

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

Année : 2015/2016

Faculté : Sciences de L'ingéniorat

Département : Électromécanique

Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de :

**Doctorat**

Intitulée

**Contribution à l'amélioration de la sûreté  
d'exploitation des moteurs à induction.**

Spécialité : Génie Industriel

Option : Génie Industriel

Par : Bennedjai Soumaya

Devant le Jury

Président : Hadjadj Aouel Elies

Pr Univ Annaba

Directeur de thèse : Bouras Slimane

MCA Univ Annaba

Examineurs :

Belhamra Ali

MCA Univ Annaba

Moussaoui Abdelkrim

Pr Univ Guelma

Rahmani Lazhar

Pr Univ Setif

Hedjazi Djemai

MCA Univ Batna

*Dédicace*

*Je dédie ce travail*

*A mes parents pour leur infini dévouement*

*Mes sœurs pour leur soutien moral.*

*A mon mari*

*A toute ma famille et ma belle famille*

*A mes amis pour leur fidélité*

## REMERCIEMENTS

*Je tiens à remercier Monsieur HADJADJ Aouel Elies, Professeur du département d'électromécanique de l'Université de Annaba, pour l'intérêt qu'il a accordé à mon travail en acceptant d'être Président du Jury.*

*Je tiens également à remercier Monsieur BOURAS Slimane, maître de conférences du département d'électromécanique, qui m'a accordé sa confiance pour mener à bien ce travail de recherche et qui m'a guidé à travers ses précieux conseils.*

*J'adresse mes expressions de reconnaissance et mes remerciements à Messieurs BELHAMRA Ali. Maitre de Conférences de l'université d'Annaba, MOUSSAOUI Abdelkrim Professeur de l'Université de Guelma, RAHMANI Lazhar Professeur de l'Université de Setif, et HEDJAZI Djemai Maitre de conférence de l'Université de Batna pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail de recherche et d'être membres Examineurs du jury.*

*Je voudrai adresser ma reconnaissance à Pr Rebbani Nacer , Pr Hayahoum Ammar , pour leurs qualités humaines et leurs encouragements illimités.*

*Enfin, j'adresse mes remerciements mes très chers parents « Papa et Maman », que Dieu les gardes et les protèges., à tous mes enseignants du Département d'Electromécanique et à toutes les Personnes qui, de manière directe ou indirecte, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.*

## **RÉSUMÉ.**

L'amélioration de la sûreté d'exploitation du moteur asynchrone dans un entraînement électromécanique ne peut aboutir sans une analyse détaillée de son mode de fonctionnement complétée par une analyse imaginant l'ensemble des dégradations, seules ou combinées entre elles, causant son dysfonctionnement. Seulement, pour ce qui est du deuxième volet de la sûreté d'exploitation du moteur à induction, la majorité des travaux de recherche s'est intéressée aux techniques de surveillance du comportement du moteur à induction sur un seul défaut spécifique. La détection et le diagnostic de défauts mécaniques combinés ont été rarement étudiés, bien que cette situation soit assez probable dans les entraînements électriques industriels, en particulier, pour ceux de grande puissance. A cette fin, notre travail de recherche exprime une contribution à la validation pratique d'un ensemble d'approches pour la détection des dégradations du roulement et du déséquilibre massique « balourd » affectant la machine séparément et combinées. Cette panoplie de techniques utilise les analyses spectrales du courant de la phase, celles du courant circulant dans le conducteur neutre, la transformée de Fourier à court terme ou « STFC » (Spectrogramme) et le vecteur somme des carrés des courants des trois phases alimentant le stator. Cette dernière méthode convertit le problème de l'analyse du courant en une analyse de reconnaissance de motifs en 3D. Ces méthodes simples et efficaces basées uniquement sur la mesure des courants n'ont pas besoin d'avoir des connaissances d'expert. Les résultats expérimentaux obtenus ont révélé de précieuses informations sur les dysfonctionnements mécaniques multiples et montrent la performance globale de ces méthodologies complémentaires pour la reconnaissance et l'identification précise des défauts mécaniques isolés et combinés affectant le moteur asynchrone à cage.

**Mots clés :** Machines asynchrones ; diagnostic ; Défauts mécaniques ; Analyse spectrale du courant ; méthode du neutre ; reconnaissance des formes 3D ; défauts multiples ; dégradation des roulements ; balourd.

ملخص.

لا يمكن أن نصل إلى تحسين ضمان تشغيل المحركات الأمتزامنة في المنشآت الألكتروميكانية إلا بالتحليل المفصل لحالة عمله العادية مرفقة بتحليل تخيلي لمجموعة الإعطاب المنفردة أو المجتمعمة و التي تتسبب في توقفه عن العمل. فقط فيما يتعلق بالجزء الثاني في ضمان تشغيل المحركات الأمتزامنة معظم البحوث قد ركزت على تقنيات مراقبة سلوك المحرك في وجود عطب واحد محدد , ونادرا ما تم التحقيق للكشف عن العيوب الميكانيكية مجتمعة، على الرغم من أنها الأكثر احتمالا في الآلات الكهربائية الصناعية خاصة المحركات عالية الطاقة. تحقيقا لهذه الغاية يعرب عمل بحثنا عن مساهمة عملية في تطبيق مجموعة من الأساليب للكشف عن الأضرار في الدرفلة وعدم الاتزان الكتلي التي تتعرض لها المحركات سواء كانت مجتمعة أو كل عطب على حدا . هذه المجموعة من التقنيات تستخدم تحليل تيار الطور ، التيار المار في الموصل الحيادي , تحويل فورييه قصير المدى ( الطيفية) و مربع محصلة أشعة تيارات الأطوار الثلاث التي تزود بها الجزء الثابت. هذا الأسلوب الأخير يحول المشكلة الحالية من تحليل التيار الكهربائي إلى تحليل التعرف على نمط . هذه الطرق البسيطة والفعالة تستند فقط على قياس تيارات الأطوار و لا تحتاج إلى خبراء. كشفت النتائج التجريبية أنه يمكننا الحصول على معلومات قيمة تخص الأعطال الميكانيكية المجتمعمة في آن واحد. كما أظهرت نجاعة الطرق التي تستخدم تحليل الشكل لتشخيص حدوث عطب ميكانيكي واحد أو عدة أعطاب متزامنة التي تصيب المحركات الحثية ذات القفص.

الكلمات الرئيسية

آلات غير متزامن. التشخيص. عيوب ميكانيكية. التحليل الطيفي للتيار. طريقة الحيادي. التعرف على الأشكال  
ثلاثة أبعاد, العيوب المركبة, تدهور الدرفلة, اختلال التوازن.

## **ABSTRACT.**

Improving the safe operation of the asynchronous motor in an electromechanical drive can not succeed without a detailed analysis of its operating mode complemented by an analysis imagining all the damage, alone or combined with each other causing its dysfunction. Only in terms of the second part of the safe operation of the induction motor, the majority of research has been interested on surveillance techniques for induction motor's behavior on a single specific defect. Detection and diagnosis of combined mechanical defects have been rarely studied, although this situation is quite probable in industrial electric drives, especially for those of high power. To accomplish this, our research work expresses a practical contribution to the validation of a range of approaches for the detection of bearing damage and mass unbalance "unbalance" affecting the machine separately and combined. This panoply of techniques uses spectral analyzes of the current phase, those of the current circulating in the neutral conductor, the Short-Time Fourier Transform or "STFC" (Spectrogram) and the vector sum of the squares of the three phase currents feeding the stator. This last method converts the current's analysis' problem to pattern recognition of 3D. These simple and effective methods based only on the current measurements do not need to have expert knowledge. The experimental results have shown precious information about multiple mechanical malfunctions and show global performance of these additional methodologies for the recognition and precise identification of isolated and combined mechanical faults affecting the cage induction motor.

**Keywords:** Asynchronous machines; diagnostic ; mechanical defects; Spectral analysis of the current; method neutral; recognition of 3D pattern; multiple defects; degradation of bearings; unbalance.

## TABLE DES MATIÈRES

Dédicace

Remerciement

Résumé

ملخص

Abstract

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Étude préliminaire en vue de la surveillance et du diagnostic du moteur à induction.....	4
I.1 introduction.....	4
I.2 Notions de base sur la sûreté de fonctionnement.....	4
I. 2.1 La maintenance .....	4
I.2.1.1 Maintenance corrective .....	4
I.2.1.2 Maintenance préventive .....	5
A. Maintenance systématique .....	5
B. Maintenance conditionnelle .....	5
I.2.2 Une anomalie.....	5
I.2.3 Une défaillance .....	5
I.2.4 Une panne .....	6
I.2.5 Un défaut.....	6
I.2.6 La surveillance.....	6
I.2.7 La détection .....	6
I.2.8 Le diagnostic .....	6
I.2.9 Étapes du diagnostic .....	6
I.3 Constitution de la machine asynchrone .....	7
I.3.1 Le stator.....	8
I.3. 2 Le rotor .....	9
I .3.2.1 le rotor à cage .....	9
I.3.2.2 Rotor bobiné .....	9
I. 3.3 Les organes mécaniques.....	10
I. 3.3.1 Les paliers .....	10

I.4 Principe de fonctionnement d'un moteur à induction .....	11
I.4.1 Fréquence de synchronisme d'une MAS .....	11
I.4.2 Le couple.....	11
I.5 Principaux défauts du moteur à induction .....	12
I.5.1 Les Causes Des Défauts .....	12
I.5.2 Études statistiques des défauts de moteur triphasé à induction de moyenne puissance .....	14
I.5.3 Défaillances d'ordre électrique.....	16
I.5.3.1 Défaillances des circuits statoriques .....	16
I.5.3.2 Défaut de court-circuit entre spires .....	16
I.5.3.3 Défaut de court-circuit entre phases .....	16
I.5.3.4 Défaut de court-circuit entre phase et le bâti .....	17
I.5.3.5 Défaillances des circuits rotoriques .....	17
I.5.3.6 Rupture des barres .....	18
I.5.3.7 Rupture d'anneaux de court-circuit .....	18
I.5.3.8 Contact Rotor-Stator .....	19
I.5.4 Défauts électromagnétiques (Défaillances du Circuit magnétique) .....	19
I.5.5 Défauts mécaniques.....	20
I.5.5.1 Défaillances des paliers .....	20
A. Défaillances des flasques .....	20
B. Défaillances de roulement .....	20
I.5.5.2 Défauts de balourd.....	21
I.5.5.3 Défaut d'excentricité.....	21
I.5.6 Défauts de la charge.....	22
I.5.6.1. Classification des différents types de charge les plus rencontrés.....	22
I.5.6.2. Exemples de fonctionnements perturbateurs. ....	23
I.6 conclusion .....	24
Chapitre II : Les méthodes de détection et de diagnostic des défauts des moteurs à induction .....	<b>25</b>
II.1 Introduction.....	25
II.2 Classification des méthodes de diagnostic.....	25
II.2.1 Diagnostic interne (approche modèle).....	25
II.2.2 Approche Signal .....	26
II.2.2.1 Les grandeurs analysées par les méthodes de diagnostic : .....	27
II.2.2.1.1. Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques .....	27
II.2.2.1.2 Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite.....	28

II.2.2.1.3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites .....	28
II.2.2.1.4. Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique.....	29
II.2.2.1.5. Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée.....	29
II.2.2.1.6. Diagnostic par l'analyse du courant statorique (MCSA).....	29
II.2.2.1.7. Diagnostic par l'analyse de la tension de neutre .....	29
II.2.3 Approches modernes de diagnostic .....	30
II.2.3.1. Les systèmes experts.....	30
II.2.3.2. Les arbres de défaillances.....	31
II.2.3.3. Les réseaux de neurones artificiels .....	32
II.2.3.4. La reconnaissance des formes (RdF) .....	33
II.3 Analyse spectrale .....	34
II.3.1 Analyse spectrale en ligne .....	34
II.3.2 Méthodes de traitement des signaux .....	34
II.3.2.1. Transformation de Fourier discrète "TFD" .....	34
II.3.2.2. Transformée de Fourier rapide "TFR" .....	34
II.3.2.3 Périodogrammes .....	35
a. Périodogrammes simples .....	35
b. Périodogrammes modifiés .....	35
II.3.2.4 Méthode de Park-Hilbert (P-H).....	36
II.3.2.5 La méthode de Prony .....	37
II.4 Conclusion .....	38
Chapitre III modélisation et simulation du moteur à induction .....	<b>39</b>
III.1 Introduction.....	39
III. 2 Modélisation du moteur à induction .....	39
III.2.1 État Sain.....	39
III.2.1.1 Équations électriques et magnétiques .....	39
III.2.1.1.1 Hypothèses simplificatrices .....	40
III.2.1.1.2 Équations de tensions.....	40
III.2.1.1.3 Équations des flux .....	40
III.2.1.1.4 Équation du couple électromagnétique .....	42
III.2.1.2 Transformation triphasé-biphasé.....	42
III.2.1.2.1 Transformation de Clarke .....	43
III.2.1.2.2 Transformation de Concordia .....	44
III.2.1.2.3 Transformation de Park : .....	44

III.2.1.3 Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone .....	45
III.2.1.4 Équations Électriques .....	46
III.2.1.5 Équations magnétiques .....	47
III.2.1.6 Expression du couple électromagnétique .....	47
III.2.1.7 équation mécanique.....	48
III.2.1.8 Modèle de la machine asynchrone alimentée en tension.....	48
III.2.2 État défectueux (cas de rupture de barres rotoriques).....	49
III.2.2.1 Modèle Multi-enroulements .....	49
III.2.2.1.1 Équations de tensions au rotor .....	51
III.2.2.1.2 Equation globale de tension .....	51
III.2.2.1.3 Modélisation du défaut de cassure des barres .....	52
III.3 La simulation de la machine asynchrone à l'état sain et l'état défectueux .....	53
III.3.1 Bloc de simulation .....	53
III.4 Conclusion : .....	58
Chapitre IV application expérimentale au diagnostic et analyse des résultats .....	<b>60</b>
IV.1 Introduction.....	60
IV.2. Détection d'un défaut de désalignement.....	60
IV.3. Résultats expérimentaux via la MCSA.....	62
IV.4. Campagne expérimentale pour la détection d'un balourd et la dégradation du roulement à billes.....	64
IV.5 Impact des défauts de déséquilibre massique et de la dégradation des roulements sur le spectre du courant statorique .....	66
IV.5.1 Signatures du défaut de balourd .....	66
IV.5.2. Signatures de la dégradation du roulement à billes .....	66
IV.5.3. Signatures de défauts dans le spectre du courant neutre.....	67
IV.6. Moteur en Présence du Défaut de Roulement à billes .....	67
IV.6.1 Représentation en 3D et signature des défauts par la Reconnaissance des Formes.....	67
IV.7. Moteur affecté par la combinaison du défaut de balourd et du défaut de roulement.....	68
IV.7.1 Moteur avant la création des défauts artificiels (état sain ).....	68
IV.7.2 Moteur en présence du défaut de balourd .....	71
IV.7.3 Moteur en Présence du Défaut de Roulement à billes .....	73
IV.7.4 Moteur affecté par la combinaison du défaut de balourd et du défaut de roulement .....	75
IV.8 Conclusion .....	77
Conclusion générale et perspectives.....	78

Annexes.....	80
Références.....	83

## **LISTE DES FIGURES**

<b>Chapitre I : Étude préliminaire en vue de la surveillance et du diagnostic du moteur à induction ....</b>	<b>4</b>
Figure I.1 : les types de maintenance industrielle. ....	5
Figure I.2 : Les éléments de construction du moteur à induction .....	7
Figure I.3: Stator d'un moteur à induction.....	8
Figure I.4 Représentation du Rotor à cage.....	9
Figure I.5 : Rotor bobiné. ....	10
Figure I.6 : Flasque Palier .....	10
Figure I.7 : schéma résume les types des défauts de la machine à induction.....	12
Figure I.8 Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	13
Figure I.9 Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage. ....	13
Figure I.10 Répartition des pannes selon la compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels pour les moteurs de moyenne puissance.....	14
Figure I.11 Répartition des pannes selon la compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels pour les moteurs de faible puissance. ....	14
Figure I.12 Répartition des pannes de moteur à induction de grande puissance par Thorsen.....	15
Figure I.13 Répartition des pannes de moteur à induction de grande puissance en 1999.....	15
Figure I.14 Répartition des pannes de moteur à induction de grande puissance en 2008.....	15
Figure I.15 Les différents courts-circuits du circuit statorique.....	17
Figure I.16 : rupture de barres dans le rotor à cage d'écureuil.....	18
Figure I.17 : Rupture d'anneaux de court-circuit.....	19
Figure I.18 : Vue éclatée d'un roulement à billes .....	20
Figure I.19: les trois types d'excentricité .....	22
<b>Chapitre II : Les méthodes de détection et de diagnostic des défauts des moteurs à induction.....</b>	<b>25</b>
Figure II.1: Principe du diagnostic par modèle. ....	26
Figure II.2 : Principe du diagnostic par l'approche signal.....	27
Figure II.3 : Les grandeurs mesurables dans le moteur asynchrone .....	27
<b>Chapitre III modélisation et simulation du moteur à induction.....</b>	<b>39</b>
Figure III.1 : Modèle triphasé de la machine asynchrone .....	39

Figure III .2 : Passage du système triphasé au système biphasé. ....	43
Figure III .3 Représentation vectorielle des enroulements de la Machine Asynchrone. ....	46
Figure III.4 : Schéma équivalent d'un rotor à cage .....	50
Figure III.5 : Schéma équivalent d'une maille du rotor .....	50
Figure III.6 Bloc SIMULINK du moteur asynchrone .....	54
Figure III.7 : Bloc de transformation triphasée-biphasé .....	54
Figure III.8 : courant statorique. $i_a$ [A] .....	55
Figure III.9: le couple électromagnétique . $C$ [N.m] .....	56
Figure III.10: la vitesse de rotation [tr/min] .....	57
Figure III.11 : Schéma résume l'influence défaut de rupture de barre .....	58
<b>Chapitre IV application expérimentale au diagnostic et analyse des résultats .....</b>	<b>60</b>
Figure IV.1 : Désalignement angulaire .....	61
Figure IV.2 : Agrégat de machines électriques dédié au diagnostic de défaut .....	61
de désalignement .....	61
Figure. IV.3 : Spectre d'un signal Sain .....	62
Figure IV. 4 : Spectre d'un signal défaillant.....	62
Figure IV. 5 : la STFT du courant statorique d'un moteur sain.....	63
Figure IV. 6 : STFT du courant statorique moteur en désalignement .....	63
Figure IV.7 Vues du Banc d'essais .....	64
Figure IV.8. Caractéristique temporelle du courant et son spectre du courant.....	69
Figure IV.9. Spectre du courant circulant dans le neutre.....	69
Figure IV.10 motif 2D et 3D des courants à l'état sain.....	70
Figure IV.11 : Spectrogramme du moteur sain.....	70
Figure .IV.12. Moteur en présence du défaut de balourd .....	72
Figure IV.13. Moteur en présence du défaut de roulement .....	74
Figure.IV.14. Moteur en présence du défaut Combinés.....	76

#### Liste des tableaux

Tableau I.1 : cause et conséquence de défauts de la charge sur le système .....	23
Tableau.IV.1 Caractéristiques du moteur asynchrone (a) et du roulement (b).....	65

## LISTE DES SYMBOLES

$n_s$  : Vitesse de synchronisme de la machine asynchrone (tr/min).

$n$  = la vitesse de rotation du moteur [tr/min].

$n_r$  : Vitesse de rotation du rotor (tr/mn).

$f$ : La fréquence des tensions d'alimentation en (Hz).

$p$  : nombre de paires de pôles .

$g$  : glissement .

$P$  : Puissance du moteur [W].

$C$  : Le couple utile (ou mécanique)[N.m]

TFD : Transformation de Fourier discrète

$N$  le nombre de points de calcul de la TFD

$P$  le nombre échantillons

TFR : Transformée de Fourier rapide

$P_{ps}^{\wedge}(f)$  : DPS La densité spectrale de puissance

$A_n$  : L'amplitude

$\sigma_n$  : Le facteur d'amortissement

$f_n$  : la fréquence

$\theta_n$  : L'angle de phase

$R_s, R_r$  : les résistances par phase du stator et du rotor.

$v_{sabc}$  : Tensions statoriques suivants l'axe abc

$v_{rabc}$  : Tensions rotoriques suivants l'axe abc

$[L_{ss}]$ : matrice d'inductances statoriques

$[L_{rr}]$  : matrice d'inductances rotoriques

$l_s$  : l'inductance propre d'une phase statorique,

$l_r$  : l'inductance propre d'une phase rotorique

$M_s$  : l'inductance mutuelle entre phase statorique

$M_r$  : l'inductance mutuelle entre phase rotorique

$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$  : L'inductance mutuelle entre phase statorique et rotorique

$L_m$  : maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor.

$P(\theta)$  : La matrice de la transformation de PARK

$\omega_s = \dot{\theta}_s$  : Pulsation statorique

$\omega_r = \dot{\theta}_r$  : Pulsation rotorique.

$\omega = \omega_s - \omega_r = \dot{\theta} = p\Omega$  Pulsation mécanique.

$J$  : Moment d'inertie des pièces tournantes.

$\Omega$  : Vitesse mécanique du rotor en tr /mn

$C_e$  : Couple électromagnétique.

$C_r$  : Couple résistant (couple de charge).

$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$  les flux statoriques suivants l'axe dq

$\omega_r$  : la vitesse de rotation de rotation

$[v_{sabc}] = [v_{sa} v_{sb} v_{sc}]^T$  le vecteur de tensions statoriques.

$[i_{sabc}] = [i_{sa} i_{sb} i_{sc}]^T$  le vecteur de courants statoriques.

$[v_{rabc}] = [i_{sa} i_{sb} \dots i_{sc} \dots i_{r(N_r-1)}]^T$  le vecteur de courants dans les mailles rotoriques.

$[\phi_{sabc}] = [\phi_{sa} \phi_{sb} \phi_{sc}]^T$  le vecteur de flux statoriques

$R_{bk}$  : Résistance de barre dans la maille k.

[V] vecteur global des tensions

[I]:le vecteur global des courants

$[L_{tr}]$  et  $[R_{tr}]$  : les matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park.

$T_e$  : équation du couple électromécanique du moteur

# *Introduction Générale*

### **Introduction Générale**

Les machines électriques occupent une place importante dans le monde industriel. Elles sont largement utilisées aussi bien dans le processus de la production de l'énergie (génératrice, Alternateur) que dans le processus de sa consommation. Cette énergie électrique est consommée en majeure partie par les moteurs électriques (70% de l'énergie) et principalement les moteurs à induction. Les machines asynchrones sont surtout utilisées comme moteurs. 80% des moteurs électriques sont des moteurs asynchrones. Leur gamme de puissance s'étale de quelques watts à une dizaine de mégawatts. Le meilleur moyen d'assurer une production sans avarie dans le fonctionnement des machines électriques c'est de parvenir à Améliorer la sûreté d'exploitation des machines électriques et de mettre en œuvre un système de maintenance prédictive planifié (MPP) des machines (entretien ou réparation) comprenant une série de mesure à prendre dont les visites (contrôle), les réparations courantes et capitales (grosses réparations). Le service d'entretien est tenu d'arrêter les périodes prévues pour bien mener ces opérations. Le volume de ces réparations surtout les grosses est défini sur la base d'une inspection minutieuse de l'état de la machine électrique qui nous permettra de fixer correctement les travaux de réparation nécessaire pour une exploitation sans défaillance. En particulier ce contrôle est indispensable des fois aussi si des anomalies surgissent lors du fonctionnement de la machine même s'il n'a pas été planifié.

Il vient alors que si on veut améliorer l'exploitation des moteurs électriques dans une chaîne de production et augmenter par conséquent leur durée de vie c'est essayer en premier lieu de veiller à leur sûreté de fonctionnement et de palier aux défauts qui peuvent paralyser leur fonctionnement en amont et en aval et d'être vigilant et rigoureux dans la surveillance de tous les paramètres qui les concernent (contrôle physique et visuel,...) . Il est important aussi de comprendre le processus technologique au sein duquel le moteur électrique joue le rôle principal dans le mouvement de tout le système électromécanique, car toute défaillance ou anomalie se répercutera directement ou indirectement sur le moteur si certaines précautions ne sont pas prises (équipement de protection et de sécurité).

Généralement, si la machine est bien dimensionnée pour une charge donnée et si les valeurs nominales sont respectées, il n'y a pas de raison pour qu'elle tombe en panne pour une cause interne. Si maintenant, on veille en plus à ce qu'il n'y ait pas de problème extra machine dans la chaîne de production qui peut directement ou indirectement nuire à la machine alors, on est sûr que cette machine aura une durée de vie nominale sans aucune défaillance.

## *Introduction générale*

---

Le diagnostic des machines électriques et spécifiquement les moteurs asynchrones représentent un enjeu scientifique et économique motivé par les objectifs de sûreté de fonctionnement et de continuité de service des entraînements électriques. Afin de prévenir à temps les défauts susceptibles de se produire dans les moteurs qui sont l'organe principal et le maillon faible dans les commandes électriques de procédés, une maintenance prédictive s'avère indispensable de la part des exploitants. Le diagnostic et la détection de défauts mobilisent à ce jour de nombreux chercheurs. Il n'y a pas de solution miracle au problème de la surveillance des machines électriques et il ne faut pas perdre de vue que c'est un ensemble de techniques mises à contribution simultanément qui permet d'élaborer un diagnostic fiable et robuste, et qui soit en mesure de réduire le taux de fausses alarmes. Ce travail est concentré au diagnostic des défauts mécaniques spécifiques isolés et à leur combinaison, chose qui a été rarement considérée par la communauté scientifique ou industrielle bien que c'est un cas habituel aux moteurs électriques réels et en particulier ceux de grandes puissances qui sont soumis à des contraintes mécaniques beaucoup plus importantes.

Pour être efficace dans son intervention, en ce qui concerne les différents problèmes qui apparaissent dans les entraînements électrique, il faut :

- 1) diagnostiquer le moteur dans le temps le plus court pour ne pas paralyser la production ; ceci bien sûr dépend aussi de la stratégie de la machine dans le processus technologique
- 2) déterminer les causes probables de la défaillance ou de la panne.
- 3) déterminer les causes révélatrices et activer à l'éloignement de la panne.
- 4) en prendre note pour le suivi de cette machine.

Si par contre on détermine que la défaillance est due à des causes internes et une réparation s'avère obligatoire alors on passe au deuxième problème qui consistera à situer définitivement l'endroit de la panne, le caractère et la cause de cette détérioration ; ceci fera l'objet de l'étude des possibilités des défaillances des organes des machines électriques, les causes et la maintenance de ces derniers.

C'est dans ce contexte ,que notre travail de recherche va s'attarder essentiellement sur le diagnostic des différents défauts simples et combinés à travers le courant de ligne moyennant une analyse spectrale spécialisée du signal Et de contribuer à développer des méthodes et des techniques novatrices qui permettent une meilleure maîtrise de la maintenance de l'ensemble des entraînements électriques de la chaîne de production afin de faire augmenter le taux de fiabilité de la chaîne de production et le gain sur les pièces de rechange. Par conséquent ; elle nous donne un rapport à haut niveau de l'état des organes du moteur asynchrone et des mécanismes qui lui sont accouplés.

Ce travail s'articule autour de quatre chapitres.

**Le premier chapitre** présente la définition de quelques termes relatifs au diagnostic des machines asynchrones puis, une description de la constitution de la machine asynchrone ainsi que les différentes défaillances auxquelles elle peut être soumise.

**Le deuxième chapitre** explique les différentes méthodes de diagnostic et plus particulièrement les méthodes de traitement de signal dont on s'intéresse à appliquer dans ce travail.

**Le troisième chapitre** présente une étude des équations électriques et mécaniques qui décrivent le comportement dynamique de la machine asynchrone dans l'état sain et en présence d'un défaut

**Le quatrième et le dernier chapitre** cible l'objectif principal de cette thèse on présentant une solution simple, efficace et peu coûteuse méritant toute sa place aux côtés des outils de diagnostic et de surveillance habituels. Il s'agit d'une validation expérimentale des défauts par une complémentarité de techniques se résumant en l'analyse spectrale du courant de la phase d'alimentation et celle du courant qui circule dans le conducteur neutre du moteur asynchrone en service, complétée par une représentation tridimensionnelle (3D) des carrés de l'intensité des courants des trois phases. Le neutre de la machine asynchrone est assez simple à sortir pourvu que l'industriel accepte de le faire afin de faciliter son diagnostic. Pour cela une campagne d'expériences dédiée à l'étude des défauts isolés (désalignement) et combinés (roulement à bille et balourd massique) a été réalisée au sein du laboratoire. L'approche repose sur la connaissance du comportement du moteur asynchrone sain, elle est ensuite comparée avec les signaux mesurés lorsque le moteur fonctionne en mode dégradé suite à ces défaillances. L'analyse de ces signaux a permis de suivre l'évolution du spectre obtenu par la FFT. La représentation des courants dans un état d'espace en 3D se résume en une analyse de reconnaissance des motifs obtenus pour chaque mode défaillant. Les résultats expérimentaux obtenus sont satisfaisants aussi bien pour la détection des défaillances mécaniques unique et multiples que pour le suivi de l'évolution de leurs degrés de gravité. La mise en œuvre de ces techniques est simple et leurs résultats sont facilement interprétables. Par conséquent, elles permettent de contribuer à réaliser un diagnostic performant et sont à la portée d'une population de mainteniciens et ne nécessitant pas un niveau d'expert.

*Chapitre I : Étude préliminaire en vue de la  
surveillance et du diagnostic du moteur à  
induction*

**Chapitre I : Étude préliminaire en vue de la surveillance et du diagnostic du moteur à induction**

**I.1 Introduction**

Actuellement, le moteur à induction joue un rôle principal dans tous les secteurs industriels. avec l'évolution des convertisseurs électroniques, et par conséquent, les variateurs électroniques de vitesse, le moteur à induction et en particulier le moteur asynchrone à cage qui s'était déjà imposé dans les entraînements électromécaniques des divers procédés technologiques grâce à sa robustesse, sa simplicité de construction, et son faible coût, va dans le futur dominer la majorité des entraînements électriques. Cependant, l'arrêt inattendu de moteur cause non seulement une coupure dans la chaîne de production donc des pertes financières lourdes ; mais aussi des dégâts matériels et corporels sur tout dans les domaines sensibles ; donc la mise en œuvre d'un système de maintenance préventive est devenue primordiale. Dans le présent chapitre nous définissons quelques notions utilisées dans le domaine de la maintenance et du diagnostic. Après cela, nous essayerons de présenter les principaux éléments qui entrent essentiellement dans la construction du moteur asynchrone à cage d'écureuil et les défauts électriques et mécaniques et leurs causes qui peuvent affecter les différents organes et leurs causes probables.

