

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة السعيدة دكتور الطاهر مولاي

Université Saida Dr Tahar Moulay –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité :Électrotechnique Industrielle

Par : AIT ABDELMALEK Fatma Zohra et MEKKI Raouaa

Sujet

Amélioration de la résolution fréquentielle pour le diagnostic des défauts rotoriques du moteur asynchrone à cage

Soutenu publiquement le **27/06/2022** devant le jury composé de :

| | | |
|--------------------------------------|-------------|------------|
| Mr. BENMAHDJOUR Mohamed Amine | Univ. Saida | Président |
| Mr. AIMER Ameer Fethi | Univ. Saida | Rapporteur |
| Mme. DRIF Malika | Univ. Saida | Examineur |

Année universitaire 2021/20 2

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Dr. AIMER A. Fethi pour avoir dirigé ce travail, pour son aide, ses conseils précieux, ses encouragements incessants durant la réalisation de ce projet.

Ainsi que nous remercions pour le soutien qu'il nous a offert tout au long de nos études.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Notre profonde reconnaissance et nos respects les plus distingués à l'ensemble des enseignants de l'université Moulay Saïda , qui ont assuré notre formation tout au long de nos années d'études.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci

Dédicace

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots,
Que nous dédions ce modeste travail de fin d'étude*

A Mon cher père Ameziane

A Ma chère mère Saliha

*Qui ont sacrifié leur vie pour notre
réussite et nous ont éclairé le chemin par
Leurs conseils judicieux.*

A mes chers frères et sœurs

A ma chère sœur Hayet,

Pour son aide et support dans les moments difficiles

A ma chère binôme Raouaa

Pour sa entente et sa sympathie

Fatma

Dédicace

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots,
Que nous dédions ce modeste travail de fin d'étude*

*A Ma chère mère Fatima
Qui a sacrifié sa vie pour notre
réussite et nous ont éclairé le chemin par
Leurs conseils judicieux.*

*A mon cher oncle
Que dieu lui accorde le Paradis*

*A mon cher frère Nourdinne
Pour son aide et support dans les moments difficiles*

*A ma chère binôme Fatma
Pour sa entente et sa sympathie*

Raouaa

Résumé

Le recours aux machines asynchrones est surtout lié à leur robustesse, leur puissance massique et à leur coût de fabrication. Néanmoins, divers défauts peuvent apparaître au niveau de ce type de machines.

La densité spectrale de puissance, basée sur la transformée de Fourier (T.F), est utilisée comme méthode d'analyse depuis plusieurs années pour sa simplicité et son temps de calcul relativement faible. Cependant, cette technique possède plusieurs inconvénients qui sont dus principalement aux problèmes de résolution fréquentielle.

Pour résoudre ces problèmes, on propose d'utiliser un algorithme basé sur l'analyse de Fourier avec différentes fenêtres de pondération dans le but d'améliorer l'analyse spectrale du courant statorique et ainsi, permettre une meilleure localisation des harmoniques indiquant la signature des défauts rotoriques du moteur asynchrone.

Mots clés : Moteur asynchrone, Défauts rotoriques, Diagnostic, Analyse spectrale, Traitement du signal.

Abstract

The use of induction machines is mainly due to their robustness, their specific power and their manufacturing cost. Nevertheless, various faults may appear in this type of machine.

Power spectral density, based on the Fourier transform (T.F), has been used as an analysis method for several years for its simplicity and relatively low computation time. However, this technique has several drawbacks which are mainly due to frequency resolution problems.

To solve these problems, we propose to use an algorithm based on Fourier transform calculation with different weighting windows in order to improve the spectral analysis of the stator current and thus, allow a better localization of the harmonics indicating the signature of the rotor faults of the induction motor.

Keywords: Induction motor, Rotor faults, Fault diagnosis, Spectral analysis, Signal processing.

ملخص

يرتبط استخدام الآلات غير المتزامنة بشكل أساسي بقوتها وقوتها المحددة وتكلفة تصنيعها. ومع ذلك ، قد تظهر أخطاء مختلفة في هذا النوع من الآلات.

تم استخدام الكثافة الطيفية للقدرة ، استنادا إلى تحويل فوربيه (T.F) ، كطريقة تحليل لعدة سنوات لسيطرتها ووقت حسابها المنخفض نسبياً. ومع ذلك ، فإن هذه النقصية لها العديد من العيوب التي ترجع أساسا إلى مشاكل استبانة التردد.

لحل هذه المشكلات ، نقترح استخدام خوارزمية ناتجة عن التقنيات المتقدمة لمعالجة الإشارة من أجل تحسين التحليل الطيفي لتيار الجزء الثابت ، وبالتالي ، السماح بتوطين أفضل للتوافقيات التي تشير إلى توقيت عيوب الدوار للمحرك. غير متزامن.

الكلمات المفتاحية: المحرك غير المتزامن ، أعطال الدوار ، التشخيص ، التحليل الطيفي ، معالجة الإشارة.

Table des Figures

CHAPITRE01 : Représentation de la machine asynchrone

| | |
|--|----|
| Figure I.1 Schéma présent principe de fonctionnement d'un moteur | 7 |
| Figure I.2 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil..... | 8 |
| Figure I.3 Vue schématique en perspective stator..... | 9 |
| Figure I.4 a) Encoches statoriques semi-fermées, b) semi-ouvertes, c) ouvertes. | 10 |
| Figure I.5 Cage rotorique | 11 |
| Figure I.6 Encoches rotoriques a)semi-fermées rondes, b) semi-fermé trapézoïdales,c)encoches fermées. | 12 |
| Figure I.7 a) Rotor à encoches profondes ,b) tôle d'un moteur à double cage..... | 12 |
| Figure I.8 a) Encoche rotorique à double cage, b) encoche d'un rotor à encoches profondes. | 13 |
| Figure I.9 Plaque signalétique d'un moteur asynchrone. | 14 |
| Figure I.10 Branchement des bobines internes de la machines asynchrone..... | 15 |

CHAPITRE 02:Diagnostic des défauts de la machine asynchrone

| | |
|--|----|
| Figure II.1 Classification des défauts selon leurs origines. | 18 |
| Figure II.2 Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage..... | 19 |
| Figure II.3 Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage. | 20 |
| Figure II.4 Pourcentage des défauts (2008)..... | 20 |
| Figure II.5 Pourcentage des défauts (1995)..... | 21 |
| Figure II.6 Représentation des différents défauts statoriques possibles | 23 |
| Figure II.7 Cassure de Barres. | 23 |
| Figure II.8 Cassures de barres et de portions d'anneaux..... | 24 |
| Figure II.9 Roulement à billes. | 26 |
| Figure II.10 Défauts de désalignement..... | 27 |
| Figure II.11 Défauts d'excentricité statique et dynamique. | 28 |
| Figure II.12 Synthèse des méthodes de diagnostic..... | 30 |
| Figure II.13 Les points de mesures [Didier, 04]..... | 31 |
| Figure II.14 Représentation temps-fréquence du courant statorique lors d'une variation du couple de charge (Cas d'une barre cassée)..... | 36 |

CHAPITRE 03:Analyse spectrale du courant statorique

| | |
|--|----|
| Figure III.1 Représentation de la fenêtre rectangulaire. | 45 |
| Figure III.2 Représentation de la fenêtre gaussienne. | 45 |
| Figure III.3 Représentation de la fenêtre de Hanning. | 46 |
| Figure III.4 Représentation de la fenêtre de Hamming. | 46 |
| Figure III.5 Représentation des différentes fenêtres de pondération..... | 47 |
| Figure III.6 Représentation de la densité spectrale de puissance | 49 |

| | |
|--|----|
| Figure III.7 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur sain avec un glissement égal à 4,06 % et RSB=75dB..... | 50 |
| Figure III.8 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur sain avec un glissement de 4,06 % et RSB=15dB | 51 |
| Figure III.9 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur avec défaut d'une barre cassée pour un glissement de 4,06 % et RSB=75dB..... | 52 |
| Figure III.10 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur avec une barre cassée pour un glissement de 4,06 % et RSB=15dB | 53 |
| Figure III.11 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur avec défaut d'une barre cassée pour un glissement de 2,13% et RSB=75dB..... | 54 |
| Figure III.12 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur avec défaut d'une barre cassée pour un glissement 2,13 % et RSB=15dB | 55 |
| Figure III.13 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur avec défaut d'une barre cassée pour un glissement de 2.13 %, RSB=75dB et k = 2 ... | 56 |
| Figure III.14 Schéma synoptique du banc d'essai..... | 57 |
| Figure III.15 Illustration du banc d'essai | 58 |
| Figure III.16 Défaut d'une barre cassée..... | 59 |
| Figure III.17 DSP du courant statorique (fenêtre rectangulaire) pour g = 4,06% | 59 |
| Figure III.18 DSP du courant statorique (fenêtre de Hamming) pour g = 4,06% | 60 |
| Figure III.19 DSP du courant statorique (fenêtre de Hanning) pour g = 4,06% | 60 |
| Figure III.20 DSP du courant statorique (fenêtre rectangulaire) pour g = 2,13% | 61 |
| Figure III.21 DSP du courant statorique (fenêtre de Hamming) pour g = 2,13% | 61 |
| Figure III.22 DSP du courant statorique (fenêtre de Hanning) pour g = 2,13% | 62 |

Liste des symboles

- f : Fréquence d'alimentation.
- p : Nombre de paires de pôles.
- g : Glissement du moteur asynchrone en pourcentage [sans unités].
- ns : Fréquence de rotation du champ \vec{B} en tours par seconde [tr/s] .
- f_{bc} : Fréquence de barre cassée.
- f_s : Fréquence d'alimentation statorique
- f_v : Fréquence vibratoire du défaut de roulement.
- D_b : Diamètre d'une bille.
- D_C : Distances entre les centres des billes diamétralement opposées.
- N_b : Nombre de billes.
- B : Angle de contact des billes avec les bagues du roulement.
- f_r : Fréquence de rotation du rotor.
- Nr : Nombre de barres rotoriques.
- n : 1, 2, 3
- π_T : Fonction rectangle de support [0,T].
- N : Nombre d'échantillons (sur lequel est calculée la TFD).
- f_s : Fréquences du fondamental.
- f_b : Fréquence du défaut de barres.
- f_{ex} : Fréquence du défaut d'excentricité .
- k : 1, 2, 3.....
- TFD** : Transformée de Fourier Discrète.
- TF** : Transformée de Fourier.
- DSP** : Densité spectrale de puissance.
- RSB** : Rapport signal sur bruit.
- F_e** : Fréquence d'échantillonnage.
- Δf : Résolution fréquentielle
- FFT** : Transformée de Fourier Rapide.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Introduction Générale..... | 2 |
| CHAPITRE01 : Représentation de la machine asynchrone | |
| INTRODUCTION..... | 5 |
| 1. HISTORIQUE | 5 |
| 2. PRESENTATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE..... | 6 |
| Principe De Fonctionnement De La Machine Asynchrone | 6 |
| Glissement D'une Machine Asynchrone | 7 |
| 3. CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE | 8 |
| Stator..... | 9 |
| Rotor | 10 |
| L'entrefer | 13 |
| Organes Mecaniques..... | 14 |
| 4. PLAQUE SIGNALETIQUE | 14 |
| 5. LE BOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE..... | 14 |
| 6. AVANTAGE ET INCONVENIENTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE..... | 15 |
| Avantages..... | 15 |
| Inconvénients | 15 |
| CONCLUSION | 16 |
| CHAPITRE 02: Diagnostic des défauts de la machine asynchrone | |
| INTRODUCTION..... | 18 |
| 1. CLASSIFICATION DES DEFAUTS DANS LES MACHINES ELECTRIQUES..... | 18 |
| 2. LES CAUSES DES DEFAUTS | 19 |
| 3. ETUDE STATISTIQUE DES DEFAILLANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE..... | 20 |
| 4. DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE..... | 22 |
| Défauts électriques | 22 |
| Défauts mécaniques | 24 |
| 5. METHODES DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS | 28 |
| Méthodes internes de diagnostic | 28 |
| Méthodes externes de diagnostic | 29 |
| 6. SIGNATURES REPRESENTATIVES DES DEFAUTS | 31 |
| 7. TECHNIQUES DU TRAITEMENT DE SIGNAL..... | 31 |
| Analyse du signal du courant statorique | 32 |
| Méthodes non paramétriques | 34 |
| Méthodes paramétriques | 37 |
| CONCLUSION | 39 |

CHAPITRE 03: Analyse spectrale du courant statorique

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION..... | 41 |
| 1. ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE | 41 |
| Passage des Séries de Fourier à la Transformée de Fourier..... | 41 |
| Passage de la transformée de Fourier à la transformée de Fourier discrète | 42 |
| 2. DENSITE SPECTRALE DE PUISSANCE PAR PERIODOGRAMME | 48 |
| 3. SIMULATION NUMERIQUE | 49 |
| 4. INTERPRETATION DES RESULTATS DE SIMULATION..... | 50 |
| Test d'un moteur sain..... | 50 |
| Test de robustesse vis-à-vis du bruit..... | 51 |
| Test d'un moteur avec défaut d'une barre cassée..... | 52 |
| Test pour un faible glissement | 54 |
| Test du moteur avec défaut d'une barre cassée ($k = 2$)..... | 56 |
| 5. COMPARAISON AVEC DES RESULTATS EXPERIMENTAUX | 57 |
| Description du banc d'essai | 57 |
| ACQUISITION DES DONNÉES..... | 58 |
| Défaut d'une barre cassée ($g = 4,06\%$)..... | 59 |
| Défaut d'une barre cassée ($g = 2,13\%$)..... | 61 |
| CONCLUSION | 62 |
| Conclusion Générale | 64 |
| Références Bibliographiques..... | 68 |
| ANNEXES..... | 73 |

Introduction générale

Les objectifs des différentes structures industrielles sont toujours liés à l'augmentation de la qualité, la productivité et la rentabilité, la surveillance spéciale du processus pendant les cycles de fonctionnement devient insuffisants.

Le diagnostic et la détection de défauts mobilisent à ce jour beaucoup de chercheurs dans les différents domaines industriels, spécialement les entraînements électriques qui utilisent de plus en plus les moteurs asynchrones à cause de leur robustesse, leur puissance mécanique et de leur coût. Mais son utilisation est limitée dans l'entraînement des systèmes à vitesse constante par rapport aux systèmes à vitesse variable à cause de la difficulté de sa commande .

Aujourd'hui, avec la progression de l'électronique de puissance, le moteur asynchrone peut-être asservi bien en couple qu'en vitesse. Ce contrôle lui ouvre de larges domaines d'utilisation (l'aéronautique, le nucléaire, la chimie, les transports ferroviaires, etc.).

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 (thermique, électrique, mécanique et d'environnement) peuvent affectés la durée de vie de celle-ci en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables, obligeant les chercheurs de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats . Bien que déjà présents dans d'autres domaines, et parmi les différentes techniques de diagnostic, l'analyse spectrale constitue des nouvelles techniques dans le domaine de diagnostic.

Nous avons voulu savoir quel pourrait être l'apport de ces techniques appliquées à la surveillance d'un système fortement non linéaire, qu'est la machine asynchrone à cage. Il est évidemment impossible de cerner toutes les possibilités et les combinaisons où peuvent intervenir ces techniques. Nous examinerons plus précisément le problème de détection, ainsi que la localisation de quelques défauts tels que les défauts de barres rotoriques.

L'analyse spectrale se base sur l'application de la transformée de Fourier. Cette dernière induit lors de l'opération de troncature des effets négatifs sur le spectre statorique .Ces effets se manifestent par l'apparition des lobes secondaires au tour du lobe principale de chaque composante fréquentielle .Ceci a pour effet de réduire la résolution fréquentielle du spectre

et altéré une lecture efficace de différentes informations fournis par le spectre .Pour résoudre ce problème ,nous allons effectuer une étude portant sur un choix optimale des fenêtres de pondérations permettant ainsi d'améliorer la résolution fréquentielle de l'analyse spectrale .

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la surveillance des machines asynchrones triphasées à cage. Nous sommes intéressées, particulièrement aux défauts qui peuvent apparaître au niveau du rotor. De ce fait, le mémoire comporte quatre chapitres. Dans le premier chapitre ,on présente des généralités sur le moteur asynchrone.

Le deuxième chapitre, présente les causes et les natures des différents défauts et aussi les méthodes et les techniques utilisées dans le diagnostic des défauts dans un moteur à cage d'écureuil.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons l' analyse spectrale du courant statorique avec ses harmoniques à l'aide de la transformée de Fourier ainsi que les résultats de simulation du moteur asynchrone, dans les différentes conditions de fonctionnement, (avec et sans défaut). Nous monterons les effets des cassures de barres sur le courant statorique de la machine. Enfin, nous présentons en fin de chapitre des résultats expérimentaux destinés à vérifier et valider les résultats de simulation obtenus.

Chapitre 1

REPRESENTATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

INTRODUCTION

Le moteur asynchrone, ou moteur à induction, est le moteur le plus utilisé dans la plupart des entraînements électriques. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple, robuste mécaniquement et facile à construire, leur stator est relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes, il tourne à vitesse peu différente de la vitesse de synchronisme, c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante. Il permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il occupe dans ce domaine ne cesse de croître [Chekima,14].

Ce chapitre, débute par un rappel sur la constitution de la machine asynchrone ainsi que son principe de fonctionnement, ses caractéristiques, ses applications et ses avantages et inconvénients.

1. HISTORIQUE

La machine asynchrone, connue également sous le terme « anglo-saxon » de machine à induction, est une machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor.

Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent.

Son invention est attribuée à Nikola Tesla en 1887. En 1889 Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski (ou Michael von Dolivo-Dobrowolski), électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891.

Le moteur asynchrone est le plus utilisé dans l'industrie, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Son seul point noir est l'énergie réactive toujours consommé pour magnétiser l'entrefer. Les machines triphasés, alimentées directement sur le réseau, représentent la grande majorité des applications.

On distingue deux types de machine asynchrone :

- Les machines d'induction : une armature, le rotor ordinaire n'est pas alimenté, les courants qui y circulent sont induits par l'autre armature.

- Les machines à collecteur : l'armature tournante est reliée au réseau par un collecteur ce qui permet d'abord de prélever de la puissance au moteur sans imposer la fréquence des courants dans celui-ci.

2. PRESENTATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

La machine asynchrone est par excellence la machine la plus répandue dans l'industrie. Cet intérêt croissant est justifié par de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, ... etc.

Le développement des convertisseurs de fréquence permettant de varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement, favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant les convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc....) [Ondel, 06].

Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur la loi de l'induction ; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court circuit.

Ce fonctionnement repose sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par les courants triphasés fournis à l'enroulement statorique par le réseau, ce champ sinusoïdal tourne à la vitesse de rotation donnée par :

$$n = \frac{f}{p} \quad (\text{I.1})$$

Où

f : la fréquence d'alimentation.

p : représente le nombre de paires de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), c'est-à-dire

lorsque $n \neq n_1$, car dans le cas contraire, ($n = n_1$), le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport $g = \frac{n_1 - n}{n_1}$ est appelé glissement de la machine asynchrone [Cherif,14].

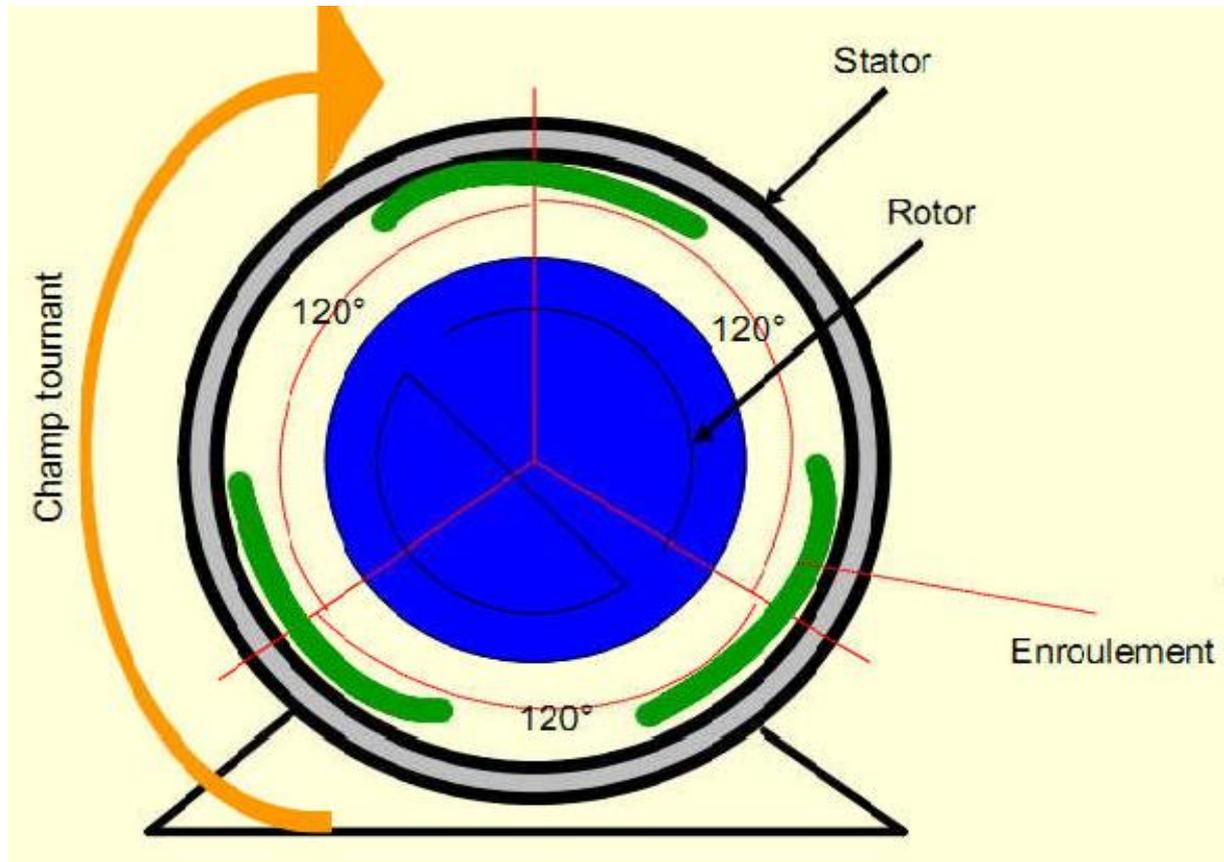


Figure I.1 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.

