



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : machine électrique

Présenté par :

➤ LAOUINI Abderraouf

➤ SADOON Oussama

Intitulé :

**Détection des différents défauts du roulement dans les
moteurs à induction en utilisant les techniques :
MCSA et MVSA**

Soutenue le : 03/06/2024

Devant le jury composé de :

Dr : MAAMRI Oussama

Président

Université

Pr : BESSOUS Noureddine

Encadreur

Université

Dr : HALEM Noura

Examineur

Université

Année académique : 2023/2024

Remerciements

Avant tout, nous voudrions remercier notre **Dieu** le Tout-Puissant de nous avoir donné l'opportunité d'atteindre ce niveau de connaissance, ainsi que le courage et la patience pour réaliser ce modeste travail.

Nous remercions notre superviseur, **Pr. BESSOUS Noureddine**, d'avoir accepté de superviser ce travail et de nous avoir guidé au long de ce travail, ses conseils précieux ont contribué à la réussite de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos gratitude à nos amis et collègues qui nous ont apporté leurs soutiens moraux et intellectuels tout au long de nos études. Nous remercions en particulier nos collègues Djaoueher et Zineb pour leurs conseils et leurs soutiens.

Nous exprimons également nos gratitudes à tous les enseignants de la Faculté de Technologie pour leurs aides et leurs orientations au long de notre formation.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

NB : Les étudiants ont toute la responsabilité de rédiger ce travail et d'avoir leurs résultats sous la supervision et les suggestions du comité de soutenance.

Dédicace

Nous dédions ce travail à nos parents qui nous ont encouragés à
persévérer tout au long de mon parcours scolaire,

Ainsi qu'à nos frères et sœurs qui nous ont soutenus matériellement
et moralement.

À nos amis avec qui nous avons partagé les plus beaux meilleurs
moments,

À tous ceux qui nous sont chers et proches de notre cœur, et à
tous ceux qui ont partagé notre joie.

Abderraouf. Oussama

ملخص

تتناول هذه الدراسة الكشف على العيوب المختلفة في محامل المحركات الحثية باستخدام تقنيتين للتحليل: تحليل التيار الكهربائي للمحرك (MCSA) وتحليل الإشارة الاهتزازية للمحرك (MVSA) وذلك بالاعتماد على تحويل فوريي السريع (FFT). حيث تقوم تقنية MCSA بتحليل تغيرات التيار الكهربائي لتحديد الخلل في المحامل. بينما تركز تقنية MVSA-FFT على استخراج المؤشرات الاهتزازية الناتجة عن المحامل مع وجود الخلل. من خلال استعمال هاتين الطريقتين، حاولنا في هذه الدراسة أن نكشف بدقة عيوب الحامل والذي يجنبنا التوقف غير المخطط لها للمحركات الحثية. تظهر النتائج أن استخدام تقنيتي MCSA-FFT و MVSA-FFT معًا يتيح الكشف المبكر لعيوب المحامل باستخدام إحدى هاتين الطريقتين.

الكلمات المفتاحية: المحركات الحثية، مؤشرات التيار الكهربائي للمحرك (MCSA)،

تحليل مؤشرات الاهتزاز للمحرك (MVSA)، المحامل، تحويل فوريي السريع (FFT).

Abstract

This study addresses the detection of various faults in induction motor bearings using two analysis techniques: Motor Current Signature Analysis (MCSA) and Motor Vibration Signal Analysis (MVSA), relying on Fast Fourier Transform (FFT). The MCSA technique analyzes variations in electrical current to identify bearing faults, while the MVSA technique focuses on extracting vibration indicators resulting from faulty bearings. By employing these two methods, this study aims to accurately detect bearing faults, thereby avoiding unplanned downtime of induction motors. The results demonstrate that using both MCSA and MVSA techniques together allows for early detection of bearing faults using either method.

Keywords: Induction motors, Motor Current Signature Analysis (MCSA), Motor Vibration Signal Analysis (MVSA), Bearings, Fast Fourier Transform (FFT).

Résumé

Cette étude traite de la détection des divers défauts dans les roulements des moteurs à induction en utilisant deux techniques d'analyse : l'analyse de la signature du courant moteur (MCSA) et l'analyse du signal de vibration moteur (MVSA), en s'appuyant sur la transformation de Fourier rapide (FFT). La technique MCSA-FFT analyse les variations du courant électrique pour identifier les défauts des roulements, tandis que la technique MVSA-FFT se concentre sur l'extraction des indicateurs de vibration résultant des roulements défectueux. En utilisant ces deux méthodes, cette étude vise à détecter avec précision les défauts des roulements, évitant ainsi les arrêts non planifiés des moteurs à induction. Les résultats montrent que l'utilisation conjointe des techniques MCSA-FFT et MVSA-FFT permet de détecter précocement les défauts des roulements en utilisant l'une ou l'autre de ces méthodes.

Mots-clés : Moteurs à induction, Analyse de la signature du courant moteur (MCSA), Analyse du signal de vibration moteur (MVSA), Roulements, Transformation de Fourier Rapide (FFT).

Sommaire

Sommaire

Liste des figures	I
Liste des tableaux	II
Liste des symboles	III
Introduction générale	1
 CHAPITRE I: Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de MAS	
I.1 Introduction	4
I.2 Constitution de la machine asynchrone	4
• stator • Rotor • L'entrefer • Les organes mécaniques	
I.3 Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil	8
 I.4 Les défaillances des machines asynchrones sont : Internes et externe a-Interne	 10
I.4.1 Défaillances au rotor	10
I.4.2 Défaillances au stator	12
I.4.3 Défaillances mécaniques	15
 I.5 Méthodes de diagnostic et de détection des défauts dans la MCSA	 16
I.5.1 Analyse des courants statorique	16
I.5.2 Analyse vibratoire de la machine	16
I.5.3 Analyse du vecteur de Park	16
I.5.4 Analyse du couple électromagnétique	17
I.5.5 Analyse de la signature du courant moteur (MCSA)	17
I.5.6 Analyse des signatures vibratoires du moteur (MVSA)	17

I.6	Conclusion	18
	CHAPITRE II: Théorie sur les techniques MCSA et MVSA	
II.1	Introduction	20
II.2	Méthode de MCSA	20
II.2.1	Analyse de la signature du courant moteur	20
II.2.2	Principaux avantages de l'utilisation de la MCSA	22
	1. Réduction des coûts de maintenance 2. Réduction du temps d'arrêt 3. Augmentation de l'efficacité 4. Rentabilité 5. Décisions de maintenance et de réparation mieux informées 6. Amélioration des performances 7. Détection précoce	
II.3	Aperçu sur MVSA	23
II.3.1	Définition de vibration	23
II.3.2	Capteurs de vibration et grandeurs mesurées	23
II.3.2.1	Capteur de déplacement	24
II.3.2.2	Capteur de vitesse	25
II.3.2.3	Capteur d'accélération	25
II.3.2.4	Méthode de l'analyse vibratoire	26
II.3.2.5	Méthode de niveau global	27
II.3.2.6	Analyse temporelle L'analyse temporelle	27
II.3.2.7	Analyse en fréquence	27
II.3.2.8	Analyse spectrale	27
II.4	Analyse de fréquences des défauts de roulements	28
II.4.1	Equation théorique (analytique)	28
II.4.2	Modulation de la fréquence du signal	29
II.4.3	Règles empiriques	29
II.5	Conclusion	30

**CHAPITRE III: Analyse des défauts de roulements par la méthode de la
" MCSA"et"MVSA"**

III.1	Introduction	32
III.2	Analyse du défaut de roulement	32
III.3	Analyse du défaut dans la bague extérieure du roulement	32
III.4	Conclusion	42
IV	Conclusion Générale	43
	Référence bibliographique	44

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts de MAS

Figure I.1. constitution de la machine asynchrone	5
Figure I.2. schéma présente l'enroulement du stator.	6
Figure I.3. Vue d'un rotor à cage.	6
Figure I.4. Vue d'un rotor bobiné.	7
Figure I.5. Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone .	8
Figure I.6. Classification des défauts selon leurs origines.	9
Figure I.7. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique	12

Chapitre II : Théorie sur les techniques MCSA et MVSA

Figure II.1. Système de Base d'Instrumentation MCSA.	21
Figure II.2. Réponse mécanique de la structure du stator.	23
Figure II.3. Principe du capteur inductif à courants de Foucault.	25
Figure II.4. Principe d'un vélocimétrie.	25
Figure II.5. Principe de fonctionnement d'un accéléromètre.	26

Chapitre III : Analyse de défaut du roulement en utilisant les méthodes : MCSA et MVSA

Figure III.1. Photos d'un roulement défectueux dans la BE.	33
Figure III.2. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BE, $g \approx 0$) (a) : 0-100Hz, (b) : 0-100Hz) : Autour des PSHs	34
Figure III.3. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BE, $g \approx 0$) (a) : 100-200Hz, (b) : 100-200Hz) : Autour des PSHs	35
Figure III.4. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BE, $g \approx 0$) (a) : 200-300Hz, (b) : 200-300Hz) : Autour des PSHs	36
Figure III.5. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BE, $g \approx 0$) (a) : 300-400Hz, (b) : 300-400Hz) : Autour des PSHs	37

Figure III.6. Spectre du courant statorique pour la bande de 0-1000Hz ($g \approx 0.4$) ; (a) : Etat sain, (b) : Etat défectueux (BE).	39
Figure III.7. Spectre du courant statorique pour la bande de 0-100Hz ($g \approx 0.4$) ; (a) : Etat sain, (b) : Etat défectueux (BE).	39
Figure III.8. Spectre du courant statorique pour la bande de 100	40
Figure III.9. Spectre du courant statorique pour la bande de 200	40
Figure III.10. Spectre du courant statorique pour la bande de 300	41

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre III : Analyse de défaut du roulement en utilisant les méthodes : MVSA et MCSA

Tableau III.1 Synthèse des signatures des défauts.	33
Tableau III.2 Tableau de comparaison des fréquences caractéristiques théoriques et expérimentales (BE, $g=0$).	38

Liste des symboles

Liste des symboles

TFR : Transformée de Fourier Rapide

MCSA : motor current signal analysis

MVSA : motor vibration signal analysis

MAS : machine asynchrone

DWT : Discret Wavelet Transforme

BE : bague externe

$i_R(t)$: courant rotorique

$i_S(t)$: courant statorique

f_{be} : la fréquence caractéristique de la bague extérieure

f_{bi} : la fréquence caractéristique de la bague interne

f_r : la fréquence de rotation de la cage

f_{bille} : la fréquence caractéristique de le bille

$f_{caract-be}$: fréquence caractéristique du défaut de la bague externe dans les spectre du courant statorique

N_b : le nombre de billes

D_b : le diamètre de la bille

D_m : le diamètre du centre des billes (diamètre moyen= $D_m =$

$$\left(\frac{D_{bag-ext} + D_{bag-int}}{2} \right))$$

α : l'angle de contact (le roulement oblique possède les valeurs de $\alpha=150$, 250 ou 400 et pour un roulement à gorge profonde, il présente une charge purement radiale $\alpha=00$).

g : glissement

(dB) : decibel.

Introduction Générale

Les moteurs à induction sont omniprésents dans diverses applications industrielles, jouant un rôle crucial dans l'alimentation des machines et des équipements. Cependant, le fonctionnement fiable de ces moteurs dépend de la santé et de l'intégrité de leurs composants, en particulier des roulements. Les roulements sont sujets à l'usure, à la fatigue et à divers défauts au fil du temps, ce qui peut entraîner des inefficacités, des pannes et des temps d'arrêt coûteux s'ils ne sont pas détectés.

Ces dernières années, il y a eu un intérêt croissant pour le développement de techniques avancées pour la détection précoce et le diagnostic des défauts des roulements dans les moteurs à induction. Parmi ces techniques, l'analyse de signature de courant du moteur (MCSA) et l'analyse de signature de vibration du moteur (MVSA) ont émergé comme des méthodes importantes de surveillance de l'état et de détection des défauts.

La MCSA-FFT implique de surveiller le courant électrique alimentant le moteur et d'analyser sa signature pour identifier les écarts indicatifs des défauts de roulement. D'autre part, la MVSA-FFT se concentre sur l'analyse des motifs vibratoires émis par le moteur pour détecter les anomalies associées à la détérioration des roulements.

Cette étude vise à investiguer l'efficacité des techniques MCSA-FFT et MVSA-FFT dans la détection de différents défauts des roulements dans les moteurs à induction. En intégrant ces approches complémentaires, la recherche vise à améliorer la précision et la fiabilité du diagnostic des défauts, facilitant ainsi les stratégies de maintenance proactive et réduisant les perturbations opérationnelles.