**I. 2 Notions de base sur la sûreté de fonctionnement**

**I. 2.1 La maintenance**

De nos jours la réussite dans le monde industriel se repose essentiellement sur la continuité dans la chaîne de production que l'on peut assurer que par une bonne stratégie de la maintenance ; cette dernière a pour rôle de garantir la disponibilité des systèmes.

D'après la norme AFNOR (Association Française de Normalisation), la définition de la maintenance est la suivante :

« La maintenance : 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. » [1]

On peut citer les types de maintenance comme suit : [2]

**I.2.1.1 Maintenance corrective**

Intervient après la détection et la localisation d'un défaut.

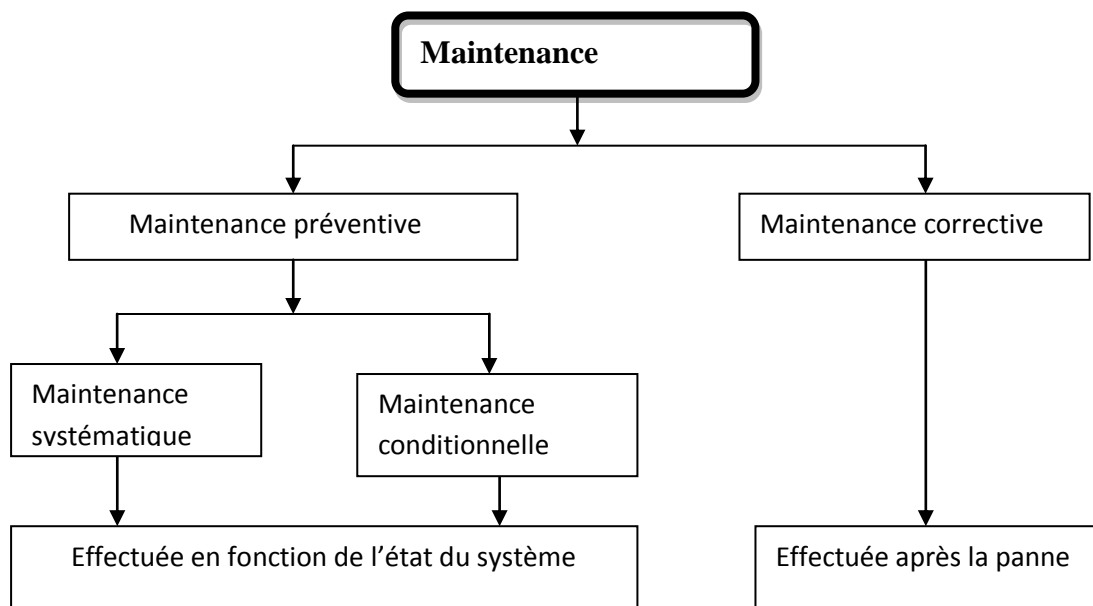
### **I.2.1.2 Maintenance préventive**

Maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. C'est une intervention de maintenance prévue, préparée et programmée avant la date probable d'apparition d'une défaillance. Le plus souvent elle est systématique.

**A. Maintenance systématique** : c'est-à-dire une maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage.

**B. Maintenance conditionnelle** : alternative à la maintenance systématique, fait l'objet d'une demande croissante dans un grand nombre d'applications industrielles.

Cette maintenance est basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système, afin de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive. Elle n'implique pas la connaissance de la loi de dégradation. La décision d'intervention préventive est prise lorsqu'il y a évidence expérimentale du défaut imminent, ou approche d'un seuil de dégradation prédéterminé. Elle impose donc des traitements en ligne, au moins une partie.



**Figure I.1 : les types de maintenance industrielle.**

### **I.2.2 Une anomalie**

On définit l'anomalie par une particularité non conforme à la loi naturelle ou logique [3].

### **I.2.3 Une défaillance**

La défaillance est une anomalie de fonctionnement au sein d'un système physique [3].

#### **I.2.4 Une panne**

La panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance [3].

#### **I.2.5 Un défaut**

Un défaut est une anomalie de comportement au sein du système. Ce concept est important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels. Tout écart entre la caractéristique observée et la caractéristique de référence est considéré comme étant un défaut [3].

#### **I.2.6 La surveillance**

On peut la définir comme suite : La surveillance se réfère à la capacité de reconnaître un comportement anormal et de le signaler [4]. Donc c'est l'association de deux grandes fonctions qui sont la détection et le diagnostic.

#### **I.2.7 La détection**

Dans le domaine industriel on définit le terme détection par la classification des situations observables du système de fonctionnement comme étant normales ou anormales.

#### **I.2.8 Le diagnostic**

Le diagnostic n'est applicable qu'après l'arrêt inattendu d'une machine. La définition de ce dernier, adoptée par les instances internationales de normalisation (AFNOR, CEI), (Association Française de Normalisation), est la suivante:

« Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test». [5].

#### **I.2.9 Étapes du diagnostic**

La sélection de la méthode de diagnostic la plus appropriée à un système industriel donné ne peut se faire qu'après un recensement des besoins et des connaissances disponibles. L'inventaire des éléments à étudier est le suivant [6] :

- nature des causes de défaillances à localiser,
- connaissance des symptômes associés aux défaillances induites par les causes,
- maîtrise des moyens de mesure des symptômes,
- maîtrise des moyens de traitement des symptômes,

- connaissance des mécanismes physiques entre les causes et les effets,
- inventaire du retour d'expérience,
- recensement des expertises disponibles,
- définition du niveau de confiance dans le diagnostic,
- identification des utilisateurs finaux du diagnostic.

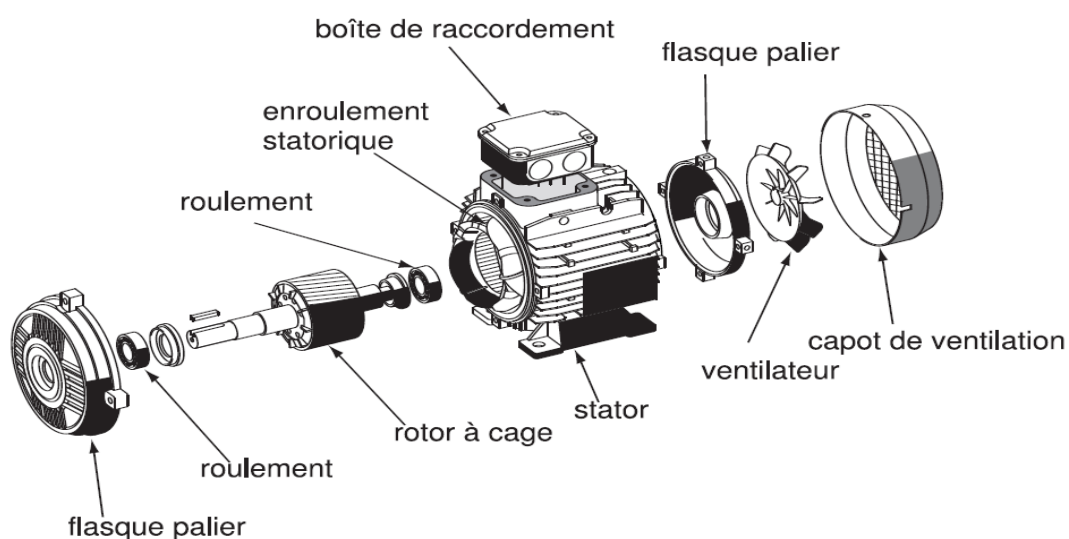
### **I.3 Constitution de la machine asynchrone [7][8][9]**

La machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil est connue également sous le terme de moteur à induction. On se propose, dans cette section, de rappeler brièvement la constitution de la machine asynchrone. Cette description va nous permettre de mieux appréhender les défauts de cette machine, dans leur dimension physique. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil.

Les machines asynchrone peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

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

Dans ce travail, nous nous intéressons à la machine asynchrone à cage d'écureuil appelée aussi à rotor en court circuit.

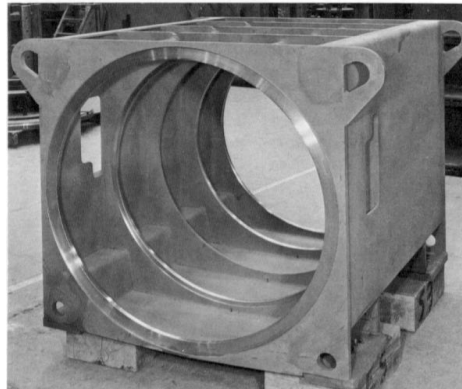


**Figure I.2 : Les éléments de construction du moteur à induction**

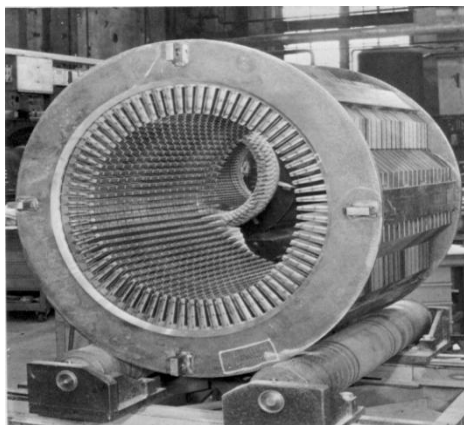
### **I.3.1 Le stator**

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

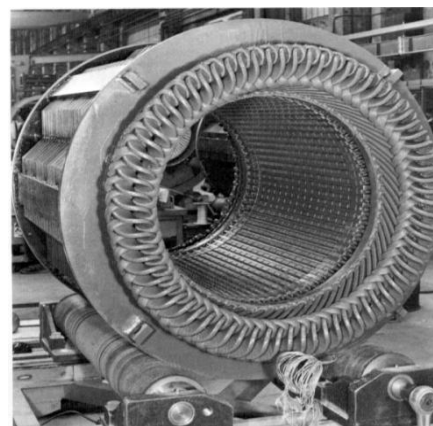
Les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriquée, ondulée ou encore concentrique.



**A. Carcasse usinée d'un moteur asynchrone**



**B. Stator avant bobinage**



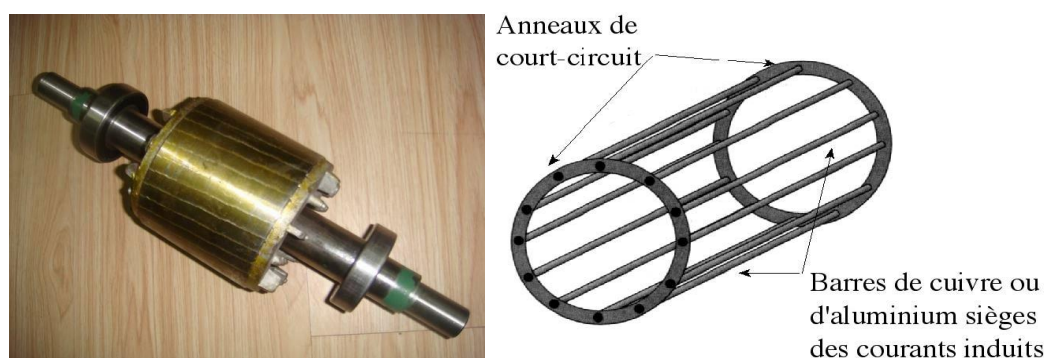
**C. Stator après bobinage**

**Figure I.3: Stator d'un moteur à induction**

## **I.3.2 Le rotor**

### **I.3.2.1 le rotor à cage**

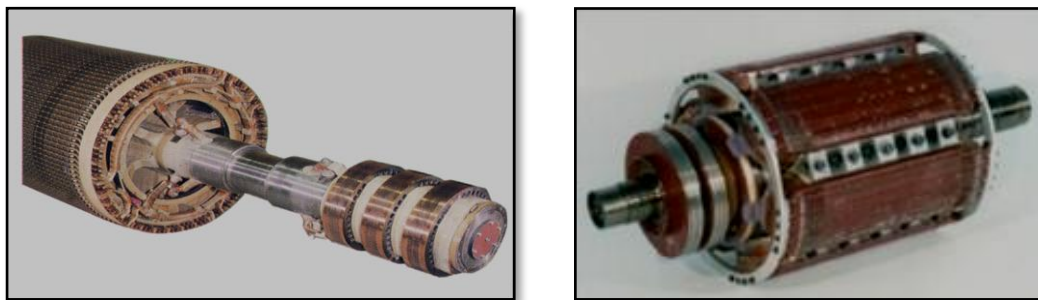
Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure I.2). Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné (figure I.3). Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.



**Figure I.4 Représentation du Rotor à cage.**

### **I.3.2.2 Rotor bobiné**

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine. Les encoches, découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques. Les extrémités des enroulements rotorique sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux.



**Figure I.5 : Rotor bobiné.**

### **I. 3.3 Les 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 et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers.

#### **I. 3.3.1 Les paliers**

Les paliers sont constitués de roulements à billes et de flasques. Les roulements à billes sont insérés à chaud sur l'arbre, permettant ainsi d'assurer le guidage en rotation de l'arbre.

Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage comme le montre la figure I.6.



**Figure I.6 : Flasque Palier**

Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. 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. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone.

#### **I.4 Principe de fonctionnement d'un moteur à induction**

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant avec le courant induit à l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont balayés par le champ tournant au niveau de l'entrefer. Le rotor tourne à la fréquence de rotation  $n$ , il tourne moins vite que le champ tournant qui lui tourne à la fréquence de rotation  $n_s$ . La fréquence de glissement est la différence entre ces deux fréquences de rotation :

$$n_g = n_s - n \quad (\text{I.1})$$

On appelle glissement d'un moteur asynchrone le rapport de la fréquence de glissement à la fréquence de synchronisme :

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

##### **I.4.1 Fréquence de synchronisme d'une MAS :**

La fréquence de rotation du champ magnétique tournant (*fréquence de synchronisme*) est donnée par la relation

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (\text{I.3})$$

**p**: Le nombre de paires de pôles créés par le stator.

**f**: La fréquence des tensions d'alimentation en (Hz).

##### **I.4.2 Le couple**

Le couple d'un moteur asynchrone est fonction de la puissance mécanique et de la vitesse de rotation  $n$  du moteur. IL s'exprime par la relation suivante:

$$C = (P \times 9\,550) / n \quad (\text{I.4})$$

Avec :

**P** = Puissance du moteur [W].

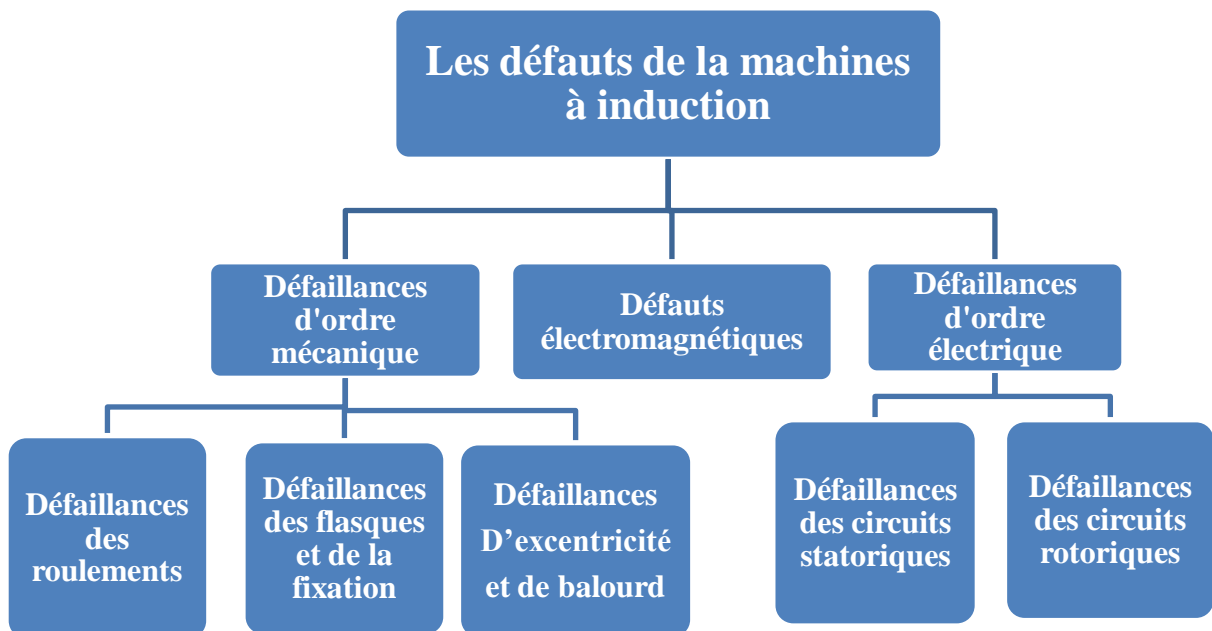
**n** = la vitesse de rotation du moteur [tr/min].

### **I.5 Principaux défauts du moteur à induction**

La machine à induction occupe une place importante dans tous les secteurs industriels elle est largement utilisée en raison de sa robustesse ; son faible cout d'achat et d'entretien.

Malgré toutes ces qualités, elle peut être affectée par un certains nombres de défaillances. Ces derniers peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques.

On peut résumer les types des défauts de moteur à induction par le schéma suivant :



**Figure I.7 : schéma résume les types des défauts de la machine à induction**

#### **I.5.1 Les Causes Des Défauts**

La machine asynchrone peut présenter différents types de défauts qui peuvent être classés comme suit [10, 11,12] :

- Les défauts du stator qui résultent d'un défaut dans un ou plusieurs enroulements de phase statorique, ou d'un mauvais raccordement des enroulements statoriques.
- Les défauts rotoriques: cassure de barres de la cage rotorique, rupture des jonctions de l'anneau de court-circuit.

## Chapitre I : Étude préliminaire en vue de la surveillance et du diagnostic du moteur à induction

- Les irrégularités statiques et/ou dynamiques dans l'entrefer pouvant avoir comme conséquence une bande de frottement entre le rotor et le stator, endommageant sérieusement le stator et ses enroulements.
- Les défauts des roulements du moteur

Ces multiples défaillances de la machine asynchrone peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques ou électriques et leurs causes sont très variées.

Dans le but d'une présentation synthétique, ces défauts peuvent se classer en deux familles principales, les figures (I.8) et (I.9) regroupent ces causes [13, 14, 15].

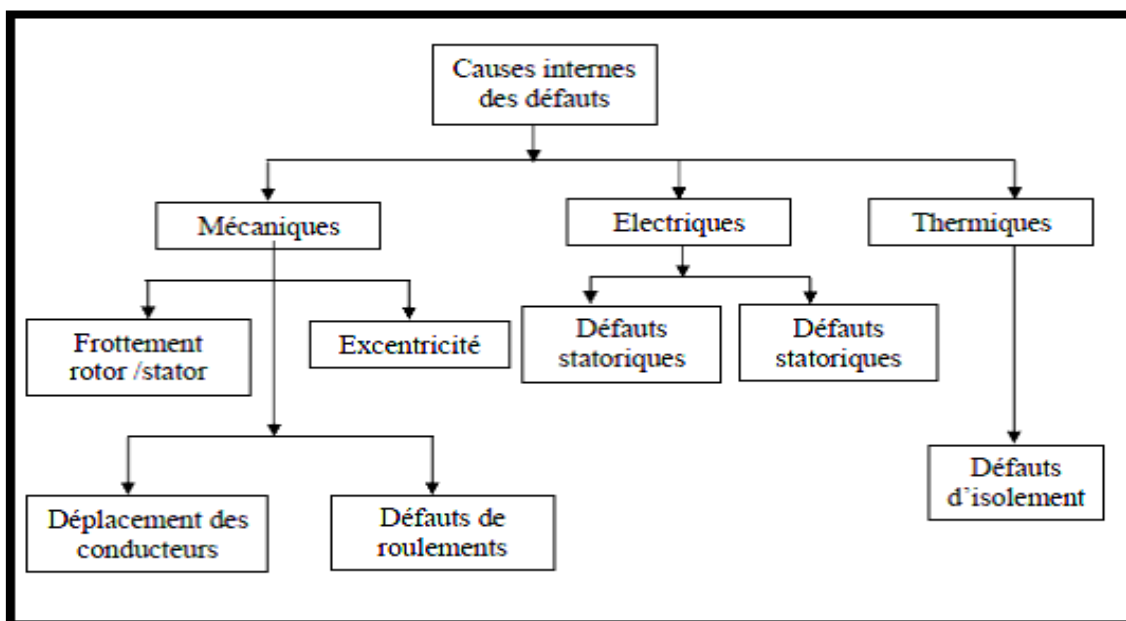


Figure I.8 Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

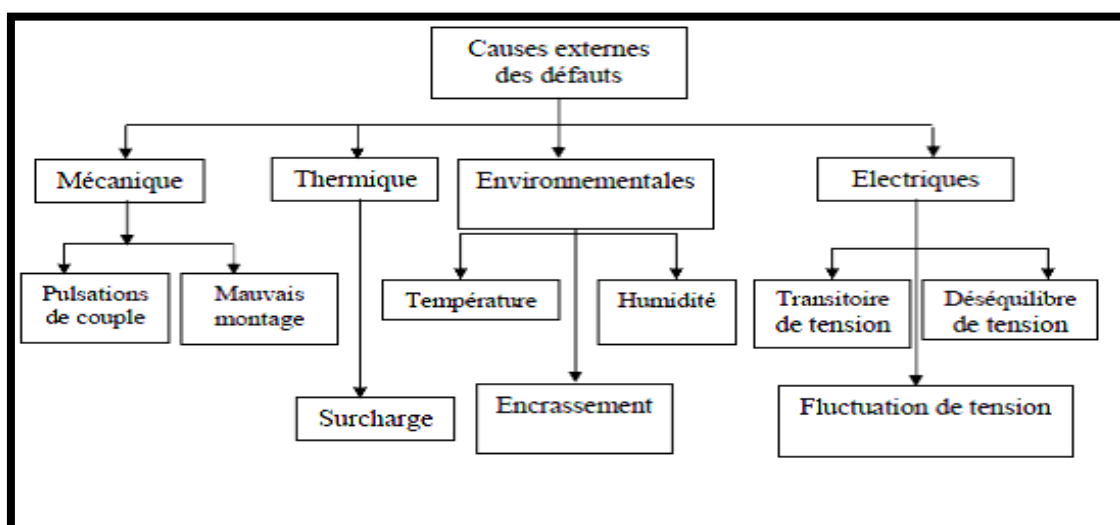
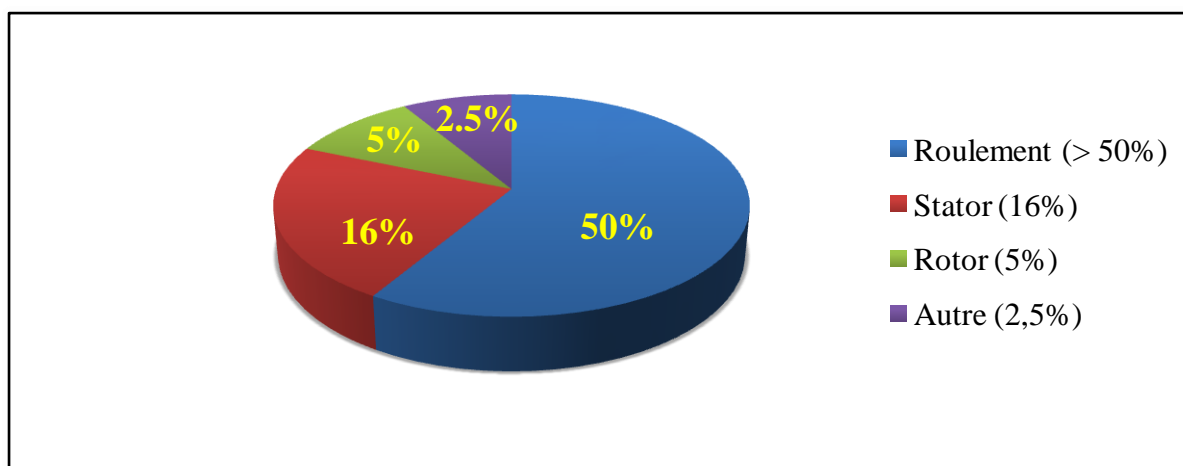


Figure I.9 Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

### **I.5.2 Études statistiques des défauts de moteur triphasé à induction de moyenne puissance**

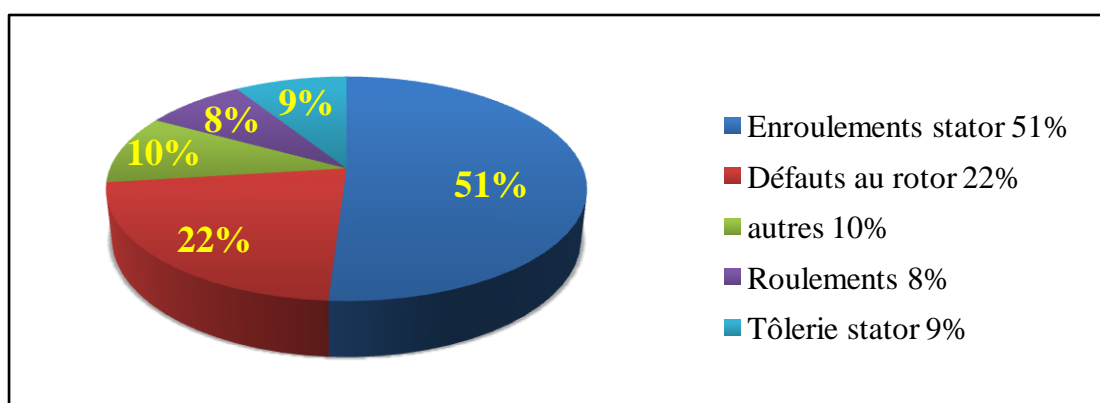
Ces dernières décennies, Une série d'études statistiques a été faite sur les pannes qui peuvent attribuer les machines à induction.

En 1988 une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels, a réparti les pannes des machines asynchrone de moyenne puissance (de 50KW à 200KW) comme le suivant :



**Figure I.10 Répartition des pannes selon la compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels pour les moteurs de moyenne puissance**

La même étude montre qu'entre 1973 et 1988 les pannes statoriques ont passées de 78% à 60% et celles du rotor de 12% à 22%. Cette variation se traduit par l'augmentation de l'utilisation de l'isolation dans cette période. La répartition des différents défauts est comme suit :



**Figure I.11 Répartition des pannes selon la compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels pour les moteurs de faible puissance.**

## Chapitre I : Étude préliminaire en vue de la surveillance et du diagnostic du moteur à induction

Il y a plusieurs répartition Pour les moteurs à induction de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) l'étude statistique de Thorsen et Dalva [16] a donné les résultats suivants:

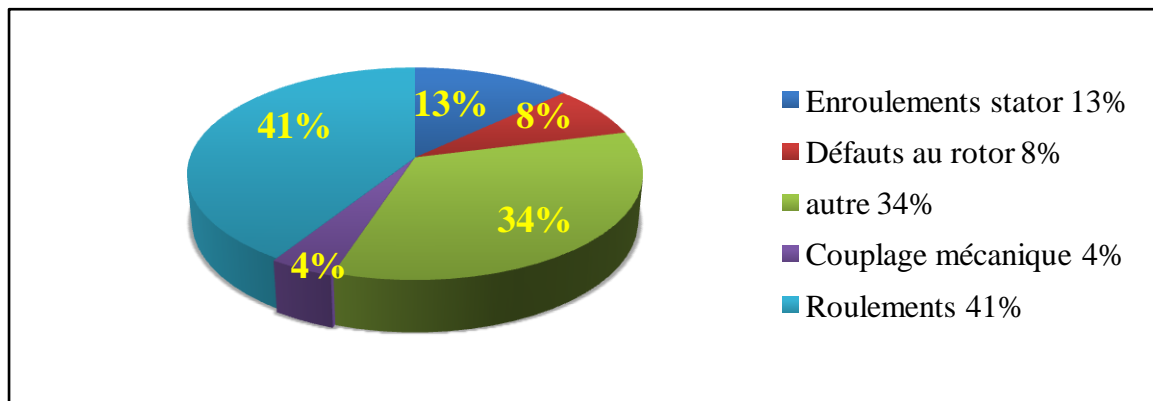


Figure I.12 Répartition des pannes de moteur à induction de grande puissance par Thorsen

Et pour la même gamme de puissance l'étude de Thomson en 1999 a confirmé les résultats d'études précédentes.

