

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de la Technologie

Mémoire de Fin d'Études
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Machines Électriques

Thème

**Synthèse spectrale des harmoniques de la
machine asynchrone triphasée saine et
avec défauts**

Réalisé par :

AYATI Belgacem

Encadré par :

Dr. HALEM Noura

Soutenu en Mai 2018

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de la Technologie

Mémoire de Fin d'Études
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Machines Électriques

Thème

**Synthèse spectrale des harmoniques de la
machine asynchrone triphasée saine et
avec défauts**

Réalisé par :

AYATI Belgacem

Encadré par :

Dr. HALEM Noura

Soutenu en Mai 2018

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier particulièrement mon encadreur, Docteur : HALEM NOURA, qui n'a ménagé aucun effort, et qui n'a cessé de m'apporter soutien et aide technique et morale.

De spéciaux grands remerciements à Monsieur : ZOUZOU SALAH EDDINE (Professeur à l'université de Biskra) pour son aide durant ce travail.

Je remercie très vivement, le Docteur MESBAHI NADHIR et le Docteur BEKAKRA YUCEF durant les journées de Master, dont les conseils furent un guide vers la voie de la réussite

Finalement, je saisis cette occasion pour témoigner ma grande reconnaissance à tous ceux qui m'aident de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

DÉDICACE

Je suis satisfait d'offrir mon œuvre pour : mes chers parents que dieu les garde en vie, aussi aux membres de toute la famille.

Également à la société universitaire particulièrement aux enseignants, aux agents d'administration, aux travailleurs et à tous les amis fideles.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I : *ÉTAT DE L'ART*

I.1. Introduction.....	3
I.2. Construction de la machine asynchrone triphasée à cage.....	3
I.2.1. Le stator.....	4
I.2.2. Le rotor.....	4
I.2.3. Les paliers.....	5
I.3. Notion sur la sûreté de fonctionnement.....	5
I.4. La maintenance.....	5
I.4.1. La Maintenance Corrective.....	6
I.4.2. Maintenance Préventive.....	6
I.4.2.1. La Maintenance préventive systématique.....	7
I.4.2.2. La Maintenance préventive conditionnelle.....	8
I.5. La surveillance.....	10
I.6. Le diagnostic.....	10
I.7. Les principaux défauts dans la machine asynchrone.....	11
I.7.1. Défauts statoriques.....	11
I.7.2. Défauts rotoriques.....	11
I.8. Conclusion.....	12

**CHAPITRE II : MÉTHODES DÉDIÉES À LA DÉTECTION DES DÉFAUTS DANS
LES MACHINES ASYNCHRONES**

II.1. Introduction.....	14
II.2. modèles dédiés au diagnostic de la machine asynchrone	14
II.2.1. Approche analytique	15
II.2.2. Approche numérique	15
II.2.2.1. Méthode des schémas magnétiques équivalents.....	15
II.2.2.2. Méthodes des éléments finis.....	16
II.3. Techniques de diagnostic des machines asynchrones.....	16
II.3.1. Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques.....	17
II.3.2. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite.....	18
II.3.3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites	18
II.3.4. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique.....	18
II.3.5. Diagnostic par mesure de la puissance instantanée.....	18
II.3.6. Diagnostic par mesure du courant statorique	19
II.4. Signatures spectrales et défauts de la machine asynchrone.....	19
II.4.1. Les défauts de roulements	19
II.4.2. Les cassures de barres et portions d'anneaux.....	21
II.4.3. Défauts d'excentricité	23
II.4.4. Défauts statoriques	24
II.5. Composantes fréquentielles permanentes dans le spectre du courant statorique d'une machine asynchrone saine.....	25
II.6. Analyse spectrale du courant statorique	26

II.6.1. La Transformée de Fourier Rapide	27
II.7. Conclusion	27

CHAPITRE III : *RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS*

III.1. Introduction	30
III.2. Description du banc d'essai	30
III.3. Analyse du spectre du courant statorique de la machine saine	31
III.3.1. Analyse du spectre du courant statorique de la machine saine : <i>essais à la vitesse</i> <i>N= 1439 tr/mn</i>	31
III.3.2. Analyse du spectre du courant statorique de la machine saine : <i>essais à la vitesse</i> <i>N= 1468 tr/mn</i>	34
III.3.3. Analyse du spectre du courant statorique de la machine saine : <i>essais à la vitesse</i> <i>N= 1492 tr/mn</i>	36
III.4. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec un défaut rotorique (une barre cassée)	39
III.4.1. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec une barre cassée : <i>essais à la vitesse N= 1438 tr/mn</i>	40
III.4.2. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec une barre cassée : <i>essais à la vitesse N= 1468 tr/mn</i>	44
III.4.3. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec une barre cassée : <i>essais à la vitesse N= 1492 tr/mn</i>	47
III.5. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec un défaut rotorique (deux barres cassées)	49
III.5.1. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec deux barres cassées : <i>essais à la vitesse N= 1432 tr/mn</i>	49
III.5.2. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec deux barres cassées : <i>essais à la vitesse N= 1458 tr/mn</i>	51

III.5.3. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec deux barres cassées : <i>essais à la vitesse $N= 1490$ tr/mn</i>	53
III.6. Conclusion	55
Conclusion générale	56
Références	57

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE II : MÉTHODES DÉDIÉES À LA DÉTECTION DES DÉFAUTS DANS LES MACHINES ASYNCHRONES

II.1. Dimension du roulement à billes.....	20
II.2. Représentation de l'effet d'une barre cassée sur les barres adjacentes.....	22
II.3. Représentation de l'excentricité.....	24
II.4. Représentation des différents défauts statoriques.....	24

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

III.1. Le banc d'essai.....	31
III.2. Courant statorique de la machine saine à la vitesse 1439 tr/mn.....	32
III.3. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) de la machine saine pour une vitesse de 1439 tr/mn.....	32
III.4. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) de la machine saine pour une vitesse de 1439 tr/mn.....	33
III.5. Courant statorique de la machine saine à la vitesse 1468 tr/mn.....	34
III.6. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) de la machine saine pour une vitesse de 1468 tr/mn.....	35
III.7. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) de la machine saine pour une vitesse de 1468 tr/mn.....	36
III.8. Courant statorique de la machine saine à la vitesse 1492 tr/mn.....	36
III.9. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) de la machine saine pour une vitesse de 1492 tr/mn.....	37
III.10. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) de la machine saine pour une vitesse	

de 1492 tr/mn.....	38
III.11. Rotor du moteur 1.1 kW avec deux barres cassées.....	39
III.12. Courant statorique de la machine avec une barre cassée à la vitesse 1438 tr/mn.....	40
III.13. Courant statorique de la machine avec une barre cassée à la vitesse 1438 tr/mn (Zoom).....	40
III.14. Courant statorique de la machine saine à la vitesse 1438 tr/mn.....	41
III.15. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) du moteur avec une barre cassée pour une vitesse de 1438 tr/mn.....	42
III.16. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) du moteur avec une barre cassée pour une vitesse de 1438 tr/mn.....	42
III.17. Courant statorique de la machine saine à la vitesse 1468 tr/mn.....	43
III.18. Courant statorique de la machine avec une barre cassée à la vitesse 1468 tr/mn.....	43
III.19. Courant statorique de la machine avec une barre cassée à la vitesse 1468 tr/mn (Zoom).....	44
III.20. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) du moteur avec une barre cassée pour une vitesse de 1468 tr/mn.....	45
III.21. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) du moteur avec une barre cassée pour une vitesse de 1438 tr/mn.....	45
III.22. Courant statorique de la machine avec une barre cassée à la vitesse 1492 tr/mn.....	46
III.23. Courant statorique de la machine avec une barre cassée à la vitesse 1468 tr/mn (Zoom).....	46
III.24. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) du moteur avec une barre cassée pour une vitesse de 1492 tr/mn.....	47
III.25. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) du moteur avec une barre cassée pour une vitesse de 1492 tr/mn.....	47
III.26. Courant statorique de la machine avec deux barres cassées à la vitesse 1432 tr/mn....	48

III.27. Courant statorique de la machine avec deux barres cassées à la vitesse 1432 tr/mn (Zoom).....	49
III.28. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) du moteur avec deux barres cassées pour une vitesse de 1432 tr/mn.....	49
III.29. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) du moteur avec deux barres cassées pour une vitesse de 1432 tr/mn.....	50
III.30. Courant statorique de la machine avec deux barres cassées à la vitesse 1458 tr/mn....	51
III.31. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) du moteur avec deux barres cassées pour une vitesse de 1458 tr/mn.....	51
III.32. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) du moteur avec deux barres cassées pour une vitesse de 1458 tr/mn.....	52
III.33. Courant statorique de la machine avec deux barres cassées à la vitesse 1490 tr/mn....	53
III.34. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) du moteur avec deux barres cassées pour une vitesse de 1490 tr/mn.....	53
III.35. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) du moteur avec deux barres cassées Pour une vitesse de 1490 tr/mn.....	54

LISTE DES SYMBOLES

f_s : la fréquence du réseau d'alimentation.

k et n_d : sont des coefficients liés à l'excentricité

p : le nombre de paire de pôles.

R : le nombre des barres rotoriques.

s : le glissement.

λ : le rang des harmoniques du temps ($\lambda = \mp 1, \mp 3, \mp 5, \dots$).

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Malgré le fait que la machine asynchrone à cage soit réputée pour être la plus robuste des machines électriques, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent affecter la durée de vie de cette machine en faisant apparaître des défauts dans le stator et le rotor. Ces défauts entraînent des pertes économiques considérables, il faut donc mettre en œuvre des systèmes de surveillance. L'analyse des signatures du courant statorique, (MCSA, Motor Current Signatures Analysis) est la technique la plus utilisée pour assurer la tâche de la surveillance [1].

Plusieurs phénomènes entrent en jeu pendant le fonctionnement du moteur asynchrone à cage et affectent essentiellement les courants d'alimentation en modifiant leurs formes, on cite par exemple le phénomène de saturation magnétique et l'effet d'encoche du stator et rotor, donc les allures temporelles du courant statorique ne donnent pas beaucoup d'informations, alors l'orientation vers les méthodes de traitement de signal est plus que nécessaire [1].

À la suite de ce qui précède, le mémoire est partagé en trois chapitres.

Le premier recense les notions de la maintenance et de la surveillance qui font partie du diagnostic des défauts dans les machines asynchrones triphasées à cage.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des techniques destinées à la détection des défauts et qui sont basées sur l'analyse spectrales. Le contenu spectral du courant statorique de la machine asynchrone saine et les signatures des différents défauts de cette machine ont lieu dans ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, on va étudier expérimentalement la machine asynchrone triphasée saine et en présence d'un défaut de barres rotoriques.

L'objectif principal de ce mémoire est de vérifier et analyser le contenu spectral du courant statorique de la machine avant et après le défaut.

Ensuite une conclusion clôture notre travail.

CHAPITRE I

ÉTAT DE L'ART

CHAPITRE I

ÉTAT DE L'ART

I.1. INTRODUCTION

À cause de ses avantages assurés (conception simples, coût faible et surtout l'absence de balais-collecteur), la machine asynchrone est la plus utilisée en industrie, les chercheurs sont allés de l'avant pour améliorer ses performances tant qu'il existe beaucoup des types de cette machine (machine asynchrone à multi phases et à double étoile, machine asynchrone à double cage, et à cage profonde, machine asynchrone à double alimentation, machine asynchrone utilisés en génératrices ...). Mais, la machine asynchrone comme tous les dispositifs électromécaniques peut avoir lieu de multiples défaillances [1].

Ce premier chapitre est consacré à la présentation des notions de bases reliées à l'action de diagnostic. Il sera suivi d'une présentation brève de la constitution du dispositif à étudier. Puis nous exposerons les causes de différents défauts qui peuvent apparaître dans une machine asynchrone triphasée.

I.2. CONSTRUCTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASÉE À CAGE

En électrotechnique, un système est un ensemble déterminé de composants en interaction. Tout système est généralement caractérisé par un ou plusieurs fonctions qu'il doit être accomplir dans des conditions données. Le système considéré dans ce mémoire est le moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil. La fonction de ce dispositif est d'assurer la conversion de l'énergie électrique fournie par le réseau en énergie mécanique de rotation avec un niveau de performances donné. Si la fonction de ce système n'est plus assurée, avec les performances demandées, suit à un accident quelconque, le système est alors jugé défaillant [1].

Dans ce paragraphe, on se propose de donner quelques informations sur les constituants de cette machine ainsi que leurs fonctions [1].

- ◆ Le stator : c'est une partie fixe, où est connecté l'alimentation électrique ;
- ◆ Le rotor : c'est une partie tournante, qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.

- ◆ Les paliers : ce sont des organes mécaniques permettant la mise en rotation du rotor et assurant le maintien des différents sous-ensembles.

I.2.1. Le stator

Il est constitué principalement d'un circuit magnétique formé d'un empilage de tôles (matériau ferromagnétique) dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine. Ces tôles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet de courant de Foucault. Donc, la fonction du circuit magnétique est d'assurer le logement et le maintien des conducteurs statoriques dans les encoches. En plus, il garantit la circulation du flux magnétique avec minimum de pertes [1].

Le stator comporte aussi des enroulements (bobinages) répartis dans les encoches du circuit magnétique. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. La fonction des conducteurs d'encoches assure la production d'un champ magnétique tournant à répartition sinusoïdale dans l'entrefer, lorsque ils sont parcourus par un ensemble de courants sinusoïdaux triphasés équilibrés. Ce champ magnétique est à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'isolation entre les conducteurs et le fond des encoches, ainsi qu'entre les groupes de bobines s'effectue à l'aide des matériaux diélectriques de différents types selon les machines asynchrones [1].

Le stator comprend également une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Tous ces composants statoriques sont englobés dans le carter ; qui présente une protection contre l'environnement extérieur et assure la fixation de la machine ainsi que le support et le centrage des flasques. Généralement, on trouve sur le carter des ailettes qui permettent le refroidissement de la machine [1].

I.2.2. Le rotor

Le rotor est constitué d'un arbre qui est généralement fabriqué en acier moulé, il permet la transmission de l'énergie mécanique produite vers la charge. Ses extrémités présentent un support pour les bagues intérieures des roulements à billes. L'arbre de la machine asynchrone assure le support et le centrage d'un circuit magnétique rotorique formé des tôles d'acier, tout comme le stator. Il a comme fonction d'assurer le logement des conducteurs rotoriques et de garantir la circulation du flux magnétique.

Les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage. Les enroulements des rotors bobinés sont construits de la même façon que les enroulements statoriques. Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système bagues – balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage, les enroulements rotoriques sont constitués des barres de cuivre ou d'aluminium. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par des anneaux de court-circuit fabriqués aussi en cuivre ou en aluminium. En générale, les conducteurs rotoriques ont comme fonction d'assurer la production de l'énergie mécanique par interaction entre le champ tournant créé par leurs courants induits et le champ tournant produit par les courants statoriques [1].

Les rotors des machines asynchrones comportent aussi un ventilateur afin d'améliorer le refroidissement.

I.2.3. Les paliers

Les paliers maintiennent le rotor et assurent sa libre rotation. Ils sont constitués des flasques et des roulements à billes. Les flasques moulés en fonte sont fixés sur le carter statorique, ils assurent le support et le centrage des bagues extérieures des roulements à billes. Ces derniers insérés à chaud sur l'arbre garantissent le guidage en rotation du rotor [1].

I.3. NOTION SUR LA SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT

La sûreté de fonctionnement unanimement appelée la science des défaillances consiste à évaluer les risques potentiels, à prévoir l'occurrence des défaillances et tenter de minimiser les conséquences des situations catastrophiques lorsqu'elles se présentent. Elle inclut leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maîtrise. Il s'agit d'un domaine transverse qui nécessite une maîtrise globale du système comme les conditions d'utilisation, les risques extérieurs, les architectures fonctionnelles et matérielles, la structure et la fatigue des matériaux. C'est à partir de nombreux travaux réalisés par l'évaluation des résultats d'expérience et des rapports d'analyse d'accidents que des avancées notables ont été enregistrées dans ce domaine [2].

I.4. LA MAINTENANCE

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la disponibilité des systèmes industriels, c'est-à-dire, d'assurer que le système fonctionne lorsqu'on le sollicite. La responsabilité de cette tâche repose sur la maintenance. Selon l'association française de normalisation

(AFNOR), la maintenance est « ensembles des activités destinées à maintenir ou à établir un bien dans un état pour accomplir une fonction requise ». Il y a deux grandes classes de la maintenance [1, 2, 3]:

- ◆ Maintenance corrective ;
- ◆ Maintenance préventive : - systématique ;
- conditionnelle.

I.4.1. La Maintenance Corrective

C'est un ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien. Autrement dit, la maintenance corrective est effectuée après la détection d'une panne : elle devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines. Ce type de maintenance sera réservé aux matériels peu coûteux, non stratégiques pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité [1, 4].

La maintenance corrective comprend : la localisation de la panne, et son diagnostic, la remise en état et le contrôle du bon fonctionnement avant la remise en service. Le taux d'utilisation de cette politique est égal à 50 % des industries générales.

Les avantages de ce type de maintenance sont :

- ✓ Faible coût de maintenance (si la panne est sans conséquences graves) ;
- ✓ Nécessite très peu de planification.

Les inconvénients sont :

- Coût de réparation très important lorsque la panne est intempestive ;
- Stockage important de pièces ;
- Peu de sécurité des travailleurs ;
- Temps de réparation élevé ;
- Ruptures de production et par conséquent des pertes économiques considérables ;

I.4.2. Maintenance Préventive

Ce type de maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des équipements au cours de l'utilisation. La mise en pratique de ce type de maintenance nécessite la décomposition des sous-systèmes en composants (roulement, circuit magnétique, etc...) [1]. Les buts de la maintenance préventive, sont:

- ✓ Augmenter la durée de vie des équipements.
- ✓ Diminuer le budget de la maintenance.
- ✓ Supprimer les causes des accidents graves.

On distingue deux types de la maintenance préventive; la maintenance préventive systématique la maintenance préventive systématique et la maintenance préventive conditionnelle.

I.4.2.1. La maintenance préventive systématique

La maintenance systématique est un type de maintenance planifiée dans le temps (graissage, lubrification, nettoyage, dépoussiérage, calibrage,...). Il s'agit là d'éviter les causes de défaillances et de vieillissement des composantes du système.

Généralement, la maintenance préventive systématique s'adresse aux éléments dont le coût des pannes est élevé, mais ne revenant pas trop cher en changement (les meilleurs exemples sont le changement systématique de l'huile, des filtres, changement de la courroie de synchronisation, des roulements, des paliers de rotation ...). À noter que dans une maintenance planifiée, le remplacement des composantes, se fait dans des échéances inférieures à leurs durées de vie, ce qui peut constituer dans d'autres conditions, une sorte de gaspillage [1, 2].

Pratiquement, la maintenance préventive systématique s'exécute sans contrôle préalable de l'état du système et à des intervalles de temps définis (révision périodique.). Par exemple :

◆ **Le remplacement :**

- De l'huile des boîtes de vitesse, des réducteurs, des mécanismes en mouvement ;
- Des filtres (air, huile, carburant,...) ;

-
- Des pièces d'usure normale (plaques de glissière, plaquettes de freins, disques d'embrayage, courroie de transmission,...) ;
 - Des roulements, paliers de rotation ;
 - Des ressorts et d'autres pièces sujets à un phénomène de fatigue mécanique et électrique.

◆ **Le réglage et l'étalonnage :**

- Des jeux de glissières ou des cales d'ajustement ;
- Des tensions de courroies ;
- Des niveaux de pressions ;

◆ **Le contrôle de l'état général :**

- Des divers blocages ;
- Des niveaux d'huile ;
- Apparence d'usure ou de fissure.

