



**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**



**Université de Hamma Lakhder El Oued**

**Faculté de la Technologie**

**Département de Génie Electrique En vue de l'obtention du diplôme**

## **Mémoire**

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

**Filière : Machines Electrique**

**Présenté par :**

MOULA Adb el moula

ZINE Mohammed laid

### **Diagnostic des défauts rotoriques dans les machines à inductions en utilisant l'analyse spectrale du courant statorique**

Soutenu le 03/06/2024. Devant le jury composé de :

Pr. HALEM Noura

Pr. BESSOUS Nouredine

Pr. MAAMRI Oussama

Maitre de conférences A

Professeur

Maitre de conférences A

Président

Rapporteur

Examineur

**Année Universitaire 2024/2025**

# *Remerciements*

*Remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant Pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces années d'étude.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur **Pr. BESSOUS Nouredine** pour leur entière disposition, leurs judicieux conseils, leur patience, leur rigueur persévérance tout au long de notre projet.*

*Nous remercions aussi tous les enseignants du département ingénierie électrique , qui tout au long des années d'études nous ont transmis leur savoir sans réserve.*

*Nous remercions tous nos collègues et amis pour leur aide et leur soutien, et tous ceux qui ont contribué de proche ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*NB : Les étudiants ont toute la responsabilité de rédiger ce travail et d'avoir leurs résultats sous la supervision et les suggestions du comité de soutenance*

**Abstract:**

The asynchronous machine enjoys a high utilization rate compared to other types, and therefore, its protection, maintenance, and fault detection are among the most important areas of research.

This work is devoted to the experimental study of broken rotor bars in the rotor cage of the three-phase asynchronous machine using the spectral analysis technique of the stator current. The experimental simulation of the broken rotor bars in the asynchronous machine has the purpose of verifying the effect of rotor bar breaking on the electrical behaviour of the asynchronous machine.

**Keywords:** Asynchronous rotating electrical machines, stator current analysis, rotor bar breakage

**Résumé**

La machine asynchrone bénéficie d'un taux d'utilisation élevé par rapport aux autres types, c'est pourquoi sa protection, sa maintenance et la détection de ses pannes sont parmi les domaines de recherche les plus importants.

Ce travail est consacré à l'étude expérimentale des cassures de barres dans la cage rotorique de la machine asynchrone triphasée en utilisant la technique d'analyse spectrale du courant statorique. La simulation des barres cassées dans la machine asynchrone pratiquemet a le but de vérifier l'effet de cassure de barres rotoriques sur le comportement électrique de la machine asynchrone.

**Mots clés :** Machines électriques tournantes asynchrones, analyse du courant statorique, cassure de barres rotoriques

**ملخص**

تحتل الآلة اللامتزامنة بمعدل استخدام كبير مقارنة بالأنواع الأخرى، ولذلك تُعتبر حمايتها وصيانتها واكتشاف أعطالها من أهم مجالات البحث.

يقدم هذا العمل دراسة تجريبية لانكسار القضبان في القفص الدوار للآلة الكهربائية اللامتزامنة، وذلك باستخدام تقنية التحليل الطيفي للتيار الكهربائي في الجزء الثابت. تهدف المحاكاة التجريبية لانكسار القضبان في المحرك الحثي أساساً إلى التحقق من تأثير هذا الانكسار على السلوك الكهربائي للآلة.

**الكلمات المفتاحية:** آلات كهربائية دوارة غير متزامنة، تحليل تيار الجزء الساكن، انكسار الجزء الدوار

## Liste des Figures

Figure (I. 1) : Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil .....	7
Figure(I. 2) :Photo du stator d'une machine asynchrone. ....	8
Figure(I. 3) :Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices) .....	9
Figure (I. 4) : Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage .....	13
Figure (I. 5) : causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage .....	13
Figure (I.6):Défauts statoriques .....	16
Figure (I. 7) : Excentricité statique, dynamique .....	18
Figure (I. 8) :différence défaillance de roulement à billes .....	19
Figure I. 9 Proportion du défaut .....	20
Figure( I. 10): Répartition des pannes sur les machines asynchrones de faibles ou moyennes puissances ..	20
Figure (I. 11) :Répartition des pannes sur les machines asynchrones de fortes .....	20
Figure(I. 12): répartitions des causes des défauts pour une machine .....	21
Figure (I. 13): Les différentes grandeurs de diagnostic dans une machine .....	22
Figure (I. 14): Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique .....	23
Figure ( II. 1): Représentation d'un neurone biologique. ....	31
Figure( II. 2): Modèle d'un neurone artificiel .....	33
Figure( II. 3): Modèle non linéaire d'un neurone .....	34
Figure( II. 4): Structure d'un réseau non récurrent .....	34
Figure ( II. 5): Structure d'un réseau boucles (ou récurrents) .....	34
Figure( II. 6): Topologie de RNA utilisée pour modéliser l'énergie solaire globale .....	35
Figure (II. 7) :Modèle GRNN pour la prévision du rayonnement solaire. ....	36
Figure( II. 8): Modèle CFNN pour la prédiction du rayonnement solaire .....	37
Figure( II. 9): Schéma de principe du FFNN.....	38
Figure( II. 10): schéma de fonctionnement pour une machine saine et avec défaut. ....	39
Figure( II. 11): défaut de rupture de barres et d anneau de court – round. ....	39
Figure( II. 12): le rotor du moteur avec 2 barres cassées .....	40
Figure( II. 13): Distribution de champ magnétique sous un défaut de la cassure de barre rotorique. ....	40
Figure( II. 14): Courants des barres rotoriques. ....	41
Figure( II. 15): défaut de cassure de barres. ....	42
Figure ( II. 16): Pavage de la transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG). ....	44
Figure( II. 17): Pavage de la Transformée en ondelettes (TO) .....	47
Figure( II. 18): Ondelette de Daubechies 4, db4 (a) et sa fonction d'échelle (b). ....	49
Figure( II. 19): Principe de la décomposition par la transformée en ondelettes discrète au niveau n (FPB 4	
Filtre Passe Bas, FPH : Filtre Passe Haut, 2 : décimation). ....	50
Figure( II. 20): Principe de la surveillance par analyse spectral .....	52
Figure III.1 Photo du banc d'essai dédié au diagnostic .....	58
Figure (III.2): Photographie des rotors de la MAS de 3 kW pour une barre cassée (gauche) et avec deux	
barres cassées (droite).....	61
Figure (III.3) : Courants statoriques du moteur asynchrone avec 1BC (en charge).....	61

---

Figure (III.4) : Courants statoriques du moteur asynchrone avec 1BC (en charge).....	61
Figure (III.5): Spectre du courant statorique avec (1BC,sain) (en charge). ....	62
Figure(III.7) : Zoom de spectre du courant statorique avec 1BC(en charge). ....	62
Figure (III.8) : Spectre du courant statorique sain (en charge).....	63
Figure (III.9): Fréquences qui correspondent aux ordres 5et7 avec 1BC (en charge). ....	63
Figure III.10 Spectre du courant statorique ( $s=3.6\%$ , 1BC) ;.....	63
Figure II.12. Courant statorique en fonction du temps ( $s=3.6\%$ , 2BC). ....	66
Figure( III.13)Spectre du courant statorique (MAS sain, 1BC et 2BC) ; (a) : Autour du .....	68
Figure (III.14) : Spectre du courant statorique avec 2BC(en charge). ....	69
Figure (III.15): Fréquences qui correspondent aux ordres 5 et 7 avec 2BC (en charge). ....	69

## Liste des tableaux

<b>Tableau III.1. Récapitulation des raies dans le spectre du courant statorique (1BC).....</b>	<b>61</b>
<b>Tableau II.2 Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques (2BC,g=0.036).....</b>	<b>69</b>
<b>TableauIII.3 Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques (1BC+2BC). ....</b>	<b>71</b>

---

## Liste des abréviations

MAS :	Machine asynchrone.
ASCM :	Analyse des Signatures des Courants du Moteur.
MCSA :	Motor Current Signature Analysis.
FFT :	Fast Fourier Transform.
RMS :	Root Mean Square.
ASVM :	Analyse des Signatures de Vibration du Moteur.
MVSA :	Motor Vibration Signature Analysis.
BE :	La Bague Externe.
BI :	La Bague Intérieure.
$\Omega_s$ :	La vitesse de synchronisme.
$\Omega$ :	La vitesse de rotation du rotor.
$g$ :	Le glissement.
$f_s$ :	Fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation.
$p$ :	Le nombre de paires de pôles.
$X(f)$ :	La valeur d'un coefficient de Fourier à la fréquence.
$X(t)$ :	Signal généré par le défaut à caractère transitoire.
$\omega$ :	Fréquence angulaire ou pulsation du mouvement.
$f$ :	Fréquence du mouvement en Hz.
$\varphi$ :	Phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps.
GRNN:	Generalized Regression Neural Network
CFNN :	Constant Feedforward Neural Network
FFNN :	Feedforward Neural Network

$f_{BE}$ :	Fréquence caractéristique du défaut de la bague externe du roulement.
$f_{BE-l}$ :	Fréquence caractéristique du défaut de la bague externe dans le spectre du courant statorique.
$f_s$ :	Fréquence de glissement.
$\nu$ :	Ordre d'harmoniques du temps.
$N_b$ :	Nombre de billes de roulement.

**Sommaire**

**Remercîments .....I**  
**Abstract:..... II**  
**Liste des Figures .....III**  
**Liste des tableaux ..... V**  
**Liste des abr eviations..... VI**  
**Sommaire ..... VIII**  
**Introduction générale..... 1**

**Chapitre I**

**Etat de l'art sur le diagnostic de défaut de la machine asynchrone**

*I.1 Introduction : ..... 6*  
*I.2 Constitution de la machine asynchrone ..... 6*  
    I.2.1 Le stator..... 7  
    I.2.2 Rotor à cage..... 8  
    I.2.3 Les paliers ..... 9  
*I.3 Notion sur le diagnostic de La machine asynchrone ..... 9*  
    I.3.1 La machine asynchrone ..... 9  
    I.3.2 Terminologie propre au diagnostic de défaut ..... 10  
    I.3.3 diagnostic ..... 11  
*I.4 Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone ..... 12*  
*I.5 Principaux défauts de la machine asynchrone triphasée à cage : ..... 12*  
**I.5.1 Défauts internes et externes ..... 12**  
*I.6 Les d fferents défauts de la machine asynchrone ..... 13*  
    I.6.1 Défauts statoriques : ..... 13  
    I.6.2 Défauts rotoriques ..... 16  
*I.7 étude statistique ..... 19*  
*I.8 Cause des défauts : ..... 21*  
*I.9 Conséquences des défauts : ..... 22*  
*I.10 Méthodes de diagnostique ..... 22*  
*I.11 Conclusion ..... 26*

**Chapitre II**

**Approches Dédiées au Diagnostic**

*II.1 Introduction : ..... 29*  
*II.2 Les réseaux de neurones ..... 29*  
    II.2.1 Définition : ..... 29  
    II.2.2 l'histoire : ..... 30  
    II.2.3 Neurone biologique ..... 31  
    II.2.4 Modélisation mathématique du neurone biologique: ..... 32  
    II.2.4.1. Le neurone artificiel ..... 32

II.2.4. 2.Principes d'un neurone artificiel .....	33
II.2.5. le type de Réseaux de neurones .....	34
II.2.5. 1. Réseaux non boucles (non récurrent) .....	34
II.2.5.2. Réseaux boucles (ou récurrents) .....	35
II.2.5. 3. FFLMP .....	36
II.2.5.4. GRNN .....	36
II.2.5.5. Le CFNN .....	37
II.2.5.6.Le FFNN .....	38
II.2.7 Domaine d'application des réseaux de neurones (RNA) : .....	39
<i>II.2.8 Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurones .....</i>	<i>39</i>
II.2.8.1 Avantages des réseaux de neurones .....	39
II.2.8.2 Inconvénients des réseaux de neurones .....	39
<i>II.3. Les défauts de la cassure de barres rotoriques : .....</i>	<i>40</i>
<i>II.4. Causes des défauts rotoriques : .....</i>	<i>41</i>
<i>II.5. Types de la rupture des barres rotoriques : .....</i>	<i>42</i>
<i>II.6. Méthodes de diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques .....</i>	<i>43</i>
II.6.1 transformée de Fourier rapide (TFR) Haut du formulaire .....	43
II.6.2 Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG).....	44
II.6.3 Transformée en ondelettes .....	46
II.6.3.1.1 Adaptabilité en temps et en fréquence.....	46
II.6.3.1.2 Atomes temps-fréquence.....	46
II.6.3.1.3 Résolution temps-échelle.....	47
II.6.3.2 Transformée en ondelette discrète (TOD).....	48
II.6.3.3 Transformée en paquets d"ondelette (TPO).....	52
<i>II.7 Technique de diagnostic (MCSA).....</i>	<i>53</i>
II.7.1_Analyse spectrale .....	53
II.7.1.1 principe.....	53
II.7.1.2 Spectre d'un signal .....	53
II.7.1.2.1 Définition d'un signal.....	53
II.7.1.2.2 Définition du spectre d'un signal.....	54
II.7.2 Analyse spectrale du courant statorique (MCSA) .....	54
II.7.2.1 Définitions.....	54
II.7.2.2 Technique de la FFT.....	55
II.7.2.3 Surveillance du moteur asynchrone basée sur la technique de la MCSA.....	55

<i>II.8 Conclusion</i> .....	57
<b>Chapitre III</b> <b>Analyse spectrale du défaut de la cassure des barres rotoriques</b>	
<hr/>	
<i>III.1 Introduction</i> .....	59
III.2 Présentation du banc D'essai.....	59
<i>III.3 Ruptures de barres dans les machines asynchrones</i> .....	60
III.3.1 Résultats et discussion de la cassure de barres .....	60
III.3.1.2_Fonctionnement en charge .....	61
<i>III.4. Conclusion</i> .....	73
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>74</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>76</b>

# *Introduction générale*

Ce travail s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts des machines électriques, en particulier le moteur asynchrone à cage d'écureuil. Ce dernier est un composant essentiel de la plupart des équipements industriels, en raison de sa grande robustesse et de son faible coût. Il est omniprésent dans les secteurs de pointe tels que l'aéronautique, le nucléaire, et la chimie. Bien que réputé pour être le plus robuste des machines électriques, le moteur asynchrone à cage peut voir sa durée de vie affectée par diverses contraintes (thermiques, électriques, mécaniques et environnementales), entraînant des pannes au niveau du stator et du rotor. Ces défauts occasionnent des pertes économiques considérables, rendant indispensable la mise en œuvre de systèmes de surveillance appropriés pour éviter les arrêts imprévus [1].

Récemment, la détection et l'isolation des défauts (FDI : Fault Detection and Isolation) est devenue une préoccupation majeure pour de nombreux chercheurs spécialisés dans les applications d'ingénierie [2]. Les deux principaux objectifs des processus de FDI sont de déterminer avec précision l'état de la machine pour localiser le défaut et de résoudre le problème. Cette stratégie de diagnostic vise à améliorer le contrôle, réduire les coûts de maintenance, augmenter la disponibilité et la fiabilité, éviter les arrêts non planifiés, et améliorer l'efficacité opérationnelle des systèmes.

Il est donc essentiel de mettre en place des systèmes de surveillance adéquats visant à détecter précocement les défauts. Bien que déjà utilisées dans d'autres domaines, certaines techniques de diagnostic comme l'analyse spectrale, les réseaux de neurones, etc. qui représentent des nouvelles approches dans le domaine du diagnostic. Nous avons voulu explorer l'apport potentiel de ces techniques lorsqu'elles sont appliquées à la surveillance d'un système électrique, tel que la machine asynchrone à cage. Bien qu'il soit impossible de couvrir toutes les possibilités et combinaisons de ces techniques, nous nous concentrerons spécifiquement sur la détection et la localisation du défaut de la cassure des barres rotoriques.

Dans ce contexte, le mémoire comporte trois chapitres qui sont organisés comme suit :

- ❖ Le premier chapitre sera consacré à un état de l'art de diagnostic des défauts dans la machine asynchrones.
- ❖ Le deuxième chapitre présentera quelques notions sur les méthodes les plus utilisées au diagnostic de la machine asynchrone.
- ❖ Dans le troisième chapitre, nous analyserons et discuterons les résultats obtenus pour le défaut de cassure de barres rotoriques en utilisant la technique MCSA-FFT. Nous analyserons la MAS sous fonctionnement d'un moteur en bon état et sous

fonctionnement d'un moteur défectueux. Enfin, nous concluons notre travail par une conclusion générale.

# *Chapitre I*

## *Etat de l'art sur le diagnostic de défaut de la machine asynchrone*



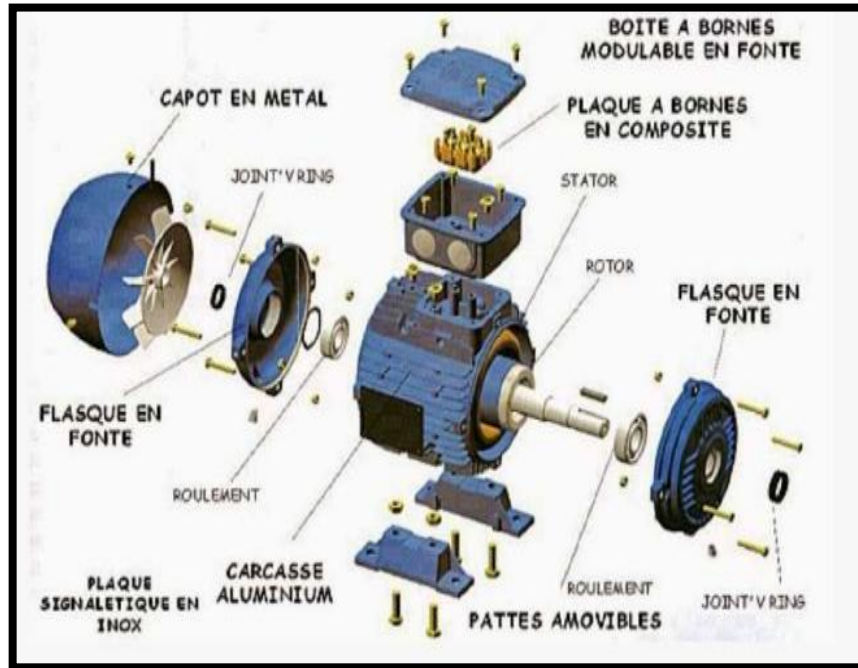
## **I.1 Introduction :**

Le diagnostic est une composante essentielle d'un système de surveillance. Il vise à déterminer en temps réel le mode de fonctionnement dans lequel se trouve le système. Pour ce faire, il repose sur une connaissance préalable des modes de fonctionnement ainsi que sur une observation continue de l'état actuel du système.

Il existe plusieurs approches pour réaliser le diagnostic, et le choix d'une approche dépend souvent du mode de représentation de la connaissance. La première partie de ce chapitre traite des différentes origines des défaillances pouvant survenir sur une machine asynchrone, qu'elles soient d'ordre électrique, mécanique, ou autre. Elle commence par rappeler la structure générale des machines électriques, en mettant l'accent sur la machine asynchrone à cage d'écureuil. Seront abordés les défauts pouvant affecter aussi bien le stator que le rotor et les enroulements de la machine.

## **I.2 Constitution de la machine asynchrone**

La machine asynchrone, souvent désignée sous le nom de moteur à induction, est composée d'un stator et d'un rotor, fabriqués à partir de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches où sont logés les enroulements. Le stator reste immobile et contient les enroulements connectés à la source d'alimentation, tandis que le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles depuis l'extérieur ou fermés en circuit continu, deux types de rotor sont définis : rotor bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, pour les besoins de ce travail, nous considérons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Notre étude se concentre spécifiquement sur la machine asynchrone à cage d'écureuil. Les composants d'une telle machine sont illustrés dans la Figure (I.1) [3].



**Figure (I. 1) :** Eléments de constitution d'une MAS à cage d'écureuil

### I.2.1 Le stator

Le stator d'une machine asynchrone est fabriqué à partir de tôles d'acier qui abritent les bobines du stator. Ces tôles sont découpées en une seule pièce pour les petites machines, tandis qu'elles sont découpées en sections pour les machines plus grandes. Elles sont généralement revêtues de vernis pour réduire l'effet des courants de Foucault, puis assemblées par boulonnage ou soudure pour former le circuit magnétique du stator. Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements du stator sont insérés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être imbriqués, ondulés ou de nature concentrique. Lorsque la machine asynchrone est enroulée mécaniquement, un enroulement concentré est souvent privilégié. Les enroulements sont constitués de plaques de cuivre de différentes sections directement placées dans les encoches pour les machines de grande taille. Des matériaux isolants sont utilisés pour créer une barrière entre les enroulements électriques et les tôles d'acier, et cette isolation peut varier en fonction de l'application spécifique de la machine asynchrone. De plus, le stator d'une machine asynchrone est équipé d'une boîte à bornes à laquelle l'alimentation électrique est connectée [4].



Figure(I. 2 ):Photo du stator d'une machine asynchrone.

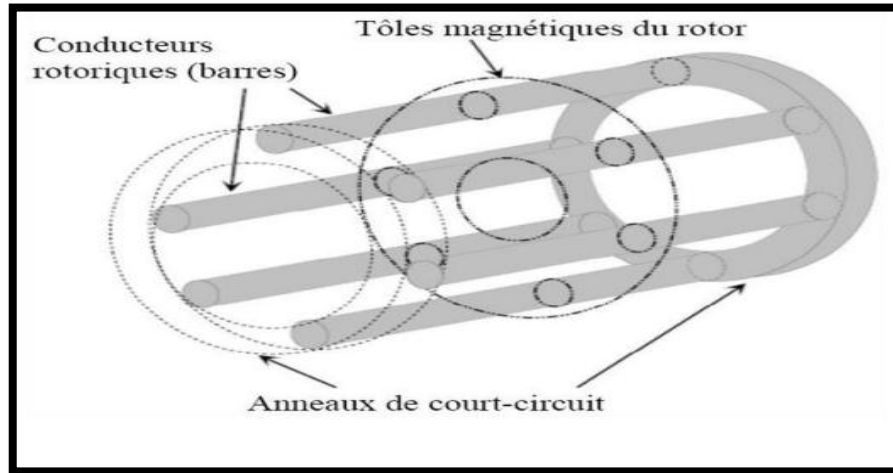
Le choix du type d'encoques pour une machine dépend de la tension de service, de la puissance et du type de bobinage utilisé.

### I.2.2 Rotor à cage

Les anneaux de court-circuit présents dans le rotor de la cage permettent aux courants de circuler d'un conducteur d'encoche (barre du rotor) à un autre. Ces barres conductrices sont uniformément espacées et forment le circuit du rotor, comme illustré dans la figure (I.3). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine, similaire à celui d'un moteur à rotor bobiné [5].