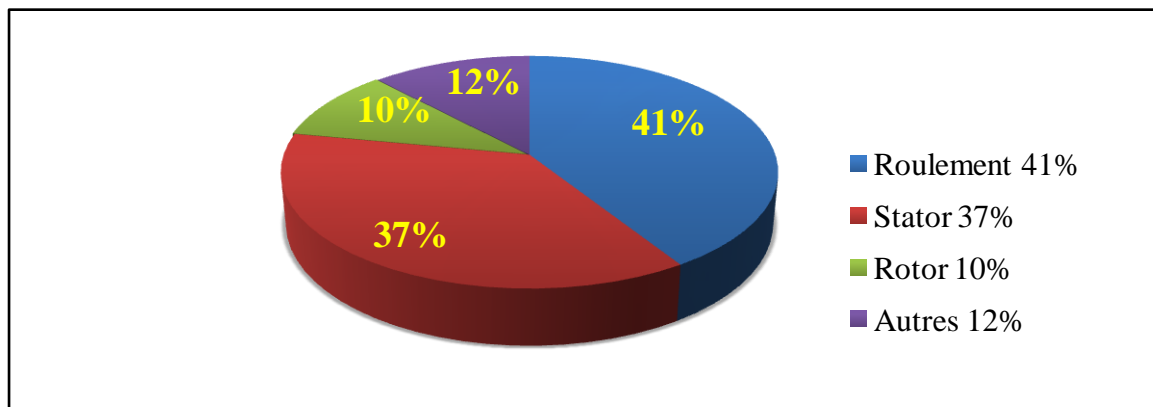


Figure I.13 Répartition des pannes de moteur à induction de grande puissance en 1999

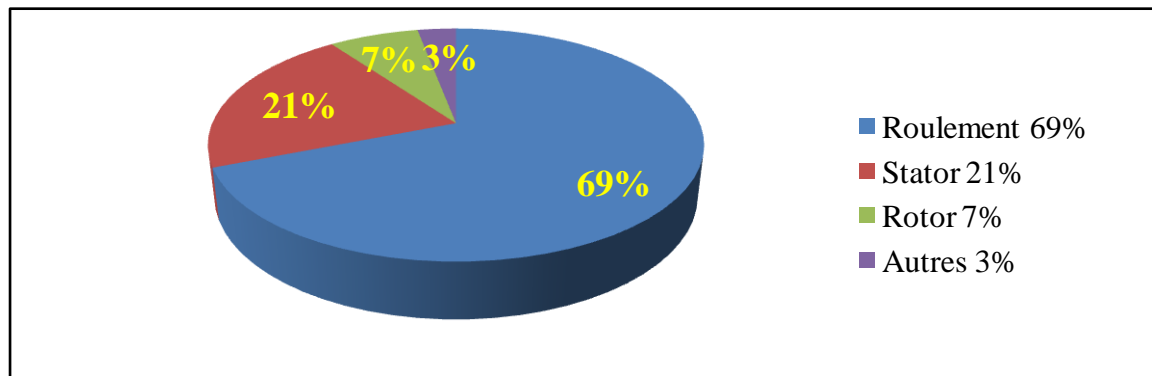


Figure I.14 Répartition des pannes de moteur à induction de grande puissance en 2008

On remarque que pendant une décennie la répartition des pannes ont changé grâce au développement de techniques de fabrication de ces machines.

Statistiquement, il est difficile de donner une répartition exacte des défaillances de machines électriques puisque le recensement des pannes et défauts n'est pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance [6]. Mais la source des pannes la plus fréquente reste les roulements.

on remarque qu'il y a certains défauts plus fréquents que d'autres et cela d'après Thorsen et Dalva dépend de l'environnement de fonctionnement du moteur qui joue un rôle prépondérant, le taux de panne pour des moteurs utilisés en extérieur, où l'environnement est humide (aux usines terrestres et en mer par exemple), peut être 2, 5 fois plus grandes que le taux d'échec pour des moteurs utilisés à l'intérieur.

Ainsi que La gamme de puissance des moteurs à induction, par exemple on trouve que le taux des pannes mécanique dues aux roulements est très élevé dans les machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW), par contre les défauts statoriques et rotoriques sont les plus apparus pour les machines de moyenne puissance (de 50 kW à 200 kW).

Tenons compte de ces statistique nos études vont se dirigés vers les types de défauts les plus courants. Parmi ces défauts, nous trouvons les suivantes :

### **I.5.3 Défaillances d'ordre électrique**

#### **I.5.3.1 Défaillances des circuits statoriques**

La dégradation d'isolation des enroulements de stator est la cause principale des défaillances statorique elle se manifeste sous la forme d'un court-circuit entre spires, d'un court-circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse.

#### **I.5.3.2 Défaut de court-circuit entre spires**

Le défaut de court-circuit entre spires peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique. Il apparaît à l'intérieur des encoches statoriques, entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée et une légère variation de l'amplitude sur les autres phases. [6]

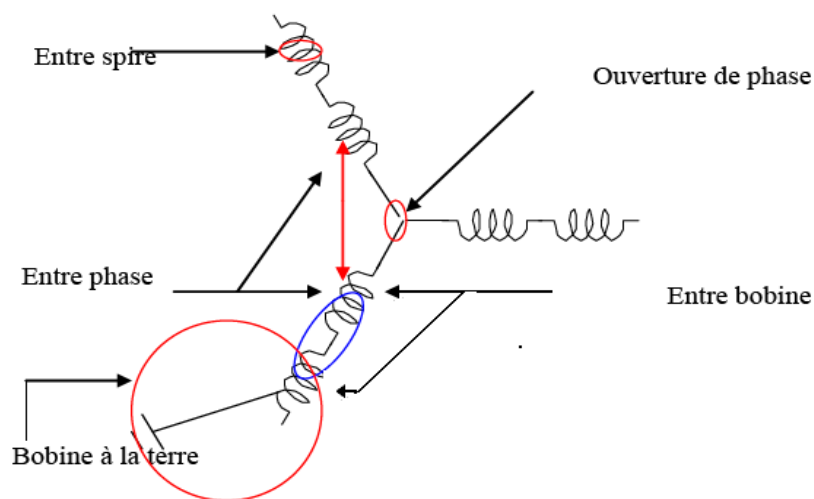
#### **I.5.3.3 Défaut de court-circuit entre phases**

Ce défaut engendre le déséquilibre des courants statoriques et induit des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des fusibles de protection, des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. Ces défauts ont le plus souvent une origine

mécanique due aux vibrations excessives. Ces vibrations peuvent mener à un desserrement des boulons de la plaque à bornes de la machine. Ce qui peut engendrer un court-circuit ou une cosse mal serrée à la jonction du câble d'alimentation et ainsi les bornes de la machine peuvent être à l'origine d'une ouverture de phase [6]

#### **I.5.3.4 Défaut de court-circuit entre phase et le 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. Sauf que le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, concernant la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux. Donc il est nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels par exemple). En présence de ce défaut, la tension de la phase concernée ne change pas mais le courant augmente à cause de la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température qui provoque un défaut d'isolement dans l'enroulement. De plus, ce défaut génère une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut. [6]



**Figure I.15 Les différents courts-circuits du circuit statorique**

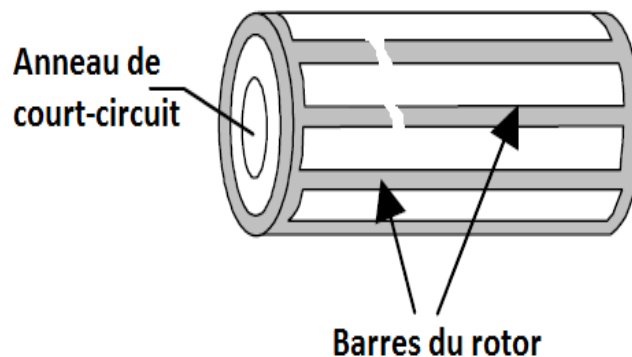
#### **I.5.3.5 Défaillances des circuits rotoriques**

Les défauts qui sont les plus répétitifs, localisés au niveau du rotor se résument aux : l'excentricité statique et dynamique, la rupture de barres rotoriques et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.

### **I.5.3.6 Rupture des barres**

Les 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) [10]

L'apparition d'un défaut de rupture de barres n'induit pas à un arrêt de la machine, du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes [11]. Ces barres sont alors surchargées, et les contraintes thermiques et électromécaniques engendrées peuvent conduire à leur rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. [12]

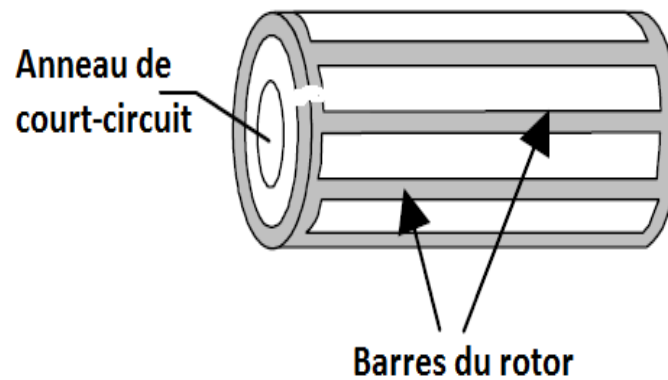


**Figure I.16 : rupture de barres dans le rotor à cage d'écureuil**

### **I.5.3.7 Rupture d'anneaux de court-circuit**

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. 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 provoqué par la cassure de barres. [3]



**Figure I.17 : Rupture d'anneaux de court-circuit**

#### **I.5.3.8 Contact Rotor-Stator [10]**

Il existe plusieurs raisons pour lesquelles un rotor peut entrer en contact avec un stator. Voici les trois plus communes :

1. défaillance d'un palier
2. déviation de l'arbre
3. désalignement rotor-stator

Lorsqu'il y a contact entre le rotor et le stator, plusieurs scénarios peuvent se présenter. Si le contact se produit seulement pendant les démarrages, la force du rotor peut finir par provoquer la perforation de l'isolement de la bobine par les laminations du stator et causer la mise à la terre de la bobine. Certains moteurs peuvent parfois fonctionner des années dans cette condition, selon la fréquence des démarrages et l'importance du contact entre le rotor et le stator. Si le contact s'effectue lorsque le moteur tourne à pleine vitesse, il en découle normalement une mise à la terre très prématurée de la bobine dans la cannelure du stator causée par une chaleur excessive produite au point de friction.

#### **I.5.4 Défauts électromagnétiques (Défaillances du Circuit magnétique)**

Les tôles du circuit magnétique sont feuilletées et isolées entre elles, cependant elles peuvent se retrouver court-circuitées. Les causes les plus fréquentes de défaut de circuit magnétiques sont généralement liées à un défaut sévère d'excentricité statique et/ou dynamique qui peut conduire à un contact front entre le stator et le rotor ce qui détruit le circuit magnétique, ou bien court-circuit des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles, ainsi la projection des corps étrangers dans l'entrefer peut entraîner l'abrasion des tôles et ainsi les court-circuitées [17]

## **I.5.5 Défauts mécaniques**

### **I.5.5.1 Défaillances des paliers**

#### **A. Défaillances des flasques**

Les défaillances des flasques sont généralement créées durant l'étape de fabrication. En effet, si les bords intérieurs ou extérieurs des flasques ne sont pas usinés correctement, les roulements à billes sont alors décentrés. Cela conduit à une excentricité du rotor par rapport au stator produisant des efforts supplémentaires sur l'arbre et sur les roulements à billes ce qui accélère leur détérioration. [18]

#### **B. Défaillances de roulement**

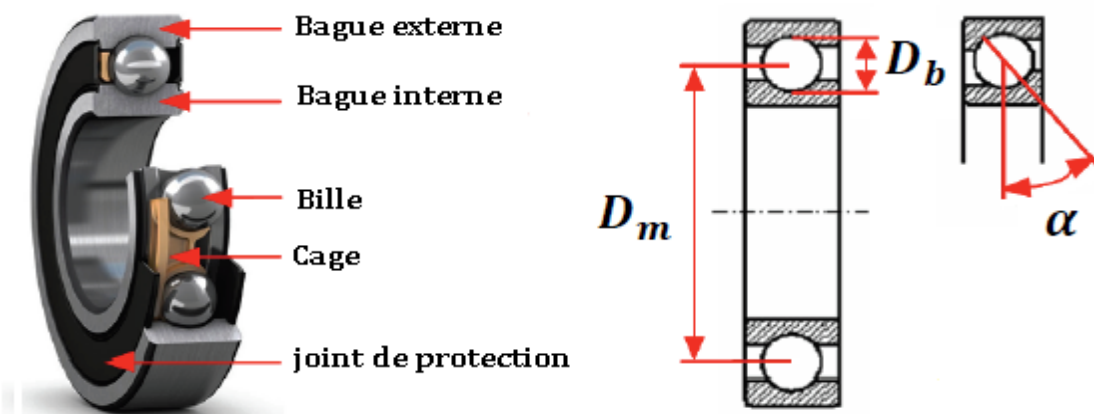
Le roulement est l'élément le plus critique d'une machine. Il joue le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor ; il permet aussi de maintenir l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor avec un frottement minimal. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux.

Le roulement est composé des éléments suivants [19].

Deux bagues concentriques en acier, appelés bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement (surfaces sur lesquelles "roulent" les corps roulants).

- Des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal.
- Une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine).

La figure I.18 montre la construction d'un roulement à billes.



**Figure I.18 : Vue éclatée d'un roulement à billes**

Avec :

$D_m$ : Diamètre moyen du roulement.

$D_b$ : Diamètre d'une bille.

$\alpha$ : Angle de contact de la bille avec les bagues.

$N$ : Nombre de billes.

La fréquence qui caractérise le défaut de roulement dépend du type de défaut et de la géométrie de roulement. Il ya plusieurs paramètres qui cause la défaillance d'un roulement Causes comme [20]

- contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, ...etc
- corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, ...
- lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement,
- mauvais alignement du rotor,
- courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques,
- installation inexacte du roulement ; en forçant incorrectement le roulement sur l'arbre du rotor ou dans les flasques (dû au désalignement), des entailles seront formées sur les chemins de roulement.

#### **I.5.5.2 Défauts de balourd**

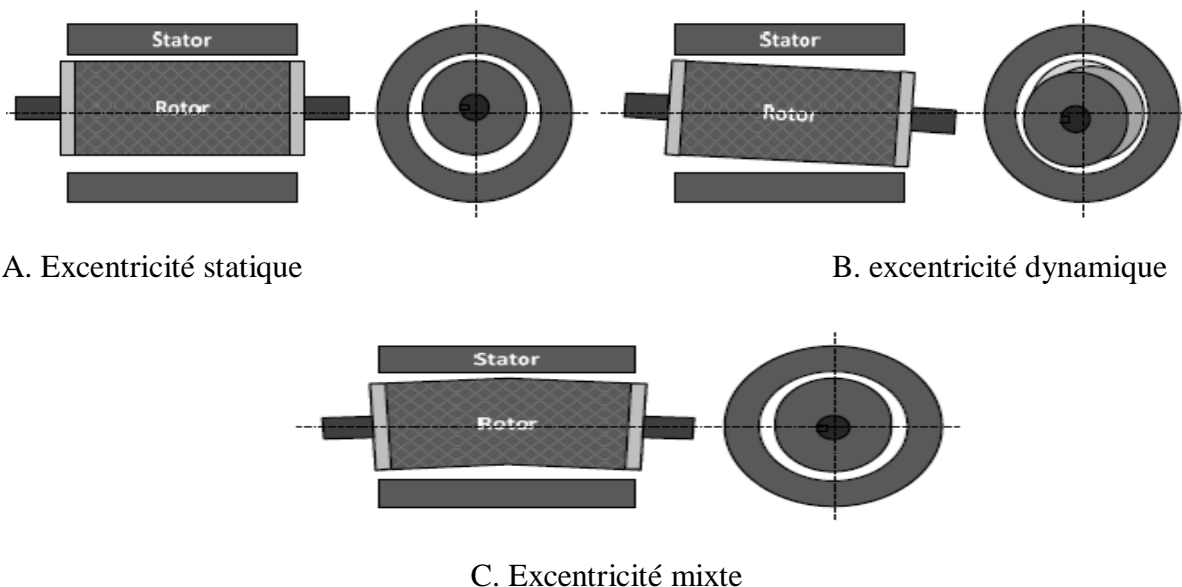
Dans le moteur à induction la répartition irrégulière des masses au tour du rotor engendre le phénomène de balourd ce qui cause lors de la rotation le problème de vibration et le déplacement du centre de gravité en dehors de l'axe géométrique du rotor . De ce fait, il en résulte la déformation du rotor .Il provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage.

#### **I.5.5.3 Défaut d'excentricité**

L'excentricité est la répartition irrégulière de l'entre fer elle peut être causé par un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication et d'assemblage. la conséquence finale pouvant être le frottement entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système

il ya Trois catégories d'excentricité [8]

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités.



**Figure I.19: les trois types d'excentricité**

### **I.5.6 Défauts de la charge**

Il est à noter que la dynamique de la charge dispose d'une grande influence sur la détection et le diagnostic de d'autres défauts tels que la rupture d'une barre ou l'excentricité du rotor. L'introduction de perturbations ou d'oscillations par la charge pouvait masquer l'apparition des défauts du moteur

#### **I.5.6.1. Classification des différents types de charge les plus rencontrés**

On distingue : [21]

- charge à couple constant : le couple n'est pas fonction de la vitesse (ex : traction, convoyeur, tapis roulant,...).
- charge à couple variable : le couple varie en fonction de la vitesse (ex : pompe centrifuge, ventilateur,...),
- charge à puissance constante : tels que les broyeuses, les affûteuses, les bobineuses,...

La nature de l'application de la charge, quelle que soit son type, peut influencer d'une manière destructive le fonctionnement du variateur en amont. En l'occurrence, une mauvaise utilisation de l'ensemble moteur – charge peut engendrer des défaillances mécaniques du système.

Le tableau 1.1 présente quelques applications néfastes de la charge et les conséquences que cela peut engendrer. [8]

**Chapitre I : Étude préliminaire en vue de la surveillance et du diagnostic du moteur à induction**

Composants	Défaillances	Causes possibles	Effets sur le système	Observable
Charge	Déséquilibre de charge	Applications successives et répétitives de surcharges A-coups de couple et de charge Démarrages en force répétitifs	Elévation de la température ⇒ dégradation des isolants ⇒ risque de court-circuit Fatigue mécanique des roulements	Température Vibrations Couple Courants Vitesse
	Oscillations du couple de charge			
	Surcouple accidentels			
	Phénomène de balourd			
	Rupture de charge			
	Vitesse critique de rotation			
	Désalignement des différents arbres			
Perturbations mécaniques				

⇒ : entraîne

**Tableau I.1 : cause et conséquence de défauts de la charge sur le système**

**I.5.6.2. Exemples de fonctionnements perturbateurs.**

- application successive et répétitive de surcharges qui peut causer une fatigue mécanique des roulements et de l'arbre du moteur,
- des à-coups de couple et de charge qui se manifestent par des couples pulsatoires,
- des démarrages en force répétitifs.

La charge peut donc être le siège de mauvaises conditions de fonctionnement qui aboutissent à l'apparition de défauts tels que :

- déséquilibre de charge et oscillations du couple de charge,
- surcouple accidentels,
- à-coups de couple accidentels,
- perturbations mécaniques dues aux vibrations et phénomènes de résonance mécanique liés à la construction de la machine ou introduites par l'environnement extérieur,
- phénomène de balourd,
- désalignement des différents arbres en jeu pour assurer l'accouplement et la rotation,
- manque de lubrifiants,
- vitesse critique de rotation,
- rupture de la charge.

Tous ces défauts de la charge vont naturellement avoir une influence dégradante sur les grandeurs mécaniques mises en jeu au niveau de l'entraînement, à savoir le couple électromagnétique et la vitesse de rotation. En outre, et selon la stratégie de commande

adoptée pour le pilotage de l'entraînement, les grandeurs électriques vont être aussi plus ou moins affectées. [8]

### **I.6 Conclusion**

Une étude sur le moteur à induction a été présentée en passant par les éléments relatifs à la sûreté de fonctionnement dans les systèmes électromécaniques dont le moteur représente le maillon principal. Les différents éléments qui le constituent peuvent être soumis à des dégradations diverses. Des statistiques concernant les défaillances qui sont à l'origine des différentes pannes ont été établies. Ceci nous aidera à orienter notre travail dans les chapitres qui suivront vers la détection et le diagnostic des défauts les plus courants et les plus virulents qui peuvent paralyser la chaîne de production.

*Chapitre II : Les méthodes de détection et de  
diagnostic des défauts des moteurs à  
induction*

## **Chapitre II : Les méthodes de détection et de diagnostic des défauts des moteurs à induction**

### **II.1 Introduction**

Dans le milieu industriel, il existe une grande variété de méthodes de diagnostic dont le principe général repose sur une comparaison entre les données observées au cours du fonctionnement du système et les connaissances acquises sur son comportement normal et ses comportements de défaillance [22].

Dans ce chapitre, on présente quelques méthodes utilisées dans le domaine du diagnostic des moteurs électriques. Le but est de donner une idée générale des différentes approches utilisées pour le diagnostic des anomalies dans les machines électriques. D'après l'étude bibliographiques [12] [23] il existe trois approches pour faire le diagnostic ; l'approche modèle, approche signal et les approches modernes (diagnostic de connaissance). Le choix d'une approche est lié à la complexité technique du system étudié et aussi a des considérations économiques.

Tout au long de cette thèse, nous allons adopter l'approche signal plutôt que les autres approches ; donc il est essentiel d'identifier les méthodes de traitement de signal utilisé au diagnostic des moteurs à induction.

### **II.2 Classification des méthodes de diagnostic**

Il existe un nombre de travaux appréciable sur les méthodes de diagnostic dont le principe général est une comparaison entre les données observées au cours du fonctionnement du système à l'état normal et celle de défaillance.

Les méthodologies de surveillance sont généralement divisées en trois groupes :

Méthode de surveillance avec modèle, méthode de connaissance (Approches modernes de diagnostic) et méthode sans modèle

#### **II.2.1 Diagnostic interne (approche modèle)**

Ces méthodes de diagnostic sont généralement employées à partir d'une modélisation physique de la machine. Elles comparent l'évolution du modèle avec celle du processus physique. Considérons la machine asynchrone comme un processus expérimental dont il est question de rechercher, à chaque instant ou période d'échantillonnage, le modèle comportemental correspondant. La figure II.1 traduit cette procédure.

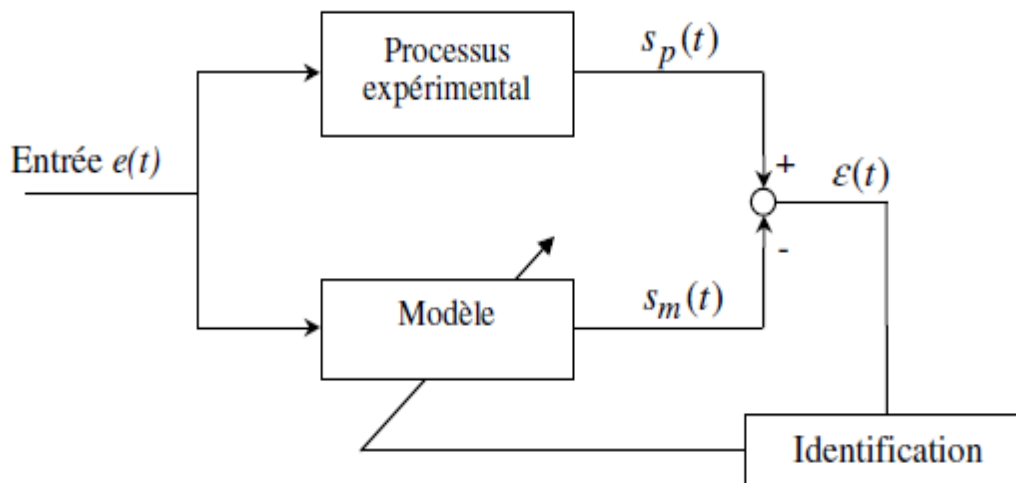


Figure II.1: Principe du diagnostic par modèle.

On part d'un modèle du processus à surveiller sain. Si la sortie du modèle  $s_m(t)$  correspond à la sortie du processus  $s_p(t)$ , alors le modèle fournit une estimation des grandeurs caractéristiques du fonctionnement sans défaut. La détection de défaillance est réalisée par le suivi de l'erreur de sortie  $e(t)$  (méthode des résidus) ou par la mise en évidence d'un écart entre le modèle (qui s'éloigne alors de la physique du phénomène) et le processus réel. Dans le second cas, l'erreur de sortie peut être minimisée en modifiant les paramètres structuraux du modèle. De cette manière les paramètres inhérents au système sont identifiés et suivis même en cas de défaillance. Le modèle adapté donne alors une signature du mode de fonctionnement. [24]

### II.2.2 Approche Signal [25] [18]

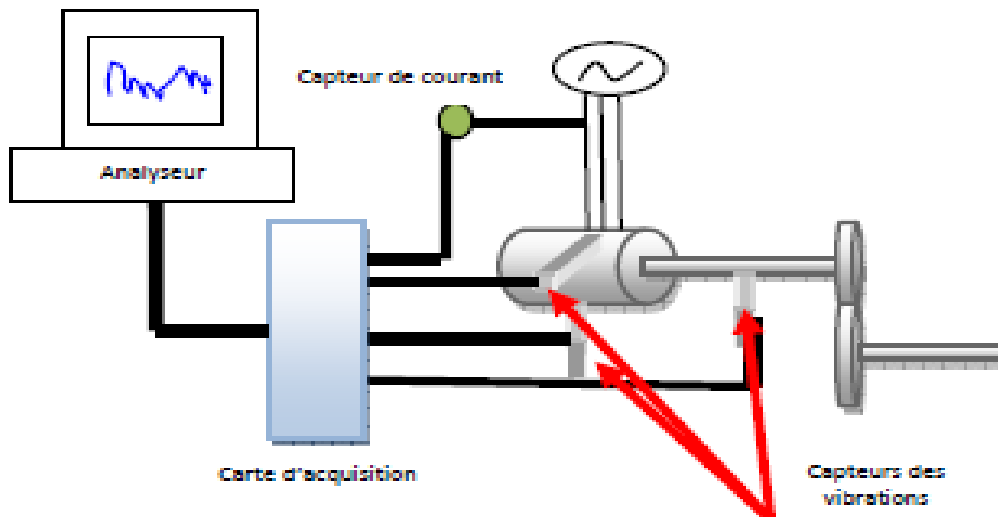
Cette méthode dite 'sans modèle' se base sur le traitement et l'analyse des signaux d'acquisitions fournis généralement par les capteurs en extrayant les informations les plus utiles et les plus pertinentes à des fins de diagnostic, en effet, la mesure d'un signal indique des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément dont la variation peut être reliée aux défauts. Ces signaux peuvent être dépendants ou indépendants du temps, monodimensionnels (exemple : signaux vibratoires, signaux de température) ou bidimensionnels dont les informations contenues restent intactes car l'analyse est indépendante par rapport aux fluctuations internes du système.

Le diagnostic d'une défaillance avec cette méthode s'effectue généralement en deux étapes, la première consiste à la détection du fonctionnement défaillant ensuite on identifie la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique basant sur un écart par comparaison aux

signatures observées dans les domaines temporels, fréquentiels et/ou statistiques.

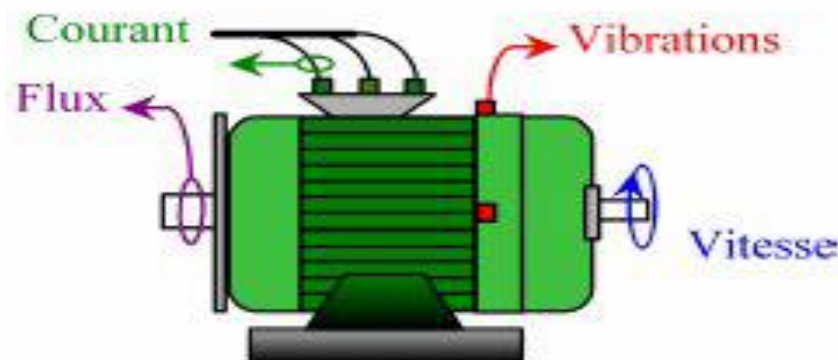
Ainsi le traitement du signal joue un rôle important pour caractériser les divers modes de fonctionnement par des signatures.

La surveillance via cette approche nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures.



**Figure II.2 : Principe du diagnostic par l'approche signal**

### II.2.2.1 Les grandeurs analysées par les méthodes de diagnostic :



**Figure II.3 : Les grandeurs mesurables dans le moteur asynchrone**

D'après la littérature, les principales techniques de diagnostic utilisées sont les suivantes : [18]

#### II.2.2.1.1. Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique. [26][27][28]

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

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la Fmm et de la perméance (P).  $B_s = Fmm \cdot P$  (II.2)

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

#### **II.2.2.1.2 Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite**

La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator et du rotor ce qui affecte la répartition des du champ magnétique dans et hors la machine. Plusieurs auteurs se sont penchés à l'exploitation du flux axial. En fait, si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de cette tension induite, peut être exploité pour détecter les différents défauts statoriques ou rotoriques [29] [30]

#### **II.2.2.1.3. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites**

En 1999 J. Milimonfared a proposé une autre technique pour la détection des défauts rotoriques dans les machines asynchrones. Cette technique, est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques, pendant la déconnexion du moteur du réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. Cependant, l'application de cette technique est impossible lorsqu'il s'agit d'un moteur appartenant à une chaîne de production.

#### **II.2.2.1.4. Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur [31]. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient major de cette méthode.

#### **II.2.2.1.5. Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée**

Il est clair que le niveau d'informations portées par le signal de la puissance est plus grand que celui donné par le courant d'une seule phase, ce qui représente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres. Cette méthode est utilisée pour la détection des défauts mécaniques ou encore les défauts électriques tels que les courts-circuits entre spires statorique. Dans cette direction, M. Drif et al. ont démontrés l'efficacité de l'utilisation de la puissance apparente pour la détection d'un défaut d'excentricité [32].

#### **II.2.2.1.6. Diagnostic par l'analyse du courant statorique (MCSA)**

Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car, il est très facile d'accès et nous permet de détecter aussi bien les défauts électriques que les défauts purement mécaniques [33][34][35]. Cette technique est dénommée dans la littérature "*Motor Current Signature Analysis*" (MCSA). Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par :

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

#### **II.2.2.1.7. Diagnostic par l'analyse de la tension de neutre**

Elle est basée sur l'exploitation du contenu spectral de la tension entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre de la machine asynchrone. Cette méthode a démontrée son efficacité quant à la détection des défauts statoriques [36], ainsi que les défauts rotoriques [37]

[38]. Cependant, l'utilisation de cette technique devient un peu compliquée dans le cas où le neutre de la machine est très loin par rapport à celui de la source.

### **II.2.3 Approches modernes de diagnostic [8]**

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 (IA), [39][40].

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.

#### **II.2.3.1. Les 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. L'architecture générale d'un système expert se compose principalement de deux éléments : une base de connaissance et un moteur d'inférence [41].

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 :

1. la sélection de règles dans la base de connaissance en fonction des faits établis,
2. la résolution des conflits entre les règles sélectionnées,
3. 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. Pour des applications industrielles, on pourra se référer à [42]. On peut aussi faire référence à quelques articles traitant le problème du diagnostic des moteurs électriques à partir de ces systèmes [43].

