

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

## MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

**Électrotechnique**

*Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique*

**Intitulé :**

---

### **DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS ROTORIQUES DE LA MACHINE ASYNCHRONE PAR LA TECHNIQUE DU PÉRIODOGRAMME**

---

**Présenté par :**

- BENATTA Wissam
- RAHMANI Fatima Zohra
- CHENNI Khayra

*Soutenu le : 22/09/2020..... devant le Jury :*

<b>M. Mohamed BRAHIMI</b>	<b>MCB</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Président</b>
<b>M. Ameer Fethi AIMER</b>	<b>MCB</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Encadreur</b>
<b>M. Yacine HABCHI</b>	<b>MCB</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mme. Nacera MEDJADJI</b>	<b>MAB</b>	<b>Centre Universitaire Naâma</b>	<b>Examineur</b>



# 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 travail.*

*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'institut de technologie du centre universitaire de Naama, 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*

*Avant tout, Nous tenons à remercier le bon dieu, et l'unique qui nous offre le courage et la volonté nécessaire pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*Nous dédions ce modeste travail*

*A nos chers parents qui sont toujours fiers de nous*

*A toutes nos familles*

*A nos amis pour tous les moments inoubliables passés ensemble*

---

# Résumé

Ce travail s'inscrit dans la thématique de diagnostic des défauts de la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Le choix de la machine est justifié par le succès grandissant qu'elle a suscité, notamment, dans les entraînements électriques à vitesse variable.

Malgré ces avantages, il est donc important de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant apparaître dans ce type de machines. Bien que la machine asynchrone soit réputée par ses qualités de robustesse et de faible coût de construction, il arrive néanmoins que celle-ci présente des pannes électriques ou mécaniques.

Dans ce mémoire, on a développé une technique appelée Périodogramme, basée sur l'analyse spectrale de la signature du courant statorique du moteur asynchrone à cage d'écureuil, en vue de la détection du défaut au rotor: cassure de barres. Dans ce contexte, nous avons proposé une approche de détection de défaut par la surveillance du courant statorique.

Les tests réalisés par simulation numérique sous l'environnement Matlab/Simulink et les résultats obtenus montrent clairement la possibilité d'extraire les signatures pour détecter les défauts recherchés

**Mots clés** : Machine asynchrone à cage d'écureuil, surveillance et diagnostic, défaut rotorique, Périodogramme.

---

# Abstract

This work falls under the field of fault diagnosis of three-phase squirrel cage induction machine. The choice of this machine is justified by the growing success it has generated, in particular, in electric drives with variable speed.

Despite these advantages, it is therefore important to develop a diagnostic system for early detection of faults that may appear in this type of machine.

Although the induction machine is chosen for its qualities of robustness and low construction cost, it nevertheless happens that it presents electrical or mechanical failures. In this work, we developed an interested technique called Periodogram based on spectral analysis of the stator current signature of squirrel cage induction motor for the detection of a rotor faults: broken bars. In this context, we have proposed a fault detection approach by monitoring the stator current.

The tests carried out by numerical simulation under the Matlab /Simulink environment and the results obtained clearly show the possibility of extracting the signatures related to the searched fault.

**Key words** : Squirrel cage induction machine, monitoring and diagnosis, rotor faults, Periodogram.

# ملخص

يعد هذا العمل جزءاً من موضوع تشخيص أعطال آلة قفص السنجاب غير المتزامن ثلاثية الأطوار. يبرر اختيار الماكينة النجاح المتزايد الذي حققته ، لا سيما في المحركات الكهربائية متغيرة السرعة

على الرغم من هذه المزايا ، من المهم تطوير أنظمة تشخيص للكشف المبكر عن الأعطال التي قد تظهر في هذا النوع من الأجهزة على الرغم من أن الآلة غير المتزامنة تشتهر بخصائص المتانة وانخفاض تكلفة البناء ، إلا أنها تحدث أعطالاً كهربائية أو ميكانيكية

في هذه الأطروحة، قمنا بتطوير تقنية تسمى Periodogram بناء على التحليل الطيفي للتوقيع الحالي للجزء الثابت للمحرك غير المتزامن في قفص السنجاب، بهدف اكتشاف خطأ الدوار: كسر القضيب. ، لقد اقترحنا نهجاً لاكتشاف الأخطاء من خلال مراقبة تيار الجزء الثابت

والنتائج التي تم الحصول عليها تظهر Matlab / Simulink الاختبارات التي أجريت بواسطة المحاكاة الرقمية في بيئة بوضوح إمكانية استخراج التوقع للكشف عن العيوب المرغوبة

**الكلمات المفتاحية:** آلة قفص السنجاب غير المتزامن ، المراقبة والتشخيص ، خطأ الدوار ، مخطط الدورة الشهرية

# Liste des figures

---

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure I-1	Machine asynchrone	4
Figure I-2	Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	6
Figure I-3	Vue schématique en perspective stator [Bac 02].	7
Figure I-4	Vue schématique en perspective du rotor à cage [Sch 99].	8
Figure I-5	Classification des défauts selon leur origine. [Jea 11]	9
Figure I-6	Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.	10
Figure I-7	Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.	11
Figure I-8	Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique	14
Figure I-9	roulement à bille.	15
Figure I-10	Pourcentage des défauts (2008)	17
Figure I-11	Pourcentage des défauts (1995)	18
Figure II-1	Les points de mesures [Didier, 04]	22
Figure II-2	Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques	23
Figure II-3	Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial [Khatraoui, 17].	24
Figure II.4	Densité spectrale de puissance du courant statorique pour un moteur sain et En présence de défaut	26
Figure II.5	Géométrie d'un roulement à billes	28
Figure II.6	Représentation temps-fréquence du courant statorique lors d'une variation Du couple de charge (Résultats de simulation avec une barre cassée)	36
Figure III-1	Représentation de la fenêtre rectangulaire	41
Figure III-2	Représentation de la fenêtre de Bartlett	42
Figure III-3	Représentation de la fenêtre gaussienne	42
Figure III-4	Représentation de la fenêtre de Henning	43
Figure III-5	Représentation de la fenêtre de Hemming	43
Figure III-6	Représentation de la fenêtre de Blackman	44

# Liste des figures

---

Figure III-1	Représentation des différentes fenêtres de pondération	44
Figure III-2	Représentation temporelle du signal du courant statorique Cas du moteur sain	47
Figure III-3	Représentation temporelle du signal du courant statorique :cas d'une barre cassée	47
Figure III-4	DPS par Périodogramme du courant statorique avec les différentes fenêtres de pondération cas d'un RSB=50Db et un glissement de5%	48
Figure III-5	DPS par Périodogramme du courant statorique avec les différentes fenêtres de pondération cas d'un RSB+15dB et un glissement de 5%	49
Figure III-6	DPS par Périodogramme du courant statorique avec les différentes fenêtres de pondération cas d'une RSB = 50dBet un glissement de 2%	49

# Liste de Tableau

---

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau I-1	Avantages et inconvénients de la machine asynchrone	17
Tableau II-1	Synthèse des techniques avancées du traitement du signal	30

# **Table des matières**

# Table des matières

---

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Présentation des moteurs asynchrones et leurs défauts</b>	
I-1 Introduction.....	3
I-2 Machine Asynchrone.....	3
I-2-1 Historique .....	3
I-3 Présentation Machine asynchrone.....	4
I-4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone .....	4
I-5 Glissement d'une machine asynchrone .....	4
I-6 Constitution de la machine asynchrone .....	5
I-6-1 Stator .....	6
I.6.2 Rotor .....	7
I.6.3 Organes mécaniques .....	8
I-7 Principaux défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	8
I.7.1 Défauts statoriques.....	11
I.7.2 Défauts de rotor .....	13
I.7.3 Défaillances mécaniques.....	14
I.8 Les conséquences des défauts .....	16
I.9 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone.....	17
I.10 Etudes statistique des défaillances de la machine asynchrone .....	17
I-11 Conclusion .....	19
<b>Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic</b>	
II.1. Introduction.....	20
II.2 La Définition et objectif du diagnostic .....	20
II.2.1 Définition .....	20
II.2.2 Objectif du diagnostic.....	20
II .3 Méthodes de diagnostic .....	20
II.3.1 Méthodes externes.....	21
II .3.2 Méthodes internes.....	21
II .3.3 Méthodes inductives .....	21
II .3.4 Méthodes déductives .....	21
II.4 Présentation des signatures de la machine asynchrone.....	22
II.4.1 Approche signal.....	22
II.4.2 Approche système .....	24
II.5 Techniques d'analyse des signaux : MCSA (Motor Current Signature Analysis) .....	24
II.5.1 Défaut de barres rotoriques .....	25
II.5.2 Défaut d'excentricité.....	26
II.5.3 Défaut de roulements.....	27
II.5.4 Défaut statorique .....	29
II.6 Techniques du traitement de signal.....	29
II.6.1 Méthodes non paramétrique .....	31
II.6.2 Méthodes paramétrique.....	33
II.7 Techniques statistiques .....	34

# Table des matières

---

II.8.1 Le Kurtosis .....	35
II.8.2 Facteur de crête .....	35
II.9 Techniques à haute résolution.....	35
II.10 Techniques Temps-Fréquence et Temps-échelle .....	35
II.10.1 Temps-Fréquence .....	36
II.10.2 Temps-échelle .....	37
II.11 Conclusion .....	37

## **Chapitre III : Diagnostic par Périodogramme**

III-1 Introduction .....	38
III.2 Passage des séries de Fourier à la transformée de Fourier .....	38
III.3 Passage de la transformée de Fourier à la transformée de Fourier discrète .....	39
III.3.1 Échantillonnage.....	39
III.3.2 Phénomène de repliement ou aliasing.....	40
III.3.3 Troncature du signal.....	40
III.3.4 Fenêtres de pondération.....	41
III.3.5 Discrétisation de la fréquence.....	45
III.3.6 Calcul de la transformée de Fourier rapide.....	45
III.3.7 Addition des zéros.....	46
III.4 Densité spectrale de Puissance par Périodogramme .....	46
III.5 Simulation numérique .....	46
III.6 Interprétation des résultats de simulation .....	47
III.7 Conclusion .....	50

<b>Conclusion générale.....</b>	<b>51</b>
---------------------------------	-----------

<b>Références bibliographique.....</b>	<b>52</b>
--	-----------

# **Introduction générale**

### Introduction générale :

La machine asynchrone occupe maintenant une grande place dans les applications industrielles. On la rencontre dans les endroits les plus divers, de l'éolienne à des applications militaires, dans la propulsion électrique de véhicule, de tramways, de trains à grande vitesse voire même de bateaux de croisières. De plus, il est habituel de nos jours de faire de la variation de la vitesse.

La croissance de ce type de machine électrique, essentiellement due à sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore sa quasi-absence d'entretien, est telle que nous la retrouvons dans tous les domaines industriels.

Dans le souci d'assurer la sécurité du personnel et des installations associées à la machine asynchrone, mais aussi pour optimiser les performances et réduire le coût de réparation, les systèmes de surveillance et de diagnostic sont devenus un objectif et une nécessité pour les industriels. Ces systèmes ont pour premier objectif de prévenir l'utilisateur d'un possible risque de problème pouvant apparaître en un point particulier du dispositif, en d'autres termes la détection et la localisation des défauts [ABE 02].

Le diagnostic des machines électriques s'est largement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables car une quelconque défaillance, même la plus anodine, peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan international, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic.

Dans ce mémoire, on s'intéresse en premier lieu aux défauts pouvant apparaître dans la machine asynchrone à cage d'écureuil, notamment ceux liés aux cassures de barres. En second lieu, on s'intéressera à la mise en œuvre d'un modèle mathématique décrivant le signal du courant statorique de la machine asynchrone.

Le premier chapitre est une entrée en la présentation de la machine asynchrone, commençant par un bref rappel sur la constitution de la machine asynchrone à cage d'écureuil, puis un principe de fonctionnement de la machine et classification des différents défauts pouvant affecter chaque élément de cette machine et ses causes et conséquences. Nous terminons ce chapitre par une étude statistique.

Le deuxième chapitre traite une synthèse des méthodes et techniques de diagnostic utilisées pour la détection de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil qui sont employées dans l'analyse des différentes méthodes interne et externe qui permettent d'extraire ces signatures issues du moteur asynchrone (courant, tension, vitesse, couple, vibrations, etc..).

## **Introduction générale:**

---

Le troisième chapitre consacré à la simulation numérique d'un cas réel de défauts de cassures de barres dans l'environnement MATLAB et par le traitement de ces résultats pour différentes conditions de fonctionnement, à l'état sain et défectueux et l'utilisation de la technique de périodogramme. Avec une analyse spectrale du courant statorique (à l'aide de la transformée de Fourier) a permis de mettre en évidence la présence des harmoniques caractérisant les défauts de barres rotoriques.

Les exigences industrielles en terme de maintenance orientent la recherche vers un diagnostic utilisant des grandeurs électromagnétiques telles que (flux, courant, tension, etc....) et plus particulièrement le courant statorique qui n'exige qu'un capteur de courant qui donne une image sur le courant de phase statorique, d'autre part, cette technique permet d'améliorer la fiabilité du moteur et d'augmenter sa durée de vie. La technique de l'analyse spectrale du courant statorique est la plus utilisée car elle permet la détection d'autres types de défauts et aussi de s'affranchir des problèmes d'accessibilité.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

# **Chapitre I**

## **Présentation des moteurs asynchrones et leurs défauts**

## I-1 Introduction :

Ce chapitre porte sur la machine asynchrone à cage. La première partie fait un rappel succinct sur la constitution des machines électriques, et plus particulièrement sur celle de la machine asynchrone à cage d'écureuil. La seconde partie traite des défauts qui peuvent affecter la machine. Nous évoquerons, essentiellement, les défauts statoriques, les défauts rotoriques et les défauts de roulement.

