



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. Massoud Chaia
2. Abdelali Baci

Intitulé :

Diagnostic des défauts statorique des moteurs à induction par AROMA

Soutenu le : 29/05 /2025

Devant le jury composé de :

Dr : Cherif Hakima	Président
Dr : Maamir Madiha	Examineur
Dr : Allal Abdrrahim Dr : Khechekhouché Ali	Encadreur

Année académique : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

سنة ١٤٢٠



Dédicace

*À ceux qui ont éveillé en moi l'amour du savoir,
À ceux dont les prières ont porté mes pas,
À mes chers parents, source d'amour et de bonté,
À mes maîtres vénérés, éclats de lumière et de guidance,
À mes amis et à tous ceux qui m'ont soutenu,*

*Je dédie humblement ce travail, en signe de gratitude, en priant le Très-Haut
de vous combler de Ses bienfaits.*

CHAIA Massoud



Dédicace

*À ceux qui ont semé en moi la lumière du savoir,
À ceux dont les prières furent mon soutien discret,
À mes parents bien-aimés, bénédiction de ma vie,
À mes professeurs, phares de sagesse,
Et à tous ceux qui ont marché à mes côtés,*

*Je dédie le fruit de cet humble effort, en priant Dieu de vous récompenser
pour tout le bien que vous m'avez offert.*

Basi Abdelali



Remerciement

Tout d'abord, je remercie Dieu de m'avoir permis de terminer cela.

***Travailler dans les meilleures conditions, et nous donner
Force, courage et patience.***

***Je tiens à remercier le superviseur M. Allal Abdrrahim pour
Après avoir accepté la direction scientifique et technique de ce
travail,***

***Pour le soutenir et le guider tout au long de cette période,
Et aussi pour sa patience.***

Merci à toute la faculté de technologie

Ceux qui nous ont suivi tout au long de ces années universitaires.

***Enfin, je voudrais remercier tous ceux qui ont contribué au
développement de Ce travail de près ou de loin.***

Contenu

Remerciement

Dédicaces

Liste de figure

Liste de Symboles

Liste abbreviation

Résumé

Introduction Générale

CHAPITRE I : Généralités sur le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones.

I.1 Introduction	1
I.2 La machine asynchrone	1
I. 2.1 Constitution du moteur asynchrone.....	2
I.2.2 Le stator.....	3
I.2.3 Le rotor	4
I.2.4 Rotor bobiné.....	4
I.2.5 Rotor à cage d'écureuil	5
I.2.6 Paliers	6
I.3 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone	6
I.4 Comparaison avec un transformateur	7
I.5 Défauts dans les machines asynchrones à cage d'écureuil	7
I.6 Défaillances électriques dans les machines asynchrones	8
I.6.1 Défauts dans les circuits électriques du stator.....	8
I.6.2 Rupture des barres du rotor	10
I.6.3 Rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit	11
I.7 Défaillances mécaniques	11
I.7.1 Défaillances des roulements à billes	12
I.7. 2 Excentricité.....	13
I.7. 3 Défaillance de l'arbre	14
I.7. 4 Défaillance des flasques	14

I.8 Causes des défaillances	15
I.8.1 Causes des défauts du rotor.....	15
I.8.2 Causes des défauts des roulements à billes.....	16
I.9 Les Défaillances de la Machine Asynchrone	16
I.10 Conclusion	19
 <i>CHAPITRE II: Techniques avancées pour le diagnostic de moteurs à induction</i>	
II.1 Introduction	21
II.2 Méthodes de détection et de diagnostic des défauts de la machine asynchrone	22
II .2.1 Techniques de traitement du signal.....	22
II .2.2 Transformée de Fourier rapide.....	22
II .2.3 Transformation de Hilbert Huang (HHT).....	24
II.3 Les approches récentes de diagnostic des défauts les plus utilisées	24
II.3.1 Le diagnostic par la méthode NRHA.....	24
II.3.2 Courants statoriques du moteur.....	24
II.4 Courant Moteur PVSM	25
II.5 Détection de défauts en utilisant l'Approche du produit du vecteur de Park-Hilbert (HPVPA)	26
II.6 Méthode de Park-Hilbert (PVSMP- H)	26
II.6.1 Résultats expérimentaux et discussion.....	26
II.6.1.1 Étude expérimentale des méthodes de diagnostic par NRHA.....	26
II.6.1.2 Diagnostic des défauts à l'aide de PVPA.....	26
II.7 Analyse de la signature du courant quadratique du moteur (MSCSA)	27
II.8 Méthodes de prétraitement	28
II.9 Approche proposée de diagnostic basée sur L'AROMA	29
II.10 Conclusion	31
 <i>CHAPITRE III : Résultats expérimentaux de diagnostic basée sur L'AROMA</i>	
III.1 Introduction	33
III.2 Configuration expérimentale	33
III.3 Analyse des signaux	33

III.4 Approche proposée de diagnostic basée sur L'AROMA	33
III.5 Schéma montrant le principe de fonctionnement d AROMA	35
III.6 Resultats expérimentaux	36
III.7 Résultats expérimentaux de La technique AROMA.....	44
III.8 Conclusion.....	48
Conclusion générale.....	50
Référence.....	52
Annexe.....	57

Liste des figures

CHAPITRE I : Généralités sur le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones.

Fig.I.1 : Différents composants du moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	2
Fig.I.2 : illustre la structure du stator ainsi que ses différents composants.....	3
Fig.I.3: Rotor d'un moteur asynchronies.	4
Fig.I.4 : Rotor bobiné d'un moteur asynchrone.....	5
Fig.I.5 : Schéma coupe de la construction du rotor.....	5
Fig.I.6 : Principe de fonctionnement simplifié d'un moteur asynchrone.....	6
Fig.I.7 : Photos d'un dégât dû à un défaut de court-circuit entre spires.	9
Fig.I.8 : Exemple de dégâts provoqués par les défauts de court –circuits statoriques.	9
Fig.I.9 : Représentation de court-circuit entre spires, entre phases et phase à terre.	9
Fig.I.10 : Défaut de barre cassée.	10
Fig.I.11 : Rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit.	11
Fig.I.12 : Roulements à billes.	13
Fig.I.13 : Les quatre types de défauts dans les roulements à billes.	13
Fig.I.14 : Les défauts d'excentricité.....	14
Fig.I.15 : Les défauts internes.	17
Fig.I.16 : Les défauts externes.	17
Fig.I.17 : Classification des principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes.....	18

CHAPITRE II: Techniques avancées pour le diagnostic de moteurs à induction

Fig.II.1 : Densité spectrale de puissance du courant statorique..	23
Fig.II.2 : Schéma bloc représentant le diagnostic par la méthode NRHA .	25
Fig.II.3 : Spectre de simulation du PVPA pour un moteur en charge (100%).....	25
Fig.II.4 : Le diagnostic des défauts dans les moteurs à induction utilisant la méthode PVPA.	27
Fig.II.5 : Spectre de simulation de l'analyse de la signature du courant quadratique du moteur MSCSA pour un moteur en charge à 100 %.....	28
Fig.II.6 : Diagnostic des défauts du stator dans le moteur à induction avec l'utilisation différentes approches.....	29
Fig.II.7 : Approche Proposée de Diagnostic Basée sur l'AROMA.	30

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

Fig.III.1: Organigramme de la méthode de détection des pannes AROMA.....	35
Fig.III.2 : Spectre FFT pour 20% de la charge nominale.....	36
Fig.III.3 : Spectre FFT pour 60% de la charge nominale.....	38
Fig.III.4 : Spectre FFT pour 100% de la charge nominale.....	40
Fig.III.5 : Spectre FFT résiduel pour 20% de la charge nominale.	42
Fig.III.6: Spectre FFT résiduel pour 60% de la charge nominale.....	42
Fig.III.7 : Spectre FFT résiduel pour 100% de la charge nominale.	43
Fig.III.8: Schéma illustratif du processus de diagnostic utilisant la méthode.....	44
Fig.III.9 : La technique AROMA pour un IM fonctionnant à 20% de la charge.....	44
Fig.III.10: La technique AROMA pour un IM fonctionnant à 60% de la charge.	45
Fig.III.11 : La technique AROMA pour un IM fonctionnant à 60% de la charge.....	45
Fig.III.12 : indice de diagnostic résiduel la méthode d'AROMA.	46
Fig.III.13 : Sévérité de défaut liée à la charge.	47

Liste de Tableau

TABLEAU.III.1: Analyse des harmoniques latéraux et des courants de défaut selon le taux de charge dans un moteur asynchrone.	41
TABLEAU. ANNEXE.1: Caractéristiques des machines utilisées.	57

Liste des Notation

Les principales notations utilisées dans ce travail sont définies comme suit :

- N_s : Nombre de spires du stator par phase.
- ω_s : Vitesse asynchrone [rad/s].
- F_s : Fréquence d'alimentation électrique [Hz].
- P : Nombre de paires de pôles.
- g : Glissement.
- Ω : Vitesse du rotor [rad/s].
- f_{mm} : Force magnétomotrice
- I_{mr} : Valeur maximale du courant rotorique.
- I_{kr} : Courant dans la boucle rotorique.
- N_r : Nombre de barres du rotor.
- I_a, I_b, I_c : Courants des phases du stator.
- ϕ_s : Flux magnétique par pôle généré par le courant statorique.
- ϕ_{abc} : Flux du stator dans le repère triphasé [Wb].
- V_{abc} : Tensions du stator dans le repère triphasé [V].
- V : nuv est un entier positif.
- \cap : cap \cap désigne l'intersection.
- h : représente l'ordre harmonique.

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.

RSFS: Series of frequency.

TH: Time harmonics.

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.

HPVPA : Produit du Vecteur de Park-Hilbert.

PVPA: Approche du Produit du Vecteur de Park.

F_{rm}: est la fréquence de rotation mécanique

MA: Machine asynchrone.

HFR : Harmoniques des fentes du rotor.

HT : Harmoniques temporelles.

HFBR : Harmoniques de défaut des barres du rotor.

HFE : Harmoniques de défaut d'excentricité.

THH : la transformée de Hilbert-Huang.

TFCT : la transformée de Fourier à court terme.

TFD : transformée de Fourier discrète.

TFR : Transformée de Fourier rapide.

Résumé

Ce mémoire traite de l'application de la **technique AROMA (Advanced Résiduel Optimal Mapping Approach)** pour le **diagnostic des défauts dans le stator des moteurs asynchrones**, en se concentrant spécifiquement sur le **court-circuit dans les enroulements statoriques**. L'objectif principal est de proposer une méthode efficace et robuste permettant de détecter précocement les anomalies à travers une analyse spectrale basée sur la transformation de Fourier (FFT).

La stratégie AROMA repose sur l'extraction des composantes harmoniques résiduelles, en comparant les signaux d'un moteur sain à ceux d'un moteur en état de défaut. Grâce à cette approche, il devient possible d'évaluer non seulement la **présence d'un défaut**, mais aussi son **niveau de sévérité**, à travers l'analyse de l'amplitude des harmoniques sensibles.

Les résultats obtenus montrent que la méthode AROMA est **très sensible aux défauts de court-circuit**, notamment à différentes charges de fonctionnement (faible, moyenne et maximale), et permet un diagnostic fiable à l'aide d'un seul capteur de courant. Par ailleurs, cette technique présente l'avantage d'être **robuste face aux variations de charge**, ce qui en fait une solution adaptée aux environnements industriels exigeants.

Mots-clés : Diagnostic de défauts, moteur asynchrone, court-circuit statorique, FFT, AROMA, surveillance conditionnelle, harmoniques.

ملخص

يتناول هذا البحث تطبيق تقنية **AROMA** (الطريقة المتقدمة للتخطيط المثالي للبواقي) لتشخيص الأعطال في **العضو الثابت للمحركات الحثية**، مع التركيز بشكل خاص على دوائر القصر في ملفات العضو الثابت. الهدف الرئيسي هو اقتراح طريقة فعّالة وموثوقة للكشف المبكر عن الأعطال من خلال تحليل طيفي يعتمد على **تحويل فورييه السريع (FFT)**.

تعتمد استراتيجية **AROMA** على استخراج المرئيات التوافقية المتبقية، وذلك من خلال مقارنة الإشارات الصادرة من محرك سليم بتلك الخاصة بمحرك به عطل. ومن خلال هذا النهج، يصبح من الممكن تقييم وجود العطل وكذلك درجة حدته عن طريق تحليل سعة التوافقيات الحساسة.

تظهر النتائج أن طريقة **AROMA** شديدة الحساسية تجاه أعطال دوائر القصر، خاصة في ظروف التشغيل المختلفة (الحمولة المنخفضة، المتوسطة، والقوى)، كما أنها تتيح تشخيصًا موثوقًا باستخدام **مستشعر تيار واحد فقط**. علاوة على ذلك، تتميز هذه التقنية بقدرتها على مقاومة تأثير تغيّرات الحمولة، مما يجعلها حلًا مناسبًا للبيئات الصناعية الصعبة. **الكلمات المفتاحية**: تشخيص الأعطال، المحرك الحثي، دائرة القصر في العضو الثابت، تحويل فورييه السريع، AROMA، المراقبة الشرطية، التوافقيات.

***Introduction
Générale***

Introduction générale

Les moteurs asynchrones (à induction) sont essentiels dans de nombreuses applications industrielles en raison de leur durabilité et de leur efficacité opérationnelle élevée. Cependant, ils restent vulnérables à divers types de dysfonctionnements, qu'ils soient électriques ou mécaniques, qui peuvent entraîner une baisse de leurs performances, une augmentation des coûts de maintenance, et même provoquer un arrêt brutal des activités industrielles. Cette étude vise à souligner l'importance du diagnostic des défauts des moteurs asynchrones et à passer en revue les dernières méthodes utilisées.

Cette recherche vise à fournir une vue d'ensemble du sujet et a été divisée en trois chapitres principaux qui abordent les aspects théoriques, techniques et appliqués. Le premier chapitre traite des fondements techniques des moteurs asynchrones, expliquant leur structure interne, leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques de fonctionnement. Il met également en évidence les défauts les plus courants, qu'ils soient liés à des aspects électriques comme le court-circuit ou la détérioration de l'isolation, ou ceux résultant de problèmes mécaniques comme les vibrations ou les pièces rotatives déséquilibrées. Il aborde également l'impact de ces défauts sur les performances, qui se manifeste souvent par une puissance réduite, des vibrations et des températures accrues et une durée de vie réduite. Le chapitre aborde également les méthodes traditionnelles de détection de défauts, telles que la (FFT) et l'analyse d'enveloppe, ouvrant la voie à une compréhension de tous les outils de diagnostic.

Le deuxième chapitre présente des techniques de diagnostic avancées basées sur des analyses plus précises et plus sensibles. Le chapitre passe en revue les méthodes d'analyse des vibrations pour détecter les défauts mécaniques et d'analyse des signaux électromagnétiques pour surveiller les changements dans le champ magnétique résultant de défauts internes. Il comprend également une analyse thermique utilisant l'imagerie infrarouge pour identifier les points chauds suspects et une analyse du signal de courant électrique pour extraire les premiers indicateurs d'un défaut. Vous pouvez également consulter AROMA et Hilbert-FFT pour plus de détails.

Le troisième chapitre se concentre sur l'application pratique de la technologie AROMA dans le diagnostic des défauts du moteur. Ce chapitre présente une expérience de laboratoire dans laquelle un moteur asynchrone est exposé à différentes conditions de charge pour tester l'efficacité de cette technique. La manière dont les données sont collectées et analysées pendant l'opération est démontrée, les résultats étant présentés sous forme de graphiques et d'analyses statistiques.

Il aborde également l'évaluation de la gravité des défauts et les classe selon différents niveaux de gravité, soulignant la capacité de la technologie AROMA à identifier avec précision les défauts.

Chapitre I :

***Généralités sur le diagnostic des défauts
dans les machines asynchrones.***

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu des moteurs asynchrones, qui sont des piliers fondamentaux des systèmes électriques et industriels en raison de leur simplicité et de leur fiabilité.

Le rotor est l'un des éléments clés du moteur asynchrone, car il influence directement ses performances et son rendement.

Ce chapitre aborde également les principales défaillances susceptibles d'affecter ce composant, en examinant leurs causes potentielles et leur impact sur le fonctionnement du moteur, ainsi que les méthodes et techniques utilisées.

Cette étude vise à améliorer la compréhension théorique et pratique des moteurs asynchrones et des défauts de rotor, contribuant ainsi à l'amélioration des stratégies de Maintenance, à la réduction des coûts d'exploitation et à l'augmentation de la fiabilité.

1.2 La machine asynchrone

C'est pour cette raison que le moteur asynchrone est largement utilisé dans les applications industrielles qui nécessitent des puissances de sortie élevées (kilowatts), en raison de ses nombreux avantages, tels qu'une puissance accrue, une efficacité, une compacité et d'autres caractéristiques techniques exceptionnelles. L'avènement des modulateurs dans les années 1980, qui permettent un contrôle étendu des fréquences de fonctionnement, a contribué à l'emploi de ces cadres. Pour cette raison, ce moteur est devenu le principal moteur dans la conception de nombreux processus industriels qui reposent sur l'intégration de transformateurs fixes avec des machines électriques, comme c'est le cas dans les véhicules électriques. En raison de la grande durabilité de la voiture asynchrone, elle n'est pas, comme les autres voitures électriques, exposée aux pannes électriques ou mécaniques. Étant donné que ce diagnostic a inclus des effets indésirables importants et des contributions à la Conférence sur les processus industriels, l'échec est devenu un domaine d'intérêt croissant.

I. 2.1 Constitution du moteur asynchrone

Le moteur asynchrone, également appelé moteur à induction, est composé de deux parties principales : le stator et le rotor.

Tous deux sont fabriqués à partir de tôles d'acier au silicium et comportent des encoches où sont placés les enroulements. Le stator est la partie fixe qui contient les enroulements connectés à la source d'alimentation électrique, tandis que le rotor est la partie mobile montée sur un axe rotatif.

Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou fermés en permanence sur eux-mêmes, on distingue deux types de rotors : le rotor bobiné et le rotor à cage d'écureuil [6].

Dans cette section, nous proposons de fournir des informations sur les éléments constitutifs des moteurs asynchrones. Cette description nous permettra de comprendre comment le système est physiquement réalisé. Les moteurs asynchrones triphasés peuvent être décomposés mécaniquement en trois parties distinctes, comme illustré ci-dessous.

- **Le Stator** : partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- **Le Rotor** : partie en rotation qui permet d'entraîner la charge mécanique.
- **Les Paliers** : éléments mécaniques abritant les roulements et assurant le support du rotor via l'arbre.

