



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمار تليجي بالاغواط

UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE -LAGHOUAT

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

*MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
DE MASTER EN ELECTROTECHNIQUE*

*SPECIALITE : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE*

*PRESENTE PAR :*

**BENLAHBIB Abderrahmane**

**BENLEKHDIM Mohammed Amar**

**THEME**

---

# **Revue sur les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines asynchrones**

---

*Publiquement soutenu devant du jury composé de :*

✓ Mr. MEKHANET Mohammed	M.C.B	Président
✓ Mr. DJEKIDEL Rabah	M.C.A	Examineur
✓ Mme. BOUDRAA Saliha	M.C.B	Encadreur

**ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2019 / 2020**

## Dédicaces

*Je dédie ce travail :*

- À la mémoire de nos grand-mères,*
- À nos chères mères et nos chers pères,*
- À nos chers frères et sœurs,*
- À nos familles,*
- À nos amis,*
- À nos collègues de la promotion 2020.*

*BENLAHBIB Abderrahmane  
BENLEKHDIM Mohammed Amar*

## **REMERCIEMENTS**

*Tout d'abord, nous remercions ALLAH pour son aide, ses innombrables dons et ALLAH qui nous a donné la force, la volonté et le moral de terminer nos études de maîtrise en génie électrique.*

*Nous remercions également tous les enseignants du département de génie électrique qui ont contribué à notre formation.*

*Évidemment, nous remercions nos parents, nos sœur et nos frères, qui nous ont encouragés et soutenus dans la poursuite de nos études pendant de nombreuses années.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à tous nos amis et collègues pour leur soutien moral et matériel ...*

*BENLAHBIB Abderrahmane  
BENLEKHDIM Mohammed Amar*

## ملخص:

تستخدم الآلات المتزامنة على نطاق واسع في أنظمة القيادة الكهربائية . نظرا لمتانتها وصلابتها وقدرة تحملها وتكلفة تصنيعها .

لضمان صيانتها ومراقبتها . من المهم تطوير أدوات تشخيص للكشف عن الأخطاء المبكرة التي قد تظهر في الأجهزة .

مساهمتنا تصب في إطار عرض مختلف الأساليب والتقنيات لرصد وتشخيص الأعطال في الآلة الغير المتزامنة مثل الأخطاء ذات الاصل الميكانيكي والكهربائي/وكذا المغناطيسي (الحمل الزائد .اعطال التغذية . انحراف الدوار . تاكل المحامل الكروية... الخ ) والتي قد تؤثر على الجهاز .

**الكلمات المفتاحية:** التشخيص ، الأعطال ، المحرك غير المتزامن ، المراقبة

## RESUME :

Les machines asynchrones sont très utilisées dans les systèmes d'entraînements électriques, à cause de leur robustesse, leur puissance massique et à leur coût de fabrication.

Pour assurer leur maintenance et leur surveillance, il est donc important de développer des outils de diagnostic pour détecter de manière précoce les défauts pouvant apparaître dans ces machines.

Notre contribution s'inscrit dans le cadre de synthèse et de choix des méthodes et des techniques de surveillance et de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone telle que les défauts d'origine mécanique, électrique et/ou magnétique (surchage, défauts d'alimentation, excentricité du rotor, usure des roulements à billes...) altérant la machine.

**Mots clés :** diagnostic, défauts, moteur asynchrone, surveillance

## ABSTRACT :

Asynchronous machines are widely used in electric drive systems, because of their robustness, their specific power and their manufacturing cost.

To ensure their maintenance and monitoring, it is therefore important to develop diagnostic tools to detect early faults that may appear in these machines.

Our contribution is part of the synthesis and choice of methods and techniques for monitoring and diagnosing faults in the asynchronous machine such as faults of mechanical, electrical and / or magnetic origin (overload, supply faults , rotor eccentricity, wear of ball bearings, etc.) affecting the machine.

**Keywords :** diagnostics, faults, asynchronous motor, monitoring

# Table des matières

<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>Chapitre I. Description de la machine asynchrone</b> .....	4
I.1. Introduction .....	4
I.2. Constitution de la machine asynchrone .....	4
I.3. Stator.....	5
I.4. Rotor .....	6
1.4.1. Rotor bobiné (a bagues) .....	6
1.4.2. Rotor a cage .....	7
1.4.2.1. Rotor à double cage .....	8
1.4.2.2. Rotor à encoches profondes .....	9
I.5. Entrefer .....	10
I.6. Organes mécaniques .....	10
I.7. Différents modes d'alimentation des moteurs asynchrones .....	11
I.8. Plaque signalétique .....	13
I.9. Principe de fonctionnement .....	13
I.10. Définitions / relations .....	14
I.10.1 Vitesse .....	14
I.10.2 Vitesse de Synchronisme $N_s$ .....	14
I.10.3 Glissement .....	15
I.11. Bilan des puissances .....	15
I.12. Domaine d'utilisation de la machine asynchrone .....	16
I.13. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone .....	16
I.13.1 Avantages .....	16
I.13.2 Inconvénients.....	16
I.14. Conclusion .....	16
 <b>Chapitre II. Les défaillances dans les machines asynchrones</b> .....	 18
II.1. Introduction .....	18
II.2. Terminologie .....	18
II.2.1. Fonctionnement normal d'un système .....	18
II.2.1. Défaut .....	18
II.2.3. Défaillance.....	18
II.2.4. Panne .....	19
II.3. Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	19
II.3.1. Contraintes électriques .....	19
II.3.2. Contraintes dynamiques Introduction .....	19
II.3.3. Contraintes magnétiques .....	19
II.3.4. Contraintes d'environnement.....	20
II.3.5. Contraintes mécaniques Introduction.....	20
II.3.6. Contraintes thermiques.....	20
II.4. Causes de défauts d'un moteur asynchrone .....	20
II.5. Conséquences des défauts d'un moteur asynchrone .....	22
II.6. Défaillances de la machine asynchrone.....	23
II.6.1. Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone.....	23
II.6.2 Défaillance d'ordre électrique .....	24
II.6.2.1 Défaillances des circuits électriques statoriques .....	24
Défaits d'isolant dans un enroulement.....	25
Court-circuit entre spires.....	25
Court-circuit entre phases .....	25

---

Court-circuit entre phases-bâti .....	26
Défauts de circuit magnétique .....	27
II.6.2.2. Défaillances au rotor .....	27
Ruptures de barres.....	27
Ruptures d'anneaux .....	28
Excentricité statique et dynamique .....	28
II.6.3. Défaillance d'ordre mécanique .....	29
Défauts des roulements .....	29
Défaillances du flasque .....	30
Défaillances de l'arbre.....	30
II.6.4. Autres défaillances .....	30
II.7 Conclusion.....	33
<b>Chapitre III. Techniques de surveillance et de diagnostic des machines asynchrones .....</b>	<b>35</b>
III.1. Introduction.....	35
III.2. Notions principales .....	36
III.3. Principe de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone .....	37
III.4. Modélisation des machines asynchrones .....	38
III.5. Méthodes de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone .....	38
III.5.1 Méthodes internes .....	39
III.5.1.1. Techniques d'identification .....	39
III.5.1.2. Techniques d'estimation d'état .....	39
III.5.1.3 Techniques des résidus .....	40
III.5.2. Méthodes externes .....	40
III.5.2.1. transformée de Fourier .....	41
Transformée de Fourier Rapide (FFT).....	42
III.5.2.2. Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques.....	42
III.5.2.3. Analyse de flux axiale de fuite.....	43
III.5.2.4. Analyse des tensions statoriques induites .....	44
III.5.2.5. Analyse des courants absorbés (courants statoriques).....	45
III.5.2.6. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique .....	45
III.5.2.7. Diagnostic par analyse de la puissance instantanée .....	46
III.5.2.8. Diagnostic utilisant le vecteur de Park.....	46
III.5.3. Approches modernes de diagnostic .....	47
III.5.4.1. Systèmes experts .....	47
III.5.4.2. Arbres de défaillances.....	48
III.5.4.3. Réseaux de neurones artificiels.....	49
III.5.4.4. Reconnaissance des formes (RdF) .....	50
III.5.3.5. Diagnostic par la mesure de la température.....	50
III.5.3.6. Diagnostic chimique .....	51
III.5.3.7. Analyse par thermographie infrarouge .....	51
III.6. Conclusion .....	52

---

<b>Chapitre IV. choix appropriés des méthodes de diagnostic (Etude de cas)</b> .....	54
IV.1. Introduction.....	54
IV.2 Déroulement des tests dans le laboratoire.....	54
IV.3 Simulation de la machine asynchrone en régime sain .....	55
IV.4 Simulation de la machine asynchrone en présence de défauts .....	56
IV.5. Défaut de court-circuit entre spires.....	60
a) Courants statoriques.....	56
d) Couple électromagnétique .....	58
e) Vitesse de rotation .....	59
IV.6. Défaut de court-circuit entre phases statoriques .....	60
IV.7. Défaut de cassure de barre .....	61
IV.7.1. Effet de cassures de barres .....	61
IV.7.2. Simulation d'une machine saine .....	62
IV.7.3. fonctionnement de la machine avec défaut.....	63
IV.8. Diagnostic par analyse spectrale FFT .....	65
IV.8.1. Cas de court-circuit entre spire .....	65
IV.8.2. Cas de rupture de barre (défaut rotorique).....	66
IV.8.3. Cas d'un défaut mixte .....	69
IV.9. Diagnostic utilisant l'intelligence artificielle.....	70
IV.9.1. (logique floue a base de l'analyse spectrale du courant statorique) .....	70
IV.10. Conclusion .....	71
<b>Conclusion générale et perspectives</b> .....	72
<b>Références bibliographiques</b> .....	73

---

## Liste des figures

### Figures du chapitre I

Figure I.1 : Différentes parties de la machine asynchrone.....	4
Figure I.2 : Stator .....	5
Figure I.3 : Vue schématique en perspective du stator .....	6
Figure I.4 : Rotor bobiné.....	7
Figure I.5 : Rotor à barres d'aluminium .....	8
Figure I.6 : Rotor à barres de cuivre .....	8
Figure I.7 : Rotor à cage d'écureuil (vue d'ensemble) .....	8
Figure I.8 : Cage d'écureuil en aluminium .....	8
Figure I.9 : Rotor à double cage.....	9
Figure I.10 : Rotor à encoches profondes .....	10
Figure I.11 : Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone .....	11
Figure I.12 : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone.....	13
Figure I.13 : Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.....	13
Figure I.14 : Diagramme et bilan de puissance d'une machine asynchrone.....	15

### Figures du chapitre II

Figure II.1 : Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage .....	21
Figure II.2 : Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage .....	21
Figure II.3 : Répartition des défauts de la machine asynchrone .....	23
Figure II.4 : Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances .....	23
Figure II.5 : Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances.....	24
Figure II.6 : Court-circuit entre phases-bâti.....	26
Figure II.7 : Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit.....	27
Figure II.8: Défauts de l'excentricité statique, dynamique et mixte .....	28
Figure II.9: Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique .....	29

### Figures du chapitre III

Figure III.1 : Surveillance. ....	36
Figure III.2 : Classement des méthodes de diagnostic.....	38
Figure III.3 : Principe du diagnostic par modèle. ....	39
Figure III.4 : Principe de la surveillance par analyse spectrale .....	41
Figure III.5 : Mesures vibratoires sur la machine asynchrone e .....	42
Figure III.6 : Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial. ....	44
Figure III.7 : Thermogramme: usure de palier.....	51

### Figures du chapitre IV

Figure IV.1 : Exemple de banc d'essai (Laboratoire Ampère) .....	54
Figure IV.2 : Simulation d'une machine saine. ....	55
Figure IV.3 : Couple électromagnétique machine saine .....	56
Figure IV.4 : Vitesse de rotation .....	56
Figure IV.5 : Court-circuit de 12 spires (5%) .....	57
Figure IV.6 : Court-circuit de 24 spires (10%) .....	57
Figure IV.7 : Court-circuit de 36 spires (15%) .....	57
Figure IV.8 : Cas de court-circuit de 48 spires (20%) .....	57
Figure IV.9 : Courbes de couple électromagnétique.....	58
Figure IV.10 : Courbes de la vitesse de rotation.....	59
Figure IV.11 : Courants de phases statoriques.....	60
Figure IV.12 : Couple électromagnétique .....	60
Figure IV.13 : Vitesse de rotation.....	61
Figure IV.14 : Simulation de la MAS état sain.....	62
Figure IV.15 : Allure des courants statorique cas de rupture de barres .....	63
Figure IV.16 : Courbe de la vitesse de rotation cas de rupture de barres .....	63
Figure IV.17 : Courbe de couple électromagnétique cas de rupture de barres .....	63
Figure IV.18 : Simulation de la MAS avec une rupture de barres .....	64
Figure IV.19 : Simulation de la MAS avec un et deux ruptures de barres .....	64
Figure IV.20 : Représentation temporelle vers fréquentielle. ....	65
Figure IV.21 : Courts-circuits de 2%.....	65
Figure IV.22 : Courts-circuits de 5 %.....	66
Figure IV.23 : Courts-circuits de 9 %.....	66
Figure IV.24 : Spectre du courant de la phase a, Cas de la machine saine.....	66
Figure IV.25 : Spectre du courant de la phase a, Cas de une barres cassé .....	67
Figure IV.26 : Spectre du courant de la phase a, Cas de deux barres cassé .....	67
Figure IV.27 : Courants statoriques cas de défaut mixte (court-circuit entre spires et une barre cassée) .....	69
Figure IV.28 : Analyse spectrale du courants statoriques cas de défaut mixte.....	69
Figure IV.29 : Fonction d'appartenance des entrées.....	70
Figure IV.30 : Fonction d'appartenance des sorties. ....	70

---

## Liste des Tableaux

Tableau. II.01: Synthèse des défaillances du stator sur la machine asynchrone .....	32
Tableau. II.02: Synthèse des défaillances du rotor sur la machine asynchrone .....	33
Tableau III.01: Analyses vibratoires, signatures fréquentielles .....	43
Tableau IV.01: Amplitudes des défauts dans le domaine fréquentielle.....	68
Tableau IV.02: Fuzzification des sorties.....	71
Tableau IV.03: Exemple de résultats de diagnostic par logique floue .....	71

## Glossaire

<b>FFT</b>	Transformation de Fourier rapide
<b>MAS</b>	Machine Asynchrone
<b>IA</b>	Intelligence Artificiel
<b>RDF</b>	La reconnaissance des formes

## Table de nomenclature

$\omega_s$	Vitesse de synchronisme	rd/s
$\omega_r$	Vitesse mécanique du rotor.	rd/s
$T_c$	Couple de charge.	Nm
$T_e$	Couple électromagnétique	Nm
$P_a$	Puissance absorbé	W
$P_{tr}$	Puissance électromécanique transmise au rotor	W
$P_r$	Puissance mécanique de rotor	W
$P_m$	Perte mécanique	W
$R$	Résistance entre phase de stator	$\Omega$
$r$	Résistance d'un enroulement	$\Omega$
$B$	Induction magnétique.	Tesla
$D_b$	Diamètre des billes.	m
$D_c$	Distance du centre des billes.	m
$f$	Fréquence des tensions triphasées d'alimentation.	Hz
$f_{bext}$	Fréquence générée par un défaut au niveau de la bague extérieure.	Hz
$f_{bint}$	Fréquence générée par un défaut au niveau de la bague intérieure.	Hz
$f_r$	Fréquence de rotation du rotor.	Hz
$f_s$	Fréquence statorique.	Hz
$\varphi$	Déphasage entre $v_a(t)$ et $i_{sa}(t)$ .	rd
$g$	Epaisseur d'entrefer.	m
$i_d, i_i, i_h$	Composantes directe, inverse et homopolaire respectivement.	Ampère
$i_{m1}$	Valeur maximale du courant de la phase.	Ampère
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	Courants des trois phases.	Ampère
$I_{sd}, I_{sq}$	Courants de Park ((direct et inverse).	Ampère
$J$	Moment d'inertie du rotor –charge combinée. produit par la machine.	Kg.m <sup>2</sup>
$l$	Longueur de la machine.	m
$n_b$	Nombre de barres rotoriques.	
$n_d$	Nombre d'ordre d'excentricité.	
$N_s$	Nombre de tours de l'enroulement de la phase,	
$\Phi$	un angle décrivant une position dans l'espace.	rd
$P$	Nombre de paires de pôles.	
$R_b$	Résistances d'une barre rotorique.	$\Omega$

$R_e$	Résistances d'un segment d'anneau de court-circuit.	$\Omega$
$r$	Rayon moyen de la machine.	$\Omega$
$r_s$	Résistance de chaque phase statorique.	$\Omega$
$S$	Glissement. %	
$\theta$	Angle de contact de la bille avec la cage.	rd
$\theta_r$	Angle qui définit la position du rotor par rapport au stator.	rd
$U_m$	Valeur maximale de la tension entre deux phases.	Volt
	Ordre des harmoniques de temps.	

---

## Introduction Générale

Le moteur asynchrone est certainement la machine électrique la plus utilisée dans l'industrie, en raison de leurs performances, de leur robustesse, et la facilité avec laquelle on peut le démarrer. A puissance donnée son coût est moindre que celui de la machine à courant continu ou la machine synchrone. De plus ne nécessite qu'une seule source d'alimentation.

Ces machines sont soumises pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, magnétiques, mécaniques et d'environnement). L'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur, ce qui engendre des arrêts non programmés conduisant à des pertes de production et à des réparations coûteuses.

Les défauts tels que les court-circuit entre spires, les ruptures de barres et de portions d'anneaux, l'excentricité et les défauts de roulements sont des défauts non apparents du fait que la machine conserve son mouvement de rotation. L'occurrence d'un de ces défauts induit une modification topologique de la machine et donc une manifestation de la signature dans les grandeurs mesurables de cette dernière.

Le diagnostic industriel joue un rôle primordial pour contribuer à faire gagner des points de disponibilité et de productivité des capitaux investis dans l'outil de production, il est maintenant devenu une partie intégrante de la fonction maintenance. Dans les deux dernières décennies, de nombreuses recherches ont été menées dans le domaine du diagnostic de défauts des machines électriques, en particulier des moteurs asynchrones.

Ce mémoire, s'intéresse, en effet à l'analyse, la synthèse et l'interprétation des techniques et méthodes de surveillance et de diagnostic des défauts du moteur asynchrone, à savoir les défauts de stator, du rotor et le défaut de roulement. Dans ce contexte le mémoire comporte quatre principaux chapitres.

- Le premier chapitre est consacré à une présentation globale de la machine asynchrone, son rôle, les principaux éléments qui la constituent. Ainsi que ses avantages et ses inconvénients.
- Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les différents types de défauts qui peuvent affecter la machine asynchrone, plus spécialement le moteur asynchrone à cage d'écureuil, les causes, les effets, et des études statistiques ont été également présentés.
- Le troisième chapitre donne une revue complète de différentes méthodes de surveillance et de diagnostic des moteurs asynchrones, les avantages et les inconvénients de chaque méthode est également discutés
- Dans le quatrième chapitre des résultats expérimentaux, obtenus de différents laboratoires des machines électriques, ont été étudiés et interprétés. Le regroupement des résultats d'une analyse

FFT nous a permis de concevoir une base de données pour entraîner un système intelligent (par logique floue) dans l'objectif de mener un diagnostic des différents défauts et élargir les méthodes de diagnostic actuelles à des méthodes plus performantes qui peuvent détecter et localiser les défauts mixtes.

- Pour clôturer ce travail, une conclusion générale sera donnée pour résumer le travail et présenter les éventuelles perspectives quant à la continuation de ce travail.

**CHAPITRE I.**  
**DESCRIPTIONS DE LA MACHINE**  
**ASYNCHRONE**

## Chapitre I. Descriptions de la machine asynchrone

### I.1. INTRODUCTION :

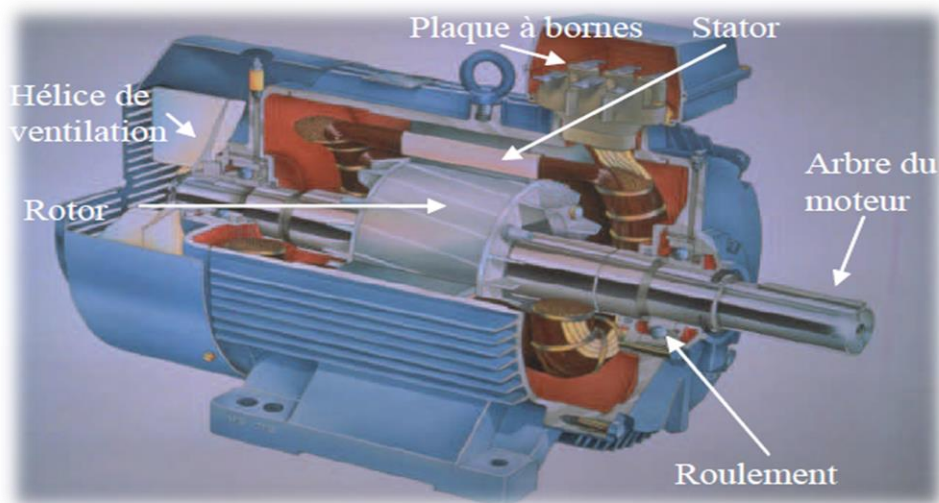
Le moteur asynchrone, ou moteur à induction, est le moteur le plus utilisé dans la plupart des entraînements électrique. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple, robuste mécanique et facile à construire, leur stator est relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constante, il tourne à vitesse peu différente de la vitesse de synchronisme.

Ce chapitre, débute par un rappel sur la constitution de la machine asynchrone ainsi que le principe de fonctionnement ; vers les caractéristiques et les applications de la MAS arrivons aux avantages et inconvénients.

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

La machine asynchrone comporte un stator muni d'un enroulement triphasé et d'un rotor portant un enroulement triphasé ou une cage. C'est un transformateur à champ tournant dont le primaire est le stator et dont le secondaire, mis en court-circuit et libre de tourner. [1]

La **fig. (I.1)** présente les différentes parties de la machine asynchrone :



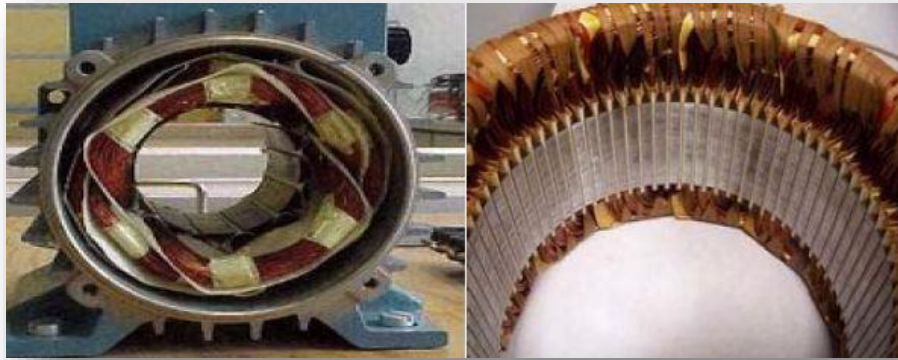
*Fig. I.1 : différentes parties de la machine asynchrone [1]*

### I.3. Stator :

Comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur asynchrone. Il se compose principalement:

[2]

- De la carcasse,
- Des paliers,
- Des flasques de palier,
- Du ventilateur refroidissant le moteur,
- Le capot protégeant le ventilateur.

