33]

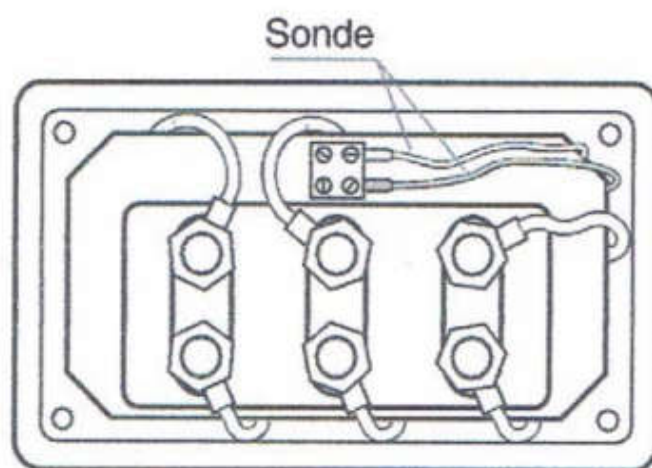
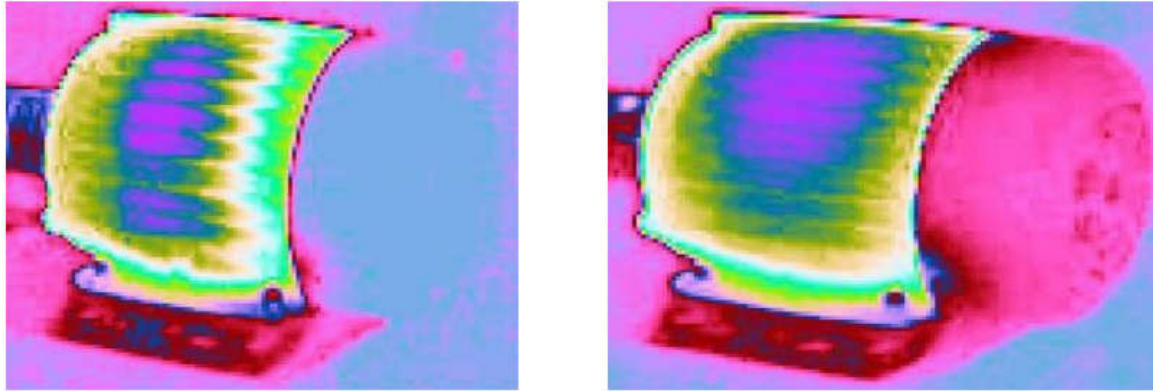


Fig. II.3: Capteur de température dans une plaque à bornes



(a) moteur sain

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

Fig. II.4: Image colorée infrarouge thermique

II.2.2.7 Analyse des courants statoriques:

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel demeure la méthode la plus courante, car le spectre obtenu fournit des informations sur la plupart des défauts électriques et magnétiques susceptibles de se manifester au sein d'une machine asynchrone. Dans cette analyse fréquentielle, il est recommandé de réaliser une étude globale des courants, car un défaut au rotor se reflète dans le spectre des trois courants de ligne.[34]

II.3 Les approches récentes de diagnostic des défauts les plus utilisées

II.3.1 Le diagnostic par la méthode NRHA

La méthode de diagnostic se base sur l'analyse résiduelle normalisée des harmoniques du courant moteur (NRHA) [35].

II.3.1.1 Courants statoriques du moteur

En régime sain, le courant de la phase « A » peut être modélisé de façon idéale par la somme du courant fondamental et de ses harmoniques :

- Courant fondamental (régime sain)

$$i_{sa}(t)_{healthy} = \hat{I}_F \cos(2\pi f_s t) \quad (II.4)$$

$$i_{sa}(t)_{healthy} = \sum_{h=1}^n \left[\frac{\hat{I}}{TH_h} \cos(2\pi TH_h t) + \frac{\hat{I}}{S_{h,k}^{\pm}} \cos(2\pi S_{h,k}^{\pm} t) + \sum_{k=1}^m \left[\frac{\hat{I}}{R_{h,k}^{\pm}} \cos(2\pi R_{h,k}^{\pm} t) + \frac{\hat{I}}{E_{h,k}^{\pm}} \cos(2\pi E_{h,k}^{\pm} t) \right] \right] \quad (II.5)$$

$$TH = hf_s$$

• Courant fondamental (régime avec défaut)

Pour l'état défectueux, des amplitudes modifiées (notées par des primes) sont employées :

$$i_{sa}(t)_f = \sum_{h=1}^n \left[\widehat{I}_{TH_h}^r \cos(2\pi TH_h t) + S_{h,k}^{\pm} \cos(2\pi S_h^{\pm} t) + \sum_{k=1}^m \left[\widehat{I}_{R_{h,k}^{\pm}}^r \cos(2\pi R_{h,k}^{\pm} t) + \widehat{E}_{h,k}^{\pm} \cos(2\pi E_{h,k}^{\pm} t) \right] \right] \quad (\text{II.6})$$

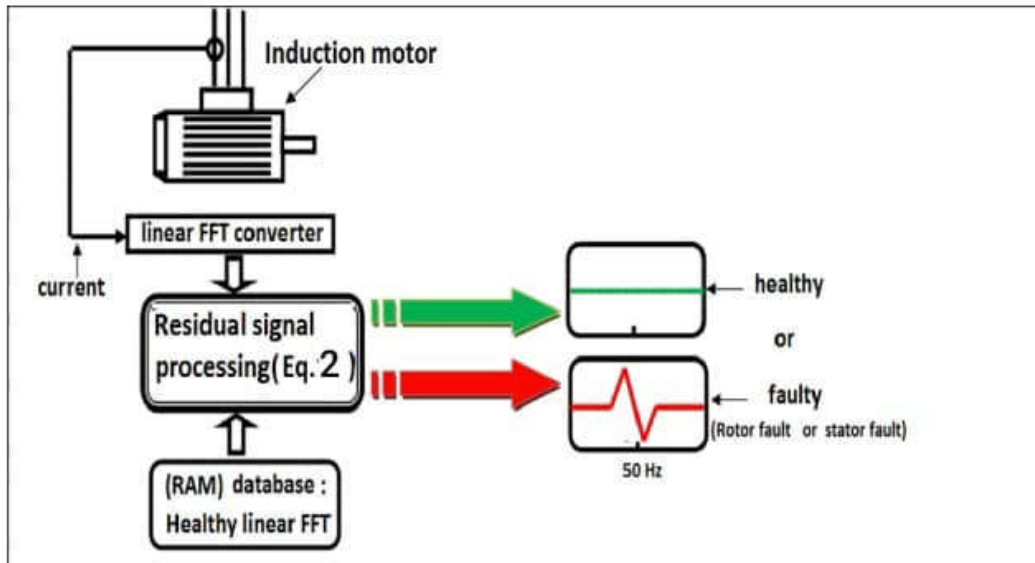


Fig. II.5: Schéma bloc représentant le diagnostic par la méthode NRHA

La Fig.II.5 montre qu'à l'aide d'un seul capteur de courant à effet Hall, il est possible d'acquérir les données du signal du courant statorique de n'importe quelle phase ; ensuite, la FFT linéaire reçue de l'alimentation du moteur peut être calculée en temps réel. En fonction du glissement estimé du fonctionnement du moteur, on obtient les données numériques de la FFT linéaire de l'état sain correspondant à la charge entraînée par le moteur. Ces données sont stockées dans une base de données (RAM) pour traiter les deux signaux selon . Le balayage spectral entre 49,9 et 50,1 Hz révèle deux cas possibles :

- (1) s'il n'y a pas d'harmoniques résiduelles, alors il n'y a pas de défaillance, et.
- (2) s'il y a des harmoniques résiduelles, alors il y a des défaillances.

La gestion du fonctionnement du moteur (la ligne de production) se fait en fonction du degré de gravité, c'est-à-dire pour arrêter et réparer immédiatement la défaillance ou pour reporter la réparation jusqu'à un arrêt planifié[35].

II.3.1.2 Spectre FFT directement par l'expression générale:

$$A(f)_{healthy}|_N = \frac{A(f)_{healthy}}{A(f)_{healthy}|_{max}} \quad (II.7)$$

$$A(f)_{faulty}|_N = \frac{A(f)_{faulty}}{A(f)_{faulty}|_{max}} \quad (II.8)$$

avec $A(f)_{faulty}[A]$ représentant les amplitudes du spectre actuel en cas de défaillance, $A(f)_{healthy}[A]$ représentant les amplitudes du spectre actuel en fonctionnement normal, et $A(f)_{healthy}|_{max}$ étant l'amplitude maximale du spectre actuel en fonctionnement normal.

Ici, $A(f)_{faulty}|_{max}$ est l'amplitude maximale du spectre actuel en cas de défaillance, et f [Hz] est la fréquence (50Hz).

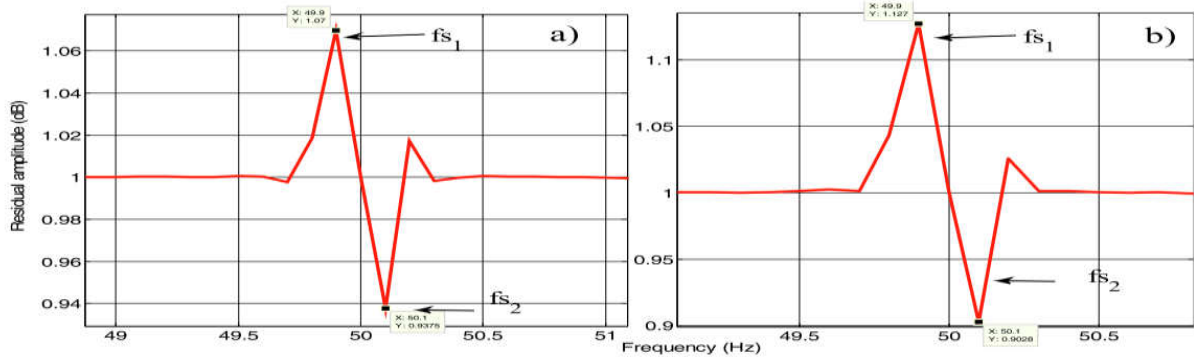
d. La NRHA du courant moteur est obtenue à l'aide des équations (II.7) et (II.8). Ainsi, la différence entre les spectres normalisés par défaut et les spectres normalisés en cas de fonctionnement normal est : $A(f)|_R = 10 \Lambda \left(A(f)_{faulty}|_N - A(f)_{healthy}|_N \right)$ with $A(f)|_R$ being the residual amplitude [35].

II.3.1.2 Résultats expérimentaux et discussion

❖ Étude expérimentale des méthodes de diagnostic par NRHA

Les tests expérimentaux ont été réalisés sur trois moteurs électriques au Laboratoire des Systèmes Électrotechniques et de l'Environnement de l'Université d'Artois (France) afin d'obtenir les résultats de la méthode d'analyse des harmoniques résiduelles normalisées dans le courant moteur (NRHA). Dans les expériences, la même résolution en fréquence a été utilisée. Le temps d'acquisition t_a était de 10 s et la fréquence d'échantillonnage f_e de 10 000 Hz. La résolution en fréquence était égale à la fréquence d'échantillonnage divisée par le nombre d'échantillons, donnée par l'équation [35].

$$\Delta f = \frac{f_e}{f_e * t_a} = 0.1 H_z \quad (II.9)$$



(a) IM1 avec 12 % des spires court-circuitées

(b) IM2 avec une cassure.

Fig. II.6: Spectres zoomés du NRHA pour moteurs défectueux

La Fig.II.6 présente les résultats expérimentaux des harmoniques résiduelles dans le temps pour le moteur IM1 présentant une défaillance du rotor par cassure et le temps harmonique résiduel associé à la défaillance du stator avec 12 % de court-circuit inter-spires en phase A. Les Fig.II.6 (a et b) démontrent que l'harmonique résiduelle dans le temps offre deux avantages :

- Un excellent indice de diagnostic grâce à sa sensibilité pour diverses défaillances du rotor ou du stator (l'amplitude de la ligne résiduelle est plus élevée), et
- La même fréquence caractéristique de 50 Hz pour différentes défaillances du rotor ou du stator [35].

II.3.2 Diagnostic des défauts à l'aide de PVPA

L'article propose une nouvelle méthodologie pour le diagnostic des défauts des moteurs asynchrones, en particulier les défauts du **rotor** et du **stator**. La méthode proposée est appelée **Park's Vector Product Approach (PVPA)**, qui repose sur l'analyse spectrale du vecteur de courant du moteur.