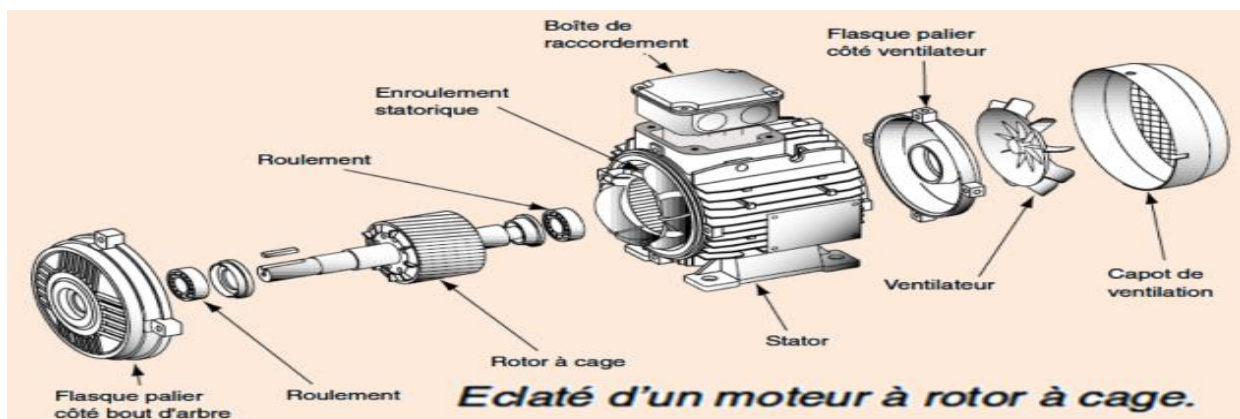


Fig.I.1 : Différents composants du moteur asynchrone à cage d'écureuil [28].

I.2.2 Le stator

Le circuit magnétique du stator est constitué d'un empilement de fines tôles d'acier, dans lesquelles sont découpées les encoches destinées à loger les conducteurs de l'enroulement. L'épaisseur de ces tôles est généralement comprise entre 0,35 mm et 0,50 mm, ce qui permet de minimiser les pertes fer dans le circuit magnétique (Fig. I.2). Afin de réduire l'impact des courants de Foucault, ces tôles sont isolées les unes des autres par une fine couche de vernis ou de silicate de sodium.

L'enroulement du stator est composé de deux parties principales :

- **Les conducteurs de fente :** qui génèrent le champ magnétique dans l'entrefer et permettent la conversion de l'énergie électromagnétique.
- **Les têtes de bobine :** qui assurent la circulation du courant en organisant son cheminement.

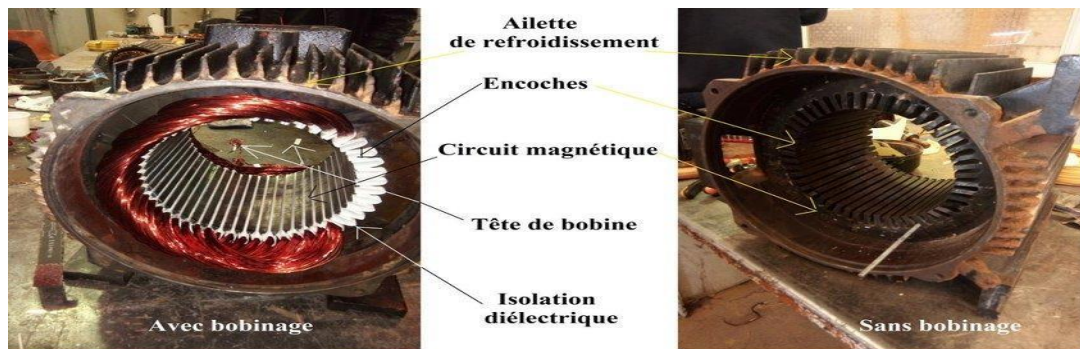


Fig.I.2 : illustre la structure du stator ainsi que les différentes composantes.

L'objectif principal est d'obtenir une répartition sinusoïdale des forces magnétomotrices dans l'entrefer, afin de minimiser les ondulations du couple. Les enroulements du stator peuvent être disposés selon différentes configurations, dont trois principales sont couramment utilisées :

1. **Enroulement en série.**
2. **Enroulement en concentrique.**
3. **Enroulement en ondes.**

Chaque type d'enroulement présente des avantages spécifiques en fonction de l'application. Pour les moteurs de faible puissance, notamment lorsque la production automatisée des enroulements est employée, l'enroulement concentrique est généralement privilégié [2].

1.2.3 Le rotor

Le rotor est constitué d'un empilement de laminations, généralement fabriquées dans le même matériau que le stator. Dans les petits moteurs, ces laminations sont découpées d'un seul tenant et montées directement sur l'arbre. En revanche, dans les moteurs de plus grande taille, chaque lamination est composée de plusieurs sections assemblées autour d'un moyeu central.

Dans les rotors à cage d'écureuil, les conducteurs prennent la forme de barres, qui peuvent être soit en alliage d'aluminium injecté, soit en cuivre préformé et inséré dans les encoches des laminations du rotor. Il existe généralement peu ou pas d'isolation entre ces barres et les laminations magnétiques, car la résistance du matériau est suffisamment élevée pour empêcher le courant d'y circuler, sauf en cas de rupture d'une barre. Les rotors se classent en deux catégories principales :

1. **Rotor bobiné** : Doté d'enroulements accessibles de l'extérieur, permettant un contrôle variable de la résistance.
2. **Rotor à cage d'écureuil** : Composé de barres court-circuitées en permanence, offrant une meilleure efficacité, une durabilité accrue et un entretien minimal.

Cette section met en lumière la construction du rotor et son rôle essentiel dans le bon fonctionnement des moteurs asynchrones.



Fig.I.3: Rotor d'un moteur asynchrones.

1.2.4 Rotor bobiné

Les enroulements du rotor sont placés dans des encoches réparties autour de la périphérie du rotor. Ces enroulements sont soigneusement disposés pour former un enroulement triphasé avec "p" paires de pôles. Contrairement aux rotors à cage d'écureuil, les rotors bobinés possèdent des bornes accessibles de l'extérieur, toujours connectées en étoile (Y).

Ces bornes sont reliées au bâti du stator par un système comprenant :

- **Trois bagues collectrices.**
- **Trois balais fixes.**

Cette conception permet de connecter des composants externes, tels que des résistances variables, au circuit du rotor. En ajustant ces résistances, il est possible d'améliorer le couple de démarrage du moteur et d'optimiser ses performances en fonction des applications spécifiques.

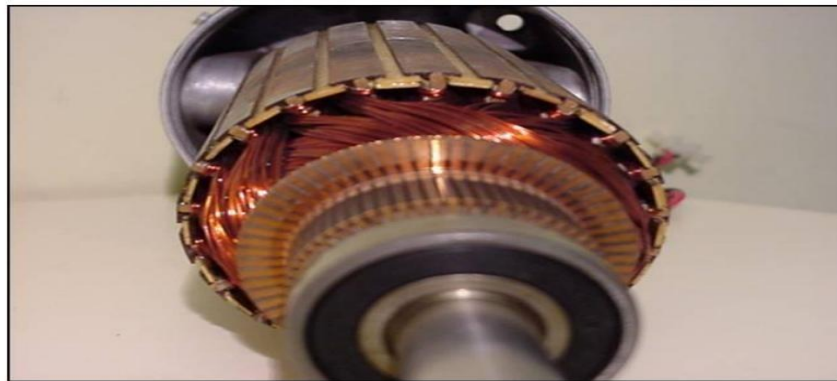


Fig.I.4 : Rotor bobiné d'un moteur asynchrone [26].

1.2.5 Rotor à cage d'écureuil

Les rotors à cage d'écureuil constituent le type le plus répandu dans les moteurs asynchrones. Dans cette configuration, chaque encoche du rotor contient une barre conductrice, généralement fabriquée en :

- **Cuivre** : utilisé pour les moteurs de forte puissance afin d'assurer une meilleure conductivité électrique et un rendement accru.
-
- **Alliage d'aluminium** : privilégié pour les moteurs de faible et moyenne puissance, offrant une alternative plus économique et plus légère.

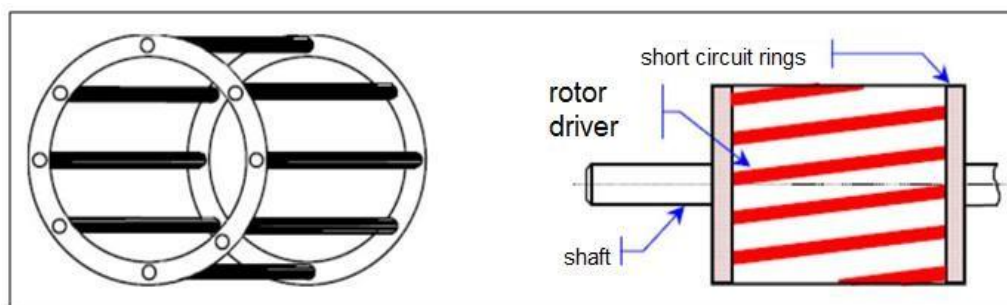


Fig.I.5 : Schéma en coupe de la construction du rotor [27].

Aux deux extrémités du rotor, ces barres sont électriquement reliées par des anneaux de court-circuit, formant ainsi une structure en boucle fermée. Cette conception élimine le besoin de connexions électriques externes, rendant le rotor totalement isolé du stator. Grâce à sa robustesse, sa simplicité et son faible besoin en maintenance, le rotor à cage d'écureuil est le choix privilégié pour les applications industrielles où la fiabilité et la durabilité sont essentielles [4], [5].

1.2.6 Paliers

Les paliers sont des composants essentiels qui soutiennent le rotor et permettent sa rotation fluide avec un minimum de frottement. Ils se composent de deux éléments principaux :

- **Flasques :** Fabriqués en fonte, ils sont solidement fixés au carter du stator, garantissant un alignement précis et une bonne stabilité des bagues extérieures des roulements.
- **Roulements à billes :** Montés à chaud sur l'arbre du rotor, ils assurent un guidage précis de la rotation tout en réduisant l'usure mécanique. En garantissant un mouvement stable et efficace, les paliers jouent un rôle crucial dans la longévité, les performances et la fiabilité des moteurs asynchrones [3].

1.3 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose sur l'induction d'un courant électrique dans un conducteur placé dans un champ magnétique tournant. Le conducteur en question correspond à l'une des barres du rotor en cage d'écureuil.

L'induction du courant ne peut se produire que si le conducteur est court-circuité, ce qui est le cas puisque les deux panneaux latéraux connectent l'ensemble des barres.

De plus, une force motrice est exercée sur le conducteur traversé par un courant et placé dans un champ magnétique tournant ou variable.

La direction de cette force est déterminée par la règle de la main droite [6].



Fig.I.6 : Principe de fonctionnement simplifié d'un moteur asynchrone [27].

De cette manière, le fonctionnement d'un moteur asynchrone est analogue à celui d'un transformateur : le stator peut être assimilé à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire, qui, en général, peut tourner à une vitesse donnée par le rapport suivant.

1.4 Comparaison avec un transformateur

Le fonctionnement d'un moteur asynchrone est souvent comparé à celui d'un transformateur :

Le stator : agit comme l'enroulement primaire, générant un champ magnétique.

Le rotor : se comporte comme l'enroulement secondaire, où un courant est induit par interaction électromagnétique.

La vitesse synchrone du champ magnétique tournant est donnée par l'équation :

$$n_1 = \frac{f_s}{p} \quad (\text{I.1})$$

- f_s : est la fréquence du courant statorique.
- p : Est le nombre de paires de pôles.

Pour que le moteur asynchrone fonctionne correctement, il doit exister une différence de vitesse entre le champ magnétique tournant (n_s) et la vitesse du rotor (n). Si le rotor tournait exactement à la même vitesse que le champ magnétique ($n = n_s$) le champ apparaîtrait immobile par rapport au rotor, empêchant ainsi toute induction de courant.

Cette différence de vitesse est quantifiée par le **glissement** (g) : qui joue un rôle essentiel dans la performance du moteur.

1.5 Défauts dans les machines asynchrones à cage d'écureuil

Bien que robuste et fiable, la machine asynchrone à cage d'écureuil est sujette à divers défauts, qui peuvent être classés en deux catégories : **défaillances électriques** et **défaillances mécaniques**.

Ces défauts peuvent résulter de plusieurs facteurs, notamment :

❖ **Défauts de fabrication** : De légères imperfections survenues lors du processus de production peuvent entraîner des pannes au fil du temps.

❖ **Mauvaise utilisation** : Des conditions de fonctionnement non conformes aux spécifications de la Machine peuvent accélérer son usure et sa dégradation.

❖ **Facteurs environnementaux** : L'exposition à des conditions sévères, telles que des substances corrosives ou des températures extrêmes, peut affecter négativement les performances et la durabilité de la machine.

Comprendre les causes profondes de ces défaillances est essentiel pour mettre en œuvre des techniques de diagnostic et des stratégies de maintenance préventive, garantissant ainsi un rendement optimal, une fiabilité accrue et une durée de vie prolongée du moteur asynchrone.

1.6 Défaillances électriques dans les machines asynchrones

Les défaillances électriques dans les machines asynchrones à cage d'écureuil peuvent entraîner des perturbations de fonctionnement, voire un arrêt complet de la machine, à l'instar des pannes mécaniques. Ces défauts peuvent être classés en deux grandes catégories en fonction de leur emplacement dans les circuits électriques de la machine :

- ❖ **Défauts électriques du stator** : Ils concernent des anomalies au niveau des enroulements statorique, telles que la dégradation de l'isolation, les déséquilibres de phase ou les court-circuit, pouvant entraîner une surchauffe excessive et une baisse de rendement.
- ❖ **Défauts électriques du rotor** : Ils apparaissent dans le circuit rotorique et sont souvent dus à des barres de rotor cassées, des défauts au niveau des anneaux de court-circuit ou une augmentation de la résistance, affectant la production de couple et la performance globale de la machine. L'identification et l'analyse de ces défaillances électriques sont essentielles pour le diagnostic des pannes et la maintenance prédictive, garantissant ainsi la fiabilité et la longévité du machin.

1.6.1 Défauts dans les circuits électriques du stator

Les défaillances dans les circuits électriques du stator d'un moteur asynchrone peuvent résulter de divers facteurs, principalement la dégradation de l'isolation, un assemblage inapproprié ou des contraintes mécaniques. Ces défauts se manifestent sous différentes formes, notamment :

- **Court-circuit entre spires** : Survient dans les encoches du stator en raison de la détérioration de l'isolation des enroulements, entraînant des déséquilibres de courants de phase et une surchauffe. **Fig. I.7** : La figure montre des photos illustrant un dégât dû à un défaut de court-circuit entre spire.
- **Court-circuit phase-neutre ou phase-masse** : Résulte d'une fuite électrique ou d'une défaillance de l'isolation, pouvant causer des dommages graves si le problème n'est pas rapidement corrigé.
- **Court-circuit entre phases** : Souvent déclenché par des contraintes mécaniques ou des défauts électriques, ce type de panne peut engendrer des champs magnétiques asymétriques et une forte détérioration des performances du moteur.

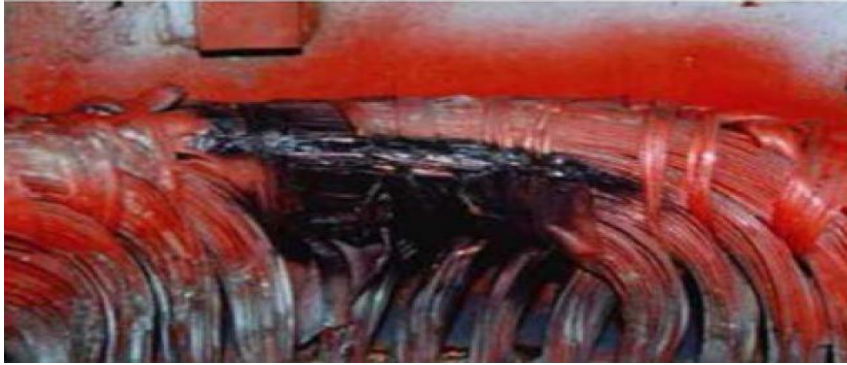


Fig.I.7 : La figure montre des photos illustrant un dégât dû à un défaut de court-circuit entre spire [29].

De plus, des facteurs mécaniques tels que des vibrations excessives peuvent desserrer les boulons de la plaque à bornes, créant des connexions électriques involontaires pouvant entraîner des court-circuit. Une fixation insuffisante des connecteurs des câbles d'alimentation peut également provoquer des interruptions de phase, perturbant le fonctionnement du moteur. Le problème le plus fréquemment rencontré dans les circuits du stator est la fusion d'un fusible de protection, généralement causée par des surtensions transitoires ou des déséquilibres de phase. Pour diagnostiquer ces défauts de manière efficace, l'analyse harmonique du spectre de courant du moteur est couramment utilisée, permettant une détection précoce et une maintenance préventive.

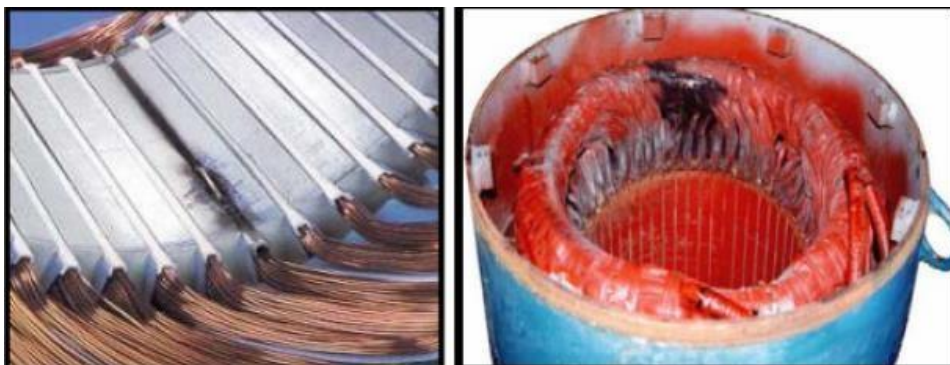


Fig.I.8 : Exemples de dommages provoqués par des défauts de court-circuit au niveau du stator [29].

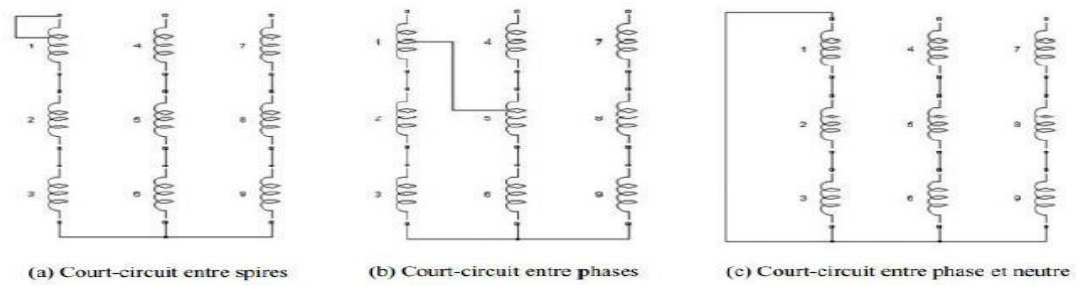


Fig.I.9 : Représentation de court-circuit entre spires, entre phases, phase et terre [29].