Glissement d'une machine asynchrone

Le glissement est une grandeur caractérisée par l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à celle de synchronisme (vitesse du champ statorique). Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pourcents : de 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées, il peut atteindre 10% pour les petites machines monophasées. Les pertes par effet Joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une machine de qualité se doit de fonctionner avec un faible glissement :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (I.2)$$

Où

g : Le glissement du moteur asynchrone en pourcentage [sans unités].

n_s : La fréquence de rotation du champ \vec{B} en tours par seconde [tr/s] .

3. CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

On se propose, dans cette section, de rappeler brièvement la constitution de la machine asynchrone. Cette description va nous permettre de mieux appréhender les défauts de cette machine dans leur dimension physique.

Les machines asynchrones peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en quatre parties distinctes :

- le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
 - le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
 - les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.
 - l'entrefer, partie amagnétique (c'est le vide entre le rotor et le stator)
- [Trigeassou,11].

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la figure (I.2) :

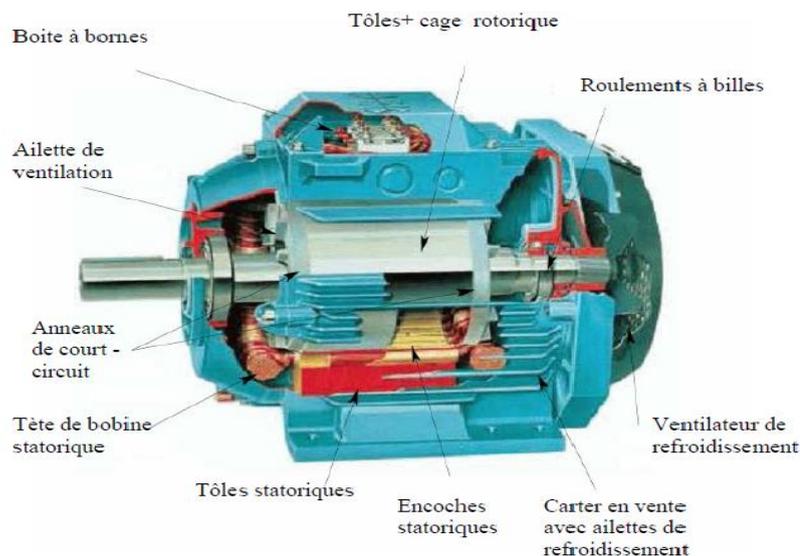


Figure I.2 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

Stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Pour les petites machines, ces tôles sont découpées en une seule pièce, alors qu'elles sont découpées par sections pour les machines de puissance plus importante. Ces tôles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault ; elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons, de rivets ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique [Loutzki,69].

Les enroulement statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriquée, ondulée ou encore concentrique.

L'enroulement concentrique est souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone.

La stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à laquelle est reliée l'alimentation électrique [Trigeassou,11].

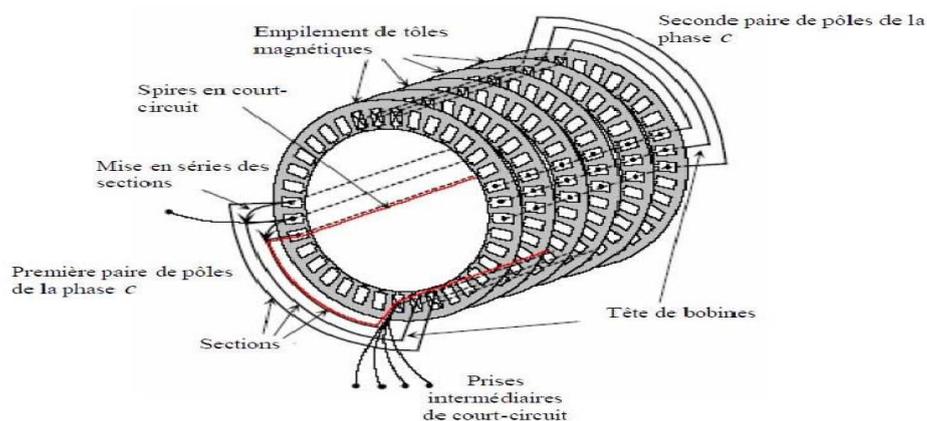


Figure I.3 Vue schématique en perspective stator.

Les encoches statoriques

Les encoches statoriques sont de 3 types génériques : ouvertes, semi-ouvertes et semi-fermées, elles sont représentées sur la figure (I.4) Les encoches de type ouvert sont habituellement de même largeur sur toute la profondeur, les encoches semi-ouvertes sont généralement de forme trapézoïdale [Bouchared,97].

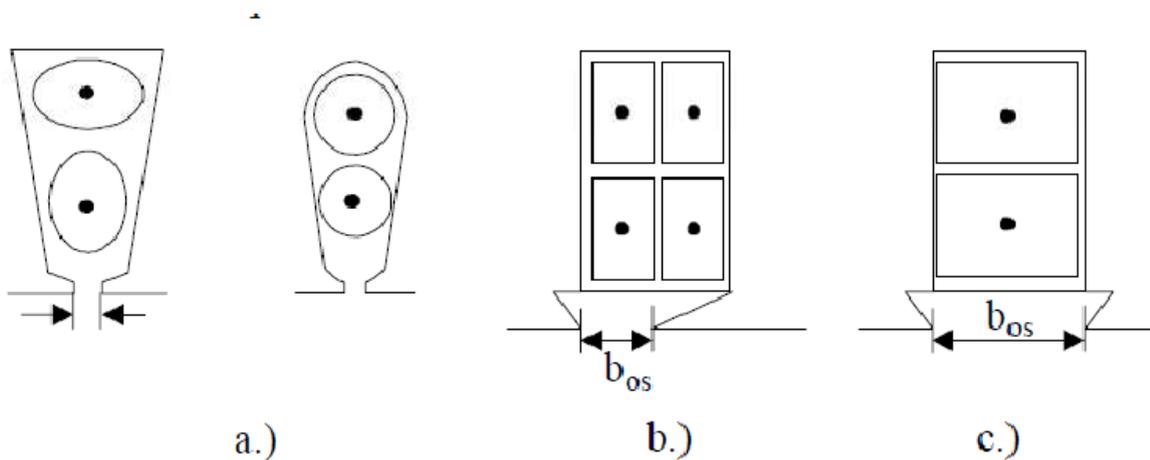


Figure I.4 a) Encoches statoriques semi-fermées, b) semi-ouvertes, c) ouvertes.

Rotor

C'est un anneau de tôles empilées et rainuré à l'extérieur. Habituellement de même matériau que le stator et est séparé de lui par n entrefer. Le rotor n'est donc relié à aucune source d'énergie ce qui simplifie sa construction. Le courant dans ses enroulements est induit par le champ tournant statorique d'où son appellation : induit ou secondaire. Les divers types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor qui est de deux types :

- rotor bobiné ou rotor à bague.
- rotor à cage d'écureuil qui peut être aussi à double cage ou à encoches profondes.

Le rotor bobiné

Le rotor bobiné comporte un enroulement triphasé bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilées sur l'arbre de la machine. Les encoches, découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques. L'enroulement triphasé est relié soit en étoile soit en triangle, il est connecté à trois bagues qui le

rendent accessible à l'extérieur par l'intermédiaire de balais. On peut ainsi le court-circuiter comme cela se produit en marche normale, on peut insérer des résistances dans le circuit lors du démarrage et dans certains cas spéciaux de fonctionnement on peut y raccorder un convertisseur de courant à thyristor afin de régler le courant de démarrage et la vitesse en marche normale.

Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux ; en effet, les pertes rotoriques pendant la phase de démarrage ne sont pas toujours supportées par les cages [Bouchared, 97].

Le rotor à cage

Pour le rotor à cage de la figure (I.5), l'enroulement triphasé est remplacé par des barres conductrices réunies entre elles de part et d'autre du rotor par des anneaux de court-circuit, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

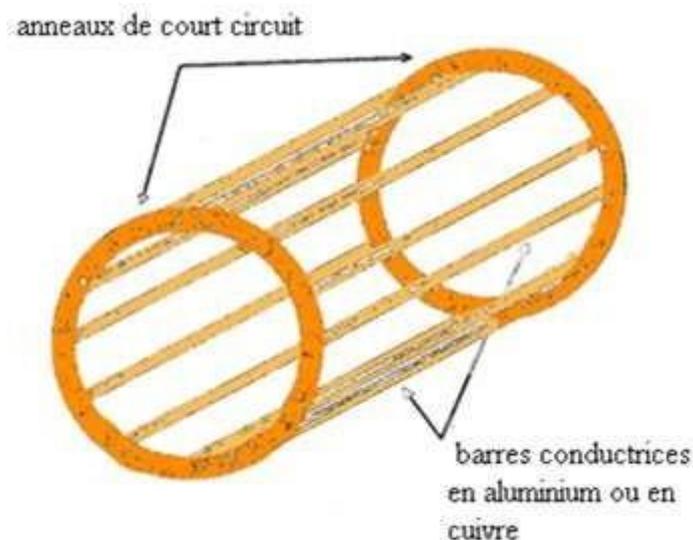


Figure I.5 Représentation d'une cage rotorique.

Les barres sont faites en cuivre ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans le cas de moteur de faible ou moyenne puissance les cages sont en aluminium coulé sous vide partiel et pression. Ce procédé permet d'éviter la présence néfaste de bulles d'air dans les barres. Toutefois, dans les petits moteurs on utilise plutôt des barres en plastique, cette manière est moins coûteuse que l'aluminium. Pour les gros moteurs les barres sont en cuivre ou en laiton. Pour les encoches, les semi-fermées ou

fermées sont les plus utilisées figure (I.6).

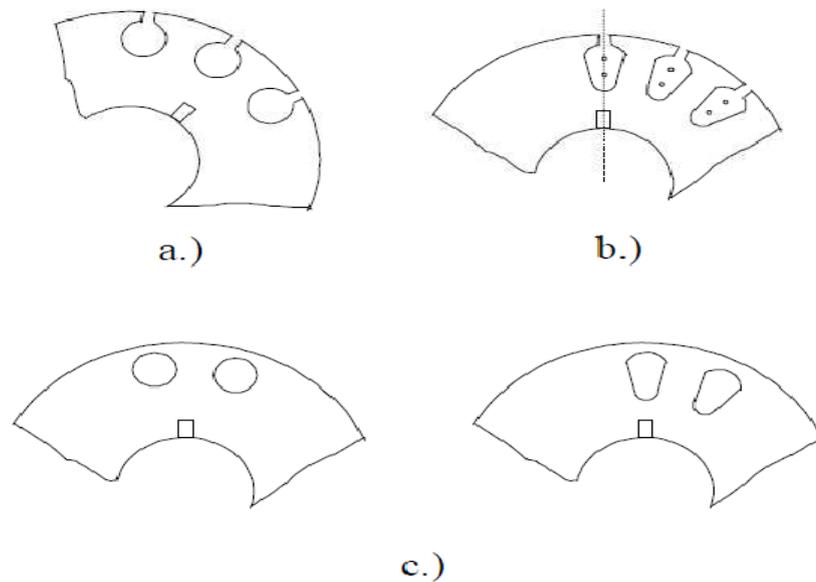


Figure I.6 Encoches rotoriques a)semi-fermées rondes, b) semi-fermées trapézoïdales, c)encoches fermées.

Le rotor à double cage

Le rotor à double cage comporte deux cages coaxiales, l'une est externe (réalisée fréquemment en laiton ou en bronze) à résistance relativement élevée et placée près de l'entrefer. L'autre est interne (réalisée en cuivre) de plus faible résistance et noyée dans l'entrefer. La figure (I.7.b) présente la forme de la tôle utilisée pour la fabrication d'un rotor à double cage alors que la figure (I.7.a) présente la forme de l'encoche utilisée.



Figure I.7 a) Rotor à encoches profondes b) tôle d'un moteur à double cage.

Les encoches profondes

Les encoches profondes (présentées sur la figure. I.8), sont très utilisées, notamment dans le cas des moteurs à haute tension à fort couple de démarrage. Ce dernier présente cependant l'inconvénient d'entraîner une augmentation du coefficient de dispersion des enroulements, donc une diminution du facteur de puissance du moteur, et bien sûr, d'exiger un diamètre de rotor plus important. Pour remédier à ce dernier inconvénient, on fait parfois appel à des conducteurs ayant des formes plus compliquées, en trapèze, voire en L (la base du L étant en fond d'encoche) [Bouchared, 97].

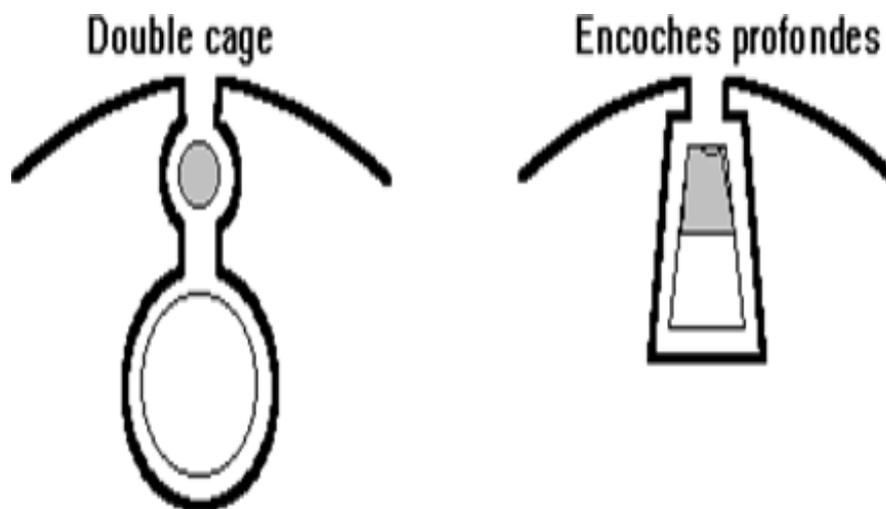


Figure I.8 a) Encoche rotorique à double cage, b) encoche d'un rotor à encoches profondes.

Pour former le rotor, on empile généralement les tôles de façon que les conducteurs soient obliques par rapport à l'axe du moteur. Cette disposition a pour effet de réduire considérablement le bruit et les sous harmoniques durant l'accélération et le démarrage en plus d'éviter l'accrochage et les oscillations à faible charge [Bouchared,97].

L'entrefer

Cette partie amagnétique (vide entre le stator et le rotor) est d'épaisseur très faible (de l'ordre du millimètre), cette épaisseur réduite rend la taille de l'entrefer sensible aux variations dues aux encoches statoriques. Ceci crée des harmoniques dites d'encoches, pour les réduire, les encoches sont fermées par des cales magnétiques qui maintiennent le bobinage [Cherier,09].

Organes Mécaniques

Les paliers sont constitués de roulements à billes de flasques. Les roulements à billes sont insérés à chaud sur l'arbre, permettant ainsi d'assurer le guidage en rotation de l'arbre. Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone [Trigeassou,11].

4. PLAQUE SIGNALÉTIQUE

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone est la carte d'identité du moteur délivrée et certifiée par le constructeur, elle contient donc les caractéristiques nominales électriques du moteur [Herrache,06].

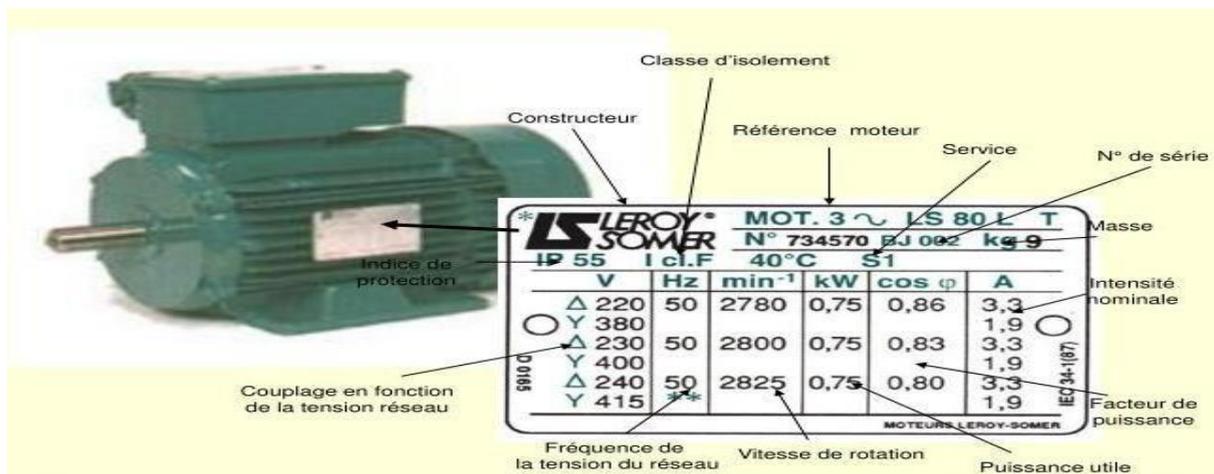


Figure I.9 Plaque signalétique d'un moteur asynchrone.

5. BOBINAGE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE

Les bobines sont logées dans les encoches du stator. Le branchement des bobines sur le réseau se fait au niveau de la plaque à bornes située au dessus du moteur. On dispose ainsi de 6 connexions, une pour chacune des extrémités des trois bobines. Les bornes sont reliées aux bobines selon le schéma de la figure (I.10) [Charbonnel,18].

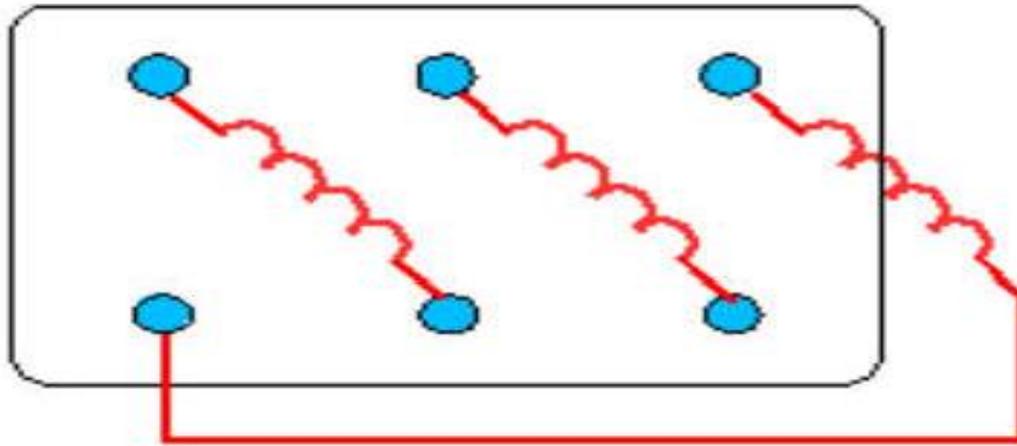


Figure I.10 Branchement des bobines internes de la machines asynchrone.

6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Comme les autres machines électriques, la machine asynchrone présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs : sa structure, sa stratégie de commande et ses applications [Ait Ouali,15].

Avantages

Parmi les avantages de la machine asynchrone et notamment en fonctionnement moteur, on peut citer [Ait Ouali,15] :

- 1/ sa robustesse mécanique.
- 2/ son faible coût.
- 3/ l'absence d'entretien constant.

Inconvénients

- 1/ L'inconvénient majeur du moteur asynchrone est lié à l'absorption du réactif qu'il faut parfois compenser, à des pertes de glissement et surtout à la nécessité de fonctionner pratiquement au voisinage de la vitesse de synchronisme.
- 2/ Le courant de démarrage plus élevé (5 à 8 fois le courant nominal).
- 3/ Difficile de contrôler la vitesse [Ait Ouali,15].

CONCLUSION

Actuellement, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique. Des applications de la machine asynchrone à vitesse variable, ont vu le jour dans divers domaines en l'occurrence : l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision.

Toutefois, cette machine peut être affectée par des défauts potentiels qui se répercutent sur la sécurité de la production, la qualité du service et la rentabilité des installations. 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. La surveillance d'un dispositif implique le diagnostic des défauts : il consiste en la détection d'un changement anormal dans le comportement ou l'état d'un système et dans la localisation de sa cause.

Le but est de garantir la sécurité et la continuité de service et d'enregistrer les événements utiles pour la maintenance curative ou le retour d'expérience.

Chapitre 2

DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous rappelons les éléments de constitution de la machine asynchrone, et les défauts pouvant survenir sur la machine asynchrone, ensuite les divers techniques de traitement pouvant être utilisés pour la détection d'un défaut électrique ou mécanique. A la fin, nous discutons les méthodes de diagnostic actuellement appliquées à la machine asynchrone.

1. CLASSIFICATION DES DEFAUTS DANS LES MACHINES ELECTRIQUES

Les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine asynchrone (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine.

La classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans figure (II.1). [Trigeassou,11].