Les conducteurs présents dans les rotors de cage d'écureuil sont fabriqués en moulant un alliage d'aluminium ou en utilisant des barres de cuivre massives qui sont préformées et frettées dans les tôles du rotor. En général, il n'y a pas ou très peu d'isolation entre les barres conductrices et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, à moins qu'il n'y ait une rupture de barre.

Le moteur à cage d'écureuil est plus facile et moins coûteux à construire que le moteur à rotor bobiné, en plus d'être plus robuste. C'est pourquoi il représente la majorité des moteurs asynchrones actuellement en service [6].



Figure(I. 3 ):Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices) [5]

Pour pallier cet inconvénient majeur, deux autres types de cages ont été développés : le rotor à double cage et le rotor à encoches profondes. Ces améliorations visent à améliorer les performances au démarrage, en réduisant le courant élevé et en augmentant le couple, comparativement au rotor à cage d'écureuil traditionnel [5].

### I.2.3 Les paliers

Les paliers qui supportent et permettent la rotation de l'arbre du rotor sont composés de flasques et de roulements à billes qui sont montés à chaud sur l'arbre. Les flasques, fabriqués en fonte, sont fixés au carter du stator à l'aide de boulons ou de tiges de serrage, comme illustré dans la figure (I.1). Ainsi, la cage d'écureuil asynchrone est formée par l'ensemble constitué de ces éléments [3].

## I.3 Notion sur le diagnostic de La machine asynchrone

### I.3.1 La machine asynchrone

Le moteur asynchrone, communément appelé moteur à induction, est actuellement le type le plus répandu de moteur électrique en utilisation. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui se traduit par une structure simple et robuste, facile à fabriquer. Sa plage de puissance disponible s'étend de quelques watts à plusieurs mégawatts. Il est directement connecté au réseau industriel à une tension et une fréquence constantes, et fonctionne à une vitesse variable légèrement inférieure à la vitesse synchrone. Il est largement utilisé pour réaliser pratiquement tous les entraînements à vitesse constante. De plus, le moteur asynchrone permet la mise en œuvre d'entraînements à vitesse variable, et son importance dans ce domaine est en croissance. Il est à noter que plus de 60% de l'énergie

électrique consommée dans les pays industrialisés est transformée en énergie mécanique par des moteurs électriques [6].

Malgré sa robustesse, la machine asynchrone, comme tout autre équipement électrique, est sujette à des pannes électriques et mécaniques. En raison des répercussions considérables et coûteuses que la présence d'un défaut peut avoir sur les opérations industrielles, le diagnostic des défauts a reçu beaucoup d'attention au cours des deux dernières décennies [7].

### **I.3.2 Terminologie propre au diagnostic de défaut**

Terminologie propre au diagnostic de défaut Avant d'aller plus loin, il faut définir d'abord les termes suivants [6] :

#### **a) Système physique (Physical System)**

Un système physique est constitué d'un ensemble d'éléments interconnectés ou en interaction, organisés pour accomplir une fonction spécifique.

#### **b) Modèle (Model)**

Un modèle d'un système physique est une description de sa structure ainsi qu'une représentation comportementale ou fonctionnelle de chacun de ses composants. La représentation comportementale comprend les relations entre les différentes variables du système, souvent désignées sous le nom de relations de cause à effet. En revanche, la représentation fonctionnelle est plus abstraite, se concentrant uniquement sur les objectifs supposés que le système physique doit atteindre [7].

#### **c) Signatures**

La signature théorique d'un défaut peut être considérée comme la trace attendue du défaut sur les différents Réseaux de Représentation d'Architecture (RRA) qui modélisent le système. En d'autres termes, la signature théorique d'un défaut peut être envisagée comme les résultats de détection lorsque tous les tests sensibles au défaut réagissent [7].

#### **d) Anomalie**

Une anomalie est une particularité qui ne respecte pas la loi naturelle ou logique.

#### **e) Défaillance**

Une défaillance est une anomalie de fonctionnement au sein d'un système physique.

#### **f) Panne**

Une panne est l'incapacité d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne découle toujours d'une défaillance.

Défaut → défaillance → panne

### g) Un défaut

Le défaut représente une anomalie de comportement au sein d'un système. Ce concept revêt une grande importance dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels. Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence est considéré comme un défaut. Il est donc évident qu'une défaillance entraîne un défaut. Cependant, un défaut ne conduit pas nécessairement à une défaillance. En effet, le dispositif peut conserver son aptitude à accomplir sa tâche principale si les défauts n'ont pas d'impact sur cette dernière. L'art du diagnostic réside dans la capacité à détecter précocement un défaut avant qu'il ne conduise à un état de défaillance, et donc à une panne [8].

### h) La Supervision

La supervision englobe trois fonctions principales : la détection, la localisation et la décision [7].

- **La détection** : Cette fonction implique la reconnaissance qu'un dispositif est en mode de dysfonctionnement en se basant sur certaines caractéristiques.
- **La localisation** : Il s'agit de déterminer les causes physiques ou fonctionnelles d'une panne, c'est-à-dire identifier le ou les éléments à l'origine du défaut.
- **La décision** : Cette fonction implique d'abord de décider du mode de fonctionnement dans lequel on souhaite placer le dispositif (mode dégradé ou mode de fonctionnement normal). Ensuite, il s'agit de définir précisément les actions à entreprendre pour atteindre ce mode.

### I.3.3 diagnostic

Le terme "diagnostic" peut revêtir différentes significations selon le contexte et le domaine d'application. Dans le domaine des procédés industriels, le diagnostic vise à identifier la cause d'une défaillance ou d'un défaut. Selon la définition adoptée par les instances internationales de normalisation telles que l'AFNOR (Association Française de Normalisation), le diagnostic consiste à identifier la cause probable de la ou des défaillances

en utilisant un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test [8].

#### **I.4 Principe du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone**

Le processus de diagnostic vise à détecter de manière précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance. Il se déroule en plusieurs étapes [7] :

- **Extraction des informations des capteurs** : Cette étape consiste à recueillir des données à partir des capteurs de la machine afin d'obtenir des indicateurs de défauts ou de résidus. Le résidu représente la différence entre l'observation et la valeur de référence. Avant d'entreprendre la recherche de la cause du défaut, il est crucial de valider l'information fournie par les résidus.
- **Quantification des résidus** : Il est essentiel de quantifier la valeur du résidu afin de produire des symptômes. L'évaluation des résidus pose le défi de définir un seuil à partir duquel le défaut sera déclaré.
- **Décision** : Cette dernière étape du processus de diagnostic consiste à comparer la signature actuelle avec celle de l'expérience. Il s'agit d'abord de déclarer si l'élément est défaillant ou non. Ensuite, en cas de défaillance, il faut identifier la cause de l'anomalie.

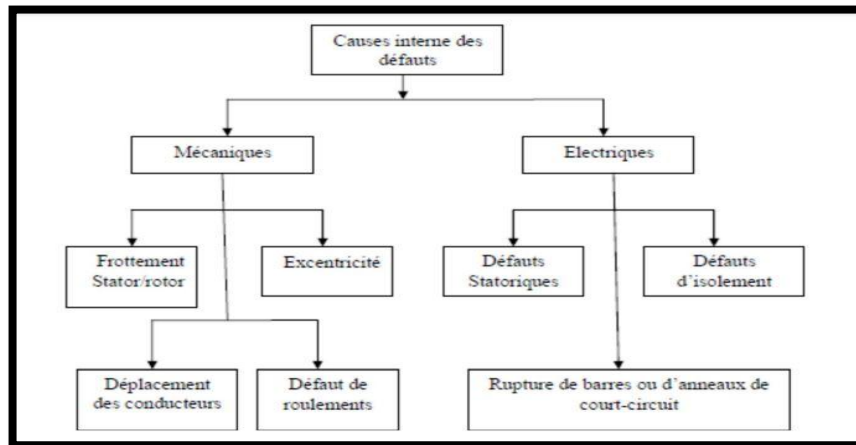
#### **I.5 Principaux défauts de la machine asynchrone triphasée à cage :**

Nous rappelons brièvement les différents défauts de la machine asynchrone triphasée à cage ainsi que leurs origines, sans prétendre à l'exhaustivité. Ces défauts peuvent apparaître dans les différentes parties constituant la machine [9].

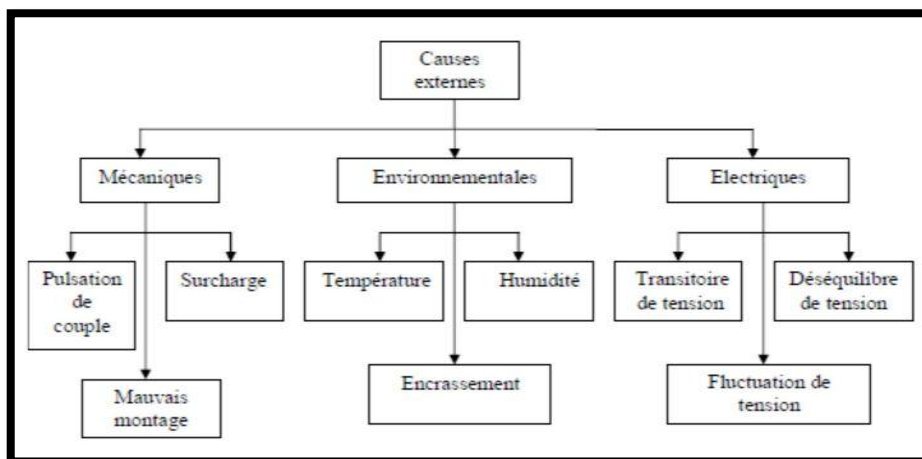
##### **I.5.1 Défauts internes et externes :**

**Il existe deux types principaux de défauts** : internes et externes. Les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures (I.4) et (I.5). Nous pouvons ainsi remarquer que les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine tels que les circuits magnétiques rotorique et statorique, le bobinage statorique, l'entrefer mécanique, la cage rotorique, etc. En revanche, les défauts externes sont provoqués soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'environnement d'utilisation de la machine [8].

Selon les organigrammes de la Figure (I.4) et de la Figure (I.5), les origines des défauts sont diverses : thermique, mécanique, électrique ou encore environnementale. À titre indicatif, les démarrages fréquents peuvent provoquer des courants élevés dans les barres rotoriques.



**Figure (I. 4) :** Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage



**Figure (I. 5) :** causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

## I.6 Les différents défauts de la machine asynchrone

### I.6.1 Défauts statoriques :

L'armature statorique, équipée de son bobinage, est une partie de la machine soumise à de nombreuses contraintes, dont les effets sont exacerbés en raison de la complexité de la structure et de la fragilité de certaines parties telles que les isolants. Les défaillances du stator sont principalement attribuables à un problème [10] :

- **Thermique** : L'isolation est conçue pour avoir une durée de vie spécifique à la température nominale. Cependant, si la température dépasse cette valeur de fonctionnement, la durée de vie diminue rapidement. Cette élévation de température peut être causée par une variation de tension ou un déséquilibre, des démarrages

répétés sur une courte période, des surcharges, une ventilation inadéquate ou une température ambiante élevée.

- **Électrique** : Une tension supérieure à la valeur nominale ou des variations rapides de tension ( $dV/dt$ ) dues à l'ouverture et à la fermeture des interrupteurs du convertisseur statique peuvent entraîner la détérioration du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne peut entraîner des décharges partielles dans les cavités de l'isolant, provoquant ainsi des points de carbonisation. Ces points entraînent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut) [9].
- **Mécanique** : L'acte de démarrer fréquemment une machine peut induire une élévation de la température au sein des composants en cuivre, tels que le bobinage statorique et la cage rotorique. Ce phénomène récurrent peut causer des expansions et des rétractions successives de la matière isolante, risquant de générer des craquelures. Ces dernières, en s'étendant, sont susceptibles d'initier un court-circuit interne. De plus, les contraintes mécaniques exercées sur les tôles et les conducteurs génèrent des forces oscillantes, entraînant des vibrations structurelles. Ces mouvements répétés peuvent mener à l'usure et à l'effritement de l'isolant, compromettant ainsi son intégrité [10].
- **Environnemental** : L'exposition à l'humidité ou à des agents chimiques dans l'environnement peut altérer la qualité de l'isolation et occasionner des anomalies dans les enroulements. Les premiers signes de détérioration se manifestent par des courants de fuite qui précipitent la dégradation de l'isolant, aboutissant à un court-circuit manifeste. Par ailleurs, la formation d'ozone et d'oxydes d'azote, en réaction avec l'humidité, peut engendrer de l'acide nitrique corrosif, nuisant gravement à l'isolant. Les défauts les plus fréquents au niveau du stator incluent des problèmes d'isolation, des courts-circuits entre les spires, entre les phases, entre une phase et le châssis, un déséquilibre dans l'alimentation électrique, ainsi qu'un dysfonctionnement du circuit magnétique [9].
- **Défauts d'isolant dans un enroulement** :
- La détérioration de l'isolation des enroulements peut entraîner des courts-circuits. Les pertes diverses, telles que les pertes Joule, fer et mécaniques, provoquent une élévation de la température des composants du moteur. Les matériaux isolants sont soumis à des limites de température, de tension et de résistance mécanique. Lorsque ces limites sont dépassées, un court-circuit peut se produire dans l'enroulement affecté. Les facteurs contribuant à ce type de défaut incluent [11] :

- ◆ La dégradation de l'isolant lors du processus de fabrication.
- ◆ Une tension d'enroulement qui excède la capacité de résistance du matériau isolant.
- ◆ Un courant excessif dans l'enroulement causé par un court-circuit, une défaillance du convertisseur ou une surcharge.
- ◆ Des vibrations mécaniques.
- ◆ Le vieillissement naturel des isolants, qui ont une durée de vie finie et se dégradent avec le temps, même sous des conditions d'utilisation normales.
- ◆ L'opération dans des conditions environnementales difficiles.

Quand un défaut se développe sur une spire, le courant de défaut peut circuler entre le cuivre de la spire et la tôle du stator, créant un défaut phase-masse. Il peut également circuler entre deux spires de la même phase si l'isolant les séparant est endommagé, résultant en un défaut entre-spires. Dans les bobinages à double couche, une encoche peut contenir des conducteurs appartenant à deux phases différentes. Si les isolants de ces deux bobines se détériorent simultanément dans la même zone, cela peut causer un contact électrique entre deux spires de phases différentes, créant un défaut phase-phase. Ce type de défaut peut également se produire dans les bobinages à une seule couche au niveau des têtes de bobines, où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact, affectant ainsi la topologie du circuit électrique [11].

#### □ **Court-circuit entre spires**

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Ce type de défaut trouve son origine dans un ou plusieurs défauts d'isolation dans l'enroulement concerné. Il se traduit par une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation d'amplitude sur les autres phases, une modification du facteur de puissance et une amplification des courants dans le circuit rotorique dans le cas des machines asynchrones. Cela entraîne une augmentation de la température au niveau du bobinage, ce qui peut accélérer la dégradation des isolants et provoquer ainsi un défaut en chaîne, comme l'apparition d'un deuxième court-circuit. Cependant, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique, à l'exception d'une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut [10].

#### □ **Court-circuit entre phases**

Ce type de défaillance peut survenir à n'importe quel point du bobinage, mais ses répercussions seront différentes en fonction de la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse précise de l'impact de ce défaut sur le système [12].

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases induirait des courants très élevés, susceptibles de provoquer la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou le déclenchement des protections. En revanche, un court-circuit proche du neutre entre deux phases entraîne un déséquilibre sans nécessairement provoquer la fusion des conducteurs [12].

Les courants statoriques deviennent totalement déséquilibrés et 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 [11].

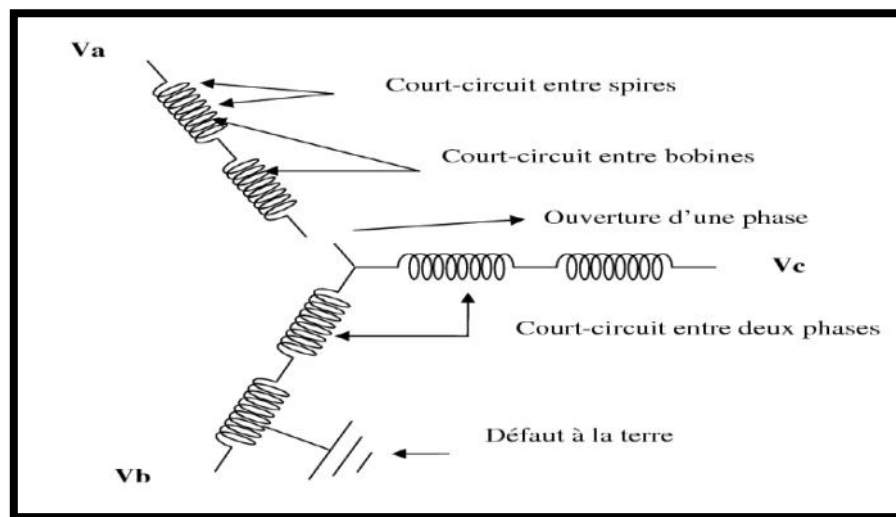


Figure (I.6)6: Défauts statoriques [11]

### I.6.2 Défauts rotoriques

Les défauts rotoriques peuvent se produire au niveau de la cage ou de l'entrefer. Au niveau de la cage, les défauts sont généralement caractérisés par la rupture de barres de la cage ou la rupture d'anneaux de court-circuit [10]. Au niveau de l'entrefer, les défauts se manifestent sous forme d'excentricité statique, dynamique ou mixte. Ces défaillances peuvent être attribuées principalement à :

- Facteurs thermiques (surcharge, etc.),
- Facteurs électromagnétiques,
- Facteurs résiduels (déformation, etc.),

- Facteurs dynamiques (arbre de transmission, etc.),
- Facteurs environnementaux (agressions, etc.).
- Les défauts les plus courants, situés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

- **Ruptures de barre**

La cassure ou rupture de barre est l'un des défauts les plus fréquents au niveau du rotor. Elle peut se produire soit au niveau de son encoche, soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, ce qui entraîne des oscillations de la vitesse de rotation, des vibrations mécaniques et 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, ce qui induit un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.

- **Ruptures d'anneaux**

La rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit dans une machine asynchrone à cage est un défaut qui survient aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures peuvent être causées par des bulles de coulée ou par des dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Étant donné la difficulté de la détecter, ce défaut est généralement regroupé, voire confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques [14].

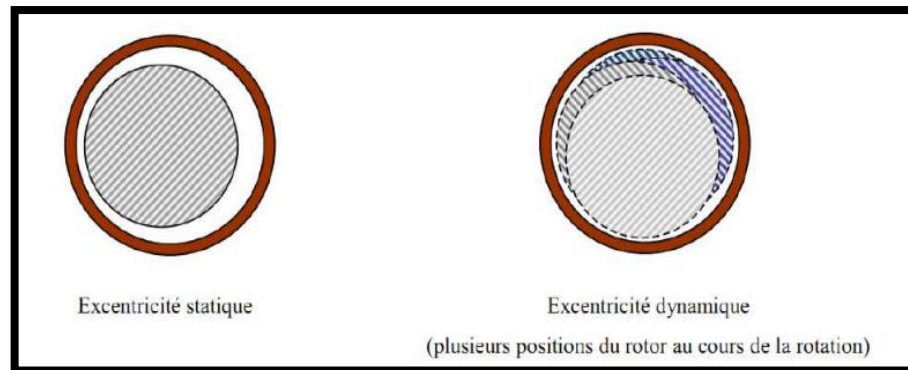
De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité, ...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et, par conséquent, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [13].

- **Excentricité statique, dynamique et mixte**

Parfois, une machine électrique peut être sujette à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple, ce qui signifie un décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor (Figure 1.6). Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique), dont l'origine peut être attribuée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un problème de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage) [14].

*Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :*

- **L'excentricité statique** : le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator, mais tourne toujours autour de son axe.
- **L'excentricité dynamique** : le rotor est positionné au centre de l'alésage, mais ne tourne plus autour de son axe.
- **L'excentricité mixte** : une combinaison des deux cas précédemment cités.



**Figure (I. 7) :** Excentricité statique, dynamique

Ce défaut altère les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer entraîne une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que sur l'enroulement correspondant, ce qui entraîne une dégradation de son isolation. De plus, cette augmentation peut entraîner des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Cela entraîne des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [13].

#### □ **Roulement à billes**

Les roulements à billes jouent un rôle crucial dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts des roulements peuvent être causés par un choix inapproprié de matériau lors de la fabrication. Les problèmes de rotation à l'intérieur de la cage de roulement, causés par des roulements endommagés, écaillés ou fissurés, peuvent perturber le bon fonctionnement de la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone, ce qui, à des vitesses importantes, peut entraîner leur détérioration. La graisse utilisée pour la lubrification joue également un rôle crucial dans le bon fonctionnement des roulements [10].

L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce type de défaillances.



Figure (I. 8) : différence de défaillance de roulement à billes  
[10]

Classiquement, ce type de défaut est diagnostiqué à partir du spectre d'une mesure acoustique ou vibratoire [11]. Les signes distinctifs incluent :

- Trous dans les gorges du roulement intérieur et extérieur,
- Ondulation de la surface du roulement,
- Attaque des billes,
- 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 augmentation des pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement, entraînant des vibrations dues aux déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut entraîner le blocage du moteur [10].

### I.7 Étude statistique

Une étude statistique menée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande spécialisée dans les systèmes industriels, portant sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200 kW), a produit les résultats suivants ( Figure I.9) [15].

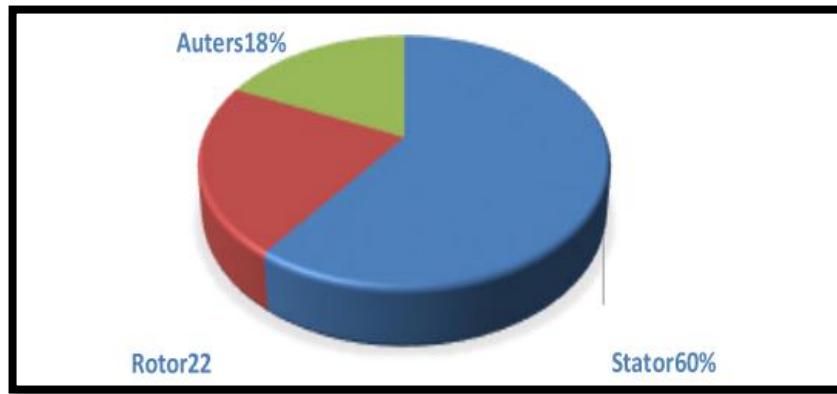
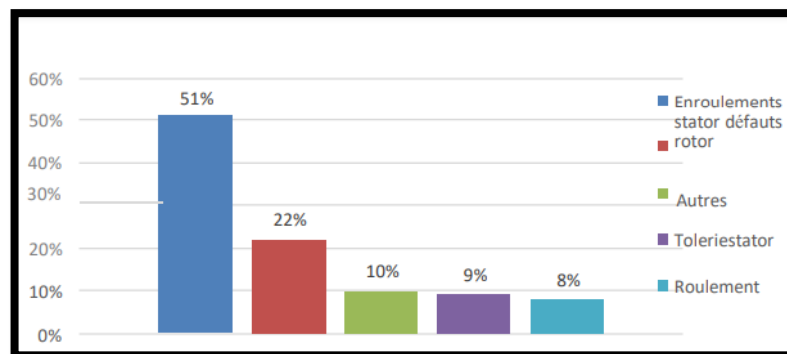


Figure I. 9 Proportion du défaut[15]

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure(I.10) [18].



