

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR - ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2015/2016

Faculté des Sciences de l'Ingénierat  
Département d'Electromécanique

## Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat

Intitulée

*Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des  
Défauts De la Machine Asynchrone*

Option : Génie Industriel

Par : KERFALI SAMIR

Soutenue le 30/05/2016

Devant le Jury

PRESIDENT :

DIRECTEUR DE THESE :

EXAMINATEURS :

**HADJADJ Aoul Elies**

**BOURAS Slimane**

**KABOUCHE Abdallah**

**MOUSSAOUI Abdelkrim**

**BOUZAOUT Azzedine**

**Pr. Univ. Annaba**

**MCA. Univ. Annaba**

**MC A. Univ. Annaba**

**Pr. Univ. Guelma**

**MC A. Univ. Skikda**

*Je dédie ce travail*

*A mes parents pour leur infini dévouement*

*A mes amis pour leur fidélité sans failles*

## **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 MOUSSAOUI Abdelkrim Professeur de l'Université de Guelma, BOUZAOUIT Azzedine Maître de Conférences de l'université de Skikda et KABOUCHE Abdallah Maître de Conférences de l'université d'Annaba, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail de recherche et d'être membres Examineurs du jury.

Enfin, j'adresse mes remerciements 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.

## الملخص

لا تزال المحركات الحثية الأكثر رواجاً في البيئة الصناعية. نظراً لمتانتها وملائمتها في تمرير الكهرباء بسرعة متفاوتة، إلا أن الحفاظ على استمرارية عملها الغير متدهور يتطلب اهتماماً خاصاً، لأن أي عطب قد يصيبها في أي وقت يسبب خسائر كبيرة . هذا العمل يساهم في التشخيص والكشف عن العيوب التي تتعرض لها المحركات الحثية الإلكترونية ميكانيكية ثلاثية الأطوار بقصص دوار و حلقة القصر الكهربائي المرتبط بها , نهدف من هذا العمل اكتشاف الإعطاب(كسر في قضبان القفص الدوار مصحوباً بكسر في جزء من حلقة القصر الكهربائي،الخلل الميكانيكي، عدم التوازن الشامل، الاختلال وتلبس أسنان العتاد ) وكذا بعض الاختلالات المصاحبة لهذه الإعطاب مجتمعة , الإعطاب الميكانيكية المأخوذة بعين الاعتبار في هذا العمل هي الأكثر ضرراً بعد المدرجات عادة لمراقبة وتشخيص هذه الإعطاب في التطبيقات الإلكترونية ميكانيكية.

يعتبر تحليل الأطياف الاهتزازية و الصوتية الأكثر رواجاً , إلا أن طريقة المنتهجة في بحثنا تعطي دمجاً لتيارات الخط والمحاييد وكذا التفسير البصر للأنماط المستخرجة من التمثيل ثلاثي الأبعاد لي مربع شدة التيار أطوري , لان الإعطاب الكهربائية والميكانيكية المذكورة سابقاً تحدث غالباً في الترددات المنخفضة و يمكن إن يحدث الالتباس بينهما،فكان لا بد من استعمال التقنيتين في نفس الوقت لقراءة أفضل،إن طريقة التحليل الترددي لمحول فوري وكذا التمثيل ثلاثي الأبعاد استعملت معاً لفصل الإعطاب المذكورة سابقاً(كهربائية أو ميكانيكية) ولتميز بينهما . إن التطبيقات التجريبية استعملت فيها محركين لأول ذو استطاعة تقدر بي 270 واط والثاني تقدر استطاعته بي 3كيلوواط مربوط بمخفض ذو ثلاثة مستويات , إن لجوء لهذه المجموعة من الأطياف الترددية و المدارية التي تتطلب معدات ذات ثمن معقول تساهم في تحسين التشخيص لوقائي من الإعطاب المعزولة والمدرجة علي خرار، كسر في قضبان القفص الدوار مصحوباً بكسر في جزء من حلقة القصر الكهربائي،الخلل الميكانيكي، عدم التوازن الشامل، الاختلال وتلبس أسنان العتاد، النتائج المرضية المتحصل عليها تسمح من دون لبس تتوقع الإيقاف النهائي لعدم الاتزان وبالتالي برمجة التوقف دون تعطيل الإنتاج.

**الكلمات المفتاحية:** المحركات الحثية ، العيوب كسر في قضبان القفص ، الخلل الميكانيكي ، ثلاثي الأبعاد ، تحويل فورييه , التيار المحاييد.

## Resumé

De par sa robustesse et son adaptation actuellement aux entraînements électriques à vitesse variable, le moteur à induction demeure le plus sollicité dans le milieu industriel. Cependant, dans les chaînes de production où il exerce un rôle stratégique, le maintien de la continuité de son fonctionnement non dégradé nécessite une attention particulière dans le cadre de sa surveillance, car une panne peut à tout moment surgir et causer de grandes pertes. Ce travail s'inscrit dans le concept de la surveillance et du diagnostic des défauts auxquels sont soumis fréquemment les entraînements électromécaniques asynchrones, à savoir, la machine asynchrone triphasée à rotor en court circuit et le réducteur mécanique qui lui est directement lié. Notre contribution a pour thématique la détection de la rupture de barres de la cage rotorique accompagnée de la cassure d'une portion de l'anneau de court circuit, du déséquilibre mécanique (ou balourd), du désalignement, de l'usure des dents d'engrenages et de certaines anomalies issues de leurs fusion. Les défauts mécaniques pris en considération dans notre travail sont les plus agressives après celles des roulements dont ils sont d'ailleurs, la cause principale. Traditionnellement, pour surveiller et diagnostiquer ces défaillances dans les applications électromécaniques, l'analyse des signaux vibratoires et sonores ont été les plus abordées. Cependant, l'approche novatrice de notre recherche offre une association de la MCSA des courants de la phase statorique et du neutre avec l'interprétation visuelle des motifs extraits de la représentation en 3D du carré des intensités des courants phasiques. Comme les dégradations électriques et mécaniques précitées surgissent généralement en basse fréquence et peuvent se masquer l'un l'autre, l'application simultanément de deux techniques de traitement du courant statorique a été jugée nécessaire. L'approche de l'analyse fréquentielle moyennant la transformée de Fourier (FFT) a été suppléée par une technique de reconnaissance de forme en 3D afin de séparer la lecture des dégradations précitées et d'en identifier leur nature. La validation expérimentale a été réalisée sur deux moteurs à induction dont l'un de 270 Watts et l'autre de 3 kW accouplé à un réducteur à trois paliers. Le recours à cette panoplie de signatures fréquentielles et orbitales dont l'obtention ne nécessite qu'un matériel simple et à faible coût, contribue à améliorer la fiabilité du diagnostic prédictif des dégradations isolées et fusionnées à savoir la rupture de la cage rotorique, le déséquilibre massique, le désaxement et la dégradation de la denture des engrenages. Les résultats satisfaisants obtenus permettent sans ambiguïté d'anticiper l'arrêt définitif du système et par conséquent, programmer l'arrêt indispensable sans perturber la production.

**Mots-clés:** Moteur à induction, balourd, rupture de barres et portion d'anneau, reconnaissance de formes en 3D, FFT, Courant neutre.

## Abstract

Due to its robustness and its adaptation to the current electric drives variable speed induction motor remains the most requested in the industry. However, in production lines where it has a strategic role, maintaining the continuity of its unimpaired operation requires special attention under its supervision, because a failure can arise at any time and cause great losses. This work is part of the concept of monitoring and fault diagnosis which are frequently subjected asynchronous electric drives, namely, the three-phase asynchronous machine with short-circuited rotor and gear box which is directly linked to it. Our contribution to thematic detecting the breakage of the rotor cage bars accompanied by the breaking of a short portion of the ring circuit, the mechanical imbalance (or imbalance) of misalignment, wear of the teeth gears and certain anomalies from their merger. Mechanical faults considered in our work are the most aggressive ones bearings after they are also the main cause. Traditionally, to monitor and diagnose these failures in electromechanical applications, analysis of vibration and acoustic signals have been the most discussed. However, the innovative approach of our research offers a combination of MCSA currents of the stator phase and neutral with visual interpretation of patterns extracted from the 3D representation of the square of the intensities of phasic currents. As aforementioned electrical and mechanical damage usually arise in low frequency and can hide each other, applying simultaneously two stator current processing techniques was deemed necessary. The approach of the frequency analysis by means of the Fourier transform (FFT) was supplemented by a form recognition technique to 3D to separate reading of the aforementioned degradations and to identify their nature. The experimental validation was performed on two induction motors which one of 270 Watts and the other 3 kW coupled to a three-step gear unit. The use of this range of frequency and orbital obtaining signatures which requires only simple equipment, low cost, improves the reliability of the predictive diagnosis of isolated damage and merged namely breaking the rotor cage, the imbalance by mass, the axial offset and the degradation of the gear teeth. The satisfactory results obtained allow unambiguous anticipate the final shutdown of the system and therefore the program must stop without disrupting production.

**Key words:** Induction motor, unbalance, breking bars and portion of a ring, pattern recognition in 3D, FFT, Neutral current.

## Sommaire

المُلخَص	1
Resumé	v
Abstract	vi
Sommaire	vii
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xii
Symboles	xiii
INTRODUCTION GENERALE	1
FORMULATION DU PROBLEMATIQUE	2
ORGANISATION DU DOCUMENT	2
<b>CHAPITRE 1 ETAT DE L'ART</b>	<b>5</b>
<b>1.1. INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
<b>1.2. ELEMENTS CONSTITUANT LA MACHINE ASYNCHRONE</b>	<b>5</b>
1.2.1. LE STATOR	5
1.2.2. LE ROTOR	6
1.2.3. LES PALIERS	7
<b>1.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE ASYNCHRONE</b>	<b>7</b>
1.3.1. FONCTIONNEMENT A VIDE	8
1.3.2. FONCTIONNEMENT EN CHARGE	8
1.3.3. CARACTERISTIQUE MECANIQUE : $CU = F(N')$	8
<b>1.4. ÉTUDE STATISTIQUE DES DIFFERENTS DEFAUTS DE LA MACHINE ASYNCHRONE :</b>	<b>8</b>
1.4.1. DEFAILLANCES D'ORDRE ELECTRIQUE	11
1.4.1.1. Défaillances des circuits électriques rotoriques	11
1.4.1.1.1. Ruptures de barres	12
1.4.1.1.2. Ruptures d'anneaux	13
1.4.1.1.3. Excentricité statique et dynamique	13
1.4.1.2. Défaillances des circuits électriques statorique	16
1.4.1.2.1. Défauts d'isolant dans un enroulement	16
1.4.1.2.2. Court-circuit entre spires	17
1.4.1.2.3. Court-circuit entre phases	18
1.4.1.2.4. Défauts de circuit magnétique	18
1.4.2. DEFAILLANCES D'ORDRE MECANIQUE	18
1.4.2.1. Défaillances des roulements	18
1.4.2.2. Défaillances des flasques	20
1.4.2.3. Défaillances de l'arbre mécanique	20
1.4.2.4. Défauts de déséquilibre massique ou « Balourd »	21
1.4.2.5. DEFAUT DE DESALIGNEMENT	21
1.4.2.6. DEFAUTS DANS LES ENGRENAGES	22

