

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



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Commande Electrique

Présenté par

BOUGUERRA Abdelfettah

Thème

Détection du défaut de la cassure de barres dans les machines à induction en utilisant les techniques : MVSA et MCSA « Etude Comparative »

Soutenu le 17/06/2019. Devant le jury composé de :

M. BABA ARBI Idris

Maitre assistant A

Président

Dr. BESSOUS Nouredine

Maitre de conférences A

Rapporteur

Dr. HALEM Noura

Maitre de conférences A

Examineur

Année Universitaire 2018/2019

Remerciement

En premier lieu, je tiens à remercier ALLAH qui m'a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

*J'adresse mes profonds remerciements à **M. BABA ARBI Idris** et **Dr. HALEM Noura** qui ont spontanément la volonté et l'honneur qui ont accepté de juger ce travail. Leurs critiques et leurs remarques me permettent de clarifier plusieurs points importants dans ce mémoire. Je les exprime ma très vive reconnaissance.*

*Je présente également à cette occasion mes chaleureux remerciements à mon encadreur **Dr. BESSOUS Noureddine** pour l'aide honorable et infatigable qu'il m'a apporté en acceptant de superviser et de suivre mon travail, pour les conseils et les précieuses orientations.*

*Je remercie vivement mon épouse **A. KHAOUNI** qui a partagé ma vie au quotidien, qui m'a soutenu et supporté durant ce mémoire. J'admire sa patience et sa bonté.*

*Nous remercions chaleureusement ma famille ma mère, mes frères, et mes sœurs pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur patience durant les étapes difficiles de ce travail. Sans oublier mon fils **MOHAMMED**.*

BOUGUERRA Abdelfettah

Résumé:

Les machines asynchrones à cage d'écureuil sont largement utilisés dans la majorité des industries. Au cours de fonctionnement de ces moteurs, à cause de la cassure de barres dans le rotor, l'excentricité, il peut y avoir l'apparition de défauts électriques. Il conduit à une incidence sur la performance et la fiabilité des moteurs.

Le diagnostic des défauts avant ses conversions à un dysfonctionnement s'effectue de diverses techniques, et le plus largement utilisé pratiquement, aujourd'hui, est la technique d'analyse des signaux vibratoires, car elle se base principalement sur l'analyse spectrale (FFT) des images de vibration.

L'objectif de cette étude est de faire une comparaison entre la méthode d'analyse du Courant statorique MCSA-FFT, et la méthode d'analyse vibratoire MVSA-FFT pour la détection du défaut de la cassure de barres dans le rotor afin d'accéder à une décision précieuse.

Mots clés : Machines tournantes, machines asynchrones à cage d'écureuil, diagnostic, transformée de Fourier, spectre, cassure de barres, excentricité, analyse vibratoire.

الملخص:

تستخدم الآلات ثلاثية الأطوار ذات القفص السنجاب في معظم الصناعات، حيث خلال ظروف تشغيل هذه الآلات وفي كثير من الأحيان قد يتم حدوث أعطال كهربائية بسبب انكسار قضبان الجزء الدوار، عدم تمرکز الجزء الدوار... وهذا يؤدي إلى التأثير على أداء وموثوقية هذه الآلات.

إن تشخيص أي عيب (خلل) قبل تحوله إلى عطل يتم بعدة تقنيات، والأكثر استعمالاً في الجانب العملي اليوم هي تحليل الإشارات الاهتزازية، إذ تعتمد في الأساس على التحليل الطيفي بتحويلات 'فوريي'.

إن الهدف من دراستنا هذه هو المقارنة بين طريقة تحليل إشارة التيار الكهربائي بتقنية التحليل الطيفي (فوريي) وكذا طريقة تحليل الإشارة الاهتزازية بتقنية التحليل الطيفي (فوريي) من أجل كشف وتشخيص خلل إنكسار القضبان في الجزء الدوار، قصد الوصول إلى قرار فاصل يؤدي تشخيص محكم.

الكلمات المفتاحية: الآلات الدوارانية، الآلات غير المتزامنة على شكل قفص سنجاب، التشخيص، تحليل فوريي، الطيف، انكسار القضبان، عدم تمرکز الجزء الدوار، التحليل الاهتزازي، تحليل إشارة التيار الكهربائي.

Abstract :

Asynchronous squirrel cage machines are widely used in most industries. During operation of these machines, because of the breakage of bars in the rotor, eccentricity, there may be the appearance of electrical faults. It leads to an impact on the performance and reliability of the engines.

The diagnosis of defects before its conversion to a malfunction is carried out by various techniques, and the most widely used practically today is the vibration signal analysis technique, because it is mainly based on spectral analysis (FFT) vibration images.

The objective of this study is to make a comparison between the MCSA-FFT stator current analysis method and the MVSA-FFT vibration analysis method for detecting the failure of bar breakage in the rotor in order to access a valuable decision.

Keywords: rotating machines, asynchronous squirrel cage machines , diagnosis, Fourier transform, spectrum, broken bars, eccentricity, vibration analysis. stator current analysis.

Table des matières

Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des symboles et abréviations	x
Introduction générale	1

CHAPITRE I : Etat de l'art sur le diagnostic des défauts dans la Machine asynchrone

I-1 Introduction :	05
I.2- Constitutions des machines asynchrones :	06
I.2.1- Stator :	06
I.2.2- Rotor :	07
I.2.3- Les paliers :	07
I.3- Les défauts des machines asynchrones :	08
I.3.1- Causes des défauts :	08
I.3.2- Les défaillances des machines électriques :	09
I.3.2.1- Défauts statoriques :	09
I.3.2.1.1 Les courts-circuits :	09
I.3.2.1.2 Court-circuit entre phases :	10
I.3.2.1.3 Court-circuit entre spire :	10
I.3.2.1.4 Circuit ouvert sur une phase :	10
I.3.2.1.5- Court-circuit avec le bâti (la carcasse) :	11
I.3.2.2- Défauts rotoriques :	11
I.3.2.2.1- Excentricité :	12
I.3.2.2.2- Rupture de barres et d'anneau de court-circuit :	13
I.4- Techniques du diagnostic des machines asynchrones :	15
I.4.1- Méthodes sans modèle :	15
I.4.2- Diagnostic du couple électromagnétique :	15
I.4.3- Diagnostic du champ magnétique :	15
I.4.4- Diagnostic par analyse du courant statorique :	16
I.4.5- Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle :	16
I.5- Conclusion :	17

CHAPITRE II : Théorie sur les techniques MCSA, MVSA

II.1- Introduction :	19
II.2- Aperçu sur la technique de la MCSA :	20
II.3- Aperçu sur MVSA :	21
II.3.1- Origine des vibrations sur les machines tournantes :	21
II.3.2- Capteurs de vibration et grandeurs mesurées :	22
II.3.2.1- Capteur de déplacement :	22
II.3.2.2- Capteur de vitesse :	23
II.3.2.3- Capteur d'accélération :	23
II.4- Les points de mesure :	24
II.5- Défauts causes par des vibrations excessives :	25
II.5.1 Défauts de balourd :	25
II.5.2 Défaut d'alignement :	27
II.5.3- Défauts de serrage :	28
II.5.4- Défauts de transmission par courroies :	28
II.5.5- Les défauts des engrenages :	29
II.5.6- Défaut de rupture de barres et de segments cassés :	29
II.5.7- Les défauts de roulement :	29
II.5.8- Défaut d'excentricité :	30
II.9- Conclusion :	30

CHAPITRE III : Application de la MCSA-MVSA pour détecter la cassure des barres

III.1- Introduction :	32
III.2- Analyse du défaut de la cassure de barres par MCSA- FFT :	33
III.2.1- Fonctionnement à vide :	33
III.2.2- Fonctionnement en charge :	35
III.2.2.1- Cas d'une barre cassée :	35
III.2.2.2- Cas de deux barres cassées :	37
III.3- Analyse du défaut de la cassure de barres par MVSA- FFT :	38
III.3.1- Fonctionnement à vide :	38
III.3.2- Fonctionnement en charge :	39

III.4- Etude comparative entre la mcsa et la mvsa :	41
III.4.1- Interpretation et discussion des resultas :	41
III.4.1.1- la MCSA pour détecter la cassure de barres :	42
III.4.1.1- la MVSA pour détecter la cassure de barres :	42
III.5- Conclusion :	43
Conclusion générale :	44
Références bibliographiques :	45

Liste des figures

CHAPITRE I :

Etat de l'art sur le diagnostic des défauts dans la Machine asynchrone

Figure I.1. Structure de la machine asynchrone triphasée à cage.....	06
Figure I.2. Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone.	07
Figure I.3. Représentation des différents défauts statoriques possible.....	09
Figure I.4. Court-circuit spire-spire.....	10
Figure I.5. Court-circuit phase-phase.....	10
Figure I.6. Détérioration d'isolation : CC entre spires (à gauche), extension aux encoches (au centre) et une extension à la profondeur des encoches (à droite).....	11
Figure I.7. Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique.....	13
Figure I.8. Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit.....	14
Figure I.9. Défaut de rupture de barres.....	14

CHAPITRE II :

Théorie sur les techniques MCSA, MVSA

Figure II.1. Principe du capteur inductif à courants de Foucault.....	22
Figure II.2. Principe d'un vélocimètre.....	23

Figure II.3. Principe de fonctionnement d'un accéléromètre.....	23
Figure II.4. Différents points de mesure des vibrations d'une MAS.....	24
Figure II.5 Déséquilibre statique.....	26
Figure II.6. Déséquilibre de couple.....	26
Figure II.7. Déséquilibre de couple.....	27
Figure II.8. Schéma du défaut d'alignement.....	27
Figure II.9. Schéma du défaut d'alignement.....	28
Figure II.10. Denture d'engrenages.....	29

CHAPITRE III :

Application de la MCSA-MVSA pour détecter la cassure des barres

Figure III.1. Schéma de principe du banc d'essai pour l'acquisition des signaux.	34
Figure III.2. Spectre du courant statorique (1CB, à vide) ; (a) : état sain ; (b) : état 1CB.....	34
Figure III.3. Spectre du courant statorique ($g=3.2\%$, 1BC) ; (a) : état sain ; (b) : état 1CB.....	36
Figure III.4. Spectre du courant statorique (2BC) de 0 à 100 Hz.....	37.
Figure III.5. Spectre du signal vibratoire (2BC, $g \approx 0$) :0-100Hz.....	38
Figure III.6. Spectre du signal vibratoire (2BC, $g=0.032$) :0-100Hz.....	39

Liste des tableaux

CHAPITRE I :

Etat de l'art sur le diagnostic des défauts dans la Machine asynchrone

Tableau I.1. Présente un résumé des causes provoquant des défauts statoriques et rotoriques.....	08
--	----

CHAPITRE II :

Théorie sur les techniques MCSA, MVSA

Tableau II.1. Reconnaissance des principaux défauts.....	25
---	----

CHAPITRE III :

Application de la MCSA-MVSA pour détecter la cassure des barres

Tableau III.1. Récapitulation des raies dans le spectre du courant statorique (1BC).....	36
Tableau III.2. Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques (1BC+2BC).....	37
Tableau III.3. Récapitulation des raies dans le spectre du signal vibratoire (2BC).....	40

Liste des symboles et abréviations

ASCS :	Analyse des Signatures de Courant statorique
MCSA :	Motor Current Signal Analysis
TFR :	Transformée de Fourier Rapide
FFT :	Fast Fourier Transform
ASVM :	Analyse des signatures de vibration du moteur
MVSA :	Motor Vibration Signature Analysis
BC :	Barre Cassée
CB :	Cassure de Barre
MAS :	Machine (Moteur) Asynchrone
f_{rot} :	fréquence de rotation
f_e :	fréquence d'engrènement
z :	nombre de dents de l'engrenage
f_a :	fréquence d'alimentation statorique
f_r :	du rotor
g :	glissement
p :	nombre de paires de pôles
f_{CB} :	fréquence caractéristique du défaut de la cassure de barres
f_{MIX}^+, f_{MIX}^- :	fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les machines électriques, particulièrement les machines asynchrones, jouent de nos jours un rôle important dans toutes les applications industrielles. L'assurance de la disponibilité et la sûreté de fonctionnement de celles-ci sont fondamentales. Il est donc nécessaire d'évelopper des systèmes, permettant de surveiller et de diagnostiquer l'état de santé de ces dispositifs. Les machines asynchrones à cage d'écureuil sont largement répandues dans l'industrie en raison de leur fiabilité et construction simple. Elles sont utilisées dans la majorité des secteurs industriels et commerciaux. Cependant, elles sont sujettes à de nombreux défauts comme les barres cassées ou l'excentricité au niveau du rotor ou encore les courts-circuits entre spires au stator.