Les avantages de ce type de maintenance sont :

- ✓ Réduction des coûts et des durées de maintenance par rapport à l'entretien correctif ;
- ✓ Bonne planification des réparations et des ressources ;
- ✓ Contrôle du niveau de stockage des pièces de rechange ;
- ✓ Généralement, peu de catastrophes ;
- ✓ Sécurité renforcée.

Tandis que les inconvénients sont :

- Révisions non nécessaires (l'entretien n'est pas fonction de l'état de la machine, mais plutôt de la durée d'utilisation) ;
- Remplacement de pièces en bon état ;
- Création de défauts lors des remontages (si les procédures ne sont pas claires et contrôlées).

I.4.2.2. La Maintenance préventive conditionnelle

C'est un type de maintenance déclenché suite à un symptôme observable (température, vibration, jeu excessif, ...) permettant de prédire une défaillance prochaine. Il s'agit là d'intervenir juste avant que la panne ne survienne. La maintenance préventive conditionnelle est réalisée dès lors qu'une mesure dépasse une valeur précise (seuil) d'une grandeur physique (température, pression...) [2].

La maintenance préventive conditionnelle s'adresse aux pièces des machines coûtant chers en remplacement et pouvant être surveillées par des méthodes non – destructives (vibration, huile, température, courant, etc.). Autrement dit, on ne change l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure affectant les performances du fonctionnement. La maintenance préventive conditionnelle nécessite une équipe de maintenance de niveau technologique plus élevé formée en méthodes du diagnostic [2].

Les avantages de ce type de maintenance sont :

- ✓ Réduction de coût et de la durée de réparation par rapport à l'entretien préventif systématique;
- ✓ L'accroissement de la durée de vie des pièces par rapport à une politique de changement systématique ;
- ✓ Remplacement uniquement des pièces défectueuses ;
- ✓ Pas de catastrophes et sécurité accrue ;
- ✓ Planification optimisée des périodes de travail ;
- ✓ Meilleur rendement de la production.

Les outils ou bien les signaux qui peuvent être utilisés par la maintenance préventive conditionnelle sont :

- Mesure de température, thermographie infrarouge (lignage, roulements, paliers)
- Mesures de pression (paliers) ;
- Mesure de débit (paliers) ;
- Analyse d'huile (roulements, paliers, engrenages) ;

-
- Mesure de vibration (déséquilibre, lignage, roulements, paliers, engrenages, jeux, etc.) ;
 - Mesure du courant statorique, du couple, de la vitesse ou de la puissance.

Enfin, la méthodologie suivie par la maintenance conditionnelle pour aboutir à ces objectifs est :

- Choisir un paramètre descriptif de l'évolution du défaut ;
- Suivre ce paramètre dans le temps (maintenance continue ou périodique.) ;
- Établir des seuils limites d'avertissement (pré-alarme.) à partir duquel on signalera l'existence d'un défaut ;
- Établir le diagnostic de défaut ;
- Prédire la date de bris ;
- Commander les pièces de rechange ;
- Déterminer la date d'entretien avant le bris.

D'après ces définitions, il apparaît donc que si un composant d'un système est jugé défaillant, sa réparation ou son remplacement doit être considéré comme de la maintenance corrective ; si celui-ci est jugé non défaillant mais en état dégradé, sa réparation ou son remplacement doit être considéré comme de la maintenance préventive [1].

I.5. LA SURVEILLANCE

C'est un ensemble des actions réalisées manuellement ou automatiquement, destinée à observer l'état d'un bien. La surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance ; et elle sert d'une part à signaler les anomalies de fonctionnement et d'autre part, prendre en compte les actions destinées à maintenir l'opération des systèmes [1, 4].

I.6. LE DIAGNOSTIC

Le diagnostic fait partie de la maintenance. C'est un ensemble des actions consistant à identifier les causes probables de la défaillance. Les deux principales tâches de diagnostic sont : la détection et la localisation des défauts. La détection consiste à signaler l'existence du défaut, tandis que la localisation a pour objet de trouver le type de défaut [1, 3, 4].

Aucun système industriel ni à l'abri des anomalies ou des perturbations accidentels, qui entraînent un mauvais fonctionnement. Trois types d'anomalies sont à considérer [4] :

- ◆ **Erreur** : tout écart entre la valeur mesurée est la valeur réelle ;
- ◆ **Défaut** : l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir ses fonctions requises avec des performances définies dans les spécifications techniques ;
- ◆ **Défaillance** : l'incapacité d'un dispositif à accomplir une fonction requise.

Donc, le diagnostic a pour objectif de détecter d'une manière précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance totale dans l'installation industrielle. La procédure de diagnostic s'articule autour des étapes suivantes [1].

- ❖ L'extraction des informations issues de capteurs de la machine pour obtenir des indicateurs de défauts ;
- ❖ Les indicateurs de défauts doivent être évalués afin de produire des symptômes (ou indices) cette étape consiste à définir un seuil à partir duquel on déclarera l'existence du défaut ;
- ❖ La décision représente la dernière étape de la tâche de diagnostic. Il s'agit de déclarer l'élément défaillant à partir de la comparaison de la signature actuelle avec une référence. L'étape de la décision va nous permettre de différencier les défauts, c'est-à-dire, trouver la cause de l'anomalie.

I.7. LES PRINCIPAUX DEFAUTS DANS LA MACHINE ASYNCHRONE

Si l'on élimine les pannes dues à des causes intrinsèques, c'est-à-dire, résultant d'une mauvaise conception (mauvais choix des matériaux), d'une mauvaise fabrication (défauts d'usinage) ou d'un mauvais montage (serrage, désalignement) du moteur, les défaillances usuelles d'une machine asynchrone sont les suivantes [5,6] :

I.7.1. Défauts statoriques

- Court circuit entre phases statoriques ou entre spires d'une même phase.
- Ouverture d'une phase.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).

I.7.2. Défauts rotoriques

- Rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).
- Défaut de roulements.
- Excentricité statique et/ou dynamique...

Ces défauts peuvent avoir pour origines des problèmes de nature très différentes, souvent reliés les uns aux autres [7, 8] :

- Causes thermiques : balourds, points chauds, température ambiantes élevée, ...
- Causes électriques : transitoire d'alimentation, déséquilibres, ...
- Causes mécaniques : chocs en service, vibrations, jeux, ...
- Causes chimiques : corrosion, humidité, ...

La diversité des défauts et des causes possibles entraînant une panne dans la machine asynchrone, facilite les erreurs sur la nature et la localisation de cette panne. Un diagnostic fiable, nécessite une bonne connaissance des mécanismes des défauts à surveiller, ainsi que leurs conséquences sur les signaux issus de la machine [8].

Plus de détail sur ces défauts et ses signatures aura lieu dans le prochain chapitre.

I.8. CONCLUSION

Ce chapitre est un prétexte à la présentation des notions très important en diagnostic, tels que la maintenance et la surveillance et leur rôle, aussi nous avons exposé la machine asynchrone, leurs défauts et leurs causes. Comme nous avons mentionné auparavant, notre travail est consacré à l'étude du contenu spectrale du courant statorique de la machine et la détection des cassures de barres d'un moteur asynchrone. Pour cela, il faut disposer les méthodes déjà utilisée, et aussi bien cerner toutes les composantes fréquentielles de ce type de machine, ceci fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE II

MÉTHODES DÉDIÉES À LA DÉTECTION DES DÉFAUTS DANS LES MACHINES ASYNCHRONES

CHAPITRE II

MÉTHODES DÉDIÉES À LA DÉTECTION DES DÉFAUTS DANS LES MACHINES ASYNCHRONES

II.1. INTRODUCTION

L'étude pratique présentée dans le troisième chapitre a permis d'analyser et d'identifier les changements spectraux qui apparaissent aux niveaux des courants statoriques, lorsque la machine passe du fonctionnement sain vers un fonctionnement avec défaut de barres. Dans ce chapitre, nous allons exposer les méthodes destinées à la détection des défauts dans les machines asynchrones.

D'abord, on va présenter les approches de modélisation et ses limites, puis on va exposer la technique de diagnostic basée sur l'analyse des signaux de la machine. La technique d'analyse spectrale du courant statorique sera appliquée sur des signaux réels issus de notre banc d'essai.

L'utilisation de la technique d'analyse spectrale du courant statorique nécessite évidemment la bonne connaissance des signatures caractéristiques des différents défauts, et aussi la connaissance des composantes fréquentielles qui existent d'une façon permanente dans le spectre du courant, alors avant d'aborder l'étude expérimentale dans le futur chapitre, nous exposons dans ce chapitre les signatures spectrales des défauts de la machine, et aussi les harmoniques permanents dans le spectre [2].

II.2. MODELES DEDIES AU DIAGNOSTIC DE LA MACHINE ASYNCHRONE

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, la vérification sur prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défauts et elles apportent également la possibilité des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Plusieurs voies de modélisation existent, elles sont actuellement utilisées pour examiner des problèmes tels que la commande, la conception ou la surveillance.

En ce qui nous concerne, nous nous intéressons aux modèles simulant le comportement électromagnétique de la machine asynchrone en vue de faire le diagnostic.

Parmi les approches de modélisation, nous citons deux :

II.2.1. Approche analytique

Les modélisations analytiques reposent sur le concept d'inductance, notion qui caractérise par définition une relation linéaire flux-courant. Toute considération de la saturation magnétique, phénomène physique (effet de peau, harmoniques de flux d'entrefer) omniprésent dans le fonctionnement normal de la machine, se trouve a priori exclue de cette approche. Cette approche globale des phénomènes électromagnétiques permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine, chaque branche est constituée d'une résistance en série avec une force électromotrice. Ensuite l'utilisation de la théorie des circuits et des systèmes permet de trouver les équations différentielles caractérisant le fonctionnement de la machine. Ces dernières seront intégrées analytiquement ce qui permet de réduire considérablement la complexité des calculs. Dans ce cadre, plusieurs modèles mathématiques ont été développés avec plusieurs degrés de complexité depuis les modèles triphasés au stator et rotor jusqu'aux modèles triphasés au stator et multiphasés au rotor (multi-enroulements) [4].

II.2.2. Approche numérique

On cite deux méthodes :

II.2.2.1. Méthode des schémas magnétiques équivalents

Cette approche consiste à découper le circuit magnétique qui constitue la machine étudiée en tubes de flux, caractérisés chacun par sa réluctance ou sa perméance. Ces grandeurs, tout comme les inductances, peuvent être définies selon les valeurs de flux, prenant ainsi en considération la saturation magnétique. Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméances d'entrefer variable selon la position du rotor. Les circuits électriques statoriques et rotoriques sont considérés grâce aux équations de couplage électrique/magnétique. Au rotor, les n phases sont constitués par les mailles électriques limitées par deux barres successives. Ce couplage est concrétisé au niveau de la mise en équation par le choix des inconnues du système qui seront simultanément les flux dans les différentes mailles du réseau magnétique ainsi que les courants statoriques et rotoriques. Pour la résolution des équations, un problème de non-linéarité s'impose et nécessite l'utilisation d'une méthode itérative en pas à pas dans le temps [4].

II.2.2.2. Méthodes des éléments finis

Il s'agit cette fois de découper le circuit magnétique de la machine en éléments de dimension suffisamment faible pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes. A partir des formes locales des équations de Maxwell, il est possible d'exprimer le problème à résoudre. La résolution analytique est complexe et ne permet de traiter la saturation que de façon approchée. Les progrès des calculateurs ont permis d'envisager leur résolution numérique. De nombreux outils logiciels leur sont dédiés. Citons, entre autres, ANSYS, FLUX 2D, FLUX 3D et MAXWELL [7, 9]. Cependant, ces logiciels ont historiquement été conçus pour déterminer le champ électromagnétique, et dans l'objectif de l'optimisation du dimensionnement.

Ces trois méthodes ont chacune leur place sur la double échelle complexité/précision des approches de simulation. La méthode analytique est la plus simple à mettre en œuvre mais elle nécessite des hypothèses restrictives, vient ensuite celle des schémas magnétiques, enfin celle des éléments finis. C'est cette dernière qui nécessite des moyens et des temps de calculs plus importants.

L'adéquation de ces méthodes au diagnostic de la machine existe pour chacune d'entre elles selon ce que l'on cherche à diagnostiquer. La méthode des éléments finis, qui reproduit le plus fidèlement le comportement électromagnétique de la machine permet de simuler des dysfonctionnements réels en son sein avec une manifestation tout à fait localisée du défaut (par exemple, des ruptures des barres). Cependant, les moyens et temps de calcul nécessaires à cette méthode constituent son handicap majeur et freinent son utilisation pour la simulation et l'évolution d'algorithmes de détection de défauts. La modélisation par schéma magnétique peut tenir compte d'une particularité géométrique du circuit magnétique ou d'une spécificité du circuit électrique. Les résistances statoriques, l'effet pelliculaire ne peuvent pas être correctement pris en compte.

II.3. TECHNIQUES DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES

De multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone, elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques. L'étude des défauts des machines à induction a un double objectif :

- ❖ Le premier consiste à comprendre leur genèse afin de pouvoir prévoir leur gravité et leur développement.

- ❖ Le deuxième, est d'analyser leur impact sur le comportement de la machine et de là, déduire les signatures permettant, à posteriori, de remonter jusqu'à la cause de la défaillance.

Ces échecs peuvent causer de grandes pertes au niveau de la production. Pour cette raison il est impératif de trouver un système de diagnostic pour une exploitation sûre.

Pour apporter des solutions innovantes aux défauts de la machine asynchrone, de nombreux travaux ont été effectués dans ce domaine. Nous nous limiterons dans ce qui suit à l'étude des techniques concernant la détection des défauts machine plus précisément les défauts de barres au rotor.

Le diagnostic des machines peut se faire à partir de l'analyse de signaux tels que les courants, les vibrations, le flux axial, le couple électromagnétique ...etc. Ces signaux peuvent fournir des informations très riches. Ils sont habituellement analysés dans le domaine fréquentiel.

II.3.1. 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 [5, 10].

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (\text{II.1})$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer, est le produit de la F.m.m (Fm) et de la perméance (P).

$$B_s = Fm \cdot P \quad (\text{II.2})$$

La force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor, en plus la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, l'excentricité). De ce fait, l'analyse spectrale des signaux de vibrations mécaniques, permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques.

Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres.

II.3.2. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Pratiquement, de multiples solutions permettent de capter le flux de fuite axial dans une machine électrique, tel que les sondes à effet Hall. Mais l'exemple de base consiste à enrouler une bobine autour de l'arbre de la machine, celle-ci sera le siège d'une FEM induite liée au flux de fuite axial. La réalité fait que les circuits électriques et magnétiques de la machine ne sont jamais parfaits à causes des tolérances et des défauts de fabrication parmi d'autres, et présentent souvent quelques degrés d'asymétrie permettant la génération des flux de fuite dont le contenu spectral est lié directement aux harmoniques contenus dans les courants statoriques et rotoriques [5, 7].

II.3.3. 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 du non – idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non – linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évités [5].

II.3.4. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Cette technique, permet de détecter aussi bien les défauts rotoriques que les défauts de court-circuit entre spires dans les bobines statoriques. Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tous défauts, soit au niveau du stator ou au rotor, affectent directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de la santé du moteur [5].

II.3.5. Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

La puissance instantanée est la somme des produit des courants est des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau des 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 apport aux autres [7].

II.3.6. Diagnostic par mesure du courant statorique

Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car il est très facile d'accès et nous permet de détecter aussi bien les défauts électriques que les défauts purement mécaniques [1, 2, 4, 5, 10, 11]. Cette technique est dénommée dans littérature "Motor Current Signature Analysis" (MCSA).

Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

- ◆ L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoche rotorique et nombre de paires de pôles).
- ◆ La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présents dans le spectre du courant à l'état sain.

Cette traditionnelle technique sera appliquée sur les signaux réels obtenus de notre banc d'essai (chapitre III)

II.4. SIGNATURES SPECTRALES ET DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

II.4.1. Les défauts de roulements

D'après l'étude statistique nous remarquons que ce défaut présente un pourcentage élevé [12, 13, 14]. Pourtant, ce type de défaut ainsi que sa détection est très peu mentionnée dans la littérature.

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et une autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (figure II.1). En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par de petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface [5].

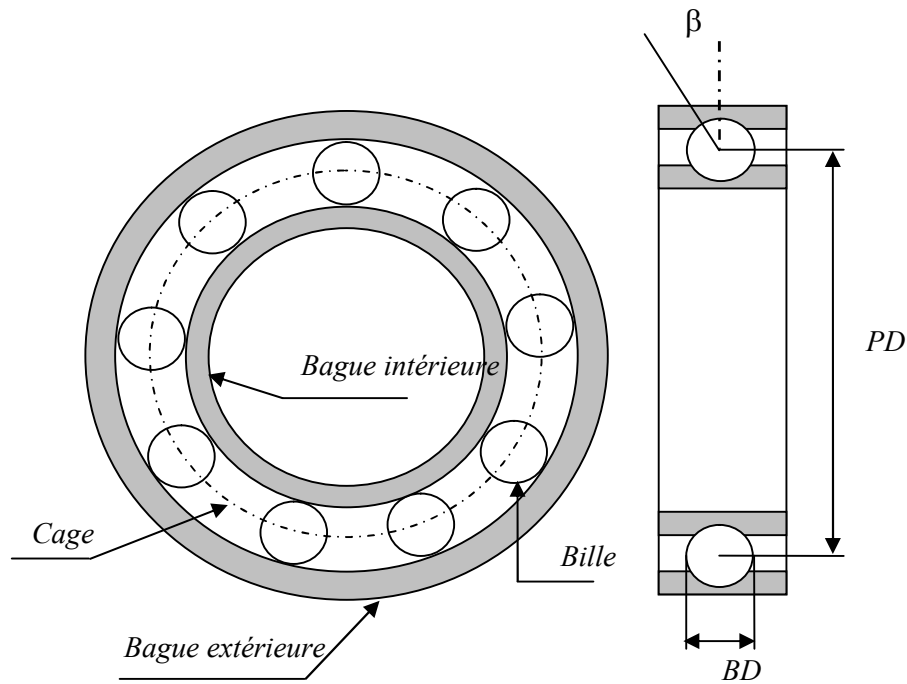


Figure II.1. Dimension du roulement à billes [7]

Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations détectables et augmente le niveau du bruit. Par conséquent, des variations d'entrefer génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquence [5] :

$$f_{roul} = |f_s \pm k f_v| \quad (\text{II.3})$$

D'où : $k = 1, 2, \dots$, et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations, soit (f_{bille} , $f_{b.int}$ ou $f_{b.ext}$).

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par le défaut, et sont liées à ses paramètres physiques. Les fréquences de vibrations qui caractérisent les défauts de roulements à billes sont [5] :

- Défaut au niveau d'une bille :

$$f_{bille} = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (\text{II.4})$$

- Défaut sur la bague intérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (\text{II.5})$$

- Défaut sur la bague extérieure :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right] \quad (\text{II.6})$$

Où n_b est le nombre d'éléments roulants, BD le diamètre d'un élément roulant, PD la distance entre les centres des billes diamétralement opposées, et β l'angle de contact des billes avec les bagues du roulement et f_{rot} est la fréquence de rotation du rotor.

II.4.2. Les cassures de barres et portions d'anneaux

La détection de ces défaillances est rendue difficile par le fait que lors de leurs apparitions, la machine continue à fonctionner. Ces défauts ont par ailleurs un effet cumulatif. Le courant qui conduisait une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres adjacentes (figure II.2). Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres qui provoquera l'arrêt de la machine. Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor et des à-coups des couples, ceci va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques [7].