<b>1.5. CONCLUSION</b>	<b>24</b>
<b><u>CHAPITRE 2    MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE</u></b>	<b><u>25</u></b>
<b>2.1. INTRODUCTION</b>	<b>25</b>
<b>2.2. MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASEE</b>	<b>25</b>
2.2.1. REPRESENTATION SCHEMATIQUE.	25
2.2.2. TRANSFORMATION DE PARK :	28
<b>2.3. MODELISATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE DANS LE REPERE DE PARK</b>	<b>30</b>
2.3.1. REFERENTIEL LIE AU STATOR	31
2.3.2. REFERENTIEL LIE AU ROTOR	31
<b>2.4. SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE SAIN A VIDE ET EN CHARGE:</b>	<b>32</b>
<b>2.5. MODELISATION DES DEFAUTS D'UN ENTRAINEMENT ELECTROMECHANIQUE ASYNCHRONE</b>	<b>37</b>
2.5.1. MODELISATION DES DEFAUTS ELECTRIQUES D'UN ENTRAINEMENT ELECTROMECHANIQUE ASYNCHRONE	37
2.5.2. MODELISATION DES DEFAUTS MECANQUES D'UN ENTRAINEMENT ELECTROMECHANIQUE ASYNCHRONE	38
2.5.2.1. Expression du Couple Electromagnétique	38
2.5.2.2. Equation du Mouvement(ou Mécanique)	38
2.5.2.3. Equations d'Equilibre Mécanique de l'Entraînement mécanique	39
2.5.2.4. Effet sur les FMM (force magnétomotrices du Rotor et du stator)	39
2.5.2.5. Effet sur la densité de flux et du courant statorique	42
<b>2.6. CONCLUSION</b>	<b>43</b>
<b><u>CHAPITRE 3    LES METHODES DE DIAGNOSTIC ET LA TECHNIQUE DE L'ANALYSE DES COURANTS STATORIQUES</u></b>	<b><u>44</u></b>
<b>3.1. INTRDUCTION</b>	<b>44</b>
<b>3.2. LES METHODES DE DIAGNOSTIQUE</b>	<b>44</b>
3.2.1. DIAGNOSTIC PAR LES METHODES INTERNES	44
3.2.2. DIAGNOSTIC PAR LES METHODES EXTERNES	46
3.2.3. DIAGNOSTIC PAR LES METHODES INDUCTIVES	46
3.2.4. DIAGNOSTIC PAR LES METHODES DEDUCTIVES	46
<b>3.3. LES TECHNIQUE DE L'ANALYSE DE SIGNAL DANS LA MACHINE ASYNCHRONE</b>	<b>47</b>
3.3.1. LA TRANSFORMEE DE FOURIER	47
3.3.2. METHODE DE REPRESENTATION TRIDIMENSIONNELLE DES COURANTS STATORIQUES (3D)	48
3.3.3. SIGNATURE DE LA COMPOSANTE DIRECTE DU VECTEUR DE PARK	50
3.3.4. SIGNATURES ORBITALES DU VECTEUR DE PARK	50
3.3.5. TRANSFORMEE DE FOURIER A COURT TERME (STFT))	51
3.3.6. SIGNATURES DU SPECTROGRAMME DE LA TRANSFORMEE DE GABOR (TG)	52
3.3.7. LA TRANSFORMEE EN ONDETTES CONTINUE (CWT)	52
3.3.8. SIGNATURE DU COURANT NEUTRE	53
<b>3.4. CONCLUSION</b>	<b>54</b>
<b><u>CHAPITRE 4    APPLICATION DE L'APPROCHE COURANT DEDIEE A LA DETECTION ET AU DIAGNOSTIC DU MOTEUR ASYNCHRONE</u></b>	<b><u>55</u></b>



<b>4.1. INTRODUCTION</b>	<b>55</b>
<b>4.2. PREMIER BANC D'ESSAI</b>	<b>55</b>
<b>4.3. DEUXIEME BANC D'ESSAI</b>	<b>57</b>
<b>4.4. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS (PREMIERE PARTIE)</b>	<b>58</b>
4.4.1. ANALYSE SPECTRALE	58
4.4.2. SIGNATURES DES DEFAUTS PAR LA RECONNAISSANCE DES FORMES EN 3D.	61
<b>4.5. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS (DEUXIEME PARTIE)</b>	<b>65</b>
4.5.1. SYSTEME ELECTROMECHANIQUE NON DEGRADE	65
4.5.2. SYSTEME ELECTROMECHANIQUE D'ENTRAINEMENT DEFAILLANT SUITE A LA FUSION BALOURD ET DESALIGNEMENT	67
4.5.3. SYSTEME ELECTROMECHANIQUE D'ENTRAINEMENT DEFAILLANT SUITE A UN BALOURD ET A UNE DEGRADATION DE LA DENTURE DE LA BOITE A ENGRENAGE	69
4.5.4. SYSTEME ELECTROMECHANIQUE D'ENTRAINEMENT DEFAILLANT SUITE A UN DEFAUT COMBINE BALOURD, DESALIGNEMENT ET CASSURE DES DENTS	72
<b>4.6. CONCLUSION</b>	<b>75</b>
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>78</b>
<b>Contributions scientifiques</b>	<b>85</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>86</b>
<b>Caractéristiques du moteur asynchrone à rotor en court circuit (Premier banc d'Essai)</b>	<b>86</b>
<b>CARACTERISTIQUES DU MOTEUR ASYNCHRONE (DEUXIEME BANC D'ESSAI)</b>	<b>86</b>

## Liste des figures

Figure 1.1. Eléments constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [3-4]	6
Figure 1.2 . : Principe du fonctionnement d'un moteur [1]	7
Figure. 1.3. Caractéristique mécanique du moteur [1]	8
Figure 1.4 : Proportion des défauts 1988[9]	10
Figure 1.5 : Pourcentage des défauts 1995 [10]	10
Figure 1.6 : pourcentage des défaut 2008 [11]	11
Figure. 1.7 Rupture de barre	12
Figure 1.8 modélisations schématiques de l'excentricité statique et dynamique [35]	14
Figure 1.9 Court-circuit entre spires	17
Figure 1.10 les roulements à billes [40]	19
Figure 1.11 Désalignement des arbres [72]	21
Figure 1.12 Image de désalignement parallèle [72]	22
Figure 1.13 Image de désalignement angulaire [72]	22
Figure 1.14 Différents types d'engrenage [72]	23
Figure 1.15 Défauts réels d'engrenage localisé [72]	24
Figure 2.1 : Représentations schématique d'une machine asynchrone triphasée	27
Figure 2.2 Représentation des machines asynchrones triphasées après la transformation de Park (modèle biphasé équivalent)	30
Figure 2.3 Couple électromécanique à vide	32
Figure 2.4 Vitesse à vide	33
Figure 2.5 Flux statorique direct à vide	33
Figure 2.6 Flux statorique quadratique à vide	33
Figure 2.7 Courant statorique direct à vide	34
Figure 2.8 Courant statorique quadratique à vide	34
Figure 2.9 couple électromécanique en charge	35
Figure 2.10 Vitesse en charge	35
Figure 2.11 Flux statorique direct en charge	35
Figure 2.12 Flux statorique quadratique en charge	36
Figure 2.13 Courant statorique direct en charge	36
Figure 2.14 Courant statorique quadratique en charge	37
Figure 2.15. Cadre référentiel du Stator (S) et du rotor (R) frame [72]	41
Figure 3.1 Principe de la Transformée de Fourier (FT) [72]	48
Figure 3.2 : Machine saine	49
Figure 3.3 : Machine en rupture de barre	49
Figure 3.4 Passage de la caractéristique temporelle à la STFT [67]	51
Figure. 3.5 Principe de la Transformée d'Ondelettes Continues [67]	53
Figure 4.1. Banc d'Essai	56
Figure 4.2. Banc d'essai du Système d'entraînement électromécanique	57

Figure 4.3 : le courant statorique de la machine sain	58
Figure 4.4 le courant statorique de la machine avec défaut	58
Figure 4.5 le courant statorique de la machine sain et défaut avec le même référentiel	59
Figure 4.6 Le spectre de la machine saine	59
Figure 4.7 Le spectre de la machine avec trois barres casées	60
Figure 4.8 : Le spectre de la machine avec défaut balourd (90g)	60
Figure 4.9 Le spectre de la machine sain avec défaut trois barres casées et balourd (90g) le même plan	61
Figure 4.10. Motif en 3 D représentant le fonctionnement sain du moteur	62
Figure 4.11 Motifs en 3D pour le mode de fonctionnement du moteur à induction en présence : d'un défaut de balourd.	62
Figure 4.12 Motifs en 3D pour le mode de fonctionnement du moteur à induction en présence : la cassure d'une portion d'anneau de court circuit et de 3 barres rotoriques	63
Figure 4.13 Motifs en 3D pour le mode de fonctionnement du moteur à induction en présence :	63
Figure 4.14 : Organigramme	64
Figure 4.15 : Caractéristique temporelle du courant (a) ; Spectre du courant phasique (b) ; Spectre du courant Neutre $I_{neutre}$ (c) ; Motif en 3D (d)	66
Figure 4.16 Caractéristique temporelle du courant phasique (a) ; Spectre du courant phasique(b) avec défauts balourd et désalignement [73]	67
Figure 4.17 Caractéristique temporelle de $I_{neutre}$ (a); spectre de $I_{neutre}$ (b) ; Motif en 3D (c) avec défauts balourd et désalignement	69
Figure 4.18 Caractéristique temporelle de $I_{ph.}$ (a) et son Spectre (b) avec défaut : balourd et à une cassure des dents	70
Figure 4.19 Caractéristique temporelle de $I_{neutre}$ a) et Son Spectre (b); c. Motif en 3D en présence de défauts : balourd et à une cassure des dents du réducteur	71
Figure 4.20 Caractéristique temporelle de $I_{ph.}$ (a) et son Spectre (b) avec défauts combiné balourd, désalignement et casseur des dents	72
Figure 4.21 Caractéristique temporelle de $I_{neutre}$ (a) et son Spectre (b); Motif en 3D (c) avec défauts combiné Balourd, désalignement et casseur des dents	74

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 Défauts des machines électriques selon leurs origines.....	09
Tableau 4.1 Caractéristiques du moteur asynchrone à rotor en court circuit.....	56
Tableau 4.2 Tableau de Signatures des Défauts.....	74

## Symboles

$n_s$  : Vitesse de synchronisme de la machine asynchrone (tr/min) ;  $n_s = 60 \frac{f}{P}$

$p$  : nombre de paires de pôles

$n_r$  : Vitesse de rotation du rotor (tr/mn) ;  $n_r = n_s (1-g)$

$g$  : glissement

$C$  : Le couple utile (ou mécanique)[N.m],  $C = (P \cdot 60) / 2\pi n$

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

$P$  : puissance active

$Q$  : puissance réactive

$F_b$  : fréquence de défaut rupture de barre

$F_s$  : fréquence d'alimentation

$F_{exe}$  : fréquence d'excentricité

$F_{cc}$  : fréquence de court-circuit

$f_{be}$  : la fréquence caractéristique de la bague externe

$f_{bi}$  : la fréquence caractéristique de la bague interne

$F_r$  : fréquence de rotation mécanique

$N_b$  : nombre de billes

$D_b$  : diamètre des billes

$D_c$  : distance du centre des billes

$\Phi$  : L'angle de contact de la bille avec la bague

$F_d$  : fréquence de défaut balourd

$V_{sa(1)}, V_{sb(2)}, V_{sc(3)}$  : Tensions statoriques suivants les axes as, bs et cs

$V_{ra(1)}, V_{rb(2)}, V_{rc(3)}$  : Tensions rotoriques suivants les axes ar, br et cr

$V_{s\alpha,\beta}, V_{r\alpha,\beta}$  : Tension statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe  $\alpha$  (ou  $\beta$ )

$V_{sd,q}$  ,  $V_{rd,q}$  : Tension statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe d (ou q)

$i_{ra}(1)$ ,  $i_{rb}(2)$ ,  $i_{rc}(3)$  : Courants rotoriques suivants les axes ar, br et cr