## I-2 Machine Asynchrone:

### I-2-1 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.

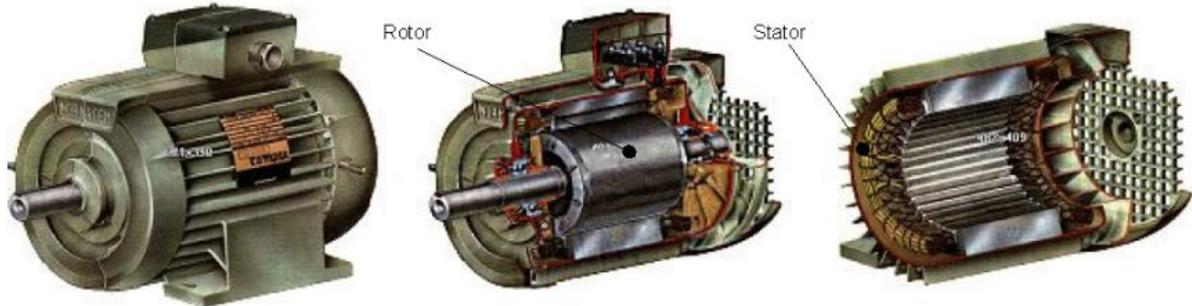
Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent. Son invention est attribuée à Nikola Tesla en 1887. En 1889 Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski (ou Michael von Dolivo-Dobrowolski), électricien allemand 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 consommée pour magnétiser l'entrefer, les machines triphasés, alimentées directement sur le réseau, représentant 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.

## I-3 Présentation 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...) [Ond 06].



**Figure I-1** : Machine asynchrone

### **I-4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :**

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme.

L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique.

La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, dans ce cas, vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique ; les courants s'annuleraient, de même que le couple qu'ils produisent, et la machine ne serait plus entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement.

### **I-5 Glissement d'une machine asynchrone :**

Le glissement est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à une machine synchrone hypothétique construite avec le même stator. 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.

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{n}_s - \mathbf{n}}{\mathbf{n}_s} \quad (\text{I.1})$$

$\mathbf{g}$  : Le glissement du moteur asynchrone en pourcentage [sans unités]

$\mathbf{n}_s$  : La fréquence de rotation du champ  $\vec{\mathbf{B}}$  en tours par seconde [tr.s-1]

$\mathbf{n}$  : La fréquence de rotation du rotor en tours par seconde [tr.s-1]

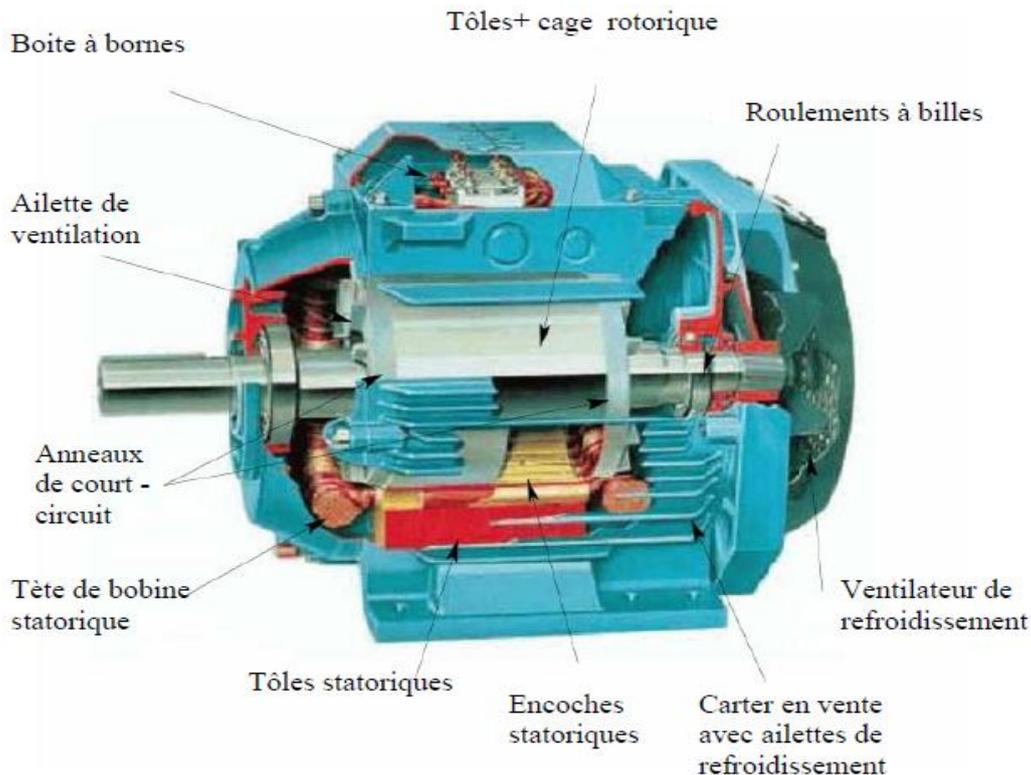
### I-6 Constitution de la machine asynchrone :

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 trois parties distinctes :

- le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- les paliers, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur. [Jea 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

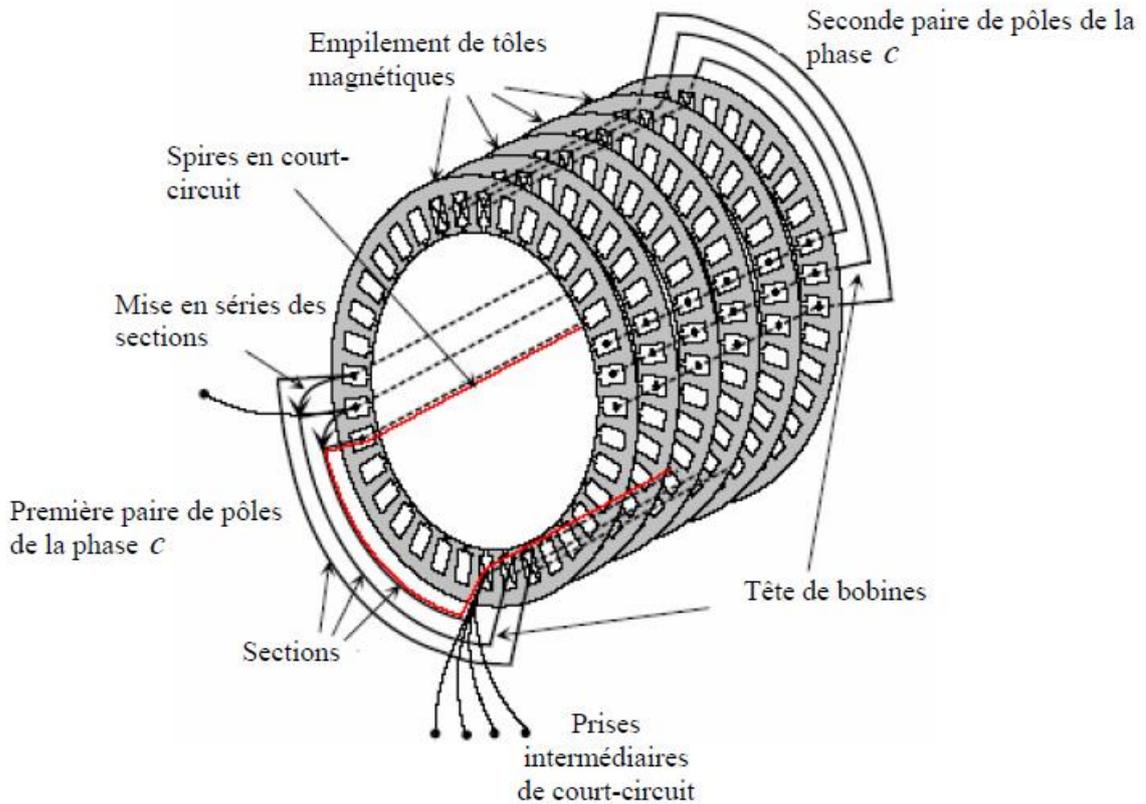
### I-6-1 Stator :

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 rivets ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Les enroulements 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.

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. [Jea 11] :



**Figure I-3:** Vue schématique en perspective stator [Bac 02].

### I.6.2 Rotor:

Le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors de machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil.

- Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique. Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine.
- Concernant les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les moteurs de grande puissance ou d'aluminium pour les plus faibles puissances. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux de court-circuit, fabriqués en cuivre ou en aluminium.

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par couplage d'un alliage d'aluminium ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Généralement il n'y a pas d'isolation entre les barres rotoriques et le circuit magnétique. Mais la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est

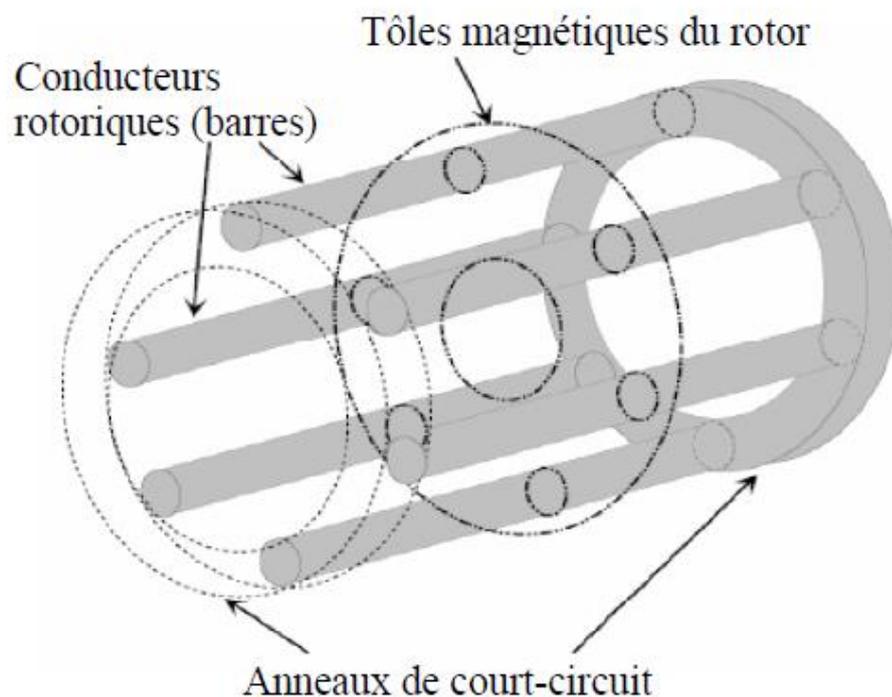
## Chapitre I : Présentation des moteurs asynchrones et leurs défauts

---

suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre.

Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné. De ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones, actuellement, en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). Pour remédier à cette situation, 2 autres types de cages ont été développés : Rotor à double cage et rotor à encoches profondes. [Jea 11]



**Figure I-4** : Vue schématique en perspective du rotor à cage [Sch 99].

### I.6.3 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. [Jea 11]

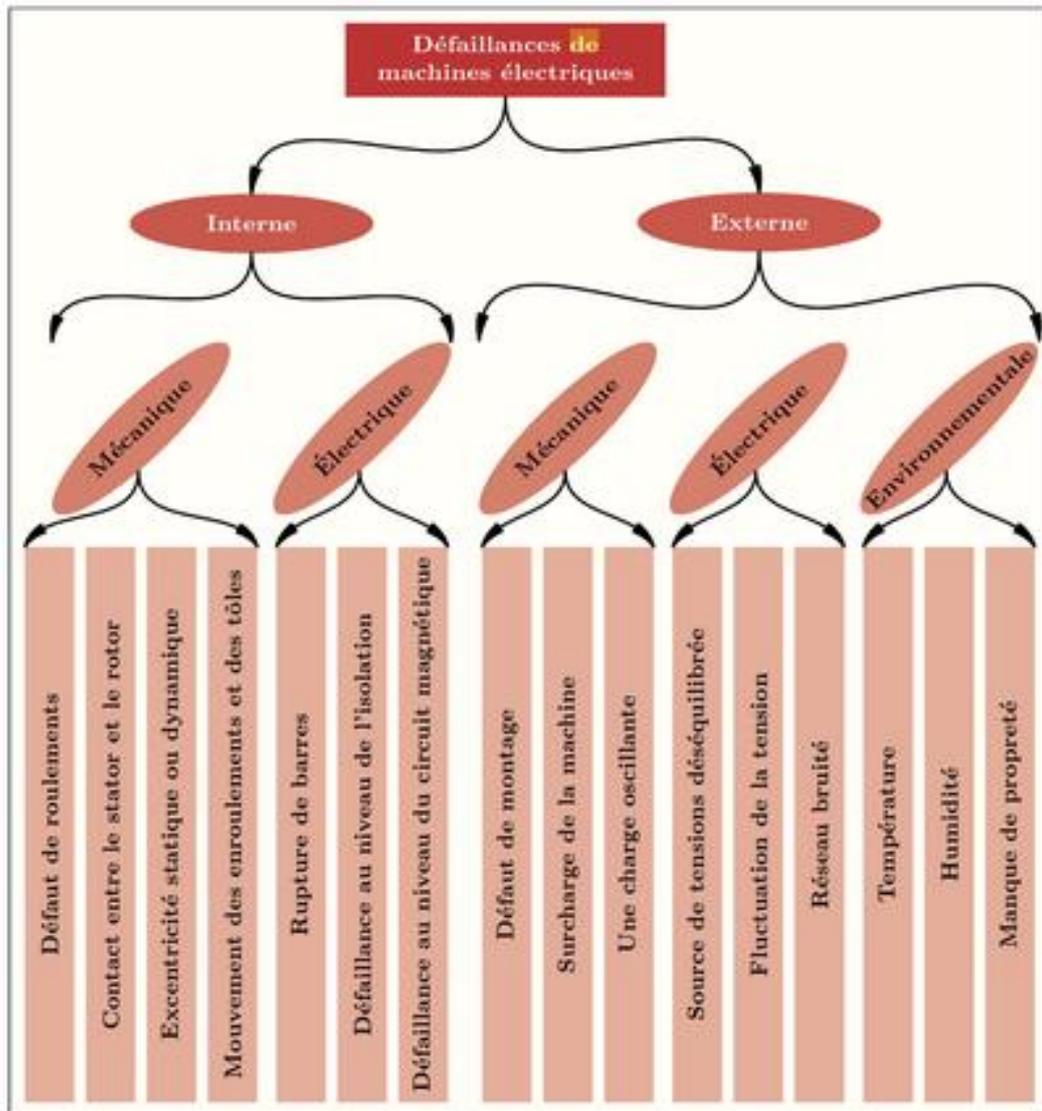
### I-7 Principaux défauts de la machine asynchrone triphasée à cage :

Les principaux défauts pouvant se produire dans une machine à cage peuvent être classés comme suit :

## Chapitre I : Présentation des moteurs asynchrones et leurs défauts

- \_ Défauts au stator résultant d'une ouverture ou d'un court-circuit sur au moins une phase du stator.
- \_ Connexion anormale des enroulements stator.
- \_ Cassure de barre ou d'anneau de court-circuit au rotor.
- \_ Excentricité dynamique ou statique.
- \_ Axe plié (proche de l'excentricité dynamique)
- \_ Roulements [Tar 01]

Il existe deux types de défauts principaux : internes et externes.