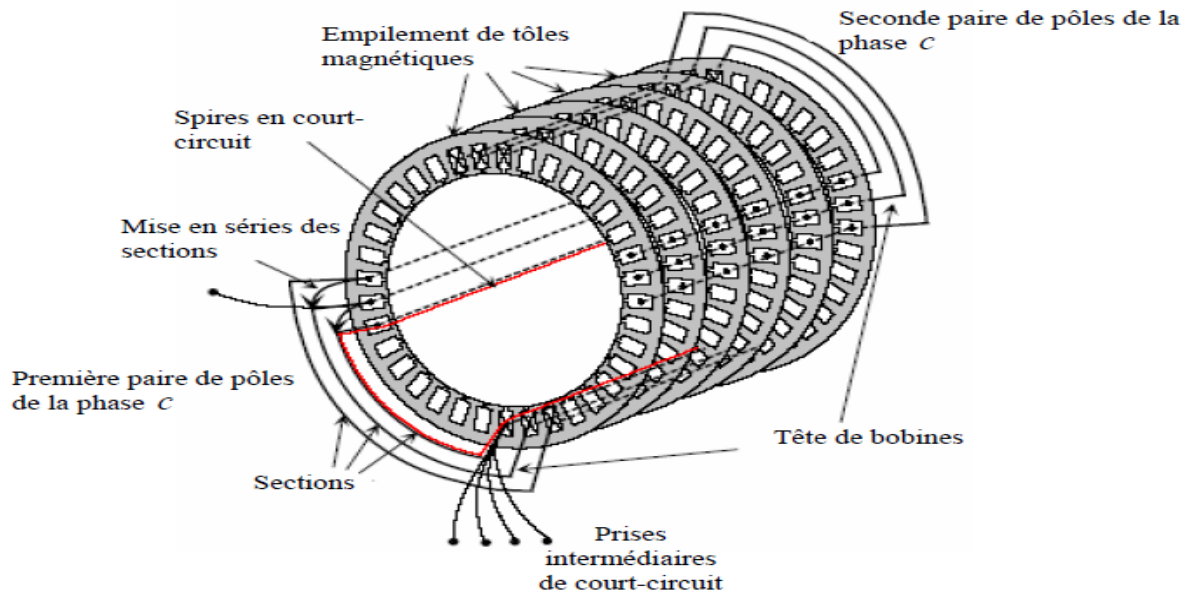


*Fig. I.2 : Stator [2]*

L'intérieur du stator comprend essentiellement (fig. I.2):

- Un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique.
- Les enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases logés dans les encoches du noyau. Dans un moteur triphasé les enroulements sont au nombre minimum de trois décalés l'un de l'autre de  $120^\circ$  électrique . Les entrées et les sorties des trois phases aboutissent à une plaque à bornes .

Le bobinage statorique peut se décomposer en 2 parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines.



*Fig. I.3 : Vue schématique en perspective du stator*

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.[8]

## **I.4. Rotor :**

Le rotor est la partie mobile du moteur asynchrone. Couplé mécaniquement à une charge, et crée un couple moteur capable de fournir un travail.

Les moteurs à induction triphasés sont classés en fonction du type du rotor : rotor à cage et rotor bobiné :

### **1.4.1. Rotor bobiné (a bagues) :**

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques empilés sur l'arbre de la machine. Cet enroulement est obligatoirement polyphasé, même si le moteur est monophasé, et, en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les encoches, découpées dans les tôles, sont théoriquement parallèles à l'axe du moteur, mais, en fait, légèrement inclinées par rapport à cet axe de façon à réduire certaines pertes dues aux harmoniques. Les extrémités de l'enroulement rotorique sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires qui permettent des réglages, par exemple de couple ou de vitesse. [3]



*Fig. I.4: rotor bobiné [5]*

#### **1.4.2. Rotor a cage :**

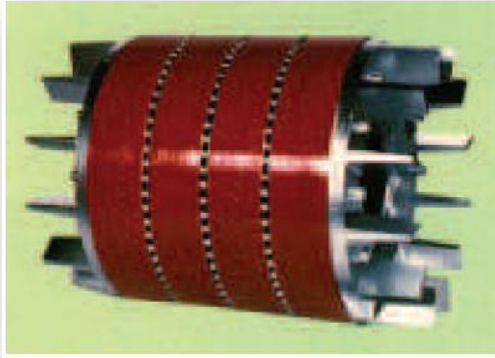
Les rotors à cage d'écureuil des machines asynchrones sont constitués par un cylindre en disques de tôles empilées, percées de trous sur la périphérie pour former des encoches.

Ces encoches, fermées ou semi fermées, sont destinées à recevoir les barres rotoriques en cuivre nu ou en aluminium coulé sous pression à une température voisine de 735°C.

Les cages en cuivre sont faites avec des barres d'égale longueur, enfilées dans les encoches et rivées ou brasées sur deux anneaux en cuivre, disposés de part et d'autre du rotor. La brasure au cuivre est faite au chalumeau, par soudure à l'arc électrique ou par chauffage inductif.

Les rotors à cage d'écureuil en aluminium se généralisent de plus en plus. La coulée d'aluminium produit non seulement le remplissage des encoches, mais elle forme également les deux anneaux du rotor qui court-circuitent toutes les barres. La cage est souvent dotée d'ailettes de ventilation.

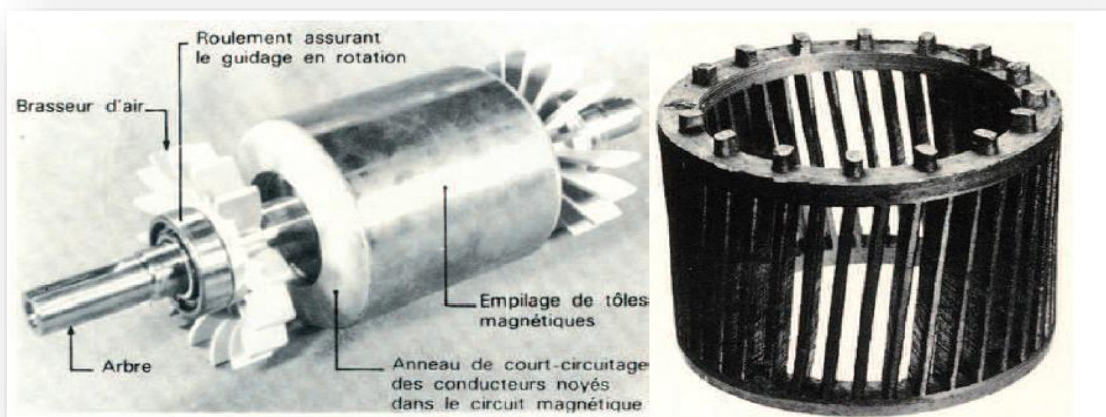
La construction de la cage en barres est actuellement réservée aux moteurs de grande puissance (Figures I.5 et I.6). Les moteurs de petites et moyennes puissances ont des cages en aluminium (Figures I.7 et I.8) (puissance inférieure à 20kW). [1]



*Fig. I.5 : Rotor à barres d'aluminium*



*Fig. I.6 : Rotor à barres de cuivre*



*Fig. I.7 : Rotor à cage d'écureuil (vue d'ensemble)*

*Fig. I.8 : Cage d'écureuil en aluminium*

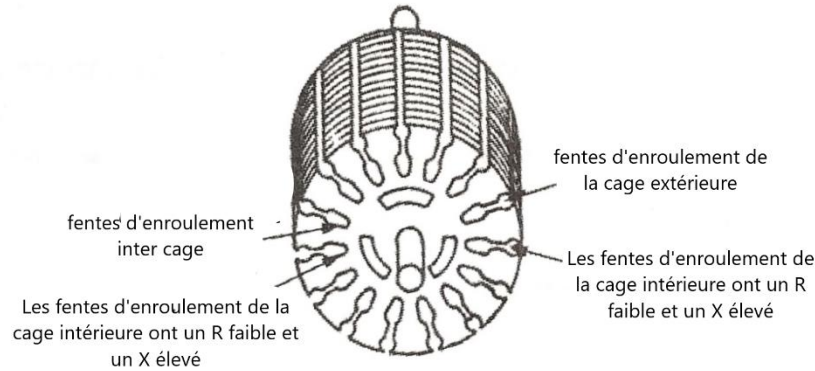
Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné, est d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue, et de loin, la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones en service. Son inconvénient majeur est qu'il ne permet pas d'insérer un rhéostat et qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et couple faible). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de moteur (rotor à double cage et rotor à encoches profondes). [1]

#### **1.4.2.1 Rotor à double cage [2] :** Le rotor comporte deux cages coaxiales:

- l'une (fréquemment réalisée en laiton ou en bronze), externe, à résistance relativement élevée, est placée près de l'entrefer.
- l'autre (en cuivre), interne, de plus faible résistance, est noyée dans le fer, ayant ainsi une inductance de fuites supérieure à la première.

Au démarrage, le courant rotorique, de fréquence égale à la fréquence  $f$  du réseau d'alimentation, se répartit de façon inversement proportionnelle aux réactances des cages, qui sont alors grandes devant les résistances. Dans ces conditions, c'est la cage externe qui est

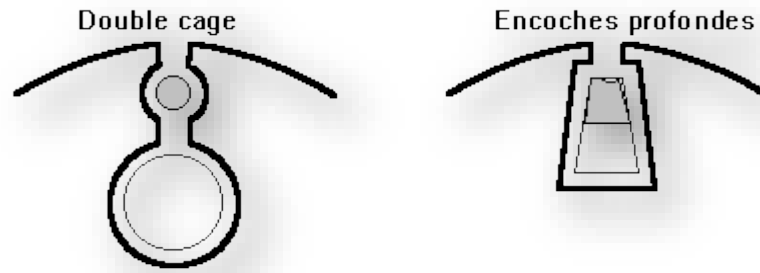
parcourue par le maximum de courant ; relativement forte résistance réduit l'appel de courant et accroît le couple. Au contraire, lorsque le moteur atteint son régime nominal de fonctionnement, normalement caractérisé par un faible glissement  $g$  et une fréquence basse  $gf$ , ce sont les résistances qui contrôlent la répartition du courant, ce qui favorise la cage interne de faible résistance.



*Figure I.9 : Rotor à double cage*

#### **1.4.2.2. Rotor à encoches profondes :**

Le rotor à double cage est beaucoup plus difficile à construire que le rotor à simple cage et est donc d'un coût plus élevé. On peut pallier cet inconvénient, tout en gardant une partie de ses avantages, en construisant une cage rotorique simple avec des barres très plates s'enfonçant profondément dans le circuit magnétique. Lors du démarrage, les lignes de courant se concentrent près de la périphérie et tendent ainsi à assigner une section de conducteur apparente réduite et par conséquent une résistance rotorique importante. En revanche, en marche normale, cet effet disparaît et les lignes de courant, en occupant la pleine section de la barre, retrouvent un circuit de faible résistance. Ce type de moteur, dit à encoches profondes, est très utilisé, notamment dans le cas des moteurs à haute tension à fort couple de démarrage. Il présente cependant l'inconvénient d'entraîner une augmentation du coefficient de dispersion des enroulements, donc une diminution du facteur de puissance du moteur, et bien sûr, d'exiger un diamètre de rotor plus important. Pour remédier à ce dernier inconvénient, on a parfois fait appel à des conducteurs ayant des formes plus compliquées, en trapèze, voire en L (la base du L étant en fond d'encoche). [2]



*Figure 1.10 : Rotor à encoches profondes*

### **I.5. Entrefer :**

Le stator et le rotor sont séparés par un entrefer très faible, de l'ordre de (0,2 à 3 mm), cette épaisseur réduite rend la taille de l'entrefer sensible aux variations dues aux encoches statoriques. Ceci crée des harmoniques dites d'encoches, pour les réduire, les encoches sont fermées par des cales magnétiques qui maintiennent le bobinage. [1,5]

### **I.6. Organes mécaniques :**

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces derniers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. [5]

Les paliers sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage comme nous pouvons le visualiser sur la figure 1.11. [6]

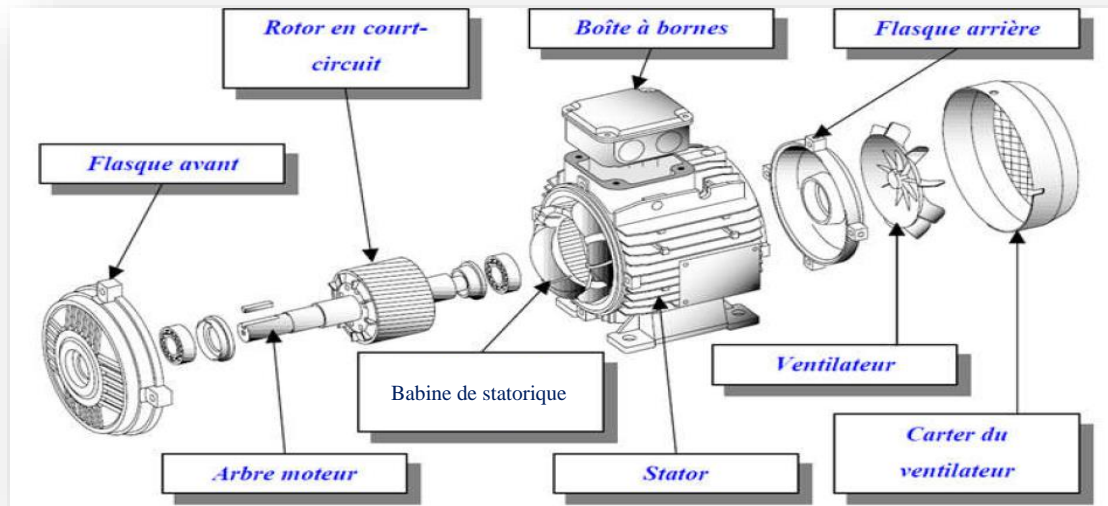


Figure 1.11 : Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone [5]

Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements. Pour les machines de petite et moyenne puissance. Dans La plupart du temps on trouve aussi un ventilateur de refroidissement.

### I.7. Différents modes d'alimentation des moteurs asynchrones :

Le moteur asynchrone triphasé est maintenant largement utilisé dans des applications nécessitant une vitesse variable. Il peut faire appel à des commandes de type scalaire ou vectoriel. Ces machines ont la réputation d'être robustes et d'être adaptées à des applications de forte puissance. Au départ les machines asynchrones ont été conçues comme étant des machines à vitesse constante en étroite liaison avec la fréquence du réseau. [5]

Le développement de l'industrie dans l'utilisation des entraînements électriques a exigé le fonctionnement de la machine à vitesses variables. Pour ce faire, plusieurs procédés sont utilisés, parmi eux, nous citons:

- ✓ Modification du nombre de pair de pôles.
- ✓ Cascade hypo synchrone.
- ✓ Action sur le glissement (tension d'alimentation, résistance rotorique..).
- ✓ Variation de la fréquence d'alimentation.

Suivant ces modes de variation de vitesse de la machine asynchrone, on distingue plusieurs modes d'alimentation :

- ✓ Alimentation par tensions du réseau industriel (amplitude et fréquence constantes).
- ✓ Alimentation par autotransformateur (amplitude variable et fréquence constante).
- ✓ Alimentation par convertisseur statique :
  - Gradateur (amplitude variable et fréquence constante)
  - Cyclo convertisseur.
  - Onduleur.

Les commandes avancées de la machine nécessitent la variation de la fréquence d'alimentation. C'est à cause du développement de l'électronique de puissance, que cette exigence est rendue possible.

Les principales techniques d'alimentation permettant d'obtenir des tensions à fréquence variable à partir du réseau à tension et fréquence constantes, sont:

- ✓ Cyclo convertisseur
- ✓ Association redresseur-onduleur.

La première technique est utilisée pour les grandes puissances aux faibles vitesses (machine de traction, machine d'outillage).

La deuxième technique est la plus utilisée de nos jours, on branche aux bornes du réseau un convertisseur alternatif-continu (redresseur) qui alimente un second convertisseur continu alternatif (onduleur). Par la commande d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de ce dernier, on arrive à obtenir des tensions à amplitude et fréquences désirées.[4]

### I.8. Plaque signalétique :

Chaque machine électrique dispose d'une plaque signalétique qui constitue une sorte de carte d'identité du moteur :

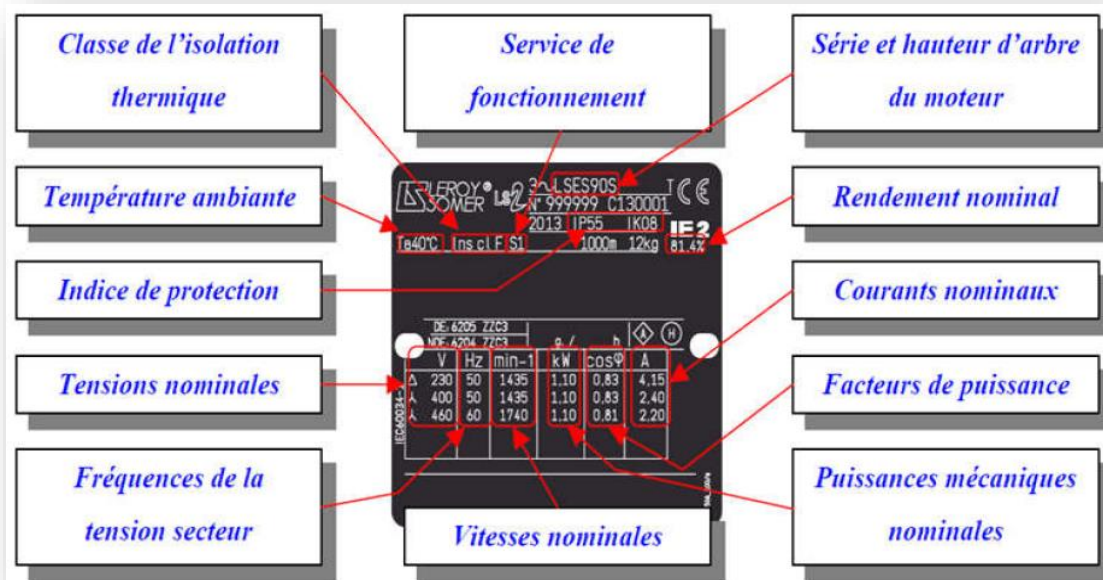


Fig. I.12 : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone [5]

### I.9. Principe de fonctionnement [3] :

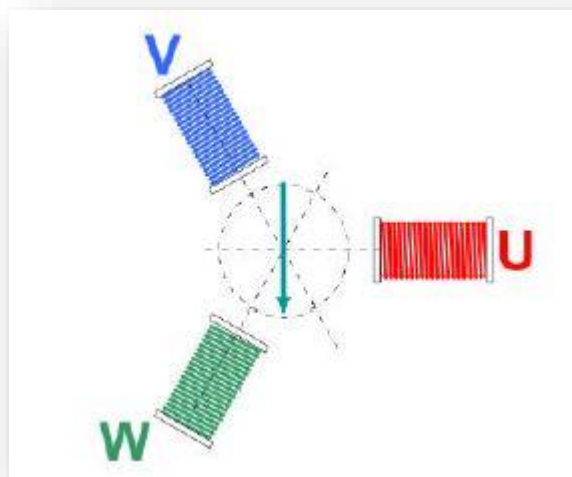


Fig. I.13 : Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone [3]

Trois bobines identiques sont disposées aux trois sommets d'un triangle équilatéral (stator). Une masse métallique (le rotor) est placée au centre des 3 bobines. Ces trois bobines forment une paire de pôles.

Lorsque les 3 bobines sont parcourues par des courants alternatifs de  $f$  (50 Hz) décalés électriquement, le stator produit un champ magnétique tournant à la fréquence de synchronisme  $N_s$ .

Le rotor subit l'influence du champ tournant. Ce champ tournant induit dans le métal du rotor un courant électrique de très forte intensité. Le courant électrique induit un champ magnétique opposé au champ tournant.

Le rotor devenu magnétique va suivre le champ tournant mais il va tourner à une fréquence légèrement inférieure à la fréquence de synchronisme d'où le nom de moteur asynchrone. Cette différence de vitesse s'appelle le glissement.

Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ magnétique, sinon la cage ne serait plus balayée par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des forces de Laplace et du couple moteur. L'inversion du sens de rotation du rotor s'obtient en inversant le sens du champ tournant (Il suffit d'invertir deux des trois phases d'alimentation.)

## **I.10. Définitions / relations :**

### **I.10.1. Vitesse :**

Elle s'exprime soit en tours par minute (notée  $N$  en tr/min) soit en radians par seconde (notée  $\Omega$  en rd/s) : [3]

$$\omega = N \times \frac{2\pi}{60} \quad (I.1)$$

### **I.10.2. Vitesse de Synchronisme $N_s$ [3] :**

C'est la vitesse de rotation du champ tournant qui entraîne le rotor : [3]

$$\omega_s = \frac{60 \times f}{p} \quad (I.2)$$

Avec :

$\omega_s$  : vitesse de angulaire en rd/min

$f$  : fréquence du réseau d'alimentation en Hz

$p$  : nombre de paires de pôles par phase

### I.10.3. Glissement :

Le glissement exprime la différence entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor Avec :  
[3]

$$S = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (I.3)$$

s: glissement en %

$\omega_s$  : vitesse de synchronisme en tr/min

$\omega_r$  : vitesse de rotation du rotor en tr/min

### I.11. Bilan des puissances :

Le principe de MAS consiste à transmettre une puissance absorbée (électrique) vers une puissance utile (mécanique) passe par quelque étapes comme sur la figure ci-dessous : [5]

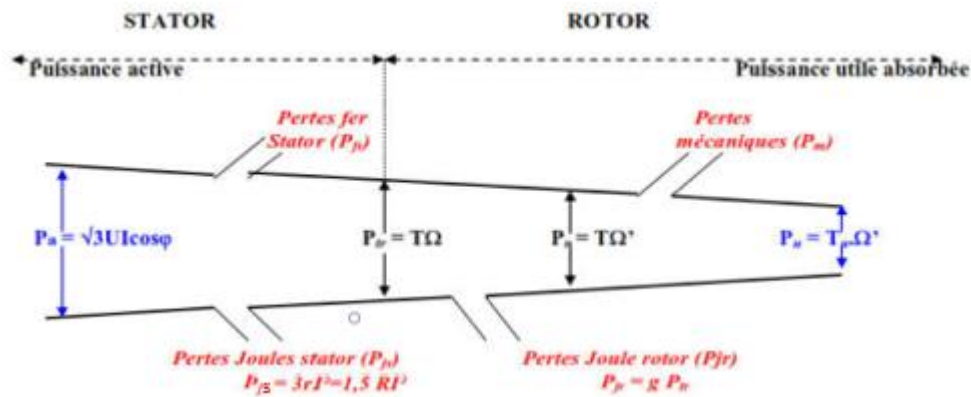


Figure 1.14 : Diagramme et bilan de puissance d'une machine asynchrone [5]

Avec :

$\Omega = \Omega_s$  : Vitesse de synchronisme.

$\Omega' = \Omega_r$  : Vitesse de rotor.

$T = Ce$  : Couple transmis au rotor ou couple électromagnétique.

$T_u = C_u$  : Couple utile.

$P_{tr}$  : Puissance électromécanique transmise au rotor.

$P_r$  : Puissance mécanique de rotor.

$r$  : Résistance entre phase de stator.

$R'$  : Résistance d'un enroulement.

$P_m$  : Perte mécanique.

Perte joule rotor :  $C_e * (\Omega - \Omega') = C_e \Omega [(\Omega - \Omega') / \Omega] = S.P_{tr}$

## **I.12. Domaine d'utilisation de la machine asynchrone :**

La machine asynchrone est très utilisée dans les applications industrielles, car de par sa conception, son cout est relativement moindre à celui des autres machines, sa robustesse au niveau électromagnétique est grande, et une bonne standardisation existe entre les différents fabricants. Cependant, la simplicité de conception de cette machine cache une complexité fonctionnelle assez importante.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la génération de la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elle était à l'origine uniquement utilisée en moteur, mais toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice; c'est par exemple le cas des éoliennes [7] .

## **I.13. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :**

Comme les autres machines électriques, la MAS présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs : sa structure, sa stratégie de commande et ses applications [5] .

### **I.13.1 Avantages :**

Parmi les avantages de la machine asynchrone et notamment en fonctionnement moteur, on peut Citer :

- Sa robustesse mécanique.
- Son faible coût.
- L'absence d'entretien constant.

### **I.13.2 Inconvénients :**

L'inconvénient majeur du moteur asynchrone est relié à l'absorption du réactif

- Qu'il faut parfois compenser, à des pertes de glissement et surtout à la nécessité de fonctionner pratiquement au voisinage de la vitesse de synchronisme.
- Le courant de démarrage plus élevé (5 à 8 fois le courant nominal).
- Difficile de contrôler la vitesse

## **I.14. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur la constitution de la machine asynchrone, et plus particulièrement sur celle de la machine asynchrone à cage d'écureuil, nous avons donné quelques notions sur son principe de fonctionnement, leurs domaines d'application, et à la fin, nous avons présenté leurs avantages et inconvénients.