- ❖ **Déplacement des conducteurs** : caractérisé par des démarrages fréquents et des vibrations des têtes de bobines.
- ❖ **Défaillance des connecteurs** : due à des vibrations excessives.
- ❖ **Vibrations de la carcasse** : résultant d'une installation inadéquate, d'un déséquilibre magnétique ou d'alimentation, d'une surcharge, d'un mouvement des enroulements ou d'un contact avec le rotor.

I.6.2 Rupture des barres du rotor

Les défaillances affectant le rotor figurent parmi les plus courantes dans les machines asynchrones. Elles se manifestent par des ruptures, totales ou partielles, d'une ou de plusieurs barres de la cage d'écureuil (voir Fig.I.6 illustrant un rotor présentant une barre cassée). Ces anomalies entraînent une augmentation de la résistance équivalente du circuit rotorique, ce qui modifie le comportement électromagnétique du moteur. En conséquence, des ondulations du couple électromagnétique apparaissent, provoquant des variations périodiques de la vitesse de rotation de la machine. Ces fluctuations mécaniques peuvent, à leur tour, générer des vibrations anormales et favoriser l'apparition d'autres défauts mécaniques au sein du système, tels que l'usure prématurée des roulements ou des déséquilibres dynamiques du rotor.

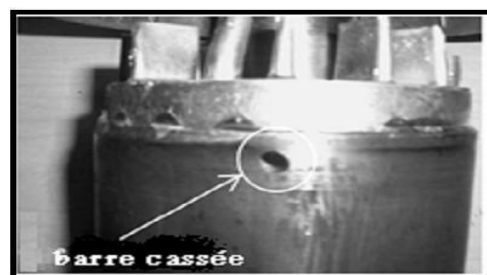


Fig.I.10 : Défaut dû à une barre rompue dans le rotor.

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

La rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit peut résulter de divers facteurs, notamment la présence de bulles de coulée lors du processus de fabrication ou des dilatations différentielles entre les barres et les anneaux sous l'effet des variations thermiques.

Les anneaux de court-circuit jouent un rôle crucial dans le bon fonctionnement du rotor, car ils transportent des courants plus élevés que les barres. Une conception inadéquate des anneaux, des conditions de fonctionnement dégradées ou une surcharge mécanique et électrique impliquant une augmentation du couple et donc du courant peuvent conduire à leur rupture.

Une telle défaillance entraîne un comportement similaire à celui observé en cas de rupture de barres du rotor, engendrant une augmentation de la résistance équivalente du circuit rotorique, des fluctuations du couple électromagnétique et des oscillations de vitesse pouvant compromettre la stabilité et la durabilité du moteur asynchrone.

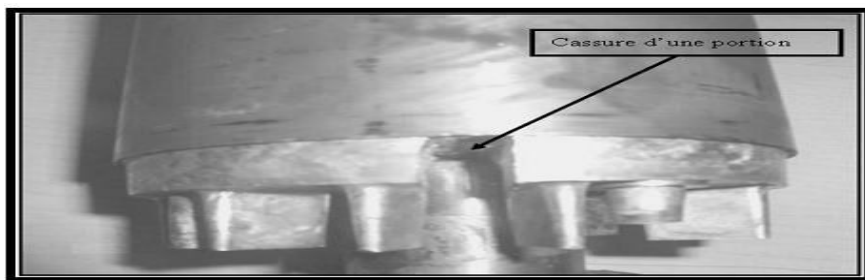


Fig.I.11 : Rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit.

Lorsqu'une telle défaillance survient, la machine continue généralement de fonctionner, rendant la détection du défaut particulièrement complexe. En effet, le courant qui circulait initialement dans une barre rompue se répartit entre les autres barres du rotor, ce qui engendre une surcharge progressive. Cette surcharge peut, à son tour, entraîner la rupture successive d'autres barres, aggravant ainsi l'endommagement du rotor et compromettant la fiabilité de la machine [9].

1.7 Défaillances mécaniques

Les anomalies d'origine mécanique représentent l'une des principales causes de dysfonctionnement des moteurs asynchrones.

Ces défaillances peuvent affecter divers composants critiques, notamment les roulements, les flasques et l'arbre moteur. Elles résultent généralement de l'usure, de défauts d'alignement, de contraintes mécaniques excessives ou encore de conditions de fonctionnement inappropriées.

Dans la suite de cette étude, nous examinerons certaines de ces défaillances en détail. De nombreuses recherches approfondies traitant de ces problématiques sont disponibles dans la littérature spécialisée [10.11].

1.7.1 Défaillances des roulements à billes

Les roulements à billes constituent un élément fondamental du bon fonctionnement des machines électriques. Leur défaillance peut résulter d'une sélection inadéquate des matériaux lors de la fabrication, d'un défaut de lubrification ou encore de conditions d'exploitation défavorables. Une rotation irrégulière, des vibrations excessives et une élévation anormale de la température sont des signes précurseurs de leur détérioration. L'usure prématurée des roulements peut être accélérée par l'utilisation de lubrifiants contaminés ou par une lubrification insuffisante. De plus, les courants électriques circulant à travers les roulements des moteurs asynchrones, notamment à grande vitesse, contribuent à leur dégradation rapide. Par ailleurs, un durcissement progressif de la graisse lubrifiante peut générer une résistance mécanique accrue, impactant ainsi la rotation du rotor [12].

Un défaut de roulement engendre une asymétrie dans le rotor, classée parmi les anomalies d'excentricité. Ce phénomène se manifeste par une répartition inégale des forces de contact entre la cage intérieure et la cage extérieure du roulement.

L'analyse des vibrations des roulements en lien avec le spectre du courant statorique repose sur l'interaction entre l'excentricité et le champ magnétique dans l'entrefer du moteur asynchrone. Les harmoniques affectant le spectre du courant statorique peuvent être définies par les relations suivantes [13].

$$f_{exe} = \left(1 \pm k \left(\frac{1-s}{2} \right) \right) (Hz) \quad (\text{I.2})$$

$$f_{exe} = |f \pm k \cdot frm| (Hz) \quad (\text{I.3})$$

$$f_{bng} = |f \pm m \cdot fvip| \quad (Hz) \quad (\text{I.4})$$

Où

f_{exe} : Fréquence d'une composante harmonique du courant statorique liée à l'excentricité.

f_{vip} : représente l'une des fréquences des vibrations mécaniques.

S : glissement.

$m = 1, 2, 3, \dots$ avec $m \in \mathbf{N}$.

$k = 1, 3, 5, \dots$ avec $k \in \mathbf{N}$.

p : Est le nombre de paires de pôles.

f : fréquence d'alimentation.

f_{bng} : fréquence d'un signal affecté par les vibrations mécaniques.

f_{rm} : fréquence de rotation mécaniques.

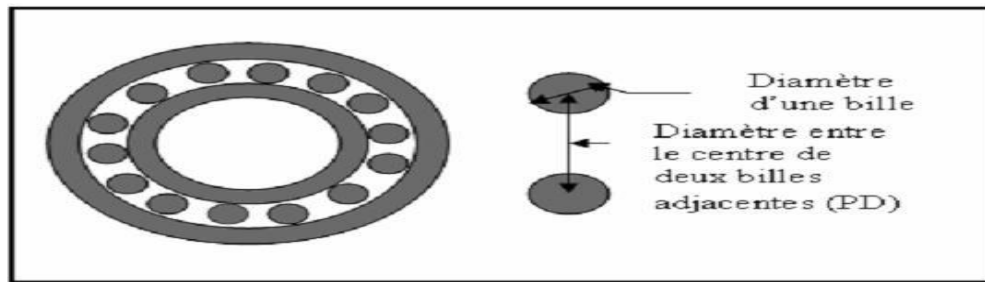


Fig.I.12 : Roulements à billes.

1.7.2 Excentricité

Les variations de la largeur de l'entrefer entraînent des fluctuations de la densité du flux magnétique dans cet espace. Ces perturbations influencent électriquement les enroulements statoriques, et leurs effets peuvent être observés dans le spectre du courant. De manière générale, on distingue trois types d'excentricité [4]. Illustrés dans la Fig.I.13.

Excentricité statique : le rotor est décalé par rapport au centre de l'alésage du stator, mais il continue de tourner autour de son propre axe.

- **Excentricité dynamique** : le rotor est correctement centré dans l'alésage, mais il ne tourne plus autour de son propre axe.
- **Excentricité mixte** : combinaison des deux précédentes, elle entraîne une usure accrue des roulements et peut provoquer des vibrations anormales ainsi qu'une détérioration prématurée du moteur.

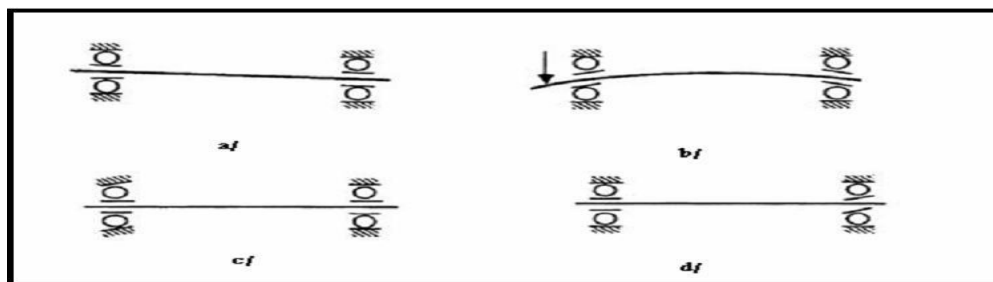


Fig.I.13 : Les quatre types de défauts dans les roulements à billes [21].

- Désalignement.
- Déformation de l'arbre en rotation.
- Inclinaison de la bague extérieure.
- Inclinaison de la bague intérieure.

• **Excentricité mixte** : Elle combine les deux cas précédents.

L'excentricité statique et l'excentricité dynamique peuvent être représentées comme suit (Fig. I.14) :

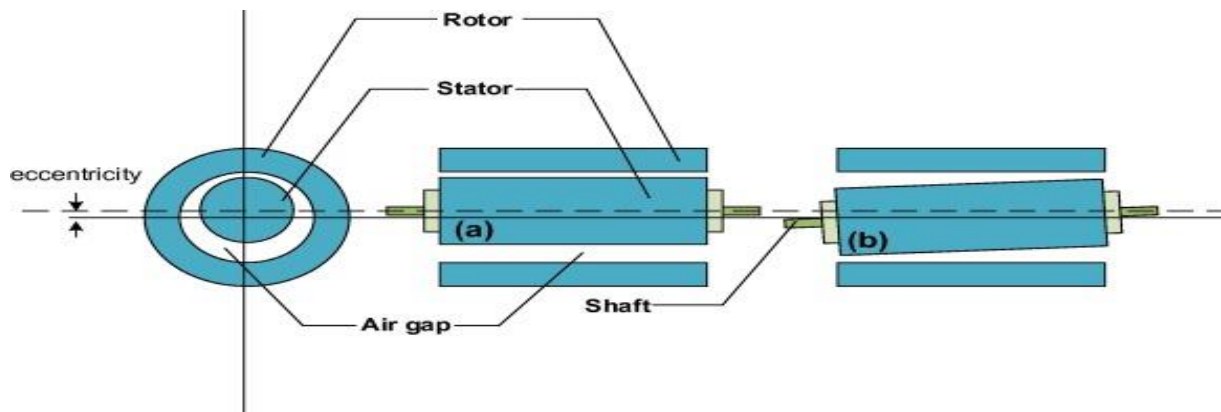


Fig.I.14 : Défauts d'excentricité [2].

a) Excentricité statique. b) Excentricité dynamique. c) Excentricité mi.

1.7.3 Défaillance de l'arbre

L'arbre du moteur peut subir des fissurations résultant de l'utilisation de matériaux inadaptés lors de sa fabrication. À court ou à long terme, ces fissures peuvent évoluer vers une rupture complète de l'arbre, provoquant ainsi un arrêt définitif du moteur asynchrone. Par ailleurs, les environnements agressifs, tels que les atmosphères humides ou corrosives, peuvent altérer la résistance mécanique de l'arbre, entraînant l'apparition de microfissures susceptibles d'évoluer en une défaillance catastrophique.

L'excentricité statique, dynamique ou mixte peut également induire des contraintes mécaniques importantes sur l'arbre du moteur, favorisant l'usure prématurée et la fatigue structurelle.

Pour détecter ces défaillances, plusieurs méthodes de diagnostic sont employées, notamment l'analyse vibratoire, l'analyse ultrasonore, l'analyse fréquentielle des courants absorbés ainsi que l'inspection visuelle de l'arbre du moteur [38].

1.7.4 Défaillance des flasques

Les défaillances des flasques d'un moteur asynchrone proviennent généralement d'anomalies survenues lors de la fabrication ou du montage. Un positionnement incorrect des flasques peut induire un désalignement de l'ensemble rotor-stator, compromettant ainsi les performances mécaniques et électriques de la machine.

Ces défauts peuvent engendrer des vibrations excessives, une usure prématurée des roulements et une augmentation des pertes énergétiques. Leur détection repose sur des techniques avancées de diagnostic, notamment l'analyse vibratoire et l'analyse harmonique du spectre des courants absorbés par la machine [40].

1.8 Causes des défaillances

Les causes des défaillances dans un moteur asynchrone sont variées et peuvent être regroupées en trois grandes catégories :

- **Les initiateurs de défauts** : Ils correspondent aux facteurs déclencheurs des anomalies, tels que les surcharges électriques, les variations de tension, ou encore les conditions de fonctionnement inappropriées.
- **Les amplificateurs de défauts** : Ces éléments exacerbent les dégradations initiales, notamment par des vibrations excessives, une mauvaise dissipation thermique ou une lubrification insuffisante des roulements.
- **Les défauts de fabrication** : Ils résultent d'irrégularités dans la conception ou l'assemblage des composants, comme des déséquilibres mécaniques, des imperfections dans l'isolation du bobinage ou des erreurs de moulage dans la cage d'écureuil [41].

Dans la majorité des cas, les défaillances affectant le rotor et le stator proviennent de l'interaction simultanée de plusieurs forces mécaniques, thermiques et électriques, compromettant ainsi la performance et la fiabilité de la machine.

1.8.1 Causes des défauts du rotor

À l'instar du stator, plusieurs facteurs peuvent être responsables de la rupture des barres du rotor ainsi que de la détérioration d'une portion de l'anneau de court-circuit. Ces causes peuvent être classées selon les contraintes suivantes :

- **Contraintes thermiques** : L'échauffement excessif de l'anneau de court-circuit et les variations brusques de température dans les barres du rotor, notamment lors des phases de démarrage, peuvent entraîner des fissures et une dégradation prématurée (effet de peau).
- **Contraintes magnétiques** : Les forces électromagnétiques générées par le flux de fuite des encoches et les anomalies d'excentricité de l'entrefer peuvent provoquer un bruit électromagnétique et des vibrations susceptibles d'affecter la structure du rotor.
- **Contraintes dynamiques** : Les variations du couple de charge, les forces centrifuges induites par la rotation et les sollicitations cycliques répétées augmentent la fatigue mécanique des composants du rotor.
- **Contraintes environnementales** : La contamination par des particules chimiques et

l'abrasion des matériaux du rotor peuvent accélérer son usure et compromettre son bon fonctionnement.

1.8.2 Causes des défauts des roulements à billes

Même lorsque les conditions de fonctionnement sont optimales, avec une charge équilibrée et un alignement précis, les roulements à billes peuvent subir des défaillances liées à la fatigue, indépendamment des phénomènes internes tels que l'excentricité. Toutefois, plusieurs facteurs externes peuvent également être à l'origine de ces défauts, notamment :

- **Contamination et corrosion** : L'exposition à des agents agressifs comme l'eau, les acides ou d'autres substances corrosives peut altérer les surfaces des roulements, réduisant ainsi leur durée de vie.
- **Lubrification inadéquate** : L'insuffisance ou l'utilisation d'un lubrifiant inadapté peut accélérer l'usure des roulements, entraînant une augmentation des frottements et des températures, ce qui favorise leur détérioration prématurée.

1.9 Les Défaillances de la Machine Asynchrone

Les défaillances affectant la machine asynchrone peuvent être classées en deux catégories principales : **défaillances internes** (fig.I.14) et **défaillances externes** (fig.I.15).

- Les **défaillances internes** résultent des anomalies affectant les composants internes de la machine, tels que le circuit magnétique statorique ou rotorique, les enroulements statorique, l'entrefer mécanique, ainsi que la cage rotorique.
- En revanche, les **défaillances externes** sont généralement induites par des perturbations électriques liées à l'alimentation (tensions d'alimentation déséquilibrées, surtensions) ou par des contraintes mécaniques imposées par la charge. Elles peuvent également découler des conditions environnementales dans lesquelles la machine est exploitée (température, humidité, vibrations).

Ainsi, le **diagnostic des défaillances** constitue une étape essentielle pour garantir la fiabilité et la durabilité des machines asynchrones, en permettant d'identifier les anomalies susceptibles d'affecter leurs performances.

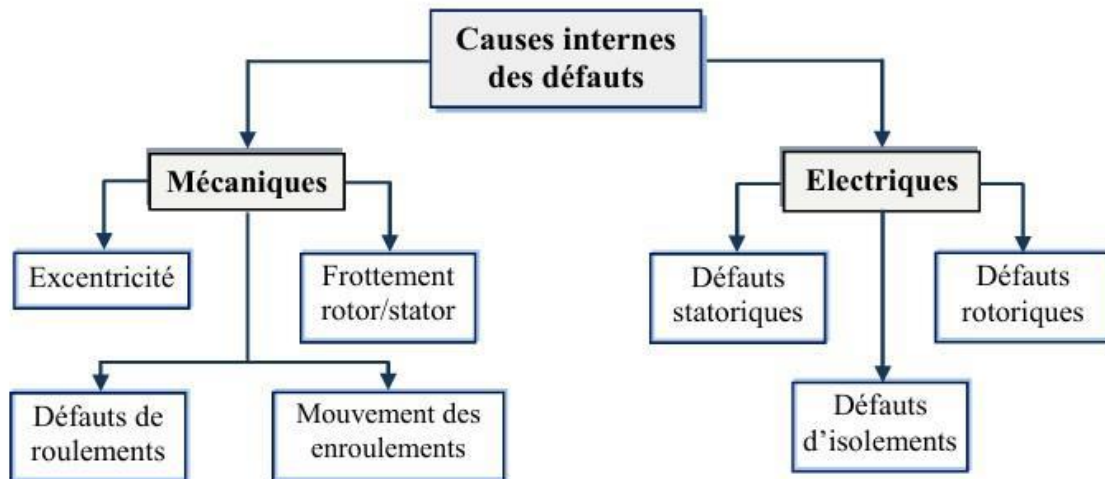


Fig.I.15 : les défauts internes [43].