**Figure I-5** : Classification des défauts selon leur origine. [Jea 11]

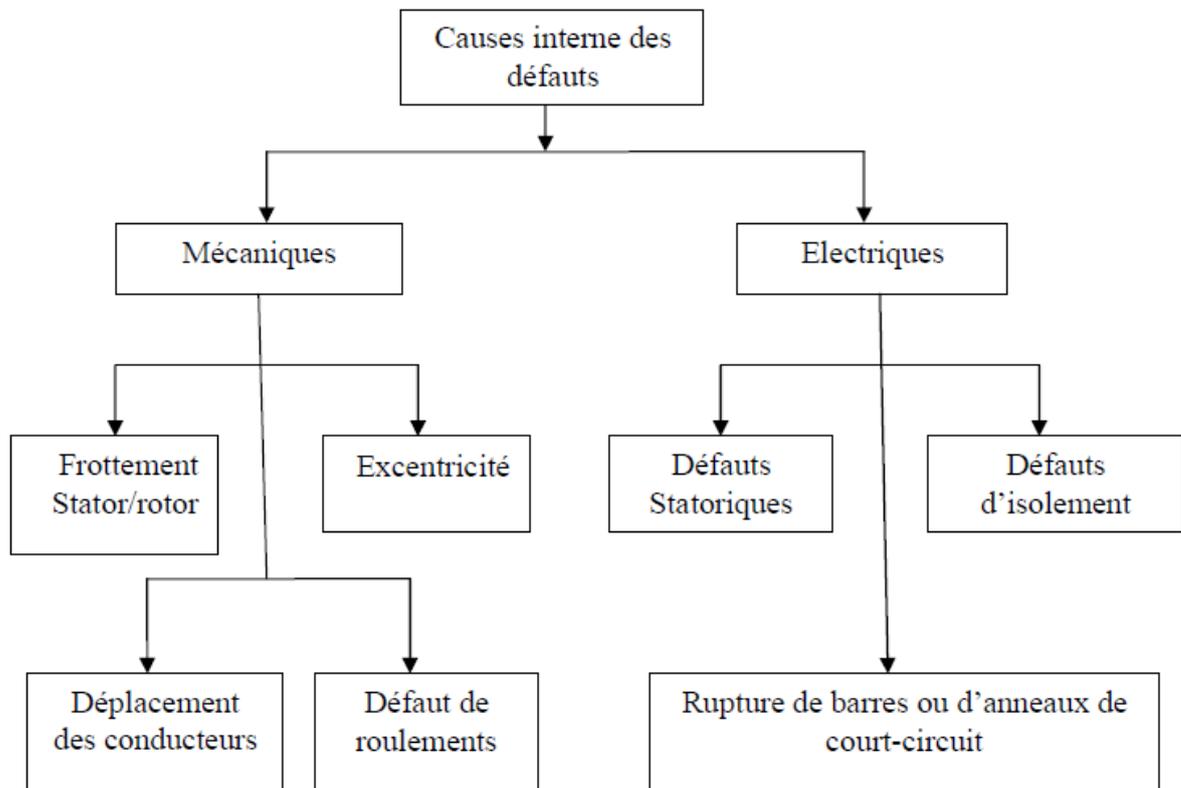
Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures I.6 et I.7

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

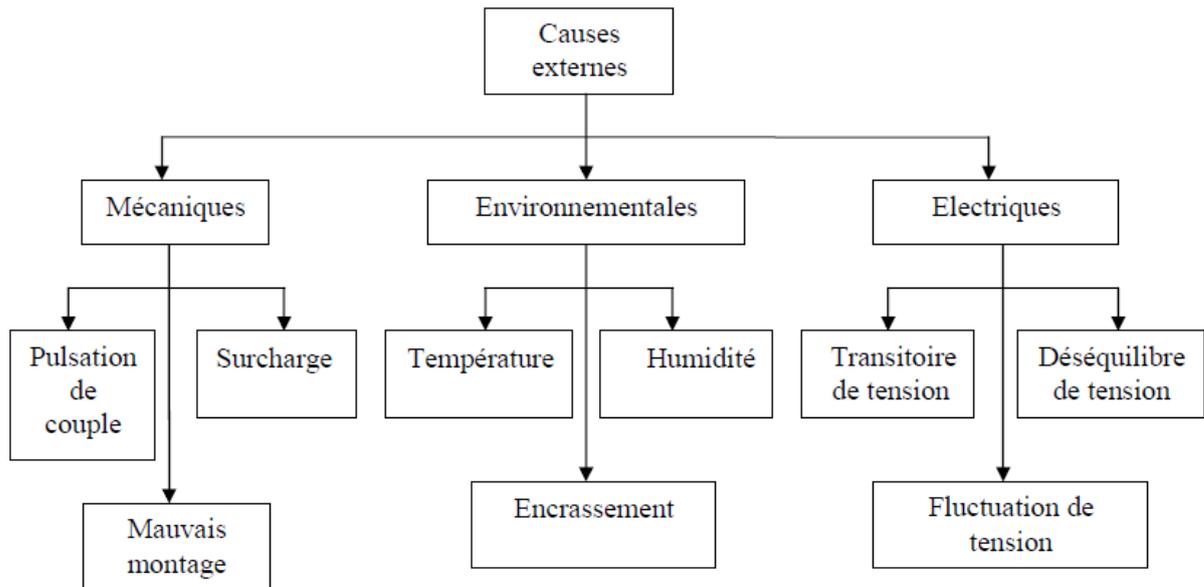
## Chapitre I : Présentation des moteurs asynchrones et leurs défauts

---

provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par de l'utilisation de la machine. D'après les organigrammes Figure I .6 et Figure I .7 les origines des défauts sont diverses Thermique, mécanique, électrique ou encore environnementale. A titre indicatif, les fréquents provoquent des courants élevés dans les barres rotoriques.



**Figure I-6** : Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.



**Figure I-7 :** Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

### I.7.1 Défauts statoriques :

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème thermique (surcharge), électrique (diélectrique), mécanique (bobinage,) et environnemental (agression,...etc.). Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit [Ond 06] :

#### I.7.1.1 Défauts d'isolant dans un enroulement :

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits.

En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...etc.) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or, les matériaux d'isolation ont une limite thermique, électrique et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce dernier se dégrade de manière prématurée ou accélérée, jusqu'à la cassure totale. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- Dégradation de l'isolant à la fabrication.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Vibrations mécaniques.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, ou à une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- Vieillesse naturelle des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.

- Fonctionnement dans un environnement sévère.

### I.7.1.2 Court-circuit entre spires :

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude sur les autres phases modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage. De ce fait, une dégradation accélérée des isolants, peut provoquer, ainsi, un défaut en cascade (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste, sensiblement, identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.

### I.7.1.3 Court-circuit entre phases :

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage. Cependant, les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit, proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre 2 phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont, totalement, déséquilibrés. Ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [Ond 06].

### I.7.1.4 Court-circuit phase-bâti :

Le bâti a, généralement, un potentiel flottant. Mais, pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel. A l'exception des effets capacitifs, le bâti prend, alors, le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit.

Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux. Il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas.

Cependant, le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, ce type de

défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [Ond 06].

### **I.7.2 Défauts de rotor:**

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie rotorique au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer des problèmes tels que :

thermique (surcharge), électromagnétique (excentricité), résiduel (déformation), dynamique (arbre de transmission) et mécanique (roulement). Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

#### **I.7.2.1 Ruptures de barres:**

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique par l'augmentation de l'amplitude des oscillations [Ond 06], qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation. Ceci engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la

détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres

cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît, rapidement, avec le nombre de barres cassées [NAÏ 00] - [ELK 92].

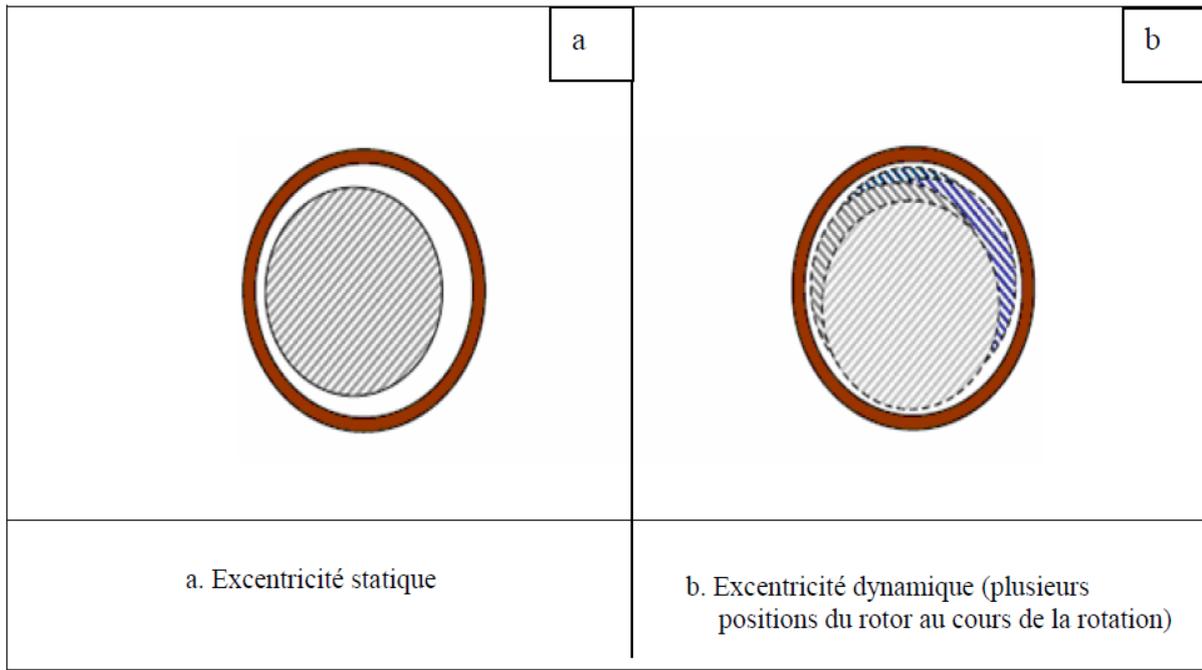
#### **I.7.2.2 Ruptures d'anneaux:**

La rupture d'une portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux [Ond 06]. Comme, il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...etc.) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

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

#### **I.7.2.3 Excentricité statique et dynamique:**

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor (Figure I-8).



**Figure I-8 :** Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique

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

Trois cas d'excentricité sont, généralement, distingués [Ond 06]:

- ❖ **Excentricité statique :** Le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- ❖ **Excentricité dynamique :** Le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- ❖ **L'excentricité mixte :** Il caractérise les 2 cas, précédemment, cités.

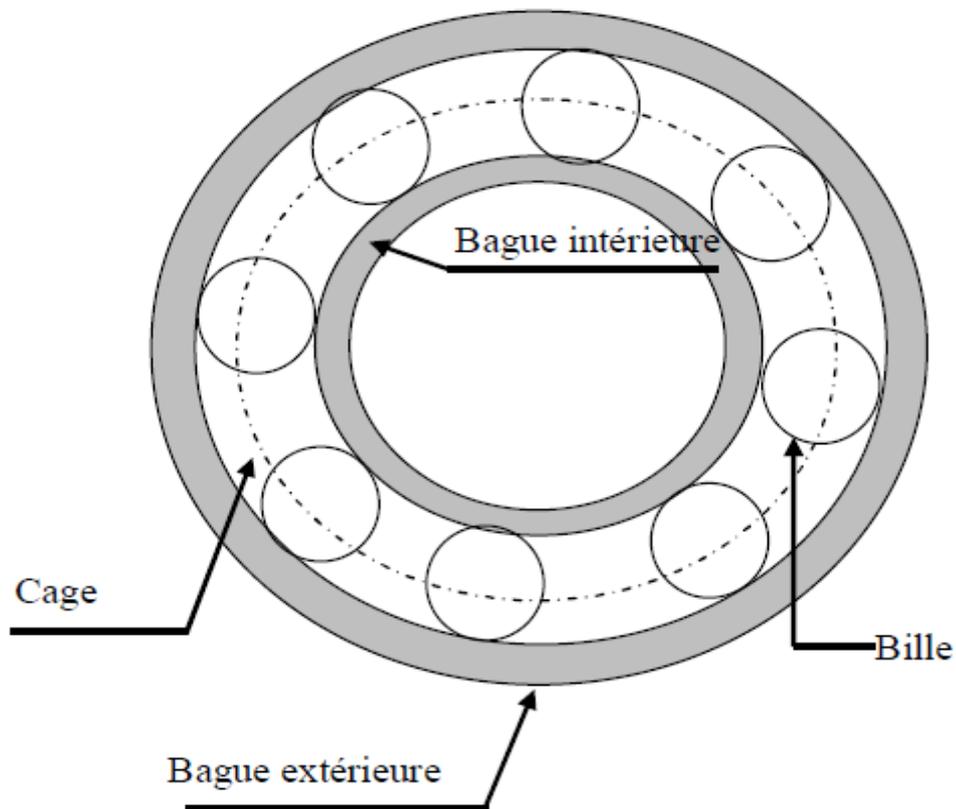
Ce défaut d'excentricité modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant [Met 08]. Ceci engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système.

Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [Ond06].

### I.7.3 Défaillances mécaniques:

#### I.7.3.1 Défauts des roulements:



**Figure I-9** : roulement à bille.

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. Dans l'article [Bon 93], l'auteur présente la plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement. Ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est, généralement, lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Les causes possibles sont :

- ❖ L'usure due au vieillissement.
- ❖ La température de fonctionnement élevée.
- ❖ La perte de lubrification.
- ❖ L'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement).
- ❖ Le défaut de montage.
- ❖ Les courants d'arbres (Shaft Current).

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- ❖ Des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- ❖ L'ondulation de leur surface de roulement.
- ❖ L'attaque des billes.

- ❖ La corrosion due à l'eau.
- ❖ Défaut de graissage, problème dû à la température.
- ❖ Décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge.

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas, le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur.

### I.7.3.2 Autres défaillances mécaniques :

Au stator, il n'y a pas de pièces mobiles donc à priori pas de défaillances mécaniques. Cependant, il peut apparaître des phénomènes d'oxydation liés à l'environnement de la machine et plus précisément au taux de salinité qui influe sur l'étanchéité et les contacteurs [Ond 06].

## I.8 Les conséquences des défauts:

Ces courants dans les barres rotoriques engendrent, par conséquent, des sur échauffements et des contraintes mécaniques conduisant à terme à des fissures puis à une cassure de barres. Par effet d'avalanche, la barre cassée accélère la rupture des barres adjacentes pouvant aboutir jusqu'à la destruction totale du rotor. De même, les efforts électrodynamiques que subissent les conducteurs des phases se traduisent par des vibrations mécaniques ayant pour effet de détériorer l'isolation. Sur le plan électrique, les fronts de tensions générés par les convertisseurs statiques accentuent le phénomène de décharges partielles et réduisent, par conséquent, la durée de vie de l'isolant. Quand aux origines environnementales, l'humidité et les produits corrosifs ou abrasifs sont les plus rencontrés [Leb 06].

Au niveau de l'entrefer, les défauts se manifestent par une excentricité statique, une excentricité dynamique ou une excentricité mixte. Le défaut d'excentricité statique est, généralement, dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Le défaut d'excentricité dynamique peut être causé aussi bien par une déformation du cylindre rotorique que par une déformation du cylindre statorique [Met 08]. L'excentricité mixte est une combinaison des 2 premiers.

Au niveau de la cage, les défauts se manifestent par la rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit. Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents,....etc.) à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures) [Leb 06].

Au niveau des paliers, nous pouvons citer le défaut de décentrage des flasques conduisant, généralement, à une excentricité statique alors qu'une détérioration de roulements à billes conduit, le plus souvent, à une excentricité dynamique.

## Chapitre I : Présentation des moteurs asynchrones et leurs défauts

Il est important de signaler que plusieurs études statistiques ont été menées dans le but de quantifier l'impact de chaque type de défaut sur la fiabilité de la machine et leurs pourcentages ont été cités dans plusieurs publications [All 88] - [Tho 95]. Les résultats obtenus restent quand même assez différents d'une étude à l'autre. Cependant, toutes les études convergentes pour classer les défauts de paliers comme étant les plus fréquents, suivis par les défauts statoriques et, en dernier, les défauts de cage rotorique [Leb 06].

### I.9 Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :

Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone sont assez nombreux mais les principaux sont résumés dans le tableau suivant :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>• Structure simple.</li><li>• Robuste et facile à construire.</li><li>• Coût réduit.</li><li>• Absence d'un système bagues balais.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Non découplage naturel.</li><li>• Non linéarités.</li></ul>

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients de la machine asynchrone

### I.10 Etudes statistique des défaillances de la machine asynchrone :

Une étude statistique menée par [BON 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 I.10 en présentant le pourcentage de défauts susceptibles d'affecter ces machines de grande puissance.

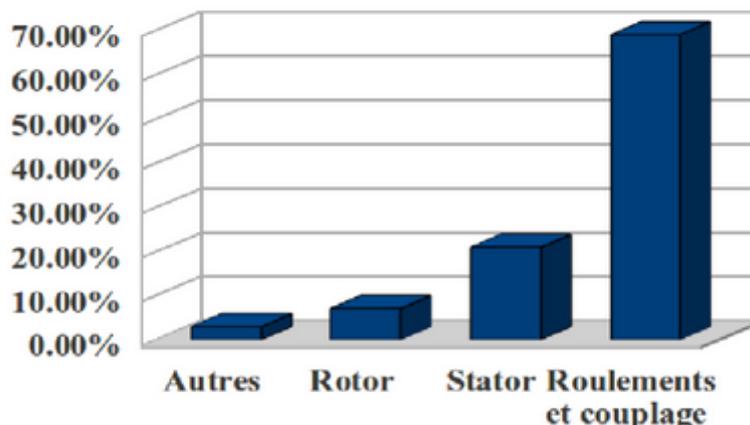
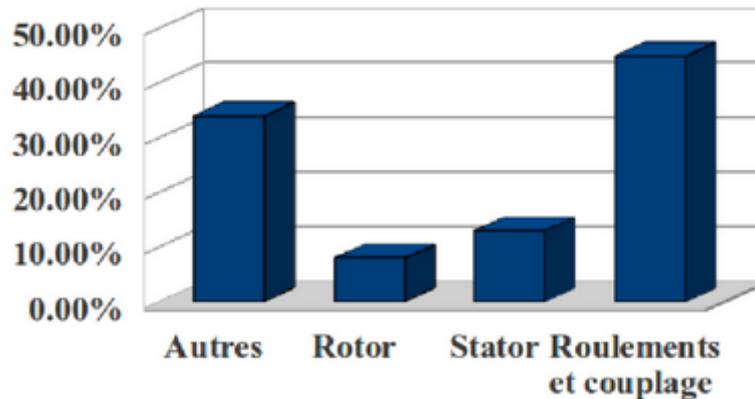


Figure I-10 : Pourcentage des défauts (2008)

## Chapitre I : Présentation des moteurs asynchrones et leurs défauts

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 I-11** : Pourcentage des défauts (1995)

En comparant ces résultats à ceux issus de publications plus anciennes, données par [THO 95] sur des machines de même type (100KW à 1MW), nous remarquons que, 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

vieillessement 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 de ces machines et que leurs origines peuvent être variées [ THO 97 ]. 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.....

### **II-11 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons décrit les éléments de constitution de la machine asynchrone qui nous facilitent la compréhension des différents types de défauts qui peuvent apparaître dans les moteurs asynchrones et en particuliers les défauts rotoriques .

# **Chapitre II**

## **Synthèse des techniques de diagnostic**

---

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

---

### II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous décrivons le système étudié qui se limite, dans notre cas, à la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Nous présentons des méthodes de diagnostic actuellement appliquées à la machine asynchrone et divers outils issus des techniques de traitement du signal pouvant être utilisés pour la détection d'un défaut électrique ou mécanique. Pour finir, nous discutons des techniques à haute résolution et Techniques Temps-Fréquence et Temps-échelle.

### II.2 LA Définition et objectif du diagnostic :

#### II.2.1 Définition :

La définition du diagnostic selon la norme AFNOR et CEI stipule que : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test [Belhamadi, 14]».

Cette définition résume les deux tâches essentielles du diagnostic :

- Observer les symptômes de la défaillance ;
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur les observations.

#### I.2.2 Objectif du diagnostic :

L'objectif d'un système de diagnostic est de prévoir l'apparition d'un défaut le plus rapidement possible et le plus précisément possible. Pour pouvoir expliquer ce principe avec plus de précision, nous allons tout d'abord définir ce que nous entendons par défaut, puis nous rappellerons les fonctions du diagnostic telles que la détection, la localisation, et l'identification des défauts [Khenfer, 15].

### II .3 Méthodes de diagnostic:

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses mais on peut les classer suivant deux axes

- L'usage des outils mathématiques qui permettent de modéliser les systèmes, les causes et les symptômes de défaillance, pour faciliter les démarches inductives et déductives, qui relèvent du domaine des méthodes de diagnostic interne
- L'usage des méthodes capables de reproduire sous forme informatique, les modes de raisonnement de l'homme. Ces derniers sont basés sur la discipline de l'intelligence artificielle et sont du domaine des méthodes de diagnostic externe.

On peut classer les méthodes de diagnostic en premier lieu dans les deux grandes familles [Benkaci, 11] :

- les méthodes internes et externes.

---

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

---

- les méthodes inductives et déductives

### II.3.1 Méthodes externes :

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine acquise par apprentissage, ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux que fournit la machine lors de son fonctionnement, les signaux utilisables peuvent être [Maghraoui, 05] : Flux d'entrefer, puissance instantanée, courant statorique et vibration acoustique

### II .3.2 Méthodes internes :

La connaissance du modèle permet de décrire les relations de cause à effet, ces méthodes requièrent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèle mathématique, ces méthodes utilisent un modèle pour reproduire le comportement du système [Maghraoui, 05]. On distingue ces méthodes suivant le modèle utilisé.

- Modèle de simulation : les modèles analytiques utilisés dans ce mode sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert.
- Observateurs : un module capable d'engendrer une approximation du vecteur d'état est appelé : estimateur d'état ou observateur d'état. Le modèle est décrit sous une représentation de variables d'état. L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic.
- Estimation paramétrique : c'est la détermination des vecteurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système.
- Modélisation des signaux : dans cette méthode, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts, l'analyse spectrale est très utilisée pour détecter des défaillances dans les machines électriques

### II .3.3 Méthodes inductives :

Elles correspondent à une approche montante ou recherche en avant, il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système, ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leur combinaison afin de trouver le défaut [Belhamdi, 05].

### II .3.4 Méthodes déductives :

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes, la méthode déductive doit trouver quels sont les effets dans le système. Une vérification des effets trouvés par rapport aux effets possibles permet de confirmer l'existence d'un défaut. Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou arrière) soit une combinaison de raisonnement (avant et arrière) dans ce dernier cas le raisonnement appelé mixte ou avant arrière [Belhamdi, 05].

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

---

### II.4 Présentation des signatures de la machine asynchrone :

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, couple et vitesse).

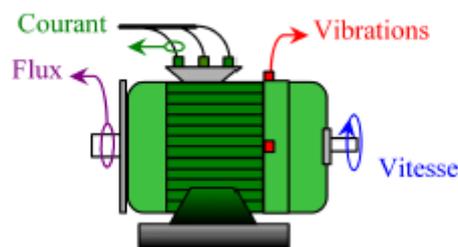


Figure II-1 : Les points de mesures [Didier, 04]

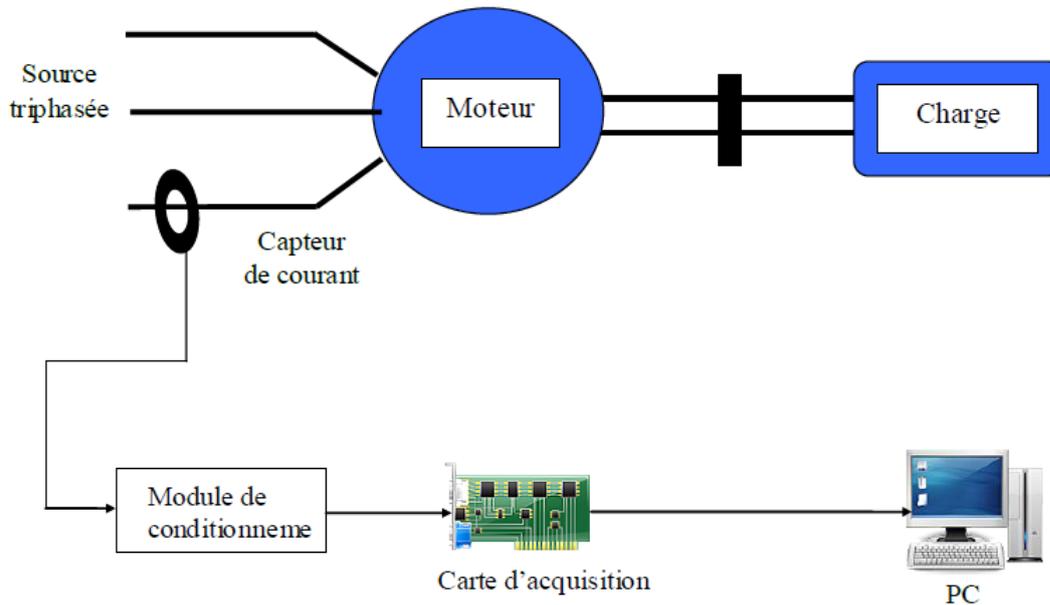
#### II.4.1 Approche signal :

##### II.4.1.1 Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques :

Cette méthode est un outil puissant pour détecter la présence des défauts mécaniques et électriques. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes, parce qu'elle ne demande ni l'introduction d'un capteur au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant mais seulement un capteur de courant (sonde à effet de hall ou transformateur de courant) qui donne une image sur le courant de phase statorique. C'est cette méthode de diagnostic qui sera utilisée comme outil de diagnostic dans la recherche des différents défauts dans ce travail. Cette méthode est basée sur la comparaison entre le spectre de courant de stator sain et le spectre de courant de stator défectueux. Les nouvelles composantes de fréquence apparaissent lorsque le moteur a souffert d'un défaut. La technique d'analyse spectrale du courant de stator (MCSA) est l'une des méthodes utilisées pour diagnostiquer de manière précise différents défauts dans les moteurs à induction [Bessous, 15]. Dans le cas d'une répartition non sinusoïdale de la Fmm en plus du fondamental apparaît des harmoniques de l'encoche rotorique, cas d'un moteur à cage [Khatraoui,17]. Pour montrer le principe de cette méthode, on considère le cas d'une asymétrie rotorique d'un moteur asynchrone, l'existence de ce défaut engendre un courant de défaut dans le rotor. Ce courant produit une Fmm pulsatoire dont la fréquence d'ondulation est ( $f_s$ ), cette Fmm produit dans l'enroulement statorique une harmonique à

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

deux composantes, la première ayant la fréquence  $(1 - 2s)f$  et la deuxième ayant la fréquence  $(1 + 2s)f$

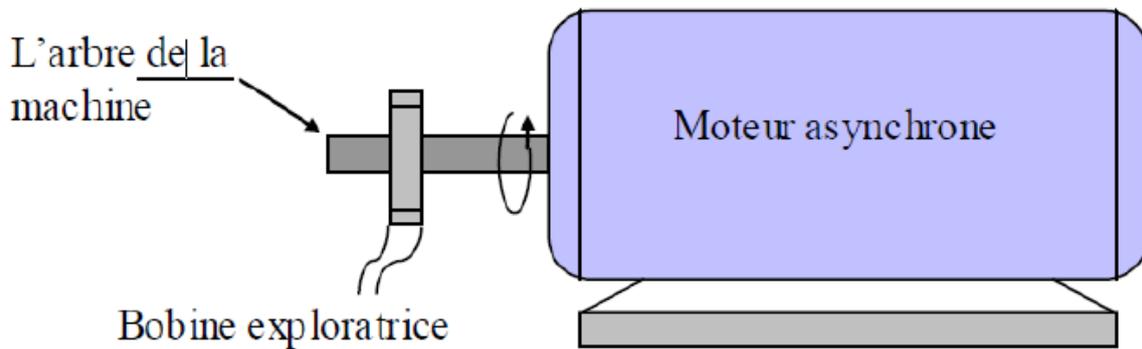


**Figure II-2** Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques

### II.4.1.2 Diagnostic par flux :

La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator et du rotor ce qui affecte la répartition des du champ magnétique dans et hors la machine. Plusieurs auteurs se sont penchés à l'exploitation du flux axial. En fait, si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de cette tension induite, peut être exploité pour détecter les différents défauts statoriques ou rotoriques [Benedjai, 15]. .