Grâce à une expérimentation et à une analyse approfondies, l'étude cherche à fournir des informations précieuses sur les performances comparatives et les synergies potentielles de la MCSA-FFT et de la MVSA-FFT pour la détection des défauts de roulement dans les moteurs à induction. Ces informations sont essentielles pour faire progresser les pratiques de maintenance prédictive et optimiser l'efficacité opérationnelle des systèmes industriels reposant sur la technologie des moteurs à induction.

Dans ce contexte, la thèse se compose de trois chapitres organisés comme suit :

* Le premier chapitre sera consacré à une revue de la littérature sur le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones.

* Le deuxième chapitre présentera quelques concepts sur les théories MCSA-FFT et MVSA-FFT et leur méthode de fonctionnement.

* Dans le troisième chapitre, nous analyserons et discuterons les résultats obtenus dans l'analyse des défauts des roulements de moteurs à induction en utilisant les techniques MCSA-FFT et MVSA-FFT. Nous analyserons le moteur asynchrone en bon état de fonctionnement et en état de fonctionnement avec des défauts.

Chapitre I:

Etat de l'art sur le diagnostic des
défauts de MAS

I.1. Introduction:

Les machines asynchrones, également connues sous le nom de moteurs à induction, sont omniprésentes dans de nombreux secteurs industriels, alimentant une gamme diversifiée d'applications telles que les systèmes de pompage, de ventilation, de transport et de production d'énergie. leur conception robuste et leur efficacité en font des composants essentiels dans les processus de fabrication et les infrastructures critiques.

Cependant, comme toute machine complexe, les moteurs asynchrones sont sujets à une variété de défauts, allant des problèmes électriques tels que les courts-circuits et les surcharges aux défaillances mécaniques telles que les désalignements d'arbre et les défauts de roulement. ces défauts peuvent avoir des conséquences graves, allant de temps d'arrêt imprévus et de pertes de production à des dommages matériels étendus et même à des risques pour la sécurité des opérateurs et des installations.

Dans ce cadre, il est essentiel de diagnostiquer les défauts sur les machines asynchrones. en détectant rapidement les signes de dégradation et en prévenant les pannes majeures, ce diagnostic permet de programmer des actions de maintenance préventive et curative. il contribue à optimiser les performances opérationnelles et à prolonger la durée de vie des équipements. ce processus repose sur l'utilisation combinée de techniques d'inspection, de surveillance et d'analyse, souvent intégrées à des systèmes de maintenance conditionnelle modernes. cela offre une approche proactive dans la gestion de la fiabilité des machines asynchrones.

I.2. Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor (figure I.1). contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seul les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction. La figure (I.1) représente la machine asynchrone. du point de vue mécanique, la machine asynchrone est subdivisée en trois parties distinctes :

Le stator : partie immobile est la partie où est connectée l'alimentation électrique.

Le rotor : partie tournante, elle permet de mettre en rotation la charge magnétique.

Les paliers : organes de support, ces derniers constituent la partie mécanique Permettant ainsi la mise en rotation de l'arbre moteur [15]

L'entrefer : cette partie est amagnétique (c'est le vide entre le rotor et le stator).

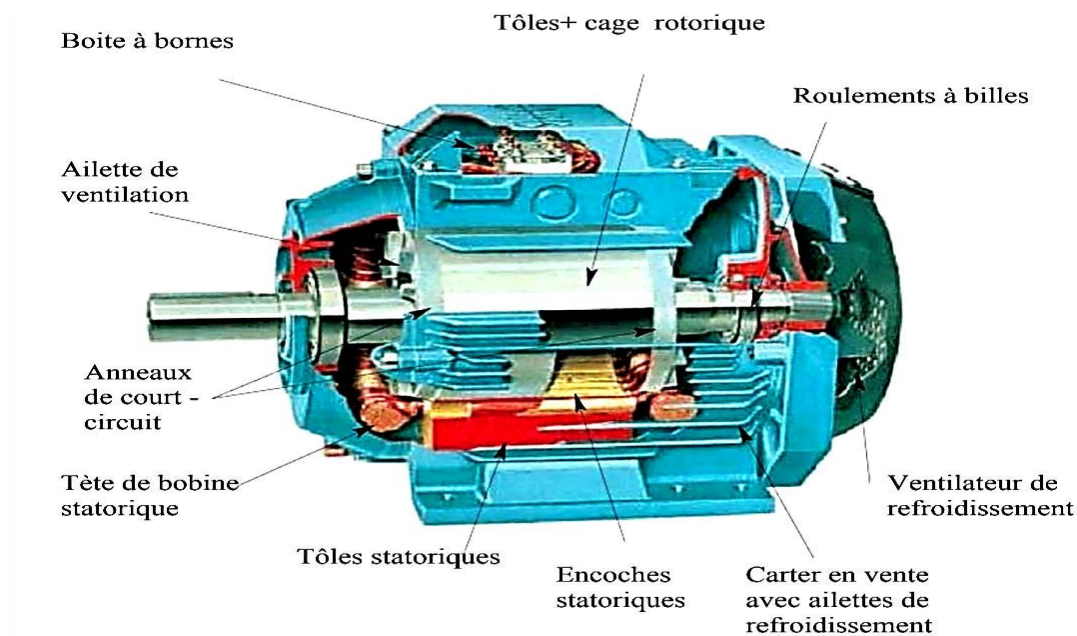
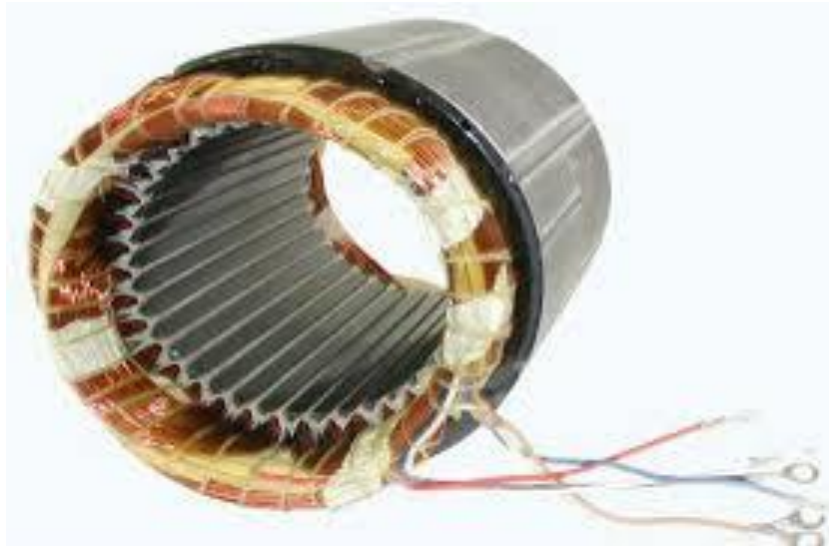


Figure (I.1) : Constitution de la machine asynchrone

Le stator :

C'est la partie fixe du moteur. une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0,5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. le « feuilletage » du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. les tôles sont munies d'encoches dans les quelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas moteur triphasé). chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation.[16]



Figure(I.2): schéma présente l'enroulement du stator.

Le rotor :

C'est l'élément mobile du moteur. il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Cet élément, de par sa technologie, permet de distinguer deux familles de moteurs asynchrone : ceux dont le rotor est dit « à cage », et ceux dont le rotor bobiné est dit « à bagues ». [16]



Figure (I.3): Vue d'un rotor à cage



Figure (I.4): Vue d'un rotor bobiné

L'entrefer:

Cette partie amagnétique (c'est un vide entre le stator et le rotor) est d'épaisseur la plus faible (de l'ordre du millimètre), cette épaisseur réduite rend la taille de l'entrefer sensible aux variations dues aux encoches statoriques. ceci crée des harmoniques dites d'encoches, pour les réduire, les encoches sont fermées par des cales magnétiques qui maintiennent le bobinage. [15]

Les organes mécaniques:

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. il comprend une partie 7 Chapitre I Etat de l'art sur le MAS centrale qui sert de support au corps du rotor il est supporté par un ou plusieurs paliers. ces derniers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. ils sont généralement à roulements [18]. pour les machines de petite et moyenne puissance. dans la plupart du temps on trouve aussi un ventilateur de refroidissement .

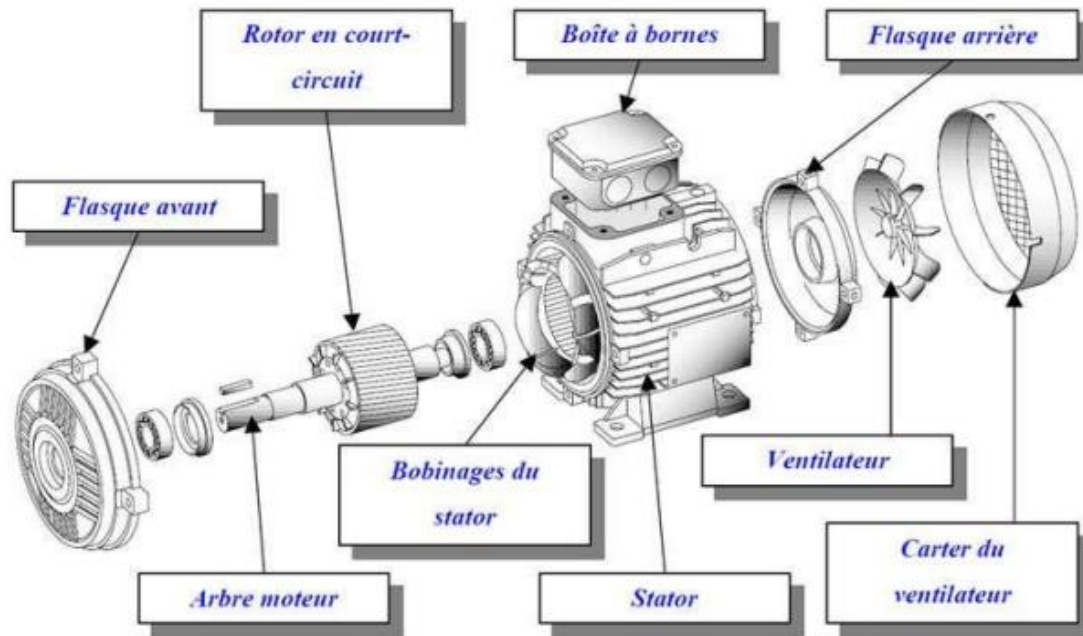
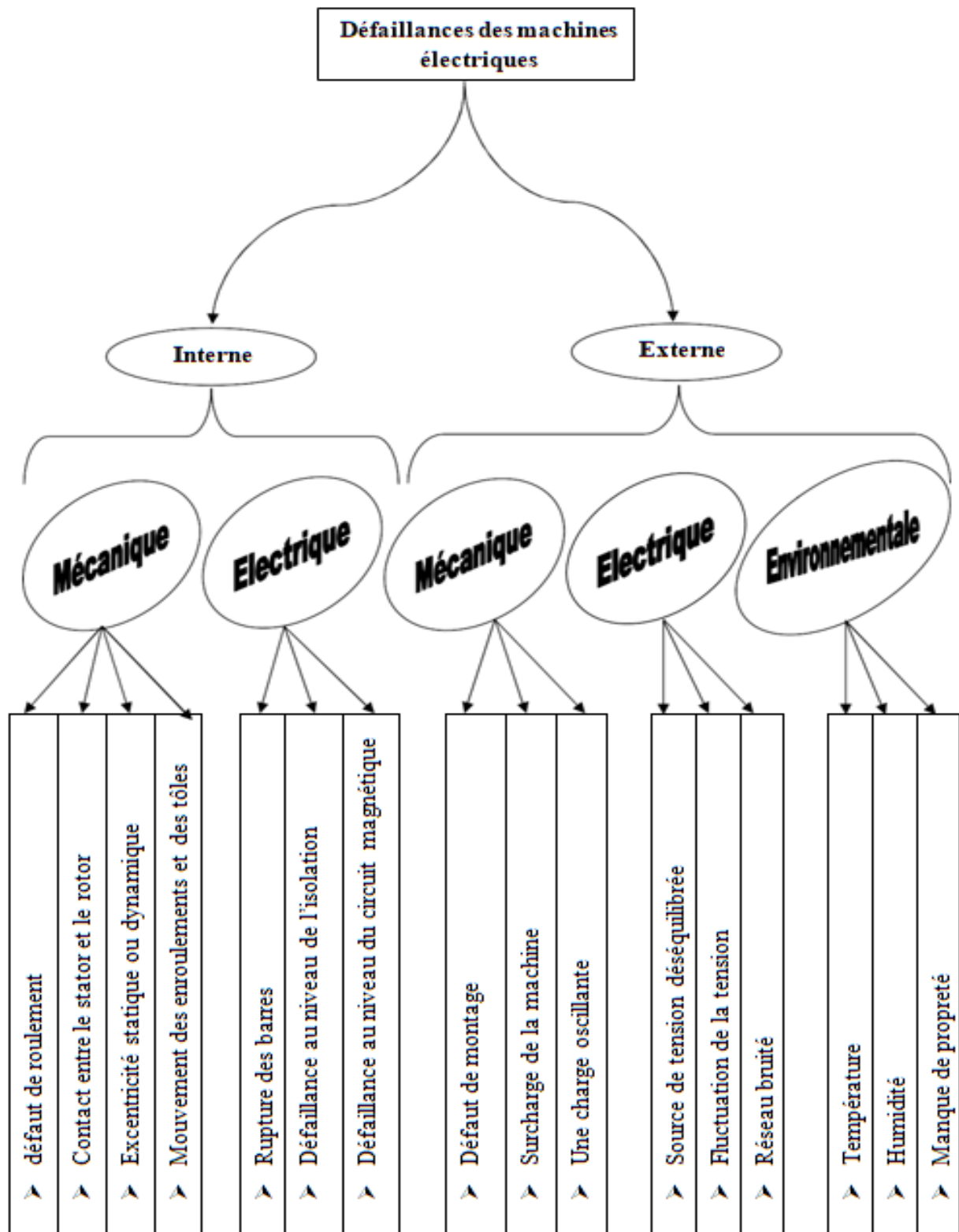


Figure (I.5) : Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone .

1.3. Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil [17] :

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes : les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survolage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc. les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques,—environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc. les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, composants—défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc. Les machines électriques et les system d'entraînement sont soumis à de nombreux types de d défauts. Ces derniers peuvent être classes selon leurs causes en deux grandes familles (Fig. I.6) les d défauts à causes internes et les défauts à causes externes. Les défauts externes sont provoqués par les tensions d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Les d défauts internes sont causes par les constituants de la machine (circuits magnétiques, bobinages du stator et du rotor, entrefer mécanique, cage rotorique, . . .). A titre d'exemple, nous pouvons citer d'une manière non exhaustive les défauts suivants :



Figure(I.6): Classification des défauts selon leurs origines

I.4. Les défaillances des machines asynchrones sont : Internes et externe a-Interne :**1.4.1. Défaillances au rotor [18]**

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

- thermique (surcharge,...)
- électromagnétique (force en $B^2(t)$),...
- résiduel (déformation,...)
- dynamique (arbre de transmission,...)
- mécanique (roulement,...)
- environnemental (agression,...)
- Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :
 - ❖ Rupture de barres
 - ❖ Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit
 - ❖ Excentricité statique et dynamique

I.4.1.1. Ruptures de barres :

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

I.4.1.2. Ruptures d'anneaux :

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. de ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

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

I.4.1.3. Excentricité statique et dynamique :

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor, (Fig. I.7)).

Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais

- tourne toujours autour de son axe l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne
- tourne plus autour de son axe l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas
- précédemment cités on peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante :



Excentricité statique



Excentricité dynamique

(Plusieurs positions du rotor au cours de la rotation)

Figure(I.7): Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique

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

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

I.4.2. Défaillances au stator [19]

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème :

- thermique (surcharge,...)
- électrique (diélectrique,...)
- mécanique (bobinage,...)
- environnemental (agression,...)
- Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :
 - ❖ défaut d'isolant
 - ❖ court-circuit entre spires

- ❖ court-circuit entre phases
- ❖ court-circuit phase/bâti
- ❖ déséquilibre d'alimentation
- ❖ défaut de circuit magnétique

I.4.2.1. Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. en effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. de ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction.

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

- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge, ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation, vibrations mécaniques.
- vieillissement naturel des isolants, tous les matériaux isolants ont une durée de
- vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader. fonctionnement dans un environnement sévère.

I.4.2.2. Court-circuit entre spires :

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

dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.

I.4.2.3. Court-circuit entre phases :

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. l'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. d'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. la détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.

I.4.2.4. Court-circuit phase/bâti :

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

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. de plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut.

I.4.2.5. Défauts de circuit magnétique :

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

I.4.3. Défaillances mécaniques :**I.4.3.1. Défauts de roulements :**

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

Comme il a été présenté précédemment, ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. ses causes possibles sont :

l'usure due au vieillissement

- la température de fonctionnement élevée
- la perte de lubrification
- l'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement) le défaut de montage
- les courants d'arbres (Shaft Current)
- Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :
 - des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures
 - l'ondulation de leur surface de roulement
 - l'attaque des billes→ la corrosion due à l'eau
 - défaut de graissage, problème dû à la température
 - décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge
- Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, ne apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du

roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur.

I.4.3.2. Autres défaillances mécaniques :

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc a priori pas de défaillances mécaniques. cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs.

I.5. Méthodes de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone:

I.5.1. Analyse des courants statorique :

L'analyse des signatures du courant statorique par la transformée de Fourier rapide (TFR) est considérée connue référence dans le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones [20].

Elle consiste à détecter les défauts par la détection de l'apparence de composantes fréquentielles révélatrices des défauts dans le spectre du courant statorique. cette méthode est très utilisée en raison de sa simplicité, peu coûteuse et facile à exécuter. elle permet de détecter aussi bien les défauts électriques que mécaniques[20].

I.5.2. Analyse vibratoire de la machine

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radial. Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts mécaniques fréquemment rencontrés [22] Plutôt.

Que de disposer d'une étude au cas par cas, on réalise une synthèse de l'ensemble des informations que peuvent fournir ces signaux en fonction des défauts, à partir de la référence, qui présente une comparaison entre les signatures des courants et les signatures vibratoires [23], [24]. L'inconvénient majeur de la surveillance basée sur les vibrations est le coût du capteur des vibrations. Cela limite l'utilisation de cette technique dans plusieurs applications notamment, dans les petites machines où le coût est un facteur important.

I.5.3. Analyse du vecteur de Park:

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des moteurs asynchrones triphasés. Une des plus connues et des plus appropriées repose sur le calcul des courants dits de Park. En fonction des courants statorique de phase $i_R(t)$, $i_S(t)$ et $i_T(t)$, les courants de Park $i_d(t)$ et $i_q(t)$ peuvent être calculés grâce aux deux relations suivantes [25]:

$$i_d(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_R(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_S(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_T(t) \quad \text{I.(1)}$$

$$i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{6}} i_R(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_T(t) \quad \text{I.(2)}$$

A partir du vecteur de Park $[i_d(t), i_q(t)]$, on trace le courant $i_q(t)$ en fonction de $i_d(t)$ c'est-à-dire $i_q(t) = f(i_d(t))$ de la machine avec un rotor sain et un rotor défaillant. l'effet de défaut se traduit par un épaississement du contour du cercle, ce qui permet d'établir un diagnostic de défaut en effectuant une surveillance des déviations de ce cercle par rapport au modèle de base.

I.5.3. Analyse du couple électromagnétique:

Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmoniques dans le spectre du couple électromagnétique, résultant d'une interaction entre le flux et le courant. l'analyse spectrale de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur. cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient major de cette méthode [29].

I.5.4. Analyse de la signature du courant moteur (MCSA):

Est une technique de diagnostic utilisée pour évaluer la santé des moteurs électriques en analysant la forme d'onde du courant pendant le fonctionnement. il s'agit de surveiller et d'analyser la signature électrique d'un moteur pour détecter des anomalies telles que des défauts mécaniques, un

déséquilibre, des désalignements ou d'autres problèmes. MCSA est une méthode non intrusive et efficace pour la détection précoce des problèmes de moteur, permettant une maintenance proactive et minimisant les temps d'arrêt.

I.5.5. Analyse des signatures vibratoires du moteur (MVSA):

Est une technique utilisée pour analyser et interpréter les modèles de vibrations produits par un moteur. il s'agit d'étudier la « signature » vibratoire unique d'un moteur lors de son fonctionnement. MVSA-FFT peut fournir des informations précieuses sur la santé, l'état et les problèmes potentiels du moteur, facilitant ainsi la maintenance préventive et la détection des pannes.

I.6. Conclusion:

Les diagnostics des défauts de machine asynchrone reposent généralement sur une analyse approfondie des signaux électriques, mécaniques et thermiques, incluant les courants, tensions, vibrations, températures et autres paramètres de fonctionnement. à partir des anomalies détectées telles que déséquilibres de courant, variations de fréquence de rotation, vibrations anormales ou surchauffes localisées, on peut déduire la présence, la nature et la gravité des défauts potentiels comme courts-circuits, défauts de roulements ou déséquilibres rotoriques. ces conclusions orientent ensuite les actions de maintenance corrective visant à garantir le bon fonctionnement de la machine asynchrone.

Chapitre II:

Théorie sur les techniques MCSA et MVSA

II.1. Introduction:

Aujourd'hui, l'utilisation des technologies avancées d'intégration des méthodes de traitement du signal occupe une place importante pour un faire le diagnostic des défauts dans les machines électriques tournantes est largement diffusées.

Ce chapitre présente des méthodes de diagnostic d'analyse les plus utilisées qui se basent sur l'analyse du courant et l'analyse du signal de vibration.

II.2. Méthode de MCSA:

MCSA est une méthode de diagnostic utilisée dans le domaine de la maintenance prédictive des moteurs électriques. En surveillant et en analysant les signatures électriques du courant d'un moteur pendant son fonctionnement, la MCSA peut détecter précocement des anomalies telles que l'usure mécanique, les déséquilibres électriques ou la dégradation de l'isolation, etc. cette approche non intrusive fournit des informations cruciales sur l'état de santé et les performances des moteurs, permettant ainsi une maintenance proactive pour éviter les temps d'arrêt inattendus et les coûts de réparation élevés. dans cette partie, nous explorerons les principes fondamentaux de la MCSA, ses applications dans divers secteurs industriels, ainsi que les avantages qu'elle offre pour garantir la fiabilité et l'efficacité des systèmes motorisés.

II.2.1. Analyse de la signature du courant moteur [12]:

C'est au début des années 1970 que le concept de MCSA a été originaire. Initialement, le MCSA a été proposé comme un outil pouvant être utilisé pour surveiller les moteurs dans des environnements difficiles et des zones dangereuses à l'intérieur des centrales nucléaires. L'analyse de la signature du courant moteur peut être décrite comme une technique qui aide à déterminer l'état de fonctionnement du moteur à induction sans perturber la production. en d'autres termes, elle détecte un signal électrique qui a des composantes de courant et identifie les défauts à un stade précoce. par conséquent, elle joue un rôle crucial dans la prévention des dommages et le diagnostic des défaillances du moteur. l'analyse de la signature du courant moteur aide à détecter les éléments suivants

Déséquilibre/mal alignement:

- Roulements défectueux.

- Dommages aux barres de rotor.
- Problèmes de charge.
- Excentricité dynamique.
- Excentricité statique.

Prenons un exemple du signal de courant que vous acquérez depuis l'alimentation du moteur sans perturber le fonctionnement de la machine. dans l'analyse de la signature du courant moteur, le spectre de fréquence (également appelé signature de courant) est acquis en traitant le signal de courant. en cas de défaut, le spectre de fréquence devient différent de celui d'un moteur sain. La détection de défauts et la surveillance de l'état du moteur à induction sont obtenues grâce à des techniques de traitement du signal car elles sont rentables et leur mise en œuvre est assez simple. de plus, la mise en œuvre de l'analyse de la signature du courant moteur permet d'obtenir une analyse précise des défauts. pour identifier les schémas exclusifs de signature de courant et fournir une plage dynamique plus large de différents défauts, on utilise le spectre de décibels (dB) par rapport à la fréquence. cela aide à identifier des défauts tels que des défauts de stator, des erreurs de rotor, des défauts de roulement et une excentricité, ou il pourrait y avoir une combinaison de ces défauts[12].