$i_{sa}(1)$ ,  $i_{sb}(2)$ ,  $i_{sc}(3)$  : Courants statoriques suivants les axes as, bs et cs

$I_{s\alpha,\beta}$  ,  $I_{r\alpha,\beta}$  : Courant statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe  $\alpha$  (ou  $\beta$ )

$i_{sd,q}$  ,  $i_{rd,q}$  : Courant statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe d (ou q)

$\Phi_{sa}(1)$ ,  $\Phi_{sb}(2)$ ,  $\Phi_{sc}(3)$  : Flux statorique suivant les as, bs et cs

$\Phi_{sr}(1)$ ,  $\Phi_{sr}(2)$ ,  $\Phi_{sr}(3)$  : Flux rotoriques suivant les ar, br et cr

$\Phi_{sd,q}$  ,  $\Phi_{rd,q}$  : Flux statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe d (ou q)

$\Phi_{s\alpha,\beta}$  ,  $\Phi_{r\alpha,\beta}$  : Flux statorique (respectivement rotorique) suivant l'axe  $\alpha$  (ou  $\beta$ )

$J$  : Moment d'inertie

$[L]$  : Matrice inductance

$L_{fs}$  : Inductance de fuite au stator

$L_m$  : Inductance mutuelle entre le stator et le rotor

$I_{ms}$  : Inductance magnétisante

$I_r$  : Inductance propre cyclique du rotor

$I_s$  : Inductance propre cyclique du stator

$[R_s] = \text{diag}(R_s)$  la matrice de résistance par phase du stator

$[R_r] = \text{diag}(R_r)$  la matrice de résistance par phase du rotor

$[R]$  : Matrice résistive

$R_s$  ,  $R_r$  : Résistance statorique, respectivement rotorique

$R_{ra}$ ,  $R_{rb}$ ,  $R_{rc}$  : Résistance rotorique de la phase ar, br, cr

$R_{sa}$ ,  $R_{sb}$ ,  $R_{sc}$  : Résistance statorique de la phase as, bs, cs

$\sigma$  : Coefficient de fuite total

$L_s$  : L'inductance cyclique statorique

$L_r$  : L'inductance cyclique rotorique

$$M_{rs} = (3/2)m_{sr}$$

$m_{sr}$  : inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor

$m_r$  : inductance mutuelle entre deux phases du rotor

$m_s$  : inductance mutuelle entre deux phases du stator

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$$

[Lr] : matrice des inductances rotorique

[Ls] : matrice des inductances statorique

[M<sub>sr</sub>] : matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et celles du rotor

[Rr] : vecteur des résistances rotorique

[Rs] : vecteur des résistances statorique

[Vr] : vecteur des tensions rotorique

[Vs] : vecteur des tensions statorique

$\theta_s$  : 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

$J$  : 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)

[X] : Vecteur d'état

[U] : Vecteur de comm

[A] : Matrice d'évolution

[B] : Matrice de commande

$J$  : Moment d'inertie des parties tournantes

$\omega_m$  : vitesse angulaire mécanique du rotor ( $\omega_m = p\omega$ )

$\omega_c = 2\pi f_c$  : Pulsation de l'oscillation et du défaut

$C_c$  : L'amplitude de l'oscillation liée à la sévérité du défaut  
 $C_{\text{moteur}}$  : Couple électromagnétique  
 $C_{\text{const}}$  : couple de charge  
 $\omega_{r0}$  : la vitesse angulaire à vide  
 $\vartheta_r$  : L'angle mécanique du rotor  
 $f_c$  : la fréquence caractéristique  
 $F_s$  : force magnétomotrice statorique fondamentale  
 $F_r^{(R)}$  : force magnétomotrice rotorique lié au rotor (R)  
 $\varphi$  : déphasage des courants rotoriques par rapport aux courants statoriques  
 $\theta$  : angle mécanique dans le repère fixe du stator  
 $\omega_{r0}$  : la vitesse mécanique angulaire du rotor  
 $\Phi$  : Le flux magnétique  
 $B$  : l'induction magnétique  
 $A$  : Surface  
 $\Lambda_0$  : perméance de l'entrefer  
 $\phi_A$  : angle de phase de la modulation.  
 $i_r(t)$  : la modulation de phase due aux oscillations du couple et de la vitesse  
 $X(t)$  : signal généré par le défaut à caractère transitoire  
 $X(f)$  : la valeur d'un coefficient de Fourier à la fréquence  
 $f_1$  : fréquence fondamentale (Hz)  
 $x(t)$  : représente le signal temporel échantillonné  
 $w(t)$  : fenêtre temporelle de largeur T  
 $w^*$  : dénote le complexe conjugué de w  
 $C_{m,n}$  : Les coefficients de Gabor du signal  
 $\tau$  : le coefficient de translation  
 $s$  : le coefficient d'échelle (ou facteur de dilatation de  $\psi$ )



$\psi(t)$  : ondelette mère

$\psi^*$  : le complexe conjugué de  $\psi$

$\alpha$  : angle de contact

$\Omega$  : Vitesse de rotation de l'arbre

$f_r$  : fréquence de rotation de l'arbre

$I_A, I_B,$  and  $I_C$  : les courants statoriques des trois phases

$I_m$  : Valeur maximale du courant

$\omega$ : Pulsation

$\varphi$ : Angle de la phase

$t$ : temps

## INTRODUCTION GENERALE

Les progrès réalisés en matière d'électronique de puissance, de circuits de commande et le développement de l'automatisation ont favorisé une utilisation galopante des machines asynchrones. L'apparition des variateurs (Altivar) de la fréquence de rotation dans une large gamme, la robustesse, la puissance massique et le coût de fabrication, ont permis actuellement à la machine asynchrone de devenir très compétitive dans les secteurs industriels. Par conséquent, elles entrent dans la conception de nombreux procédés industriels dans le cadre des entraînements électriques. Cependant, dans les chaînes de production le moteur asynchrone joue un rôle stratégique dans plusieurs procédés de fabrication, il est considéré comme le maillon faible et le maintien de la continuité de son fonctionnement non dégradé nécessite une attention particulière dans le cadre de sa surveillance, car sa panne peut à tout moment causer de grandes pertes.

Parmi toutes les machines électriques tournantes utilisées dans les systèmes électromécaniques, notre choix a porté sur le moteur à induction. La présence de ces derniers représentent déjà plus de 80% dans les différentes chaînes de production, et d'autant plus, qu'ils ont tendance dans le futur à se substituer aux moteurs à courant continu à vitesse variable pour plusieurs raisons. Notre travail se veut alors une contribution au diagnostic et à la détection précoce des dégradations les plus courantes auxquelles l'actionneur asynchrone et son environnement direct peuvent être soumis et où le temps d'arrêt est très critique, étant donné l'importance de leur rôle dans l'animation des procédés technologiques.

Devant la multitude de défauts envisageables et les conséquences de leurs apparitions, le diagnostic et la prévision de pannes a fait l'œuvre de plusieurs articles [55][10][11]. Parmi les défauts électriques et mécaniques très sensibles aux nombres de démarrages excessifs et aux mauvaises conditions d'exploitations, la fissure de portion d'anneau, la cassure de barres et le déséquilibre massique ou « balourd » sont assez fréquents. Contrairement à la rupture de barres, la rupture de portion d'anneau de court circuit s'avère plus importante car elle induit l'arrêt de la machine [59][60][61][62]. Suite aux altérations mécaniques (perte d'ailette, érosion ou encrassement des pales, ...), ces systèmes sont souvent sujets à des défauts de balourd qui sont généralement à l'origine des dégradations des éléments des roulements. De même, les vibrations et les fluctuations du couple et, par conséquent les à coups, auront des conséquences très critiques pour le matériel de l'environnement à savoir les dégradations des accouplements et de la denture des engrenages pour le réducteur mécanique. En outre, en présence de ces défauts mécaniques, un

grand pompage du courant d'alimentation est constaté en particulier pour les grandes puissances. La nécessité de détecter et de caractériser correctement ces défaillances de façon précoce s'impose afin d'anticiper l'arrêt définitif du système dont le coût a des répercussions financières importantes [56]. Ceci nous ramène notamment à l'utilisation de dispositifs de suivi permanent afin de détecter, diagnostiquer puis corriger les modes défaillants affectant les mécanismes. Plusieurs travaux de recherches ont privilégié les défauts électriques de la cage rotorique. Par contre, [63],[58]ont mené leur étude sur les défaillances mécaniques (balourd, désalignement ,roulement, engrenage ) affectant fréquemment le moteur asynchrone.

## **FORMULATION DU PROBLEMATIQUE**

Le diagnostic des machines asynchrones est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus adéquate devient, pour certaine application indispensable. Les chaînes de production doivent être composées de systèmes de protections fiables car une quelconque défaillance, même la plus insignifiante, peut mener à l'arrêt inévitable. Pour remédier à ce problème la recherche, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic dont l'objectif primordial est la prévention d'apparition du risque en un point particulier du système électromécanique. Notre recherche s'articule essentiellement sur le diagnostic des défaillances de la machines asynchrone triphasée à cage d'écureuil et des éléments qui lui sont accouplés telles que les boîtes à vitesse, ceci en faisant appel à la méthode sans modèle à priori, qui elle, est basée essentiellement sur le traitement du signal courant de ligne. Cette approche du courant va nous permettre de diagnostiquer l'état du système électromécanique, d'abord en fonctionnement sain, puis en dysfonctionnement et, essayer après une analyse des spectres ou des formes géométriques obtenus, d'en conclure sur la nature des différentes défaillances électriques et / ou mécaniques

## **ORGANISATION DU DOCUMENT**

Notre travail a été scindé en deux parties. Dans la première partie de cette recherche expérimentale nous exposons la détection de défauts multiples à savoir la fissuration d'une portion d'anneau, la cassure de trois barres et la présence d'un balourd mécanique au rotor par l'exploitation du traitement de l'intensité du courant phasique du stator [64][65] [25]. S'agissant de l'analyse fréquentielle du courant (FFT), généralement ces défauts apparaissent tous en basse fréquence. Cette recherche préconise une approche complémentaire à l'analyse fréquentielle aidant à confirmer la nature du défaut à savoir électrique ou mécanique par une reconnaissance des formes. Cette nouvelle approche développée par [46] est basée sur l'exploitation en 3D du carrée des

intensités du système triphasé d'alimentation du moteur à induction. En se basant sur les fréquences de défaut extraites par la FFT et l'interprétation des signatures basées sur les motifs obtenus pour chaque défaillance (axes d'ellipses, formes des orbites, géométrie et sections des contours périphériques), les deux approches, ensemble, peuvent témoigner de la nature du défaut, de sa localisation (stator ou rotor) et du degré de sa gravité. Ces approches de diagnostic et de détection précoce de défauts ont été validées expérimentalement par la création intentionnelle des défauts précités et les résultats obtenus sont appréciables. Elles sont simples à mettre en œuvre et leurs signatures visuelles sont facilement interprétables. Par conséquent, elles permettent de réaliser un diagnostic approfondi et sont à la portée d'une population de techniciens pas forcément experts en la matière.

Pour extraire de manière précise les informations relatives à ces défaillances, une deuxième partie de ce travail de recherches est dirigée particulièrement vers la MCSA (Motor Current Signature Analysis) [57][58]. L'application consécutive de la FFT et de la 3D a pour objectif de concilier les avantages des signatures spectrales, orbitales et temporelles au profit d'une détection et une lecture fiable des défauts naissants de balourd, de désalignement, et de la denture d'engrenage. En outre, cette panoplie de signatures, a le privilège de préconiser un matériel simple et à faible coût et peut être exploitée par des opérateurs pas forcément experts en la matière. Les résultats obtenus peuvent contribuer à établir une perspective d'approche automatique par l'ajout de techniques de prise de décision qui serait capable de donner un diagnostic fiable et améliorer la gestion en maintenance du parc de machines.