- En considérant un moteur asynchrone en bon état et une tension d'alimentation sinusoïdale équilibrée, les courants statoriques peuvent être exprimés comme suit [36]."

$$i_{sa} = i_m \cos(\omega t) , i_{sb} = i_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) , i_{sc} = i_m \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II.10})$$

- Dans le cas des défauts naissants du rotor, en considérant uniquement les harmoniques primaires et secondaires

$$i_q = \frac{\sqrt{6}}{2} i_m \cos(\omega t) + \frac{\sqrt{6}}{2} i_{h1} \cos((1 - 2s)\omega t_1) + \frac{\sqrt{6}}{2} i_{h2} \cos((1 - 2s)\omega t) \quad (\text{II.11})$$

$$i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} i_m \sin(\omega t) + \frac{\sqrt{6}}{2} i_{h1} \sin((1 - 2s)\omega t_1) + \frac{\sqrt{6}}{2} i_{h2} \sin((1 - 2s)\omega t_2) \quad (\text{II.12})$$

où i_{h1} représente la valeur maximale de la composante de bande latérale inférieure du vecteur de courant de Park (en ampères), i_{h2} représente la valeur maximale de la composante de bande latérale supérieure du vecteur de courant de Park (en ampères), et s correspond au glissement. L'approche proposée dans cet article repose principalement sur le produit de i_d par i_q du vecteur de courant de Park (voir Fig.II.7) [36].

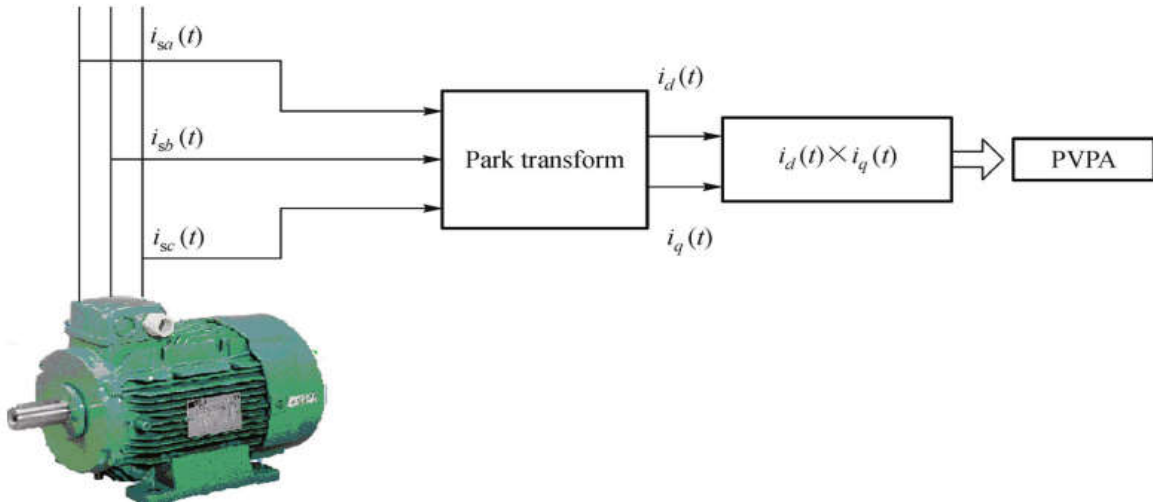


Fig. II.7. Diagnostic des défauts dans le moteur à induction à l'aide de PVPA

Dans cette situation, la PVPA est donnée par

$$\begin{aligned}
 i_d \cdot i_q = & \frac{3}{4} i_m^2 \sin(2\omega t) + \frac{3}{4} i_{h1}^2 \sin(2(\omega - \omega_r)t) + \frac{3}{4} i_{h2}^2 \sin(2(\omega + \omega_r)t) - \\
 & \frac{3}{2} i_m i_{h1} \sin((2\omega - \omega_r)t) + \frac{3}{2} i_m i_{h2} \sin((2\omega + \omega_r)t) + \\
 & \frac{3}{2} i_{h1} i_{h2} \sin(2\omega_r t) + \frac{3}{2} i_m (i_{h1} - i_{h2}) \sin(\omega_r t)
 \end{aligned} \tag{II.13}$$

L'équation (II.13) comporte une composante à la fréquence $2f_s$, des composantes en bande latérale à $2f_s + f_r$ et $2f_s - f_r$ ainsi que des composantes supplémentaires à f_r , $2f_r$ et $2f_s + 2f_r$, $2f_s - 2f_r$. La Fig.II.8 présente le spectre de la PVPA pour ce type de défaut. Ainsi, même pour un moteur présentant un court-circuit inter-tours dans les enroulements de phase, de nouvelles composantes de fréquence peuvent être utilisées pour détecter ce type de défaut, avec $f_r = (1 - s) \cdot f_s/p$, où p représente le nombre de paires de pôles.

II.3.2.2 Interprétations des résultats de simulation

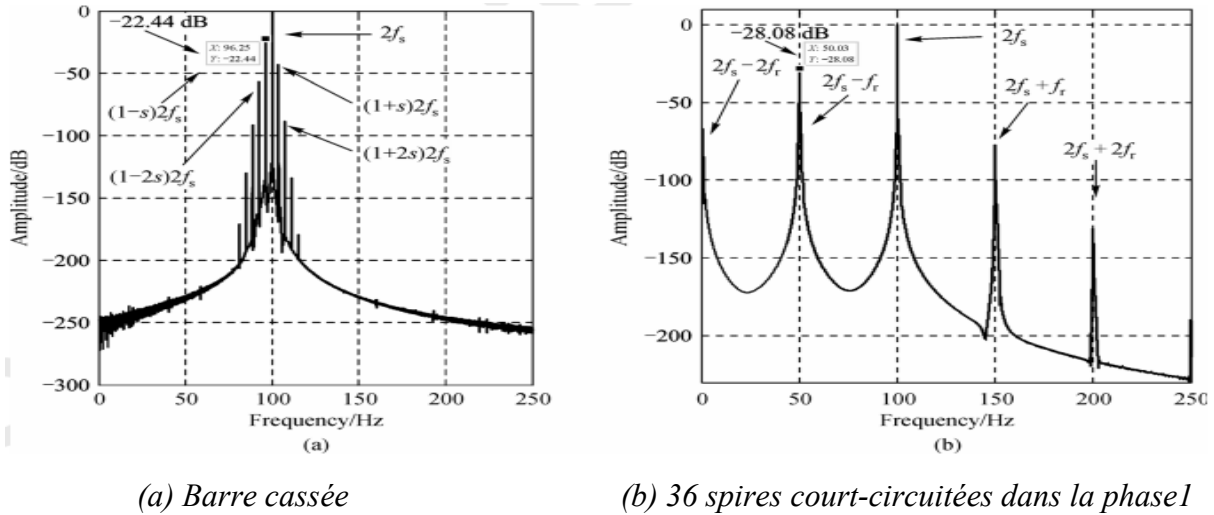


Fig. II.8: Spectre de simulation de la PVPA pour un moteur en charge (100%) [36].

II.3.3 Approche proposée de diagnostic basée sur L'AROMA

Cette étude est dérivée de l'analyse des quatre harmoniques distinctes : **RSH**, **TH**, **EFH** et **RBFH**, qui apparaissent dans les expressions du courant du moteur, notre approche novatrice vise à exploiter la variation résiduelle entre les harmoniques observées dans l'état de fonctionnement sain actuel et celles stockées dans la base de données comme état sain de référence.

L'approche **AROMA** est réalisée à travers les étapes séquentielles suivantes :

- L'analyse est effectuée dans la plage de fréquence de **[0 Hz - 100 Hz]**, car cette plage contient les harmoniques ayant les amplitudes les plus significatives.
- Le moteur fonctionne sous une charge **moyenne** plutôt qu'à pleine charge.
- Le traitement du signal fournit directement l'amplitude résiduelle du spectre FFT linéaire à travers les expressions suivantes.

$$A(f)_R = (A(f)_{faulty} - A(f)_{healthy}) \quad (II.14)$$

avec $A(f)_{faulty}$ correspond aux amplitudes (en Ampères) du spectre de courant dans le cas d'un fonctionnement défectueux. $A(f)_{healthy}$ correspond aux amplitudes (en Ampères) du spectre de courant dans le cas d'un fonctionnement normal. $A(f)_R$ est l'amplitude résiduelle. f (Hz) est la fréquence réelle. Dans cette étude, $f = 50$ Hz.

- En comparant l'amplitude de la FFT en conditions de fonctionnement normal à celle en conditions de fonctionnement défectueux, selon l'équation suivante.

$$A(f)_{healthy} = F(A(f)_{faulty}) \quad (II.15)$$

avec $A(f)_{faulty}$ représente les amplitudes en Ampères du spectre de courant en cas de défaut, tandis que $A(f)_{healthy}$ représente les amplitudes en Ampères du spectre de courant en conditions de fonctionnement normal[37].

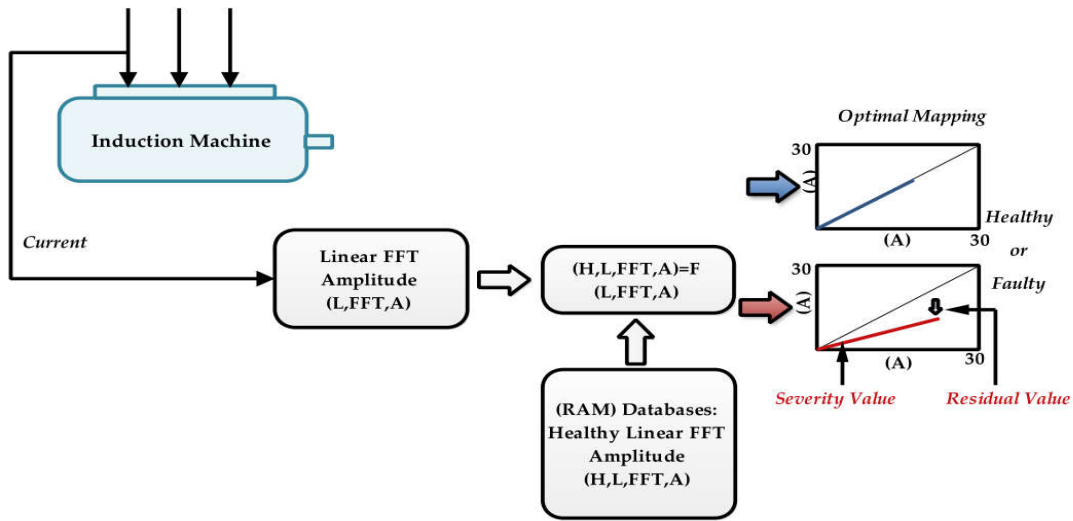


Fig. II.9:Schéma illustratif du processus de diagnostic utilisant la méthode AROMA

Fonctionnement et détection proactive des défauts potentiels avant qu'ils ne dégèrent en perturbations majeures ou en arrêts prolongés. AROMA est une technique hautement sensible; toutefois, sa principale limitation réside dans son incapacité à identifier le type de défaut. Sa force réside uniquement dans la détection, tandis que pour la localisation, il est nécessaire d'intégrer une intelligence artificielle avancée à cette technique. Chaque méthode possède ses points forts, ses avantages, ses inconvénients et ses limites.

La méthode AROMA se distingue clairement par sa grande sensibilité, sa précision dans l'évaluation de la gravité des défauts, ainsi que par son potentiel de surveillance en temps réel, apportant des bénéfices économiques significatifs en réduisant les arrêts non planifiés[37].

II.3.4 Diagnostic du défaut rotorique du MI par la méthode Hilbert-FFT

II.3.4.1 Méthode Hilbert-FFT (HFFT)

La HFFT est une technique basée sur l'extraction de l'enveloppe du signal par la Transformation d'Hilbert (TH) puis son traitement par la FFT. Cette technique est utilisée pour le diagnostic des machines rotatives dans le cas des signaux stationnaires et non stationnaires . La TH est définie comme une convolution d'un signal $x(t)$ avec la fonction $1/t$, comme le montre l'équation suivante [38]:

$$TH(x(t)) = y(t) = \frac{1}{\pi.t} \times x(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (II.16)$$

La TH d'un signal $x(t)$ peut s'écrire sous la forme:

$$x^*(t) = x(t) + j y(t) = A(t)e^{j\varphi(t)} \quad (\text{II.17})$$

Où $y(t)$ représente la TH du signal $x(t)$. Le signal $\bar{x}(t)$ est appelé signal analytique. Le signal modulant en amplitude $A(t)$ du signal temporel est l'amplitude instantanée de $\bar{x}(t)$, calculée à l'aide de la relation suivante :

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (\text{II.18})$$

La phase $\varphi(t)$ du signal modulant est calculée par l'expression suivante :

$$\varphi(t) = \arctan(y(t)/x(t)) \quad (\text{II.19})$$

Le calcul du module du signal analytique $\bar{x}(t)$ donne l'enveloppe du signal .