Un défaut dans le rotor va engendrer une sorte d'asymétrie qui, dans le cas d'une alimentation par un système de tensions triphasées symétrique, va être à l'origine d'un champ magnétique inverse de fréquence $-g f_s$ dans le circuit rotorique. Cela va engendrer des courants circulant dans le circuit statorique à une fréquence de $(1-2g)f_s$. Une autre composante apparaît aussi dans le spectre du courant statorique à une fréquence de $(1+2g)f_s$. Cette composante est due aux fluctuations de la vitesse provoquées par les oscillations du couple [5, 7].

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

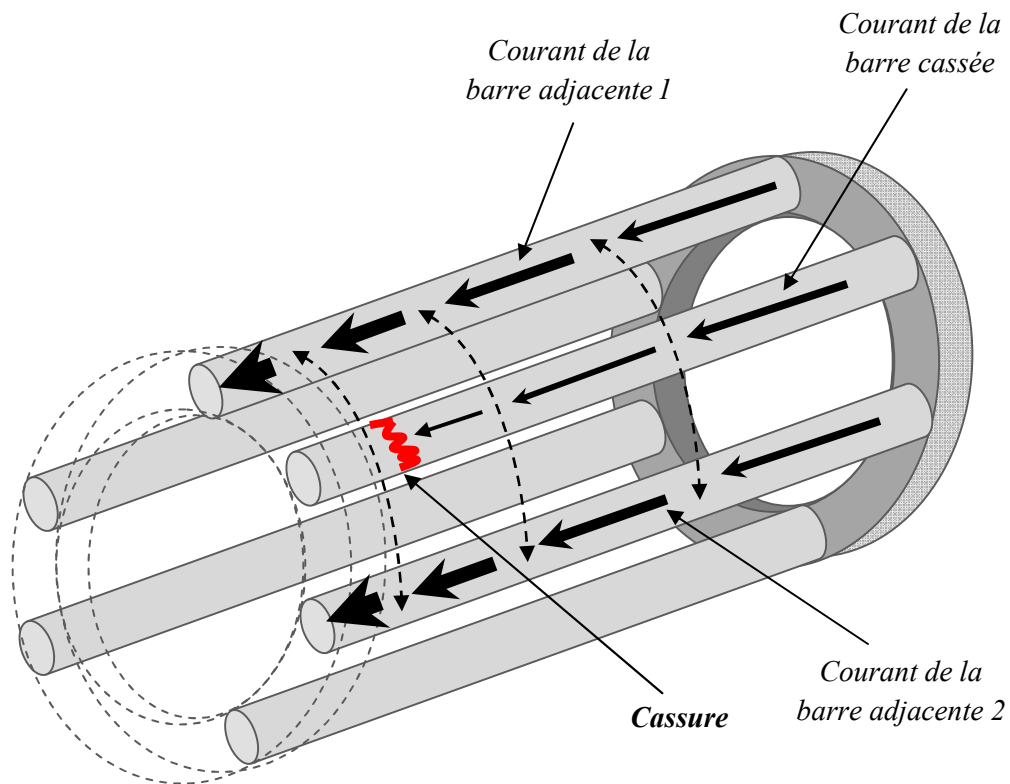


Figure II.2. Représentation de l'effet d'une barre cassée sur les barres adjacentes [7]

D'autres composantes spectrales peuvent apparaître dans le spectre du courant statorique à des fréquences données par l'expression suivante [7]:

$$f_b = \left[\frac{k}{p/2}(1-g) \pm g \right] \cdot f_s \quad (\text{II.7})$$

Avec : $\frac{k}{p/2} = 1, 3, 5, 7, \dots$

Les défauts de cassure de barres génèrent également dans les signaux du couple et de vitesse des composantes de fréquences $2g f_s$ et $4g f_s \dots$ [2].

II.4.3. Défauts d'excentricité

On parle d'excentricité dans une machine lorsqu'on est en face d'une uniformité de l'entrefer. Ce défaut peut survenir suite à la flexion de l'arbre, un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, l'usure des roulements, un déplacement du noyau statorique...etc. Lorsque cette excentricité s'accroît, la résultante des forces magnétiques radiales déséquilibrées (connue aussi sous le nom de traction magnétique déséquilibrée) peut causer un frottement entre le stator et le rotor, celui-ci a des conséquences néfastes sur le circuit magnétiques et l'enroulement du stator et du rotor [2].

On distingue deux principaux types d'excentricité (figure II.3) qui peuvent apparaître dans les machines tournantes ; l'excentricité statique et l'excentricité dynamique. On cite aussi dans la littérature l'excentricité axiale, ou plus généralement, à une non uniformité axiale de l'entrefer.

❖ L'excentricité statique

Dans ce type d'excentricité, la position de l'épaisseur minimale de l'entrefer est fixe dans l'espace. Elle peut être causée par l'ovalité de la partie intérieure du stator ou encore par le mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction. Si cependant l'assemblage entre le rotor et l'arbre est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique ne change pas.

❖ L'excentricité dynamique

L'excentricité dynamique est due à une déformation ou un désalignement du rotor ou à un desserrage de barres rotoriques. Dans le cas de l'excentricité dynamique, le centre du rotor n'est pas confondu avec son centre de rotation. Et par conséquent, la position de l'entrefer minimale change avec la position du rotor. Ce qui fait que l'excentricité dynamique dépend du temps et de l'espace, alors que l'excentricité statique dépend seulement de l'espace.

La présence de l'excentricité se manifeste donc par l'apparition d'harmoniques dans le spectre du courant. Ces fréquences sont [1, 2, 10]:

$$f_{exc} = f_s \left[(\lambda R \pm n_d) \frac{(1-g)}{p} \pm \omega_s \right] \quad (\text{II.8})$$

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

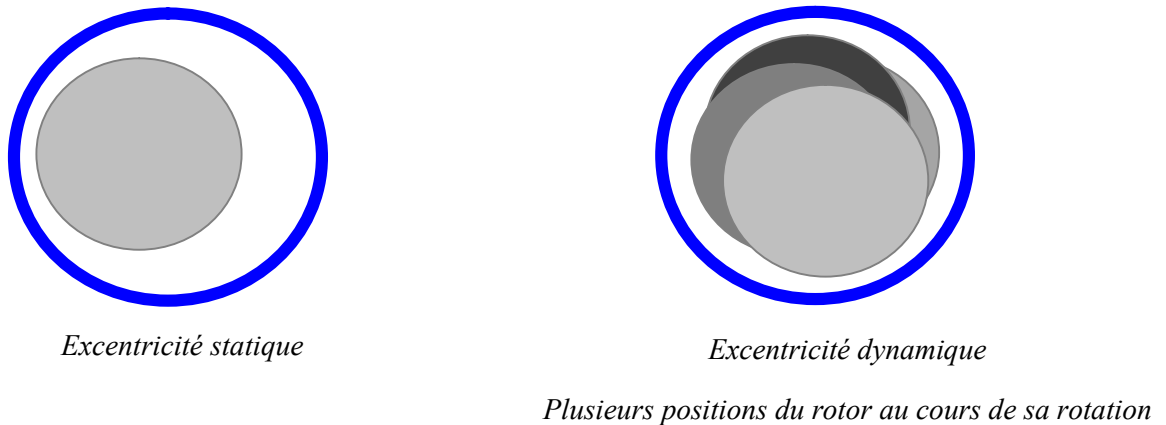


Figure II.3. Représentation de l'excentricité [7]

II.4.4. Défauts statoriques

Les défauts au stator des moteurs asynchrones sont dus en grande partie aux défauts d'isolation. On rappelle que ces défauts peuvent être : des courts-circuits entre spires des enroulements de la même phase ou de phase différentes, des courts-circuits phase-terre, une ouverture de phase provoque une dissymétrie au niveau du stator, ou encore un déséquilibre dans les tensions d'alimentation (figure II.4).

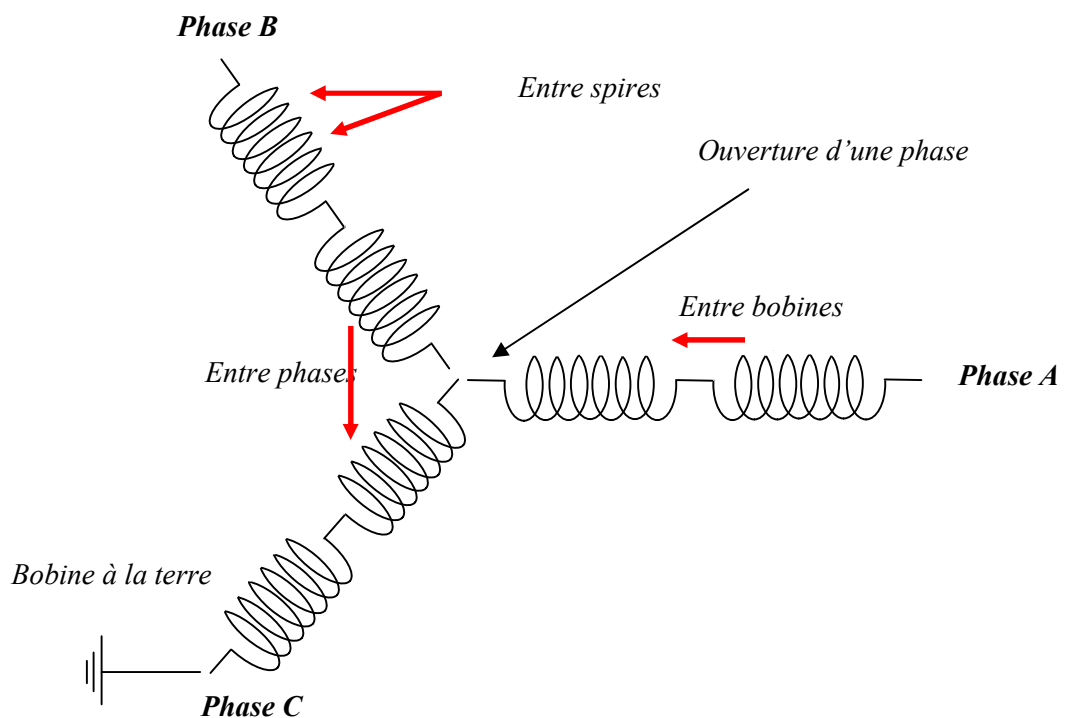


Figure II.4. Représentation des différents défauts statoriques [7]

La fréquence caractéristique du défaut de court circuit est [5] :

$$f_{cs} = f_s \left\{ \frac{n}{p} (1-g) \pm k \right\} \quad (\text{II.9})$$

Avec : $n=1, 2, 3, \dots$ et $k=1, 3, 5, \dots$

II.5. COMPOSTANTES FRÉQUENTIELLES PERMANENTES DANS LE SPECTRE DU COURANT STATORIQUE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE SAINE

D'après [2, 10] tous les harmoniques permanents qui peuvent apparus dans le spectre du courant statorique sont:

- **Une série d'harmoniques dus à la saturation (saturation harmonics, time harmonics):** qui sont tirées à partir de la formule [2]:

$$H_s = 3k f_s \quad (\text{II.10})$$

Avec k impair

- **Une série des harmoniques de la force magnétomotrice (fmm) (mmf harmonics):** ces harmoniques sont les plus éminents dans le spectre du courant statorique de la machine asynchrone, leur présence est conforme à la définition de la fmm, ce sont un résultat du courant qui traverse le bobinage statorique et donc c'est une conséquence de la nature discrète des enroulements statoriques, ces harmoniques sont donnés par la formule [2]:

$$H_m = (6k \mp 1) f_s \quad (\text{II.11})$$

Avec ($k = \mp 1, \mp 2, \dots$)

- **Une série d'harmoniques d'encoche rotoriques RSHs (Rotor Slot Harmonics):** leur existence ne dépend pas seulement de la fmm, la perméance du stator et du rotor et la denture de stator et de rotor, mais ils existent aussi dans le spectre du courant de statorique que pour un nombre combiné de pair de pôles et les barres rotoriques.

Généralement les fréquences des RSHs sont données par la formule suivante [1, 2] :

$$f_H = \left| \left(KR \frac{(1-s)}{p} \pm \partial \right) f_s \right| \quad (\text{II.12})$$

f_s : la fréquence du réseau d'alimentation.

λ : le rang des harmoniques du temps ($\lambda = \mp 1, \mp 3, \mp 5, \dots$).

R : le nombre des barres rotoriques.

s : le glissement.

p : le nombre de pair de pôles.

k et n_d : sont des coefficients liés à l'excentricité, $n_d = 0$ c'est le cas d'excentricité statique, $n_d = 1, 2, 3, \dots$, c'est le cas d'excentricité dynamique (n_d est le rang des harmoniques d'excentricité). Pour le cas d'une machine saine $k=0$ et $nd=0$, alors on obtient les fréquences des harmoniques d'encoches rotoriques comme suit [2]:

$$f_{RSHs} = \left| \left(\lambda \mp R \frac{(1-s)}{p} \right) f_s \right| \quad (\text{II.13})$$

$$f_r = \frac{(1-s)}{p} f_s \quad (\text{II.14})$$

$$f_{RSHs} = |\lambda f_s \mp R f_r| \quad (\text{II.15})$$

Pour $\lambda = 1$ on obtient les harmoniques de premier ordre, appelés: les harmoniques principaux d'encoches rotoriques (Principal Slot Harmonics PSHs) [2, 10].

II.6. ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE

Comme nous l'avons vu précédemment, la technique d'analyse spectrale joue un rôle très important pour vérifier l'état sain de la machine asynchrone triphasé, pour cela nous avons réservé ce paragraphe pour donner un rappel sur cette technique.

Dans le prochain chapitre, on s'intéresse à l'utilisation d'une méthode basée sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT). C'est un outil mathématique très utilisé. Elle permet de décrire n'importe quel signal par son spectre de fréquence ; ce qui prêt bien à notre application dans la mesure où de nombreux phénomènes associés aux défauts, se traduisent par l'apparition des nouvelles fréquences liées directement au glissement ou la modification des amplitudes des harmoniques qui déjà existes dans le spectre.

II.6.1. La Transformée de Fourier Rapide

On rappelle que la transformée de Fourier Rapide $X(f)$ d'un signal $x(t)$ continu dans le temps est donnée par [1, 5]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (\text{II.16})$$

Cependant, un ordinateur ne peut traiter que des signaux numériques, ceux-ci sont obtenus après un échantillonnage. Dans notre cas, les signaux à analyser sont les courants statoriques acquises à l'aide de la carte *dSpace* en utilisant des capteurs de courant à effet Hall.

Avec un ordinateur, il est impossible de calculer la FFT $X(f)$ pour une valeur quelconque de la fréquence f . Donc, on ne calcule la FFT que pour des multiples de Δf . C'est la notion de la Transformée de Fourier Discrète (DFT). En conséquence, la DFT $X(n)$ d'un signal échantillonné $x(k)$ est donnée par [1]:

$$X(n) = \sum_{k=1}^{N_e} x(k)e^{-j2\pi k \frac{n}{N_e}} \quad (\text{II.17})$$

Avec $n = 1, 2, \dots, N_e$

Il est important de noter que la résolution fréquentielle joue un rôle primordial quant à la clarté du spectre. Elle doit être de faible valeur pour qu'on puisse séparer les harmoniques proches. Dans le chapitre suivant, les spectres seront visualisés dans une échelle logarithmique normalisée par rapport au maximum.

II.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, notre objectif est de faire une étude sur les harmoniques de la machine asynchrone triphasée saine et avec défauts, alors un bagage théorique sur les méthodes utilisées et les techniques possibles pour arriver à atteindre ce but est plus que nécessaire.

Dans ce chapitre nous avons représenté les différents aspects de modélisation de la machine asynchrone pourtant que notre étude est expérimental, c'est dans le but de vérifier et donner les limites de la modélisation.

Ensuite nous avons donné les signaux de la machine asynchrone qui peuvent être analysés pour traiter les harmoniques de la machine, l'analyse spectrale du courant statorique sera utilisée dans le prochain chapitre.

Puis nous avons donné les différentes fréquences qui caractérisent les défauts de la machine asynchrone.

À la fin de ce chapitre nous avons ajouté un rappel sur l'outil mathématique utilisé pour le traitement de nos signaux.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

III.1. INTRODUCTION

Dans ce travail, on s'intéresse seulement à l'utilisation de la méthode de la Transformée de Fourier Rapide (FFT), elle permet de décrire n'importe quel signal par son spectre de fréquence, ce qui prôt bien à notre étude dans la vérification où de nombreux phénomènes associés aux défauts et aussi des phénomènes physique (saturation).

Les changements dans le spectre se traduisent par l'apparition des nouvelles composantes fréquentielles liées directement aux défauts ou bien au glissement ou la modification des amplitudes des harmoniques qui déjà existent dans le spectre [2].

Dans ce présent chapitre, on va étudier expérimentalement le moteur asynchrone triphasé à cage en présence d'un défaut de barres rotoriques.

L'objectif principal de cette étude est de vérifier et analyser le contenu spectral du courant statorique de la machine avant et après le défaut.

III.2. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI

Les essais expérimentaux sont effectués au sein du Laboratoire de Génie Électrique de Biskra (LGEB) (figure III.1). Le moteur triphasé asynchrone à cage utilisé pour notre étude expérimentale est un moteur tétra polaire de 1.1 kW fabriqué par *Leroy somere*.

Le stator est constitué de 48 encoches alors que le rotor se compose de 28 barres en Aluminium. Le moteur est alimenté en le branchant directement à une source triphasée variable. Le banc d'essai est équipé par un ensemble des instruments de mesure et des capteurs de tension, de courant et de couple. L'acquisition des signaux est effectuée par l'intermédiaire d'une carte *dSpace*.

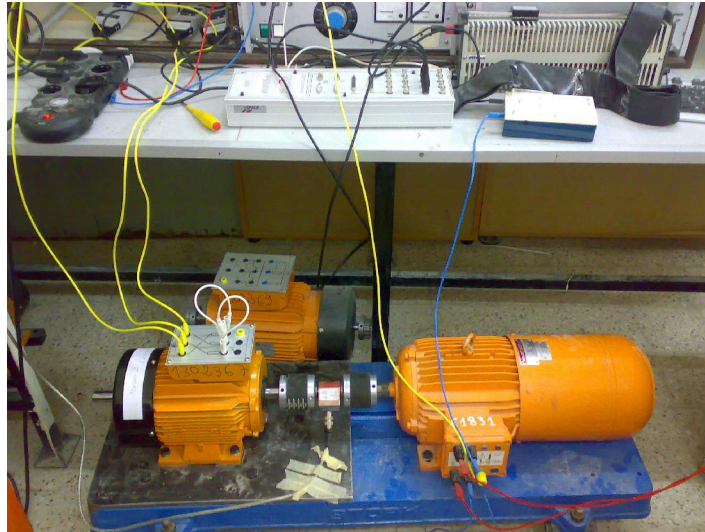


Figure III.1. Le banc d'essai

III.3. ANALYSE DU SPECTRE DU COURANT STATORIQUE DE LA MACHINE SAINE

Dans le domaine de diagnostic des machines électriques tournantes, il est indispensable de faire l'analyse spectrale du signal à traiter préalablement à l'état sain, dans le but de synthétiser tous les harmoniques qui existent déjà dans le spectre, sans oublier que les conditions de fonctionnement (la charge par exemple) affectent fortement sur les amplitudes et les fréquences des amplitudes [1, 2].

Dans ce paragraphe nous exposons les spectres du courant statorique de la machine asynchrone à cage à l'état sain pour différentes conditions de fonctionnement.