Ainsi le manuscrit de la thèse a été organisé en quatre chapitres:

Le premier chapitre commence par la présentation de la machine asynchrone et les différents éléments qui la composent puis il développe le principe de fonctionnement et les caractéristiques mécaniques de la machine à induction opérant comme moteur. Après cela, une étude statistique a été menée concernant les défauts affectant les machines asynchrones et les différentes pannes qu'ils peuvent causer.

Le deuxième chapitre porte sur la modélisation et la simulation de la machine asynchrone fonctionnant à vide et en charge, puis il expose le modèle mathématique avec les équations appropriées pour un fonctionnement sain de la machine et les résultats de différents essais de simulation.

Le troisième chapitre évoque les méthodes et les techniques de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone. Dans une première partie, il présente les deux grandes familles :

- Les méthodes internes et externes.
- Les méthodes inductives et déductives.

La seconde partie du chapitre est consacrée à la présentation des plusieurs techniques de diagnostic avec l'application consécutive de la FFT, la 3D, l'APV et la STFC pour une détection et une lecture fiable des défauts électriques et mécaniques naissants et certains de leur fusionnement qui affectent couramment les entraînements électriques.

Dans le quatrième et dernier chapitre, les deux bancs d'essais expérimentaux qui ont été conçus et réalisés au laboratoire du département d'électromécanique ont été présentés. La campagne d'essais réalisée sur le premier banc d'essai est faite en deux étapes. La première étape a concerné le captage des courants d'alimentation du moteur sain en fonctionnement et leurs traitements. La deuxième étape de l'expérience a consisté au mesurage et au traitement du courant des 3 phases d'alimentation du stator du moteur en fonctionnement dégradé en procédant volontairement d'abord à une fissure sur l'anneau de court circuit et la cassure de 3 barres rotoriques, puis la création volontaire d'un balourd en fixant une masse de 90 grammes. Le deuxième Banc d'essai a servi à l'étude expérimentale du système électromécanique complexe composé du moteur à induction de 3KW accouplé à un réducteur mécanique de vitesse à trois étages d'engrenages, en fonctionnement sain et en présence des défauts de balourds et de désalignement et l'usure des dents d'engrenages. Les dégradations précitées, séparées puis combinées, ont été réalisées intentionnellement sur le système électromécanique. Les courants ont été prélevés à chaque fois et traités par l'outil Matlab. Nous clôturons ce chapitre par l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus.

Enfin, cette thèse s'achève par une conclusion générale qui synthétise l'ensemble de nos contributions et nos suggestions de quelques perspectives destinées à la poursuite de ce travail de recherche.

# Chapitre 1 ETAT DE L'ART

## 1.1. Introduction

Les méthodes de diagnostic que nous préconisons ont été appliquées aux entraînements électromécaniques à base de moteurs asynchrones. En effet, le moteur asynchrone est un des plus prisés dans les applications industrielles de petites et fortes puissances qui s'étalent de la dizaine aux milliers de kilowatts. Tout simplement parce que cet actionneur présente énormément d'avantages à savoir sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre et son faible coût. En outre, l'apparition dans les dernières décennies des Altivars pouvant assurer la commande électronique des moteurs à induction, a grandement favorisé et favorisera encore plus dans le futur sa propulsion dans le milieu industriel. Ainsi, Ce premier chapitre va porter tout d'abord sur les éléments constituant la machine asynchrone triphasée à cage, certains organes qui lui sont accouplés pour le transfert de sa puissance mécanique et son principe de fonctionnement. Par la suite, il établit une synthèse des défaillances auxquelles la machine peut être soumise et par conséquent pouvant provoquer des pannes entraînant des arrêts inattendus qui sont critiques pour la sécurité du personnel et coûteux pour l'exploitant.

## 1.2. Eléments constituant la machine asynchrone

Du point de vue mécanique, la machine asynchrone triphasée est composée de trois parties distinctes :

- ✓ le stator c'est la partie fixe de la machine.
- ✓ le rotor c'est la partie tournante de la machine.
- ✓ Les paliers c'est la partie mécanique qui supporte les bouts d'arbre du rotor tout en lui assurant le degré de liberté de la rotation.

### 1.2.1. Le stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les Bobinages statoriques. Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importantes, découpées en sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. [3] Les enroulements statoriques sont placés dans des encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriqués, ondulés ou encore concentriques. La figure 1.1 présente les différentes compositions dans le stator de la machine asynchrone.

### 1.2.2. Le Rotor

Les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types :

- ✓ Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique. Les phases rotoriques sont disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine, ce qui permet de profiter des caractéristiques de ce type de rotor à savoir le démarrage, le freinage et la variation de vitesse du moteur par insertion de résistance.
- ✓ les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres en cuivre utilisées pour les gros moteurs ou en aluminium pour les moteurs de petite puissance.

Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dits "de court-circuit".

Il existe différentes structures de rotor à cage dépendant principalement de la taille du moteur et de la charge qui sera objet de l'entraînement.

La figure 1.1 donne les différents éléments de constitution d'un moteur à cage d'écureuil. [3-4]

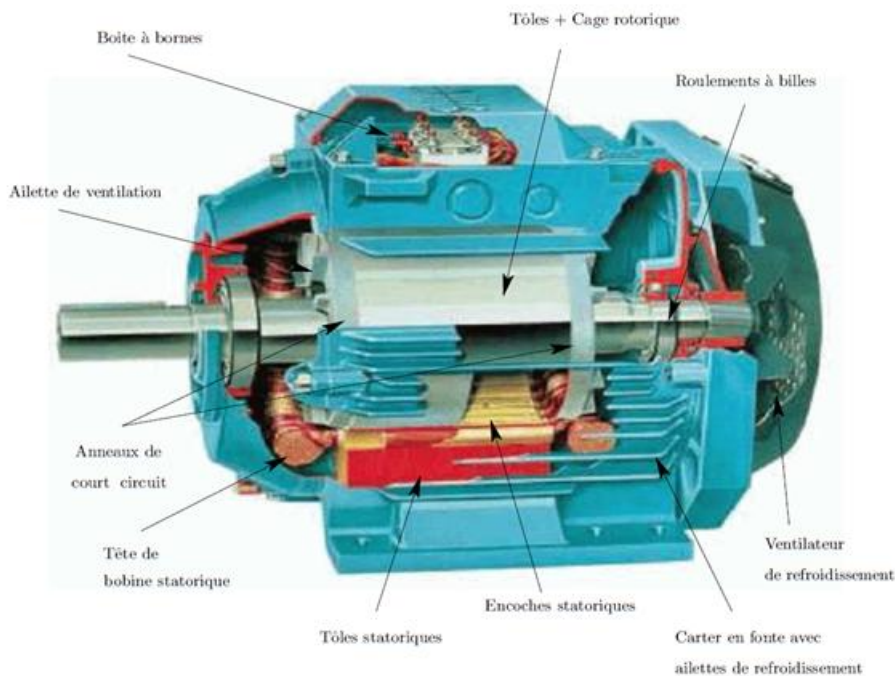


Figure 1.1. Eléments constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [3-4]

### 1.2.3. Les Paliers

Les paliers, qui permettent de supporter et de permettre la rotation de l'arbre rotoriques, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre.

Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage comme nous pouvons le visualiser sur la figure 1.1.

L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil. [3]

### 1.3. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

L'étude du fonctionnement du moteur asynchrone consiste à admettre qu'un stator formé de trois bobines avec des axes décalés de  $120^\circ$  et alimentées par un réseau triphasé équilibré, crée dans l'entrefer du moteur un champ magnétique, tournant à la fréquence de synchronisme  $n_s$ .

Un rotor en court-circuit, balayé par ce champ tournant, est traversé par des courants induits (courants de Foucault). Le rotor donc soumis à des forces électromagnétiques de Laplace. L'ensemble de ces forces crée un couple moteur qui entraîne le rotor en rotation. Ce dernier tourne dans le même sens que le champ tournant, mais sa fréquence de rotation est nécessairement inférieure à celle du champ tournant d'où l'appellation d'asynchrone.

En effet, si les deux fréquences de rotation étaient égales, il n'y aurait plus création de courants induits dans le rotor et donc plus de couple moteur. Ceci résulte de la loi de Lenz qui énonce que la f.é.m. induite s'oppose toujours par ses effets à la cause qui lui donne naissance.

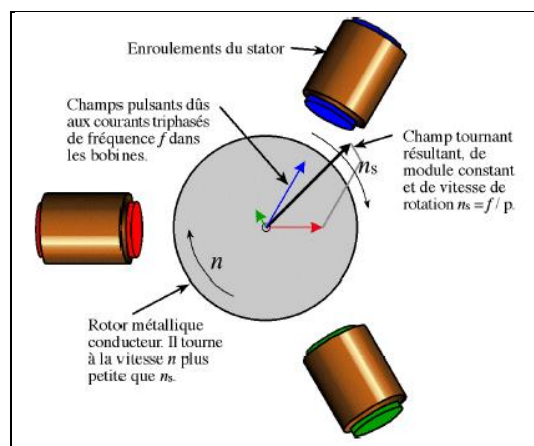


Figure 1 .2 . : Principe du fonctionnement d'un moteur [1]



### 1.3.1. Fonctionnement à vide

✓ Le régime à vide c'est lorsque le moteur n'entraîne pas de charge.

Conséquence : le glissement est nul est le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

✓ A vide:  $g \approx 0$  par conséquent  $n_o = n_s$  et  $C_u = C_0$

Le facteur de puissance à vide est très faible ( $\cos \varphi < 0,2$ ) et le courant absorbé reste fort (P : puissance active est petit et Q : puissance réactive est grande). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (servant à créer le champ magnétique).

### 1.3.2. Fonctionnement en charge

Le moteur est maintenant chargé, c'est-à-dire que l'arbre de ce dernier entraîne une charge résistante qui s'oppose au mouvement du rotor.

En régime permanent, ou régime établi :  $C_u = C_r$

### 1.3.3. Caractéristique mécanique : $C_u = f(n')$

Le point de fonctionnement se trouve sur l'intersection de la caractéristique mécanique du moteur et de la courbe qui caractérise le couple résistant de la charge. La caractéristique mécanique du moteur dans sa partie utile est un segment de droite. Pour la tracer, il suffit de deux points. Le premier est généralement donné par l'étude d'un cas de fonctionnement précis, le second se déduit de l'essai à vide. Dans cet essai, le couple utile est nul, il est associé à une fréquence de rotation considérée comme égale à la fréquence de synchronisme.

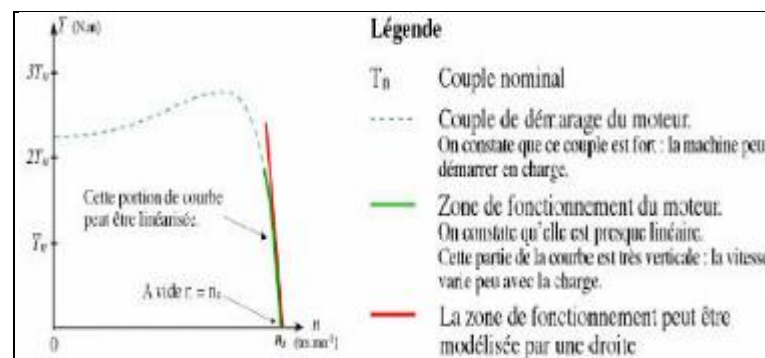


Figure. 1 .3. Caractéristique mécanique du moteur [1]

### 1.4. Étude statistique des différents défauts de la machine asynchrone :

D'après [30, 2], les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe.

Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine.

Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le Tableau 1.1. [5]

**Tableau 1.1 : Défaillances des machines électriques selon leurs origines**

Défaillances des Machine électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le stator et rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
			Mouvement des enroulements et des toles
		Electrique	Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
	Externe	Mécanique	Charge oscillante
			Surcharge de la machine
			Défaut de montage
		Environnementale	Humidité
			Température
			Propreté
		Electrique	Fluctuation de la tension
			Sources de tension déséquilibrées
			Réseau bruité

Statistiquement, il est difficile de donner des informations exactes des défaillances de machines asynchrone par ce que les défauts ne sont pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance [8].

De multiples études statistiques sur des machines ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'à nos jours. Toutes ces statistiques mentionnées dans [6, 7] concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie.

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants (Figure 1.4) [9]

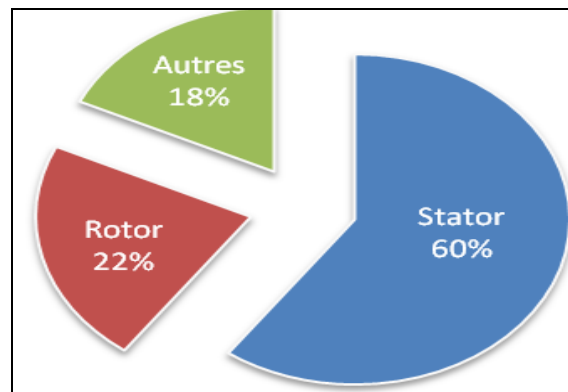


Figure 1.4 : Proportion des défauts 1988[9]

Une autre étude statistique [10] faite sur des machines de grande puissance (100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés la figure 1.5

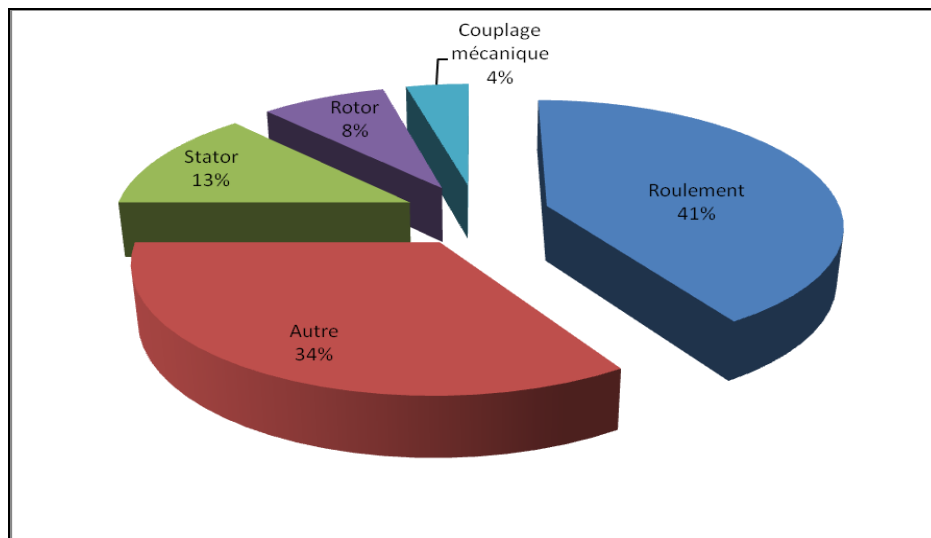


Figure 1.5 : Pourcentage des défauts 1995 [10]

De même, une étude statistique, effectuée en 2008 par A. H. Bonnett et all [11] sur les défauts de la machine asynchrone a donné les résultats sur la figure 1.6

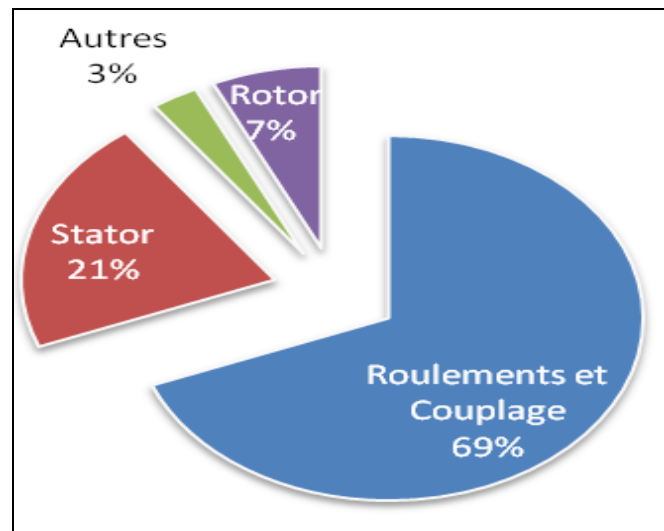


Figure 1.6 : pourcentage des défauts 2008 [11]

D'après l'étude statistique de 2008 ; 1995 et de 1988, il est clair que les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines et en particulier pour celles de gros calibres. Ceci peut justifier le taux élevé des pannes suite aux dégradations des roulements, Par conséquent leur surveillance et leur maintenance s'avèrent indispensables.

#### 1.4.1. Défaillances d'ordre électrique

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certains cas, être la cause d'un arrêt de la machine au même titre que celles d'ordre mécanique. Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques.

##### 1.4.1.1. Défaillances des circuits électriques rotoriques

Pour le circuit rotorique, Les défaillances sont essentiellement dues à un problème [9] [34]:

- ✓ Thermique (surcharge,)
- ✓ Dynamique (arbre de transmission,)
- ✓ Mécanique (roulement)
- ✓ Environnemental (agression,...)

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

- ✓ Rupture de barres
- ✓ Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit

- ✓ Excentricité statique et dynamique

#### 1.4.1.1.1. Ruptures de barres

Au cours des vingt dernières années, il y a eu poursuite des efforts à l'étude et le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones et, en particulier, de nombreux travaux ont été consacrés au problème de la rupture des barres rotoriques ainsi que le développement de techniques de diagnostic non intrusives [12-13-14]. Certains travaux de recherches ont été basés sur la technique des éléments finis (EF) [15-16-17-18-19-20], où de plus amples informations peuvent être récupérées à des fins de diagnostic. Il est bien établi d'utiliser des courants de ligne comme un paramètre indicatif [21] qui peut donner un aperçu de la base d'un système de surveillance de l'état non-invasive pour la détection précoce des dégradations. Un autre effort de recherche a été axé sur l'analyse de la signature du courant statorique [22-23-24-25] afin de détecter les défauts électriques et mécaniques affectant les moteurs à induction. Un autre problème constamment signalé dans la littérature et qui a également reçu beaucoup d'attention de la part des chercheurs, c'est l'échec lié à l'échauffement. Pour par exemple, des recherches ont été menées sur les ventilateurs de refroidissement des moteurs à induction par une analyse de la sensibilité thermique [26-27-28]. Dans cette référence, les problèmes de conception thermique ont été examinés et des algorithmes d'optimisation de conception ont également été développés. Une analyse thermique magnétique couplée d'un moteur à induction ayant pour objectif principal de parvenir à une prédiction rapide et précise de la performance IM a été proposée dans [29]. Le problème de l'échauffement d'un moteur lorsque l'une des barres du rotor est totalement cassée a été simulé dans certains journaux [30]; certains documents ont étudié les caractéristiques de l'échauffement et la distribution de la chaleur du moteur avec les rotors sains et défectueux [31-32-33].

Bien que de nombreux journaux aient couvert ce domaine de recherche, des problèmes techniques persistent encore lors de l'analyse des champs thermiques des moteurs électriques en présence des défauts de rupture des barres de la cage rotorique.

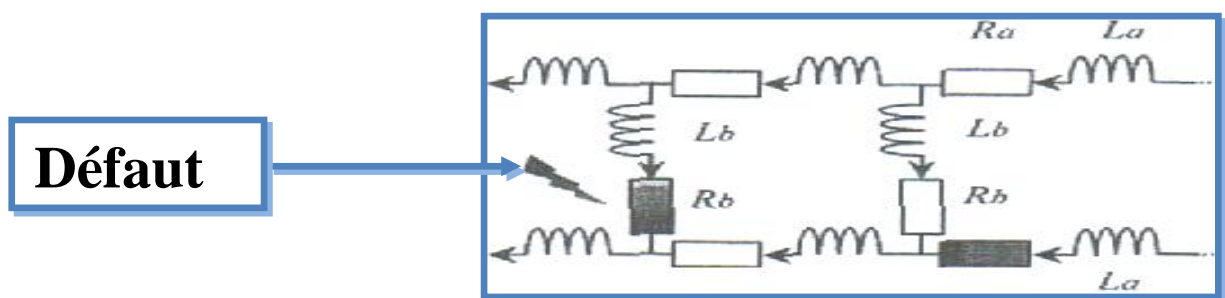


Figure. 1.7 Rupture de barre

L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées. Le modèle diffère pour la simulation car le rang de la matrice afférent au rotor n'est plus constant. Néanmoins, les fréquences engendrées, autour de la fréquence fondamentale de l'alimentation, par un défaut de barre ou de portion d'anneau, sont :

$$fb = (1 \pm 2.k.g) f_s \quad (1.1)$$

Avec :  $k = 1, 2, 3, \dots, K \in N$

Par contre, les harmoniques d'espaces génèrent eux aussi des fréquences dont la relation est :

$$fb = \left\{ \left( \frac{k}{p} \right) (1 - g) \pm g \right\} f_s \quad (1.2)$$

Avec :  $k = 1, 2, 3, \dots, K \in N$ ,  $p$  étant le nombre de paires de pôles. [35]

### 1.4.1.1.2. Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneaux est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que celui de la cassure de barres. Les fissures sont dues aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de détecter ce défaut car il est généralement groupé, voire confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques.

De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité, ...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

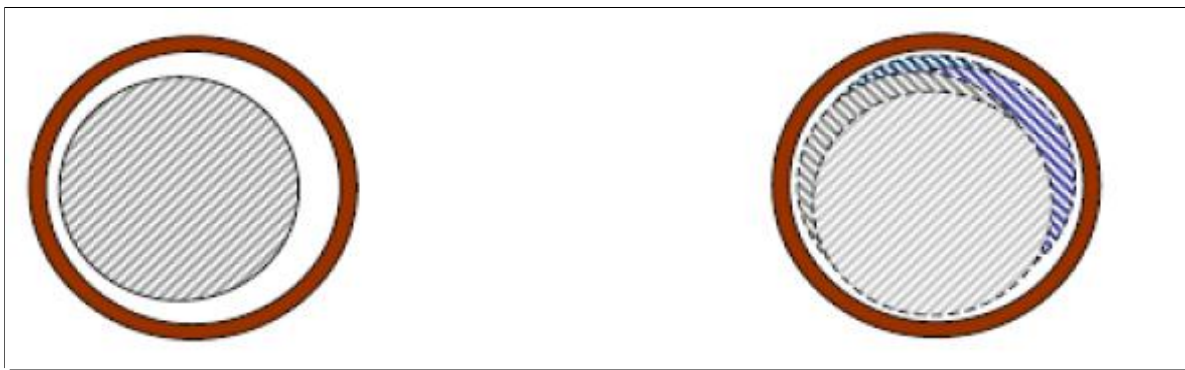
La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, elle engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques, tout à fait similaire à celui provoqué par la cassure de barres. [36-3]

### 1.4.1.1.3. Excentricité statique et dynamique

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple suite au décalage entre la rotation de l'arbre et le centre du rotor (figure 1.8). Ce

phénomène, dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). On distingue généralement trois cas d'excentricité [36-37-38-39]:

- ✓ l'excentricité statique, c'est lorsque le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- ✓ l'excentricité dynamique, c'est lorsque 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', cette dernière associe les deux cas précédemment cités.



