

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



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université d'Echahid Hamma Lakhdhar d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Machines Electriques

Présenté par

GUEMARI Aymen

ZELACI Mohammed

DJANI Fares

Thème

**Contribution au diagnostic des défauts rotoriques
dans les moteurs à induction**

Soutenu le 06/06/2023. Devant le jury composé de :

Dr. TOUIL Slimane

Maitre de conférences A

Président

Dr. BESSOUS Noureddine

Maitre de conférences A

Rapporteur

Dr. AZA Abdelaziz

Maitre de conférences A

Examineur

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Avant tous nous remercions « ALLAH » le tout puissant qui nous a
donné le courage, la

patience, l'aide et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à
notre encadreur Dr. BESSOUS Noureddine , pour suivi continuel
tout

le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous
donner ses conseils et
ses remarques.

Nous remercions également les membres de jury d'avoir accepté et
d'examiner ce travail.

Nous n'oublions pas de remercier tous les enseignants qui ont
contribués durant notre
formation.

Enfin nous voudrions associer à nos remerciements toutes personnes
qui ont
contribué de près ou de loin à ce travail.

الإهداء

الحمد لله الذي رزقنا من العلم ما لم نكن نعلم ووفقنا في هذا

و لم نكن لنصل إليه لولا فضل الله علينا أما بعد:

أهدي ثمرة عملي وجهدي إلى الذين قال فيهما الله عز وجل

﴿ وَقُلْ رَبِّي إِرْحَمُهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا ﴾.

إلى من كان لها الفضل بعد الله في تربيته و تعليمي... إلى من أودع الله في قلبها الرحمة وتحت قدميها

الجنة... أُمِّي الغالية حفظها الله و أُمدها بالعافية و الصحة.

إلى من كان سندي في هذه الحياة و علّمني كيف أصل إلى مبتغاي والنجاح من دعمه المعنوي

والمستمر... أبي العزيز حفظه الله و أُمده بالعافية و الصحة.

وإلى من بهم أكبر وعليهم أعتمد وإلى من بوجودهم أكتسب قوة و محبة لا حدود لها و إلى من عرفت

معهم معنى الحياة إخوتي الأعزاء.

إلى جميع الأصدقاء والأصحاب و الأقارب

"إلى من ذكرهم قلبي و لم يذكرهم قلبي"

" أيمن "

الإهداء

أهدي تخرجي إلى والدي العزيز، الذي كان ولا يزال مصدر إلهام لي. لقد علمني قيم العطاء والتفاني دون انتظار أي مقابل. أتمنى له العمر الطويل وأن يشاهد ثمار نجاحي وتحقيقي للأهداف المستقبلية.

أيضاً، أود أن أهدي تخرجي إلى أُمي الحبيبة، التي كانت ومازالت رمزاً للحب والرعاية في حياتي. كانت دعواتها تشكل قوة دافعة لي واحتضانها يعالج جروحي العاطفية. أنا ممتن لها لكل ما قدمته لي وأتمنى لها السعادة والصحة.

أما إخواني وأخواتي، فأنتم جزء لا يتجزأ من نجاحي، كنتم دعماً قوياً ومصدر إلهام في حياتي أتمنى لكم جميعاً النجاح والسعادة في مسيرتكم الحياتية.

أخيراً، أشكر جميع الأهل والأصدقاء وكل من وقف إلى جانبي ودعمني في رحلتي التعليمية بالخصوص الخال عبد الباسط الذي رافقني منذ الخطوات الأولى في مسيرتي، لقد كنتم رافعة أثق بها وسبباً في تفوقي، أدعو الله أن يكون لكم الخير والتوفيق في حياتكم .

" محمد "

الإهداء

أهدي هذا العمل إلى :

أمي العزيزة

والدي المحترم الذي ضحى بنفسه من أجل نجاحي.

لأخي عوني في الشدائد.

إلى شيعي يزيد الذي كان جزءًا من نجاحي.

إلى إخواني وأخواتي ... إلى كل عائلتي.

إلى أصدقائي الأعزاء.

" فارس "

ملخص:

يحتل اليوم المحرك غير المتزامن مكانا مهما في عالم الصناعة بفضل أهميته و بساطة هيكله و متانته وبسبب إستخداماته العديدة في مختلف المجالات.

هذا الأخير يمكن أن يتعرض لأي خلل في أي وقت و يسبب ذلك خسائر مادية كبيرة، لذلك إكتسبت عملية تشخيص العيوب إهتماما كبيرا.

في هذا العمل، ومن أجل المساهمة في تشخيص العيوب التي يتعرض لها هذا المحرك، حاولنا في هذه الدراسة تشخيص عيب القضبان المكسورة بإستخدام طريقة تحليل التيار الكهربائي و طريقة تحليل الإشارة الإهتزازية و المقارنة بينهم للوصول إلى نتائج أفضل.

الكلمات المفتاحية: الالة غير المتزامنة، التشخيص، إنكسار القضبان، التحليل الطيفي للتيار، التحليل الطيفي للإهتزاز، تحويل 'فوريي' الطيف، التحليل الطيفي.

Résumé

La machine asynchrone occupe aujourd'hui une place importante dans le monde de l'industrie grâce à son intérêt et la simplicité de sa structure du fait de ses nombreuses utilisations dans différentes applications. Ce type de moteur peut être endommagé à tout moment. Cela peut être dû à d'énormes pertes, de sorte que le processus de diagnostic des défauts a attiré une grande attention.

Dans ce travail, et afin de contribuer à la détection, la surveillance des défauts auxquels ce moteur est affecté. Nous avons donc essayé dans cette étude de diagnostiquer le défaut de la cassure de barres rotoriques en utilisant la méthode d'analyse du courant statorique et la méthode d'analyse vibratoire. En plus, on a fait aussi une étude comparative entre les deux techniques afin d'obtenir des bons résultats.

Mots clés : Machine asynchrone, Diagnostic, Cassure de Barres, ASCM , ASVM, Transformée de Fourier rapide, FFT, Analyse spectrale.

Abstract

The asynchronous machine today occupies an important place in the world of industry thanks to its interest and the simplicity of its structure because of its many uses in different applications. This type of engine can be damaged at any time. This may be due to huge losses, so the fault diagnosis process has attracted great attention.

In this work, and in order to contribute to the detection, the monitoring of the faults to which this engine is affected. We therefore tried in this study to diagnose the fault of the breakage of rotor bars by using the method of analysis of the stator current and the method of vibration analysis. In addition, a comparative study was also made between the two techniques in order to obtain good results.

Key words : Induction machine, Diagnosis, Broken bars, MCSA, MVSA, Fourier Fast Transform, FFT, Spectral analysis.

Table des matières

Table des matières		II
Liste des figures		VI
Liste des tableaux		X
Liste des symboles et abréviations		XII
INTRODUCTION GENERALE		02
CHAPITRE – I –		
Etat de l'art du diagnostic des défauts dans les MAS		
I-1	Introduction	05
I -2	La machine asynchrone (MAS)	05
I - 2-1	Constitution de la machine asynchrone	05
I - 2-1-1	Stator	06
I - 2-1-2	Rotor	07
I - 2-1-2-1	Rotor bobiné	07
I - 2-1-2-2	Rotor à cage	08
I - 2-1-3	Les paliers	08
I -2-2	Principe de fonctionnement	09
I -3	Les défauts dans la machine asynchrone	10
I -3-1	Introduction	10
I -3-2	Étude statistique	10
I -3-3	Différents défauts dans la machine asynchrone	11
I -3-3-1	Défauts statoriques	11
I -3-3-1-1	Court-circuit enter phase	12
I -3-3-1-2	Court-circuit entre spire	13
I -3-3-1-3	Circuit ouvert sur une phase	13
I -3-3-1-4	Court-circuit avec le bâti (la carcasse)	13
I -3-3-1-5	Défauts de circuit magnétique	14
I -3-3-2	Défaut rotorique	14
I -3-3-2-1	Défaut de rupture de barres	14
I -3-3-2-2	Défaut de rupture d’anneaux	15
I -3-3-2-3	Défaut d’excentricité	15
I -3-3-3	Défauts mécanique	17
I -4	Causes et conséquences des défaillances	17
I -4-1	Causes des défaillances	17
I -4-1-1	Causes des défauts statoriques	17

Table des matières

I -4-1-2	Causes des défauts rotoriques	18
I -4-1-3	Causes des défauts des roulements à billes	18
I -4-2	Conséquences des défaillances	18
I -5	Technique de diagnostic des défauts dans les MAS	19
I -5-1	Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques	19
I -5-2	Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite	19
I -5-3	Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites	19
I -5-4	Diagnostic par mesure du couple électromagnétique	20
I -5-5	Diagnostic par mesure de la puissance instantanée	20
I -5-6	Diagnostic par mesure du courant statorique	20
I -6	Conclusion	20
CHAPITRE – II –		
Représentation des techniques de diagnostic (MCSA, MVSA)		
II-1	Introduction	22
II-2	Etude approfondie aux cassures de barre	22
II-2-1	Défauts de barres	22
II-2-2	La détection des barres cassées	23
II-2-3	Causes principales des cassures des barres	24
II-2-4	Risques de rupture des barres de rotor	24
II-3	Aperçu sur analyse vibratoire des machines tournant	25
II-3-1	Analyse vibratoire	25
II-3-1-1	Définition d'une vibration	25
II-3-1-2	Principe Analyse vibratoire	25
II -3-1-3	Objectifs d'analyse vibratoire	25
II -3-1-4	Techniques d'analyse	25
II-3-1-5	Avantages et inconvénients de l'analyse vibratoire et les domaines d'applications	26
II-3-2	Caractéristiques d'une vibration	26
II-3-2-1	Fréquence	26
II-3-2-2	Amplitude	27
II -3-2-3	Nature d'une vibration	27
II-4	Etude détaillée "MCSA" et "MVSA"	28
II-4-1	Technique de diagnostic (MVSA)	28
II-4-1-1	Définition d'une MVSA	28
II-4-1-2	Signal vibratoire	28

Table des matières

II-4-1-2-1	Type des signaux	28
II-4-1-2-1-1	Déterministe	28
II-4-1-2-1-2	Aléatoire	29
II-4-1-2-2	Représentation d'un signal vibratoire :	29
II-4-1-2-2-1	La représentation temporelle (fonction du temps)	29
II-4-1-2-2-2	Représentation fréquentielle (fonction de la fréquence)	30
II-4-1-3	Chaine de mesure vibratoire	30
II-4-1-3-1	Capteurs de vibrations	30
II-4-1-3-1-1	Les proximètres (capteurs de déplacements)	30
II-4-1-3-1-2	Les vélocimètres (capteurs de vitesses)	31
II-4-1-3-1-3	Les accéléromètres (capteurs d'accélérations)	31
II-4-1-3-2	Les points de mesure	32
II-4-2	Technique de diagnostic (MCSA)	33
II-4-2-1	Analyse spectrale	33
II-4-2-1-1	principe	33
II-4-2-1-2	Spectre d'un signal	34
II-4-2-1-2-1	Définition d'un signal	34
II-4-2-2	Analyse spectrale de courant statorique (MCSA)	34
II-4-2-2-1	Définitions	34
II-4-2-2-2	Technique de la FFT	35
II-5	Conclusion	36

CHAPITRE – III –

Analyse du défaut de la Cassure de barres en utilisant MVSA et MCSA

III-1	Introduction	38
III-2	Cassure de barres dans les machines asynchrones	38
III-3	Détection du défaut de la cassure des barres par la méthode de MCSA	38
III-3-1	La Méthode de MCSA	38
III-3-2	Résultats expérimentaux de la rupture de barres	39
III-4	Détection du défaut de la cassure des barres par la méthode de MVSA	46
III-4-1	LA METHODE DE MVSA	46
III-4-2	Mesure de vibration pour un défaut dans la cassure des barres	46
III-5	Conclusion	51
	Conclusion générale	53
	Bibliographe	55

Liste des figures

CHAPITRE – I –	
Etat de l'art du diagnostic des défauts dans les MAS	
Figure(I.1) : Les éléments de construction du moteur à induction.	06
Figure(I.2) : Stator d'une machine asynchrone.	07
Figure(I.3) : Rotor bobiné.	07
Figure(I.4) : Rotor à cage d'écureuil.	08
Figure(I.5) : Flasque Palier.	09
Figure(I.6) : Principe de fonctionnement de M.A.S	09
Figure(I.7) : Répartition des pannes selon la compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels pour les moteurs de moyenne puissance.	10
Figure(I.8) % : Répartition des pannes sur les machines asynchrones de faibles ou moyennes puissances.	11
Figure(I.9) : Répartition des pannes sur les machines asynchrones de fortes puissances.	11
Figure(I.10) : Représentation des différents défauts statoriques possible.	12
Figure(I.11) : Court-circuit phase-phase.	12
Figure(I.12) : Court-circuit entre spire.	13
Figure(I.13) : Exemple d'un rotor d'un MI pour : (a) rotor à l'état sain et (b) rotor avec une barre cassée.	14
Figure(I.14) : Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.	15
Figure(I.15) : Défauts d'excentricités.	16
Figure(I.16) : Roulement à bille.	17
CHAPITRE – II –	
Représentation des techniques de diagnostic (MCSA, MVSA)	
Figure (II.1) : Représentation des différentes amplitudes.	27
Figure (II.2) : Nature d'une vibration.	27
Figure (II.3) : les différents types des signaux vibratoires.	29
Figure (II.4) : Les proximètres.	30
Figure (II.5) : Les capteurs de vitesse.	31
Figure (II.6) : Accéléromètre piézoélectrique.	32
Figure. (II.7) : Points de mesure.	32
Figure (II.8) : principe de la surveillance par analyse spectral.	33
Figure (II.9) : Les différents points de mesure.	35

CHAPITRE – III –

Analyse du défaut de la Cassure de barres en utilisant MVSA et MCSA

Figure (III.1) : Photographie des rotors de la MAS de 3 kW pour un état sain (à gauche), une barre cassée (au centre), deux barres cassées (à droite).	39
Figure (III.2) : Courant statorique en fonction du temps ($g=0\%$, 1BC).	39
Figure (III.3) : Spectre du courant statorique avec 1BC (à vide).	40
Figure (III.4) : Spectre du courant statorique (1BC, à vide) ; (a) et (b) : 0-100Hz, (c) et (d) : 200-400Hz.	40
Figure(III.5) : Courant statorique en fonction du temps ($g= 3.6\%$, 1BC).	41
Figure (III.6) : Spectre du courant statorique avec 1BC (en charge).	41
Figure (III.7) : Spectre du courant statorique ($s=3.6\%$, 1BC) ; (a) et (b): 0-100Hz, (c) et (d): 200-400Hz.	42
Figure (III.8) : Courant statorique en fonction du temps ($g= 3.6\%$, 2BC).	42
Figure (III.9) : Spectre du courant statorique avec 2BC (en charge).	43
Figure (III.10) : Spectre du courant statorique avec 2BC(en charge).	43
Figure (III.11) : Fréquences qui correspondent aux ordres 5et7 avec 2BC (en charge).	44
Figure (III.12) : Signal temporel de vibration dans l'état sain et pour 2BC du MAS ; (a) : fonctionnement à vide, (b) : fonctionnement en charge.	46
Figure (III.13) : Spectre du signal vibratoire pour différentes plages de fréquences (2BC, $s=0.004$) ; (a) et (b) :0-200Hz, (c) et (d) :200-400Hz, (e) et (f) :600-800Hz.	47
Figure (III.14) : Spectre d'un signal de vibration pour différentes plages de fréquences (2BC, $s=0.034$) ; (a) et (b) :0-200Hz, (c) et (d) :200-400Hz, (e) et (f) :600-800Hz.	49

Liste des Tableaux

CHAPITRE – II –	
Représentation des techniques de diagnostic (MCSA, MVSA)	
Tableau (II.1) : Avantages et inconvénients de l'analyse vibratoire.	26
CHAPITRE – III –	
Analyse du défaut de la Cassure de barres en utilisant MVSA et MCSA	
Tableau (III.1) : Récapitulation des raies dans le spectre du courant statorique (1BC, 2BC).	45
Tableau (III.2) : Valeurs théoriques et pratiques des harmoniques dans le spectre d'un signal vibratoire (2BC, $s=0.034$, $f_r=24.15\text{Hz}$).	50

***Liste des symboles et
abréviations***

Liste des symboles et abréviations

MAS : Machine asynchrone.

CB : cassure de barre.

ASCM : Analyse des Signatures des Courants du Moteur.

MCSA : Motor Current Signature Analysis.

ASVM : Analyse des Signatures de Vibration du Moteur.

MVSA : Motor Vibration Signature Analysis.

FFT : Fast Fourier Transform.

g : le glissement.

Ω_s : La vitesse de synchronisme.

n : la vitesse de rotation de rotor.

f_s : fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation.

p : le nombre de paires de pôles.

f : Fréquence du mouvement en Hz.

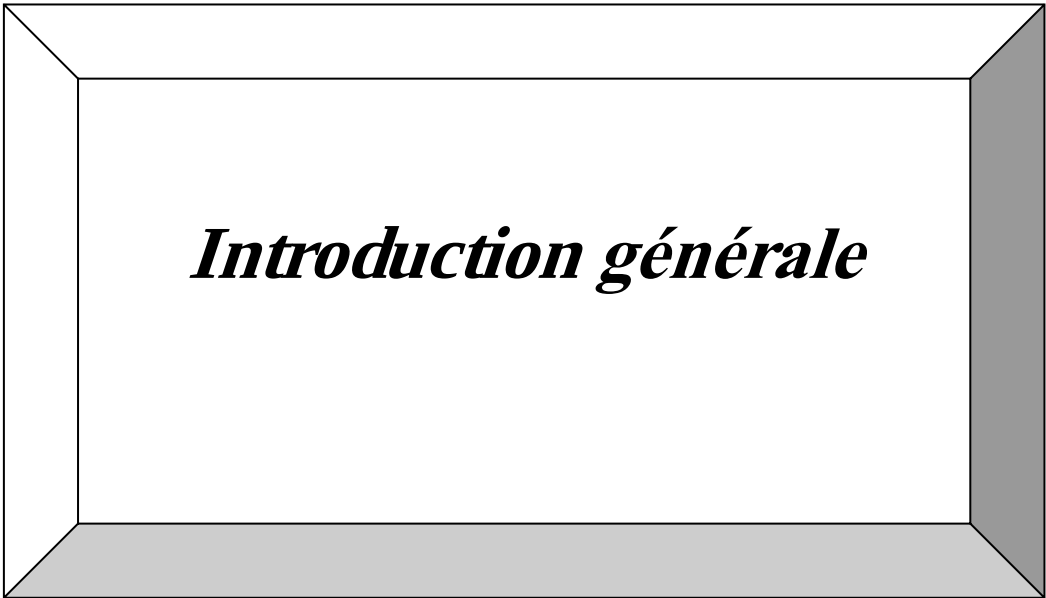
A_c : Amplitude crête.