III.3.1. Analyse du spectre du courant statorique de la machine saine : *essais à la vitesse* $N= 1439 \text{ tr/mn}$

La figure III.2 représente la courbe temporelle du courant statorique de la phase A, la machine saine tourne à la vitesse 1439 tr/mn, c'est à dire presque en pleine charge ($g=0.04$).

D'après la figure précédente, il est clairement visible que l'allure du courant statorique n'est pas sinusoïdale, on peut directement justifier ça par la présence de la saturation magnétique et l'effet d'encoche [2, 10], ce résultat est déjà prévu pour les allures obtenus expérimentalement, contrairement aux certaines modélisations des machines électriques

tournantes qui obligent des fois l'utilisation des hypothèses simplificatrices, ces simplifications influent fortement sur les résultats obtenus.

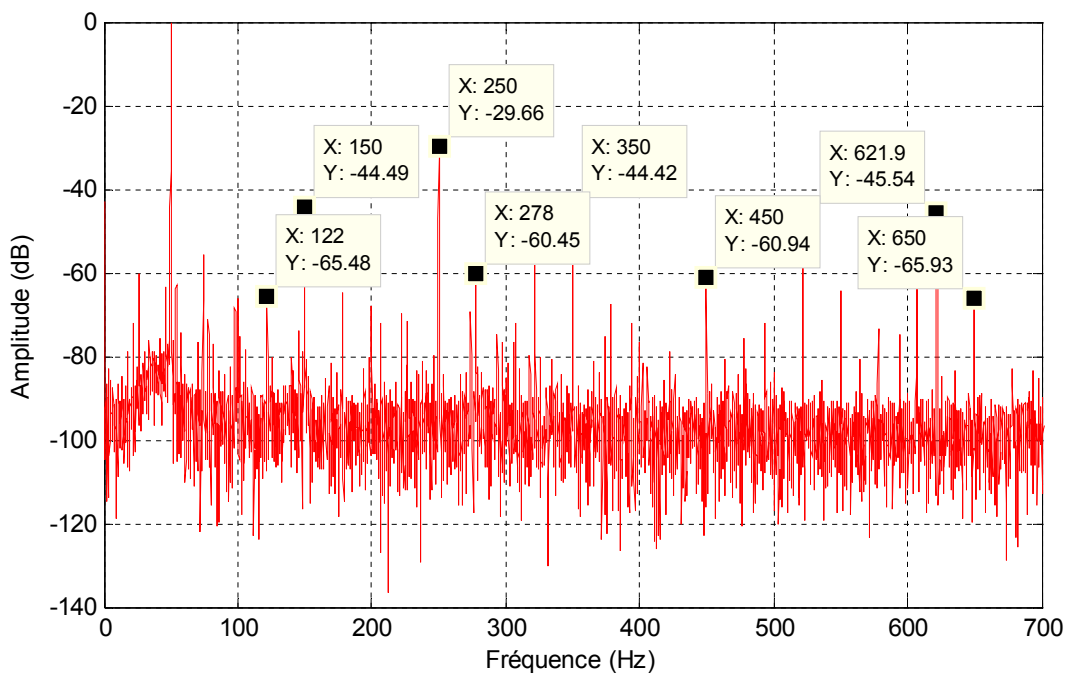
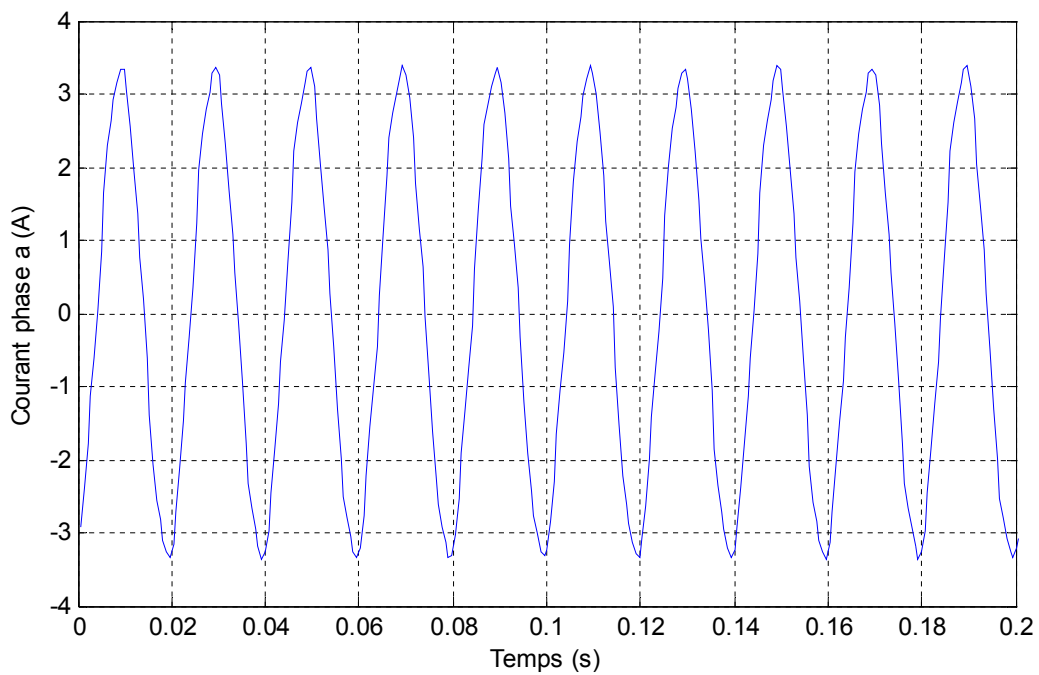


Figure III.3. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) de la machine saine pour une vitesse de 1439 tr/mn

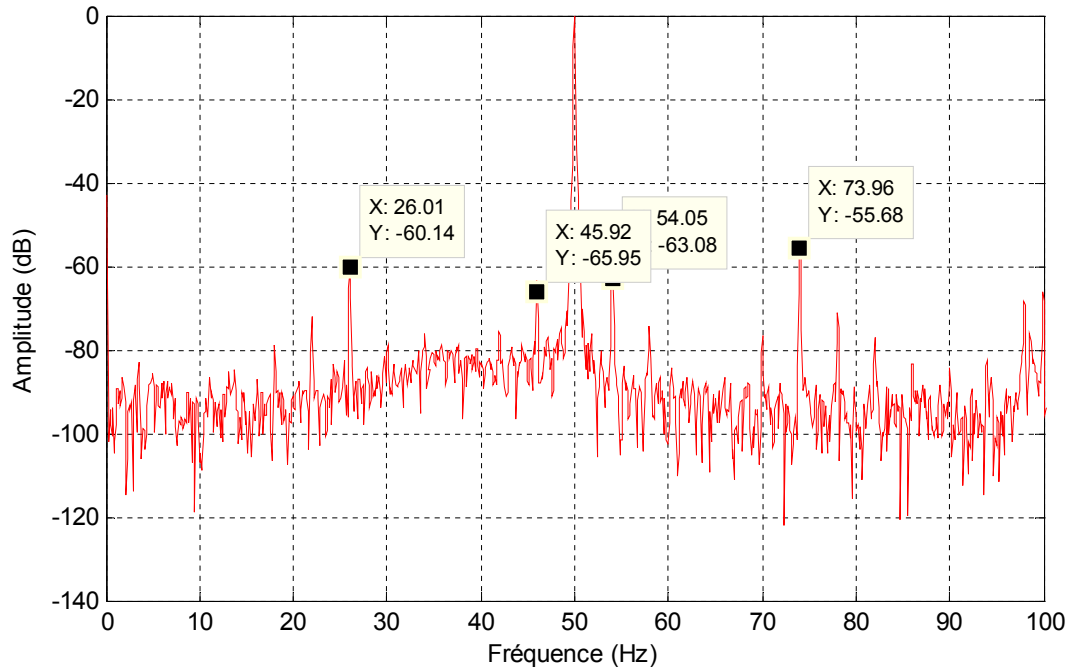


Figure III.4. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) de la machine saine pour une vitesse de 1439 tr/mn

La figure III.3 représente le spectre du courant statorique de la machine saine en pleine charge, et d'après notre étude précédente, les composantes fréquentielles des encoches rotoriques sont apparues ; par exemples les composantes 122 Hz et 621 Hz, aussi on détecte la composante de la saturation qui se situe au 150 Hz, et les harmoniques de la FMM qui sont localisés aux 250 Hz, 350 Hz,

La figure III.4 représente le spectre du courant statorique de la machine saine en pleine charge de 0 Hz à 100 Hz, la remarque la plus importante ici que nous avons détecté autour de la composante fondamentale ces composantes fréquentielles :

- ♦ **les composantes fréquentielles d'excentricité mixte situées aux fréquences 26.01 Hz et 73.96 Hz ;** $f_s \mp f_r = (1 \mp (1-g)/p)f_s = (1 \mp (1-0.04)/2)50 = 26 \text{ Hz et } 74 \text{ Hz}$.

Ces fréquences ont respectivement les amplitudes -60.14 dB et -55.68 dB. La présence de ces fréquences dans le spectre du courant statorique de la machine saine est normale, car ce type de défaut surtout l'excentricité statique a naissance durant la phase de fabrication de la machine mais avec un pourcentage très faible qui ne dépasse pas généralement 10 % [2, 10].

- ◆ les composantes fréquentielles de la cassure de barre rotorique situées aux fréquences 45.92 Hz et 54.05 Hz ; $(1 \mp 2 g) f_s = (1 \mp 2 * 0.04)50 = 46 \text{ Hz}$ et 54 Hz.

Ces composantes sont présentées même à l'état sain de la machine (rotor sain sans barre cassée), la cause est toujours liée à la phase de la fabrication de la machine (fissure de fabrication dans les barres rotoriques), mais comme nous avons déjà mentionné, ces composantes sont faibles et ont une faible amplitude.

III.3.2. Analyse du spectre du courant statorique de la machine saine : essais à la vitesse $N=1468 \text{ tr/mn}$

La figure III.5 représente la courbe temporelle du courant statorique de la phase A, la machine saine tourne à la vitesse 1468 tr/mn, c'est à dire un fonctionnement en mi-charge ($g=0.021$).

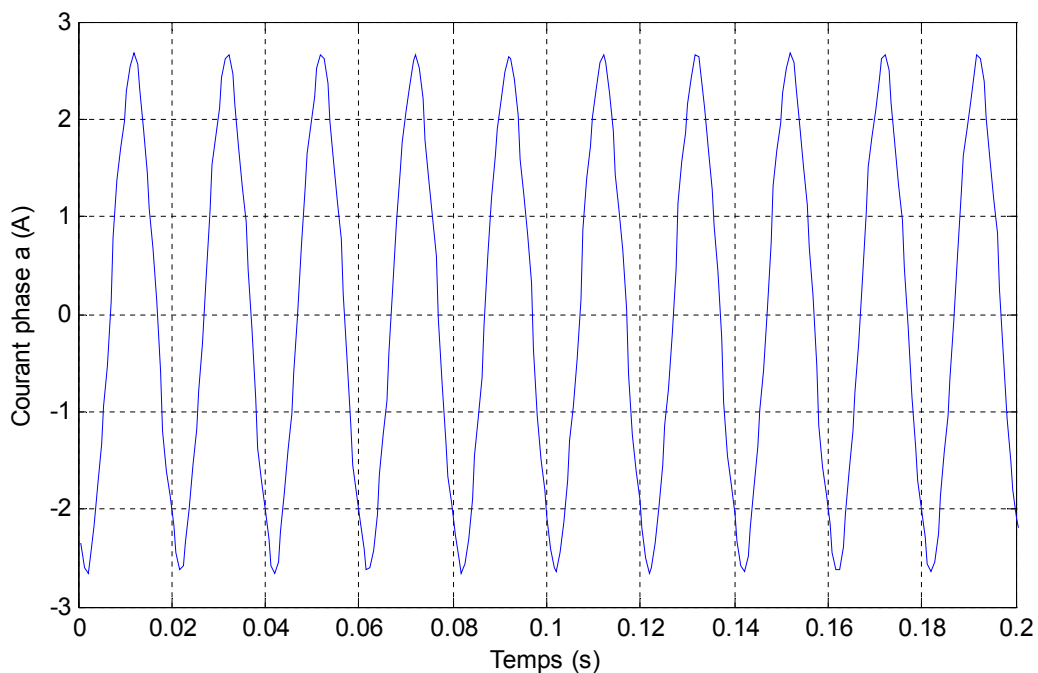


Figure III.5. Courant statorique de la machine saine à la vitesse 1468 tr/mn

Les figures III.6 et III.7 représentent le spectre du courant statorique de la machine saine en fonctionnant en mi-charge. D'après ces deux spectres on peut retirer les remarques suivantes :

- ◆ On observe clairement que les composantes fréquentielles des encoches rotoriques ont changé leurs situations, puisque elles sont liées fortement au glissement, on cite par exemple les harmoniques qui sont localisés aux 634.8 Hz et 434.9 Hz, aussi concernant ces composantes on peut remarquer que ses amplitudes sont diminuées, par

exemple l'harmonique qui se situe au 650 Hz son amplitude a augmenté de -65.93 dB à -47.89 dB, et c'est à cause de la diminution de la charge.

- ◆ Les composantes fréquentielles permanentes (saturation magnétique et FMM) sont toujours localisées aux mêmes fréquences, car ses composantes sont indépendantes du glissement, mais ses amplitudes sont légèrement touchées à cause de l'effet de la charge.

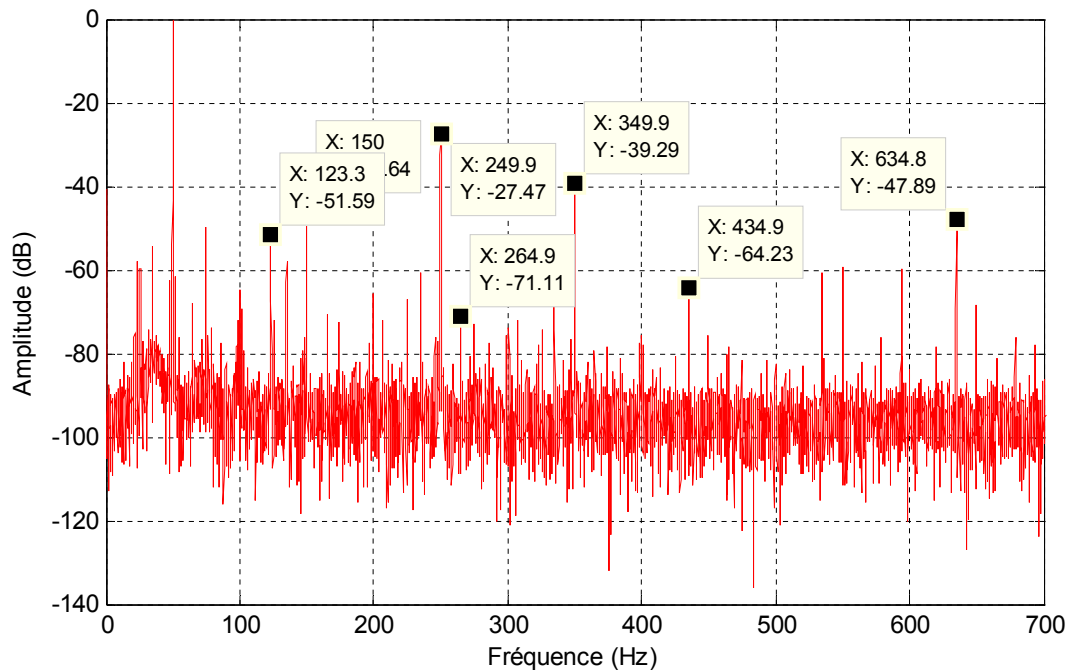


Figure III.6. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) de la machine saine pour une vitesse de 1468 tr/mn

- ◆ Les fréquences des harmoniques d'excentricité sont changées à cause du glissement, et on remarque que les amplitudes de ces fréquences sont augmentées bien que la charge est diminuée.
- ◆ Aussi les composantes fréquentielles qui caractérisent le défaut de cassure de barres sont toujours localisées autour de la fondamentale, mais on remarque que ses amplitudes sont légèrement diminuées.

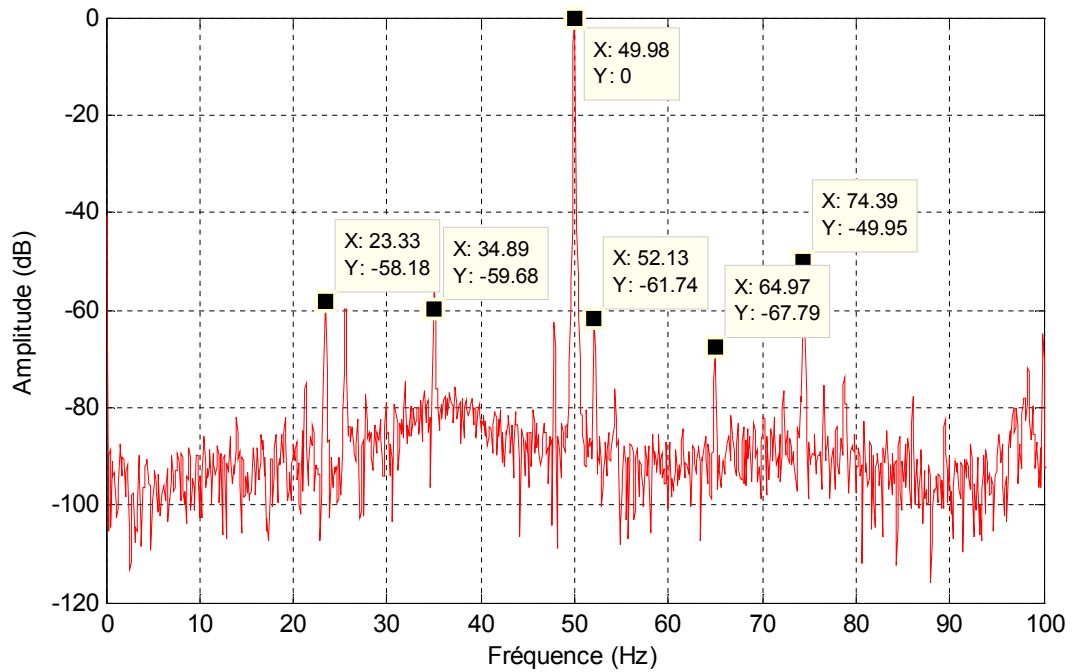


Figure III.7. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) de la machine saine pour une vitesse de 1468 tr/mn

III.3.3. Analyse du spectre du courant statorique de la machine saine : essais à la vitesse

N= 1492 tr/mn

La figure III.8 représente la courbe temporelle du courant statorique de la phase A.