Excentricité statique

Excentricité dynamique

Figure 1.8 modélisations schématiques de l'excentricité statique et dynamique [35]

Ce défaut modifie aussi bien le comportement magnétique que celui mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

Les fréquences proches du fondamental sont données par la relation :

$$f_{exe} = \left\{ 1 \pm n \left( \frac{1-g}{p} \right) \right\} f_s \quad (1.3)$$

où :

$f_{exc}$  : fréquence "d'excentricité",

$n$  : 1,2,3,...,  $n \in \mathbb{N}$ ,

$g$  : le glissement,

$p$  : nombre de paires de pôles,

$f_s$  : fréquence d'alimentation.

Cette relation a l'avantage de ne pas nécessiter de connaissance précise de la machine asynchrone car elle ne fait pas apparaître de terme lié à sa conception [35]

Une seconde approche consiste à utiliser une expression liant le défaut de barre cassée à celle de l'excentricité et des encoches au rotor.

C'est ainsi qu'une équation, sous forme compacte, fait apparaître les harmoniques de fréquences relatives à ces défauts, et qui dépendent pour beaucoup du nombre de paires de pôles..

$$f_{exe} = \left\{ (k N_r \pm n d) \left( \frac{1-g}{p} \right) \pm n \omega \right\} f_s \quad (1.4)$$

où :

$f_{exc}$  : fréquence " d'excentricité "

$k$  : 1,2,3,...,  $n \in \mathbb{N}$ ,

$N_r$  : nombre d'encoches au rotor,

$nd \in \mathbb{N}$ ,

$g$  : le glissement,

$p$  : nombre de paires de pôles,

$n\omega_s$  : 1,3,5,...,

$n\omega_s \in \mathbb{N}$ ,

$f_s$  : fréquence d'alimentation [35]



### 1.4.1.2. Défaillances des circuits électriques statorique

Pour le circuit statorique, les défaillances sont principalement dues à un problème [3]:

- ✓ Thermique (surcharge....)
- ✓ électrique (diélectrique....)
- ✓ Mécanique (bobinage.....)
- ✓ Environnemental (agression....)

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

- ✓ Défaut d'isolant
- ✓ court-circuit entre spires
- ✓ court-circuit entre phases
- ✓ Défaut de circuit magnétique

#### 1.4.1.2.1. Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents organes du moteur. Cependant, les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et de mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau va se dégrader de manière prématurée ou accélérée et finira par ne plus assurer sa fonction. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

Les différentes Causes pour ce type de défaut sont :

- ✓ la dégradation de l'isolant à la fabrication.
- ✓ la tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation,
- ✓ le courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- ✓ les vibrations mécaniques.
- ✓ le vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée ; même pendant une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader

✓ fonctionnement dans un environnement sévère [3]

#### 1.4.1.2.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires d'une même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné [34][35]. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau des enroulements et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2<sup>ème</sup> court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique en dehors d'une augmentation des oscillations proportionnelles au défaut.

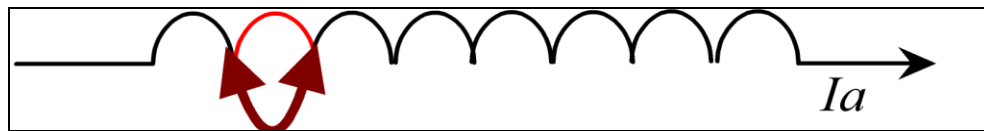


Figure 1.9 Court-circuit entre spires

Il a été montré que le courant statorique avait un spectre enrichi suite à la création d'un court-circuit entre plusieurs spires au stator. Les fréquences sont données par la relation :

$$f_{cc} = \left\{ \frac{n}{p}(1-g) \pm k \right\} fs \quad (1.5)$$

où :

$f_{cc}$  : fréquence " de court-circuit ",

$f$  : fréquence d'alimentation,

$n$  : 1,2,3, . . . ,  $n \in \mathbb{N}$ ,

$p$  : nombre de paires de pôles,

$g$  : le glissement,

$k$  : 1,3,5, . . . ,  $k \in \mathbb{N}$ .

### **1.4.1.2.3. Court-circuit entre phases**

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système [3][34].

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

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

### **1.4.1.2.4. Défaits de circuit magnétique**

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant [3][34], etc...

## **1.4.2. Défaillances d'ordre mécanique**

Les défaillances d'ordre mécaniques sont en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que rencontre la machine asynchrone [3][34].

Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur tels que le défaut de balourd et de désalignement.

### **1.4.2.1. Défaillances des roulements**

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau dès l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques peuvent circuler au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se solidifier et

causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce genre de défaillances [3][34].

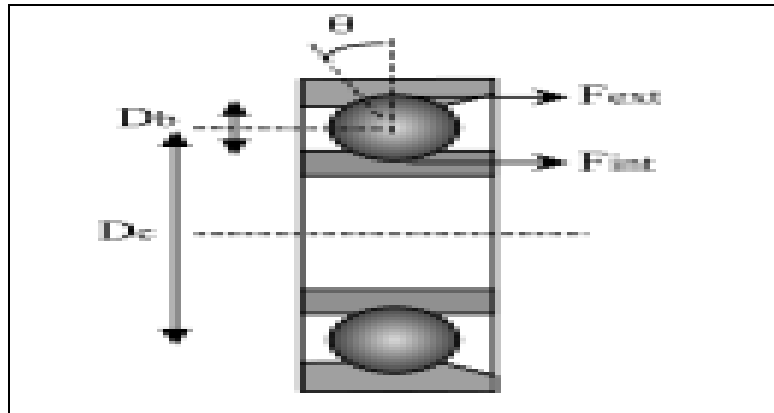


Figure 1.10 les roulements à billes [40]

La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre du courant statorique est basée sur le fait que toutes les excentricités interfèrent sur le champ dans l'entrefer de la machine asynchrone. Un défaut de roulement à billes se manifeste par la répétition continue du contact défectueux avec la cage de roulement extérieure comme intérieure. [40]

La fréquence de répétition sera pour la cage intérieure et extérieure :

$$\left\{ f_{int} = \frac{nb}{2} \cdot fr \left\{ 1 + \frac{Db}{Dc} \cos \theta \right\} \right\} \quad (1.6)$$

$$\left\{ f_{ext} = \frac{nb}{2} \cdot fr \left\{ 1 - \frac{Db}{Dc} \cos \theta \right\} \right\} \quad (1.7)$$

Le spectre en courant est alors décrit par :

$$\left\{ f_{int, ext} = fs \pm n \frac{nb}{2} \cdot fr \left\{ 1 \pm \frac{Db}{Dc} \cos \theta \right\} \right\} \quad (1.8)$$

g :le glissement,

fs : fréquence d'alimentation,

fr : fréquence de rotation mécanique,

$n : 1, 2, 3, \dots, n \in \mathbb{N}$ ,

$nb$  : nombre de billes,

$Db$  : diamètre des billes,

$Dc$  : distance du centre des billes,

$\theta$  : L'angle de contact de la bille avec la cage.

En considérant que le nombre de billes est compris entre 6 et 12 habituellement, deux relations couramment rencontrées sont :

$$\{f_{ext} = 0.4.nb.fr\} \quad (1.9)$$

$$\{f_{int} = 0.6.nb.fr\} \quad (1.10)$$

Donc le spectre en courant sera enrichi de :

$$\{f_{int, ext} = fs \pm nf \{int, ext\}\} \quad (1.11)$$

### 1.4.2.2. Défaillances des flasques

Les défauts créés au niveau des flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine.

Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [3][34].

### 1.4.2.3. Défaillances de l'arbre mécanique

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone.

Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine.

Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine [3][34].

Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance.

### 1.4.2.4. Défauts de déséquilibre massique ou « Balourd »

La grande sensibilité du courant aux variations de couples, captées par le moteur asynchrone et par voie de conséquences, aux défauts mécaniques (balourd) induisant ces dernières, fait de l'analyse spectrale du courant (MCSA) un outil d'investigation extrêmement puissant [50][51]. Les défauts de déséquilibre massique ou "balourd" sont détectés par la surveillance des fréquences appropriées de la phase du courant statorique.

$$f_d = [k f_1 \pm m f_r] \quad (1.12)$$

où

$f_1$  : la fréquence du réseau d'alimentation du moteur à induction

$f_r$  : la fréquence de rotation de l'arbre rotorique.

Le balourd entraîne l'émergence de raies aux fréquences définies par (1.12) pour  $m=k=1$  et avec des amplitudes de moindre importance aux fréquences du courant pour  $m=1$  et  $k=2$ .

### 1.4.2.5 Défaut de désalignement

Le désalignement est un problème plus fréquent que le balourd, et la raison en est bien Simple. Malgré l'emploi de paliers auto-alignant, et d'accouplements flexibles, il est difficile d'aligner deux arbres, ainsi que leurs paliers afin d'assurer qu'il n'y existe aucune force qui puisse causer la vibration [72].

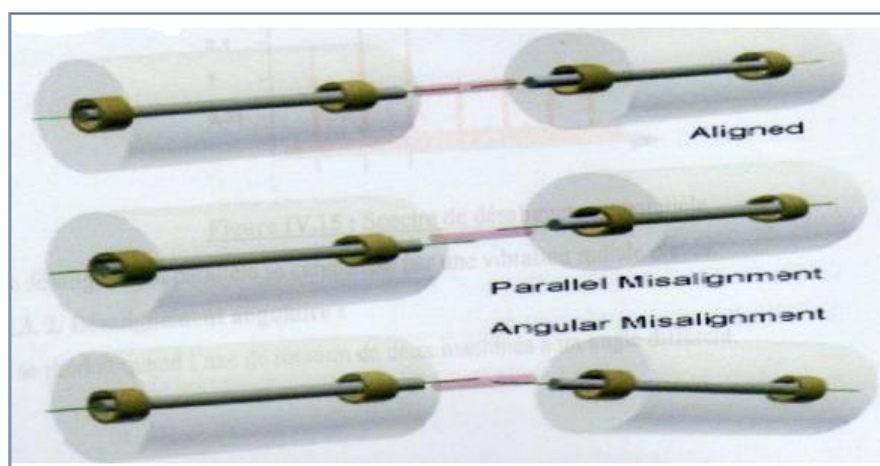


Figure 1.11 Désalignement des arbres [72]

On distingue deux types de désalignement « parallèle et angulaire ».

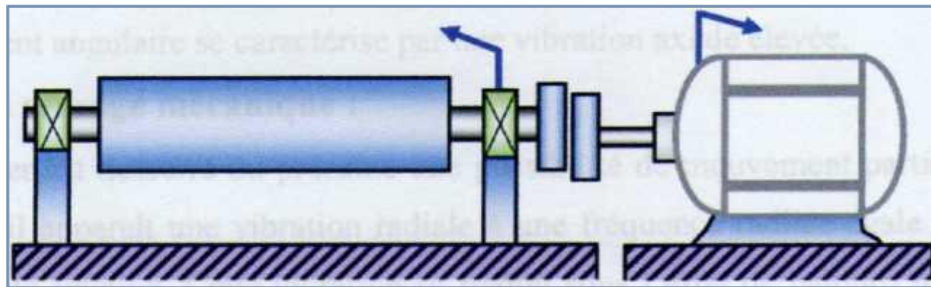


Figure 1.12 Image de désalignement parallèle [72]

Désalignement parallèle : Il se produit quand les axes de rotation des deux machines ont le même Angle d'orientation, mais ils sont séparés verticalement, chacun de l'autre [72].