A_{cc} : L'amplitude crête à crête.

A_{eff} : L'amplitude efficace.

f_s : Fréquence de glissement.

F_{cb} : Fréquence caractéristique du défaut de la cassure de barre.



Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

La machine asynchrone occupe maintenant une grande place dans les applications industrielles. Elle représente jusqu'à 80% des machines utilisées dans les différents domaines. On la rencontre dans les endroits les plus divers de l'éolienne à des applications militaires, de tramway et de train de grande vitesse, voire même de bateaux de croisière.

Cette large utilisation des moteurs à induction est due aux différents avantages qu'il offre, comme sa qualité de robustesse, la quasi-absence d'entretien, l'avantage d'être alimentée directement par le réseau triphasé. Son prix d'achat est moins élevé par rapport à la machine à courant continu et à la machine synchrone [BES 07].

Toutefois, ces machines sont impactées par des défaillances diverses comme la cassure des barres rotoriques, défaut du roulement, court-circuit statoriques, etc. Cela peut conduire à l'arrêt de la production et causer des dommages aux équipements. Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machines.

Il existe plusieurs types de techniques de détection, à savoir l'analyse vibratoire, l'analyse courants, l'analyse vitesse et thermographique, etc [KER 17].

Généralement, les méthodes de diagnostic nécessitent la connaissance de l'état sain de la machine, quelle que soit la grandeur physique exploitée. La détection d'un défaut est alors basée sur la comparaison de la signature d'un état donné avec celle de l'état supposé sain, en difficulté de cette démarche est que, souvent, les indicateurs sensibles existent déjà pour la machine saine (cas de raies d'un spectre). C'est alors leur variation, souvent leur augmentation, qui est susceptible de donner des informations sur la présence d'un défaut. D'autre part, la charge de la machine peut constituer pour le diagnostic un facteur perturbant, car elle induit plusieurs états sains [MES 20].

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur le diagnostic des défauts de la rupture de barres rotoriques d'une machine asynchrone en utilisant la méthode d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA-FFT) et la méthode d'analyse spectrale de la vibration (MVSA-FFT). Dans ce contexte, le mémoire comporte trois chapitres qui sont organisés comme suit :

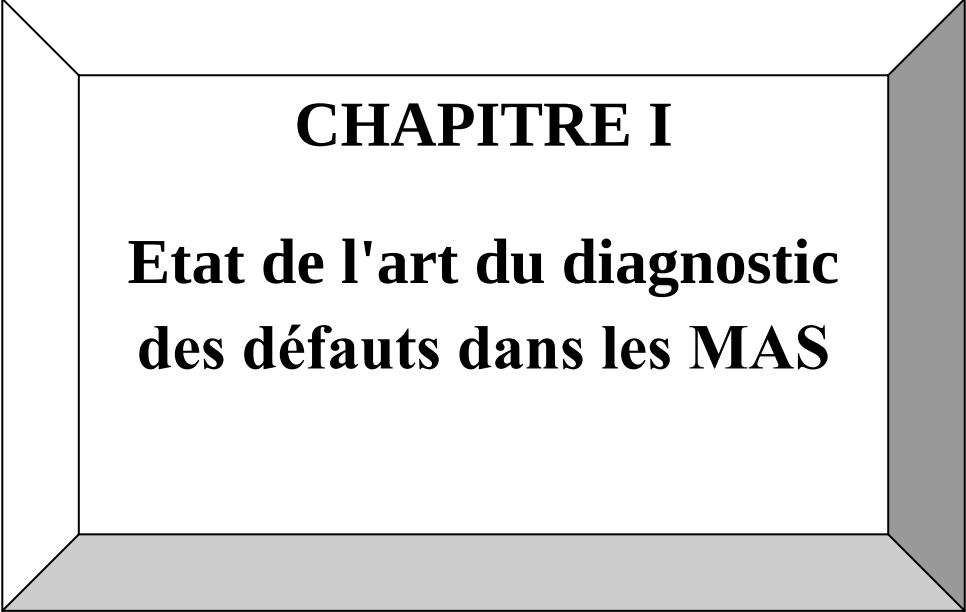
Le premier chapitre consiste en une vision générale sur les machines asynchrones en expliquant leurs composants et le principe de son fonctionnement. En plus, certains défauts dans les machines asynchrones seront cités avec les causes qu'ils peuvent les produire. Quelques techniques de diagnostic des défauts dans les MAS vont mentionner dans ce chapitre brièvement.

Introduction générale

Le deuxième chapitre présente un aperçu général sur le défaut de la cassure des barres et les méthodes d'analyse utilisées dans ce travail qui sont: MCSA-FFT et MVSA-FFT.

Dans le troisième chapitre, on va analyser et discuter les résultats obtenus pour un défaut de la rupture de barres rotoriques en se basant sur les méthodes indiquées dans le deuxième chapitre.

Enfin, nous allons finaliser notre travail par une conclusion générale.



CHAPITRE I

Etat de l'art du diagnostic des défauts dans les MAS

I-1 Introduction

Dans ce premier chapitre, nous présenterons les principaux composants de la machine à induction. Ensuite, nous discuterons des différents types de défauts (électriques et mécaniques) qui peuvent se produire dans la machine. Comme nous verrons comment diagnostiquer les défauts dans une machine à induction pour détecter et localiser les défauts. Les méthodes de diagnostic les plus couramment utilisées sont attentivement décrites.

I -2 La machine asynchrone (MAS)

Le moteur asynchrone, également connu sous le nom de moteur à induction, est le type le plus courant de moteur électrique en usage aujourd'hui. Son principal avantage est l'absence de contacts électriques glissants, ce qui se traduit par une structure simple et robuste qui est facile à construire. La puissance disponible varie de quelques watts à plusieurs mégawatts. Il est connecté directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes et tourne à une vitesse variable légèrement différente de la vitesse synchrone; il est utilisé pour réaliser presque tous les entraînements à vitesse constante. Le moteur asynchrone permet également la réalisation d'entraînements à vitesse variable, et son importance dans ce domaine est en croissance. Plus de 60% de l'énergie électrique consommée dans les pays industrialisés est convertie en énergie mécanique par des moteurs électriques. Malgré sa robustesse, la machine asynchrone, comme tout autre équipement électrique, est sujette à des pannes électriques et mécaniques. En raison des répercussions considérables et coûteuses que la présence d'un défaut peut avoir sur les opérations industrielles, le diagnostic des défauts a reçu beaucoup d'attention au cours des deux dernières décennies [SAM 22].

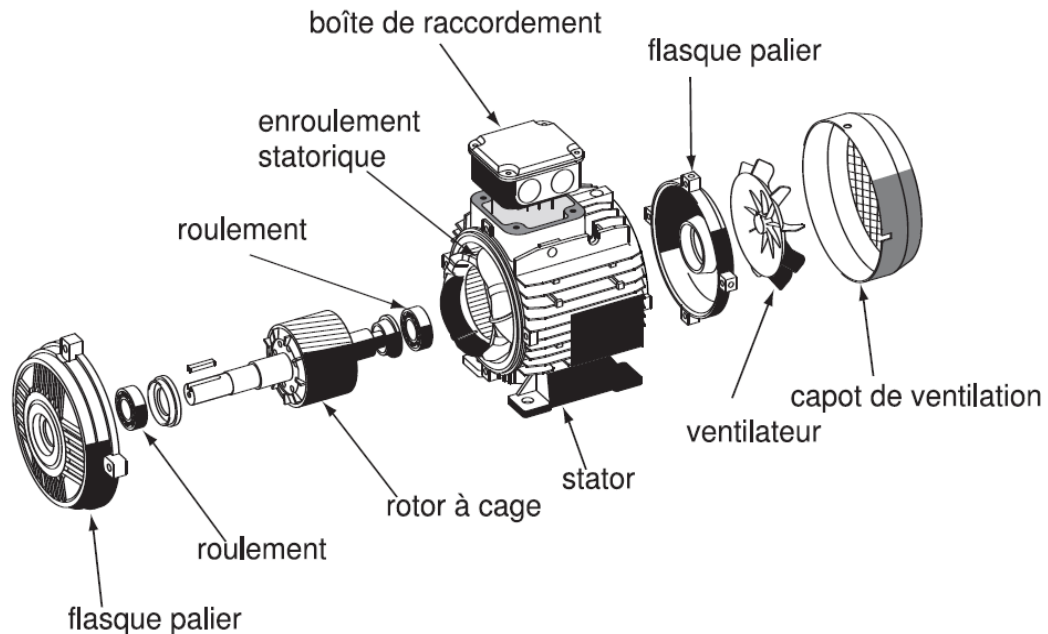
I - 2-1 Constitution de la machine asynchrone

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, seuls 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 [BABA 14].

Le moteur triphasé asynchrone à cage peut également être divisé en trois sous-systèmes :

- 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.

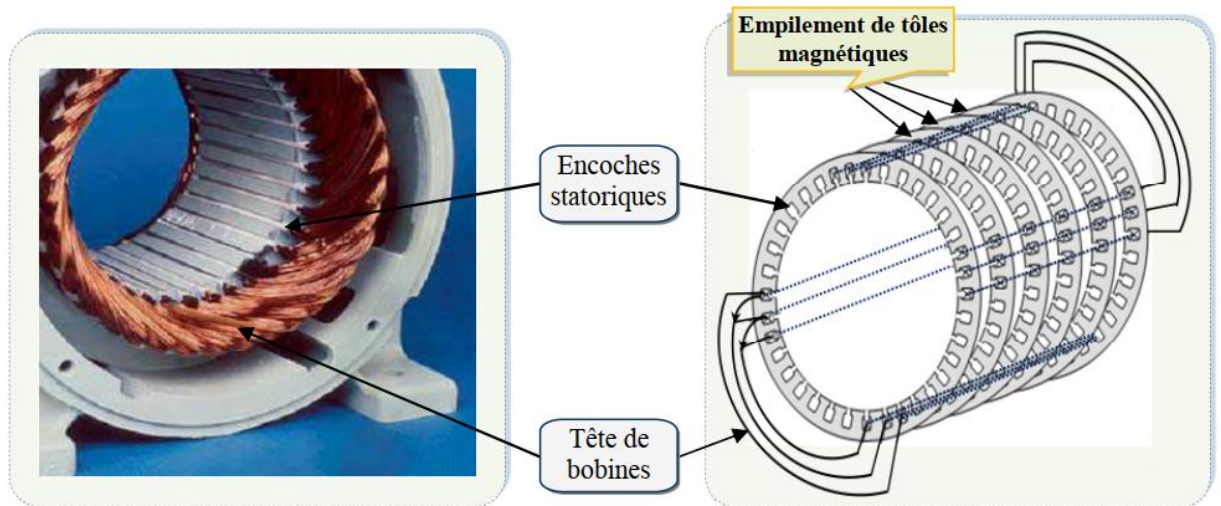
- Les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre du moteur [BAZ 16].



Figure(I.1): Les éléments de construction du moteur à induction [BEN 16].

I - 2-1-1 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 [OUA 22].



Figure(I.2): Stator d'une machine asynchrone [ABD 18].

I - 2-1-2 Rotor

C'est la partie mobile du moteur. A propos du rotor on emploie souvent le terme d'induit ou parfois de secondaire [MES 20].

Les moteurs à induction d'enroulement de rotor sont classés en deux groupes :

- Moteur à induction à rotor bobiné représenté sur la figure (I.3)
- Moteur à induction à cage d'écureuil représenté sur la figure (I.4)

I - 2-1-2-1 Rotor bobiné

Les enroulements rotoriques sont localisés dans les encoches situées à la périphérie du rotor. Ces enroulements sont bobinés de manière à obtenir un enroulement triphasé à « p » paires de pôle. Les bobinages rotoriques sont toujours couplés en étoile, et les trois bornes accessibles sont reliées à la carcasse du stator à l'aide d'un système constitué de trois bagues tournants et de trois balais fixes [BABA 14].



Figure(I.3): Rotor bobiné [BEN 16].

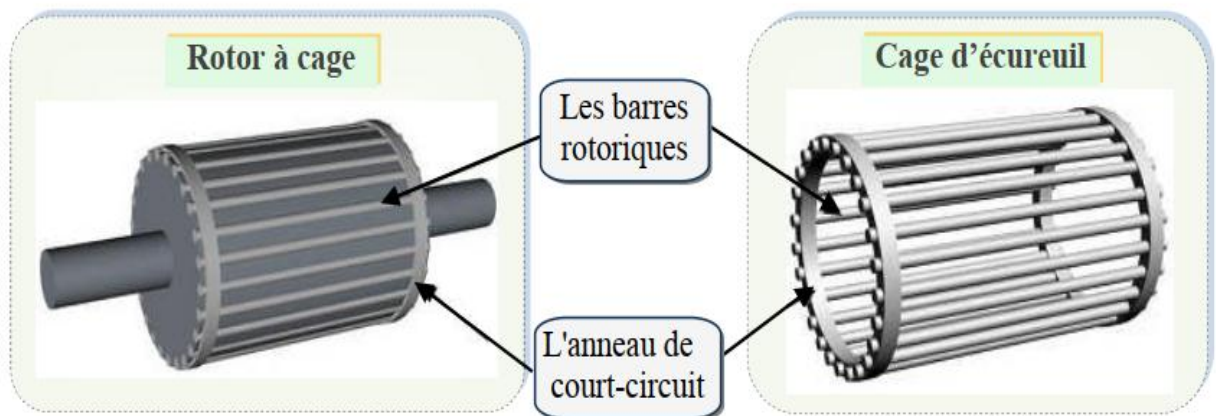
I - 2-1-2-2 Rotor à cage

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur.

Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes) [BES 07].



Figure(I.4): Rotor à cage d'écureuil [ABD 18].

I - 2-1-3 Les paliers

Les paliers qui soutiennent et font tourner l'arbre du rotor sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte sont fixées au carter du stator à l'aide de boulons ou de tiges de serrage, comme le montre la figure I.5. La cage d'écureuil asynchrone est alors formée par l'ensemble qui a été établi [SAM 22].



Figure(I.5): Flasque Palier [BEN 16].

I -2-2 Principe de fonctionnement

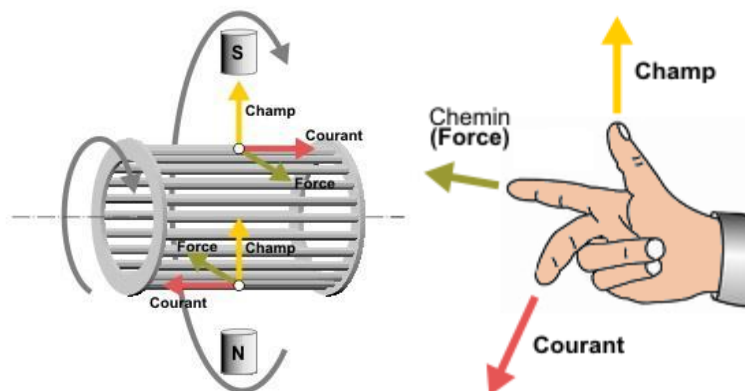
Dans les conducteurs de l'enroulement secondaire (enroulement du rotor), le champ tournant induit des courants qui produisent un second champ ayant pour effet d'entraîner le rotor dans le sens de rotation du champ tournant produit par le stator. la vitesse de rotation du rotor tend à s'approcher de celle du champ tournant mais ne peut jamais l'atteindre. Si cela se produisait, le mouvement relatif du rotor par rapport au champ tournant serait nul de même que les courants induits; par conséquent, le couple d'entraînement serait également nul. La vitesse du rotor est donc légèrement inférieure à la vitesse synchrone ou vitesse du champ tournant; la différence entre les deux vitesses se nomme vitesse de glissement. Dans la plupart des cas, le glissement n'a pas de valeur vraiment significative ni d'utilité pratique si on l'exprime en tours par minute. Pour cette raison, on l'exprime plutôt par rapport à la vitesse synchrone, donc en valeur normalisée. On obtient ainsi la relation: [MES 20]

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

g : le glissement en % ;

n_s : la vitesse de rotation de champ tournant.[tr/min] ;

n : la vitesse de rotation de rotor.[tr/min].



Figure(I.6): Principe de fonctionnement de la MAS [REZ 19].

De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur: le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant [MES 20] :

Dans la MAS, l'onde du champ tournant se déplace dans l'entrefer de la machine avec une vitesse de rotation nommée vitesse de synchronisme Ω_s . Elle est liée à la fréquence d'alimentation f_s par l'expression suivante :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = 60 \times \frac{f_s}{p} (\text{tr/min}) ; \quad (\text{I.2})$$

f_s : fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation [Hz] ;

p : le nombre de paires de pôles [LADG 21].

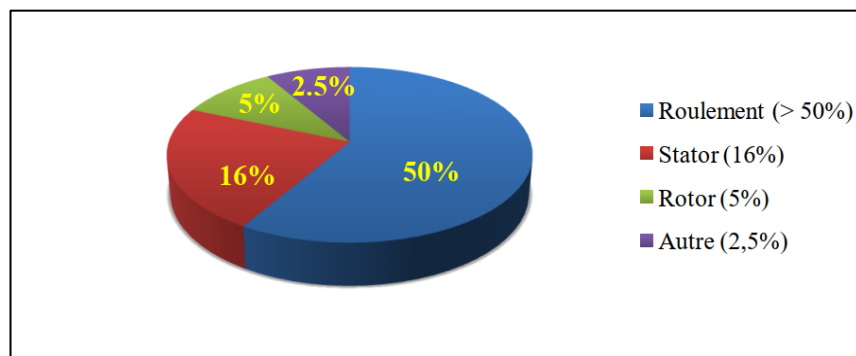
I-3 Les défauts dans la machine asynchrone

I-3-1 Introduction

La sécurité des systèmes est essentielle dans les processus industriels; toute défaillance de l'instrumentation conduit à la production de fausses informations; la machine asynchrone est bien adaptée à l'environnement industriel en raison de sa robustesse; toutefois, la cage d'écureuil asynchrone peut présenter des défauts structuraux, y compris une défaillance totale ou partielle de la barre de rotor et de portion d'anneau. Dans cette section, nous aborderons les différents défauts de la machine asynchrone [SAM 22].