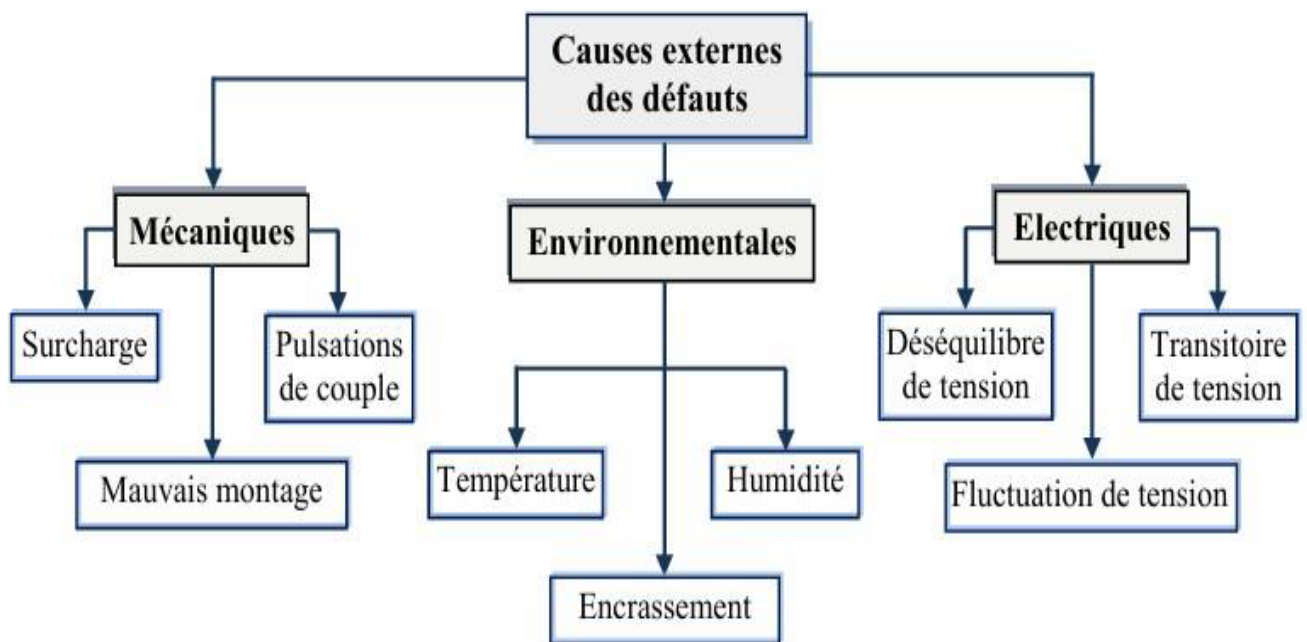


Fig.I.16 : les défauts externes [43].

Selon les organigrammes, les **origines des défaillances** des machines asynchrones peuvent être multiples, englobant des causes **mécaniques**, **électriques** ou **environnementales**.

À titre d'exemple, les **démarrages fréquents** de la machine entraînent des courants de démarrage élevés dans les **barres rotorique**, susceptibles de provoquer une surchauffe ou une dégradation progressive de la cage rotorique [40].

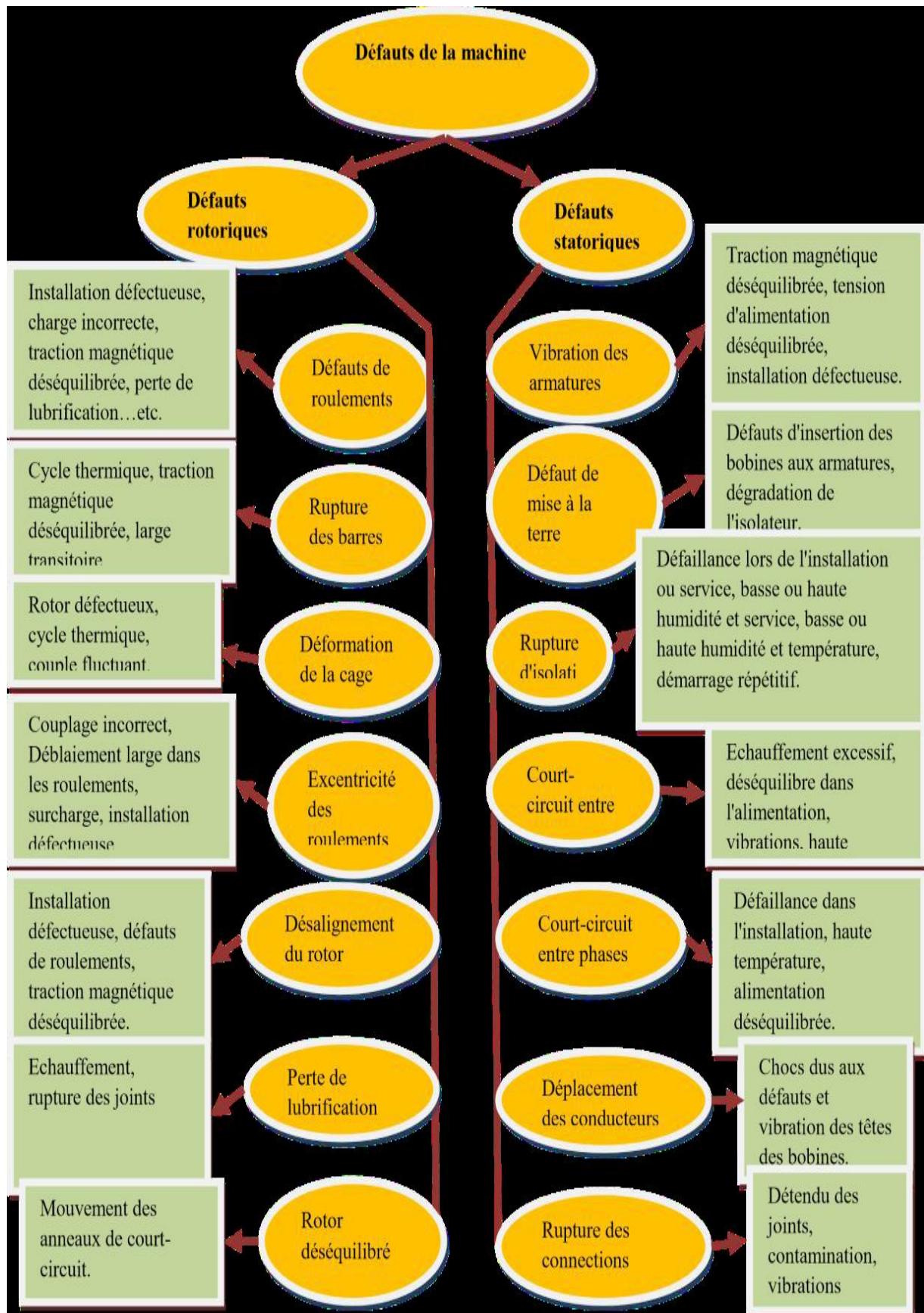


Fig.I.17 : Classification des principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes

I.10 Conclusion

Dour conclure, ce chapitre met en lumière l'importance cruciale des moteurs asynchrones dans les systèmes industriels, grâce à leur capacité à convertir efficacement l'énergie électrique en énergie mécanique.

L'étude des défauts affectant le rotor souligne la nécessité d'un diagnostic précoce afin de détecter les dysfonctionnements potentiels. Cela permet non seulement d'élaborer des stratégies de maintenance préventive, mais aussi d'optimiser les performances globales du moteur.

Les connaissances acquises constituent ainsi un socle solide pour le développement de solutions techniques innovantes dans les chapitres à venir, contribuant à une durable de l'efficacité des systèmes existants.

Chapitre II :

***Techniques avancées pour le diagnostic
de moteurs à induction***

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons les fondements théoriques et les cadres scientifiques qui sous-tendent l'utilisation de techniques de diagnostic avancées appliquées aux moteurs à induction. Ces moteurs jouent un rôle essentiel dans le bon fonctionnement des systèmes industriels, ce qui rend indispensable un diagnostic précoce afin d'assurer la continuité des opérations et de limiter les interventions.

Nous commençons par présenter les principes fondamentaux qui régissent le fonctionnement des moteurs à induction, ainsi que les mécanismes à l'origine des défauts. Nous identifions les facteurs clés influençant leur performance et leur sensibilité aux conditions de fonctionnement. Ensuite, nous abordons les avancées technologiques ayant permis l'émergence de nouvelles méthodes de diagnostic, telles que l'analyse du signal, la modélisation mathématique et l'intégration des données.

Ce chapitre vise à offrir une vue d'ensemble des approches traditionnelles et modernes en matière de diagnostic, en comparant leur efficacité et en analysant leurs limites respectives. Grâce à la littérature scientifique existante, nous mettons en lumière les lacunes actuelles et proposons des pistes de recherche pour répondre aux besoins contemporains de l'industrie.

En somme, ce chapitre cherche à maintenir un équilibre entre les concepts théoriques et les applications concrètes, préparant ainsi le terrain pour les sections suivantes, consacrées aux études expérimentales et à la mise en œuvre de modèles diagnostiques dans des cas réels.

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

Les laboratoires ont concentré leurs recherches sur le développement d'une approche de diagnostic plus sensible, capable de détecter les plus faibles variations anormales dans le moteur. Cette avancée permet d'anticiper l'apparition de défauts et ainsi d'éviter des pertes économiques considérables dans les industries à haut niveau de production.

II .2.1 Techniques de traitement du signal

Le traitement du signal comprend diverses méthodes analytiques, telles que la transformée de Fourier rapide (FFT), la transformée de Hilbert-Huang (HHT), la transformée de Fourier à court terme (STFT), la distribution de Wigner-Ville (WVD), la transformée en ondelettes discrète (DWT) et la transformée en ondelettes continue (CWT), entre autres. Ces techniques sont utilisées pour détecter le BRB et analyser les signaux de manière efficace. Pour un diagnostic plus précis, il est essentiel de sélectionner la technique de traitement appropriée en fonction des exigences de l'analyse.

Cette section présente un aperçu des techniques de traitement du signal les plus couramment utilisées.

II .2.2 Transformée de Fourier rapide

La transformée de Fourier est l'une des techniques les plus couramment utilisées pour l'analyse des signaux dans le domaine fréquentiel. Il s'agit d'une méthode mathématique permettant de convertir une fonction temporelle $x(t)$ en une fonction fréquentielle $X(w)$. Cette transformation facilite l'exploration des informations liées aux fréquences dans ce domaine.

De plus, l'application de la transformée de Fourier inverse permet de reconstruire le signal d'origine. Pour analyser les fréquences dans un signal temporel, la transformée de Fourier discrète (DFT) a été développée. Cependant, cette méthode nécessite un grand nombre de points de données, ce qui a conduit au développement de la transformée de Fourier rapide (FFT), une version optimisée du DFT permettant un calcul plus efficace et rapide. L'équation de la DFT pour N : échantillons de données est donnée [44,45].

Comme suit :

$$X(K) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi k(n/N)} \quad (\text{II .1})$$

$$K = 1.2.3 \dots \dots \dots (N - 1) \quad (\text{II .2})$$

Après avoir calculé les coefficients FFT du signal, les spectres d'amplitude et de phase en fonction de la fréquence peuvent être obtenus à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Amplitude} = \text{spectrum} \frac{\sqrt{(X[k])^2 + Im(X[k])^2}}{N} \quad (\text{II .3})$$

$$\text{Phase spectrum} = \arctan \left(\frac{\sqrt{Re(X[k])^2}}{Im(X[k])^2} \right) \quad (\text{II .4})$$

Les fréquences de défaut associées à l'apparition de pannes du rotor dans le spectre d'amplitude du courant statorique sont illustrées dans la Figure 1. Ces fréquences sont bien distinctes lorsque le moteur est en pleine charge, mais en l'absence de charge, elles se confondent avec la composante fondamentale et deviennent ainsi indétectables.

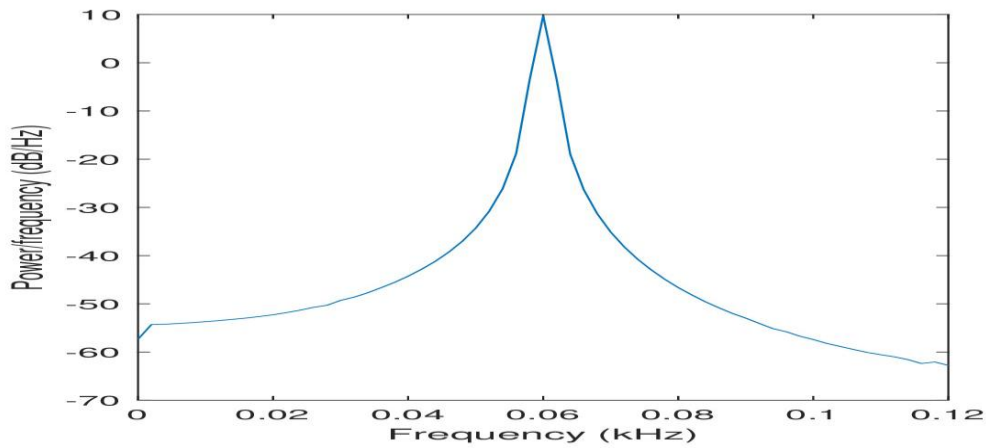


Fig.II.1 : Densité spectrale de puissance du courant statorique.

II.2.3 Transformation de Hilbert Huang (HHT)

La transformation de Hilbert Huang (HHT) est une combinaison de l'analyse spectrale de Hilbert (HSA) et de la décomposition en modes empiriques (EMD). À l'aide de la méthode EMD, le signal est décomposé en fonctions de mode intrinsèque (IMF), auxquelles l'HSA est ensuite appliquée afin d'extraire les données de fréquence instantanée.

Une fonction peut être considérée comme une IMF si elle satisfait aux critères suivants :

1. Le nombre d'extrémis et le nombre de passages par zéro dans l'ensemble des données doivent être identiques ou différer d'au plus un.
2. L'enveloppe définie par les maxima locaux et celle définie par les minima locaux doivent avoir une moyenne nulle en tout point.
3. Les IMF peuvent être extraites par un processus d'itération appelé «criblage» qui peut être décrit comme suit:

- Identification de tous les extrêmes locaux dans les données de test.
- Détection de l'enveloppe supérieure en reliant tous les maxima locaux.
- Détection de l'enveloppe inférieure en reliant tous les minima locaux.

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

II.3.1 Le diagnostic par la méthode NRHA

Cette technique de diagnostic est fondée sur l'analyse des harmoniques résiduelles naturelles (NRH) du courant moteur [35].

II.3.2 Courants statoriques du moteur

Dans des conditions de fonctionnement idéales, le courant de phase [A] est supposé être composé du courant fondamental plus les harmoniques :

• Courant fondamental (régime sain)

$$i_{sa}(t)_{healthy} = \hat{I}_F \cos(2\pi f_s t) \quad (\text{II.5})$$

$$i_{sa}(t)_{healthy} = \sum_{h=1}^n \left[\hat{T}H_h \cos(2\pi TH_h t) + \hat{S}_{h,k}^{\pm} \cos(2\pi S_{h,k}^{\pm} t) \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^m \left[\hat{R}_{h,k}^{\pm} \cos(2\pi R_{h,k}^{\pm} t) + \hat{E}_{h,k}^{\pm} \cos(2\pi E_{h,k}^{\pm} t) \right] \right] \quad (\text{II.6})$$

$$TH = hf_s \quad (\text{II.7})$$

• Courant fondamental

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

$$i_{sa}(t)_f = \sum_{h=1}^n \left[\widehat{I}'_{TH_h} \cos(2\pi TH_h t) + \widehat{I}'_{S_{h,k}^\pm} \cos(2\pi S_{h,k}^\pm t) + \sum_{k=1}^m \left[\widehat{I}'_{R_{h,k}^\pm} \cos(2\pi R_{h,k}^\pm t) + \widehat{I}'_{E_{h,k}^\pm} \cos(2\pi E_{h,k}^\pm t) \right] \right] \quad (II.8)$$

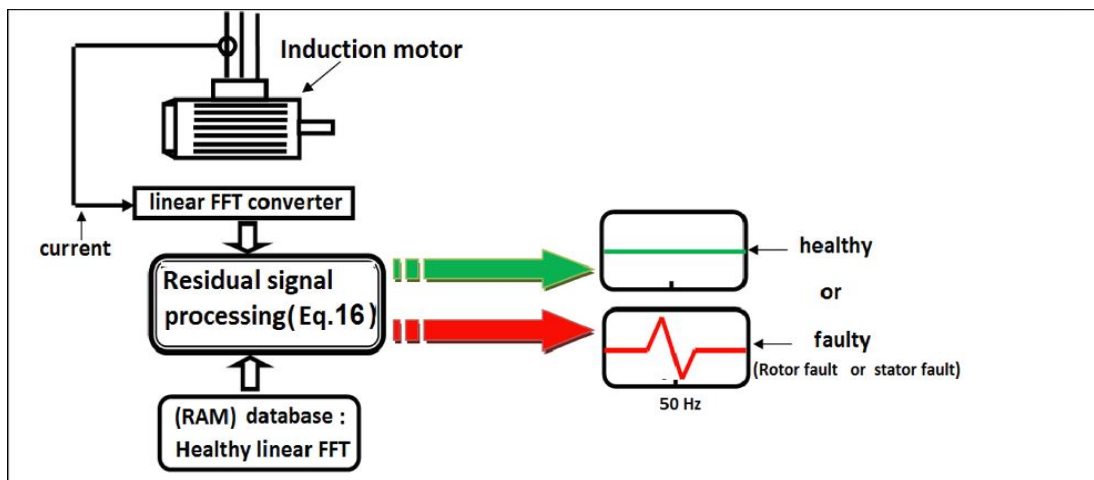


Fig.II.2 : Schéma bloc représentant le diagnostic par la méthode NRHA [35].

II.4 Courant Moteur PVSM

La transformation de Park est utilisée pour convertir les courants du stator d'un système triphasé (1-2-3) en un système diphasé (d-q) [5]. Le « module carré du vecteur de Park du courant moteur » est défini par

$$PVSM = |ids^2 + jiq^2| = ids^2 + jiq^2 \quad (II.9)$$

Une analyse du spectre PVSM doit être effectuée pour chaque condition de fonctionnement.