Figure( I. 10): Répartition des pannes sur les machines asynchrones de faibles ou moyennes puissances [18].

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur la figure(I.11) [18].

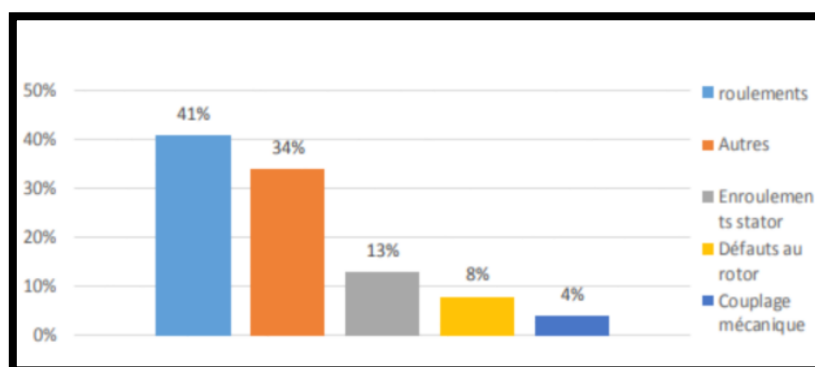


Figure (I. 11 ):Répartition des pannes sur les machines asynchrones de fortes

Puissances [18].

### I.8 Cause des défauts :

La figure (I.9) met en évidence les phénomènes à l'origine des défauts dans la machine. La principale source de défauts provient des aspects mécaniques. Ensuite, la surchauffe du moteur est identifiée comme la deuxième cause de défauts, accentuant le vieillissement des composants. Enfin, le claquage d'isolants, entraînant des courts-circuits, est répertorié comme la troisième cause de défauts [14] [17].

Les origines des défauts des machines asynchrones peuvent être de natures diverses, mais elles sont généralement étroitement liées les unes aux autres. Voici les causes majeures identifiées [15] :

a) Causes thermiques : déséquilibres thermiques, points chauds, températures ambiantes élevées.

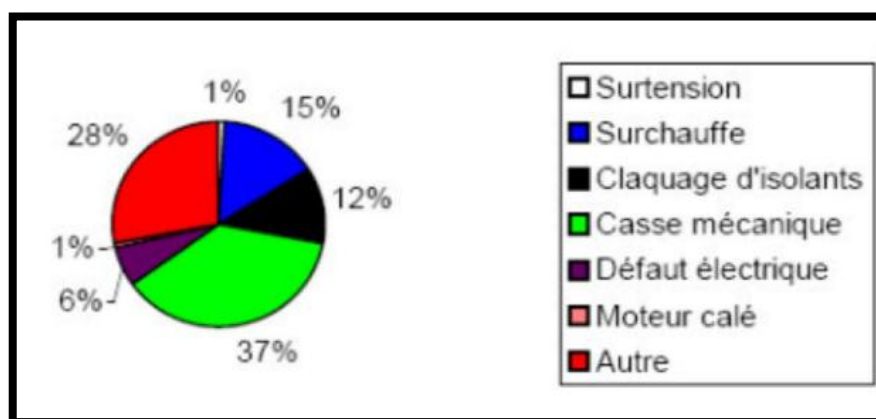
b) Environnement de la machine (tension transitoire d'alimentation, utilisation d'inverseurs, ventilation inadéquate, mauvaise qualité du courant d'alimentation, surcharge, corrosion due à l'humidité, etc.).

c) Causes mécaniques et mauvaise utilisation du moteur (résonance avec la commande de vitesse, chocs en service, vibrations, jeu excessif, déséquilibres mécaniques, etc.).

d) Défauts de fabrication initiaux.

e) Erreurs commises lors de la réparation ou de la maintenance (choix incorrect de taille et de type d'enroulement, utilisation de roulements inappropriés, etc.).

f) Dépassement de la durée de vie attendue du moteur [18].



Figure(I. 12): répartitions des causes des défauts pour une machine[16]

## I.9 Conséquences des défauts :

Les défauts survenant sur les machines asynchrones entraînent une série de problèmes pouvant affecter la rentabilité de l'installation dans son ensemble, voire même conduire à un arrêt total. Parmi les conséquences des défauts, on peut citer [16]:

- Dégradation des caractéristiques mécaniques telles que le couple et la vitesse.
- Augmentation de l'appel de courant supplémentaire.
- Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.
- Accroissement des arrêts non programmés, des pertes de production, et par conséquent, une diminution du rendement global.

## I.10 Méthodes de diagnostic

Les moteurs asynchrones sont soumis à différentes contraintes pendant leur fonctionnement, ce qui peut provoquer des défauts dans différentes parties du moteur. Pour détecter ces défauts, il existe diverses techniques de diagnostic et de détection [19].

Certaines de ces techniques sont basées sur l'observation et la mesure, telles que la mesure du champ magnétique ou la mesure du bruit. D'autres techniques reposent sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut, telles que le courant statorique, le couple et la vitesse (Figure I-13).

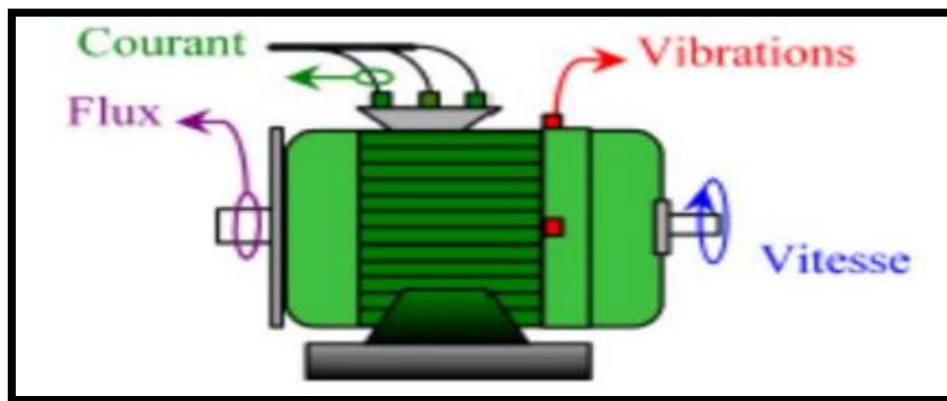


Figure (I. 13): Les différentes grandeurs de diagnostic dans une machine

### □ Diagnostic par l'analyse des courants statoriques

La méthode basée sur l'analyse du spectre du courant statorique est un outil puissant pour détecter les défauts mécaniques et électriques dans les machines asynchrones. Elle présente plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes, car elle ne nécessite ni l'installation d'un capteur sur la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et

encombrant. Il suffit simplement d'un capteur de courant tel qu'une sonde à effet Hall ou un transformateur de courant, qui permet d'obtenir une mesure du courant de phase statorique [19].

Cette méthode de surveillance repose sur l'analyse du spectre du courant statorique. Normalement, dans un spectre de courant d'un moteur sans défaut, seule la composante du fondamental apparaît, correspondant à une répartition sinusoïdale du flux magnétique dans la machine. Cependant, en présence d'une répartition non sinusoïdale du flux magnétique, comme c'est le cas dans un moteur à cage, des harmoniques de l'encoche rotorique apparaissent en plus du fondamental.

Pour illustrer le principe de cette méthode, prenons le cas d'une asymétrie rotorique dans un moteur asynchrone. La présence de ce défaut engendre un courant de défaut dans le rotor, ce qui produit un flux magnétique mutuellement modulé (Fmm) pulsatoire. Cette Fmm induit dans l'enroulement statorique une harmonique à deux composantes : la première composante a une fréquence de  $(1-2g)f$  et la deuxième a une fréquence de  $(1+2g)f$  (figure I.13) [20].

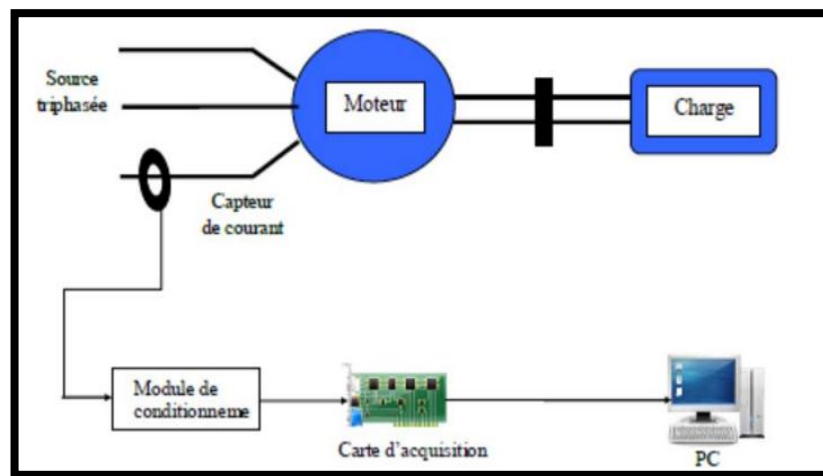


Figure (I. 14): Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique

#### □ Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Le flux de fuite axial peut être détecté à l'aide d'une bobine exploratrice enroulée autour de l'arbre de la machine (voir Fig. I.16) ou par d'autres dispositifs sensibles tels que les sondes à effet Hall. Lorsqu'une bobine est enroulée autour de l'arbre d'une machine électrique, elle génère une force électromotrice (Fem) induite qui est liée aux flux de fuite axiaux. Ces flux de fuite sont présents dans toutes les machines électriques en raison des asymétries dans les

circuits électriques et magnétiques, qui résultent des variations du réseau électrique et des tolérances pendant le processus de fabrication [20].

L'analyse spectrale de la tension induite dans la bobine exploratrice peut être utilisée pour identifier les différentes asymétries et défauts. Le contenu harmonique des flux de fuite axiaux du stator et du rotor est directement lié aux harmoniques contenus respectivement dans les courants du stator et du rotor. Une conséquence directe d'un défaut est l'augmentation du flux de fuite axial. Cette augmentation du flux est une condition nécessaire pour utiliser le flux de fuite axial comme technique de diagnostic, ce dernier devant avoir une valeur significative [21].

#### □ **Diagnostic par mesure de la température**

La surveillance des températures des supports est une pratique courante et fournit des informations importantes. De même, la mesure des températures d'un liquide de refroidissement peut aider à détecter les problèmes de refroidissement et à contrôler la machine lorsqu'elle est utilisée à des puissances élevées [19].

Il est également crucial de surveiller les températures des bobines pour déterminer les limites de charge du moteur et estimer la durée de vie restante de l'isolation des enroulements. Bien que la mesure directe de ces températures puisse être difficile en raison des problèmes d'isolation électrique, des détecteurs de température peuvent parfois être intégrés dans l'isolant près des conducteurs. Cependant, cela peut affaiblir l'intégrité de l'isolant. Par conséquent, il est souvent nécessaire d'utiliser des capteurs de température spéciaux qui peuvent être montés sur les enroulements ou insérés dans l'isolant de manière électriquement isolée pour permettre une mesure précise [20].

#### □ **Diagnostic par mesure des vibrations**

Le diagnostic vibratoire est une méthode courante et efficace pour détecter les défauts dans les machines électriques. Toutes les machines électriques génèrent du bruit et des vibrations, et l'analyse de ces vibrations peut fournir des informations précieuses sur l'état de la machine [20].

Les mesures de vibrations sont généralement effectuées de manière périodique ou lorsqu'un problème est suspecté. Pour cela, des accéléromètres ou des capteurs de vitesse à boulons sont utilisés. Des sondes de déphasage peuvent également être employées pour contrôler le mouvement de l'arbre.

Le désalignement entre les centres des paliers, qui crée un entrefer non uniforme, génère des vibrations à une fréquence double, tandis que le déséquilibre mécanique produit des

vibrations à la fréquence de rotation du moteur. Ces signaux de vibrations contiennent des informations cruciales sur l'état de la machine [21].

L'analyse spectrale de ces signaux vibratoires permet d'identifier les différents défauts qui sont à l'origine de ces vibrations, ce qui aide les techniciens à diagnostiquer et à résoudre les problèmes potentiels de la machine.

#### □ **Diagnostic par mesure du couple électromagnétique**

Effectivement, le couple électromagnétique développé dans une machine électrique est le résultat de l'interaction entre le champ magnétique produit par le stator et celui produit par le rotor. Ainsi, tout défaut survenant au niveau du stator ou du rotor peut avoir un impact direct sur le couple électromagnétique produit par la machine.

L'analyse spectrale du signal de couple, qu'il soit mesuré directement ou estimé, peut fournir des informations précieuses sur l'état de santé de la machine. En examinant les composantes fréquentielles du signal de couple, les techniciens peuvent détecter les anomalies qui pourraient indiquer la présence de défauts dans la machine, qu'ils soient mécaniques ou électriques. Cette méthode d'analyse permet ainsi de diagnostiquer les problèmes potentiels avant qu'ils ne causent des dommages plus importants ou des pannes [20].

#### □ **Diagnostic par mesure de la vitesse**

La détection des défaillances dans les machines peut être réalisée en mesurant les fluctuations de la période de rotation du moteur. Cette méthode s'avère particulièrement efficace pour détecter un large éventail de défauts, notamment les problèmes liés au rotor tels que les vibrations, l'excentricité, l'asymétrie du rotor, les roulements défectueux et les désalignements d'arbre [19].

Cependant, il est important de noter que comme la vitesse et le couple de la machine peuvent varier, les instruments de mesure utilisés doivent être capables de distinguer les variations de vitesse causées par le couple de charge normal des variations induites par les défauts du rotor. Cette distinction est essentielle pour garantir une détection précise des défauts et pour éviter les fausses alertes [21].

## **I.11 Conclusion**

Ce chapitre examine les méthodes de surveillance et de diagnostic des machines électriques, en mettant l'accent sur la machine asynchrone à cage d'écureuil. Il présente une vue d'ensemble de la constitution de cette machine et des défauts potentiels qui peuvent l'affecter. Les différentes techniques de surveillance, allant des mesures directes aux méthodes plus sophistiquées, sont explorées. Un exemple pratique d'application est également présenté pour illustrer l'importance de la surveillance proactive dans divers environnements industriels.



*Chapitr II*

*Approches Dédiées au*

*Diagnostic*

## II.1 Introduction :

Dans ce chapitre se concentre sur la modélisation des réseaux de neurones et les techniques d'analyse associées, appliquées spécifiquement au diagnostic des défauts rotoriques dans les machines asynchrones à cage. Comprendre les principes fondamentaux des réseaux de neurones, leur modélisation mathématique ainsi que les différentes architectures de réseaux neuronaux est essentiel pour développer des méthodes efficaces de diagnostic des défauts. Ce chapitre explorera également les méthodes spécifiques d'analyse des défauts rotoriques, telles que la transformée de Fourier rapide (TFR), la transformée en ondelettes, et l'analyse spectrale, mettant en lumière leur pertinence et leur application dans le contexte du génie électrique. En fournissant une base solide sur la théorie et les techniques nécessaires, ce chapitre vise à préparer le terrain pour la mise en œuvre pratique des réseaux de neurones dans le diagnostic avancé des machines asynchrones, contribuant ainsi à l'amélioration de la fiabilité et de la maintenance prédictive des systèmes électriques industriels.

## II.2 Les réseaux de neurones

Artificiels (RNA) représentent un ensemble de dispositifs computationnels et de techniques qui se distinguent par leur capacité à apprendre, à généraliser, à mémoriser, à classifier, à s'adapter et à prendre des décisions. Leur application s'étend à divers domaines, notamment la reconnaissance de formes, le contrôle et la robotique. Dans le contexte de la maintenance industrielle, les réseaux de neurones sont déployés pour résoudre les problèmes de diagnostic en automatisant la classification des signaux et des formes associés aux différents états de fonctionnement, qu'ils soient normaux ou anormaux, des machines.

### II.2.1 Définition :

D'après Haykin, un réseau de neurones est un système informatique distribué massivement parallèle, doté d'une capacité intrinsèque à acquérir et à mémoriser des connaissances issues de l'expérience, pour les exploiter ultérieurement. Il présente deux analogies majeures avec le cerveau humain :

- **Apprentissage** : Le réseau de neurones assimile des informations à travers un processus d'apprentissage.
- **Stockage de l'information** : Les connexions entre les neurones, appelées poids synaptiques, servent à emmagasiner les connaissances acquises.

L'utilisation des réseaux de neurones offre plusieurs avantages notables:

- **Non-linéarité** : Le neurone élémentaire est un élément non-linéaire. Par conséquent, la combinaison de plusieurs neurones donne naissance à un système global non-linéaire lui-même. Cette propriété fondamentale permet de modéliser des systèmes présentant des non-linéarités intrinsèques, ce qui rend les réseaux de neurones particulièrement puissants.

[22]

### II.2.2 l'histoire :

L'émergence des réseaux de neurones artificiels trouve ses racines dans le travail pionnier de plusieurs chercheurs au cours du 20ème siècle. En 1890, le célèbre psychologue américain W. James posa les premiers jalons en introduisant le concept de mémoire associative, qui jetterait les bases de ce qui deviendrait plus tard la loi de Hebb pour l'apprentissage des réseaux de neurones. Plus tard, en 1949, J. Mc Culloch et W. Pitts formalisèrent une modélisation du neurone biologique, jetant ainsi les bases pour la construction de réseaux de neurones formels capables de réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques.

Parallèlement, en 1949, le physiologiste américain D. Hebb avança les propriétés des neurones par le biais de l'observation du conditionnement chez les animaux. Son travail sur le conditionnement pavlovien, illustré par l'exemple du chien salivant à des heures spécifiques, même en l'absence de nourriture, contribua à expliquer partiellement les mécanismes de modification des connexions neuronales.

Les années suivantes virent des avancées significatives, notamment en 1957 avec le développement du modèle du Perceptron par F. Rosenblatt, qui marqua les débuts de la reconnaissance de formes par les réseaux de neurones. Toutefois, les ressources technologiques limitées de l'époque constituaient un défi pour le fonctionnement durable de ces premiers modèles.

En 1960, l'automaticien Widrow contribua au développement du modèle Adaline, qui, bien que similaire au Perceptron, présentait une loi d'apprentissage différente, à l'origine de l'algorithme de rétro-propagation de gradient largement utilisé aujourd'hui.

Les travaux de M. Minsky et S. Papert, publiés en 1969, mettaient en lumière les limitations théoriques des Perceptrons, notamment leur incapacité à traiter des problèmes non linéaires. Cette période fut suivie d'une relative stagnation jusqu'à ce que, en 1982, J. J. Hopfield propose une théorie novatrice sur le fonctionnement des réseaux de neurones, marquant ainsi le renouveau de ce domaine. Sa démarche anticonformiste, consistant à définir d'abord le comportement souhaité du modèle avant de concevoir la structure et la loi

d'apprentissage correspondantes, ouvrit de nouvelles perspectives, notamment dans le domaine de l'optimisation.

Dans les années qui suivirent, d'autres modèles émergèrent, tels que la machine de Boltzmann en 1983, qui offrait des solutions aux limitations des Perceptrons, bien que sa convergence se révélât difficile à obtenir. En 1985, l'algorithme de rétro-propagation de gradient fut développé, permettant de surmonter les limitations des Perceptrons Multi Couches et ouvrant la voie à la réalisation de fonctions d'entrée/sortie non linéaires.

Enfin, en 1989, Moody et Darken introduisirent le Réseau à Fonctions de base Radiales (RFR), qui se démarqua des autres modèles de réseaux de neurones par sa représentation locale, offrant ainsi de nouvelles possibilités pour la modélisation de fonctions complexes. [23 24]

### II.2.3 Neurone biologique [25 26]

Le neurone, considéré comme l'unité de base du système nerveux central, est composé d'un corps cellulaire appelé soma, à partir duquel se déploient des prolongements appelés dendrites. Les dendrites ont pour fonction de recevoir et de transmettre l'information provenant de l'extérieur ou d'autres neurones vers le soma. Après traitement de l'information par le soma, celle-ci est transmise à d'autres neurones à travers une autre prolongation appelée axone. La transmission de l'information entre un axone et une dendrite se fait au niveau d'un espace vide appelé synapse, où des substances chimiques interviennent dans le processus de transmission. [25 26]

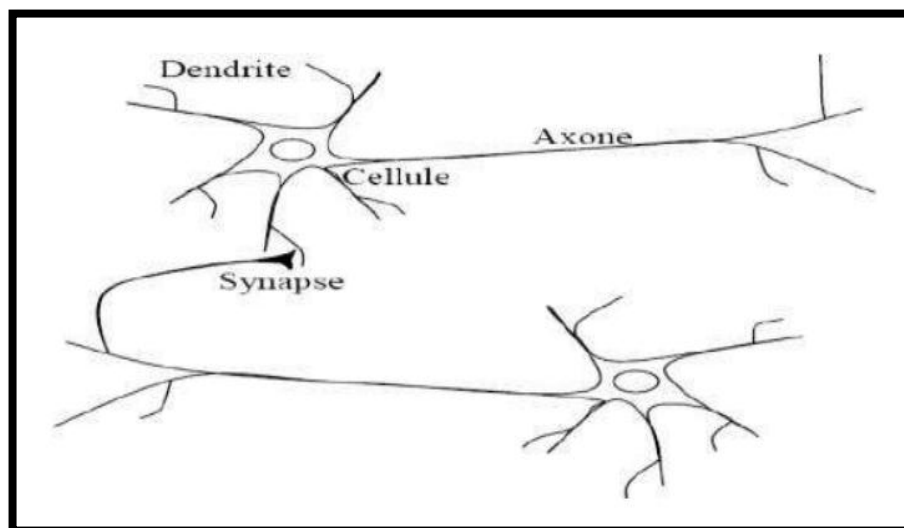


Figure ( II. 1): Représentation d'un neurone biologique.