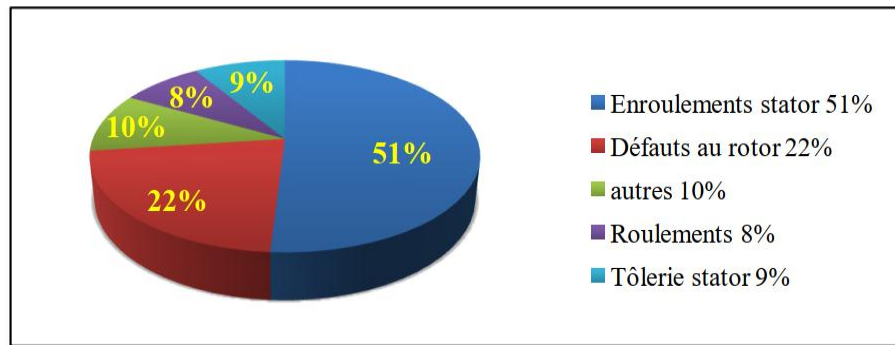
I-3-2 Étude statistique

Dans la littérature, plusieurs études statistiques ont été émises concernant les défauts qui peuvent affecter la machine. Une étude statistique est effectuée en 1988, par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels, sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50kW à 200kW) a donné les résultats suivants : [MAB 17]



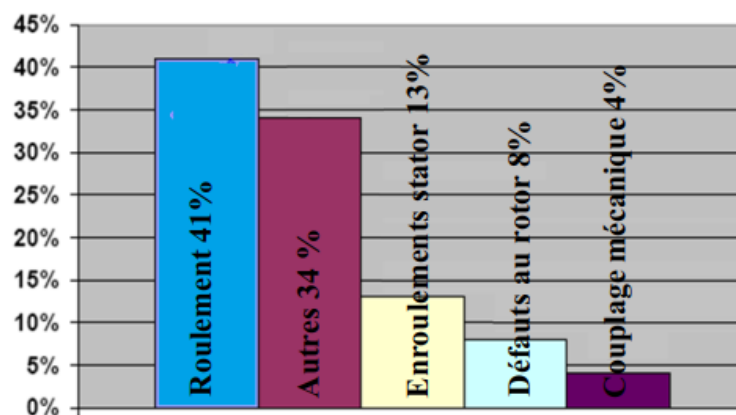
Figure(I.7): Répartition des pannes selon la compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels pour les moteurs de moyenne puissance [BEN 16].

--La même étude montre qu'entre 1973 et 1988 les pannes statoriques ont passées de 78% à 60% et celles du rotor de 12% à 22 %. Cette variation se traduit par l'augmentation de l'utilisation de l'isolation dans cette période. La répartition des différents défauts est comme suit [BEN 16].



Figure(I.8) % : Répartition des pannes sur les machines asynchrones de faibles ou moyennes puissances.

--Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne les résultats suivants :



Figure(I.9):Répartition des pannes sur les machines asynchrones de fortes puissances [MAB17].

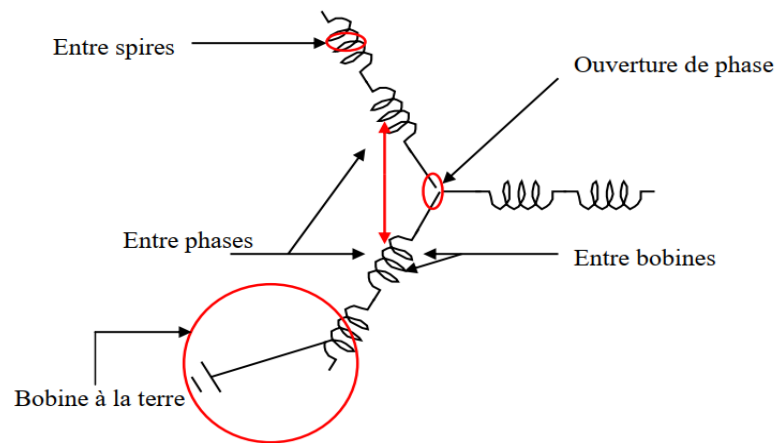
III -3 Différents défauts dans la machine asynchrone.

III -3.1 Défauts statoriques

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants. La quasi totalité de ces défauts sont dus à la dégradation de l'isolant, ils se manifestent sous la forme [BAZ 16] :

- Court-circuit entre phases statoriques.
- Court-circuit entre spires d'une même phase.

- Ouverture d'une phase.
- Court-circuit phase / bâti.
- Défauts de circuit magnétique.



Figure(I.10): Représentation des différents défauts statoriques possible [BES 17].

I -3-3-1-1 Court-circuit enter phase

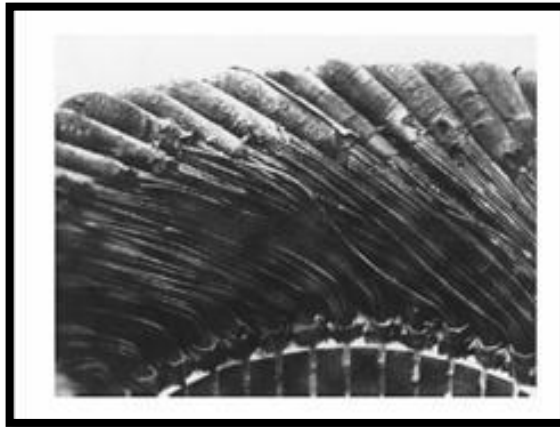
Ce défaut peut arriver en tout point du bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine, Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs. L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage [HAL 15].



Figure(I.11): Court-circuit phase-phase [BES 07].

I -3-3-1-2 Court-circuit entre spire

Le défaut de court-circuit entre spires de la même phase est assez fréquent dans la machine asynchrone, ce défaut 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 aussi le facteur de puissance et amplifiées courants dans le circuit rotorique, Donc, la conséquence est une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant encourager l'apparition d'un 2ème court-circuit, alors un défaut en chaîne. Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut [HAL 15].



Figure(I.12): Court-circuit entre spire [BES 07].

I -3-3-1-3 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 -3-3-1-4 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) [BES 17].

I -3-3-1-5 Défauts de circuit magnétique

Les tôles du circuit magnétique sont feuilletées et isolées entre elles, cependant elles peuvent se retrouver court-circuitées. Les causes les plus fréquentes de défaut de circuit magnétique sont généralement liées à un défaut sévère d'excentricité statique et/ou dynamique qui peut conduire à un contact front entre le stator et le rotor ce qui détruit le circuit magnétique, ou bien court-circuit des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles, ainsi la projection des corps étrangers dans l'entrefer peut entraîner l'abrasion des tôles et ainsi les court-circuitées [MES 20].

I -3-3-2 Défaut rotorique

Les différents défauts relatifs à la partie rotorique peuvent être traduits par.

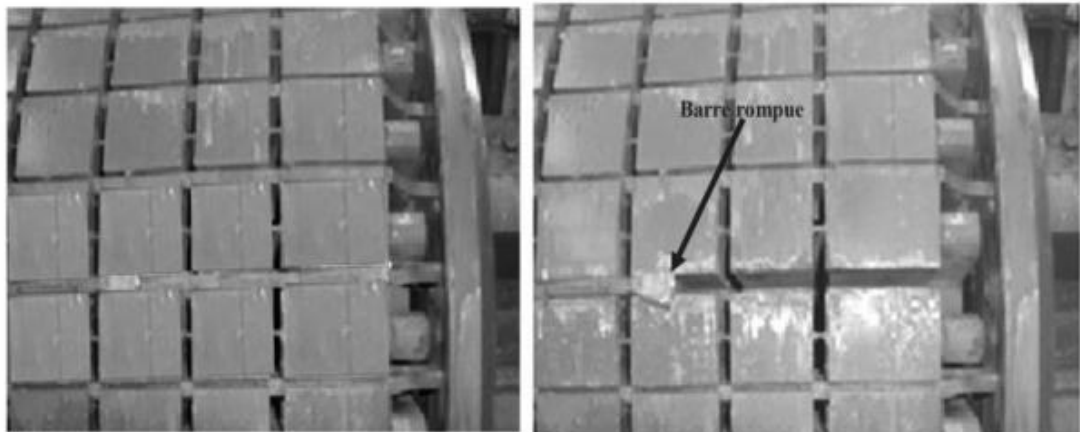
- Les défauts de rupture de barres.
- Les défauts des ruptures d'anneaux.
- Les défauts d'excentricité.

I -3-3-2-1 Défaut de rupture de barres

La rupture des barres rotorique d'une machine asynchrone est un des défauts les plus couramment étudiés, en raison de sa simplicité de réalisation. Ce défaut induit des modifications dans les courants statoriques et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal. En effet, lors du défaut d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produites et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences autour de la fréquence fondamentale f ; telles que :

$$f_{abc} = f_s(\pm 2.k.g) \text{ avec } k = 1, 2, 3 \dots \quad (I.3)$$

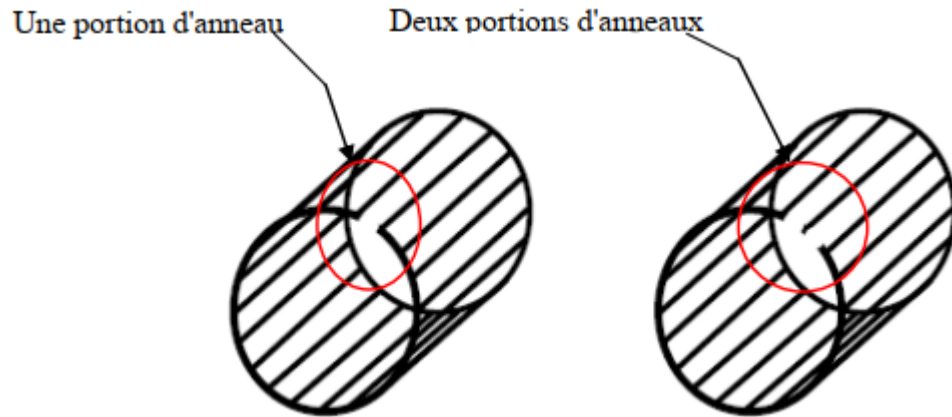
g : glissement, f_s : fréquence d'alimentation statorique,



Figure(I.13): Exemple d'un rotor d'un MI pour : (a) rotor à l'état sain et (b) rotor avec une barre cassée [THOM 03][MAB 17].

I -3-3-2-2 Défaut de rupture 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 Figure (I.14), [BES 17].



Figure(I.14): Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit [BES 17].

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. Telles que : [TOLI 95]

$$(f_{ca}=(1\pm 2k). f_s). \quad (I.4)$$

I -3-3-2-3 Défaut d'excentricité

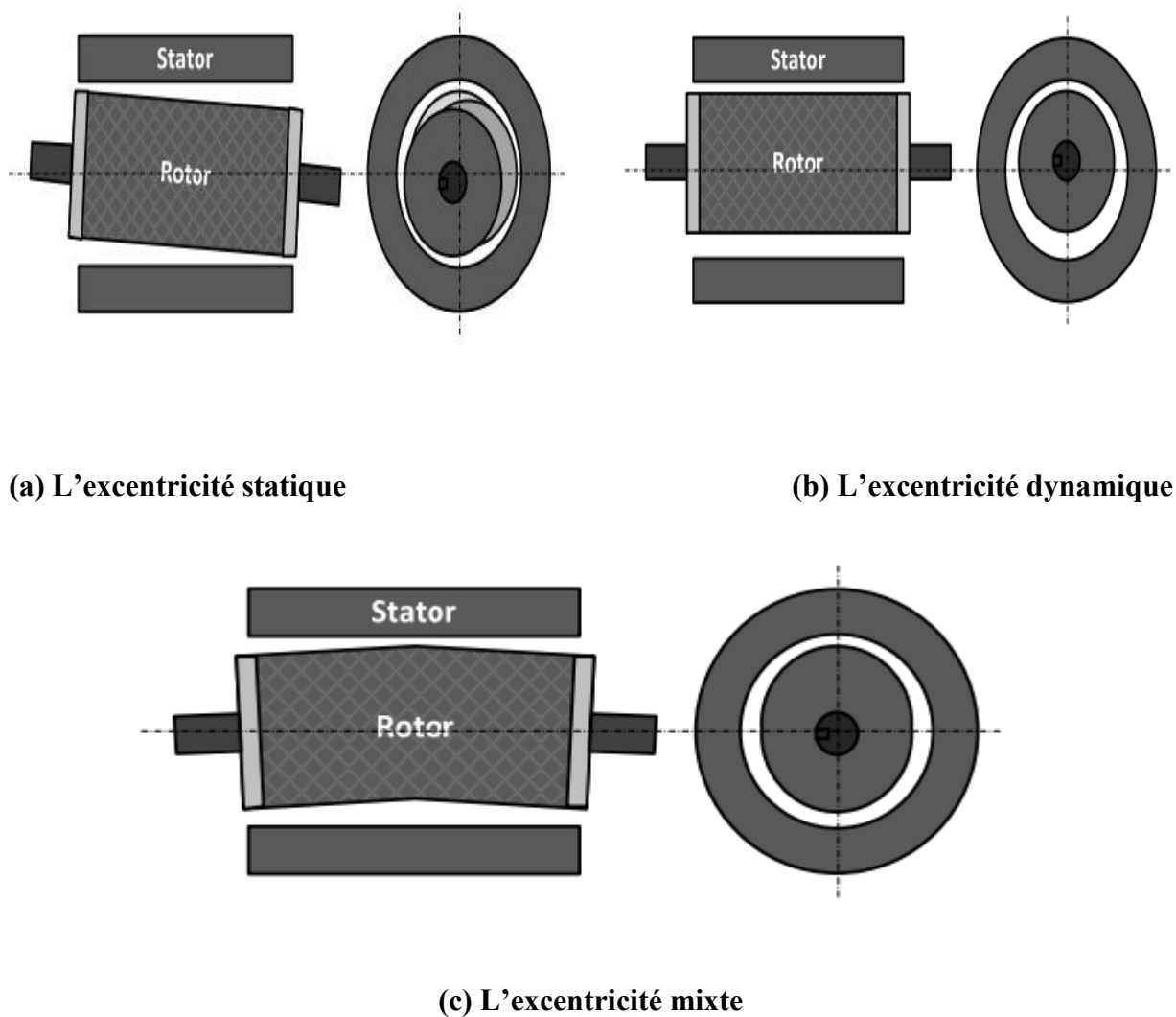
Un défaut d'excentricité dans une machine électrique correspond à un décentrement du rotor par rapport au stator, entraînant une variation de l'entrefer. Il existe trois types de défaut d'excentricité [ABD 18].

- L'excentricité statique : le centre de rotation de l'arbre du rotor est différent du centre géométrique de la machine [MAB 17].

- L'excentricité dynamique : le centre de rotation de l'arbre du rotor tourne autour du centre géométrique de la machine.
- L'excentricité mixte : associant les deux cas précédemment cités.

En réalité, les excentricités statique et dynamique ont tendance à coexister. Même à l'état sain, la machine présente toujours un certain degré d'excentricité mixte résiduelle dû aux inévitables erreurs de fabrication [MAB17].

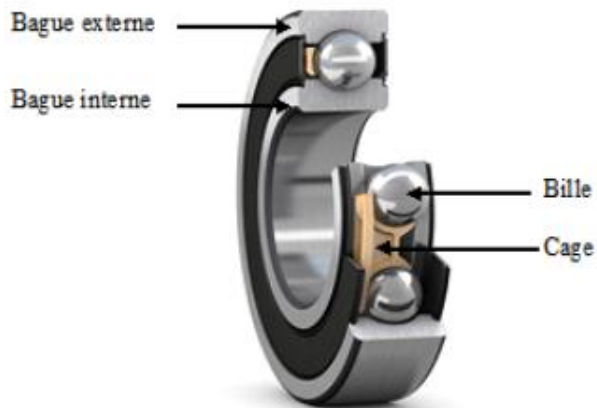
On peut représenter l'excentricité statique et dynamique et mixte de la manière suivante :



Figure(I.15) : Différents types d'excentricité dans les machines électriques [TAL 18]

I -3-3-3 Défauts mécanique

La plupart des défauts observés sur le terrain sont liés à l'usure abrasive, à l'humidité, à la corrosion, au montage incorrect, à des ajustements incorrects des bagues sur l'arbre ou dans le palier, au glissement des éléments roulants, à une pollution imprévue ou à la défaillance de la cage, des joints ou de la lubrification, une charge excessive [TRA 09]. Ils entraînent des effets mécaniques dans les machines tels que l'augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Ces types de défaut induisent également des variations (oscillations) dans le couple de charge de la machine asynchrone. Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor [IBR 09]. La figure (I.16(a)) présente une vue coupe d'un roulement à billes et La figure (I.16(b)) présente un défaut de cage à bille.



(a) roulement à bille.



(b) défaut de cage à bille

Figure(I.16): Roulement à bille [BAZ 16].

I -4 Causes et conséquences des défaillances

I -4-1 Causes des défaillances

Les causes des défauts sont multiples. Elles peuvent être classées en trois groupes : les initiateurs de défauts, les amplificateurs de défauts et les défauts de fabrication [BOUM 01]. La majorité des défauts du rotor et du stator sont provoqués par une combinaison des divers efforts qui agissent sur ces deux composants de la machine.

I -4-1-1 Causes des défauts statoriques

Les défauts statoriques peuvent être dus à plusieurs raisons, parmi lesquelles [LAH 05], [BOUM 01] :

- * Un grand noyau du stator où la température d'enroulements est élevée ;
- * Attachement lâche à la fin de l'enroulement ;
- * Contamination due à l'huile, à la moisissure ou à la saleté ;
- * Cycle de démarrage fréquent ;
- * Surtension, décharges électriques, et fuites dans les systèmes de refroidissement.