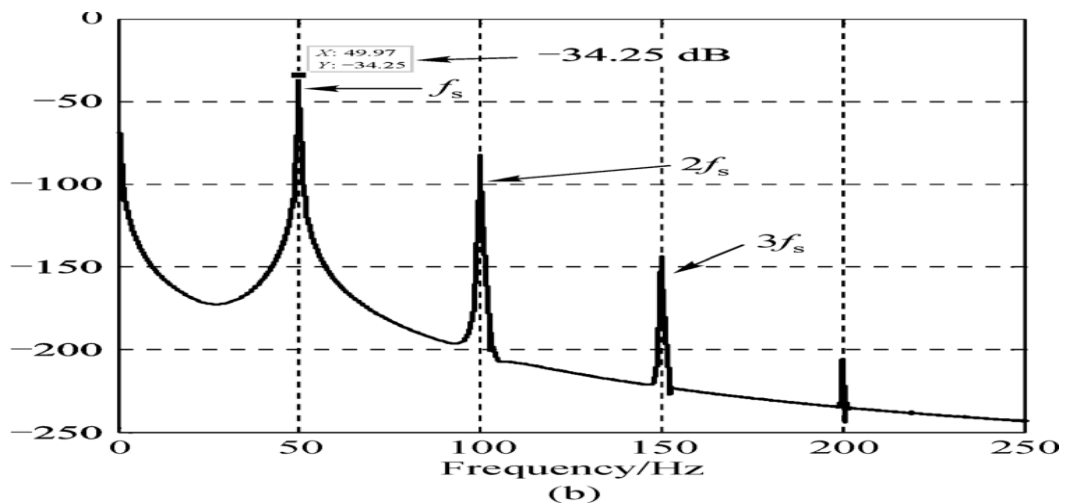


Fig.II.3 : Spectre de simulation du PVSM pour un moteur en charge (100%).

II.5 Détection de défauts en utilisant l'Approche du produit du vecteur de Park-Hilbert (HPVPA)

Mathématiquement, l'Approche du Produit du Vecteur de Park-Hilbert (HPVPA) La transformée de Hilbert d'un courant statorique, appelée signal analytique, est donnée par l'expression suivante [8-10] Enfin, l'Approche du Produit du Vecteur de Park-Hilbert (HPVPA) est obtenue par la FFT suivante.

$$\text{HPVPA} = i_{dp-H} * i_{qp-H} \quad (\text{II .10})$$

II.6 Méthode de Park-Hilbert (PVSMP- H)

Mathématiquement, la méthode de Park-Hilbert est définie par :

$$\text{PVSM}_{p-H} = \left(\sqrt{(i_{dq-H}^2 + i_{qp-H}^2)} \right)^2 \quad (\text{II .11})$$

II.6.1 Résultats expérimentaux et discussion

II.6.1.1 Étude expérimentale des méthodes de diagnostic par NRHA

Les essais expérimentaux ont été réalisés sur trois moteurs électriques au sein du Laboratoire des Systèmes Électrotechniques et de l'Environnement de l'Université d'Artois (France), afin d'évaluer l'efficacité de la méthode d'analyse des harmoniques résiduels normalisés dans le courant moteur (NRHA). Lors des expériences, la même résolution fréquentielle a été utilisée. Le temps d'acquisition était de 10 s et la fréquence d'échantillonnage était de 100 Hz.

II.6.1.2 Diagnostic des défauts à l'aide de PVPA

Dans cette étude, une nouvelle méthode, appelée **Approche du Produit du Vecteur de Park (PVPA)**, est proposée. Cette technique repose sur l'analyse spectrale du produit du vecteur de Park du courant moteur pour le diagnostic des défauts. L'efficacité de l'approche proposée est évaluée en la comparant à trois techniques récemment étudiées [4,7-9]. De plus, la méthode est analysée dans diverses conditions de fonctionnement et pour différents types de défauts, notamment ceux affectant le stator et le rotor.

$$\text{PVPA} = i_{sd}(t) \times i_{sq}(t) \quad (\text{II .12})$$

Nous simplifierons le calcul analytique et ne prendrons en considération que les harmoniques de défaut d'excentricité avec : Il est à noter que notre approche proposée, à savoir HPVPA, PVSM, MSCSA et PVSMP-H, présente les mêmes harmoniques que celles du PVPA

cité précédemment. Sans simplification du calcul, nous retrouvons tous les différents harmoniques dans le Tableau 2.

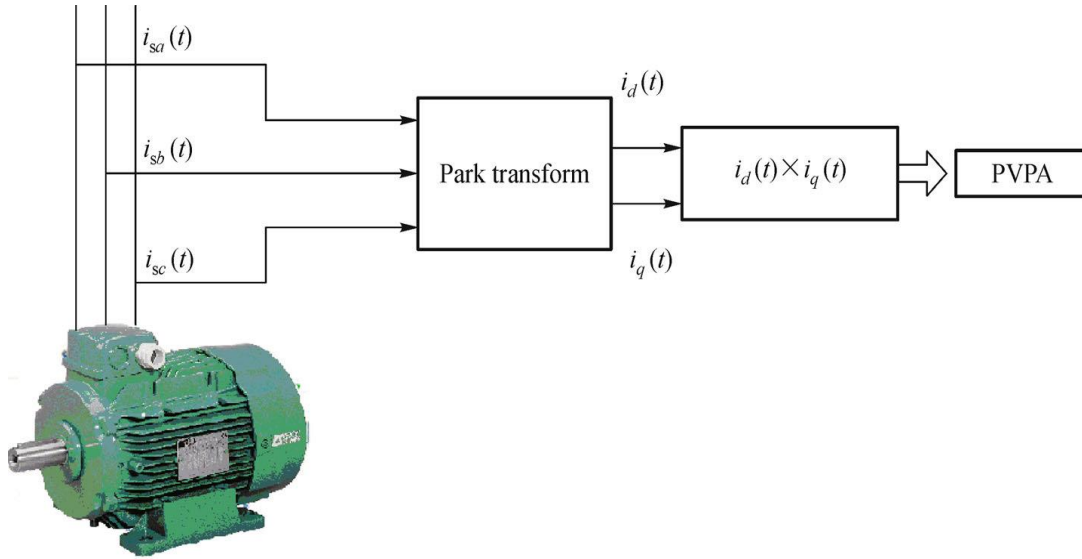


Fig.II.4: Faults diagnosis in induction motor using PVPA.

II.7 Analyse de la signature du courant quadratique du moteur (MSCSA)

Proposée dans la référence [4], cette approche repose sur l'analyse du courant statorique. La méthode **MCSA** utilise l'analyse spectrale du courant d'une phase du stator du moteur. Que le moteur soit en bon état de fonctionnement ou présente un défaut, le courant quadratique de phase est exprimé selon la référence [4].

$$MSCA = i_1^2(t) \quad (\text{II.13})$$

Dans l'équation (1), une nouvelle méthodologie de diagnostic des défauts basée sur l'**analyse de la signature du courant quadratique du moteur (MSCSA)** est présentée. La technique proposée repose sur trois étapes principales. Tout d'abord, le courant du moteur asynchrone est mesuré. Ensuite, le carré de ce courant est calculé. Enfin, une analyse fréquentielle du courant quadratique est effectuée [4].

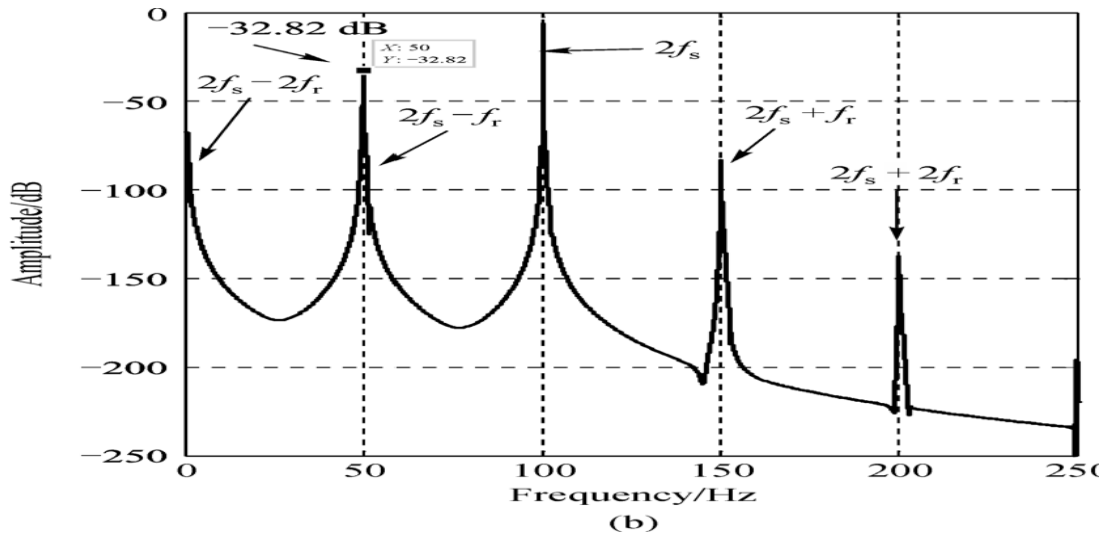


Fig.II.5 : Specter de simulation de analyses de la signature du courant quadrature du meteur (MSCSA) pour un meteur end charge à 100 %.

$$a) h = 1; TH = f_s; K = 1; R^\pm = (1 + 2s)f_s \tag{II .14}$$

$$b) h = 1; TH = f_s; K = 1; S^\pm = |fs \pm Nrfr| \tag{II .15}$$

$$c) h = 1; TH = f_s; K = 1; E^\pm = |fs \pm kfr| \tag{II .16}$$

II.8 Méthodes de prétraitement

Après la collecte de l'ensemble de données et l'extraction des signaux FFT, différentes méthodes de prétraitement ont été mises en œuvre afin de convertir les données b étapes sont exposées séparément, en commençant par les méthodes de prétraitement. Routes en représentations visuellement interprétables. Les étapes de prétraitement, de partitionnement des données et de sélection du modèle ont été réalisées simultanément. Afin d'en faciliter la compréhension.

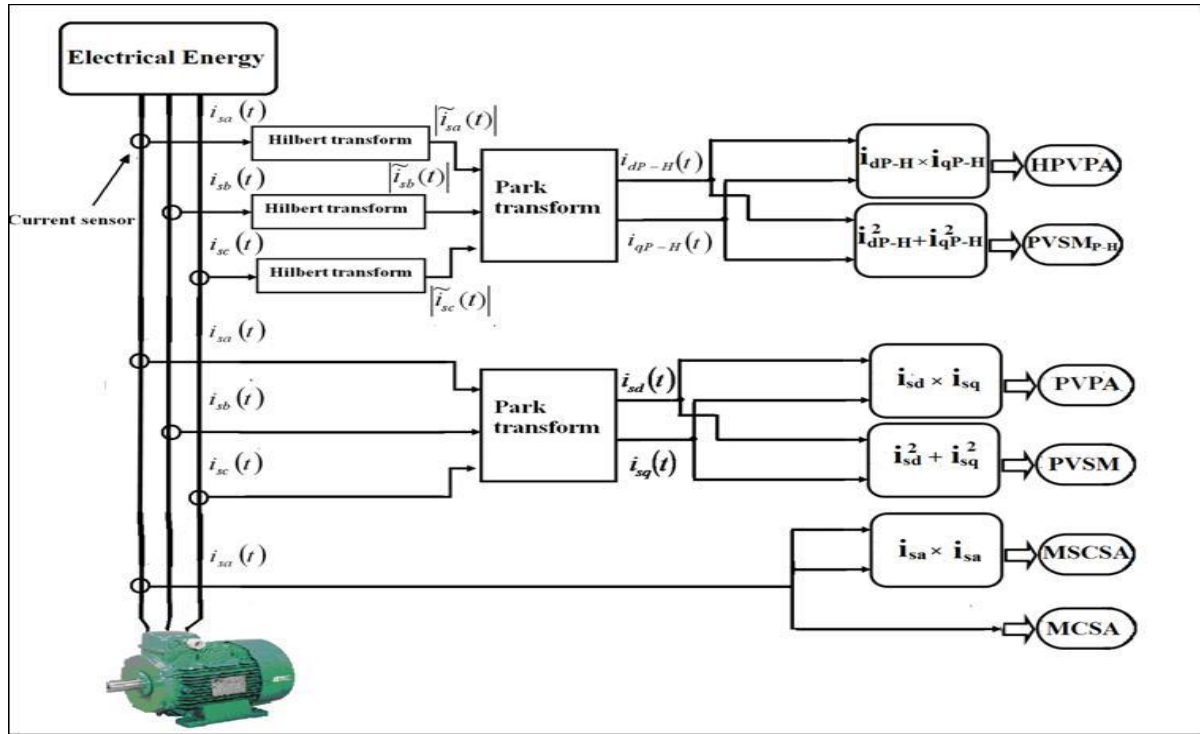


Fig.II.6 : Diagnostic des défauts du stator dans le moteur à induction avec l'utilisation différentes approches.

II.9 Approche proposée de diagnostic basée sur L'AROMA

Dérivée de l'analyse des quatre harmoniques distinctes : **RSH**, **TH**, **EFH** et **RBFH** présentes dans les équations de courant du moteur (8) et (9), 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.

$$A(f)_s = (A(f)_{faulty} - A(f)_{healthy}) \tag{II.17}$$

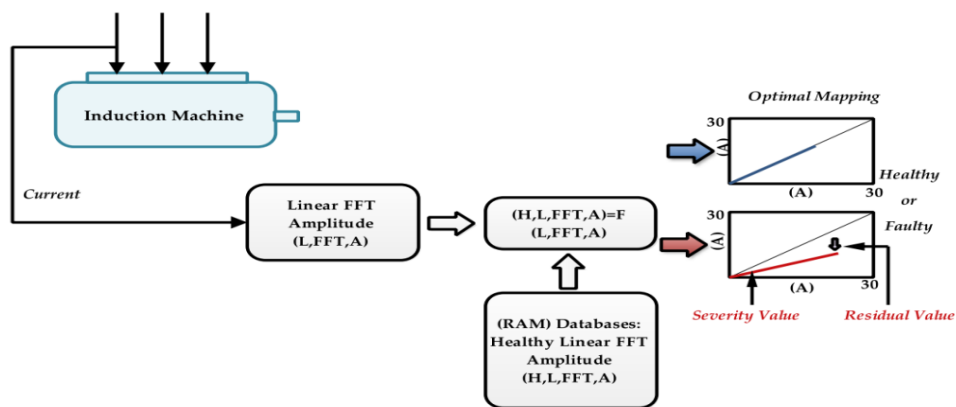


Fig.II.7 : Schéma illustratif du processus de diagnostic utilisant la méthode AROMA.

Fonctionnement et détection proactive des défauts potentiels avant qu'ils ne dégénèrent 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.

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné et analysé un ensemble de techniques avancées appliquées au diagnostic des moteurs à induction. L'accent a été mis sur les méthodes les plus pertinentes permettant une détection précoce des défauts ainsi qu'une identification précise des faiblesses du système. Nous avons

Mis en évidence l'importance de l'intégration de l'analyse fréquentielle, du traitement des signaux et de l'intelligence artificielle afin d'améliorer la précision et l'efficacité des procédures de diagnostic. Par ailleurs, les défis et les limites inhérentes à ces techniques ont été abordés, en soulignant la nécessité de les associer aux approches traditionnelles pour optimiser les performances. Les résultats obtenus démontrent que l'utilisation de ces approches avancées permet d'atteindre un niveau de diagnostic plus fiable et plus performant pour les moteurs à induction, contribuant ainsi à la pérennité de leur fonctionnement tout en notamment les coûts liés à la maintenance et aux réparations. L'accent a également été mis sur la nécessité de poursuivre les efforts de recherche et d'innovation pour dépasser les obstacles techniques actuels et renforcer la capacité des systèmes à faire face à la complexité croissante des environnements.

En somme, ce chapitre constitue une étape fondamentale vers la mise en place d'un système de diagnostic intégré fondé sur des technologies modernes. Il ouvre la voie à de nouvelles perspectives en matière de développement technologique dans les domaines de la maintenance et de l'exploitation des moteurs à induction, tout en posant les fondements pour les recherches et applications présentées dans les chapitres.

Chapitre III :

***Résultats expérimentaux des défauts
statoriques basée sur AROMA.***

III.1 Introduction

Le diagnostic des défauts affectant le stator des moteurs asynchrones constitue un enjeu majeur dans le domaine de la maintenance industrielle, en raison de son impact direct sur la performance et la continuité de fonctionnement des systèmes. Dès lors, il devient impératif de recourir à des approches capables de détecter précocement les anomalies afin de prévenir les pannes graves. Dans ce contexte, la présente étude propose l'utilisation de **la méthode avancée de cartographie optimale des résidus (Advanced Résiduel Optimal Mapping Approché)** comme une alternative performante surpassant les techniques classiques.

Cette méthode repose sur des algorithmes sophistiqués de traitement et d'analyse des signaux, permettant une évaluation fine des paramètres électriques liés au comportement du stator. Les résultats expérimentaux ont démontré que cette approche est capable de distinguer avec précision les états sains des états présentant des défauts tels que la dégradation de l'isolation ou le déséquilibre entre les phases, même en présence de bruit ou d'interférences. Par ailleurs, elle a permis de réduire significativement les taux d'erreur tout en améliorant la fiabilité et l'efficacité du diagnostic, en comparaison avec des techniques conventionnelles comme l'analyse spectrale ou les réseaux de neurones simples.

III.2 Configuration expérimentale

Pour étudier les défauts du stator dans un moteur asynchrone triphasé, nous avons mis en place un banc d'essai spécifique. Ce montage comprend un moteur asynchrone connecté mécaniquement à une génératrice à courant continu. Afin de simuler les défauts, notamment les court-circuit internes entre spires, nous avons introduit ces anomalies volontairement. Pour la collecte des données, nous avons utilisé des capteurs de courant.

III.3 Analyse des signaux

Pour détecter les défauts, nous avons principalement exploité les signaux électriques, en particulier le courant de ligne. Ces signaux ont été traités à l'aide de la transformée de Fourier rapide (FFT) ainsi que de filtres adaptés, afin d'isoler les caractéristiques les plus pertinentes. Ensuite, l'algorithme AROMA a été utilisé pour identifier les anomalies associées aux défauts d'enroulement.

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

Dans ce travail, nous avons utilisé la méthode AROMA (Approche de Cartographie Résiduelle Optimale Avancée) pour détecter les défauts au niveau du stator d'un moteur asynchrone. Cette méthode repose sur l'analyse de quatre harmoniques principales (RSH, TH, EFH et RBFH) extraites du courant moteur, en comparant les signaux obtenus dans un état sain et dans un état défectueux.

L'analyse se fait dans une plage de fréquence allant de [0Hz à 100 Hz], car c'est dans cette zone que les changements liés aux défauts d'enroulement sont les plus visibles. Le moteur est testé sous une charge moyenne pour simuler des conditions réelles de fonctionnement.