Le cerveau est constitué d'environ  $10^{12}$  (mille milliards) de cellules nerveuses, appelées neurones. Chaque neurone est connecté à des milliers d'autres neurones, formant ainsi un vaste réseau de communication. Chaque neurone effectue un traitement local en collectant les signaux provenant de ses dendrites et en les combinant. Si l'amplitude totale de ces signaux dépasse un seuil critique, le neurone envoie alors un signal électrique le long de son axone pour communiquer avec d'autres neurones.

## II.2.4 Modélisation mathématique du neurone biologique: [25 26 27]

### II.2.4.1. Le neurone artificiel :

Le modèle mathématique d'un neurone artificiel est représenté par la figure (II.2). Un neurone artificiel est principalement composé d'un intégrateur qui calcule la somme pondérée de ses entrées. Le résultat de cette somme, noté  $n$ , est ensuite soumis à une fonction de transfert  $f$  qui génère la sortie  $D$  du neurone. Les entrées, notées  $R$ , correspondent à un vecteur.

$P = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_R]$ , alors que  $W = [W_{1,1} \ \dots \ W_{1,R}]$  représente le vecteur des poids du neurone. La sortie  $n$  de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante

$$\begin{aligned} n &= \sum_{j=1}^R w_j p_j - b \\ &= W_{1,1} \cdot p_1 + W_{1,2} \cdot p_2 + \dots + W_{1,R} \cdot p_R - b \\ D &= f(n) = f\left(\sum_{j=1}^R W_{1,j} \cdot p_j - b\right) \end{aligned}$$

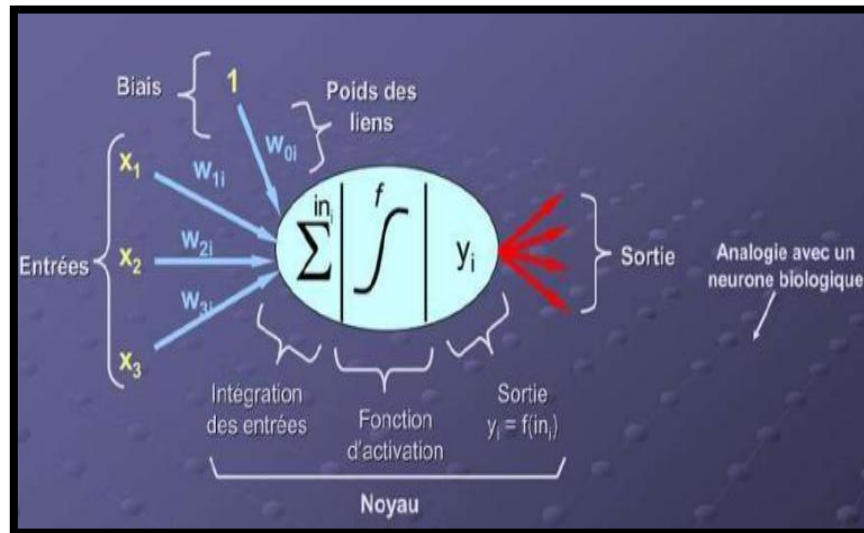
Que l'on peut aussi écrire sous forme matricielle :

$$\begin{aligned} n &= w^T * P - b \\ d &= f(n) = f(w^T * P - b) \\ W &= \begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1R} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{S1} & \dots & w_{SR} \end{bmatrix} F = [p_1 p_2 \dots \dots p_R] \end{aligned}$$

- $P$  : dimension matricielle est  $R \times 1$ ,  $W$ : dimension  $S \times R$
- $S$  : le nombre de neurones d'une même couche
- $i$  : le premier indice (rangée) désigne toujours le numéro de neurone sur la couche.
- $j$  : le deuxième indice (colonne) spécifie le numéro de l'entrée .

La sortie du neurone est calculée comme une somme pondérée des poids attribués aux entrées, à laquelle on soustrait le biais  $b$  du neurone. Ce résultat, appelé niveau d'activation du neurone, est déterminant pour son fonctionnement. Le biais  $b$  est également désigné comme le

seuil d'activation du neurone. Lorsque le niveau d'activation atteint ou dépasse le seuil  $b$ , l'argument de la fonction de transfert devient positif (ou nul). Sinon, il reste négatif.

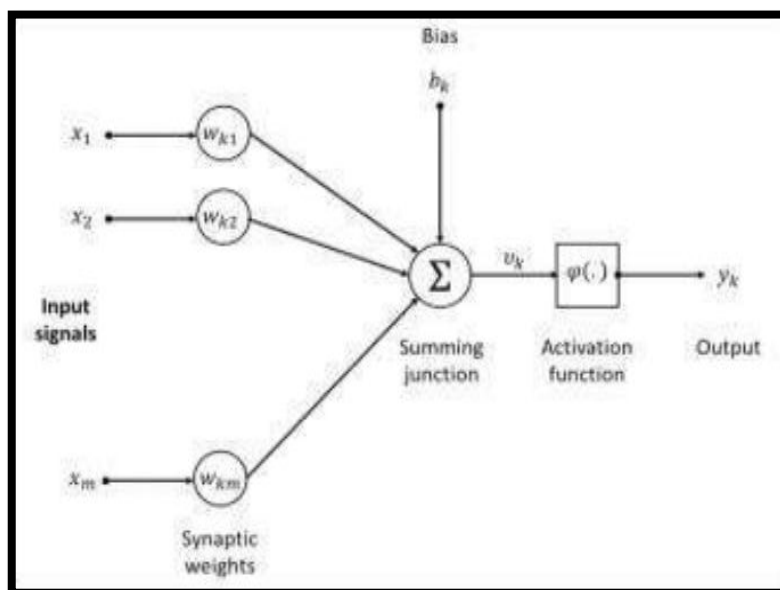


Figure( II. 2): Modèle d'un neurone artificiel

#### II.2.4. 2.Principes d'un neurone artificiel

Chaque neurone artificiel peut être considéré comme un processeur élémentaire. Il reçoit un ensemble variable d'entrées provenant soit de neurones précédents, soit des capteurs intégrés à la machine dont il fait partie. Chaque entrée est pondérée en fonction de la force de la connexion qui lui est associée. Chaque processeur élémentaire est pourvu d'une sortie unique, qui se divise ensuite pour alimenter un ensemble variable de neurones en aval [28].

À chaque connexion est attribué un poids spécifique.



Figure( II. 3): Modèle non linéaire d'un neurone

## II.2.5. le type de Réseaux de neurones [25 26]

### II.2.5. 1. Réseaux non boucles (non récurrent) :

Le perceptron multicouche constitue un exemple élémentaire de réseau de neurones statique, avec chaque couche comprenant un ou plusieurs neurones. Pour clarifier ce concept, voici les rôles attribués à chacune des couches dans un perceptron à trois couches.

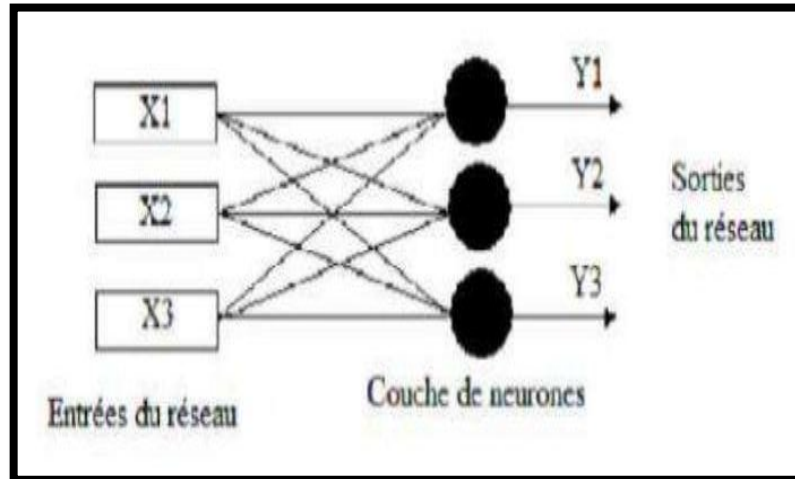
La première couche, appelée couche d'entrée, reçoit les données sources destinées à l'analyse. Sa dimension est ainsi déterminée par le nombre de variables d'entrée.

La deuxième couche, la couche cachée, est caractérisée par l'utilisation de fonctions d'activation généralement non linéaires. Le choix de sa dimension (nombre de neurones) n'est pas trivial et doit être ajusté. Pour obtenir une dimension optimale, il est souvent recommandé d'explorer différentes tailles.

La troisième couche, nommée couche de sortie, fournit le résultat issu du traitement par le réseau des données introduites dans la première couche. Sa dimension est directement influencée par le nombre de variables de sortie nécessaires [25].

Dans cette étude, nous employons un réseau statique non récurrent, car les paramètres recherchés dans le cadre de ce projet de recherche demeurent indépendants du temps.

La structure de ce type de réseau :



Figure( II. 4): Structure d'un réseau non récurrent

### II.2.5.2. Réseaux boucles (ou récurrents) :

L'architecture la plus générale pour un réseau de neurones est celle des "réseaux bouclés", caractérisés par un graphe de connexions cyclique. Dans ces réseaux, lorsqu'on suit le sens des connexions, on peut trouver au moins un chemin qui ramène à son point de départ, ce chemin étant appelé "cycle". Ainsi, la sortie d'un neurone du réseau peut dépendre de sa propre sortie précédente ; cette configuration est envisageable uniquement si la notion de temps est explicitement intégrée dans le modèle. [25 26]

La structure de ce type de réseau :

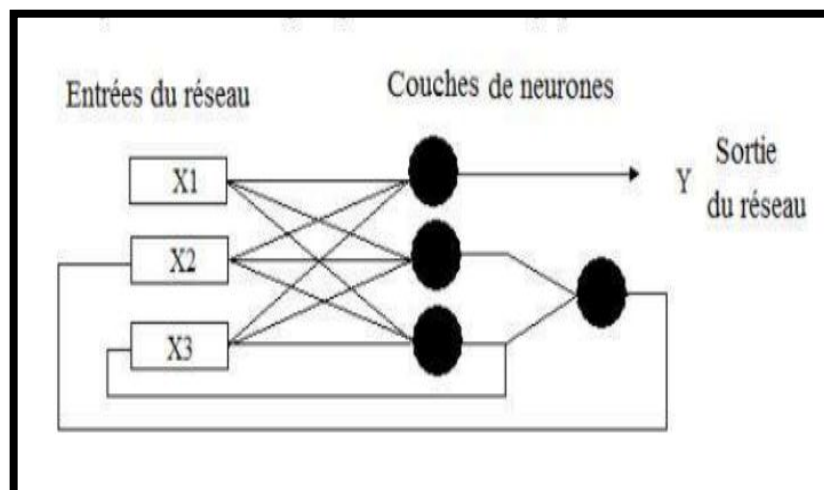
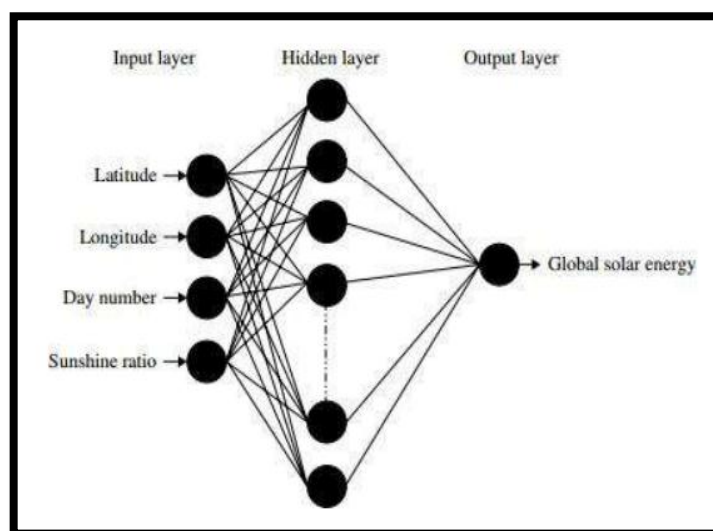


Figure ( II. 5): Structure d'un réseau boucles (ou récurrents)

### II.2.5. 3. FFLMP

Le FFLMP, acronyme de "Feedforward Neural Network" (Réseau de neurones à propagation avant), est largement considéré comme le plus utilisé dans le domaine des réseaux de neurones, car il apprend à partir d'exemples. La figure (II.6) correspond à un schéma diagrammatique d'un tel réseau. Celui-ci se compose de trois couches principales : les couches d'Entrée, Cachée et de Sortie. Chaque couche est interconnectée par des connexions de différentes intensités appelées poids.

Dans ce contexte, quatre variables géographiques et climatiques sont utilisées comme caractéristiques d'entrée : la longitude, la latitude, le nombre de jours et le pourcentage d'ensoleillement quotidien. La sortie du réseau est représentée par un nœud qui prédit l'indice de clarté quotidien estimé [27].



Figure( II. 6): Topologie de RNA utilisée pour modéliser l'énergie solaire globale

### II.2.5.4. GRNN

Le GRNN, ou Generalized Regression Neural Network (Réseau neuronal de régression généralisée), est un type de réseau neuronal qui se base sur des principes probabilistes. Contrairement à certains réseaux classiques où la variable cible est spécifique, les GRNN sont utilisés pour effectuer une régression lorsque la variable cible est continue. La figure (II.7) illustre un graphique représentant un GRNN utilisé pour prédire l'irradiation solaire horaire.

Ce réseau est composé de trois couches principales : les couches d'entrée, de masque et de sortie. La couche d'entrée comprend un neurone pour chaque variable prédictive. Ces

neurones d'entrée normalisent la plage de valeurs en soustrayant la médiane et en divisant par la plage quartile [28].

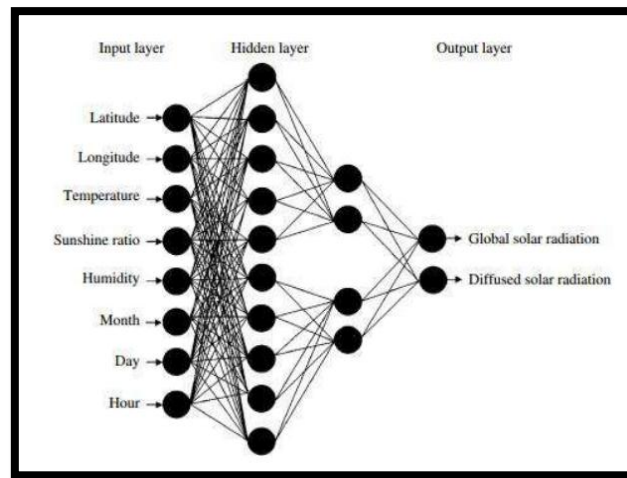


Figure (II. 7 ):Modèle GRNN pour la prévision du rayonnement solaire.

#### II.2.5.5. Le CFNN

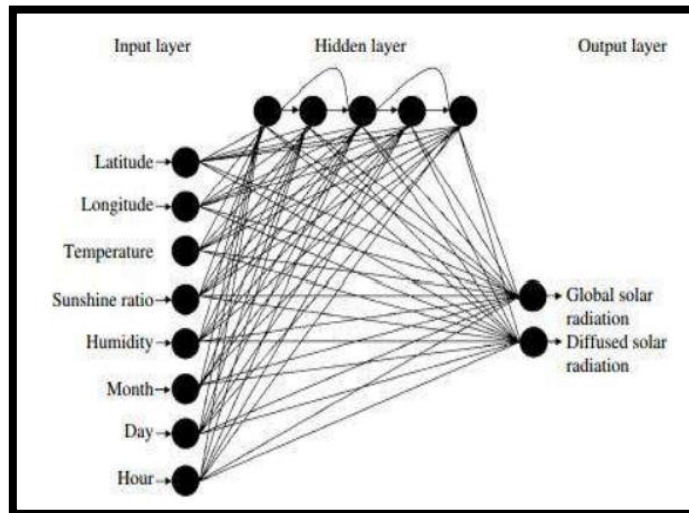
Le CFNN, ou Constant Feedforward Neural Network (Réseau neuronal à propagation avant avec constante), est composé de trois couches principales.

La première couche, la couche d'entrée, représente les entrées pour les valeurs des variables de prédiction.

La deuxième couche, la couche cachée, est où les opérations de prédiction sont effectuées. Dans cette couche, chaque neurone d'entrée est multiplié par un poids, puis les valeurs pondérées résultantes sont additionnées pour produire une valeur combinée. Cette somme pondérée est ensuite introduite dans une fonction de transfert, qui génère une valeur [29].

La troisième couche, la couche de sortie, est chargée de produire les résultats de prédiction. Dans cette couche, les sorties de la couche cachée, ainsi que les valeurs de tous les neurones d'entrée (y compris le biais), sont reçues. Chaque valeur présentée à un neurone de sortie est multipliée par un poids, puis les valeurs pondérées résultantes sont additionnées à nouveau pour produire une valeur combinée. Cette somme pondérée est ensuite introduite dans une fonction de transfert qui délivre la valeur finale de prédiction.

La figure (II. 8) illustre le diagramme du CFNN utilisé pour la prévision du rayonnement solaire.



Figure( II. 8): Modèle CFNN pour la prédiction du rayonnement solaire

### II.2.5.6.Le FFNN

Le FFNN, ou Feedforward Neural Network (Réseau neuronal à propagation avant), est constitué de couches d'entrée, de couches cachées et de couches de sortie. Dans ce type de réseau, les valeurs circulent uniquement du calque d'entrée vers le calque caché, puis vers les calques de sortie [30].

En ce qui concerne la sélection du nombre de neurones dans la couche cachée des réseaux FFNN, il n'existe pas de règles directes pour déterminer le nombre optimal de neurones cachés sans entraînement préalable et estimation de l'erreur de généralisation sur plusieurs réseaux. Cependant, l'utilisation d'un faible nombre de neurones cachés peut entraîner un sous-ajustement et une erreur de généralisation élevée, tandis qu'un nombre élevé de neurones peut entraîner un sur-ajustement et une variance élevée.

Pour obtenir une estimation empirique du nombre de neurones dans la couche cachée, certaines règles ont été suggérées. Par exemple, il est couramment recommandé que le nombre de neurones dans la couche cachée se situe quelque part entre la taille de la couche d'entrée et la taille de la couche de sortie. D'autres recommandations incluent le maintien du nombre de neurones cachés à moins de deux fois le nombre d'entrées, ou que le nombre de neurones cachés soit de 2/3 à 70 à 90% du nombre de neurones d'entrée.

En se basant sur ces recommandations, le nombre de neurones dans la couche cachée des modèles FFNN et CFNN a été sélectionné à deux nœuds cachés.

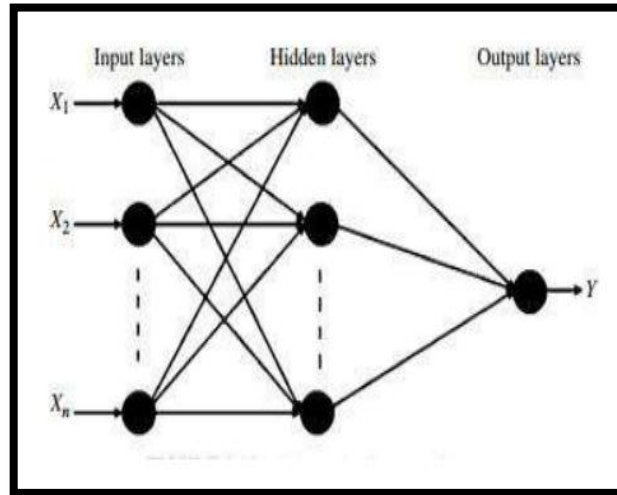


Figure ( II. 9): Schéma de principe du FFNN

### II.2.7 Domaine d'application des réseaux de neurones (RNA) :

Les réseaux de neurones (RNA) sont aujourd'hui largement utilisés dans divers domaines, parmi lesquels : [31]

- Application au traitement du signal
- Application à la planification
- Application au contrôle
- Application au diagnostic

### II.2.8 Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurones :

#### II.2.8.1 Avantages des réseaux de neurones : [32]

Les réseaux de neurones présentent plusieurs qualités significatives, notamment leur capacité d'adaptabilité et d'auto-organisation, ainsi que leur aptitude à résoudre des problèmes non linéaires avec une bonne approximation. Ils offrent également une bonne immunité aux bruits et sont bien adaptés à une mise en œuvre parallèle. La rapidité d'exécution est un atout majeur qui justifie souvent le choix d'implanter un réseau de neurones. Ces qualités ont permis de développer avec succès plusieurs applications telles que la classification, le filtrage, la compression de données, les contrôleurs, etc.

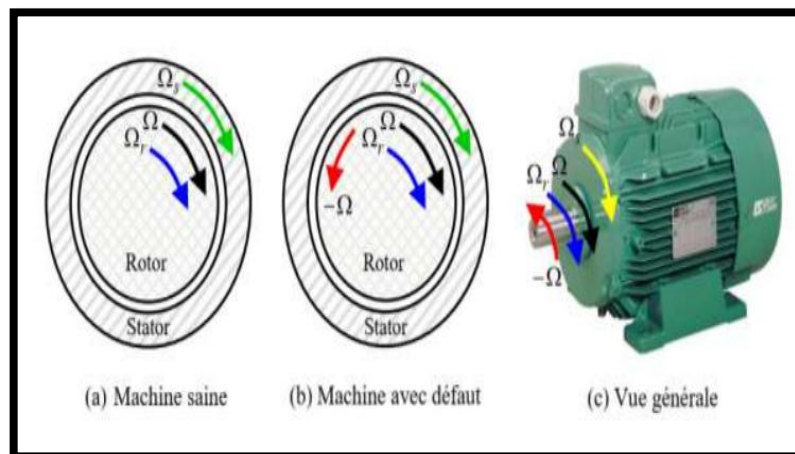
#### II.2.8.2 Inconvénients des réseaux de neurones : [32]

Cependant, il existe des inconvénients associés aux réseaux de neurones, notamment la difficulté d'interpréter leur comportement, ce qui complique la mise au point d'une application. Il est souvent impossible d'utiliser les résultats obtenus pour améliorer ce comportement, et généraliser à partir d'expériences antérieures pour en tirer des conclusions

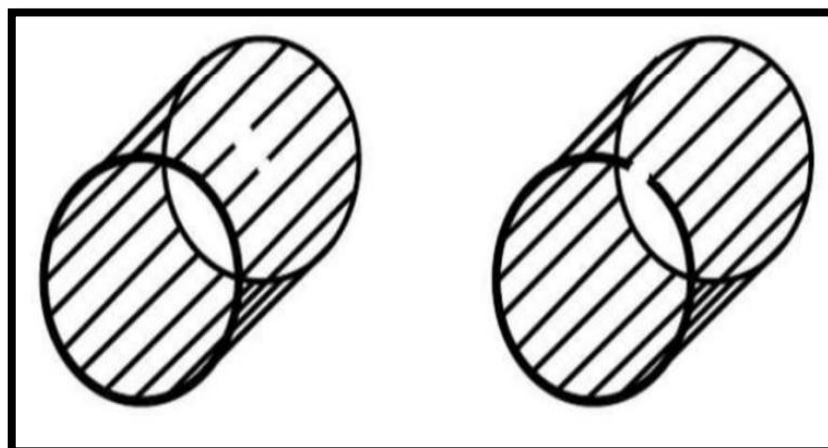
ou établir des règles sur le fonctionnement et le comportement des réseaux de neurones peut être hasardeux.