### **II.2.3.2. Les 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 [44].

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. Cette méthode présente différents 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, cette méthode présente plusieurs 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.

### **II.2.3.3. Les 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. 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.

#### **II.2.3.4. La 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 oeuvre, cette approche est privilégiée. De nombreux travaux [45] [46], ont permis de montrer l'intérêt de ce type d'approche. Dans le domaine du diagnostic des machines électriques, cette approche, quoique plus rarement utilisée, a été mise en oeuvre avec succès par [47][48], par exemple. 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 [49] [50]. 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.

Nous allons adopter l'approche signal permettant plutôt que les autres approches ; donc il est très important de prendre une idée générale sur les différentes méthodes utilisées pour le traitement de signal.

### **II.3 Analyse spectrale**

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les court-circuit 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.

#### **II.3.1 Analyse spectrale en ligne**

L'analyse en ligne ("on-line" en anglais) de certains processus devient indispensable de nos jours. En effet, une détection précoce et surtout rapide de la défaillance permet ainsi d'éviter au système d'évoluer vers un mode dangereux qui peut être fatal pour l'installation dans laquelle il fonctionne. Le principal objectif de cette section est de donner une méthodologie permettant de mettre en œuvre un système de surveillance en ligne basé sur la transformée de Fourier discrète glissante.

#### **II.3.2 Méthodes de traitement des signaux**

##### **II.3.2 1. Transformation de Fourier discrète "TFD"**

C'est une méthode classique d'estimation de la densité spectrale de la puissance d'un signal. La transformée de Fourier discrète, d'une suite finie de  $P$  échantillons  $\{p(0), p(1), \dots, p(P-1)\}$  se calcule grâce à la relation [51]

$$F(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}} \quad (\text{II.3})$$

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

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

##### **II.3.2 2. Transformée de Fourier rapide "TFR"**

C'est une transformée basée sur un algorithme de calcul rapide de la TFD. L'algorithme de base de cette transformée utilise un nombre de points  $N$  égal à une puissance de 2. Ceci permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la TFD, de [51] :

$$\text{Gain} = \frac{N}{\log_2(N)} \quad (\text{II.4})$$

Cette transformée de Fourier rapide est très utilisée lorsqu'il est indispensable d'obtenir une analyse fréquentielle en ligne dans certains processus à travers d'une fenêtre glissante d'observation [51] [52].

### II.3.2 .3 Périodogrammes

#### a. Périodogrammes simples

La densité spectrale de puissance "DSP"  $\hat{P}_{ps}(f)$  de la suite  $p(n)s$ , repose sur l'équation suivante [51]:

$$\hat{P}_{ps}(f) = \lim_{N \rightarrow \infty} E \left[ \frac{1}{(2N+1)} \left| \sum_{n=-N}^N P_s(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \right] \quad (\text{II.5})$$

Avec  $-\frac{1}{2T} \leq f \leq \frac{1}{2T}$  et T la période d'échantillonnage. La nécessité d'appliquer

l'espérance mathématique E provient du caractère aléatoire des signaux. En pratique, pour un ensemble de données  $p(n)s$  disponibles de  $n = 0$  à  $N-1$ , le calcul de la DSP s'effectue avec la relation [51]

$$\hat{P}_{ps}(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} P_s(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \quad (\text{II.6})$$

Cet estimateur est appelé périodogramme. L'estimation de la DSP peut être vue comme un filtrage du signal d'entrée par un banc de filtres du type passe-bande, dont chaque filtre élémentaire possède la réponse fréquentielle  $H(f)$  donnée par la relation :

$$H(f) = \frac{\sin(N\pi(f-f_0))}{N \sin(\pi(f-f_0))} e^{j(N-1)\pi(f-f_0)} \quad (\text{II.7})$$

Le signal de sortie d'un filtre élémentaire est ensuite échantillonné et son amplitude est élevée au carré pour déterminer la puissance de sa bande spectrale. La largeur de bande à -3[dB] de ces filtres est d'environ  $1/N$ . Lorsque N tend vers l'infini, la puissance de sortie du filtre correspond à celle d'une composante spectrale de fréquence  $f_0$  du signal d'entrée

#### b. Périodogrammes modifiés

Il est utilisé dans le cas où le nombre d'échantillons N est limité. Il peut être vu comme la multiplication terme à terme de la totalité du signal par la suite  $\omega(n) = \prod \{0, \dots, N-1\} (n)$ . On donne à cette dernière le nom de fenêtre rectangulaire. Ce fenêtrage introduit des ondulations parasites dans le spectre fréquentiel résultant. Par conséquent, il est courant

d'utiliser des fenêtres dites de pondérations pour permettre une meilleure visualisation des composantes du spectre fréquentiel. L'expression de la DSP est donnée par l'équation suivante [51]

$$\hat{P}_{ps}(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \omega(n) P_s(n) e^{-j2\pi fn} \right|^2 \quad (\text{II.8})$$

Le terme  $\omega(n)$ , rajouté dans l'équation, représente l'expression mathématique de la fenêtre de pondération choisie. Les fenêtres de pondération les plus connues sont : Hamming, Hanning, et Blackmann. Chacune d'elle permet de choisir le rapport souhaité entre la largeur du lobe principal et l'atténuation de la hauteur du lobe secondaire du spectre fréquentiel [65].

### II.3.2.4 Méthode de Park-Hilbert (P-H)

Elle est basée sur une combinaison entre l'approche du vecteur de Park étendu et la transformée de Hilbert. C'est une méthode parmi les plus connues dans le domaine du traitement de signal. Elle peut être utilisée pour analyser les signaux dans les différents secteurs techniques même en diagnostic [53][54][55]. Contrairement à la transformée de Fourier, qui transforme un signal issu du domaine temporel en un signal exprimé dans le domaine fréquentiel, la transformée de Hilbert ne change pas le domaine du signal. En effet, la transformée de Hilbert d'un signal dépendant du temps est aussi une fonction du temps. Mathématiquement, la transformée de Hilbert d'un signal réel  $x(t)$ , tel qu'un courant statorique, est défini par :

$$y(t) = HT\{x(t)\} = \frac{1}{\pi t} * x(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (\text{II.9})$$

En associant la fonction  $x(t)$  et sa transformée de Hilbert  $y(t)$ , on obtient ce qu'on appelle le signal analytique, défini par :

$$\bar{x}(t) = x(t) + jy(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (\text{II.10})$$

avec:

- $A(t) = \sqrt{[x^2(t) + y^2(t)]}$  l'amplitude instantanée de  $\bar{x}(t)$ . Elle reflète la modulation d'amplitude du signal réel  $x(t)$ .
- $\phi(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right)$  la phase instantanée de  $\bar{x}(t)$ . Elle reflète la modulation de phase du signal réel  $x(t)$ .

### II.3.2.5 La méthode de Prony

Dans cette méthode le signal est supposé être constitué d'une somme d'exponentielles comme montré (II.11) La méthode utilisée dans notre étude a été présentée dans [56].

Chaque terme dans (II.11) a quatre éléments : l'amplitude  $A_n$ , le facteur d'amortissement  $\sigma_n$ , la fréquence  $f_n$  et l'angle de phase  $\theta_n$ . Chaque composante exponentielle avec une différente fréquence est vue comme un mode unique du signal original  $y(t)$ . Les quatre éléments de chaque mode peuvent être identifiés de la représentation de l'espace d'état d'un enregistrement de données également prélevé. L'intervalle de temps entre chaque échantillon est T.

$$y(t) = \sum_{n=1}^N A_n e^{\sigma_n t} \cos(2\pi f_n t + \theta_n) \quad (\text{II.11})$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, N$$

En Utilisant le théorème d'Euler et laissant  $t = MT$ , les échantillons de  $y(t)$  sont :

$$y_M = \sum_{n=1}^N B_n \lambda_n^M \quad (\text{II.12})$$

$$B_n = \frac{A_n}{2} e^{j\theta_n} \quad (\text{II.13})$$

$$\lambda_n = e^{(\sigma_n + j2\pi f_n)T} \quad (\text{II.14})$$

L'analyse de Prony se compose de trois étapes. Dans la première étape, on calcule les coefficients d'un modèle de prédication linéaire. Le modèle linéaire d'affirmation (LPM) de l'ordre N montré en (II.15), est établi pour s'adapter à l'enregistrement de données également prélevé de  $y(t)$  avec la longueur M. Généralement la longueur M devrait être au moins trois fois plus grande que l'ordre N.

$$y_M = a_1 y_{M-1} + a_2 y_{M-2} + \dots + a_N y_{M-N} \quad (\text{II.15})$$

L'estimation des  $a_n$  les coefficients de LPM est essentielle pour le calcul de la fréquence, l'amortissement, l'amplitude et l'angle de phase d'un signal. Pour estimer ces coefficients exactement, beaucoup d'algorithmes peuvent être employés. Une représentation matricielle du signal à des instants d'échantillonnage différents peut être formée en écrivant séquentiellement la prévision linéaire du  $y_M$  répétitivement. En inversant la représentation matricielle, les coefficients linéaires  $a_n$  peuvent être dérivés de (II.16)

Un algorithme, qui utilise une décomposition en valeurs singulières de la matrice d'inversion pour dériver les coefficients de LPM, est appelé algorithme SVD.

$$\begin{bmatrix} y_N \\ y_{N+1} \\ \vdots \\ y_{M-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{N-1} & y_{N-2} & \dots & y_0 \\ y_N & y_{N-1} & \dots & y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{M-2} & y_{M-3} & \dots & y_{M-N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Dans la seconde étape, les racines  $\lambda_n$  du polynôme caractéristique représentées par (II.17) associé à la LPM de la première étape sont dérivées. Le facteur d'amortissement  $\sigma_n$ , et la fréquence  $f_n$  sont calculés à partir de la racine  $\lambda_n$  selon (II.14).

$$\lambda^N - a_1 \lambda^{N-1} - \dots - a_{N-1} \lambda - a_N = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \dots (\lambda - \lambda_n) \dots (\lambda - \lambda_N) \quad (\text{II.17})$$

Dans la dernière étape, les amplitudes et les angles de phase du signal sont résolus par la méthode des moindres carrés. Selon (II.12), l'équation (II.18) est construite en utilisant les racines résolues  $\lambda_n$ .

$$y = \varphi B \quad (\text{II.18})$$

$$y = [y_0 \quad y_1 \quad \dots \quad y_{M-1}]^T \quad (\text{II.19})$$

$$\varphi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_1^{M-1} & \lambda_2^{M-1} & \dots & \lambda_N^{M-1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$B = [B_1 \quad B_2 \quad \dots \quad B_N]^T \quad (\text{II.21})$$

L'amplitude  $A_n$  et l'angle de phase  $\theta_n$  ; sont ainsi calculés à partir des variables  $B_n$  selon (II.13). Le plus grand avantage de l'analyse de Prony est sa capacité d'identifier le facteur d'amortissement de chaque mode dans le signal. Grâce à cet avantage, les harmoniques transitoires peuvent être identifiés avec précision.

#### **II.4 Conclusion**

Nous avons exposé dans ce chapitre les trois catégories de diagnostic en ciblant brièvement des techniques de diagnostic qui s'articule sur le diagnostic par l'approche signal qui est l'objectif de notre travail.

Il est important de souligner que le choix d'une de ces méthodes dépend essentiellement sur la possibilité de traduire l'état de fonctionnement de la machine avec un modèle mathématique (cas de diagnostic interne) ainsi que la capacité d'apprentissage et de généralisation (cas de diagnostic de connaissance) sans oublier les considérations techniques et économiques (cas de diagnostic externe).

Dans le chapitre qui suivra, nous présenterons la modélisation et la simulation du moteur asynchrone à l'état sain sous Matlab/Simulink afin de pouvoir étudier son comportement sain et défaillant.

*Chapitre III : modélisation et simulation du  
moteur à induction*

## Chapitre III modélisation et simulation du moteur à induction

### III.1 Introduction

L'étude et la mise au point des méthodes de diagnostic du moteur asynchrone nécessitent l'aménagement d'un environnement expérimental riche. En effet, les méthodes élaborées doivent être testées pour diverses conditions de fonctionnement et pour des machines de caractéristiques différentes ce qui est rarement possible en pratique ; c'est pour cette raison que la modélisation et la simulation des machines électriques constituent une étape primordiale en matière du diagnostic. [57]

Son avantage est de réduire le coût de l'installation et d'éviter la dégradation du système. Dans la littérature il existe plusieurs méthodes pour la modélisation de la machine asynchrone tels que les schémas équivalents, les méthodes de calculs du champ, des éléments finis, des différences finis et équations intégrales.

### III. 2 Modélisation du moteur à induction [58, 59, 60,19].

#### III.2.1 État Sain

##### III.2.1.1 Équations électriques et magnétiques

Puisque la machine asynchrone est un système complexe et plusieurs phénomènes compliqués interviennent lors de son fonctionnement ; il est généralement nécessaire de considérer des hypothèses simplificatrices pour avoir un modèle simple de la machine.

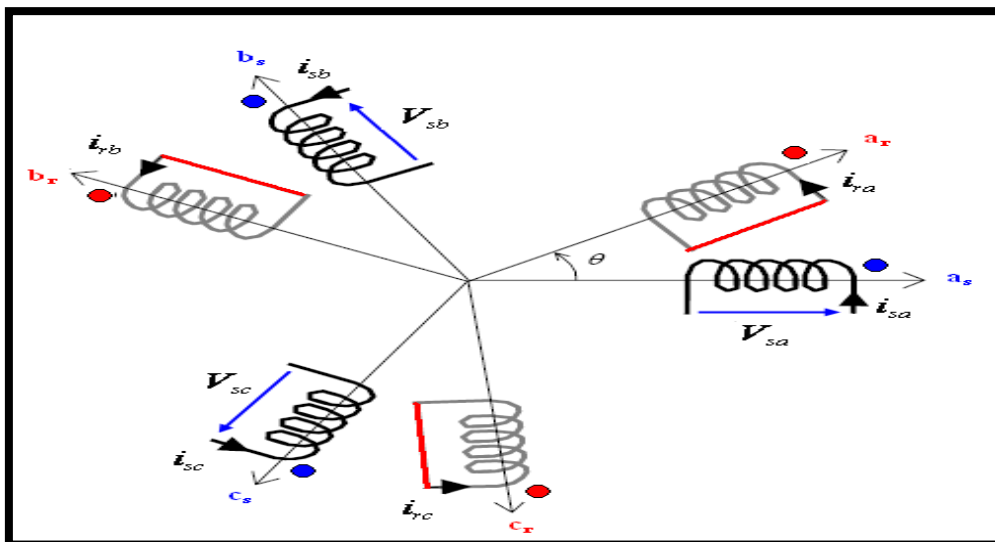


Figure III.1 : Modèle triphasé de la machine asynchrone

### III.2.1.1.1 Hypothèses simplificatrices

Le modèle de la machine est établi en tenant compte des hypothèses de base suivantes :

- La machine est symétrique à entrefer constant ;
- La répartition dans l'entrefer de la FMM et du flux est sinusoïdale;
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et à perméabilité constante;
- Les pertes fer par hystérésis et courants de Foucault sont négligeables;
- L'effet des encoches est négligeable.

Les équations de la machine asynchrone obéissent aux lois et conventions fondamentales de l'induction électromagnétiques qui sont les lois de Lenz et de Faraday

Les équations des tensions des trois phases statoriques et rotoriques s'écrivent, en tenant compte des hypothèses simplificatrices citées précédemment.

### III.2.1.1.2 Équations de tensions

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

$R_s, R_r$  désignent les résistances par phase du stator et du rotor.

Ou de manière plus raccourcie :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + (d/dt)[\Phi_{sabc}] \quad (\text{III.2})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + (d/dt)[\Phi_{rabc}] \quad (\text{III.3})$$

Le rotor est en court-circuit, donc, les tensions rotoriques sont nulles et on écrira:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad (\text{III.4})$$

### III.2.1.1.3 Équations des flux

Les équations électromagnétiques de liaison entre le stator et le rotor sont :

$$\varphi_s = L_{ss}.I_s + M_{sr}.I_r \quad (\text{III.5})$$

$$\varphi_r = L_{rr}.I_r + M_{rs}.I_s \quad (\text{III.6})$$

Avec:

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.7}) \quad , \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

(L<sub>ss</sub>): matrice d'inductances statoriques

(L<sub>rr</sub>) : matrice d'inductances rotoriques.

L'inductance mutuelle entre phase statorique et rotorique (matrice de couplage rotor- stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = L_m \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

la machine est défini par 5 inductances :

- 1) l'inductance propre d'une phase statorique  $l_s$ ,
- 2) l'inductance propre d'une phase rotorique  $l_r$ ,
- 3) l'inductance mutuelle entre phase statorique  $M_s$ ,
- 4) l'inductance mutuelle entre phase rotorique  $M_r$ ,

- 5) L'inductance mutuelle entre phase rotorique et phase rotorique  $[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$

$L_m$  : maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor.

En utilisant la notion des inductances mutuelles et la notation complexe aux grandeurs sinusoïdales à la pulsation  $\omega_s$  on peut écrire:

$$\bar{\phi}_s = L_s \bar{I}_s + M_{sr} \bar{I}_r \quad (\text{III.10})$$

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + j \omega_s \bar{\phi}_s \quad (\text{III.11})$$

$$\bar{\phi}_r = L_r \bar{I}_r + M_{rs} \bar{I}_s \quad (\text{III.12})$$

$$0 = R_r \bar{I}_r + j \omega_s \bar{\phi}_r \quad (\text{III.13})$$

$L_s$  et  $L_r$  représentent respectivement l'inductance cyclique statorique et rotorique

$M_{rs} = (3/2)m_{sr}$  est l'inductance mutuelle cyclique.

### III.2.1.1.4 Équation du couple électromagnétique

Les relations donnant le couple électromagnétique sont nombreuses et dépendent du modèle choisi.

En se référant au schéma de (la figure III.1), le couple électromagnétique en régime permanent s'écrit:

$$C_e = \frac{P_m}{\Omega} = 3 \frac{P}{\omega_s} \frac{R'}{g} (I'_r)^2 \quad (\text{III.14})$$

$$\overline{I'_r} = \frac{V_s - R_s \overline{I_s}}{\frac{R'_r}{g} + jL'\omega_s} \quad (\text{III.15})$$

Si on néglige la résistance statorique on aura:

$$I'_r = \frac{V_s^2}{\sqrt{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + (L'\omega_s)^2}} \quad (\text{III.16})$$

Pour un glissement faible on peut écrire:

$$C_e = 3 \frac{P}{\omega_s} V_s^2 \frac{g}{R'_r} \quad (\text{III.17})$$

Le couple varie linéairement en fonction du glissement.

Le couple maximum correspond à:

$$\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 = (L'\omega_s)^2 \quad (\text{III.18})$$

$$g_m = \frac{R'_r}{L'\omega_s} \quad (\text{III.19})$$

On aura alors:

$$C_{e_{\max}} = \frac{P}{L'_r} \left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2 \quad (\text{III.20})$$

### III.2.1.2 Transformation triphasé-biphasé

Le but de l'utilisation de cette transformation est de passer d'un système triphasé **abc** vers un système biphasé **αβ**.

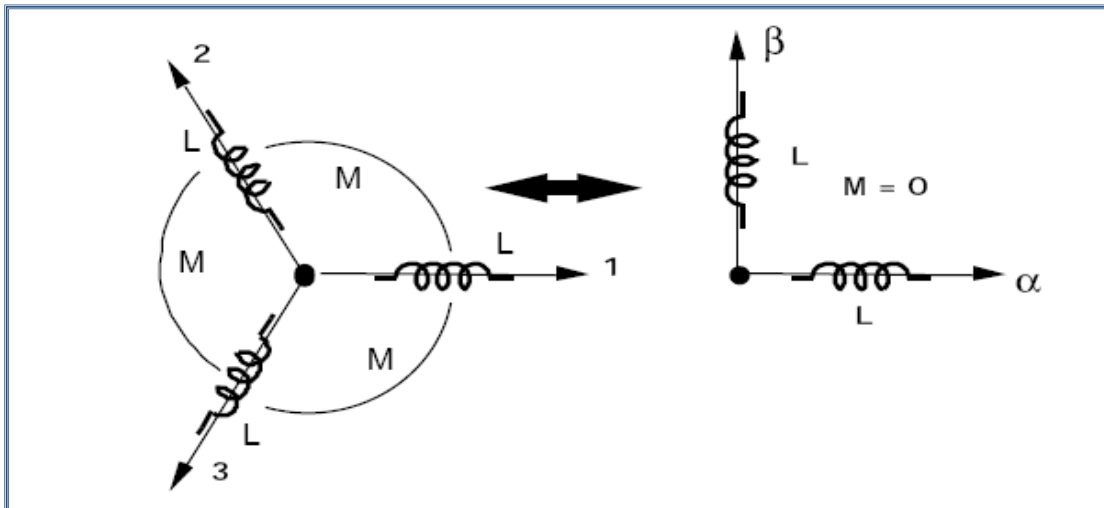


Figure III .2 : Passage du système triphasé au système biphasé.

Il existe principalement deux transformations: *CLARKE* et *CONCORDIA*. La transformation de *CLARKE* conserve l'amplitude des grandeurs mais pas la puissance ni le couple (*on doit multiplier par un coefficient 3/2*). Tandis que celle de *CONCORDIA*, qui est normée, conserve la puissance mais ne conserve pas les amplitudes.

### III.2.1.2.1 Transformation de Clarke

Le passage d'un système triphasé **abc** à un système biphasé de CLARKE **α β** s'écrit:

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{23}} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \text{ c.à.d. } [X_{\alpha\beta}] = C_{23} [X_{abc}] \quad (\text{III.21})$$

Avec :

$$C_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

Le passage inverse s'écrit:

$$[X_{abc}] = C_{32} [X_{\alpha\beta}] \text{ Avec } C_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

Le choix de la matrice de passage non normée (Clarke) est pratique en commande où l'on traite des grandeurs  $\mathbf{dq}$ . Cela permet, par exemple, d'apprécier directement le module du courant absorbé par le moteur.

### III.2.1.2.2 Transformation de Concordia

Le passage d'un système triphasé  $abc$  à un système biphasé  $\alpha\beta$  s'écrit:

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{23}} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \text{ c.à.d. } \begin{bmatrix} X_{\alpha\beta} \end{bmatrix} = T_{23} \begin{bmatrix} X_{abc} \end{bmatrix} \quad \text{(III.24)}$$

Avec :

$$T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad \text{(III.25)}$$

Le passage inverse s'écrit :

$$\begin{bmatrix} X_{abc} \end{bmatrix} = T_{32} \begin{bmatrix} X_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \text{ Avec } T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad \text{(III.26)}$$

Le choix d'une matrice normée (*Concordia*) est souvent utilisé pour des raisons de symétrie de transformation directe et inverse.

### III.2.1.2.3 Transformation de Park :

La transformation de la machine triphasé à une machine biphasé consiste à remplacer tout enroulement triphasé (a, b, c) par deux enroulements équivalents, l'un sur l'axe direct ( $\mathbf{d}$ ) et l'autre sur l'axe en quadrature ( $\mathbf{q}$ ).

La transformation qui traduit ce passage du système triphasé (a, b, c) au système biphasé ( $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{q}$ ) est dite de Park.

Le repère ( $\mathbf{d}$ ,  $\mathbf{q}$ ) est tournant ou fixe.

La matrice de la transformation de PARK qui conserve la puissance instantanée est défini comme suit:

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} \quad \text{(III.27)}$$

Sous forme plus compacte.

$$[X_{0dq}] = p(\theta)[X_{abc}] \quad \text{(III.28)}$$

$$p(\theta) = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad \text{(III.29)}$$

La matrice de la transformation de PARK qui conserve les amplitudes est défini comme suit:

$$p(\theta) = 2/3 \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad \text{(III.30)}$$

### III.2.1.3 Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone

Pour cette étude, on se restreint à la transformation de Park qui conserve la puissance instantanée. La transformation de Park des grandeurs statoriques et rotoriques est donnée par les équations suivantes:

$$[V_{0dq}]_i = p(\theta)[V_{abc}]_i \quad \text{(III.31)}$$

$$[i_{0dq}]_i = p(\theta)[i_{abc}]_i \quad \text{(III.32)}$$

$$[\varphi_{0dq}]_i = p(\theta)[\varphi_{abc}]_i \quad \text{(III.33)}$$

$i = s, r(\text{stator}, \text{rotor})$ .

Cette transformation est schématisée par la figure représentée ci-dessous.

$\theta_s$ : Déphasage entre l'axe (A) de la phase statorique et l'axe direct de Park.

$\theta_r$ : Déphasage entre l'axe (A) de la phase statorique et l'axe (a) de la phase rotorique.

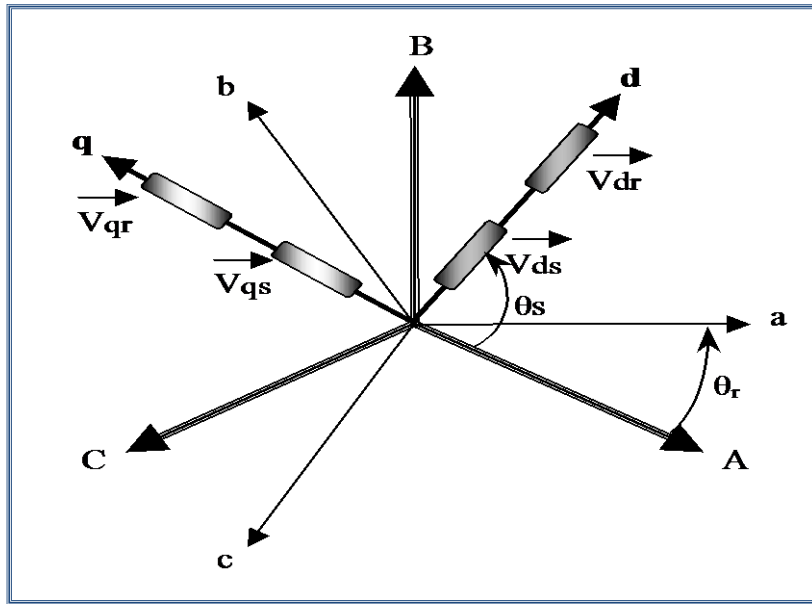


Figure III .3 Représentation vectorielle des enroulements de la Machine Asynchrone.

#### III.2.1.4 Équations Électriques

Nous avons exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère **dq** qui fait un angle électrique ( $\theta_s$ ) avec le stator et qui fait également un angle électrique ( $\theta_r$ ) avec le rotor.

Il existe trois choix importants, on peut fixer le repère **dq** : au stator, au rotor ou au champ tournant. Étant donné que le repère **dq** est mobile, il nous appartient de calculer les angles des transformations de Park ( $\theta_s$ ) et ( $\theta_r$ ) afin d'effectuer les rotations.

On peut donc le lier à un référentiel mobile comme le champ tournant qui est le champ créé par le bobinage statorique et qui tourne, en régime permanent, à la vitesse de synchronisme.

Notons :

$$\omega_s = \dot{\theta}_s \text{ Pulsation statorique}$$

$$\omega_r = \dot{\theta}_r \text{ Pulsation rotorique.}$$

$$\omega = \omega_s - \omega_r = \dot{\theta} = p\Omega \text{ Pulsation mécanique.}$$

Nous pouvons écrire :

$$\begin{cases}
 V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\
 V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\
 0 = R_r i_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\
 0 = R_r i_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt}
 \end{cases} \quad \text{(III.34)}$$

### III.2.1.5 Équations magnétiques

$$\begin{cases}
 \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\
 \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\
 \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\
 \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs}
 \end{cases} \quad \text{(III.35)}$$

### III.2.1.6 Expression du couple électromagnétique

On sait que la transformation de PARK conserve la puissance instantanée ce qui nous permet d'écrire:

$$P_e = V_{s1} i_{s1} + V_{s2} i_{s2} + V_{s3} i_{s3} = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \quad \text{(III.36)}$$

Faisons intervenir les équations (3.15), (3.16) on obtient :

$$P_e = [R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq}] I_{sd} + [R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} + \omega_s \varphi_{sd}] I_{sq} \quad \text{(III.37)}$$

$$P_e = [R_s I_{sd}^2 + R_s I_{sq}^2] + [\frac{d\varphi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} I_{sq}] + [\omega_s (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd})] \quad \text{(III.38)}$$

Le premier terme de cette expression représente les pertes joules dans les enroulements statoriques et rotoriques. Le deuxième terme correspond à l'énergie magnétique stockée dans le circuit magnétique.

Le dernier terme ne peut donc représenter que la puissance électrique transformée en puissance mécanique, puisque notre modélisation néglige les pertes fer.

Cette puissance peut se mettre sous la forme:

$$P_e = C_e \Omega_s = \omega_s (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{III.39})$$

$$C_e = p(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{III.40})$$

Il est possible d'obtenir d'autres expressions du couple instantané.

### III.2.1.7 équation mécanique

L'équation de mouvement est donnée d'après la loi fondamentale de la dynamique.

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r \quad (\text{III.41})$$

- ⊕  $J$  : Moment d'inertie des pièces tournantes.
- ⊕  $\Omega$  : Vitesse mécanique du rotor en tr /mn
- ⊕  $C_e$  : Couple électromagnétique.
- ⊕  $C_r$  : Couple résistant (couple de charge).