I -4-1-2 Causes des défauts rotoriques

Comme pour le stator, les raisons pour les cassures des barres rotoriques et de rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit sont nombreuses [RAZ 02] :

- * Effort thermique dû à l'échauffement de l'anneau de court-circuit et à la différence de la température dans la barre pendant le démarrage (effet de peau) ;
- * Effort magnétique causé par les forces électromagnétiques (flux de fuite d'encoche, excentricité de l'entrefer), bruits et vibrations électromagnétiques ;
- * Effort dynamique dû au couple de charge, aux forces centrifuges ainsi qu'aux efforts cycliques ;
- * Effort environnemental causé par la contamination, l'abrasion des matériels rotoriques due aux particules chimiques.

I -4-1-3 Causes des défauts des roulements à billes

Souvent, mêmes sous des conditions normales de fonctionnement avec équilibre de charge et un bon alignement, les défauts dus à la fatigue, mis à part celles dues au fonctionnement interne normal inhérentes à l'excentricité, peuvent prendre place. D'autres causes externes peuvent exister, telles que [PEN 94] :

- * Contamination et corrosion causées par l'eau et l'acide...
- * Lubrification impropre.
- * Installation impropre de roulement dû au désalignement de la machine.

I -4-2 Conséquences des défaillances

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total [BEL 17]. On cite parmi les conséquences des défauts:

- Effectuassions au niveau du couple et de la vitesse.
- Appel supplémentaire de courant.
- Déséquilibre au niveau de la tension et de courant de ligne.
- Augmentation des arrêts non programmés, des pertes de production et par conséquent le rendement global.

I -5 Technique de diagnostic des défauts dans les MAS

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de la maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de cette installation. D'après la littérature, les principales techniques du diagnostic utilisées sont les suivantes :

I -5-1 Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [SAH 03]. Les vibrations de la machine peuvent être captés par des accéléromètres. Les spectres des signaux de vibration, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsqu'elle est en bon état. Puisque la force magnéto motrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, l'excentricité), ceci permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques.

I -5-2 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans la machine idéale et sans défauts, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de la tension induite dans cette bobine, peut être exploité pour détecter les différents défauts [SAH 03] [SON 21].

I -5-3 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques, pendant la déconnexion du moteur de réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évités [SAH 03] [ABD 06].

I -5-4 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur [SAH03][DID21].

I -5-5 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

La puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [SAH 03][KER 16].

I -5-6 Diagnostic par mesure du courant statorique

Cette méthode est un outil puissant pour détecter la présence des défauts mécaniques et électriques. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes, parce qu'elle ne demande ni l'introduction d'un capteur au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant mais seulement un capteur de courant (sonde à effet de hall ou transformateur de courant) qui donne une image sur le courant de phase statorique [BEN 18].

I -6 Conclusion

Le présent chapitre est principalement dédié à l'état de l'art concernant le diagnostic des défauts de la machine asynchrone. Il comprend quelques rappels sur les termes et notions utilisés dans le domaine du diagnostic. Une description de la constitution de la machine asynchrone est également fournie, ainsi qu'une présentation des différents types de défauts pouvant affecter la machine et de leurs origines. Enfin, une vue d'ensemble des méthodes utilisées dans le diagnostic des défauts de la machine a été présentée.

Le deuxième chapitre de ce travail sera consacré à l'étude et à la détection des défauts de la cassure de barres dans le rotor d'un moteur asynchrone.

CHAPITRE II

Représentation des techniques de diagnostic (MCSA, MVSA)

II-1 Introduction

La détection précoce des défauts des machines tournantes nécessite la connaissance des symptômes relatifs à chaque défaut et les outils (méthodes) adéquats pour les détecter. C'est-à-dire, les méthodes nécessaires pour confirmer l'existence ou non de ces symptômes au niveau du signal temporel. Mais en pratique, cette tâche n'est pas une chose simple, à cause de la complexité du signal temporel qui véhicule le comportement vibratoire normal et anormal de toute la machine auquel s'ajoute la difficulté d'associer pour chaque défaut ces propres symptômes puisque certains de ces derniers sont communs à plusieurs défauts. Ce chapitre va présenter les techniques à exploiter dans la partie d'analyse.

II-2 Etude approfondie de la cassure des barres

La cassure ou rupture de barres est l'un des défauts le plus fréquent 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 il se résulte 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 des barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de Barres cassées [LABD 17].

II-2-1 Défauts de barres

On peut diviser les machines selon le rotor aux deux types : types à cage rotorique coulée et les autres types à cage fabriquée, les machines à cages rotoriques fabriquées sont employées dans des applications spéciales et peuvent être utilisées pour fréquences plus élevées, mais on trouve les autres machines qui contiennent des cages rotoriques coulées dans les petits moteurs, actuellement employés même pour des moteurs pouvant atteindre les 3 MW, et cela grâce au développement remarquable des techniques de moulage. Cependant, ceux-ci présentent l'inconvénient de ne pouvoir être réparés, suite à une cassure partielle ou bien totale de barres [VIC05].

Suivant la puissance du moteur, la cage d'écureuil à des barres en cuivre ou en aluminium. Il peut donc exister ou non des courants inters-barres. Le modèle diffère pour la simulation car le rang de la matrice afférent au rotor n'est plus constant [BES 07]. Il y a des méthodes utilisées pour détecter les défauts ; c'est-à-dire les cassures de barre, dépendent l'analyse spectrale des signaux du courant pour la détection des défauts dans les barres

rotoriques, on peut trouver que quelques défauts peuvent apparaître dans telles intervalles des fréquences présentée en la relation suivante :

$$fb = (1 \pm 2g)f \quad (\text{II.1})$$

La composante $(1-2g)f$ du courant interagit avec le fondamental du flux de l'entrefer et produit des ondulations dans la vitesse à la fréquence $2gf$, ce qui provoque une augmentation de la composante du courant aux fréquences :

$$fb = (1 \pm 2kg)f \quad (\text{II.2})$$

L'inertie de la charge affecte également l'amplitude du courant à ces fréquences, et d'autres composantes spectrales sont observées pour [BES 07]:

$$fb = \left[\left(\frac{k}{p}\right)(1-g) \pm g\right]f \quad (\text{II.3})$$

Un autre travail est présenté concernant la détection des barres rotoriques cassées par l'utilisation des signaux de tensions et de courants statoriques destinés à l'estimation simultanée de la vitesse et de la résistance rotorique. Cette dernière est comparée à sa valeur nominale pour détecter les barres cassées en tenant compte de l'influence de la température.

Une autre méthode donnée dans telle référence, a mentionnée l'existence de deux défauts rotoriques, le premier est l'oscillation de l'arbre le long de l'entrefer, qui cause la variation de la densité du flux dans ce dernier, l'oscillation produit alors des harmoniques de courant statorique pour fréquences prédites par :

$$f_{osc} = f \cdot \left(\frac{k(1-g)}{p \pm 1}\right) \quad (\text{II.4})$$

Le deuxième défaut est l'asymétrie du rotor qui perturbe la densité du flux dans l'entrefer [FIL98], les fréquences des composantes spectrales de la densité du flux dans l'entrefer sont données par [BES 17]:

$$f_{ra} = f \cdot \left(\frac{k(1-g)}{p} \pm g\right) \quad (\text{II.5})$$

II-2-2 La détection des barres cassées

La détection des barres cassées, dans les moteurs asynchrones à cage d'écureuil par l'outil paramétrique, est basée sur l'hypothèse que la résistance apparente du rotor d'un moteur augmente quand une barre ou une portion d'anneau de court-circuit du rotor se casse. Ici, la résistance apparente du rotor est celle qui est située dans le modèle électrique équilibré par phase d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil. Pour détecter les cassures des barres et des portions

d'anneau de court-circuit de la cage du rotor, des mesures de courant du stator, de tension du stator, la fréquence d'excitation du stator, et la vitesse du rotor sont effectuées. Ces mesures sont traitées par un estimateur de moindres carrés récursifs pour évaluer les états et les paramètres du moteur. En particulier, on estime la résistance apparente du rotor et on la compare avec sa valeur nominale pour détecter les défauts [BES 17].

II-2-3 Causes principales des cassures des barres

Une barre cassée signifie que le courant circulant dans celle-ci est nul et le courant qui circule à travers cette barre se répartit sur les autres barres adjacentes. Ces dernières seront surchargées, et provoquera des ruptures, et parfois un arrêt total de la machine. Les cassures de barres peuvent être de natures différentes. Les phénomènes qui peuvent accompagner la rupture de barres dans une cage rotorique sont:

- Contraintes thermiques dues aux surcharges thermiques, points chauds, pertes excessives, et/ ou étincelles
- Contraintes magnétiques dues aux forces électromagnétiques, traction magnétique déséquilibrée, bruit et/ou vibrations électromagnétiques.
- Contraintes résiduelles dues aux problèmes de construction [BEND 18].
- Contraintes dynamique dues aux couples de charges, aux forces centrifuges, ainsi que les contraintes cycliques.
- Contraintes environnementales causées par la contamination, l'abrasion des matériels rotoriques due aux particules chimiques etc....
- Contraintes mécaniques dues aux pertes dans les tôles, la fatigue des parties du rotor et le défaut de roulements [LAHC 05].

II-2-4 Risques de rupture des barres de rotor

Thomson a rapporté que durant ces dix dernières années, des études ont montré que la rupture des barres rotoriques peut être un problème grave pour certaines machines asynchrones ; bien que la cassure des barres ne mène pas immédiatement la machine à l'arrêt complet, leur décollement des encoches rotoriques peut endommager les enroulements statoriques, de plus si l'environnement est explosif les étincelles provoquées à l'emplacement du défaut pendant le processus de dégradation peut être un risque potentiel en matière de sécurité [BOUA 17].

II-3 Aperçu sur analyse vibratoire des machines tournant

II-3-1 Analyse vibratoire

II-3-1-1 Définition d'une vibration

La norme ISO 2041 " Vibrations et chocs - Vocabulaire (Août 1990)" ,définit la notion de vibration comme suit: "Variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence". un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence [NAD 20].

II-3-1-2 Principe Analyse vibratoire

Le principe de l'analyse vibratoire est basé sur l'idée que les structures des machines, excitées par des efforts dynamiques, donnent des signaux vibratoires dont la fréquence est identique à celle des efforts qui les ont provoqués. La mesure globale prise en un point est la somme des réponses vibratoires de la structure aux différents efforts excitateurs.

On peut donc, grâce à des capteurs placés en des points particuliers, enregistrer les vibrations transmises par la structure de la machine, et par leur analyse, identifier l'origine des efforts auxquels elle est soumise. De plus, si l'on possède de la signature vibratoire de la machine en état de bon fonctionnement, on pourra, par comparaison, apprécier l'évolution de son état ou déceler l'apparition d'efforts dynamiques nouveaux consécutifs à une dégradation en cours de développement [HAM 09].

II -3-1-3 Objectifs d'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- La détection des défauts.
- L'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- soit dans le domaine temporel.
- soit dans le domaine fréquentiel [DJE 13].

II -3-1-4 Techniques d'analyse

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance, il existe différentes techniques d'analyse tels que l'analyse vibratoire, l'émission acoustique, la thermographie, l'analyse des huiles et des lubrifiants, la variation de résistance dans un circuit électrique, etc.

Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts, on établit une courbe d'évolution de l'indicateur au cours du temps. Sur cette courbe, on définit différents seuils correspondant à un niveau d'alerte, à une alarme, à un niveau de défaillance, ces niveaux sont établis soit par expérience soit en appliquant une norme pour les roulements, on utilise des abaques de sévérité vibratoire pour définir les différents seuils [DJE 13].

II-3-1-5 Avantages et inconvénients de l'analyse vibratoire et les domaines d'applications

Tableau(II.1) Avantages et inconvénients de l'analyse vibratoire [NAC 15]

	Avantages	inconvénients	Domaines d'applications
Analyse de vibration	- Détection de défauts à un stade précoce. - Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi. - Autorise une surveillance continue. - Permet de surveiller. - L'équipement à distance	- Spectres parfois difficile interpréter. - Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses	- Découverte des défauts de tous les éléments cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure

II-3-2 Caractéristiques d'une vibration

II-3-2-1 Fréquence

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz (Hz). Une vibration qui se produira 50 fois par seconde aura donc une fréquence de 50 hertz. 1 hertz = 1 cycle / seconde Le hertz est la fréquence d'un phénomène périodique dont la période est 1 seconde [BEN 04].

II-3-2-2 Amplitude

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre. On peut définir :

- L'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelle amplitude crête (A_c) au niveau crête.
- L'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête (A_{cc}) ou niveau crête à crête.
- L'amplitude efficace (A_{eff}), aussi appelée RMS (Root Mean Squar) ou niveau efficace [NAD 20].

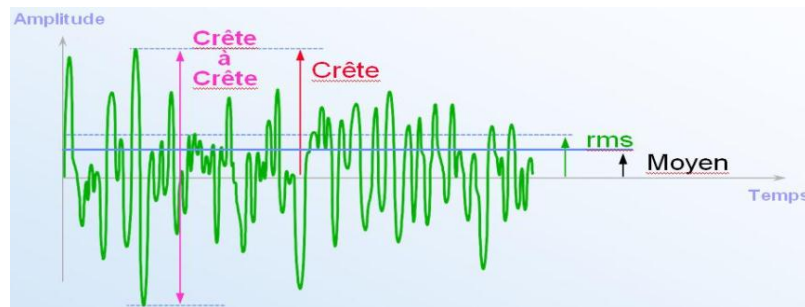


Figure (II.1) : Représentation des différentes amplitudes [BEN 18].

II -3-2-3 Nature d'une vibration

Une machine tournante quelconque en fonctionnement génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante:

- 1) Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple (fig II.2. a) ou sinusoïdal complexe (fig II.2. b) représentatives du fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques.
- 2) Les vibrations périodiques de type impulsionnel (fig II.2. c).
- 3) Les vibrations aléatoires de type impulsionnel (fig II.2. d) provoqué par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe [KHEL 19].

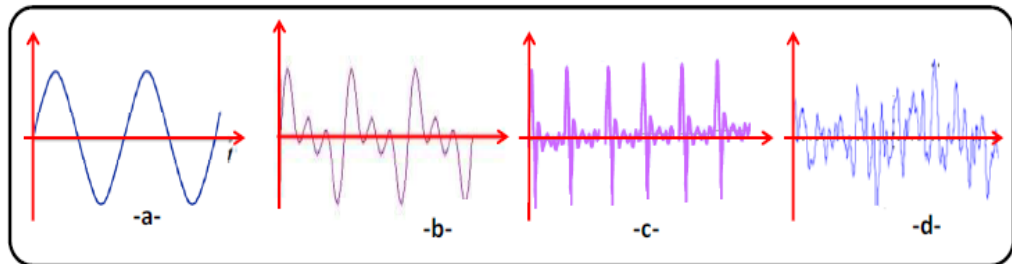


Figure (II.2) : Nature d'une vibration [BOUG 20].

II-4 Etude détaillée "MCSA" et "MVSA"

II-4-1 Technique de diagnostic (MVSA)

II-4-1-1 Définition d'une MVSA

La méthode technique Motor Vibration Signature Analysis (MVSA) est une technique d'analyse des vibrations utilisée pour évaluer l'état de santé des moteurs électriques.

L'analyse MVSA consiste à mesurer les vibrations produites par le moteur électrique pendant son fonctionnement normal à différentes fréquences, puis à analyser les signaux pour identifier les fréquences caractéristiques des défauts du moteur, tels que les déséquilibres, les défauts de roulements, les fissures de l'arbre, etc.

En utilisant cette méthode, il est possible de diagnostiquer les problèmes et les défauts des moteurs électriques avant qu'ils ne deviennent critiques et causent des temps d'arrêt coûteux. Les données recueillies lors de l'analyse MVSA peuvent également être utilisées pour planifier la maintenance préventive et prolonger la durée de vie du moteur.

II-4-1-2 Signal vibratoire

II-4-1-2-1 Type des signaux

II-4-1-2-1-1 Déterministe

Des signaux (périodique ou non périodique) dont l'évolution en fonction du temps peut être parfaitement décrite par un modèle mathématique. Ces signaux proviennent de phénomènes pour lesquels on connaît les lois physiques correspondantes et les conditions initiales, permettant ainsi de prévoir le résultat. Les signaux non périodiques se composent

d'une part des signaux pseudopériodiques formés d'une somme de sinusoïdes de périodes différentes et d'autre part des signaux transitoires dont l'existence est limitée dans le temps. Ces signaux "certains" peuvent en principe être reproduits rigoureusement identiques à eux-mêmes [MOKH 19].

II-4-1-2-1-2 Aléatoire

Le signal aléatoire fait intervenir deux notions :

- La notion de signal c'est à dire une mesure qui dépend d'un ou plusieurs paramètres d'espace, le plus souvent le temps.
- La notion d'aléatoire qui fait que, à un instant t donné, la mesure n'est pas certaine mais dépend du hasard. Cet aspect est appelé l'aspect stochastique et on parle indifféremment de signal aléatoire ou de signal stochastique.

Ce sont les signaux qui ont caractère non reproductible et imprévisible [MOKH 19].