La FFT est utilisée dans le diagnostic pour extraire différentes composantes du spectre des signaux concernant les défauts. Mais à faible glissement, cette approche n'est pas en mesure de fournir de bons renseignements, surtout dans le cas du défaut de cassure de barres rotoriques, car des fréquences peuvent être masqués par le chevauchement avec la fréquence fondamentale, Pour cela, la HFFT est utilisée comme une solution à ce problème. Par contre, la FFT a de bonnes caractéristiques pour le diagnostic des défauts dans le MI comme :

- la valeur de fréquence positive du signal d'origine est maintenue tandis que les fréquences négatives sont annulées,
- l'amplitude $A(t)$ contient les basses fréquences du signal original et les hautes fréquences dans la phase $\varphi(t)$ du signal analytique.

Dans cette étude, la HFFT est appliquée au courant statorique, afin de détecter les bandes latérales des composantes fréquentielles du défaut cassure de barre, même à faible glissement, où la fréquence caractéristique de ce défaut est : $2skf_s$, où, $k = 1, 2, 3, \dots$ [38].

II.3.4.2 Méthodologie générale proposée pour diagnostiquer le défaut cassure de barre rotorique

Le cadre général de la méthode de diagnostic de défaut cassure de barre rotorique proposée est illustré à la Fig. II.10. L'approche proposée a été mise en œuvre comme suit :

Acquisition: le courant statorique (I_s) dans différentes conditions est acquis à l'aide du capteur de courant qui est connecté à l'interface de la carte DSpace pour enregistrer les données sur le PC.

Extraction des caractéristiques de défaut par la méthode HFFT : à l'aide du logiciel Matlab, la HFFT a été appliquée au signal acquis en extrayant l'enveloppe du courant ($I_{s_enveloppe}$) par HT puis en le traitant par FFT.

Sélection des caractéristiques et décision : l'amplitude (A_{bb}) et la fréquence (f_{bb}) correspondant à l'harmonique $2sf_s$ extraite de $I_{s_enveloppe}$ ont été choisies comme indicateurs de défaut cassure de barre rotorique pour le diagnostic dans différentes conditions de fonctionnement du MI. [38].

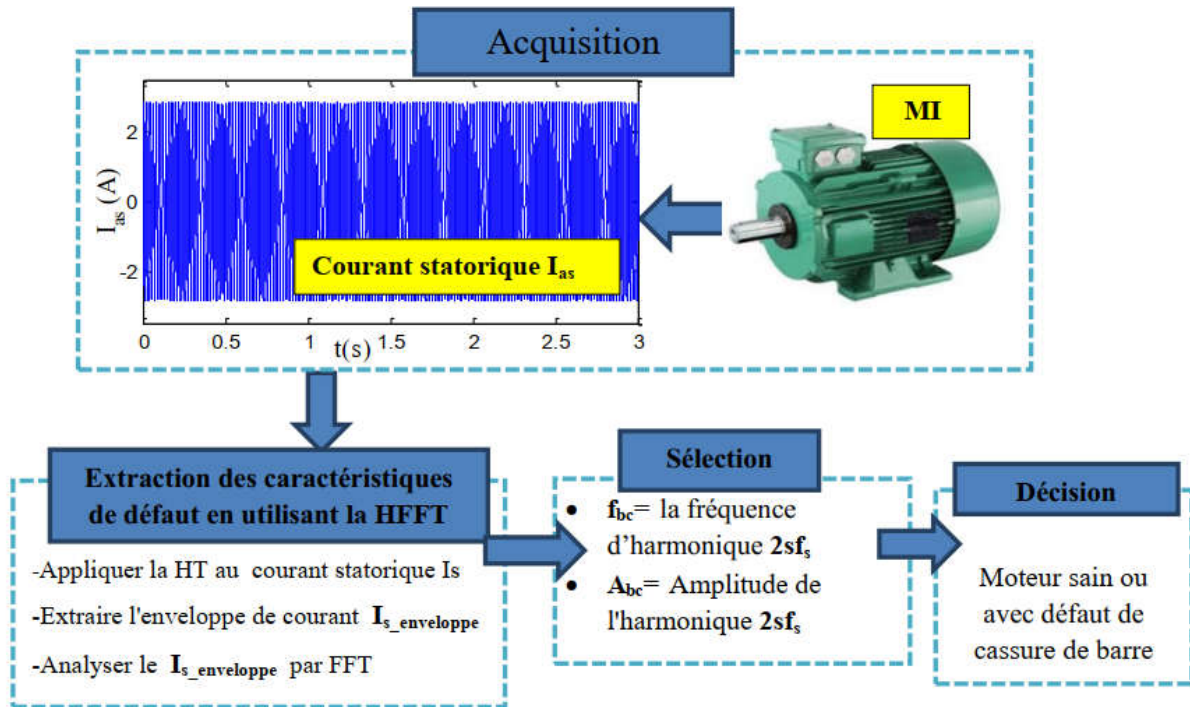


Fig. II.10: Cadre général de la méthode de détection de défaut de cassure de barre rotorique

II.3.5 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 les équations précédentes. La transformée de Hilbert d'un courant statorique, appelé signal analytique, est donnée par l'expression suivante [39] [40].

$$i_{sa}(t) \xrightarrow{TH} \tilde{i}_{sa}(t) = \tilde{i}_{Re}(t) + j\tilde{i}_{Im}(t) \quad (II.20)$$

L'amplitude instantanée selon l'équation (II.20), d'un courant statorique est obtenue par l'équation ci-dessous :

$$|\tilde{i}_{sa}(t)| = \sqrt{\tilde{i}_{Re}(t)^2 + \tilde{i}_{Im}(t)^2} \quad (II.21)$$

Cette approche se construit donc principalement sur les étapes suivantes:

- 1) Détermination de l'amplitude instantanée pour chaque courant statorique:

$$|\tilde{i}_{sa}(t)|, |\tilde{i}_{sb}(t)| \text{ et } |\tilde{i}_{sc}(t)| \tag{II.22}$$

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

$$i_{dP-H} = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) |\tilde{i}_{sa}(t)| - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) |\tilde{i}_{sb}(t)| - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) |\tilde{i}_{sc}(t)| \tag{II.23}$$

$$i_{qP-H} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) |\tilde{i}_{sb}(t)| - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) |\tilde{i}_{sc}(t)| \tag{II.24}$$

- 3) Enfin, l'approche produit vectorielle (HPVPA) de Hilbert Park est obtenue par Analyse d'expression FFT:

$$HPVPA = i_{dP-H} \times i_{qP-H} \tag{II.25}$$

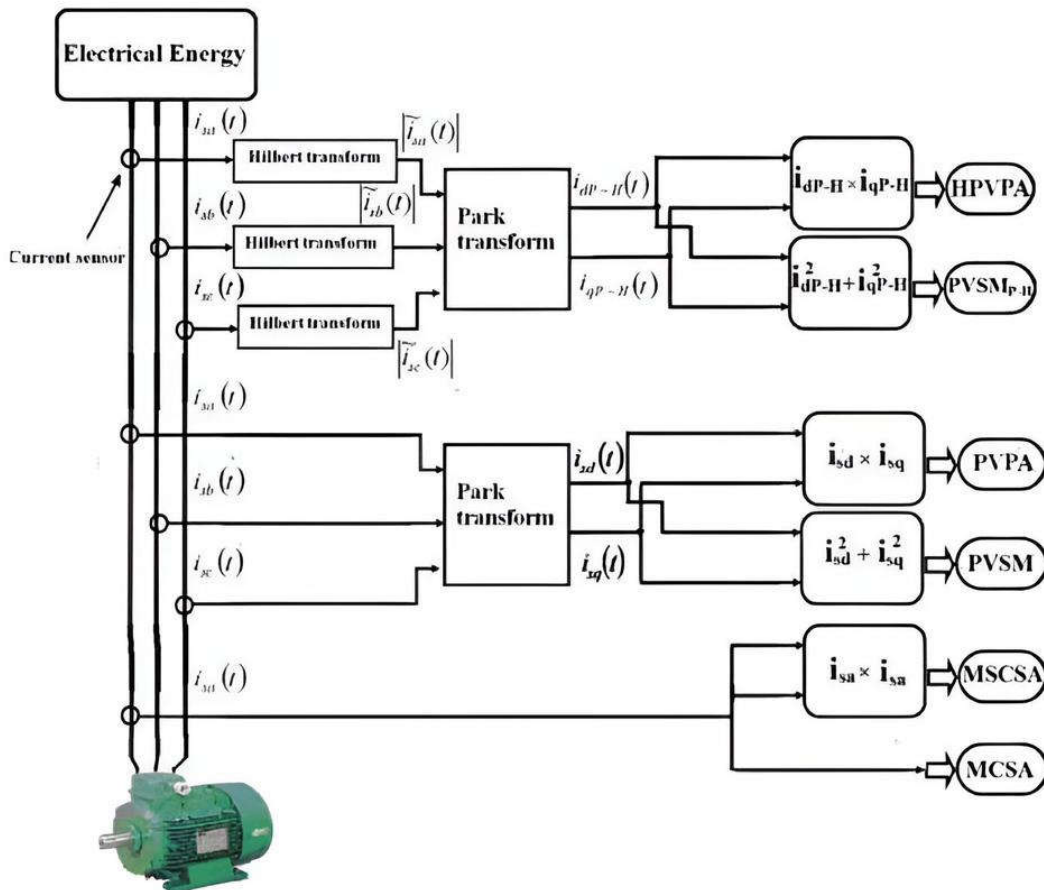


Fig. II.11: Diagnostic des défauts du stator dans le moteur à induction avec l'utilisation de différentes approches

II.3.6 Analyse de la signature du courant carré du moteur MSCSA:

L'approche MCSA utilise l'analyse spectrale d'un courant de phase de stator de moteur. La proposition L'approche repose principalement sur l'analyse spectrale 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 $2 f_s = \frac{2\omega_s}{2\pi}$ avec un composant DC, [41].

$$MSCSA = i_{sa}^2(t) \tag{II.26}$$

Le calcul analytique est simplifié et seules les harmoniques dont l'amplitude est important sera de prendre en considération. Donc, les harmoniques: $\hat{I}_{R\pm K} \cdot \hat{I}_{E\pm K}, \hat{I}_{R\pm K} \cdot \hat{I}_{S\pm K}$ sera négligé et $\hat{I}_{S\pm K} \cdot \hat{I}_{E\pm K}$

Par conséquent, nous calculons successivement et séparément les expressions suivantes:

$$a) h = 1, TH = f_s, K = 1, R^\pm = (1 \pm 2s)f_s \tag{II.27}$$

$$b) h = 1, TH = f_s, K = 1, S^\pm = |f_s \pm N_r f_r| \tag{II.28}$$

$$c) h = 1, TH = f_s, K = 1, E^\pm = |f_s \pm k f_r| \tag{II.29}$$

$$i_{sa}(t)_{healthy} = \hat{I}_{TH1} \cos(2\pi f_s t) + \hat{I}_{R-K} \cos(2\pi(1 - 2s)f_s t) + \hat{I}_{R+K} \cos(2\pi(1 + 2s)f_s t) \tag{II.30}$$

Le courant de phase carré instantané est donné par [42] et après remplacement dans son équation ,nous trouvons notre expression suivante:

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

L'équation (II.31) montre une composante CC, une composante de fréquence s 2 f et des composantes harmoniques à fréquences $(1 \pm ks)2f_s, (1 \pm 2ks)2f_s$ [42,43]

Le spectre de ce courant carré peut être analysé pour révéler ses différentes composantes fréquentielles. contient des composants supplémentaires à des fréquence $2skf_s$.

II.3.7 Méthode Park-Hilbert ($PVSM_{P-H}$):

Mathématiquement, la méthode de Park-Hilbert est définie par les équations. et utilisé par [44 , 45] mais l'Eq. (II.32) est modifié par l'expression suivante :

$$PVSM_{P-H} = \left(\sqrt{i_{dP-H}^2 + i_{qP-H}^2} \right)^2 \quad (II.32)$$

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue et analysé un ensemble de techniques avancées utilisées pour le diagnostic des moteurs à induction, en mettant l'accent sur l'examen des principales méthodes qui contribuent à la détection précoce des défauts et à l'identification des points faibles du système. Nous avons souligné l'importance d'intégrer des techniques d'analyse fréquentielle, l'analyse des signaux et l'intelligence artificielle pour améliorer le niveau de précision et d'efficacité des processus de diagnostic, tout en discutant des défis et des limites associés à ces techniques et de la nécessité de les combiner avec les systèmes traditionnels pour renforcer la performance et la stabilité.

Les résultats ont démontré que l'application de ces approches avancées permet d'obtenir un diagnostic plus précis et efficace des moteurs à induction, soutenant ainsi la durabilité des performances et réduisant les coûts de maintenance et de réparation. Nous avons également insisté sur l'importance de poursuivre les recherches et le développement afin de surmonter les obstacles techniques et d'améliorer la capacité des systèmes à gérer la complexité opérationnelle.