### II.3. Les défauts de la cassure de barres rotoriques :

Une défaillance du rotor induira une asymétrie magnétique de manière inhérente. Parallèlement, un système de tensions triphasées symétriques générera un champ magnétique rotorique inversé à la fréquence  $-gfs$ . Ceci induira des courants dans le circuit statorique à une fréquence de  $(1-2g)fs$ . Une autre composante émerge également dans le spectre du courant statorique à une fréquence de  $(1+2g)fs$ . Cette composante résulte des fluctuations de la vitesse induites par les variations du couple [33].



Figure( II. 10): schéma de fonctionnement pour une machine saine et avec défaut.



Figure( II. 11): défaut de rupture de barres et d anneau de court – round.

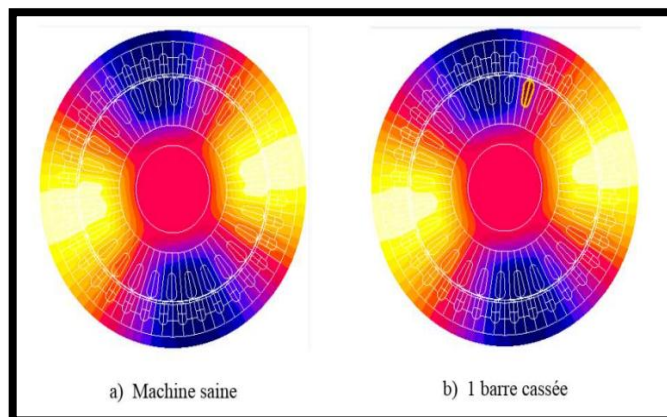
#### II.4. Causes des défauts rotoriques :

Les causes de la rupture des barres rotoriques et des ruptures de portions d'anneaux de court-circuit sont multiples, tout comme pour le stator. Ces raisons incluent : [34]

- L'effet thermique résultant du réchauffement de l'anneau de court-circuit et de la différence de température le long de la barre pendant le démarrage, causé par l'effet de peau.
- Les forces dynamiques engendrées par le couple de charge, les forces centrifuges et les contraintes cycliques.
- Les contraintes environnementales causées par la contamination et l'abrasion des matériaux du rotor dues aux particules chimiques.



Figure( II. 12): le rotor du moteur avec 2 barres cassées

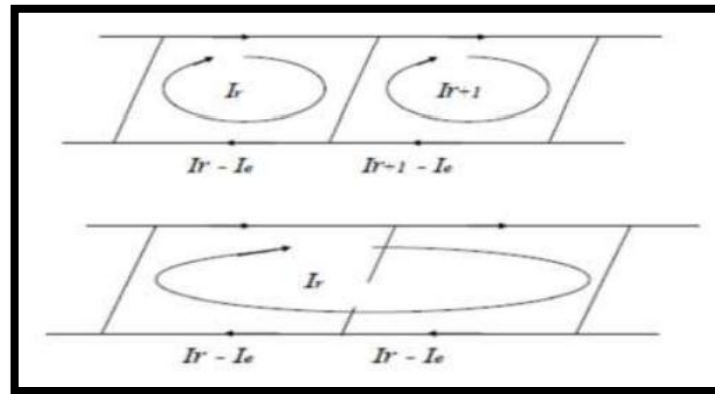


Figure( II. 13): Distribution de champ magnétique sous un défaut de la cassure de barre rotorique.

## II.5. Types de la rupture des barres rotoriques :

### □ Cassure totale d'une barre :

Une cassure totale d'une barre se caractérise par l'absence de passage du courant à travers celle-ci, ce qui le rend nul. La Figure (II.4) illustre la configuration générale de deux mailles adjacentes et présente les courants circulant dans les barres et les anneaux.



Figure( II. 14): Courants des barres rotoriques.

Si une barre est cassée (circuit ouvert), cela implique que ( $I_{r+1}=I_r$ ) (la Figure II.5). La condition ( $I_{r+1}=I_r$ ) est imposée sur la matrice des résistances et des inductances par l'addition de la colonne relative à ( $I_{r+1}$ ) à celle relative à ( $I_r$ ). De même, les lignes ( $I_{r+1}$ ) sont supprimées du vecteur courant et de tension. La taille des matrices est réduite selon le nombre de barres cassées.

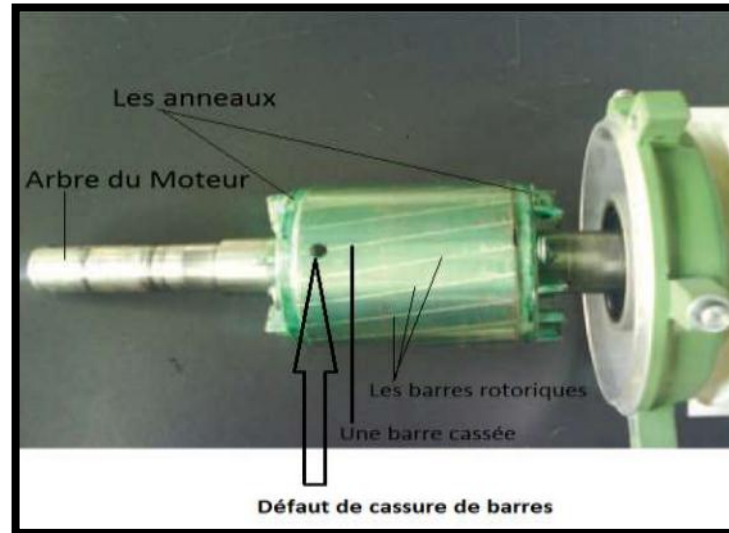
### □ Défaillance partielle d'une barre :

Une barre présentant un rétrécissement ou une mauvaise soudure voit sa résistance augmentée par rapport à une barre normale, ce qui implique le passage d'un faible courant à travers cette barre. La matrice de résistance est ajustée en augmentant la valeur de la résistance de la barre défectueuse [35].

En présence de cette défaillance, le rotor génère, en plus du champ rotorique direct qui tourne à la vitesse  $g\omega_s$  par rapport au rotor (glissement de la machine), un champ inverse qui tourne à une vitesse  $-g\omega_s$ . L'interaction de ces champs avec celui généré par le bobinage statorique engendre des composantes de fréquence ( $2g\omega_s$ ) dans le couple électromagnétique. Ces composantes sont responsables d'oscillations de vitesse, donnant lieu à des f.é.m. aux pulsations  $\omega_s$  ( $1-2g$ ) $\omega_s$ , ( $1+2g$ ) $\omega_s$  et ( $1-4g$ ) $\omega_s$  qui, à leur tour, créent des courants aux

mêmes pulsations. Ces courants induisent à leur tour des champs dans le rotor, tant directs qu'inverses, via un processus similaire, conduisant ainsi à des composantes de fréquences

$$F_{\text{defaut}} = (1 \pm \omega S_k g) f$$



Figure( II. 15): défaut de cassure de barres.

## II.6. Méthodes de diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques

### II.6.1 transformée de Fourier rapide (TFR) Haut du formulaire

Penchons-nous sur le signal  $x(t)$  en domaine temporel continu. Dans le cas où  $x$  possède une énergie finie, sa transformée de Fourier rapide (TF) à la fréquence  $f$  est définie comme suit [36] :

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

Son inverse est donné par :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) e^{j2\pi f t} df$$

La transformation de Fourier discrète (TFD) de  $N$  points de  $x$  avec une période d'échantillonnage  $T$  est exprimée comme suit :

$$x\left(\frac{f}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{K=0}^{K=N-1} x(KT) e^{-\frac{j2\pi fKT}{NT}}$$

et sa relation inverse est donnée par :

$$x(KT) = \frac{1}{N} \sum_{K=0}^{K=N-1} x\left(\frac{F}{NT}\right) e^{-\frac{j2\pi fKT}{NT}}$$

L'algorithme de la transformée de Fourier rapide (TFR) est conçu pour effectuer rapidement le calcul de la transformée de Fourier discrète (TFD). L'algorithme de base de la TFR utilise un nombre de points  $N$  qui est une puissance de 2. Cette caractéristique permet d'obtenir un gain de temps de calcul significatif par rapport à un calcul de la TFD classique. Plus précisément, le gain en temps de calcul est de l'ordre de  $2N/\log(N)$ .

Le signal sous sa forme fréquentielle  $x(f)$  est le plus souvent étudié par l'analyse de la courbe  $|x(f)|^2$  définissant l'amplitude du spectre à chaque fréquence. Cette transformation fait clairement ressortir le contenu fréquentiel du signal  $x(t)$ . En effet, la TFR décompose le signal  $x(t)$  sur une base de vecteurs propres sinusoïdaux. Malheureusement,  $\{R \in f\}$  ceci convient pour des signaux stationnaires dont les propriétés statistiques sont invariantes dans le temps. Cependant, en pratique la grande majorité des signaux rencontrés sont non stationnaires et la notion de décomposition sur une somme infinie d'exponentielles complexes propres à la TFR s'avère inadéquate. Pour mieux décrire ce type de signaux, on fait appel à des représentations faisant intervenir conjointement le temps et la fréquence. Le changement ainsi opéré nous permettra d'analyser les lois du comportement fréquentielle du signal au cours du temps. Dans le cas de l'existence de sauts, d'impulsions ou de changements de fréquence par exemple, la TFR ne permet pas de localiser ces événements transitoires qui surviennent dans le signal [37 38 39]

Ces phénomènes sont non stationnaires et du fait qu'ils sont brefs et souvent à caractère oscillatoire, leur contenu spectral est difficile à mettre en évidence. Dans ce cas, c'est le changement instantané de la fréquence tout au long du temps qui nous intéresse et pas nécessairement la fréquence elle-même. Il faut donc mettre à profit les caractéristiques et les propriétés statistiques du signal afin de faire apparaître les événements le constituant. Suite aux travaux fondamentaux de Gabor [40], Ville [41] et de Wigner [42] sur les représentations temps-fréquence (RTF), le sujet est quasiment devenu une discipline scientifique à part entière. Les RTF sont utilisés dans de nombreux domaines d'applications, pour la détection et pour la classification [43]. Plus récemment, la transformée en ondelettes a gagné en popularité et est devenue l'analyse la plus utilisée surtout dans le domaine industriel.

### II.6.2 Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG)

Contrairement à la TF qui évalue le contenu fréquentiel d'un signal  $x(t)$  en l'étudiant sur tout son domaine temporel, la transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG) estime le

contenu fréquentiel du signal  $x(t)$  dans une fenêtre localisée dans le temps [44]. Elle peut s'interpréter comme la projection du signal analysé sur des atomes temps-fréquences de Gabor. Ces atomes sont construits par une translation en temps d'une fenêtre unique  $h(t)$  et une modulation  $h_{b,f}(t) = h(t - b)e^{+j2\pi ft}$ . L'énergie de  $h_{b,f}$  est concentrée au voisinage de  $b$  sur un intervalle de longueur  $T_h$ . Sa transformée de Fourier s'obtient en translatant de  $f$  la transformée de Fourier  $\hat{h}$  de  $h$ :

$$h_{b,w}(w) = h(w - f)e^{-j2\pi t(w-f)}$$

L'énergie de  $h_{b,w}$  est localisée au voisinage de la fréquence  $f$  sur un intervalle de largeur  $B_h$ . Dans le plan temps-fréquence  $(t,w)$ , l'étalement de l'énergie de l'atome est représenté par un rectangle d'Heisenberg. Ce rectangle a pour centre  $(b, f)$  avec une largeur temporelle  $T_h$  et une largeur fréquentielle de  $B_h$  (Figure II. 7).

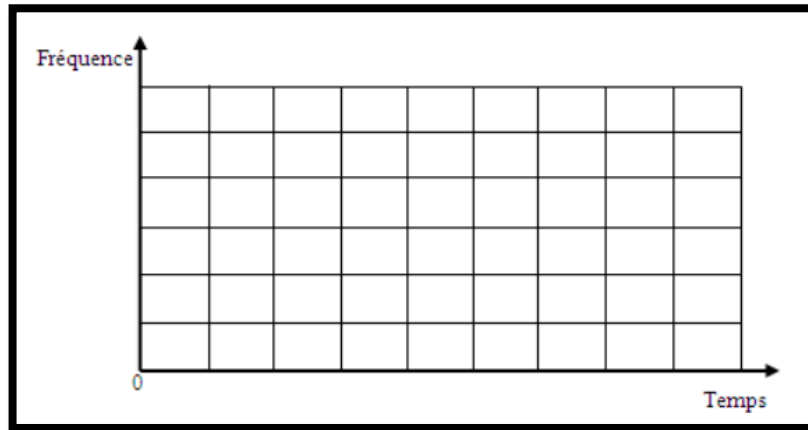


Figure ( II. 16): Pavage de la transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG).

Le principe de la TFFG consiste à effectuer une TF du signal  $x(t)$  multipliée au préalable par la fenêtre  $h(t - b)$ . Chaque fenêtre  $h$  est lissée, bien localisée et de courte durée  $T_h$  pendant laquelle  $x(t)$  est considéré comme stationnaire.  $h$  est en plus réelle, symétrique :  $h(t) = h(-t)$  et normalisée à  $\|h\| = 1$ , afin d'avoir  $\|h_{b,f}\| = 1$  pour tout  $(b, f) \in \mathbb{R}^2$ . L'application de la TFFG sur le signal  $x(t)$  fournit une représentation à deux dimensions dépendant du temps et de la fréquence [41]. Sa formule est :

$$Fx(b, f) = (x, h_{b,f}) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)h(t - b) e^{-j2\pi ft} dt$$

où la fonction qui associe  $h(t - b)$  à  $b$  est la fenêtre qui sélectionne la durée  $h T$  autour de l'instant  $b$ .

## II.6.3 Transformée en ondelettes

### II.6.3.1 Transformée en ondelettes continue (TOC)

#### II.6.3.1.1 Adaptabilité en temps et en fréquence

Lorsqu'un signal  $x(t)$  est la somme de multiples composantes avec des dérivées de fréquence instantanée très distinctes, il devient difficile de visualiser toutes ces composantes de manière concentrée à l'aide de la transformée de Fourier à temps-fréquence constante (TFFG). Dans de telles situations, il est nécessaire d'ajuster la taille de la fenêtre de manière variable en fonction de la position dans le plan temps-fréquence. C'est précisément le principe fondamental de la transformée en ondelettes. Les différentes composantes d'un même signal peuvent évoluer de manière divergente, selon qu'elles sont de haute ou basse fréquence. Une composante basse fréquence, par nature, demande un temps d'observation prolongé pour une analyse adéquate. À l'inverse, une composante haute fréquence évolue rapidement et nécessite une période d'observation plus courte pour son analyse. L'adaptabilité inhérente à l'analyse par transformée en ondelettes permet ainsi d'aborder ces composantes de manière différenciée. Une multitude d'ondelettes sont disponibles, offrant ainsi une grande variété d'approches d'analyse. Par ailleurs, il existe diverses formes de transformées, continues ou discrètes. Ainsi, la transformée en ondelettes offre la possibilité de représenter le signal dans un plan temps-échelle ou temps-fréquence, facilitant ainsi son analyse.

#### II.6.1.3.2 Atomes temps-fréquence

C'est comme une alternative à la transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG) que la transformée en ondelettes continue [43] a été développée afin de pallier les difficultés de résolution temps-fréquence. Morlet en 1983 [44], pour l'étude en haute résolution des signaux sismiques, propose une transformée où la taille de la fenêtre est variable, ceci grâce à un paramètre d'échelle. Cette transformée en ondelettes est une décomposition atomique dont les atomes sont issus d'une même fonction, l'ondelette mère, par opérations de translation et dilatation. Cette ondelette, appelée ainsi car représentant des oscillations, comme une onde, mais limitée en temps d'où le nom de la petite onde. Elle doit être bien localisée en temps et en fréquence. On conduit l'analyse en ondelettes de la même manière que l'analyse par la TFFG. Le signal est multiplié par une fonction semblable à la fonction de fenêtrage de la ft de la TFFG a été remplacée par une ondelette  $\pi$ TFFG. La fenêtre modulée  $h(t)e^{j2\pi ft}$ . La

translation est liée à la localisation de la fenêtre, à mesure que cette fenêtre est décalée sur l'étendue du signal. L'échelle peut s'interpréter comme l'inverse d'une fréquence  $1/f$ . De même que la TFFG, la transformée en ondelette permet de mesurer les variations temporelles des composantes spectrales de  $x(t)$ . Cependant, il existe une grande différence entre les deux transformées. Pour analyser des composantes transitoires de durées différentes, la transformée en ondelettes décompose les signaux sur une famille d'ondelettes translatées et dilatées. La largeur de la fenêtre est donc modifiée pour chacune des composantes spectrales individuellement, ce qui se traduit par une résolution temps-fréquence différente de celle de la TFFG. Ce dernier point est la caractéristique la plus significative de la transformée en ondelettes. Une famille d'atomes temps-échelle s'obtient à partir d'une ondelette unique, en la dilatant d'un facteur d'échelle  $a$  et en la translatant de  $b$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

La transformée en ondelettes de  $x \in L^2$  au temps  $t$  et à l'échelle  $a$  se calcule en projetant  $x(t)$  sur la famille d'ondelettes,  $\psi_{t/a}(s)$ ;  $t \in \mathfrak{R}$  et  $a \in \mathfrak{R}^+$ . La représentation temps-échelle obtenue est appelée transformée en ondelettes continue (TOC), sa définition est :

$$T_x(b, a) = \langle x, \psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

Sa version fréquentielle est donnée par :

$$T_x(b, a) = |a|^{1/2} = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \psi^*(af) e^{j2\pi fb} df$$

–  $\psi(f)$  doit être absolue et de carré intégrable :

$$\int |H(f)|^2 \frac{df}{|f|} = 1$$

Cette première propriété impose que l'ondelette  $\psi(f)$  ait un spectre  $H(f)$ , dont la décroissance soit au moins en  $|f|^{-2}$ .

– elle doit être de moyenne nulle, autrement dit, le spectre de  $\psi(f)$  s'annule à l'origine:

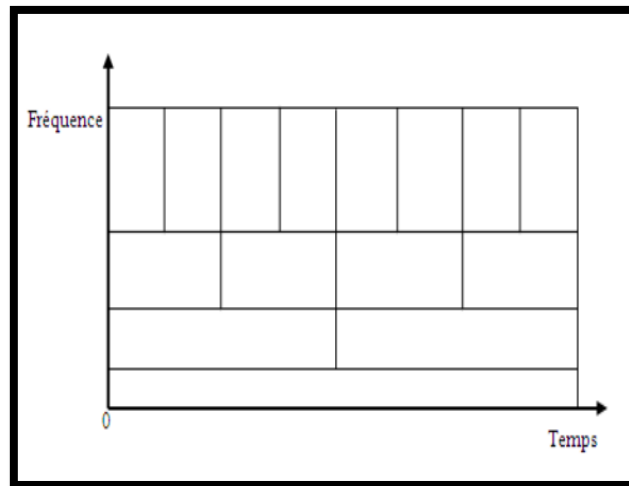
$$\int \psi(f) dt = H(0) = 0$$

### II.6.3.1.3 Résolution temps-échelle

Contrairement au comportement rigide de la TFFG, la transformée en ondelettes adopte un comportement dynamique, lié au zoom adaptatif de l'échelle  $a$ , pour suivre les réelles, les variations  $\psi$  singularités et les irrégulières du signal analysé. Avec une ondelette

brutales du signal  $x(t)$  produisent de grands coefficients d'ondelettes et la singularité locale est liée à la décroissance de  $T_x(b, a)^2$  lorsque  $a$  tend vers 0 [46].

La notion de représentation temps-échelle ou espace-échelle permet de voir la transformée en ondelettes comme un microscope mathématique, le zoom étant l'échelle et l'optique, l'ondelette. Le paramètre échelle est très similaire à la notion d'échelle pour les cartes géographiques. En tant qu'opération mathématique, les grandes échelles, ou basses fréquences, dilatent le signal et correspondent à des vues plus globales non détaillées du signal. Les petites échelles, ou hautes fréquences, correspondent à des vues détaillées et donnent des informations détaillées sur un motif caché dans le signal.



Figure( II. 17): Pavage de la Transformée en ondelettes (TO)

Généralement ces composantes de faibles échelles n'existent que sur de courtes durées du signal, elles apparaissent de temps en temps associées à des pics transitoires. A l'inverse, les grandes échelles existent typiquement sur toute la durée du signal .

### II.6.3.2 Transformée en ondelette discrète (TOD)

Pour appliquer la transformée en ondelette à des signaux numériques, il est nécessaire de discrétiser les paramètres de résolution  $a$  et de position  $b$ . Cette discrétisation dans le plan temps-fréquence se traduit par la mise en place d'une grille non uniforme déterminée par les paramètres de l'équation (III.11). La valeur de  $b_0$  est influencée par le choix de l'ondelette [47].

$$(b, a) = (nb_0 a_0^m, a_0^m), b_0 > 0, a_0 > 1, m \in \mathbf{Z}$$

L'idée fondamentale derrière cette discrétisation est la suivante : une fois qu'un niveau de grossissement est choisi et que le processus est étudié à une position spécifique, nous nous

déplaçons ensuite vers une autre position. Si le niveau de grossissement est élevé (pour une analyse des détails à petite échelle), les déplacements se font par de petits incréments. En revanche, si le niveau de grossissement est faible (pour une analyse à plus grande échelle), les déplacements peuvent être plus rapides. Ce mécanisme est automatiquement réalisé si l'incrément de déplacement est inversement proportionnel au niveau de grossissement. Ainsi, un atome de cette transformation discrète est défini comme indiqué dans l'équation (III.12).

$$\psi_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi \left( \frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) = a_0^{-\frac{m}{2}} \Psi(a_0^{-m} t - nb_0)$$

La transformée en ondelette discrète de  $x(t)$ , calculée à partir de  $\psi_{m,n}(t)$ , est donnée par l'équation :

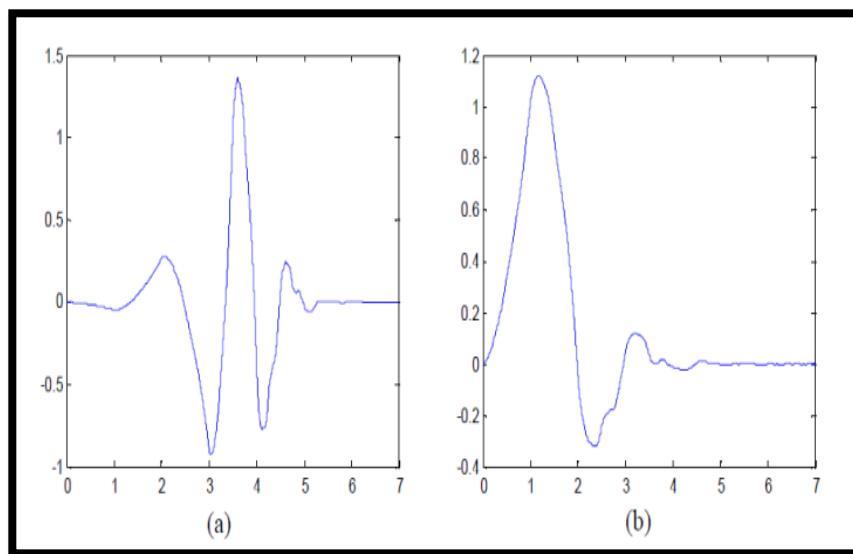
$$T_{dx}(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \int x(t) \psi(a_0^{-m} t - nb_0)$$

Dans la formalisation de l'analyse multi-résolution, deux choix de discrétisation sont possibles. Le premier consiste en une décomposition continue où  $0 < a < 1$  est très proche de 1 et  $0 < b < 1$  est suffisamment petit. Dans ce cas, il sera nécessaire d'étudier les fréquences en fonction de coefficients de dilatation imposés par une évolution en puissance de  $m$ , avec  $m$  le niveau de détails. Le second choix ( $a=2, b=1$ ) correspond à un échantillonnage dyadique du plan temps-fréquence (transformée en ondelettes discrète, *TOD*) [47].