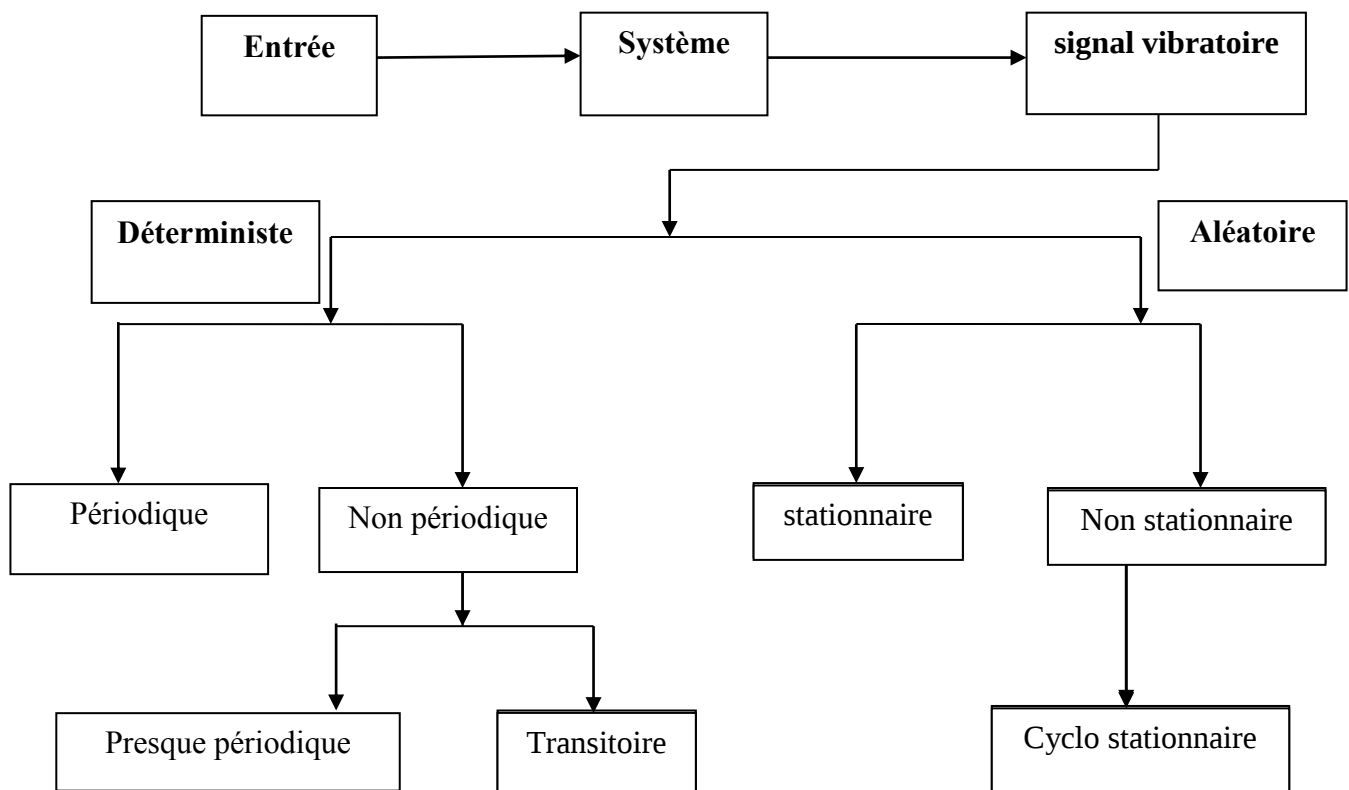


Figure (II.3) : les différents types des signaux vibratoires [NAB 11].

II-4-1-2-2 Représentation d'un signal vibratoire

II-4-1-2-2-1 La représentation temporelle (fonction du temps)

La représentation en fonction du temps est utilisée pour suivre le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ces paramètres de fonctionnement. Cette représentation est simple à exploiter (analyser) s'il s'agit d'une vibration sinusoïdal (simple), elle devient inexploitable lorsque le signal est considéré complexe [REDJ 17].

II-4-1-2-2 Représentation fréquentielle (fonction de la fréquence)

Afin de rendre un signal vibratoire complexe sous une représentation temporelle exploitable, il faut le représenter par rapport à la fréquence, c'est-à-dire, chacune des composantes du signal complexe doit être représenté par son amplitude par rapport à sa fréquence qui représente inverse de la période, par cette représentation chaque composante caractérise une anomalie affectant la machine [REDJ 17].

II-4-1-3 Chaîne de mesure vibratoire

Le transducteur (capteur de vibration) soumis à la vibration converti les effets mécaniques de celle-ci en signal électrique pré-amplifié ayant la forme de la vibration. Ce signal est reçu soit par un mesureur qui effectue une mesure de niveau global soit par un analyseur qui effectue une analyse de fréquence.

II-4-1-3-1 Capteurs de vibrations

La mesure de n'importe quelle grandeur physique variable est effectuée par un système d'instrumentation dont les premiers composants sont les capteurs.

II-4-1-3-1-1 Les proximètres (capteurs de déplacements)

Le proximètre, ou sonde de proximité [figure II.4], est un capteur de déplacement sans contact qui produit un signal électrique directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor. Il est monté en permanence à l'intérieur du palier. Ces mesures seront limitées aux basses fréquences (< 100 Hz) [KHEL 19].



Figure (II.4) : Les proximètres.

II-4-1-3-1-2 Les vélocimètres (capteurs de vitesses)

Les capteurs de vitesse (figure II.5), ou vélocimètres, sont constitués d'une sonde à contact appelée sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. Les vélocimètres les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté. La vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension électrique proportionnelle à la vitesse de mouvement de la bobine.

La fréquence de résonance de ce type de capteur se situe généralement entre $8\ 15 \rightarrow Hz$ et la gamme dynamique s'étend de $10\ 20\ 2000 / Hz$ [KHEL 19].

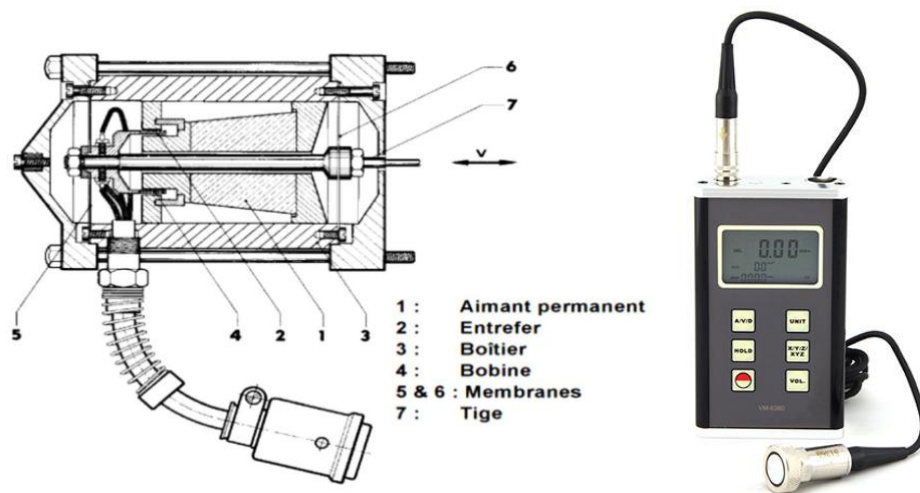


Figure (II.5) : Les capteurs de vitesse [BEN 18].

II-4-1-3-1-3 Les accéléromètres (capteurs d'accélérations)

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. Schématiquement (figure II.6), un accéléromètre est composé d'un disque en matériau piézoélectrique qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte. Quand la masse se déplace sous l'effet d'une accélération, elle exerce sur le disque piézoélectrique des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération [ELF 12].

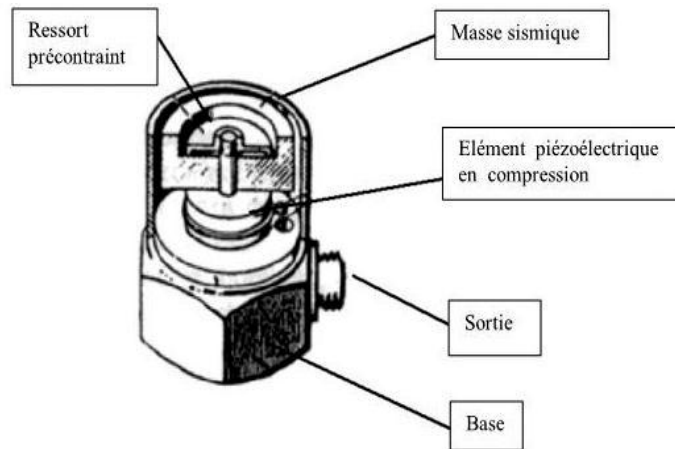


Figure (II.6) : Accéléromètre piézoélectrique [DJE 13].

II-4-1-3-2 Les points de mesure :

La plupart des vibrations de machines sont issues des parties tournantes ou oscillantes. Elles peuvent être d'origine mécanique, électromagnétique, hydraulique, etc. Elles sont transmises à la structure par l'intermédiaire des paliers, et aux fondations par l'intermédiaire des paliers, et aux fondations par l'intermédiaire des fixations. On conçoit aisément que les meilleurs points de mesurage dans le cadre de la maintenance des machines sont les paliers et qu'il serait déraisonnable de prendre des mesures sur le cadre [NAD 20].

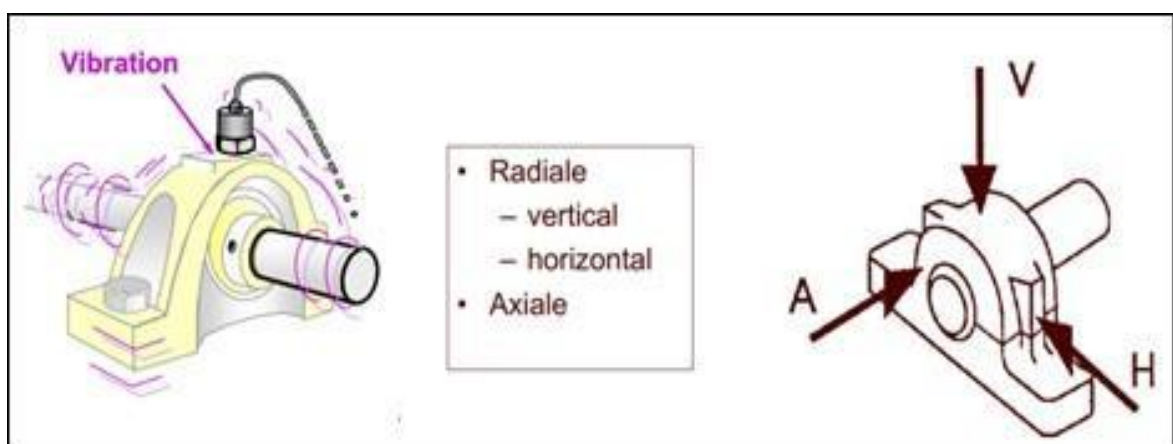


Figure. (II.7) : Points de mesure [NAD 20].

II-4-2 Technique de diagnostic (MCSA)

Les méthodes basées sur l'examen du courant statorique sont désignées sous le nom de "Analyse des Signatures des Courants du Moteur (ASCM)" qui a l'abréviation en Anglais (MCSA) qui signifie "Motor Current Signature Analysis". 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. Cette méthode est très utilisée car elle est simple, peu coûteuse et la partie expérimentale est facile à exécuter. Elle est très populaire dans la détection des défauts statoriques et plus particulièrement des défauts de court-circuit entre spires de l'enroulement statorique [BABA 14].

II-4-2-1 Analyse spectrale

L'analyse spectrale permet de décomposer un signal complexe en ses constituants de base. L'analyse spectrale permet de représenter l'amplitude d'un signal en fonction de la fréquence.

II-4-2-1-1 principe

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones à cage, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans le bobinage. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquence directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

La surveillance par analyse spectrale de la MAS consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut.et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont les grandeurs mécanique (vibration, couple électromagnétique, vitesses) [BOUA 20].

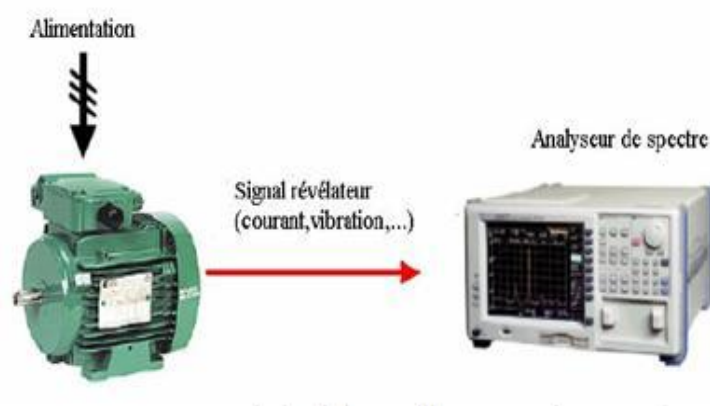


Figure (II.8) : principe de la surveillance par analyse spectral [DID 21].

II-4-2-1-2 Spectre d'un signal**II-4-2-1-2-1 Définition d'un signal**

La mesure d'une grandeur physique est représentée par un signal. Les grandeurs physiques mesurées incluent le signal sismique, la mesure du pouls, le déplacement, le voltage, l'intensité, et d'autres encore. Actuellement, la plupart des grandeurs physiques sont converties en signaux électriques, qui sont ensuite encodés en signaux numériques binaires. Il y a très peu de mesures qui restent totalement analogiques.

II-4-2-2 Analyse spectrale de courant statorique (MCSA)**II-4-2-2-1 Définitions**

L'analyse spectrale du courant statorique : est une méthode de contrôle qui consiste à analyser le spectre du courant statorique sachant que dans un spectre d'un moteur sans défaut, apparaît la composante du fondamental à la fréquence du réseau d'alimentation en régime permanent, accompagnée des composantes à faibles et hautes fréquences qui sont dues à la géométrie de la machine considérée.

Un bon équipement d'analyse de spectre (grande de sensibilité) et la comparaison entre les spectres du courant d'un moteur avec défaut et celui de la référence (le spectre du courant d'un moteur sans défaut), permet d'avoir une bonne analyse et obtenir la maximum d'information sur l'état de moteur.

Cette méthode est utilisée lors de fonctionnement normale du moteur (moteur en marche) ce qui facilite beaucoup la surveillance de la machine et indique à chaque instant l'état de leur fonctionnement [BOUA 20].

L'analyse du courant statorique : est un outil puissant pour détecter la présence d'anomalies mécaniques et électriques, non seulement dans le moteur, mais également dans la charge.

Des améliorations considérables sont apportées à cette technique qui est dénommée dans la littérature.

- Parmi tous les signaux utilisables, 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.
- Cette technique est dénommée dans la littérature par "Motor Current Signature Analysis" (MCSA) [BOUZ 15].

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).
- La 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 [BES 17].

Les points de mesures des différents signaux (courant, flux, vibrations,...) à l'aide d'une variété des appareils sont illustrés par la figure (II.9) :

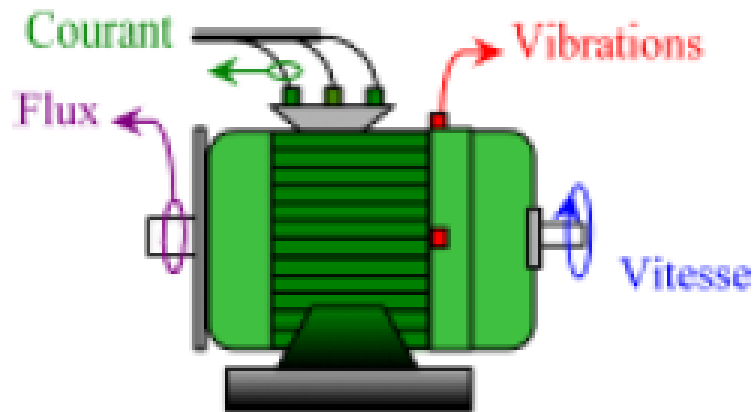


Figure (II.9): Les différents points de mesure [MES 20].

II-4-2-2-2 Technique de la FFT

L'analyse de Fourier est une base majeure de la physique et des mathématiques. Elle est indissociable du traitement du signal, et ce pour deux raisons principales. La première est l'universalité du concept de fréquence sur lequel elle repose. La seconde tient à la structure même de l'analyse de Fourier qui se prête aisément à des transformations communes comme le filtrage linéaire en les traduisant de manière particulièrement simple.

Le principe de la transformée de Fourier repose sur le fait que toute fonction périodique peut être représentée comme la somme d'une série de sinus et de cosinus dont on fait varier d'une part les amplitudes en les multipliant par des coefficients, et d'autre part les phases en les décalant de manière à ce qu'elles s'additionnent ou se compensent [TAL 18].

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-2j\pi f t} \cdot dt \quad (\text{II.6})$$

II-5 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présente un aperçu général sur le défaut de la cassure des barres et présenté des termes et des notions très importantes sur les techniques de diagnostic MVSA et MCSA.

Ces techniques seront appliquées dans le troisième chapitre. Afin de détecter le défaut de cassure de barre.

CHAPITRE III

Analyse du défaut de la Cassure de barres en utilisant MVSA et MCSA

III-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous exploiterons deux techniques de diagnostic utilisées pour détecter les défauts d'une MAS. La plupart de ces techniques se basent sur la comparaison des grandeurs de la machine en état sain et en état défectueux. Nous nous concentrerons en particulier sur l'analyse spectrale du courant statorique et l'analyse spectrale des vibrations mécaniques d'une machine asynchrone triphasée sous deux conditions (MAS saine et MAS défectueuse). Pour réaliser ces analyses, nous utiliserons la transformée de Fourier rapide (FFT). Nous montrerons comment ces deux méthodes peuvent être utilisées pour détecter les signatures de défaut de barres cassées. En outre, nous étudierons l'impact du nombre de barres cassées sur le contenu spectral du courant statorique.

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

III-2 Cassure de barres dans les machines asynchrones

La cassure de barre sur un rotor est un défaut courant qui peut se produire soit à l'encoche, soit à l'extrémité reliant la barre à l'anneau de court-circuit. Ce type de dégradation a plusieurs conséquences néfastes.

Premièrement, il réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique, entraînant des fluctuations de vitesse de rotation, des vibrations mécaniques et un fonctionnement anormal de la machine. De plus, l'amplitude élevée des oscillations résultant de la cassure de barre accélère la détérioration de la machine.

Par conséquent, chaque barre cassée diminue considérablement le couple, ce qui a un effet cumulatif sur la défaillance de la machine. Enfin, il est important de noter que l'impact d'une cassure de barre s'intensifie avec le nombre de barres cassées.

III-3 Détection du défaut de la cassure des barres par la méthode de MCSA

III-3-1 La Méthode de MCSA

Analyse de la signature du courant moteur(ASCM) qui a l'abréviation en Anglais (MCSA) qui signifie Motor current signature analysis est une technique utilisée pour déterminer l'état de fonctionnement des moteurs à induction AC sans interrompre la production en analysant le courant et la tension fournis à un moteur électrique à l'aide de modèles et de protocoles spécifiques.

III-3-2 Résultats expérimentaux de la rupture de barres

Deux tests ont été effectués pour évaluer le comportement d'un rotor avec des barres cassées. Le premier test a été réalisé pour une barre cassée et le second pour deux barres cassées. Les photos du rotor avec une barre cassée (1BC) et deux barres cassées (2BC) sont présentées dans la figure (III.1).