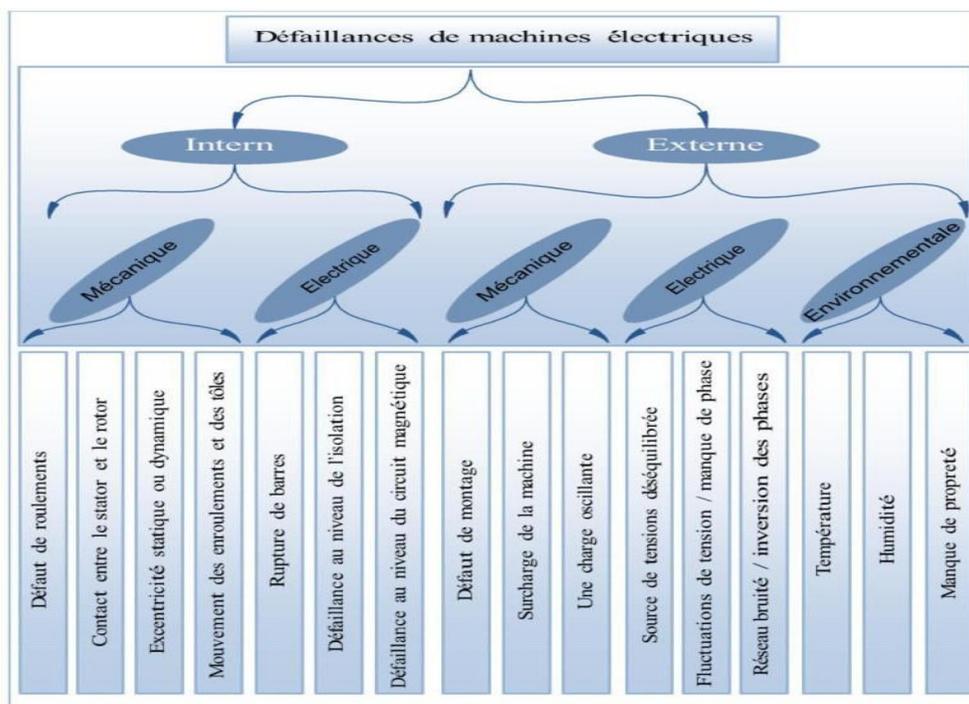


Figure II.1 Classification des défauts selon leurs origines.

2. LES CAUSES DES DEFAUTS

Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures (II.2) et (II.3).

Nous pouvons ainsi remarquer que les défauts internes sont causés par les constituants de la machine (Circuits magnétiques rotoriques et statoriques, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique...).

Alors que les défauts externes sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'utilisation de la machine. D'après les organigrammes des figures (II.2) et (II.3), les origines des défauts sont diverses : thermique, mécanique, électrique ou encore environnementale. A titre indicatif, les démarrages fréquents provoquent des courants élevés dans les barres rotoriques .

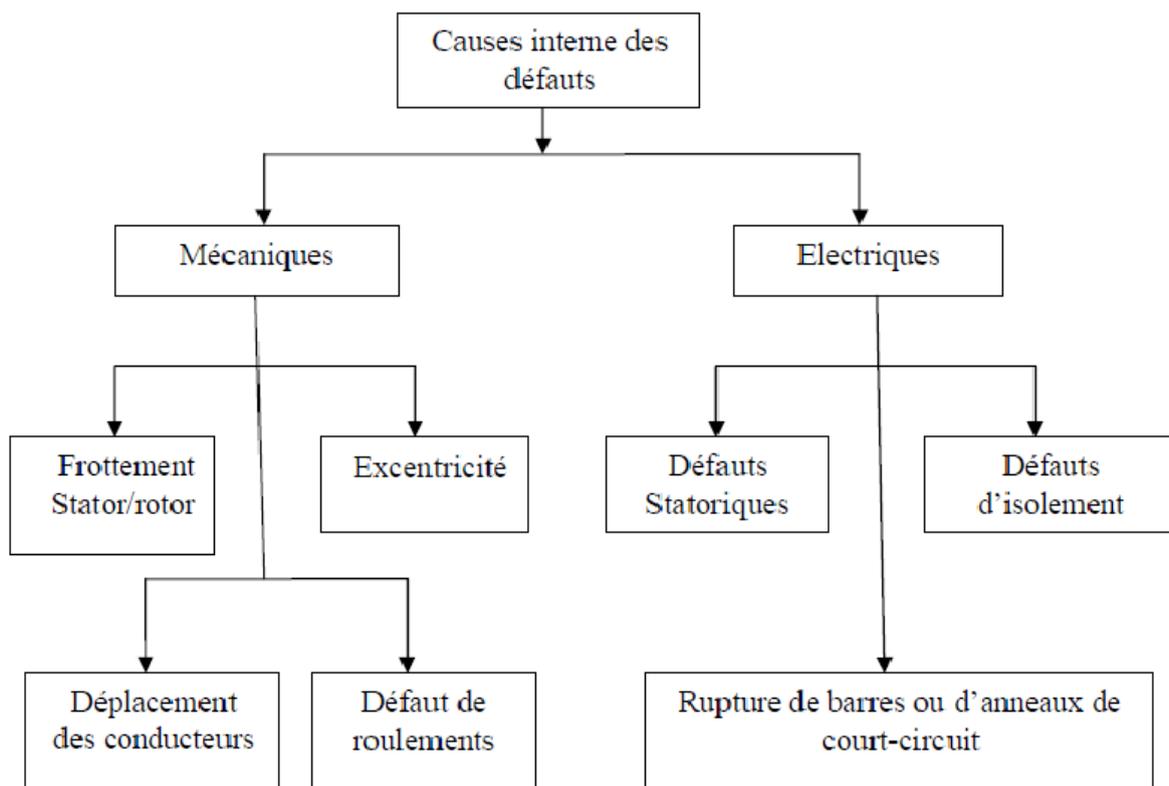


Figure II.2 Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

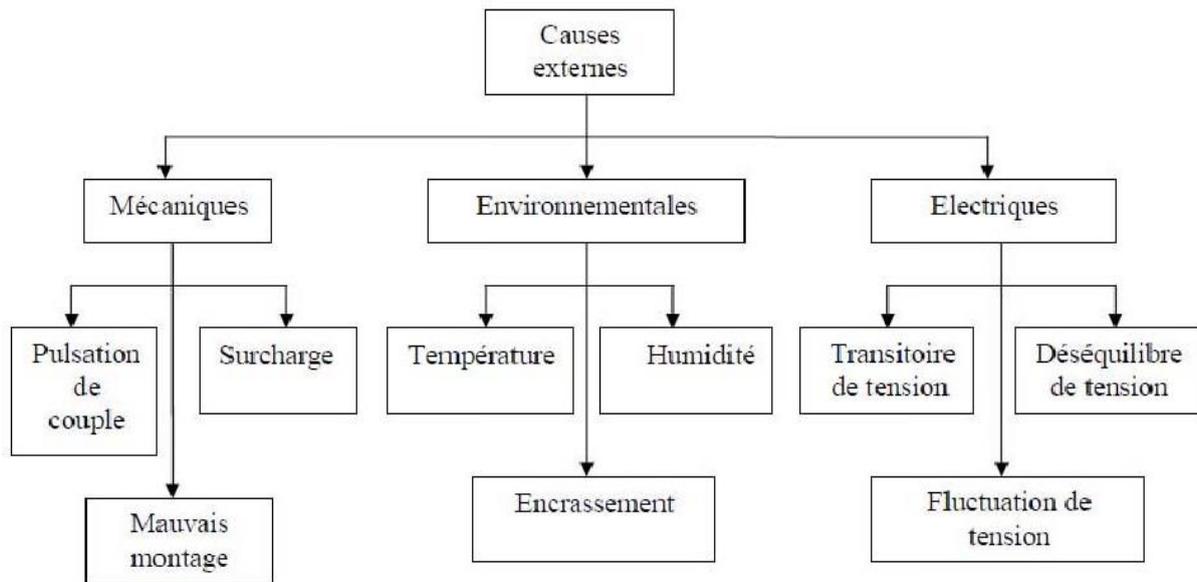


Figure II.3 Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

3. ETUDE STATISTIQUE DES DEFAILLANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Une étude statistique menée par [Bonnett,08] sur les machines asynchrones à cage d'écureuil, exploitées dans le domaine de l'industrie pétrochimique, nous révèle que certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres comme exposé par le diagramme de la figure (II.4) en présentant le pourcentage de défauts susceptibles d'affecter ces machines de grande puissance.

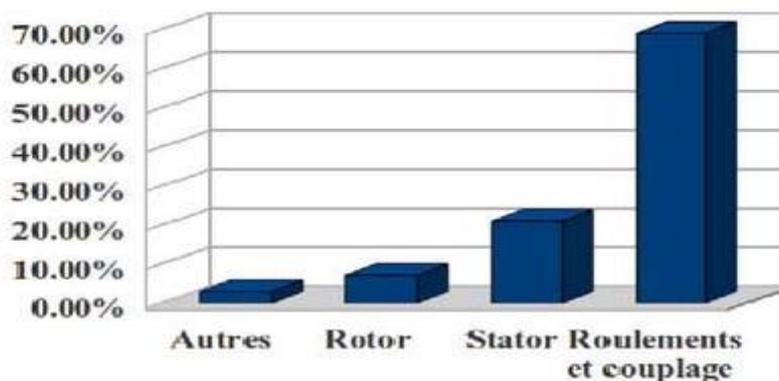


Figure II.4 Pourcentage des défauts (2008).

Cette répartition montre que les défauts des machines de grande puissance proviennent principalement de roulements et du bobinage statorique, ceci est dû aux contraintes mécaniques plus importantes dans le cas de ces machines.

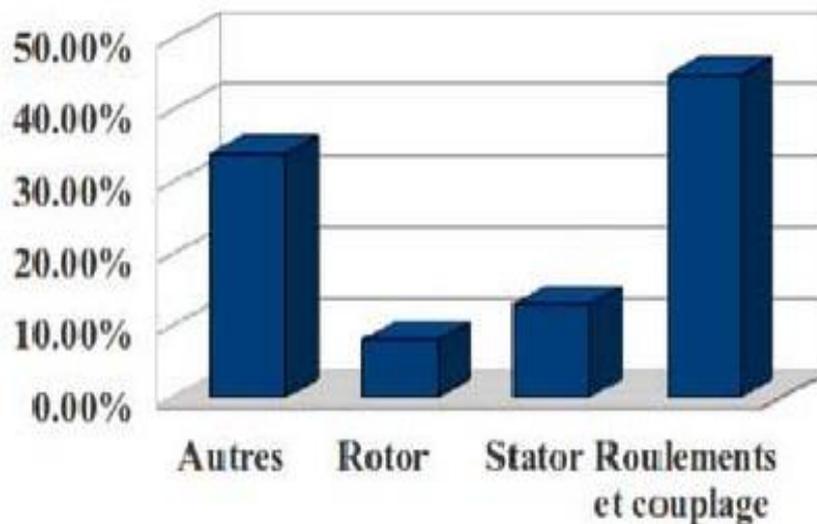


Figure II.5 Pourcentage des défauts (1995).

En comparant ces résultats à ceux issus de publications plus anciennes, données par [Thorsen,95] sur des machines de même type (100KW à 1MW), nous remarquons que, dans ces dernières, la répartition de pourcentage de ces défauts a changé, du fait des conditions de fabrication des moteurs. Les défauts dans le stator et le rotor sont de moins en moins fréquents, la principale source de défaillances est constituée actuellement par les roulements.

L'avancée technologique dans le domaine de l'électronique de puissance a permis aussi d'introduire des nouvelles techniques de commande des machines électriques. Dans le cas des machines commandées par des convertisseurs de puissance, les enroulements sont excités par des tensions comprenant des harmoniques de rang élevé. Cette dernière option est devenue la norme pour le contrôle des systèmes électriques. Ce type d'alimentation accélère le vieillissement de l'isolation du bobinage statorique. Une solution est le développement d'une meilleure isolation de matériaux.

Ces statistiques ne sont pas pour autant valables pour toutes les circonstances, il est à noter que ces défauts sont très sensibles aux conditions d'exploitation des machines et que leurs origines peuvent être variées.

Recensons, par exemple, les origines :

- mécaniques : mauvaise fabrication, vibrations de la machine, forces électromagnétiques déséquilibrées, forces centrifuges, fluctuations de la charge.
- électriques : dégradation d'isolement, décharges partielles, étincelles.
- thermiques : pertes dans le cuivre , manque de refroidissement général ou localisé.
- environnementales : humidité, poussière.....[Thorsen,95].

4. DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Défauts électriques

Défauts au niveau du stator

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. On peut citer à titre d'exemple, les défauts de type court circuits entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches [Ondel, 06].

Ce type de défaut peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. On peut citer aussi les courts circuits entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statorique.

Enfin dans [Ondel,06], l'auteur mentionne que l'amplitude de l'harmonique de rang 3 et de l'harmonique principal d'encoches rotoriques augmente significativement lors d'un court-circuit entre spires d'une phase statorique.

Les différents courts-circuits sont représentés dans la figure (II.6) ci-dessous :

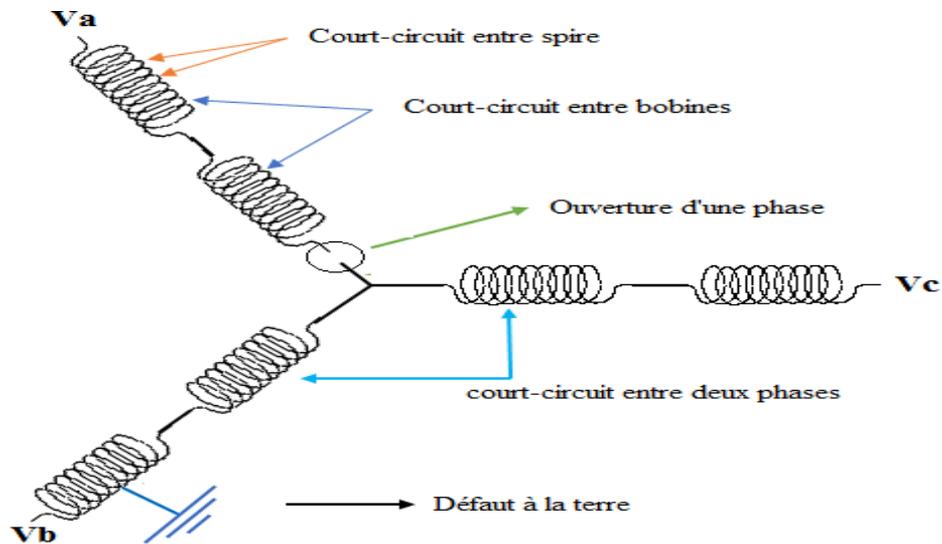


Figure II.6 Représentation des différents défauts statoriques possibles.

Défauts au niveau du rotor

La présence d'une barre rotorique cassée provoque une asymétrie rotorique qui a son tour produit des raies spectrales autour de la fréquence fondamentale f_s . Cette fréquence est donnée sous la forme :

$$f_{bc} = (1 \pm 2kg) f_s \quad (\text{II. 1})$$

Où

f_{bc} : fréquence de barre cassée.

f_s : fréquence d'alimentation statorique .

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

g : glissement.

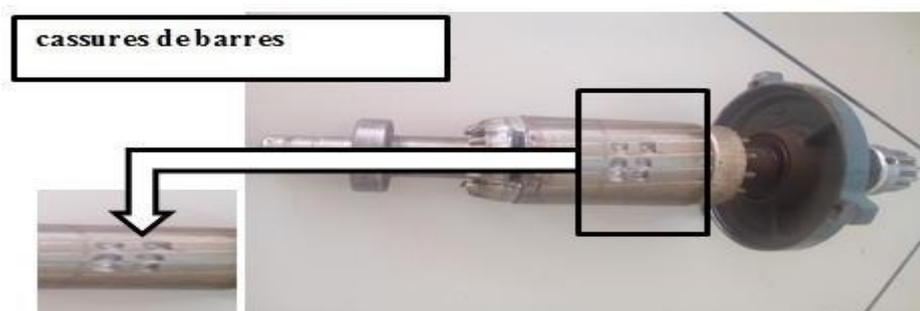


Figure II.7 Cassure de Barres.

La détection de ces défaillances est rendue difficile par le fait que lors de leurs apparitions, la machine continue de fonctionner. Ces défauts ont par ailleurs un effet cumulatif. Le courant que conduisait une barre cassée, par exemple, se répartit sur les barres adjacentes. 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 pour provoquer l'arrêt de la machine. Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor, ceci va générer des vibrations et l'apparition de défauts mécaniques [Boumegoura,01].



Figure II.8 Cassures de barres et de portions d'anneaux.

Défauts mécaniques

Défaut de roulements mécaniques

Le roulement à billes est un organe de base dans la machine asynchrone qui joue le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En plus, il représente l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a un meilleur rapport performance/prix [Chahmi,17] [Oumaamar,12].

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et une extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (figure II.9). En fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par des petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [Bousseksou,07] .

$$f_{roul} = |f_s \mp kf_v| \quad (II. 2)$$

Où

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

f_v : est la fréquence vibratoire du défaut de roulement.

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par le défaut et sont liées aux paramètres du roulement. Les fréquences vibratoires qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont :

a. Défaut au niveau d'une bille

$$f_{b= \frac{D_c}{D_b}} = f_r [1 - (\frac{D_b}{D_c} \cos(\beta))^2] \quad (II. 3)$$

b. Défaut sur la bague intérieure

$$f_{b= \frac{N_b}{2r}} = f_r [1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \beta] \quad (II. 4)$$

c. Défaut sur la bague extérieure

$$f_{b= \frac{N_b}{2r}} = f_r [1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta] \quad (II. 5)$$

Où

D_b : le diamètre d'une bille.

D_c : La distances entre les centres des billes diamétralement opposées.

N_b : le nombre de billes.

β : angle de contact des billes avec les bagues du roulement.

f_r : la fréquence de rotation du rotor.

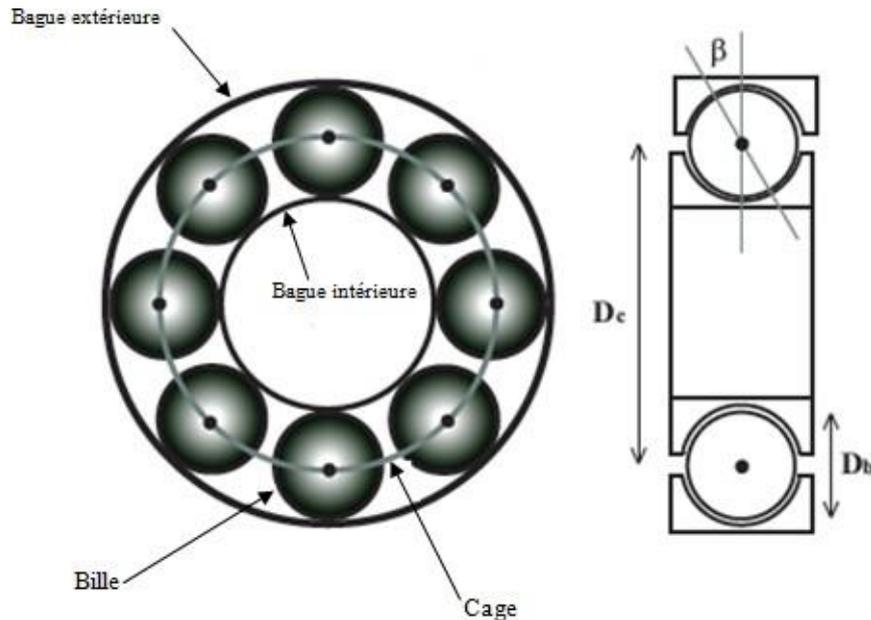


Figure II.9 Roulement à billes.

Défait de désalignement

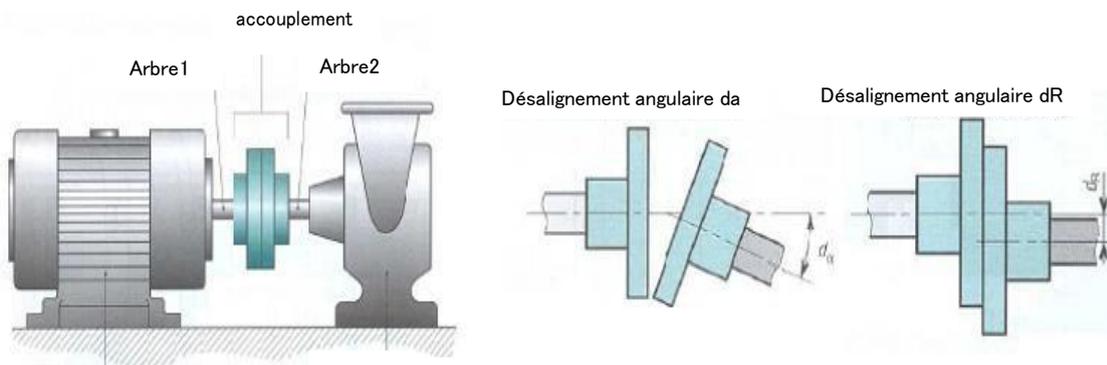
Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements, il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe. L'arbre moteur et l'arbre récepteur d'une machine ne sont pas parfaitement alignés. L'objectif du lignage de deux machines est de faire en sorte que les axes des deux lignes d'arbres soient parallèles et confondus. Deux types de défauts de lignage sont donc rencontrés :

a. Désalignement angulaire

il se produit quand l'axe de rotation de deux machines a un angle différent. Le désalignement angulaire se caractérise par une vibration axiale élevée.

b. Désalignement axial :

il se produit quand les axes de rotation des deux machines ont le même angle d'orientation. Mais ils sont séparés verticalement, chacun de l'autre. Le désalignement axial (parallèle) se caractérise par une vibration radiale élevée [Touafek,11].