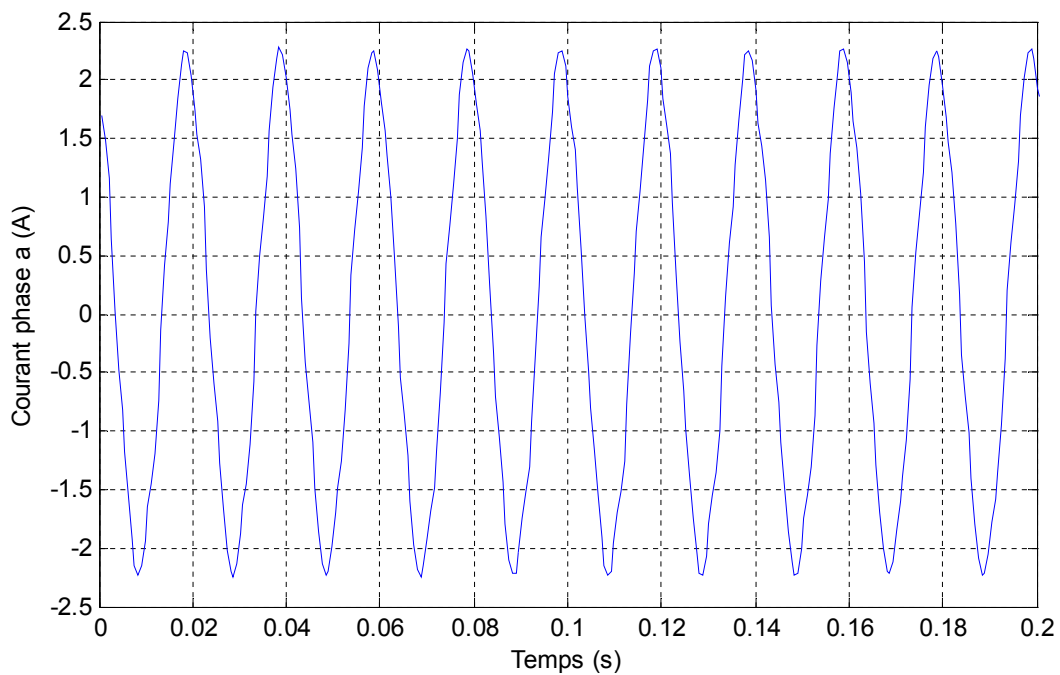


Figure III.8. Courant statorique de la machine saine à la vitesse 1492 tr/mn

Dans cet essai la machine saine tourne à la vitesse 1492 tr/mn, c'est à dire presque un fonctionnement à vide.

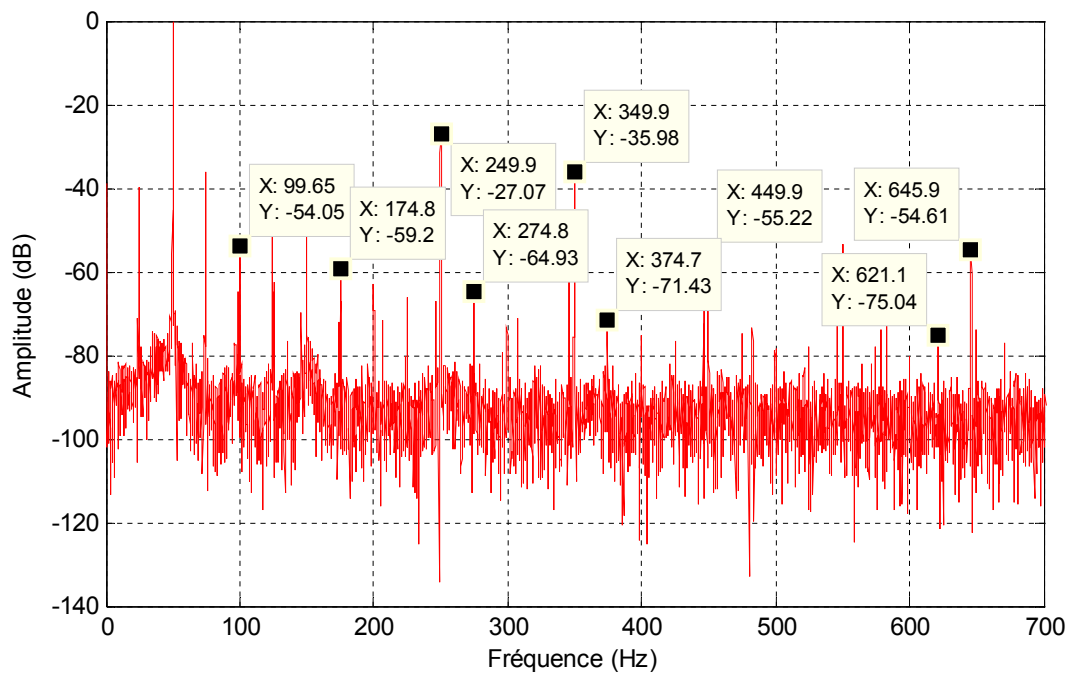


Figure III.9. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) de la machine saine pour une vitesse de 1492 tr/mn

La figure III.9 représente le spectre du courant statorique pour cet essai, on peut retirer les remarques suivantes :

- ◆ Les composantes fréquentielles permanentes qui sont liées aux encoches rotoriques sont toujours présentées, mais avec des nouvelles localisations à cause du changement du glissement. par exemple la composante principale qui situe autour 600 Hz a changé sa position au 645 Hz. ainsi, ces composantes dans cet essai ont des amplitudes inférieures aux cas précédents, c'est à cause de la diminution de la charge.
- ◆ Les composantes de la FMM et de la saturation sont toujours localisées aux mêmes fréquences mais cette fois avec une diminution dans les amplitudes.

D'après la figure III.10 qui représente les fréquences autour de la fondamentale pour une machine saine fonctionnant à vide, on peut facilement retirer les remarques suivantes :

- ◆ Les composantes fréquentielles qui caractérisent le défaut dans les barres sont presque disparues, alors on peut constater que l'augmentation de la charge a une grande influence sur ce type de défaut.

- ◆ Les composantes fréquentielles de l'excentricité mixte sont toujours existantes, mais cette fois avec une très grande amplitude comparant par les deux essais précédent, on a -39.85 dB pour la composante 25.15 Hz et -36.34 dB pour la deuxième composante. alors ces résultats sont très normaux à cause de l'effet de la charge et du moment d'inertie de la machine, il est très connu que l'effet de l'excentricité s'augmente avec la diminution de la charge [2, 10].

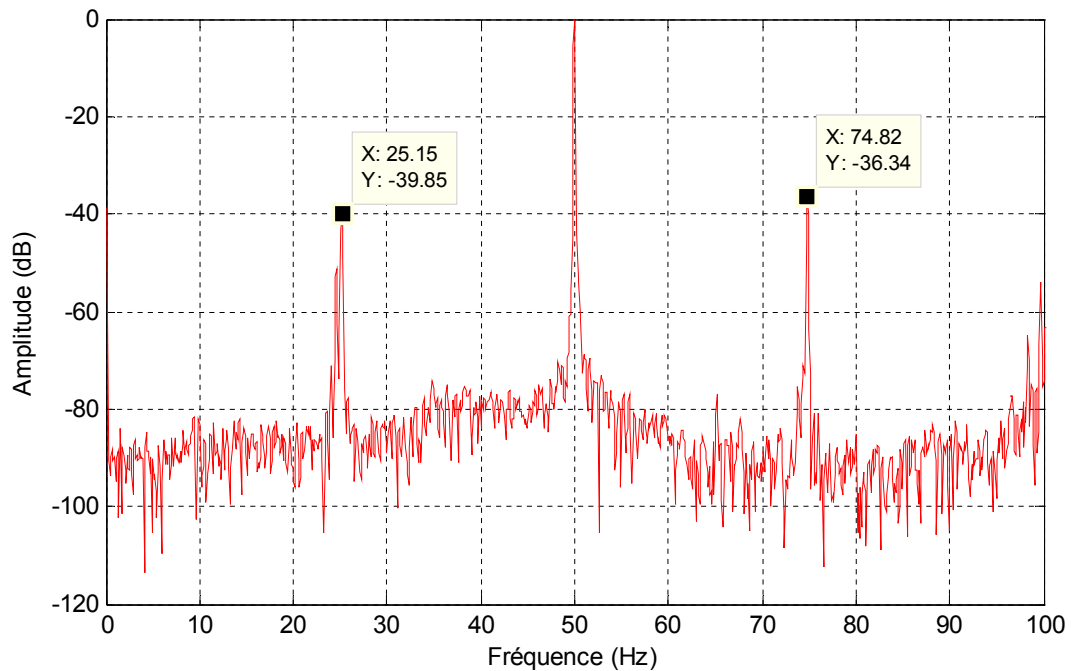


Figure III.10. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) de la machine saine pour une vitesse de 1492 tr/mn

III.4. ANALYSE DU SPECTRE DU COURANT STATORIQUE DE LA MACHINE AVEC UN DÉFAUT ROTORIQUE (UNE BARRE CASSÉE)

Le même banc d'essai d'écrit auparavant, a été utilisé pour étudier expérimentalement le défaut de cassure de barres. Nous commençons par la cassure d'une seule barre rotorique, on a utilisé le même moteur asynchrone de puissance 1.1 kW, le moteur de 1.1 kW est toujours couplé en étoile sans, le moteur a 28 barres rotoriques (figure III.11). La rupture de la barre a été réalisée en perçant une barre. Plusieurs essais ont été effectués pour différents régimes de fonctionnement (pleine charge, mi-charge et à vide.). Pour chaque essai, on a enregistré les trois courants d'alimentation, on a choisi le courant de la première phase pour faire l'analyse spectrale.



Figure III.11. Rotor du moteur 1.1 kW avec deux barres cassées [1]

Le défaut de barres se manifestera dans le courant statorique par l'apparition des composantes spectrales dont les fréquences sont données par les formules suivantes [1, 2] :

$$[\nu - (h \pm \eta'')(1 - s)]f_s \quad (\text{III.1})$$

$$(\nu \pm 2ks)f_s \quad (\text{III.2})$$

Avec : $\nu = 1, 3, 5, \dots$ est le rang des harmoniques du temps.

Donc on doit certainement trouver des raies autour des harmoniques du temps à une distance de $2ksf_s$. Pour mettre en évidence la présence de ces raies dans le spectre du courant statorique.

III.4.1. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec une barre cassée : *essais à la vitesse $N = 1438 \text{ tr/mn}$*

Nous avons commencé par l'essai en pleine charge (vitesse 1438 tr/mn, $g=0.041$), les figures III.12 et III.13 représentent l'allure du courant statorique de la première phase.

D'après la figure III.12 on peut clairement observer la faible naissance des ondulations dans l'allure du courant statorique, la figure III.14 qui représente l'allure du courant de la machine à l'état sain confirme l'observation.

La figure III.15 représente le spectre du courant statorique de la machine asynchrone avec une seule barre cassée (0 Hz - 700 Hz). On peut fortement détecter la génération des nouvelles

composantes fréquentielles, en plus on peut observer le changement au niveau des amplitudes des harmoniques permanents.

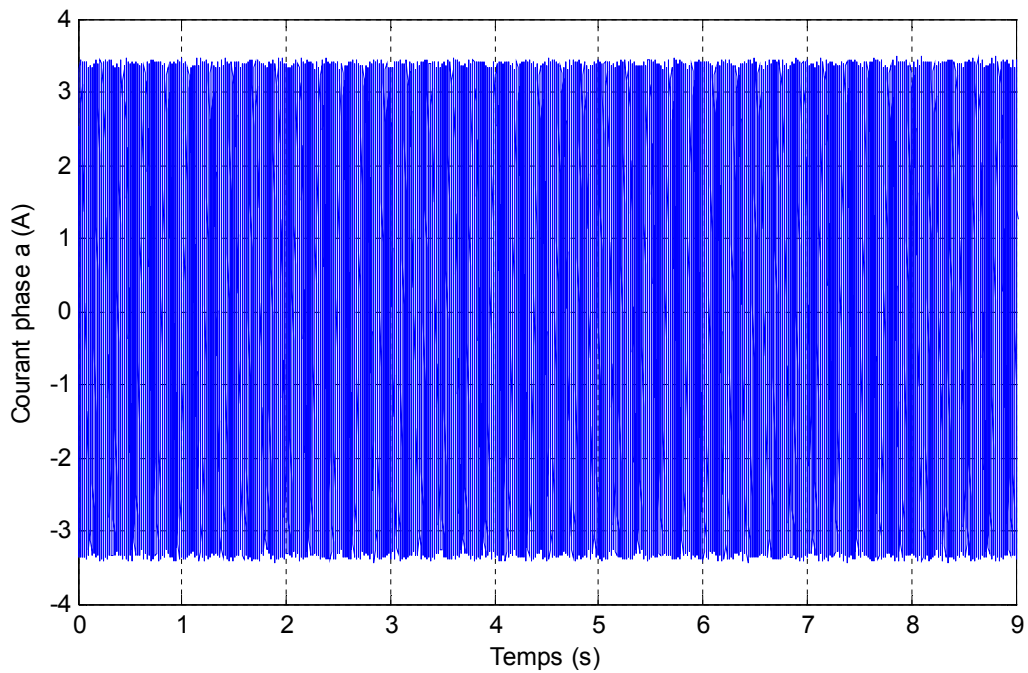


Figure III.12. Courant statorique de la machine avec une barre cassée à la vitesse 1438 tr/mn

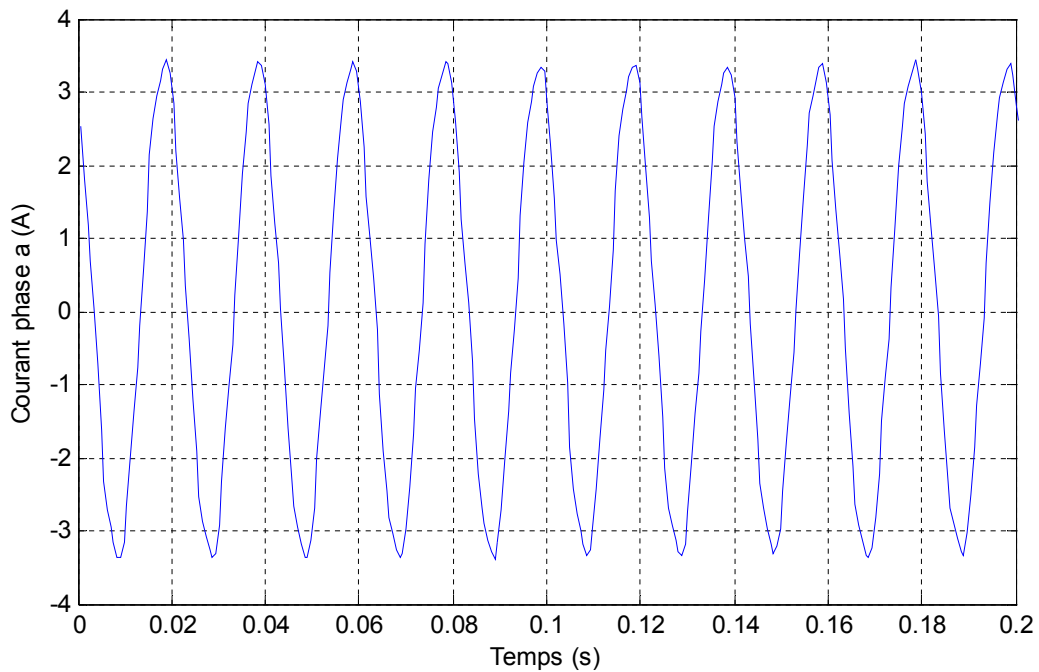


Figure III.13. Courant statorique de la machine avec une barre cassée à la vitesse 1438 tr/mn
(Zoom)

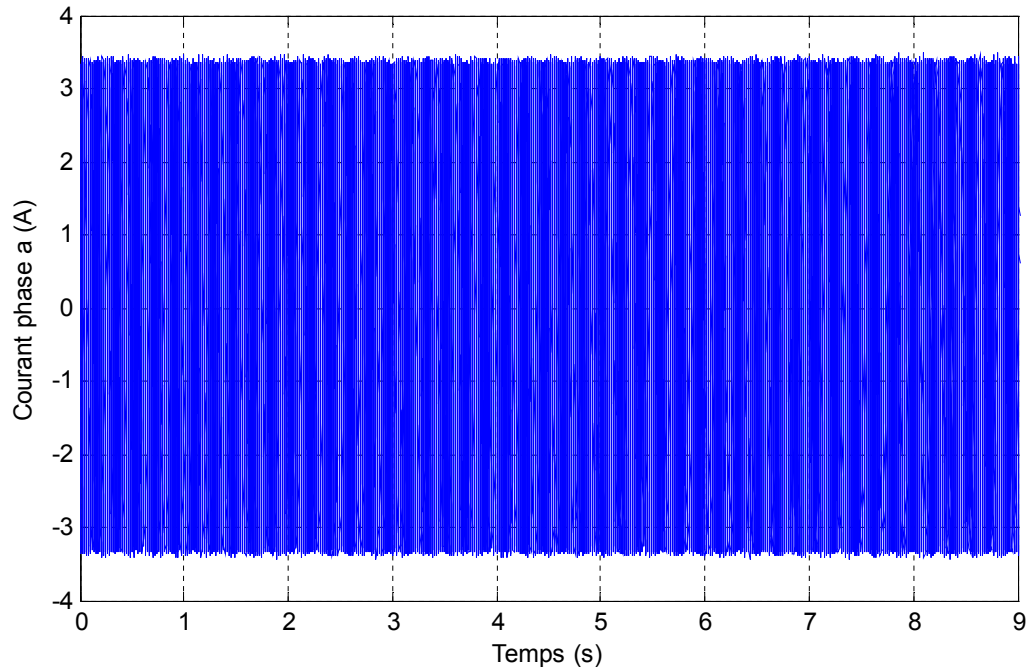


Figure III.14. Courant statorique de la machine saine à la vitesse 1438 tr/mn

D'un autre coté, le spectre de la figure III.15 confirme aussi la présence des composantes spectrales autour des harmoniques du temps (50Hz, 250Hz, 350Hz,...) et les harmoniques d'encoches rotoriques. Ces composantes spectrales sont en bonne concordance avec les formules générales (III.7) et (III.8).

D'après la figure III.16 qui représente le spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz), les composantes fréquentielles caractéristiques du défaut de cassure de barre sont localisées autour du fondamentale (50 Hz), exactement ces composantes sont localisées aux fréquences 45.8 Hz et 54.16 Hz, ces fréquences sont en bonne concordance avec la formule générale (III.8), le calcul suivant confirme notre résultat : $(1 \mp 2g)f_s = (1 \mp 2 * 0.041)50 = 45.86$ Hz et 54.1 Hz.

Aussi, on peut remarquer que les amplitudes des composantes fréquentielles de l'excentricité mixte qui sont localisées aux 25 HZ et 75 Hz sont aussi touchées, la première de -60.14 dB a augmentée à -46.26 dB, l'autre de -55.68 dB vers -50.00 dB.