Les vibrations sont omniprésentes dans la plupart des machines électriques. Les machines tournantes vibrent pour plusieurs raisons comme : défauts d'équilibrage et d'alignement et les imperfections des paliers, les cassures partielles ou totales des barres rotoriques, les problèmes aux roulements, et l'excentricité. Généralement, les vibrations diminuent la durée de vie de l'équipement et dans les cas extrêmes peuvent endommager celui-ci ou même provoquer des défaillances catastrophiques. Pour cela, plusieurs méthodes ont été proposées pour la détection des défauts et le diagnostic,

Notre travail présente une étude comparative entre la technique MVSA et la technique MCSA pour détecter le défaut de cassure des barres dans le rotor. Afin d'accéder à une décision précieuse.

La procédure de l'analyse des signatures vibratoires du moteur (ASVM ou MVSA en Anglais), consiste à détecter l'apparition d'un défaut sans démontage de la machine en prélevant l'image vibratoire à l'aide d'un capteur de vibration. Dans la plupart des cas, le traitement des signaux vibratoires s'effectue par l'analyse du contenu spectral. Le même principe d'analyse vibratoire (spectre), est appliqué au courant statorique de la machine asynchrone. Cette technique se basant sur l'analyse des signatures du courant statorique (ASCS ou MCSA en Anglais) en utilisant la transformée de Fourier rapide (TFR ou FFT en Anglais), est actuellement en concurrence avec la méthode de MVSA.

.

Cette mémoire s'articule donc autour de trois chapitres que nous décrirons brièvement :

- ✓ Dans le chapitre I, est consacré sur le diagnostic de défaut de la machine asynchrone. Une citation des divers défauts pouvant affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone ainsi que les différents méthodes de détection et diagnostique de ces défauts.

- ✓ Le deuxième chapitre nous avons présenté une étude théorique sur la procédure de l'analyse du contenu spectral des signatures du courant statorique (MCSA) et la procédure de l'analyse du contenu spectral des signatures vibratoires du moteur (MVSA).avec les déférents défauts causés par des vibrations excessives.

- ✓ Le troisième chapitre sera principalement consacré à l'étude analytique de cassure de barres. Nous allons faire une étude comparative avec simulation de défaut de cassure des barres en se basant sur les méthodes de la MCSA et MVSA. et une discussion détaillée des deux techniques appliquées dans ce travail.

CHAPITRE I

Etat de l'art sur le diagnostic des défauts dans la Machine asynchrone

I.1- Introduction :

Ce chapitre dresse un panorama des défauts des machines électriques et leur diagnostic, avec une référence particulière aux machines asynchrones et leur détection de défauts, sachant que ces techniques peuvent être facilement étendues à d'autres types de machines électriques. La surveillance des machines électriques, pour le diagnostic et la prévision de pannes, a suscité de nombreux travaux ces dernières années, à cause de son influence considérable sur la continuité opérationnelle de nombreux processus industriels.

Un bon diagnostic et une détection précoce de défauts permettent de minimiser le temps d'arrêt ainsi que le temps de maintenance du processus en question. Ils permettent aussi d'éviter les conséquences nuisibles, parfois dévastatrices, des défauts ainsi que de réduire les pertes financières. Une bonne procédure de détection doit prendre les mesures minimales nécessaires à partir du processus en question, ainsi que d'extraire un diagnostic donnant une indication claire des modes de défaillance, par l'analyse des données, dans un minimum de temps.

Le but de ce chapitre est de présenter les défauts et les méthodes de diagnostic appliquées à la machine asynchrone.

I.2- Constitutions des machines asynchrones :

La connaissance des éléments de constitution des machines asynchrones permet de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se composer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes : le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique; le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique; les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.

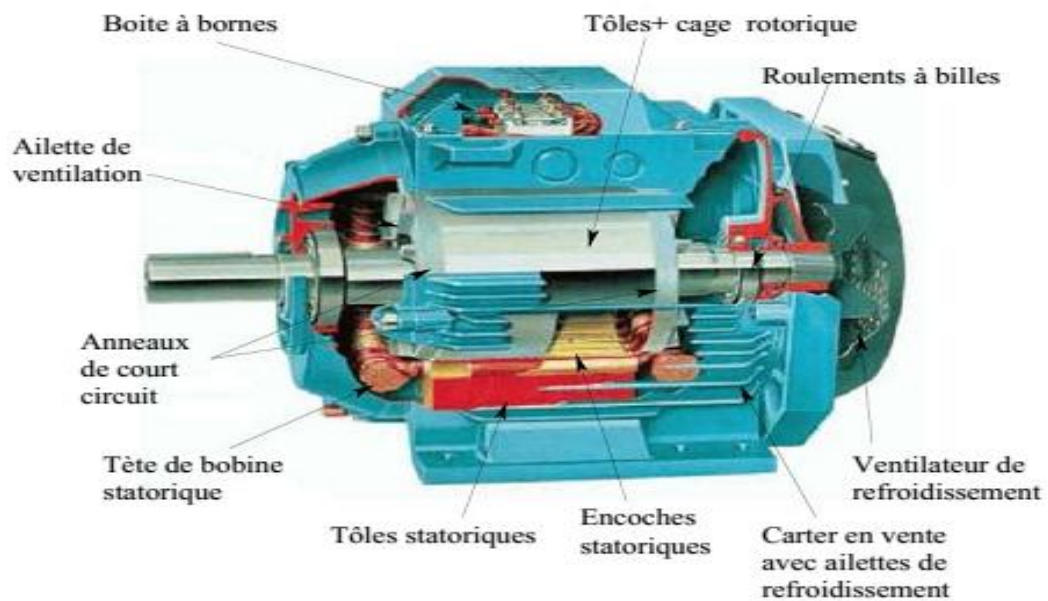


Figure I.1. Structure de la machine asynchrone triphasée à cage

I.2.1- Stator :

Le circuit magnétique du stator est réalisé par un assemblage de tôles ferromagnétiques fines et découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. L'utilisation des tôles minces permet de minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique.

I.2.2- Rotor :

Le rotor est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement du même matériau. dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu. Dans le rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont des barres obtenues par injection d'un alliage d'aluminium ou préformées en cuivre et introduites dans les tôles du rotor, il n'y a généralement pas ou très peu d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment forte pour que les courants ne circulent pratiquement pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [1]

I.2.3- Les paliers :

Les paliers sont constitués de roulements à billes et de flasques. Les roulements à billes sont insérés à chaud sur l'arbre, permettant ainsi d'assurer le guidage en rotation de l'arbre. Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixes sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone.

I.3- Les défauts des machines asynchrones :

Bien que la machine asynchrone soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts se déclarent dans les différentes parties de la machine en commençant par la connexion des phases statoriques et en finissant par l'accouplement mécanique du rotor à la charge. Ces défaillances peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques, et leurs causes sont très variées.

I.3.1- Causes des défauts :

La figure I.2 présente les phénomènes à l'origine des défauts dans la machine : la principale source de défauts provient de la mécanique; la deuxième cause de défauts est la surchauffe du moteur qui accentue le vieillissement des composants; la troisième cause de défauts référencés est le claquage d'isolants conduisant à des courts-circuits.

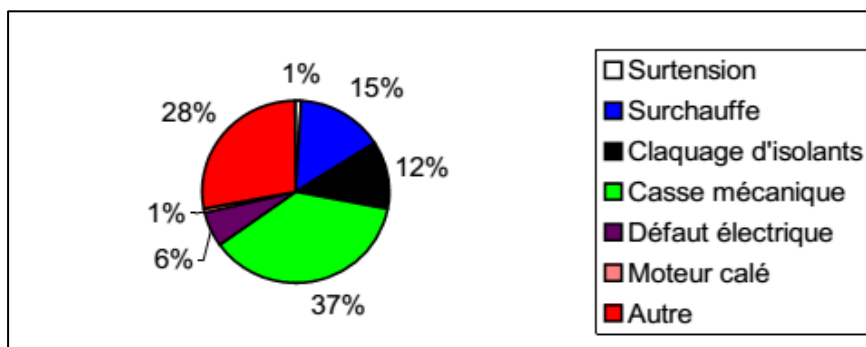


Figure I.2. Répartition des causes des défauts pour une machine asynchrone [2].

Le tableau I.1 [3] Présente un résumé des causes provoquant des défauts statoriques et rotoriques.

	Defaults	Causes
Défauts statoriques	Vibration du support	Un déséquilibre magnétique, mouvement des enroulements, un déséquilibre de l'alimentation, surcharge, mauvaise installation, un contact avec le rotor.
	Un défaut entre le stator et les carcasses	Ecrasement des spires par la carcasse, le cycle thermique, une abrasion de l'isolant, présence de points anguleux dans les encoches, un choc.
	Défaut dissolution	endommagement de l'isolant lors de l'insertion des enroulements, démarrage fréquent, condition de température ou d'humidité extrême.
	Court-circuit entre spires	Température excessive, humidité, vibration, surtension.
	Court-circuit entre phases	Défaut d'installation, haute température, alimentation déséquilibrée, contrainte d'écrasement au niveau des enroulements
	déplacement des conducteurs	choc dû à un défaut, démarrage fréquent, vibration des têtes de bobines.
	Défaillance de connecteurs	Ecrasement des conducteurs, vibration excessive.
Défauts rotoriques	Défaut de roulements	Mauvaise installation, déséquilibre magnétique, perte de lubrifiant, haute température, manque de propreté, charge déséquilibrée.
	Rupture de barres	Déséquilibre magnétique, régime transitoire à longue durée, fatigue thermique.
	Défaut du circuit magnétique	Défaut de fabrication, fatigue thermique, surcharge.
	Désalignement des roulements	Défaut de couplage, surcharge, mauvaise installation, jeu au niveau des paliers.
	Désalignement du rotor	Mauvaise installation, déséquilibré magnétique, défaut de roulements.
	Déséquilibre mécanique	Mouvement des anneaux de court-circuit, problème d'alignement.

I.3.2- Les défaillances des machines électriques :

I.3.2.1- Défauts statoriques :

Même si les vibrations des conducteurs d'encoches et les divers frottements qui en résultent, suite à de grandes sollicitations de la machine, accélèrent l'usure des isolants, il reste que le facteur principal de vieillissement est l'échauffement anormal de bobinages. En effet, pour les machines fonctionnant en milieu hostile, poussière et humidité viennent se déposer pour les machines fermées entre les ailettes extérieures, et pour les machines ouvertes au niveau des têtes de bobine, affaiblissant ainsi l'isolation électrique et court-circuitant ainsi les conducteurs[4].

I.3.2.1.1 Les courts-circuits :

Comme précité, l'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses.

- ✓ Déconnection des attaches des enroulements ;
- ✓ Une augmentation de la température des enroulements ou de l'armature statorique ;
- ✓ Courts-circuits ou contraintes de démarrage ;
- ✓ Contamination due à l'humidité et à la saleté.

On peut clarifier les différents défauts possibles de court circuit par la figure (I-4).