Le principe est de calculer l'écart entre le spectre du courant en cas de défaut et celui en état normal, selon la formule :

$$\text{Où} \quad A(f)_s = (A(f)_{faulty} - A(f)_{healthy}) \quad (\text{III.1})$$

- $A(f)_{faulty}$: est le spectre du courant avec un défaut au niveau du stator.
- $A(f)_{healthy}$: est le spectre du courant dans un état normal.
- $A(f)_s$: Représente l'amplitude résiduelle liée à l'anomalie.

L'analyse se concentre notamment autour de la fréquence fondamentale de $f = 50$ Hz. Le résultat obtenu a montré que cette méthode permet de détecter avec précision les défauts d'enroulement du stator, même à un stade précoce.

Pour mieux évaluer l'impact du défaut, on a comparé les amplitudes du spectre de courant obtenues par la FFT dans les deux états (sain et défectueux). Cette comparaison repose sur la relation suivante.

$$A(f)_{healthy} = F(A(f)_{faulty}) \quad (\text{III.2})$$

avec $A(f)_{faulty}$ représente les amplitudes (en Ampères) du spectre en présence de défaut, tandis que $A(f)_{healthy}$ correspond aux amplitudes mesurées Fonctionnement normal [37].

III.5 Schéma montrant le principe de fonctionnement d AROMA

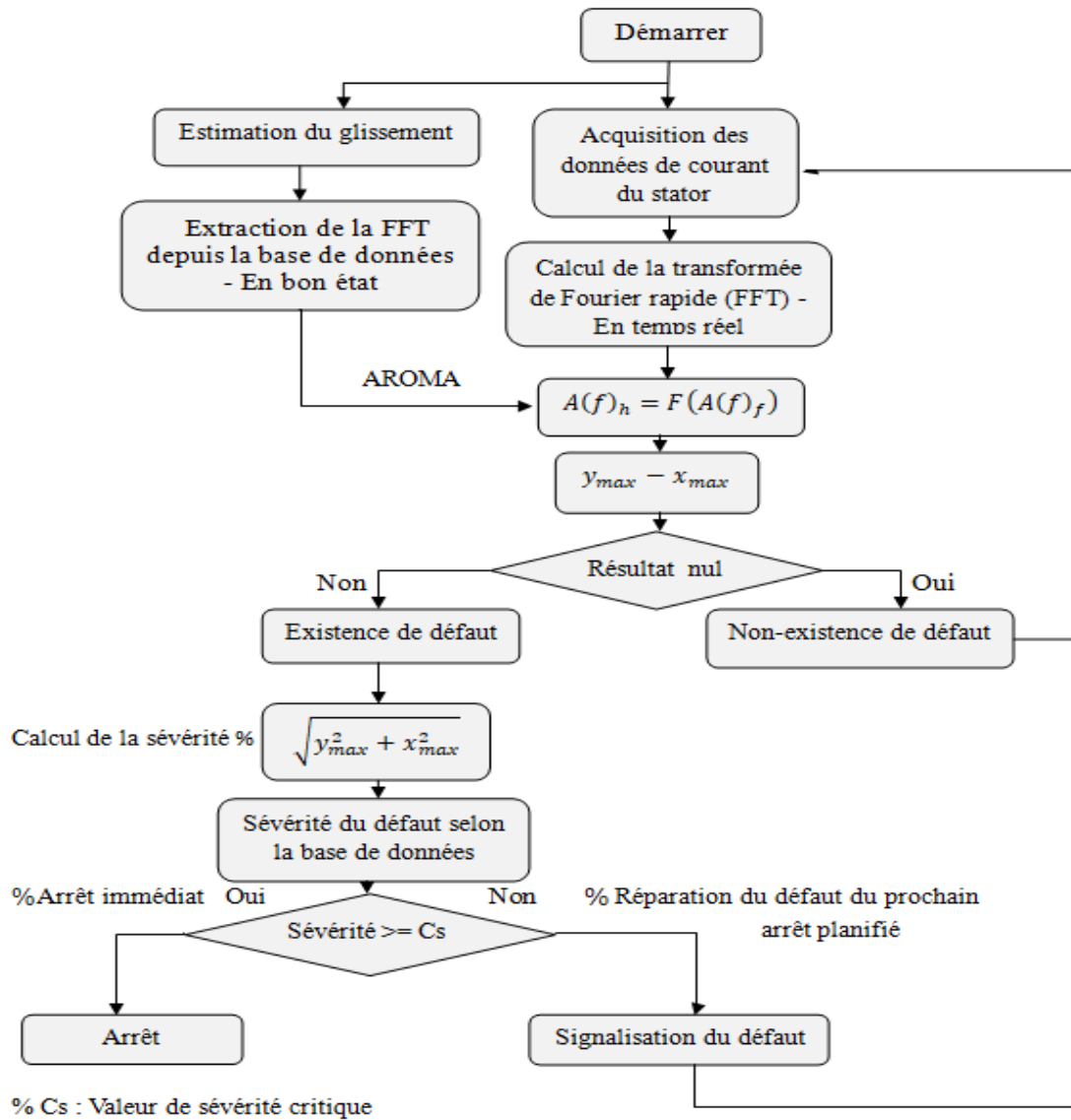


Fig.III.1. Organigramme de la méthode de détection des pannes AROMA.

III.6 Resultats expérimentaux

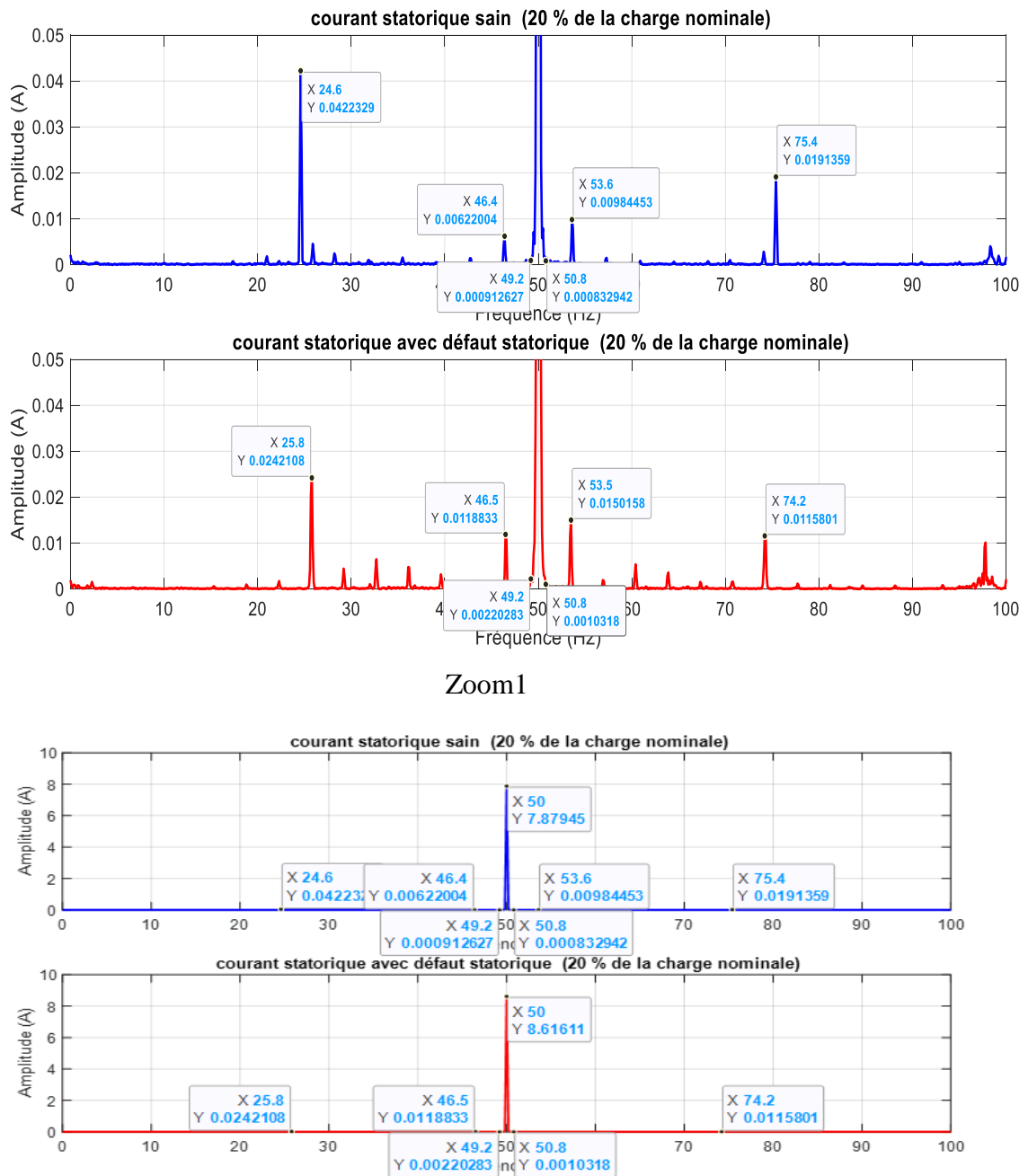


Fig. III.2: Spectre FFT pour 20% de la charge nominale.

Dans cette partie, l'analyse a été réalisée en se basant sur les résultats du Tableau 1, en se concentrant sur le fonctionnement du moteur sous une charge de 20 %, qui représente la condition la plus légère testée. Pour cela, nous avons comparé les spectres du courant statorique dans deux cas : l'état sain (courbe bleue) et l'état avec défaut au niveau du stator (courbe rouge). L'étude s'est appuyée principalement sur les composantes fréquentielles, en particulier l'harmonique fondamental et les harmoniques latéraux, afin de détecter les éventuelles anomalies dues au défaut.

. Harmonique fondamentale ($TH_R, h = 1$)

La fréquence fondamentale mesurée reste constante à 50 Hz aussi bien en état sain qu'en présence d'un défaut. Cependant, on remarque une légère augmentation de l'amplitude lorsque le stator présente un défaut : elle passe de 7.87945 A (état sain) à 8.61611 A. Cette variation suggère un début d'instabilité dans le courant du moteur, ce qui peut être lié à un déséquilibre ou un défaut dans les enroulements statorique.

. Harmoniques latéraux (RSH_R)

Lors de l'analyse, deux composantes ont été identifiées à 46.4 Hz et 53.6 Hz. En état sain, leurs amplitudes étaient respectivement de 0.00622004 A et 0.00984453 A. En présence d'un défaut, ces valeurs chutent à 0.0118833 A et 0.0150158 A. Cette baisse notable suggère une perturbation de l'équilibre magnétique à l'intérieur du moteur, ce qui peut être dû à un défaut dans la partie tournante.

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

Met en évidence des variations importantes aux fréquences de 49,2 Hz et 50,8 Hz. En présence d'un défaut dans le stator, l'amplitude à 49,2 Hz augmente significativement 0,0022083 A par rapport à l'état normal 0,000832942 A, tandis qu'à 50,8 Hz, elle diminue. Cette variation asymétrique traduit une perturbation au niveau de l'entrefer causée par un problème dans le stator, ce qui perturbe l'équilibre magnétique de la machine.

. Harmoniques électriques de haute fréquence (EFH_R)

Lors de l'analyse, des composantes ont été relevées aux fréquences de 24.6 Hz et 75.4 Hz. On remarque une variation importante à 75.4 Hz, où l'amplitude passe de 0.0191359 A en état sain à 0.0115801 A en cas de défaut. Ce changement peut indiquer un début de vieillissement de l'isolation ou une dégradation au niveau des enroulements du stator.

Remarque

Quand le moteur tourne à 20 % de sa charge, on remarque des différences claires dans le spectre du courant entre un état sain et un état avec défaut. Même avec une faible charge, ces écarts montrent qu'il peut y avoir un problème électrique ou mécanique, surtout au niveau du stator. Ces observations montrent que l'analyse spectrale permet de détecter tôt les anomalies, ce qui rend la surveillance conditionnelle très importante pour éviter des pannes graves.

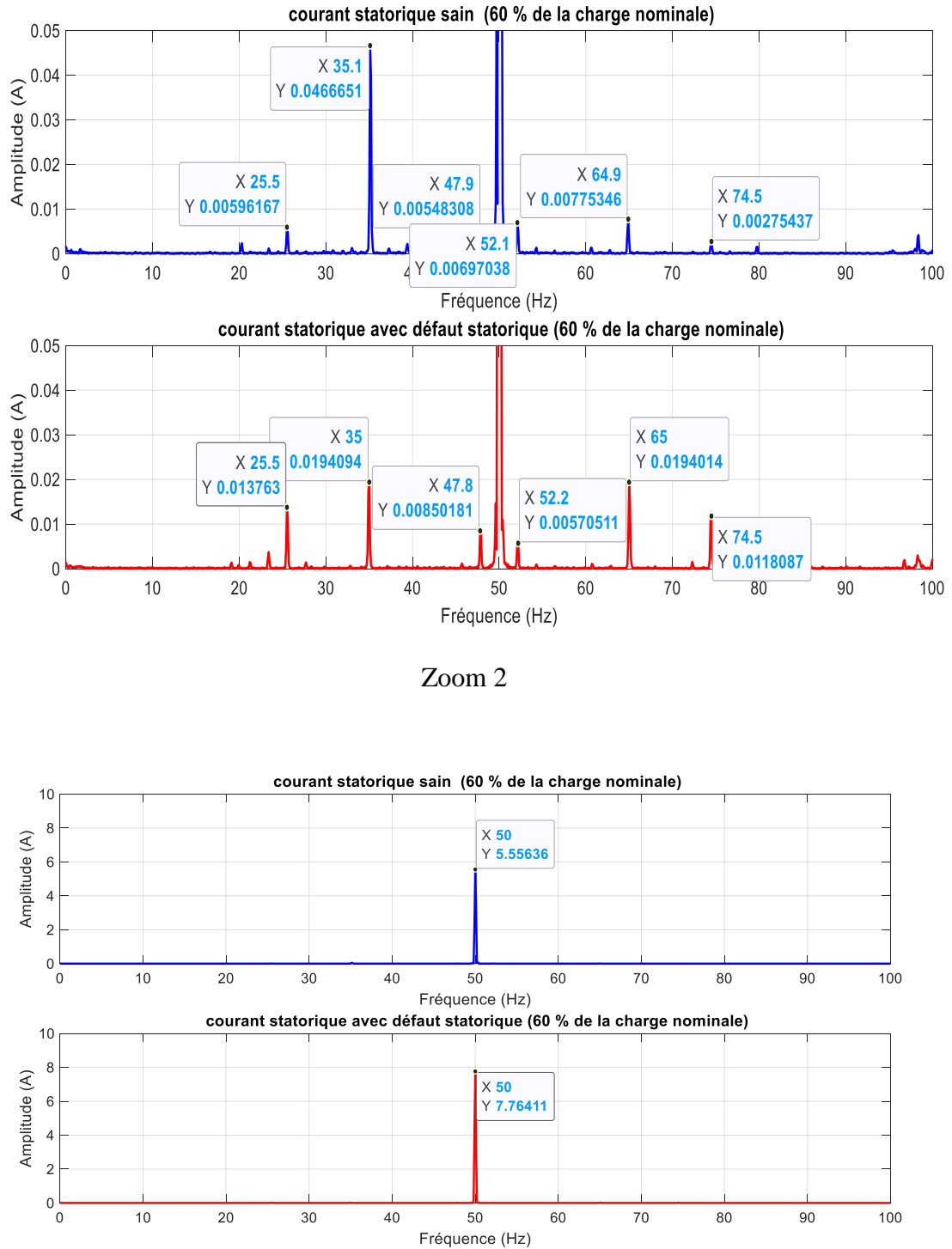


Fig.III.3: Spectre FFT pour 60% de la charge nominale.

En s'appuyant sur les données présentées dans le tableau relatif à l'analyse des harmoniques latéraux et des courants de défaut. Cette étude vise à comparer l'état sain (représenté par la courbe bleue) à l'état défectueux (représenté par la courbe rouge), en examinant plusieurs indicateurs harmoniques, notamment le TH_R , RSH_R , $RBFH_R$ et EFH_R .

. Taux Harmonique Total (THR)

On remarque que la valeur du THR est plus élevée en présence de défaut 7,76411 A comparée à l'état sain 5,55636 A. Cette augmentation traduit une distorsion plus importante du signal électrique, ce qui suggère la présence d'un défaut potentiel dans le moteur.

. 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 A que dans l'état défectueux 0.0194094 A. En revanche, à 64.9 Hz, elle est plus importante dans l'état défectueux 0.0194014 A par rapport à l'état sain 0.00775346 A. Ces variations irrégulières suggèrent un défaut localisé ou partiel dans le moteur.

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

Le rapport des harmoniques liés à une cassure $RBFH_R$ à la fréquence de 52,1 Hz révèle une variation notable entre l'état sain et l'état présentant un défaut. L'amplitude diminue de 0,00570511 A (état sain) à 0,00697038 A en cas de défaut. Cette baisse peut être interprétée comme un signe d'un court-circuit partiel entre les spires du stator. En effet, ce type de défaut modifie la distribution du champ magnétique dans l'entrefer, ce qui entraîne des perturbations dans les composantes fréquentielles du courant.

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

L'analyse des composantes harmoniques de haute fréquence a mis en évidence une augmentation significative de l'amplitude à 25,5 Hz dans l'état défectueux 0,013763 A, par rapport à l'état sain. Ce changement peut être associé à un début de court-circuit entre spires dans les enroulements du stator, provoquant une perturbation du champ magnétique. En revanche, à 74,5 Hz, les variations observées entre les deux états restent faibles, ce qui suggère que les effets du défaut sont plus marqués à basse fréquence.

Remarque

À partir des résultats obtenus, on remarque que l'état défectueux se traduit par une augmentation significative de certains indicateurs harmoniques, notamment le THR et le $RBFH_R$. Cette évolution met en évidence la présence probable d'un court-circuit entre spires dans les enroulements du stator. Le changement du spectre fréquentiel observé confirme l'impact direct de ce type de défaut sur le comportement électrique du moteur, ce qui renforce l'importance de l'analyse harmonique pour une détection précoce et fiable des anomalies du stator.