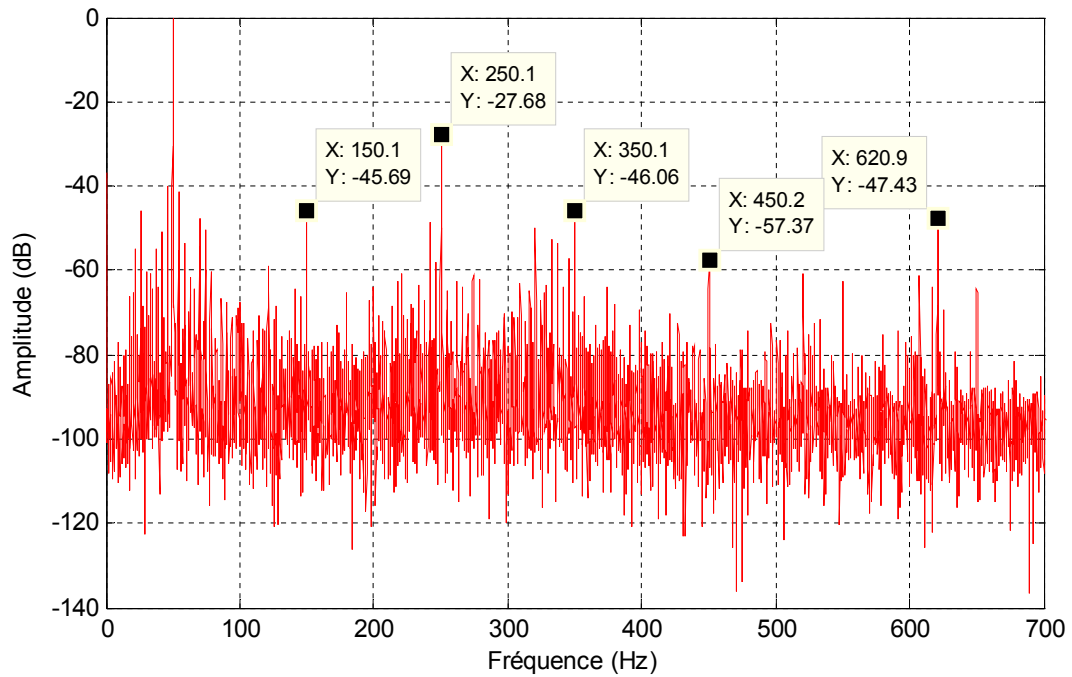


Figure III.15. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) du moteur avec une barre cassée pour une vitesse de 1438 tr/mn

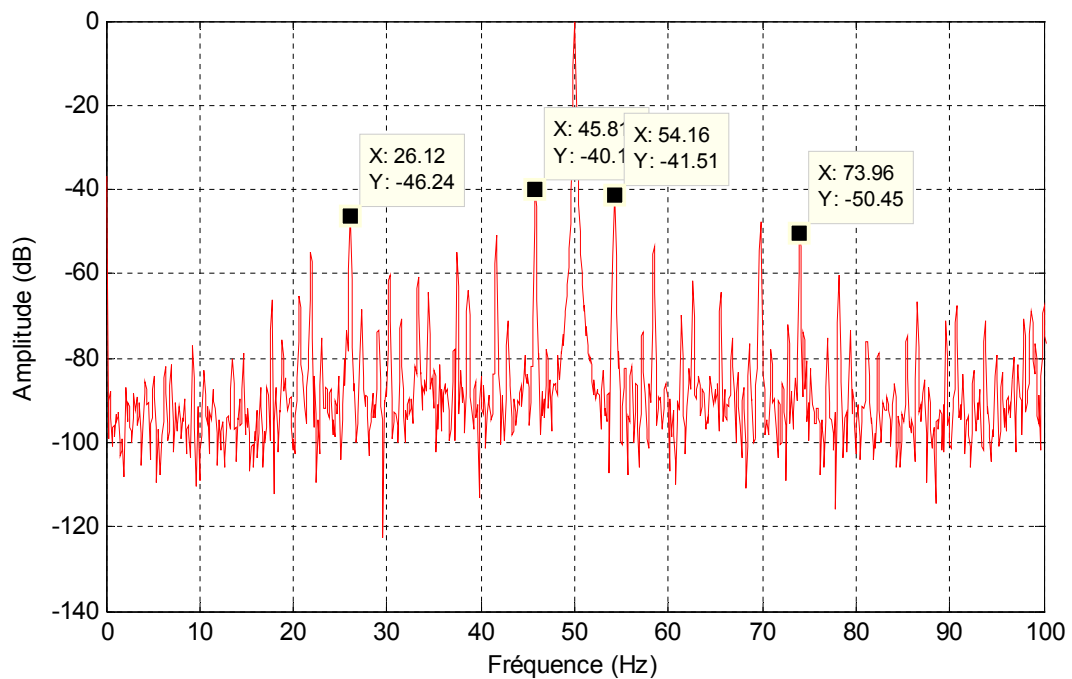


Figure III.16. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) du moteur avec une barre cassée pour une vitesse de 1438 tr/mn

III.4.2. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec une barre cassée : essais à la vitesse $N=1468$ tr/mn

Dans cet essai la machine tourne à une vitesse 1468 tr/mn, c'est presque en fonctionnement en mi-charge.

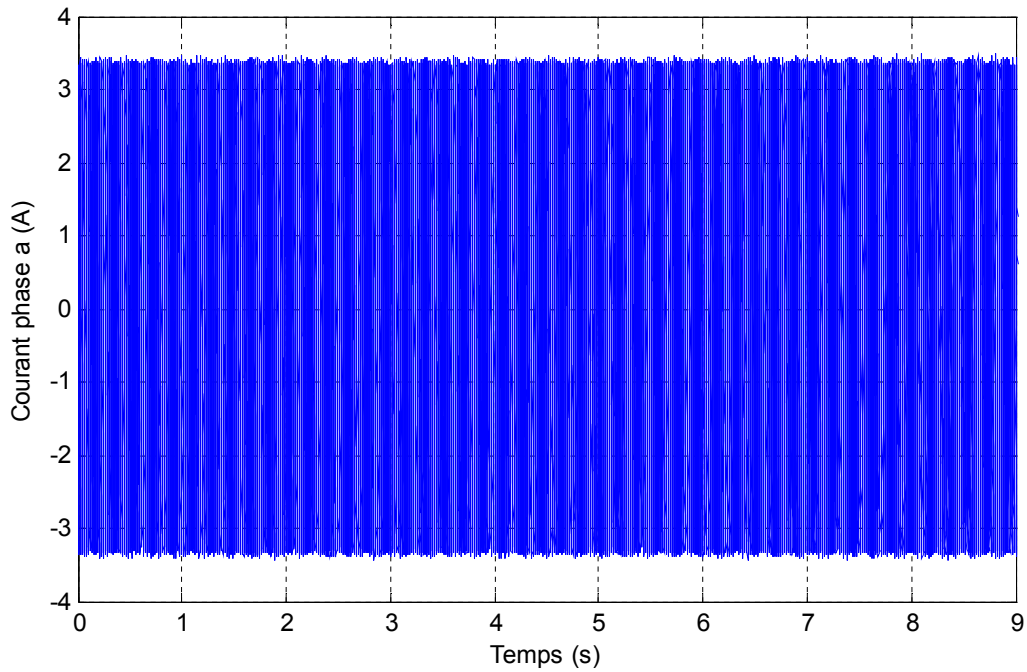


Figure III.17. Courant statorique de la machine saine à la vitesse 1468 tr/mn

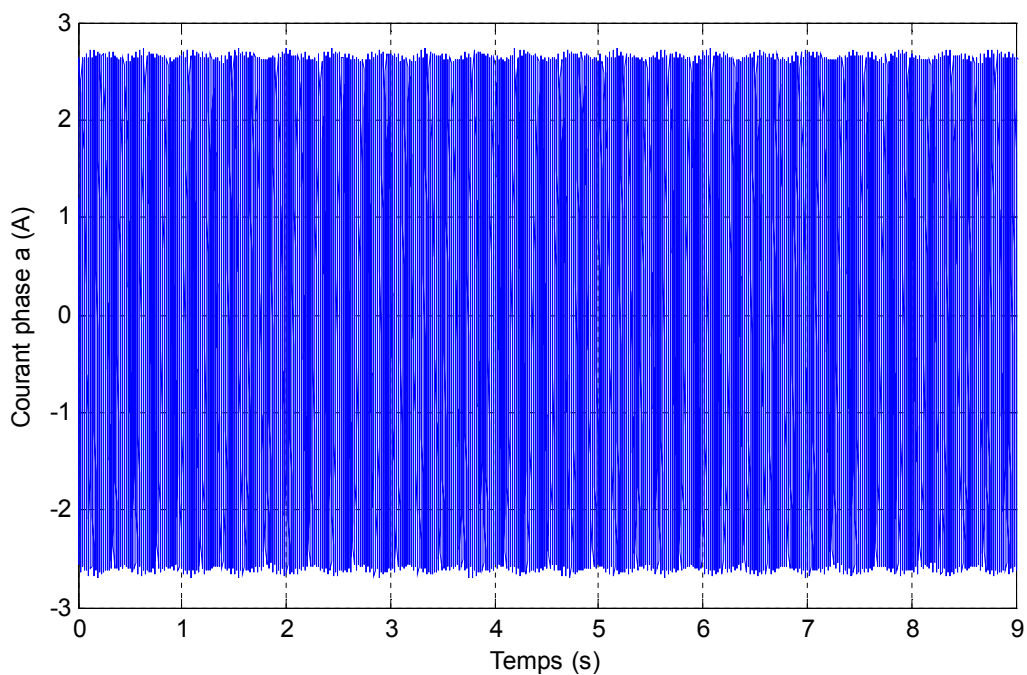


Figure III.18. Courant statorique de la machine avec une barre cassée à la vitesse 1468 tr/mn

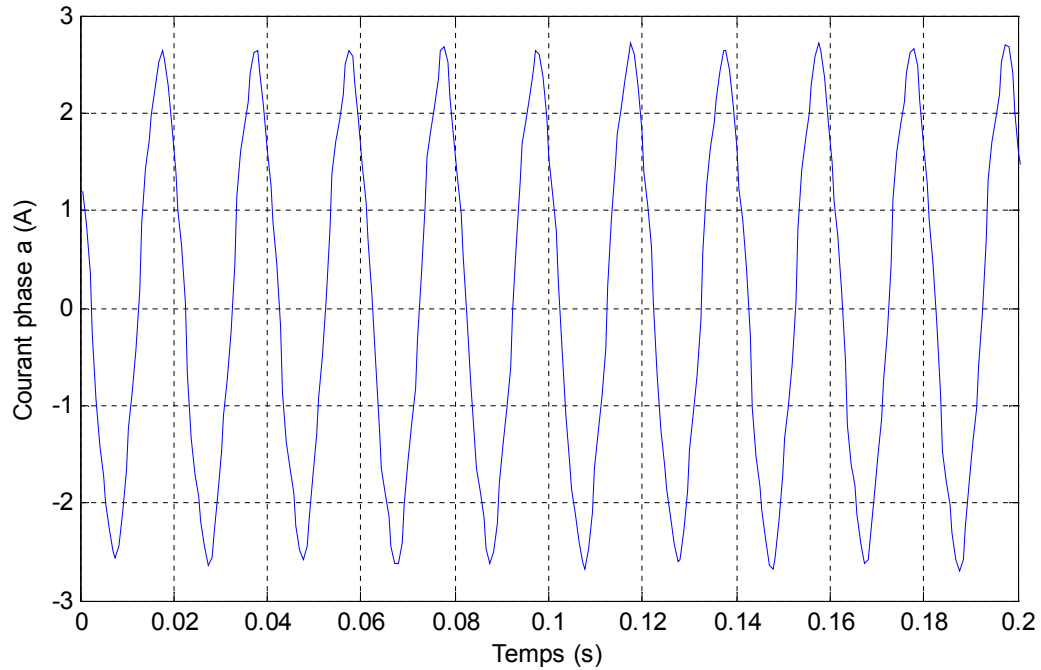


Figure III.19. Courant statorique de la machine avec une barre cassée à la vitesse 1468 tr/mn
(Zoom)

Les deux figures III.17 et III.18 représentent respectivement les allures temporelles du courant statorique de la machine à l'état sain puis avec défaut de cassure de barre rotorique, la différence entre les deux allures est assurément visible, l'allure de la figure III.18 est pleine d'ondulations.

La figure III.19 illustre bien la présence des ondulations dans l'allure temporelle du courant statorique obtenu de la machine avec une barre cassée.

Les figures III.20 et III.21 représentent les spectres du courant statorique de la machine asynchrone avec une seule barre cassée, les spectres sont respectivement de 0 Hz à 700 Hz et de 0 Hz à 100 Hz. on peut constater que les amplitudes des fréquences caractéristiques du défaut sont un peu diminuées à cause de la diminution de la charge.

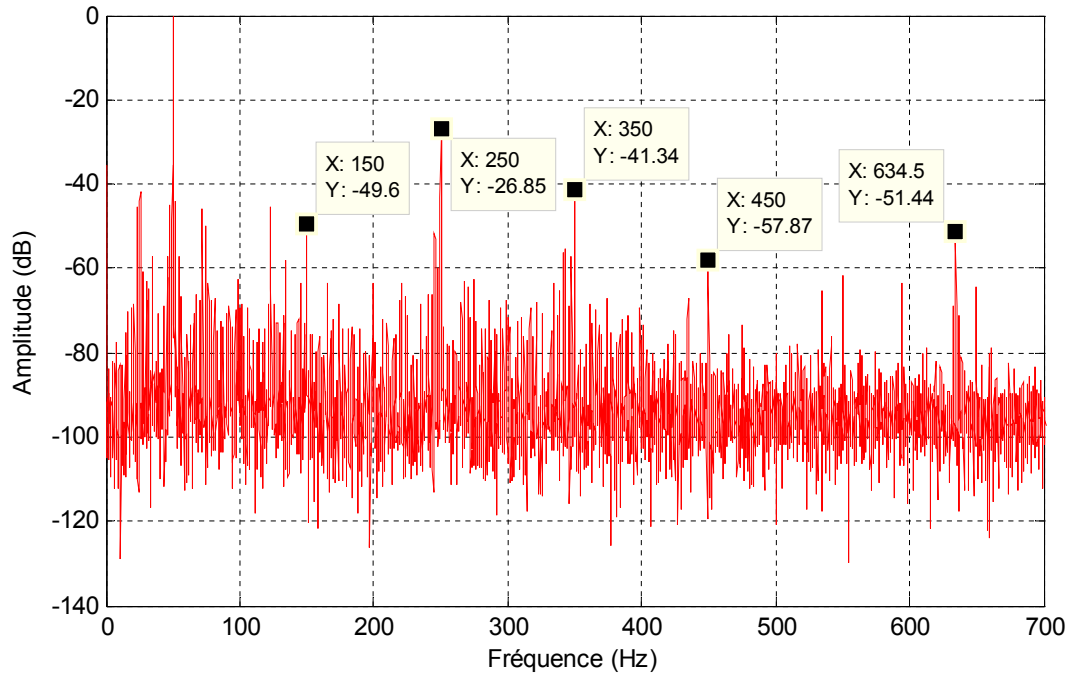


Figure III.20. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) du moteur avec une barre cassée pour une vitesse de 1468 tr/mn

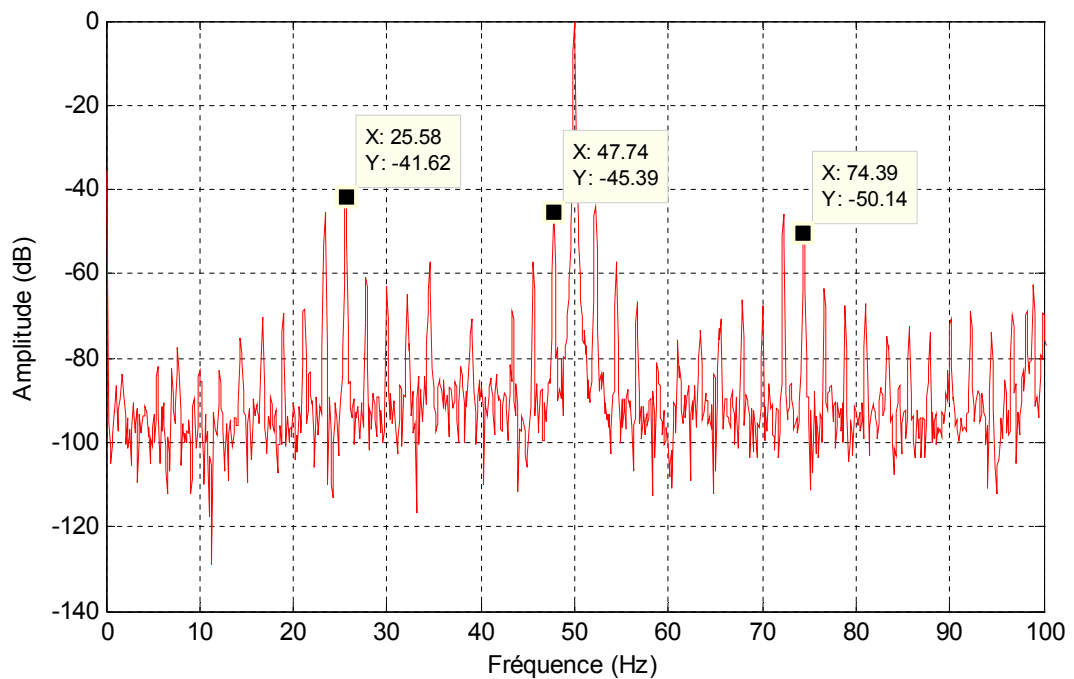


Figure III.21. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) du moteur avec une barre cassée pour une vitesse de 1438 tr/mn

III.4.3. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec une barre cassée : essais à la vitesse $N=1492$ tr/mn

Dans cet essai la machine tourne à vide, à une vitesse de 1492 tr/mn, les figures III.22 et III.23 représentent les allures du courant statorique pour cet essai, les ondulations ne sont pas clairement observées dans ce cas, car la charge est très faible.

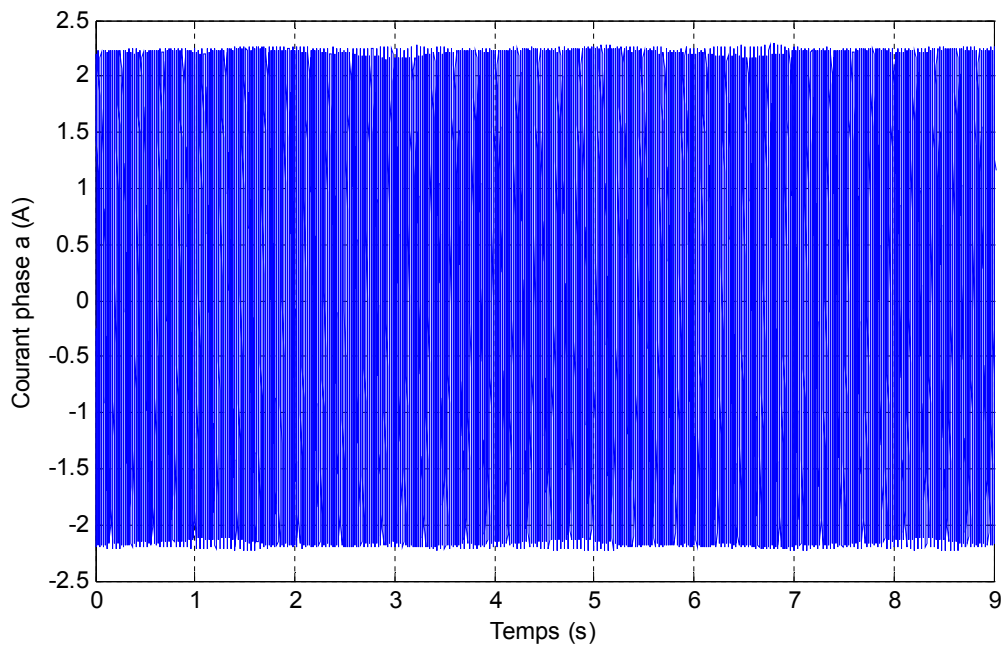


Figure III.22. Courant statorique de la machine avec une barre cassée à la vitesse 1492 tr/mn