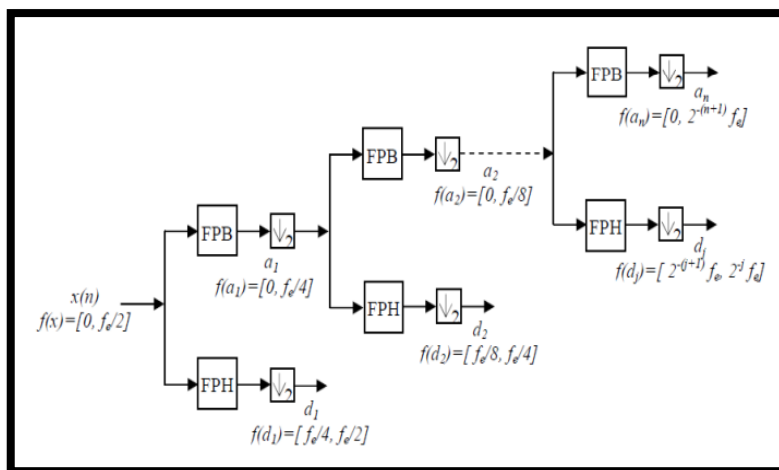
La Transformée en Ondelette Discrète (TOD) est viable uniquement si les ondelettes sont orthogonales. L'orthogonalité implique que l'information capturée par une ondelette est totalement indépendante de celle capturée par une autre, garantissant ainsi la réversibilité en conservant uniquement l'information nécessaire. Une ondelette mère orthogonale et sa fonction d'échelle permettent une analyse multi-résolution orthogonale, où les espaces de détail et d'approximation sont orthogonaux, ce qui signifie que la projection des vecteurs de la base d'un espace sur l'autre donne zéro. Chaque ondelette et sa fonction d'échelle associée sont également orthogonales. Une famille particulièrement populaire a été développée par Ingrid Daubechies. Un exemple notable est l'ondelette de Daubechies d'ordre 4 (db4) et sa fonction d'échelle.

La réussite de la transformée en ondelette repose en partie sur son efficacité d'implémentation matérielle. La méthode la plus courante consiste à utiliser des bancs de filtres organisés en une structure pyramidale, une technique découlant des travaux de Mallat. Deux filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR) calculent, à chaque niveau, les coefficients d'ondelette (pour les détails) et les coefficients d'échelle (pour les approximations), chacun

possédant des caractéristiques passe-haut et passe-bas respectivement. Pour maintenir le même nombre d'échantillons en sortie qu'en entrée, les produits de convolution des filtres sont sous-échantillonnés d'un facteur deux. Seule la sortie du filtre passe-bas (représentant l'approximation) est soumise à un traitement ultérieur par les deux filtres. Cette structure pyramidale est illustrée dans la figure III.4. Pour obtenir la transformée inverse, l'algorithme est simplement inversé, utilisant une autre paire de filtres FIR. Les quatre filtres (deux pour la décomposition et deux pour la reconstruction) associés au sous-échantillonnage forment un banc de filtres conjugués en quadrature.



Figure( II. 18): Ondelette de Daubechies 4, db4 (a) et sa fonction d'échelle (b).



Figure( II. 19): Principe de la décomposition par la transformée en ondelettes discrète au niveau n (FPB : Filtre Passe Bas, FPH : Filtre Passe Haut, 2 : décimation).

Etant donné un signal discret  $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , la TOD le décompose en différents signaux de détail  $d_j$  et d'approximation  $a_n$ . Les fréquences correspondants aux signaux de détail  $d_j$  et d'approximation  $a_n$  sont données par :

$$f(d_j) \in [2^{-(j+1)}f_e, 2^{-j}f_e] \text{Hz}, f(a_n) \in [0, 2^{-(j+1)}f_e] \text{Hz}$$

Les signaux d'approximation et de détail fournissent une représentation temporelle de l'évolution des composantes de fréquence du signal original  $x$ , contenues dans ses différentes bandes de fréquence. Cependant, en raison de limitations dans le processus de filtrage, il peut y avoir un certain chevauchement entre les bandes de fréquences adjacentes. Dans le contexte de la TOD, cet effet peut entraîner une distorsion lorsque certaines composantes de fréquence du signal se situent près des limites d'une bande. Pour atténuer ce problème, l'utilisation de fonctions d'ondelettes avec des filtres d'ordre élevé peut être bénéfique en réduisant la largeur du chevauchement entre les bandes. La figure II.5 illustre la réponse en fréquence des fonctions d'ondelettes db5 et db44, mettant en évidence que db5 présente un chevauchement plus important par rapport à db44.

Avant d'appliquer la TOD, il est nécessaire de sélectionner préalablement le type d'ondelette mère et le nombre de niveaux de décomposition. Le choix de l'ondelette mère est étroitement lié aux coefficients des filtres utilisés dans le processus de filtrage de la TOD [47].

Au fil des dernières décennies, plusieurs familles d'ondelettes, présentant différentes propriétés mathématiques, ont été développées. Le choix de l'ondelette mère peut être basé sur un compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul requis.

Quant au nombre de niveaux de décomposition, il est déterminé par la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  et les composantes de basse fréquence à extraire. À cet égard, il est crucial de vérifier la condition spécifiée en (III.15), qui stipule que la limite inférieure de la bande de fréquence contenant la composante caractéristique du défaut doit être inférieure à cette fréquence de défaut.

$$l > \frac{\log\left(\frac{f_e}{f_b}\right)}{\log(2)} - 1$$

Les énergies correspondants aux signaux de détail  $d_j$  et d'approximation  $a_n$  peuvent être calculées par (III.16) et (III.17), respectivement [38]:

$$E(a_n) = \sqrt{\frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} (a_n)^2[i]}$$

$$E(d_j) = \sqrt{\frac{1}{N_l} \sum_{i=1}^{N_l} (d_j)^2[i]}$$

### II.6.3.3 Transformée en paquets d'ondelette (TPO)

**Les transformées en ondelettes imposent une « trame » de résolutions : depuis**

L'ondelette mère, en appliquant les dilatations successives pour construire la base d'ondelettes, un ensemble de fonctions est conçu dont les résolutions en temps et en fréquences sont liées entre elles. Le principe des paquets d'ondelette est d'adapter les résolutions temps-fréquence en fonction du signal étudié [44] :

- Pour les ondelettes, la résolution temporelle est a priori optimale pour une fréquence donnée. En revanche,
- pour les paquets d'ondelette, la résolution s'adapte au contenu de la carte temps-fréquence : la résolution temps-fréquence peut être sélectionnée a posteriori en fonction des caractéristiques des signaux étudiés.

Comme pour les transformées en ondelette discrète orthogonales, les paquets d'ondelette nécessitent l'utilisation d'ondelettes orthogonales. Le principe de la décomposition en paquets d'ondelette consiste à répéter le processus de décomposition d'un signal en approximation et en détail, non seulement sur les coefficients d'approximation, mais aussi sur ceux de détail. Cela permet d'obtenir un plus grand nombre d'espaces de projection. La figure III.5 illustre l'algorithme pyramidal étendu permettant d'obtenir ces coefficients. Ce schéma de décomposition peut être visualisé comme une matrice de coefficients où chaque ligne se décompose en deux sous-arbres correspondant à des sous-espaces orthogonaux.

Pour garantir l'orthogonalité, seules les décompositions formant une base complète dans le sens horizontal de cette matrice, sans chevauchement vertical, sont considérées valides. L'arbre de décomposition ainsi obtenu offre une variété de choix, comme une décomposition complète, des coefficients d'ondelette classiques, ou toute autre décomposition orthogonale valide.

## II.7 Technique de diagnostic (MCSA)

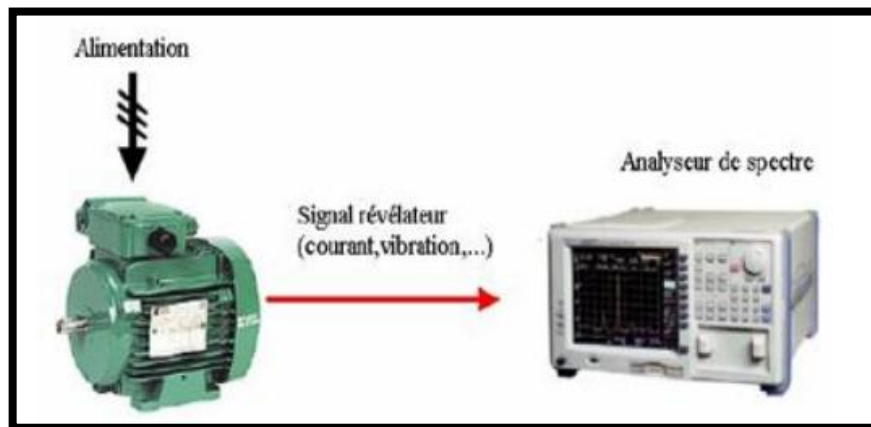
La méthode de la MCSA, abréviation de Motor Current Signal Analysis, est également désignée en français par l'acronyme ASCS, qui se traduit par Analyse des Signatures du Courant Statorique ou Analyse Spectrale du Courant Statorique.

### II.7.1 Analyse spectrale

#### II.7.1.1 principe

Depuis de nombreuses années, l'analyse spectrale est employée pour détecter des défaillances dans les machines électriques, principalement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones à cage, la détérioration des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans le bobinage. Ces situations se prêtent bien à cette approche car de nombreux phénomènes se manifestent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation [48].

La surveillance par analyse spectrale de la MAS implique de réaliser une transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, puis de visualiser les fréquences parasites qui constituent la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs sélectionnées pour cette analyse sont les grandeurs mécaniques telles que les vibrations, le couple électromagnétique et les vitesses [49].



Figure( II. 20): Principe de la surveillance par analyse spectral [48].

#### II.7.1.2 Spectre d'un signal

##### II.7.1.2.1 Définition d'un signal

Un signal représente la mesure d'une grandeur physique, telle qu'un signal sismique, une mesure du pouls, un déplacement, une tension, une intensité, etc. La plupart des grandeurs

physiques sont actuellement converties en signaux électriques, puis encodées en signaux numériques binaires. Les mesures totalement analogiques sont rares de nos jours.

#### **II.7.1.2.2 Définition du spectre d'un signal**

Le spectre d'un signal est la représentation des amplitudes des différentes composantes présentes dans le signal en fonction de la fréquence.

### **II.7.2 Analyse spectrale du courant statorique (MCSA)**

#### **II.7.2.1 Définitions**

a) L'analyse spectrale du courant statorique est une méthode de contrôle qui implique l'analyse du spectre du courant statorique. Dans un spectre d'un moteur sans défaut, on observe la composante fondamentale à la fréquence du réseau d'alimentation en régime permanent, accompagnée de composantes à faibles et hautes fréquences dues à la géométrie de la machine considérée. Un équipement d'analyse de spectre de grande sensibilité et la comparaison entre les spectres du courant d'un moteur avec défaut et celui de référence (le spectre du courant d'un moteur sans défaut) permettent d'obtenir une analyse précise et d'extraire un maximum d'informations sur l'état du moteur.

Cette méthode est utilisée pendant le fonctionnement normal du moteur (lorsqu'il est en marche), ce qui facilite grandement la surveillance de la machine et permet d'indiquer à tout moment l'état de son fonctionnement.

b) L'analyse du courant statorique est un outil puissant pour détecter la présence d'anomalies mécaniques et électriques, non seulement dans le moteur, mais également dans la charge. Des améliorations considérables ont été apportées à cette technique, connue dans la littérature sous diverses dénominations.

- Les signaux de courant présentent l'avantage d'être facilement mesurables et peu coûteux.
- Des composantes fréquentielles ont été identifiées pour chaque type de défaut. Il est important de noter que l'amplitude de la composante fréquentielle augmente avec la sévérité du défaut.
- Parmi tous les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car il est facile à mesurer et permet de détecter les défauts électriques, y compris les défauts purement mécaniques.
- Cette méthode, connue sous le nom de "Motor Current Signature Analysis" (MCSA), repose sur les phénomènes électromagnétiques qui se traduisent par une information dans le courant statorique. Elle est appuyée par un algorithme de calcul rapide appelé Transformée de Fourier Rapide (FFT).

- Les défauts de la machine asynchrone se manifestent dans le spectre du courant statorique par : [50], [51]
- L'apparition de raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine et aux paramètres physiques de la machine (nombre de barres rotoriques et nombre de paires de pôles).
- La modification de l'amplitude des raies spectrales déjà présentes dans le spectre du courant. La surveillance par le courant statorique nécessite une bonne connaissance des défauts et de leurs signatures. Elle est actuellement utilisée dans le contexte des machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquences caractéristiques de défauts [50].
- La présence d'harmoniques caractérisant les défauts de la machine asynchrone [52].

### II.7.2.2 Technique de la FFT

La FFT (Fast Fourier Transform) est un moyen efficace de réduire le nombre d'opérations arithmétiques nécessaires à la transformée discrète de Fourier. Son importance croît avec l'évolution du traitement numérique des signaux, ainsi qu'avec la possibilité de l'utiliser pour des signaux analogiques ou plus généralement pour des fonctions continues dans de nombreux domaines scientifiques.

Cette méthode est très simple à utiliser car elle ne nécessite pas l'introduction d'appareils de mesure à l'intérieur de la machine électrique. Elle consiste simplement à analyser le courant statorique du moteur [52], [53], [50].

### II.7.2.3 Surveillance du moteur asynchrone basée sur la technique de la MCSA

Selon la littérature, les principaux signaux du moteur utilisés et utilisables pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine sont les suivants :

- Couple électromagnétique
- Puissance instantanée statorique
- Vibration mécanique
- Courant statorique

Parmi tous ces signaux utilisables, le courant statorique s'est révélé être l'un des plus intéressants pour deux raisons :

1. La surveillance du courant statorique permet de détecter et même de diagnostiquer à la fois des défauts électromagnétiques (tels que le déséquilibre de phase, les courts-circuits entre spires, les excentricités d'entrefer, les ruptures de barres, etc.) et des défauts

purement mécaniques (comme la dégradation des roulements à billes, le désalignement, etc.).

2. Le courant statorique est très facilement accessible, car il est utilisé pour la commande de la machine et peut être mesuré directement au poste d'alimentation.

□ **Remarques sur la surveillance du moteur asynchrone basée sur le courant statorique**

Trois remarques importantes peuvent être formulées concernant la surveillance du moteur asynchrone basée sur le courant statorique : [49]

1. **L'impact de la charge** : La charge est un paramètre crucial à prendre en compte dans le processus de diagnostic. En effet, les fréquences de certaines composantes spectrales du courant statorique dépendent du glissement  $g$  et donc de la charge. Lorsque le glissement est très faible, l'espacement entre certaines raies spectrales adjacentes devient très étroit, rendant l'analyse des signaux plus délicate.
2. **Recouvrement des signatures** : L'utilisation d'un même signal pour détecter différentes défaillances peut entraîner des problèmes de recouvrement de leurs signatures. Par exemple, une excentricité d'entrefer causée par un défaut mécanique, tel qu'un mauvais alignement du rotor, et celle causée par un défaut électromagnétique présentent la même signature spectrale.
3. **Complexité de l'interprétation** : En raison de la richesse et de la complexité du spectre du courant statorique, la discrimination entre un bon et un mauvais fonctionnement du moteur asynchrone est difficile à décider pour un praticien non expert. Face aux multiples événements pouvant être induits par les différentes conditions de fonctionnement, même les plus normales, cette tâche nécessite une expertise approfondie.

## II.8 Conclusion

Ce chapitre a offert une vue d'ensemble approfondie sur la modélisation des réseaux de neurones et les techniques d'analyse utilisées pour le diagnostic des défauts rotoriques dans les machines asynchrones à cage. En explorant les bases théoriques des réseaux neuronaux, y compris les neurones biologiques, les principes des neurones artificiels et les différentes architectures de réseaux, nous avons établi une fondation solide pour comprendre leur fonctionnement et leur application dans le domaine du génie électrique.

De plus, en examinant en détail les méthodes spécifiques d'analyse des défauts rotoriques telles que la transformée de Fourier rapide, la transformée en ondelettes et l'analyse spectrale, nous avons souligné leur importance dans la détection et la localisation précises des défauts. Ces techniques offrent des outils puissants pour améliorer la fiabilité opérationnelle des machines asynchrones et pour mettre en place des stratégies de maintenance prédictive plus efficaces. En combinant ces connaissances théoriques avec des études de cas pratiques, nous pourrions exploiter pleinement le potentiel des réseaux neuronaux dans le diagnostic avancé des machines électriques, ouvrant ainsi la voie à des systèmes industriels plus fiables et durables.

## *Chapitre III*

# *Analyse spectrale du défaut de la cassure des barres rotoriques*

### III.1 Introduction

Diverses techniques ont été développées pour réaliser le diagnostic. La plupart de ces méthodes reposent sur la comparaison des grandeurs de la machine en état sain et en état défectueux. Dans ce chapitre, nous présenterons l'analyse spectrale du courant statorique (expérimentalement, le courant statorique instantané isa) de la machine asynchrone triphasée à cage, tant en état sain qu'en présence de défauts, en utilisant la transformation de Fourier rapide (FFT). Nous démontrerons comment cette méthode permet de détecter les signatures de défauts dus à des barres cassées. De plus, nous montrerons également l'influence du nombre de barres cassées sur le contenu spectral du courant statorique [54].

### III.2 Présentation du banc D'essai

On a exploité les résultats du banc de tests qui a été effectué dans le laboratoire du génie électrique à Biskra (LGEB). L'acquisition des courants nous permet d'appliquer la

Technique de la MCSA afin de détecter le défaut de la cassure de barres en comparant avec

L'état sain de la machine asynchrone [2].

Les constituants principaux du banc d'essai sont :

- Une carte en temps réel DSPACE DS1104 ;
- Une MAS à rotor à cage d'écureuil : AZAZGA 3 kW, couplage triangle, P=2
- Une charge pour le freinage, soit une machine à courant continu ou un frein à poudre magnétique.

La figure (II-2) illustre une photo de système expérimental connecté avec la carte Dspace qui se traduit par Matlab/Simulink sous une fréquence d'échantillonnage  $f_e=10000\text{Hz}$ .



Figure III.1 Photo du banc d'essai dédié au diagnostic.

Nous allons présenter une analyse complète sur le défaut des cassures de barres en se basant sur les résultats expérimentaux obtenus à partir de banc d'essai.

### III.3 Ruptures de barres dans les machines asynchrones

La cassure ou rupture de barres est l'un des défauts les plus courants au niveau du rotor. Elle peut se produire soit au niveau de l'encoche, soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, ce qui provoque des variations de la vitesse de rotation et engendre des vibrations mécaniques, entraînant un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Par conséquent, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées, induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'impact d'une rupture de barre augmente rapidement avec le nombre de barres cassées. [54]

#### III.3.1 Résultats et discussion de la cassure de barres

Nous avons trouvé deux testes ; le premier pour une seule barre cassée et le second pour deux barres cassées.

La figure (III.2) représente des photos pour un rotor avec une barre cassée (1BC) et un autre pour deux barres cassées (2BC).



**Figure (III.2):** Photographie des rotors de la MAS de 3 kW pour une barre cassée (gauche) et avec deux barres cassées (droite).

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

Qui est simulé en rouge désigne l'état de la cassure de barres [2].

### III.3.1.2\_Fonctionnement en charge

Dans ce cas, la machine présente un couple résistant de 15 N.m, équivalent à 75 % de la charge nominale, avec un glissement de 3,6 %. Le courant électrique d'une phase statorique de la machine asynchrone est illustré dans la figure (III.3) sous un défaut de 1BC dans les conditions de charge.

Le courant électrique d'une phase statorique de la MAS est illustré dans la figure (III-4) sous un défaut de 01 BC en charge. La figure (III.5...11) présente le spectre du courant statorique lors du fonctionnement en charge de deux machines : l'une en bon état et l'autre avec une barre cassée (01 BC)

Le courant électrique d'une phase statorique de la MAS est illustré dans la figure (III-4) sous un défaut de 01 BC pour les deux conditions de charge. La figure (III.5...11) montre le spectre du courant statorique lors du fonctionnement en charge de deux machines : l'une en bon état et l'autre avec une barre cassée (01 BC). Il est important de noter que les fréquences correspondant aux ordres 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, ...  $(6k\pm 1)$  ont les fréquences  $(6k\pm 1)fs$ . Ces harmoniques sont connus sous le nom d'harmoniques de la force magnétomotrice (FMM). Leur apparition s'explique par la présence de ruptures de barres du rotor avec un glissement  $s$ . La formule suivante montre clairement les valeurs des autres fréquences appelées fréquences de bande latérale (FBL). En général, les harmoniques du courant statorique de fréquence  $(6k\pm 1)fs$  sont détectées sous ces conditions.