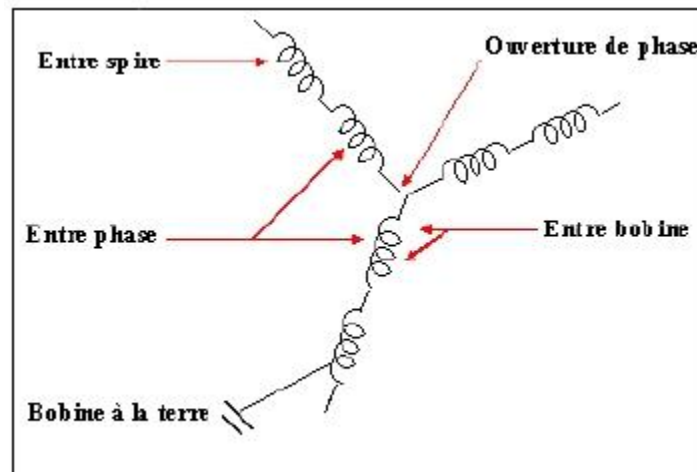


Figure I.3. Représentation des différents défauts statoriques possible.

I.3.2.1.2 Court-circuit entre phases :

Un court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Cependant, un court-circuit au bobinage près du neutre où entre spires n'a pas d'effet aussi radical. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui provoque une répercussion directe sur le couple .

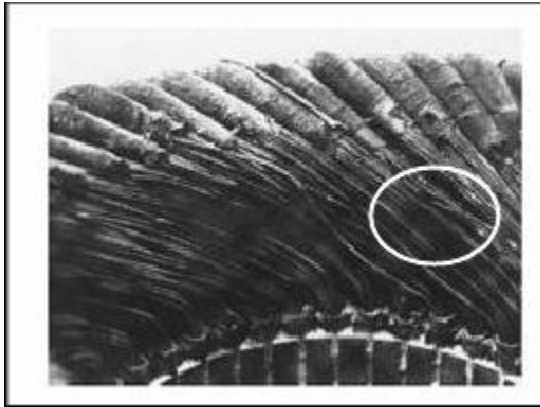


Figure I.4. Court-circuit spire-spire.



Figure I.5. Court-circuit phase-phase.

I.3.2.1.3 Court-circuit entre spire :

Le défaut de court-circuit entre spires peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. Il apparaît à l'intérieur des encoches statoriques, entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée et une légère variation de l'amplitude sur les autres phases. [5]

I.3.2.1.4 Circuit ouvert sur une phase :

Les conséquences d'ouverture de phase sont moins graves qu'un court circuit entre spires ou entre phases. Le courant ne peut pas circuler, et ça ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de bobinage. De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine.

I.3.2.1.5- Court-circuit avec le bâti (la carcasse) :

Le bâti est raccordé généralement avec une masse de terre. Si le bâti n'a pas d'importance dans la sécurité, il crée les effets capacitifs ; le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement en cas court-circuit. La sécurité des personnes est donc soumise à un danger inattendu, et les dispositifs de protection sont nécessaires (disjoncteurs de sécurité). [4] ; [7]



Figure I.6. Détérioration d'isolation : CC entre spires (à gauche), extension aux encoches (au centre) et une extension à la profondeur des encoches (à droite).

I.3.2.2- Défauts rotoriques

Dans les machines asynchrones à cage, les défaillances qui peuvent atteindre le rotor sont considérées comme plus variées et plus complexes que celles affectant le stator. Ceci est particulièrement vérifié pour les machines de faible et moyenne puissances. Plusieurs facteurs manifestent l'apparition des défaillances au niveau du rotor de la machine asynchrone, parmi eux on cite :

- ✓ Thermique (surcharge, ...).
- ✓ Electromagnétique (force en $B^2(t)$...).
- ✓ Dynamique (arbre de transmission, ...).

Les défauts qui sont les plus répétitifs, localisés au niveau du rotor sont : l'excentricité statique et dynamique, la rupture de barres rotoriques et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.

I.3.2.2.1- Excentricité :

Les effets des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe dès sa fabrication. La présence d'un certain niveau d'excentricité est normale dans les machines électriques. Des fabricants et utilisateurs spécifient un niveau admissible maximum de 5%, tandis que dans d'autres cas, un niveau maximum de 10% de la largeur d'entrefer est toléré

.Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées : [1]

❖ L'excentricité statique :

Généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle résulte d'un défaut de centrage des flasques et se manifeste même dans des machines fabriquées récemment en raison des méthodes de fabrication et d'assemblage. [1]

❖ L'excentricité dynamique :

Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes. Elle correspond au décalage du centre de rotation du rotor par rapport au centre géométrique du stator, avec en plus, une rotation du centre du rotor autour du centre géométrique de ce stator .

❖ L'excentricité mixte :

En réalité, les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à co-exister. Un niveau inhérent d'excentricité statique existe toujours, même dans des machines de fabrication récentes. Cela provoque des efforts réguliers d'attraction magnétiques non compensés dans une seule direction, et avec le temps cela peut conduire à la flexion d'un arbre et la dégradation de roulement ..., tout cela entamant une excentricité dynamique. Sans détection précoce, l'excentricité devient suffisamment grande pour développer des forces radiales déséquilibrées qui peuvent créer un frottement entre le stator et le rotor, ce qui mène à une panne très grave de la machine.

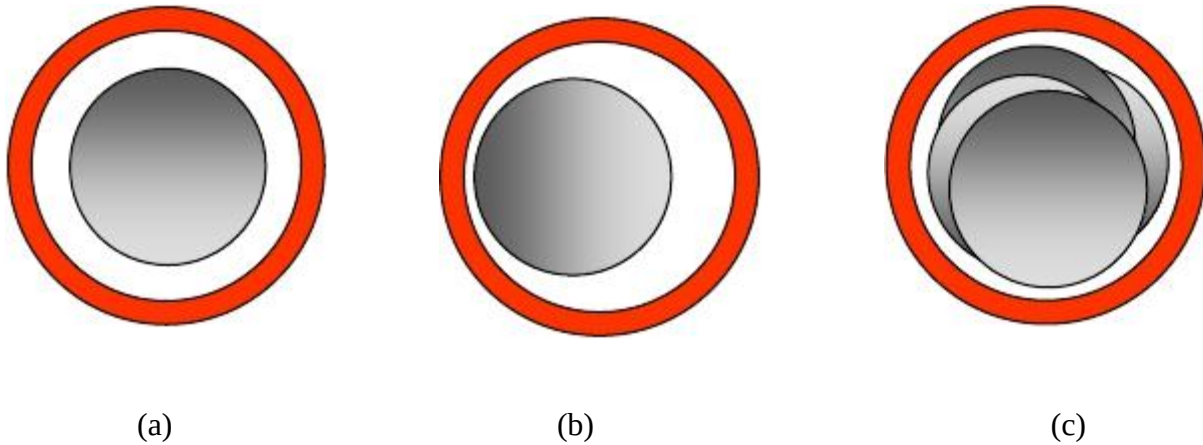


Figure I.7. Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique.

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature 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 [1].

I.3.2.2.2- Rupture de barres et d'anneau de court-circuit :

Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, . . .), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures) . Ce défaut fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante). Lorsque l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statorique.

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. En fait les cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotorique.

De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et donc des courants peuvent entraîner leur cassure [6];[7]

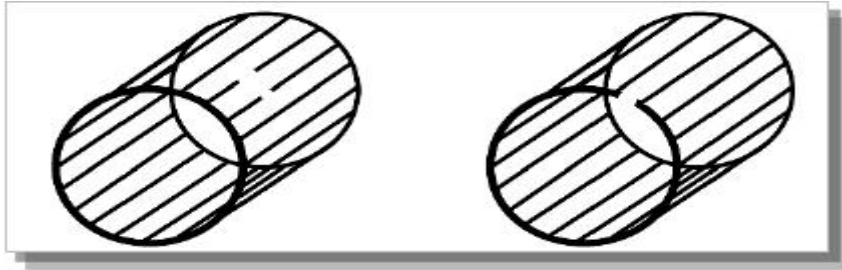


Figure I.8. Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit



Figure I.9. Défaut de rupture de barres

Un défaut de rupture de barres n'induit pas à un arrêt de la machine, du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui peut conduire à leur rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. Devant la multitude des défauts envisageables et les conséquences de leurs apparitions, les techniques de surveillance se sont rapidement imposées auprès des utilisateurs des machines électriques. Elles commencent également à intéresser les concepteurs.

I.4- Techniques du diagnostic des machines asynchrones :

I.4.1- Méthodes sans modèle :

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal. Les méthodes se basant sur l'analyse des signaux d'acquisition ont l'avantage d'être indépendante des fluctuations internes du système. Ainsi, l'information contenue dans les signaux n'est pas affectée par une éventuelle erreur de modélisation. Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que : les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations,...etc. [8]

I.4.2- Diagnostic par le couple électromagnétique :

Permet la détection de défauts lors de la mise en service ou en fonctionnement. Cette méthode peut détecter des barres de rotor cassées et des courts-circuits au stator. La forme du couple électromagnétique peut être utilisée pour distinguer des déséquilibres engendrés par des barres de rotor cassées ou des enroulements stator défaillants. Le couple électromagnétique peut être soit mesuré, soit estimé par le biais d'observateur d'état par exemple [2].

I.4.3- Diagnostic par le champ magnétique :

Permet de détecter les défauts au stator et au rotor qui peuvent causer des modifications de l'évolution du champ magnétique. Les défauts au rotor peuvent être détectés par une spire de mesure placée au stator de la machine. Les défauts cités peuvent introduire des variations dans la répartition du flux d'entrefer et conduire à un flux axial qui peut être détecté par une spire de mesure placée autour de l'axe de la machine ou des capteurs à effet Hall. En surveillant le flux de fuite axial, il est souvent possible d'identifier de nombreux défauts : barre de rotor cassée, court-circuit dans un enroulement stator [2].

I.4.4- Diagnostic par analyse du courant statorique :

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace). [8]

I.4.5- Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle :

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

- ✓ Logique floue,
- ✓ Réseaux neuronaux,
- ✓ Reconnaissance des formes. [8]

I.5- Conclusion :

Ce chapitre regroupe un ensemble d'information nous permettant de comprendre la genèse des défauts pouvant affecter la machine lors de sa durée de vie. En effet, compte tenu des différents types de défaillances, les dispositifs de surveillance de leur état de santé présentent un intérêt tout particulier pour les fabricants et les exploitants. Parmi les défaillances possibles, notre intérêt c'est porté sur les défauts de cassures des barres rotoriques.

Plusieurs méthodes de surveillance et de diagnostic relatifs à ce type de défauts ont également été évoquées. Nous nous sommes cependant focalisé sur la méthode MCSA. Cette méthode consiste à détecter les défauts par l'étude de certains composants fréquentiels ou par la vérification de la variation de certains des composants déjà existant.

CHAPITRE II :

Théorie sur les techniques MCSA, MVSA

II.1- Introduction :

La surveillance et la diagnostic des MAS repose sur la mesure et l'analyse permanente ou périodique de données objectives fournies par les machines en fonctionnement. La collecte et le traitement de ces informations nécessitent de disposer des outils adaptés à cet effet ; et avec les pertes économiques causées par les arrêts de production imprévus et les gros risques de pertes qu'elles pourraient engendrer on ne peut se permettre de prendre à la légère ces paramètres. Les vibrations sont omniprésentes dans la plupart des machines électriques. Les machines tournantes vibrent pour plusieurs raisons comme : défauts d'équilibrage et d'alignement et les imperfections des paliers, les cassures partielles ou totales des barres rotoriques, les problèmes aux roulements, et l'excentricité. Généralement, les vibrations diminuent la durée de vie de l'équipement et dans les cas extrêmes peuvent endommager celui-ci ou même provoquer des défaillances catastrophiques.

Pour cela, plusieurs méthodes ont été proposées pour la détection des défauts et le diagnostic.

L'observation de phénomènes vibratoires est une technique largement utilisé dans l'industrie, notamment pour la surveillance des composants sensibles, comme les roulements à billes, les engrenages ou les rotors. L'analyse vibratoire permet de dénoter et de détecter les problèmes dans les machines tournantes.

La procédure de l'analyse des signatures vibratoires du moteur (ASVM ou MVSA en Anglais), consiste à détecter l'apparition d'un défaut sans démontage de la machine en prélevant l'image vibratoire à l'aide d'un capteur de vibration.