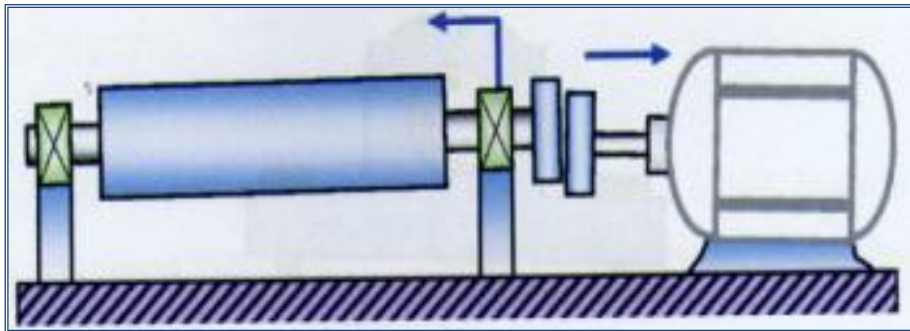


Figure 1.13 Image de désalignement angulaire [72]

Désalignement angulaire : Il se produit quand l'axe de rotation de deux machines a un angle différent [72].

#### 1.4.2.6 Défauts dans les engrenages

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues dentées engrenant l'une avec l'autre, permettant de transmettre de la puissance entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse constant. Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes d'engrenages (figure 1.14)[72] :

- Les engrenages parallèles « les 2 arbres sont parallèles ».
- Les engrenages concourants « les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se coupent ».
- Les engrenages gauches « les 2 arbres occupent une position relative quelconque ».

Les dentures d'engrenage peuvent être droites, hélicoïdales ou à chevrons. Les efforts, en conséquence, sont :

- Uniquement radiaux sur les engrenages parallèles, à denture droite ou à chevrons,
- Mixtes « radiaux et axiaux » sur les engrenages à denture hélicoïdales, les engrenages coniques et les engrenages à roue et vis sans fin[72].



Figure 1.14 Différents types d'engrenage [72]

Les engrenages sont des éléments de transmissions de mouvement qui peuvent être touchés par des défauts tel que :

- Des piqûres pour les dents taillées.
- Des écaillages de la denture.
- Des fissures.
- Des ruptures au terme de fissures.
- Des grippages qui conduisent à d'importantes détériorations.

Les principaux défauts survenant sur un couple d'engrenages d'un réducteur simple sont les défauts répartis sur toute la denture et les défauts localisés sur une partie de la denture.





Figure 1.15 Défauts réels d'engrenage localisé [72]

Plus généralement, les détériorations superficielles d'engrenages sont le résultat de différents phénomènes pouvant intervenir au cours du fonctionnement du système [72].

### **1.5. Conclusion**

Ce chapitre a débuté par un rappel de la constitution de la machine asynchrone, suivi d'une liste non exhaustive des causes pouvant engendrer des défaillances mécaniques et électriques de ces machines. Puis, une classification des défaillances susceptibles d'affecter les différentes parties des machines asynchrones a été présentée. Les fréquences caractéristiques de ces défauts ont été mentionnées au fur et à mesure.

## Chapitre 2 MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

### 2.1. Introduction

La modélisation d'une machine électrique est une phase indispensable dans l'étude de tous les entraînements électriques. Le progrès de l'informatique et du génie de logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Ainsi la modélisation permet de guider les développements par une quantification des phénomènes en outre elle est d'un apport précieux en permettant d'une part de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir des compartiments de la machine plus variées que ceux de l'observation expérimental [71].

Pour obtenir le modèle d'un système, trois tâches doivent être accomplies. Choisir le modèle, et ces paramètres enfin vérifier sa validité. Pour faciliter le travail, on adapte les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligeable.
  - Le circuit magnétique n'est pas saturé et que les courants de Foucault sont négligeables.
  - Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
  - On admet que la F.m.m pour chacune des phases est sinusoïdale.
- Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer:
- L'additivité des flux.
  - La constance des inductances propres.
  - La variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

### 2.2. Modélisation de la machine asynchrone triphasée

#### 2.2.1. Représentation schématique.

La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine.

Dans les encoches régulièrement répartie sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, à partir de pôle, leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égale à  $2\pi/3$ ,

Les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tension sinusoïdale à fréquence et amplitude réglables [71].

La structure électrique du rotor peut être réalisée :

- Soit par un système d'enroulement triphasé (rotor bobine), raccordé en étoile à trois bagues sur lesquelles trottent trois balais fixes accessibles par la plaque à bornes et mis en court circuit pendant les régimes permanents.
- Soit par une cage conductrice intégrée aux tôles ferromagnétiques (rotor à cage).

Le champ statorique tourne à la vitesse :  $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$

$\Omega_s$  : Étant la pulsation de courant statorique.

$2P$  : le nombre de pôles.

La vitesse mécanique du rotor est noté  $\omega$  le rapport :  $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega}$

Les équations du rotor et celle du stator avant la transformation de Park sont :

$$\begin{aligned}
 V_{as} &= \frac{d\varphi_{as}}{dt} + R_s i_{as} & V_{ar} &= \frac{d\varphi_{ar}}{dt} + R_r i_{ar} \\
 V_{bs} &= \frac{d\varphi_{bs}}{dt} + R_s i_{bs} & V_{br} &= \frac{d\varphi_{br}}{dt} + R_r i_{br} \\
 V_{cs} &= \frac{d\varphi_{cs}}{dt} + R_s i_{cs} & V_{cr} &= \frac{d\varphi_{cr}}{dt} + R_r i_{cr}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

$$\tag{2.2}$$

En remplaçant les flux  $\Psi_k$  par leur expression dans les équations des tensions statorique et rotoriques on obtient un système d'équations non linéaires longues, difficiles à résoudre pour remédier à ce problème on propose une transformation [71].

On appelant :

$R_s$  : résistance d'une phase du stator

Ri : résistance d'une phase du rotor

$\Psi_k$  : flux D'enroulement traversent l'enroulement

Équation entre flux et courant :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} & M_{rs} \cos \theta & M_{rs} \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & M_{rs} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} & M_{rs} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & M_{rs} \cos \theta & M_{rs} \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} & M_{rs} \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & M_{rs} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & M_{rs} \cos \theta \\ M_{rs} \cos \theta & M_{rs} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & M_{rs} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{rs} \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & M_{rs} \cos \theta & M_{rs} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{rs} \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & M_{rs} \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & M_{rs} \cos \theta & M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

En remplaçant les flux par leurs expressions respectives dans les équations (2.1) (2.2) On obtient des équations non linéaires longues et difficiles à résoudre, ce qui nous amène introduire une transformation mathématique, afin de les simplifier telle que la transformation [71].

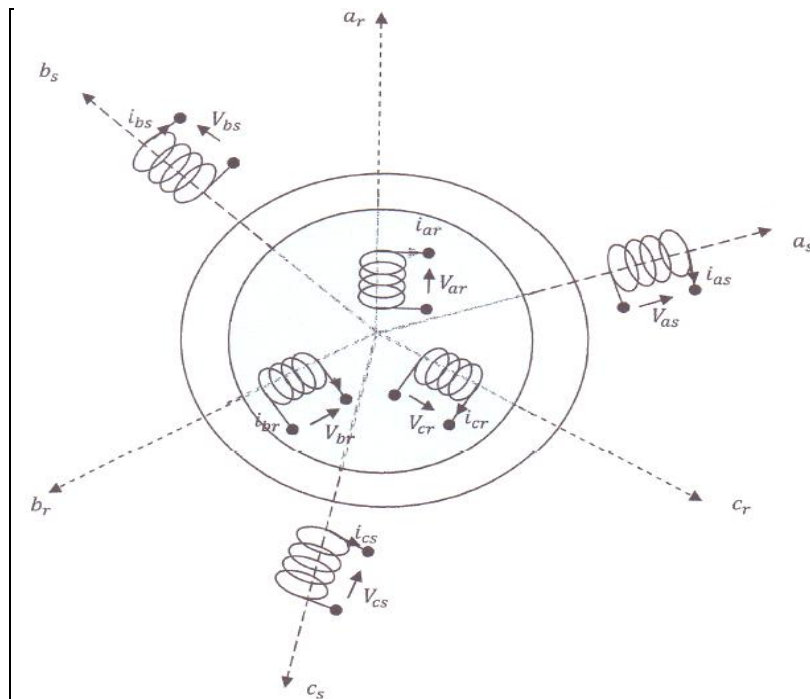


Figure 2.1 : Représentations schématique d'une machine asynchrone triphasée

### 2.2.2. Transformation de Park :

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - biphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère dq. Le repère  $\alpha B$  est toujours fixe par rapport au repère abc par contre le repère dq est mobile. Il forme avec le repère fixe  $\alpha B$  un angle qui est appelé l'angle de la transformation de Park ou angle de Park. C'est-à-dire ;

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotorique en enroulements orthogonaux équivalents.

Ce passage est rendu possible pour la transformation des grandeurs physique par la matrice de Park.[52][53][54][71]

$$\begin{bmatrix} V_{0dq} \end{bmatrix}_i = A \begin{bmatrix} V_{abc} \end{bmatrix}_i \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{0dq} \end{bmatrix}_i = A \begin{bmatrix} i_{abc} \end{bmatrix}_i \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{0dq} \end{bmatrix}_i = A \begin{bmatrix} \varphi_{abc} \end{bmatrix}_i \quad (2.5)$$

Où [A] est la matrice de Park définit par :

$$A = 2/3 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = 2/3 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Sous forme condensée :

$$I_{dq0} = A \cdot i_{abc}$$

Avec :

$I_d$  = courant directe

$I_q$  = courant quadratique

$I_0$  = représente la composante homopolaire

Les équations de tension statorique et rotorique s'écrivent dans le repère de Park Sous la forme suivante :

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \quad (2.8)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \quad (2.9)$$

$$0 = R_r i_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \quad (2.10)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \quad (2.11)$$

De plus les composants du flux statorique et rotorique sont exprimés par

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \quad (2.12)$$

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \quad (2.13)$$

$$\varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \quad (2.14)$$

$$\varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \quad (2.15)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_s = I_s - M_s \\ L_r = I_r - M_r \\ M = \frac{3}{2} M_{sr} \end{array} \right. \quad (2.16)$$

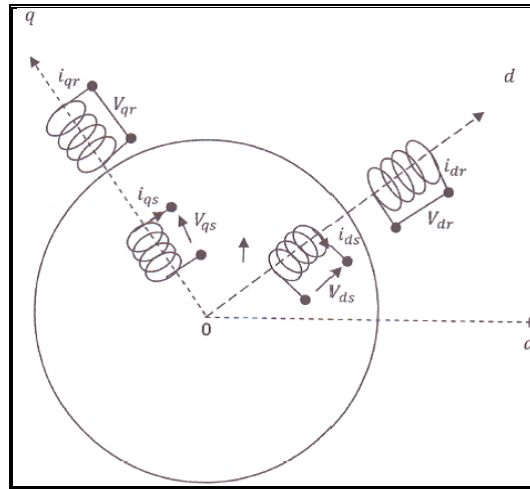


Figure 2.2 Représentation des machines asynchrones triphasées après la transformation de Park (modèle biphasé équivalent)

### 2.3. Modélisations de la machine asynchrone dans le repère de Park

Dans le repère de Park (diq) tournant à la vitesse angulaire et vu que notre machine asynchrone est à cage on obtient les équations suivantes [71] :

$$\Omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$$

Les équations :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \quad (2.17)$$

$$0 = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \quad (2.18)$$

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases} \phi_s = L_s \cdot i_s + M_{sr} \cdot i_r \\ \phi_r = L_r \cdot i_r + M_{sr} \cdot i_s \end{cases} \quad (2.19)$$

Deviennent :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \phi_{ds} \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.21)$$

Les équations de flux de flux sont :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + lm i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + lm i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + lm i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + lm i_{qs} \end{cases} \quad (2.22)$$

**Choix référentiel :**

Le référentiel est le système (Od, Oq) associée à la vitesse de rotation choisie pour lui donc l'utilisation, de la transformation de Park n nécessite le choix d'un référentiel qui permet de simplifier au maximum l'expression analytique du modèle.