### III.2.1.8 Modèle de la machine asynchrone alimentée en tension

Plusieurs façons sont possibles pour le choix du vecteur d'état, cela dépendra de l'objectif tracé. On considère les flux statoriques ( $\varphi_{ds}$ ,  $\varphi_{qs}$ ) et les courants statoriques ( $I_{ds}$ ,  $I_{qs}$ ) ainsi que la vitesse de rotation de rotation  $\omega_r$  comme variables d'état

La référence choisie de notre étude de modèle mathématique obtenu suit à cette modélisation suivant :

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = -R_s \cdot i_{ds} + V_{ds} \quad (\text{III.42})$$

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = -R_s \cdot i_{qs} + V_{qs} \quad (\text{III.43})$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = V_{ds} \frac{L_r}{L_r \cdot L_r - L_m^2} + \omega \frac{L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \varphi_{qs} + \varphi_{ds} \frac{R_r}{L_r \cdot L_s - L_m^2} - \omega i_{qs} - \frac{(L_r \cdot R_r + L_s \cdot R_s)}{L_s \cdot L_r - L_m^2} I_{ds} \quad (\text{III.44})$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = -\omega \frac{L_r}{L_s.L_r - L_m^2} \varphi_{ds} + \frac{R_r}{L_s.L_r - L_m^2} \varphi_{qs} + \frac{l_r}{L_r.L_s - L_m^2} V_{qs} - \frac{(L_s.R_r + L_r.R_s)}{L_s.L_r - L_m^2} i_{qs} + \omega i_{ds} \quad \text{(III .45)}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} \left[ \frac{p}{j} \varphi_{ds} i_{qs} - \frac{p}{j} \varphi_{qs} i_{ds} \right] - \frac{C_r}{j} \quad \text{(III .46)}$$

Ces équations nous permettent d'étudier le comportement dynamique de la machine asynchrone à vide et en charge alimentée directement à pleine tension ou à tension délivrée par l'onduleur.

### **III.2.2 État défectueux (cas de rupture de barres rotoriques)**

#### **III.2.2.1 Modèle Multi-enroulements**

Le diagnostic par l'approche model nécessite l'application d'un model capable de traduire le comportement de la machine dans les différents états de fonctionnement. A cet effet, nous avons développés un modèles de types multi enroulements qui a prouvé sa fiabilité par la comparaison de ces résultats de simulation avec celles de l'expérimental

Le model de ce type nous donne la possibilité de mesurer les paramètres de la machine facilement et ne nécessite pas d'outils de calcul complexes.

L'objectif de ce modèle est de montrer l'influence des défauts étudiés sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants.

Dans ce model, un moteur asynchrone triphasé à cage est considéré. Le rotor de ce moteur est constitué de  $N_b$  barres isolées, uniformément réparties sur la surface du rotor et court circuitées par deux anneaux. Le nombre des équations différentielles obtenus est égale aux nombres de barres plus un.

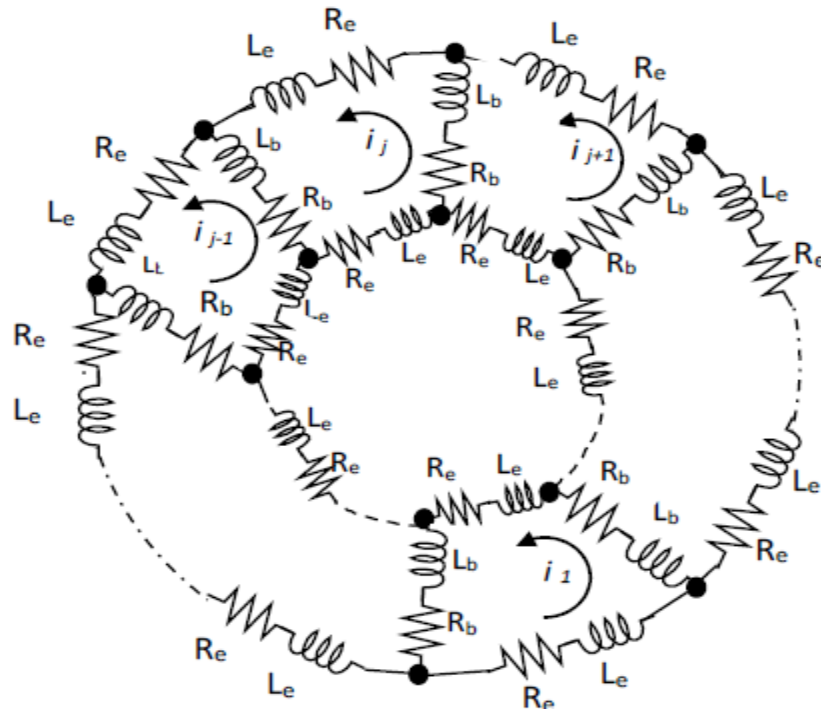


Figure III.4 : Schéma équivalent d'un rotor à cage

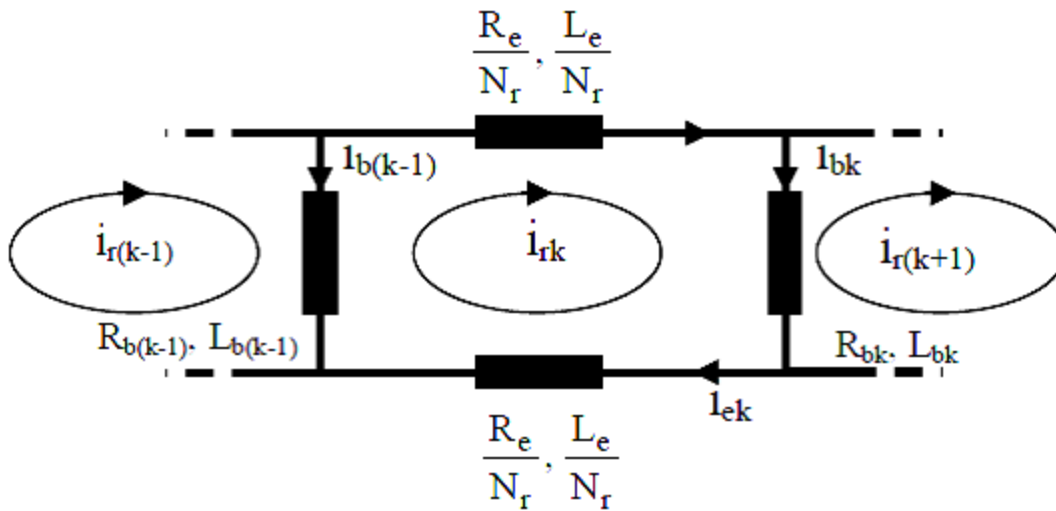


Figure III.5 : Schéma équivalent d'une maille du rotor

$$[v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad (\text{III.47})$$

Avec

$$[\phi_{sabc}] = [L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rk}] \quad (\text{III.48})$$

Où

$[v_{sabc}] = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}]^T$  le vecteur de tensions statoriques.

$[i_{sabc}] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$  le vecteur de courants statoriques.

$[v_{sabc}] = [i_{sa} i_{sb} \dots i_{sc} \dots i_{r(N_r-1)}]^T$  le vecteur de courants dans les mailles rotoriques.

$[\phi_{sabc}] = [\phi_{sa} \phi_{sb} \phi_{sc}]^T$  le vecteur de flux statoriques.

Les matrices  $[R_s]$ ,  $[L_s]$  et  $[M_{sr}]$  sont données dans l'annexe.1.

### III.2.2.1.1 Équations de tensions au rotor

L'équation de tension pour une maille 'k' de la cage rotorique est donnée par :

$$R_{bk} i_{r(k-1)} + \left( 2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{bk} \right) i_{rk} - R_{bk} i_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} i_e + \frac{d}{dt} \phi_{rK} = 0 \quad (\text{III.49})$$

Où

$$\phi_{rK} = \left( L_{rp} + 2L_b + 2 \frac{L_e}{N_r} \right) i_{rk} - M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq K}}^{N_r-1} i_{rj} - L_b (i_{r(k-1)} + i_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} i_e -$$

$$L_{sr} \left[ \cos(\theta_r + ka) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \right] [i_{sabc}] \quad (\text{III.50})$$

Il faut compléter les équations des circuits du rotor par celles de l'anneau de court-circuit :

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{d}{dt} i_{rk} - R_e i_e - L_e \frac{d}{dt} i_e = 0 \quad (\text{III.51})$$

### III.2.2.1.2 Equation globale de tension

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [I] \quad (\text{III.52})$$

Avec

$[V] = [v_{sa} v_{sb} v_{sc} : 00 \dots 0 : 0]^T$  : le vecteur global des tensions  $(N_r+4 \times 1)$ .

$[I] = [i_{sa} i_{sb} i_{sc} : i_{r0} i_{r1} \dots i_{rk} \dots i_{r(N_r-1)} : i_e]^T$  le vecteur global des courants  $(N_r+4 \times 1)$ .

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & \vdots & [0] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [0] & \vdots & [R_r] \end{bmatrix} \quad (\text{III.53})$$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & \vdots & [M_{sr}] \\ \dots & \vdots & \dots \\ [M_{sr}]^T & \vdots & [L_r] \end{bmatrix} \quad (\text{III.54})$$

$$\text{Et } d \frac{[L]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots & \vdots & \dots \\ \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} & \vdots & [0] \end{bmatrix} \quad (\text{III.55})$$

On remarque que la matrice  $[M_{sr}]$  dépend du temps, ce qui nécessite l'inversion de la matrice inductance  $[L]$ , de dimension  $N_r+4$ , à chaque pas de calcul. Pour rendre cette matrice constante on applique la transformation de Park sur les équations de tensions globales. Le repère de Park doit être lié au rotor. Finalement la mise en équation du modèle de la machine conduit à un système complet de dimension  $N_r+4$  :

$$\begin{bmatrix} v_{os} \\ v_{ds} \\ v_{qs} \\ \dots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} + [R_{tr}] \begin{bmatrix} i_{os} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \\ \dots \\ i_{r0} \\ \vdots \\ i_{rk} \\ \vdots \\ i_{r(N_r-1)} \\ \dots \\ i_e \end{bmatrix} \quad (\text{III.56})$$

$[L_{tr}]$  et  $[R_{tr}]$  sont les matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park. Elles sont présentées dans l'annexe 2. A ces équations, on ajoute celles électromécaniques afin d'avoir la vitesse électrique de rotation et la position  $\theta_r$  du rotor.

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \omega_m) \quad (\text{III.57})$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (\text{III.58})$$

$$T_e = \frac{\sqrt{3}}{2} P L_{sr} \{ i_{qs} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \cos(ka) - i_{ds} \sum_{k=0}^{N_r-1} i_{rk} \sin(ka) \} \quad (\text{III.59})$$

### III.2.2.1.3 Modélisation du défaut de cassure des barres

D'après [61]. On peut modéliser la cassure d'une barre par l'annulation du courant qui traverse cette barre. Les matrices des inductances et des résistances sont modifiées de telle façon que : si la barre  $k$  est rompue, le courant  $i_{rk}$  doit être nul. Dans ce cas, le courant dans la maille  $(k-1)$  devient égal au courant dans la maille  $(k)$ , c'est-à-dire,  $(i_{r(k-1)} = i_{rk})$ . Ceci est traduit dans les matrices des inductances et des résistances, par l'addition des deux colonnes et des deux lignes liées aux courants  $i_{r(k-1)}$  et  $i_{rk}$ . Le courant  $i_{rk}$  est donc supprimé du vecteur des courants, en d'autre terme l'ordre du système est réduit.

### **III.3 La simulation de la machine asynchrone à l'état sain et l'état défectueux**

La simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes.

Actuellement, plusieurs outils de simulation sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires, parmi lesquels MATLAB/ SIMULINK<sup>TM</sup>. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran. SIMULINK<sup>TM</sup> est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires; une extension de MATLAB<sup>TM</sup>, dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. [62]

Afin de pouvoir donner un exemple de diagnostic par l'approche modèle, nous allons faire une étude de l'impact de la présence d'un défaut de rupture de barre sur les grandeurs de la machine sur le logiciel SIMULINK

#### **III.3.1 Bloc de simulation**

La figure III.6 représente le modèle SIMULINK du moteur asynchrone décrit par les équations de modélisation

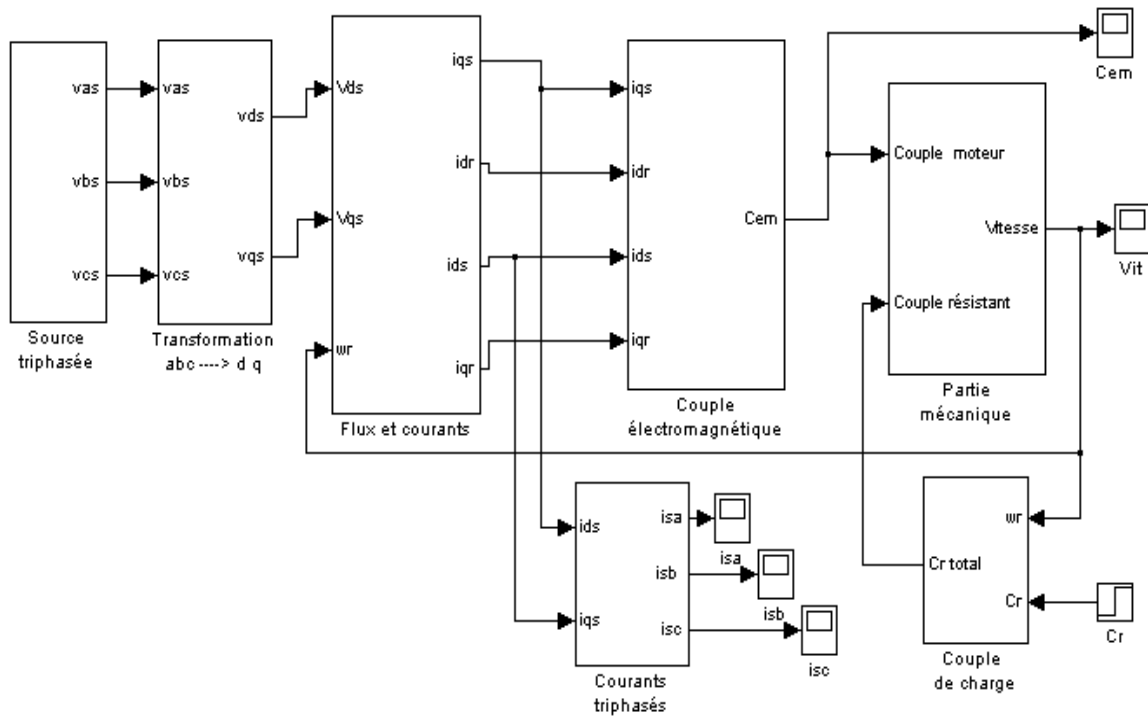


Figure III.6 Bloc SIMULINK du moteur asynchrone

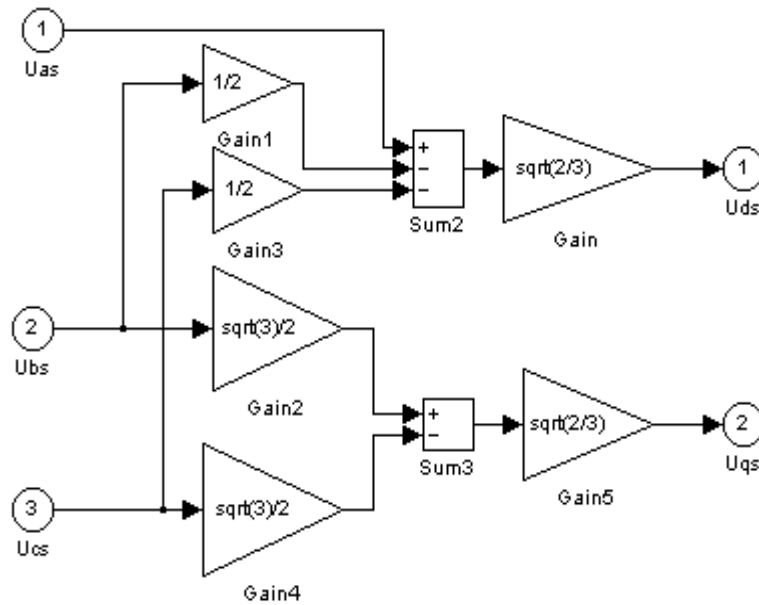
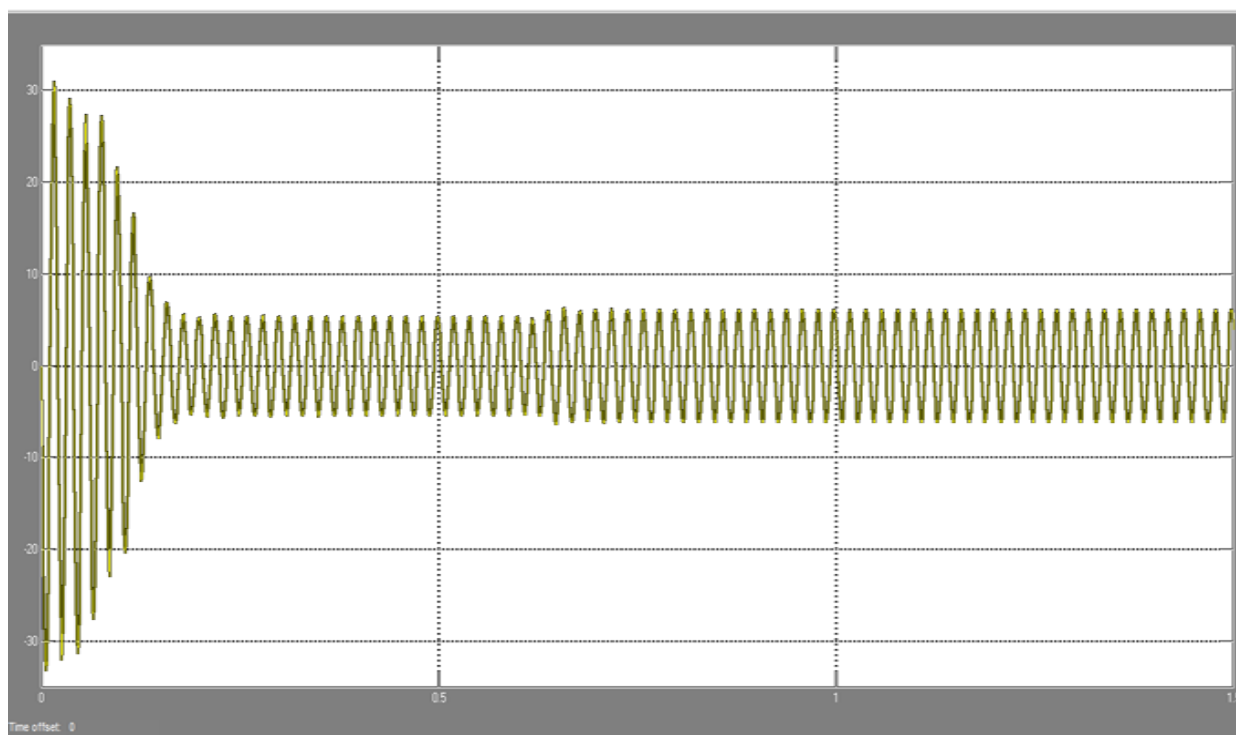
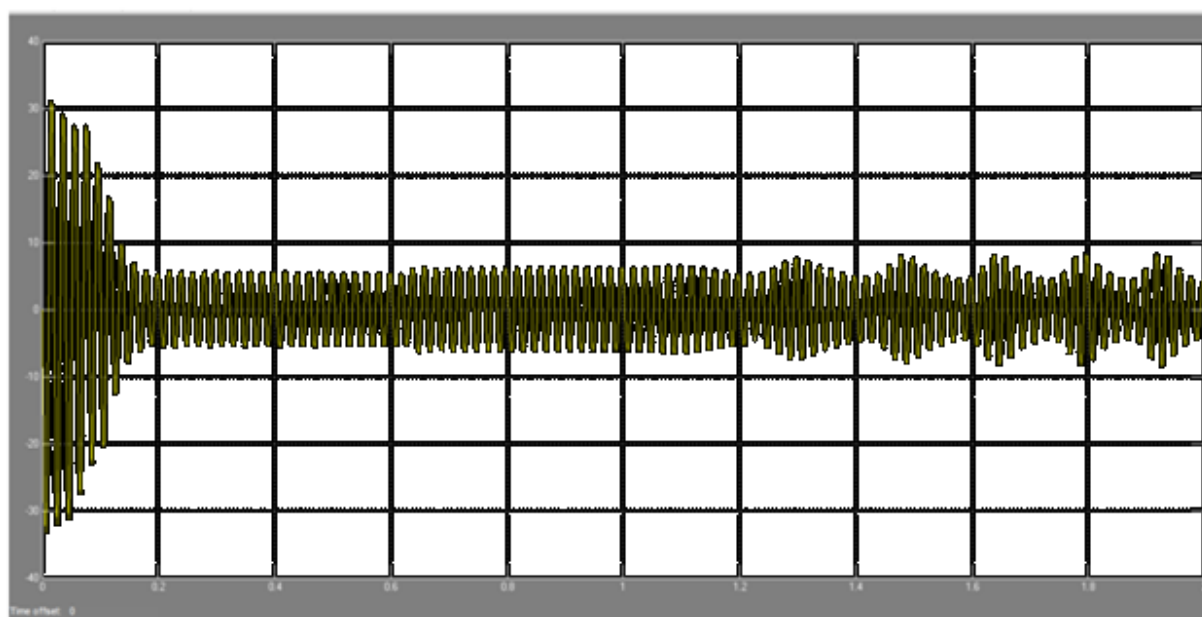


Figure III.7 : Bloc de transformation triphasée-biphasé



(A)

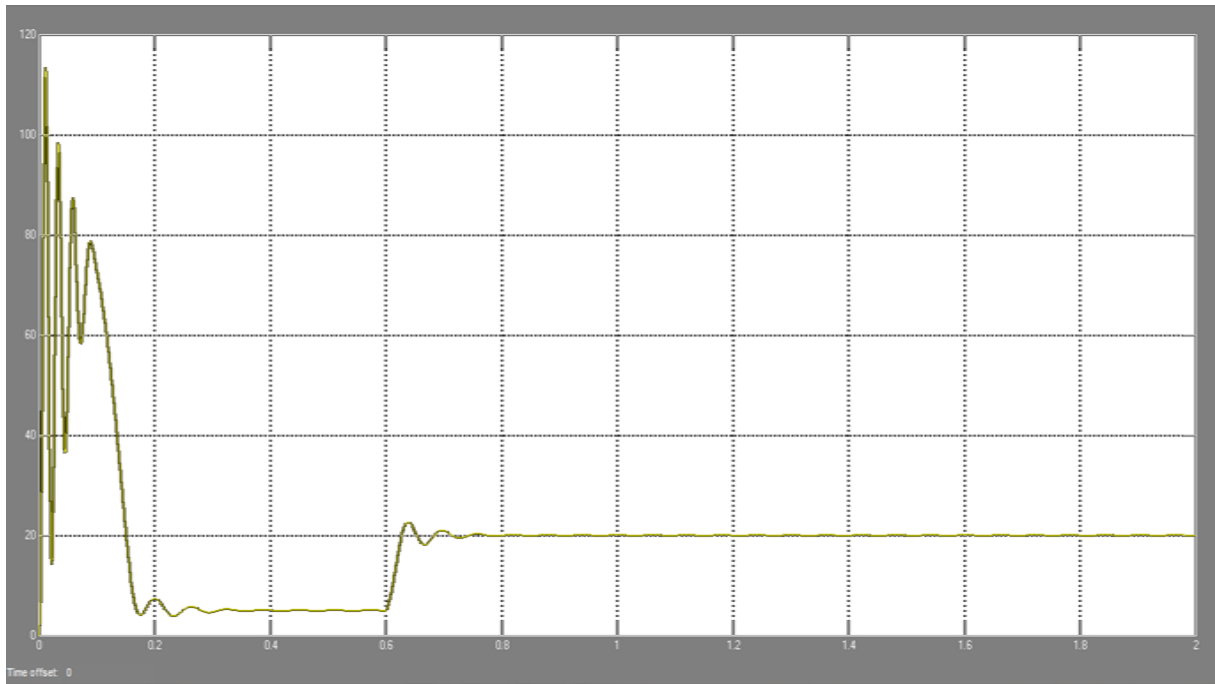


(B)

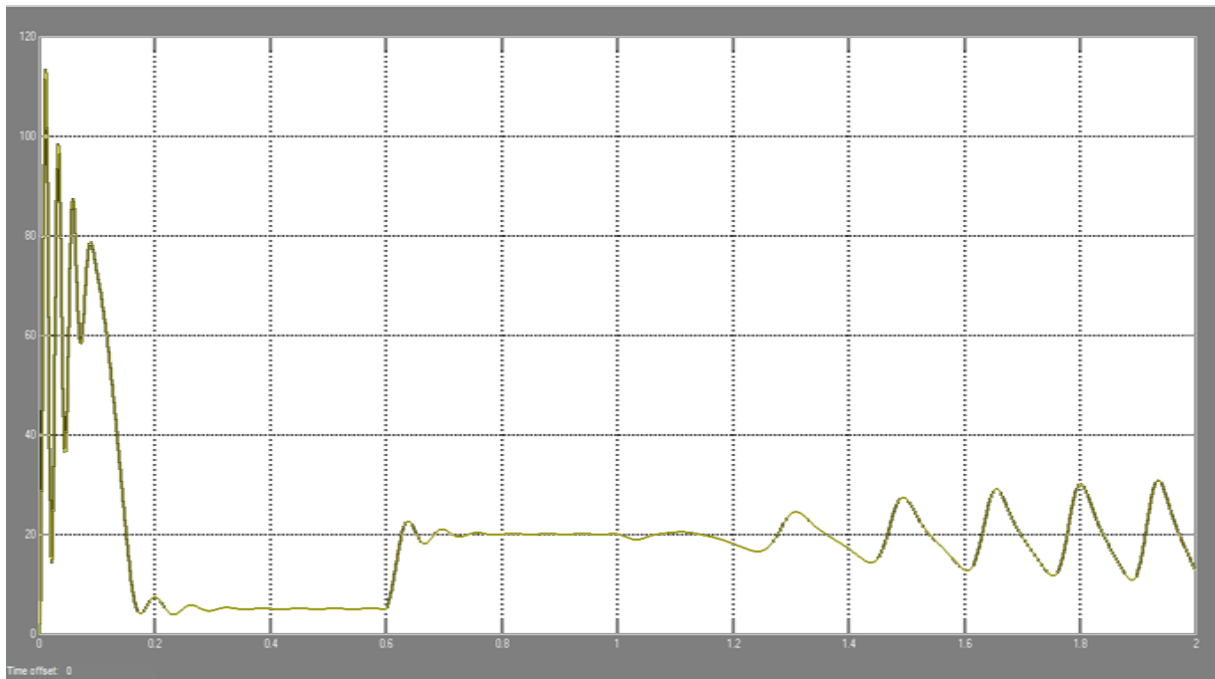
Figure III.8 : courant statorique.  $i_a$  [A]

(A) état sain

(B) état défectueux



(A)

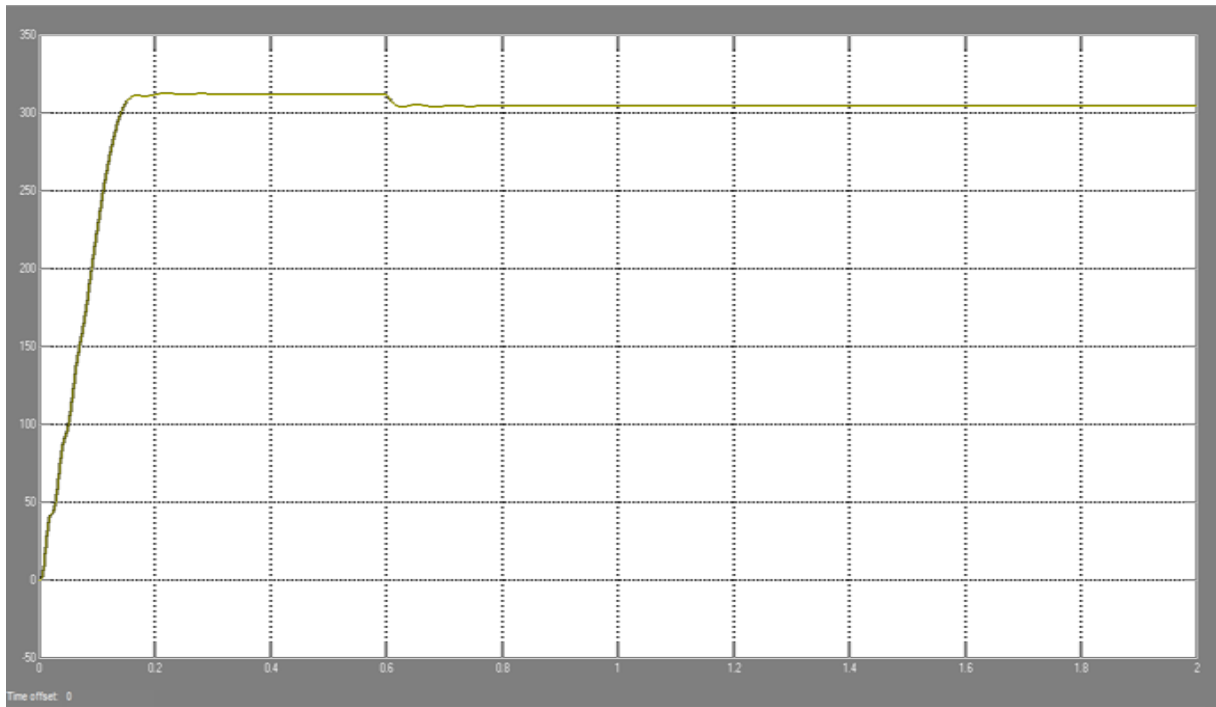


(B)