Figur II.10 Défauts de désalignement.

Défauts d'excentricité

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

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

On distingue trois catégories d'excentricité figure (II.11) .

a. Excentricité statique

est généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle est localisée à la fréquence donnée par :

$$f_{\text{ex,s}} = f_s \left(1 \pm \frac{nN_r(1-g)}{p} \right) \quad (\text{II. 6})$$

b. Excentricité dynamique

se manifeste lorsque le centre de rotation du rotor est différent du centre géométrique du stator mais, de plus le centre de rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique ou statorique.

$$f_{\text{ex,d}} = f_s (1 \pm 2n(1 - g)) \quad (\text{II. 7})$$

c. Excentricité mixte

Elle représente la somme des deux cas statique et dynamique. [Hubert,02].

$$f_{ex,m} = f_s \left(1 \pm \frac{n(1-g)}{p} \right) \quad (II.8)$$

Où

p : nombre de paires de pôles.

Nr : nombre de barres rotoriques.

n = 1, 2, 3



Excentricité statique

Excentricité dynamique

Figure II.11 Défauts d'excentricité statique et dynamique.

5. METHODES DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS

Méthodes internes de diagnostic

Dans le cas des méthodes internes, la détection repose sur une connaissance à priori du système. Deux techniques principales sont à considérer pour ce type de diagnostic et sont présentées comme suit :

Technique des résidus

Les résidus sont des signaux générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller. Ce modèle est de manière générale, constitué d'un ensemble de relations de contraintes dynamiques liant deux types de variables : des variables inconnues (variables internes, perturbations, entrées inconnues,...) et des variables connues (consignes, variables mesurées). Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsqu'une défaillance survient [Bachir, 02].

Plusieurs techniques sont utilisées pour faire ressortir un résidu significatif de la présence de défauts. La difficulté majeure consiste à faire la liaison entre le résidu obtenu et un défaut particulier.

Estimation paramétrique

Cette technique de diagnostic utilise les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance et extrait par la suite les paramètres du système à partir des lois de connaissance pour détecter et localiser les défaillances. Le point essentiel dans l'efficacité de cette technique est le choix du modèle de connaissance. En effet, le type de défaut que l'on voudra détecter sera fonction du modèle utilisé [Bachir, 01], [Didier, 04].

Le modèle mathématique d'un système fait intervenir un ensemble de paramètres divers. Les techniques d'estimation paramétrique permettent, à partir d'un ensemble de mesures réalisées, de déterminer le vecteur de paramètres intervenant dans le modèle.

L'apparition d'un défaut au sein du système entraîne une modification de ses caractéristiques physiques d'où résulte une évolution significative des paramètres par rapport à leurs valeurs nominales. Autrement dit, tout écart notable des paramètres par rapport aux valeurs nominales est révélateur d'un défaut.

Toutefois, l'obtention d'un modèle mathématique assez fidèle au système réel est difficile en raison de la complexité des phénomènes physiques mis en jeu. Nous pouvons alors avoir recours aux méthodes de diagnostic externe.

Méthodes externes de diagnostic

Ces méthodes se fondent sur l'analyse des mesures que fournit le système à surveiller lors de son fonctionnement. Ces méthodes dites « sans modèles » se basent sur l'analyse des signaux d'acquisitions. Plusieurs signaux permettent le suivi de l'état du système et l'analyse de ces signatures permet de détecter le défaut.

Méthodes par traitement du signal

Les méthodes de traitement et d'analyse la plus répandue dans le domaine industriel est celle basée sur l'estimation de la densité spectrale de puissance (DSP) par périodogramme. Cependant, cette méthode présente plusieurs inconvénients qui sont dus essentiellement au problème de résolution fréquentielle [Aimer, 17].

Le principal défaut de l'analyse spectrale est qu'elle est très sensible à la qualité de la mesure, au niveau du bruit ainsi qu'à la fréquence d'échantillonnage et au nombre d'échantillons. A cet effet, un panorama de méthodes de traitement de signal sont proposées pour résoudre ces problèmes et ainsi obtenir une méthode efficace et fiable pour le diagnostic des défauts des machines électriques.

Méthodes par intelligence artificielle

Le terme « Intelligence Artificielle » comprend diverses techniques telles que les systèmes experts, les réseaux de neurones, la logique floue, ...etc. qui peuvent être utilisées de manière indépendante ou combinée pour améliorer leur efficacité. Ces méthodes sont intéressantes même si elles nécessitent une phase d'apprentissage initial qui est critique pour un fonctionnement optimal. La phase d'apprentissage nécessite un ensemble important d'exemples comme elle peut être trompeuse ou peut produire des résultats limités à un ensemble de systèmes [Trigeassou,11].

Une fois la phase d'apprentissage accomplie, ces techniques se montrent efficaces et simples, et elles peuvent être adoptées avec succès pour le diagnostic des défaillances des machines électriques.

Méthodes par reconnaissance des formes

Cette approche est basée sur l'utilisation de la reconnaissance des formes. Un vecteur de paramètres, appelé vecteur forme, est extrait de chacune des mesures effectuées sur la machine. Les règles de décisions utilisées permettent de classer les observations, décrites par le vecteur forme, par rapport aux différents modes de fonctionnement connus avec ou sans défaut [Casimir,03], [Ondel, 06].

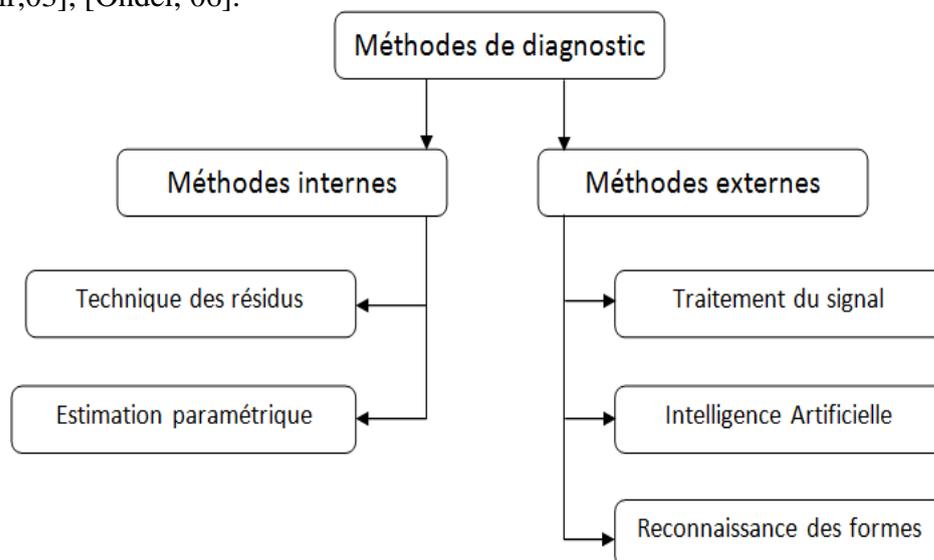


Figure II.12 Synthèse des méthodes de diagnostic.

6. SIGNATURES REPRESENTATIVES DES DEFAUTS

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur. Pour remédier au problème de détection des défauts, il existe une variété de techniques de diagnostic et de

détection des défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure (mesure de champ magnétique, mesure de bruit), d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut (courant statorique, tension, puissance, couple ou vitesse).

L'analyse des signaux est basée sur l'examen d'une grandeur de sortie du moteur asynchrone comme c'est le cas pour le courant statorique et parce que ce dernier est facilement accessible, et vu sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux [Didier,04] .

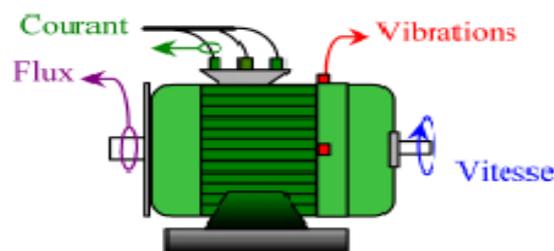


Figure II.13 Les points de mesures [Didier, 04].

7. TECHNIQUES DU TRAITEMENT DE SIGNAL

Le traitement du signal, l'analyse spectrale plus particulièrement, est utilisé depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines asynchrones [Abed, 02].

Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation de la machine. Les méthodes d'analyse spectrale sont principalement utilisées sur les machines directement alimentées par le réseau (harmoniques d'alimentation faibles) et fonctionnant en régime permanent (phénomènes périodiques) et en entraînant des charges dont les caractéristiques

spectrales sont connues. Avec le développement des applications à vitesse variable, l'analyse se complique car les phénomènes sont non stationnaires et les spectres sont beaucoup plus riches.

Analyse du signal du courant statorique

Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche et consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace).

Pour extraire les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut, généralement, on extrait l'amplitude ou les densités d'amplitude. Il existe toutefois d'autres possibilités qui consistent à déterminer les fonctions d'auto corrélation, les transformées de Fourier ou la densité spectrale [Noureddine,13].

Dans ce qui suit, on présente quelques méthodes utilisées dans le diagnostic des machines asynchrones à cage et appliquées sur le signal mesuré du courant statorique. Une synthèse de ces méthodes est présentée dans le tableau (II.1) Deux approches peuvent être adoptées, à savoir les techniques paramétriques et les techniques non paramétriques.

| | <i>Méthode d'analyse</i> | <i>Avantages</i> | <i>Inconvénients</i> |
|-----------------------------------|--|--|---|
| <i>Méthodes non paramétriques</i> | - Transformée de Fourier classique | Algorithme simple. Temps de calcul réduit. | - Résolution fréquentielle limitée. Inadaptée aux signaux non stationnaires. |
| | - Transformée de Fourier à court terme | Algorithme simple. Temps de calcul réduit. - Adaptée aux signaux non stationnaires. | - Résolution temps/fréquence limitée. - Fenêtre d'analyse de largeur fixe. |
| | - Distribution de Wigner-Ville | - Meilleure résolution temps/fréquence. - Adaptée aux signaux non stationnaires. - Fenêtre d'analyse de largeur variable. | - Temps de calcul prohibitif. - Interprétation difficile des spectres. - Problème des termes d'interférence. |
| | - Pseudo distribution de Wigner-Ville lissée | - Meilleure résolution temps-fréquence. - Élimination supplémentaire du bruit. - Élimination des termes d'interférences. | - Temps de calcul prohibitif. - Interprétation difficile des spectres. - Délocalisation des fréquences. |
| | - Transformée en ondelettes | - Fenêtre d'analyse à largeur variable. Meilleure résolution temps/fréquence. | - Temps de calcul prohibitif. - Interprétation difficile des résultats. |
| | <i>Méthodes paramétriques</i> | - Décomposition harmonique de Pisarenko | Algorithme simple. Temps de calcul réduit. |
| - Algorithme MUSIC | | - Estimation fréquentielle robuste au bruit. Fréquences mises en évidence efficacement. | - Temps de calcul important. Inadaptée aux signaux non stationnaires. |
| - Méthode ESPRIT | | - Estimation efficace des fréquences. Fréquences mises en évidence efficacement. | - Temps de calcul important. - Inadaptée aux signaux non stationnaires. |
| - Pseudo-spectre ST-MUSIC | | - Estimation fréquentielle robuste au bruit. Adaptée aux signaux non stationnaires. | - Temps de calcul important. - Interprétation difficile des pseudo-spectres. |

Méthodes non paramétriques

Transformée de Fourier classique

L'analyse d'un signal peut se faire par des méthodes fondées soit sur la représentation temporelle, $x(t)$, soit sur la représentation spectrale $X(f)$, qui est la transformée de Fourier (T.F) de $x(t)$. Le signal temporel donne une information sur la présence d'un signal, son énergie et son évolution temporelle. La T.F nous renseigne sur les fréquences présentes dans le signal et sur la répartition de l'énergie sur ces fréquences. Pour les signaux déterministes, les représentations couramment utilisées pour l'analyse des signaux sont l'énergie instantanées $|x(t)|^2$ et le spectre d'énergie $|X(f)|^2$. Pour les signaux aléatoires, les outils d'analyse sont fondés sur l'autocorrélation dans le domaine temporel et sur la densité spectrale (T.F de l'autocorrélation) dans le domaine fréquentiel [Benidir, 04].

Ces outils d'analyse sont valables dans le cas des signaux stationnaires, aussi bien déterministes qu'aléatoires. Cependant, leurs limitations sont immédiates quand on les applique aux signaux non stationnaires, i.e., aux signaux avec un spectre qui varie avec le temps. En particulier, ils ne donnent pas d'informations sur la manière dont la fréquence varie avec le temps [Aimer, 09].

- Algorithme de la Transformée de Fourier Rapide "TFR "

C'est une transformée basée sur un algorithme de calcul rapide de la T.F. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points N égal à une puissance de 2. Ceci permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la T.F, de [Didier, 04] :

$$\text{Gain} = \frac{N}{\log_2(N)} \quad (\text{II.9})$$

Cette transformée de Fourier Rapide est très utilisée lorsqu'il est indispensable d'obtenir une analyse fréquentielle en ligne dans certains processus à travers une fenêtre glissante d'observation [Henry, 99] [Didier, 04].

Transformée de Fourier à Court Terme

La localisation des signaux non-stationnaires dans le temps est généralement réalisée par la transformée de Gabor ou la transformée de Fourier à Court Terme (STFT en anglais pour Short Time Fourier Transform). Cette transformation nécessite la division du signal en court segments consécutifs et ensuite calcule la transformée de Fourier de chaque segment. L'idée est d'introduire le paramètre de fréquence locale de sorte que la transformée de Fourier locale s'applique sur le signal à travers une fenêtre sur laquelle le signal est environ stationnaire. Cette transformée représente les résultats en trois dimensions, la description du signal est effectuée dans le plan temps-fréquence composé de caractéristiques spectrales en fonction du temps [Yasici, 99], [Aimer, 09].

L'inconvénient principal de la STFT et sa résolution limitée. En effet, il est impossible d'avoir une localisation parfaite à la fois en temps et en fréquence. En d'autres termes, plus le support temporel de la fenêtre glissante est petit plus la résolution en fréquence est mauvaise et inversement [Flandrin,99].

Distribution de Wigner –Ville

Durant ces dernières années, l'avancement des méthodes statistiques de surveillance de signaux a fourni des outils efficaces pour traiter les signaux non-stationnaires. En particulier, les transformations temps-fréquence donnent un cadre mathématique optimal pour l'analyse des signaux non-stationnaires [Didier,04]. Par exemple, la transformation de Wigner-Ville (WVD en anglais pour Wigner-Ville Distribution) permet d'obtenir une représentation temps-fréquence permettant d'effectuer une représentation en trois dimensions du signal analysé. Cette transformation est une fonction réelle qui définit une distribution d'énergie dans le plan temps fréquence.

Ensuite, une analyse statistique du spectre fréquentiel est effectuée pour distinguer les conditions de défaut par rapport aux conditions de fonctionnement normales du moteur. Puisque chaque moteur a une géométrie distincte, une approche particulière est alors utilisée. Dans cette approche, l'algorithme est programmé pour identifier le fonctionnement normal du moteur avant la détection réelle du défaut.

Le temps de calcul d'une telle représentation peut être excessif et l'interprétation de l'image résultante est souvent difficile, ce qui rend la détection de défaut complexe. En plus, le spectre temps-fréquence issu de la WVD contient des termes d'interférences autour des fréquences du signal dus au bruit contenu dans le signal. Une autre variante de la WVD connue sous le nom de pseudo distribution de Wigner-Ville lissée (SPWVD pour Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution) est employée dans l'analyse des signaux pour éliminer les termes d'interférences. La SPWVD permet d'avoir une meilleure résolution et une élimination supplémentaire du bruit, mais introduit une délocalisation des fréquences, paramètre essentiel dans le diagnostic de défauts [Burnett,96] [Yasici,99].

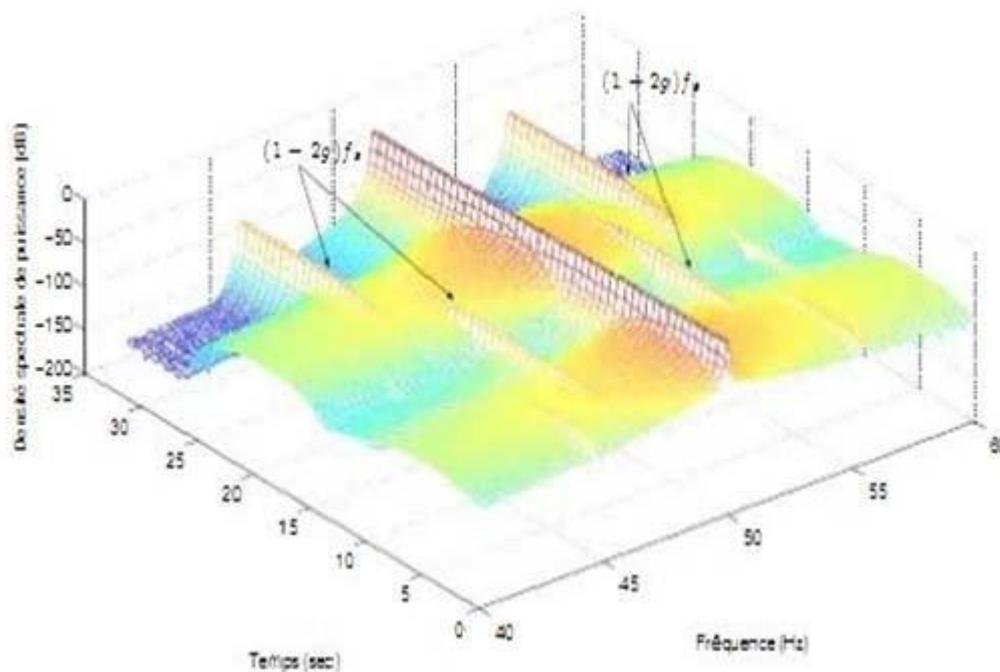


Figure II.14 Représentation temps-fréquence du courant statorique lors d'une variation du couple de charge (Cas d'une barre cassée).

Transformée en Ondelettes

En 1982, Morlet ouvre la voie conduisant à l'utilisation grandissante de la transformation en ondelettes. Ce mode d'analyse encore appelé analyse temps-échelle, est utilisé pour détecter des phénomènes qui se déroulent sur des échelles de fréquences différentes rencontrées dans un signal. L'idée fondamentale est de décomposer le signal à l'aide de fonctions analysantes particulières construites à partir d'une ondelette mère oscillante et à moyenne Nulle [Didier, 04]. À partir de l'ondelette mère, il est possible de créer des ondelettes analysantes centrées autour d'une valeur et à échelle variable limitée.

Une technique de fenêtrage avec une région de taille variable est utilisée pour améliorer l'analyse du signal, ce dernier pouvant être par exemple le courant statorique du moteur asynchrone. L'analyse par ondelettes permet l'utilisation d'intervalles de temps longs, pour avoir une information basse fréquence la plus précise possible, et d'intervalles de temps plus courts, pour avoir une information riche en hautes fréquences. La capacité d'exécuter l'analyse locale est un des dispositifs les plus intéressants de la transformation en ondelettes. L'utilisation des ondelettes, pour la surveillance des défauts et le diagnostic des moteurs asynchrones, est un avantage car cette technique permet d'améliorer l'analyse du courant statorique pendant les phases transitoires.

Les ondelettes peuvent être utilisées pour une analyse localisée dans le domaine temps- fréquence ou temps-échelle. Malheureusement, ce type d'analyse donne une représentation temps-échelle sous forme d'une image souvent difficile à interpréter. En plus, le temps de calcul de ce type d'analyse est généralement excessif [Benbouzid,99].

Méthodes paramétriques

Dans la famille des méthodes paramétriques, on se donne souvent un modèle pour le signal ou pour son spectre et on applique une méthode d'analyse spectrale appropriée. Les modèles les plus fréquents sont linéaires. Le signal à étudier s'interprète alors comme la sortie d'un filtre linéaire qui est soit un filtre autorégressif (AR), soit un filtre à moyenne mobile (MA) soit une combinaison des ces deux derniers (ARMA) [Benidir,04].

Il existe plusieurs méthodes spectrales utilisées, qualifiées de méthodes à haute résolution, basées sur l'estimation de fréquence d'un signal donnant ainsi une représentation du signal en pseudo-spectre. L'estimation de la fréquence est le processus d'estimation des composantes complexes de fréquence d'un signal en présence de bruit. Les méthodes les plus communes consistent à identifier le sous-espace de bruit afin d'extraire ces composantes. Les méthodes les plus utilisées dans l'estimation de la fréquence en se basant sur la théorie des sous-espaces sont présentées comme suit :

Décomposition Harmonique de PISARENKO

La décomposition harmonique de Pisarenko (PHD en anglais pour Pisarenko Harmonic Decomposition) est considérée comme la première méthode d'estimation de fréquence et a été proposée par V.F. Pisarenko en 1973 sur la base de la décomposition propre de la matrice de corrélation et de sa séparation en sous-espaces de signal et de bruit [Hayes,96], [Manolakis,05]. Cette méthode utilise un vecteur propre associé à la plus petite valeur propre pour estimer les fréquences des exponentielles complexes.

La méthode de Pisarenko se caractérise par une matrice de corrélation de rang égal à N_h+1 (N_h étant le nombre des exponentiels complexes). Bien que cette méthode est peu utile en raison de sa sensibilité au bruit, elle est d'un grand intérêt théorique, car elle a été la première méthode fondée sur le principe des sous-espaces du signal et du bruit, et elle a contribué au développement de nombreuses méthodes comme MUSIC et ESPRIT.