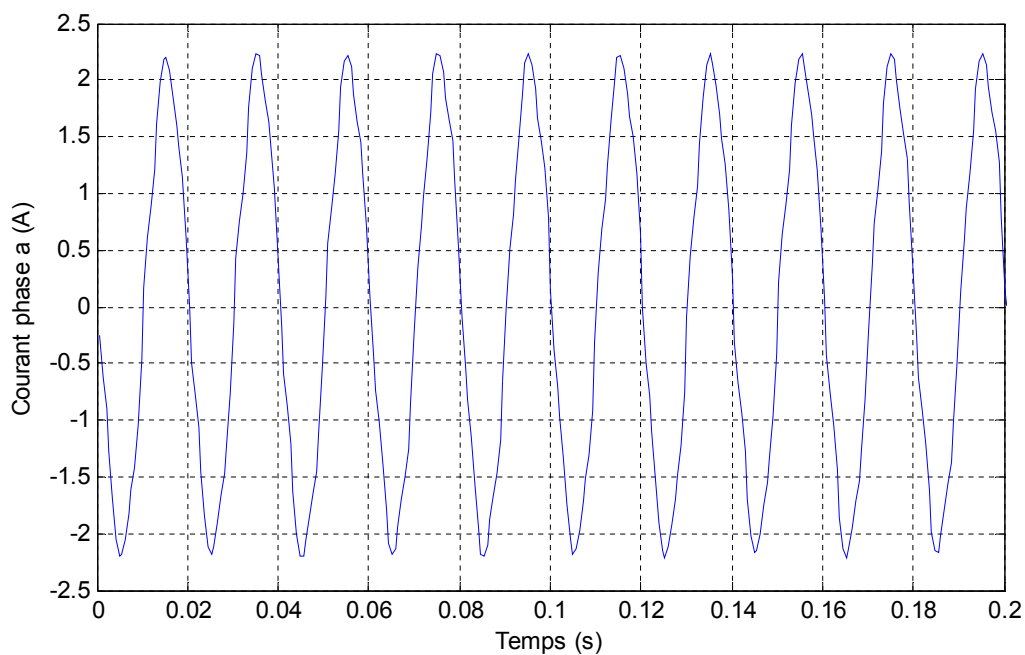


Figure III.23. Courant statorique de la machine avec une barre cassée à la vitesse 1468 tr/mn
(Zoom)

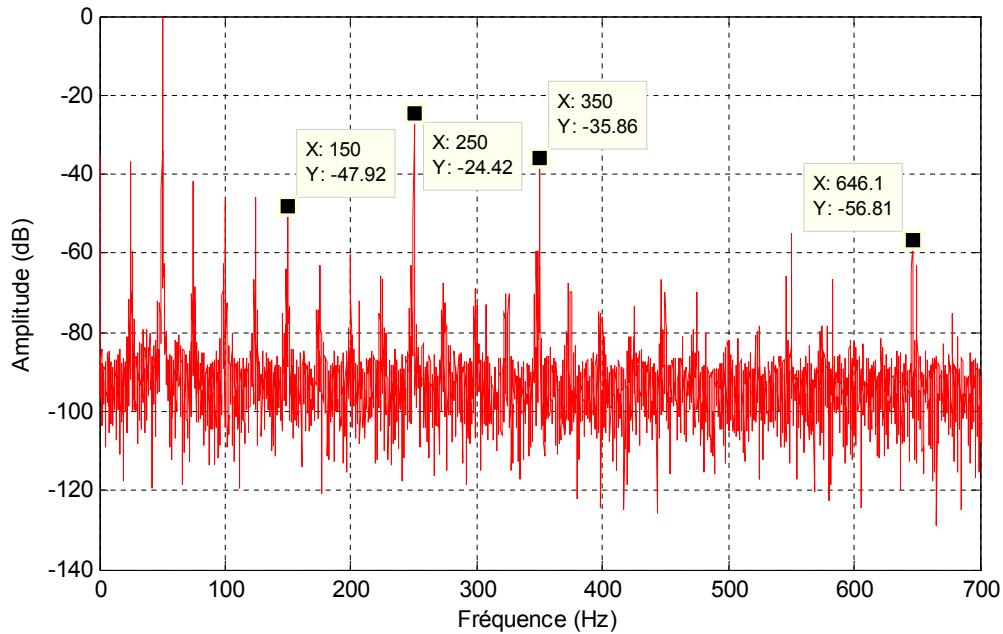


Figure III.24. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) du moteur avec une barre cassée pour une vitesse de 1492 tr/mn

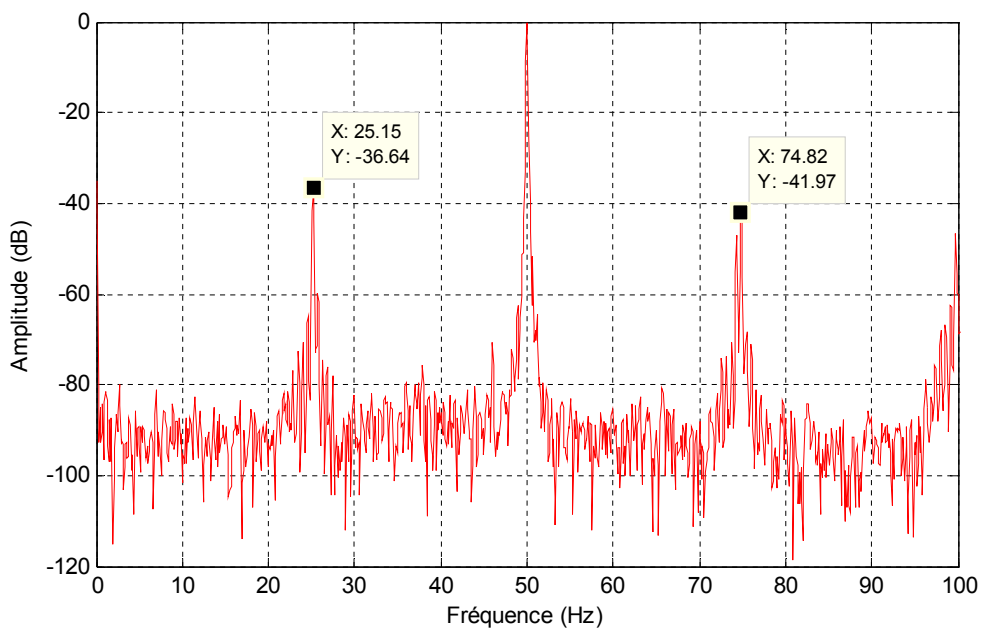


Figure III.25. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) du moteur avec une barre cassée pour une vitesse de 1492 tr/mn

Les figures III.24 et III.25 exposent les spectres du courant statorique pour une machine asynchrone avec une barre rotorique rompue, les fréquences qui caractérisent le défaut sont assez faibles, ce qui explique que l'augmentation de la charge influe fortement sur l'apparition des indices de défaut.

III.5. ANALYSE DU SPECTRE DU COURANT STATORIQUE DE LA MACHINE AVEC UN DÉFAUT ROTORIQUE (DEUX BARRES CASSÉES)

III.5.1. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec deux barres cassées : essais à la vitesse $N=1432$ tr/mn

Dans cet essai la machine tourne à la vitesse 1432 tr/mn mais avec deux barres rompues, la figure III.26 représente l'allure temporelle du courant statorique, elle est clairement pleine des ondulations, et par comparaison avec la figure III.12 (courant statorique d'une machine avec une seule barre cassée), les ondulations sont aggravées, ce qui explique l'effet de l'amplification du défaut.

La figure III.27 représente le zoom de l'allure du courant statorique pour cet essai, l'aggravation des ondulations est clairement observée.

La figure III.28 représente le spectre du courant statorique pour une machine qui fonctionne en pleine charge et avec deux barres cassées, le spectre est très riches avec les harmoniques, on peut faire la comparaison avec le spectre de la figure III.3, et même les amplitudes des harmoniques permanentes sont augmentées, ce qui explique l'effet de deux barres cassée par rapport une seule barre.

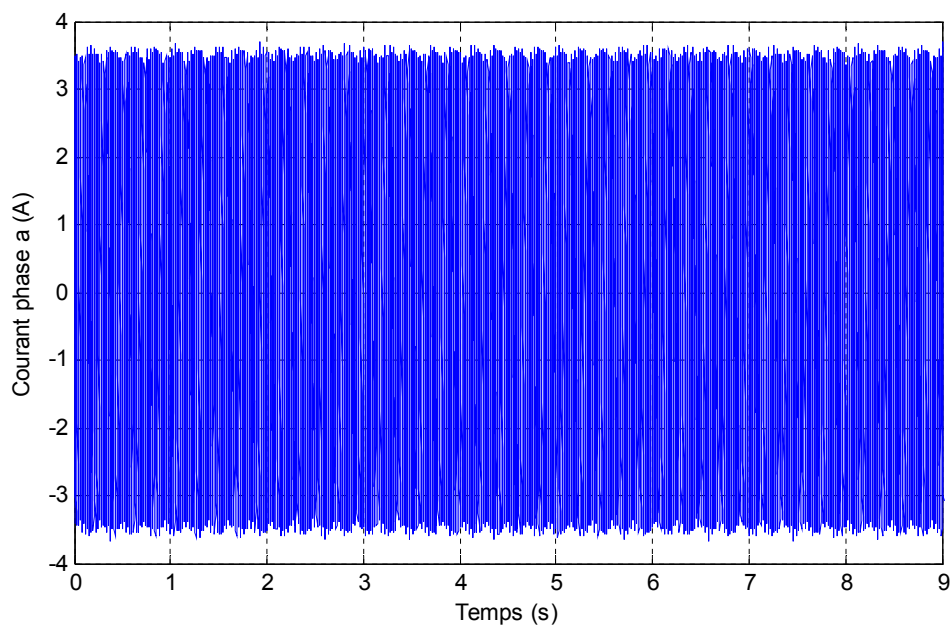


Figure III.26. Courant statorique de la machine avec deux barres cassées à la vitesse 1432 tr/mn

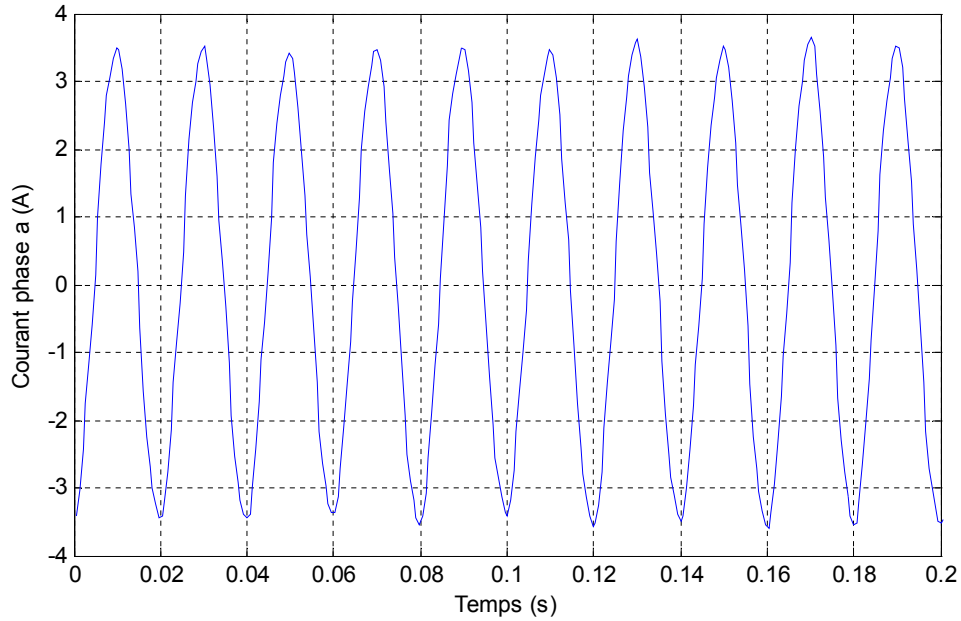


Figure III.27. Courant statorique de la machine avec deux barres cassées à la vitesse 1432 tr/mn (Zoom)

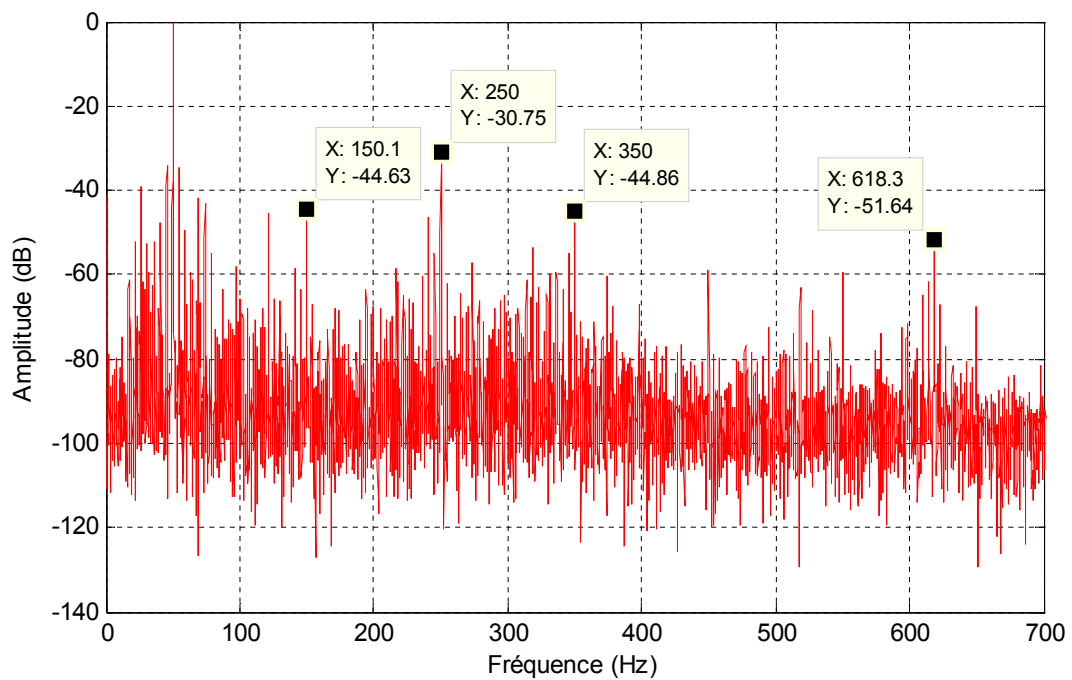


Figure III.28. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) du moteur avec deux barres cassées pour une vitesse de 1432 tr/mn

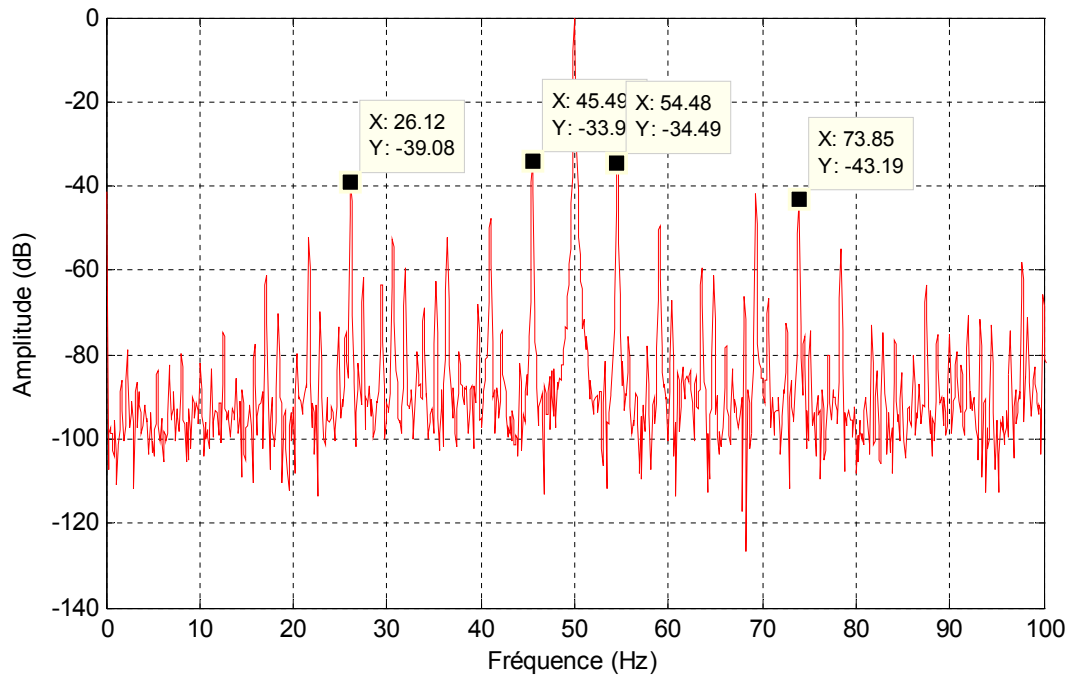


Figure III.29. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) du moteur avec deux barres cassées pour une vitesse de 1432 tr/mn

La figure III.29 représente les indices de défaut de deux barres cassées autour de la fondamentale, ces composantes fréquentielles ont des amplitudes très importantes -33.9 dB pour la première et -34.49 dB pour la deuxième, ce qui explique l'influence de l'amplification de défaut.

III.5.2. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec deux barres cassées : essais à la vitesse $N=1458$ tr/mn

Dans cet essai, la machine asynchrone à cage souffre toujours de deux barres cassées adjacentes, la machine tourne à une vitesse de 1458 tr/mn, c'est à dire le moteur est couplé à une charge moyenne.

D'après la figure III.30 qui représente l'allure du courant statorique, les ondulations sont toujours manifestées, mais avec une diminution par rapport au cas précédent (en pleine charge, figure III.27).

La figure III.28 représente le spectre du courant statorique pour la machine avec deux barres cassées et un fonctionnement en mi-charge, le spectre est toujours très riche par les composantes fréquentielles générées par le défaut. Également, on peut confirmer que les

amplitudes des harmoniques permanentes sont touchées par un élévation, mais pas assez grande comme le cas précédent.