## **CHAPITRE II.**

# **LES DEFAILLANCES DANS LES MACHINES ASYNCHRONES**

## Chapitre II. Défaillances dans les machines asynchrones

### II.1. INTRODUCTION :

Bien que la machine asynchrone soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts peuvent être soit d'origine électrique, soit d'origine mécanique.

Un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut tout comme une utilisation non conforme de la machine. Certaines fois, nous pouvons aussi incriminer le milieu dans lequel la machine est utilisée (milieux corrosifs, humide et/ou chimique hostiles).

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes défaillances qui peuvent affecter le moteur asynchrone. Nous évoquerons, essentiellement, les défauts statoriques et les défauts rotoriques.

### II.2 Terminologie :

Dans ce qui suit on va , il faut définir les termes suivants :

#### II.2.1 Fonctionnement normal d'un système :

Un système est dit dans un état de fonctionnement normal lorsque les variables le caractérisant (variables d'état, variables de sortie, variables d'entrée, paramètres du système) demeurent au voisinage de leurs valeurs nominales. Le système est dit défaillant dans le cas contraire.

#### II.2.2 Défaut :

Le concept de défaut est fondamental dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des procédés industriels. On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique. Cet écart est idéalement nul en l'absence de défaut. Les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs ou au niveau du processus lui-même.

#### II.2.3 Défaillance :

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques. Une défaillance est un dysfonctionnement du système, le processus présente alors un fonctionnement inacceptable du point de vue des performances. Il est clair qu'une défaillance implique l'apparition d'un défaut puisqu'il existe un écart entre la caractéristique mesurée et théorique. Par contre, *un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance* puisque le dispositif peut très bien continuer à assurer sa fonction principale.

#### **II.2.4 Panne :**

Une panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance et d'un défaut :

### **II.3. Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage d'écureuil :**

Les défaillances peuvent être d'origines diverses : électriques, mécaniques, thermiques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en 3 groupes : [8]

- ✓ générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : Surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de barre... etc.
- ✓ amplificateurs de défauts : Surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement...etc.
- ✓ vices ou défauts de fabrication et les erreurs humaines : Défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, ...etc.

Avant d'étudier les différents types de défauts, il est indéniable de présenter les causes donnant naissance à ces défauts ainsi que leurs conséquences .

#### **II.3.1. Contraintes électriques :**

Elles ont des effets directs sur la partie isolante du bobinage. Ce qui crée des problèmes diélectriques pouvant entraîner les ruptures des isolants. [11]

#### **II.3.2. Contraintes dynamiques :**

Elles ont pour conséquence des dépassements dynamiques d'origine externe apparaissant sous forme de couples pulsatoires, vibrations, forces centrifuges, augmentation de la vitesse et de la contrainte périodique. Ces contraintes peuvent provoquer le décalage de la masse rotorique, la flexion de l'arbre et des déformations au niveau des barres rotoriques. [11]

#### **II.3.3 Contraintes magnétiques :**

On distingue : [11]

- ✓ Effets électromagnétiques.
- ✓ Sollicitation magnétique déséquilibrée.
- ✓ Parasites et les vibrations électromagnétiques.

### **II.3.4. Contraintes d'environnement :**

Une machine doit toujours être gardée dans un endroit propre et sec, car sa durée de vie et sa bonne tenue dépendent de l'environnement dont lequel elle fonctionne. La présence de l'humidité et de la poussière, qui contient des particules métalliques, engendre de graves endommagements au niveau de la surface rotorique de la machine et détériore l'isolant provoquant par conséquent des courts-circuits dans les enroulements de la machine. « Elle dépend de la classe de la machine » [11]

### **II.3.5. Contraintes mécaniques : [11]**

Ces contraintes s'interprètent physiquement sous la forme de:

- ✓ Mouvement de l'enroulement.
- ✓ Déflexion du rotor.

L'excès de la température provoque essentiellement la dégradation des isolants des enroulements et contribue à leur vieillissement, engendrant des courts-circuits de différents types. Parmi les causes faisant apparaître les dépassements thermiques on cite [11] :

### **II.3.6. Contraintes thermiques :**

- ✓ Variations de la tension.
- ✓ Déséquilibre des tensions d'alimentation.
- ✓ Démarrage du moteur.
- ✓ Surcharge du moteur.
- ✓ Défaillance du système de ventilation.
- ✓ Augmentation de la température ambiante.
- ✓ Pertes thermiques excessives.

## **II.4. Causes des défauts d'un moteur asynchrone :**

Les causes des défauts sont brièvement et respectivement décrites dans les organigrammes des figures II.1 et II.2.

Les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique...). Tandis que, les défauts externes sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique, soit par l'environnement de l'utilisation de la machine. [8]

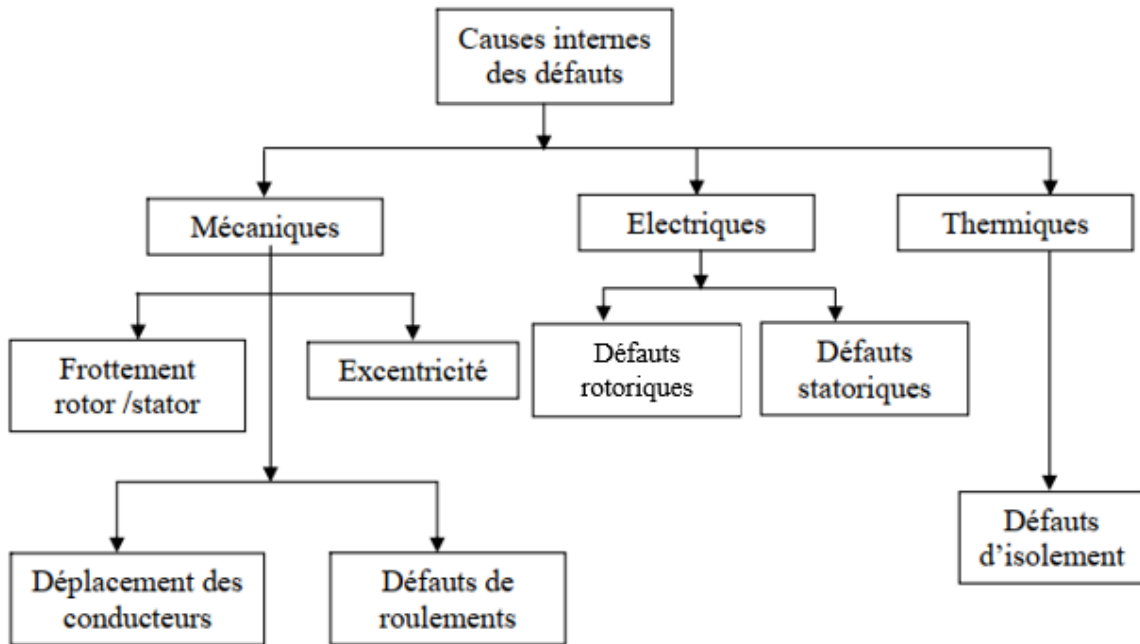


Fig. II.1. Causes internes des défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

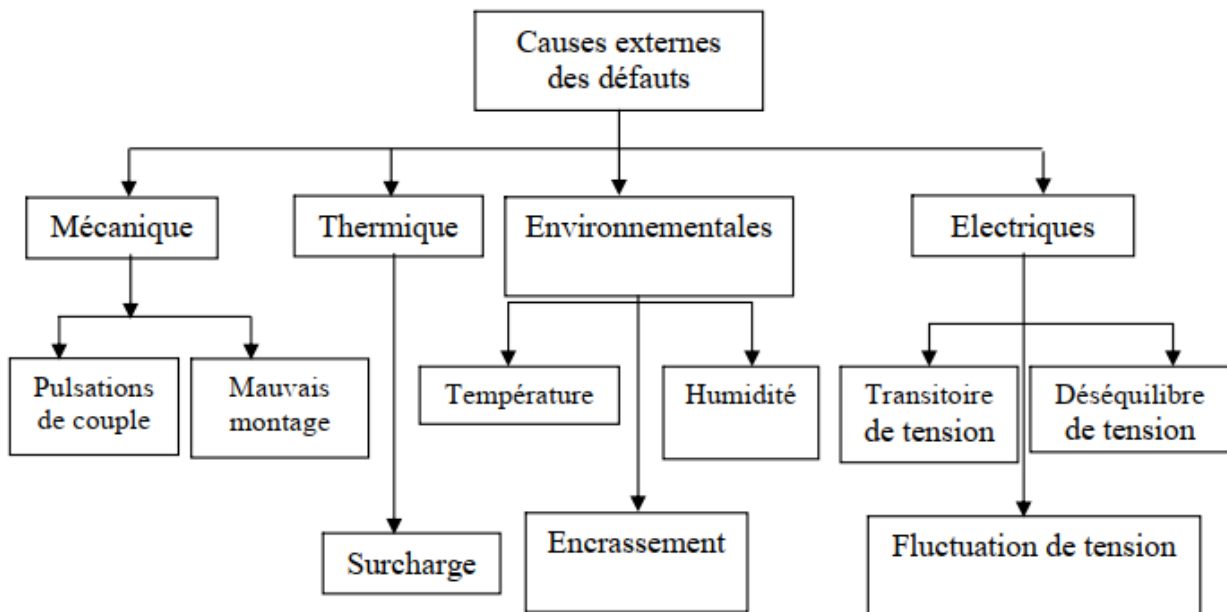


Fig. II.2. Causes externes des défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

## II.5. Conséquences des défauts d'un moteur asynchrone

- Au niveau du rotor, les démarrages fréquents provoquent des courants élevés dans les barres rotoriques. Ces courants engendrent, par conséquent, des surchauffements et des contraintes mécaniques conduisant à terme à des fissures puis à une cassure de barres. Par effet d'avalanche, la barre cassée accélère la rupture des barres adjacentes pouvant aboutir jusqu'à la destruction totale du rotor.
- De même, les efforts électrodynamiques que subissent les conducteurs des phases se traduisent par des vibrations mécaniques ayant pour effet de détériorer l'isolation. Sur le plan électrique, les fronts de tensions générés par les convertisseurs statiques accentuent le phénomène de décharges partielles et réduisent, par conséquent, la durée de vie de l'isolant. Quant aux origines environnementales, l'humidité et les produits corrosifs ou abrasifs sont les plus rencontrés [8].
- Au niveau de l'entrefer, les défauts se manifestent par une excentricité statique, une excentricité dynamique ou une excentricité mixte. Le défaut d'excentricité statique est, généralement, dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Le défaut d'excentricité dynamique peut être causé aussi bien par une déformation du cylindre rotorique que par une déformation du cylindre statorique. L'excentricité mixte est une combinaison des 2 premiers [8].
- Au niveau de la cage, les défauts se manifestent par la rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit. Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents...etc.) à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures) [8].
- Au niveau des paliers, nous pouvons citer le défaut de décentrage des flasques conduisant, généralement, à une excentricité statique alors qu'une détérioration de roulements à billes conduit, le plus souvent, à une excentricité dynamique [8].

Le diagnostic des moteurs asynchrones doit permettre de détecter et de localiser un défaut avant que celui-ci ne conduise à une défaillance ou à une panne qui entrainerait l'arrêt du système.

## II.6 Défaillances de la machine asynchrone

### II.6.1 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone :

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 [kW] à 200[kW]) a donné les résultats suivants (Fig. II.1) : [8]

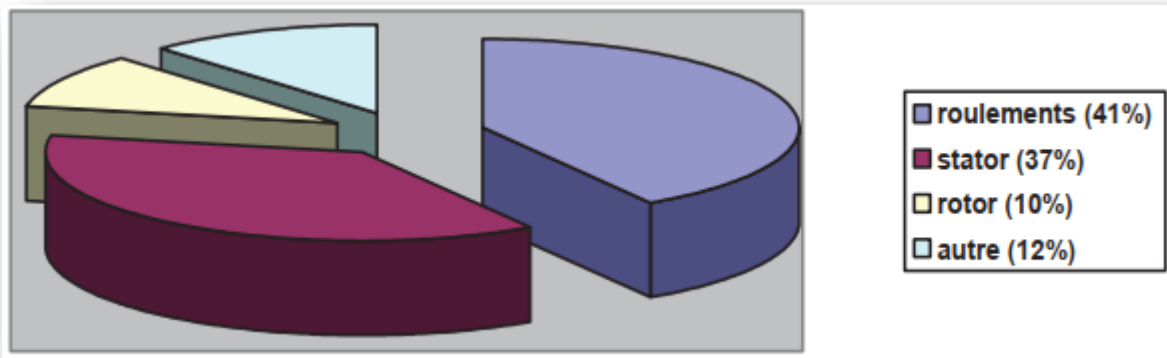


Fig. II.3. Répartition des défauts de la machine asynchrone

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure II.2.

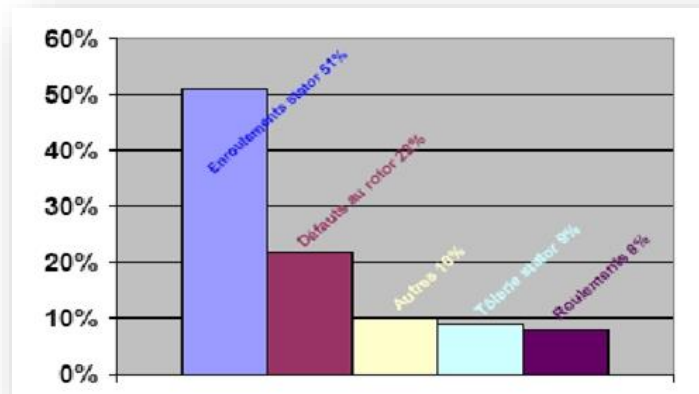


Fig. II.4. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances

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 Fig.II.3.

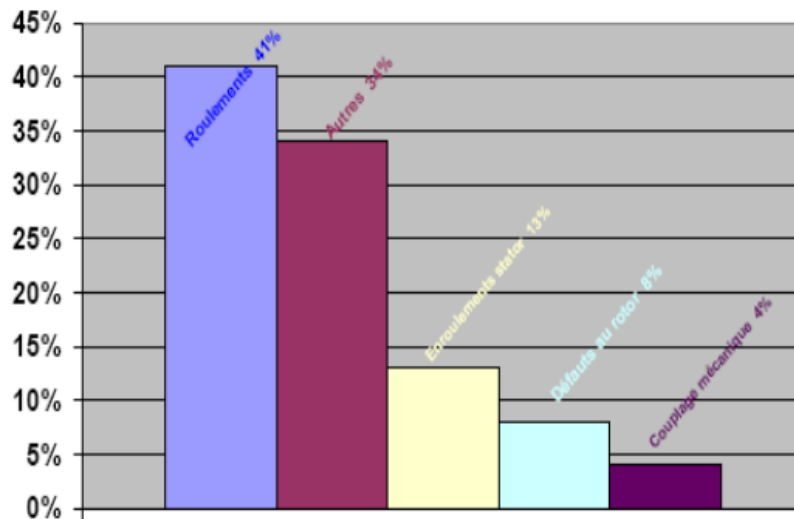


Fig.II.5. Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines. Ceci explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Ce qui exige une maintenance mécanique accrue.

Les défauts dans la machine asynchrone, peuvent être soit d'ordre électrique, soit d'ordre mécanique :

### II.6.2 Défaillance d'ordre électrique :

Les défauts d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine. Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques. [9]

#### A) Défaillances des circuits électriques statoriques :

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit: [9]

- défaut d'isolant
- court-circuit entre spires
- court-circuit entre phases
- court-circuit phase/bati
- déséquilibre d'alimentation
- défaut de circuit magnétique

### **A-1) Défauts d'isolant dans un enroulement :**

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique...etc.) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or, les matériaux d'isolation ont une limite thermique, électrique et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce dernier se dégrade de manière prématurée ou accélérée, jusqu'à la cassure totale. Les différentes causes pour ce type de défaut sont: [11]

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

### **A-2) Court-circuit entre spires :**

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude sur les autres phases modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage. De ce fait, une dégradation accélérée des isolants, peut provoquer, ainsi, un défaut en cascade (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste, sensiblement, identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut. [11]

### **A-3) Court-circuit entre phases :**

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

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les

protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. [9,11]

Les courants statoriques sont 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.

#### **A-4) Court-circuit entre phases-bâti :**

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepte les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels).

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance.

Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut. [8,11]



*Fig. II.6. Court-circuit entre phases-bâti*

**A-5) Défaits de circuit magnétique :**

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui a son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc. [11]

**B) Défaillances au rotor :**

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit : [11]

- Rupture de barres
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit
- Excentricité statique et dynamique

**B-1) Rupture de barres :**

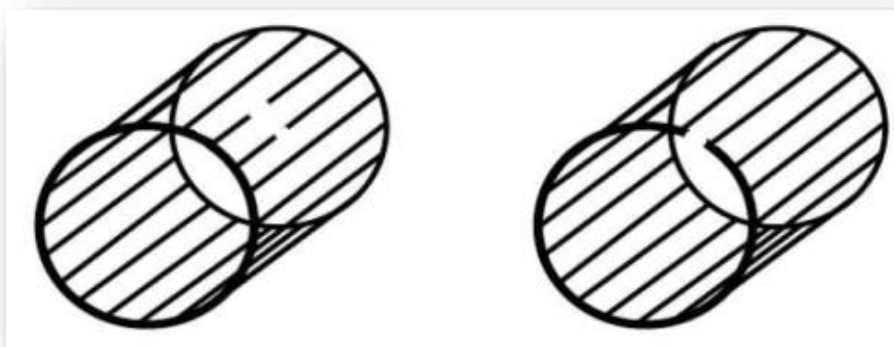
La cassure de barres est un des défauts les plus fréquents au rotor. La détérioration des barres entraîne une augmentation de la résistance rotorique, diminution de la résistance statorique et réduction dans la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmentation d'amplitude des oscillations.

L'effet de la cassure de barres croît rapidement avec le nombre de barres cassées. La grande amplitude des oscillations accélère la détérioration de la machine et des composants de la chaîne de traction.

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

$$f_d = f_s (1 \pm 2k.S) \quad (\text{II.1})$$

De plus les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défaillantes. [9]



*Figure II.7 : Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit [9]*

### B-2) Ruptures d'anneaux :

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparait aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux.

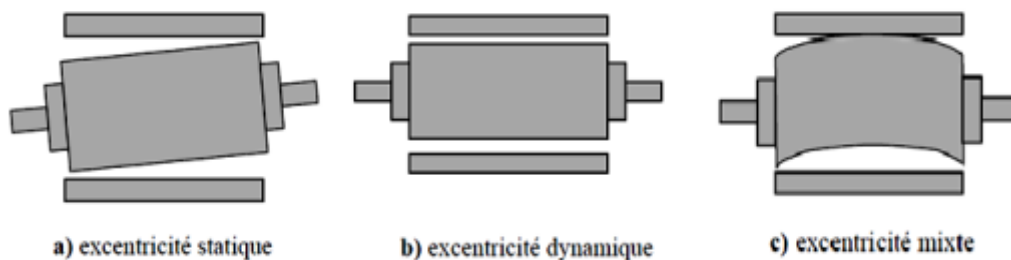
Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui qui est provoqué par la cassure de barres. [9]

### B-3) Excentricité statique et dynamique :

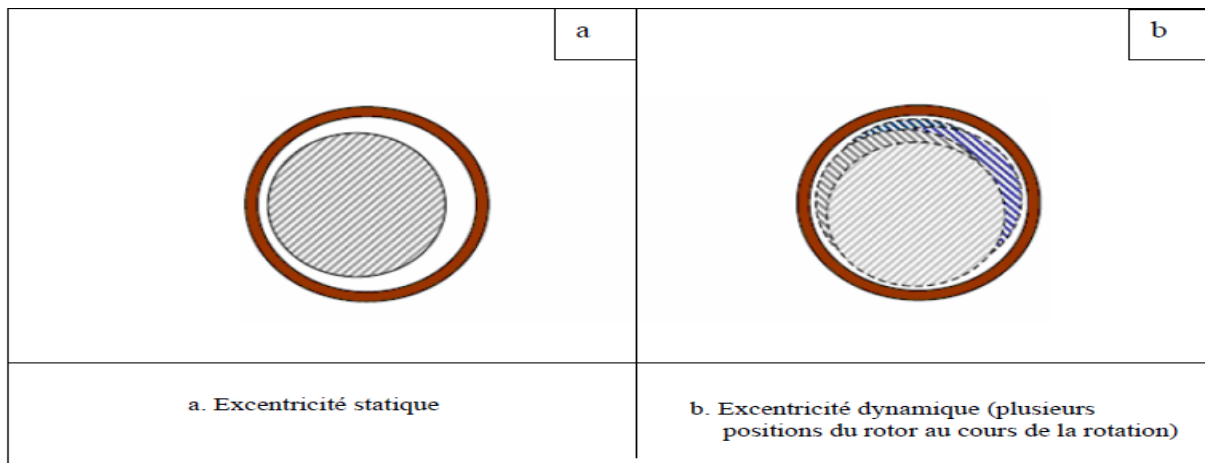
Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor), se traduisant par des oscillations de couple. Ce phénomène est appelé excentricité dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). [9]

Trois cas d'excentricité sont, généralement, distingués [9]:

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



*Fig. II.8: Défauts de l'excentricité statique, dynamique et mixte*



*Fig. II.9 : Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique*

Ce défaut modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statoriques ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

### **II.6.3 Défaillance d'ordre mécanique :**

Les défaillances d'ordre mécaniques sont, en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur. [9,11]

#### **A) Défaillances des roulements :**

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Le défaut de roulements est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Ce type des défauts peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication.

Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abimé, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation.

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

**B) Défaillances du flasque :**

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une *analyse vibratoire* ou une *analyse harmonique des courants absorbés par la machine*.

**C) Défaillances de l'arbre :**

L'arbre de la machine peut laisser paraître une usure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette usure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une *analyse vibratoire*, une *analyse par ultrason*, une *analyse fréquentielle des courants absorbés* ou simplement une *analyse visuelle* de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance.

## **II.6.4 Autres défaillances :**

**A) Environnemental :** La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuite qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant. [10]

Enfin, pour résumer cette partie, les tableaux II.01 et II.02 présentent les principales défaillances pouvant affectées le moteur asynchrone ainsi les causes des défauts et leurs conséquences sur le moteur.

<i>Composants</i>		<i>Défaillances</i>	<i>Causes possibles</i>	<i>Effets sur le système</i>	<i>Observable</i>
<i>Machine asynchrone à cage d'écureuil</i>	<i>Stator</i>	Isolant dans un enroulement	- Dégradations de l'isolant à la fabrication - Tension élevée - Courant élevé - Vibrations mécaniques - Température élevée - Vieillessement naturel	- Court-circuit dans l'enroulement	- Température - Vibrations - Courants
		Court-circuit entre spires	- Défaut d'isolants	- Elévation courants statoriques, variation d'amplitude sur les autres phases. - Modification de facteur de puissance. - Elévation du courants rotoriques.	- Température - Vibration - Courant - Puissance instantané
		Court-circuit entre phases	- Décharge partielle	- Proche de l'alimentation : - Fusion des conducteurs - Disjonction par les protections - Proche du neutre : - Elévation courants des les barres et les anneaux - déséquilibre des courants statoriques	- courants (déséquilibre) - température - tension - puissance instantanée
		Court-circuit phase/bâti	- Dégradation des isolants	- Elévation courant dans la phase - élévation de la température - création de défauts d'isolants - apparition d'une composante homopolaire - création couple pulsatoire	- Courant de fuite
		Circuit magnétique		- Dissymétrie du fonctionnement de la machine - surchauffe, surtension - élévation du courant	- Température - Courants - Tensions
		Déséquilibre d'alimentation	- Problème sur le réseau d'alimentation. - Défaillance du convertisseur.	- Elévation des courants dans les autres phases. - Elévation vibrations. - Elévation de l'échauffement.	- Vibrations - Courants. - Tensions. - Puissance.