Algorithme MUSIC

En 1979, une amélioration de la décomposition harmonique de Pisarenko connue sous le nom d'algorithme MUSIC (MUltiple Signal Classification) ou méthode de classification multiple du signal a été présentée par R.O. Schmidt. À l'instar de la méthode de Pisarenko, l'algorithme Music est une technique d'estimation de la fréquence où la matrice de corrélation se divise en composants du signal et du bruit en utilisant les vecteurs propres [Boudinar,07].

Toutefois, plutôt que de limiter le rang de la matrice de corrélation à N_h+1 (cas de Pisarenko), la méthode MUSIC propose un rang strictement supérieur à N_h+1 pour la matrice de corrélation. Par conséquent, la dimension du sous-espace du bruit devient plus grande que 1. Cette nouvelle dimension offre une estimation de fréquence meilleure et robuste par rapport à la méthode de Pisarenko [Schmidt, 86].

Algorithme ESPRIT

L'algorithme ESPRIT (Estimation of Signal Paramétrés via Rotational Invariance Techniques) est une technique d'estimation de la fréquence construite sur les mêmes principes que les autres méthodes. Cette méthode a été proposée en 1985 par R. Roy et A. Paulraj. L'algorithme ESPRIT diffère des autres méthodes, basées sur la notion des sous-espaces, par le fait que le sous-espace du signal est estimé à partir de la matrice de données plutôt qu'à partir de la matrice de corrélation [Manolakis, 05]. L'idée clé de l'algorithme ESPRIT se trouve dans la propriété de rotation entre les sous-espaces décalés qui est appelée à produire l'estimation de la fréquence.

Dans le cas d'un signal en temps discret, cette propriété se fonde sur des observations du signal sur deux intervalles identiques échelonnés dans le temps. Cette condition se pose naturellement pour les signaux à temps discret.

Méthode ST-MUSIC

Dans la méthode du pseudo-spectre ST-MUSIC (Short-Time Multiple Signal Classification), le signal est fenêtré ou décomposé en sections en utilisant le principe de la STFT. On calcule, par la suite, le pseudo-spectre de chaque section du signal en se basant sur l'algorithme MUSIC [Cupertino,04]. De cette manière, la capacité de l'algorithme MUSIC à mettre en évidence les principales composantes de fréquence d'un signal, à réduire l'influence du bruit et d'en extraire l'information sera utilisée efficacement avec des signaux non-stationnaires.

CONCLUSION

Les machines asynchrones triphasées peuvent présenter des défaillances qui induisent, pour la plupart d'entre elles, un arrêt intempestif de la machine asynchrone. C'est pour pallier ce problème que le diagnostic de défaut a pris une importance de plus en plus grandissante dans les milieux industriels.

Dans ce chapitre, nous avons abordé les défauts de la machine asynchrone suivis par les différentes signatures représentatives de défauts ainsi que les méthodes de diagnostic employées, en mettant l'accent sur les techniques basées sur le traitement du signal et plus particulièrement la Transformée de Fourier (objet de notre travail).

Dans cette optique, le prochain chapitre sera dédié à l'étude de l'analyse spectrale basée sur la Transformée de Fourier, et à présenter les différents résultats de simulation du courant statorique en présence de défaut de barre rotorique.

Chapitre 3

ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE

INTRODUCTION

Le traitement du signal, l'analyse spectrale plus particulièrement, est utilisé depuis de nombreuses années dans la détection et la localisation des défaillances des machines asynchrones. Ce type de défaillances se prête bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences liées à la vitesse de rotation de la machine.

La densité spectrale de puissance ou DSP par Périodogramme du courant statoriques, constitue l'outil le plus utilisé actuellement par les chercheurs et les industriels. Ceci est justifié par la simplicité et le coût réduit des capteurs de courant et par le contenu harmonique riche en informations. Cependant, cette technique possède plusieurs inconvénients qui sont dus au problème de résolution fréquentielle. En effet, le calcul de la Transformée de Fourier introduit un effet de lissage et un effet de bord. Ces effets se traduisent par l'apparition de lobes secondaires dans le spectre du courant statorique réduisant ainsi la finesse d'analyse. Pour bien analyser un signal, on a intérêt à avoir un lobe principal aussi étroit que possible et des lobes secondaires d'amplitudes aussi faibles que possible, chose impossible à obtenir simultanément.

À cause de ce problème de résolution, la DSP trouve des difficultés dans la détection des défauts naissants (amplitudes très faibles) ou dans le cas d'un faible glissement (harmonique trop proche du fondamental). Dans cette optique, le présent chapitre met l'accent sur les critères de choix de la fenêtre de pondération et les répercussions de ce choix sur la détection et la localisation des défauts de barres du moteur asynchrone.

1. ANALYSE SPECTRALE DU COURANT STATORIQUE

Passage des Séries de Fourier à la Transformée de Fourier

En 1822, alors qu'il cherchait à résoudre l'équation de la chaleur, Joseph Fourier définit les séries désormais dites de Fourier. L'idée de base est que tout signal périodique peut être représenté comme une somme de fonctions sinusoïdales déphasées entre elles : la transformée de Fourier est l'expression analytique de ce principe. La transformée de Fourier prend ses racines dans la formulation des séries de Fourier, qui expriment le fait que tout signal périodique peut se décomposer comme une somme de sinusoïdes. Par exemple, pour un signal $x_T(t)$ de période T (et de fréquence f_0) [Navarro,07].

$$X_T(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{j(2\pi f(t+\varphi_n))} \quad (\text{III. 1})$$

Où

$$j^2 = -1$$

En faisant tendre T vers l'infini ($f_0 = \frac{1}{T}$) le signal tend vers un signal non-périodique et $x(t)$ s'écrit :

$$x_t = \int_{-\infty}^{\infty} A(f) e^{j(2\pi(t+\varphi(f)))} df \quad (\text{III. 2})$$

Si

$$TF(f) = A(f) e^{j\varphi(f)} \quad (\text{III. 3})$$

alors :

$$x_t(t) = \int_{-\infty}^{\infty} TF(f) e^{j2\pi ft} df$$

L'inversion de cette formule conduit à l'expression de la transformée de Fourier (T.F) :

$$TF_x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x_t e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{III. 4})$$

La transformée de Fourier est une représentation complexe qui possède un module :

$$TF_x(t) = \sqrt{\text{Im}(TF_x(f))^2 + \text{Re}(TF_x(f))^2} \quad (\text{III. 5})$$

Et une phase :

$$\varphi_{TF}(f) = \text{Atan} \left(\frac{\text{Im}(TF_x(f))}{\text{Re}(TF_x(f))} \right) \quad (\text{III. 6})$$

Passage de la transformée de Fourier à la transformée de Fourier discrète

Le passage de l'analyse de Fourier des signaux continus à l'aide de la transformation de Fourier (T.F) au calcul numérique du contenu spectral d'un signal grâce à la transformation de Fourier discrète (TFD) exige la prise en considération des étapes suivantes :

Échantillonnage

L'échantillonnage est une opération qui permet de transformer un signal analogique continu en signal numérique discret. Cette opération est réalisée en gardant une valeur en mémoire à une fréquence régulière appelée fréquence d'échantillonnage F_e [Navarro,07].

$$F_e = \frac{1}{T_e} \quad (\text{III.7})$$

L'échantillonnage est réalisé en deux étapes :

- la première étape consiste à filtrer le signal de manière analogique avec un filtre anti-repliement.
- la deuxième consiste à convertir le signal avec un convertisseur analogique/numérique.

Phénomène de repliement ou aliasing

La précision d'un signal analogique peut être considérée comme infinie. L'échantillonnage va avoir pour effet de réduire, ou de contraindre, cette précision à la fréquence d'échantillonnage. Le repliement de spectre est lié à la transformée de Fourier et au théorème de Nyquist-Shannon, il se traduit par une contamination des fréquences positives par les fréquences négatives [Navarro,07].

Le théorème de Nyquist-Shannon énonce que la fréquence d'échantillonnage d'un signal doit être égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans ce signal, afin de convertir ce signal d'une forme analogique à une forme numérique [Navarro,07]. Lors de la conversion analogique/numérique, il devient évident qu'une perte d'information se produit si le pas d'échantillonnage est trop grand en comparaison avec les périodes en présence dans le signal: la fréquence d'échantillonnage étant trop faible par rapport aux fréquences considérées.

Troncature du signal

Dans la pratique, un signal discret provient souvent de l'échantillonnage d'un signal continu. Le problème est que la période d'échantillonnage T_e est finie et l'information contenue dans cette observation ne permet pas de calculer la T.F du signal à moins que ce dernier soit périodique et que T soit un multiple de sa période [Benidir,04].

Pour palier ce problème, associons au signal $x(t)$, observé sur une durée finie T , le signal tronqué $x_T(t)$ défini par :

$$x_T(t) = x(t)\Pi_T(t) \quad (\text{III.8})$$

Où

Π_T est la fonction rectangle de support $[0,T]$.

Dans ce cas, le calcul de la TFD introduit un effet de lissage et un effet de bord. Ces effets se traduisent par l'apparition de lobes secondaires qui ne devraient pas exister [Benidir,04]. Ces lobes secondaires proviennent de l'effet brutal de troncature du signal qui revient à remplacer ce dernier par zéro en dehors du support de la fenêtre d'observation rectangulaire Π_T . Ces effets réduisent la

finesse d'analyse. En particulier si l'on a deux raies spectrales distantes de moins de $1/T$, elles seront pratiquement indiscernables.

Pour atténuer les effets de troncature, on introduit des fenêtres de pondération $\omega_T(t)$. Cela signifie qu'au lieu de traiter le signal tronqué $x_T(t)$, on traite le signal pondéré :

$$X_P(t) = \omega_T(t)x_T(t) \quad (\text{III.9})$$

Fenêtres de pondération

On peut séparer deux fréquences f_1 et f_2 si elles vérifient $f_1 - f_2 \geq 1/T$ où T est la durée d'observation du signal. Pour bien séparer les signaux, on a intérêt à avoir un lobe principal aussi étroit que possible et des lobes secondaires d'amplitudes très faibles. Malheureusement, il n'est pas possible d'avoir simultanément ces deux propriétés. Il est cependant possible de diminuer les amplitudes des lobes secondaires en remplaçant la fenêtre rectangulaire par une fenêtre plus douce et sans discontinuités.

La définition d'une fonction utilisable en tant que fenêtre de pondération répond à la recherche du compromis suivant [Benidir,04]:

- Elle doit suffisamment déformer le signal temporel pour le rendre périodique.
- Elle doit respecter suffisamment le signal pour que les résultats trouvés restent réalistes.

De nombreux « mathématiciens » se sont penchés sur le problème et ont défini un certain nombre de fenêtres temporelles répondant à ce compromis en optimisant l'erreur maximale commise sur le niveau mesuré et la résolution fréquentielle. Les fenêtres seront donc à choisir en fonction du type de signal analysé et du compromis désiré.

a/ Fenêtre rectangulaire

C'est la plus simple, elle correspond, en fait, à aucune pondération. Elle est exprimée par :

$$h(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

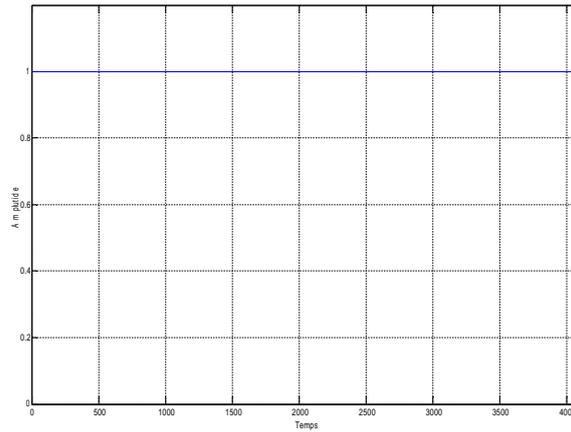


Figure III.1 Représentation de la fenêtre rectangulaire.

c/ Fenêtre Gaussienne

La fenêtre de Gauss est exprimée par :

$$h(t) = \begin{cases} e^{-\frac{t^2}{T^2}} & \text{pour } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

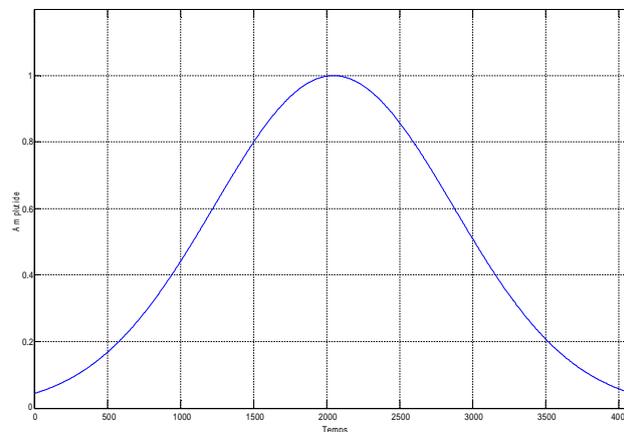


Figure III.2 Représentation de la fenêtre gaussienne.

d/ Fenêtre de Hanning

La fenêtre de Hanning est exprimée par :

$$h(t) = \begin{cases} 0.5 \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{t}{T} \right) \right) & \text{Pour } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

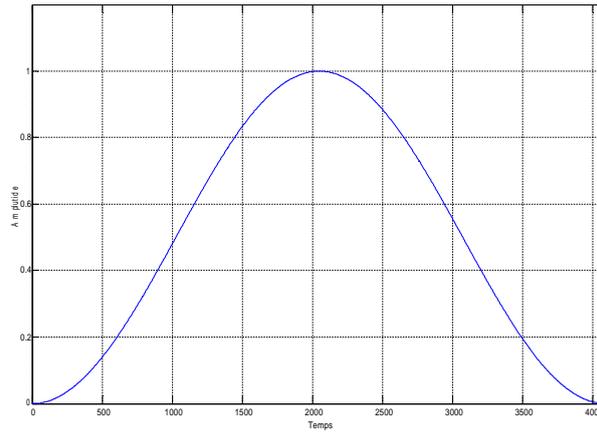


Figure III.3 Représentation de la fenêtre de Hanning.

e/ Fenêtre de Hamming

La fenêtre de Hamming est exprimée par :

$$h(t) = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) & \text{pour } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III .13})$$

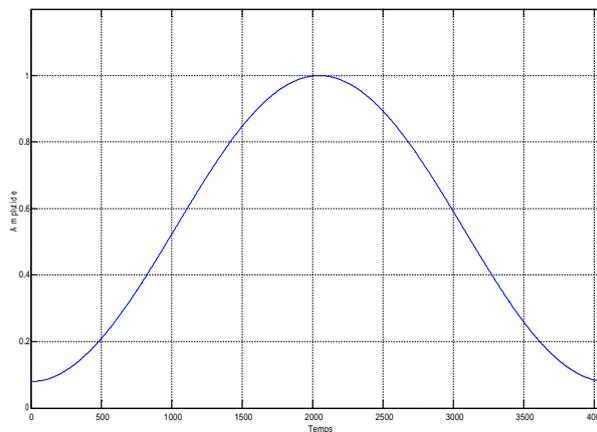


Figure III.4 Représentation de la fenêtre de Hamming.

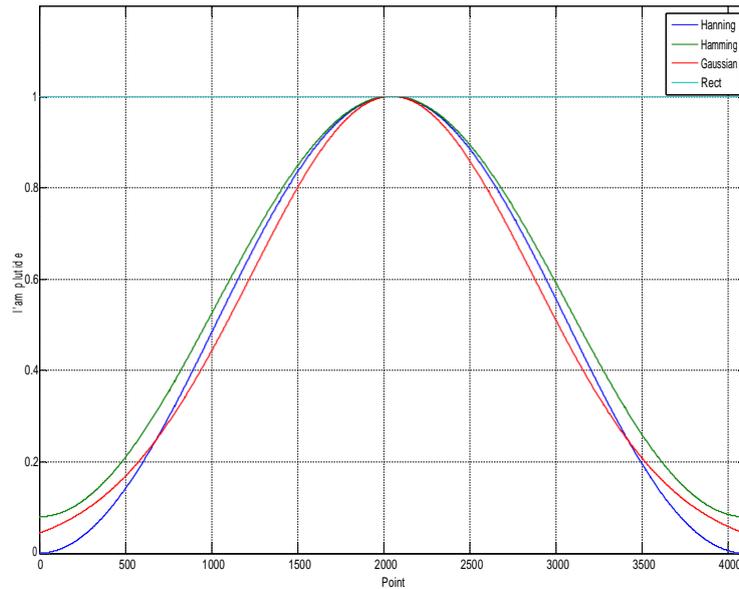


Figure III.5 Représentation des différentes fenêtres de pondération.

La figure (III.5) présente les différentes fenêtres de pondération sur le même tracé spectral par rapport à la fenêtre rectangulaire. Cette représentation permet de voir la différence entre les fenêtres de pondération.

Discrétisation de la fréquence

Afin de pouvoir calculer numériquement un spectre, il est évidemment nécessaire de discrétiser la fréquence qui consiste à remplacer la fréquence f par $k\Delta f$ où k est un entier relatif. Les fréquences $f_n = k \cdot \Delta f$ sont alors appelées fréquences harmoniques de la TFD. Comme la T.F d'un signal numérique est périodique de période F_e , il suffit de se borner à une seule période et de diviser celle-ci par le N échantillons. On a alors :

$$\Delta f = \frac{F_e}{N} \quad (\text{III.14})$$

N : étant le nombre d'échantillons (sur lequel est calculée la TFD).

Cette discrétisation de la fréquence n'est rien d'autre qu'un échantillonnage dans le domaine spectral. Le recours à un calculateur numérique pour déterminer la T.F d'un signal permet seulement d'obtenir un nombre limité de valeurs de la fréquence f et ceci en raison de la limitation de sa puissance de calcul. Il est donc nécessaire de remplacer la variable continue f par une variable discrète.

On définit ainsi la Transformé de Fourier Discrète (TFD) [Benidir,04].

$$\text{TFD}_x(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x_p(nT) e^{-j2\pi f n T} \quad (\text{III .15})$$

Après la discrétisation fréquentielle : $f = k\Delta f$, on obtient :

$$\text{TFD}_x(k\Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} x_p(nT) e^{-j2\pi n k T \Delta f} \quad (\text{III .16})$$

Calcul de la transformée de Fourier rapide

Dans le cas où le nombre de points d'acquisition N est une puissance de deux ($N=2^n$), on dispose d'algorithmes de calcul très rapide. Ces algorithmes portent le nom de FFT (Fast Fourier Transform) et l'algorithme le plus connu est celui de Cooley-Tuckey. Le nombre de multiplications est donc divisé par $2N/n$ (exemple : si $N = 1024 \Rightarrow 2^{10}$, le nombre de multiplications est divisé grosso modo par 200 ramenant le temps de calcul à quelques microsecondes). Sans l'introduction d'algorithmes de calcul rapide, la transformée de Fourier discrète TFD serait probablement restée un objet mathématique sans grand intérêt [Benidir,04] .

Addition des zéros

Si le nombre de points d'acquisition n'est pas une puissance de deux, on a intérêt à compléter la longueur de l'enregistrement par des zéros afin de pouvoir utiliser un algorithme de FFT, cette technique porte le nom de technique de remplissage par zéros ou prolongement (zero-padding en anglais), (exemple : $N = 1000$, on prend $\text{TFD} = 0$ pour $k = 1000, 1001, 1002, \dots, 1023$). Le remplissage par des zéros ne modifie pas la TFD, par contre le pas de calcul dans l'espace des fréquences devient $F_e/1024$ et non plus $F_e/1000$.

2. DENSITE SPECTRALE DE PUISSANCE PAR PERIODOGRAMME

On définit la densité spectrale de puissance (DSP en abrégé, Power Spectral Density ou PSD en anglais) comme étant le carré du module de la transformée de Fourier.

La densité spectrale de puissance est indépendante de la phase du signal. De plus elle est toujours réelle et positive, elle exprimée par :

$$\text{DSP}(f) = \frac{|\text{TFD}(f)|^2}{N} \quad (\text{III .17})$$

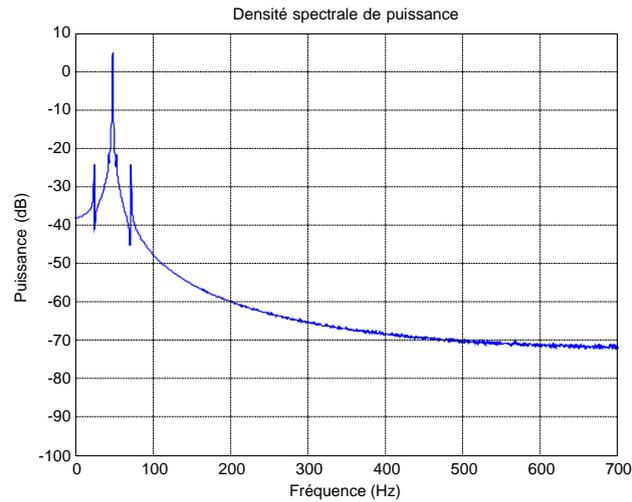


Figure III.6 Représentation de la densité spectrale de puissance .

3. SIMULATION NUMERIQUE

Pour simuler la présence d'un défaut rotorique dans une machine asynchrone à cage présentant un glissement $g=4.06\%$, on construit le signal à analyser comme suit :

$$x(t) = A_1 \sin(2\pi f_s t) + A_2 \sin(2\pi f_b t) + A_3 \sin(2\pi f_{exc} t) + b(t) \quad (\text{III .18})$$

Avec : $b(t)$ un signal qui représente le bruit blanc introduit en utilisant la notion du RSB.