Le même principe d'analyse vibratoire (spectre), est appliqué au courant statorique de la machine asynchrone. Cette technique se basant sur l'analyse des signatures du courant statorique (ASCS ou MCSA en Anglais) en utilisant la transformée de Fourier rapide (TFR ou FFT en Anglais), est actuellement en concurrence avec la méthode de MVSA.

II.2- Aperçu sur la technique de la MCSA :

La méthode d'analyse de signature du courant statorique (ASCS) ou du courant de moteur (ASCM) sous l'abréviation Anglaise MCSA se base sur L'analyse spectrale du courant statorique. le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressant, car il est facile à mesurer et nous permet de détecter les défauts électriques, y compris les défauts purement mécaniques. La technique de la MCSA se base sur les phénomènes électromagnétiques qui se transforment, par influence à une information dans le courant statorique. Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique par :

- ✓ L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux paramètres physiques de la machine (nombre de barres rotoriques et nombre des paires de pôles).
- ✓ a modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présents dans le spectre du courant. La surveillance via le courant statorique, nécessite une bonne connaissance des défauts et de leurs signatures. Elles sont utilisées pour le moment dans le contexte de machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquences caractéristiques de défauts.

Une analyse spectrale du courant statorique (à l'aide de la transformée de Fourier rapide 'FFT') a permis de mettre en évidence, la présence d'harmoniques caractérisant les défauts de la MAS [4].

Plusieurs techniques peuvent traiter le signal du courant statorique afin d'extraire un ensemble d'informations en se basant sur la signature de celles-ci.

II.3- Aperçu sur MVSA :

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 [4].

II.3.1- Origine des vibrations sur les machines tournantes :

Les machines asynchrones sont constituées d'un ensemble d'éléments, raccordés entre eux. un défaut se trouvant au niveau de l'un de ces éléments peut transmettre sa vibration aux autres éléments. La vibration est la variation dans le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité oscille autour d'une certaine valeur de référence. On peut dire qu'un corps est en vibration lorsqu'il y a un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence.

Les différents éléments de la MAS : bâti, roulements, bobinage, accouplements, arbre, paliers, etc. peuvent être caractérisés, en particulier sur le plan vibratoire, par des formes de signaux et des traitements particuliers. L'analyse de vibration permet le diagnostic :

- L'état des roulements et engrenages ;
- Défauts de serrage ;
- Défauts d'excentricité ;
- Défauts des barres rotoriques ;
- Problème de fixation ;
- Défaut d'accouplement (désalignement) ;
- Perturbation électromagnétique dans les moteurs ;

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 MEMSs (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.1, est relié à un émetteur-démodulateur-conditionneur. [9] ;[10].

• **Plage de fréquence** : Le principe de mesure à courants de Foucault présente généralement une plage de réponse en fréquence allant de 0 à 10000 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 10000 Hz autorise, entre autres, la mesure dynamique des harmoniques d'ordre élevé de la fréquence de rotation

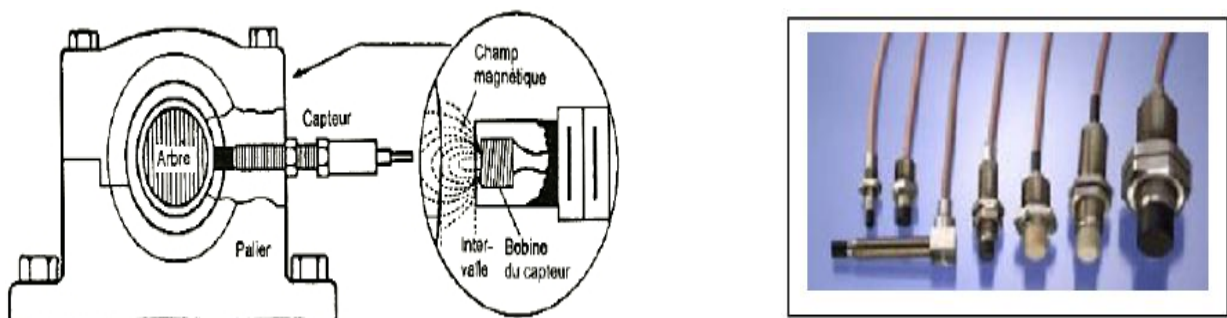


Figure II.1. Principe du capteur inductif à courants de Foucault

II.3.2.2- Capteur de vitesse :

Les capteurs de vitesse ou vélocimètres sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. Ce type de capteur présente l'avantage de ne nécessiter ni source d'alimentation ni préamplificateur. [9] ; [10].

• **Plage de fréquence** : Les plages de travail en fréquence des différents capteurs sont fonction de leurs caractéristiques. Les plages typiques sans linéarisation sont : 8 à 2000 Hz et 20 à 2000 Hz.

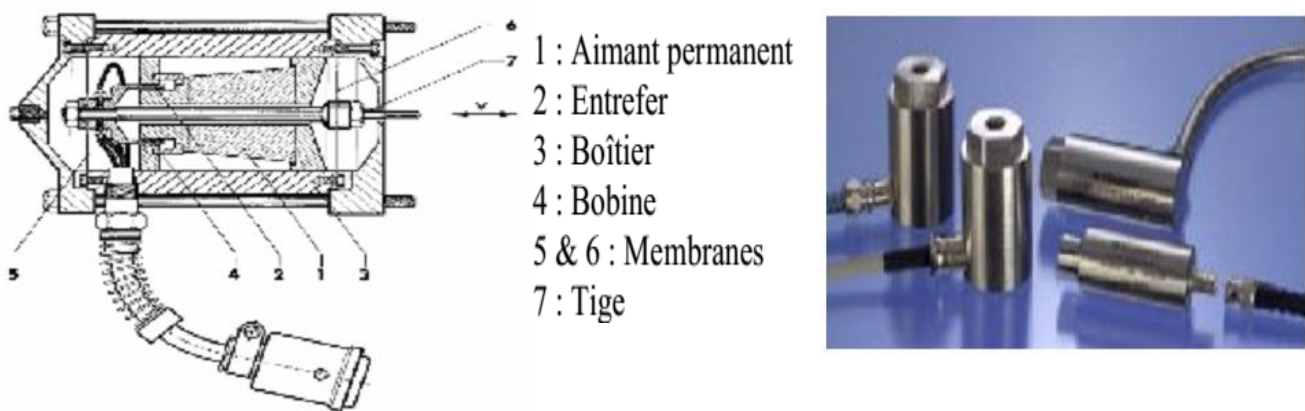


Figure II.2. Principe d'un vélocimètre

II.3.2.3- Capteur d'accélération :

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibrations absolues les plus utilisés pour la surveillance des machines tournantes. Leur principe de fonctionnement repose sur la propriété des matériaux piézoélectriques de générer une charge électrique proportionnelle à la contrainte de compression ou de cisaillement subie. [10]



Figure II.3. Principe de fonctionnement d'un accéléromètre.

II.4- Les points de mesure :

Généralement, la localisation des points de mesure se fait pour les raisons suivantes:

- Les mesures de vibrations sont réalisées sur les paliers de la machine ;
- Le capteur doit être placé de façon à assurer un trajet direct (rotor-structure) aux vibrations.

Les mesures peuvent se faire :

- dans un plan radial (vertical : PRV, horizontal : PRH, oblique : PRO) ;
- et/ou dans un plan axial (axial : PA) [4] ; [15].



Figure II.4. Différents points de mesure des vibrations d'une MAS.

On fait les mesures de vibrations pour :

- ✓ vérifier les fréquences et les amplitudes indésirables ;
- ✓ éviter les fréquences de résonance des composants de la structure ;
- ✓ être capable d'amortir ou isoler la ou les sources de vibrations ;
- ✓ étudier le comportement du système électrique (MAS) ;
- ✓ faciliter la maintenance préventive des machines ;
- ✓ construire ou vérifier les modèles informatiques qui entrent en jeu.

II.5- Défauts causes par des vibrations excessives :

Les vibrations excessives doivent être évitées et rapidement supprimées lorsqu'elles sont détectées parce qu'elles ont pour effet d'accélérer l'usure de l'équipement, qu'elles causent des dommages et qu'elles peuvent provoquer une défaillance et parfois même un accident catastrophique. On peut citer les principaux défauts et leurs fréquences correspondent dans le tableau suivant [11] :

Tableau I.1. Reconnaissance des principaux défauts

Type d'anomalie	Vibrations		Remarques
	Fréquence	Direction	
Balourd	1 x frot	Radiale	Amplitude proportionnelle à la vitesse de rotation
Défaut d'alignement	2 x frot	axiale et radiale	Vibration axiale plus importante
Défaut de fixation	1,2,3,4 x frot	Radiale	
Excitation électrique	1,2,3,4 x 50 Hz	axiale et radiale	
Vitesse critique de rotation	fréquence critique du rotor	Radiale	Apparaît en régime transitoire et s'atténue ensuite.
Engrenage Endommagé	fréq. d'engrènement $f_e = z \times \text{frot}$	radiale et axiale	
Détérioration d'un Roulement	Hautes Fréquences	radiale et axiale	Ondes de choc dues aux Ecaillages

II.5-1 Défauts de balourd :

Un balourd est une dissymétrie de masse par rapport à l'axe de rotation. Car en pratique, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor. Il en résulte que l'arbre en rotation est soumis à des forces centrifuges qui le déforment. Ces efforts se traduisent par des vibrations liées à la vitesse de rotation. Il existe trois types de balourd. [12]

• **Déséquilibre statique :**

Ce déséquilibre agit aussi s'il n'y a pas de rotation; on l'appelle alors "déséquilibre statique". Il provoque un déplacement du centre de la masse en dehors du plan géométrique, durant son utilisation, le rotor oscille parallèlement à son axe de rotation.

- Même phase sur chaque roulement.
- Principalement des vibrations radiales Balourd (équilibrage).

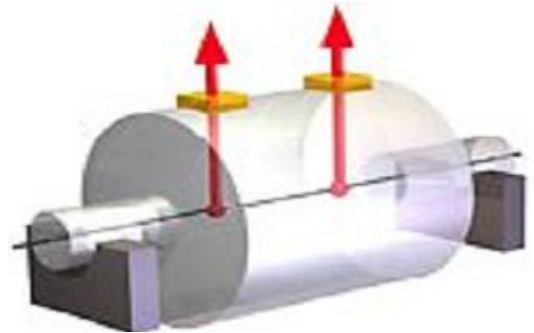
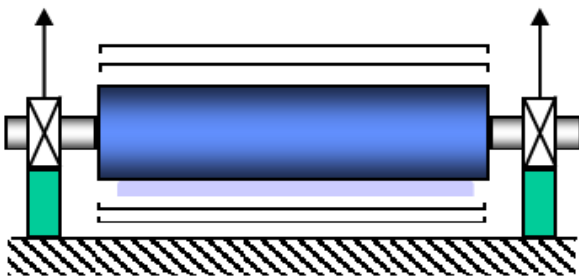


Figure II.5. Déséquilibre statique.

• **Déséquilibres de couple (Déséquilibre typique d'un rotor) :**

Cette répartition du déséquilibre ne peut plus être déterminée par oscillation, car le rotor n'accepte plus aucune position stable. Le rotor tourne, ce qui donne un mouvement de saut autour de son axe (verticalement par rapport à l'axe de rotation), car les deux déséquilibres déclenchent un couple. Par conséquent, cette sorte de répartition du déséquilibre est indiquée comme un déséquilibre de couple [9] ; [12]

- Vibration Radiale et Axiale
- Déséquilibre statique et dynamique existant simultanément

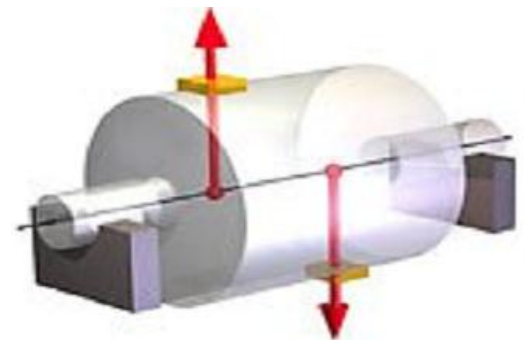
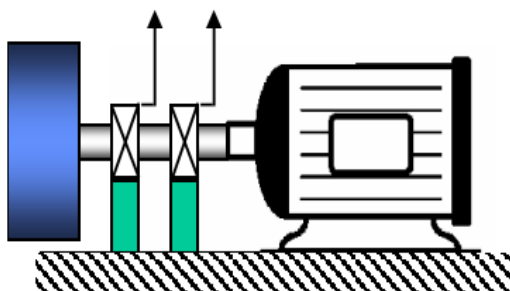


Figure II.6. Déséquilibre de couple.