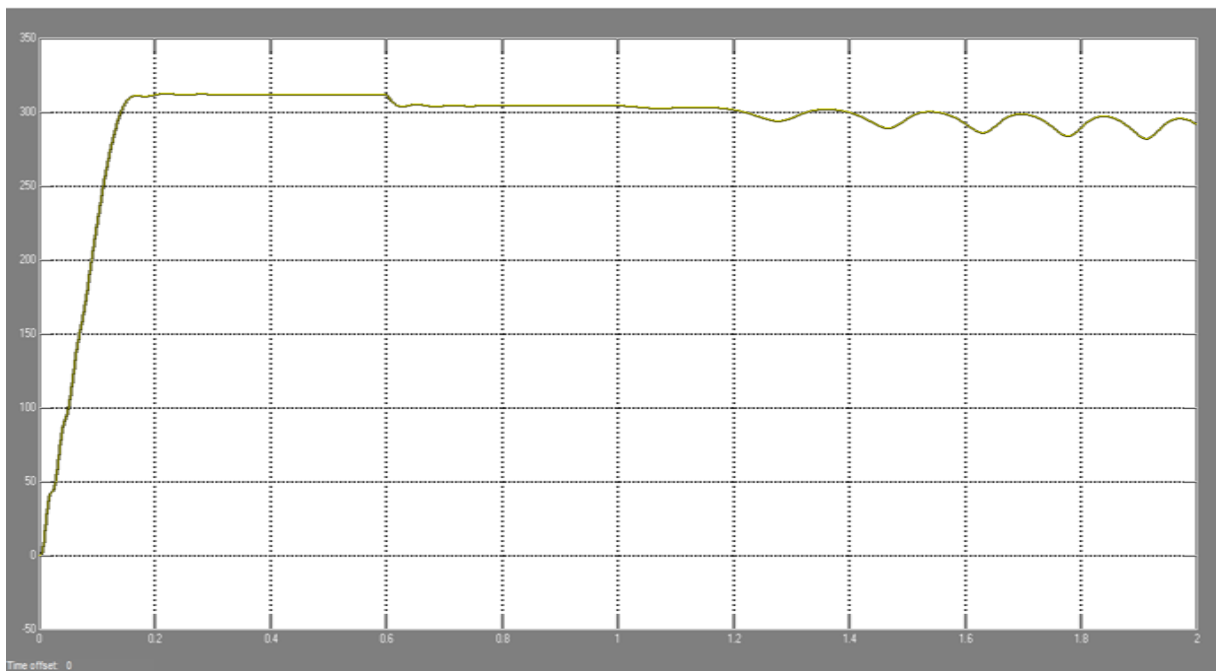
Figure III.9: le couple électromagnétique .  $C$  [N.m]

(A) état sain

(B) état défectueux



(A)



(B)

**Figure III.10: la vitesse de rotation [tr/min]**

**(A) état sain**

**(B) état défectueux**

En présence d'une barre rompue dans la cage, les courants rotoriques engendrent un champ magnétique inverse de fréquence  $-gfs$  ; par conséquent, des courants à la fréquence  $(1-2g) fs$

sont induits dans les circuits statoriques, accompagnés par un couple oscillatoire de fréquence  $2gfs$  dans le couple électromagnétique. Celui-ci, provoque une oscillation dans la vitesse et donne naissance à de nouvelles composantes d'harmoniques de courant d'une fréquence  $(1\pm 2g) fs$ , dans les circuits statoriques. Les harmoniques de même fréquence  $[(1-2g) fs]$  s'ajoutent, pour donner une seule composante résultante ; tandis que les harmoniques du courant de fréquence  $(1+2g) fs$ , circulent dans les enroulements statoriques induisent des courants de  $\pm 3gfs$  au rotor [63].

où  $g$ = glissement et  $fs$ = la fréquence du courant statorique

On peut résumer l'influence de défaut de barre par le schéma suivant

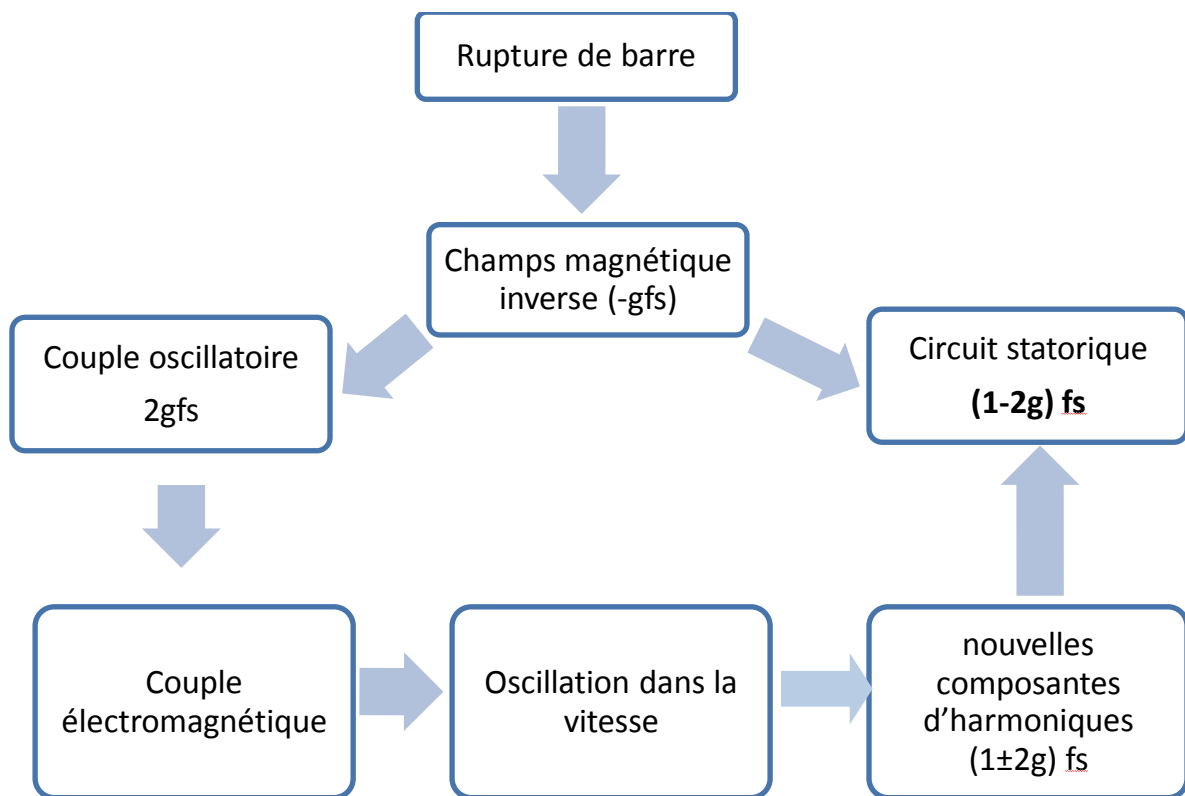


Figure III.11 : Schéma résume l'influence défaut de rupture de barre

#### III.4 Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de traiter un exemple de diagnostic par l'approche modèle. Les équations électriques et mécaniques décrivant le comportement dynamique de la machine asynchrone à l'état sain et à l'état défectueux (cas de rupture d'une barre rotorique) ont été

présentées. Une simulation de ces deux situations a été faite afin de mieux comprendre l'influence de défaut de rupture de barre sur les grandeurs physiques de la machine.

*Chapitre IV : application expérimentale au  
diagnostic et analyse des résultats*

## **Chapitre IV application expérimentale au diagnostic et analyse des résultats**

### **IV.1 Introduction.**

Les chapitres qui ont précédé ont permis de présenter globalement la machine asynchrone et les différentes méthodes employées pour diagnostiquer prématurément les défauts et parvenir ainsi à contribuer, à travers un diagnostic prédictif correct, à l'amélioration de sa sûreté de fonctionnement et de son rétablissement programmé et planifié en cas de dysfonctionnement. Ainsi, ce chapitre va être réparti en deux sections dans lesquelles nous allons décrire les deux campagnes d'essai qui ont été exercées sur deux moteurs asynchrone en fonctionnement sain et dégradé et l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus. La première section concerne le banc d'essai exploitant un moteur asynchrone à cage de 4.05 KW auquel on lui a fait subir volontairement un défaut de désalignement et un moteur de 270 W sur lequel nous avons exercé intentionnellement un balourd sur son arbre rotorique et procédé aussi à la dégradation des billes de l'un de ses roulements.

### **IV.2 Détection d'un défaut de désalignement**

Le banc d'essai a nécessité un groupe de machines électrique composé d'un moteur électrique asynchrone à rotor en court circuit accouplé à une génératrice à courant continu à poly-excitation lui servant de charge.

L'actionneur asynchrone porte les inscriptions suivantes :

Type ML60/4 avec ; 5.5 Hp, 1430 trs/mn, 50Hz, Y/ $\Delta$  , 380V/220V, 8.6A/15A

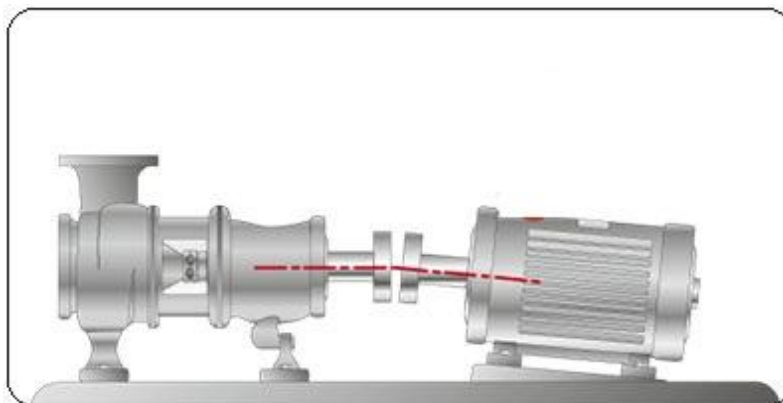
La génératrice à courant continu est de **4 kW** et débite 16A sous 220V avec un inducteur adaptable à tous les modes d'excitations.

Le matériel ayant servi pour le mesurage et l'acquisition des bases de données est constitué de :

- un capteur de courant 0.01 - 10 A.
- un oscilloscope numérique HAMEG507 équipé d'un logiciel SP107 E
- un micro-ordinateur.

Le traitement des données est fait en utilisant le logiciel MATLAB à des fins d'analyse des signaux.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au désalignement angulaire. C'a été réalisé par le soulèvement des deux pattes avant de fixation au moyen de plaquettes en aluminium de 2 mm d'épaisseur



**Figure IV.1 : Désalignement angulaire**



**a. Système sain**



**b. Système défaillant**

**Figure 0.2 : Agrégat de machines électriques dédié au diagnostic de défaut de désalignement**

### IV.3. Résultats expérimentaux via la MCSA

Les résultats obtenus suite au traitement du signal du courant statorique par différentes approches seront présentés afin de trouver la méthode qui fiabilise mieux la détection et le diagnostic de défaut de désalignement dans les systèmes électromécaniques à base de moteur asynchrone à cage.

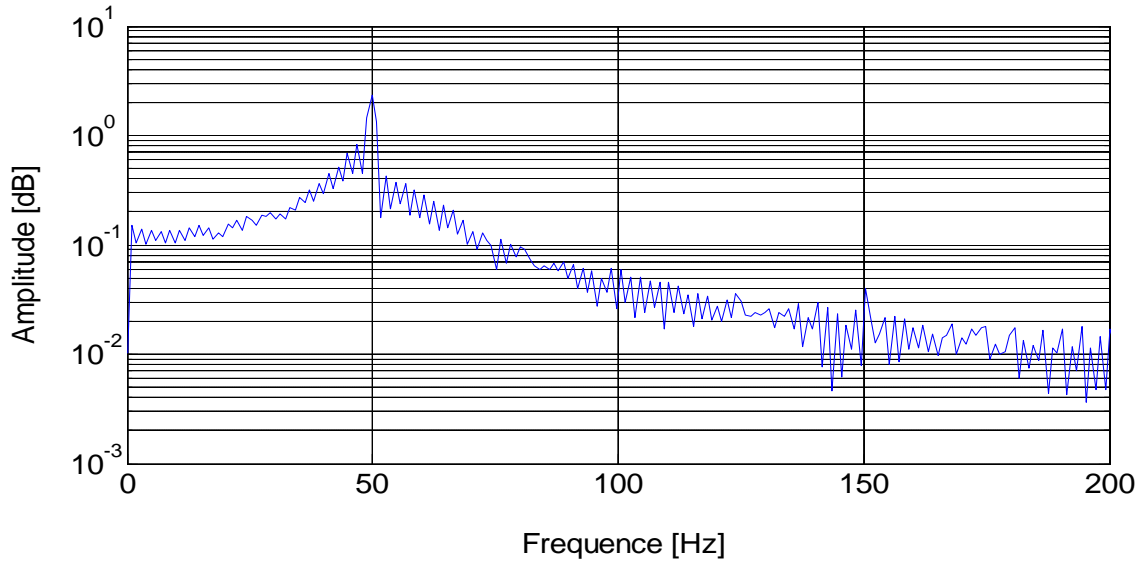


Figure. IV.3 : Spectre d'un signal Sain

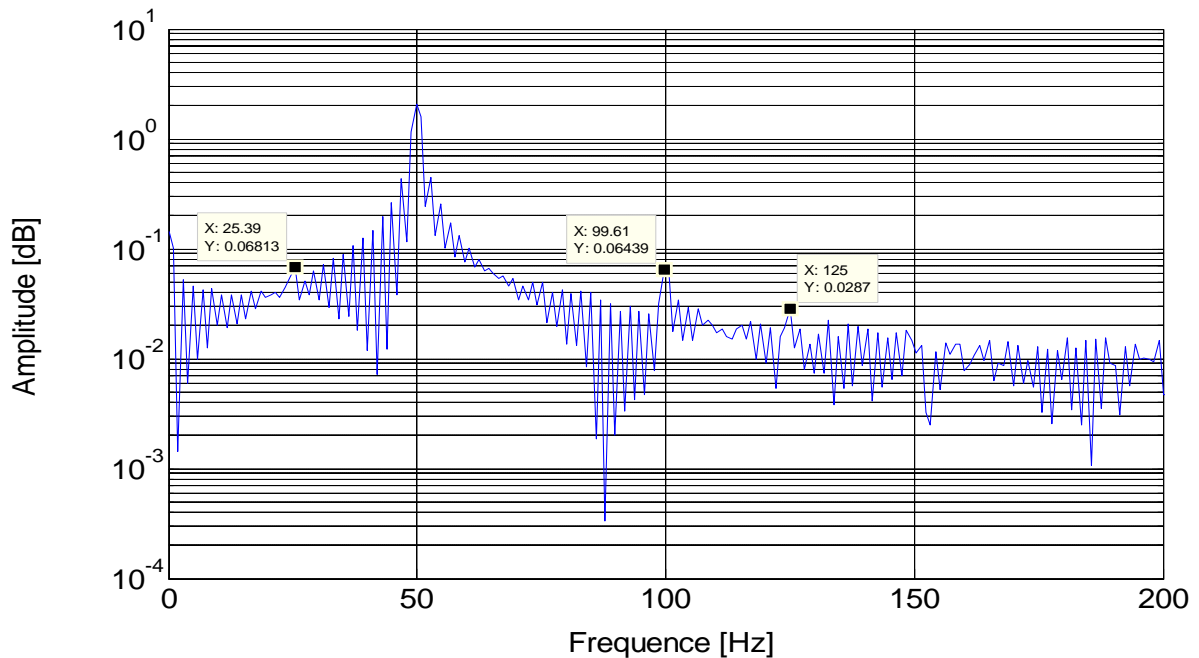


Figure IV.4 : Spectre d'un signal défaillant

La figure IV.3 donne le spectre du courant statorique lorsque le moteur n'est soumis à aucun défaut (sain).

Lorsque le moteur est en fonctionnement dégradé suite au défaut d'alignement, le spectre du courant (figure IV. 4) montre l'émergence des harmoniques caractéristiques de ce défaut à savoir  $50 \text{ Hz} \pm (2,3 \text{ et même } 4)$  où  $f_r = n/60$

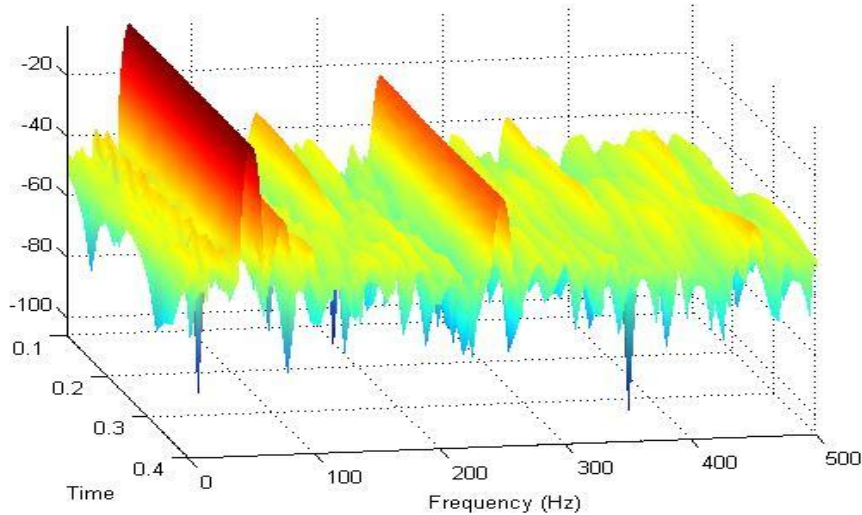


Figure IV. 5 : la STFT du courant statorique d'un moteur sain

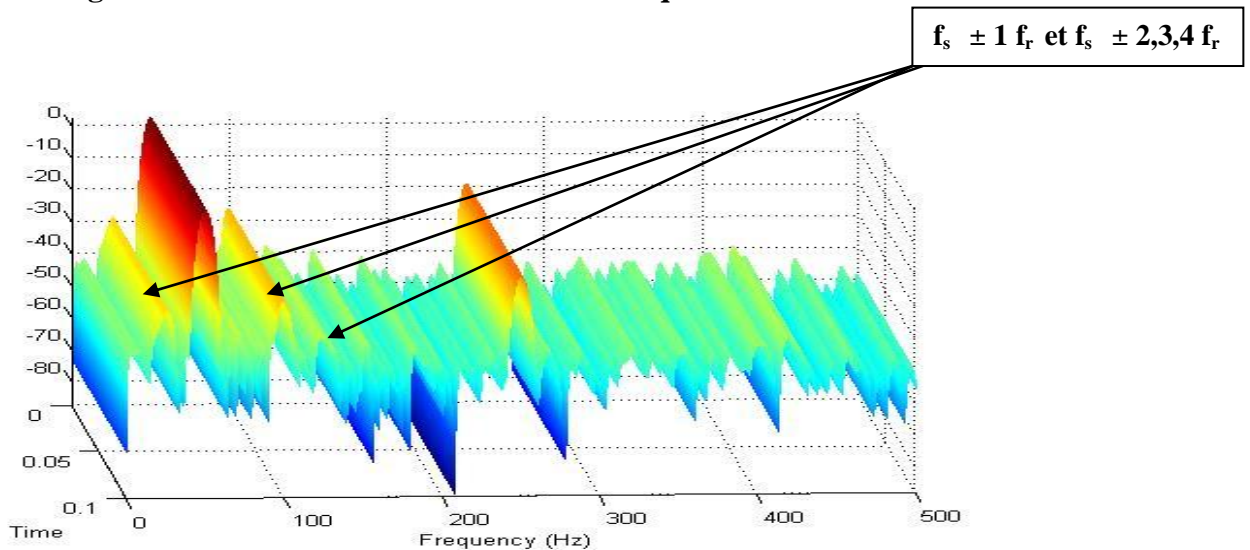


Figure IV. 6 : STFT du courant statorique moteur en désalignement

La figure IV.5 montre le spectrogramme de la STFT de Gabor pour un moteur à induction en bonne santé. Le moteur dégradé suite à un désalignement est représenté en figure IV.6.

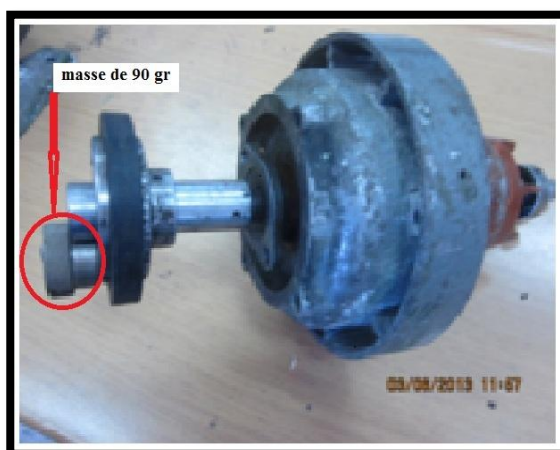
Le spectrogramme montre les pics de fréquence répondant aux fréquences caractéristiques de défaut d'alignement dans le contexte théorique :  $f_s \pm (2,3 \text{ et même } 4f_r)$ .

#### **IV.4 Campagne expérimentale pour la détection d'un balourd et la dégradation du roulement à billes**

Ce deuxième banc d'essai expérimental représenté en figure (IV.7a), a concerné un moteur électrique asynchrone à cage entraînant un petit séparateur. Les informations relevées sur la plaque signalétique du moteur sont données au tableau 1. Les caractéristiques de son roulement à bille sont présentées au tableau 2.



( a )



( b )



( c )

**Figure IV.7 Vues du Banc d'essais**

Description	Moteur
Puissance	270 w
Fréquence d'alimentation	50 HZ
Couplage du moteur	en étoile
Tension	220/380V
Courant	1,43 / 0,8A
Nombre de paires de pôles	2
Nombre de barres au rotor	18
Vitesse nominale	1400 trs/min

(a)

Description	Roulement
Type	<b>6200</b>
Nombre de billes	<b>8</b>
Diamètre moyen	<b>40mm</b>
Diamètre de la bille	<b>8</b>
Angle de contact	<b>0°</b>

(b)

**Tableau.IV.1 Caractéristiques du moteur asynchrone (a) et du roulement (b)**

Cette deuxième section s'inscrit dans le diagnostic de la détection d'un balourd et de la dégradation du roulement d'abord séparément puis par la suite nous avons opéré au diagnostic des deux défauts combinés. Dans ce volet, trois approches de traitement du signal courant ont été exploitées à savoir l'analyse spectrale des courants phasiques et du courant circulant dans le conducteur neutre, la transformée de Fourier à fenêtre glissante appelée aussi la STFT et la représentation en 3D du vecteur somme des carrés des intensités des courants phasiques alimentant le stator.

La campagne d'essai s'est déroulée en quatre étapes sur le moteur fonctionnant en régime continu. La première étape a concerné les prises de mesures sur le moteur à l'état sain.

La deuxième étape de mesures a été réalisée après avoir provoqué intentionnellement un balourd en fixant une masse de 90 grammes sur un disque solidaire à l'arbre du moteur (figure IV.7b). Une fois le balourd retiré, la troisième étape de mesure du courant est entamée après avoir écorché volontairement deux billes adjacentes du roulement se situant du côté du ventilateur de refroidissement (figure IV.7c). La dernière étape de mesures a été faite sur le moteur en le mettant en service de nouveau mais avec la présence des deux défauts précités. Pour l'acquisition des signaux du courant relatifs à ces essais et leur traitement, le même

matériel mentionné ci dessous et ayant servi à la première campagne expérimentale a été utilisé.

#### **IV.5 Impact des défauts de déséquilibre massique et de la dégradation des roulements sur le spectre du courant statorique**

Il a été montré que lors d'une défectuosité électrique ou mécanique du rotor du moteur asynchrone, l'entrefer n'est plus constant et que n'importe quelle excentricité produit des anomalies dans la distribution du champ dans l'entrefer. Par conséquent cette information sera présente dans le spectre du courant [64] [65]. De même dans les spectrogrammes du courant il y aura la présence d'harmoniques conditionnés par la qualité de la tension d'alimentation et ceux dus aux défauts affectant le moteur et les mécanismes qui lui sont accouplés. Les plus grandes dynamiques présentes dans le spectre du courant se produisent à la fréquence d'alimentation électrique et ses harmoniques.

##### **IV.5.1 Signatures du défaut de balourd**

La grande sensibilité du courant aux variations de couples, captées par le moteur asynchrone et par voie de conséquences, aux défauts mécaniques (excentricité, balourd, désalignement, roulement,...) induisant ces dernières, fait de l'analyse spectrale du courant un outil d'investigation complémentaire extrêmement puissant [66]. Les défauts de déséquilibre massique ou "balourd" sont détectés par la surveillance des fréquences appropriées de la phase du courant statorique.

$$\mathbf{F}_d = [ \mathbf{k} \mathbf{f}_s \pm \mathbf{m} \mathbf{f}_r ] \quad (\text{IV.1})$$

Le balourd conduit à l'augmentation de l'amplitude des fréquences définies par (IV.1) pour  $m=k=1$  et des amplitudes de moindre importance aux autres harmoniques du courant.

##### **IV.5.2. Signatures de la dégradation du roulement à billes**

Shoen et Blodt [67] [68] ont développé l'expression de la relation de la vibration du roulement au spectre du courant statorique (IV.2) et des équations théoriques liées aux défauts sur chacun des éléments tournants  $f_{bng}$

$$\mathbf{f}_{bng} = | \mathbf{f}_s \pm \mathbf{m} \mathbf{f}_v | \quad (\text{IV.2})$$

où  $m = 1, 2, 3, \dots$  et  $f_v$  est une fréquence caractéristique de vibration.

Pour le défaut de billes Blodt a suggéré

$$\mathbf{f}_{bng} = \mathbf{f}_s \pm \mathbf{f}_c \pm \mathbf{m} \mathbf{f}_b \quad (\text{IV.3})$$

Des équations réelles s'exprimant en fonction du nombre de billes N et de la fréquence de rotation ont été déduites de l'expérimentation sur plus de 2000 roulements de différents types mais dont les approximations ne sont valables que pour les roulements à une rangée de billes ( 6 à 12 billes de la série 6200, mais ne le sont pas pour la série 6300 [69] ).

### **IV.5.3. Signatures de défauts dans le spectre du courant neutre**

Le changement du spectre du courant du neutre au voisinage du troisième harmonique et de ses multiples est révélateur d'informations précieuses sur l'état de santé du moteur. Elles sont comparables à celles du courant de phase. Lorsqu'une défaillance mécanique survient au rotor d'une machine asynchrone, les composantes dont les fréquences sont données par la relation (IV.4) augmentent en amplitude.

$$F_{sh} = [3h - (3h-1) s] f_s \quad \text{avec } h=1,3,5,7,\dots \quad \text{(IV.4)}$$

Les fréquences porteuses spécifiques au défaut du déséquilibre massique peuvent être exprimées par :

$$f_a = [k f_s \pm m f_r] \quad \text{(IV.5)}$$

**k=3, 9,12,...** en général  $m=1$  et  $m=2$  mais avec une amplitude relativement faible

### **IV.6. Détection des défauts combinés par l'analyse spectrale des courants phasiques et le courant circulant dans le neutre**

Les fréquences caractéristiques de la combinaison des différents défauts précités apparaissent respectivement dans les spectres des courants des phases et du neutre aux harmoniques et aux fréquences propres concernées par ces défauts spécifiques mais avec une augmentation prépondérante des amplitudes des raies concernées.

#### **IV.6.1. Représentation en 3D et Signature des Défauts par la Reconnaissance des Formes.** Les courants circulants dans les trois phases statoriques s'expriment comme :

$$\begin{cases} I_A = I_m \sin(\omega t - \varphi) \\ I_B = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi) \\ I_C = I_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi) \end{cases} \quad \text{(IV.6)}$$

La représentation spatiale du courant d'alimentation du courant est un cercle parfait en vue orthogonale pour un cas idéal d'un moteur sain.

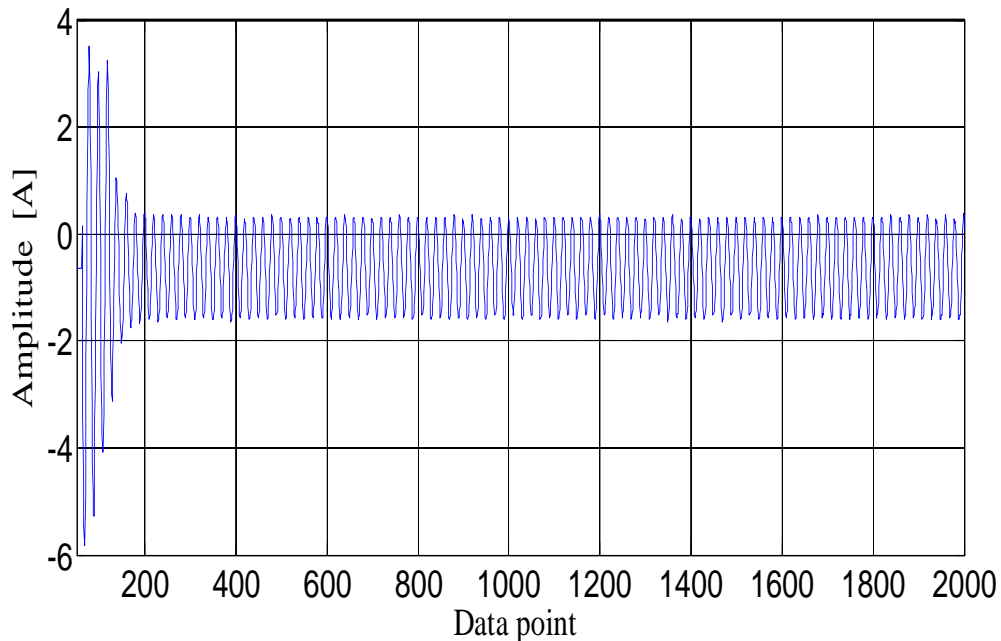
$$R^2 = I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 \quad (\text{IV.7})$$

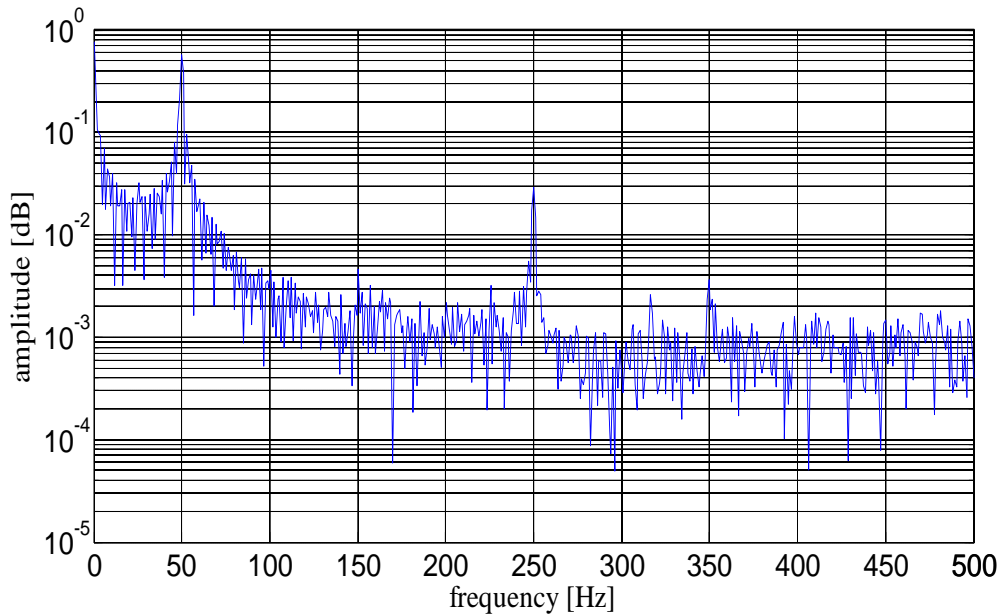
Où R est son rayon. C'est le reflet de l'image du champ tournant dans l'entrefer. Le cercle est déformé au fur et à mesure que le moteur présente des défaillances [70] [71].