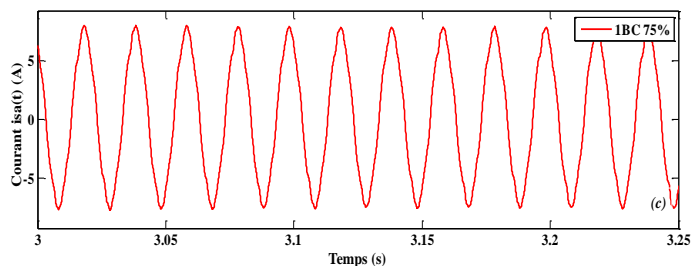
$$f_{cb} = (6\pm 1) \pm 2kg)fs, \quad k = 1,2,3, \dots \quad (III.1)$$

Cette formule a été vérifiée dans notre étude à travers les bandes latérales présentées dans la figure (III.5...11). Un autre indicateur du défaut de rupture des barres est représenté par des bandes latérales autour des harmoniques des encoches rotoriques (RSHs). Ces fréquences sont associées aux RSHs et espacées de  $2sfs$ . Nous arrivons donc à la formule suivante :

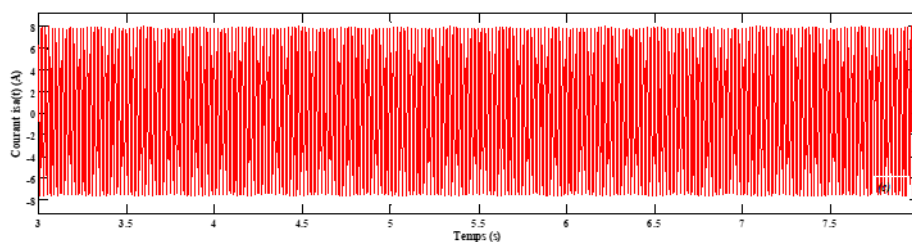
$$f_{cb} = RSH \pm 2Kg fs \quad (III.2)$$

Ou bine,

$$f_{cb} = \left( \frac{Kn_b(1-g)}{p} \pm v \pm 2ks \right) fs = Kn_b \cdot fs \pm v fs \pm 2kg \cdot fs \quad (III.3)$$



**Figure (III.3) :** Courants statoriques du moteur asynchrone avec 1BC (en charge).



**Figure (III.4) :** Courants statoriques du moteur asynchrone avec 1BC (en charge).

Une fréquence a été identifiée dans le spectre de la MAS pour les deux états du moteur (sain et défectueux) : il s'agit de la composante du double de la fréquence d'alimentation, soit 100 Hz. La formule générale est la suivante :

$$F_{doub-s} = f_{100Hz} = 2f_s \quad (III.4)$$

Selon la littérature, cette fréquence peut avoir plusieurs sources, telles que le déséquilibre de l'alimentation (champ statorique) ou la déformation du stator. Nous avons réalisé une acquisition de la tension d'alimentation à l'aide d'un oscilloscope numérique, ce qui nous a permis d'effectuer une analyse FFT.

La variation de la charge entraîne une variation du glissement. Nous appliquons maintenant un couple résistant correspondant à une charge de 75% ( $g=3,6\%$ ). La représentation temporelle du courant statorique est montrée. Il est confirmé que le défaut de cassure de barres induit des fréquences de bandes latérales (FBL) autour des fréquences suivantes : la fondamentale  $f_s$ , les harmoniques 5 et 7, ainsi que les RSHs. La figure (III.9.10.11) illustre les FBL, où les fréquences se déplacent en fonction de l'ordre des harmoniques.

Sous des conditions anormales (présence d'un défaut de rupture de barre), des harmoniques sont générées dans le courant, provoquant des déformations de celui-ci.

Une série de nouvelles composantes fréquentielles de valeurs  $(1 \pm 2k)f_s$  et d'autres précédemment mentionnées caractérisent ce type de défaut. Ces nouveaux harmoniques

apparaissent dans le spectre du courant statorique. Les valeurs des raies qui caractérisent le défaut de cassure des barres autour de la fréquence fondamentale, des harmoniques 5 et 7, ainsi que des RSHs, sont résumées dans le tableau (III.1). La vérification des trois types de FBL est liée aux formules (III.1) ,(III.2) ,(III.3), (III.4) et aux formules indiquées dans le tableau (III.1).

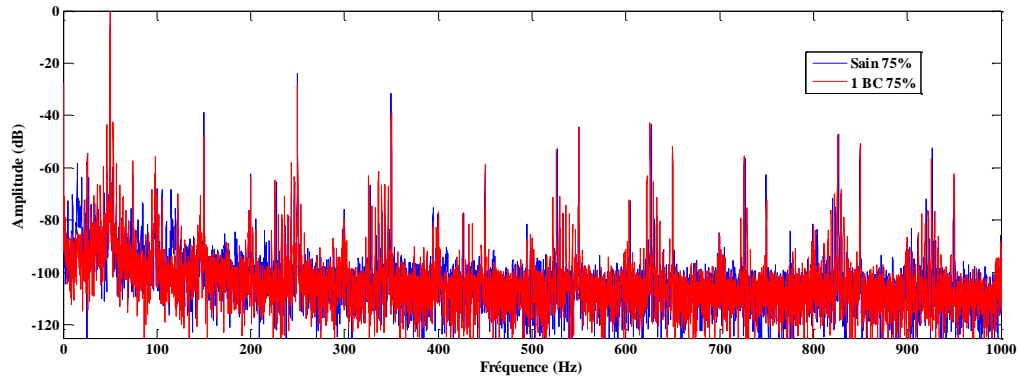
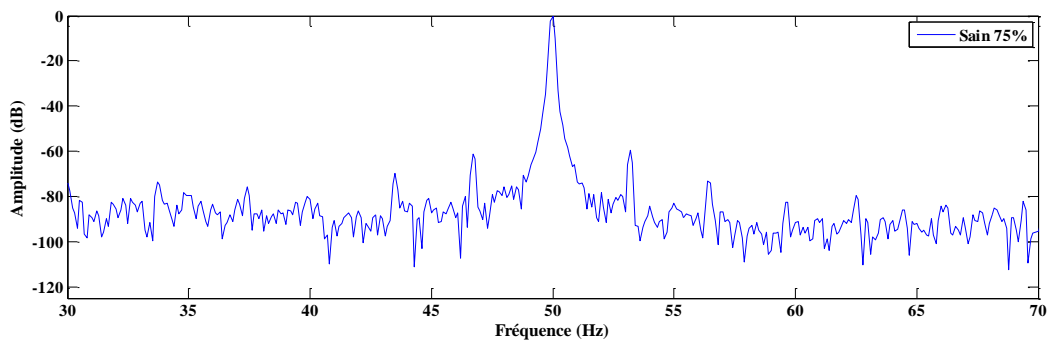
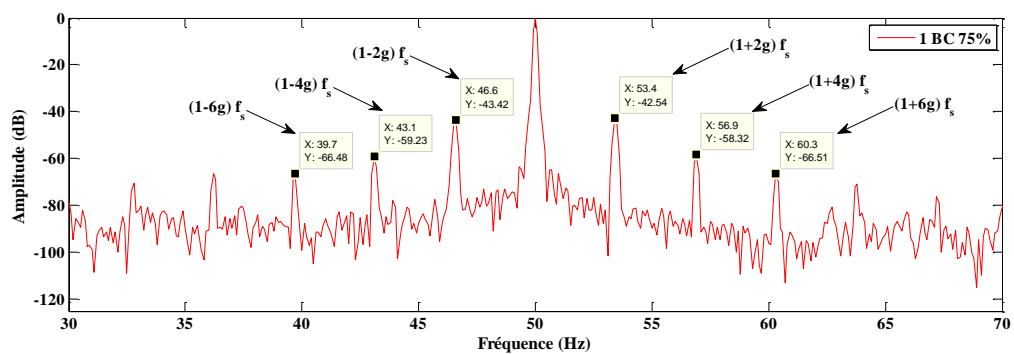


Figure (III.5): Spectre du courant statorique avec (1BC,sain) (en charge).



Figure

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



Figure(III.7) : Zoom de spectre du courant statorique avec 1BC(en charge).

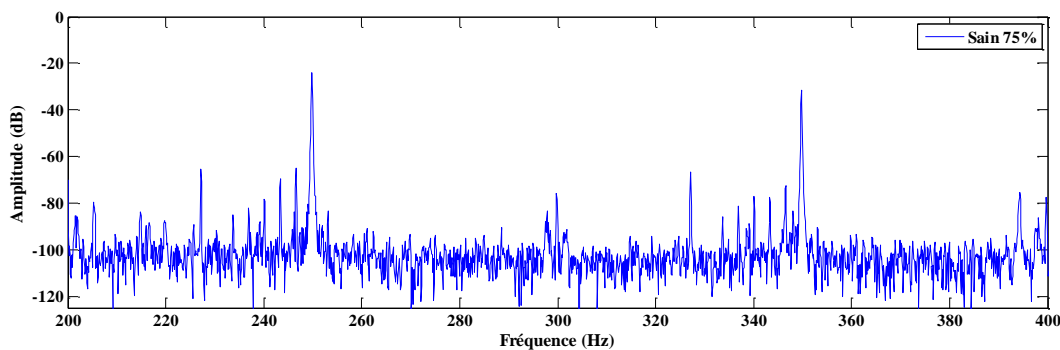


Figure (III.8) : Spectre du courant statorique sain (en charge).

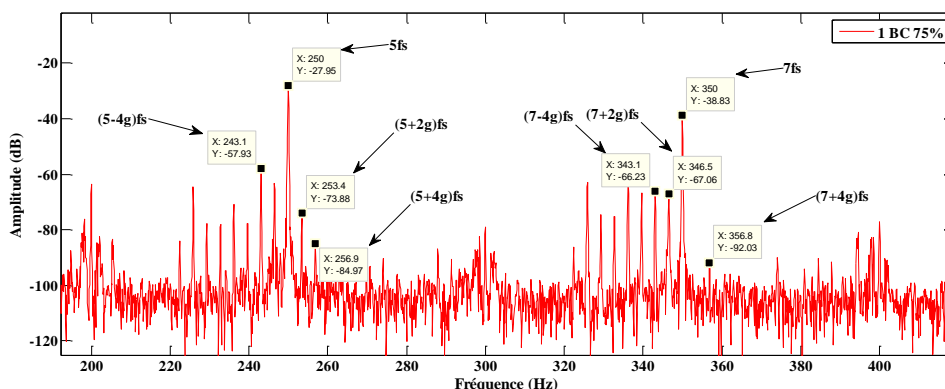


Figure (III.9): Fréquences qui correspondent aux ordres 5et7 avec 1BC (en charge).

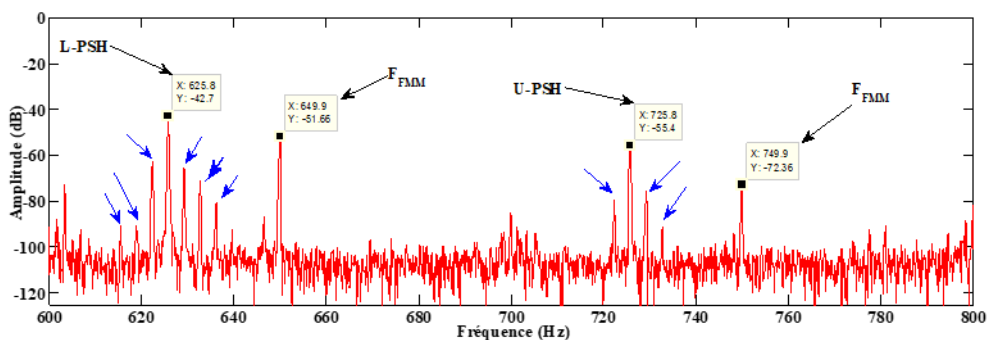
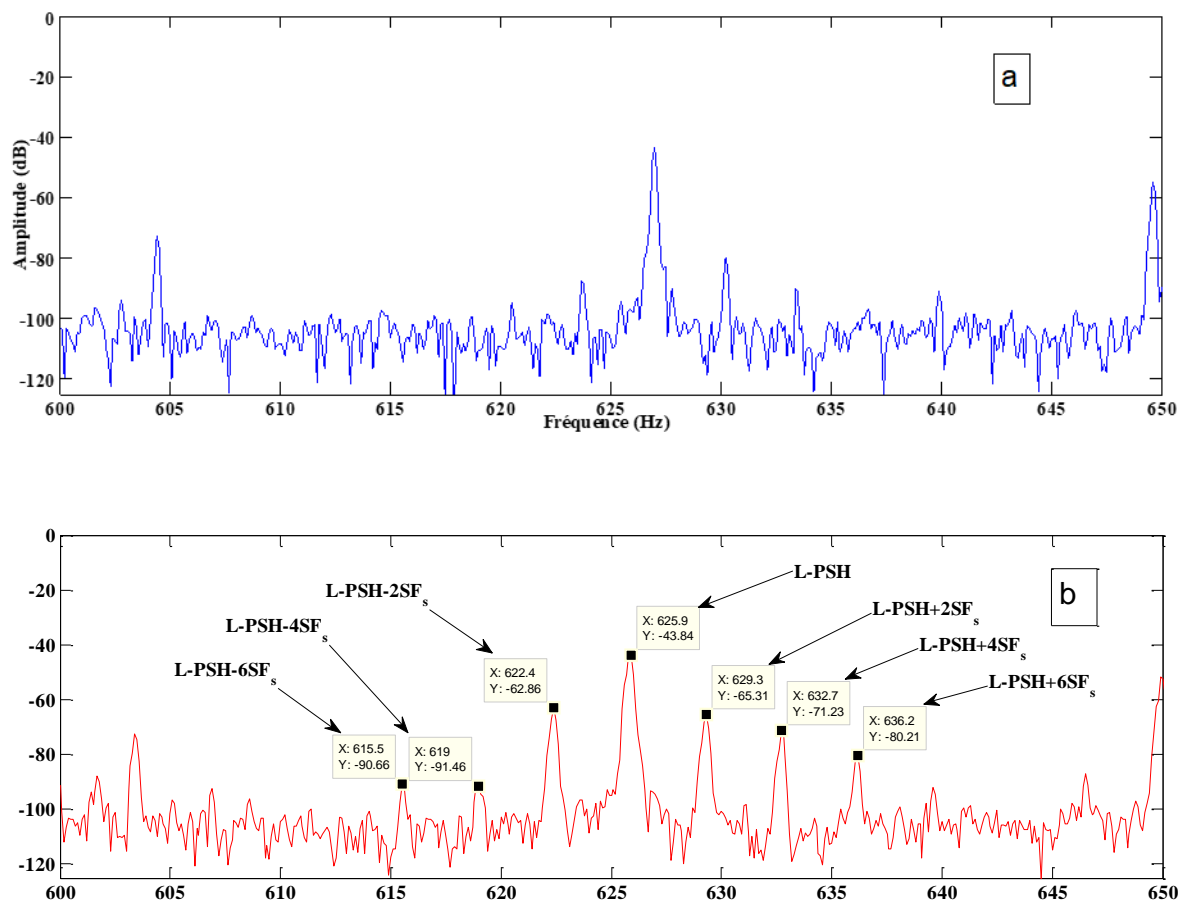


Figure III.10 Spectre du courant statorique ( $s=3.6\%$ , 1BC) ;

Un zoom autour de quelques bandes pour clarifier l'influence du défaut de la rupture de barres est présenté dans la figure (III-11).



**Figure III.11.** Spectre du courant statorique ( $s=3.6\%$ , 1BC) ; (a/b) 600-650Hz.

D'après la figure (III.11.a), on constate que pour la machine en état sain sous charge, aucune composante fréquentielle n'apparaît dans le spectre du courant statorique, à l'exception des composantes permanentes : les harmoniques de saturation et les harmoniques de la force magnétomotrice (FMM).

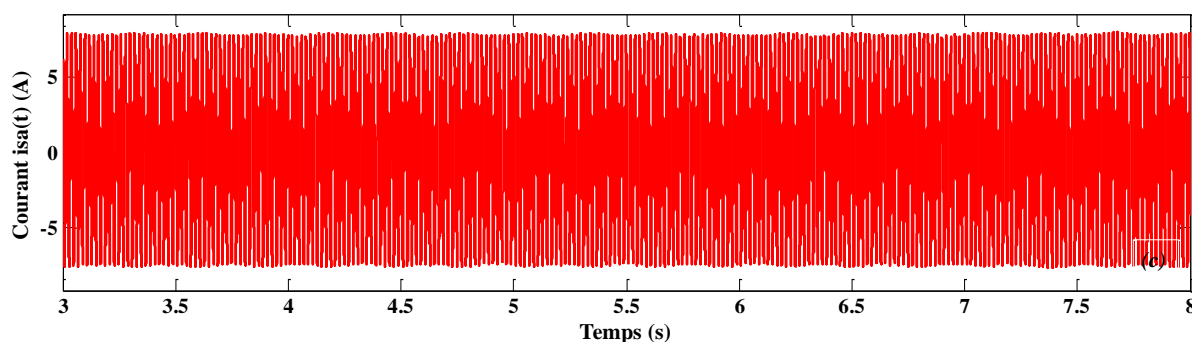
L'analyse spectrale du courant statorique révèle des composantes supplémentaires qui apparaissent en présence d'un défaut. Nous pouvons affirmer que l'apparition des raies  $(1\pm 2ks)$  fs (tableau III.1) est un indicateur de l'existence de cassures de barres.

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

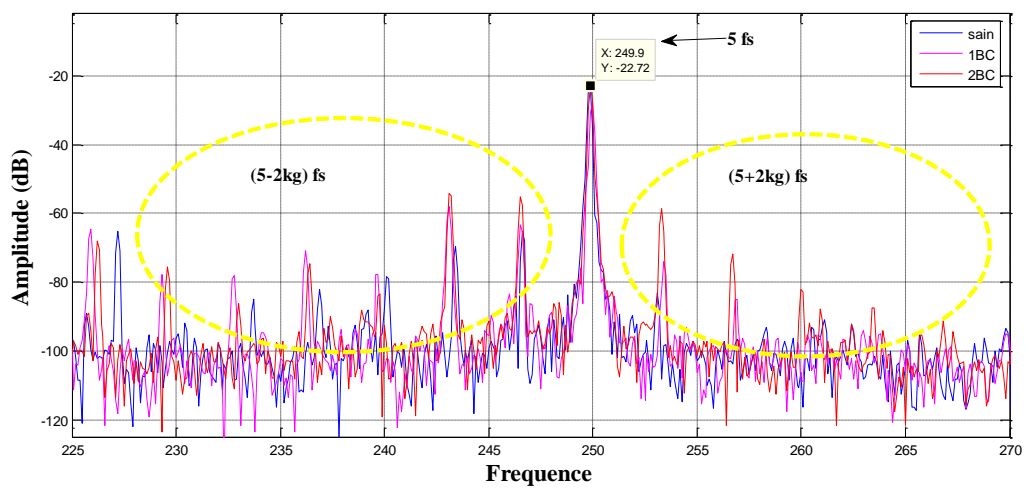
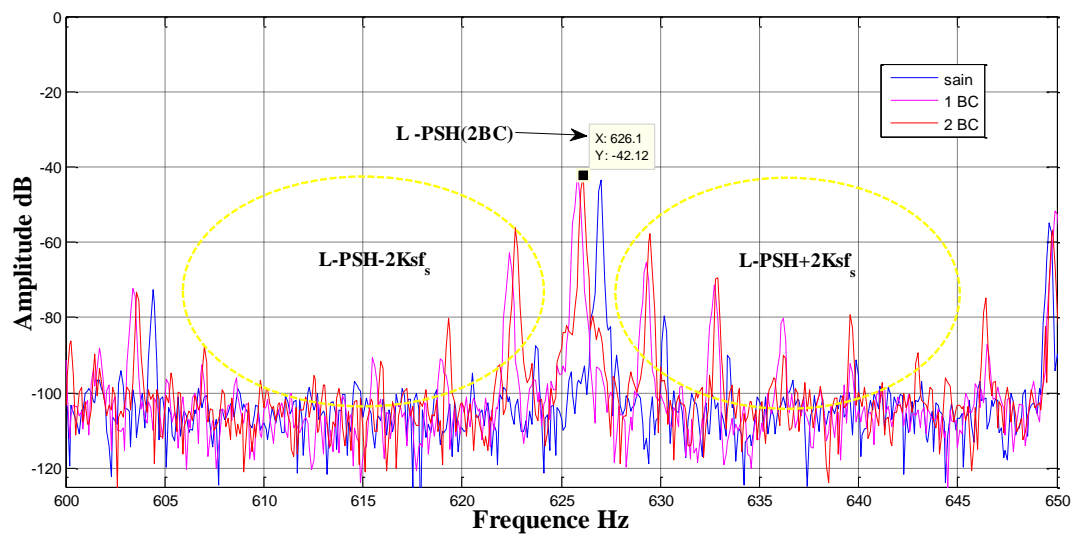
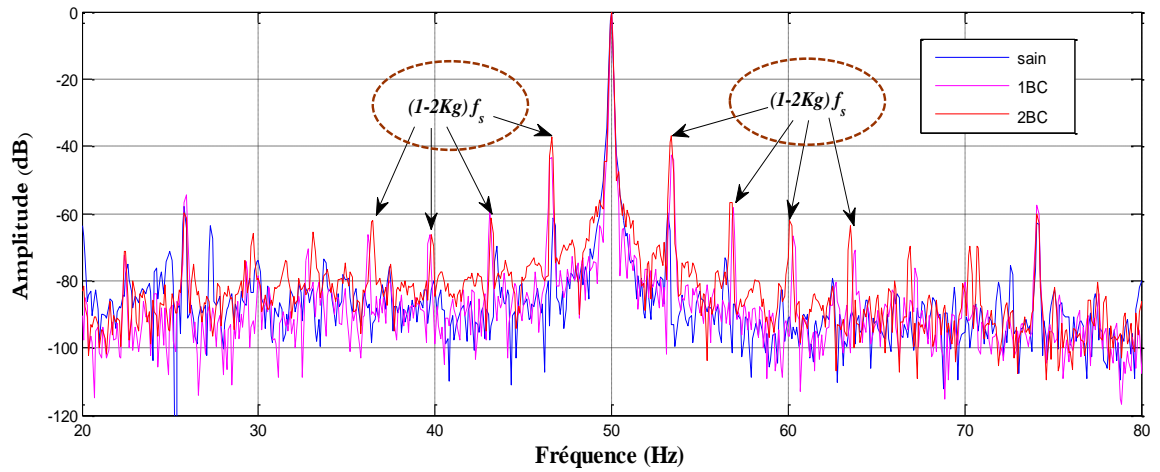
Formules des fréquences caractéristiques	Valeurs théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amplitude «état sain » (dB)	Amplitude pour 1BC (dB)
$(1-2s)f_s$	46.4 Hz	46.6 Hz	-61.7	-43.42
$(1+2g)f_s$	53.6 Hz	53.4 Hz	-59.67	-42.54
$5f_s$	250Hz	250Hz	-23.91	-27.95
$(5-2s)f_s$	246.4 Hz	246.5Hz	-65.15	-63.36
$(5+2s)f_s$	253.6 Hz	253.4Hz	-83.2	-73.88
$7f_s$	350 Hz	350Hz	-31.51	-38.83
$(7-4s)f_s$	342.8 Hz	343.1 Hz	-77.46	-66.23
$(7+4s)f_s$	257.2 Hz	356.8 Hz	-100.4	-92.03
$RSH_1^{(-)} = L-PSH$	624.8 Hz	625.8 Hz	-43.55	-42.7
$RSH_1^{(-)}-2gf_s$	621.2 Hz	622.4Hz	-87.38	-62.86
$RSH_1^{(-)}+2gf_s$	628.4 Hz	629.3Hz	-79.64	-65.31
$RSH_1^{(-)}-4gf_s$	617.6 Hz	618.9Hz	-94.66	-90.86
$RSH_1^{(-)}+4gf_s$	632 Hz	632.7Hz	-90.06	-71.23