Ce dernier étant le rapport de signal sur bruit donné par la relation suivante :

$$\text{RSB} = 10 \log_{10} \frac{p_s}{p_b} \quad (\text{III .19})$$

La fréquence d'alimentation utilisée est égale à $f_s=50\text{Hz}$. Les fréquences caractéristiques du défaut sont calculées à partir de :

$$f_b = (1 \pm 2gk)f_s \quad (\text{III .20})$$

$$f_{exc} = f_s * \left(1 \pm \frac{n(1-g)}{p}\right) \quad (\text{III .21})$$

Avec

f_s , f_b , f_{exc} sont respectivement les fréquences du fondamental, du défaut de barres et du défaut d'excentricité, g : le glissement et $k = 1, 2, 3, \dots$

4. INTERPRETATION DES RESULTATS DE SIMULATION

Test d'un moteur sain

Dans le premier test, nous simulons le cas d'un moteur asynchrone sans défaut de barres. Toutefois, le signal simulé du courant statorique comporte la fréquence du fondamental ainsi que les fréquences du défaut d'excentricité. Ce défaut est introduit dans le signal du courant statorique dans la mesure où tout moteur, même neuf, possède une certaine excentricité qui se manifeste de part et d'autre du fondamental aux fréquences théoriques calculées par l'équation (III.21). Nous introduisons également le bruit par le biais du rapport signal sur bruit (RSB). Cette notion du RSB permet d'injecter du bruit dans le signal pour pouvoir simuler un signal bruité synonyme d'une alimentation polluée (cas d'un onduleur de tension par exemple).

Aussi, la simulation est réalisée pour la valeur de glissement $g=4,06\%$ correspondante à un fonctionnement à charge nominale. Cette valeur est choisie à partir de tests expérimentaux réalisés et présentés par la suite.

Enfin, la valeur du RSB utilisée est égale à 75 dB. Cette valeur correspond à un signal faiblement bruité .

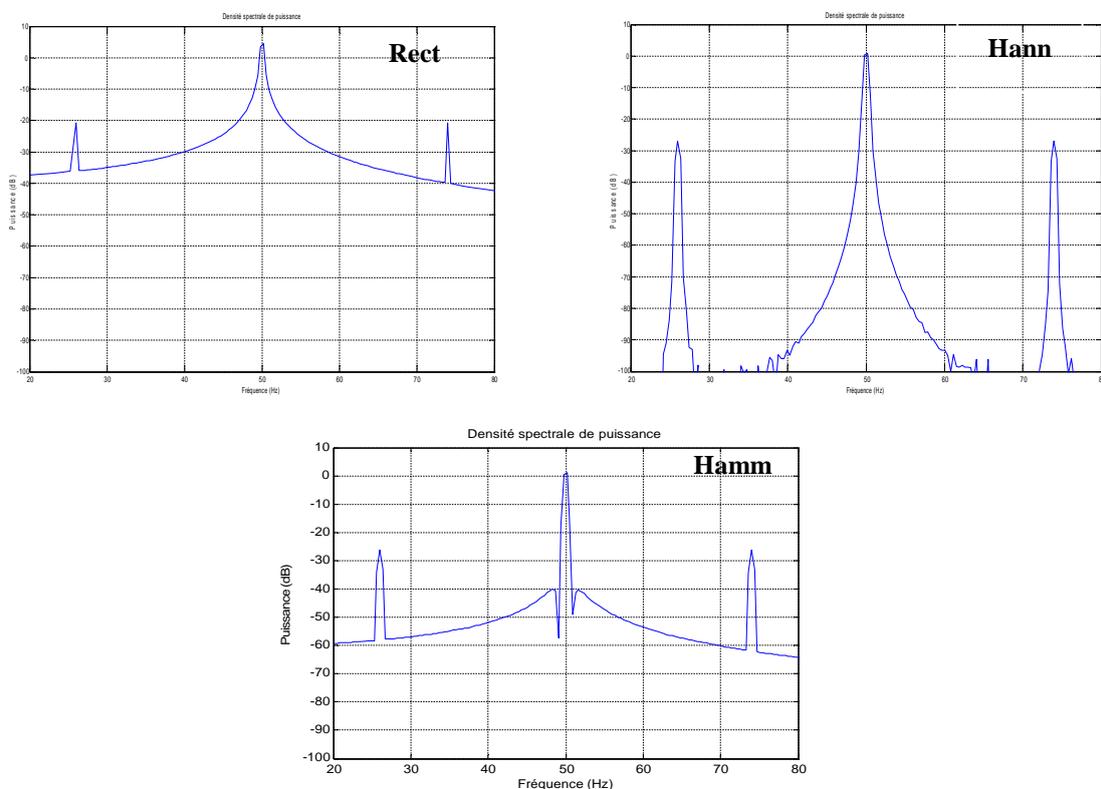


Figure III.7 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur sain avec un glissement égal à 4,06 % et RSB=75dB.

A travers la figure (III.7), nous pouvons lire la fréquence du fondamental ainsi que la fréquence de l'excentricité de part et d'autre du fondamental aux fréquences théoriques de 26,015Hz et 73,985Hz (obtenues à partir de l'équation III.21).

Nous remarquons aussi la différence du niveau spectral qui est élevé pour la fenêtre rectangulaire, moins élevé pour Hamming et plus bas pour Hanning. Ceci est dû à la hauteur des lobes secondaires variant d'une fenêtre à l'autre. Enfin, nous pouvons voir sur ce test la différence entre les fenêtres de pondération en terme de largeur du lobe principal et hauteur des lobes secondaires.

Test de robustesse vis-à-vis du bruit

Dans ce test, la valeur du RSB est égale à 15 dB correspondant à un signal fortement bruité. En effet, dans ce test le bruit est augmenté dans le signal pour vérifier la robustesse des fenêtres de pondération en cas de signal fortement bruité.

Ce test est très important dans la mesure où les signaux deviennent fortement bruités dans le cas d'une machine asynchrone alimentée par onduleur (cas d'une variation de charge).

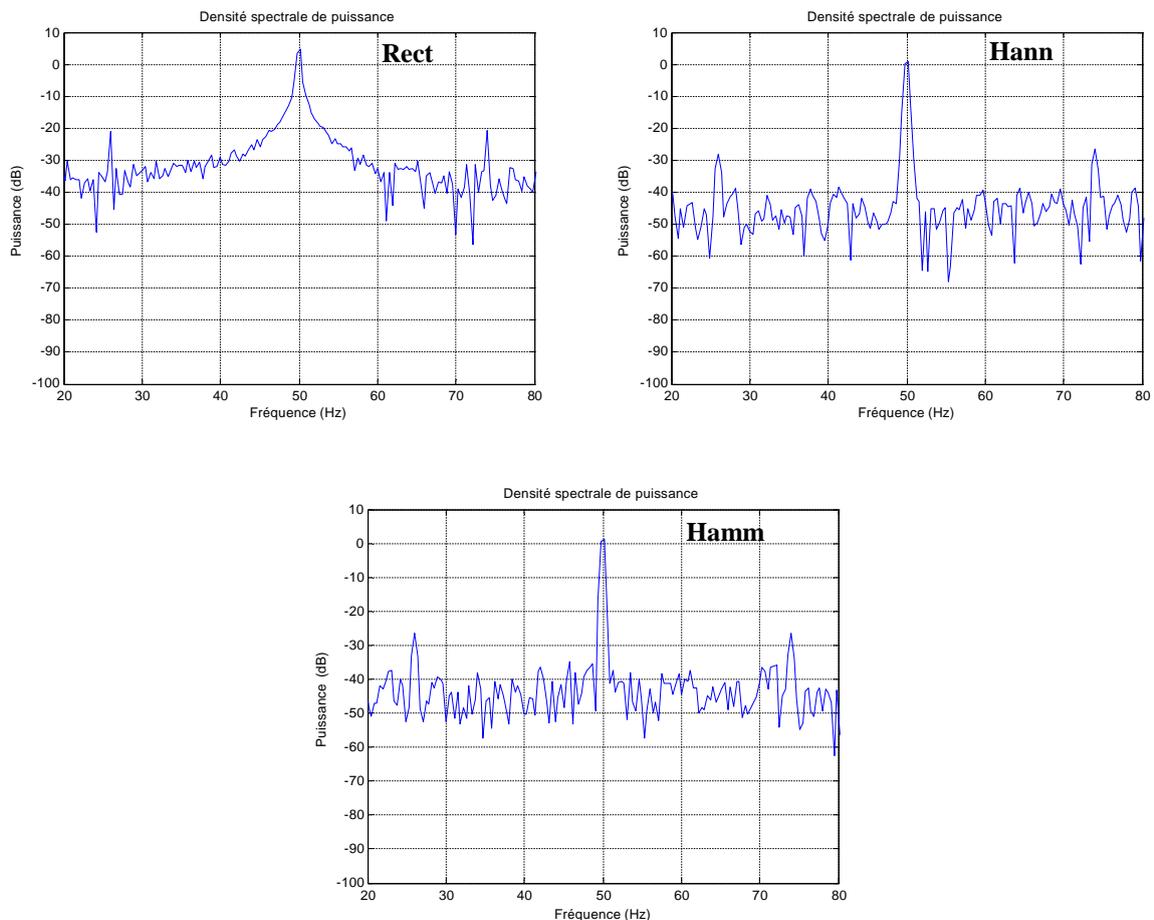


Figure III.8 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur sain avec un glissement de 4,06 % et RSB=15dB.

D'après la figure (III.8), nous pouvons observer une augmentation des harmoniques sur le spectre de la DSP du courant statorique pour l'ensemble des fenêtres ainsi qu'une élévation du niveau spectral suite à l'augmentation du bruit dans le signal. Nous pouvons voir le degrés de sensibilité de la DSP par rapport au bruit.

Enfin, les mêmes constatations sont observées pour les fréquences contenues dans le signal par rapport au test avec $RSB=75dB$.

Test d'un moteur avec défaut d'une barre cassée

Dans ce test, le défaut d'une barre cassée est introduit par l'intermédiaire de sa fréquence caractéristique. En effet, le signal du courant statorique est constitué d'une somme de fonctions sinusoïdales et chaque évènement est caractérisé par une nouvelle fonction sinusoïdale à la fréquence caractéristique de cet évènement.

Ce test est réalisé pour un glissement de 4,06% (fonctionnement à charge nominale) et un RSB de 75 dB (signal faiblement bruité).

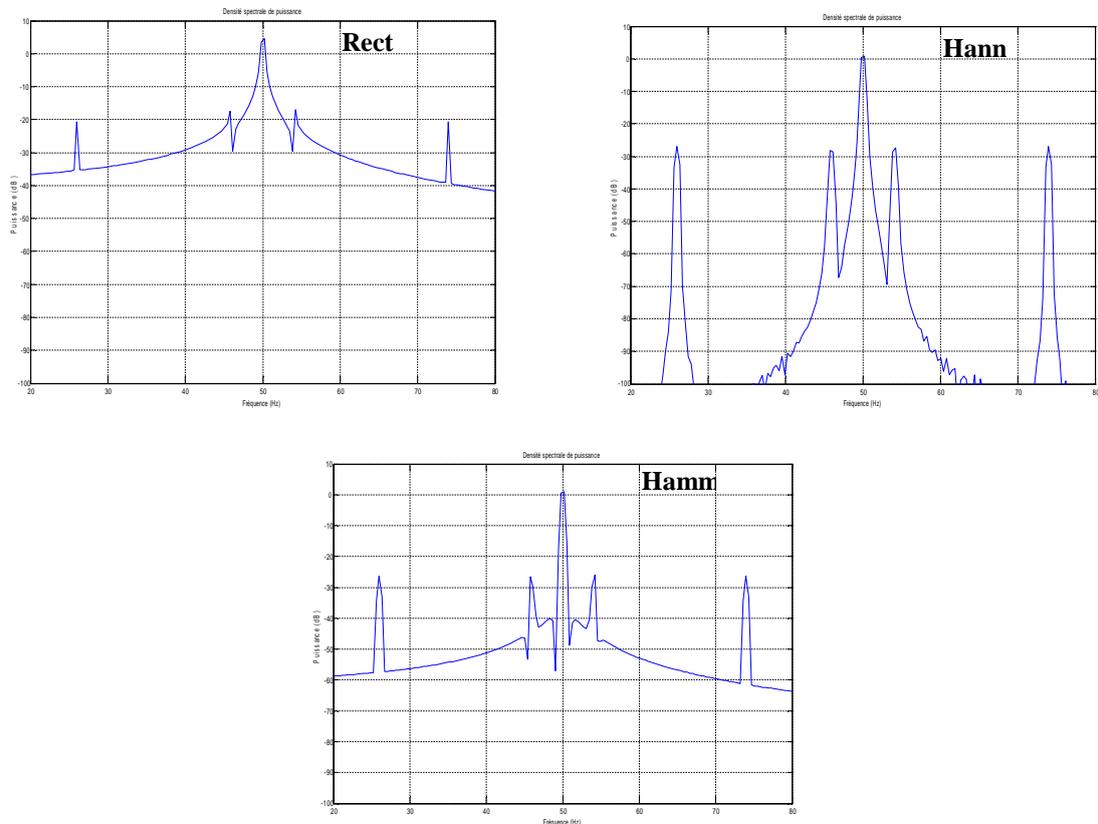


Figure III.9 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur avec défaut d'une barre cassée pour un glissement de 4,06 % et $RSB=75dB$.

Suite à l'introduction du défaut d'une barre cassée, nous remarquons sur la figure (III.9), en plus des fréquences d'excentricité, l'apparition de deux harmoniques aux fréquences 54,06Hz et 45,94Hz de part et d'autre du fondamental correspondant aux fréquences théoriques calculées par l'équation (III.20).

Enfin, nous pouvons dire que les fréquences caractéristiques de défaut d'une barre cassée sont considérées comme fréquences principales de défaut (pour $k = 1$ dans l'équation III.20). En effet, ce paramètre k représente la répétition de la fréquence du défaut de barres sur le spectre.

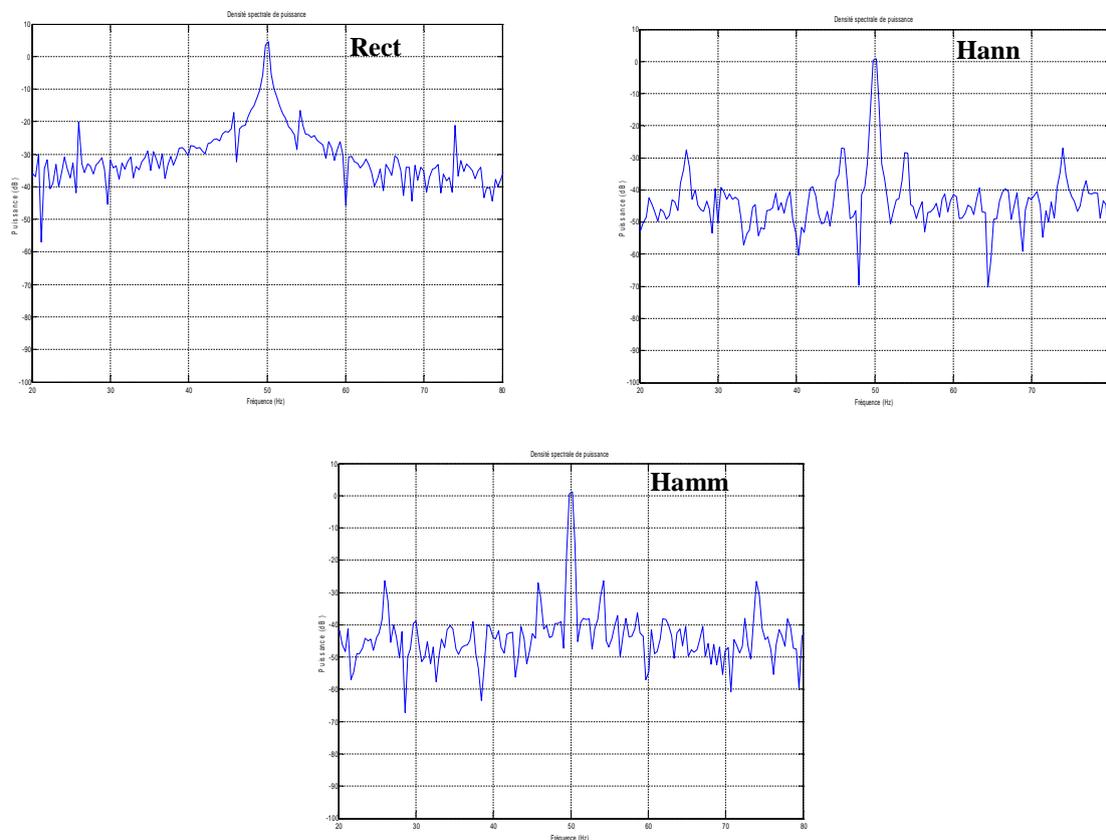


Figure III.10 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur avec une barre cassée pour un glissement de 4,06 % et RSB=15dB.

La figure (III.10) représente la densité spectrale de puissance du courant statorique simulé avec les fenêtres de pondération étudiées. Dans ce test, le signal du courant statorique comporte les défauts d'excentricité et le défaut d'une barre cassée mais avec l'augmentation du bruit. Dans ce test, nous remarquons également l'augmentation du niveau des harmoniques sur le spectre par rapport au fondamental.

Test pour un faible glissement

Dans ce test, nous choisissons une faible valeur du glissement égale à 2,13%. Cette valeur correspond à un fonctionnement du moteur asynchrone à faible charge. Aussi, cette valeur est choisie par rapport aux tests expérimentaux pour une faible charge présentés plus loin.

Enfin, la valeur du glissement est très importante vu que ce paramètre contribue à déterminer les fréquences caractéristiques du défaut de barres cassées. En plus, une faible valeur du glissement permet d'avoir des fréquences trop proches du fondamental et nous permettra de vérifier la résolution fréquentielle de chaque fenêtre.

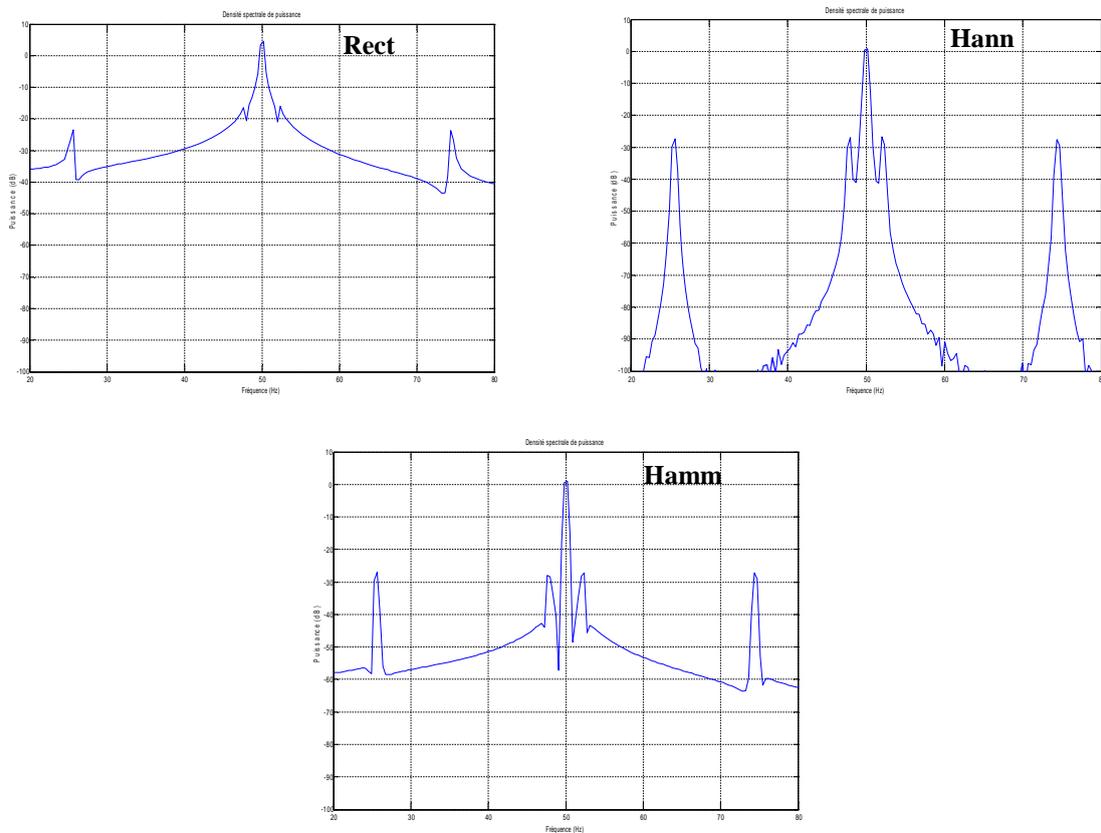


Figure III.11 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur avec défaut d'une barre cassée pour un glissement de 2,13% et RSB=75dB.

Sur la figure (III.11), le courant statorique est analysé en utilisant plusieurs fenêtres de pondération. Ce test est réalisé pour une barre cassée, un glissement de 2.13% et un RSB de 75dB synonyme d'un signal faiblement bruité. On observe une difficulté de localisation des fréquences du défaut avec la fenêtre rectangulaire.

Avec l'utilisation des autres fenêtres (Hamming et Hanning) ce problème est résolu. Il reste à signaler que la fenêtre de Hamming se caractérise par un lobe principal étroit et des lobes secondaires d'amplitude faible.