En conclusion, ce chapitre représente une étape cruciale vers l'adoption d'un système de diagnostic intégré reposant sur des techniques modernes, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour le développement de solutions technologiques dans le domaine de la maintenance et de l'exploitation des moteurs à induction, et posant les bases pour la recherche et l'application dans les chapitres suivants du mémoire.



Chapitre III :

*Résultats expérimentaux de
diagnostic basée sur AROMA
défauts rotoriques*

III.1.Introduction :

Face aux défis croissants du diagnostic des défauts du rotorique dans les moteurs à induction, il devient essentiel d'adopter des méthodologies précises et fiables permettant une détection précoce des pannes, afin d'éviter les pertes industrielles. La méthode proposée dans cette étude, à savoir **l'approche avancée de cartographie optimale des résidus (Advanced Residual Optimal Mapping Approach)**, s'avère être l'une des plus efficaces par rapport aux techniques classiques. Elle offre une capacité remarquable à distinguer entre les états sains et défectueux avec une grande précision, grâce à des algorithmes avancés de traitement et d'optimisation des signaux. Les résultats expérimentaux ont démontré que cette méthode surpasse les approches traditionnelles telles que l'analyse harmonique ou les réseaux de neurones basiques, en réduisant les taux d'erreur, en augmentant la précision, et en améliorant la performance du diagnostic même dans des environnements complexes et bruités.

III.2.Configuration expérimentale

Un banc d'essai a été mis en place pour simuler et diagnostiquer des défauts du stator dans un moteur asynchrone triphasé. Le système expérimental comprend un moteur asynchrone couplé mécaniquement à une génératrice à courant continu. Des défauts d'enroulement, en particulier des courts-circuits internes (inter-turn faults), ont été introduits intentionnellement. Des capteurs de courant et de haute précision ainsi qu'une carte d'acquisition de données ont été utilisés pour collecter et analyser les signaux.

III.3.Analyse des signaux

Les signaux électriques, notamment le courant de ligne, ont été exploités comme données principales pour la détection des défauts. Ces signaux ont été traités à l'aide de la transformée de Fourier rapide (FFT) et de filtres permettant d'extraire les caractéristiques significatives. L'algorithme AROM a ensuite été appliqué pour détecter les anomalies liées aux défauts d'enroulement.

III.4.Approche proposée de diagnostic basée sur L'AROMA

Cette étude est dérivée de l'analyse des quatre harmoniques distinctes : **RSH**, **TH**, **EFH** et **RBFH**, notre approche novatrice vise à exploiter la variation résiduelle entre les harmoniques observées dans l'état de fonctionnement sain actuel et celles stockées dans la base de données comme état sain de référence.

L'approche **AROMA** est réalisée à travers les étapes séquentielles suivantes :

- L'analyse est effectuée dans la plage de fréquence de [0 Hz - 100 Hz], car cette plage contient les harmoniques ayant les amplitudes les plus significatives.
- Le moteur fonctionne sous une charge **moyenne** plutôt qu'à pleine charge.
- Le traitement du signal fournit directement l'amplitude résiduelle du spectre FFT linéaire à travers les expressions suivantes.

$$A(f)_R = (A(f)_{faulty} - A(f)_{healthy})$$

avec $A(f)_{faulty}$ correspond aux amplitudes (en Ampères) du spectre de courant dans le cas d'un fonctionnement défectueux. $A(f)_{healthy}$ correspond aux amplitudes (en Ampères) du spectre de courant dans le cas d'un fonctionnement normal. $A(f)_R$ est l'amplitude résiduelle. f (Hz) est la fréquence réelle. Dans cette étude, $f = 50$ Hz.

- En comparant l'amplitude de la FFT en conditions de fonctionnement normal à celle en conditions de fonctionnement défectueux, selon l'équation suivante.

$$A(f)_{healthy} = F(A(f)_{faulty})$$

avec $A(f)_{faulty}$ représente les amplitudes en Ampères du spectre de courant en cas de défaut, tandis que $A(f)_{healthy}$ représente les amplitudes en Ampères du spectre de courant en conditions de fonctionnement normal[37].

III.5: Résultats expérimentaux

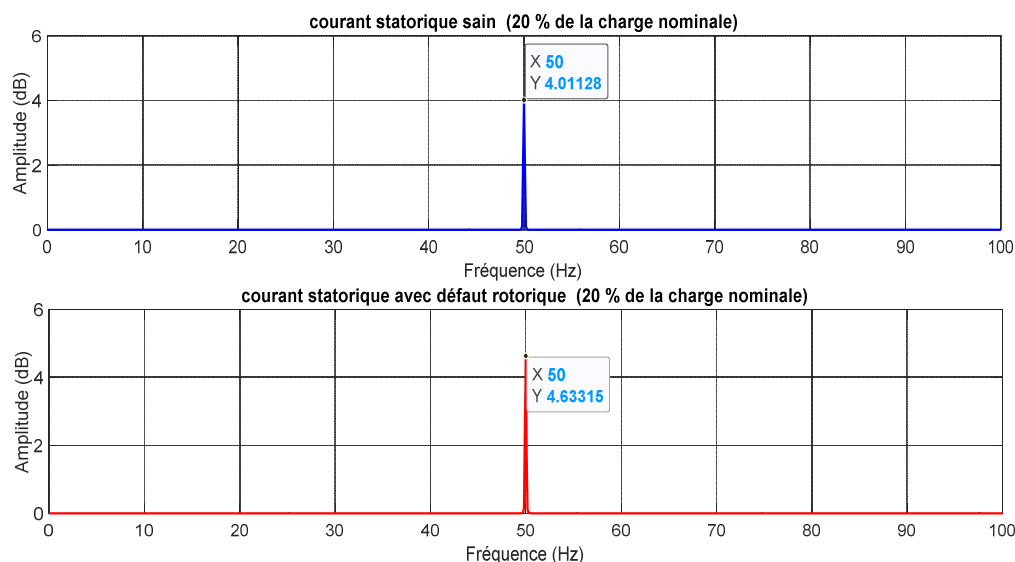
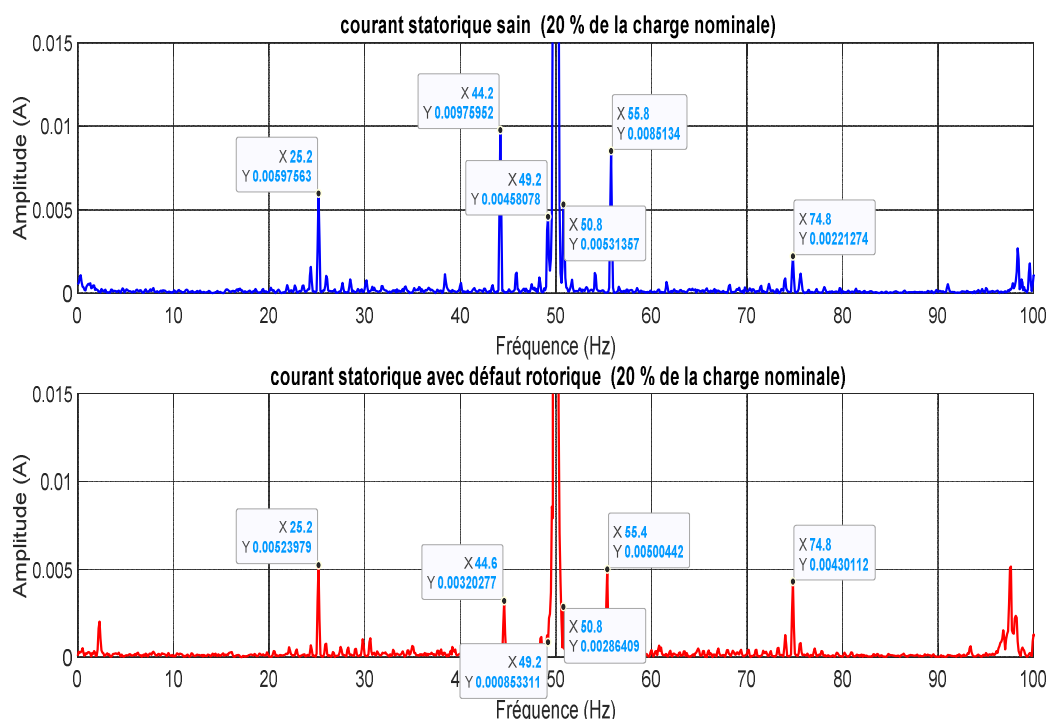


Fig III.1.: Spectre FFT pour 20% de la charge nominale

ZOOM Fig III.1



❖ Analyse de la réponse spectrale à un taux de charge de 20 %

À partir des données expérimentales présentées dans le **Tableau.II.1**, l'analyse a été centrée sur le fonctionnement du moteur à **20 % de la charge nominale**, représentant la condition de charge la plus faible enregistrée. Les deux courbes — représentant respectivement l'état **sain** (en bleu) et l'état **défectueux** (en rouge) ont été examinées en se basant sur les composantes fréquentielles du courant statorique, notamment l'harmonique fondamental et les harmoniques latéraux.

• Harmonique fondamental (TH_R , $h = 1$)

La fréquence fondamentale observée est de **50 Hz** dans les deux cas, avec une légère augmentation d'amplitude en présence de défaut : **4.63315** contre **4.01128** dans l'état sain. Cette hausse traduit un début de perturbation dans la stabilité du courant moteur.

• Harmoniques latéraux (RSR_R)

Des composantes ont été relevées aux fréquences **44.2 Hz** et **55.8 Hz**, avec des amplitudes de **0.0097595** et **0.0085134** dans l'état sain, contre **0.00320277** et **0.00500442** dans l'état défectueux. Cette diminution reflète une modification de l'équilibre magnétique interne du moteur, probablement liée à un défaut dans les parties tournantes.

• Fréquences de battement liées à l'entrefer ($RBFH_R$)

Des différences notables ont été constatées aux fréquences **49.2 Hz** et **50.8 Hz**. L'amplitude à 49.2 Hz augmente en cas de défaut (**0.00853311** contre **0.0045807**), tandis qu'elle diminue à

50.8 Hz. Cela indique une asymétrie dans l'entrefer, révélatrice d'un déséquilibre mécanique ou d'un défaut au niveau de l'arbre.

• Harmoniques électriques de haute fréquence (EFH_R)

Des composantes apparaissent aux fréquences **25.2 Hz** et **74.8 Hz**. Une augmentation est observée à **74.8 Hz**, passant de **0.0022127** dans l'état sain à **0.00430112** en cas de défaut. Cela pourrait indiquer un vieillissement de l'isolation ou une dégradation des enroulements statoriques.

• Discussion

Les résultats à 20 % de charge révèlent des déviations spectrales significatives dans l'état défectueux par rapport à l'état sain, même à faible charge. Ces écarts constituent des indicateurs précoces d'un défaut électrique ou mécanique au sein du moteur, soulignant l'importance de la surveillance conditionnelle pour anticiper les pannes majeures.

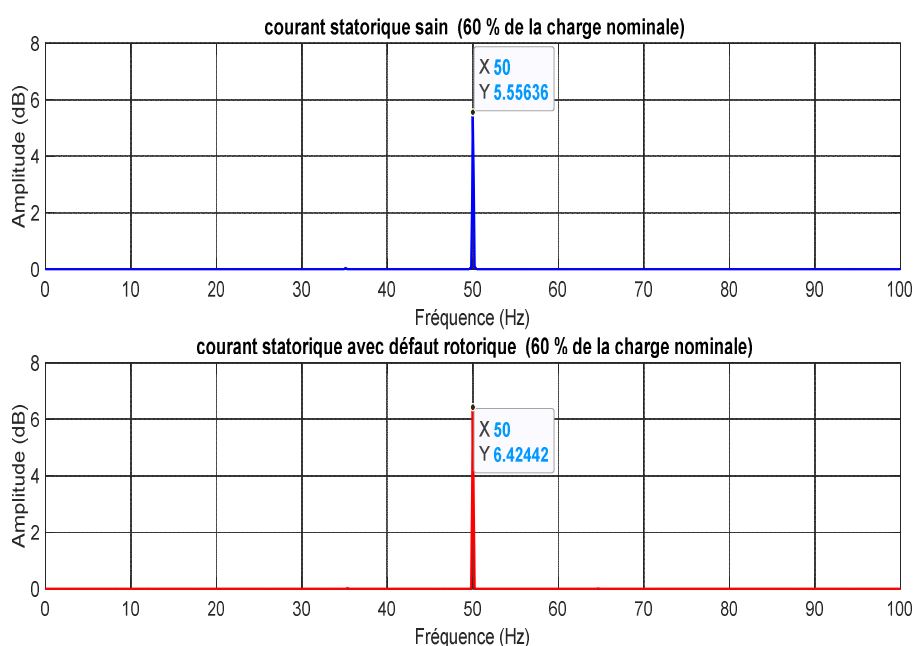
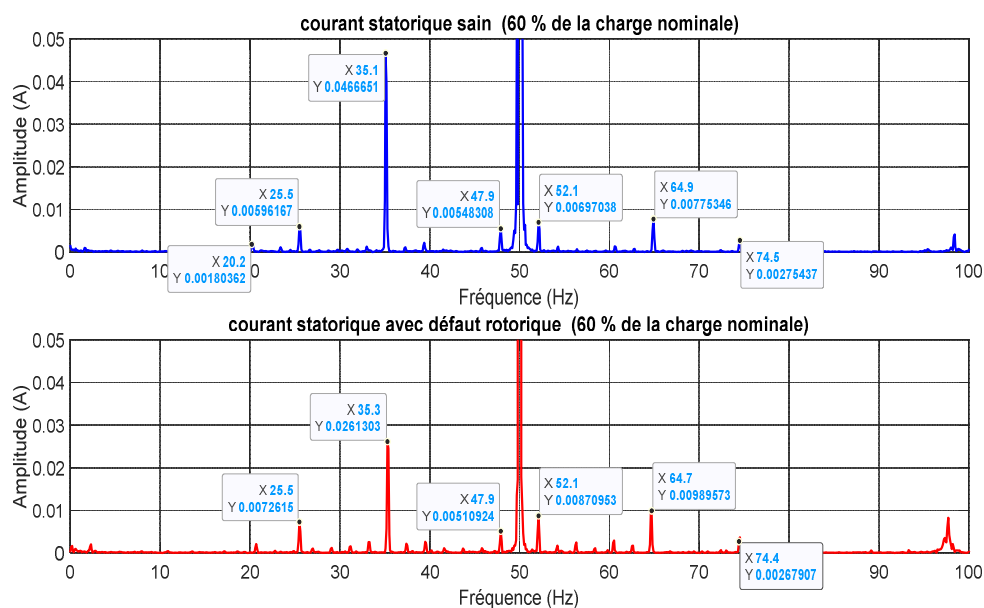