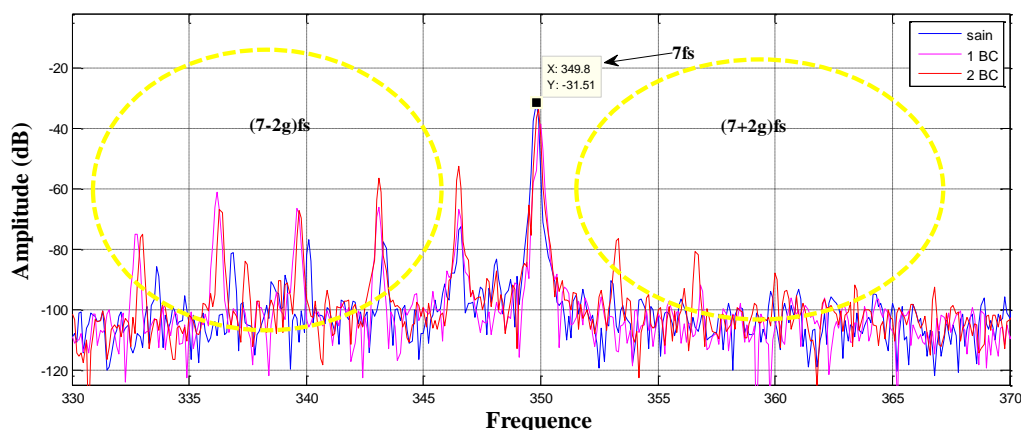
L'évolution de l'amplitude des harmoniques est un indicateur qui permet de vérifier plusieurs points intéressants, notamment la sévérité du défaut. Pour cette raison, nous présentons une troisième machine défectueuse avec deux barres cassées. L'évolution de l'amplitude du courant statorique en fonction du temps est indiquée sur la figure (II-12). Il est évident que le degré de sévérité du défaut se manifeste par une déformation du courant. En général, selon la littérature, la cassure des barres du rotor entraîne une forme du courant statorique similaire au phénomène de battement. Une superposition des FFT de trois machines (saines, avec une barre cassée (1BC), et avec deux barres cassées (2BC)) est présentée dans la figure (II-13). De plus, lorsque le rotor est défectueux, les fréquences du défaut apparaissent clairement dans le spectre.

figure (II-13) illustre les plages fréquentielles autour des harmoniques fondamentaux, des PSH, ainsi que des 5ème et 7ème harmoniques. On observe clairement les raies engendrées par une oscillation de vitesse due à la rupture d'une barre du rotor. Ces résultats ont permis de faire émerger des raies significatives, nous permettant ainsi de déterminer avec précision le type de défaut.xte.



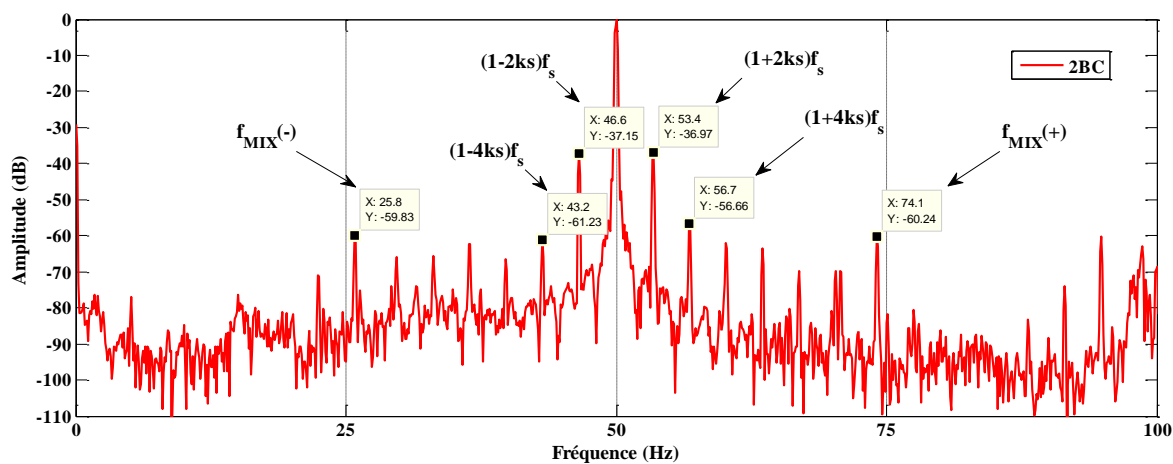
**Figure II.12.** Courant statorique en fonction du temps ( $s=3.6\%$ , 2BC).



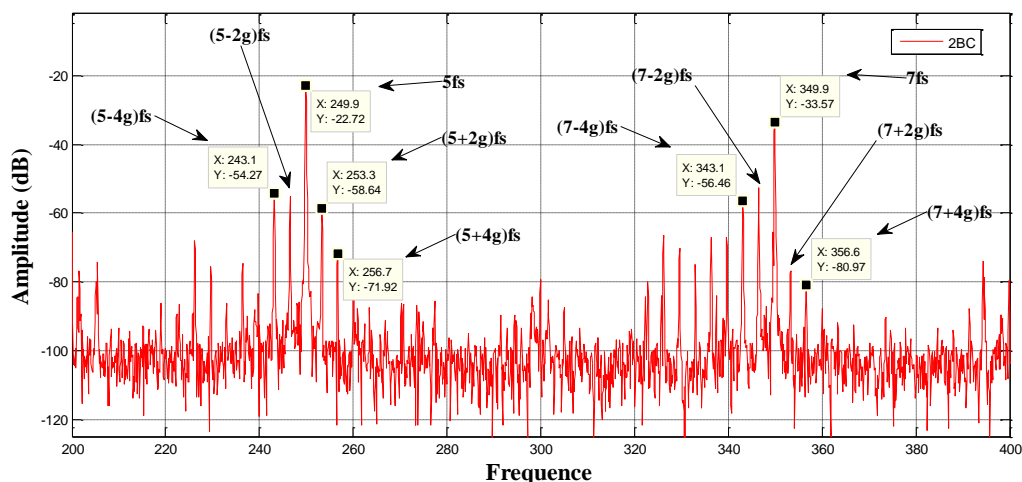


**Figure III.13** Spectre du courant statorique (MAS sain, 1BC et 2BC) ; (a) : Autour du fondamental, (b) : Autour de  $L-PSH$ , (c) : Autour de 5, (d) : Autour de 7.

Les figures (III.5) et (III.12) présentent les spectres du courant statorique obtenus expérimentalement lors du fonctionnement en charge de la machine à l'état sain, avec une barre cassée, et avec deux barres cassées. Les signatures de défaut de cassure de barres apparaissent dans les spectres de la machine asynchrone défectueuse (voir figures III.9 et III.15).



**Figure (III.14)** : Spectre du courant statorique avec 2BC(en charge).



**Figure (III.15):** Fréquences qui correspondent aux ordres  $5e7$  avec **2BC** (en charge).

Le tableau (III.2) décrit et généralise les harmoniques des défauts de rotor induits dans les bobinages statoriques avec deux barres cassées (2BC). Cette étude nous permet à la fois de vérifier l'existence de ces harmoniques et de suivre leurs positions.

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

**Tableau II.2** Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques  
(2BC,  $g=0.036$ )

Formules des fréquences caractéristiques	Valeurs théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amplitude «état sain » (dB)	Amplitude pour 2BC (dB)
$(1-2g)f_s$	46.8 Hz	46.6Hz	-61.7	-37.15
$(1+2g)f_s$	53.2 Hz	53.4 Hz	-59.67	-36.97
$5f_g$	250 Hz	249.9 Hz	-23.91	-22.72
$(5-2g)f_s$	246.8 Hz	246.5 Hz	-65.15	-55.03
$(5+2g)f_s$	253.2 Hz	253.4 Hz	-83.2	-58.64
$7f_s$	350 Hz	349.9 Hz	-31.51	-33.57

$(7-2g)f_s$	346.8 Hz	346.5 Hz	-72.53	-52.56
	353.2 Hz	353.3 Hz	-90.46	-76.71
$(7+2g)f_s$				
	343.6 Hz	343.1 Hz	-77.46	-56.46
$(7-4g)f_s$				
	356.4 Hz	356.7 Hz	-100.4	-80.97
$(7+4g)f_g$				
$RSH_1^{(-)}=L-PSH$	627.6 Hz	626.1 Hz	-43.55	-42.12
$RSH_1^{(-)}-2gf_s$	624.4 Hz	622.7 Hz	-87.38	-56.2
$RSH_1^{(-)}+2gf_s$	630.8 Hz	629.5 Hz	-79.64	-57.78
$RSH_1^{(-)}-4sf_s$	621.2 Hz	619.3 Hz	-94.66	-80.14
$RSH_1^{(-)}+4sf_s$	634 Hz	632.9 Hz	-90.06	-69.48

Lorsque la machine est en charge avec une barre cassée (figure III.7), le défaut génère des composantes fréquentielles autour de la fréquence fondamentale, notamment à 46,5 Hz et 53,4 Hz. Pour une seule barre cassée, les fréquences de 46,5 Hz et 53,5 Hz présentent des amplitudes respectives de -42,54 dB et -43,72 dB. Ces amplitudes augmentent avec la gravité du défaut [54]. En effet, dans le cas d'une machine avec deux barres cassées, les fréquences de 46,6 Hz et 53,4 Hz présentent des amplitudes respectives de -37,15 dB et -36,97 dB (figure III.13).

**Tableau III.3** Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques (1BC+2BC).

Fréquences caractéristiques	Amplitude pour 1BC (dB)	Amplitude pour 2BC (dB)
$(1-2g)f_s$	-43.42	-37.15
$(1+2g)f_s$	-42.54	-36.97
$5f_s$	-27.95	-22.72
$(5-2g)f_s$	-63.36	-55.03
$(5+2g)f_s$	-73.88	-58.64
$7f_s$	-38.83	-33.57
$(7-2g)f_s$	-67.06	-52.56
$(7+2g)f_s$	-95.9	-76.71
$(7-4g)f_s$	-66.23	-56.46
$(7+4g)f_s$	-92.03	-80.97
$RSH_1^{(-)} = L - PSH$	-42.7	-42.12
$RSH_1^{(-)} - 2PSH$	-62.86	-56.2
$RSH_1^{(-)} + 2gf_s$	-65.31	-57.78
$RSH_1^{(-)} - 4gf_s$	-90.86	-80.14
$RSH_1^{(-)} + 4gf_s$	-71.23	-69.48

Après avoir décrit les effets pouvant survenir suite à une rupture de barres, notre étude démontre une bonne correspondance et une exactitude en comparaison avec la littérature. Toutes les formules, les déplacements des harmoniques et le degré de sévérité du défaut de rupture de barres sont vérifiés.

En présence du défaut en régime permanent, le système inverse de courant au rotor produit une composante oscillatoire de pulsation  $2s\omega_s$  [2]. Nous avons observé l'apparition d'harmoniques de fréquences liées à  $2ksfs$  dans le spectre du courant statorique. Il a également été noté que le spectre du courant fournit des informations plus claires et plus visibles grâce à une série de FBL autour de la fondamentale, des  $(6k\pm 1)fs$  et des RSHs.

Une analyse spectrale par la transformée de Fourier rapide a été appliquée au signal du courant statorique afin de déterminer son contenu fréquentiel et, par conséquent, d'identifier les harmoniques caractéristiques des cassures de barres, permettant ainsi un diagnostic efficace.

### **III.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude pratique sur l'application de la MCSA-FFT pour le diagnostic des défauts de la cassure de barres rotoriques dans un moteur asynchrone en utilisant les signaux du courant statorique instantané (isa). Nous avons aussi présenté des résultats expérimentaux de la machine asynchrone à l'état sain et avec défaut. Au cours de ce chapitre nous avons fait une comparaison entre les spectres. Nous avons trouvé que la rupture d'une barre provoque des oscillations dans le courant, cet indice peut argumenter la présence d'un défaut mais ne peut pas le préciser, la méthode d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA) est, donc, efficace. L'analyse de spectre nous permet d'avoir une bonne analyse et obtenir le maximum d'information sur l'état du moteur.

# *Conclusion générale*

En raison de leur utilisation intensive dans de nombreuses applications, les machines asynchrones requièrent une détection rapide et précoce de leurs défaillances. Ce travail s'inscrit dans le contexte du diagnostic des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil en utilisant la technique de la MCSA avec la technique de réseau neuronal

Dans notre étude, nous avons effectué le diagnostic de défauts par l'analyse spectrale du courant statorique en régime permanent. Cette approche reste, de loin, la méthode la plus utilisée par les chercheurs pour plusieurs raisons, notamment en raison de l'accessibilité extérieure du courant statorique et de la sensibilité des harmoniques associées aux défauts de la machine par rapport à la sévérité de ces derniers.

Nous avons localisé l'étude sur les moteurs à cage pour deux raisons :

La première raison : parce que les moteurs asynchrones à cage sont les plus Utilisés.

Tandis que la deuxième raison réside dans le fait que d'un point de vue structure multi-enroulement, les moteurs à rotors bobinés constituent un cas particulier des moteurs à cage.

La MCSA attribue à chaque défaut une signature spectrale spécifique caractérisant le problème analysé. Dans ce cadre, nous avons examiné toutes les fréquences caractéristiques des défauts de rupture de barre sur différentes plages de fréquences. Il est important de noter la relation entre la gravité du défaut et l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il engendre.

# *Références bibliographiques*

1. G. Didier, "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence défaillances", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2004.
2. N. Bessouse , " Contribution au diagnostic des défauts dans les machines asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation " Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2017.
3. Abla Bouguerne « Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones » MEMOIRE ,Magister En Electrotechnique UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE / 2009 Hamadou, A.Nessissen «Modélisation numérique d'un moteurasynchrone à cage d'écureuil», Université Djilali Bou naama Khemis Miliana, année 2015.
4. L.Kerszenbaum et C. F. Landy, "The existence of large inter bar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and en-ring faults" IEEE Transactions onPower Apparatus Systems, Vol. PAS-103, n°7, pp.1854- 1862, July 1984.
5. Ouanas, A. Medoued, S. Haddad, M. Mordjaoui, D. Sayad."Automatic and Online Detection of Rotor Fault State Int. Journal of Renewable Energy Development (IJRED). Vol.7. n°:1. 2018.pp.43-52. <https://doi.org/10.14710/ijred.7.1.43-52>
6. M. Ammar, "Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques :applications aux moteurs asynchrones" Thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, 2012.
7. Noureddine BESSOUS, Contribution Au Diagnostic Des Machines Asynchrones, magister en Electrotechnique, université de Constantine Algérie 2013.
8. thèse doctorat Smail bachir19 92, ‘‘contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique’’
9. NEZLIOUI Said et YAKOUB Yazid « Diagnostic des défauts de court-circuit statorique d'une machine asynchrone » Mémoire master , Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou 2011/2012
10. MESSAOUDI Yacine et OUKACINE Belkacem « Modélisation fine multi-spires de la machine asynchrone en vue de sa simulation en régime sain et de défauts de court-circuités entre spires », Mémoire master , Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2007 – 2008
11. SADKI Nour elhouda « SIMULATION DES DÉFAUTS STATORIQUE D'UN MOTEUR A ASYNCHRONE » Mémoire MASTERACADEMIQUE , UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA ,2014-2015

12. HARIR Miloud « Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée » Mémoire master ; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF 2008/2009
13. AYACHE MOHAMED et ELFANI YASSINE « Modélisation et Diagnostic des défauts de court-circuit entre spires d'une machine asynchrone » Mémoire master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA 2017/2018
14. Ondel,O. (2006).Diagnostic par reconnaissance des forms : applicationun ensemble convertisseurmachine asynchrone (doctora l dissertation, ecole centrale de lyon).
15. thèse doctorat Gaetan didier 2004, ‘modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de defaillances’
16. Hubert razik, gaëtan didier “notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone”
17. Bouguerne.’(2009).diagnostic automatique des defaults des moteurs asynchrones,mémoire de magister,université mentouri,constantine,algérie
18. RIDHA ZAITER « Commande directe du couple DTC d'une machine asynchrone avec défaut », Mémoire de Magister, Université de Biskra juin 2013.
19. SADKI Nour elhouda, Simulation des défauts statorique d'un moteur a asynchrone, mémoire master en Electrotechnique, université Ouargla 2015
20. Lebaroud Abdesselam, " Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2006.
21. ERIC LAROCHE <exploration de différentes architectures de réseaux de neurones pour la prédiction de la glace atmosphérique sur les conducteurs des réseaux électriques> Université de Québec 2002
22. Mr. Ali DJAIDJA < Étude de la classification supervisée des données environnementales à l'aide de réseaux de neurones de fonctions à base radiales> mémoire de master en contrôle industriel Université Mohamed Boudiaf - m'sila 2016
23. Ryad Zemouri < Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la e-maintenance> 2004
24. Calcul de l'MPPT par réseaux de neurone pour un système photovoltaïque UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2014/2015
25. Melle TRAHY Fatiha. «Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels. Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche lampa.» mémoire de magister en électronique Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2011.

26. Calcul de l'MPPT par réseaux de neurone pour un système photovoltaïque UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2014/2015
27. Melle TRAHY Fatiha. «Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels. Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche lampa.» mémoire de magister en électronique Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2011.
28. Commande MPPT à base d'un réseau de neurone artificiel Pour un système ph
29. ZAOUI Lynda< Contribution à la prévision de la sécheresse par le modèle du réseau de neurones autorégressif> mémoire de master en aménagement et ouvrages Hydrotechniques école nationale supérieure d'hydraulique -ARBAOUI Abdallah 2017otovoltaïque université badji mokhtar Annaba 2019
30. Mr. Ali DJAIDJA < Étude de la classification supervisée des données environnementales à l'aide de réseaux de neurones de fonctions à base radiales> mémoire de master en contrôle industriel Université Mohamed Boudiaf - m'sila 2016
31. HICHAM CHAOUI < conception et comparaison de lois de commande adaptative à base de réseaux de Neurones pour une articulation flexible avec nonlinéarité dure> Université de Québec 2002
32. P .VAS .F.Fippetti , G . Franceschini , et C . Tassoni . Transient modeling oriented to diagnosis of induction machines whith rotor asymmetries . International Conferenosis on electrical Machine , C . 3 : 67. 1994
33. Benouzza, Drif, Emploi de l'approche des vecteurs de Park pour la détection des défauts de barres dans les moteurs asynchrones à cage d'écureuil, Université de Coimbra departamento de engenharia electrotechnique; P3000, coimbra, 1999, Portugal.
34. khatir abdefatah, etude comparative des modeles des machines asynchrones utiliseden dignostic des defauts, universite ferhat abbas – setif – ufas, 2009, algerie.
35. E. Oran Brigham, "Fast Fourier transform and its applications", Prentice Hall, 1988.
36. R. Polikar, "The wavelet tutorial", Available: <http://users.rowan.edu/polikar/wavelets/wttutorial.html>
37. J. Cusido, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, A. Garcia, "Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 2, pp. 633–643, Feb. 2008.
38. S. H. Kia, H. Heno, G. A. Capolino, "Diagnosis of broken-bar fault in induction machines using discrete wavelet transform without slip estimation," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 45, No. 4, pp. 107– 121, Jul/ Aug. 2009.

39. F. Coulon, "Théorie et traitement des signaux", Vol. VI, Presses polytechniques romandes, 1990.
40. J. Ville, "Théorie et applications de la notion de signal analytique", Câbles et Transm., Vol. 2A, No.1, pp. 61–74, 1948.
41. E.P. Wigner, "On the quantum correction for thermodynamic equilibrium". Physics Review, Vol.40, No. 5, pp. 749–760, 1932.
42. M. Davy, "Noyaux optimisés pour la classification dans le plan temps-fréquence – Proposition d'un algorithme constructif et d'une référence bayésienne basés sur les méthodes MCMC – Application au diagnostic d'enceintes acoustiques". Thèse de doctorat, Université de Nantes, Sep. 2000.
43. S.G. Mallat, "A wavelet tour of signal processing", second ed., Academic Press, 1998.
44. J. Morlet, "Sampling theory and wave propagation," Acoustic Signal/Image Processing And Recognition, Springer-Verlag , Vol. F1, NATO ASI, pp. 233–261, 1983.
45. R. Polikar, "The wavelet tutorial", Available: <http://users.rowan.edu/polikar/wavelets/wttutorial.html>
46. J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, M. P. M. Palomares, "Validation of a New Method for the Diagnosis of Rotor Bar Failures via Wavelet Transform in Industrial Induction Machines," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 42, No. 4, pp. 990–996, Jul./Aug.2006.
47. Khaled, "Modélisation d'un Moteur Asynchrones pour le suivi de la sévérité des défauts rotorique par l'approche de la fonction d'enroulement ", Mémoire de Magistère en électrotechnique, Université, d'Oran Mohamed Boudiaf, 2011.
48. S. Bachir, "Contribution au diagnostic de la MAS par estimation paramétrique ", Thèse doctorat, 2002, Université de Poitiers France.
49. M. Sahraoui " Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage" Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie, 2003.
50. M. E. H. Benbouzid and G. B. Kliman, "What Stator Current Processing-Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 2, pages 238-244, June 2003.
51. Ibrahim" Contribution au diagnostic de machines électromécaniques " Thèse de doctorat, université de saint Etienne Mars 2009.
52. G. Didier, "Modélisation et diagnostic de la MAS en présence de défaillance" Thèse de doctorat, 2004, Université D'Henri Poincaré, Nancy-I, France.

53. S. Emmanuel, "Diagnostic des MAS : Modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts ",Thèse de doctorat,1999,Ecole central de Nantes France.
54. N. Halem, "Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Éléments Finis", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2015.