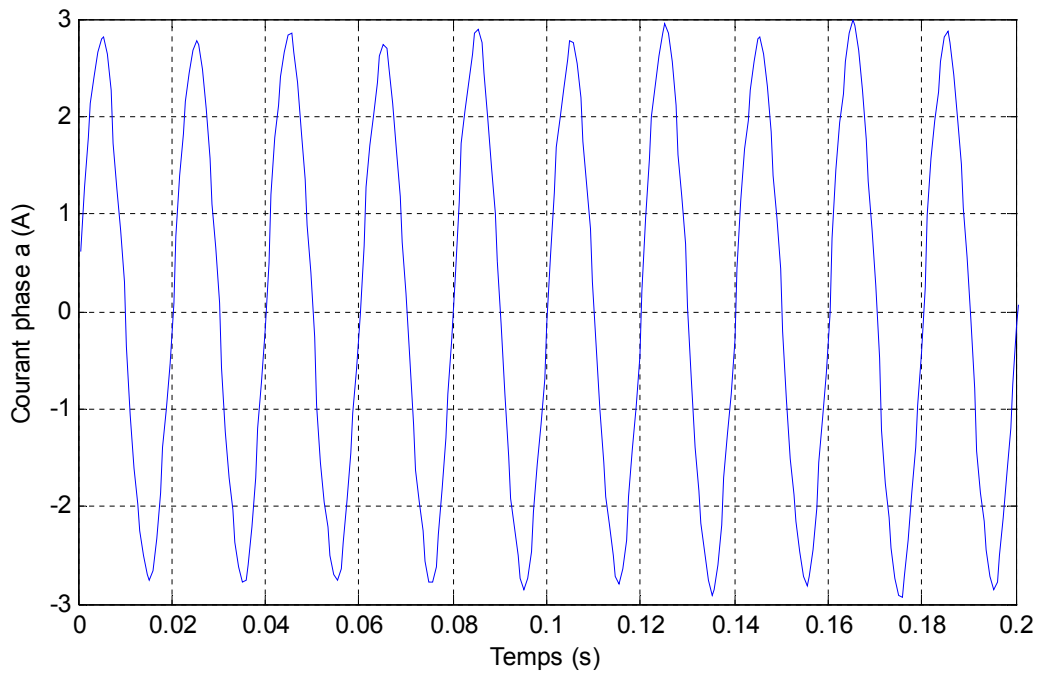


Figure III.30. Courant statorique de la machine avec deux barres cassées à la vitesse 1458 tr/mn

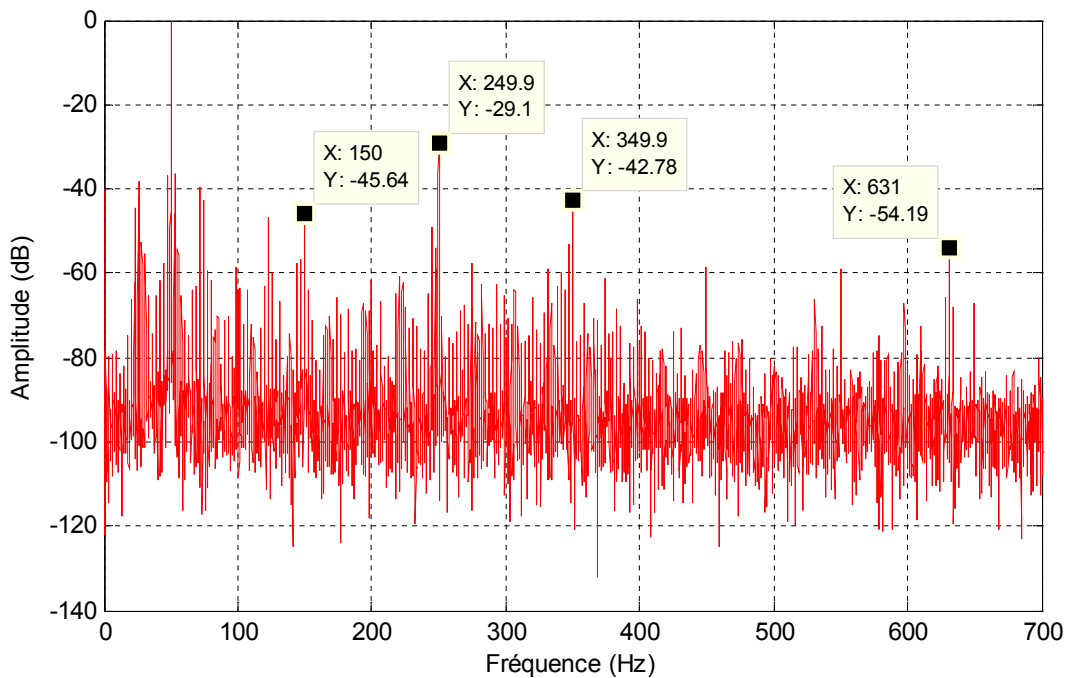


Figure III.31. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) du moteur avec deux barres cassées pour une vitesse de 1458 tr/mn

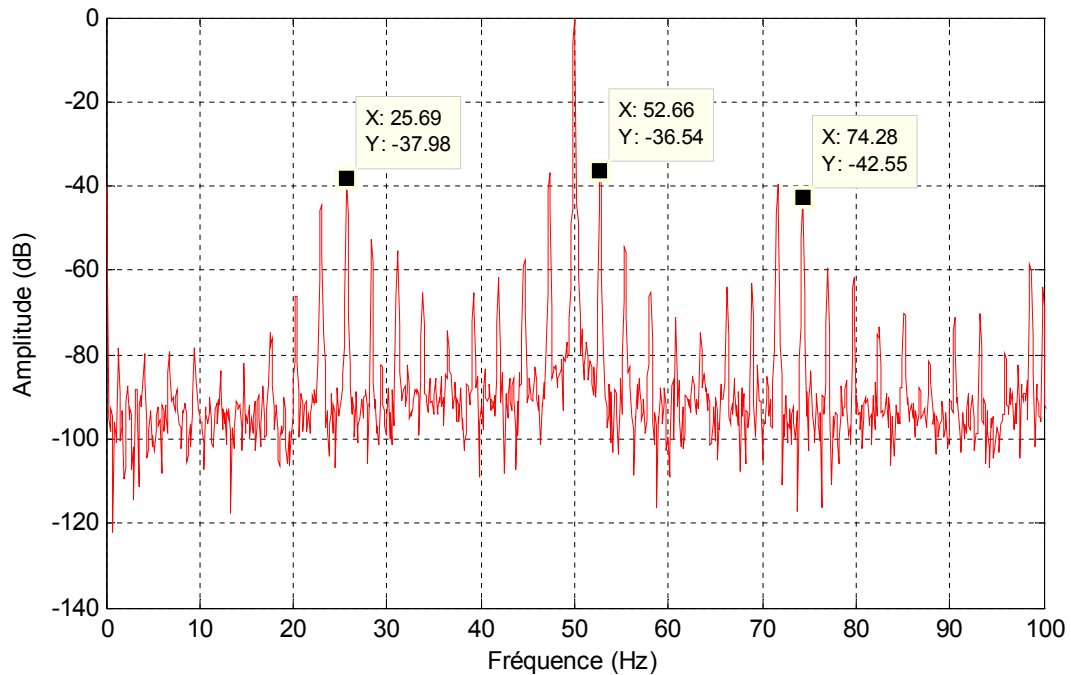


Figure III.32. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) du moteur avec deux barres cassées pour une vitesse de 1458 tr/mn

La figure III.32 représente le spectre du courant statorique pour cet essai de 0 Hz à 100 Hz, les composantes fréquentielles de défaut sont toujours localisées autour de la fondamentale, mais cette fois ses amplitudes sont un peu diminuées par rapport au cas précédent, c'est à cause de l'effet de la charge, par exemple l'amplitude de la deuxième composante a diminué de -34.39 dB à -36.54 dB.

III.5.3. Analyse du spectre du courant statorique de la machine avec deux barres cassées : essais à la vitesse $N=1490$ tr/mn

Le dernier essai est réservé comme toujours pour le fonctionnement à vide, le moteur tourne à la vitesse de 1490 tr/mn. D'après ce qui précède, les ondulations ne seront pas clairement visibles, car la charge est faible, l'allure du courant statorique représentée par la figure III.33 confirme notre interprétation repérée.

La même remarque sera rapportée pour l'analyse spectrale du courant statorique qui est représenté par les figures III.34 et III.35 ; les composantes fréquentielles de défaut sont faiblement apparues, ce qui explique la forte influence de la charge sur l'apparition de ces indices.

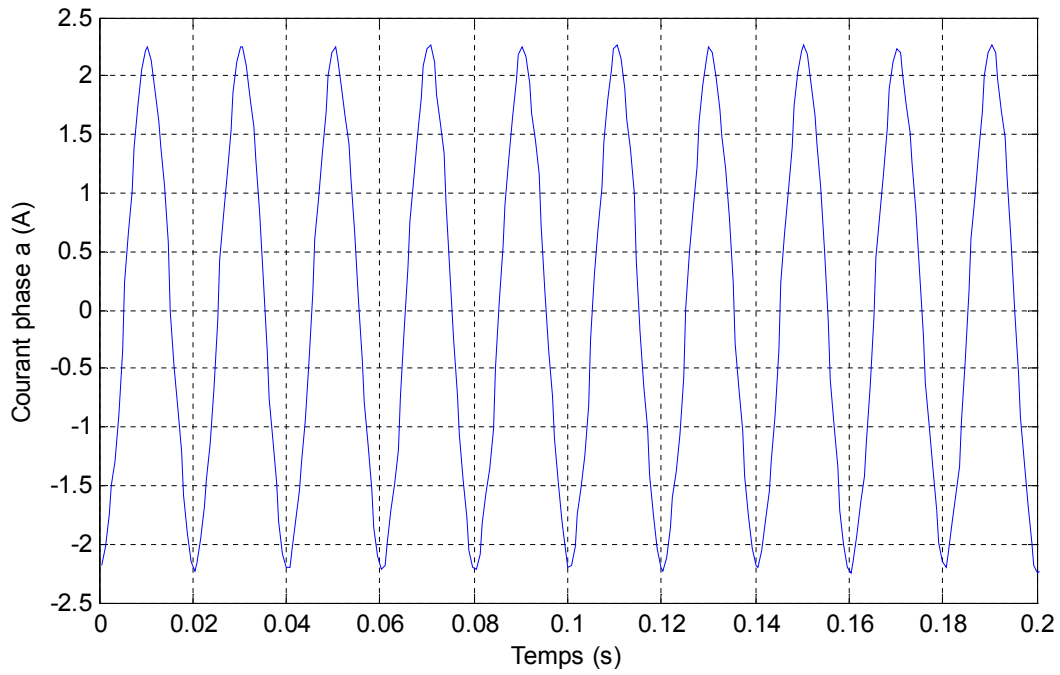


Figure III.33. Courant statorique de la machine avec deux barres cassées à la vitesse 1490 tr/mn

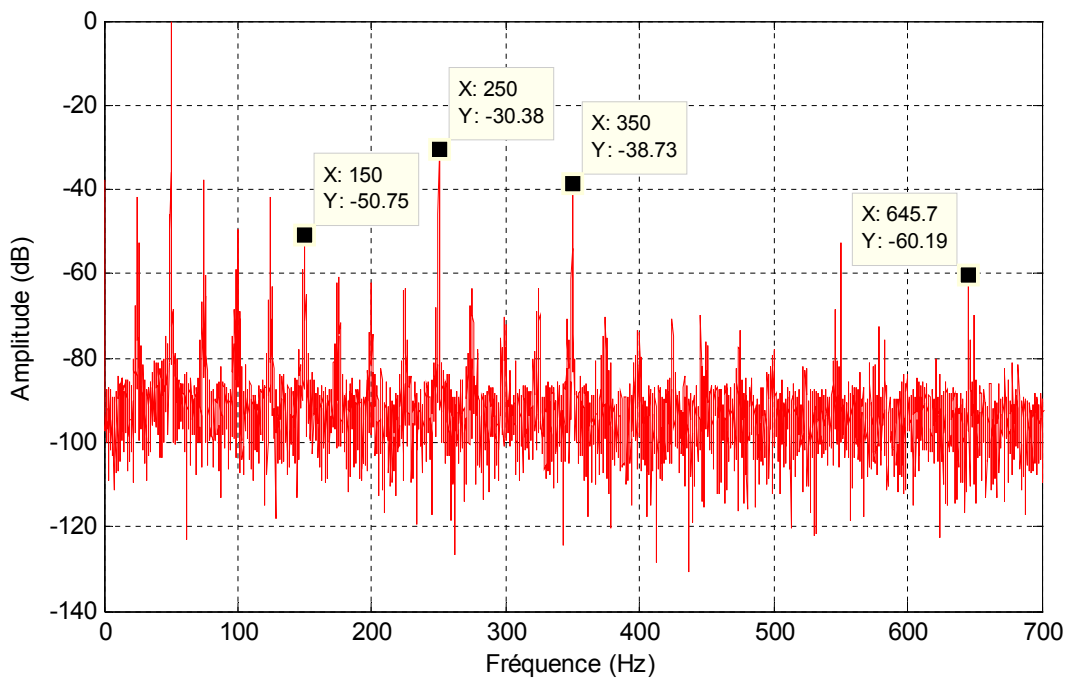


Figure III.34. Spectre du courant statorique (0 Hz - 700 Hz) du moteur avec deux barres cassées pour une vitesse de 1490 tr/mn

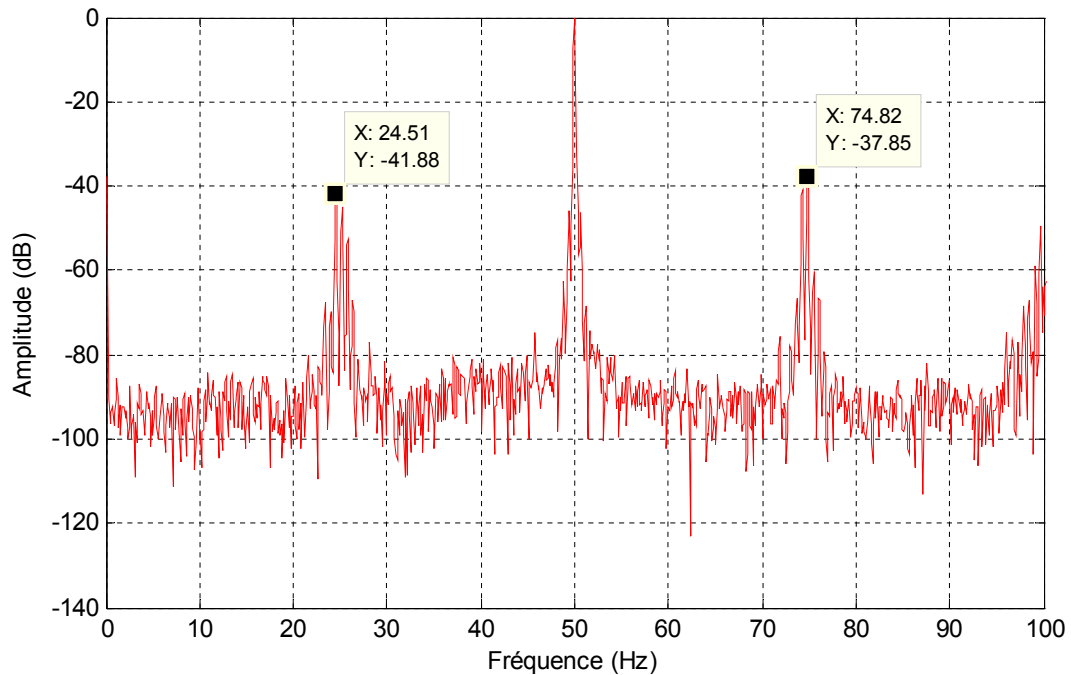


Figure III.35. Spectre du courant statorique (0 Hz - 100 Hz) du moteur avec deux barres cassées pour une vitesse de 1490 tr/mn

III.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a représenté les résultats expérimentaux pour une machine asynchrone saine et avec un défaut rotorique, les essais sont effectués pour différentes charges, suite à ce qui précède on peut conclure :

- ◆ La présence des indices de défaut de la cassure de barres même dans le spectre de la machine saine, ce qui explique que toute machine électrique a des défauts d'origine de fabrication. Pour l'état sain de la machine, les amplitudes de ces indices sont diminuées avec la diminution de la charge.
- ◆ La forte présence des indices spectraux de l'excentricité même dans le spectre du courant statorique de la machine saine, et d'après notre examinaisons dans les travaux précédents, l'excentricité dans les machines électriques tournantes se produit depuis la phase de la fabrication de la machine, et avec le temps le degré de ce défaut s'augmente [2].

- ◆ Contrairement au défaut de la cassure de barres, les amplitudes des fréquences de l'excentricité sont augmentées avec la diminution de la charge, c'est à cause de moment d'inertie [2, 10].
- ◆ La charge a une grande influence sur le contenu spectral du courant statorique de la machine saine ou avec défaut, les amplitudes des composantes fréquentielles permanentes s'augmentent et les amplitudes des indices de défaut s'augmentent aussi avec l'augmentation de la charge.
- ◆ Le degré de défaut a un effet remarquable sur les amplitudes des fréquences permanentes ou bien les fréquences causées par le défaut.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'intérêt grandissant des industriels pour la maintenance des entraînements électriques, et compte tenu de la fréquence d'utilisation des machines asynchrones, la détection précoce des défauts dans ces machines est devenue un enjeu économique important. Le contrôle continu du courant statorique de la machine asynchrone a un grand rôle dans la surveillance [2].

Dans ce cadre, le travail présenté dans ce mémoire traite le contenu spectral du courant statorique de la machine asynchrone saine et avec défaut en vue de d'assembler les facteurs qui peuvent influencer sur ce contenu. Le traitement des signaux des courants statoriques qui sont obtenus expérimentalement a été effectué par la méthode de la Transformée de Fourier Rapide (FFT). Les fréquences obtenues dans les spectres sont en bonne concordance avec ses formules, surtout les fréquences qui caractérisent le défaut de cassure de barre et l'excentricité [2].

Dans ce travail, on a bien vérifié l'influence de la charge sur le contenu spectral du courant statorique, et surtout sur les indices des défauts qui sont fréquemment touchés non seulement la machine asynchrone à cage, mais toutes les machines électriques tournantes, par exemple le défaut d'excentricité qui se manifeste fortement dans toutes les machines électriques tournantes.

Cette étude expérimentale a permis d'acquies connaissance que même dans les machines saines, les composantes fréquentielles qui caractérisent les défauts apparaissent dans ses spectres du courant statorique, alors c'est la manifestation des défauts de fabrication qui s'évaluent avec le temps et entraînent des défauts majeurs.

RÉFÉRENCES

- [1] M. SAHRAOUI, "*ÉTUDE COMPARATIVE DES MÉTHODES DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES*", thèse de Doctorat, université de Biskra, Algérie, 2010.
- [2] N. HALEM "*MODÉLISATION DES MACHINES ASYNCHRONES TRIPHASÉES À CAGE EN VUE DU DIAGNOSTIC PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS*", thèse de Doctorat, université de Biskra, Algérie, 2015.
- [3] M. KHOV, "*SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES MACHINES SYNCHRONES À AIMANTS PERMANENTS : DÉTECTION DES COURTS-CIRCUITS PAR SUIVI PARAMÉTRIQUE*", Thèse de Doctorat, université de Toulouse, France, 2009.
- [4] A. ABED, "*CONTRIBUTION À L'ÉTUDE ET AU DIAGNOSTIC DE LA MACHINE ASYNCHRONE*", thèse de Doctorat, université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002.
- [5] M. SAHRAOUI, "*CONTRIBUTION AU DIAGNOSTIC D'UNE MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASÉE À CAGE*", mémoire de Magistère, université de Biskra, Algérie, 2003.
- [6] B. VASEGHI, "*CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES MACHINES ÉLECTRIQUES EN PRÉSENCE DE DÉFAUT ENTRE-SPIRES MODÉLISATION-RÉDUCTION DU COURANT DE DÉFAUT*", thèse de Doctorat, université de Nancy, France, 2009.
- [7] N. HALEM, "*MODÉLISATION DES MACHINES ASYNCHRONES EN VUE DU DIAGNOSTIC AVEC PRISE EN COMPTE ADÉQUATE DE CIRCUIT MAGNÉTIQUE PAR ÉLÉMENTS FINIS*", mémoire de Magistère, université d'El-Oued, Algérie, 2010.
- [8] A. IBRAHIM, "*CONTRIBUTION AU DIAGNOSTIC DE MACHINES ÉLECTROMÉCANIQUES : EXPLOITATION DES SIGNAUX ÉLECTRIQUES ET DE LA VITESSE INSTANTANÉE*", thèse de Doctorat, université de Saint Etienne, France, 2009.

-
- [9] A. CEBAN, "*MÉTHODE GLOBALE DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ÉLECTRIQUES*", Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement, France, 2012.
- [10] A. GHOGGAL, "*CONTRIBUTION À LA MODÉLISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASÉE DÉDIÉE AU DIAGNOSTIC*", thèse de Doctorat, université de Biskra, Algérie, 2010.
- [11] M. E. H. BENBOUZID, M. VIEIRA, C. THEYS, "*INDUCTION MOTORS' FAULTS DETECTION AND LOCALIZATION USING STATOR CURRENT ADVANCED SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES*", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, N°1, PP. 14-22, 1999.
- [12] R. CASIMIR, "*DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS DES MACHINES ASYNCHRONES PAR RECONNAISSANCE DES FORMES*", thèse de Doctorat, L'école Centrale de Lyon, France, 2003.
- [13] R. CASIMIR, E. BOUTLEUX; G. CLERC, F. CHAPPUIS, "*A DECISION SYSTEM TO DETECT FAILURES IN INDUCTION MOTORS*", Systems, Man and Cybernetics, 2002 IEEE International, Conference on, Volume: 5, 6-9 Oct. 2002, Pages: 6 pp.vol.5.
- [14] ALLIANZ, "*PRÉSENTATION DES AVARIES. MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES*", Cahier des préventions, CP2, 1988.