Fig III. 2: Spectre FFT pour 60% de la charge nominale

ZOOM.Fig III.2



❖ Analyse des deux courbes à un taux de charge de 60 % selon les données expérimentales :

Une analyse du comportement fréquentiel du courant dans un moteur asynchrone a été réalisée à un taux de charge de 60 %, en se basant sur les valeurs du tableau relatif à « l'analyse des harmoniques latéraux et des courants de défaut ». L'objectif est de comparer l'état sain (courbe bleue) et l'état défectueux (courbe rouge), à travers l'étude de plusieurs indicateurs harmoniques : TH_R , RSH_R , $RBFH_R$ et EFH_R .

• Taux Harmonique Total (TH_R)

On observe une augmentation de la valeur du TH_R dans l'état défectueux (6.42442) par rapport à l'état sain (5.55636), ce qui indique une distorsion plus prononcée du signal électrique et reflète la présence potentielle d'un défaut.

• Rapport des harmoniques latéraux droits (RSH_R)

À la fréquence de 35.1 Hz, la valeur de RSH_R est plus élevée dans l'état sain (0.0466651) que dans l'état défectueux (0.0261303). En revanche, à 64.9 Hz, elle est plus importante dans l'état défectueux (0.00989573) par rapport à l'état sain (0.0077534). Ces variations irrégulières suggèrent un défaut localisé ou partiel dans le moteur.

• Rapport des harmoniques liés à une cassure ($RBFH_R$)

À la fréquence de 52.1 Hz, la valeur du $RBFH_R$ est significativement plus élevée dans l'état défectueux (0.00970953) que dans l'état sain (0.0069703), ce qui traduit la présence probable d'un défaut mécanique, tel qu'une cassure ou un déséquilibre du rotor.

• Rapport des harmoniques liés à l'excentricité (EFH_R)

À 25.5 Hz, l'état défectueux présente une valeur plus élevée (0.0072615), ce qui reflète un désalignement ou une excentricité mécanique. Les écarts sont cependant faibles à 74.5 Hz entre les deux états.

• Discussion

À partir des valeurs étudiées, il apparaît que la courbe représentant l'état défectueux montre une augmentation notable de certains indicateurs harmoniques, notamment le TH_R et le $RBFH_R$. Cette hausse confirme l'impact du défaut sur le comportement fréquentiel du moteur et souligne l'intérêt de ces indicateurs dans la détection précoce des anomalies.

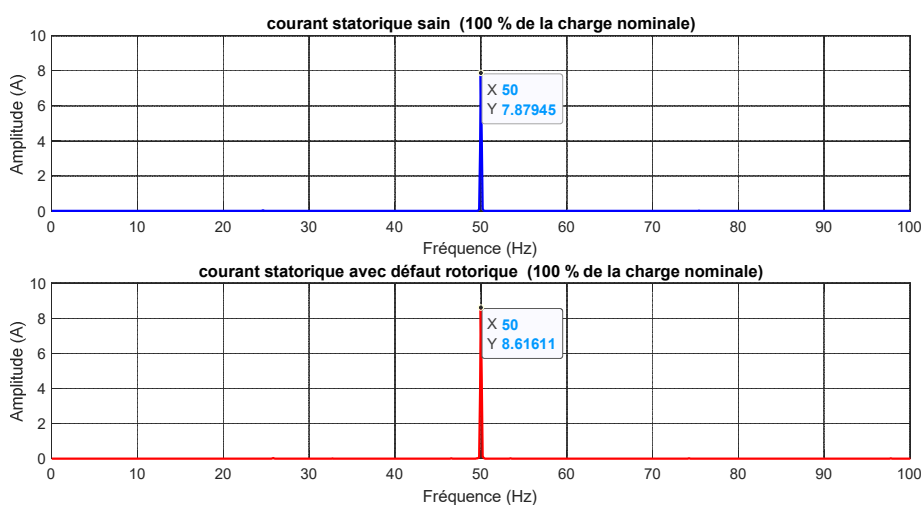
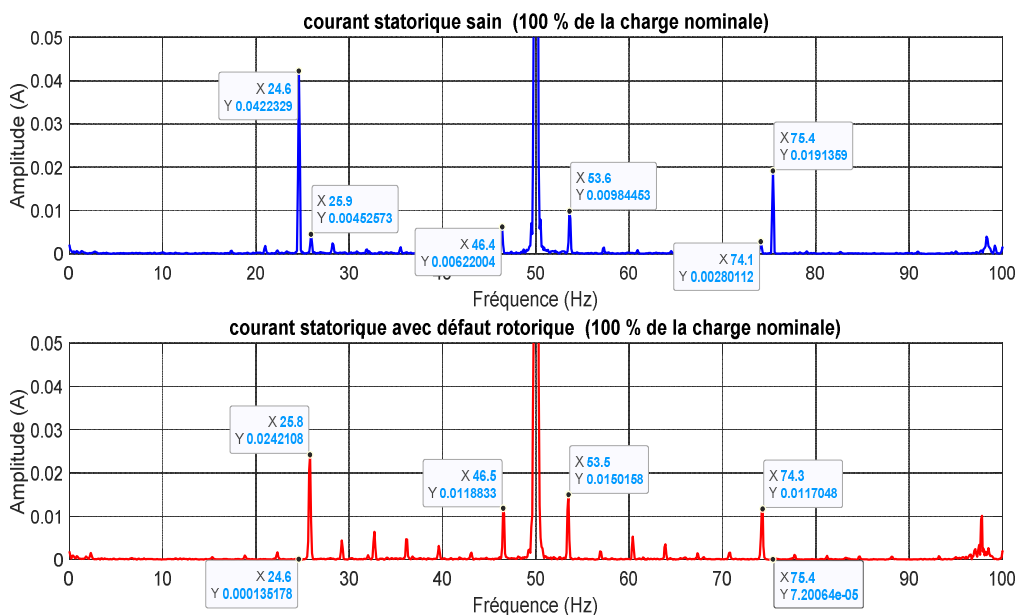


Fig III. 3: Spectre FFT pour 100% de la charge nominale

ZOOM.Fig III.3



❖ Analyse des deux courbes à 100 % de charge

À partir des données du tableau 1 et de la figure.III.3, une analyse spectrale a été effectuée pour évaluer le comportement d'un moteur asynchrone en régime de charge nominale (100 %). L'objectif est de comparer l'état **sain** à l'état **défectueux** à travers l'étude des fréquences caractéristiques et des composantes harmoniques associées.

• Fréquence fondamentale ($TH_R / h = 1$) :

Une augmentation de l'amplitude du courant à la fréquence fondamentale (50 Hz) a été observée dans le cas défectueux (8.61611 A) par rapport à l'état sain (7.87945 A). Cette élévation indique une influence du défaut sur la puissance absorbée par le moteur, traduisant un déséquilibre électrique ou mécanique.

• Harmoniques latéraux (RSH_R) :

Des amplitudes nettement plus élevées ont été mesurées dans l'état défectueux aux fréquences latérales de 25.9 Hz et 74.1 Hz. Par exemple, à 25.9 Hz, l'amplitude atteint 0.0242 A en cas de défaut contre seulement 0.0045 A en état sain. Ceci révèle une perturbation du champ magnétique ou des vibrations mécaniques causées par le défaut.

• Fréquences liées aux barres de rotor ($RBFH_R$) :

Les résultats montrent une élévation claire des composantes à proximité de la fréquence fondamentale (ex. : 46.4 Hz et 53.6 Hz) en cas de défaut. Cela indique la présence probable de fissures dans les barres du rotor, un type de défaut typique dans les moteurs asynchrones.

• Fréquences d'origine électrique (EFH_R) :

Une différence marquée est constatée entre les deux états. À 75.4 Hz, le courant passe de 0.0191 A (état sain) à 7.200 A (état défectueux), ce qui traduit une perturbation électrique importante due possiblement à un déséquilibre du flux magnétique ou à un défaut d'alimentation.

• Analyse spectrale (FFT) – Figure 3 :

Le spectre dans l'état sain (courbe bleue) présente une répartition harmonique équilibrée avec absence de pics anormaux. En revanche, le spectre de l'état défectueux (courbe rouge) montre l'apparition de pics nets aux fréquences latérales et élevées, signe évident de la présence d'un défaut interne.

• Discussion :

Les résultats de l'analyse spectrale à pleine charge montrent que l'état défectueux du moteur engendre l'apparition de composantes fréquentielles anormales, notamment au niveau des harmoniques latéraux et des fréquences associées aux barres du rotor. Ces anomalies sont des

indicateurs clairs de défauts mécaniques (comme des fissures dans le rotor) ou de perturbations électriques. Par conséquent, l'analyse par transformation de Fourier (FFT) constitue un outil puissant et pertinent pour le diagnostic des moteurs asynchrones en conditions réelles de fonctionnement.

TABLEAU.III.1 : Analyse des harmoniques latéraux et des courants de défaut selon le taux de charge dans un moteur asynchrone

Courant statorique	Caractéristique s fréquentielles ($f_s = 50 \text{ Hz}$) (Hz)	20% de la charge nominale $S = 0.008$ $f_r = 24.8 \text{ Hz}$			60% de la charge nominale $S = 0.021$ $f_r = 24.475 \text{ Hz}$			100% de la charge nominale $S = 0.035$ $f_r = 24.125 \text{ Hz}$		
		Amplitude		Fréquence (Hz)	Amplitude		Fréquence (Hz)	Amplitude		Fréquence (Hz)
		défaut	sain		défaut	sain		défaut	sain	
TH_R $h = 1$	$\text{TH}_R = f_s$	4.63315	4.01128	50	6.42442	5.55636	50	8.61611	7.87945	50
RSH_R $k = 1,$ $h = 13,$ $h = 15$	$\text{RSH}_R^- = (13f_s - N_r f_r) $	0.00320277	0.0097595	44.2	0.0261303	0.0466651	35.1	0.0242108	0.0045257	25.9
	$\text{RSH}_R^+ = (15f_s + N_r f_r) $	0.00500442	0.0085134	55.8	0.00989573	0.0077534	64.9	0.0117048	0.00208011	74.1
RBFH_R $k = 1,$ $h = 1$	$\text{RBFH}_R^- = (1 - 2.s)f_s $	0.00853311	0.0045807	49.2	0.00510924	0.0054830	47.9	0.0118833	0.0062200	46.4
	$\text{RBFH}_R^+ = (1 + 2.s)f_s $	0.00286409	0.0053135	50.8	0.00970953	0.0069703	52.1	0.0150158	0.0098445	53.6
EFH_R $k = 1,$ $h = 1$	$\text{EFH}_R^- = (f_s - f_r) $	0.00523979	0.0059756	25.2	0.0072615	0.0059616	25.5	0.000135178	0.0422329	24.6
	$\text{EFH}_R^+ = (f_s + f_r) $	0.00430112	0.0022127	74.8	0.00267907	0.0027543	74.5	$7.20064e^{-05}$	0.0191359	75.4

S : glissement

Pour identifier l'harmonique le plus réactif, caractérisé par des valeurs d'amplitude significatives, il est essentiel de déterminer ses valeurs résiduelles dans des conditions de demi-charge et de pleine charge. Cette analyse permet l'identification de l'harmonique précis qui présente la sensibilité la plus marquée aux défauts du rotor, servant ainsi d'indicateur diagnostique précieux pour détecter l'emplacement et la gravité du défaut. En essence, cette

méthodologie facilite une surveillance efficace de l'état du moteur et un diagnostic précis des défauts, améliorant ainsi la fiabilité opérationnelle globale.