Figure (III.1) : Photographie des rotors de la MAS de 3 kW pour un état sain (à gauche), une barre cassée (au centre), deux barres cassées (à droite).

Fonctionnement à vide :

Caractéristiques de la machine : Couple résistant : 0 N.m et Équivalence de la charge : 0% et Glissement : 0%.

Le courant électrique d'une phase statorique du MAS est représenté dans la figure (III.2) sous un défaut de 1BC pour la condition à vide.

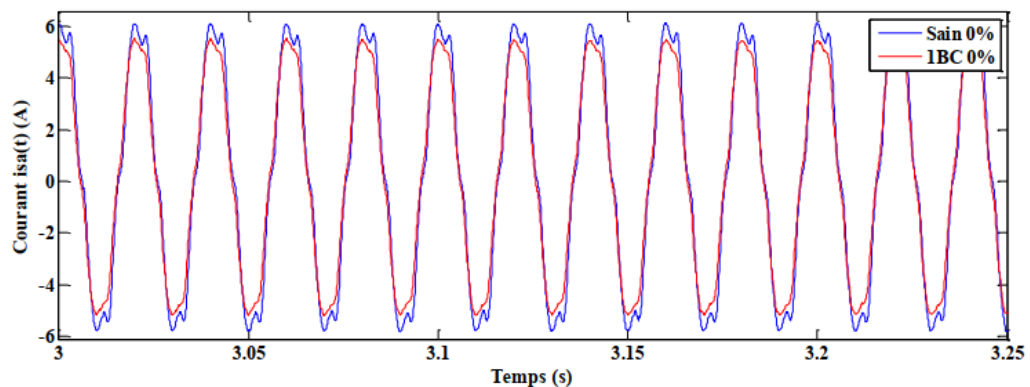


Figure (III.2) : Courant statorique en fonction du temps ($g=0\%$,1BC).

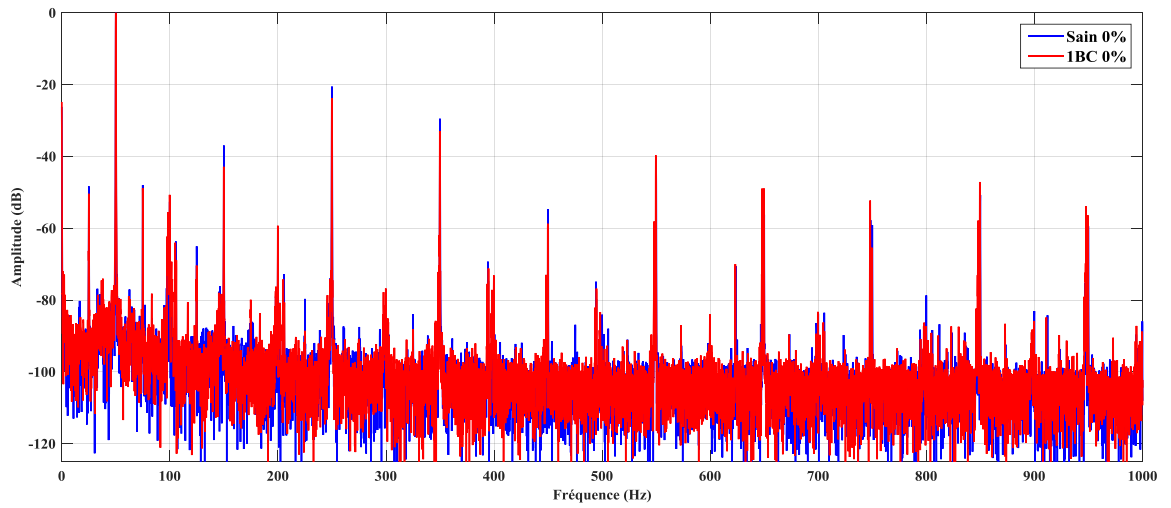


Figure (III.3) : Spectre du courant statorique avec 1BC (à vide).

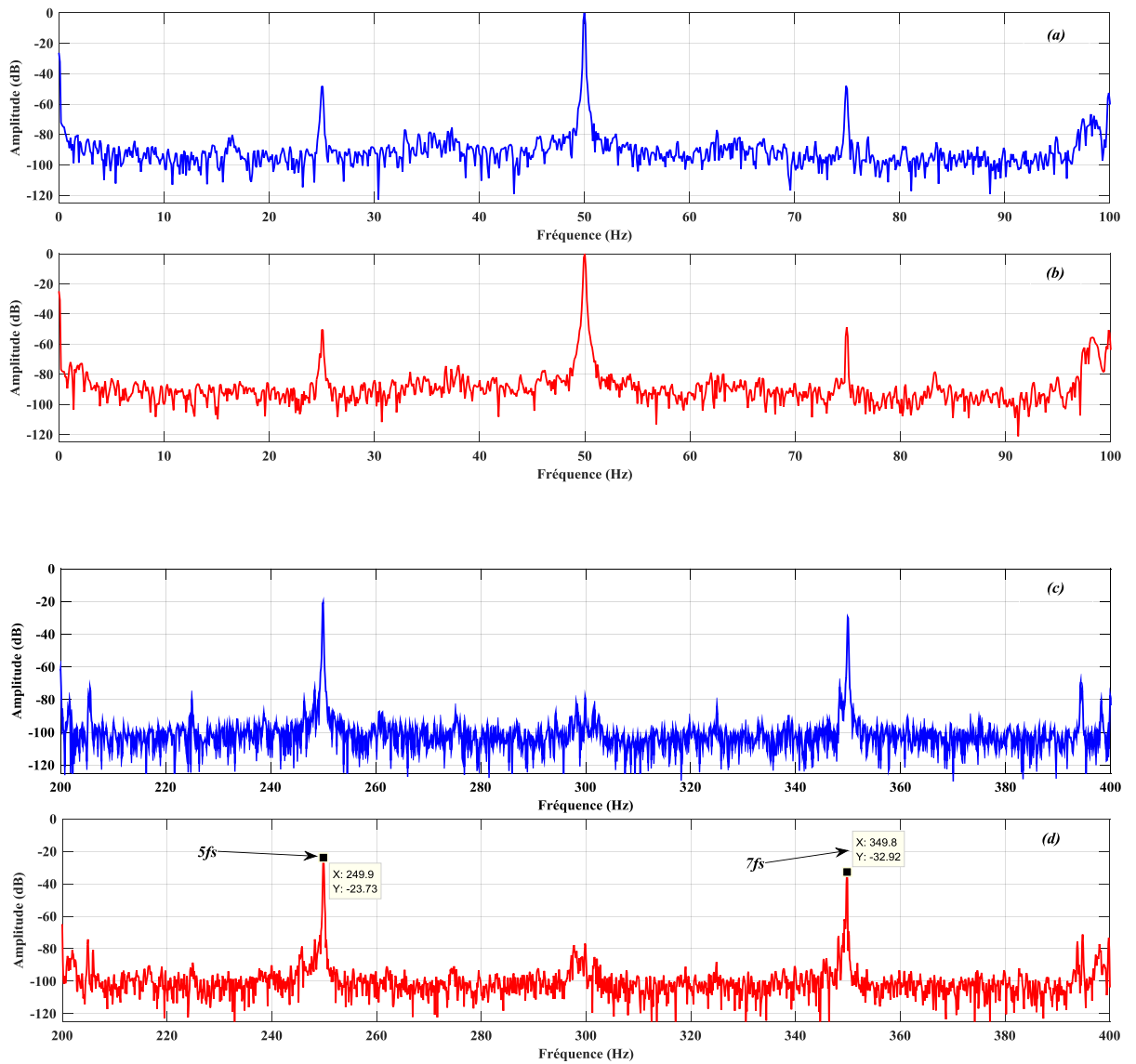


Figure (III.4) : Spectre du courant statorique (1BC, à vide) ; (a) et (b) : 0-100Hz, (c) et (d) : 200-400Hz.

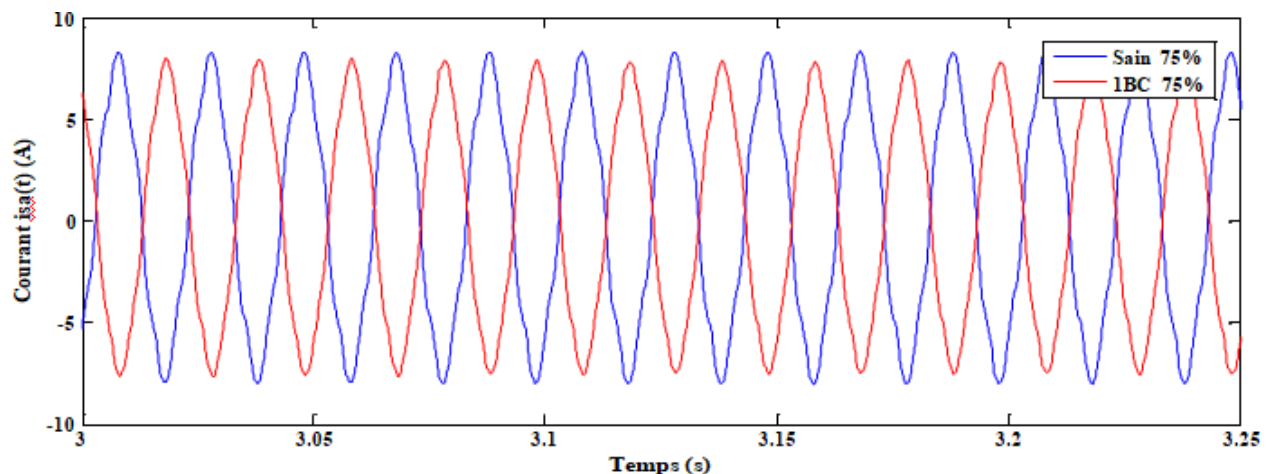
On remarque :

Lorsqu' une barre est cassée, il est intéressant de noter que le changement d'état de la MAS (à vide) n'affecte pas les composants harmoniques du courant statorique. En effet, les fréquences supplémentaires causées par la rupture de la barre restent presque invisibles. Cette situation est due à la valeur du glissement, qui est proche de zéro pendant le fonctionnement à vide.

Fonctionnement en charge:

Caractéristiques de la machine : Couple résistant : 15 N.m et Équivalence de la charge : 75% et Glissement : 3.6%.

Le courant électrique d'une phase statorique du MAS est représenté dans la figure (III.5) sous un défaut de 1BC pour la condition en charge.



Figure(III.5) : Courant statorique en fonction du temps ($g= 3.6\%$, 1BC).

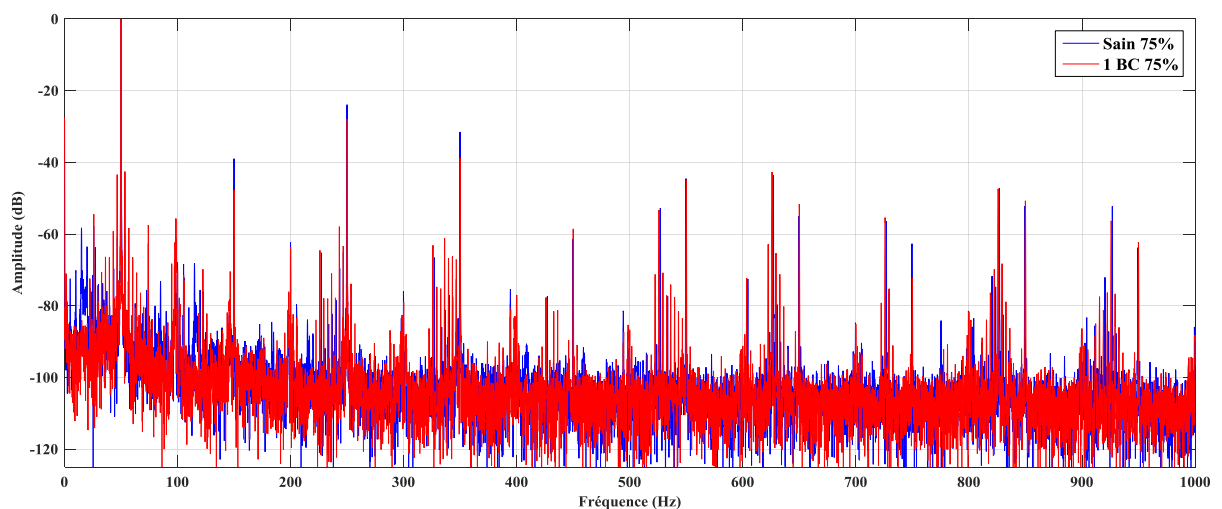


Figure (III.6) : Spectre du courant statorique avec 1BC (en charge).

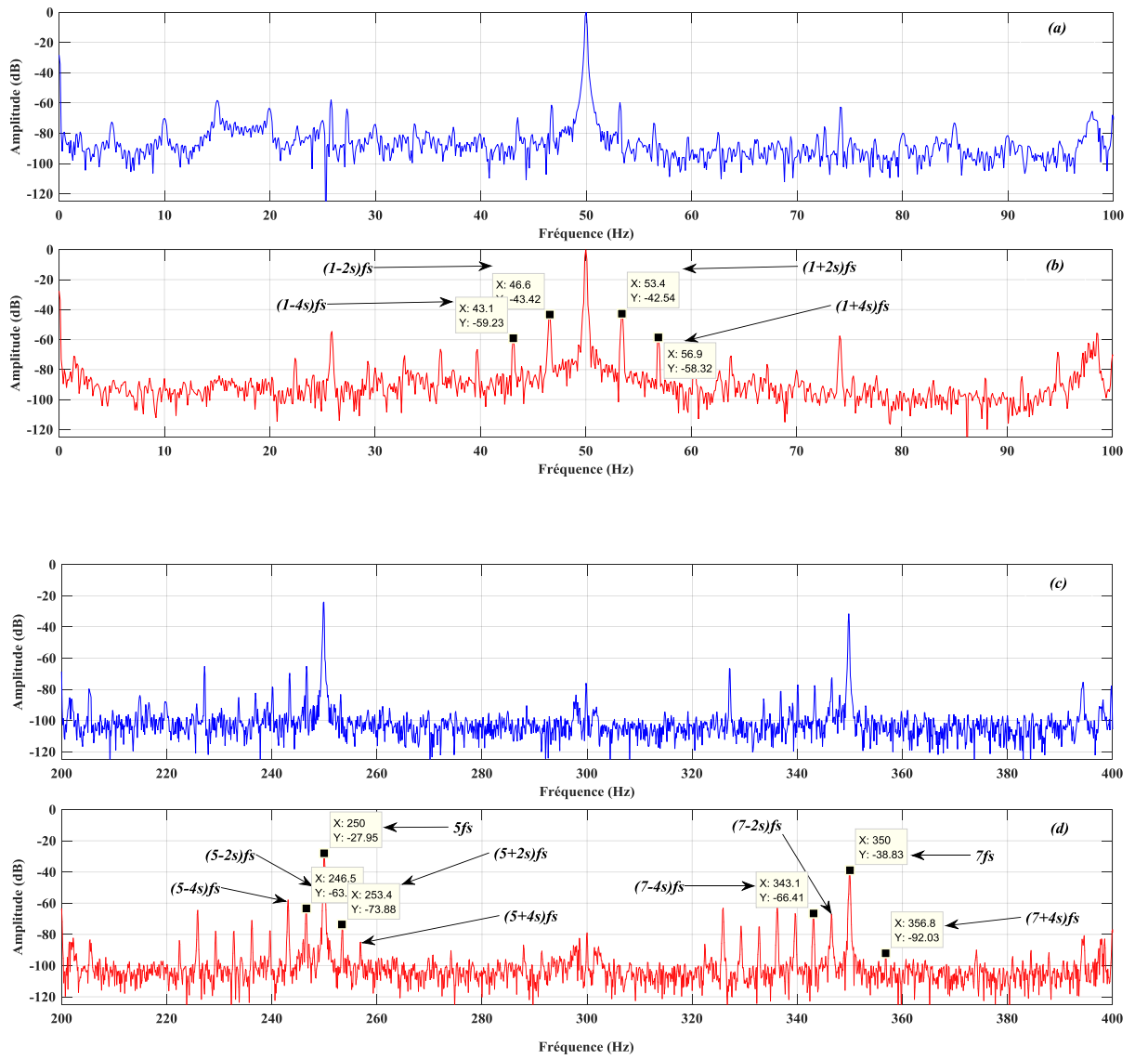


Figure (III.7) : Spectre du courant statorique ($s=3.6\%$, 1BC) ; (a) et (b): 0-100Hz, (c) et (d): 200-400Hz.

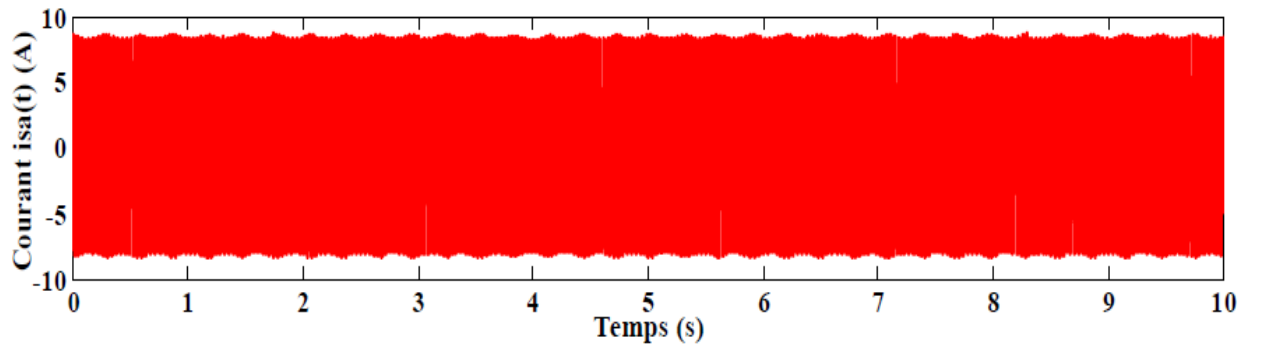


Figure (III.8) : Courant statorique en fonction du temps ($g=3.6\%$, 2BC).