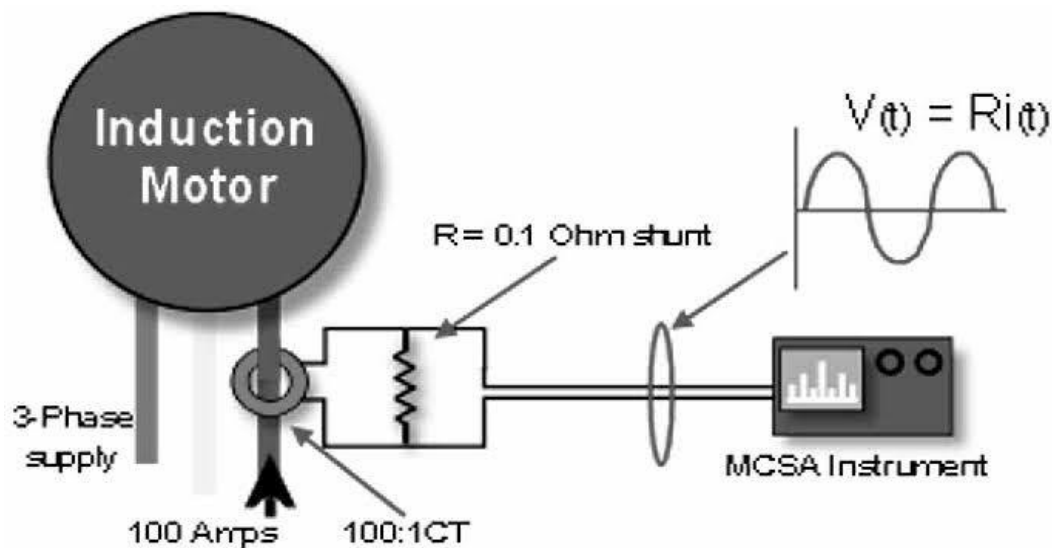


Figure (II.1) Système de Base d'Instrumentation MCSA.[13]

II.2.2.Principaux avantages de l'utilisation de la MCSA :**1. Détection précoce :**

Les services MCSA permettent la détection précoce de problèmes avec les moteurs électriques, ce qui peut éviter l'apparition de problèmes plus graves et potentiellement économiser des réparations ou remplacements coûteux.

2. Amélioration des performances :

Les services MCSA peuvent aider à identifier les problèmes qui peuvent causer un fonctionnement inefficace du moteur et permettre une augmentation des performances.

3. Décisions de maintenance et de réparation mieux informées :

Les entreprises peuvent prendre des décisions éclairées sur leurs besoins en maintenance et réparation en comprenant mieux les performances d'un moteur électrique.

Réduction des coûts

4. Rentabilité :

Les services MCSA sont rentables, car ils peuvent détecter les problèmes dès leur apparition et permettre une résolution rapide. cette rentabilité peut réduire le montant d'argent dépensé en réparations et remplacements, ce qui permet d'économiser de l'argent à long terme pour les entreprises.

5. Augmentation de l'efficacité :

Les entreprises peuvent s'assurer que leur équipement fonctionne aussi efficacement que possible en comprenant mieux la santé d'un moteur électrique. cette efficacité accrue peut réduire la consommation d'énergie et augmenter la productivité.

6. Réduction du temps d'arrêt :

En identifiant les problèmes dès leur apparition, les entreprises peuvent réduire le temps d'arrêt de leur équipement. ce temps d'arrêt réduit peut augmenter la productivité et réduire les coûts.

7. Réduction des coûts de maintenance :

Les services MCSA réguliers peuvent aider à réduire les dépenses de maintenance et de réparation en identifiant et en résolvant les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent des problèmes majeurs.[14]

II.3. Aperçu sur MVSA :

II.3.1. Définition de vibration:

L'analyse vibratoire des machines tournantes est aujourd'hui très utilisée par les industriels, pour diagnostiquer des défauts. L'identification du problème permet de mettre en place des actions curatives comme un réglage ou le remplacement d'une pièce défectueuse avant la panne de la machine. l'analyse des signatures de vibration du moteur électrique (ASVM) ou sous l'abréviation Anglaise MVSA (Motor Vibration Signature Analysis) est l'un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement [1].

- **Origine des vibrations:**

D'après la définition de la vibration, seules les forces excitatrices appliquées à une structure sont à l'origine de ses vibrations. le transfert entre ces forces et les vibrations qu'elles engendrent est la réponse mécanique de la structure, illustrée par la Figure (II.1) [2] :

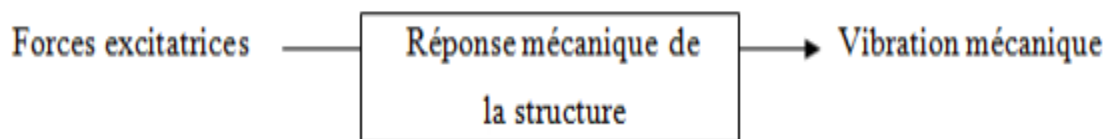


Figure (II.2) Réponse mécanique de la structure du stator.

Les Vibration proviennent:

- Des jeux de fonctionnement.
- Du processus.
- Des mauvais réglages.

- Des phénomènes d'usure.

II.3.2. Capteurs de vibration et grandeurs mesurées :

Un capteur de vibration est un transducteur capable de convertir en signal électrique le niveau de vibrations qu'il a subi à un instant donné. la plupart des capteurs dans le domaine industriel (pratique) appartiennent à la famille de MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), qui servent essentiellement à la capture des signaux. les 3 grandeurs que l'on est amené à mesurer en technique vibratoire sont le déplacement, la vitesse et l'accélération. on distingue trois principes plus particulièrement utilisés :

- Déplacement : principe des courants de Foucault

- Vitesse : principe électrodynamique

• Accélération : principe piézo-électrique ils ont tous les trois le même but : transformer une vibration mécanique en un signal électrique. les capteurs utilisant ces principes peuvent être actifs ou passifs. Les capteurs actifs ne nécessitent pas d'alimentation, alors que les capteurs passifs ne fonctionneraient pas sans source d'énergie auxiliaire.

II.3.2.1. Capteur de déplacement :

Aujourd'hui, le proximètre le plus utilisé pour la surveillance de machines est le capteur inductif à courants de Foucault. Ce capteur, représenté en figure (II.2), est relié à un émetteur démodulateur-conditionneur. [4] ;[5].

• Plage de fréquence :

Le principe de mesure à courants de Foucault présente généralement une plage de réponse en fréquence allant de 0 à 1000 Hz. La fréquence de 0 Hz correspond à une mesure statique : par exemple, la position axiale d'un arbre par rapport aux butées. la limite supérieure de 1000 Hz autorise, entre autres, la mesure dynamique des harmoniques d'ordre élevé de la fréquence de rotation:

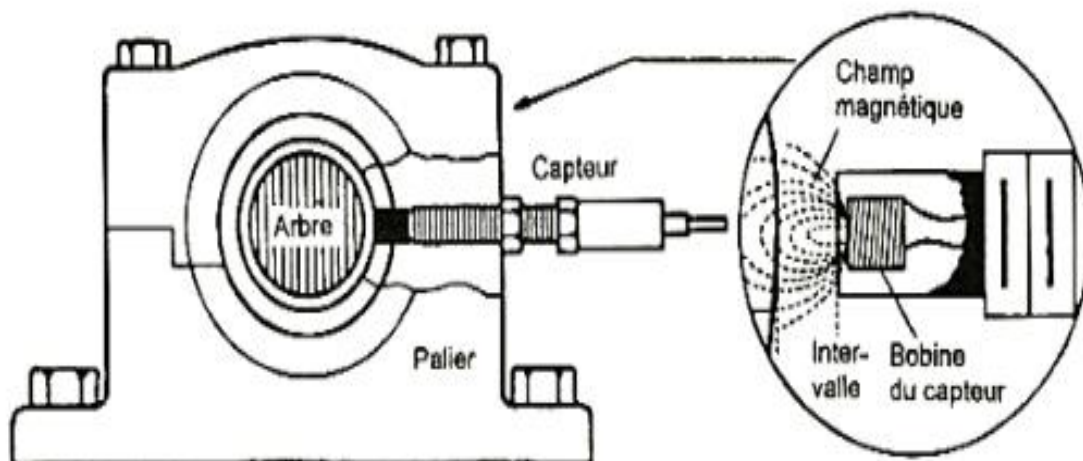


Figure (II.3) Principe du capteur inductif à courants de Foucault

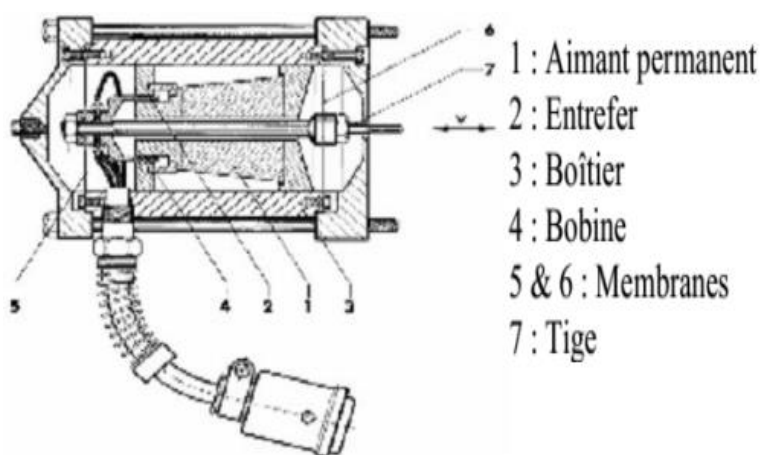


Figure (II.4). Principe d'un vélocimètre

II.3.2.2. Capteur de vitesse:

C'est un capteur vibratoire de faible impédance électrique, très limité dans sa gamme fréquentielle. il est sensible au champ magnétique, la fréquence de résonance de ce type de capteurs se situe généralement entre 8 et 15 [Hz] et la gamme dynamique s'étend de 10-20 [Hz] à 2000 [Hz] environ [6], [7].

II.3.2.3. Capteur d'accélération :

C'est un capteur vibratoire qui est capable de mesurer les accélérations quasi statiques. La gamme fréquentielle est très large, il possède une excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique. Etant lui-même, générateur, il est donc indépendant de toute alimentation externe. le signal d'accélération peut être intégré électriquement pour donner le déplacement et la vitesse, c'est le meilleur capteur disponible pour la mesure de vibrations [6].

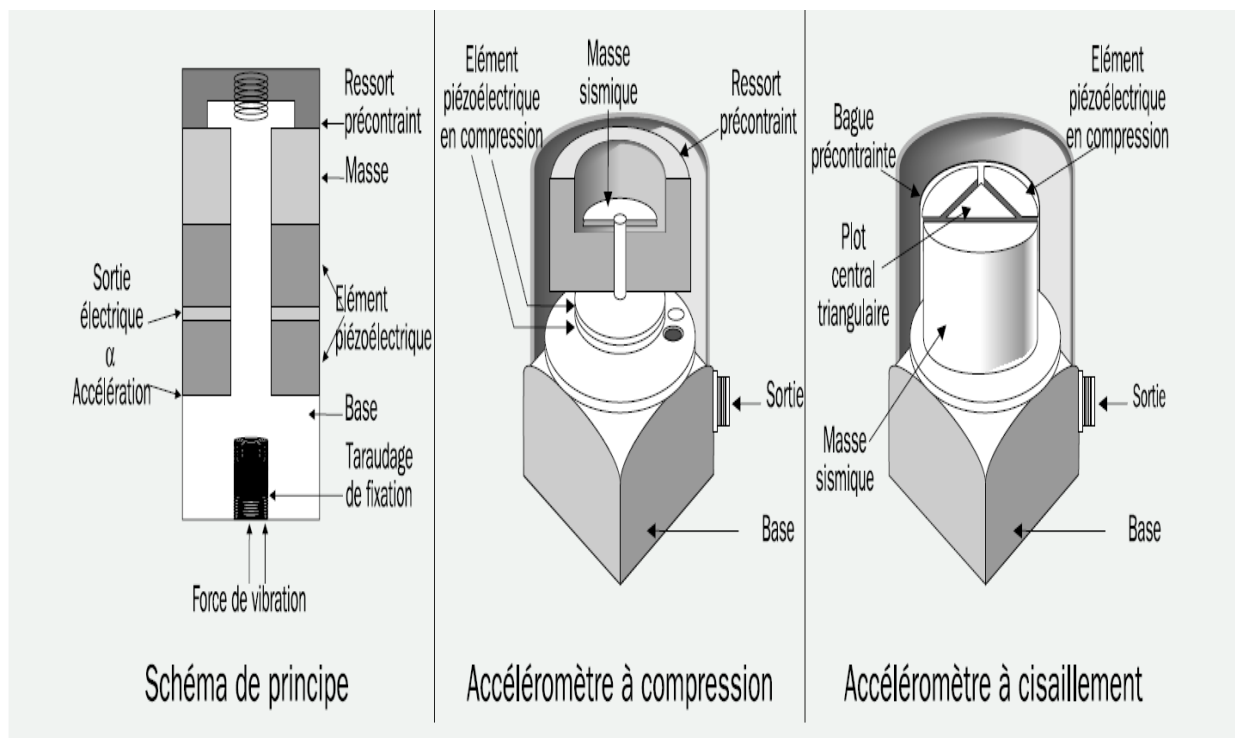


Figure (II.5) Principe de fonctionnement d'un accéléromètre.