L'analyse spectrale de la tension induite peut être utilisée pour identifier les différentes asymétries et défauts. Le contenu d'harmoniques des flux de fuites axiaux du stator et du rotor est directement en relation avec les harmoniques contenus respectivement dans les courants du stator et du rotor. La conséquence directe d'un défaut est l'augmentation du flux de fuite axial. Cette augmentation du flux est la condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite axial comme une technique de diagnostic, c'est-à-dire ce dernier doit avoir une valeur importante [Khatraoui, 17].



**Figure II.3:** Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial [Khatraoui, 17].

### II.4.1.3 Diagnostic par mesure des vibrations :

Les signaux de vibrations détectés contiennent des informations essentielles sur l'état de la machine. L'analyse spectrale de ces signaux nous renseigne sur les différents défauts qui sont à l'origine de ces vibrations [Khatraoui, 17]. Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques, rotoriques et l'excentricité). Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode [Benedjai, 15].

### II.4.1.4 Diagnostic par couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient major de cette méthode [Benedjai, 15].

### II.4.2 Approche système :

Son principe repose sur un prétraitement du signal et sur sa classification. Après l'adaptation du signal selon l'application désirée (soit par un descripteur, un espace de représentation, une distance...), la classification se fait, en général, soit selon la sévérité du défaut s'il y en a un seul ou par le type de défaut s'il y en a plusieurs. La procédure de classification s'exprime en termes de séparation des classes. Elle est déterminée par un espace de représentation où les classes sont maximalelement séparées et une règle de décision utilisant au mieux cette séparation. La procédure de classification est constituée d'un certain espace de représentation des données et d'une règle de décision qui affecte un individu à une classe à

---

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

---

l'aide d'une fonction discriminante (par exemple une distance  $d$ ). Ici, l'espace de représentation peut être le domaine temporel, fréquentiel, temps-fréquence, doppler-retard, temps-échelle(ou l'espace de paramètres issus d'une modélisation autorégressive (AR) [Lebaroud, 06].

### II.5 Techniques d'analyse des signaux : MCSA (Motor Current Signature Analysis) :

La méthode est basée sur l'examen du courant statorique et parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux.

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

L'analyse d'un signal donc est une source d'informations. En effet, la mesure d'un signal indique des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. La variation de ces signaux peut être reliée aux défauts.

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].

Une étude sur les fréquences caractéristiques des principaux défauts est présentée dans ce qui suit :

#### II.5.1 Défaut de barres rotoriques :

La rupture de barres d'une machine asynchrone est un des défauts le plus couramment étudié en laboratoire en raison à sa simplicité de réalisation mais non nécessairement le plus probable. Ce défaut induit des modifications dans les courants du stator et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal [ONDEL, 06], [BENDIABDELLAH, 07].

En effet, lors de l'apparition d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produits et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences :

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

Avec  $f_b, f_s$  : sont respectivement les fréquences du fondamental et du défaut,  $g$  : le glissement  
et  $k = 1, 2, 3, \dots$

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

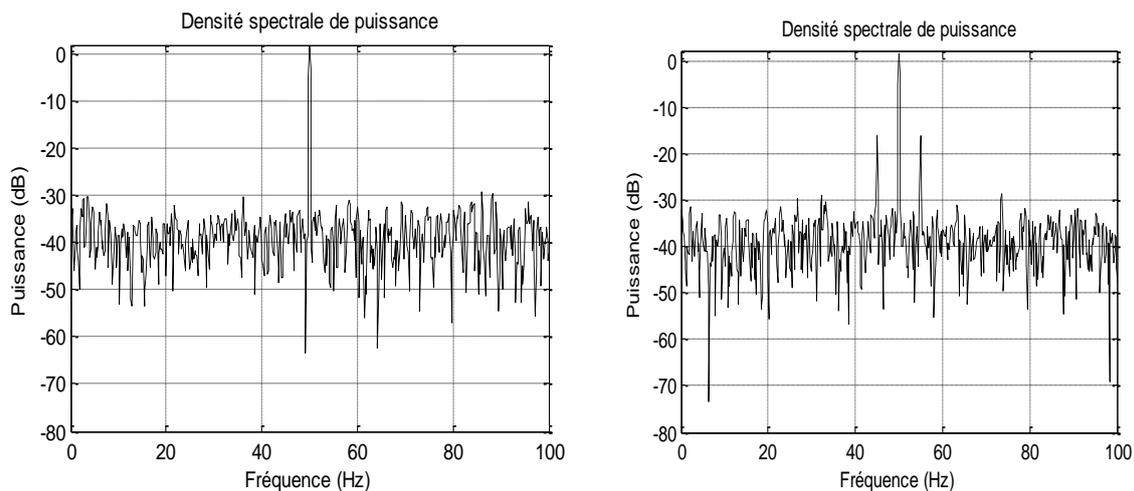
De plus, les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défailtantes [BENBOUZID, 00].

À titre d'exemple, la figure II.4. donne une représentation de la densité spectrale de puissance du courant statorique dans le cas d'un moteur sain et en présence d'une rupture d'une barre

rotorique. Les fréquences caractéristiques du défaut de barres sont clairement visibles de part et d'autre du fondamental sur le spectre résultant.

L'analyse du courant statorique pour les défauts de barres ne donne généralement qu'une évaluation de l'état du rotor. En effet, [BENBOUZID, 00] a signalé que les composantes correspondantes au défaut de barres n'apparaissent pas sur le spectre du courant statorique si les barres cassées sont distantes de  $\frac{\pi}{2}$  radians. Aussi, des résultats expérimentaux ont démontrés que l'amplitude des harmoniques caractéristiques du défaut de barres diminue considérablement pour une cage possédant des barres inclinées.

En plus, [BENBOUZID, 00] a indiqué que lorsque le rapport entre l'amplitude des fréquences caractéristiques du défaut de barres est l'amplitude du fondamental est supérieur à 50 dB, le rotor est considéré comme sain.



**Figure II.4 :** Densité spectrale de puissance du courant statorique pour un moteur sain et en présence de défaut

### II.5.2 Défaut d'excentricité :

La variation de la longueur de l'entrefer entraîne des variations dans la densité du flux d'entrefer.

Les enroulements statoriques sont électriquement modifiés, ce qui entraîne des effets dans le spectre des courants.

L'identification du type d'excentricité est possible, par la visualisation dans ce spectre, des composantes fréquentielles suivantes :

- Excentricité statique :

$$f_{ex,s} = f_s \left( 1 \pm \frac{n \cdot N_S (1-g)}{P} \right) \quad (II.2)$$

- Excentricité dynamique :

$$f_{ex,d} = f_s (1 \pm 2 \cdot n(1 - g)) \quad (\text{II.3})$$

Excentricité mixte :

$$f_{ex,m} = f_s \left( 1 \pm \frac{n \cdot (1 - g)}{p} \right) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

P : nombre de paires de pôles, Nr : le nombre de barres rotoriques et  $n = 1, 2, 3 \dots$

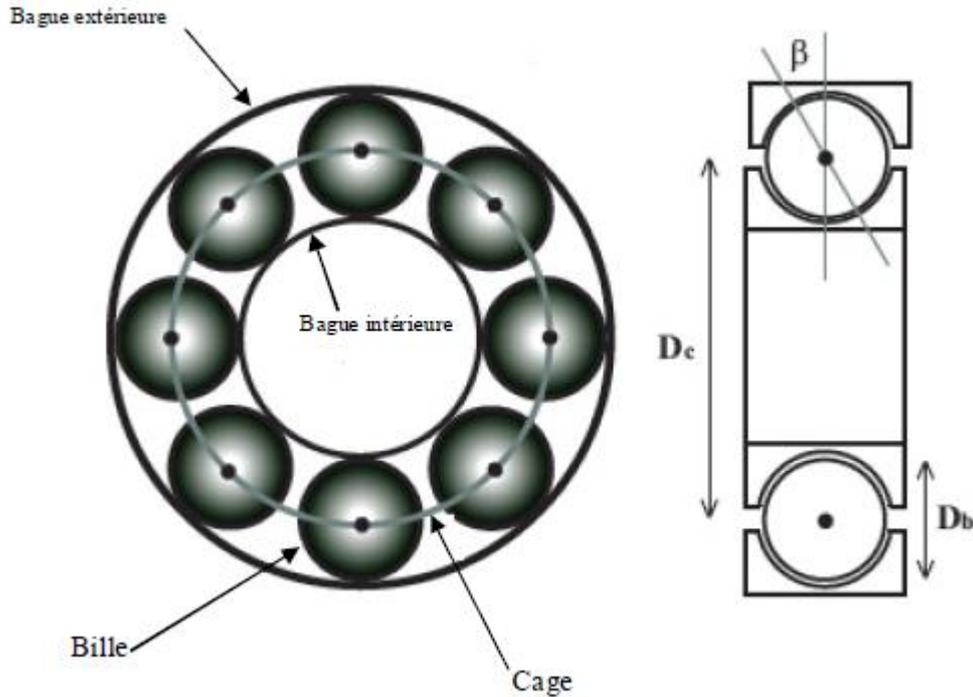
### II.5.3 Défaut de roulements :

Les roulements sont constitués de deux bagues l'une intérieure et l'autre extérieure, des billes et de la cage qui assure une équidistance entre les billes. Le nombre de billes est défini par  $N_b$  et leur diamètre par  $D_b$ . Le diamètre de la cage est désigné par  $D_c$ . Le point de contact entre une bille et la bague est caractérisé par l'angle de contact  $\beta$  [BLÖDT, 04]. Cette géométrie est représentée sur la figure II.5.

Les principaux défauts de roulements sont classés par référence à l'élément correspondant affecté par le défaut :

- Défaut de la bague externe.
- Défaut de la bague interne.
- Défaut de bille.

Le défaut est caractérisé par un trou sur l'élément correspondant. L'étude de ce type de défaut se base sur la création d'un défaut artificiel sur un des éléments des roulements. Par contre, dans le cas réel une combinaison des trois défauts cités est plus probable [BLÖDT, 04].



**Figure II.5** : Géométrie d'un roulement à billes

Pour chaque type de défaut de roulement, une fréquence caractéristique est associée. Cette fréquence est fonction de la géométrie des roulements et de la fréquence mécanique du rotor  $f_r$ .

L'expression de cette fréquence est donnée pour chaque type de défauts par [BLÖDT, 04] :

- Bague externe :

$$f_e = \frac{N_b}{2} f_s \left( 1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (\text{II.5})$$

- Bague interne :

$$f_i = \frac{N_b}{2} f_s \left( 1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right) \quad (\text{II.6})$$

- Bille :

$$f_{bi} = \frac{D_c}{D_b} f_s \left( 1 - \frac{D_b^2}{D_c^2} \cos^2 \beta \right) \quad (\text{II.7})$$

On peut observer d'après les équations précédentes que les informations spécifiques concernant la géométrie des roulements sont nécessaires pour le calcul des fréquences caractéristiques de chaque défaut.

Cependant, les fréquences caractéristiques des défauts de bagues intérieures et extérieures peuvent être approximées pour les roulements dont le nombre de billes est compris entre six et douze par [BENBOUZID, 00] :

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

---

- Bague externe :

$$f_e = 0,4N_b f_r \quad (\text{II.8})$$

- Bague interne :

$$f_i = 0,6N_b f_r \quad (\text{II.9})$$

Enfin, les fréquences du défaut de roulements définies par  $f_{dr}$  se manifestent sur le spectre du courant statorique aux fréquences [BENBOUZID, 99] :

$$f_{dr} = |f_s \pm m f_{e,i,bi}| \quad (\text{II.10})$$

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

### II.5.4 Défaut statorique ;

Dans [ONDEL, 06], l'auteur note 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.

### II.6 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.

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 des ces méthodes est présentée dans le tableau II.1. Deux approches peuvent être adoptées, à savoir les techniques paramétriques et les techniques non paramétriques.