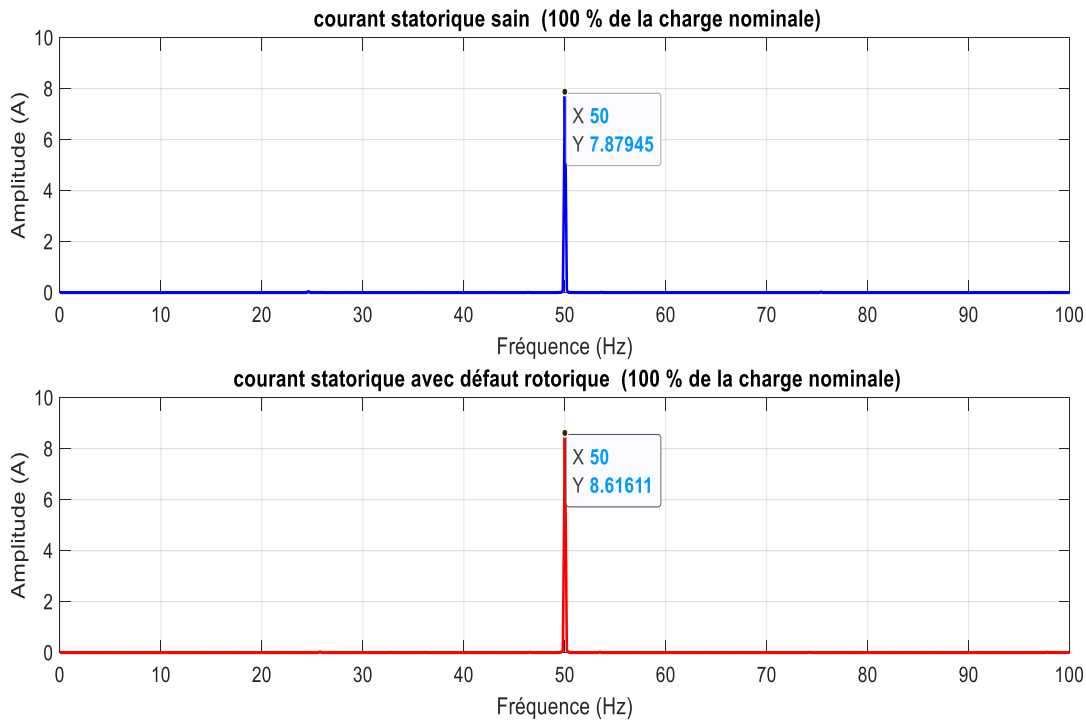


Fig.III.4: Spectre FFT pour 100% de la charge nominale.

À partir des données du tableau 1 et de la figure 3, une analyse spectrale a été menée pour étudier le comportement d'un moteur asynchrone fonctionnant à pleine charge (100 %) en présence d'un court-circuit dans les enroulements du stator. L'objectif est de comparer l'état sain à l'état affecté par ce défaut, en examinant les fréquences caractéristiques et les composantes harmoniques spécifiques à ce type d'anomalie électrique.

. *Fréquence fondamentale ($TH_R / h = 1$)*

Une augmentation notable de l'amplitude du courant à la fréquence fondamentale 50 Hz a été relevée dans le cas d'un court-circuit dans le stator 8,61611 A comparée à l'état sain 7,87945 A. Cette hausse reflète l'impact direct du court-circuit sur le fonctionnement électrique du moteur, traduisant un déséquilibre important dans les enroulements du stator et une surconsommation de courant due au défaut.

Remarque

Les résultats de l'analyse spectrale à pleine charge révèlent que l'état défectueux, dû à un court-circuit dans le stator, provoque l'apparition de composantes fréquentielles anormales, notamment au niveau des harmoniques latéraux. Ces anomalies traduisent clairement un dysfonctionnement électrique localisé dans le stator, affectant le courant et provoquant un déséquilibre dans le système. Ainsi, l'utilisation de la transformation de Fourier rapide (FFT) s'avère efficace pour détecter précocement ce type de défaut et prévenir des pannes majeures.

TABEAU III .1 :

Analyse des harmoniques latéraux et des courants de défaut selon le taux de charge dans un moteur asynchrone

Courant statorique	Caractéristique fréquentielles ($f_s = 50 \text{ Hz}$) (Hz)	20% De la charge nominale			60% De la charge nominale			100% De la charge nominale		
		$S = 0.008$ $f_r = 12.4$			$S = 0.022$ $f_r = 9.75$					
		Amplitude		Fréquence (Hz)	Amplitude		Fréquence (Hz)	Amplitude		Fréquence (Hz)
défaut	sain	défaut	sain		défaut	sain				
TH_R h = 1	$TH_R = f_s$	8.61611	7.87945	50	7.76411	5.55636	50	8.61611	7.87945	50
RSH_R k = 1, h = 13, h = 15	$RSH_R^- = (13f_s - N_r f_r) $	0.0118833	0.00622004	46.4	0.0194094	0.0466651	35.1			
	$RSH_R^+ = (15f_s + N_r f_r) $	0.0150158	0.00984453	53.6	0.0194014	0.00775346	64.9			
RBFH_R k = 1, h = 1	$RBFH_R^- = (1 - 2.s)f_s $	0.00220283	0.000912627	49.2	0.00548308	0.00548308	47.9			
	$RBFH_R^+ = (1 + 2.s)f_s $	0.0010318	0.000832942	50.8	0.00570511	0.00697038	52.1			
EFH_R k = 1, h = 1	$EFH_R^- = (f_s - f_r) $	0.0242108	0.0422339	25.8	0.013763	0.00596169	25.5			
	$EFH_R^+ = (f_s + f_r) $	0.0115801	0.0191359	74.4	0.0118087	0.00275437	74.5			

Afin d'identifier l'harmonique le plus sensible aux défauts, il est essentiel sous des charges partielles (50 %) et nominales (100 %). Cette méthode permet de détecter l'harmonique dont l'amplitude présente la plus grande variation en cas de court-circuit dans le stator, ce qui en fait un indicateur fiable pour localiser et évaluer la gravité du défaut électrique. Ainsi, cette

approche constitue un outil précieux pour assurer une surveillance efficace de l'état du moteur, permettant un diagnostic précis des défauts liés au stator et contribuant à prolonger la durée de vie et la performance globale du système d'analyser ses valeurs résiduelles.

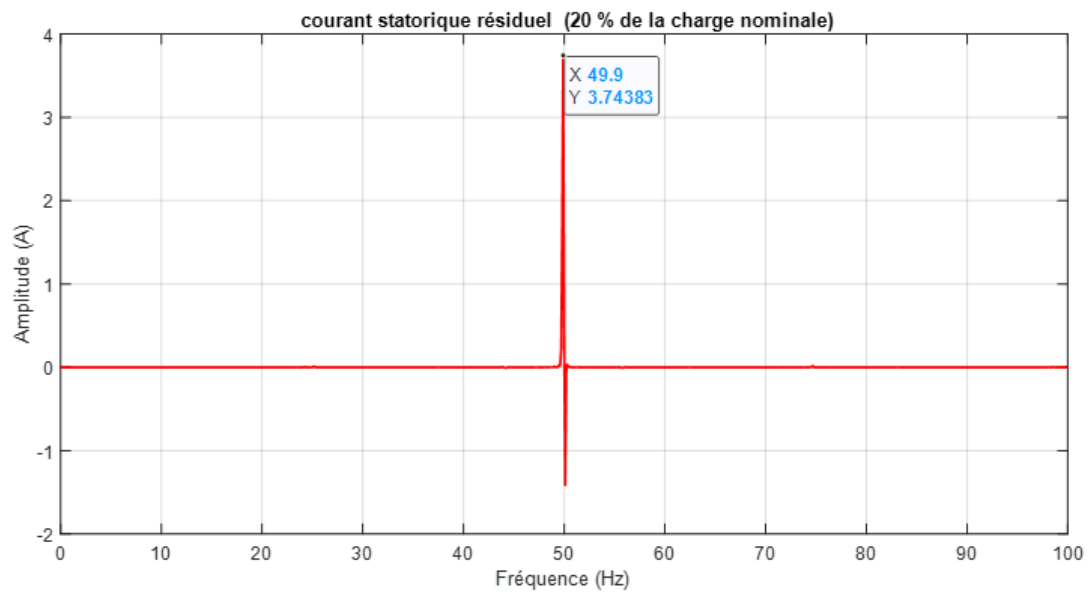


Fig.III.5 : Spectre FFT résiduel pour 20% de la charge nominale.

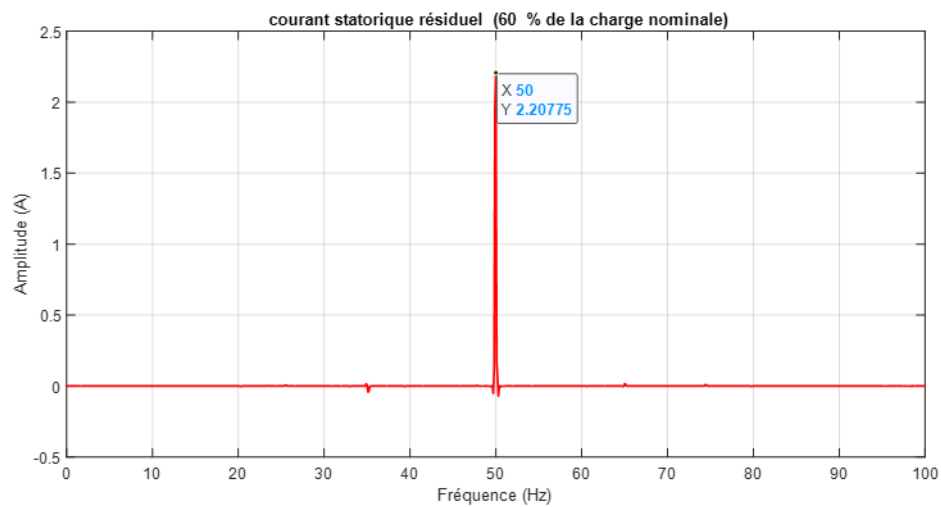


Fig.III.6 : Spectre FFT résiduel pour 60% de la charge nominale.

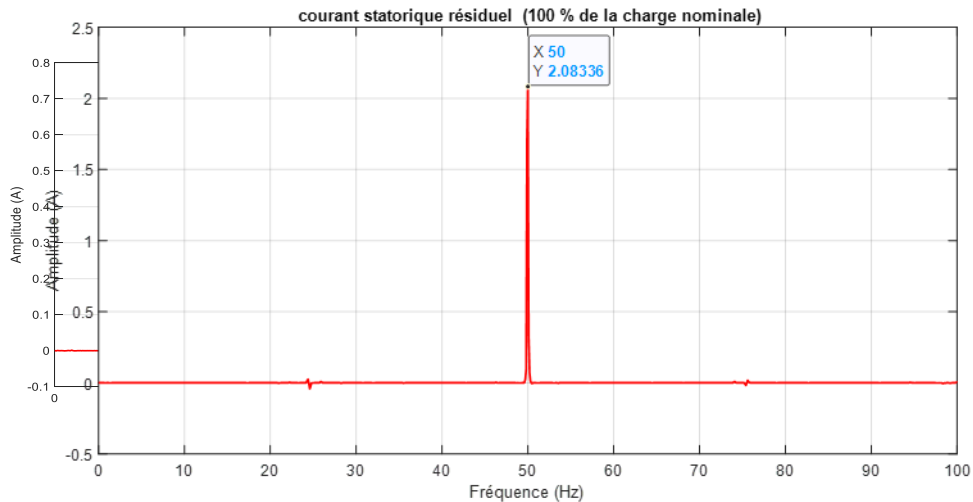


Fig.III. 7: Spectre FFT résiduel pour 100% de la charge nominale.

L'évaluation de la sensibilité harmonique commence par le calcul de l'écart entre les amplitudes mesurées en régime sain et celles observées en présence d'un court-circuit au niveau de l'enroulement du stator, sous différentes conditions de charge (faible, moyenne et maximale). Cet écart constitue la sensibilité résiduelle, traduisant la réponse de chaque harmonique face à ce type de défaillance électrique.

Les figures. III.5, III.6 et III.7, ainsi que le tableau.III.1, présentent les amplitudes des principales composantes harmoniques en fonctionnement normal et en cas de court-circuit statorique sous demi-charge. Il ressort de cette analyse que certaines harmoniques, telles que RSH⁻, RSH⁺, RBFH⁻, RBFH⁺, EFH⁺ et EFH⁻, affichent des variations d'amplitude faibles, témoignant d'une sensibilité limitée à ce défaut.

En revanche, l'harmonique temporelle (TH) se distingue par une sensibilité nettement plus élevée, marquée par une augmentation significative de son amplitude en présence du défaut. Cette caractéristique en fait un indicateur de diagnostic particulièrement pertinent pour la détection des court-circuit dans l'enroulement statorique.

Par ailleurs, l'application de l'algorithme AROMA permet d'amplifier la distinction entre les états sain et défectueux, renforçant ainsi la précision du diagnostic. Ce traitement offre un outil fiable, capable non seulement de détecter la présence du défaut, mais également d'évaluer la gravité.

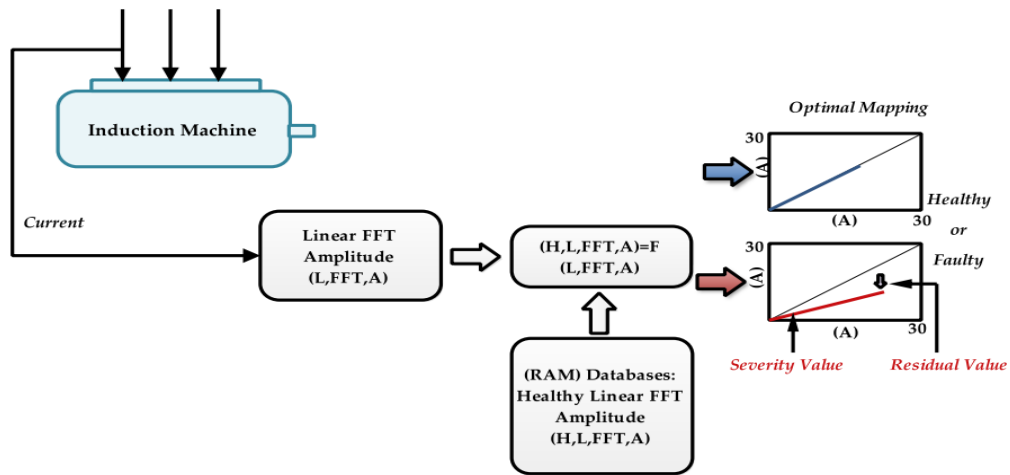


Fig.III.8. Schéma illustratif du processus de diagnostic utilisant la méthode.

III.7 Résultats expérimentaux de La technique AROMA

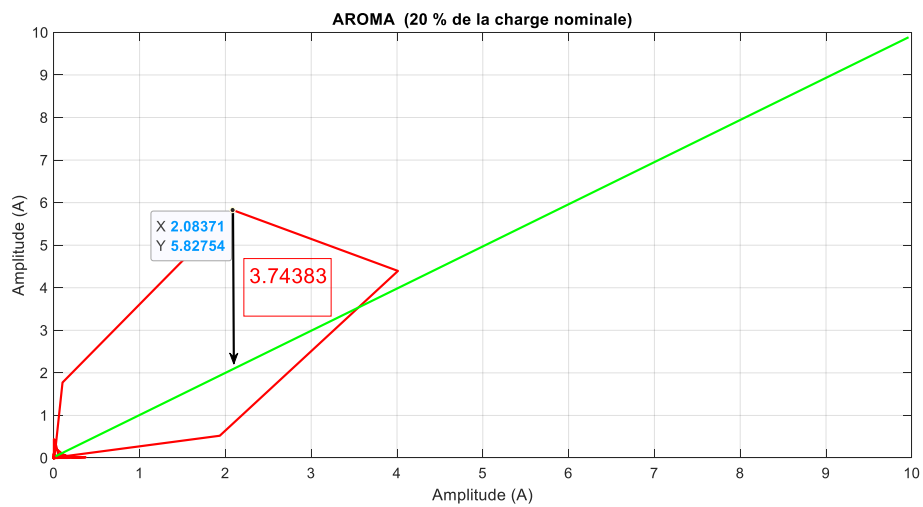


Fig.III.9. La technique AROMA pour un IM fonctionnant à 20% de la charge.

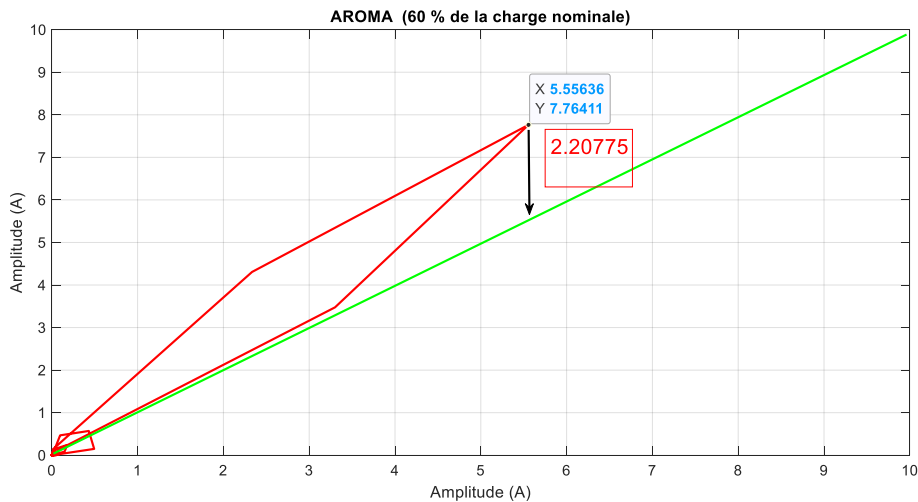


Fig.III.10. La technique AROMA pour un IM fonctionnant à 60% de la charge.

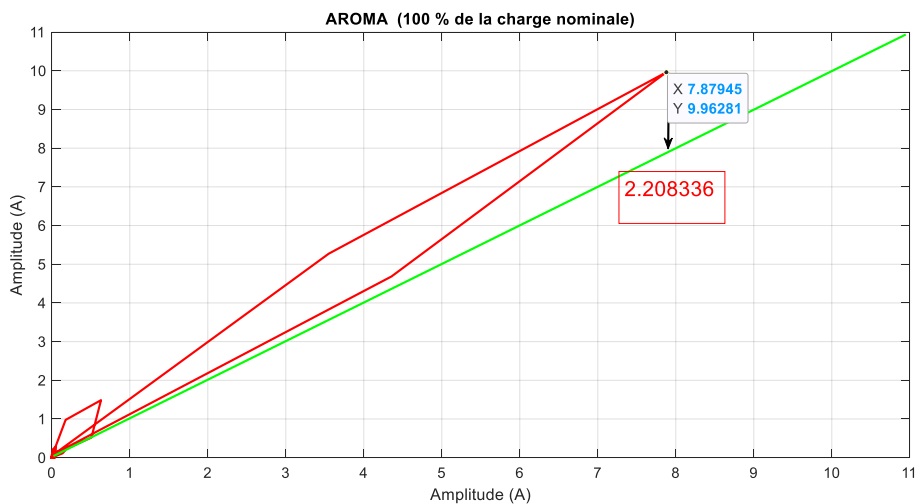


Fig.III.11. La technique AROMA pour un IM fonctionnant à 60% de la charge.