• Les déséquilibres dynamiques :

Le rotor réel possède non seulement un déséquilibre indépendant, mais théoriquement plusieurs autres qui sont répartis arbitrairement le long de l'axe de rotation. on parle d'un déséquilibre dynamique. Il peut se décomposer en un déséquilibre statique et un déséquilibre de couple. Pour corriger complètement le déséquilibre dynamique, il est nécessaire d'avoir deux plans de compensation. Le déséquilibre dynamique se produit pratiquement sur tous les rotors. C'est pourquoi, on emploie, pour effectuer l'équilibrage, des machines à équilibrer verticales aussi bien qu'horizontales.

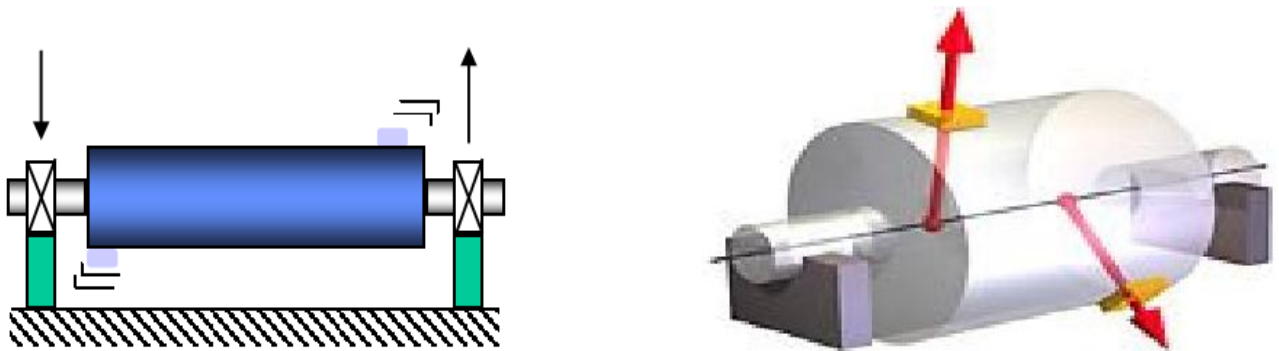


Figure II.7. Déséquilibre de couple.

II.5-2 Défaut d'alignement :

Un défaut d'alignement peut apparaître lorsqu'un arbre doit entraîner un autre arbre, souvent par l'intermédiaire d'un accouplement. Il y a 2 types de désalignements :

- ✓ le décalage d'axe : les axes sont parallèles mais non concentriques ;
- ✓ le désalignement angulaire : les axes ne sont pas parallèles. Dans la réalité, les défauts d'alignement sont une combinaison du décalage d'axe et du désalignement angulaire.

[13]

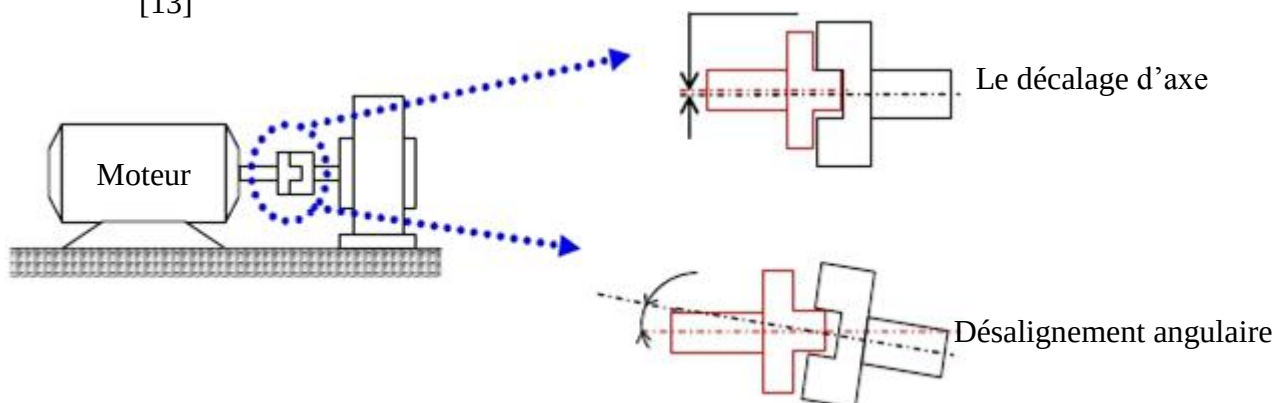


Figure II.8. Schéma du défaut d'alignement.

II.5.3- Défauts de serrage :

Le mauvais serrage de la structure de la machine génère des vibrations et un certain bruit. Le spectre typique mesure sur une machine dans laquelle il existe un jeu contient un grand nombre de pic a des fréquences multiples de la fréquence de rotation. [14]

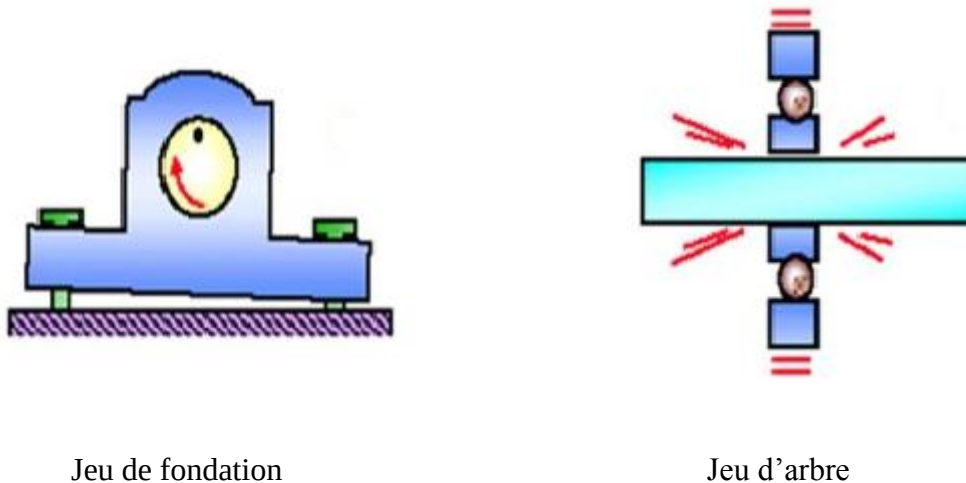


Figure II.9. Schéma du défaut de serrage

II.5.4- Défauts de transmission par courroies :

Les courroies sont utilisées pour transmettre la puissance entre deux arbres dont la distance n'est pas trop importante. Une courroie, constituée par une bande sans fin passant sur deux poulies, transmet l'énergie grâce à son adhérence sur les poulies. Le principal défaut rencontré dans ce type de transmission est lié à une détérioration localisée de la courroie (partie arrachée, défaut de jointure,...) impliquant un effort ou un choc particulier à la fréquence de passage de ce défaut [15].

II.5.5- Les défauts des engrenages :

Un engrenage est composé de deux roues dentées possédant un certain nombre de dents (noté Z) tournant à des vitesses différentes. Un réducteur ou un multiplicateur peut être composé de plusieurs engrenages. L'engrènement se fait au rythme d'engagement des dents selon une fréquence

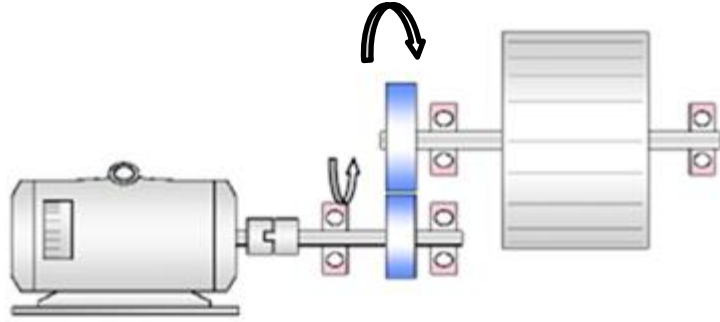


Figure II.10. Denture d'engrenages.

II.5.6- Défaut de rupture de barres et de segments cassés :

Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, . . .), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures). Ce défaut fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante).

Lorsque l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statorique. [15]

II.5.7- Les défauts de roulement :

Les roulements sont parmi les composants les plus sollicités des machines et représentent une source de panne fréquente. Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage), ...etc.

Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues. [10] [11]

II.5.8- Défaut d'excentricité :

On parle d'excentricité dans une machine lorsqu'on est en face d'une uniformité de l'entrefer. ce défaut peut survenir suite à la flexion de l'arbre, un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, l'usure des roulements, un déplacement du noyau statorique...etc. Lorsque cette excentricité s'accroît, la résultante des forces magnétiques radiales déséquilibrées (connue aussi sous le nom de traction magnétique déséquilibrée) peut causer un frottement entre le stator et le rotor, celui-ci a des conséquences néfastes sur le circuit magnétique et l'enroulement du stator et du rotor. La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant. [15]

II.9- Conclusion :

Dans ce chapitre, on a représenté 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 qu'est basé sur: «L'analyse spectrale du courant statorique ». Et la technique d'analyse des signatures vibratoires du moteur (MVSA). Qu'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 :

Application de la MCSA-MVSA pour détecter la cassure des barres

III.1- INTRODUCTION :

Les défauts qui apparaissent dans les machines électriques ont des causes variées. La rupture des barres dans les moteurs a fait l'objet de nombreux travaux.

Pour cela, plusieurs méthodes ont été proposées pour détecter ce défaut et le diagnostiquer.

Dans ce chapitre nous allons discuter et analyser ses défauts par les deux techniques de diagnostic MVSA et MCSA appliquées à la machine asynchrone afin d'aboutir à un choix judicieux.

La procédure de l'analyse des signatures vibratoires du moteur (ASVM ou MVSA en Anglais), consiste à détecter l'apparition d'un défaut sans démontage de la machine en prélevant l'image vibratoire à l'aide d'un capteur de vibration. Dans la plupart des cas, le traitement des signaux vibratoires s'effectue par l'analyse du contenu spectral.

Le même principe d'analyse vibratoire (spectre), est appliqué au courant statorique de la machine asynchrone. Cette technique se basant sur l'analyse des signatures du courant statorique (ASCS ou MCSA en Anglais) en utilisant la transformée de Fourier rapide (TFR ou FFT en Anglais), est actuellement en concurrence avec la méthode de MVSA.

On a utilisé le logiciel Matlab/Simulink pour analyser les données de la MAS.

III.2- Analyse du défaut de la cassure de barres par MCSA- FFT :

Notre étude dans cette partie consiste à détecter le défaut de cassure de barres en se basant sur la méthode de MCSA-FFT.

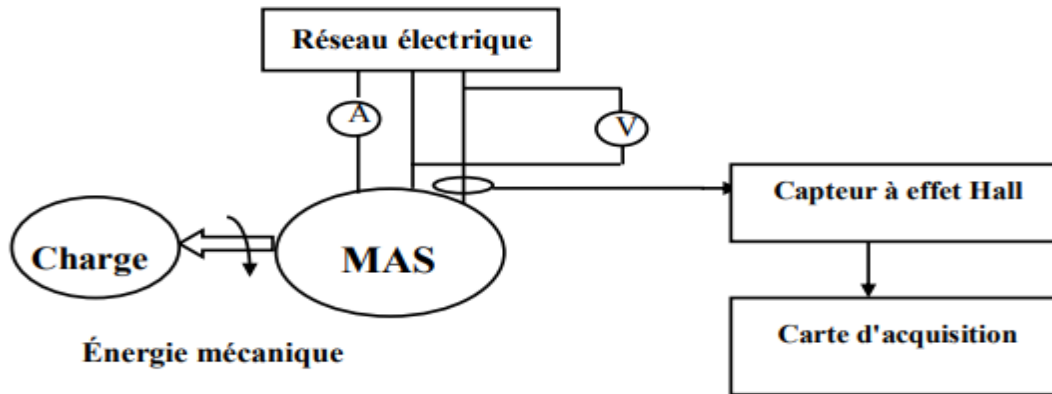


Figure III.1. Schéma de principe du banc d'essai pour l'acquisition des signaux.