#### **IV.7 Analyse des résultats expérimentaux et interprétations**

##### **IV.7.1 . Moteur avant la création des défauts artificiels (état sain)**

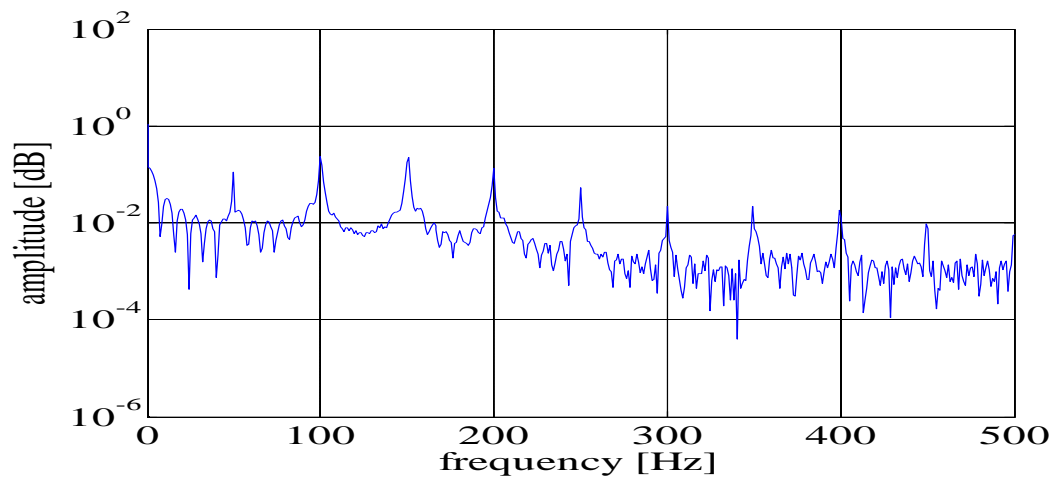
A cet effet, nous avons représenté de nombreux spectres de l'intensité du courant circulant dans les phases, dans le conducteur neutre du moteur asynchrone, une représentation spatiale en 3D des trois courants de phases et le spectrogramme de la STFC. La figure IV.8 expose la caractéristique temporelle du courant statorique et son spectre pendant le fonctionnement du moteur à induction en régime continu sain et sans la création d'aucun défaut artificiel. Seulement, il faut noter que contrairement aux résultats théoriques (cas idéal), le spectre obtenu par les expérimentations pour l'état sain contient des composantes spécifiques au défaut attestant d'une asymétrie naturelle au rotor qui résulte des imperfections de construction, de montage ou de fonctionnement.





**Figure IV.8. Caractéristique temporelle du courant et son spectre du courant.**

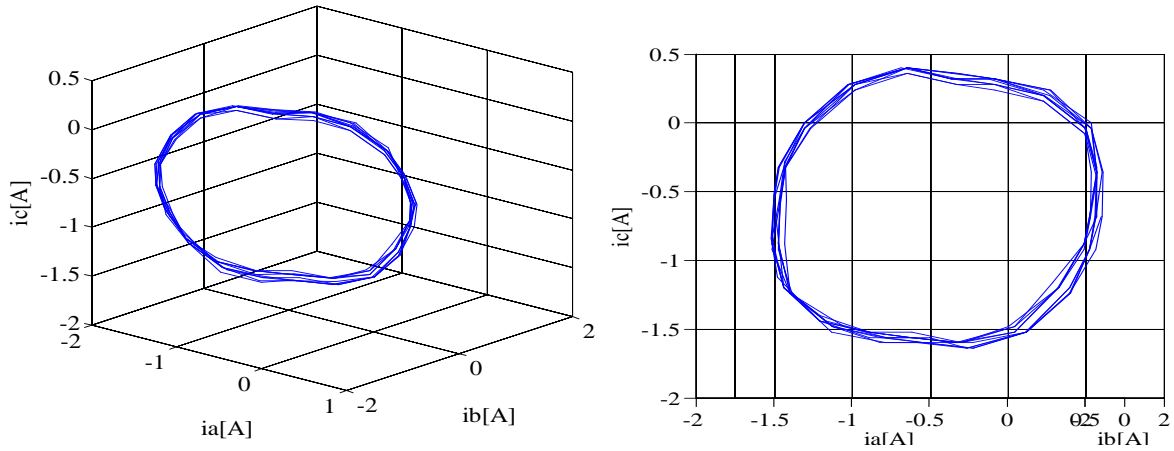
La figure IV.9 donne le spectre du courant circulant dans le conducteur neutre sans la présence d'aucun défaut créé volontairement sur le moteur. Il est à remarquer que la présence même du signal du courant neutre signifie déjà une présence d'anomalies. Comme soulevé Les conditions idéales pour un champ tournant circulaire dans l'entrefer ne sont pas réunies précédemment, ceci s'explique par les imperfections de fabrication ou de fonctionnement



**Figure IV.9. Spectre du courant circulant dans le neutre**

La figure IV.10 illustre le motif tridimensionnel obtenu et sa projection en 2D lorsque notre moteur fonctionne sans la création intentionnelle des défauts de balourd et du roulement. Il est à remarquer que l'orbite n'est pas circulaire ; elle est plutôt ellipsoïdale. Ceci s'explique

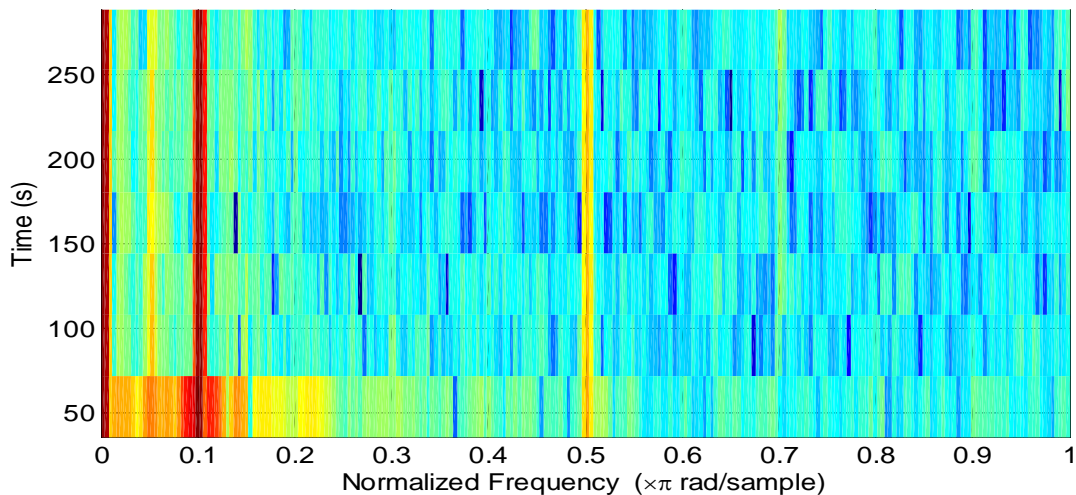
clairement par l'absence des conditions idéales pour le fonctionnement du moteur asynchrone.



**Figure IV.10 motif 2D et 3D des courants à l'état sain**

En vue de suivre dans le temps le comportement des bandes fréquentielles obtenues par la FFT et d'apporter un complément au diagnostic des défauts mécaniques les plus fréquents affectant les entraînements électriques à base de moteur à induction, une analyse conjointe en temps et en fréquence du courant statorique lors du fonctionnement du moteur asynchrone a été réalisée par le carré du module de la transformée de Fourier à court terme ou STFC (Spectrogramme)

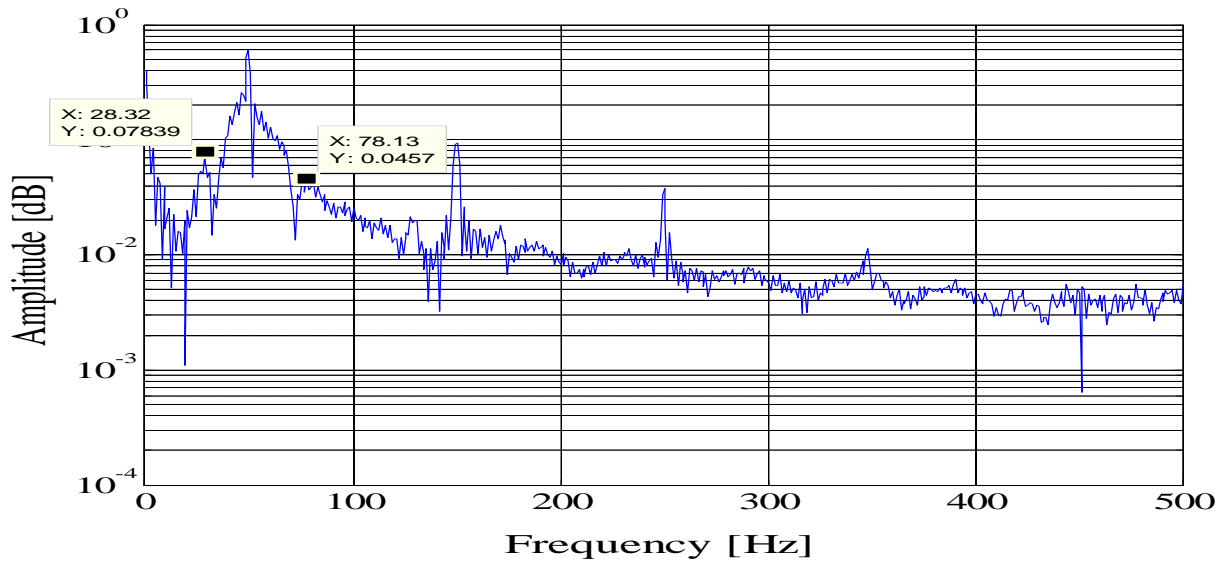
Le spectrogramme de la STFC en figure IV.11. montre la bande rouge correspondant à la fréquence fondamentale  $f_s=50\text{Hz}$  en l'absence de toute dégradation de l'état de santé du moteur (sain).



**Figure IV.11 : Spectrogramme du moteur sain**

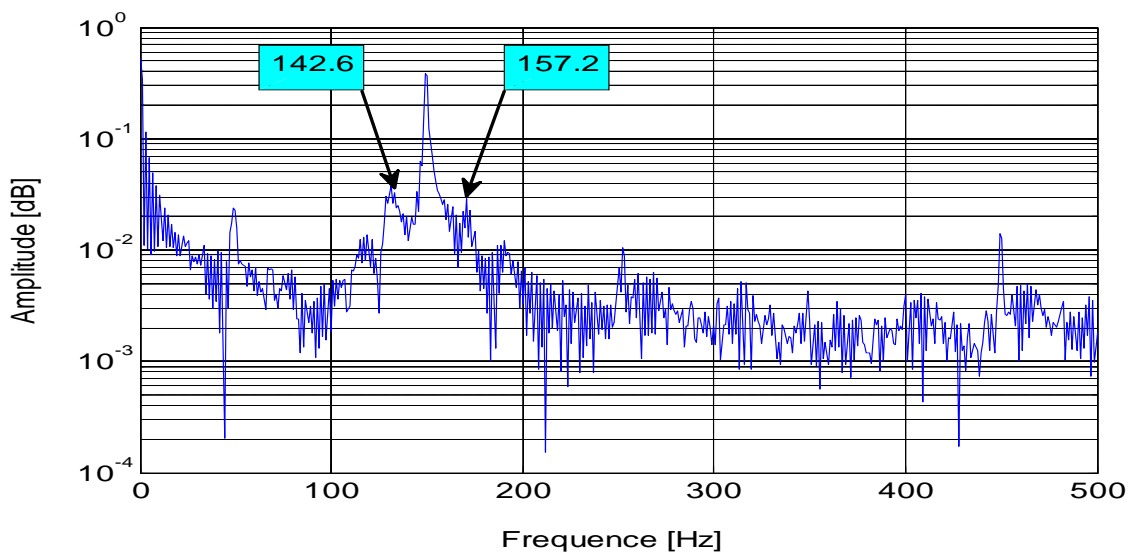
### IV.7.2 Moteur en présence du défaut de balourd

La figure (IV.12 a) montre l'émergence des fréquences 28,32 Hz et 78,13 Hz relatives au défaut de balourd. Seulement, l'amplitude de ces composantes n'est pas relativement significative. De même, nous observons des bandes latérales autour du 3e, 5e, 7e ainsi que le 9<sup>e</sup> harmonique introduites par le défaut de balourd.



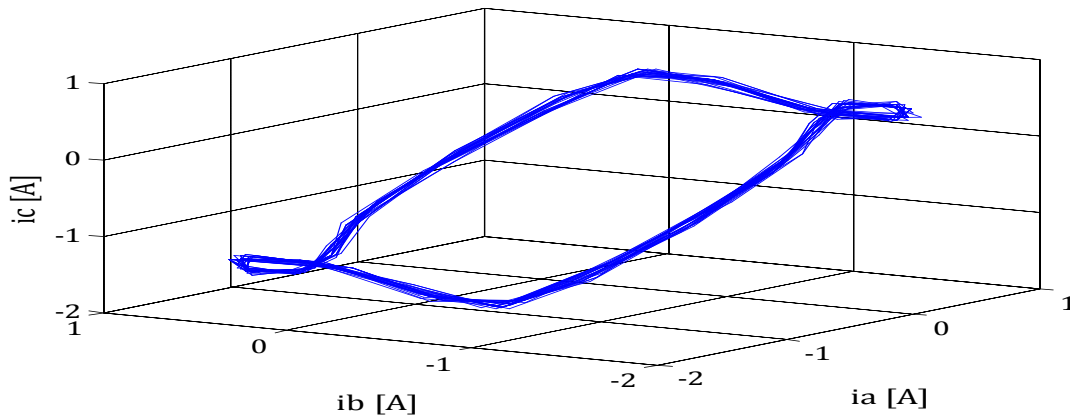
(a)

La présence de la prépondérance flagrante de l'harmonique d'ordre 3 (figure IV.12 b) témoigne bien de la présence du courant dans le neutre. Ce qui est synonyme d'un déséquilibre dans les courants d'alimentation et par conséquent du fonctionnement du moteur en mode dégradé



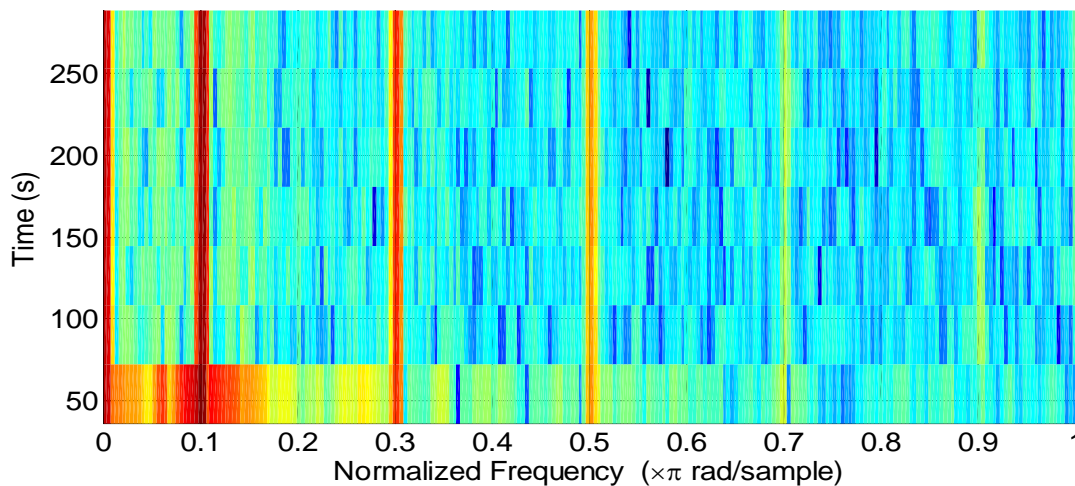
(b)

La représentation dans l'espace (figure IV.12 c) des courants montre un motif ayant une orbite qui s'éloigne de l'ellipse et tend vers une hypocycloïde ceci est due essentiellement au déplacement du centre de gravité de la masse rotorique.



(c)

La figure (IV.12 d) de part et d'autre de la bande fondamentale on note des bandes latérales en rouge vif à  $50 \pm 1f_r$  ( $f_r = 23.33$  Hz) avec des amplitudes correspondant à des décibels élevés sur l'échelle des couleurs. Il y a aussi l'apparition d'une bande à l'harmonique d'ordres 3 et 5. Ces harmoniques impairs sont révélateurs de la présence d'un déséquilibre (couples moteurs antagonistes); ce qui est pour notre cas le déséquilibre massique(ou balourd). L'harmonique 3 intervient avec des décibels élevés comparables à ceux pour  $f_s$



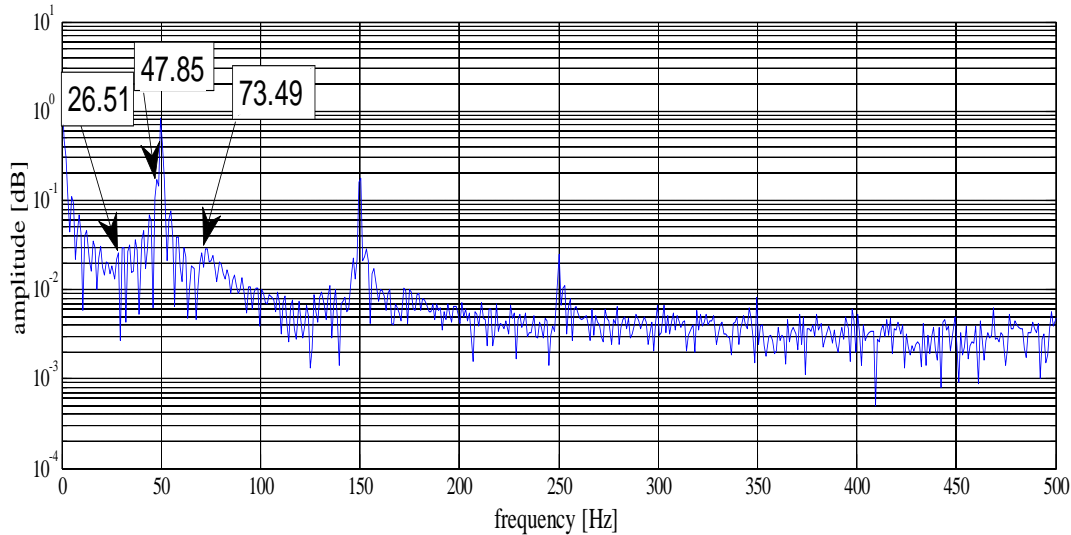
(d)

**Figure .IV.12. Moteur en présence du défaut de balourd**

- a. Spectre du courant de la phase statorique ;
- b. Spectre du courant circulant dans le neutre ;
- c. Motifs en 3D obtenu par les carrés des 3 courants.
- d. Spectrogramme du Défaut de balourd

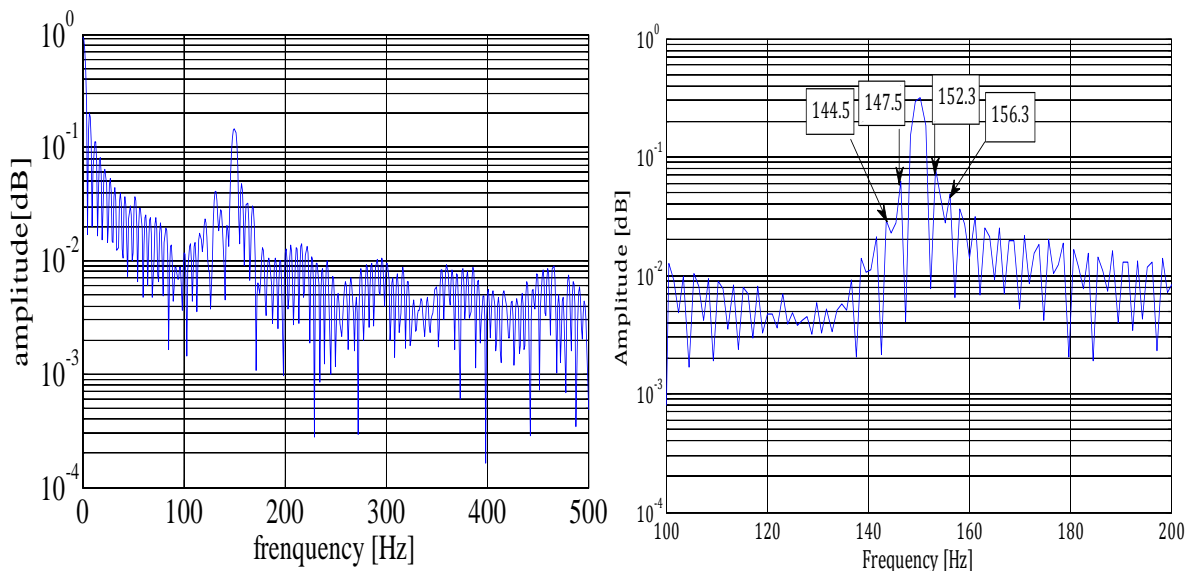
### IV.7.3 Moteur en Présence du Défaut de Roulement à billes

La figure (IV.13a) montre le spectre du courant de phase sur lequel on peut remarquer les fréquences porteuses du défaut de billes comme par exemple : 26.51 Hz ; 47.85 Hz ; 73.49 Hz ; 106.31 Hz ; 132.15 Hz ; 138.82 Hz ; 164.997 Hz ; 171.64 Hz ; 196.82 Hz ; 229.64 Hz ; Ces fréquences vérifient bien l'équation théorique (IV.2).



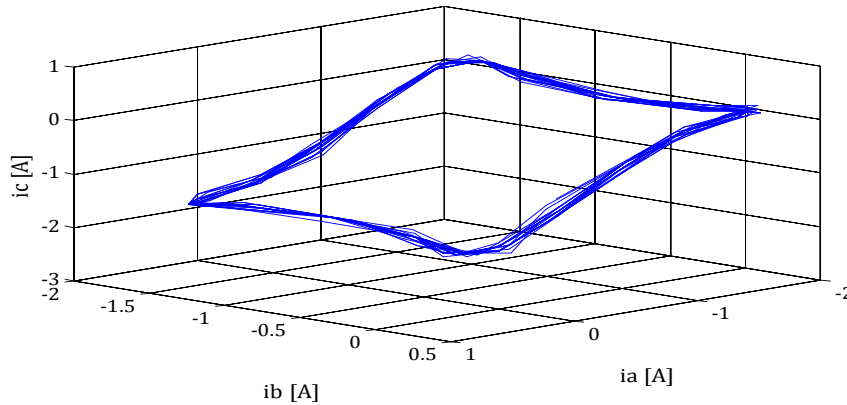
(a)

Sur le spectre du courant neutre représenté par la figure (IV.13b) sur différentes plages de fréquences, on voit une émergence prépondérante de l'harmonique 3 et des raies à son voisinage de part et d'autres dont les fréquences sont comme suit: 144.5 Hz ; 147.5 Hz ; 152.3 Hz ; 156.3 Hz



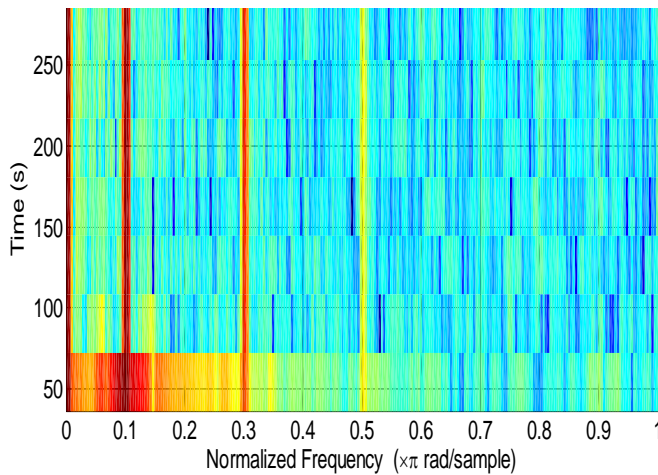
(b)

La figure (IV.13c) donne le motif en 3D obtenu par la représentation du carré des trois courants d'alimentation du stator. A la différence du défauts électrique statorique ou rotorique qui donnent des contours ellipsoïdaux, le défaut du roulement est décrit par un contour polygonal avec des côtés curvilignes (un contour hypocycloïdal).

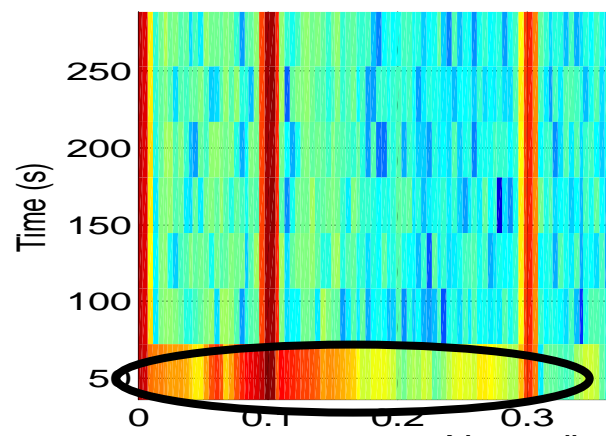


(c)

La figure (IV.13d) diffère de la figure (IV.12d) où l'on constate que de part et d'autre de 50Hz la couleur rouge qui est devenue plus vive (décibels élevés) et avec un élargissement de la bande, ce qui explique la présence d'un défaut de nature différente. En accord avec les informations complémentaires obtenues par la FFT on peut dire qu'il s'agit du défaut du roulement.



(d)



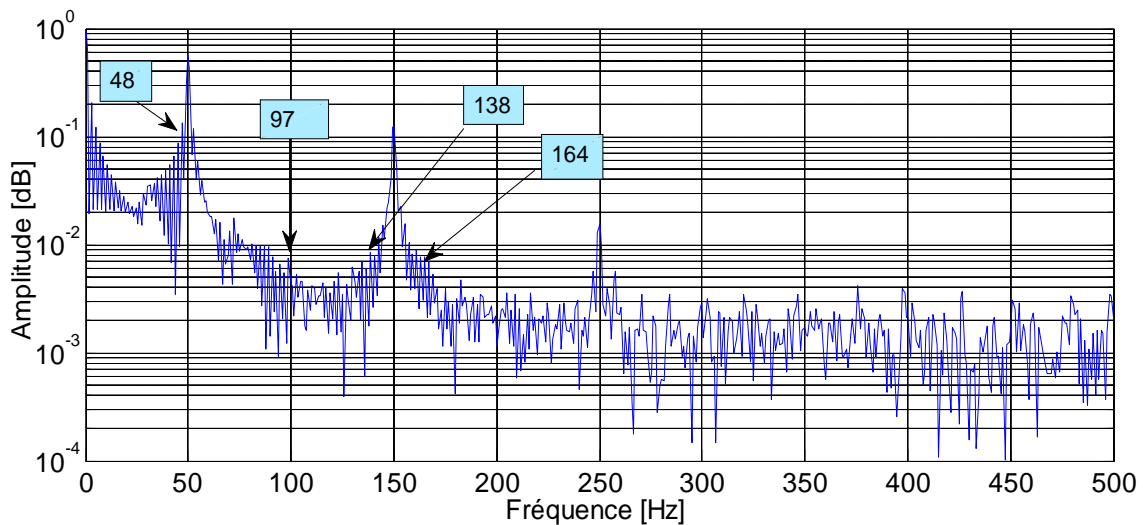
(e)

**Figure IV.13. Moteur en présence du défaut de roulement**

- a. Spectre du courant de la phase statorique ;
- b. Spectre du courant circulant dans le neutre ;
- c. Motifs en 3D obtenu par les carrés des 3 courants ;
- d. Spectrogramme du Défaut de roulement ;
- e. zoom du spectrogramme du Défaut de balourd .

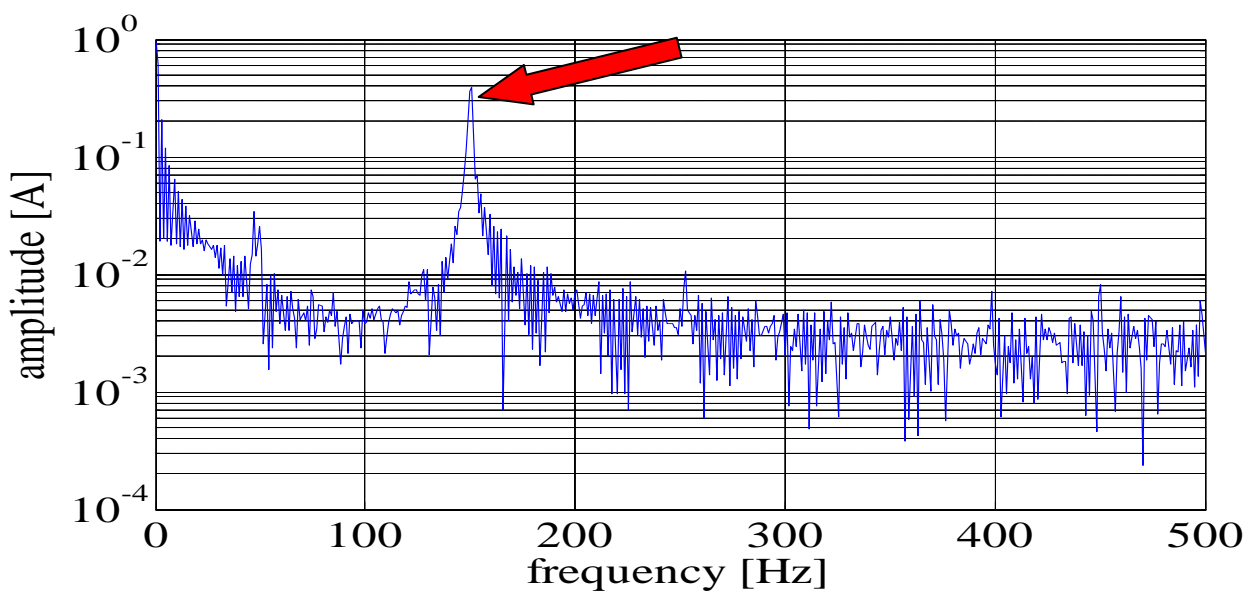
#### IV.7.4 Moteur affecté par la combinaison du défaut de balourd et du défaut de roulement

Lorsqu'il s'agit de la présence simultanée du défaut de roulement et du balourd nous assisterons à la prépondérance de la composante de la fréquence  $3fs$  dans le spectre du courant ainsi que l'observation des composantes de fréquences induites respectivement par les deux défauts à savoir 27 Hz; 48 Hz; 75Hz; 97 Hz; 107Hz; 132.15 Hz; 138.82 Hz; 164 997 Hz 171.64 Hz; 196.82 Hz; 229.64 Hz, affectées d'une augmentation significative de leurs amplitudes.