*Tableau. II.01: Synthèse des défaillances du stator sur la machine asynchrone. [11]*

<i>Composants</i>		<i>Défaillances</i>	<i>Causes possibles</i>	<i>Effets sur le système</i>	<i>Observable</i>
<i>Machine asynchrone à cage d'écureuil</i>	<i>Rotor</i>	Ruptures de barres	Surcharge	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduction de la valeur moyenne de couple électromagnétique.</li> <li>- Oscillations de la vitesse.</li> <li>- Vibrations mécaniques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vibrations.</li> <li>- Couple électromagnétique.</li> <li>- Courant.</li> </ul>
		Ruptures d'anneaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bulles coulées.</li> <li>- Dilatations différentielles.</li> <li>- Surcharge du couple.</li> <li>- Détérioration des conditions de fonctionnement</li> </ul>	- Déséquilibre la répartition des courants entrainant la modulation d'amplitude des courants statoriques.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Courant.</li> <li>- Vibrations.</li> </ul>
		Excentricité	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage.</li> <li>- Usure des roulements.</li> <li>- Défaut de charge.</li> <li>- Défaut de fabrication</li> </ul>	- Balourd (mécanique et magnétique) entrainant les oscillations de couple.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vibrations.</li> <li>- Courants.</li> <li>- Couple.</li> </ul>
	<i>Axe</i>	Roulements	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usure</li> <li>- Température élevée</li> <li>- Perte de lubrification</li> <li>- Défaut de montage</li> <li>- Huile contaminée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Oscillations du couple de charge entrainant une augmentation des pertes et des vibrations.</li> <li>- Altération de l'équilibre magnétique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vibrations</li> <li>- Courants</li> <li>- Puissance instantanée</li> <li>- Variables mécaniques</li> </ul>

*Tableau. II.02: Synthèse des défaillances du rotor sur la machine asynchrone. [11]*

## **II.7 Conclusion:**

Ce chapitre a été, essentiellement, dédié à l'étude de défaillances de la machine asynchrone, et présenter d'une façon générale, l'enchaînement des mécanismes de défaillance probables ayant lieu d'une machine asynchrone mise en service, nous avons effectué une analyse des différents défauts pouvant survenir sur la machine asynchrone a cage d'écureuil.

## **CHAPITRE III.**

# **TECHNIQUES DE SURVEILLANCE ET DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES**

## **Chapitre III. Techniques de surveillance et de diagnostic des machines asynchrones**

### **III.1 INTRODUCTION :**

Le diagnostic des machines électriques a existé depuis la première mise en œuvre de ces machines. Les constructeurs et les utilisateurs de ces machines, dans un premier temps emploient des méthodes de protection simple telles que la détection des surintensités, surtension, défaut à la terre etc... . Les techniques et les moyens étaient rudimentaires et n'intervenaient qu'au dernier stade du défaut. Depuis plus d'une vingtaine d'années, des études et des recherches ont été menées sur la façon dont on pourrait détecter une panne, une défaillance et d'y comprendre la relation cause à avec. Des conférences internationales dédiées exclusivement au diagnostic sont tenues annuellement. Plusieurs ouvrages, publications et communications ont vu le jour. Ainsi, on pourrait améliorer la fiabilité du moteur asynchrone, donc augmenter sa durée de vie.

Les techniques de diagnostic sont généralement liées aux types de défauts. Certaines techniques sont plus adaptées pour un type particulier de défaut, d'autres peuvent être utilisé pour n'importe quel type de défaut. L'intérêt de la technique réside dans l'instrumentation employée, la facilité de la mise en œuvre ainsi que la richesse de l'information fournit sur l'existence ou non du défaut et de sa sévérité.

La méthode basée sur le traitement de signaux, appelé l'analyse spectrale, est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barre au rotor, la dégradation de roulements, les excentricités, les courts-circuits dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation de la machine dans les grandeurs électriques telles que le courant de ligne, le module des courants de Park, la puissance instantanée statorique...etc.

Dans ce chapitre, nous allons présenter, les différentes méthodes et techniques diagnostic de défauts dans les machines asynchrones. Nous avons choisi de décrire sommairement les méthodes les plus courantes, actuellement utilisées dans la surveillance et le diagnostic de défauts électriques et mécaniques dans les machines asynchrones.

### III.2. Notions principales :

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la fiabilité, la disponibilité et la sûreté des systèmes industriels les définitions de ces caractéristiques sont : [11]

**La fiabilité** : c'est l'aptitude d'un système à accomplir sa mission dans des conditions données d'utilisation.

**La disponibilité** : c'est l'aptitude d'un système à fonctionner lorsqu'on le sollicite.

**La sûreté**: La sûreté de fonctionnement consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances d'un système.

La responsabilité de garantir la disponibilité des systèmes repose sur la maintenance. D'après la norme AFNOR (Association Française de NORmalisation), la maintenance est définie ainsi :

*« Ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Elle peut être préventive ou bien corrective »*

Pour accomplir ces fonctions, la maintenance nécessite de connaître l'état de fonctionnement des systèmes. La surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance: elle sert, d'une part, à signaler les anomalies de fonctionnement et d'autre part, à prendre en compte les actions destinées à maintenir l'opération des systèmes.

La surveillance est composée de trois tâches, la tâche du moniteur, la tâche de protection et la tâche de diagnostic, comme le montre la figure III.1.



**Fig. III.1:** Surveillance. [11]

**Les trois tâches de la surveillance** sont définies de la façon suivante:

**Supervision** : les variables mesurées sont comparées à des valeurs de référence et le résultat est affiché et lu par l'opérateur.

**Protection automatique** : dans le cas d'une anomalie dangereuse, la tâche du moniteur est de déclencher automatiquement des actions préventives. Ces actions ont pour objectif de garantir la sûreté de l'opérateur et du système.

**Diagnostic**: les indicateurs d'anomalies dans le fonctionnement du système sont calculés à l'aide des variables mesurées. Le diagnostic a pour objectif de trouver la cause et l'endroit de l'anomalie.

### **III.3. Principe de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone :**

Le diagnostic consiste à détecter de façon précoce le défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance. La procédure de diagnostic s'articule autour des étapes suivantes : [15]

- Extraction des informations issues de capteurs de la machine pour obtenir des indicateurs de défauts ou résidus. Le résidu représente la différence entre l'observation et la valeur de référence. Avant de chercher la cause du défaut, il est important de valider l'information fournie par les résidus.
- La valeur du résidu doit être quantifiée afin de produire des symptômes. Le problème d'évaluation des résidus consiste à définir le seuil à partir duquel on déclarera le défaut.
- La décision constitue la dernière étape de la tâche du diagnostic. à partir de la comparaison de la signature actuelle avec celle de l'expérience, il s'agit de déclarer, dans un premier temps, si l'élément est défaillant ou non. Dans un second temps, si l'élément est défaillant, il faut trouver la cause de l'anomalie.

### III.4. Modélisation des machines asynchrones :

Les modèles décrivant le fonctionnement de la machine asynchrone en présence de défaut peuvent être groupés en **modèles physiques** et en **modèles comportementaux** :

- **Modèles physiques** se basent sur les lois de l'électromagnétisme pour décrire le fonctionnement de la machine. La méthode la plus utilisée dans ce cadre de modélisation est la méthode des éléments finis.
- **Modèles de comportement** (approche système), modifient les modèles issus de la physique en y introduisant des paramètres supplémentaires qui permettent la détection et dans certains cas la localisation de défaut observé.[15], ces méthodes reposent sur une connaissance du comportement du système sain et défaillant, c'est-à-dire l'effet d'un défaut sur les variables mesurées. Elles nécessitent une base d'apprentissage intégrant des signatures du système dans ces différents modes de fonctionnement. Un nouveau point de fonctionnement est comparé avec les points de la base de fonctionnement.

Plusieurs méthodes ont été développées dans la littérature basées sur les réseaux de neurones, la reconnaissance de formes (RDF), le neuro-flou, les algorithmes génétiques...etc. Toutes ces méthodes tendent à automatiser le processus de diagnostic depuis l'acquisition des données sur la machine jusqu'à la prise de décision sans l'intervention d'un expert.

### III.5. Méthodes de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone :

La figure III.2 montre un classement général de différentes méthodes du diagnostic des machines électriques

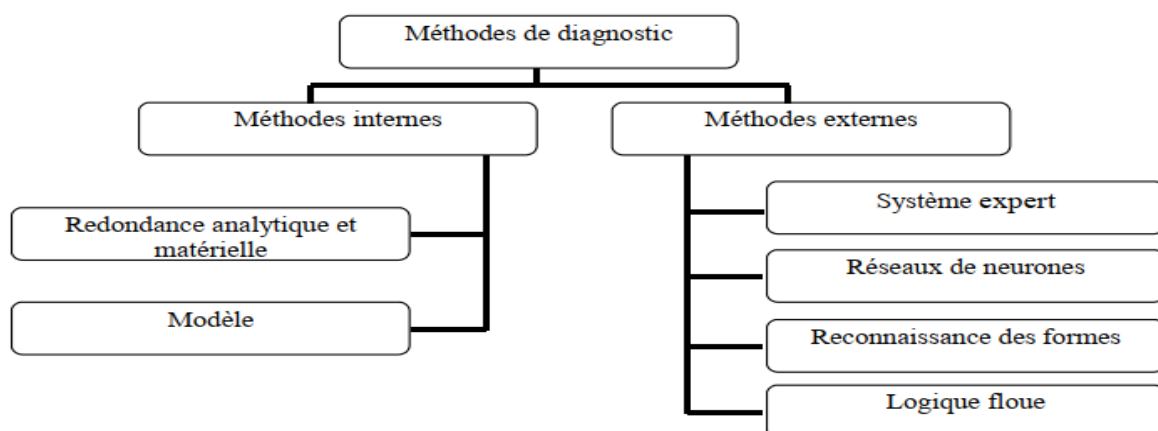


Fig. III.2 : Classement des méthodes de diagnostic [13]

### III.5.1. Méthodes internes : Méthode du diagnostic basée sur le modèle « Méthodes de diagnostic avec connaissance à priori » :

La méthode du diagnostic basée sur le modèle consiste à comparer les grandeurs déduites d'un modèle représentatif du fonctionnement des différentes entités du processus avec les mesures directement observées sur le processus industriel. La figure III.3 représente le fonctionnement d'un système de détection de défaillances utilisant l'approche basée sur le modèle. [13]

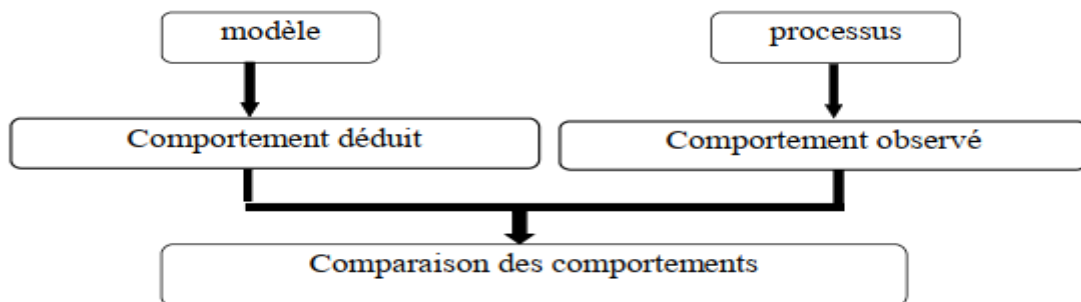


Fig. III.3 : Principe de fonctionnement de la méthode du modèle [13]

Le modèle possède une structure identique à celle du processus. La comparaison des comportements sert à la détection des écarts entre les signaux d'état: normaux et anormaux. Les observations simultanées des signaux de sortie de comparaison permettent d'isoler rapidement le module défaillant.

#### III.5.1.1. Techniques d'identification :

L'identification est la détermination, à partir de la connaissance des signaux d'entrée et de sorties, d'un modèle mathématique appartenant à une classe donnée pour lequel les comportements dynamiques ou statiques sont équivalents à ceux du processus au sens d'un critère donné. Donc le processus de diagnostic peut se faire suivant les étapes suivantes : [13]

- Choix d'un modèle mathématique.
- Choix des signaux d'entrée et de sortie.
- Critère de similitude entre le modèle et le processus.

#### III.5.1.2. Techniques d'estimation d'état :

L'estimation des variables internes d'un système en se basant sur un modèle approché comme par exemple l'estimation des flux ou des courants rotoriques dans le moteur asynchrone sur la base du modèle de Park peuvent donner dans certains cas des informations sur la présence de défauts. L'observation effectue la correction des variables estimées sur la base de mesures. [13]

### III.5.1.3 Techniques des résidus :

Les résidus sont des signaux générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller. Le modèle est constitué d'un ensemble de relations de contraintes dynamiques liant deux types de variables : [13]

- **Variables inconnues** : variables internes, perturbations, entrées inconnues .....
- **Variables connues** : consignes, variables mesurées.

Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsqu'une défaillance survient. Plusieurs méthodes sont utilisées pour faire ressortir un résidu significatif de la présence de défaut (**Gradient, Newton Rafeson, Levenbert Marquardt**). La difficulté majeure consiste à faire la liaison entre le résidu établi et un défaut particulier.

### III.5.2. Méthodes externes Méthodes sans modèle (Analyse spectrale) « Méthodes de diagnostic par suivi des grandeurs mesurables (sans connaissance à priori) »:

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs X physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement du signal. [15]

Le principe des méthodes d'analyse du signal repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. L'apparition d'un défaut était à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement, les vibrations,...etc. Ces symptômes sont des manifestations flagrantes d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques. Prenons comme exemple l'analyse spectrale qui est utilisée pour détecter les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

L'avantage des méthodes basant sur l'analyse des signaux d'acquisition est leur indépendance des fluctuations internes du système. En plus, cette technique permet une surveillance rapide et peu onéreuse car elle exige un simple capteur du courant ou de vibration.

Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux des machines électriques tels que : les courants , le flux , la vitesse et les vibrations...etc. la méthode la plus utilisée est celle des transformées de Fourier, elle consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les grandeurs choisies qui sont : soit les grandeurs électriques (plus particulièrement les courants de lignes), soit les grandeurs mécaniques (vibration, couple électromagnétique).[14,15]

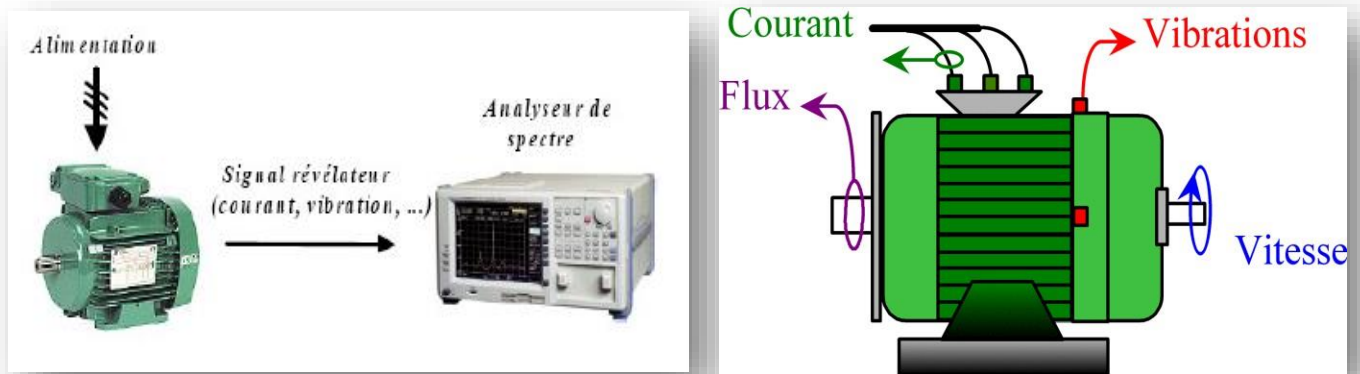


Fig. III.4 : Principe de la surveillance par analyse spectrale [14]

### III.5.2.1. transformée de Fourier :

L'un des principaux inconvénients de la transformée de Fourier discrète est la nécessité de disposer de la totalité des échantillons d'une séquence d'acquisition en vue d'estimer le contenu spectral du signal mesuré. Ce type d'algorithme requiert un nombre d'acquisitions égal à une puissance de 2 ( $2^A$  plus précisément où  $N$  est nombre d'échantillons). Aussi, la résolution spectrale à laquelle nous pouvons prétendre est égale à  $F$  où  $F$  est la résolution spectrale,  $F_e$  est la fréquence d'échantillonnage et  $T_e$  est le temps d'acquisition du signal à étudier. Ceci impose bien naturellement des conditions drastiques sur le fonctionnement du procédé dont la plus contraignante est le fonctionnement en régime stationnaire. La transformée de Fourier discrète d'une suite finie de  $N$  échantillons. [9]

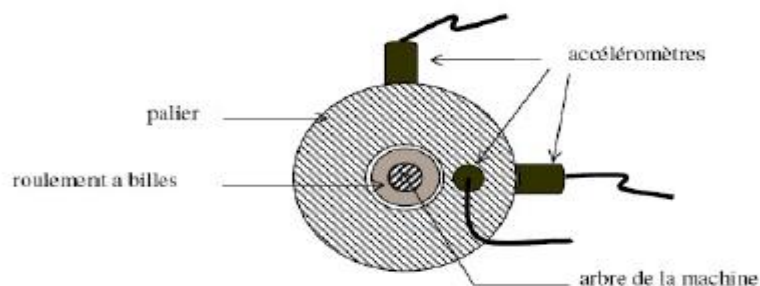
Nous présentons ici les méthodes classiques d'estimation de la Densité Spectrale de Puissance d'un signal, notée DSP, fondées sur la transformée de Fourier discrète. Nous donnons par la suite les caractéristiques importantes d'un estimateur qui sont le biais et la variance ainsi que leur impact sur le spectre fréquentiel résultant. Cela nous amènera à présenter quelques méthodes permettant de diminuer la variance pour obtenir une meilleure estimation de la densité spectrale de puissance du signal observé. Rappelons, au préalable, que toutes les méthodes présentées font partie de la famille des méthodes d'estimation spectrale non-paramétriques.

### A) Transformée de Fourier Rapide (FFT) :

La transformée de Fourier rapide (FFT) est une technique largement utilisée pour la détection des défauts dans les machines asynchrones. Elle donne de bons résultats pour des fonctionnements à forte puissance ou à couple constant mais des difficultés apparaissent pour les fonctionnements à couple de charge, vitesse de rotation et tensions d'alimentation variables. La nécessité de trouver d'autres techniques de traitement de signal pour les signaux non stationnaires devient donc nécessaire. [9]

### III.5.2.2. Diagnostic par analyse des vibrations mécaniques :

Le diagnostic de défaut en utilisant mes vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales. [11]



*Fig. III.5: Mesures vibratoires sur la machine asynchrone [14]*

Toute machine électrique produit du bruit et des vibrations, leur analyse est peut être employée pour donner des informations sur l'état de la machine. Le bruit et les vibrations sont provoqués principalement par des forces qui sont d'origine magnétique, mécanique et aérodynamique. Ces forces sont créées par le champ d'entrefer, dont leur expression est la suivante :

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

Les vibrations dans les machines électriques peuvent être captées par des accéléromètres piézoélectriques, qui sont les capteurs les plus utilisés pour la mesure de ces vibrations, en raison de leur fiabilité, de leur gamme de fréquence élevée et de leur robustesse. Après avoir capté les vibrations, une analyse spectrale est effectuée et comparée avec celle du moteur sain. Si les spectres des signaux captés sont différents de ceux du moteur sain, cela indique la présence d'un défaut dans le moteur.

❖ Le tableau III.01 résume les caractéristiques de l'analyse vibratoire des défauts :

Types de défaut	Signatures (analyse vibratoire)	Commentaires
Rupture de barres Rupture de portions d'anneaux	$f_r \pm 2sf_z$	Les vibrations axiales augmentent avec le nombre de barres Cassées
Excentricité Statique	Excentricité statique : $2f_z$ ou des composantes à $kf_r \pm f_z$	L'excentricité statique est fonction de l'espace seulement.
Excentricité Dynamique	Excentricité Dynamique $f_r \pm 2sf_z$ ou $f_r$	L'excentricité dynamique est fonction du temps et de l'espace.
Désalignement	$f_r$ ou $2f_r$ principalement	Vibrations plus importantes dans la direction axiale.
Déséquilibre mécanique	$f_r$	Au niveau de la charge notamment, vibrations plus importantes dans la direction radiale.
Défaillance des paliers	$f_{bext}$ $f_{bint} \pm nf_r$ avec n un nombre entier : 1,2,...	Bagues externes. Bagues internes. Ces composantes fréquentielles sont modulées par la vitesse.

**Tableau III.01:** Analyses vibratoires, signatures fréquentielles [11]

Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients :

- ✓ Problème d'accessibilité.
- ✓ Difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut.

De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant.

Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux.

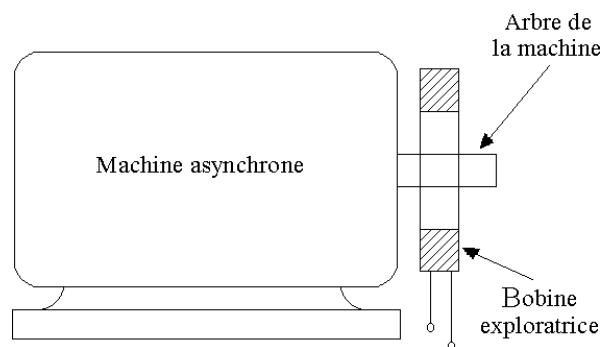
### III.5.2.3. Analyse de flux axiale de fuite :

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion est donc affectée par tout déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique au rotor ou au stator. Le flux embrassé dans les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leurs sensibilités à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés. Ces grandeurs sont difficilement mesurables mais des études ont été menées

pour extraire des signatures spécifiques à certains défauts. Le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leurs fabrications. L'étude des variations de flux peut donc être une solution pour détecter et localiser un défaut en utilisant des bobines exploratrices placées à l'extérieur de la machine, perpendiculairement à l'axe du rotor. [11]

Le contenu d'harmoniques des flux de fuites axiaux du stator et du rotor est directement en relation avec les harmoniques contenus respectivement dans les courants du stator et du rotor.

Ce flux de fuite axial peut être détecté non seulement par une bobine enroulée autour de l'arbre de la machine (fig. III.6) mais aussi par n'importe quel arrangement symétrique simple des bobines placées à l'extrémité de la machine ou par d'autres dispositifs sensibles tels que les sondes à effet hall.



*Fig. III.6: Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial.1*

Il est prouvé d'après la littérature, qu'il est possible d'identifier, et de distinguer les défauts suivants :

- ✓ Cassure d'une ou de plusieurs barres rotoriques.
- ✓ Court-circuit entre une ou plusieurs bobines de l'enroulement statorique.
- ✓ Excentricité statique et/ou dynamique.... etc.