Les fréquences caractéristiques :

$$f_{CB} = (1 \pm 2k) \cdot f_a \quad \text{III-1}$$

On trouve aussi des fréquences dues à l'excentricité mixte dans les spectres du courant statorique (à vide et en charge) qu'on peut calculer par l'équation suivantes :

$$f_{MIX}^+ = f_a + f_r = 50 + \frac{1-g}{p} f_a \quad \text{III-2}$$

$$f_{MIX}^- = f_a - f_r = 50 - \frac{1-g}{p} f_a \quad \text{III-3}$$

Tel que k est un entier positif. $k = 1, 2, 3, \dots$; $f_a = 50$ Hz ; g : glissement ; p : nombre de paires de pôles.

Remarque : Dans ce chapitre, tout ce qui est simulé en bleu désigne l'état sain et tout ce qui est en rouge désigne l'état défectueux.

III.2.1- Fonctionnement à vide :

Le spectre du courant électrique d'une phase statorique du MAS est représenté dans la figure (III- 1), à vide pour état sain et état cassure de barre.

On remarque que les composants harmoniques du courant statorique ne sont pas influencés par le changement de l'état de la MAS à vide pour une barre cassée. Dans ce cas, les fréquences supplémentaires causées par la rupture de barre sont encore presque invisibles ; ceci est dû à la valeur du glissement pour un fonctionnement à vide proche de zéro.

On peut voir les composantes de fréquence à $f_a + f_r$ et $f_a - f_r$... etc. qui sont déjà présentés dans le spectre de la machine saine due à l'excentricité mixte. Ces séries des fréquences caractéristiques sont décrites par la formule (III.2) et (III.3).

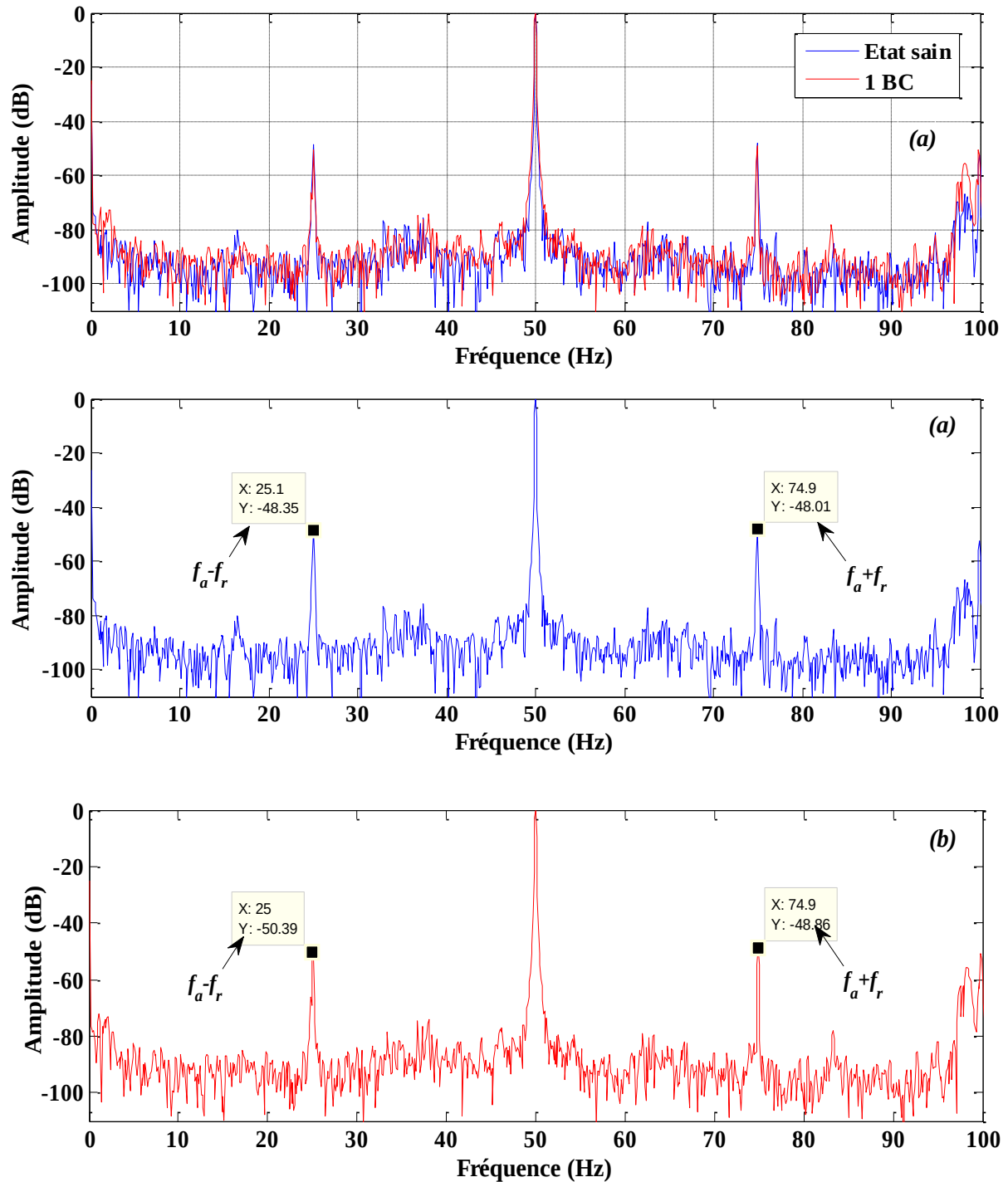


Figure III.2. Spectre du courant statorique (1CB, à vide) ; (a) : état sain ; (b) : état 1CB

III.2.2 Fonctionnement en charge :

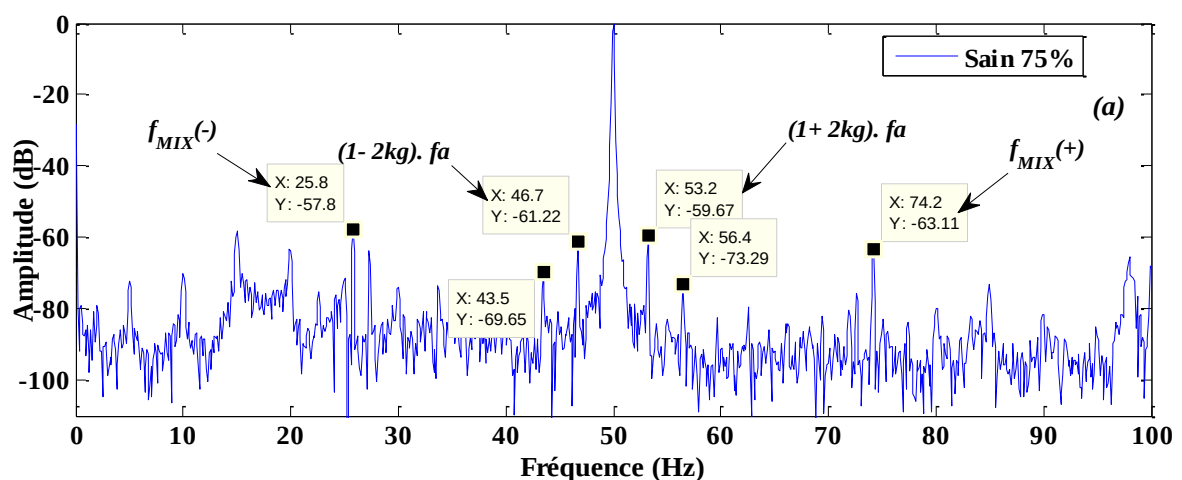
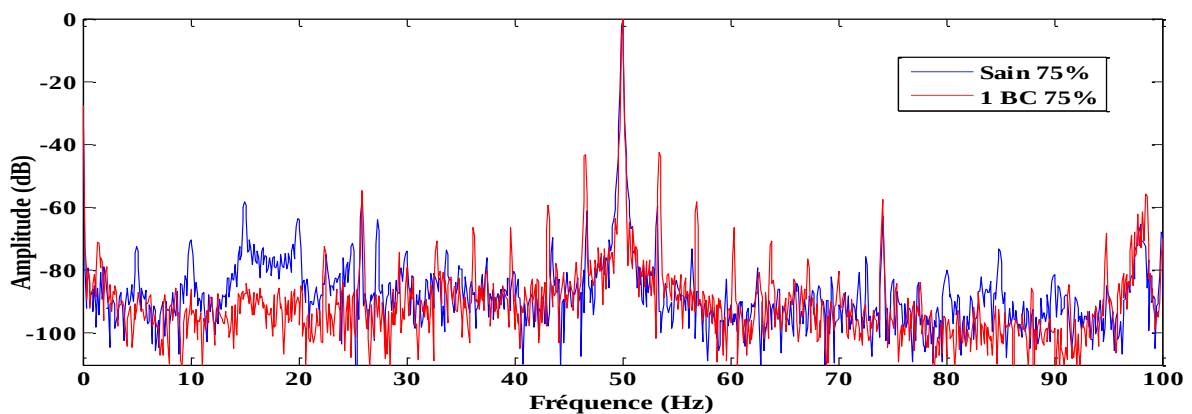
III.2.2.1 Cas d'une barre cassée :

Le spectre du courant électrique d'une phase statorique du MAS est représenté dans la figure III- 2), en charge pour état sain et état cassure de barre.

La variation de la charge affecte une variation du glissement. On applique maintenant un couple résistant qui assure une charge de 75% ($g = 3.2\%$). La représentation temporelle du courant statorique a été montrée dans la figure (III-2). Nous vérifions que le défaut de cassure de barres induit des fréquences de bandes latérales autour de la fréquence fondamentale f_a .

Les fréquences caractérisées les défauts de cassure des barres apparaissent très clair dans le spectre du courant statorique avec des amplitudes de les harmoniques très importantes.