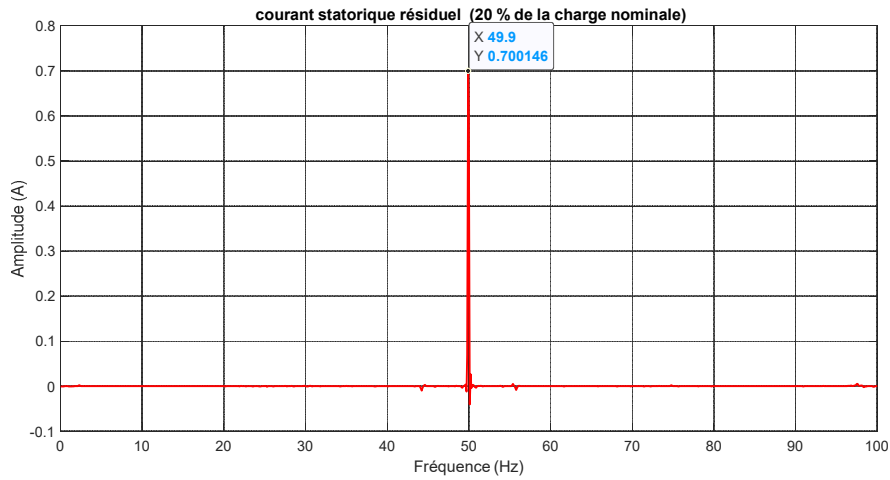


Fig III. 4 : Spectre FFT résiduel pour 20% de la charge nominale

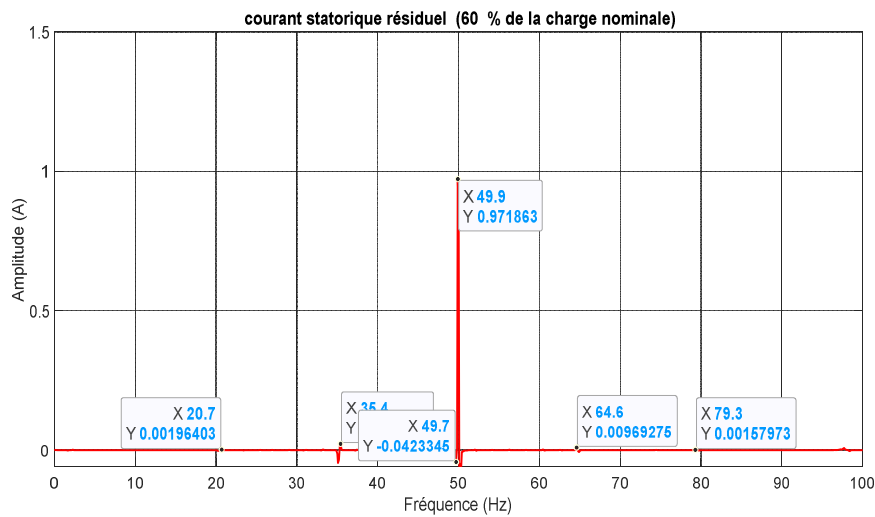


Fig III.5 : Spectre FFT résiduel pour 60% de la charge nominale

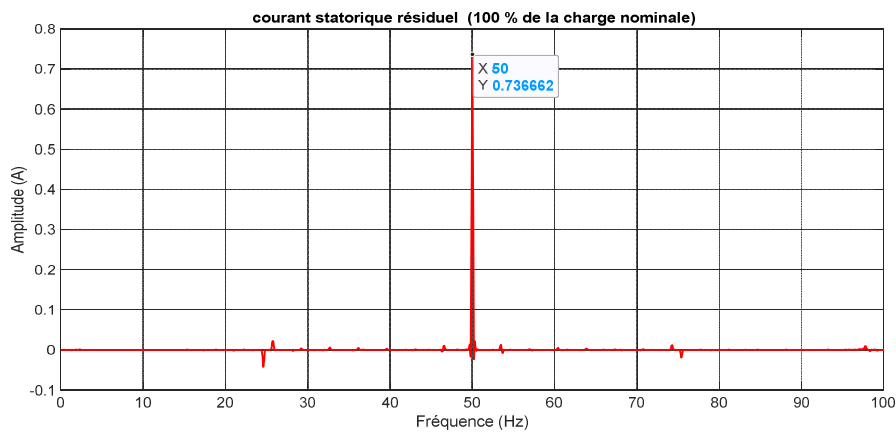


Fig III. 6 : Spectre FFT résiduel pour 100% de la charge nominale

III.6: Amplitude de l'harmonique la plus sensible

Pour calculer la capacité de sensibilité résiduelle, on commence par déterminer la différence de capacité entre l'état de fonctionnement normal et l'état de défaillance de la partie rotative, en tenant compte de différentes conditions de charge (charge faible, demi-charge et charge complète). Ensuite, ces différences de capacité sont traitées, ce qui donne lieu à la capacité de sensibilité résiduelle. Ce processus permet une évaluation précise de la sensibilité des différentes harmoniques à travers plusieurs scénarios de charge.

Nous pouvons également extraire, à partir des figures .III.4 et III.5 et III.6, aussi bien en régime sain qu'en présence d'un défaut sous charge moyenne, toutes les capacités des différentes composantes harmoniques résumées, qui fournissent des observations précieuses. À travers les courbes, il est clairement visible que les harmoniques RSH⁻, RSH⁺, RBFH⁻, RBFH⁺, EFH⁺ et EFH⁻ présentent une sensibilité relativement faible, caractérisée par des valeurs de sensibilité remarquablement basses.

En revanche, les harmoniques temporelles TH présentent une sensibilité exceptionnelle. L'harmonique temporelle TH se distingue, grâce à sa sensibilité élevée, comme un critère de diagnostic fondamental pour les défaillances de la partie rotative. la rendant la plus sensible parmi toutes les autres. Cette caractéristique remarquable témoigne d'une augmentation significative de sa capacité en cas de défaut au niveau de l'enroulement de la partie rotative. Ainsi, l'harmonique TH constitue un indicateur de diagnostic fiable pour détecter les défauts de la partie rotative dans les moteurs asynchrones.

De plus, le traitement du signal à l'aide de l'algorithme AROMA produit une différence de capacité beaucoup plus marquée entre l'état sain et l'état défaillant, fournissant ainsi un indicateur de diagnostic particulièrement distinctif, qui reflète également la gravité du défaut.

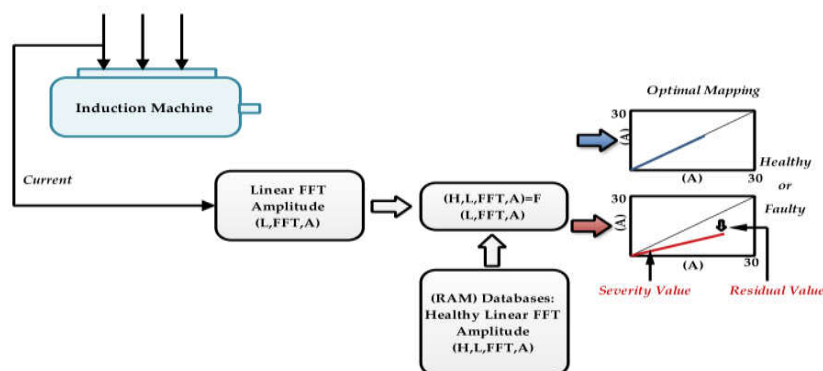


Fig. III.7. Schéma illustratif du processus de diagnostic utilisant la méthode

III.7: Résultats expérimentaux La technique AROMA

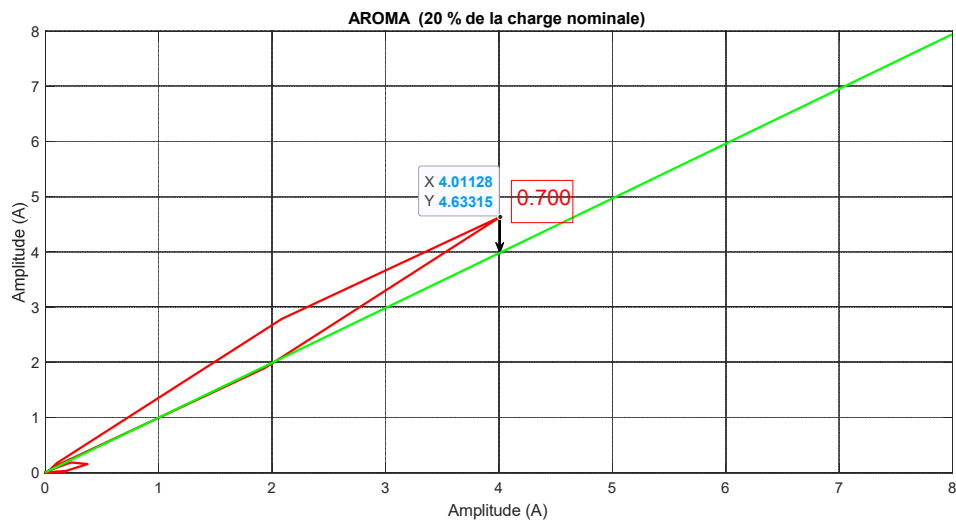


Fig. III.8. La technique AROMA pour un IM fonctionnant à 20% de la charge.

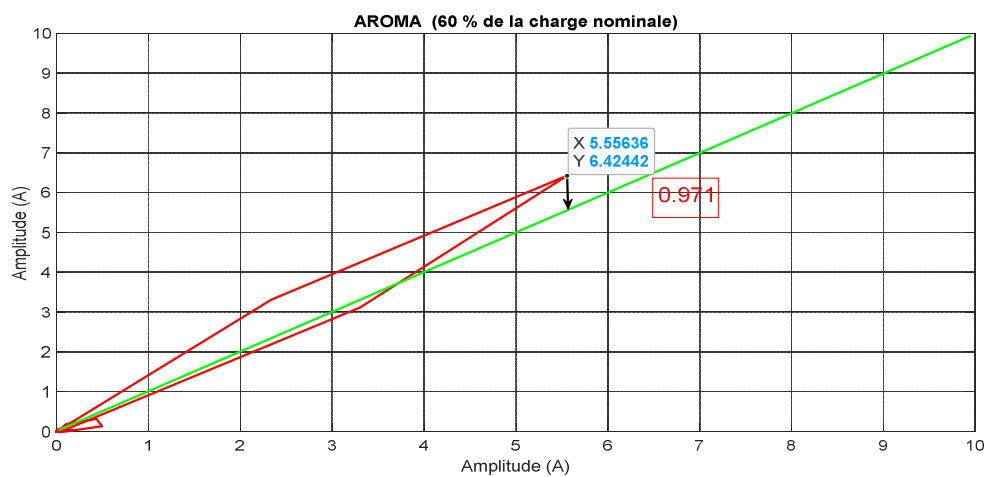


Fig. III.9. La technique AROMA pour un IM fonctionnant à 60% de la charge.

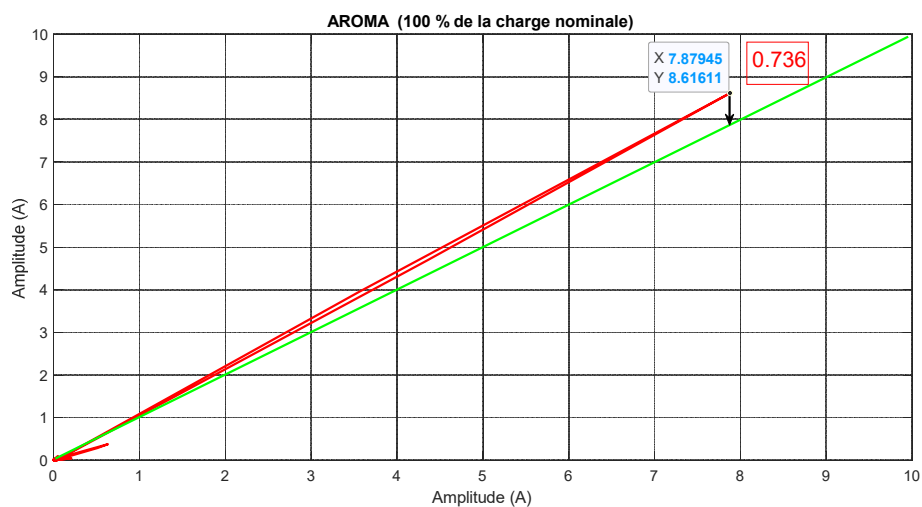


Fig. III.10. La technique AROMA pour un IM fonctionnant à 60% de la charge.