Par contre, pour la fenêtre de Hanning, les lobes secondaires sont d'amplitude plus importante mais le lobe principal est plus large pour cette fenêtre ce qui risque de noyer les harmoniques de défaut dans le fondamental. Enfin, les fréquences du défaut de barres sont localisées aux fréquences 52,13Hz et 47,87Hz.

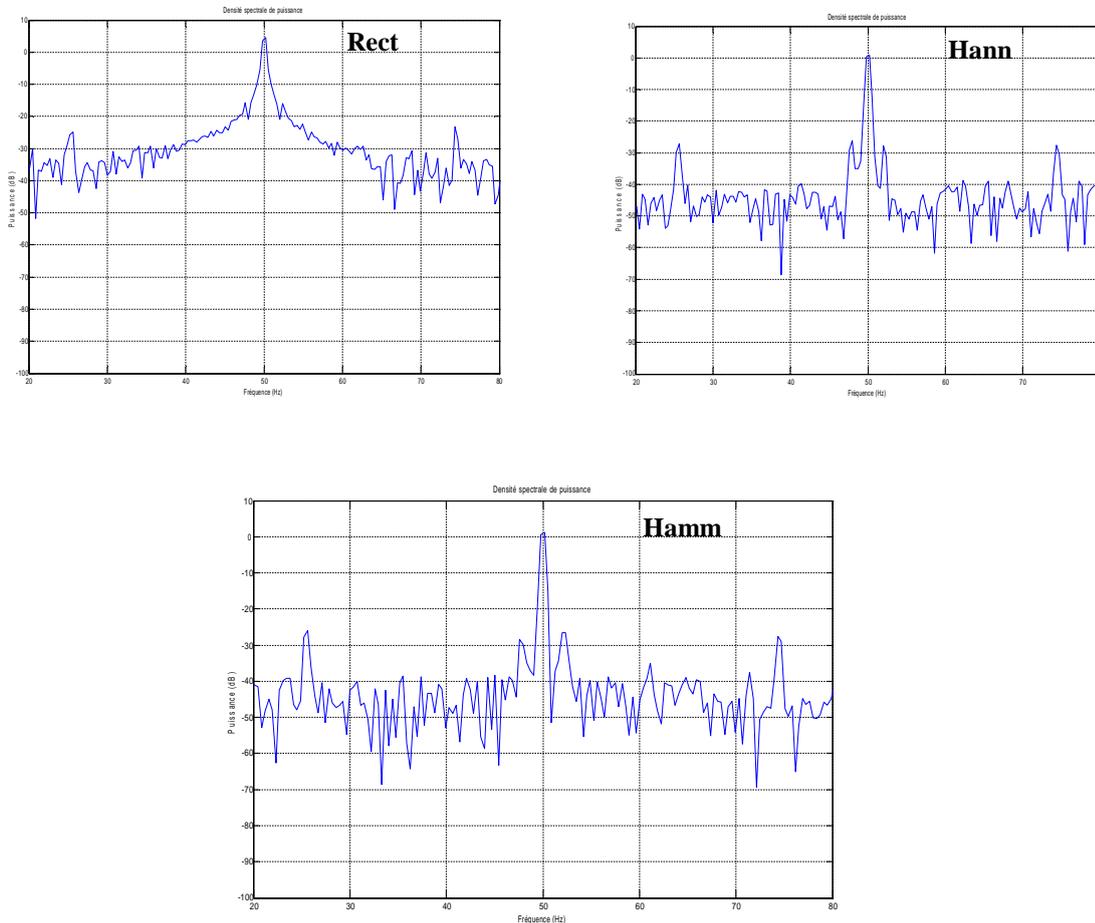


Figure III.12 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur avec défaut d'une barre cassée pour un glissement 2,13 % et RSB=15dB.

Le test de la figure (III.12) est effectué pour définir la robustesse vis-à-vis du bruit pour chaque fenêtre dans la localisation des fréquences contenues dans le signal du courant statorique. En effet, le RSB considéré dans ce test est égal à 15dB ce qui équivaut à un signal fortement bruité. Comme pour le premier test, la fenêtre rectangulaire est limitée par rapport aux autres fenêtres, alors que c'est celle de Hanning qui offre la meilleure localisation.

Enfin, le but de ce test, effectué avec une barre cassée à un RSB de 15dB et un glissement de 2,13%, est de vérifier le pouvoir de discrimination des fréquences pour chaque fenêtre lorsque les fréquences sont proches du fondamental. Encore une fois le compromis entre la largeur du lobe principal et l'amplitude des lobes secondaires est mis en valeur.

Test du moteur avec défaut d'une barre cassée ($k = 2$)

La Figure (III.13) représente la DSP du courant statorique en considérant une valeur de $k = 2$. Ce paramètre permet de calculer les fréquences du défaut de barres (équation III.20).

En effet, $k = 1$ nous donne la fréquence principale du défaut de barres alors qu'en variant le paramètre $k = 2,3,4,\dots$ nous obtenons une répétition ou une duplication de cette fréquence caractéristique du défaut sur le spectre.

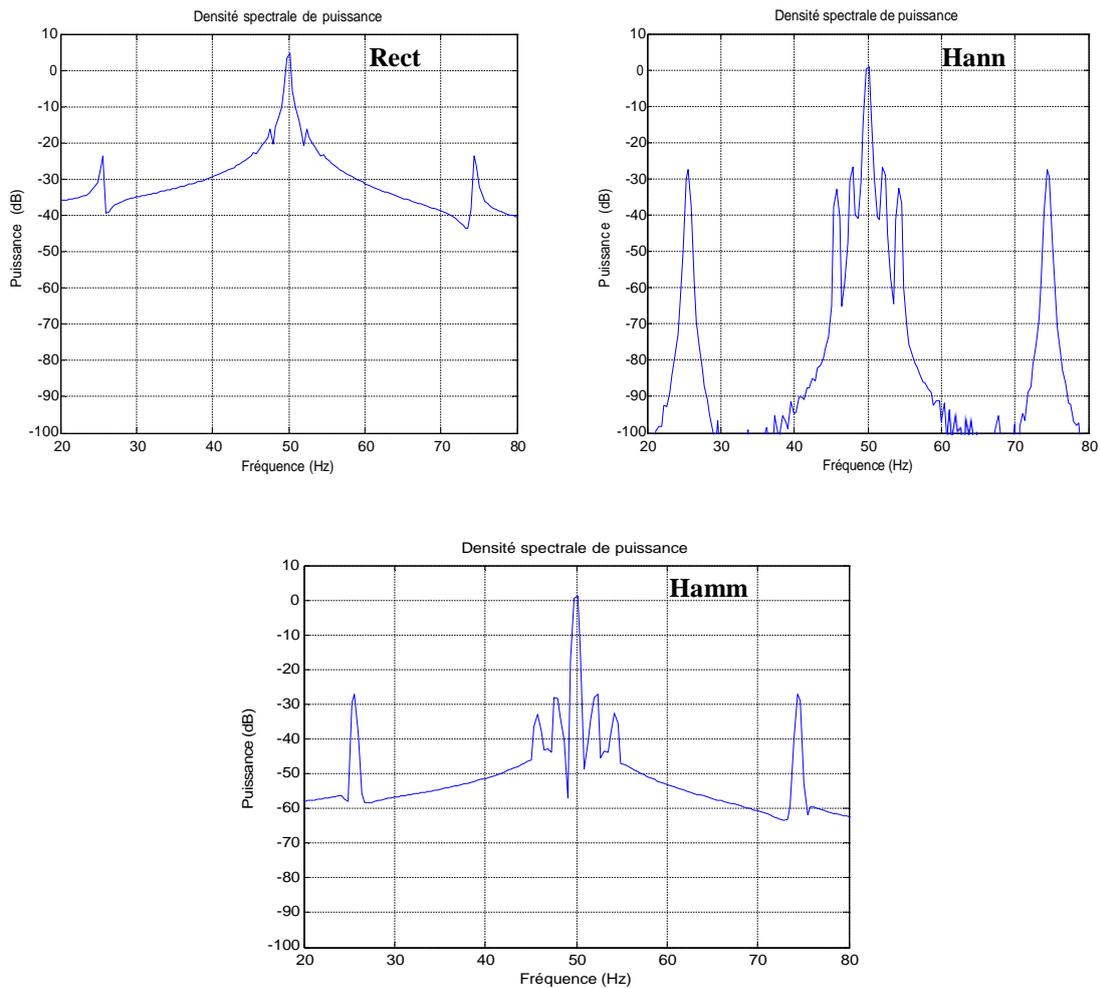


Figure III.13 DSP du courant statorique avec différentes fenêtres de pondération pour un moteur avec défaut d'une barre cassée pour un glissement de 2.13 %, $RSB=75dB$ et $k = 2$.

Nous remarquons l'impossibilité de localiser cette duplication de fréquence de défaut sur la fenêtre rectangulaire dû à la proximité des harmoniques du défaut avec le fondamental. Avec les fenêtres de pondération nous arrivons à observer cette duplication avec une meilleure résolution pour la fenêtre de Hamming vu qu'elle offre un lobe principal plus étroit.

Les fenêtres de pondération proposées dans ce mémoire ont été vérifiées à l'aide de tests de simulation. Dans ce qui suit, cela va être comparé avec des résultats expérimentaux réalisés par un banc d'essai réel par le Groupe DIAGNOSTIC au sein du Laboratoire de Développement des Entraînements Electriques à l'USTO Oran.

5. COMPARAISON AVEC DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI

Le schéma synoptique du banc d'essai est donné par la figure suivante :

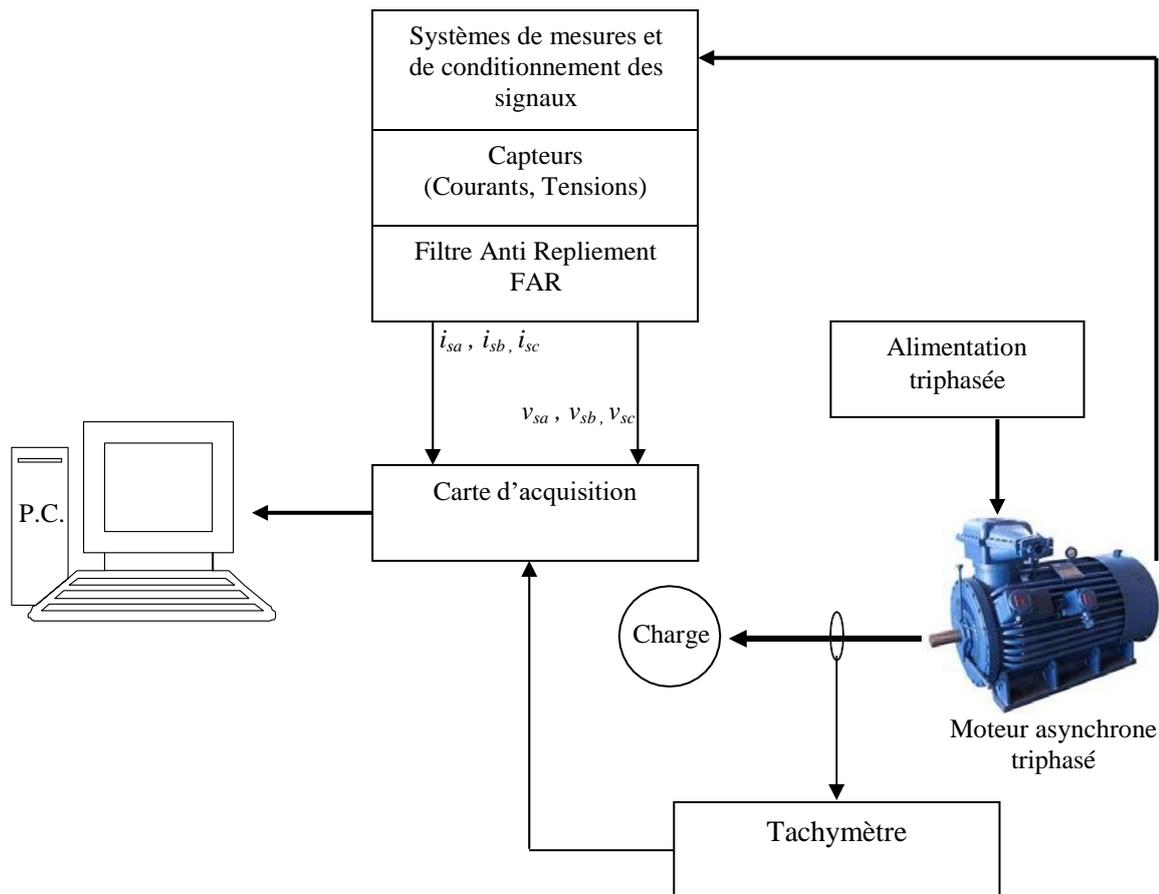


Figure III.14 Schéma synoptique du banc d'essai.

Le banc d'essai, utilisé pour vérifier nos résultats de simulation, est réalisé par le Groupe DIAGNOSTIC au sein du Laboratoire de Développement des Entraînements Electriques L.D.E.E. (USTO). Ce banc d'essai est constitué de :

- Une source triphasée avec une fréquence d'alimentation de 50 Hz.
- Un moteur asynchrone à cage d'écureuil de 3 kW, à deux paires de pôles.
- Module de mesures constitué de trois capteurs de courant et trois capteurs de tension à effet Hall.

- Module de conditionnement, constitué de filtres anti-repliements, destiné à éviter les recouvrements de spectre lors de l'acquisition. La fréquence de coupure du filtre est égale à 400Hz.
- Une machine à courant continu fonctionnant en mode générateur est accouplée au moteur asynchrone pour lui servir de charge à entraîner.

Le banc d'essai est illustré dans la figure III.15 ci-après.



Figure III.15 Illustration du banc d'essai.

ACQUISITION DES DONNÉES

Toutes les acquisitions ont été réalisées en régime permanent nominal (soit un couple nominal de 20N.m) sur une durée de 40 sec. avec une fréquence d'échantillonnage égale à 1500 Hz. Par conséquent, la résolution spectrale est égale à 0,025 Hz. En plus, la vitesse de rotation du moteur est mesurée à l'aide d'un tachymètre.

Les différents paramètres du moteur asynchrone à cage utilisé dans le banc d'essai sont donnés en Annexe. Enfin, le défaut d'une barre cassée est créé artificiellement comme il est montré sur la figure (III.16)



Figure III.16 Défaut d'une barre cassée .

Défaut d'une barre cassée ($g = 4,06\%$)

Dans ce test, le glissement calculé à $4,06\%$ suite à la mesure de la vitesse de rotation à 1439 tr/min.

L'analyse spectrale du courant statorique par DSP est donnée par les figures suivantes :

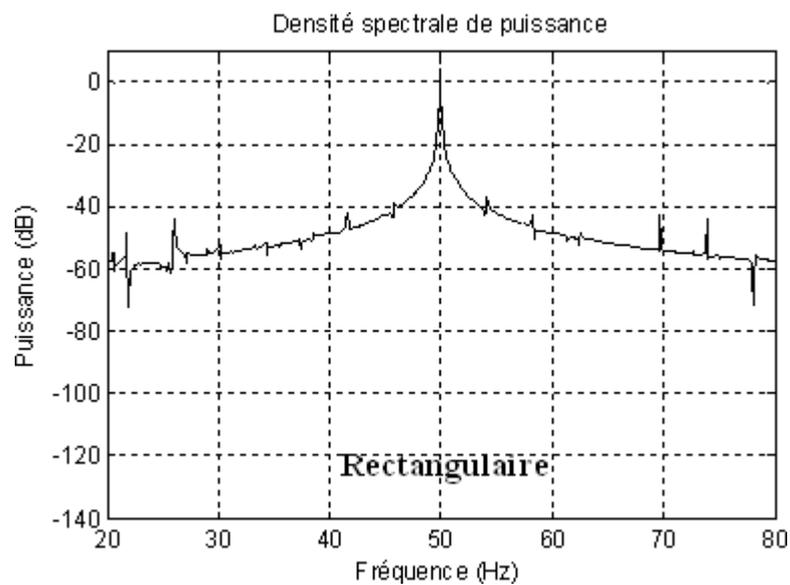


Fig. III.17 DSP du courant statorique (fenêtre rectangulaire) pour $g = 4,06\%$.

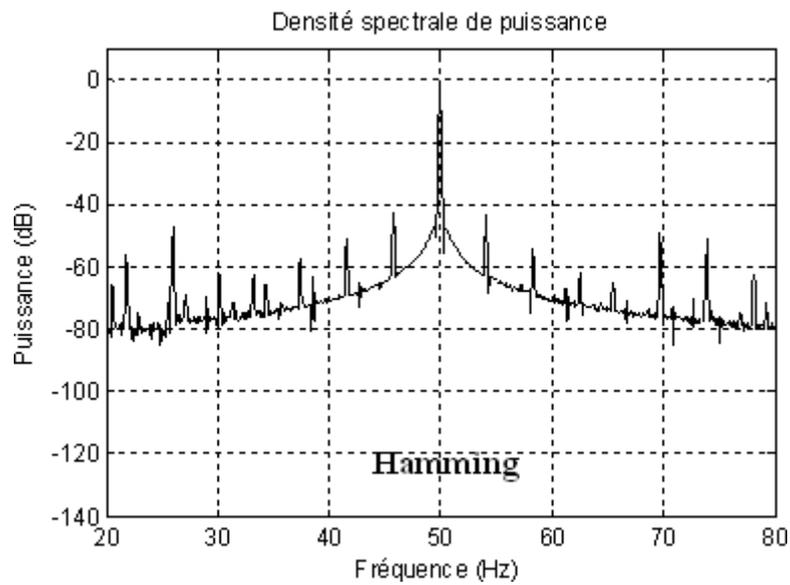


Figure III.18 DSP du courant statorique (fenêtre de Hamming) pour $g = 4,06\%$.

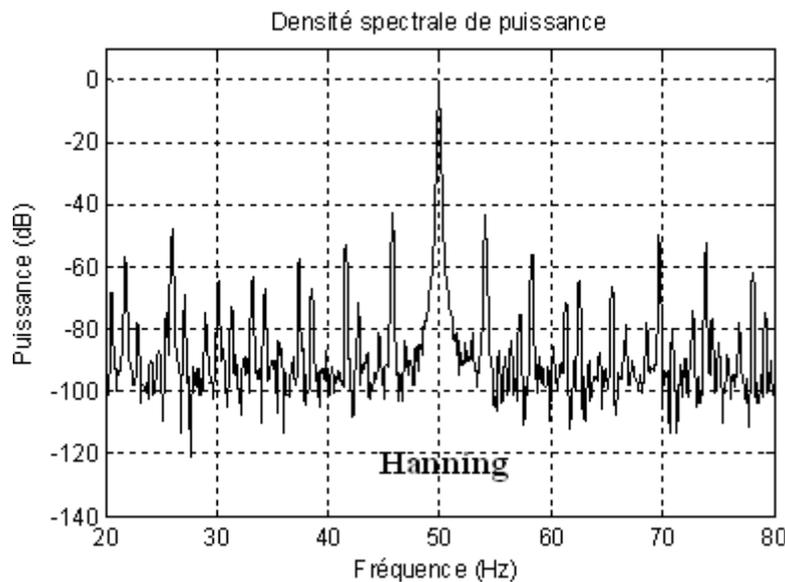


Figure. III.19 DSP du courant statorique (fenêtre de Hanning) pour $g = 4,06\%$.

Sur les résultats de ce premier test, nous remarquons les harmoniques du défaut de barres ainsi que les harmoniques du défaut d'excentricité sur les trois fenêtres avec une meilleure résolution pour les fenêtres de Hamming et Hanning. Nous remarquons aussi le phénomène de duplication ou de répétition de ces fréquences sur le spectre ($k = 1,2,3. \dots$).

Défaut d'une barre cassée ($g = 2,13\%$)

Dans ce test, le glissement est calculé à 2,13 % suite à la mesure de la vitesse de rotation à 1468 tr/min équivalent à un fonctionnement du moteur asynchrone à faible charge. Ce test permet de vérifier le pouvoir de discrimination des fréquences de chaque fenêtre d'analyse.

L'analyse spectrale du courant statorique par DSP est donnée par les figures suivantes :

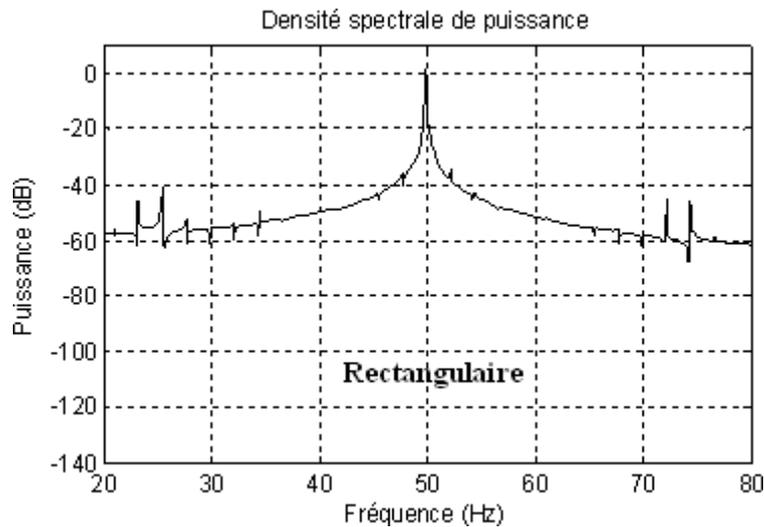


Figure III.20 DSP du courant statorique (fenêtre rectangulaire) pour $g = 2,13\%$.