#### **III.5.2.4. Analyse des tensions statoriques induites (Technique d'ouverture de phases (statoriques)) :**

Cette technique est utilisée pour la détection de barres cassées dans les moteurs asynchrones, elle est basée sur un test d'ouverture de phase lorsque la machine asynchrone fonctionne à vide. Au moment où les trois phases statoriques de la machine sont déconnectées de l'alimentation, nous savons que les courants rotoriques induisent des tensions dans les bobinages statoriques. Lorsque le rotor de la machine est sain, la force magnétomotrice produite par les courants des barres rotoriques après la déconnexion de la source d'alimentation est à prédominance sinusoïdale. Par conséquent les tensions générées dans les bobinages statoriques contiennent peu ou pas d'harmoniques significatifs [14]. Les

effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées [15]

Lorsque la cage rotorique présente une défaillance, la tension induite dans les bobinages statoriques n'est plus sinusoïdale, une augmentation des composantes harmoniques de rang  $6.m + 1$  avec :  $m = 0,1,2,\dots$  apparaît . L'apparition de composantes harmoniques supplémentaires est spécifique aux défauts rotoriques.[14]

### III.5.2.5. Analyse des courants absorbés (courants statoriques) :

Pour extraire de manière précise les informations relatives aux défauts, les recherches ont été particulièrement dirigées vers le spectre des courants statoriques, ceci, pour deux raisons : Les courants sont faciles à mesurer et ils fournissent des informations sur de nombreux défauts.[14]

Cette méthode a la capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Des études ont montré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, à condition que les composantes fréquentielles définies pour chaque défaut sont connues. Cette méthode ne s'applique actuellement qu'en régime permanent. [14,15]

### III.5.2.6. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique :

Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmoniques dans le spectre du couple électromagnétique mesuré, résultant d'une interaction entre le flux et le courant. Ce couple peut être reconstruit, soit à partir de deux des trois courants statoriques, soit en utilisant un modèle physique de la machine. [11]

L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même la torsion de l'arbre, entraîne l'apparition d'harmoniques dans le spectre du couple.

A partir d'un modèle de la machine, procède à l'estimation des composantes du flux rotorique dans un repère 'd-q' lié au stator dans le but d'observer le couple électromagnétique  $C_{em}$ . Il constate qu'une dissymétrie électrique du rotor fait apparaître des harmoniques de dentures rotoriques, ce qui modifie le champ d'entrefer. Le problème peut alors être détecté en analysant les fréquences d'encoches présentent dans le spectre du couple estimé  $C_{em}$  :

$$f_{sb} = f \left[ \frac{nb(1-s)}{p} \pm k \right] \pm 2sf_s \quad (\text{III.2})$$

Avec :  $k$  est un nombre entier.

Utilise le modèle triphasé pour estimer le flux statorique, ce qui permet d'estimer le couple utile  $C_u$ . Or, en présence d'excentricité, le spectre du couple  $C_u$  présente des informations aux fréquences :

$$f_{Cu} = \left[ 1 \pm k \frac{(1-s)}{p} \right] f_s \quad (\text{III.3})$$

Cependant, cette technique reste moins efficace et moins utilisée du faite que le spectre du couple électromagnétique est moins riche en information que ceux obtenus par analyse vibratoire. De plus l'acquisition de cette grandeur nécessite un équipement d'acquisition assez riche.

### III.5.2.7. Diagnostic par analyse de la puissance instantanée :

La puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres. [15]

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans la machine asynchrone a fait l'objet de nombreux travaux .

### III.5.2.8. Diagnostic utilisant le vecteur de Park :

C'est une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des moteurs asynchrones triphasés. Deux versions d'analyse par cette méthode a savoir :

- La première la plus connue, utilise les grandeurs biphasées ( de Park)  $i_d$ , et  $i_q$  qui sont calculées a partir des trois courant d'alimentation  $i_{sa}(t)$ ,  $i_{sb}(t)$  et  $i_{sc}(t)$ , pour l'obtention de la courbe de Lissajous  $i_q=f(i_d)$ . le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut

Les courants de Park  $i_d(t)$  et  $i_q(t)$  peuvent être calculés grâce aux deux relations suivantes :

$$\begin{cases} i_d(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} i_{sa}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sc}(t) \\ i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sc}(t) \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

- La deuxième est appelée Vecteur de Park Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module de vecteur de Park  $(\sqrt{i_d^2(t) + i_q^2(t)})$ . Elle présente beaucoup d'avantages quand à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement. [9,15]

### **III.5.3. Approches modernes de diagnostic :**

En dépit des diverses techniques mentionnées précédemment (diagnostic interne et externe), ces dernières années, la surveillance et la détection de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle. [11]

Ces techniques apportent aux systèmes de diagnostic des moteurs électriques la fiabilité, l'automatisation, la praticité et la sensibilité.

Ces méthodes ne sont pas en concurrence avec les méthodes précédemment citées. Elles exploitent les signatures avec ou sans modèle, décrites précédemment, pour réaliser la supervision et le diagnostic du système. Elles possèdent, par ailleurs, de grandes facultés d'apprentissage. En effet, les récents développements dans le matériel et le logiciel permettent de produire un système pour la surveillance automatique des moteurs asynchrones en utilisant des techniques de traitement des signaux et des techniques de classification non supervisée pour le diagnostic des défauts.

Parmi ces méthodes, nous pouvons citer les systèmes experts, la logique floue, les réseaux neuronaux, la reconnaissance des formes.

Dans cette partie, nous allons présenter quelques-unes de ces techniques ainsi que leur application dans le domaine du diagnostic de la machine électrique. Elles sont présentées dans l'ordre chronologique de leur utilisation pour la surveillance des moteurs.

#### **III.5.3.1. Systèmes experts :**

Les systèmes experts sont des outils conçus pour pouvoir modéliser l'approche des experts dans un domaine spécifique. Ils permettent de formaliser leurs connaissances et fournissent un mécanisme pour les exploiter. Lorsque le mode de représentation de la connaissance est de type symbolique, l'approche par système expert est favorisée. Dans ce cadre, la connaissance a priori sur le système est représentée par un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent ce qu'on appelle la base de connaissance. Cette base est construite à l'aide d'outils d'aide à la formalisation, ces outils sont fortement liés à l'application. [11]

Une base de connaissance et un moteur d'inférence .Le moteur d'inférence représente l'organe de résolution, son fonctionnement est basé sur des méthodes de résolution indépendantes du contexte.

Une méthode de résolution inclut en général les étapes suivantes :

- Sélection de règles dans la base de connaissance en fonction des faits établis,
- Résolution des conflits entre les règles sélectionnées.

- L'exécution en indiquant les conditions de déclenchement et les conséquences jusqu'à ce que le but recherché soit atteint, par exemple le diagnostic.

En diagnostic, ce type d'approche est adapté aux problèmes nécessitant la manipulation d'une quantité importante de données non homogènes. Ils ont beaucoup été utilisés dans le diagnostic des systèmes statiques. Pour des systèmes dynamiques, ce type d'approche est peu adapté pour des problèmes de temps-réel et de gestion dynamique de l'information.

### **III.5.3.2. Arbres de défaillances :**

Il s'agit d'une méthode déductive qui vise à identifier pour chaque événement indésirable, l'ensemble des événements élémentaires qui peuvent contribuer à son apparition. Cette méthode est très employée dans les domaines de l'automobile, du nucléaire, de la chimie, de l'aéronautique, etc... pour évaluer la fiabilité d'un système. Elle consiste en une recherche exhaustive des combinaisons possibles d'événements qui conduisent à un défaut de fonctionnement ou une panne. La représentation la plus utilisée est celle qui associe à chaque événement indésirable la liste de tous les enchaînements logiques des événements jusqu'à arriver à des événements de base qui ne nécessitent pas de développements plus poussés. Quand l'arbre est établi et les probabilités des événements élémentaires connues, la probabilité de l'événement indésirable et les combinaisons les plus probables conduisant à son apparition peuvent être déterminées. [11]

#### **Cette méthode présente différents avantages :**

##### **Avantages :**

- ✓ Elle permet d'analyser toutes les causes possibles d'un défaut et donc d'améliorer la conception du système.
- ✓ La décomposition arborescente permet un diagnostic relativement rapide des défauts.  
Cependant

##### **Inconvénients :**

- ✓ Le principal vient de l'exhaustivité nécessaire pour établir le diagnostic : uniquement les causes prévues peuvent être déduites. La difficulté réside en la lourdeur de la mise en œuvre de la méthode pour un système complexe.
- ✓ Connaître jusqu'à quel niveau de décomposition l'analyse peut être menée.
- ✓ La méthode est difficile à utiliser pour des systèmes complexes fortement interconnectés. Une étude exhaustive de tous les défauts et de leurs combinaisons s'avère rédhibitoire pour un entraînement.

Dans le domaine des entraînements, des arbres de défaillances ont été utilisés pour analyser les pannes de cartes analogiques de commande. L'idée était d'analyser les causes de quelques combinaisons de signaux logiques issus de protections pour donner à l'utilisateur une indication sur la carte à changer après un défaut. L'expérience a montré que ces arbres étaient lourds à mettre en œuvre et difficiles à modifier. De plus, comme ils étaient basés sur un nombre restreint de signaux logiques, les indications données étaient très succinctes.

### **III.5.3.3. Réseaux de neurones artificiels :**

Un réseau de neurone est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement de vrais neurones humains. Cette technique est placée dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle qu'ils enrichissent en permettant de prendre des décisions s'appuyant davantage sur la perception que sur le raisonnement logique formel. Dans les années 1940, les neurologues Warren Sturgis McCulloch et Walter Pitts menèrent les premiers travaux sur les réseaux de neurones. Ils constituèrent un modèle simplifié de neurone biologique communément appelé neurone formel. Ils montrèrent également théoriquement que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques complexes. [11]

Issus de la recherche en neurophysiologie et en informatique, cette approche fait l'objet de recherches dans beaucoup de domaines tels que la compréhension et la synthétisation de la langue naturelle, la classification, le diagnostic, etc. Cette technologie comporte des caractéristiques très intéressantes comme la faculté d'apprentissage et d'auto-organisation.

Elle présente des perspectives d'applications particulièrement intéressantes pour l'aide au diagnostic avec signatures externes. En effet, le calcul neuromimétique possède des propriétés similaires à celles de la reconnaissance des formes pour la classification automatique de signatures.

Pour identifier des défauts dans un système, le diagnostic réalisé par réseaux de neurones doit disposer d'un nombre suffisant d'exemples de bon fonctionnement et de défauts pour pouvoir les apprendre. Pendant la phase d'apprentissage, les exemples sont présentés au réseau en entrée avec les diagnostics correspondants à la sortie.

Le réseau s'auto-organise, apprenant à relier les exemples montrés aux diagnostics. Après l'apprentissage, le réseau ne reconnaît pas seulement les exemples appris mais également des paradigmes leur ressemblant, ce qui correspond à une certaine robustesse par rapport aux déformations de signaux par le bruit.

Pour un traitement par réseau de neurones, les exemples doivent être mis en forme pour être entrés dans le réseau. Ce sont des grandeurs caractéristiques des défauts à diagnostiquer, filtrées et prétraitées (transformée de Fourier). Conceptuellement, un réseau de neurones peut être considéré comme une boîte noire, il n'est pas nécessaire de construire un modèle du système, contrairement aux méthodes dites internes.

Cependant, l'inconvénient majeur est d'arriver à déterminer une méthodologie pour maîtriser les problèmes inhérents, qui sont principalement le choix de la structure, de la taille du réseau et des algorithmes d'apprentissage pour un problème précis. Par contre, la principale raison de leur intérêt en diagnostic industriel est leur faculté d'apprentissage et la mémorisation d'un grand volume d'information.

#### **III.5.3.4. Reconnaissance des formes (RdF) :**

Lorsque les observations sont de type numérique, l'approche par reconnaissance des formes peut être employée. Sur des problèmes complexes tels que le nucléaire, l'industrie automobile, le comportement humain, les réseaux téléphoniques, etc... où la modélisation du procédé est souvent difficile à mettre en œuvre, cette approche est privilégiée. De nombreux travaux, ont permis de montrer l'intérêt de ce type d'approche.

Pour anticiper l'apparition d'un dysfonctionnement, soit pour les éviter, soit pour en limiter les conséquences, quelques études ont utilisées l'association de la RdF et la théorie des ensembles flous. Il est parfois important de détecter l'évolution du système à diagnostiquer, notamment pour détecter la transition entre les modes de fonctionnement normal et anormal. [11]

Nous pouvons citer d'autres types de diagnostic utilisant d'autres grandeurs physiques, par exemple :

#### **III.5.3.5. Diagnostic par la mesure de la température :**

La machine électrique dissipe une certaine quantité de chaleur, due aux pertes mécaniques dans les paliers (frottement et ventilation) et aux pertes électriques dans les conducteurs et les pertes magnétiques dans le fer. Il en découlent des échauffements générateurs de contraintes thermiques et une diminution du rendement. L'approche thermique ou la méthode de diagnostic par la mesure de la température consiste à mesurer la température de chaque phase de l'enroulement statorique et la comparer avec la valeur limite, si elle dépasse le taux admissible, on déduit l'existence du défaut dans le moteur. [11]

### III.5.3.6. Diagnostic chimique :

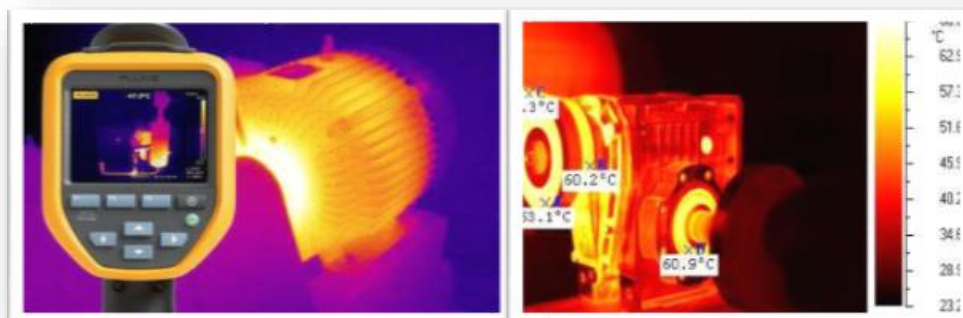
Le diagnostic chimique est basé sur l'analyse des fluides de refroidissement qui sont utilisés pour l'évacuation de la chaleur dans les moteurs à grandes puissances (eau, air ou huile). La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone, qui apparaît dans le circuit de l'air de refroidissement et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge.

La méthode de diagnostic chimique est uniquement utilisée dans les moteurs à grande puissance, donc elle n'englobe pas tous les types de machines. [11]

### III.5.3.7. Analyse par thermographie infrarouge :

La thermographie infrarouge «TIR» est la science de l'acquisition et de l'analyse d'informations thermiques à l'aide de dispositifs d'imagerie thermique à distance. La thermographie infrarouge est utilisée dans le domaine de la surveillance conditionnelle de fonctionnement pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le flux de production et réduire au maximum les coûts d'entretien. La technologie de détection par thermographie infrarouge est devenue un moyen irremplaçable de garantir la sécurité des conditions de production industrielle. Cette méthode de détection ne nécessite aucune coupure de courant, n'exige ni arrêt des machines, ni interruption de la production. Elle permet de diagnostiquer à l'avance les dysfonctionnements latents, et ainsi de prévenir l'occurrence des pannes, d'éviter les incidents de production. L'imagerie thermique est une technique innovante d'évaluation « sans-contact », à la fois sûre, fiable, et rapide. [16]

Une caméra thermique ne mesure pas des températures mais des flux de rayonnement. Après le réglage de certains paramètres par l'opérateur en thermographie, la caméra calcule alors les températures de la cible. Elle fournit ensuite à l'utilisateur une cartographie des températures, appelée thermogramme (fig. III.7).



*Fig. III.7 : Thermogramme: usure de palier [11]*

### **III.6 Conclusion :**

L'objectif de ce chapitre était de présenter une liste non exhaustive des différentes méthodes de diagnostic ainsi que les différentes signatures de défaillances extraites à partir de ces méthodes.

Deux groupes des méthodes sont exposés à savoir : les méthodes de diagnostic dites internes (avec connaissance à priori), et les méthodes externes (sans connaissance à priori) basées sur la mesure de signaux vibratoires, électriques, électromagnétiques...etc. rendant directement compte de l'état de la machine. Les méthodes numériques ainsi que les techniques modernes servant au diagnostic et surveillance de la machine asynchrone sont aussi présentées.

## **CHAPITRE IV.**

### **CHOIX APPROPRIES DES METHODES DE DIAGNOSTIC (ETUDE DE CAS)**

## Chapitre IV. choix appropriés des méthodes de diagnostic (Etude de cas)

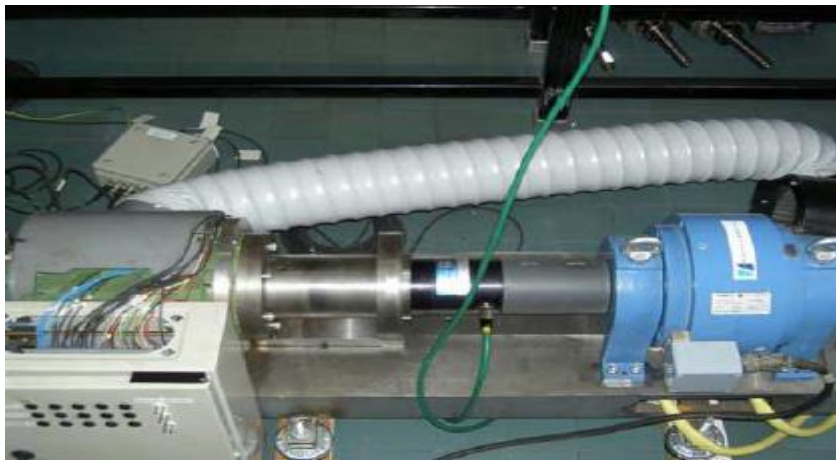
### IV.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous allons faire l'analyse des résultats des tests effectués aux différents laboratoires tels que le laboratoire "Ampère" site université Claude Bernard, Lyon1, France, laboratoire électrotechnique de l'université de Laghouat, et le laboratoire de génie électrique LGEB de Biskra.

Bien qu'un banc expérimental n'a pas été réalisé, les données utilisées dans ce chapitre ont été extraites de différentes études telles que les études de Y Messaoudi [14], A. Gazzam, C. Safsafa [9], A. Medoued [8], et H. Cherif [15] qui sont travaillées dans les laboratoires cités ci-dessus.

### IV.2. Déroulement des tests dans le laboratoire :

Le banc d'essai (Fig. IV.1) est un exemple d'une machine asynchrone, les paramètres des machines étudiées sont fournis dans l'annexe A, B et C.



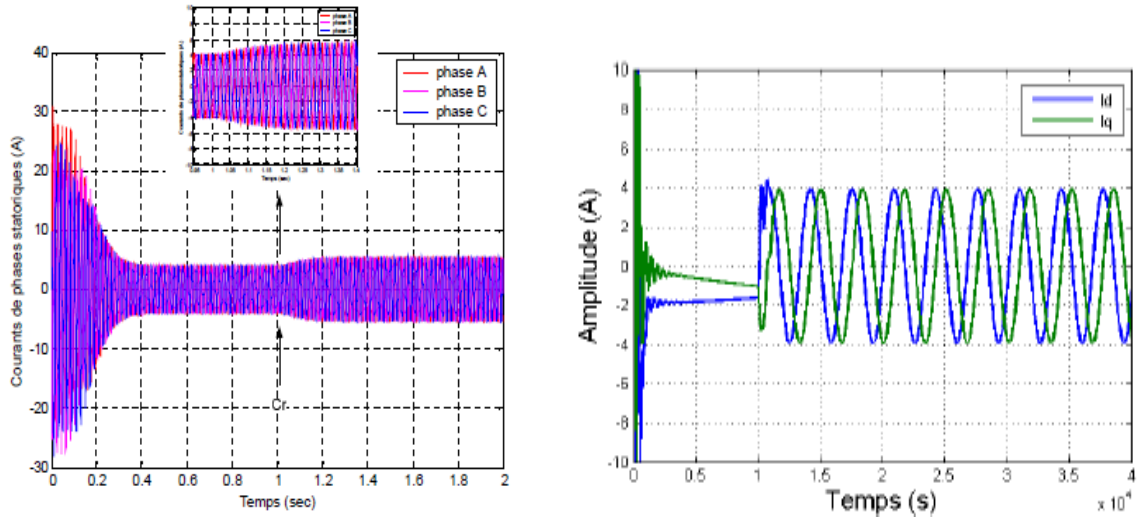
*Figure IV.1 : Exemple de banc d'essai (Laboratoire Ampère) [8]*

Différentes conditions de fonctionnement de la machine ont été considérées, à savoir :

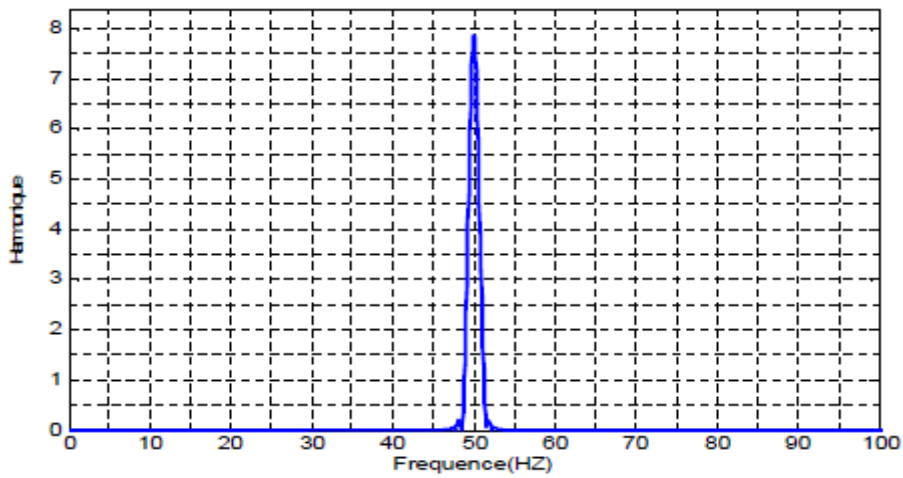
- machine saine.
- Défaut stator.
- Défaut rotor.