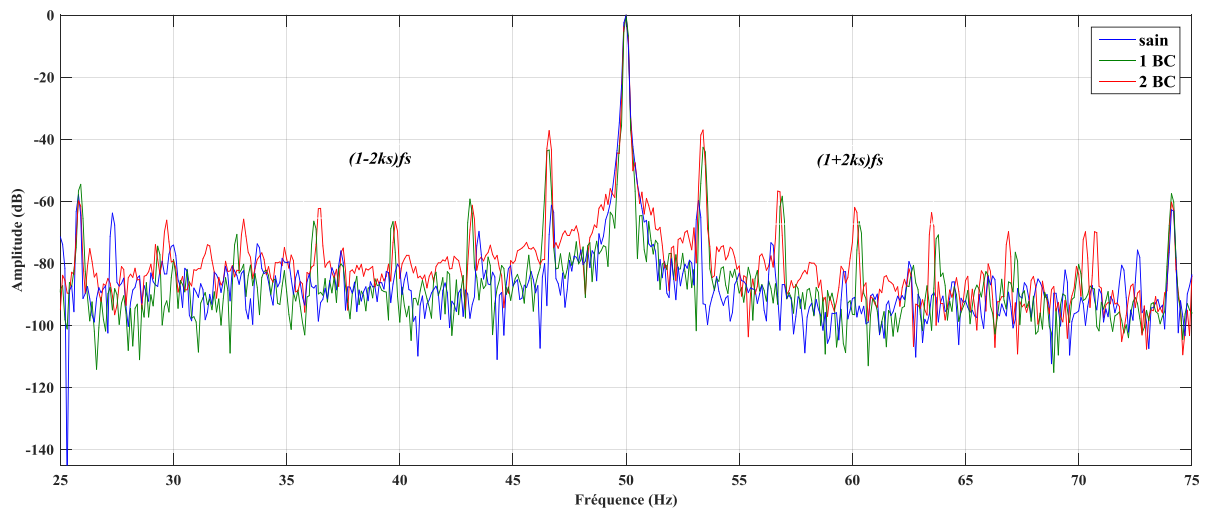


Figure (III.9) : Spectre du courant statorique avec 2BC (en charge).

Les figures (III.6) et (III.9) présentent les spectres du courant statorique obtenus expérimentalement pour un fonctionnement en charge de la machine à l'état sain, avec une barre cassée et avec deux barres cassées. Les signatures de défaut de cassure de barres sont visibles dans les spectres de la machine asynchrone avec défaut, comme illustré sur les figures (III.7.b) et (III.10).

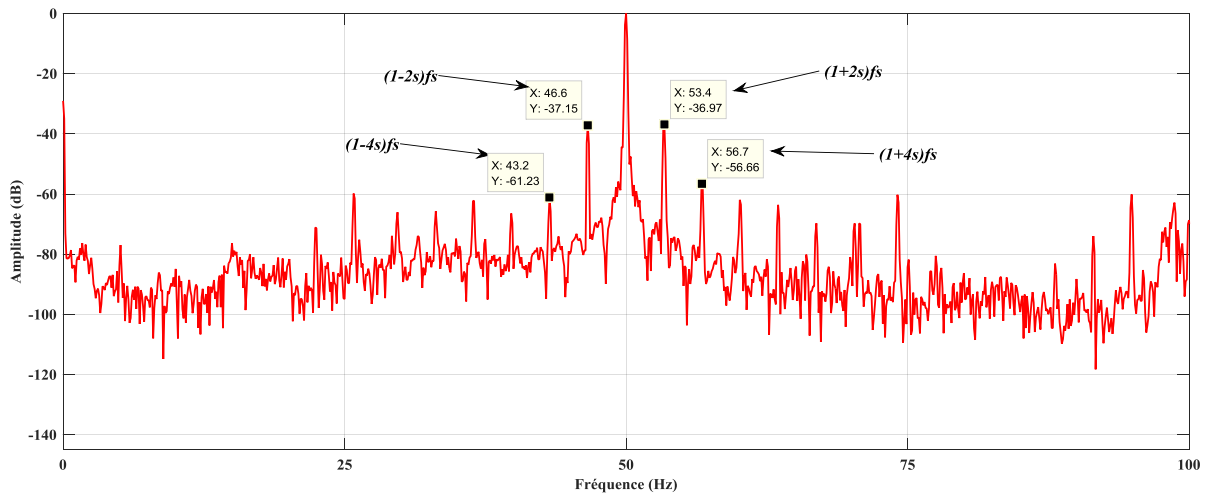


Figure (III.10) : Spectre du courant statorique avec 2BC(en charge).

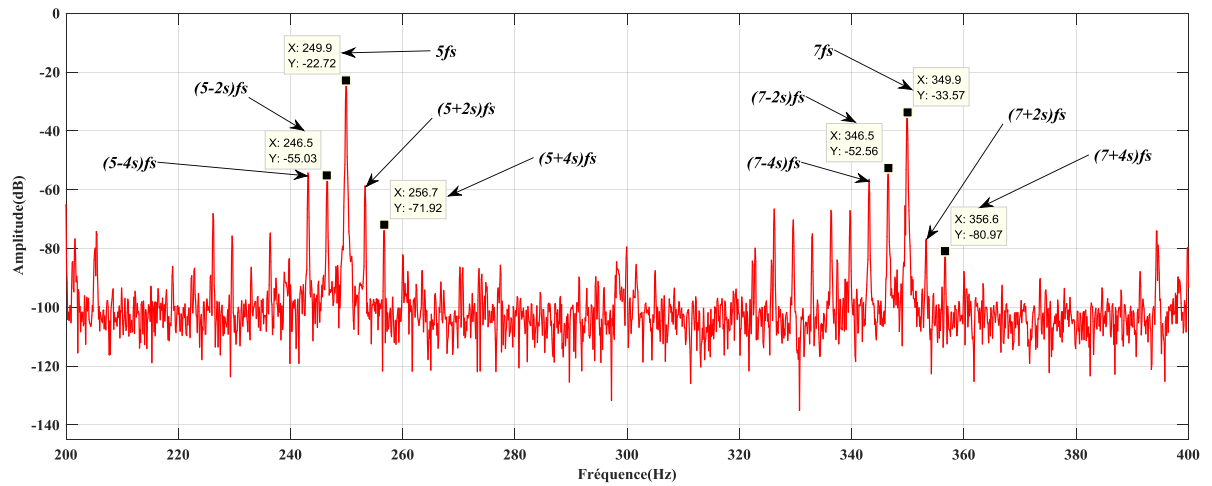


Figure (III.11) : Fréquences qui correspondent aux ordres 5et7 avec 2BC (en charge).

D'après la figure (III.7.a), lorsqu'une machine est sous charge et en bon état, son spectre de courant statorique ne présente aucune composante fréquentielle à l'exception des harmoniques de saturation et des harmoniques de force magnétomotrice permanents (fmm).

En revanche, si une barre est cassée sous charge (figure III.7.b), des composantes fréquentielles apparaissent autour de la fréquence fondamentale, à savoir 46,5 Hz et 53,4 Hz, comme précédemment mentionné. Les amplitudes de ces fréquences pour une barre cassée sont respectivement de -42,54 dB et -43,72 dB, et augmentent en fonction de la gravité de la défaillance. Pour une machine avec deux barres cassées, les fréquences 46,6 Hz et 53,4 Hz ont des amplitudes respectives de -37,15 dB et -36,97 dB (figure III.10).

En somme, l'analyse spectrale du courant statorique permet de détecter des composantes supplémentaires en cas de défaillance, telles que les raies $(1 \pm 2kg) fs$ (tableau III.1), qui signalent la présence de cassures de barres.

Tableau (III.1) : Récapitulation des raies dans le spectre du courant statorique (1BC ,2BC).

Formules des Fréquences caractéristiques	Valeurs Théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amplitude Pour 1BC (dB)	Amplitude pour 2BC (dB)
f_s	50	50	0	0
$(1-2s)f_s$	46.4	46.6	-43.72	-37.15
$(1+2s)f_s$	53.6	53.4	-42.54	-36.97
$5f_s$	250	249.9	-27.95	-22.72
$(5-2s)f_s$	246.4	246.5	-63.36	-55.03
$(5+2s)f_s$	253.6	253.4	-73.85	-58.64
$7f_s$	350	349.9	-38.47	-33.57
$(7-2s)f_s$	346.4	346.5	-67.06	-52.56
$(7+2s)f_s$	353.6	256.8	-92.03	-76.71

Selon le tableau (III.1), il est observable que les amplitudes des composantes fréquentielles $(1\pm 2k)f_s$ augmentent en fonction du nombre de barres cassées. Cette augmentation revêt une signification importante lorsque le nombre de barres cassées augmente. En outre, cela explique clairement que la rupture d'une barre entraîne une augmentation des courants dans les autres barres, ce qui déclenche automatiquement une autre réaction magnétique ayant une incidence sur la valeur du courant statorique.

III-4 Détection du défaut de la cassure des barres par la méthode de MVSA

III-4-1 La méthode de MVSA

La méthode Motor Vibration Signature Analysis (MVSA) est utilisée pour évaluer l'état de santé des moteurs électriques. L'analyse MVSA implique la mesure des vibrations émises par le moteur électrique lors de son fonctionnement normal à différentes fréquences. Ensuite, les signaux sont analysés afin d'identifier les fréquences caractéristiques des défauts moteurs, tels que les barres cassées. Cette méthode permet de diagnostiquer les problèmes et les défauts des moteurs électriques avant qu'ils ne deviennent critiques et engendrent des temps d'arrêt coûteux.

III-4-2 Mesure de vibration pour un défaut dans la cassure des barres

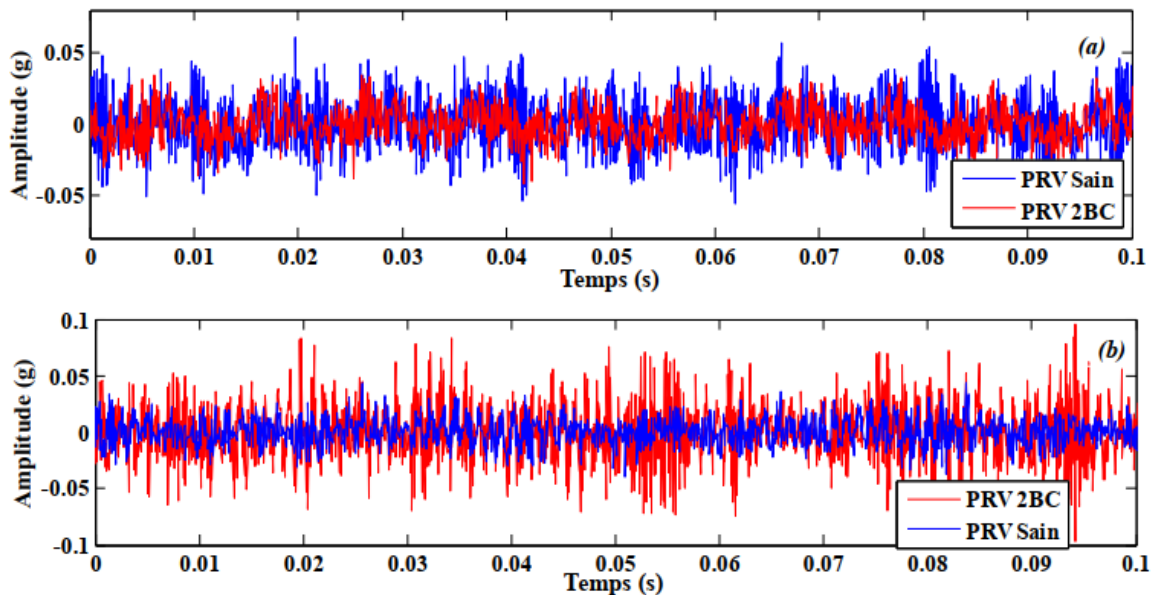


Figure (III.12) : Signal temporel de vibration dans l'état sain et pour 2BC du MAS ; (a) : fonctionnement à vide, (b) : fonctionnement en charge.

Fonctionnement à vide :

Le spectre du signal de vibration pour deux barres cassées et pour un fonctionnement du moteur à vide est montré dans les figures (III -13).

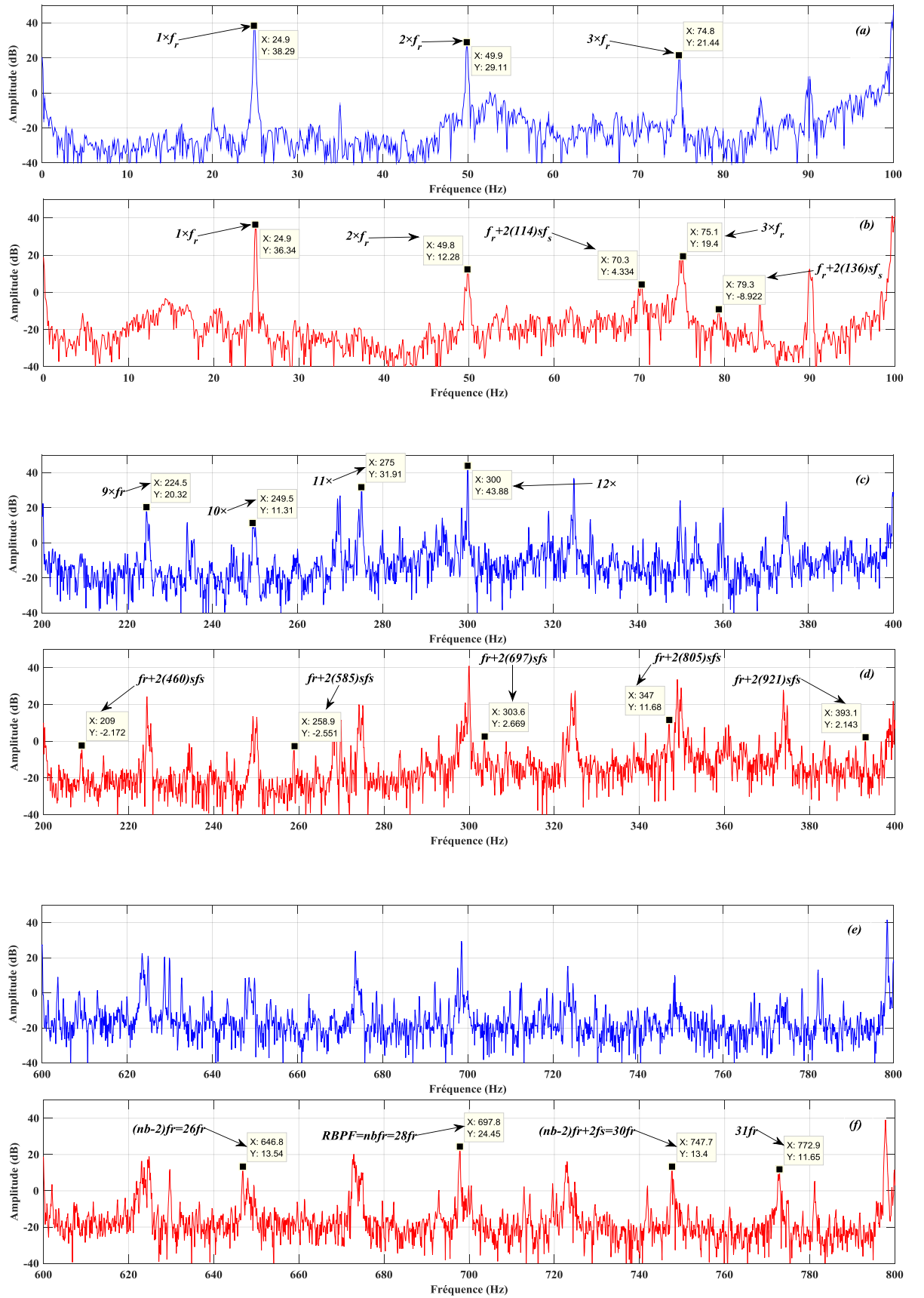


Figure (III.13) : Spectre du signal vibratoire pour différentes plages de fréquences (2BC, $s=0.004$) ; (a) et (b) :0-100Hz, (c) et (d) :200-400Hz, (e) et (f) :600-800Hz.

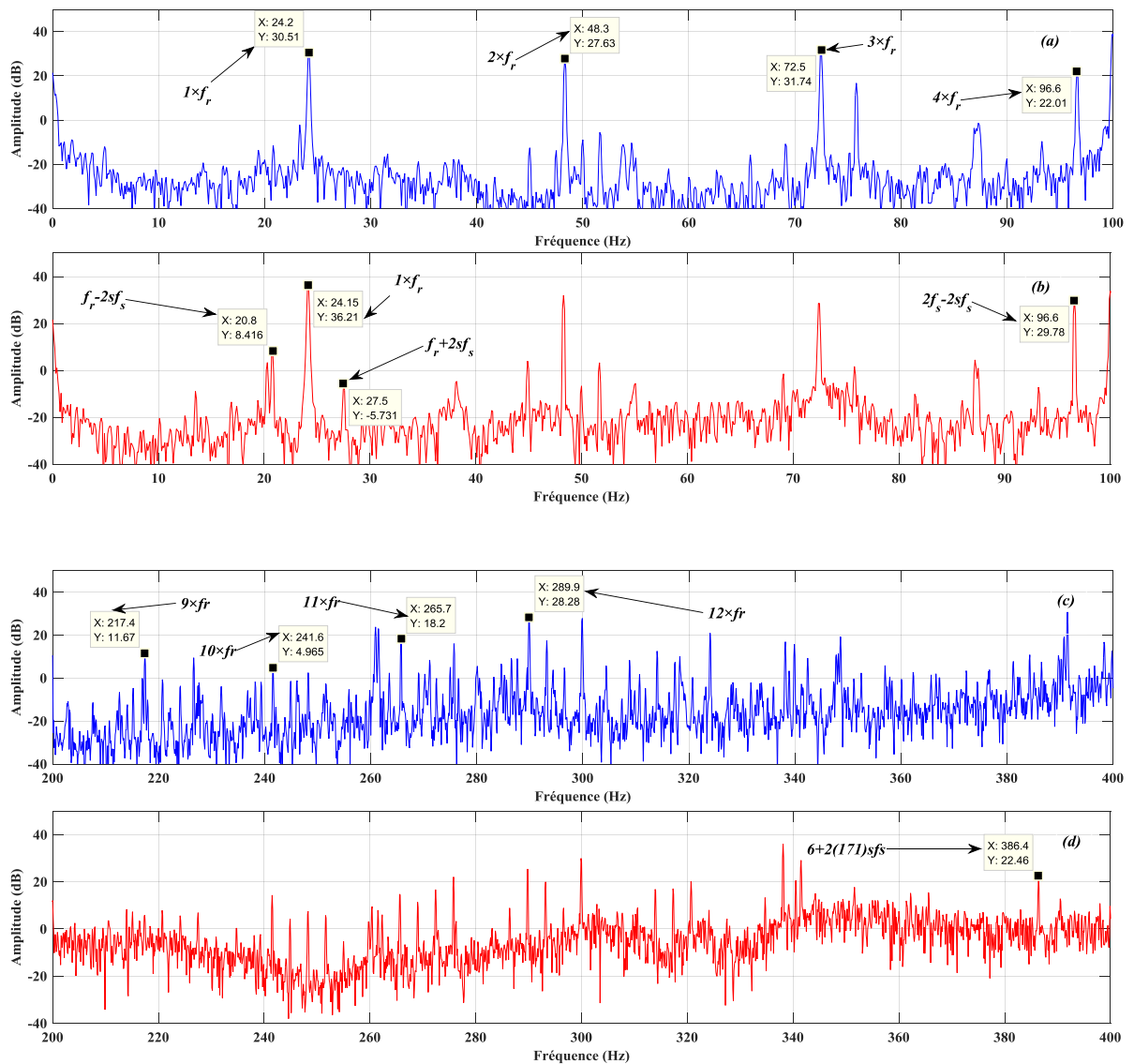
On remarque :

Il est difficile à diagnostiquer le défaut de la cassure de barre rotorique pour un fonctionnement à vide. La cause peut être revient à la valeur du glissement qui est proche de zéro ($s \approx 0$).