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

Méthodes non paramétrique	Méthode d'analyse	Avantages	Inconvénients
	- 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 - Transformée en ondelettes	- Meilleure résolution temps-fréquence. - Élimination supplémentaire du bruit. - Élimination des termes d'interférences. - Fenêtre d'analyse à largeur variable. - Meilleure résolution temps/fréquence.	- Temps de calcul prohibitif. - Interprétation difficile des spectres. - Délocalisation des fréquences. - Temps de calcul prohibitif. - Interprétation difficile des résultats.
Méthodes paramétrique	- Décomposition harmonique de Pisarenko	- Algorithme simple. - Temps de calcul réduit.	- Sensible au bruit. - Inadaptée aux signaux non stationnaires.
	- 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.

**Tableau II-1** : Synthèse des techniques avancées du traitement du signal

---

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

---

### II.6.1 Méthodes non paramétrique :

#### II. 6.1.1 Transformation de Fourier discrète "TFD" :

C'est une méthode classique d'estimation de la densité spectrale de la puissance d'un signal. La transformée de Fourier discrète, d'une suite finie de  $P$  échantillons  $\{p_s(0), p_s(1), \dots, p_s(P-1)\}$  se calcule grâce à la relation [Did 04]:

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p_s(n) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \quad (\text{II.11})$$

Pour  $k=0, \dots, N-1$

Où le terme  $N$  représente le nombre de points de calcul de la TFD

#### II. 6.1.2 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, 04b]. 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, 09a].

#### II. 6.1.3 Transformée de Fourier rapide "TFR" :

C'est une transformée basée sur un algorithme de calcul rapide de la TFD. 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 TFD, de [Did 04] :

$$\text{Gain} = \frac{N}{\log_2(N)} \quad (\text{II.12})$$

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

#### II. 6.1.4 Transformée de Fourier à court terme :

La localisation des signaux non-stationnaires dans le temps est généralement réalisée par la

---

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

---

transformée de Gabor ou la transformée de Fourier à court terme (STFT en anglais pour Short Time Fourier Transformé). 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, 09c].

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].

### II. 6.1.5 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].

### II. 6.1.6 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

---

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

---

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 signal 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].

### II.6.2 Méthodes paramétrique :

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, 04b].

Il existe plusieurs méthodes spectrales utilisées, qualifiée de méthodes à haute résolution, basée 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 développées comme suit :

#### II.6.2.1 Décomposition harmonique de Pisarenko :

La décomposition harmonique de Pisarenko (PHD en anglais pour Pisarenko Harmonic Décomposition) est considérée comme la première méthode d'estimation de fréquence et a été proposé 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

---

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

---

principe des sous-espaces du signal et du bruit, et elle a contribué au développement de nombreuses méthodes comme MUSIC et ESPRIT.

### II.6.2.2 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, 07b]. 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].

### II.6.2.3 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 échelonnées dans le temps. Cette condition se pose naturellement pour les signaux à temps discret.

### II.6.2.4 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.

## II.7 Techniques statistiques :

Les techniques statistiques les plus populaires sont les techniques de lissage (tel que le lissage exponentiel) et les techniques d'analyse des séries temporelles tels que les modèles de régression, notamment les modèles AR (Auto-Regressive) et ARMA (Auto-Regressive

---

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

---

Moving Average models). Ces techniques sont aussi classées sous la catégorie analyse par tendance. Ces techniques présentent l'intérêt d'être simples à programmer. Cependant, elles supposent que la dégradation du système est monotone, et ne permettent pas d'intégrer les variations des conditions d'utilisation du système : l'évolution de la dégradation à venir doit être similaire à celle qui a été apprise. Le paragraphe suivant décrit des techniques d'analyse de séries temporelles.

### II.8 Analyse statistique des signaux :

Les indicateurs statistiques évaluent l'état de fonctionnement global des équipements mais ne localisent pas le défaut. Ce sont des méthodes utiles à la surveillance. De nombreux indicateurs existent dans la littérature et certains sont le résultat de la combinaison de plusieurs d'entre eux, [Alain, 90] [Alain, 03], c'est pourquoi nous ne présenterons ici que les plus courants.

#### II.8.1 Le Kurtosis :

Le Kurtosis est un paramètre statistique permettant d'analyser les répartitions d'amplitude dans un signal temporel. Le Kurtosis est défini comme le rapport du moment d'ordre 4 de la distribution temporelle sur le carré de la puissance [Alain, 90].

#### II.8.2 Facteur de crête :

Le facteur de crête FC correspond au rapport entre la valeur crête d'un signal (en valeur absolue) et sa valeur efficace [Alain, 90].

### II.9 Techniques à haute résolution :

Les méthodes, dites à haute résolution (HR) fréquentielle, restent en pratique largement sous employées par rapport aux méthodes plus classiques qui reposent, comme nous l'avons vu précédemment, sur le calcul de la transformée de Fourier. Les principaux obstacles à l'utilisation plus large des méthodes HR sont essentiellement liés au choix des paramètres libres (en particulier l'ordre du modèle) et à la dégradation des performances de ce type de méthodes en présence de signaux complexes (grand nombre de composantes, très proches et d'amplitudes très différentes). Ce type d'analyse est utilisé lorsque le nombre d'échantillons du signal est relativement faible (nombre de points compris entre quelques dizaines et quelques centaines). En effet, pour un nombre de points fixé, les méthodes hautes résolutions permettent d'obtenir une meilleure résolution fréquentielle par rapport à une analyse par transformée de Fourier classique. Notons aussi que les méthodes à haute résolution requièrent des hypothèses sur la nature du bruit et sur le modèle du signal.

### II.10 Techniques Temps-Fréquence et Temps-échelle :

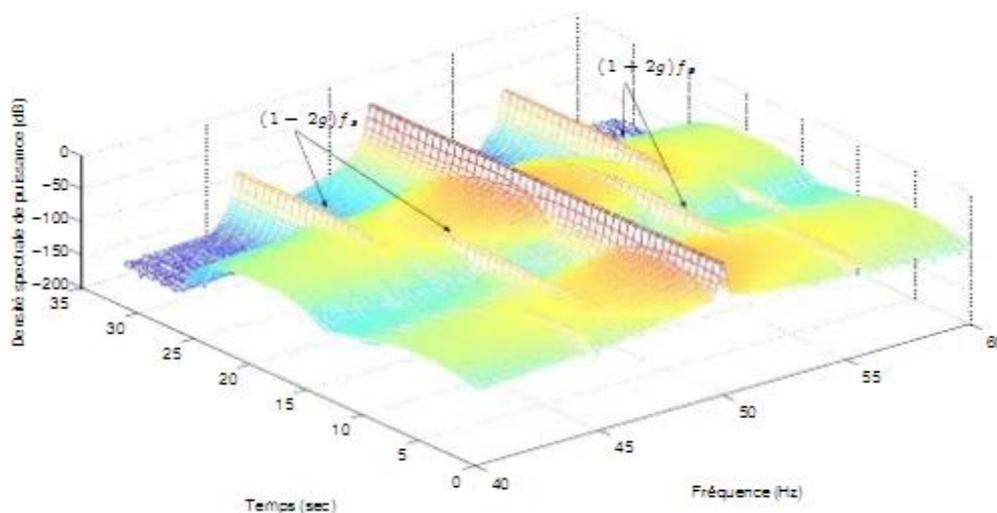
La non-stationnarité des signaux est une propriété très courante mais difficile à maîtriser. Si nous prenons le cas d'une machine asynchrone, certaines utilisations obligent cette dernière à

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

fonctionner sous des couples de charges variant très souvent dans le temps. C'est pour cette raison que des techniques de traitements temps-fréquence et temps-échelle ont vu le jour.

### II.10.1 Temps-Fréquence :

Le courant du moteur asynchrone peut être assimilé à un signal non-stationnaire dans certaines applications (variation aléatoire du couple de charge modifiant la valeur efficace du courant absorbé). De plus, nous savons que les techniques qui utilisent la transformée de Fourier ne sont pas suffisantes pour représenter ce type de signal. 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 [Flandrin, 93] [Boashash, 90]. Par exemple, la transformation de Wigner-Ville permet d'obtenir une représentation temps-fréquence permettant d'effectuer un diagnostic relativement précis de l'état du système analysé. Cette transformation est une fonction réelle qui définit une distribution d'énergie dans le plan temps-fréquence. Le temps de calcul d'une telle représentation peut être prohibitif et l'interprétation de l'image résultante est souvent difficile, ce qui rend la détection de défaut complexe. C'est pour cette raison qu'en 1999, une méthode d'analyse temps-fréquence adaptative pour détecter les barres rotoriques cassées et les défauts de roulements a été proposée. L'idée clé dans cette méthode est de transformer le courant du moteur en une représentation temps-fréquence pour capturer la variation dans le temps des composantes spectrales comme nous le montre la figure II.6. 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 [Yazici, 99].



**Figure II.6:** Représentation temps-fréquence du courant statorique lors d'une variation du couple de charge (Résultats de simulation avec une barre cassée)

---

## Chapitre II : Synthèse des techniques de diagnostic

---

### II.10.2 Temps-échelle :

Ce mode d'analyse 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 [Da Silva, 97]. A 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 signal 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. C'est par conséquent un outil adéquat pour la surveillance et le diagnostic de défaut des machines électriques lorsqu'il est indispensable de les utiliser à vitesse variable [Wang, 96].

### II.11 Conclusion :

Nous avons montré que les principaux éléments de constitution d'une machine asynchrone triphasée 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 la continuité de la présentation, nous avons abordé les techniques conventionnelles de diagnostic, qui utilisent la transformée de Fourier rapide, suffisent. Cependant, il s'avère que lorsque le signal à analyser est non-stationnaire, les transformations temps-fréquence et temps-échelle fournissent un outil plus adapté pour la détection et le diagnostic de défauts.

En effet, ces techniques montrent quelques avantages dans des applications particulières où la vitesse rotorique change rapidement.

# **Chapitre III**

## **Diagnostic par Périodogramme**

### III-1 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 statorique, 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 en même temps.

À cause de ce problème de résolution, la DSP trouve des difficultés dans la détection des défauts naissants 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.

### III.2 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  $f_0$ ) [NAV07]:

$$x_T(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{j(2\pi n f_0 t + \phi_n)} \quad (\text{III.1})$$

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:

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

Si  $TF(f) = A(f) e^{j\phi(f)}$ , alors :

$$x_T(t) = \int_{-\infty}^{\infty} TF(f) e^{j2\pi ft} df \quad (\text{III.3})$$

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

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

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

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

et une phase :

$$\phi_{TF_x(f)} = A \tan\left(\frac{\text{Im}(TF_x(f))}{\text{Re}(TF_x(f))}\right) \quad (\text{III.6})$$

### III.3 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 :

#### III.3.1 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  $F_e$  [NAV07].

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

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.

### III.3.2 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 [NAV07].

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 [NAV07]. 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.

### III.3.3 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  $T$  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 [BEN04].

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  $\Pi_T$  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 [BEN04a]. 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  $\Pi_T$ . 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 :

$$x_p(t) = \omega_T(t)x_T(t).$$

### III.3.4 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 [BEN04] :

- 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 :

$$h(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

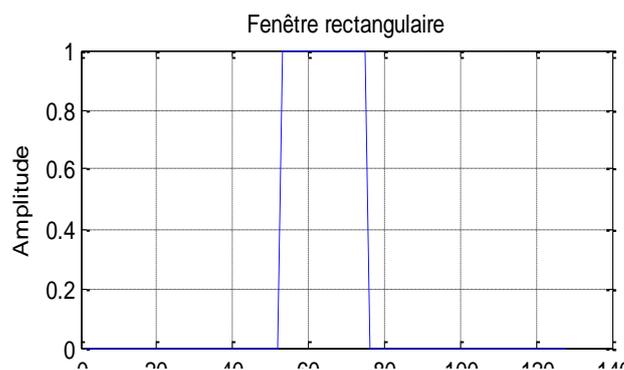
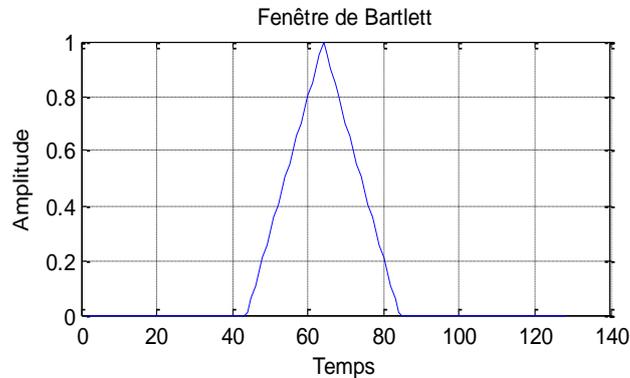


Figure III-1: Représentation de la fenêtre rectangulaire

#### b/ Fenêtre de Bartlett :

La fenêtre de Bartlett, ou fenêtre triangulaire est exprimée par :

$$h(t) = \begin{cases} 1 - 2 \left| \frac{t}{T} \right| & \text{pour } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

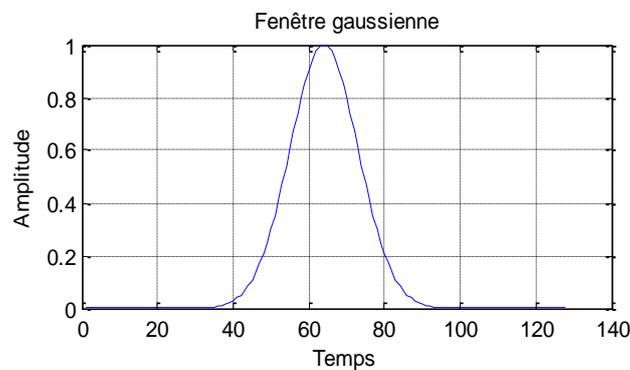


**Figure III-2:**Représentation de la fenêtre de Bartlett

### c/ Fenêtre Gaussienne :

La fenêtre de Gauss est exprimée par :