II.3.2.4. Méthode de l'analyse vibratoire:

Toutes machines possédant des composantes en mouvement génèrent un certain niveau de vibration quel que soit le soin apporté à leur fabrication. le niveau de ces vibrations est le paramètre le plus significatif de l'état d'une machine tournante. quand ce niveau change, la première manifestation physique d'une anomalie apparaîtra, causent une potentielle de dégradation et de panne. Aujourd'hui, l'emploi des technologies intégrant les méthodes avancées de traitement de signal occupe une place privilégiée pour faire un diagnostic d'un équipement mécanique. ces caractéristiques font de la

surveillance par analyse vibratoire, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet d'améliorer la disponibilité et la sécurité par détection précoce et le suivi de la dégradation des éléments critiques, ainsi localiser l'organe défectueux sans démontage de la machine [8].

II.3.2.5. Méthode de niveau global:

Cette stratégie de surveillance consiste à mesurer, à l'aide de capteurs, le niveau global d'un ou de plusieurs indicateurs (déplacement, vitesse ou accélération), à suivre son évolution dans le temps et à le comparer à des normes ou des mesures précédentes. Certes, toute évolution est due à une dégradation de la machine. Cela permet de mettre en évidence l'existence d'une anomalie à un stade précoce et de faire une première idée des types de défauts qui affectent la machine, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis [7]

II.3.2.6. Analyse temporelle L'analyse temporelle:

peut se faire en utilisant des descripteurs obtenus à partir d'une valeur scalaire calculée directement sur la totalité d'un signal par les méthodes statistiques. Elle peut se faire également par des méthodes plus spécifiques telles que la démodulation d'amplitude et la démodulation de phase. Ces méthodes peuvent être utilisées dans la phase de prétraitement ou dans la phase de décision [9].

II.3.2.7. Analyse en fréquence:

L'analyse en fréquence est devenue l'outil fondamental pour le traitement des signaux vibratoires. Elle s'appuie sur la transformée de Fourier qui permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître le contenu spectral d'énergie ou de puissance, présent dans le signal à la fréquence f , et donc de détecter la présence d'un défaut générant un choc périodique à une fréquence de défaut. La comparaison de cette fréquence avec celle des défauts théoriques potentiels (fréquences caractéristiques) sur le roulement permet sa localisation. Dans la pratique, on utilise la transformée de Fourier discrète rapide sur des signaux numérisés [10].

II.3.2.8. Analyse spectrale:

L'analyse spectrale consiste à relever le signal vibratoire mesuré sur la machine et de procéder à une analyse systématique pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts

susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela permet d'accéder au diagnostic, c'est à dire, d'identifier avec précision la nature de l'anomalie et si possible en préciser la gravité [7].

II.4. Analyse de fréquences des défauts de roulements [11] :

On trouve pour les formules des fréquences caractéristiques des défauts de roulement des formules théoriques et autres approximatives, ces formules sont expliquées en détail dans cette partie [19].

II.4.1. Equation théorique (analytique) :

- Défaut de la bague extérieure :

$$f_{be} = \frac{frNb}{2} \left(1 - \frac{Db}{Dm} \cos(\alpha)\right) \quad (\text{II-1})$$

- Défaut de la bague intérieure :

$$f_{bi} = \frac{frNb}{2} \left(1 + \frac{Db}{Dm} \cos(\alpha)\right) \quad (\text{II-2})$$

- Défaut de la cage :

$$f_c = \frac{frNb}{2} \left(1 - \frac{Db}{Dm} \cos(\alpha)\right) \quad (\text{II-3})$$

- Défaut de la bille :

$$f_{bille} = \frac{fr}{2} \frac{D_{\text{b}}}{Db} \left(1 - \left(\frac{Db}{D_{\text{b}}} \cos(\alpha)\right)^2\right) \quad (\text{II-4})$$

- f_e : la fréquence caractéristique de la bague extérieure
- f_{bi} : la fréquence caractéristique de la bague interne
- fr : la fréquence de rotation de la cage
- f_{bille} : la fréquence caractéristique de rotation des billes
- Nb : le nombre de billes
- Db : le diamètre de la bille

- D_m : le diamètre du centre des billes (diamètre moyen = $D_m = \left(\frac{D_{bag-ext} + D_{bag-int}}{2} \right)$)
- α : l'angle de contact (le roulement oblique possède les valeurs de $\alpha=150$, 250 ou 400 et pour un roulement à gorge profonde, il présente une charge purement radiale $\alpha=00$).

Les autres relations entre ces fréquences sont les suivantes :

$$f_{be} + f_{bi} = N_b \cdot f_r \text{ et } f_{be} = N_b \cdot f_c \quad (\text{II-5})$$

II.4.2. Modulation de la fréquence du signal :

- **Défaut sur la bague intérieure :**

$$f_{bi-Mod} = \frac{f_r N_b}{2} \left(1 + \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \pm f_{\square} \quad (\text{II-6})$$

- **Défaut sur la bille :**

$$f_{bille} = \frac{f_r}{2} \frac{D_{\square}}{D_b} \left(1 - \left(\frac{D_b}{D_{\square}} \cos(\alpha) \right)^2 \right) \pm f_{\square} \quad (\text{II-7})$$

II.4.3. Règles empiriques :

- **Bague extérieure :**

$$f_{be} = 0,4 \cdot N_b \cdot f_r \quad (\text{II-8})$$

- **Bague intérieure :**

$$f_{bi} = 0,6 \cdot N_b \cdot f_r \quad (\text{II-9})$$

- **Cage :**

$$f_c = 0,4 \cdot f_r \quad (\text{II-10})$$

II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté deux techniques de surveillance et de diagnostic de la MAS, qui permettent de mettre en évidence un grand nombre des défauts causeront les pannes dans les MAS par l'identification de leurs fréquence. La technique de la MCSA-FFT est basée sur l'analyse spectrale du courant statorique. La technique d'analyse des signatures vibratoires du moteur (MVSA) est consisté à détecter l'apparition d'un défaut de la machine en prélevant l'image vibratoire à l'aide d'un capteur de vibration. Le but de ces techniques est d'éviter les arrêts de production non programmé, augmenter la durée de vie des équipements et assurer un contrôle de qualité permettent de mettre une procédure de maintenance efficace.

Chapitre III :

Analyse des défauts de roulements
par la méthode de la " MCSA" et
"MVSA"

III.1. Introduction:

Les entraînements de moteurs à induction sont essentiels pour alimenter divers systèmes électriques, représentant souvent un pourcentage important de la capacité totale d'exploitation d'électricité dans l'industrie. Ils jouent un rôle crucial dans les industries, les transports et de nombreux autres secteurs. Cependant, il est crucial de garantir leur fiabilité et d'identifier rapidement les défauts.

Une technique notable pour la détection de défauts dans ces machines à induction est l'Analyse de Signature de Courant du Moteur (MCSA). La MCSA consiste à analyser les composantes spectrales du courant statorique, en se concentrant sur l'identification des irrégularités pouvant indiquer des défauts, tels que le défaut du roulement. En évaluant l'amplitude relative de l'harmonique de courant, la MCSA fournit des informations précieuses sur l'état du moteur, permettant une surveillance efficace pour éviter l'arrêt brusque de la MAS.

L'Analyse Signature de Vibration du moteurs (MVSA) est aussi un outil puissant pour la surveillance de l'état des MAS, conduisant finalement à une sécurité accrue, une réduction des temps d'arrêt et des économies de coûts.

ce chapitre va analyser les défauts dans le roulement (bague interne et externe) en se basant sur la MCSA-FFT et la MVSA-FFT. Ces analyses ont l'objectif de comparer entre ces techniques afin d'avoir la meilleur technique.

III.2. Analyse du défaut de roulement:

Il est important de noter que cette partie à exploiter des données expérimentales attentivement afin d'avoir une décision sur l'état de la MAS.

III.3 Analyse du défaut dans la bague extérieure du roulement:

De nombreux types de défauts mécaniques entraînent des oscillations du couple de charge appliqué à la machine asynchrone [26]. Par conséquent, nous étudierons les effets des variations périodiques du couple de charge sur le courant statorique de la machine en présence d'un défaut de la bague extérieure du roulement. La figure (III-11) illustre une photographie d'un roulement défectueux au niveau de la bague externe. Ce roulement sera remonté dans la MAS coté charge. Il appartient à la série de 6206.



Figure (III.1) Photos d'un roulement défectueux dans la BE.

III.1.Tableau: Synthèse des signatures des défauts.

Type de défaut	Signaux et signatures	
	Courants statorique	Vibrations
Bague extérieure	$f_{c-be} = f_s \pm k \cdot f_{be}$	$f_{be-vib} = k \cdot f_{be} = 0.4N_b \cdot f_r$
Bague intérieure	$f_{c-bi} = f_s \pm k \cdot f_{bi}$	$f_{bi-vib} = k \cdot f_{bi} = 0.6N_b \cdot f_r$ ou $f_{be-vib} = f_{bi} \pm k \cdot f_r$
Cage	$f_{c-cage} = f_s \pm k \cdot f_{cage}$	$f_{cage-vib} = k \cdot f_{cage} = 0.4k \cdot f_r$
Bille	$f_{c-bille} = f_s \pm k \cdot f_{bille}$	$f_{bille-vib} = k \cdot f_{bille} = 2.32 \cdot k \cdot f_r$

Le spectre du courant statorique de la machine asynchrone, comme nous l'avons constaté, est très riche en harmoniques aussi bien en l'absence qu'en présence d'un défaut. En effet, les fréquences présentes dans ce spectre correspondent principalement aux raies spectrales associées à la fréquence de défaut du roulement.

$$f_{caract-be,bi,cage,bille} = |v \cdot f_s \pm k \cdot f_{be,bi,cage,bille}| \quad (III.1)$$

Nous allons examiner le spectre du courant statorique en régime permanent dans les deux états, sain et défectueux, d'un défaut dans la bague extérieure.

La figure (III.2) et la figure (III.3) représentent respectivement le contenu spectral du courant statorique de la MAS pour les deux modes de fonctionnement : à vide ($g=0.004\approx 0$) et en charge ($g=0.4$).

On observe clairement la présence d'harmoniques dues au défaut de la bague extérieure. Si nous nous concentrons sur le spectre du courant statorique dans l'état sain ou défectueux.

D'après la figure ci-dessous, le spectre des bandes fréquentielles de 0 à 100 Hz montrent clairement des fréquences additionnelles comme: 40Hz, 59.7Hz qui en correspondance avec la formule (III.2).