On remarque qu'il y a des fréquences dépendantes à le glissement g et apparaissent lorsque la MAS est en charge ($g \neq 0$) à l'état sain (voir Figure III.2)



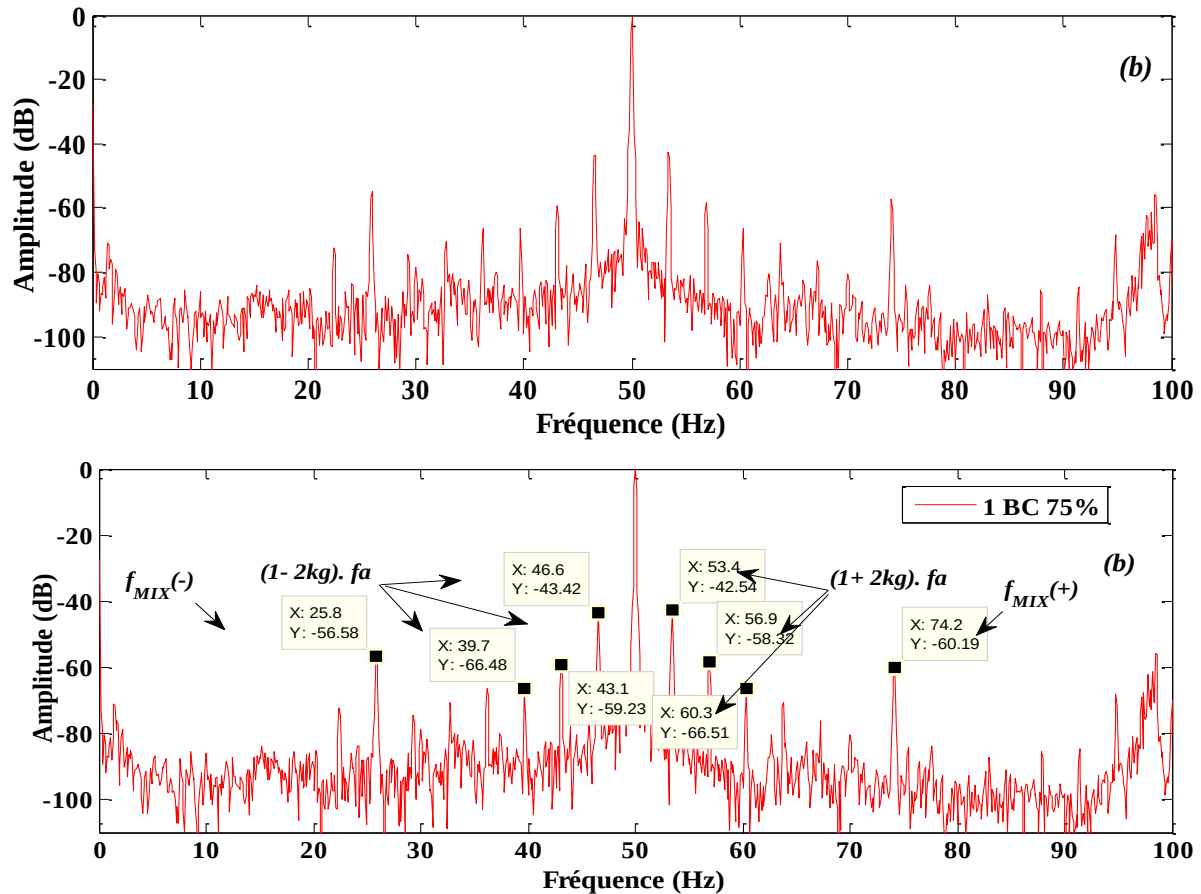


Figure III.3. Spectre du courant statorique ($g=3.2\%$, 1BC) ; (a) : état sain ; (b) : état 1CB

Tableau III.1. Récapitulation des raies dans le spectre du courant statorique (1BC).

Formules des fréquences caractéristique	Valeurs théoriques (Hz)	Valeurs expérimentale (Hz)	Amplitude «état sain » (dB)	Amplitude pour 1BC (dB)
$(1+2g)fa$	53.2	53.4	-59.67	-42.54
$(1-2g)fa$	46.8	46.6	-61.22	-43.42
$(1+4g)fa$	56.4	56.9	-73.29	-58.32
$(1-4g)fa$	43.6	43.1	-69.65	-59.23
$(1+6g)fa$	59.6	60.3	-----	-66.51
$(1-6g)fa$	40.2	39.7	-----	-66.48

III.2.2.1- Cas de deux barres cassées :

La sévérité de la cassure de barres peut provoquer aussi des déplacements des raies harmoniques, même avec des valeurs faibles. Il est important d'indiquer la valeur du glissement. La figure ci-dessous montre les fréquences de bandes latérales autour de l'harmonique fondamental pour deux barres cassées.

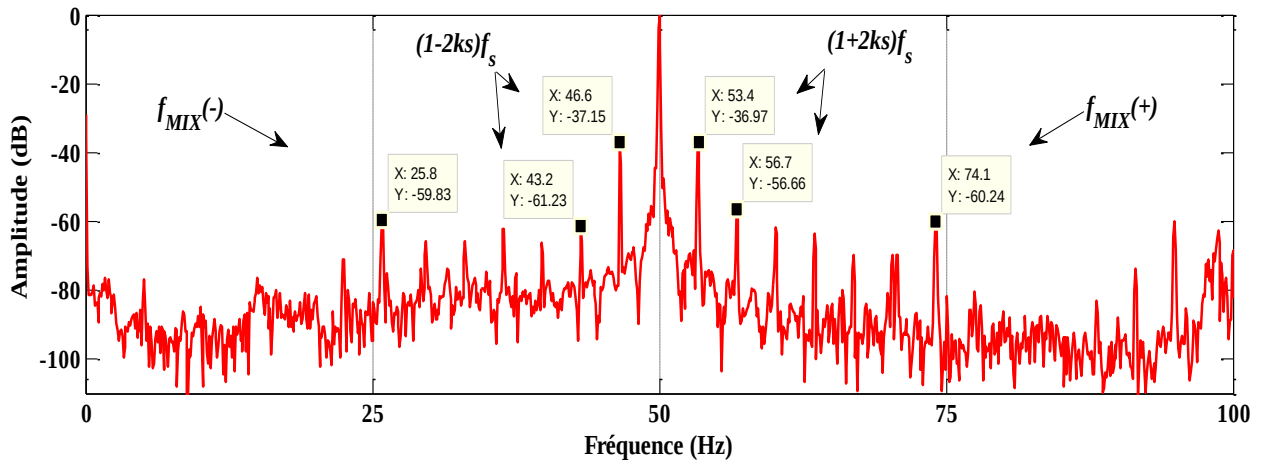


Figure III.4. Spectre du courant statorique (2BC) de 0 à 100 Hz.

Un autre tableau récapitulatif, est présenté ci-dessous qui montre un bilan comparatif des amplitudes pour 1BC et 2BC.

Tableau III.2. Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques (1BC+2BC).

Fréquences caractéristiques	Amplitude pour 1BC (dB)	Amplitude pour 2BC (dB)
$(1+2g)f_a$	-42.54	-36.97
$(1-2g)f_a$	-43.42	-37.15
$(1+4g)f_a$	-58.32	-56.66
$(1-4g)f_a$	-59.23	-61.23

Après avoir décrit les effets qui peuvent survenir suite à une rupture de barres ; notre étude montre la bonne correspondance et l'exactitude en comparant avec la littérature. Toutes les formules, le déplacement des harmoniques et le degré de sévérité du défaut de la rupture de barres sont vérifiés. Une analyse spectrale par la transformée de Fourier rapide a été appliquée sur le signal du courant statorique afin de déterminer le contenu fréquentielle du courant et par conséquent de trouver les harmoniques caractéristiques des cassures de barres qui conduisent à un diagnostic efficace.

III.3- Analyse du défaut de la cassure de barres par MVSA- FFT :

III.3.1- Fonctionnement à vide :

Notre étude dans cette partie consiste à détecter le défaut de cassure de barres en se basant sur la méthode de MVSA-FFT. Les fréquences caractéristiques du défaut de la rupture de barres à vérifier sont :

$$(f_r \pm 2kg.f_a) \quad (III.4)$$

Une autre série d'harmoniques selon la formule suivante [4] :

$$(6 \pm 2kg.f_a) \quad (III.5)$$

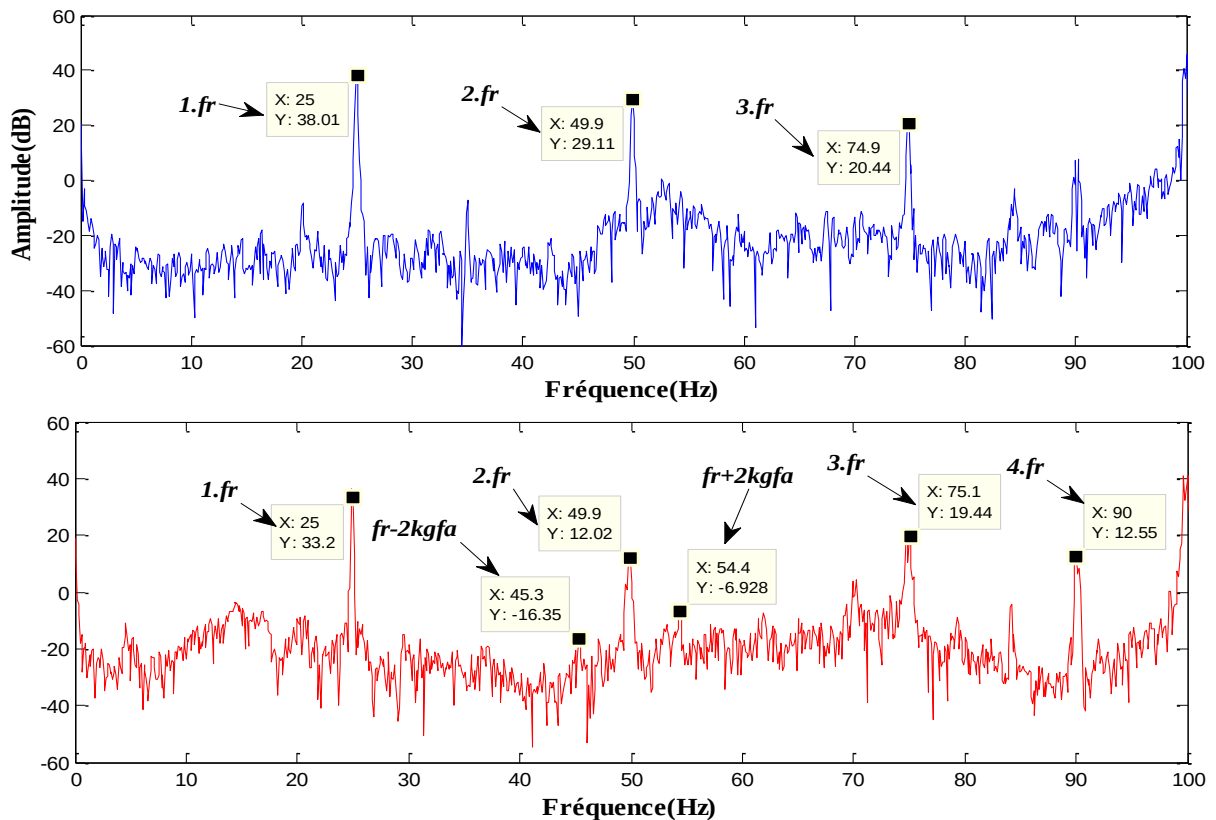


Figure III.5. Spectre du signal vibratoire (2BC, $g \approx 0$) :0-100Hz

III-3-2 Fonctionnement en charge :

On va maintenant diagnostiquer l'état du MAS pour un fonctionnement en charge ($g=0.032$). En effet, les variations observées dans la figure (III-4) sont riches en informations sur la présence du défaut autour de $f_r = 24.15\text{Hz} \approx 24.2\text{Hz}$, tel que 13.5, 17, 20.8, 27.5 et 30.9 qui vérifient la formule $f_r \pm 2kgf_a$. Les résultats obtenus à partir de la bande de [0-100 Hz].