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

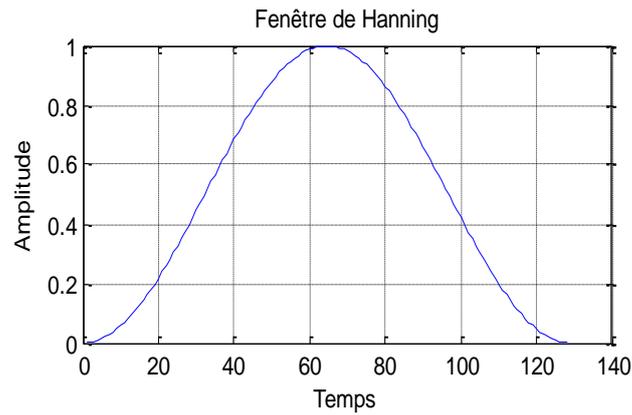


**Figure III-3:**Représentation de la fenêtre gaussienne

### d/ Fenêtre de Hanning :

La fenêtre de Hanning est exprimée par :

$$h(t) = \begin{cases} 0,5 \left( 1 - \cos \left( 2\pi \frac{t}{T} \right) \right) & \text{pour } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

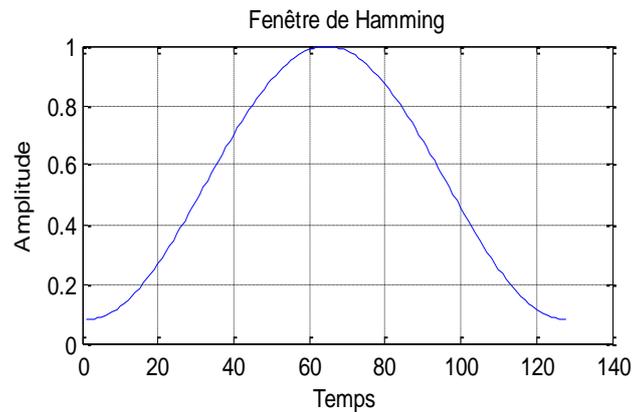


**Figure III-4:**Représentation de la fenêtre de Henning

### e/ Fenêtre de Hamming :

La fenêtre de Hamming est exprimée par :

$$h(t) = \begin{cases} 0,54 - 0,46\cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) & \text{pour } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

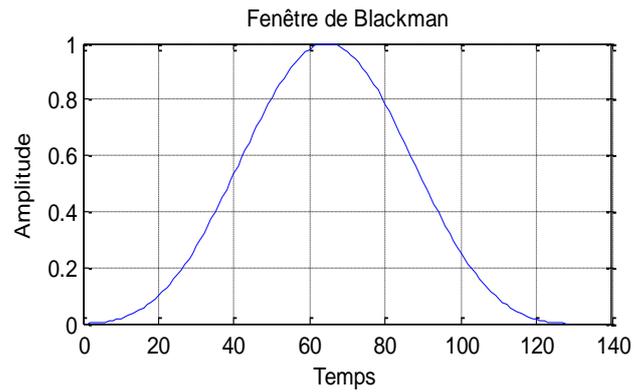


**Figure III-5:**Représentation de la fenêtre de Hemming

### f/ Fenêtre de Blackman :

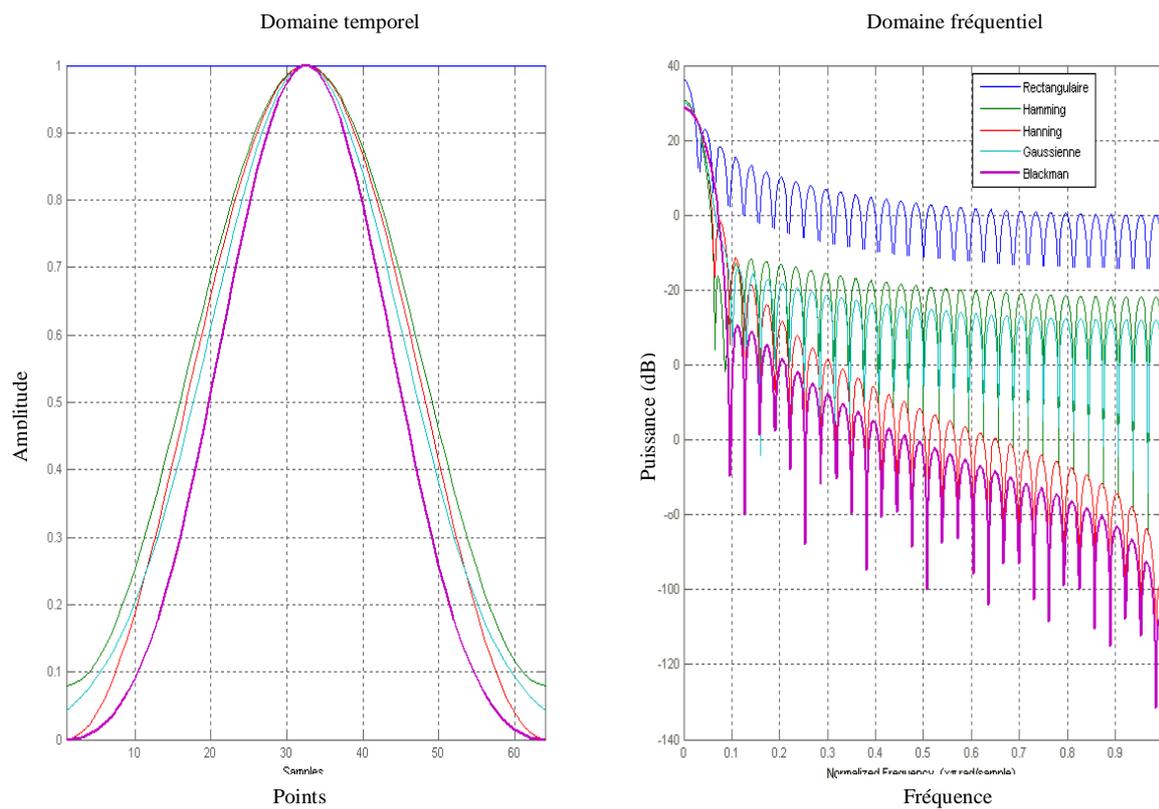
La fenêtre de Blackman est exprimée par :

$$h(t) = \begin{cases} 0,42 - 0,5\cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) + 0,8\cos\left(4\pi \frac{t}{T}\right) & \text{pour } 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$



**Figure III-6:**Représentation de la fenêtre de Blackman

La figure III.7 présente les différentes fenêtres de pondération sur le même tracé spectral. Cette représentation permet de voir la différence entre les fenêtres de pondération



**Figure III-7:**Représentation des différentes fenêtres de pondération

### III.3.5 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 :

$$\Delta f = \frac{F_e}{N} \quad (\text{III.15})$$

$N$  : étant le nombre d'échantillons (sur lequel on a calculé 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 Transformée de Fourier Discrète (TFD) [BEN04]:

$$TFD_x(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x_p(nT) e^{-j2\pi f \frac{n}{F_e}} \quad (\text{III.16})$$

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

$$TFD_x(k\Delta f) = \sum_{n=0}^{N-1} x_p(nT) e^{-j2\pi n \frac{k}{N}} \quad (\text{III.17})$$

### III.3.6 Calcul de la transformée de Fourier rapide :

Le calcul de la TFD ne pose pas à priori de problèmes majeurs, pour obtenir une valeur particulière de la TFD il faut effectuer  $2N$  multiplications ( $N$  multiplications pour la partie réelle et  $N$  multiplications pour la partie imaginaire) et  $2(N-1)$  additions. Pour obtenir les  $N$  valeurs de la TFD il faut donc  $2N^2$  multiplications et  $2(N-1)N$  additions. Le temps de calcul est d'autant plus long que le nombre de points d'acquisition est élevé, et on arrive très vite à des temps de calcul très longs. 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 ramenant le nombre de multiplications à :  $Nn$ . Ces algorithmes portent le nom de FFT (Fast Fourier Transform). L'algorithme le plus connu est celui de Cooley-Tuckey. Le nombre de multiplications est donc divisé par  $2N/n$  (exemple : si  $N = 1024 = 2^{10}$ , 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 [BEN04].

### III.3.7 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 ou prolongement (zero-padding en anglais), (exemple :  $N = 1000$ , on prend  $TFD = 0$  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  $F/1024$  et non plus  $F/1000$ .

### III.4 Densité spectrale de Puissance par Périodogramme :

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 :

$$DSP_x(f) = |TFD_x(f)|^2 \quad (III.18)$$

### III.5 Simulation numérique :

Pour simuler la présence d'un défaut rotorique dans une machine asynchrone à cage présentant un glissement  $g=5\%$ , on construit le signal à analyser comme suit :

$$x(t) = 5 \sin(2\pi f_s t) + 0,066 \sin(2\pi f_{b1} t) + 0,068 \sin(2\pi f_{b2} t) + b(t) \quad (III.19)$$

Avec :  $b(t)$  un signal qui représente le bruit blanc introduit en utilisant la notion du RSB. Ce dernier étant le rapport signal sur bruit donné par la relation suivante :

$$RSB = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_b} \quad (III.20)$$

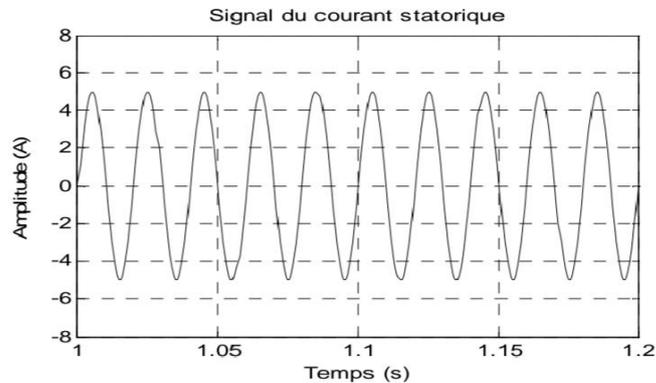
La fréquence d'alimentation utilisée est égale à  $f_s=50\text{Hz}$ . Les fréquences caractéristiques du défaut sont calculées à partir de :

$$f_b = (1 \pm 2gk) f_s \quad (III.21)$$

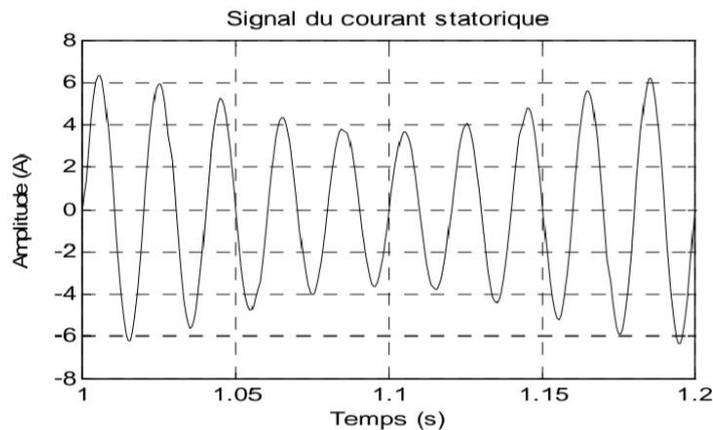
Avec :  $f_s, f_b$  : sont respectivement les fréquences du fondamental et du défaut,  $g$  : le glissement et  $k = 1, 2, 3, \dots$

Par conséquent, les fréquences de défauts simulés sont égales à :

$$f_{b1} = 45\text{Hz} \quad \text{et} \quad f_{b2} = 55\text{Hz}.$$



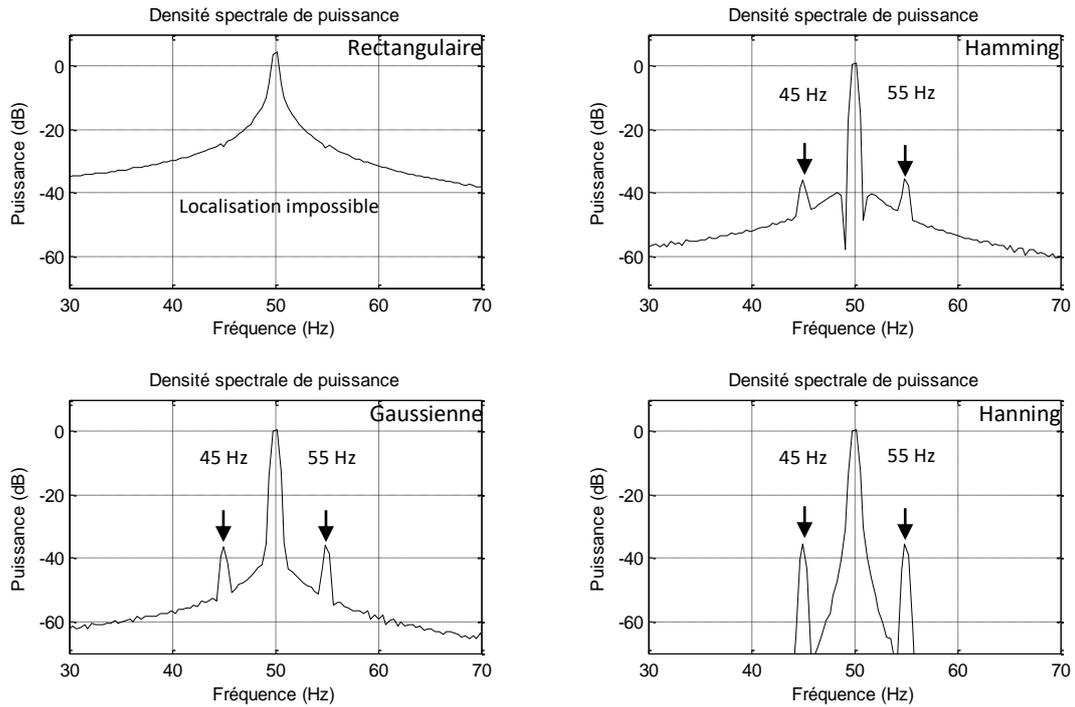
**Figure III-8:** Représentation temporelle du signal du courant statorique : Cas du moteur sain



**Figure III-9:** Représentation temporelle du signal du courant statorique : cas d'une barre cassée

### III.6 Interprétation des résultats de simulation :

Les Figures III.8 et III.9 représentent respectivement le signal temporel du courant statorique simulé avec et sans défaut de barres. On peut observer la modification de la forme des courants statoriques après l'introduction d'un défaut d'une barre cassée.