Il est important de signaler les amplitudes de la série de $2kf_s$ tout au long des fréquences dans le spectre du signal vibratoire. On peut le considérer comme un indicateur du défaut.

Fonctionnement en charge:

On va maintenant diagnostiquer l'état du moteur pour un fonctionnement en charge ($s=0.034$).



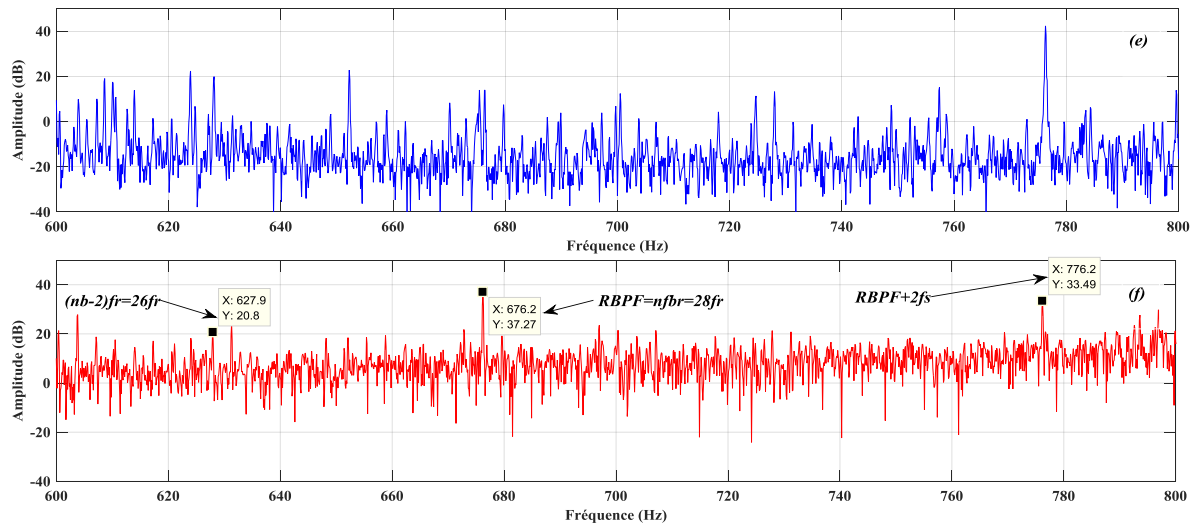


Figure (III.14) : Spectre d'un signal de vibration pour différentes plages de fréquences (2BC, $s=0.034$) ; (a) et (b) :0-100Hz, (c) et (d) :200-400Hz, (e) et (f) :600-800Hz.

Dans la section précédente, nous avons expliqué que les composantes du défaut, telles que $fr \pm 2sfs$, RBPHs, et autres, seront suivies dans les bandes de fréquences. Il est important de noter que la série de fréquences résultant du nombre de barres rotoriques est vérifiée dans le spectre selon l'équation suivante : $f_{RBPF} = RBPF \pm 2kfs$.

Tous les signaux rapportés ont été enregistrés en régime permanent avec un glissement de 0.034. L'analyse des fréquences caractéristiques présentée sur les figures (V-14), avec un moteur sain et un autre avec deux barres cassées, montre les FBL (fréquences de barre lâche) dues au défaut de la CB autour de fr . Les harmoniques espacés de $2sfs$ par rapport à la fréquence de rotation sont observés (détectés) avec difficulté.

Suite à l'analyse des fréquences caractéristiques du défaut de rupture de barres, nous sommes confrontés à une difficulté sérieuse dans cette partie pour décider de l'existence du défaut de cassure de barre.

Les valeurs caractérisant les raies supplémentaires du défaut de la CB, ainsi que leurs amplitudes, peuvent être résumées dans le tableau suivant :

Tableau (III.2) : Valeurs théoriques et pratiques des harmoniques dans le spectre d'un signal vibratoire (2BC, $s=0.034$, $f_r=24.15\text{Hz}$).

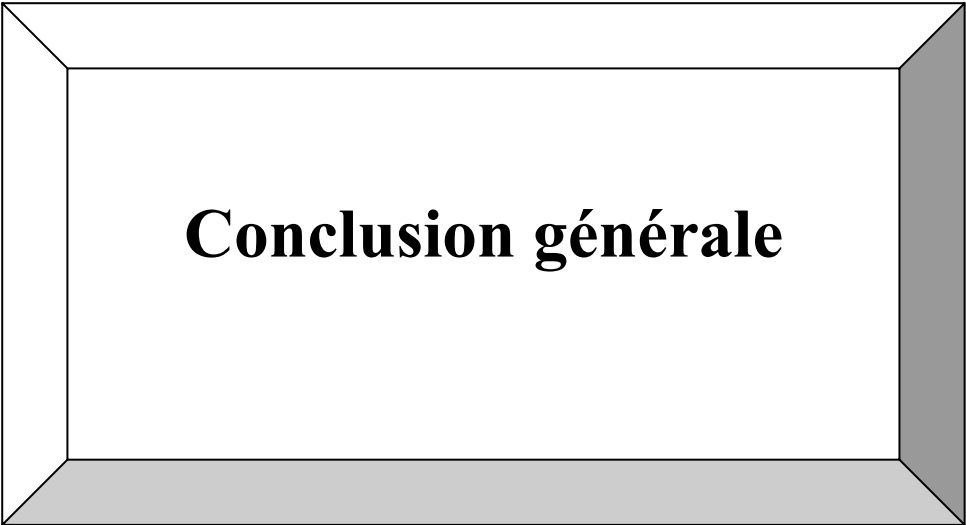
Formules de fréquences (CB)	Valeurs théoriques [Hz]	Valeurs pratiques [Hz]	Amplitude [dB]	
			sain	2BC
$1 \times f_r$	Relevée de l'exp.	24.15	30.51	36.21
$2 \times f_r$	Relevée de l'exp.	48.3	27.63	32.03
$3 \times f_r$	Relevée de l'exp.	72.5	31.74	28.54
$f_r + 2s f_s$	27.55	27.5	/	-5.73
$f_r - 2s f_s$	20.75	20.8	/	8.41
RBPF	676.2	676.2	13.82	37.27
RBPF + 2 f_s	776.2	776.2	42.34	33.58
RBPF - 2 f_s	576.2	576.2	37.05	24.05

Enfin, 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. De plus, la détection des fréquences caractéristiques de la CB a été remarquée dans une plage de fréquences un peu avancées (0-400 Hz).

III-5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé deux méthodes de diagnostic pour détecter le défaut de la cassure de barres dans la MAS. Les techniques utilisées sont : la MCSA et la MVSA.

On conclut que la méthode de la MCSA offre de meilleurs résultats que la méthode de la MVSA pour détecter les défauts dans la cassure de barres rotoriques.



Conclusion générale

Conclusion générale

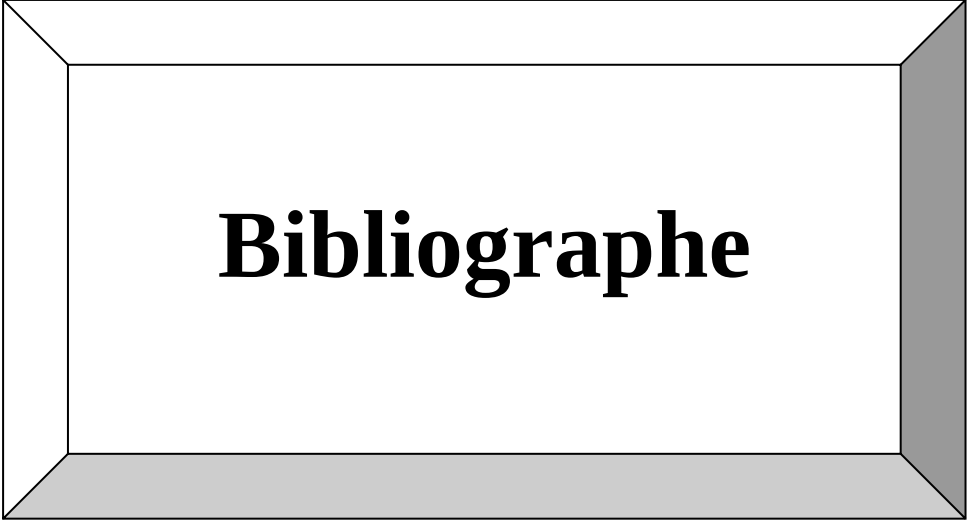
Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts des moteurs asynchrones à cage d'écureuil. Le défaut de cassure des barres rotoriques a été le centre de notre intérêt dans le ce travail.

Premièrement, nous avons présenté un état de l'art de la machine asynchrone où nous rappelons brièvement les principaux composants de cette la machine, les différents défauts et différentes techniques utilisées au diagnostic des MAS.

Dans le deuxième chapitre, nous avons mis un aperçu général sur le défaut de la cassure des barres et les techniques utilisées.

Dans le dernier chapitre, nous avons analysé des signaux pour avoir des résultats sur de défaut en utilisant deux méthodes d'analyse (MCSA et MVSA).

On conclut que la méthode de la MCSA offre de meilleurs résultats que la méthode de la MVSA pour détecter les défauts dans la cassure de barres rotoriques.



Bibliographie

Bibliographie

- [ABD18] Abdallah HAMOUDI « Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par les Techniques d'identification ».Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques d'Oran Mohamed Boudiaf 2018.
- [ABD06] Abdelwahab.M et D.Abdelhakim, « Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage, » UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA, M'SILA, 2006.
- [BOUZ15] BOUZIDA Ahcene «Diagnostic de Défauts des Machines Asynchrones par la Technique du Traitement du Signal ». Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique 2015.
- [BABA14] BABAA FATIMA « Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : "Application au diagnostic des défauts statoriques" ». Thèse de doctorat, Université de Constantine 1, 2014.
- [BAZ16] BAZI Smail « Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur ». Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2016.
- [BEL17] BELAHAMMOU Abdelhak et BENINE Abderrezak « Diagnostic des défauts des roulements dans les machines asynchrones par la méthode de laMCSA».Mémoire de master En Commande Electrique. Université Echahid Hamma Lakhdar d'ElOued 2017.
- [BEND18] BENDOUITEM ABDELAZIZ « Diagnostic des machines asynchrones » Mémoire de master, Université EchahidHamma Lakhdar d'El-Oued 2018.
- [BEN04] BENLALLI YACINE "Etude Du Processus De Dégradation Des Roulements Par Analyse Vibratoire". Université Badji Mokhtar –Annaba 2004.
- [BEN16] Bennedjai Soumaya « Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction ». Thèse de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2016.
- [BEN18] BENINE Hamza «Etude de la vibration des machines à induction sous un défaut de roulement». Mémoire de master. Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued 2018.
- [BES07] BESSOUS Nouredine « Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones ». Mémoire de magister En Electrotechnique, Université Mentouri Constantine 2007.
- [BES17] BESSOUS Nouredine« Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation ».Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra 2017.
- [BOUA17] Bouaicha Abdelghafour et Belkacemirabie «Diagnosticde défauts rotorique d'une machineasynchrone à rotor à cage d'écureuil» Projet de fin d'études,Université LARBI BEN M'HIDI Oum El-Bouaghi 2017.

- [BOUA20] Bouaoun Oudai « Contribution au Diagnostic des défauts de la cassure des barres rotoriques dans les systèmes électromécaniques : Application aux Moteurs à Induction ». Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued 2020.
- [BOUM01] BOUMEGOURA.T «Recherche de signature électromagnétique des défauts dans unemachine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic» Thèse Doctorat, Ecole centrale de Lyon. Mars 2001.
- [BOUGH20] Boughareb Khaled «Surveillance et diagnostic des machines tournantes par analyse vibratoire». Mémoire de master. UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA 2020.
- [DID21] Didi Mohammed et M.Oussama et A.Souhaib, « Diagnostic des défauts rotoriques de machine asynchrone par utilisation du module de Park,» L'Université d'Echahid Hamma la Lakhdar d'El Oued, El Oued, 2021.
- [DJE13] 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, universite de reims champagne ardenne 2013.
- [ELF12] ELFAR Youssouf « DIAGNOSTIC DES DEFAUTS D'UNE MACHINE TOURNANTE PAR L'ANALYSE VIBRATOIRE ». Mémoire de master, UNIVERSITE DE M'SILA 2012.
- [HAL15] HALEM Noura « Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis ». Thèse de doctorat, Université Mohamed Kheider –Biskra 2015.
- [HAM09] Hamdidi Naima, Boucherk Kahina, « Traitement des signaux vibratoires : Application au diagnostic des défaillances». Diplôme d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009.
- [IBR09] Ibrahim, « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée, » Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences, ingénierie, santé, Université Jean Monnet, France, 10Mars 2009.
- [KER16] Kerfali Samir, «Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone »,Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016.
- [KHEL19] Khelfaoui Nabil « DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE MACHINES PAR L'ANALYSE DES SIGNAUX ». Mémoire de master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA 2019.
- [LABD17] Labdani Amina «Simulation et étude expérimentale des défauts de la machine asynchrone de 1 KW»MEMOIRE Pour l'obtention du diplôme de Master,Université LARBI BEN M'HIDI Oum El-Bouaghi 2017.
- [LADG21] LADGHEM Anis« Contribution au diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones à cage d'écureuil: Détection du défaut mécanique ». Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued 2021.
- [LAH05] Lahcène NOUREDDINE Diagnostic de défauts au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.Mémoire magister. LRE (<http://re.enp.edu.dz>),

- Ecole Polytechnique d'Alger 2005.
- [LAHC05] Lahcène NOUREDDINE « Diagnostic de défauts au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil » Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassan Badi El Harrach, Alger Algérie BP182, 16200, 2005.
- [MAB17] Mabrouk Abd Elhamid « Contribution Au Diagnostic De La Machine Asynchrone En Présence De Variation De Charge ». Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra 2017.
- [MES20] MESBAHI Slimane « Détection Des Défauts de roulement dans la Machine Asynchrone en utilisant la Technique de SFAS ». Mémoire de master En Commande Electrique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued 2020.
- [MOKH19] MOKHTARI Yaakoub « Diagnostic des défauts mécaniques du moteur asynchrone par l'analyse vibratoire ». Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra 2019.
- [NAB11] Nabti Mohamed Tahar « Etude de l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques ». Mémoire de MAGISTER. UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF 2011.
- [NAC15] NACIB Leila « DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS DANS LES MACHINES TOURNANTES PAR L'ANALYSE VIBRATOIRE ». Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA 2015.
- [NAD20] Nadji Ihab Mohamed Anes « Diagnostic des défauts du moteur asynchrone dans le domaine temporel ». Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra 2020.
- [OUA22] Ouamane Mohamed « Analyse Paramétrique Du Diagnostic De La Machine Asynchrone ». Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra 2022.
- [PEN94] J. Penman, H. G. Sedding, W. T. Fink. Detection and location of interturn's short circuits in the stator windings of operating motors. IEEE Trans. Energy conversion, vol.9, no4, dec.1994.
- [RAZ02] Razik. H Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, état de l'art. Revue 3EI no29, pages 48-52. Juin 2002.
- [REDJ17] REDJIL KHAOUA « Etude des défauts du roulement par analyse spectrale et cepstrale ». Mémoire de master. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2017.
- [REZ19] REZZAG Djaber « Maintenance et Techniques de Diagnostic d'une Machine Asynchrone ». Mémoire de master, Université de Ghardaïa 2019.
- [SAID17] SAID AZZEDINE « Commande de la Machine Asynchrone par mode glissant ». Mémoire de master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent 2017.
- [SAH03] Sahraoui Mohammed. « Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à cage » Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie 2003.

- [SAM22] SAMIR ALI «Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par une méthode non invasive». Mémoire de master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2022.
- [SON21] Sondes. H et K.Rayane, « Diagnostic des défauts rotoriques de la machine asynchrone par utilisation du modèle réduit issu du modèle multi – enroulements, » L'Université d'Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, El Oued 2021.
- [TAL18] TALHA mouhamed El-Amine « Détection des défauts d'excentricité dans les MAS par traitement de signal du courant statorique ». Mémoire de master. Université Mohamed Khider Biskra 2018.
- [THOM03] Thomas, V.V., K. Vasudevan, and V.J. Kumar, Online cage rotor fault detection using airgap torque spectra. IEEE transactions on energy conversion, 2003. 18(2): p. 265-270.
- [TOLI95] Toliyat, H.A., Lipo, T.A., « Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults». IEEE Transactions Energy Conversion vol. 10, pp. 241-247, IEEE 1995.
- [TRA09] Trajin, B. « Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones, » Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 1 Décembre 2009.
- [VIC05] Vicente Pedro ,Rodriguez Jover, Negre Amarian, Arkkio Antero « A. A general scheme for induction motor condition monitoring». In Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED'05, the 5th IEEE International Symposium, IEEE 2005.