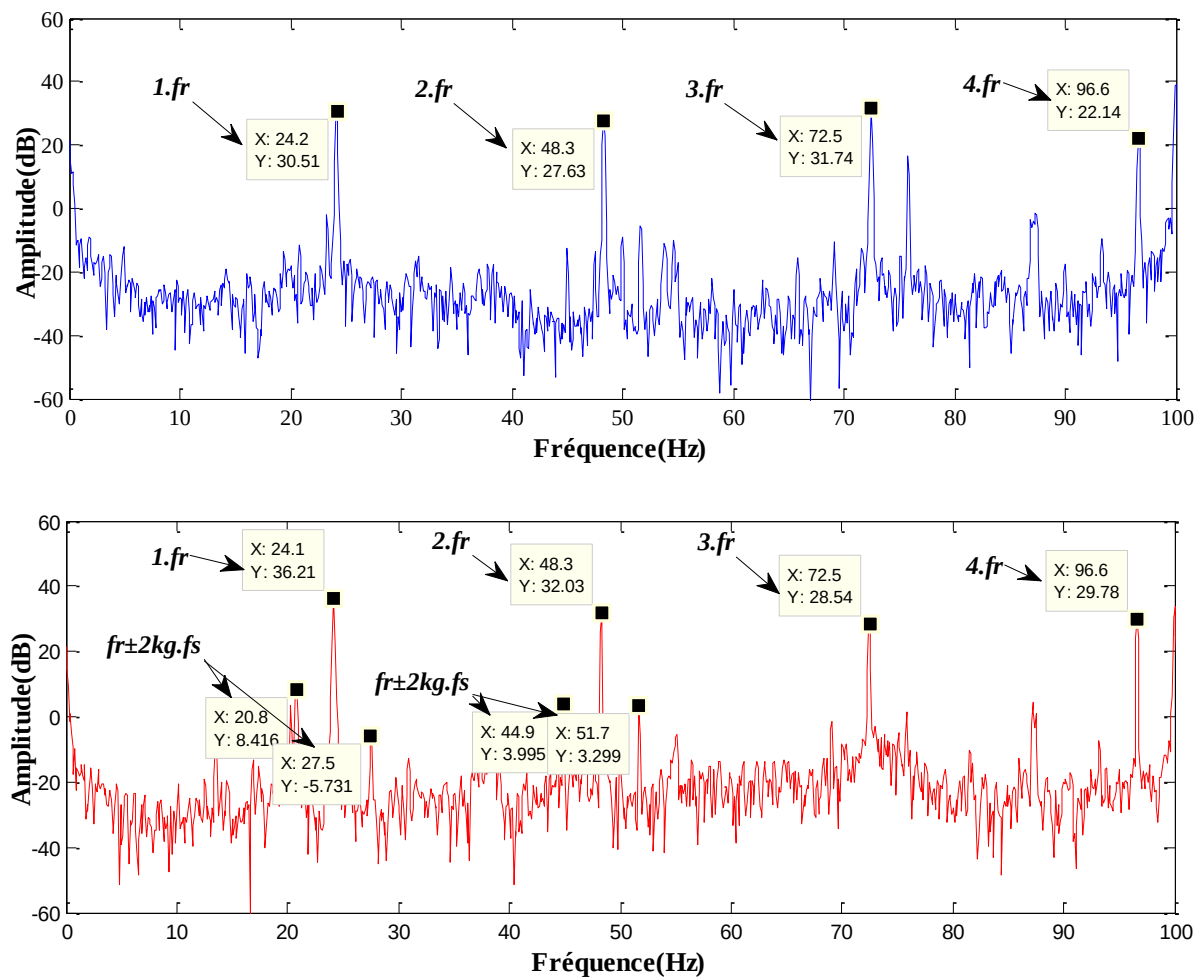


Figure III.6. Spectre du signal vibratoire (2BC, $g=0.032$) :0-100Hz

D'après l'analyse des fréquences caractéristiques du défaut de la rupture de barres, nous menons à une difficulté sérieuse dans cette partie pour décider l'existence du défaut de la cassure de barre. l'image de vibrations donne des informations limitées sur l'existence du défaut de la cassure des barres. Malgré cela, les indicateurs du défaut sont apparus en série des fréquences des bandes latérales ; nous avons remarqué que ces derniers n'ont pas une amplitude remarquable.

Les valeurs caractérisant les raies supplémentaires du défaut de la CB avec ses amplitudes peuvent être résumées au tableau suivant :

Tableau III.3. Récapitulation des raies dans le spectre du signal vibratoire (2BC).

Formules des fréquences caractéristiques	Valeurs théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amplitude «état sain » (dB)	Amplitude pour 2BC (dB)
$1 \times fr$	24.2	24.2	30.51	36.21
$2 \times fr$	48.4	48.3	27.63	32.03
$3 \times fr$	72.6	72.5	31.74	28.54
$4 \times fr$	96.8	96.9	22.14	29.78
$fr + 2gfa$	27.4	27.5	—	-5.731
$fr - 2gfa$	21	20.8	—	8.416
$fr + 2(2)gfa$	30.6	51.7	—	3.299
$fr - 2(2)gfa$	17.8	44.9	—	3.995

III.4- ETUDE COMPARATIVE ENTRE LA MCSA ET LA MVSA :

Aujourd'hui, les méthodes de diagnostic progressent continuellement, grâce aux matériels informatiques et le développement du traitement du signal. Parmi celles-ci, on trouve l'analyse du signal du courant statorique (fréquence et/ou amplitude, etc.) ou du signal vibratoire. Ces méthodes ont été appliquées dans notre étude pour le défaut de la cassure des barres. L'analyse du courant statorique par la transformée de Fourier rapide MCSA-FFT est recommandée dans le cas d'une mauvaise qualité causée par un défaut.

De la même façon, et avec l'utilisation de la FFT (MVSA-FFT) sur un signal vibratoire peut être détecté les défauts.

La question qui se pose à présent, est de savoir qu'elle est la technique la plus efficace pour détecter les défauts dans les MAS ?

III.4.1- INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTAS :

Certains défauts dans les machines tournantes sont caractérisés par des phénomènes physiques, se traduisant par des perturbations différentes sur les signaux à traiter; c'est le cas dans les défauts de la rupture de barres. L'existence de ce défaut peut être de faible ou forte amplitudes lorsque le défaut est naissant. Le défaut évolue rapidement, surtout, pour un fonctionnement intensif de la machine (charge variable). Pour cette raison, il est nécessaire de les détecter à une phase précoce ; pour pouvoir éviter des dégâts, il faut planifier une maintenance efficace et sécuriser le système d'utilisation. Les techniques de détection des défauts qui se basent sur l'analyse spectrale de Fourier, ont démontré les meilleures performances dans le diagnostic.

III.4.1.1- la MCSA pour détecter la cassure de barres :

Nous avons vu dans le chapitre III. Les résultats, qui ont été obtenus par la méthode de MCSA-FFT, présentent une grande richesse d'informations sur l'existence du défaut de la CB. Les fréquences et les bandes fréquentielles qui caractérisent le défaut sont clairement présentées dans le spectre du courant statorique, pour les fréquences inférieures et supérieures. Il est important de signaler ici, la difficulté de la détection pour un fonctionnement à vide de la MAS.

III.4.1.1- la MVSA pour détecter la cassure de barres :

La MVSA a été appliquée afin de détecter les signatures du défaut de la rupture de barres. Cette technique a donné de bons résultats, surtout, aux harmoniques supérieurs. Lorsque le glissement $g \approx 0$, les fréquences caractéristiques n'apparaissent pas clairement. De plus, l'amplitude des raies pour les deux fonctionnements est un handicap sérieux pour cette technique. nous amenons à une difficulté sérieuse dans cette partie pour décider l'existence du défaut de la cassure de barre. l'image de vibrations donne des informations limitées sur l'existence du défaut de la cassure des barres

Le niveau de bruit est gênant pour les signaux vibratoires. Et nombreux défauts sont impliqués aux mêmes fréquences.

Les analyses de vibrations ne donnent pas d'informations très significatives. L'amplitude de la composante d'ordre 1 de la fréquence de rotation (f_r) est multipliée tout au long du spectre . Cela nous amène à une difficulté de la détection de quelques défauts qui ont comme base de diagnostic l'existence de la série de la fréquence f_r .

III.5- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploité les résultats expérimentaux; pour détecter le défaut de cassure des barres, par la technique d'analyse des signatures vibratoires du moteur (MVSA) et la technique d'analyse des signatures du courant statorique (MCSA).

Nous avons fait une comparaison des résultats obtenus avec les formules théoriques des fréquences qui caractérisent ce défaut (CB).

La méthode MCSA-FFT est facile et pratique, car le courant à extraire ne demande que des capteurs existants. Nous avons vu les fréquences caractérisées les défauts de cassure des barres très clair dans le spectre du courant statorique avec des amplitudes de les harmoniques très importantes. en plus, nous avons vu le cas de l'excentricité mixte. Pour On a remarqué aussi qu'il y a des fréquences dépendantes à le glissement g et apparaissent lorsque la MAS est en charge ($g \neq 0$).

La MVSA-FFT est la technologie de surveillance la plus utilisée dans l'industrie. D'après l'analyse des fréquences caractéristiques du défaut de la rupture de barres, nous amenons à une difficulté sérieuse dans cette partie pour décider l'existence du défaut de la cassure de barre. L'image de vibrations donne des informations limitées sur l'existence du défaut de la cassure des barres. L'amplitude des harmoniques dans le spectre des signaux vibratoires est généralement faible.

CONCLUSION GENERALE

Avec les progrès technologiques considérables l'être humain est entouré d'outils, de machines et de systèmes de plus en plus sophistiqués. Cette complexité croissante des systèmes rend la tâche de diagnostic plus difficile et son accomplissement implique une grande perte de temps.

Le diagnostic des défaillances dans l'industrie est une solution qui avant tout, garde les employés loin des risques qui surviennent lors de l'apparition d'un défaut mécanique sévère et qui peuvent être dangereux, De même elle réduit les pertes en matières premières qui peuvent être endommagées à cause de la panne, et augmente la productivité de la chaîne de production

Les défauts qui apparaissent dans les machines électriques ont des causes variées. La rupture des barres dans les moteurs a fait l'objet de nombreux travaux.

Pour cela, plusieurs méthodes ont été proposées pour détecter ce défaut et le diagnostiquer. Aujourd'hui, les méthodes de diagnostic progressent continuellement, grâce aux matériels informatiques et le développement du traitement du signal. Parmi celles-ci, on trouve l'analyse du signal du courant statorique (fréquence et/ou amplitude, etc.) ou du signal vibratoire. Ces méthodes ont été appliquées dans notre étude pour le défaut de la cassure des barres

La MVSA a été appliquée afin de détecter les signatures du défaut de la rupture de barres. Cette technique a donné de bons résultats, surtout, aux harmoniques supérieurs. Lorsque le glissement $g \approx 0$, les fréquences caractéristiques n'apparaissent pas clairement. De plus, l'amplitude des raies pour les deux fonctionnements est un handicap sérieux pour cette technique. nous amenons à une difficulté sérieuse dans cette partie pour décider l'existence du défaut de la cassure de barre.

MCSA-FFT, présentent une grande richesse d'informations sur l'existence du défaut de la CB. Les fréquences et les bandes fréquentielles qui caractérisent le défaut sont clairement présentées dans le spectre du courant statorique, pour les fréquences inférieures et supérieures. Il est important de signaler ici, la difficulté de la détection pour un fonctionnement à vide de la MAS.

Références bibliographiques

- [1] N.HALEM « Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du diagnostic par la Méthode des Eléments Finis », Thèse de Doctorat, Laboratoires de Recherche : LGEB et MSE de l'Université de Biskra, Avril 2015.
- [2] A. LEBAROUD « Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, septembre 2006.
- [3] KAZZAZ S.A.S.A., Singh G.K., « Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques », Electric Power Systems Research, vol. 65, p. 197-221, Elsevier, 2003).
- [4] N. BESSOUS « Contribution au Diagnostic des Défaits dans les Machines 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.
- [5] Y. SOUFI « Modélisation et diagnostic d'une association convertisseur machine électrique », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar ANNABA , juin 2012.
- [6] S.BELHAMDI « Diagnostic Des Défaits De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande », Thèse de doctorat, Université de Biskra, Mai 2014
- [7] S. BENNEDJAI « Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar ANNABA , Juin 2016.
- [8] R.CHAOUCHE S.CHETTI «Détection et diagnostic de défauts statorique externe d'un moteur synchrone triphasé à l'aide de la carte ARDUINO MEGA 2560 ».

MASTER en Electrotechnique, Université KASDI Merbah Ouargla, Juin 2016.

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] N. CHIKH « Analyse spectrale des vibrations Application à la maintenance des équipements mécanique », Mémoire de Magister en en génie mécanique Laboratoire : Dynamique des Moteurs et Vibroacoustique, Université M’hamed bougara Boumerdes 2005.
- [12] Diagnostic des défauts par analyse vibratoire.
http://gia.agroparistech.fr:10000/educ/CND_Analyse_des_defauts.pdf
- [13] Analyse vibratoire des machines tournantes.
www.silanus.fr/sin/formationSTI2D/ET22A-B/ET22A/Ressources/hubertfaigner.pdf
- [14] A. DJEBALLI « Diagnostic des défauts des roulements par l’analyse de vibration », MASTER en génie mécanique Option : Mécanique avancée , Université Badji Mokhtar ANNABA 2017.
- [15] B.AKBI, HAMZAOU. M.S « Analyse vibratoire des défauts courants dans le parc machine de la centrale thermique RAS-DJINET », MASTER en génie mécanique Option : Mécatronique, Université M’hamed bougara Boumerdes 2017.