Les fig.III.9 et fig.III.10 et fig.III.11 illustrent la réponse du moteur soumis à différents niveaux de charge, en présence d'un défaut de type court-circuit dans le stator, et l'effet de l'algorithme AROMA sur la mise en évidence de ce défaut :

Fig.III.9 : Sous faible charge, on note une perturbation légère mais détectable dans la courbe du courant et du couple, signalant une anomalie précoce potentiellement liée à un court-circuit partiel.

Fig.III.10 : À demi-charge, l'algorithme met en évidence une distorsion plus marquée dans la réponse dynamique, notamment au niveau du courant, traduisant une aggravation du défaut statorique.

Fig.III.11 : En pleine charge, les effets du court-circuit sont nettement accentués. Le moteur présente des instabilités dans le courant et une réponse dégradée du couple, ce qui permet à la commande AROMA d'identifier clairement la gravité du défaut.

Ces résultats soulignent la capacité de la technique **AROMA** non seulement en contrôle,

aussi en détection des court-circuit dans le stator mais, ce qui en fait un outil double usage pour la surveillance avancée des moteurs asynchrones.

Remarque

L'analyse des trois courbes met en évidence l'impact négatif d'un court-circuit au niveau des enroulements du stator sur le comportement dynamique des machines asynchrones sous différentes charges. Ce type de défaut entraîne notamment:

- Un allongement du temps nécessaire à la stabilisation du système,
- L'apparition d'oscillations persistantes dans le courant et le couple,
- Une baisse notable de l'efficacité énergétique,
- Une dégradation de la stabilité globale du moteur, en particulier sous forte charge.

En résumé, la présence d'un court-circuit dans le stator compromet sérieusement le fonctionnement normal du moteur asynchrone. Ces résultats soulignent l'importance de la détection précoce de tels défauts afin de prévenir les défaillances graves et de garantir la fiabilité du système.

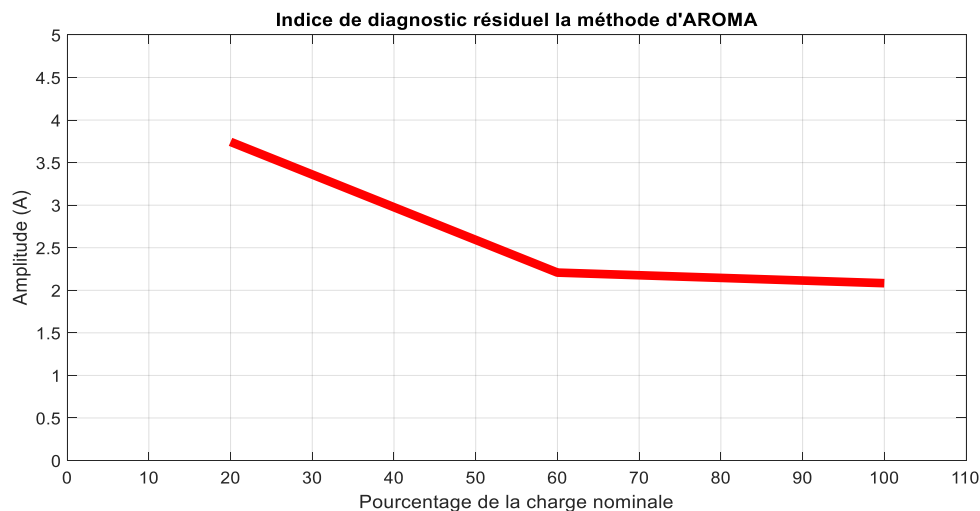


Fig.III.12. Indice de diagnostic résiduel la méthode d'AROMA.

La figure (III.12) représente l'évolution de l'indice de diagnostic résiduel obtenu par la méthode AROMA pour trois niveaux de charge nominale du moteur : 20 %, 60 % et 100 %.

À 20 % de la charge nominale, la valeur de l'indice est d'environ 3,6 A, ce qui indique la présence de composantes fréquentielles marquées dans le signal résiduel. Cela reflète la sensibilité de la méthode à détecter les défauts sous des charges faibles.

À 60 % de la charge, la valeur de l'indice diminue nettement pour atteindre environ 2,3 A, ce qui signifie que certaines composantes du signal liées au défaut deviennent moins visibles avec l'augmentation de la charge.

À 100 % de la charge nominale, la valeur se stabilise autour de 2,1 A, indiquant une certaine

stabilité du signal résiduel en régime de pleine charge, tout en laissant subsister un effet du défaut encore détectable.

L'analyse graphique montre que la méthode AROMA fournit des indices plus significatifs sous des charges partielles, ce qui la rend particulièrement adaptée pour le diagnostic précoce des défauts, notamment dans les applications fonctionnant rarement à pleine charge.

La formule classique

$$\sqrt{x_{max}^2 + y_{max}^2} \quad (\text{III. 3})$$

Permet d'évaluer l'intensité des perturbations liées à un court-circuit dans le stator. En présence de ce type de défaut, cette méthode fournit une indication claire de la gravité de l'anomalie, facilitant ainsi la prise de décisions concernant l'exploitation sécurisée du moteur. Selon le niveau de dégradation détecté dans les enroulements du stator, des actions de maintenance peuvent être planifiées ou engagées immédiatement, assurant ainsi une meilleure fiabilité du système et la continuité du processus industriel.

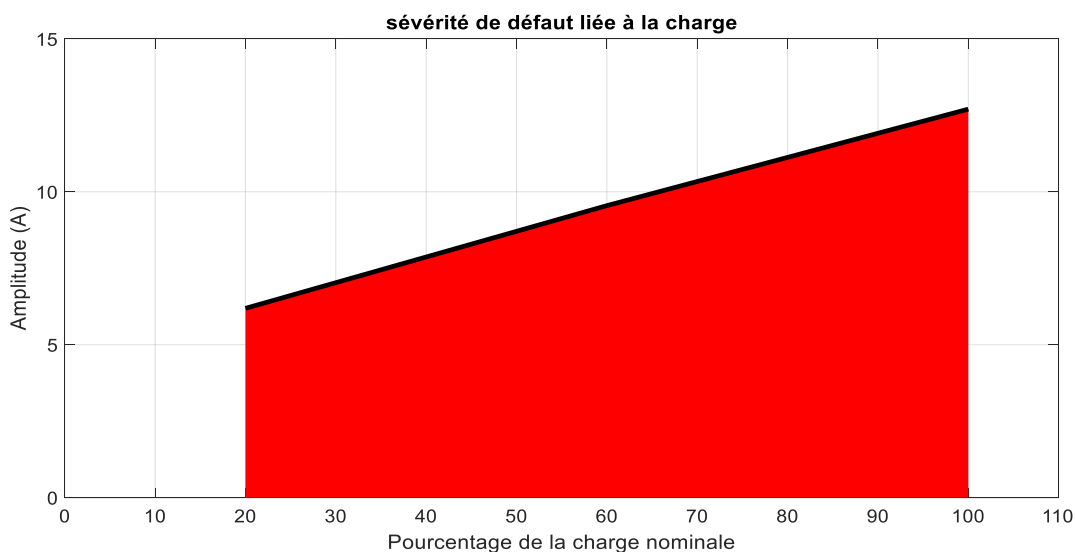


Fig.III.13. Sévérité de défaut liée à la charge.

L'analyse des courbes de sévérité du défaut à différents niveaux de charge (faible, moyenne et pleine) permet d'évaluer l'influence d'un court-circuit dans les enroulements du stator sur le comportement électrique du moteur. Les résultats mettent en évidence une corrélation directe entre l'augmentation de la charge et la sévérité du défaut lié au court-circuit :

- **Sous faible charge**, l'effet du court-circuit reste modéré 6.12833 A, rendant sa détection plus difficile.

- **À demi-charge**, la sévérité s'accroît à 10 A, indiquant que le défaut commence à se manifester plus distinctement dans les signaux électriques.
- **En pleine charge**, la sévérité atteint son maximum 12.5 A, traduisant une amplification claire des composantes perturbées par le court-circuit dans le stator.

Cette évolution confirme que la charge joue un rôle déterminant dans la visibilité des défauts d'origine électrique. Ainsi, il est essentiel d'intégrer cette variable lors de la conception de systèmes de surveillance, afin d'adapter les seuils de détection au niveau de charge pour une détection fiable des court-circuit.

III.8 Conclusion

En conclusion, une méthode efficace de diagnostic du rotor du moteur asynchrone est présentée, basée sur l'analyse de la transformée de Fourier rapide (FFT) et l'outil AROMA, qui permet une grande précision de la gravité du défaut en utilisant un seul capteur de courant. Compte tenu des limites de cette méthode, la capacité à détecter une défaillance partielle est limitée. Il est donc suggéré de l'intégrer aux technologies d'IA pour sa réputation de surveillance distinctive, qui nécessite une maintenance plus intelligente et plus efficace.

***Conclusion
Générale***

Conclusion générale

Cette étude propose une méthode performante pour la détection précise des défauts affectant le stator des moteurs asynchrones (IM). La stratégie adoptée repose sur l'analyse des écarts résiduels entre les composantes harmoniques d'un moteur sain, enregistrées dans une base de données, et celles mesurées en temps réel sur un moteur en fonctionnement. Concrètement, la méthode consiste à comparer les amplitudes FFT du moteur sain avec celles obtenues sur un moteur potentiellement défectueux, en s'appuyant sur l'outil AROMA pour extraire les informations pertinentes de ces signaux.

Cette analyse permet le calcul d'un indice de défaut fondé sur les amplitudes maximales des spectres FFT dans les deux états (sain et défectueux). Un avantage majeur de cette approche réside dans sa robustesse face aux variations de charge, grâce à sa dépendance exclusive à la fréquence. Cela facilite la mise en œuvre du diagnostic, réduit les risques d'erreurs et garantit la fiabilité du système de surveillance.

Dans l'ensemble, cette méthode constitue une solution robuste, précise et simple à déployer pour le diagnostic des défauts de stator dans les moteurs asynchrones. Les résultats expérimentaux ont montré que l'utilisation d'un seul capteur de courant, placé sur les lignes d'alimentation, combinée à une référence saine issue de la base de données, permet deux modes de diagnostic :

En pleine charge, la valeur résiduelle détectée est de 2,1 A.

En demi-charge, elle est de 2,3 A.

En faible charge, elle atteint 3,6 A.

Le second mode de diagnostic concerne l'évaluation quantitative de la sévérité du défaut, permettant d'éviter des arrêts non justifiés :

En pleine charge, la sévérité mesurée est de 12,5 A.

En demi-charge, elle est de 9 A.

En faible charge, elle est de 6,85 A.

Ces informations permettent aux responsables de maintenance de prendre des décisions éclairées entre un arrêt d'urgence ou une planification d'intervention.

Cependant, bien que cette méthode soit sensible et efficace pour estimer l'intensité des défauts, elle ne permet pas d'en identifier précisément la nature. Pour pallier cette limitation, l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) représente une perspective prometteuse.

En particulier, les algorithmes d'apprentissage automatique pourraient enrichir cette approche en détectant et classifiant plus finement les défauts à partir de grands ensembles de données.

Référence

- [1] Technique de l'ingénieur. Moteur asynchrone. D3490, pages 2-6.
- [2] S. Bachir. Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par Estimation Paramétrique. Thèse de doctorat. Université de Poitiers. Décembre 2002.
- [3] M. Sahraoui, "*Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones*" Thèse Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2010.
- [4] "Modélisation analytique des machines Asynchrone R. Bousseksou application. Au diagnostic c ". Mémoire de magister En Electrotechnique. Université M'entourai Constantine 2007.
- [5] S. Bachir "Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique" Thèse Doctorat, Université de Poitier, France, 2003.
- [6] Première Bac pro Elec, Lycée Professionnel Clément Ader Le moteur asynchrone triphasé - Dossier ressources.
- [7] M. Haïdouk. Diagnostic de la machine asynchrone. PFE, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2005.
- [8] S. Williamson et K. Mirzoian, Analysis of cage induction motors with stator winding faults, IEE Trans. on Power Apparatus and Systems, pp. 1838-1843, 1985.
- [9] . A. H. Bonnet and G. C. Soukup. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 28(4) :921_937, July/August 1992.
- [10] A.H. Bonn et t. Root cause a C motor failure analysis with a focus on shaft failures IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36(5) :1435-1448 September/ October 2000.
- [11] J. Piniella, F. Bandura, Diagnostics of Eccentricities and Bar/End-Ring Connector Breakages in Polyphase Induction Motors Through a Combination of Time-Series Data Mining and Time-Stepping Coupled FE-State-Space Techniques. IEEE Transactions On Industry Applications, VOL. 39, NO. 4, JULY/AUGUST 2003.
- [12] G. Didier. Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances. Theses de doctorate. University Henri Poincare, Nancy-I. October 2004.
- [13] H. Razik. Le contenu spectral du courant absorbé par la machines chroniques cas de défaillance, état de l'art. Revue 3 Eiao 29, pages 48-52. Juin 2002.

- [14] B. Ahcen. Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes. Mémoire de Magister, LRE (<http://lre.enp.edu.dz>).
- [15] Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Janvier2007.
- [16] T. BOUMEGOURA. Recherche désignateur électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic. Thèse Docteur at. Ecole centrale de Lyon. Mars 2001.
- [17] N. L'achène. Diagnostic de défauts au rotor d'un machine asynchrone cage d'écureuil. Mémoire magister. LRE (<http://lre.enp.edu.dz>), Ecole Polytechnique d'Alger 2005.
- [18] M.E.H. Benboozed and G.B. Kliman, "What Stator Current Processing- Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis IEEE Transaction son Energy Conversion, vol.18, no.2, pages238-244, June2003.
- [19] M. Sahraoui " Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée Cage" Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie,2003.
- [20] G. Abdelkader, "Effetdel'alimentationsurladétectiondesdéfautsdansune Machine asynchrone à cage basée sur l'analyse de signal du courant", Mémoire de magister en G. élec Université de Chlef, 2011.
- [21] Y. Han, Y. H. Song, "Condition Monitoring Techniques for Electrical Equipment–A Literature Survey», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, January 2003, pp. 4-13.
- [22] S. Nandi and al., "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review, IEEE Trans. on Ener. Conv. Vol. 20, no.4, 2005, pp. 719- 729
- [23] D. G. Dorrell and al., "Analysis of Air Gap Flux, Current, and Vibration Signals as a Function of the Combination of Static and Dynamic Air Gap Eccentricity in3-Phase Induction Motors", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol.33, no.1, 1997, pp.24-34
- [24] V. Kokko, "Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements", Doctoral thesis, Oulun Yliopisto, Oulu2003, ISBN 951-42 6938-1, p. 157. Available on web at: <http://herkules.oulu.fi/isbn9514269381>.
- [25] I. Ahmed and M. Ahmed, Comparison of Stator Current, Axial leakage FluxandInstantaneousPowertoDetectBrokenRotorBarFaultsinInduction Machines", in Proc. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'08), 2008, pp. 1-6.
- [26] N.Bessous" Contribution au diagnostic des machines asynchrones" ".Mémoire de magister En Electrotechnique. Université Mentouri Constantine 2007.

- [27] B. Fatima, "Contribution à la modélisation et à la commande la machine Asynchrone : "Application au diagnostic des défauts statoriques".
Thèse de Doctorat, Université Constantine 1, 2014.
- [28] R. Bousseksou, "Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic". Memoir de magister en Electro technique. University Mentor Constantine ,2007
- [29] HAMOUDI Abdallah, « Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par les Techniques d’Identification », Thèse de doctorat, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D’ORAN, 2017/2018. Impropre Baring installation due to machine misalignment
- [30] GUERMIR Acid « Surveillance et diagnostic des machines alternatives Détection des court- circuit entre spires », MEMOIRE de Master, UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE, juin 2015.
- [31] Allal A. Non- Invasive Quantities for Diagnosis of Asynchronous Machines. Memory of Magister. University of Sétif, Algeria, 2010.
- [32] Menace A, Naît-Saïd M S, Benakcha A H, Dred S. Stator current analysis of incipient fault into asynchronous motor rotor bars using Fourier fast transform. Journal of Electrical Engineering, 2004, 55:122–130.
- [33] Shehata S a M, El-Goharey H S, Marei M I, Ibrahim A K. Detection of induction motors rotor/stator faults using electrical signatures analysis. In: Proceedings International Conference on Renewable Energies and Power Quality. Bilbao, Spain, 2013, 1–6
- [34] Joksimovic GM, Penman J. The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47: 1078–1084
- [35] Khodja D E, Kheldoun A. Three-phases model of the induction machine taking account the stator faults. International Journal of Mechanical Systems Science & Engineering, 2009, 1(2): 107
- [36] Pires V F, Kadivonga M, Martins J F, Pires A J. Motor square current signature analysis for induction motor rotor diagnosis. Measurement, 2013, 46(2): 942–948
- [37] Sribovornmongkol T. Evaluation of motor online diagnosis by FEM simulations. Dissertation forth Master’s Degree. Stockholm: Royal Institute of Technology Stockholm, 2006.

- [38] Sahraoui M, Ghoggal A, Guedidi S, Zouzou S E. Detection of inter turn short-circuit in induction motors using Park–Hilbert method. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2014, 5(3): 337–351.
- [39] Cherif, Hakima. « Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l’analyse par FFT et ondelettes ». Thèse de magister Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [40] Actionneurs électriques principes modèles commande - EUROLLES-
- [41] MEDOUED AMMAR. « SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES MACHINES ELECTRIQUES : APPLICATIONS AUX MOTEURS ASYNCHRONES ». Thèse de doctorat en électrotechnique de l’université du 20 Août 1955-Skikda.2012
- [42] HAMMOUDI, Abdellah. « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par les techniques d’identification ». Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie d'Oran.2018
- [43] MENDAZ, KHEIRA et BOUNOUA, HOURIA. « Adaptation des commandes floues et Neuro-floue aux actionnaires asynchrones en mode dégradé : application au transport ferroviaire ». Thèse de doctorat. Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès.2015.
- [44] Didier, Gaëtan. « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ». Thèse de doctorat de l’université Henri Poincaré, Nancy-I.2004.
- [45] Benbouzid, M.E.H. ; Kliman, G.B. What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis ? *IEEE Trans. Energy Convers.* 2003, 18, 238–244. [Crossref]
- [46] Lyons, R.G. *Understanding Digital Signal Processing*, 3rd ed.; Pearson Education: Noida, India, 1997.
- [47] A. Allah and B. Chelate, “High sensitivity detection of the stator shortcircuitfaults in induction motor using Hilbert Park’s vector product,” *J. Fund am. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 994–1022, 2019.
- [48] M. Sahraouian, A. Ghoggal, S. Guedidi, and S. E. Zouzou, “Detection of inter-turn short-circuit in induction motors using Park–Hilbert method,” *Int. J. Syst. Assurance Eng. Manage.*, vol. 5, no. 3, pp. 337–351, Sep. 2014, doi: 10.1007/s13198-013-0173-6.

Annexe

Tableau A.1. Caractéristiques des machines utilisées

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 pair de pole	2