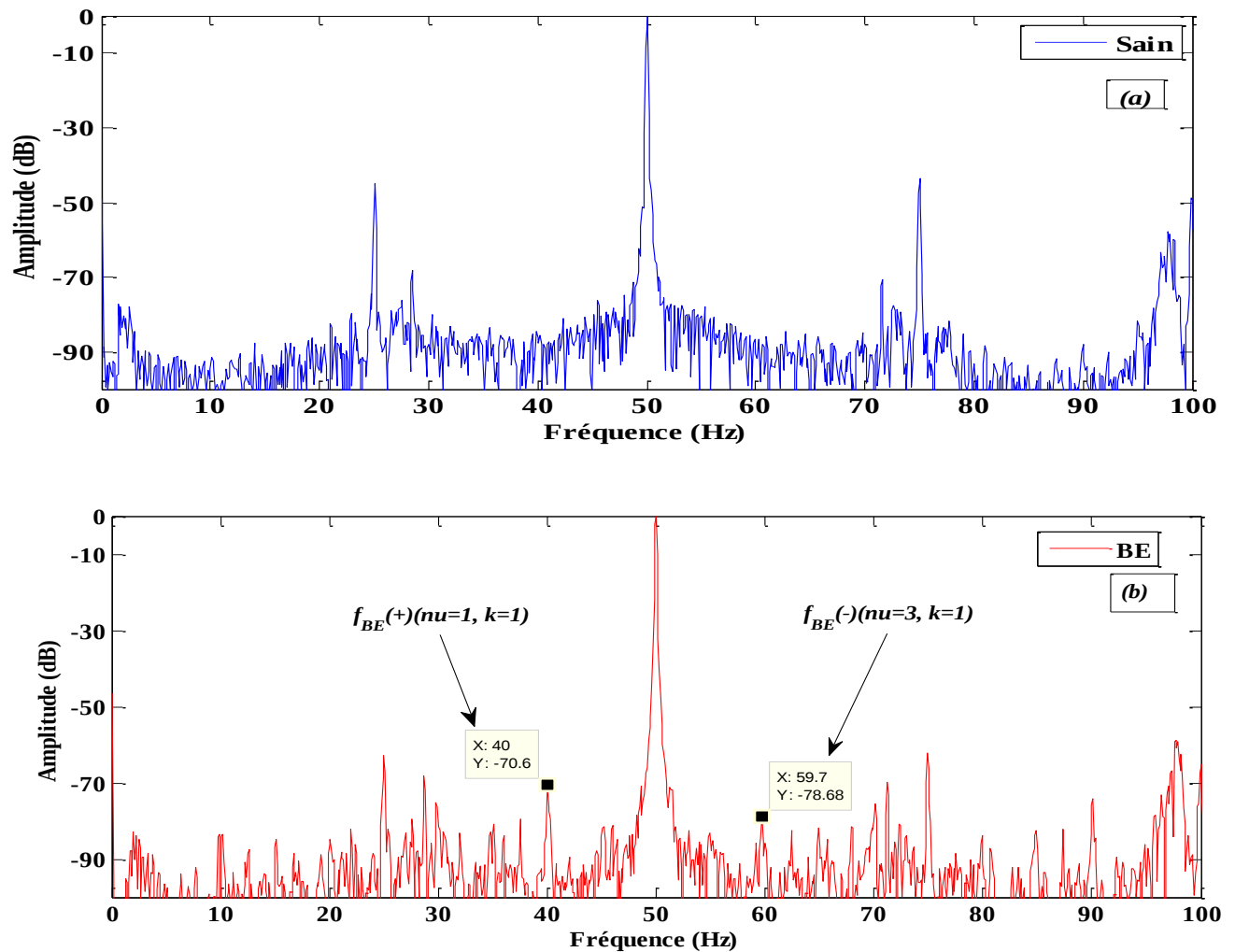


Figure (III.2): Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles

(défaut de la BE, $g\approx 0$) (a) : 0-100Hz, (b) : 0-100Hz) : Autour des PSHs

La figure suivante montre le spectre des bandes fréquentielles de 100 à 200 Hz montrant clairement des fréquences additionnelles comme: 130Hz, 199.9Hz qui en correspondance avec la formule (III.1).

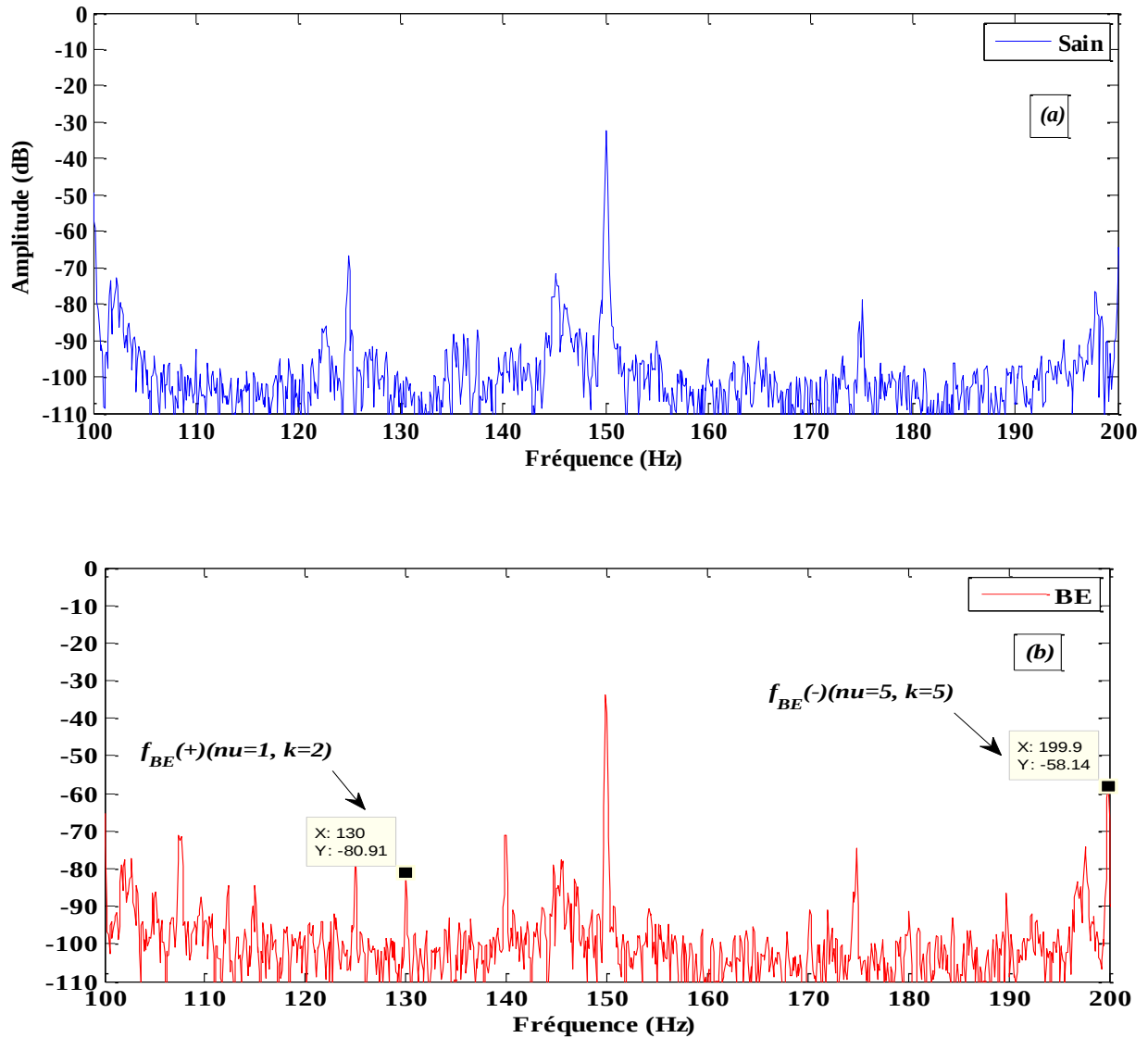


Figure (III.3): Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles

(défaut de la BE, $g \approx 0$) (a) : 100-200Hz, (b) : 100-200Hz) : Autour des PSHs

La figure (III.4), représente le spectre des bandes fréquentielles de 200 à 300 Hz montrant clairement des fréquences additionnelles comme: 229.9Hz, 299.8Hz.

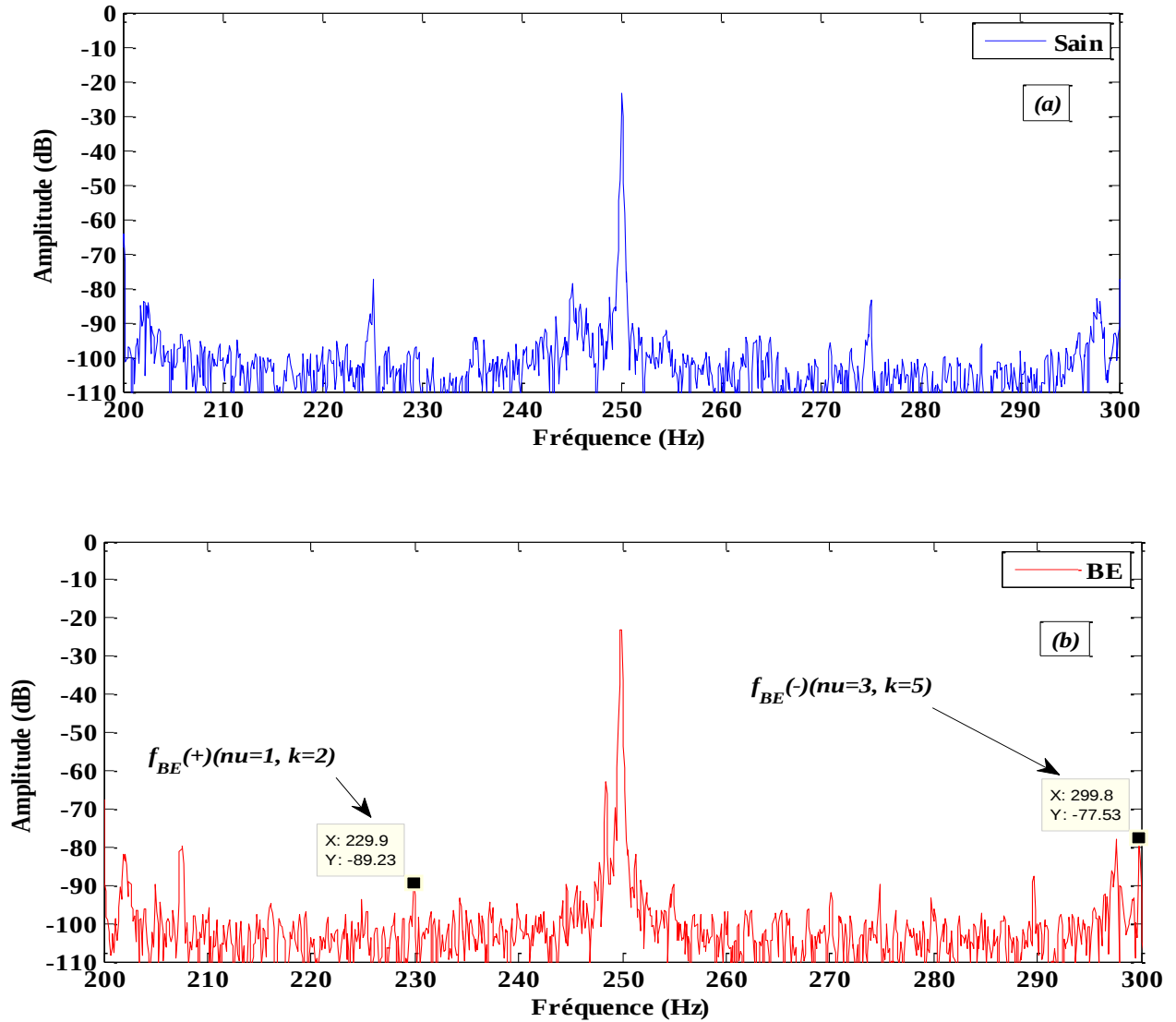


Figure (III.4): Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles

(défaut de la BE, $g \approx 0$) (a) : 200-300Hz, (b) : 200-300Hz) : Autour des PSHs

Le spectre de la figure (III.5) dans les bandes fréquentielles de 300 à 400 Hz montre clairement deux fréquences additionnelles 319.9 Hz et 349.8 Hz