### IV.3. Simulation de la machine asynchrone en régime sain :

La figure IV.2 présente les résultats de simulation de l'entraînement électrique de la machine asynchrone saine, alimentée directement par le réseau triphasé avec un enroulement statorique connecté en étoile.[14]



(a)



(b)

**Fig.IV.2 :** Simulation d'une machine saine

(a) Courants des phases statoriques, (b) spectre du courant de la phase  $I_{sa}$

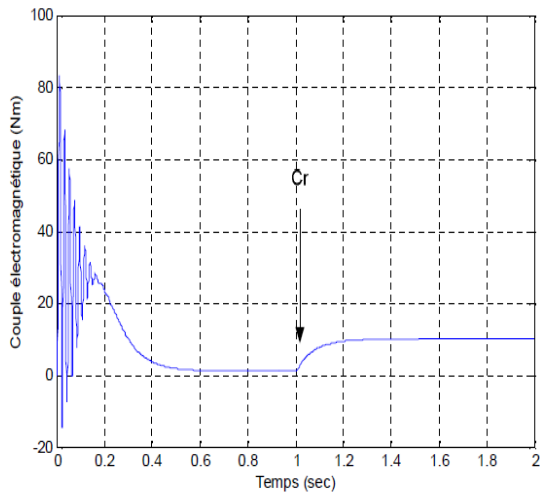


Fig.IV.3 : Couple électromagnétique machine saine

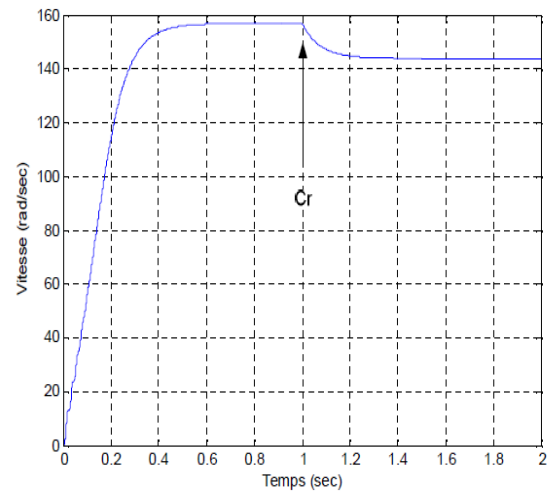


Fig.IV.4 : Vitesse de rotation

#### IV.4 Simulation de la machine asynchrone en présence de défauts :

Dans le but de connaître l'influence des défauts sur le fonctionnement et l'état de la machine asynchrone, nous donnons les résultats de simulation des défauts soit : le court-circuit entre spires de même phase statorique , et le court-circuit entre phases statorique. [14]

#### IV.5. Défaut de court-circuit entre spires

##### a) Courants statoriques :

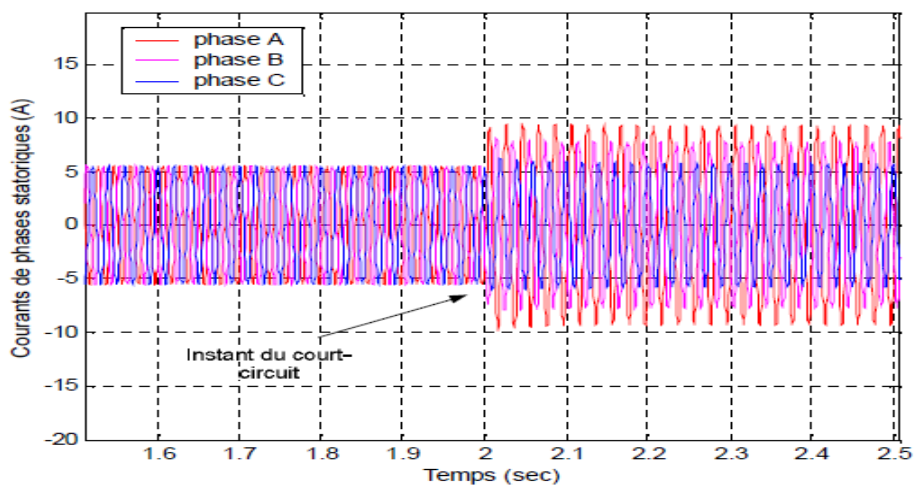


Fig.IV.5 : Court-circuit de 12 spires (5%)

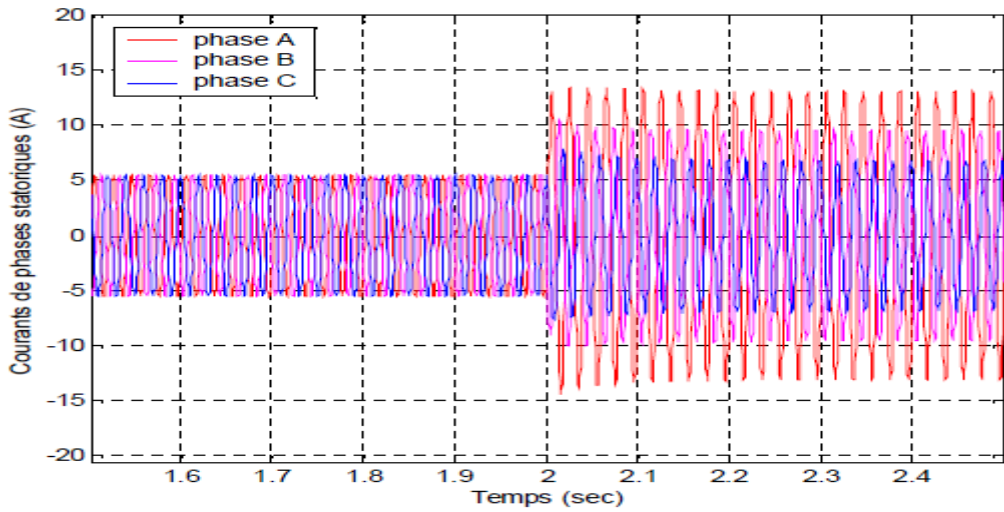


Fig.IV.6 : Court-circuit de 24 spires (10%)

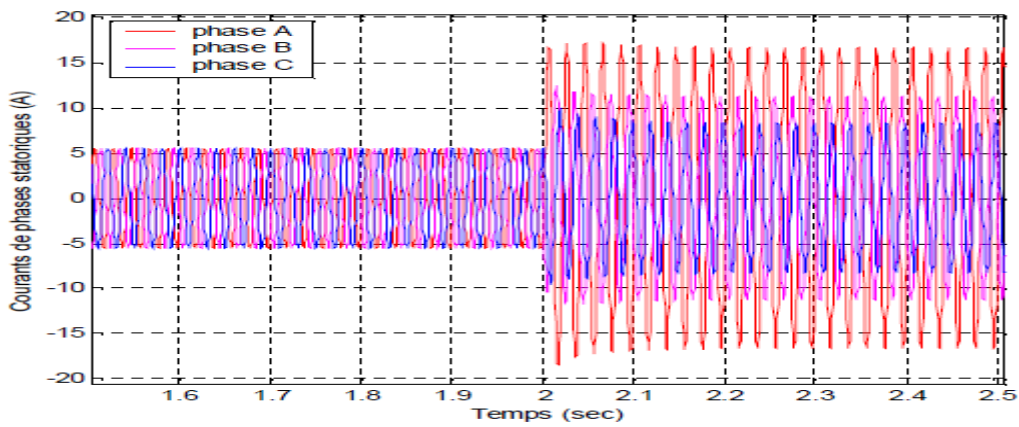


Fig.IV.7 : Court-circuit de 36 spires (15%)

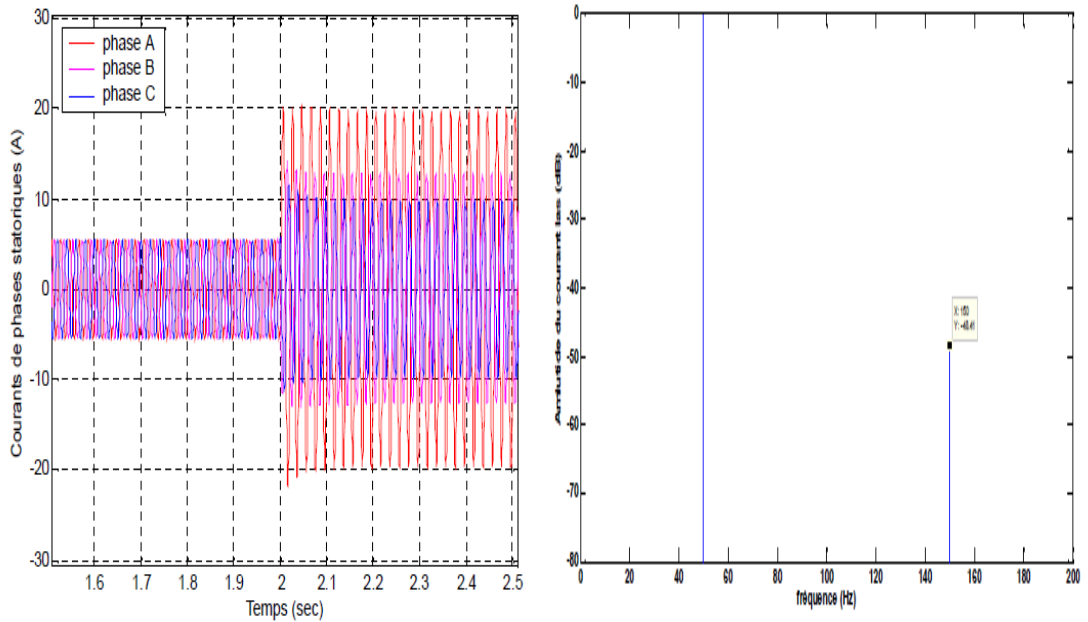
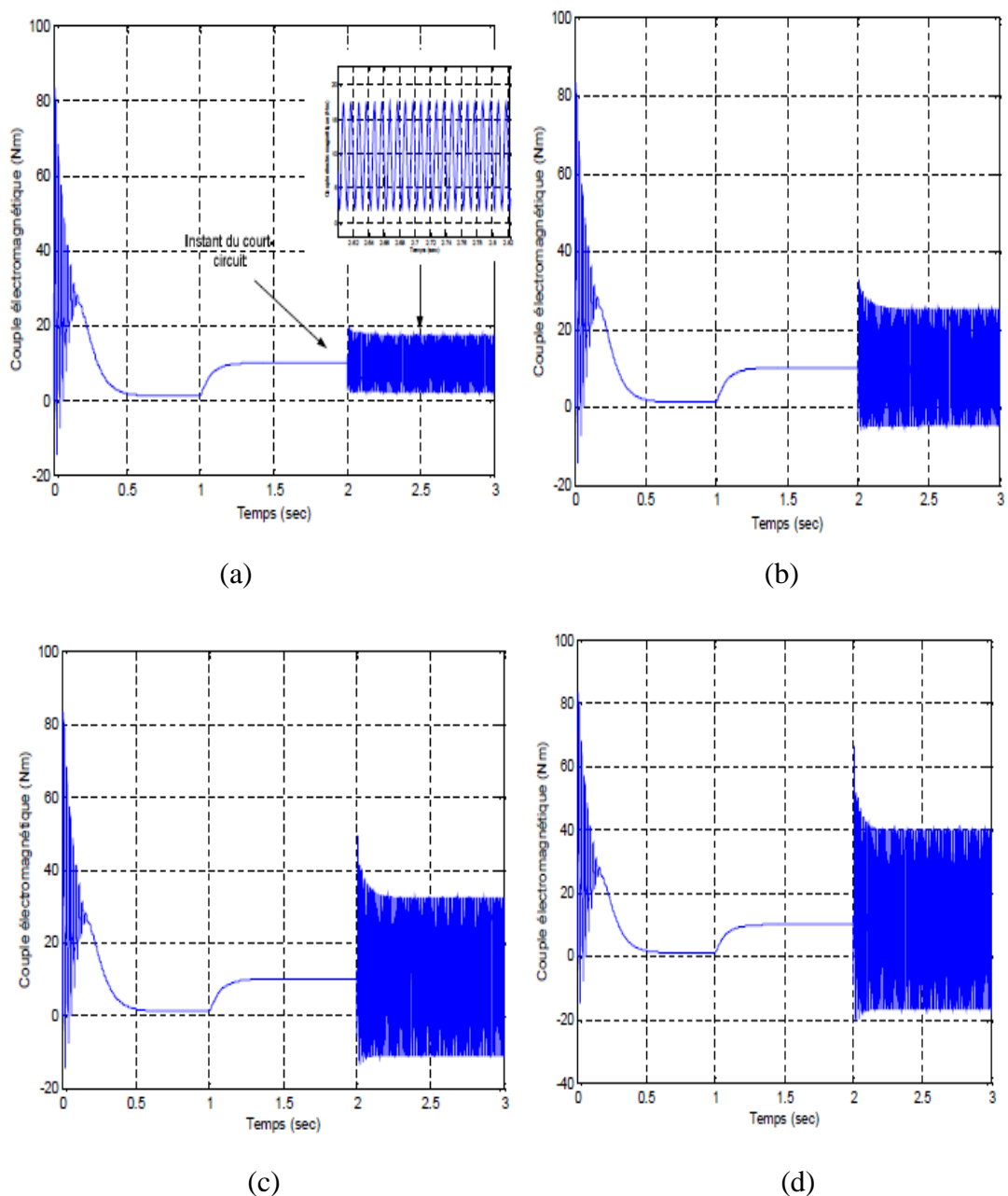


Fig.IV.8 : Cas de court-circuit de 48 spires (20%)  
 (a) Les courants statorique (b) spectre de courant de la phase  $a_s$

Les figures (IV.4 - IV.7) montrent l'augmentation du courant dans les phases abc du stator suite à des courts-circuits de 12, 24,36 et 48 spires créés dans la phase « as » de la machine fonctionnant en charge. Nous remarquons que pour un court-circuit de 48 spires (20%), le courant de la phase en défaut atteint presque 3 fois le courant nominal de la machine, avec une augmentation des courants dans les deux autres phases qui est due au couplage magnétique des trois phases statoriques, conformément aux observations trouvées par d'autres auteurs [14]. nous remarquons dans la figure (b) une nouvelle composante de fréquence visible au voisinage de la fondamentale.

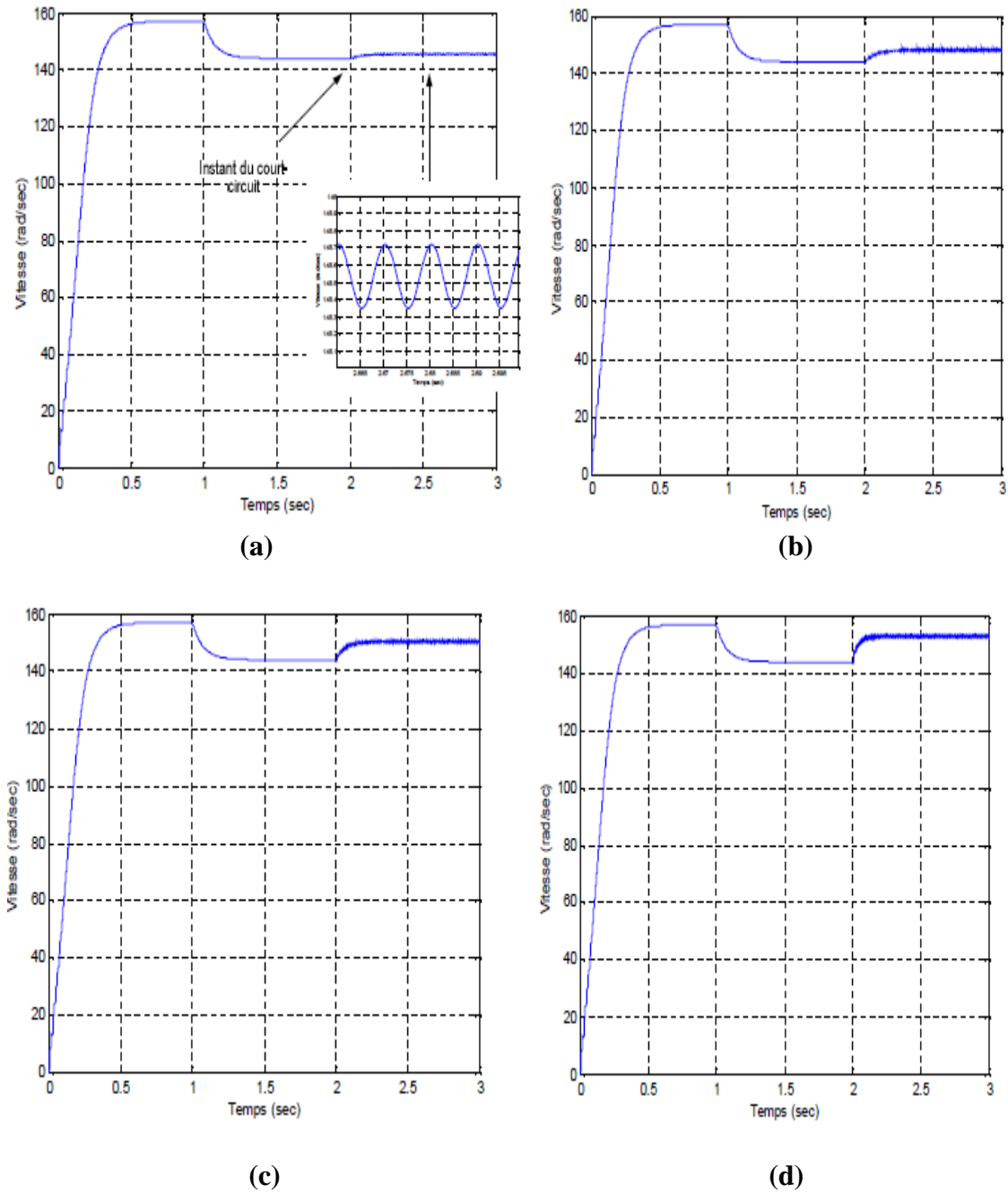
**d) Couple électromagnétique :**



**Fig.IV.9 :** Courbes de couple électromagnétique  
 (a) court-circuit de 12 spires (5%), (b) court-circuit de 24 spires (10%)  
 (c) court-circuit de 36 spires (15%) (d) court-circuit de 48 spires (20%)

Nous remarquons l'apparition des ondulations dans les courbes de couple électromagnétique, ces ondulations croissent avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit, sans que cela change la valeur moyenne du couple par rapport à sa valeur en régime sain. [14]

**e) Vitesse de rotation**



**Fig.IV.10 :** Courbes de la vitesse de rotation  
 (a) court-circuit de 12 spires (5%), (b) court-circuit de 24 spires (10%)  
 (c) court-circuit de 36 spires (15%), (d) court-circuit de 48 spires (20%)

Les simulations montrent que ce défaut à une influence significative sur la mécanique du rotor, car l'augmentation du nombre de spires en court-circuit engendre une augmentation de la vitesse de rotation de la machine .[14]

#### IV.6. Défaut de court-circuit entre phases statoriques :

Le court-circuit entre phases statoriques du côté de l'alimentation est un défaut à effet radical sur une chaîne d'entraînement, il induit des courants très forts dans les conducteurs d'alimentation qui cause leurs fusions et la disjonction par les protections. Dans cette partie, nous donnons les résultats de la simulation dans le cas où les trois phases statoriques seraient court-circuitées simultanément.

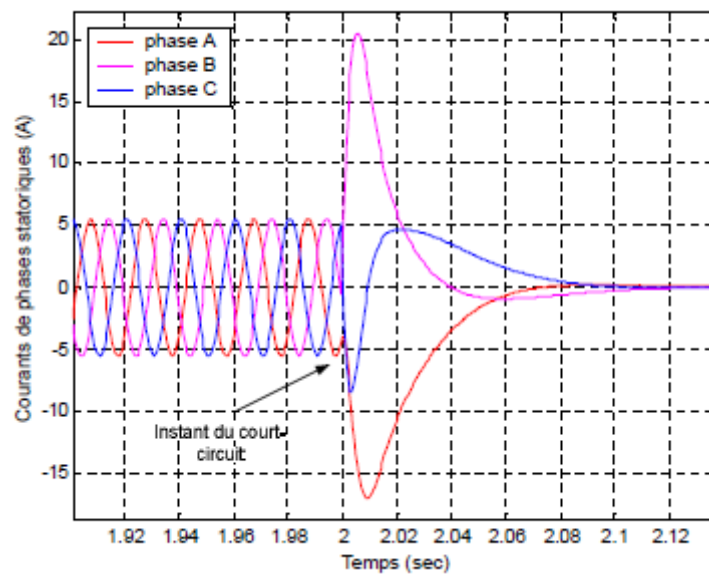


Fig.IV.11 : Courants de phases statoriques

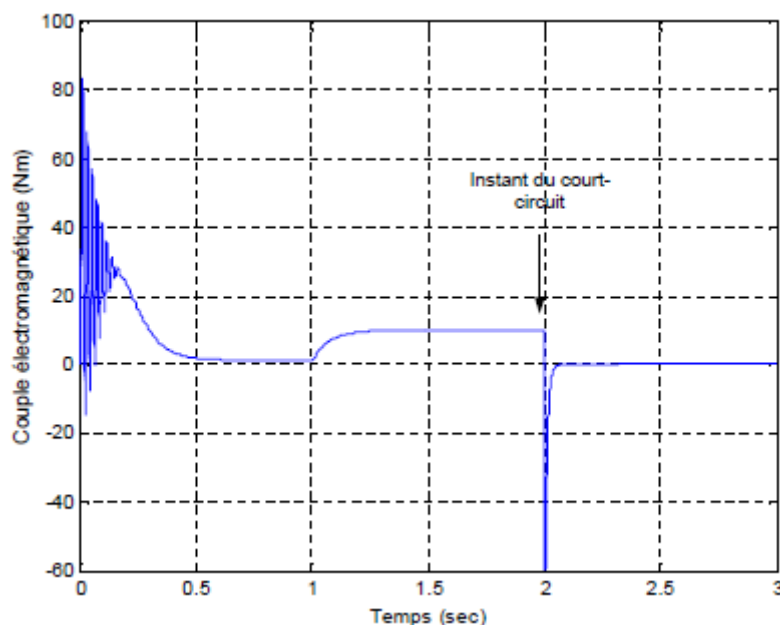
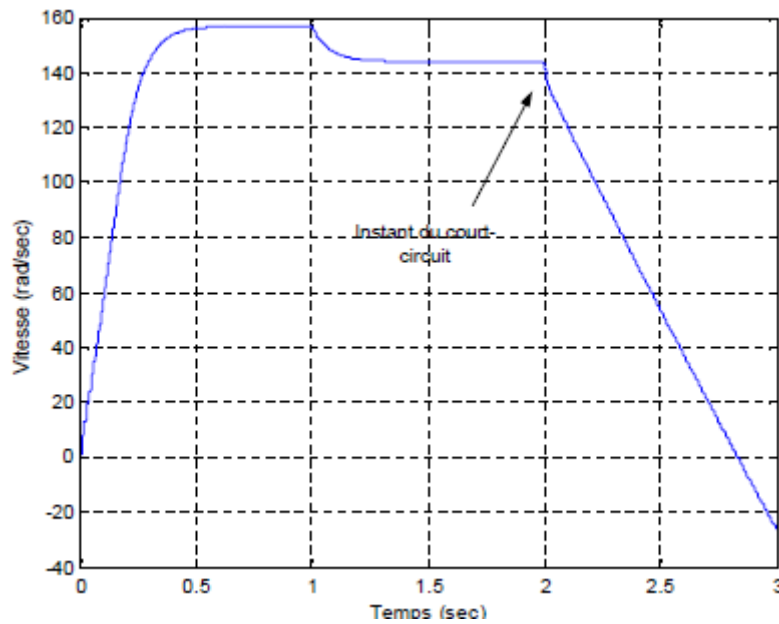


Fig.IV.12 : Couple électromagnétique



*Fig.IV.13 : Vitesse de rotation*

Comme on le constate, les courants statoriques s'annulent, ainsi, le couple électromagnétique s'annule, comme le montre la figure Fig.IV.12 ; la vitesse de rotation s'annule puis elle devient négative, donc le moteur change le sens de rotation puisque à ce moment, le rotor se trouve sollicité par le couple de charge.

## IV.7. défaut de cassure de barre :

### IV.7.1 L'effet de cassures de barres :

La cassure de barres est un des défauts les plus fréquents au rotor. La détérioration des barres entraîne une augmentation de la résistance rotorique, diminution de la résistance statorique et réduction dans la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmentation d'amplitude des oscillations.

L'effet de la cassure de barres croît rapidement avec le nombre de barres cassées. La grande amplitude des oscillations accélère la détérioration de la machine et des composants de la chaîne de traction.