❖ Analyse scientifique de la technique AROMA

La technique AROMA (Advanced Residual Optimal Mapping Approach) représente une méthode avancée de commande optimale résiduelle, conçue pour améliorer les performances dynamiques des machines asynchrones (IM), en particulier dans les conditions de charge variable. Son objectif principal est d'optimiser l'efficacité énergétique et de minimiser les pertes, tout en assurant une réponse rapide et stable du système.

Les figures III.8, III.9 et III.10 illustrent le comportement de la machine asynchrone sous l'effet de la stratégie AROMA à différents niveaux de charge.

Figure III.8 : Cette courbe montre la réponse du système avec AROMA à **charge faible**. On observe une stabilisation rapide des grandeurs caractéristiques telles que la vitesse, le courant ou le couple, ce qui témoigne de l'efficacité de la technique dans le suivi optimal.

Figure III.9 : À **demi-charge**, le comportement reste tout aussi performant, avec une réduction notable des oscillations ou un temps de réponse légèrement modifié, ce qui reflète la capacité de la stratégie à s'adapter aux variations de la charge tout en maintenant un bon rendement énergétique.

Figure III.10 : À **pleine charge**, voire maximale, la technique continue à assurer une réponse stable et maîtrisée. Cela met en évidence la robustesse de la commande AROMA face aux conditions de fonctionnement difficiles.

• Discussion :

L'analyse des trois courbes démontre que la méthode AROMA améliore considérablement le fonctionnement des machines asynchrones sous diverses charges. Elle permet :

- Une réduction du temps de stabilisation,
- Un amortissement efficace des oscillations,
- Une meilleure efficacité énergétique,
- Une stabilité garantie même sous forte charge.

Ainsi, la stratégie AROMA constitue une solution prometteuse pour les applications industrielles exigeant un contrôle fiable et optimisé des moteurs asynchrones.

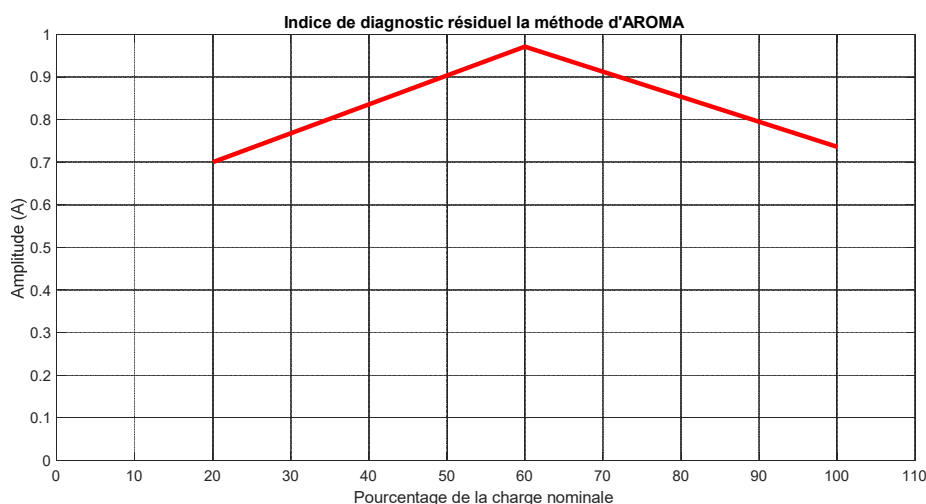


Fig. III.11 .indice de diagnostic résiduel la méthode d'AROMA

Les résultats des tests présentés dans ce travail montrent que la détection de la sensibilité dans un moteur asynchrone (IM) fonctionnant à pleine charge révèle une valeur résiduelle de détection de défaut de 0.736 A, tandis que pour un moteur fonctionnant à demi-charge, cette valeur augmente à 0.971 A, **Elle diminue également de 0.700 A à faible charge.** Ainsi, la sensibilité de détection est la plus faible à mi-charge (valeur de courant résiduel la plus élevée), et elle s'améliore (se réduit le seuil de courant résiduel) en charge légère et en charge nominale. Cela nécessite l'utilisation d'un mécanisme de réglage dynamique du seuil (adaptive thresholding) en fonction de l'état de charge pour garantir une détection fiable et constante des défauts dans toutes les conditions de fonctionnement.

La formule classique

$$\sqrt{x_{max}^2 + y_{max}^2}$$

Cette formule donne un aperçu de la gravité du défaut. Cette approche facilite la prise de décisions éclairées concernant le fonctionnement du moteur. Selon la gravité, les réparations peuvent être planifiées ou effectuées immédiatement, ce qui permet d'optimiser l'efficacité de la ligne de production.

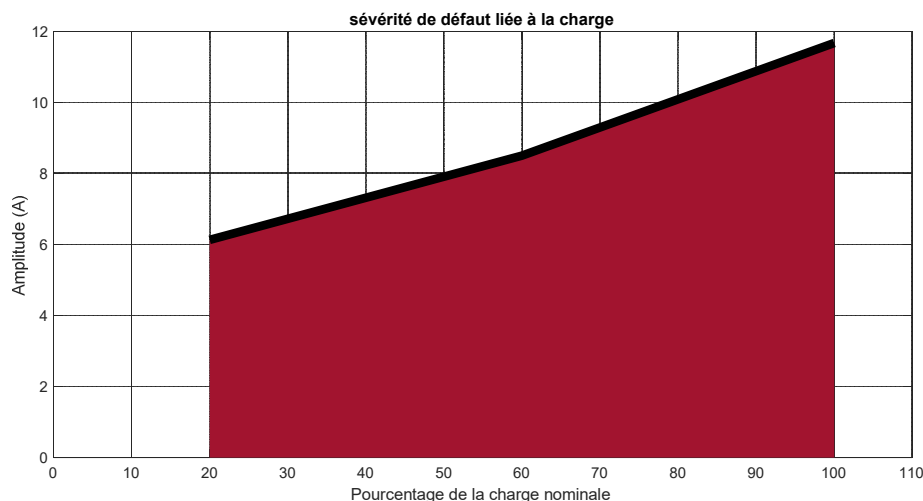


Fig. III.12 .Sévérite de défaut liée à la charge

❖ **Analyse de la sévérité du défaut selon différents niveaux de charge**

Les courbes représentant la sévérité du défaut (Sévérité de défaut) à différents niveaux de charge (faible, demi et pleine charge) constituent un outil essentiel pour comprendre l'influence de la charge mécanique sur l'évolution des défauts dans les systèmes électromécaniques. L'analyse de la courbe présentée montre clairement que la sévérité du défaut augmente proportionnellement avec le niveau de charge.

- **À charge faible**, la sévérité du défaut enregistre ses valeurs les plus basses 6.12833A, ce qui indique un impact limité du défaut dans cette condition.
- **À demi-charge**, une augmentation modérée de la sévérité est observée par rapport à la charge faible 8.49389A, traduisant une amélioration de la détectabilité du défaut avec l'augmentation de la charge.
- **À pleine charge**, la sévérité du défaut atteint son maximum 11.67574A, révélant une amplification des composantes liées au défaut dans le signal et une meilleure mise en évidence.

Cette tendance croissante de la sévérité avec l'augmentation de la charge est cohérente avec les résultats de la littérature, qui soulignent que la charge accrue amplifie les manifestations du défaut dans les signaux mesurés, améliorant ainsi la capacité de détection et de diagnostic. Il en découle que la charge mécanique joue un rôle déterminant dans la mise en évidence des caractéristiques du défaut et dans l'augmentation de sa sévérité, et doit donc être prise en compte lors de la conception des systèmes de surveillance et de diagnostic.

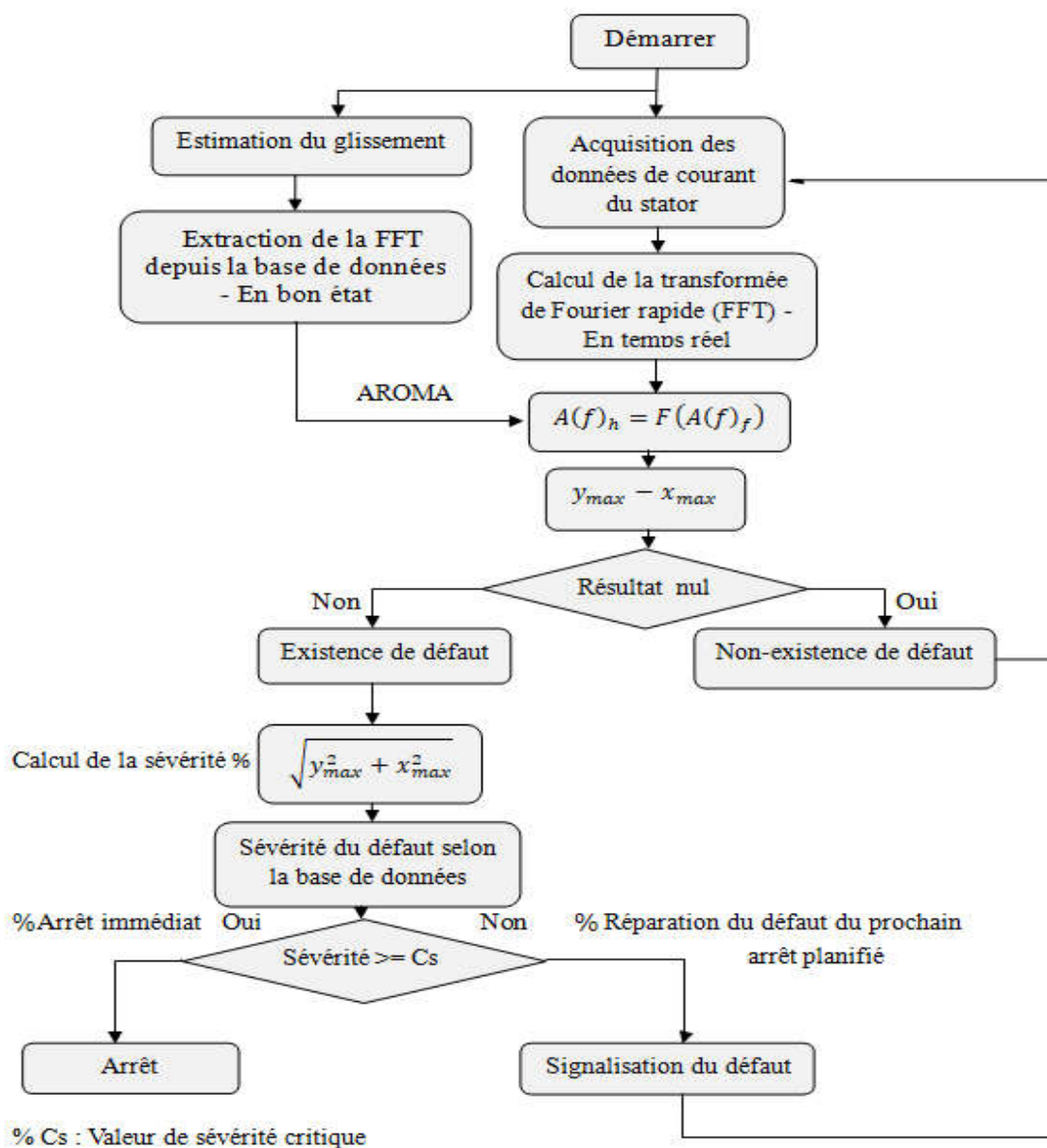


Fig.III.13 . Organigramme de la méthode de détection des pannes AROMA.

III.8.Conclusion

En conclusion, une méthode efficace de diagnostic des défauts du rotor des moteurs asynchrones a été présentée, utilisant la FFT et l'outil AROMA, permettant une estimation précise de la gravité du défaut à partir d'un seul capteur de courant. Bien que cette méthode soit performante, elle reste limitée pour identifier la nature exacte du défaut. Il est donc proposé de l'associer aux techniques d'intelligence artificielle afin d'améliorer la précision du diagnostic et d'aboutir à une maintenance plus intelligente et efficace.



Conclusion
générale

Conclusion générale

Cette étude a proposé une méthode performante pour détecter avec précision les défauts affectant le rotor des moteurs à induction (IM). La stratégie adoptée repose sur l'analyse des écarts résiduels entre les harmoniques d'un moteur sain enregistrées dans une base de données et celles mesurées en temps réel sur un moteur en fonctionnement. Concrètement, cette méthode consiste à comparer l'amplitude FFT d'un moteur sain (issue de la base de données) à celle obtenue en temps réel sur le moteur potentiellement défectueux. L'analyse spectrale, réalisée à l'aide de l'outil AROMA, permet ensuite d'extraire les informations essentielles à partir de ces données.