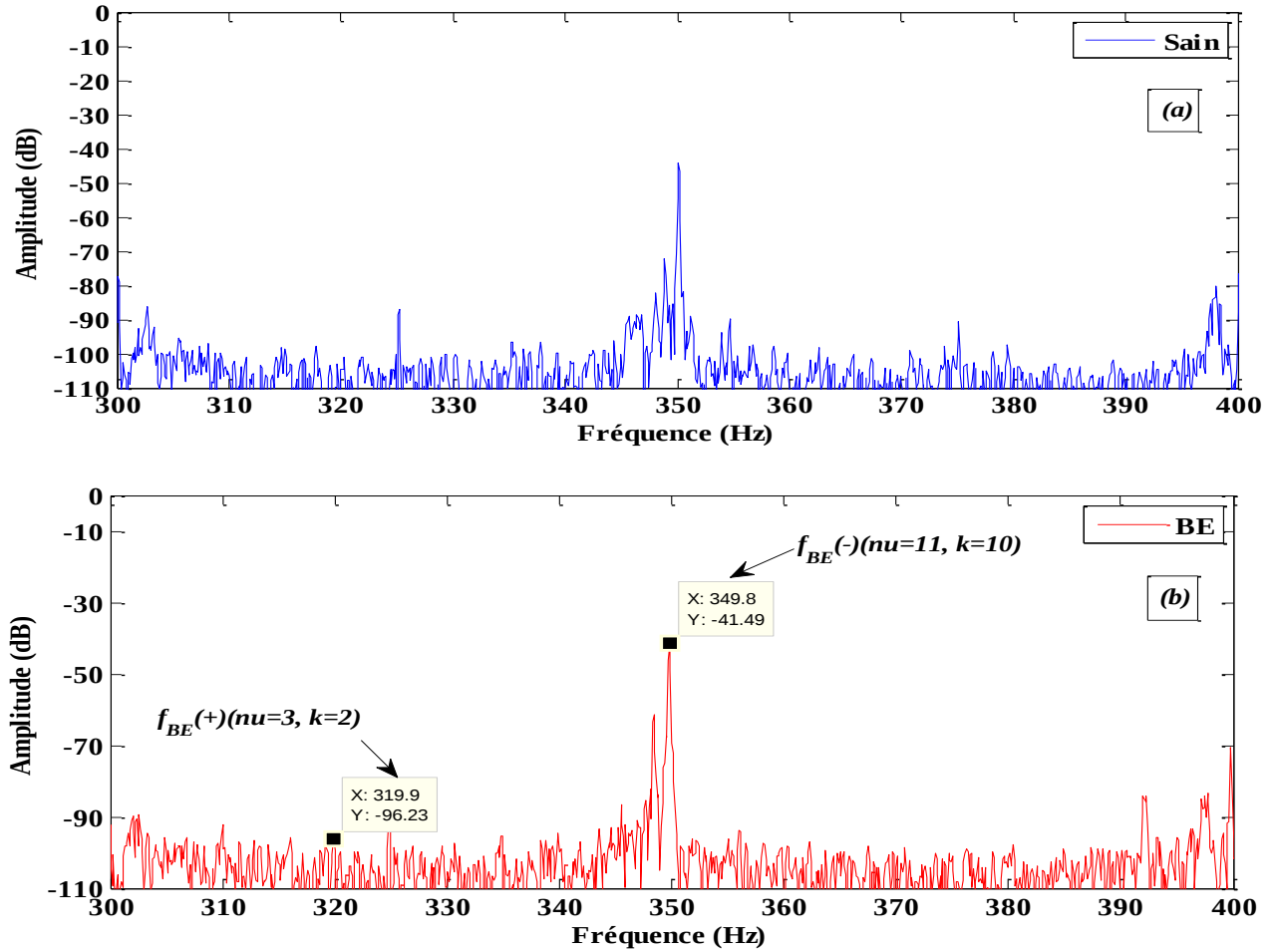


Figure (III.5): Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles

(défaut de la BE, $g \approx 0$) (a) : 300-400Hz, (b) : 300-400Hz) : Autour des PSHs

Les valeurs peuvent être écrites comme suit, où leurs fréquences correspondent à la formule des fréquences caractéristiques :

$$f_{\text{caract-be-1}} = f_s - 0.4N_b f_r = 40 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{caract-be-2}} = f_s + 0.4N_b f_r = 230 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{caract-be-2}} = f_s - 0.4N_b f_r = 230 \text{ Hz}$$

La continuité d'existence de la série harmonique caractérisant le défaut de la bague extérieure (BE) a été observée aux ordres supérieurs des harmoniques le long des bandes fréquentielles. Cette

continuité est confirmée par la cohérence des résultats expérimentaux obtenus avec les formules théoriques des fréquences caractéristiques des défauts de la BE. Cela permet d'affirmer l'efficacité de la méthode de diagnostic des défaillances dans la BE du roulement. Le tableau ci-dessous présente quelques valeurs comparatives entre les résultats théoriques et expérimentaux pour un fonctionnement à vide ($g \approx 0$).

Tableau (III.2): Comparaison entre les fréquences caractéristiques (théoriques et expérimentales BE, $g=0$):

Formule	Valeurs théoriques [Hz]	Valeurs pratiques [Hz]	Amplitude [dB]
$f_{BE} = 6f_s \pm 0.4KN_b f_r $			
$f_{BE}(-)(v=1, k=1)$	40	40	-70.60
$f_{BE}(+)(nu=1, k=2)$	230	229.9	-89.23
$f_{BE}(-)(nu=1, k=2)$	130	130	-80.91
$f_{BE}(-)(nu=3, k=5)$	300	299.8	-77.53
$f_{BE}(-)(nu=3, k=1)$	60	59.7	-78.68
$f_{BE}(+)(nu=1, k=3)$	320	319.9	-96.23
$f_{BE}(-)(nu=5, k=5)$	200	199.9	-58.14
$f_{BE}(-)(nu=11, k=10)$	350	349.8	-41.49

Cette comparaison montre que les fréquences expérimentales sont en accord avec les prévisions théoriques, validant ainsi la méthode de diagnostic basée sur l'analyse fréquentielle des harmoniques pour la détection des défauts dans la bague extérieure du roulement.

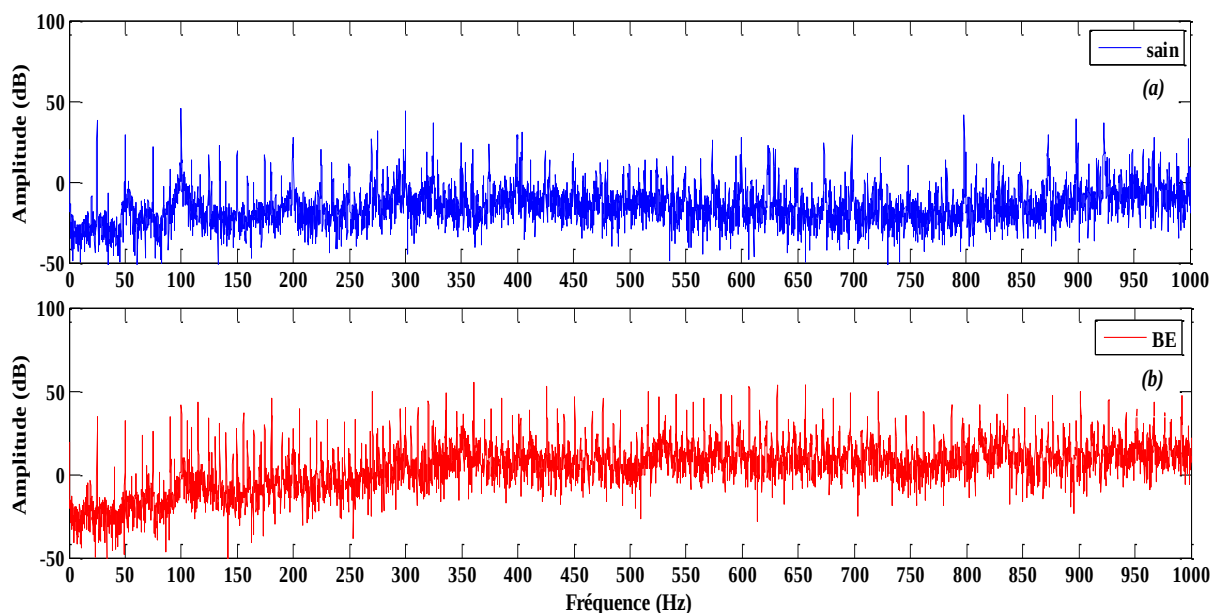


Figure III.6. Spectre du courant statorique pour la bande de 0-1000Hz ($g \approx 0.04$) ; (a) : Etat sain, (b) : Etat défectueux (BE).

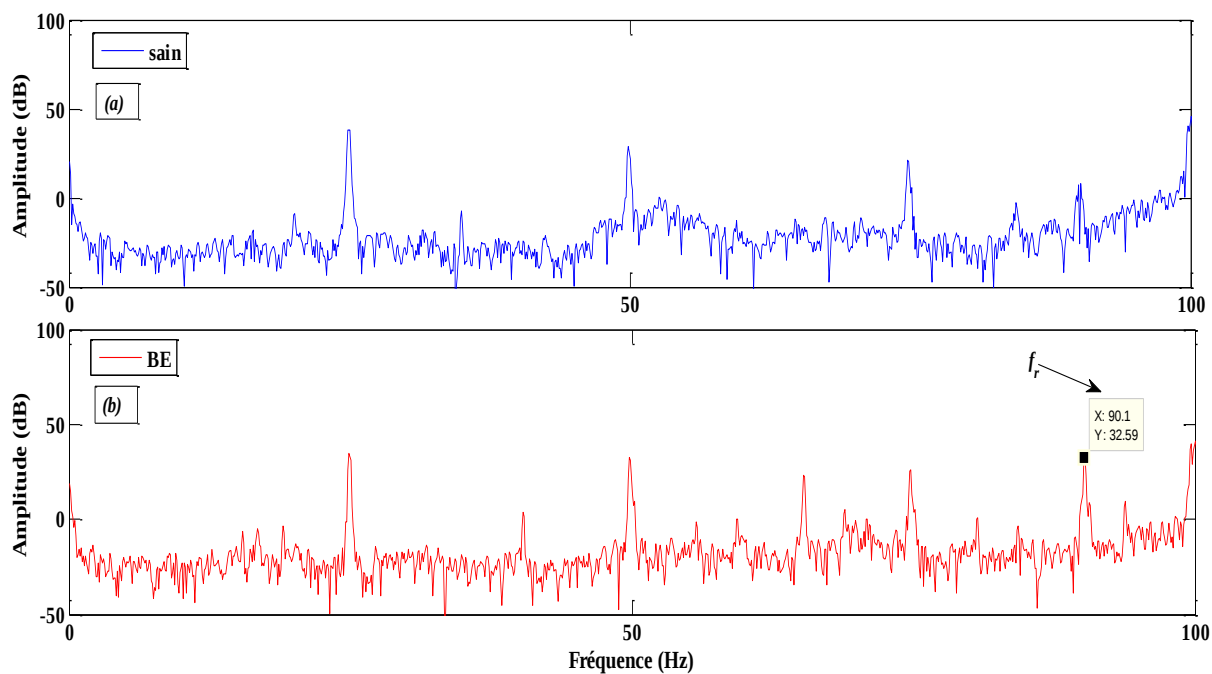


Figure III.7. Spectre du courant statorique pour la bande de 0-100Hz ($g \approx 0.04$) ; (a) : Etat sain, (b) : Etat défectueux (BE).

Nous observons l'apparition de lignes caractéristiques d'un défaut de la bague extérieure du palier dans la plage de fréquence de 0 à 100 Hz, avec les valeurs suivantes 90.1Hz.

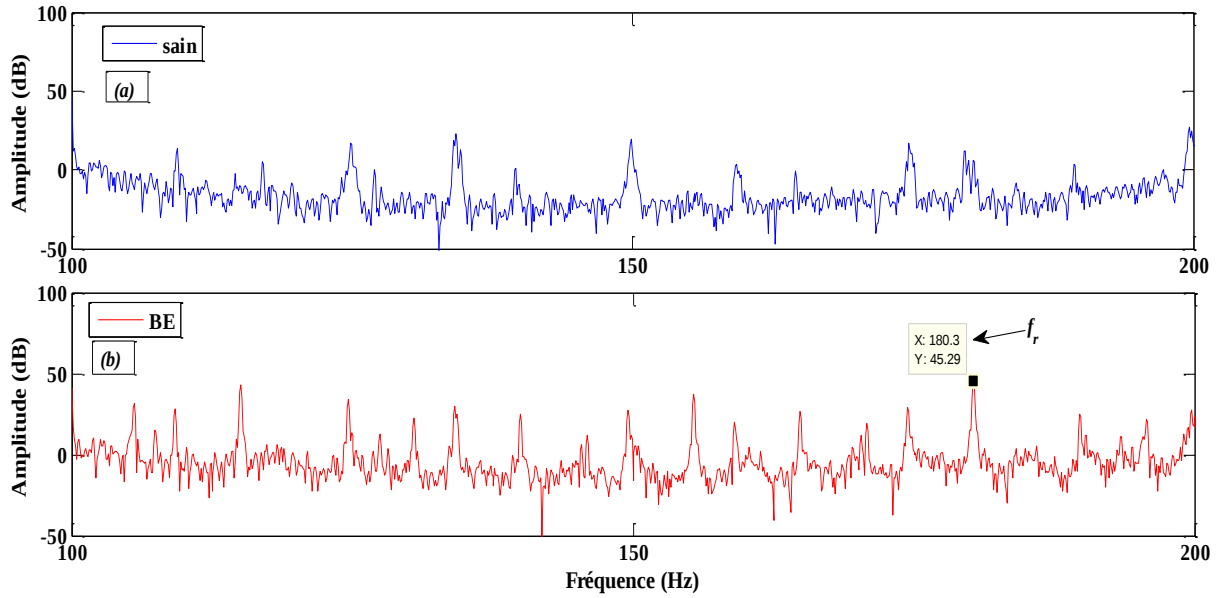


Figure III.8. Spectre du courant statorique pour la bande de 100-200 Hz ($g \approx 0.04$) ; (a) : Etat sain, (b) : Etat défectueux (BE).