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

$$f_d = f_s (1 \pm 2ks) \quad (\text{IV.1})$$

De plus les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défectueuses. [9]

IV.7.2. Simulation d'une machine saine :

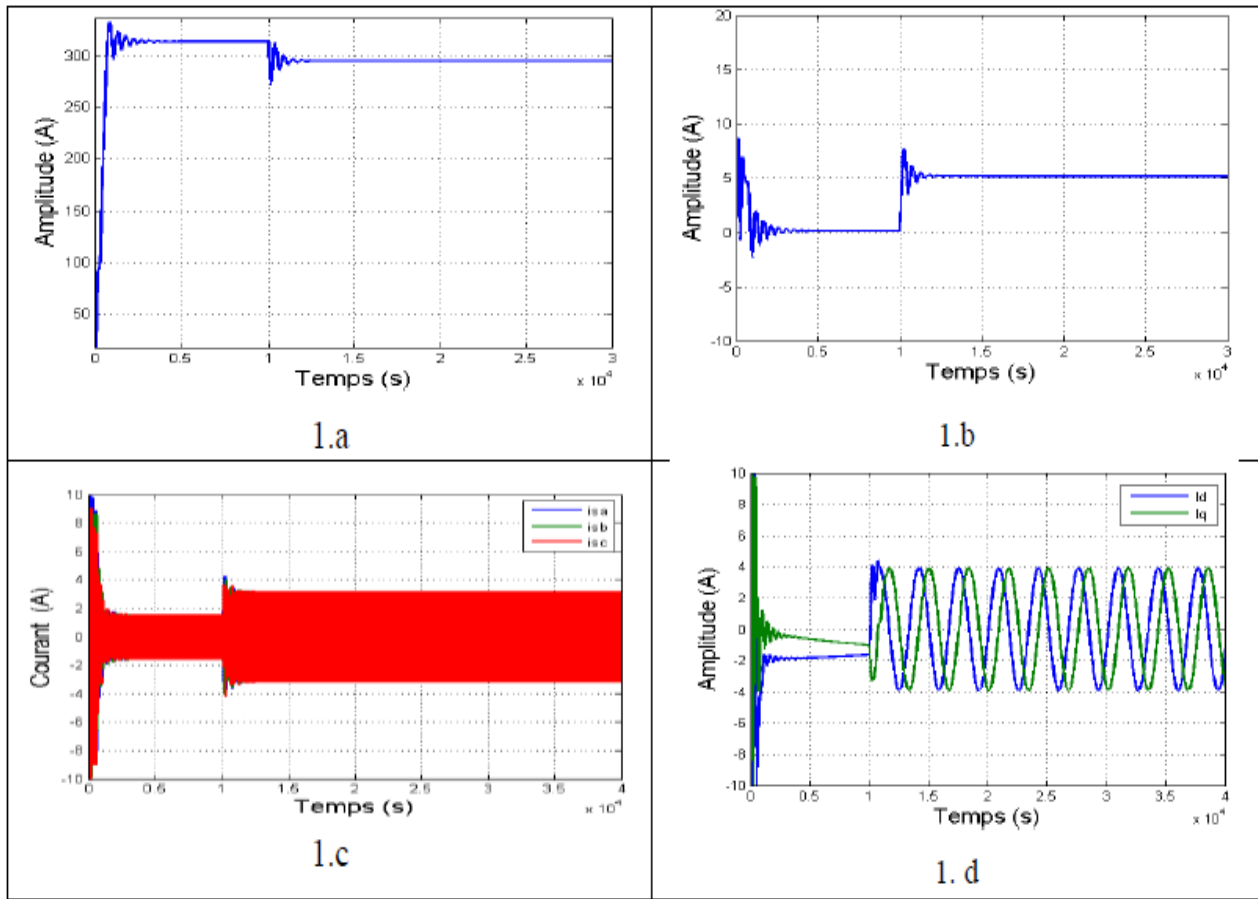


Figure IV.14 : Simulation de la MAS état sain

**IV.7.3. fonctionnement de la machine avec défaut :**

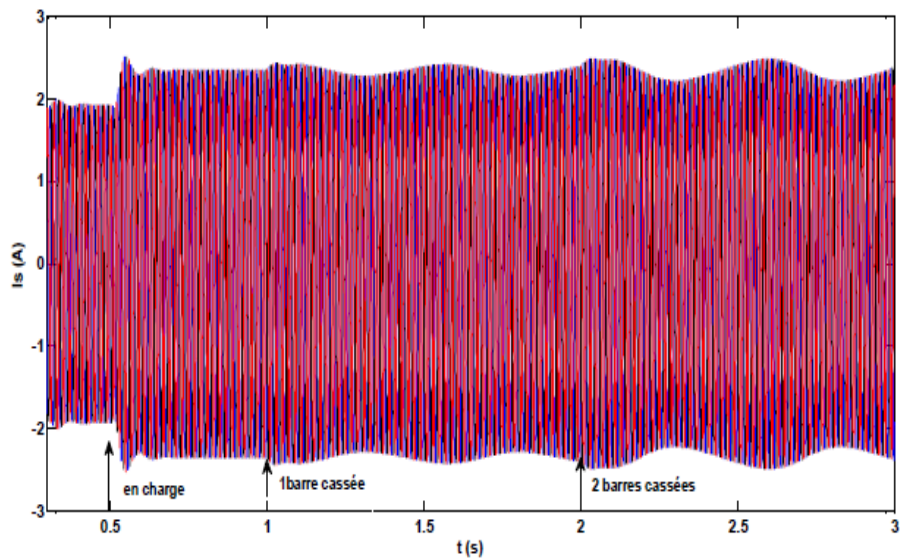
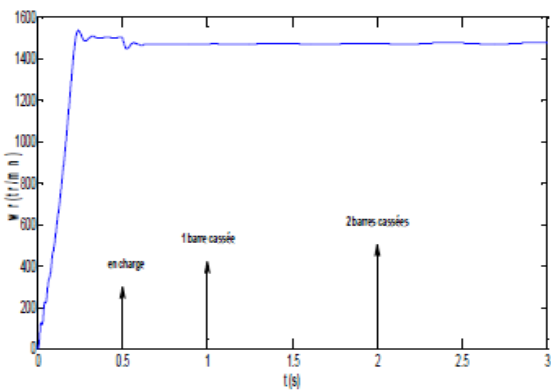
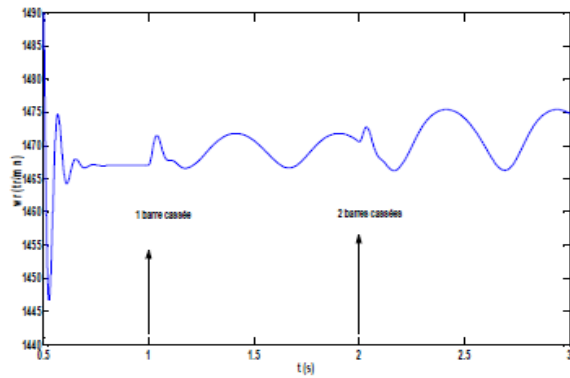


Figure IV.15 : L'allure des courants statorique cas de rupture de barres [15]

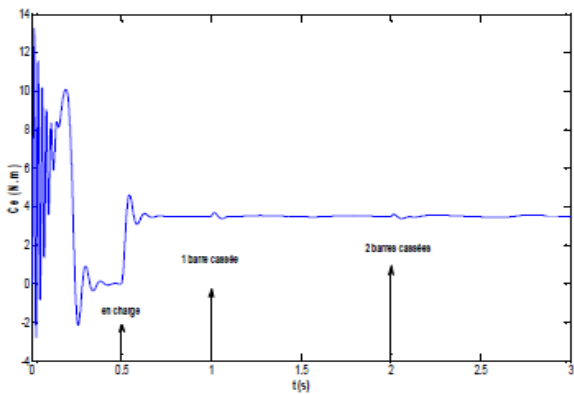


(a) : vitesse de rotation au défaut rotorique.

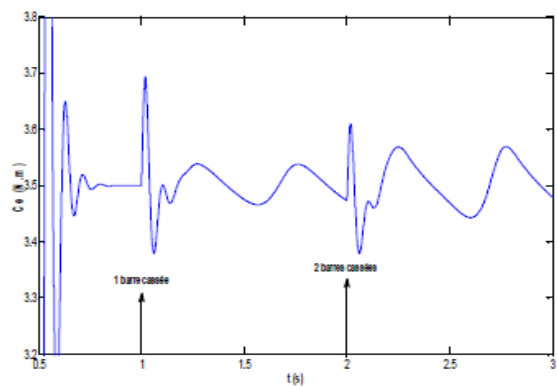


(b) : Zoom de la vitesse de rotation

Figure IV.16 : Courbe de la vitesse de rotation cas de rupture de barres [15]



(a) : Couple électromagnétique lors d'un défaut rotorique.



(b) : Zoom du couple électromagnétique

Figure IV.17 : Courbe de couple électromagnétique cas de rupture de barres [15]

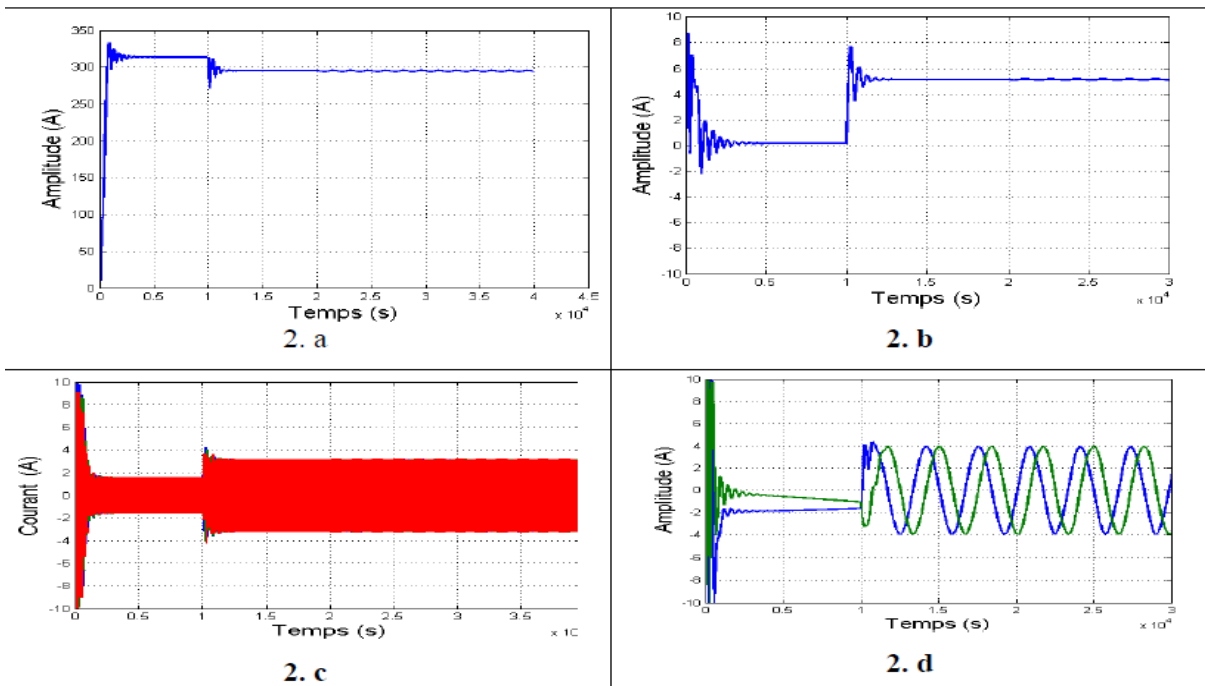


Figure IV.18 : Simulation de la MAS avec une rupture de barres. [15]

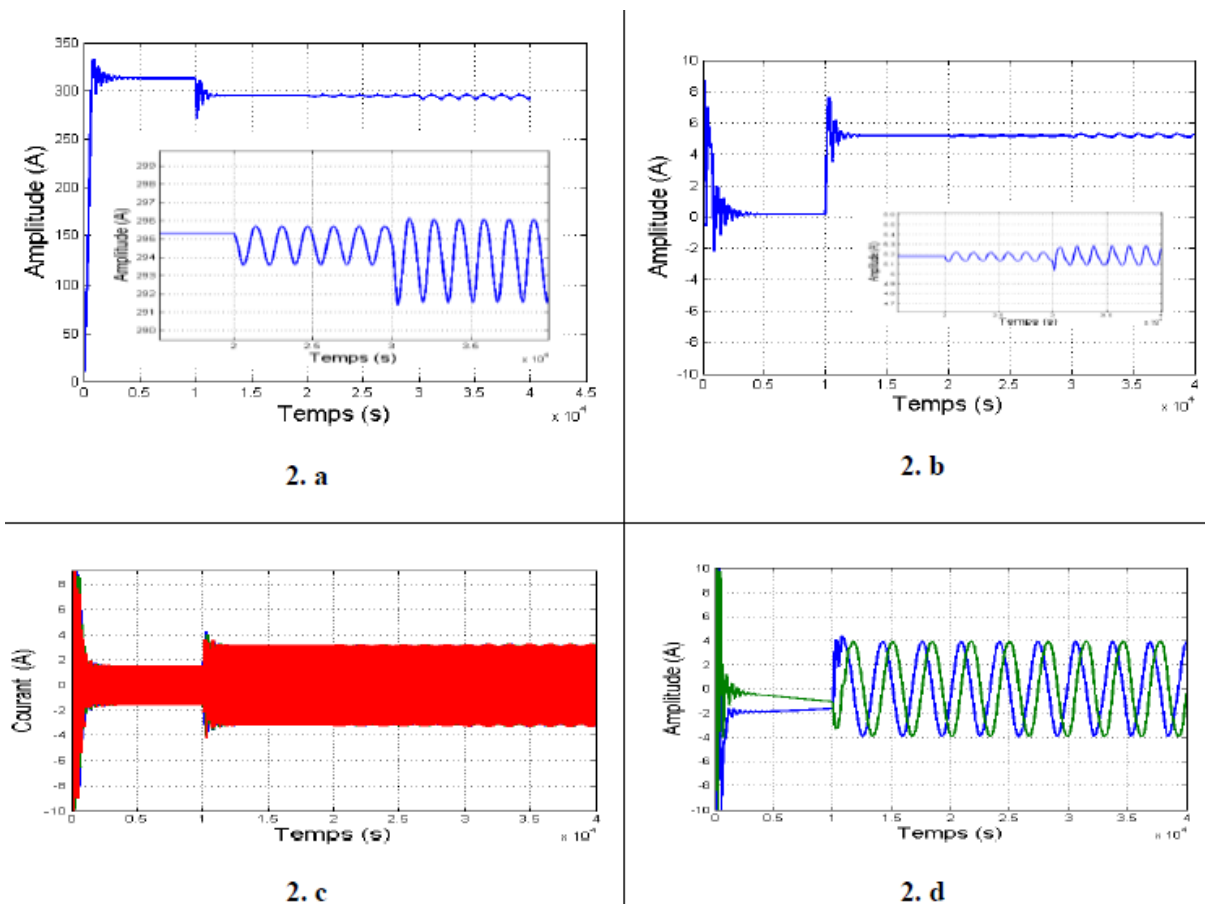


Figure IV.19 : Simulation de la MAS avec un et deux ruptures de barres [15]

Le défaut rotorique fait apparaître des ondulations au niveau des courants statoriques, l'amplitude de ces ondulations augmente avec l'augmentation de nombre de barres cassées. Du même pour le couple électromagnétique et la vitesse de rotation, les ondulations du couple augmentent les vibrations ce qui accélère la détérioration de la machine

Comme nous pouvons remarquer d'après la simulation ci-dessus, les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations, donc on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques .

#### IV.8. Diagnostic par analyse spectrale FFT :

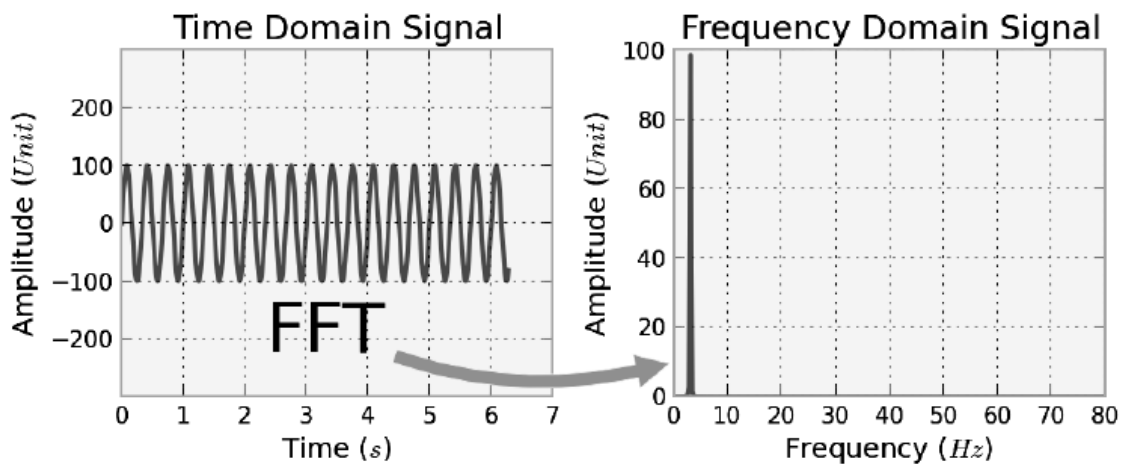


Figure IV.20 : Représentation temporelle vers fréquentielle.

##### IV.8.1 Cas de court-circuit entre spires : [15]

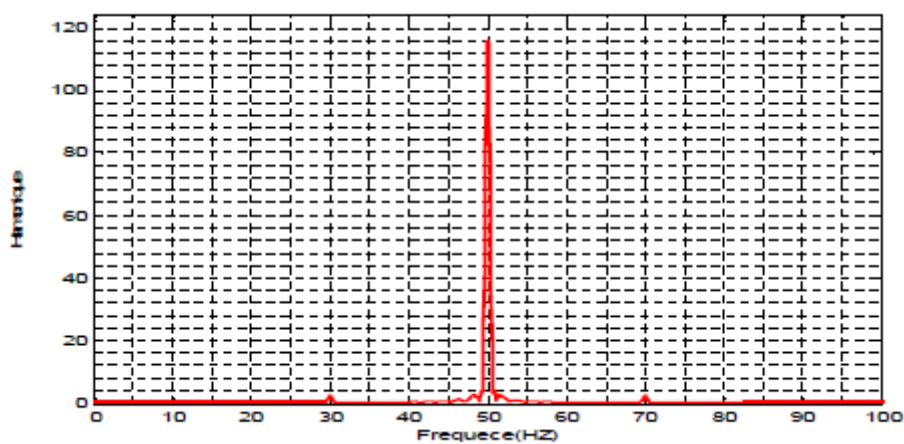


Figure IV.21 : courts-circuits de 2%.

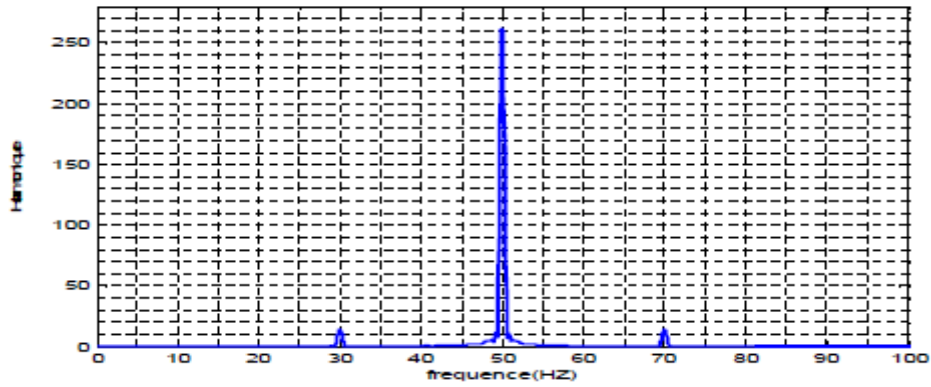


Figure IV.22 : courts-circuits de 5 %.

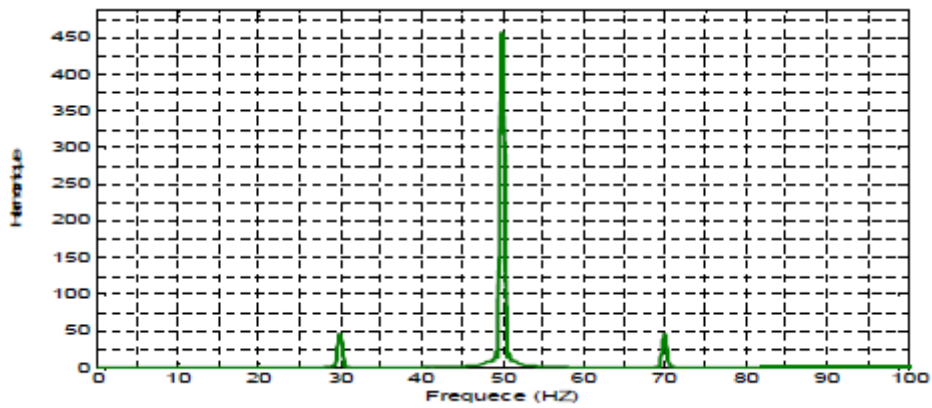


Figure IV.23 : courts-circuits de 9 %.

#### IV.8.2 Cas de rupture de barre (défaut rotorique) :

L'analyse spectrale (FFT) du courant statorique se réalise avec un fenêtrage de type (Hanning) la période d'échantillonnage est de  $10^{-4}$ (s) pour le cas d'une machine saine et avec défaut d'un et deux cassures des barres est en introduisant d'un couple de 5 N.m . [9]

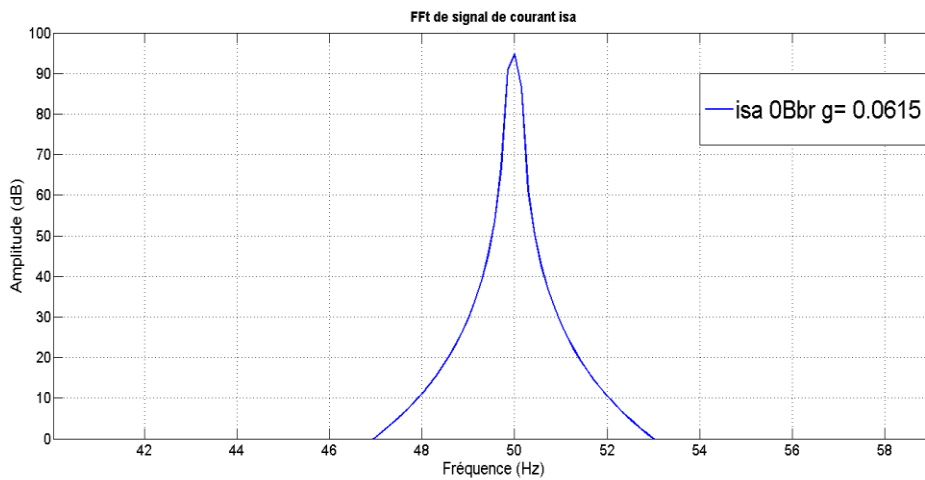


Figure IV.24 : Spectre du courant de la phase a, Cas de la machine saine.

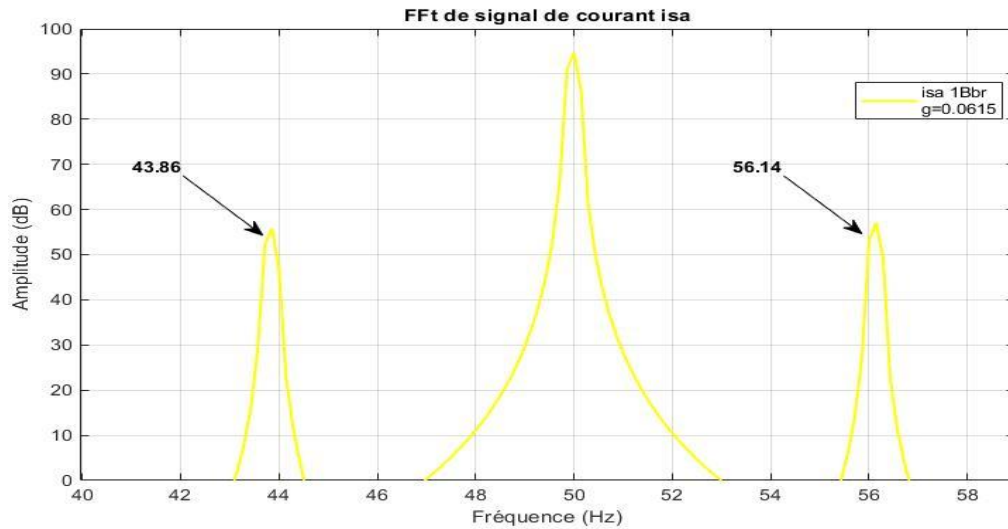


Figure IV.25 : Spectre du courant de la phase a, Cas d'une barre cassé.

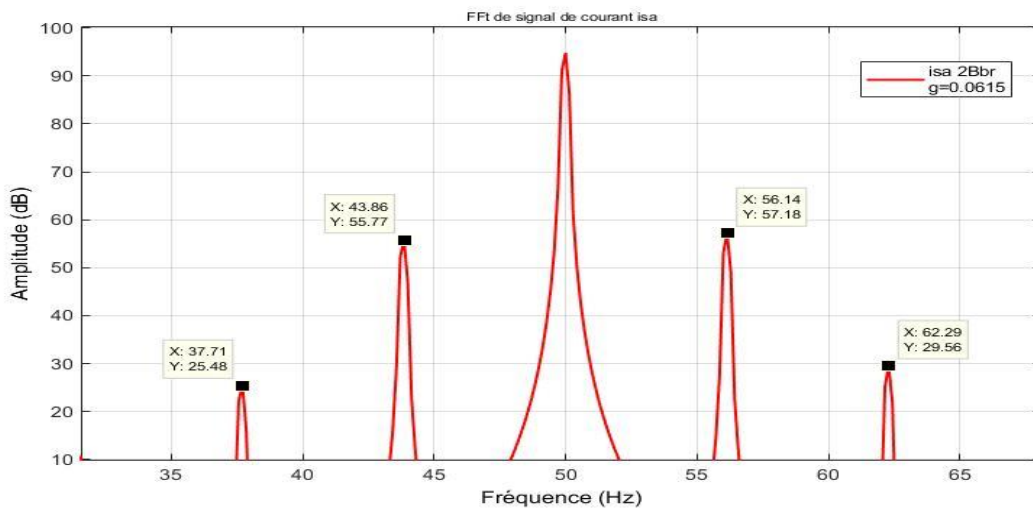


Figure IV.26 : Spectre du courant de la phase a, Cas de deux barres cassé

On remarque que FFT du courant statorique en fonctionnement sain de la machine, aucune raie latérale autour du fondamentale à 50 Hz (figure IV.20), qui représente le contenu spectral du courant statorique en régime permanent.