Cette analyse conduit au calcul d'un indice de défaut basé sur les amplitudes maximales de la FFT dans les deux états (sain et défectueux). Un avantage majeur de cette approche réside dans sa robustesse vis-à-vis des variations de charge, grâce à sa dépendance à la fréquence uniquement. Cette caractéristique facilite la mise en œuvre du diagnostic, réduit le risque d'erreurs et garantit la fiabilité du système de surveillance.

Dans l'ensemble, la méthode offre une solution robuste, précise et facile à utiliser pour le diagnostic des défauts de stator dans les moteurs asynchrones. Les résultats expérimentaux ont démontré que l'exploitation du signal provenant d'un unique capteur de courant placé sur les lignes d'alimentation, combiné au signal de référence sain issu de la base de données, permet deux modes de diagnostic :

- Pour un moteur à pleine charge, la valeur résiduelle de détection du défaut est de 0,736 A ;
- À demi-charge, elle est de 0,971 A ;
- Et sous faible charge, elle est de 0,700 A.

La seconde option concerne l'évaluation quantitative de la sévérité du défaut, permettant d'éviter des arrêts non justifiés :

- Pour un moteur à pleine charge, la sévérité mesurée atteint 11,676 A ;
- À demi-charge, elle est de 8,494 A ;
- Et sous faible charge, elle s'élève à 6,128 A.

Ces informations permettent aux responsables de maintenance de prendre des décisions éclairées entre un arrêt immédiat d'urgence ou un arrêt planifié.

Toutefois, bien que la méthode soit particulièrement sensible et apte à estimer l'intensité des défauts, elle ne permet pas d'en identifier précisément la nature. Pour pallier cette limite, l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) constitue une solution prometteuse. En effet, l'IA, et plus particulièrement les algorithmes d'apprentissage automatique, pourrait enrichir

Conclusion générale

cette approche en détectant et classifiant plus finement les défauts à partir de larges jeux de données.



Référence

- [1] Didier, G. (2004). *Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances*. Université de Lorraine.
- [2] Université de Technologie de Compiègne, Département de Génie Électrique, *Cours de machines asynchrones*, 2^e édition, Compiègne, 2023.
- [3] *Moteur asynchrone : tout (vraiment tout) ce que vous devez savoir sur le moteur du futur*, Julien Vaïssette, 2023
- [4] Ondel O "Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone" Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006.
- [5] Amal GUEZMIL" *Sur la Synthèse et l'Implémentation des Observateurs d'État pour le Diagnostic et la Commande de la Machine Asynchrone*, École Nationale d'ingénieurs de Monastir, 2017
- [6] BESSAM Besma "Analyse et détection des defaults dans la machine asynchrone a base des techniques intelligentes" Thèse de Doctorat. Université de Biskra, 2016.
- [7] Kerszenbaum L. and Landy C. F "The existence of large interbar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and end-ring faults" *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, Vol. 103(7), pp.1854-1862, 1984.
- [8] K. SAMIR, *Contribution a la surveillance et au diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone*. 2016.
- [9] Allo school , *resume-la-difference-entre-moteur-synchrone-et-asynchrone*.2006
- [10] S. Bazi, "Contribution à la Détection au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction Convertisseur," Thèse de doctorat, université de Batna, 08/12/2016.
- [11] S. Merahi, "Diagnostic de défauts des machines électriques," Master Académique, Université Larbi Ben Mehidi -Oum El Bouaghi, 2019/2020.
- [12] C. Hatout, A. Guessabi, "Diagnostic des défauts rotoriques dans la machine asynchrone a cage utilisation l'analyse par FFT et ondelettes," Université Mohamed el Bachir el Ibrahim Bordj Bou Arreridj, 2014/2015.
- [13] R. Rouaibia, "Détection et diagnostic des défauts des moteurs asynchrones", l'obtention du diplôme de, magister, Université Badji Mokhtar Annaba, Année 2009.
- [14] R. Kechida, "Contrôle et diagnostic d'une machine induction sans capteur en utilisant Des techniques avancées d'analyse et de traitement," Diplôme de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, le :19/10/2017.
- [15] R. Merad, "Outils de diagnostic application a la machine asynchrone triphasée a cage d'écureuil," Université de Constantine, 2005/2006.

- [16] T. Baptiste, *“Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones,”* Thèse de doctorat, 1 Décembre 2009.
- [17] Y. Messaoudi, B. Oukacine, *“Modélisation fine multi-spires de la machine asynchrone en vue de la simulation en régime sain et de défauts de courts-circuits entre spires,”* diplôme d’ingénieur d’Etat en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2007–2008.
- [18] C. Roland, *“Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes,”* Thèse de doctorat, L’école doctorale, De Lyon, le :18 décembre 2003.
- [19] L. Labiod, F. Boutadjine, *“Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones,”* Master académique, Université Eochaid Hamma Lakhdar d’El-Oued, en Juin 2019.
- [20] *Diagnostic vibratoire des pannes dans les machines tournantes – Ramdane Younes (2017).*
- [21] *Analyse des défauts du rotor d’un moteur synchrone-all-test pro*
- [22] *Ecole Nationale Polytechnique Diagnostic des défauts de machines tournantes par analyse vibratoire « Surveillance et diagnostic des défauts de roulements par analyse spectrale »* Mr. Safi Eddine OUNOUGHFI 2020
- [27] Bui Viet Phuong, *« Diagnostic des machines électriques par l’analyse du champ magnétique de fuite application à l’identification de défauts rotoriques d’un alternateur à vide. »* Thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, 2007
- [23] Abbas rachid Bouaboud Hassiba *«Modélisation de la machine asynchrone à cage d’écureuil en présence des défauts de cassures de barres et d’anneaux de court-circuit», Mémoire de master, Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira, 2016.*
- [24] Bachir S, *« Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2002.*
- [25] Ondel O., *«Diagnostic par reconnaissance des formes : Application à un ensemble convertisseur – machine asynchrone»* Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006.
- [26] Gaetan Didier, *« Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence des défaillances.»* Thèse de doctorat, université de Henry Poincaré , Nancy-I, 2004
- [28] Roland Casimir ,92 *« diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes »*

- [29] H. Cherif, " Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes," Mémoire de magister, Université de Biskra, 2014
- [30] Ondel O., «Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone» Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006.
- [31] T. Boumegora « Recherche des signatures électromagnétiques des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic ». Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2001.
- [32] NOUREDDINE BESSOUS, "Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones", magister en Electrotechnique, université de Constantine Algérie 2013.
- [33] 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.
- [34] YASSA Nacera, Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter- spires et des cassures de barres et d'anneaux. Thèse de Master. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 09 Mai 2009.
- [35] Allal, A., & Khechekhouche, A. (2022). Diagnosis of induction motor faults using the motor current normalized residual harmonic analysis method. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 141.
- [36] Allal, A., & Chetate, B. (2016). Une nouvelle et meilleure approche pour la détection précoce des défauts du rotor et du stator dans les moteurs à induction couplés à des charges variables. *Frontiers in Energy*, 10(2), 176–191.
- [37] Allal, A., Lammouchi, Z., Khechekhouche, A., Mohamed, N., Alqunun, K., Alghadhban, A., Marouani, I., & Guesmi, T. (2024). Advanced Residual Optimal Mapping Approach for Precise Detection of Stator Faults in Induction Motors. *IEEE Access*, 12, 143515–143529.
- [38] Chérif, H. (2024). *Les figures du corps féminin dans la poésie féminine algérienne contemporaine d'expression arabe (1990-2022)* (Thèse de doctorat, Université Mohamed Ben Ahmed – Oran 2).
- [39] 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 ,p1-6.
- [40] M. SAHRAOUI , A. GHOGGAL, S. GUEDIDI , et AL. , "Detection of inter-turn shortcircuit in induction motors using Park– Hilbert method", *International Journal of System*

Référence

Assurance Engineering and Management , Vol 5 (No.3),2014,p 337-351. DOI: 10.1007/s13198-013-0173-6.

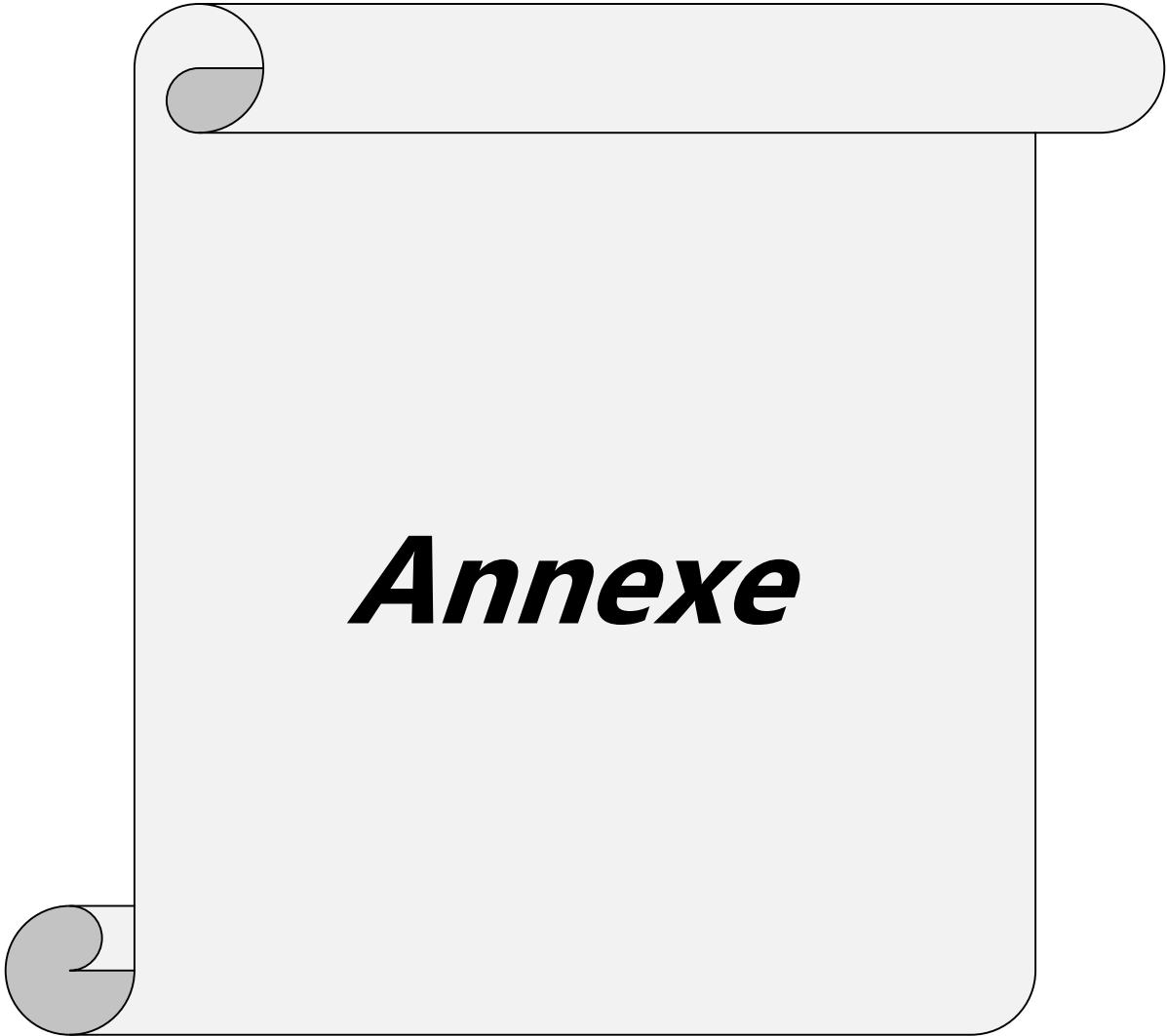
[41]V. F. PIRES, M. KADIVONGA , J. F. MARTINS ,et AL. ",Motor square current signature analysis for induction motor rotor diagnosis" , Measurement, Vol 46 (No.2), 2013, p 942–948.

[42]. 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.

[43]. A. Allal , B. Chetate , D. Benattous ,The Instantaneous Power Approach for Rotor Cage Fault Diagnosis in Induction Motor, 6th symposium on Hydrocarbons and chemistry ISHC6,2012,(Zeralda , Algiers) .

[44]. 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.

[45]. M. Sahraoui , S. E. Zouzou, A. Ghoggal ,et al. ,A new method to detect inter-turn short-circuit in induction motors,19nd ed., International conference on Electrical Machine (ICEM,2010), Sept ,2010,(Rome,Italy), IEEE, 2010 ,p 1-6.



Annexe

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

TABLEAU.III.2. Caractéristiques des machines à induction

Caractéristiques	Moteur asynchrone N°1
Fabricant	
La puissance	3 kW
La vitesse nominale	1430 tr/min
La tension nominale	380 V
Le courant nominale	6.40 A
Nombre de barres rotoriques	28
Nombre de paire de pole	2