On remarque l'apparition des raies caractéristiques du défaut de roulement de la bague extérieure situé dans la plage fréquentielle de 100-200 Hz, qui ont les valeurs suivantes 180.3Hz

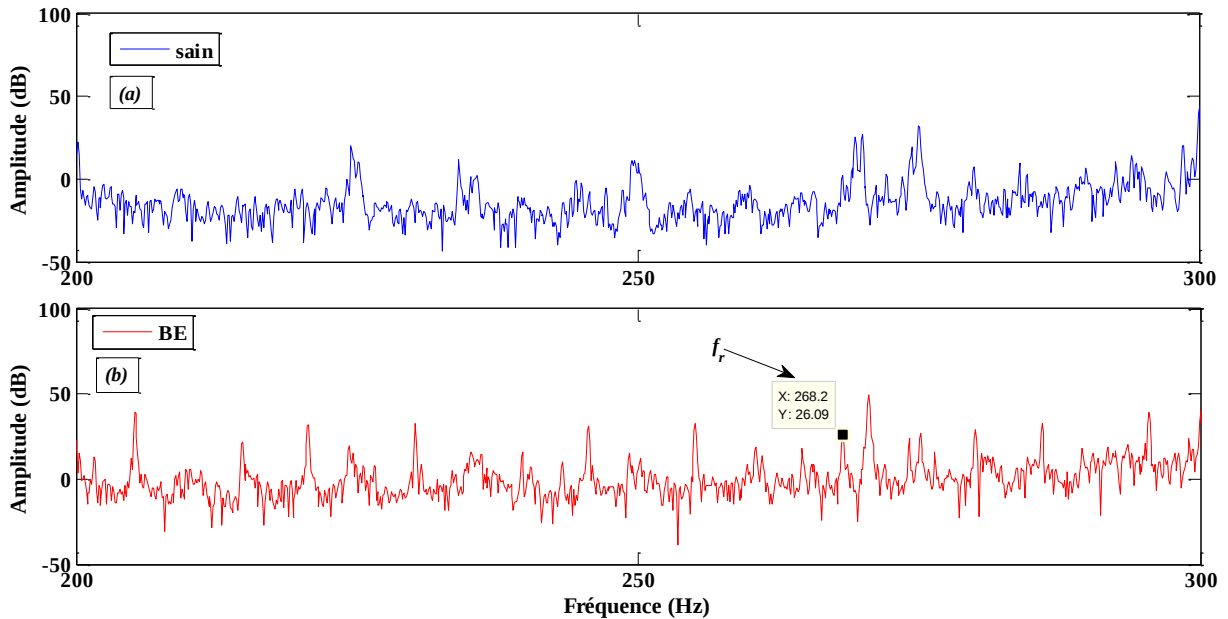


Figure III.9. Spectre du courant statorique pour la bande de 200-300 Hz ($g \approx 0.4$) ; (a) : Etat sain, (b) : Etat défectueux (BE).

Nous remarquons l'apparition de lignes caractéristiques d'un défaut de la bague extérieure du roulement dans la plage de fréquences de 200 à 300 Hz, avec les valeurs suivantes 268.2Hz

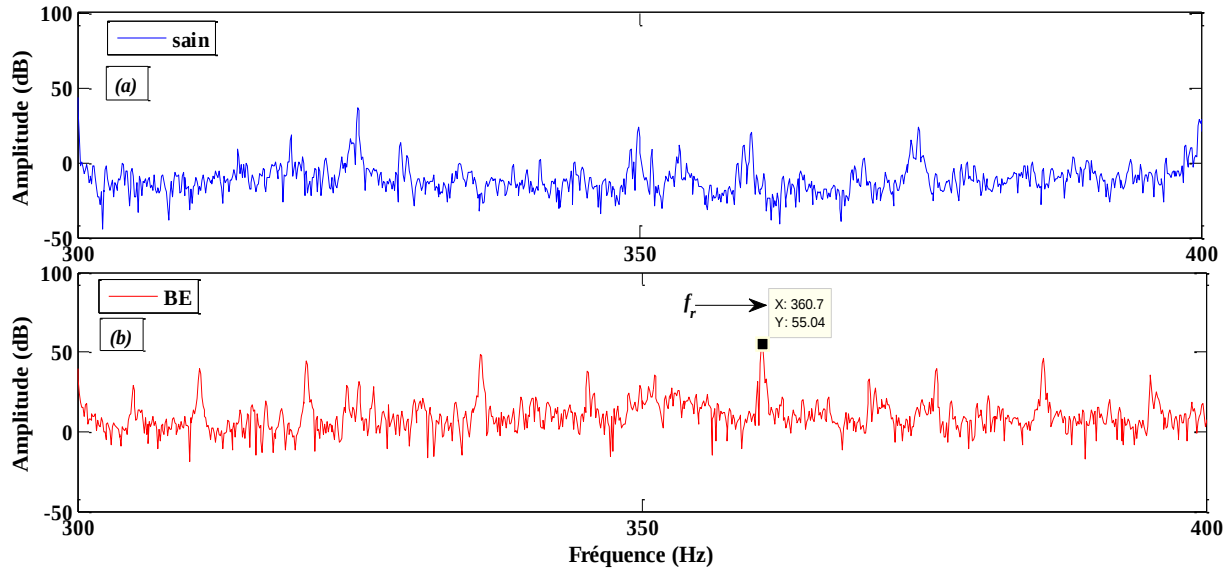


Figure III.10. Spectre du courant statorique pour la bande de 300-400 Hz ($g \approx 0.04$) ; (a) : Etat sain, (b) : Etat défectueux (BE).

On constate l'apparition de lignes caractéristiques d'un défaut de la bague extérieure du roulement dans la plage de fréquences de 1000 à 1500 Hz, avec les valeurs suivantes 360.7

III.3. Tableau Valeurs théoriques et pratiques des harmoniques (BE, $g=0.4$).

Formule	Valeurs	Valeurs	Amplitude
$f_{BE} = 4 N_b f_r k$	théoriques [Hz]	pratiques [Hz]	[dB]
$f_{BE} = 0.4 (9) (24.9)$	89.64	90.1	32.59
$f_{BE} = 4(9) (24.9)^2$	179.28	180.3	45.29
$f_{BE} = 4(9) (24.9)^3$	268.92	268.2	26.09
$f_{BE} = 4(9) (24.9)^4$	358.56	360.7	55.04

III.4.Conclusion:

D'après l'utilisation de l'analyse de la signature du courant des moteurs (MCSA) et l'analyse de la signature vibratoire des moteurs (MVSA), nous avons constaté que le courant statorique et le signal de vibration sont sensibles aux défauts mécaniques. La MVSA-FFT est riche en information par rraport à la MCSA-FFT. Cela peut dire que la MVSA-FFT est mieux que celle-ci MCSA-FFT. C'est chapitre a approuvé les résultats qui ont été trouvé dans les travaux précédents.

Conclusion Générale

En conclusion, l'utilisation conjointe des techniques MCSA-FFT et MVSA-FFT s'est avérée être une approche efficace pour la détection précoce et précise des défauts des roulements dans les moteurs à induction. Les résultats obtenus ont démontré que cette combinaison offre une meilleure sensibilité et spécificité dans l'identification des anomalies par rapport à l'utilisation individuelle de chaque technique. En intégrant l'analyse des signatures électriques et vibratoires, il devient possible de détecter une gamme plus large de défauts, allant des défauts naissants aux défauts avancés, ce qui permet une intervention préventive plus opportune et efficace.

De plus, cette approche combinée offre une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents des défauts des roulements, ce qui peut contribuer à l'amélioration des stratégies de la surveillance. En identifiant et en corrigeant les problèmes à un stade précoce, les entreprises peuvent éviter les temps d'arrêt coûteux et prolonger la durée de vie utile de leurs moteurs à induction.

Cependant, malgré les avantages évidents de l'approche combinée, il est important de reconnaître que des défis subsistent, notamment en ce qui concerne la mise en œuvre pratique sur le terrain et l'interprétation des données recueillies. Des efforts supplémentaires de recherche et de développement sont nécessaires pour affiner les techniques d'analyse, améliorer la fiabilité des résultats et rendre ces méthodes plus accessibles aux praticiens de la maintenance industrielle.

En fin de compte, l'adoption de la MCSA-FFT et de la MVSA-FFT comme outils de surveillance de l'état des moteurs à induction représente un pas important vers un diagnostic plus efficace, permettant aux de maximiser la disponibilité opérationnelle des équipements tout en réduisant les coûts et les risques associés aux défaillances des machines asynchrones.

Référence bibliographiques

[1]	N. BESSOUS « Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machine Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation », Thèse de Doctorat, Laboratoires de Recherche : LGEB de l'Université de Biskra, Septembre 2017.
[2]	Imaouchen Yacine, " Mesure et analyse des vibrations des machines électriques tournantes", Thèse de Doctorat, Université A.mira-Bejaia, 2015.
[3]	BOUGUERRA Abdelfettah "Détection du défaut de la cassure de barres dans les machines à induction en utilisant les techniques : MVSA et MCSA « Etude Comparative »; MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued 2019.
[4]	T.BENSANA «Diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une turbine à vapeur ». Mémoire de Magister en en génie mécanique option : Energétique, Université Badji Mokhtar ANNABA 2008.
[5]	M.HACHEMI « Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration des machines tournantes », MASTER en génie mécanique Option : Maintenance Industrielle, Université Abou Beker BEKAID, Juillet 2012.
[6]	Hamdidi Naima, Boucherk Kahina, "Traitement des signaux vibratoires : Application au diagnostic des défaillances", Diplôme d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009.
[7]	Landolsi Foued , "Techniques de surveillance", Support de cours, Institut Superieur des Etudes Technologique de Nabeul, 2017.

[8]	Boumaila Ahmed Dhia Eddine, " Diagnostic des défauts d'un ventilateur M14A par analyse vibratoire au niveau de l'unité SIDER TSS", Diplôme de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018.
[9]	Bachouche Hassina, Azzi Ouahiba, " Analyse des signaux vibratoires par la transformée en ondelette", Mémoire de Master, Université Akli M'hand Oulhadj – Bouira, 2017.
[10]	Djebili Omar, " Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement", Thèse de Doctorat, Université De Reims Champagne Ardenne, 2013.
[11]	BESSOUS Nouredine, «Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation», Université Mohamed Khider – Biskra, 2017.
[12]	https://www.artesis.com/motor-current-signature-analysi
[13]	MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS TO DETECT FAULTS IN INDUCTION MOTOR; DRIVES—FUNDAMENTALS, DATA INTERPRETATION AND INDUSTRIAL CASE HISTORIES by William . T. Thomson and Ronald J. Gilmore.
[14]	https://www.diatech.in/benefits-of-motor-current-signature-analysis-mcsa/
[15]	Cherier.F, Amade. G, « Modélisation en vue du diagnostic des défauts dans une machine asynchrone » mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université M'hamed Bougara-Boumerdès, 2009.

[16]	E.Gaucheron, «Les moteurs électriques... pour mieux les piloter et les protéger», http://www.schneider-electric.com ,avril2018
[17]	P. O'Donnell, "Report of large reliability survey of industrial and commercial installations, Part 1", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA 21, N° 4, jury/August 1985 pp 853 – 864
[18]	A. H. Bonnett, "Cause and analysis of Anti-Friction Bering Failures in A.C Induction Moto IEEE Transactions on Industry Application, pp 14 - 23, Sept/Oct 1993
[19]	S. Nandi, H. A. Toliyat, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines – a review" IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, Vol.1, pp.197-204, Phoenix, USA, 1999
[20]	M.E.H.Benbouzid, "Review of induction motors signature analysis as a medium for fault detection". IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol.47, pp. 984-993, 2000.
[21]	Dr.ALLAL Abderrahim "Diagnostic d'un moteur asynchrone d'un compresseur à piston 2021"
[22]	H. Henao, C.Demian, G.A.Capolino, "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 39, pp. 1272–1279, Sept/Oct. 2003.
[23]	J.R.Cameron, W.T.Thomson, A.B.Dow, "Vibration and current monitoring for detecting air gap eccentricity in large induction motors", IEE Proceedings, Vol. 133, no.3, pp. 155-163, May 1986.
[24]	W.R.Finley, M.M.Hodowanec, W.G.Holter, "An analytical approach to solving motor vibration problems", IEEE Transactions on Industry Application, Vol.363, no. 5, pp. 1467- 1480. Sept. /Oct. 2000.

[25]	S. M. A. Cruz "Stator winding fault diagnosis in three-phase using synchronous motors, by the extended Park's vector approach", IEEE Trans. Ind. Applicat 2000.
[26]	Ali Ibrahim. —Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée . Thèse de Doctorat, laboratoire d'Analyse des Signaux et des Processus Industriels, université Jean Monnet. Lyon, Mars 2009.