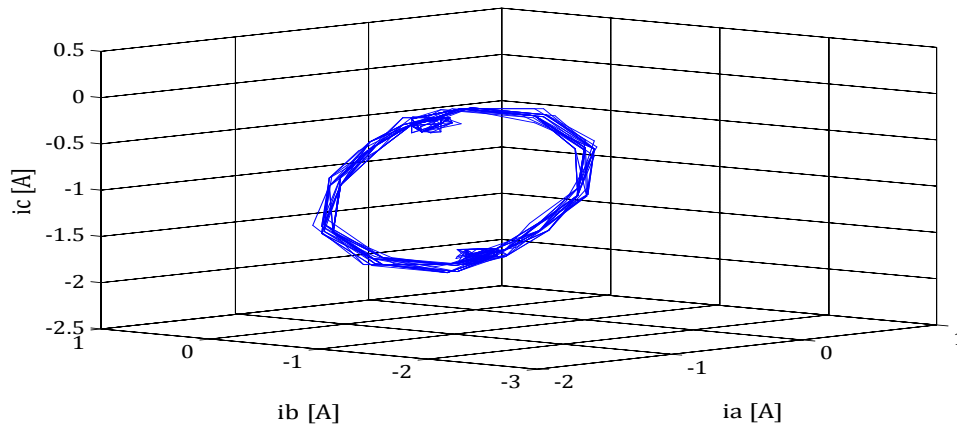
(14.a)

Pour le spectre du courant neutre, seule l'harmonique 3 demeure dominante par sa prépondérance et une densité de raies d'amplitudes faibles sur toute la plage de fréquences.



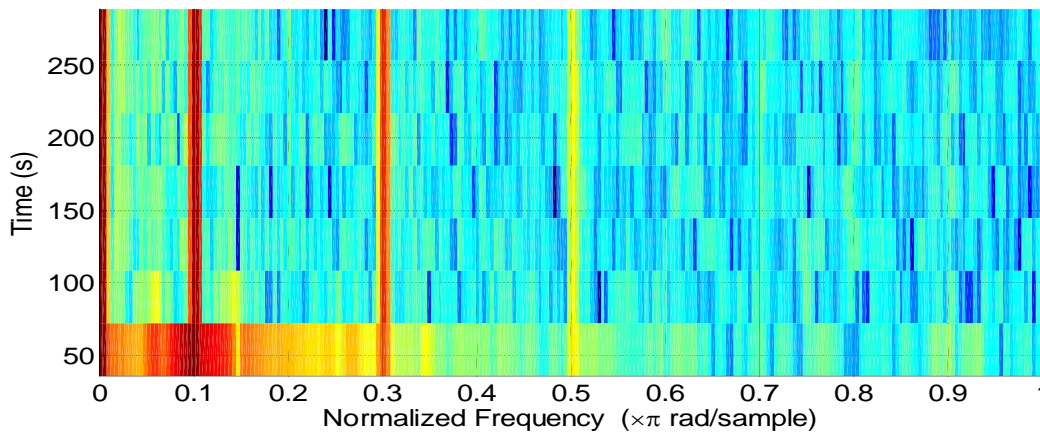
(14.b)

L'effet de la variation de la charge est le même que celui dans le cas où les défauts sont considérés séparément. Pour ce défaut combiné la représentation du modèle tridimensionnel (3D) laisse apparaître une superposition de l'orbite ellipsoïdale avec le motif polygonal (figure IV.14.c). Donc, la combinaison des défaillances du balourd et du roulement se présente en 3 D comme une addition de leurs motifs respectifs. L'épaississement de la section périphérique atteste beaucoup plus de la gravité des deux défauts. La détection et le diagnostic des défauts combinés sont rendus robustes avec cette reconnaissance de formes.



(14.c)

Sur la figure 14.d, c'est la bande encadrée par la même échelle de temps et sur l'intervalle 0 - 150Hz fenêtre mais avec des couleurs encore plus vifs qui prouve qu'il y a bien fusion des deux défauts de notre étude : balourd et Roulement.



(14.d)

**Figure. IV.14. Moteur en présence du défaut Combinés**

- a. Spectre du courant de la phase statorique ;
- b. Spectre du courant circulant dans le neutre ;
- c. Motifs en 3D obtenu par les carrés des 3 courants.
- d. Spectrogramme du Défaut combinés

#### **IV.8 Conclusion**

Dans ce travail nous avons développé expérimentalement une complémentarité de techniques dédiée au diagnostic précoce des défauts mécaniques uniques et multiples qui affectent couramment la machine asynchrone. L'exploitation pratique de l'analyse des courants du système triphasé alimentant le moteur asynchrone nous a révélé de précieuses informations sur la présence des défauts mécaniques isolés (désalignement) et combinés (déséquilibre massique et du roulement à billes). Les résultats obtenus sont satisfaisants et prouvent leur aptitude à envisager la détection en ligne et en temps réel des défauts mécaniques précités de manière automatique grâce à la mise en œuvre matérielle d'un dispositif de réseau programmable sur le champ. En outre, la simplicité et l'efficacité des techniques préconisées dans cette recherche peuvent aider amplement à supprimer les clivages d'ordre culturel existant, généralement entre les services électrique et mécanique.

## *Conclusion générale et perspectives*

## **Conclusion générale et perspectives**

Pour assurer le succès technique et économique dans le domaine de l'industrie, il faut veiller à assurer une sûreté d'exploitation des installations électromécaniques. Comme de nos jours, les entraînements électriques utilisés pour mener les procédés technologiques (textile, cimenterie, traction électrique, laminoirs, manutention, pompage, etc...), de petits ou de grands calibres, sont basés pour la plupart sur des machines à courant alternatif et, en particulier, les actionneurs tournants à induction (moteur à induction). Ceci s'explique par les nombreux avantages dont ils disposent (entretien facile, robustesse, facilité de mise en œuvre, etc ..), ajouté à cela, leur adaptation à la vitesse variable sur une large gamme grâce à l'avènement et le développement croissant des convertisseurs électroniques. Cependant, ces actionneurs qui sont le maillon faible de l'entraînement électromécanique ne sont pas tout à fait sécuriser devant les dégradations multiples internes et externes qui peuvent les affecter et si on ne s'y prend pas à temps, des pannes peuvent être provoquées causant des arrêts intempestifs préjudiciables à la bonne marche du système d'entraînement ainsi qu'à la sécurité des opérateurs. C'est à cette fin que ce travail s'est inscrit dans une contribution à la prédiction des défaillances qui peuvent se présenter au moteur asynchrone à rotor en court circuit, moyennant des méthodes de diagnostics et de détection des dégradations à leur naissance. Ce sont généralement les problèmes mécaniques qui posent problème tels que le déséquilibre massique ou « balourd », le désalignement, la dégradation des roulements à billes et certains défauts de leurs combinaisons. L'analyse vibratoire est d'habitude la plus recommandée pour le diagnostic des défaillances mécaniques internes ou externes à l'unité motrice. Seulement, il est des défauts induisant des fluctuations de couple pour lesquels l'approche vibratoire a montré ses limites. La grande sensibilité du courant aux variations de couples et par voie de conséquences, aux défauts mécaniques induisant ces dernières, captées via l'alimentation électrique du moteur asynchrone, fait de l'analyse du courant un outil d'investigation extrêmement puissant. L'application successive de trois approches à savoir la FFT, la représentation des motifs en 3D (orbitaux ou autres) et la STFC a été consacrée à la validation expérimentale de la détection des défauts mécaniques simples et multiples précités. L'application de cet arsenal de techniques de traitement et d'analyse du courant est faite beaucoup plus pour soulever l'ambiguïté sur la nature du défaut. Deux moteurs asynchrones à cage de différentes puissances ont servi pour la validation expérimentale des approches « courants ». La mise en œuvre des stands d'essai n'a pas nécessité de grands moyens technique et financier. Des résultats satisfaisants ont été obtenus et, dont la lecture et

l'interprétation à notre sens, ne nécessite pas l'intervention de techniciens experts en la matière.

Aussi, Cette étude expérimentale peut contribuer à apporter aussi des éléments de réflexion sur l'automatisation du diagnostic et la détection prédictive des défauts mécaniques multiples des systèmes industriels à vitesse variable qui seront dans le futur proche de plus en plus nombreux.

Enfin, nous souhaitons vivement, comme l'ont suggéré « Alain Boulanger et Christian Pachaud » dans leur aide mémoire sur la surveillance des machines , que ce travail de recherche contribuera à éclairer le lecteur chercheur et le persuadera que la principale difficulté réside aujourd'hui dans le choix des techniques d'investigation à mettre en œuvre (modèles analytiques et techniques de traitement du signal) , en fonction de la fiabilité recherchée. De la pertinence de ce choix, se trouvera conforté le double défi que s'est donné la maintenance moderne :

- réduire les coûts de l'entreprise par une anticipation des pannes ;
- augmenter le taux de disponibilité des outils de production par une programmation des arrêts

Gageons aussi que les techniques de surveillance, qui ne cessent de s'améliorer, grâce à l'expérience croissante des utilisateurs et à l'évolution continue des performances de l'outil informatique, augmenteront encore grandement la pertinence de leur utilisation et donc la fiabilité des outils de production.

# *Annexes*

## ANNEXE 1 : EXPRESSION DES INDUCTANCES

- **L'inductance principale statorique (magnétisante)**

$$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4 \mu_0 N_s^2 R l}{e \pi p^2} \quad (1)$$

- **L'inductance mutuelle statorique :**

$$M_s = -\frac{L_{sp}}{2} \quad (2)$$

- **L'inductance propre (totale) d'une phase statorique**

$$L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s = L_{sp} + L_{sf} \quad (3)$$

- **L'inductance cyclique statorique**

$$L_{sc} = L_{sp} + L_{sf} - M_s = \frac{3}{2} L_{sp} + L_{sf} \quad (4)$$

- **L'inductance propre (totale) d'une maille rotorique :**

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2 \pi}{e} R l \quad (5)$$

- **L'inductance mutuelle entre mailles rotorique non adjacentes.**

$$M_{rr} = -\frac{\mu_0}{N_r^2} \frac{2 \pi}{e} R l \quad (6)$$

- **L'inductance mutuelle entre mailles rotorique adjacentes.**

$$M_{r_{k(k-1)}} = M_{r_{k(k+1)}} = M_{rr} - L_b$$

- **L'inductance mutuelle rotorique - statorique :**

$$M_{r_{ksa}} = L_{sr} \cos(\omega_r t + k a) \quad (7)$$

avec :

$$L_{sr} = \frac{4 \mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right),$$

où :  $a = p \frac{2 \pi}{N_r}$  et  $k=0, 1, \dots, N_r-1$

**ANNEXE 2 : LA MATRICE [L<sub>TR</sub>] EST DONNEE PAR**

$$\begin{bmatrix}
 Ls + 2Ms & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \vdots & 0 \\
 0 & Ls - Ms & 0 & \vdots & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L}{sr} & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L}{sr} \cos(a) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L}{sr} \cos((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 0 & 0 & Ls - Ms & \vdots & 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L}{sr} \sin(a) & \dots & \dots & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L}{sr} \sin((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L}{sr} & 0 & \vdots & Lrp + 2Lb + 2 \frac{Le}{Nr} & Mrr - Lb & Mrr & \dots & Mrr - Lb & \vdots & - \frac{Le}{Nr} \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L}{sr} \cos(a) & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L}{sr} \sin(a) & \vdots & Mrr - Lb & Lrp + 2Lb + 2 \frac{Le}{Nr} & Mrr - Lb & Mrr & \dots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L}{sr} \cos((Nr-1)a) & \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L}{sr} \sin((Nr-1)a) & \vdots & Mrr - Lb & Mrr & \dots & Mrr - Lb & Lrp + 2Lb + 2 \frac{Le}{Nr} & \vdots & - \frac{Le}{Nr} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & - \frac{Le}{Nr} & \dots & \dots & \dots & - \frac{Le}{Nr} & \vdots & Le
 \end{bmatrix}$$

La matrice [R<sub>tr</sub>] est donnée par :

$$\begin{bmatrix}
 rs & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \vdots & 0 \\
 0 & rs & \omega(Ms - Ls) & \vdots & 0 & - \omega L \sqrt{\frac{3}{2}} \sin(a) & \dots & \dots & - \omega L \sqrt{\frac{3}{2}} \sin((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 0 & \omega(Ls - Ms) & rs & \vdots & \omega L \sqrt{\frac{3}{2}} & \omega L \sqrt{\frac{3}{2}} \cos(a) & \dots & \dots & \omega L \sqrt{\frac{3}{2}} \cos((Nr-1)a) & \vdots & 0 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & R_{b0} + R_{b(Nr-1)} + 2 \frac{R_e}{Nr} & - R_{b0} & 0 & \dots & - R_{b(Nr-1)} & \vdots & - \frac{R_e}{Nr} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & - R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2 \frac{R_e}{Nr} & - R_{bk} & 0 & \vdots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & - R_{b(Nr-1)} & 0 & \dots & - R_{b(Nr-2)} & R_{b(Nr-1)} + R_{b(Nr-2)} + 2 \frac{R_e}{Nr} & \vdots & - \frac{R_e}{Nr} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \vdots & - \frac{R_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & - \frac{R_e}{Nr} & \vdots & Re
 \end{bmatrix}$$

[R<sub>s</sub>] : matrice des résistances statoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix}
 rs & 0 & 0 \\
 0 & rs & 0 \\
 0 & 0 & rs
 \end{bmatrix}$$

[L<sub>s</sub>] : matrice des inductances statoriques.

$$[L_s] = \begin{bmatrix}
 Las & Ms & Ms \\
 Ms & Lbs & Ms \\
 Ms & Ms & Lcs
 \end{bmatrix}$$

[M<sub>sr</sub>] : matrice des inductances mutuelles entre phases statiques et mailles rotoriques.

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \dots & L_{sr} \cos(\theta_r + k a) & \dots & \vdots & 0 \\ \dots & L_{sr} \cos(\theta_r + k a - \frac{2\pi}{3}) & \dots & \vdots & 0 \\ \dots & L_{sr} \cos(\theta_r + k a - \frac{4\pi}{3}) & \dots & \vdots & 0 \end{bmatrix}$$

où : k=0, 1, 2, ..., Nr-1

[R<sub>r</sub>] : la matrice des résistances rotoriques.

$$\begin{bmatrix} R_{b0} + R_{b(Nr-1)} + 2\frac{R_e}{Nr} & -R_{b0} & 0 & \dots & -R_{b(Nr-1)} & \vdots & -\frac{R_e}{Nr} \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_e}{Nr} & -R_{bk} & 0 & \vdots & \vdots \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -R_{b(Nr-1)} & 0 & \dots & -R_{b(Nr-2)} & R_{b(Nr-1)} + R_{b(Nr-2)} + 2\frac{R_e}{Nr} & \vdots & -\frac{R_e}{Nr} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{R_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & -\frac{R_e}{Nr} & \vdots & R_e \end{bmatrix}$$

[L<sub>r</sub>] : matrice des inductances rotoriques.

$$\begin{bmatrix} Lrp + 2L_b + 2\frac{L_e}{Nr} & Mrr - L_b & Mrr & \dots & Mrr - L_b & \vdots & -\frac{L_e}{Nr} \\ Mrr - L_b & Lrp + 2L_b + 2\frac{L_e}{Nr} & Mrr - L_b & Mrr & \dots & \vdots & \vdots \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Mrr - L_b & Mrr & \dots & Mrr - L_b & Lrp + 2L_b + 2\frac{L_e}{Nr} & \vdots & -\frac{L_e}{Nr} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ -\frac{L_e}{Nr} & \dots & \dots & \dots & -\frac{L_e}{Nr} & \vdots & L_e \end{bmatrix}$$

## *Références*

## Références

- [1] M.A. Abed, "Contribution à L'étude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, mars 2002.
- [2] kaikaa Mohamed Yazid « Modélisation de la machine asynchrone avec prise en compte de la non uniformité de l'entrefer. Application au diagnostic » these de doctorat Soutenu le : 09/06/2010.
- [3] BELHAMDI Saad « Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande » these de doctorat Soutenu le : 08/05/2014
- [4] BOUCHARÈB Ilhem « Modélisation & Simulation de Défauts D'une Machine Synchrone à Réductance Variable » mémoire de magistère, Université de Constantine 11/2009
- [5] G. Zwingelstein, "Diagnostic des Défaillances", Paris, Hermes, 1995.
- [6] Youcef SOUFI Modélisation et diagnostic d'une association convertisseur machine électrique TH\_ESE de doctorat Université Badji Mokhtar ANNABA juin 2012
- [7] S. Bachir, "*Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique*", Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2003.
- [8] Olivier Ondel « Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur - machine asynchrone » Ecole Centrale de Lyon France, 2006
- [9] Sadok Bazine et Jean – Claude Trigeassou Les défauts des machines électriques et leur diagnostic pages 23-42
- [10] A. H. Bonnett and G. C. Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, pp. 921-937, 1992.
- [11] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts," Thèse de doctorat, Institut de Recherche en Cybernétique de Nantes, École Centrale de Nantes, Nantes, France, 1999.
- [12] ANDRIAN CEBAN « METHODE GLOBALE DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ELECTRIQUES » these de doctorat Université Lille de Nord France février 2012
- [13] F. Babaa, "Modélisation et diagnostic des machines asynchrones : application à la détection des défauts statoriques", Mémoire de Magister en Electrotechnique, université Mentouri Constantine, 2005.
- [14] Jean Claude Trigeassou 'Diagnostic des machines électriques' Traité EGEM, 2011 Hermès.
- [15] A. Khatir. Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts .Thèse de Magister .Université Ferhat Abbas de Sétif .Algérie 2009.

- [16] O. V. Thorsen and M. Dalva. Failure identification and analysis for highvoltage induction motors in the petrochemical industry. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35(no.4) :pp. 810–818, July-Aug. 1999.
- [17] Halem noura Modélisation des machines asynchrones triphasées à cage en vue du diagnostic par la méthode des éléments finis these de doctorat Soutenue publiquement le 07/04/2015.
- [18] M. Sahraoui, "*Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones*", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2010.
- [19] A. Ibrahim, "*Contribution au Diagnostic de Machines Electromécaniques: Exploitation des Signaux Electriques et de la Vitesse Instantanée*", Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, France, 2009.
- [20] S. Nandi, H. A. Toliyat, and L. Xiaodong. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review. *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20(no. 4) :pp. 719–729, December 2005.
- [21] . L. A. Saunders, K. S. Crawford, R. A. Epperly et G. Murphy, "Applying adjustable frequency controllers to high-starting – torque loads" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.31, no.1, pp.68-76, Janvier- Février 1995
- [22] Combacau, M. 1991, Commande et surveillance des systèmes à événements discrets complexes : applications aux ateliers flexibles, thèse de doctorat, L'université Paul Sabatier de Toulouse
- [23] D. Thailly, "Etude du champ de dispersion des machines à courant alternatif : Application audiagnostic," Thèse de doctorat, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE), Université d'Artois, Béthune, France, 2007.
- [24]. Roland Casimir « Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes » these de doctorat France 2003
- [25] Attoui Issam « Contribution au diagnostic de defauts d'une generatrice asynchrone dans une chaine de conversion d'energie eolienne. » these de doctorat de universite de badji mokhtar annaba algerie 2015.
- [26]J. R. Cameron, W. T. Thomson, and A. B. Dow, "Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap Eccentricity in Large Induction Motors", in *Proc. IEE*, vol. 33 no.3 (1986), pp. 155-163.
- [27]D. G. Dorrell, W. T. Thomson, "Analysis of Airgap Flux, Current, and Vibration Signals as a Function of the Combination of Static and Dynamic Airgap Eccentricity in 3-Phase Induction Motors", *IEEE Trans. on Ind. Appl.* Vol. 33, no.1, 1997, pp.24-34.
- [28] M. R. Caryn, B. K. Lin, T. G. Habetler and R.R. Schoen, "A Method for Sensorless On-Line Vibration Monitoring of Induction Machines", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 34, No. 6, Nov. /Dec. 1998.
- [29] J. Penman, H. G. Sedding, B. A. Lloyd, and W. T. Fink, "Detection and location of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 9, n. 4, December 1994, pp. 652-658.

- [30] H. Henao, et al "A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, No. 5, pp. 1272–1279, Sep./Oct. 2003
- [31] Martin BLÔDT, "*Condition Monitoring of Mechanical Faults in Variable Speed Induction Motor Drives Application of Stator Current Time-Frequency Analysis and Parameter Estimation*", These de Doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse, France 2006.
- [32].M. Drif and A. J. M. Cardoso "Airgap-Eccentricity Fault Diagnosis, in Three-Phase Induction motors, by the Complex Apparent Power Signature Analysis", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol.55, no.3, March 2008.
- [33] G.B. Kliman and J. Stein, "Methods of Motor Current Signature Analysis", *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 20, No. 3, September 1992, pp. 463-474.
- [34] A. Ghoggal, M. Sahraoui and S.E. Zouzou, "Analytical and experimental study of squirrel cage induction motors with rotor bar faults", *Advances in Modeling, Measurement and Control, A: General Physics and Electrical Applications*, vol.81, no 2, pp. 43-60, 2008.
- [35] R. P. Panadero M. P. Sanchez, M. R. Guasp, J. R. Folch, E. H. Perez and J. P. Cruz, "Improved Resolution of the MCSA Method Via Hilbert Transform, Enabling the Diagnosis of Rotor Asymmetries at Very Low Slip", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 24, no. 1, March 2009, pp. 52-59.
- [36] M. A. Cash, T. G. Habetler and G. B. Kliman, "Insulation failure prediction in ac machines using line-neutral voltages", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 34, no. 6, Nov. /Dec. 1998, pp. 1234\_1239.
- [37] M.E.K. Oumaamar A. Khezzar, M. Boucherma, H. Razik, R.N. Andriamalala and L. Baghli, "Neutral Voltage Analysis for Broken Rotor Bars Detection in Induction Motors Using Hilbert Transform Phase", in *Proc. IEEE IAS'07 Annual Meeting Conf.2007*, pp.1940-1947
- [38] A. Khezzar, M.K. Oumaamar, M. Hadjami, M. Boucherma and H. Razik, "Induction Motor Diagnosis Using Line Neutral Voltage Signatures", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, Nov. 2009, pp. 4581-4591.
- [39] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, "Recent developments of induction motors drives fault diagnosis using AI techniques" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 47, no. 5, pp. 994-1003, Oct.2000
- [40] R. Casimir, E. Boutleux, G. Clerc, F. Chappuis, "Broken bars detection in an induction motor by pattern recognition", *Proc. IEEE Power Tech'03 International Conference*, pp 282 - 288, 23-26 June 2003, Bologna Italy
- [41] H. Farreny, "*Les systèmes experts – Principes et exemples*" Cépadues, 1989.
- [42] J. L. Alty, L. I. Mikulich, "Industrial applications of artificial intelligence" *2nd ed.*, *Kluwer Academic Publisher*, North Holland, 1991.

- [43] S. Ahrens, "Système expert d'aide au diagnostic et à la maintenance de grands entraînement électrique" *Thèse de doctorat – Institut National Polytechnique de Grenoble*, 1993.
- [44]. D. Vilain, F. Madar, "Surveillance et diagnostic en ligne d'un four à ciment à l'aide d'un système expert temps réel" Actes de la convention IA'91, Paris 1990.
- [45] L. F. Pau, "Diagnosis of equipment failure by pattern recognition" *IEEE Transactions on Reliability*, Vol.1, pp. 750-756, 1974.
- [46],M. A. Peltier, B. Dubuisson, "A human operator monitoring process based on a fuzzy approach" *In Tooldiag'93, International conference on Fault diagnosis*, 1993.
- [47],M. Haji, H. A. Toliyat, "Pattern recognition – A technique for induction machine rotor broken bar detection" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.16, Issue 4, pp. 312-317, December 2001.
- [48], D. Diallo, M. E. H. Benbouzid, D. Hamad, X. Pierre, "Fault detection and diagnosis in induction machine drive: A pattern recognition approach based on Concordia stator mean current vector" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20, Issue 3, pp. 512-519, Sept. 2005.
- [49],E. Boutleux, "Diagnostic et suivi d'évolution de l'état d'un système, par reconnaissance des formes floues. Application au modèle du réseau téléphonique français" *Thèse de doctorat Université de Technologie de Compiègne*, 1996
- [ 50]N. Boudaoud, "Conception d'un système de diagnostic adaptatif en ligne pour la surveillance des systèmes évolutifs" *Thèse de doctorat Université de Technologie de Compiègne*, 1997.
- [ 51] Didier G., « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances » Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.:
- [52] Henry D., « Diagnostic et contrôle de cohérence des systèmes multi variables incertains ». Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, France, 1999.
- [53] S. C. Pei and S. B. Jaw, "Computation of discrete Hilbert transform through fast Hartley transform," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 36, no. 9, pp. 1251–1252, Sep. 1989.
- [54] X. Boqiang et al, "A novel approach to detect rotor bar breaking fault of induction motors based on Hilbert transform and graph visualization technique," *The Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 2002, Jeju (Korea)*, 2: 975-978.
- [55] Z. Liu, X. Zhang, X. Yin, and Z. Zhang, "Rotor cage fault diagnosis in induction motors based on spectral analysis of current Hilbert modulus. *The Proceedings of IEEE 2004 Power Engineering Society General Meeting*, 6-10 June 2004, Denver (USA), 2: 1500-1503.
- [56]Li Qi, Lewei Qian, Stephen Woodruff, and David Cartes .Prony analysis for power system transient harmonics.*The center for advanced power systems, Florida State University,Tallahassee,*

FL32310, USA Received 9 August 2006; revised 15 December 2006; accepted 18 December 2006 recommended by Irene Y. H. Gu

[57] M. sahraoui, se. zouzou, a. menacer, a. aboubou, a. derghal diagnostic des defauts dans les moteurs asynchrones triphases a cage Partie I : Modèle Dédié à la Simulation des Ruptures de Barres juin 2004

[58] Luc Mutrel « ELECTROTECHNIQUE. Le moteur asynchrone – Régimes statique et dynamique . Ellipses Edition 1999

[59] Damien Grenier and al. “Electromécanique – Convertisseurs d’énergie et actionneurs. Dunod, Paris,2001.

[60] Martin Blödt. Condition Monitoring of Mechanical Faults in Variable Speed Induction Motor Drives : Application of Stator Current Time-Frequency Analysis and Parameter Estimation. Thèse de doctorat, Laboratoire d’Electrotechnique et d’Electronique Industrielle de l’ENSEEIH, Institut National Polytechnique de Toulouse, 14 septembre 2006.

[61] H. A. Toliyat, T. A. Lipo, " Transient Analysis of Cage Induction Machines Under Stator, rotor bars and end – ring Faults", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 10, N°6, June 1995, pp. 241-247

[62] mamadou L.d ; Abdoulaye T « modélisation et simulation d’une machine asynchrone à cage à l’aide du logiciel matlab/simulink »

[63] M.Sahraoui, S.E.Zouzou, A. Menacer, A. Aboubou Et A. Derghal Diagnostic des defauts dans les moteurs asynchrones triphases à cage partie II : méthodes dédiées a la détection des cassures de barres dans les moteurs asynchrones triphasés a cage Courrier du Savoir – N°05, Juin 2004, pp. 57-61

[64] Ali Ibrahim, François Guillet, Mohamed Elbadaoui, and Frédéric Bonnardot "Techniques to estimate the instantaneous frequency with an aim of induction machines faults diagnosis. In Proceedings of IEEE, IECON’08, Orlando Florida, USA, 10-13 Nov. 2008. IEEE.

[65] Sahraoui M., Ghoggal A., Zouzou S., Benbouzid M.,”Dynamic eccentricity in squirrel cage induction motor-Simulation and analytical study of its spectral signature on stator currents”, Elsevier Simulation Modelling Practice and Theory, vol.16, p.1503-1513, 2008

[66] Ramzy R. Obaid and Thomas G.Habetler "effect of load on detecting Mecanichal faults in small induction motors " SDEMPEDS Atlanta GA USA 24-26 August 2003.

[67] Shoen R.R. et al., « Motor bearing damage detection using stator current monitoring”, IEEE Trans.Ind.Applicat., vol.31, novembre-decembre 1995.

[68] Blodt M., Granjon P., Raison B., Rostaing G., « Models for bearing damage detection in induction motors », IEEE trans, ind. Electron. vol.55, n°4, p.1813-1822, avril 2008.

[69] J. R. Stack, T. G. Habetler, R. G. Harley, Fault classification and fault signature production for rolling element bearing in electric machines” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40,, no. 3, Mai-Juin 2004, pp. 735-739.

[70 ] JoaF. Martins, Vitor F. Pires, Tito Amaral. “Induction motor fault detection and diagnosis using a current state space pattern recognition .” ,Pattern Recognition Letters 32 (2011) 321–328

[71] V. Fernao Pires, J.F. Martins , A.J. Pires .” Eigenvector/eigenvalue analysis of a 3D current referential fault detection and diagnosis of an induction motor”., Energy Conversion and Management 51 (2010) 901–907.