En fonctionnement avec défaut d'une et deux barres cassées (figures IV.21 et IV.22), il y a une apparition des raies latérales au voisinage du fondamental correspondant aux raies de défaut. On constate l'apparition de raies en symétrie autour de la fréquence fondamentale avec l'augmentation des barres cassées.

La cassure d'une barre rotorique crée dans l'entrefer de la machine, un champ tournant inverse de fréquence. L'interaction de ce champ tournant avec la vitesse rotorique crée une composante de fréquence  $(1-2s) f_s$  dans le spectre du courant statorique. La présence de cette harmonique dans le

courant statorique induit une oscillation au niveau du couple électromagnétique de la machine de fréquence  $2s fs$ . Cette oscillation du couple crée inévitablement une oscillation de la vitesse rotorique à la même fréquence qui induit une nouvelle composante de fréquence  $(1+2s) fs$  dans le spectre du courant statorique. Et par un processus identique, on obtient une série d'harmoniques de fréquences données par:

$$fd = fs (1 \pm 2ks)$$

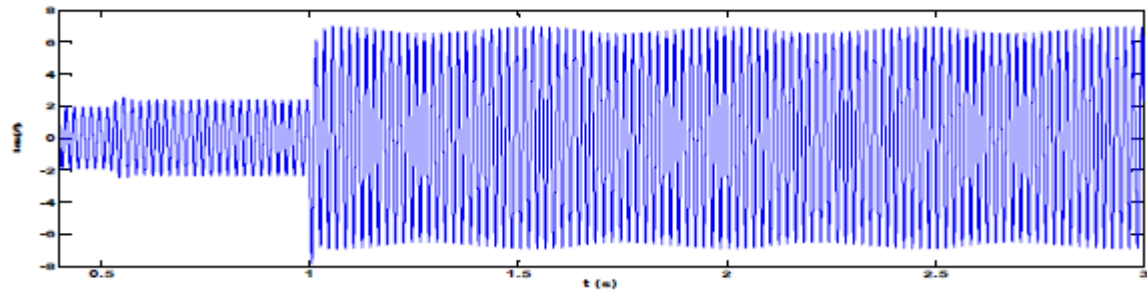
Avec :  $k = 1, 2, 3 \dots$  nombre de barre cassé,  $fs = 50\text{Hz}$  fréquence de réseau et  $g$ : le glissement.

Dans le tableau ci-dessous (tableau IV.1), on a résumé les fréquences des harmoniques induites dans les courants statoriques déduite et calculer suite à un défaut de barres (une et deux barres cassées). Ces fréquences sont calculées de la formule précédente et déduites avec l'allure de FFT directement.[9]

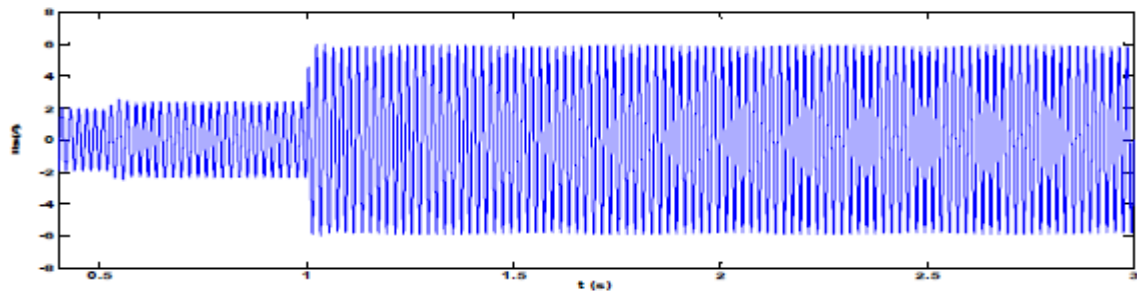
<b>Glissement t (g)</b>	<b>f défaut (Hz)</b>	<b>50 (1 + 2s)</b>	<b>50 (1 - 2s)</b>	<b>50 (1 + 4s)</b>	<b>50 (1 - 4s)</b>
<b>g=0.0615</b>	<b>f calculée (Hz)</b> <b>1Bbr</b>	<b>56.15</b>	<b>43.85</b>	<b>--</b>	<b>--</b>
	<b>f observée (Hz)</b> <b>1Bbr</b>	<b>56.17</b>	<b>43.86</b>	<b>--</b>	<b>--</b>
<b>g=0.0637</b>	<b>f calculée (Hz)</b> <b>2Bbr</b>	<b>56.37</b>	<b>43.63</b>	<b>62.74</b>	<b>37.26</b>
	<b>f observée (Hz)</b> <b>2Bbr</b>	<b>56.14</b>	<b>43.86</b>	<b>62.29</b>	<b>37.71</b>

*Tableau IV.1 : Amplitudes des défauts dans le domaine fréquentielle [9]*

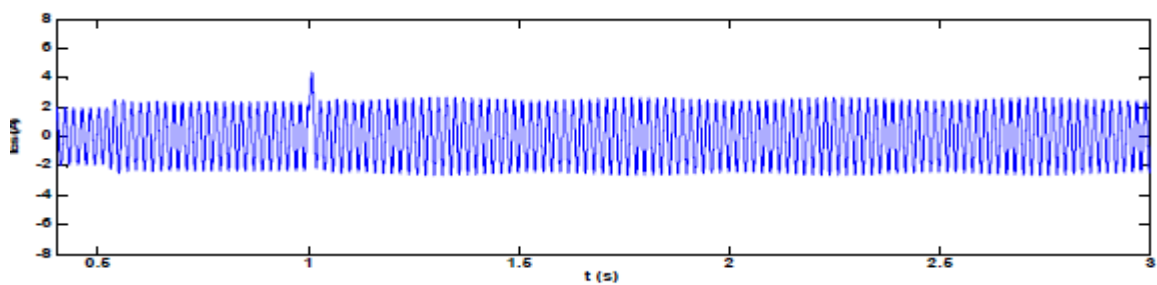
### IV.8.3. Cas d'un défaut mixte: [15]



(c): Courant statorique de la phase 'a'

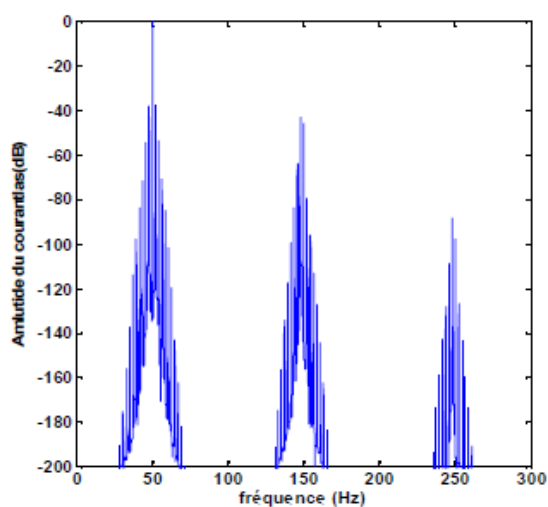


(d): Courant statorique de la phase 'b'

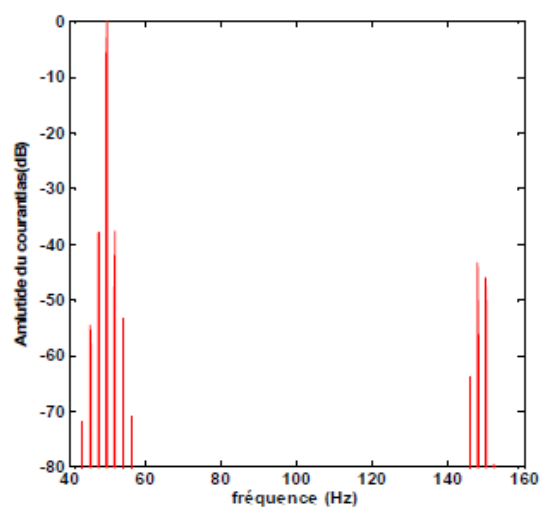


(e): Courant statorique de la phase 'c'

Figure IV.27 : Courants statoriques cas de défaut mixte (court-circuit entre spires et une barre cassée)



(a) : spectre du courant au défaut mixte



(b) : Zoom de spectre du courant

Figure IV.28 : Analyse spectrale du courants statoriques cas de défaut mixte (Court-circuit entre spires et une barre cassée)

## IV.9. Diagnostic utilisant l'intelligence artificielle :

### IV.9.1. (La logique floue à base de l'analyse spectrale du courant statorique) :[17]

Le diagnostic de défaut par la logique floue est basé sur l'analyse spectrale du courant statorique. Les fréquences qui apparaissent dans le spectre montrent la présence d'un défaut de court-circuit.

Le défaut de court-circuit se manifeste par la création dans le spectre du courant en plus du fondamental d'autres harmoniques caractéristiques du défaut aux fréquences données par l'expression suivante :

$$f_{cc} = \left[ \frac{n}{p} (1 - s) \pm k \right] f_s \quad (III.13)$$

Avec :  $n=1, 2, 3, \dots$  et  $k=1, 3, 5, \dots$ . La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre du courant statorique est basée sur le fait que toutes les excentricités interfèrent sur le champ dans l'entrefer de la machine asynchrone. [11]

Les fréquences de court-circuit  $f_{cc1}$  et  $f_{cc2}$  ont été définies comme variables d'entrée dans le système.

Les valeurs linguistiques définies pour l'ensemble d'entrée sont définies en tant qu'étant : très Bas (TB), Bas (B), Moyenne (M), Haut (H). Basé sur les données mesurées, un ensemble de règles brouillées ont été définies. En termes de terminologie brouillée les variables CC1 et CC2 sont l'antécédent et l'état d'enroulement de phase (cc) est le conséquent. Ce dernier est associé à 4 fonctions d'adhésion qui tracent le rendement à l'ensemble brouillé suivant (valeurs linguistiques) : (S) Sain et Défaut mineur (Dm), Défaut majeur (DM), Défaut grave (DG).

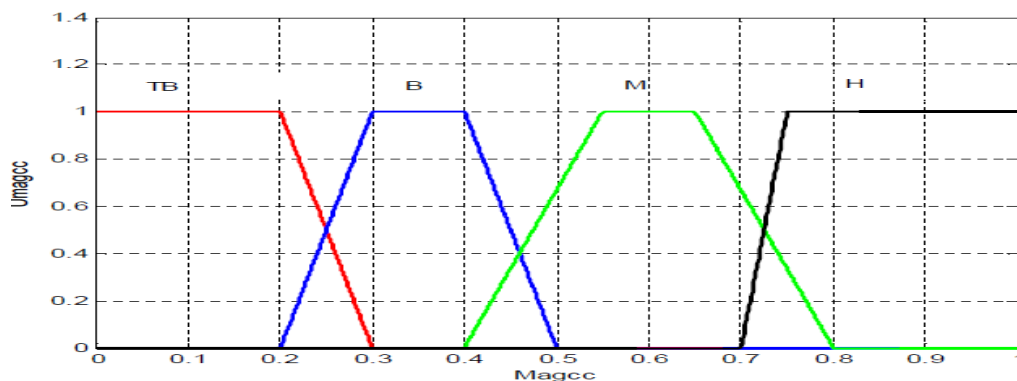


Figure IV.29 : la fonction d'appartenance des entrées

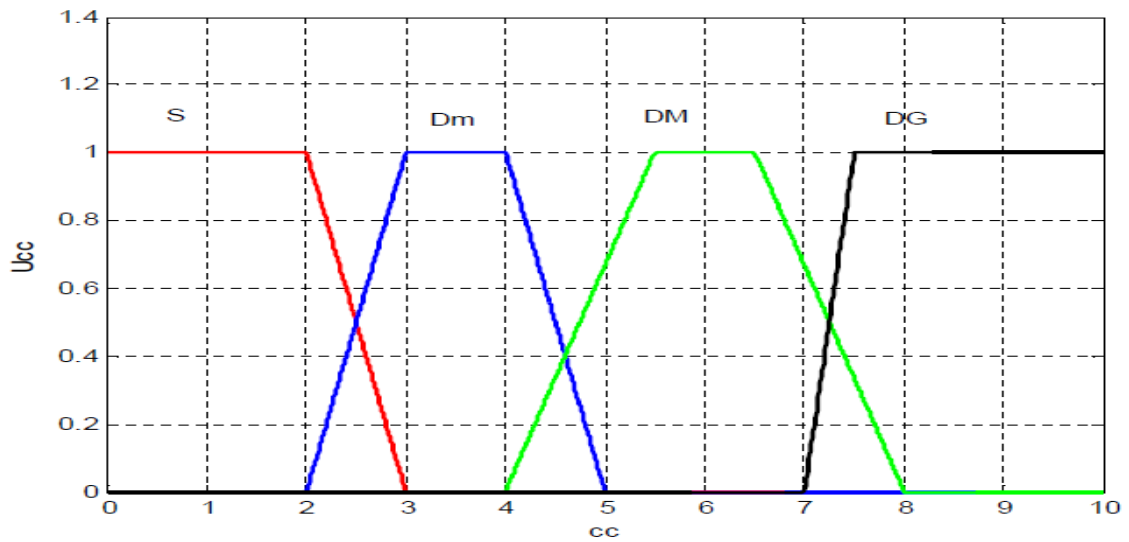


Figure IV.30 : la fonction d'appartenance des sorties

**Les règles d'inférences seront comme suit :**

- Rule 1 : si CC1 TB et CC2 TB alors cc est S
- Rule 2 : si CC1 B et CC2 TB alors cc est Dm
- Rule 3 : si CC1 B et CC2 B alors cc est Dm
- Rule 4 : si CC1 M et CC2 B alors cc est DM
- Rule 5 : si CC1 M et CC2 H alors cc est DM
- Rule 6 : si CC1 H et CC2 M alors cc est DG
- Rule 7 : si CC1 H et CC2 H alors cc est DG

Sortie flou	Etat de machine	Court circuit (%)
$0 \leq CC \leq 1$	Sain	0%
$1 \leq CC \leq 3$	Défaut mineur	2%
$3 \leq CC \leq 6$	Défaut major	5%
$6 \leq CC \leq 12$	Défaut grave	9%

Tableau IV.2 La Fuzzification des sorties

	Entree		Sortie
	CC1	CC2	CC
Sain	0.199	0.118	0.75
2%	0.279	0.314	2.49
5%	0.597	0.575	5.5
9%	0.861	0.827	8.06

Tableau IV.3 Exemple des résultats de diagnostic par logique floue

Nous remarquons que les défauts des courts-circuits sont détectés et caractérisés par rapports au spectre fréquentielle du courant statorique. Cette méthode intelligente semble être efficace pour la détection de tous les défauts dans les moteurs asynchrones même les défauts mixte.

#### **IV.10. Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la présentation des exemples de diagnostic de défauts par différentes méthodes, nous avons pu conclure que la méthode FFT donne de façon plus claire et plus précise le type de défaut, même en cas de défauts mixte à savoir le court-circuit associés aux rupture des barres.

La méthode FFT peut aussi fournir une base de données large et riche, qui peut nous servir à construire un système de diagnostic basé sur les techniques de l'intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones...), ces méthodes intelligentes sont les méthodes modernes qui sont actuellement utilisées pour une surveillance et un diagnostic efficace et fiable des systèmes électriques.

## Conclusion générale et perspectives

La machine asynchrone est le cœur de l'industrie et le plus utilisable dans les différents domaines à cause de sa robustesse est sa maintenabilité, et son faible cout de fabrication, ces machines peuvent être affectées par des défaillances potentielles qui se répercutent sur la continuité et la qualité de service.

Le problématique est que les défauts dans la machine asynchrone n'appartient pas visuellement ou à l'aide des appareils spécifiques, et ne peut pas être détecté par une analyse simple dans le domaine temporel (simulation), surtout dans le cas d'un petit défaut et en état que la machine est à vide, ce qui rend le la surveillance et le diagnostic des machines asynchrone plus difficile.

D'autre part la difficulté de connaitre le positionnement, la distribution, et la sévérité de chaque type de défauts est un problème major qui rencontre les experts et les ingénieurs de maintenance durant leur mission de surveillance et de diagnostic des machines asynchrones, ces problèmes conduisent à limiter les méthodes et les moyens utilisés. Ajoutant à tous ces problèmes le facteur de temps et de cout qui jouent un rôle déterminant dans l'opération de maintenance.

Ce travail a porté sur les techniques de surveillance et de diagnostic des défauts de la machine asynchrone. L'analyse FFT des courants statoriques a été utiliséepour détecter les défauts entre spires et les défauts de barres, les résultats obtenus par l'analyse FFT ont été introduits dans un système fuzzifié (système conçu par la technique de logique floue) pour détecter plus précisément les défauts latents dans les machines asynchrones.

À la lumière des résultats que nous avons obtenus, nous pouvons conclure ce qui suit :

- Les défauts statoriques (entre spires et phases) ainsi que les défauts mécaniques peuvent être détectés par l'analyse spectrale FFT des signaux de courants statoriques.
- Les défauts mixtes, et la sévérité de chacun des défauts peuvent être constatés à partir des résultats de l'entraînement d'un système intelligent tel que la logique floue.

Les résultats obtenus dans ce travail nous permettent d'ouvrir de nombreuses perspectives, à savoir :

- Une étude plus approfondies des interactions des défauts dans les machines asynchrones afin de pouvoir trouver les méthodes de diagnostic les plus fiables et les moins onéreux.

## Références bibliographiques

- [1] Mohamed El Kamel Oumaamar, Surveillance Et Diagnostic Des Défauts Rotorique Et Mécaniques De La Machine Asynchrone Avec Alimentation Equilibrée Ou Déséquilibrée, Thèse doctorat, faculté des sciences et technologies Nancy Université de Lorraine, 2012.
- [2] BOUDJTAT WALID ,Etude Et Simulation D'une Machine Asynchrone Alimente Par Un Onduleur De Tension A Commande Mli ; Mémoire De Master ; Université d'Annaba, 2017
- [3] <https://www.techniques-ingenieur.fr/> ;extrait (Réf. Internet 42249)
- [4] COURS TSI : CI-3 ; STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE
- [5] Gherbi Allel, Abbad Abdellah, Commande d'un moteur asynchrone par la logique floue adaptative, mémoire master électromécanique, université de bouira, 2018.
- [6] Kerfali Samir, Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone, Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016.
- [7] Abbas Kamel, Ikken Massinissa, Etude et réalisation de la machine asynchrone à double étoile, mémoire de fin d'études master, Université A. MIRA – BEJAIA, 2018.
- [8] MEDOUED Ammar ; Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : application aux moteur asynchrone; Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de Docteur en Sciences Université du 20 Août 1955-Skikda , 2012.
- [9] Gazzam Abdelhak , Safsafa Chouaib ; Diagnostic des défauts rotorique des machines asynchrones à cage par différentes techniques de traitement de signal ; Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de MASTER en Electromécanique , UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT, 2018.
- [10] Babak VASEGHI; Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre spires; Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de DOCTORAT DE L'I.N.P.L, L'institut nationale polytechnique de Lorraine , 2009 .
- [11] Souad LARIBI ; Contribution à la Commande et Diagnostic des Défauts Statoriques et Rotoriques de la Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil ; Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de Docteur en Sciences , Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf , 2016.
- [12] BESSAM Besma; Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des techniques intelligentes; Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de Docteur en Sciences, Université mohamed khider biskra , 2016 .
- [13] Mr. Khodja Djalal Eddine ;Elaboration d'un Système Intelligent de Surveillance et de Diagnostic Automatique en Temps Réel des Défaillances des Moteurs à Induction; Thèse de Doctorat En Génie Electrique,Université M'hamed Bougara de Boumerdès , 2007.
- [14] Mr. MESSAOUDI Yacine, Mr. OUKACINE Belkacem, Modélisation fine multi-spires de la machine asynchrone en vue de sa simulation en régime sain et de défauts de courts-circuits entre spires, Mémoire de fin d'étude En vue de l'obtention de diplôme d'ingénieur d'Etat en électrotechnique, Option : Machines électriques, 2009.
- [15] Hakima Cherif, Détection des défauts statoriques et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes ; mémoire de magister, Université de Biskra, 2010.
- [16] Boughagha Fouzi, Diagnostic et détection des défauts mécaniques affectant les systèmes électromécaniques , mémoire master , Université Badji Mokhtar Annaba , 2019.

- [17] BOURAIOU Ahmed, *Diagnostic de défaut par logique floue*, mémoire de magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2010.

## Annexe A : Paramètres de la machine

Les paramètres mécaniques et électriques pour la simulation de la machine asynchrone à cage, sont illustrés dans le Tableau A.1 :

Puissance nominale	<b>1.1 Kw</b>
Tension nominal	<b>400/230 V</b>
Courant nominal	<b>2.6/4.3 A</b>
Fréquence d'alimentation	<b>50 Hz</b>
La vitesse rotorique	<b>1425 tr/min</b>
Le nombre de pôles	<b>4 pôles</b>
Le nombre de barres rotoriques	<b>28</b>
Le nombre d'encoches statoriques	<b>48</b>
Nombre de spires par phase	<b>464 spires</b>
Résistance rotorique	<b>3.83Ω</b>
Résistance statorique	<b>9.81Ω</b>
L'inductance mutuelle	<b>436 mH</b>
L'inductance de fuite	<b>76.2 mH</b>
Moment d'inertie	<b>0.002</b>
Coefficient de frottement	<b>0.00119</b>

*Tableau A.1: Paramètres mécaniques et électriques du MAS étudié.*

**Annexe B :**

<b>Puissance</b>	03 kW
<b>Fréquence</b>	50 Hz
<b>Tension nominale</b>	400/230 V
<b>Courant nominal</b>	6.3/11 A
<b>Vitesse nominale</b>	1415 tr/mn
<b>Facteur de puissance</b>	0.83
<b>Nombre de paires de pôles</b>	02
<b>Nombre d'encoches statoriques</b>	36
<b>Nombre d'encoches rotoriques</b>	24
<b>Nombre de spires par phase statorique</b>	240
<b>Nombre de spires par phase rotorique</b>	64
<b>Inductance propre d'une phase statorique</b>	$L_s = 0.153$ H
<b>Inductance propre d'une phase rotorique</b>	$L_r = 0.038$ H
<b>Inductance mutuelle entre deux phases statoriques</b>	$M_s = 0.083$ H
<b>Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques</b>	$M_r = 0.019$ H
<b>Inductance mutuelle maximale entre le stator et le rotor</b>	$M_{sr} = 0.073$ H
<b>Inductance propre principale d'une phase statorique</b>	$L_{ps} = 0.146$ H
<b>Inductance propre principale d'une phase rotorique</b>	$L_{pr} = 0.036$ H
<b>Inductance de fuites d'une phase primaire</b>	$L_{fs} = 0.007$ H
<b>Inductance de fuites d'une phase rotorique</b>	$L_{fr} = 0.0017$ H
<b>Résistance d'une phase statorique</b>	$R_s = 1.7$ $\Omega$
<b>Résistance d'une phase rotorique</b>	$R_r = 1.6$ $\Omega$
<b>Moment d'inertie</b>	$J_t = 0.053$ Kg.m <sup>2</sup>
<b>Frottement visqueux</b>	$f_v = 0.00465$ Nm/rad/s