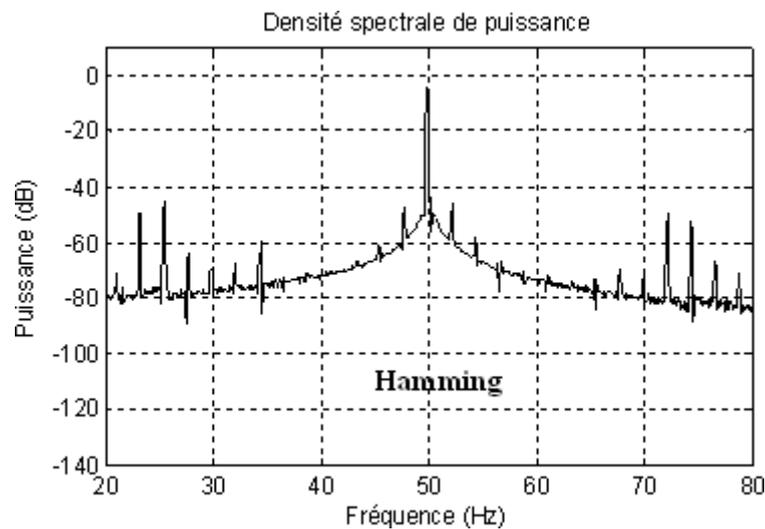


Figure III.21 DSP du courant statorique (fenêtre de Hamming) pour $g = 2,13\%$.

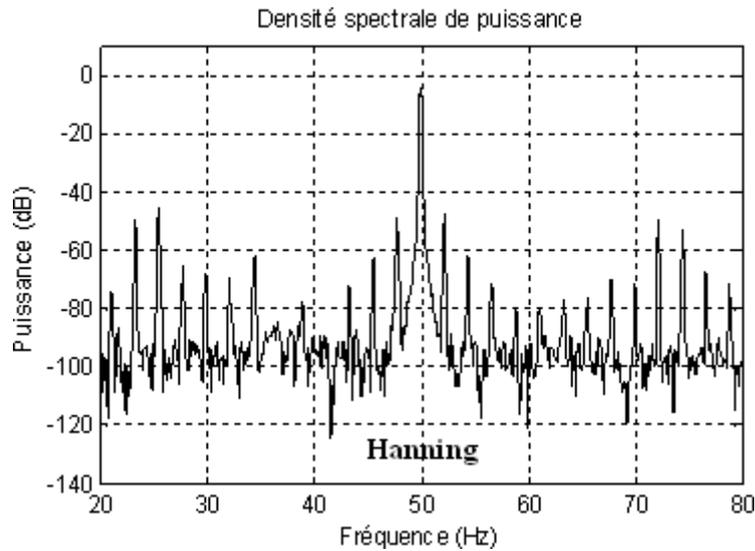


Figure III.22 DSP du courant statorique (fenêtre de Hanning) pour $g = 2,13\%$.

Dans le dernier test à faible glissement, nous remarquons la limitation de la fenêtre rectangulaire devant les fenêtres de pondération ainsi que la supériorité de la fenêtre de Hanning en terme de résolution fréquentielle lorsque les harmoniques du défaut sont trop proches du fondamental.

CONCLUSION

Le présent chapitre est consacré à l'étude et le diagnostic du défaut de barres de la machine asynchrone ainsi que l'influence du choix du type de fenêtres de pondération sur la résolution fréquentielle de la densité spectrale de puissance.

A travers les résultats de simulation obtenus, nous avons vérifié le pouvoir de localisation et de discrimination des fréquences relatives au défaut de barres rotoriques. Pour cela, il est nécessaire de procéder au bon choix de la fenêtre de pondération utilisée pour avoir un résultat satisfaisant et un diagnostic fiable.

Aussi, nous avons effectué des tests de robustesse vis-à-vis du bruit pour valider l'importance d'un bon choix des fenêtres de pondération pour améliorer la résolution fréquentielle de la DSP dans le diagnostic des défauts rotoriques de la machine asynchrone à cage.

Enfin, nous avons comparé et validé les résultats de simulation par rapport aux résultats expérimentaux présentés dans ce chapitre.

Conclusion générale

A travers le présent mémoire, nous avons passé en revue les défauts du moteur asynchrone à cage ainsi que les méthodes de diagnostic utilisées pour la détection et la localisation de ces défauts.

Parmi ces méthodes, nous avons mis l'accent sur les méthodes basées sur le traitement du signal et plus particulièrement la technique de l'analyse spectrale du signal du courant statorique en se basant sur le calcul de la transformée de Fourier. En effet, le calcul de la Transformée de Fourier introduit un effet de lissage et un effet de bord dus à l'opération de troncature du signal.

Ces effets négatifs se traduisent par l'apparition de lobes secondaires sur le spectre réduisant ainsi la résolution fréquentielle et altérant par conséquent, l'efficacité de la lecture spectrale. Pour remédier à ce problème de résolution fréquentielle, nous avons effectué une étude comparative mettant en œuvre des fenêtres de pondération destinées à limiter les effets négatifs de troncature sur le spectre.

En effet, les fenêtres de pondération de Hamming et Hanning sont proposées afin d'améliorer la résolution fréquentielle de la densité spectrale de puissance et ce, dans le cas de l'analyse spectrale du courant statorique d'un moteur asynchrone à cage avec ou sans défaut de barres cassées.

Plusieurs tests de simulation sont réalisés dans le but de vérifier l'efficacité des fenêtres de pondération et d'avoir un meilleur compromis entre la largeur du lobe principal et la hauteur des lobes secondaires sur le spectre du courant statorique. Ces tests de simulation étudient plusieurs limitations en terme de résolution fréquentielle à savoir : robustesse vis-à-vis du bruit (cas d'une alimentation polluée), proximité des harmoniques du défaut avec le fondamental (cas d'un faible glissement), ...etc.

À travers l'étude de chaque fenêtre, on a cherché à établir un compromis entre un lobe principal étroit et des lobes secondaires d'amplitudes faibles. Ce compromis est clairement représenté par les différents résultats de simulations effectués. On a pu observer qu'avec la fenêtre de Hanning on a des lobes secondaires de faible amplitude mais le lobe principal est plus large. Par contre, la fenêtre de Hamming offre la possibilité d'avoir un lobe principal étroit mais les lobes secondaires sont d'amplitude supérieure à celle obtenue avec la fenêtre de Hanning.

Enfin, on peut dire que la fenêtre de Hanning est recommandée dans le cas du diagnostic des défauts naissants et la fenêtre de Hamming est plus appropriée dans le cas de défauts proches du fondamental.

A travers ces tests de simulation, nous avons vérifié l'apport des fenêtres de pondération étudiées dans l'amélioration de la résolution fréquentielle du spectre du courant statorique. En plus, nous avons comparé et validé nos résultats avec des résultats expérimentaux réalisés au sein du Laboratoire de développement des entraînements électriques (USTO-Oran) et ce, dans le but de vérifier l'efficacité des fenêtres de pondération dans l'analyse spectrale du signal du courant statorique réel en présence d'un défaut de barres cassées.

Néanmoins, nous avons constaté la limitation de l'analyse spectrale par transformée de Fourier et sa sensibilité par rapport au bruit. En plus, cette technique n'est pas adaptée à l'analyse de signaux non stationnaires où les fréquences varient dans le temps (cas d'une variation de vitesse).

Dans cette optique et pour de futurs travaux, nous proposons de considérer un algorithme plus robuste au bruit et de l'adapter à l'analyse des signaux non stationnaires obtenus suite à l'alimentation de la machine asynchrone par un onduleur de tension dans des applications à vitesse variable.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [Abed,02] A. ABED, "Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone" ,Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, mars 2002.
- [Aimer,09] AIMER, A.F., BENDIABDELLAH, A., BOUDINAR, A.H., MOKHTAR, C., "Induction Motor Broken Rotor Bars Detection and Location via a Time - Frequency Spectrum". 3rd International Conference on Electrical Engineering, organisée à l'Université M'hamed Bougara, Boumerdès, 05-07 Décembre 2009, Algérie.
- [Aimer,17] AIMER, A.F., BOUDINAR, A.H., BENOZZA, N., BENDIABDELLAH, A., "Utilisation de la méthode ROOT-Auto Régressive dans le diagnostic des défauts mécaniques du moteur asynchrone". Revue Roumaine des Sciences Techniques. Série électrotechnique et énergétique – Volume 62 , Edition 2 juin 2017.
- [Ait Ouali,15] AIT OUALI, Z., "Application de FPGA à la commande d'un moteur asynchrone", Mémoire de magister, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ,2015.
- [Bachir,01] BACHIR, S., TNANI, S., TRIGEASSOU, J.C., CHAMPENOIS, G., "Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines". EPE01, Graz , Autriche , August 2001.
- [Bachir,02] BACHIR, S., "Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique". Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France. 2002.
- [Benbouzid,99] BENBOUZID, M.E.H., VIEIRA, M., THEYS, C., "Induction motors' faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques". IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 14, NO.1, pp. 14-23, January 1999.
- [Benidir,04] BENIDIR, M., "Théorie et traitement du signal 2 : Méthodes de base pour l'analyse et le traitement du signal". Édition Dunod. 2004.
- [Bonnett,08] BONNETT, A.H., YUNG, C., "Increased efficiency versus increased reliability". IEEE Industry Applications Magazine. Jan./Feb. 2008.
- [Bouchared,97] BOUCHARED, R.P., et OLIVIER, G., "Conception des moteurs asynchrones

triphasés", édition presse internationale polytechnique CANADA 1997.

[Boudinar,07] BOUDINAR, A.H., BENDIABDELLAH A., BENOZZA, N., BOUGHANMI,N., "Three phase induction motor incipient rotor's faults detection based on improved Root MUSIC approach". International Review of Electrical Engineering, vol. 02, NO.3, pp. 406-413. May-June 2007.

[Boumegoura,01] BOUMEGOURA, T., "Recherche de signature électromagnétique des défauts sans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic", Thèse de Doctorat. Ecole doctorale électronique, électrotechnique et automatique de Lyon. 2001

[Bousseksou,07] BOUSSEKSOU R., "Modélisation analytique des machines Asynchrones application au diagnostic", Mémoire de magister ,Université de Constantine ,2007.

[Burnett,96] BURNETT.R, WATSON, J.F., ELDER, S., "The application of modern signal processing techniques for use in rotor fault detection and location within three phase induction motors". Signal Processing Vol. 49, pp. 57-70, ELSEVIER Science. 1996.

[Casimir,03] CASIMIR, R., "Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes". Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, France. 2003.

[Chahmi,17] CHAHMI A., "Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic", Thèse de Doctorat, Université USTO d'Oran. 2017

[Charbonnel,18] CHARBONNEL. A., "Le moteur asynchrone triphasé", Site internet <<https://sti.discip.ac-caen.fr> > avril2018.

[Cherif,14] CHERIF H., "Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes". Mémoire de magister, Université mohamed khider biskra, 2014.

[Cherier,09] CHERIER. F., AMADE. G, "Modélisation en vue du diagnostic des défauts dans une machine asynchrone". Mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université M'hamed Bougara-Boumerdès, 2009.

[Chekima,14] CHEKIMA D., "Commande d'une Machine Asynchrone par Logique Floue",

Mémoire de master, Université d'EL-Oued, 2014.

[Cupertino,04] CUPERTINO, F., DEVANNA, E., SALVATORE, L., "Analysis techniques for detection of induction motor's broken rotor bars after supply disconnection". IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 42, NO.2, pp. 526-533, Mar./Apr. 2004.

[Didier,04] DIDIER, G., "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances". Thèse de doctorat, université Henri Poincaré ,Nancy I ,2004 .

[Flandrin,99] FLANDRIN, P., "Time - Frequency/Time - Scale analysis". Edition Hermes. 1999.

[Hayes,96] HAYES, M.H., "Statistical digital signal processing and modelling". John Wiley& Sons Inc., 1996.

[Herrache,06] HERRACHE S., et KHALFAOUI K., "Etude et analyse des procédés de démarrage des moteurs asynchrones triphasés". Mémoire d'ingénieur. Université M'SILA.2006.

[Henry,99] HENRY, D., "Diagnostic et contrôle de cohérence des systèmes multi variables incertains". Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, France, 1999.

[Hubert,02] HUBERT, R., "Le contenu Spectral Du Courant Absorbé Par La Machine Asynchrone En Cas De Défaillance ,Un Etat De L'art". Faculté des Sciences, Nancy, CEDEX, juin 2002.

[Manolakis,05] MANOLAKIS, D.G., INGLE, V.K., KOGON, S.M., "Statistical and adaptive signal processing : spectral estimation , signal modelling , adaptive filtering, and array processing". Artech House Inc., 2005.

[Loutzki,69] LOUTZKY, S., "Calcul pratique des alternateurs et des moteurs asynchrones". Eyrolles, 1969

[Navarro,07] NAVARRO, L., "Représentation tridimensionnelle de la phase d'un signal d signal dans un plan temps-fréquence :contribution à l'analyse des signaux quasi-stationnaires". Thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines, Saint-Étienne, France.2007.

[Noureddine,13] NOUREDDINE B., "Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones",

Mémoire de magister en Electrotechnique, université de Constantine Algérie 2013.

[Ondel,06] ONDEL O., "Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone" Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006.

[Oumaamar,12] OUMAAMAR, M.E.K., "Surveillance et diagnostic de défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée", Thèse de Doctorat ,Université de Lorraine, 2012.

[Schmidt,86] SCHMIDT, R.O., "Multiple emitter location and signal parameter estimation". IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. AP-34, NO.3, pp. 276-280, Mar. 1986.

[Thorsen,95] THORSEN O. V. and DALVA M., "A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.31(5), pp. 1186-1196, September 1995.

[Touafek,11] TOUAFEK, I., "Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L'EMD et des ondelettes(WT)". Mémoire magister. Université Ferhat Abbas Sétif 2011.

[Trigeassou,11] TRIGEASSOU, J.C., "Diagnostic des machines électriques". Printed and bound in England by Antony Rowe Ltd, Chippenhan, April 2011.

[Yasici,99] YAZICI, B., KLIMAN, G.B., "An adaptive statistical time-frequency method for detection of broken rotor bars and bearing faults in motors using stator current". IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 35. pp. 442-452, Mar./Apr.1999.

ANNEXES

Description du banc d'essai (figure III.15)

Moteur asynchrone triphasé

Ce moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil



| | |
|----------------------------|------------------|
| Constructeur | AZAZGA (ALGERIE) |
| Puissance | 3 KW |
| Tension nominale | 380 V |
| Branchement | (Δ) |
| Courant nominale | 7 A |
| Cos (φ) | 0.83 |
| Nombre de pôle | 4 |
| Nombre de barres rotorique | 28 |
| Vitesse nominale | 1410 tr/mn |
| Classe d'isolation | F |

Génératrice à courant continu

Cette machine à courant continu, fonctionnant en génératrice, est accouplée au moteur asynchrone et servant de charge à entraîner.



| | |
|----------------------|-----------|
| Constructeur | DELORENZO |
| Puissance | 2.4KW |
| Tension d'induit | 220V |
| Courant d'induit | 10.9A |
| Courant d'excitation | 0.65A |
| Type d'excitation | séparée |
| Vitesse nominale | 1410tr/mn |
| Classe d'isolant | F |

Capteurs de courant " FLUKE i30s (AC /DC CURRENT CLAMP)"

Ces capteurs de courant à effet Hall ont pour rôle de mesurer les courants statoriques.



| | |
|-----------------------|----------|
| Courant maximal | 20 A |
| Rapport de conversion | 100m V/A |

Capteurs de tension " TEKTRONIX P5200"

Ces capteurs de tension ont pour rôle de mesurer les tensions de phases du moteur asynchrone.



| | |
|-----------------------|---------------|
| Tension maximale | 1000V |
| Rapport de conversion | 1/50 ou 1/500 |

Filtre Anti-Remplissement

C'est un filtre analogique de type Betterworth d'ordre 4 et qui a pour rôle d'éviter les recouvrements de spectre dûs au numérisation du signal.



| | |
|----------------------|------------------|
| Fréquence de coupure | 400 Hz ou 1500Hz |
|----------------------|------------------|

Tachymètre "ONO SOKKI HT-341"

Cet appareil de mesure a pour rôle de mesurer la vitesse réelle du moteur asynchrone.



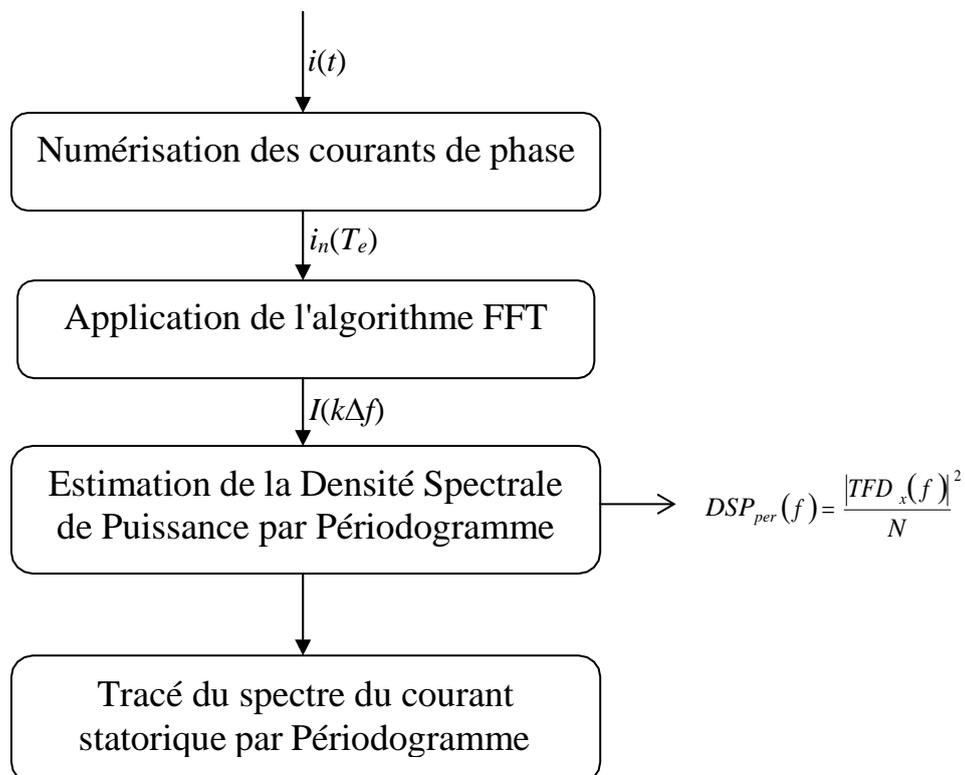
| | Mode 1 | Mode 2 |
|----------------------------|-------------------|-------------------|
| Plage de mesure | 1,5 à 2000 tr/min | 15 à 10000 tr/min |
| Précision de mesure | ± 0,1 tr/min | ± 0,2 tr/min |

Carte d'acquisition "National Instrument BNC-2110"

Cette carte est le principal élément de la chaîne d'acquisition. Elle permet de numériser le signal analogique.



La carte BNC-2110 possède 08 entrées analogiques

Rotor à cage avec une barre cassée**Organigramme de la densité spectrale de puissance**

Résumé

Le recours aux machines asynchrones est surtout lié à leur robustesse, leur puissance massique et à leur coût de fabrication. Néanmoins, divers défauts peuvent apparaître au niveau de ce type de machines.

La densité spectrale de puissance, basée sur la transformée de Fourier (T.F), est utilisée comme méthode d'analyse depuis plusieurs années pour sa simplicité et son temps de calcul relativement faible. Cependant, cette technique possède plusieurs inconvénients qui sont dus principalement aux problèmes de résolution fréquentielle.

Pour résoudre ces problèmes, on propose d'utiliser un algorithme basé sur l'analyse de Fourier avec différentes fenêtres de pondération dans le but d'améliorer l'analyse spectrale du courant statorique et ainsi, permettre une meilleure localisation des harmoniques indiquant la signature des défauts rotoriques du moteur asynchrone.

Mots clés : Moteur asynchrone, Défauts rotoriques, Diagnostic, Analyse spectrale, Traitement du signal.

Abstract

The use of induction machines is mainly due to their robustness, their specific power and their manufacturing cost. Nevertheless, various faults may appear in this type of machine.

Power spectral density, based on the Fourier transform (T.F), has been used as an analysis method for several years for its simplicity and relatively low computation time. However, this technique has several drawbacks which are mainly due to frequency resolution problems.

To solve these problems, we propose to use an algorithm based on Fourier transform calculation with different weighting windows in order to improve the spectral analysis of the stator current and thus, allow a better localization of the harmonics indicating the signature of the rotor fault of the induction motor.

Keywords: Induction motor, Rotor faults, Fault diagnosis, Spectral analysis, Signal processing.

ملخص

يرتبط استخدام الآلات غير المتزامنة بشكل أساسي بوظيفتها ووزنها المحددة وتكلفة تصنيعها. ومع ذلك، قد تظهر أخطاء مختلفة في هذا النوع من الآلات.

تم استخدام الكثافة الطيفية للقدرة، استناداً إلى تحويل فورييه (T.F)، كطريقة تحليل لعدة سنوات لبساطتها ووقت حسابها المنخفض نسبياً.

ومع ذلك، فإن هذه التقنية لها العديد من العيوب التي ترجع أساساً إلى مشاكل استبانة التردد. لحل هذه المشكلات،

نقترح استخدام خوارزمية ناتجة عن التقنيات المتقدمة لمعالجة الإشارة من أجل تحسين التحليل الطيفي لتيار الجزء الثابت

، وبالتالي، السماح بتوطين أفضل للتوافقيات التي تشير إلى توقييع عيوب الدوار للمحرك غير المتزامن.

الكلمات المفتاحية: المحرك غير المتزامن، أعطال الدوار، التشخيص، التحليل الطيفي، معالجة الإشارة.