**Figure III-10:** DPS par Périodogramme du courant statorique avec les différentes fenêtres de pondération cas d'un RSB=50Db et un glissement de 5%

## Chapitre III : Diagnostic par Périodogramme

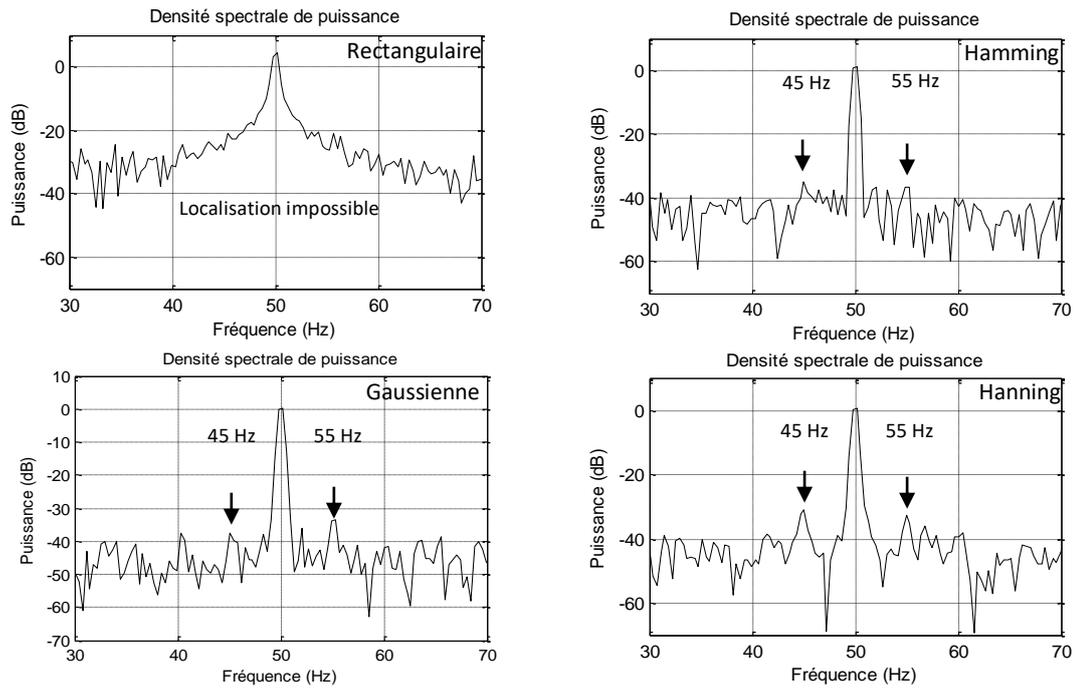


Figure III-11:DPS par Périodogramme du courant statorique avec les différentes fenêtres de pondération cas d'un RSB+15dB et un glissement de 5%

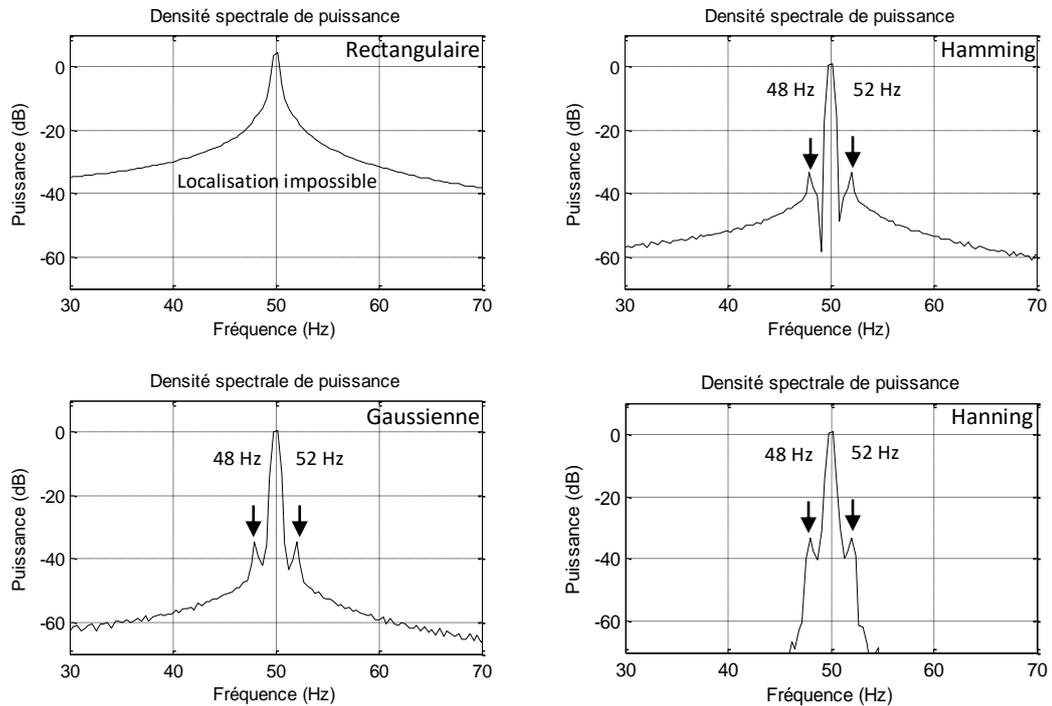


Figure III-12:DPS par Périodogramme du courant statorique avec les différentes fenêtres de pondération cas d'une RSB = 50dB et un glissement de 2%

---

## Chapitre III : Diagnostic par Périodogramme

---

Lors du premier test représenté sur la Figure III.10, le courant statorique est analysé par Périodogramme en utilisant plusieurs fenêtres de pondération. Ce test est réalisé pour une barre cassée, un glissement de 5% et un RSB de 50dB synonyme d'un signal moyennement bruité. On observe l'impossibilité de localisation des fréquences du défaut avec la fenêtre rectangulaire.

Avec l'utilisation des autres fenêtres (Hamming, Hanning et gaussienne) ce problème est résolu. Il reste à signaler que les fenêtres gaussiennes et de Hamming se caractérisent par un lobe principal étroit et des lobes secondaires d'amplitude faible (-38 dB).

Par contre, pour la fenêtre de Hanning la localisation est plus facile avec des lobes secondaires d'amplitude -35 dB mais le lobe principal est plus large pour cette fenêtre.

Le deuxième test 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 complètement limitée comme il est montré sur la Figure III-11. Pour les autres fenêtres, c'est celle de Hanning qui offre la meilleure localisation.

Enfin, la Figure III.12 présente un test effectué avec une barre cassée, un RSB de 50dB et un glissement de 2 %. Le but de ce test 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.

### III.7 Conclusion :

Le présent chapitre est consacré à l'étude de la technique du Périodogramme 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 du Périodogramme. 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.

Enfin, nous avons effectué des tests de robustesse vis-à-vis du bruit pour valider l'efficacité de la technique du Périodogramme dans le diagnostic des défauts rotoriques de la machine asynchrone à cage.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

Le présent mémoire est dédié au diagnostic des défauts rotoriques de la machine asynchrone à cage d'écureuil par la technique du Périodogramme.

Pour cela, on a présenté dans ce travail plusieurs fenêtres de pondération utilisées pour remplacer la fenêtre rectangulaire dans le calcul de la densité spectrale de puissance par Périodogramme.

En effet, le bon choix de la fenêtre de pondération permet d'étudier différents cas qui peuvent se présenter, à savoir le faible glissement, les défauts naissants (de faible amplitude) et les signaux fortement bruités (cas d'une alimentation par onduleur). Pour mettre en valeur chaque fenêtre, on a pris en considération l'étude du diagnostic du défaut de barres rotoriques et la localisation de ce défaut en utilisant la DSP par Périodogramme.

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, les fenêtres gaussiennes et de Hamming offrent 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 ou la fenêtre gaussienne est plus appropriée dans le cas de défauts proches du fondamental.

# **Références bibliographique**

### Références 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 , 09a] AÏMER, A.F., BENDIABDELLAH, A., BOUDINAR, A.H., MOKHTAR, C., ATime Frequency Analysis used in Induction Motor Broken Rotor Bars Diagnosis . 1 st International Conference on Electric Engineering, organisée à l'Université Larbi Tebessi, Tébessa, 25-26 Octobre 2009, Algérie
- [AIMER , 09c] AÏMER, 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 ;
- [Allianz, 88] "Présentation des avaries. Machines électriques tournantes" Cahier des Préventions. CP2, Allianz, 1988.
- [Alain, 90] Alain Boulenger, Christian Pachaud. Surveillance des machines par analyse des vibrations, Livre ,1990.
- [Alain , 03] Alain Boulenger, Christian Pachaud. Analyse vibratoire en maintenance Surveillance et diagnostic des machines, Livre,2003.
- [Bachir, 02] Bachir S, « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2002.
- [BELHAMDI , 14] BELHAMDI SAAD «Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone», Thèse présentée en vue de l'obtention Du diplôme de Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider – Biskra, Soutenue publiquement le 08/05/2014.
- [Belhamdi, 05] BELHAMDI SAAD « Prise en Compte D'un Défaut Rotorique Dans la Commande d'un Moteur Asynchrone »Thèse de Magister , Université Mohamed Khider Biskra, Soutenue 2005.
- [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

## Références bibliographiques

---

- [BENBOUZID , 00] BENBOUZID, M.E.H., A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection . IEEE Trans. on Industry Electronics, vol. 47, pp. 984993, October 2000
- [BENDIABDELLAH , 07] BENDIABDELLAH, A., BENOZZA, N., TOUMI, D., Cage motor faults detection algorithm using speed estimation and current analysis. Acta Electrotechnica et Informatica. NO.2, vol. 07. 2007
- [BENIDIR , 04b] BENIDIR, M., Théorie et traitement du signal 2 : Méthodes de base pour l'analyse et le traitement du signal . Édition Dunod. 2004
- [Benedjai, 15] BENNEDJAI SOUMAYA «Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction», Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat universitebadjimokhtarannaba, Année : 2015/2016.
- [Bessous, 15] BESSOUS NOUREDDINE «Experimental Exploitation for the Diagnosis to the Induction Machine under a Bearing Fault – using MCSA» IEEE 2015.
- [BLÖDT, 04] BLÖDT, M., GRANJON, P., RAISON, B., ROSTAING, G., Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring . IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE 2004, Ajaccio, France.
- [Boashash, 90] B. Boashash. Time-Frequency signal analysis. Advances in Spectrum Analysis And Array Processing, pages 418-517 ,1990. Ed Enqlewood Cliffs, NJ :Prentice-Hall.
- [Bonnett, 93] Bonnett A. H. "Cause and analysis of anti-friction bearing failures in A.C induction motors" IEEE Transactions on Industry Application, pp 14 - 23, Sept/Oct 1993.
- [BOUDINAR,07b] 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
- [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
- [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

## Références bibliographiques

---

- [Didier, 04] :G .Didier « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances .Thèse de doctorat, université Henri Poincaré ,Nancy I ,2004 .
- [Elkasabgy, 92] Elkasabgy N. M., Eastham. A. R. and Dawson. G. E., "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28 (1), Part 1, pp. 165-171, 1992.
- [Flandrin, 93] P. Flandrin. Temps-fréquence. Hermes ,1993.
- [FLANDRIN, 99] FLANDRIN, P., Time - Frequency/Time - Scaleanalysis . Edition Hermes. 1999
- [Gaetan, 04] D. Gaetan, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillance», Thèse de doctorat, octobre 2004, Nancy I.
- [HAYES, 96] HAYES, M.H., Statistical digital signal processing and mode 1 ling . John Wiley& Sons Inc., 1996
- [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 Razik , « Le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art ». juin 2002.
- [Jean, 11] Jean-Claude Trigeassou, Diagnostic des machines électriques. Printed and bound in England by Antony Rowe Ltd,Chippenhan,April 2011.
- [Khenfer, 15] khenfer Riad « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques » thèse de Docteur en Sciences Université Ferhat Abbes - Setif-1.le 05 Mars 2015.
- [Khatraoui, 17] KHATRAOUI ABDERREZAK, ZAID MANSOUR «Diagnostic Des Machines Asynchrones Triphasées», Thèse de MASTER ACADEMIQUE , UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar D'El-oued soutenu en Mai 2017.
- [Lebaroud, 06] Lebaroud A., «Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables», Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Alegria, 2006.
- [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
- [Maghraoui, 05] MAGHRAOUI ABDELWAHAB, DEBOUCHA ABDELHAKIM "Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage" mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en

## Références bibliographiques

---

génie électrotechnique UNIV MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA 2005 / 2006.

- [Metatla, 08] Metatla A., Bahi T., Hadjadj I. and Medoued A, "Failure detection of eccentricity in asynchronous machine". International Conference of System and Computer, 25-27 November 2008, Cairo. Egypt, 2008.
- [Nejjari, 00] Nejjari H. and Benbouzid M. E. H., " Monitoring and diagnosis of induction motors electrical faults using a current Park's vector pattern learning approach ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36 , (3) , p.730-735. May/June 2000.
- [Noureddine, 13] Noureddine BESSOUS, Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones, 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.
- [Razik, 03] H. Razik et D. Gaiten, « Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone».2003
- [Roland, 03] Roland Kasmir, « Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes», Lyon, décembre 2003
- [Schaeffer, 99] E. Schaeffer, « Diagnostique des machines asynchrones : modèle et paramétrique dédiés a la simulation et a la détection de défauts », thèse de doctorat, décembre 1999, nantes.
- [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
- [Smail, 92] Smail bachir, « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique », PhD thesis, Ecole supérieure d'ingénieurs de POITIERS, France, 1992.
- [Tarek, 01] Tarek BOUMEGOURA , recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateur en vue du diagnostic",26.3.2001.
- [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.

## Références bibliographiques

---

- [Touhami, 07] O.Touhami and M. Fadel, « Faults diagnosis by parameter identification of the squirrel cage induction machine » , International Electric Machines & Drives Conference, IEEE IEMDC '07, pp. 821–825, 3-5 May 2007. Antalya.
- [YAZICI , 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 Transactions on Industry Applications, Vol. 35. pp. 442-452, Mar./Apr.1999.