### 2.3.1. Référentiel lié au stator

La position des axes d, q par rapport aux axes statorique et rotorique est la suivante :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r = g \omega_s \quad (2.23)$$

Ce référentiel est choisi dans le cas de variation d'importance de la vitesse de rotation associée ou non à des variations de la fréquence d'alimentation

### 2.3.2. Référentiel lié au rotor

Ce type de référentiel est caractérisé par la relation suivante

$$\frac{d\theta_s}{dt} - \omega_r \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad (2.24)$$

Ce choix est intéressant dans l'étude des régimes transitoires ou la vitesse de rotation est constante.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r = g \omega_s \quad (2.25)$$

On choisit ce référentiel lorsqu'on veut étudier les problèmes où la fréquence d'alimentation est constante. Ainsi ce référentiel est le seul qui n'introduise pas de simplification dans la formulation

Les équations dont la formulation soit affectée par le choix du référentiel sont les équations :



$$C_m - C_e = \frac{j}{p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.26)$$

$$g = \frac{\omega - \omega_r}{\omega} \quad (2.27)$$

Le référentiel choisi de notre étude est le référentiel statorique et le modèle mathématique de la machine obtenu suite à cette modélisation est le suivant [71] :

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = -R_s \cdot i_{ds} + V_{ds}$$

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = -R_s \cdot i_{qs} + V_{qs}$$

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

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

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{p}{j} \varphi_{ds} \cdot i_{qs} + \frac{p}{j} \varphi_{qs} \cdot i_{ds} - \frac{C_r}{j} - \frac{K_f}{j}$$

Ces équations vont nous permettre d'étudier le comportement dynamique de la machine asynchrone à vide et en charge alimentée directement pleine tension ou à tension délivrée par notre onduleur multi niveaux [71].

#### 2.4. Simulation de la machine asynchrone sain à vide et en charge:

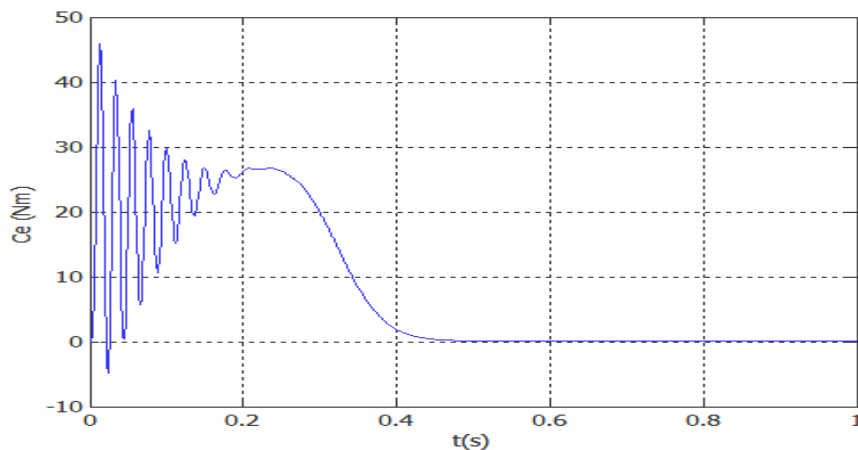


Figure 2.3 Couple électromécanique à vide

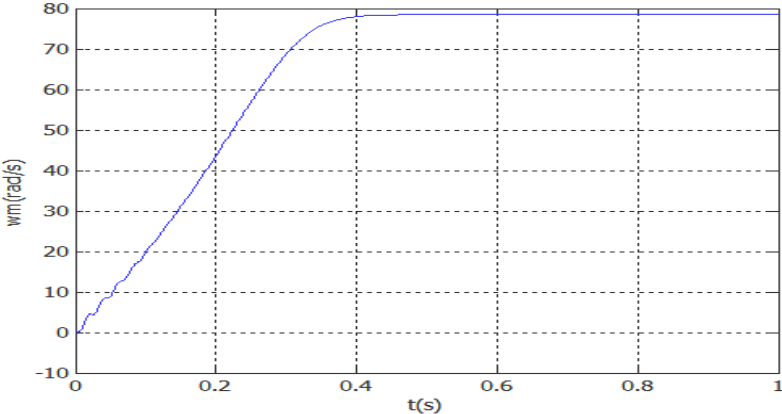


Figure 2.4 Vitesse à vide

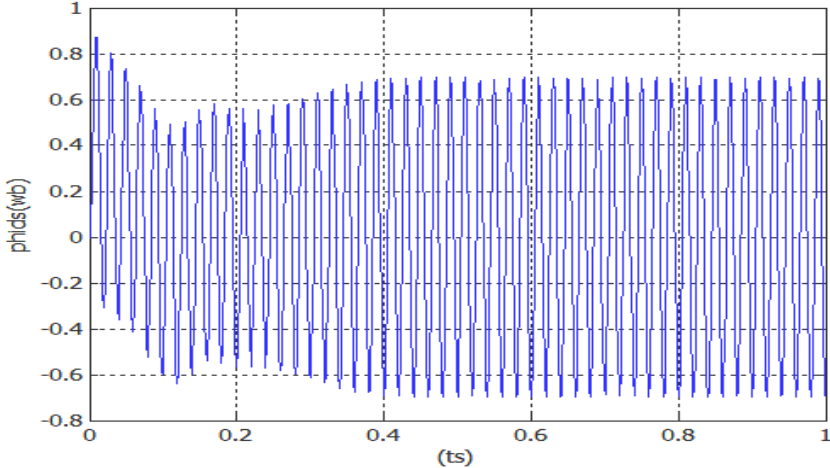


Figure 2.5 Flux statorique direct à vide

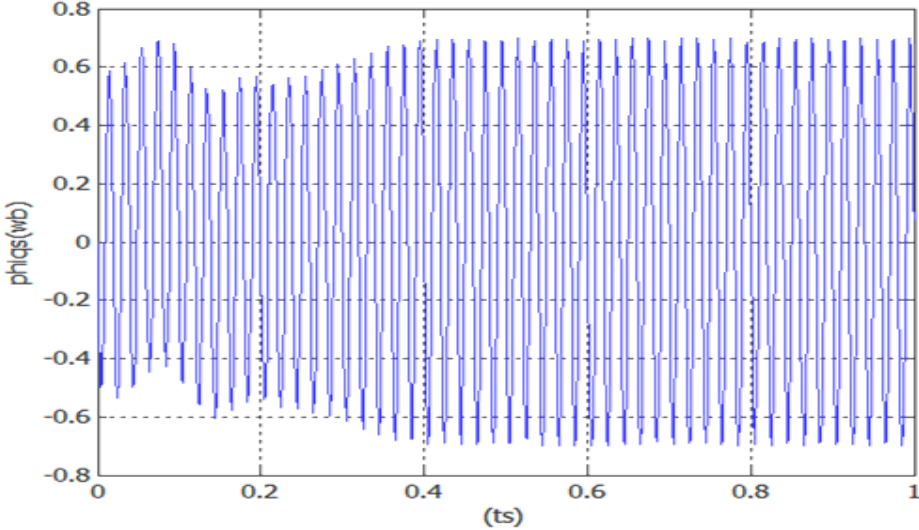


Figure 2.6 Flux statorique quadratique à vide

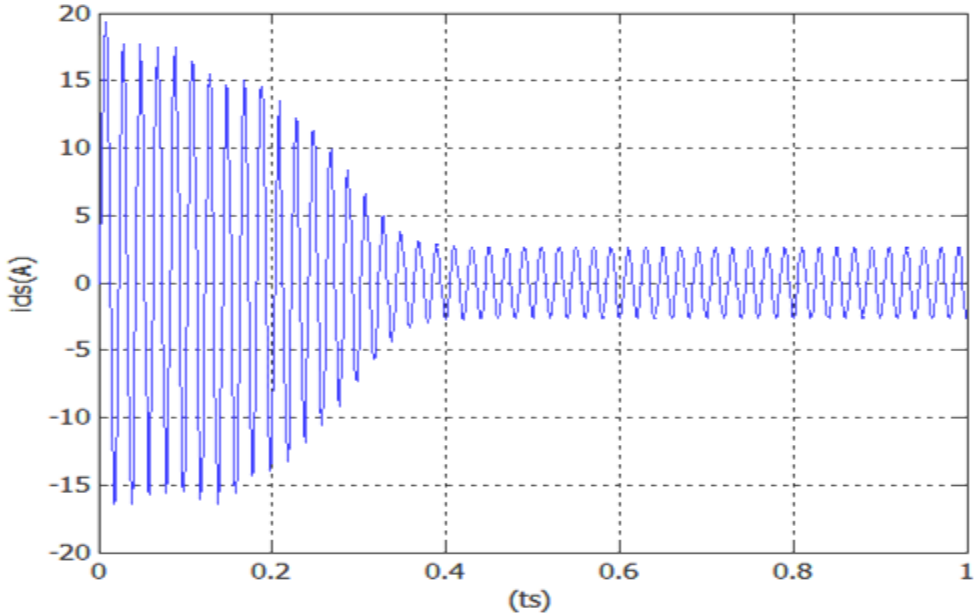


Figure 2.7 Courant statorique direct à vide

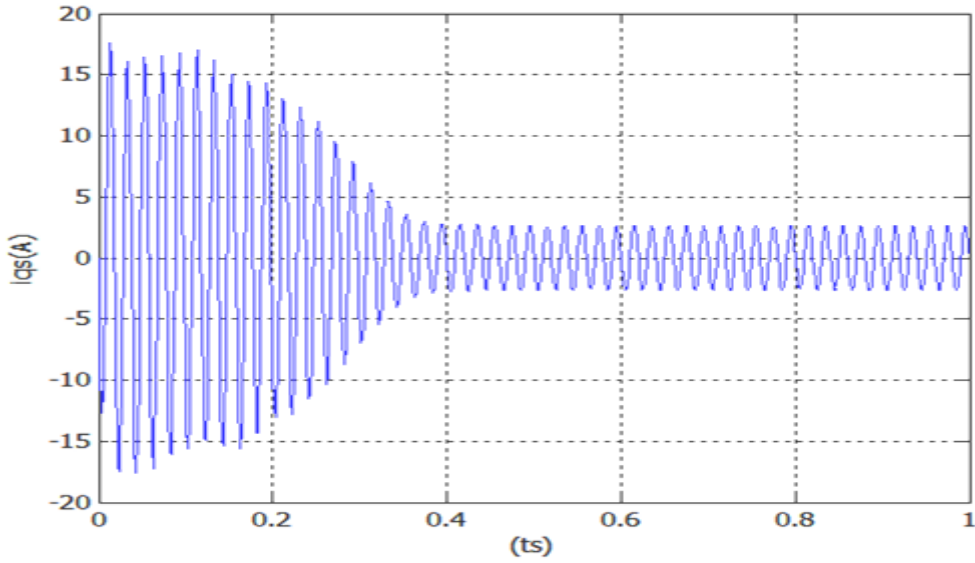


Figure 2.8 Courant statorique quadratique à vide

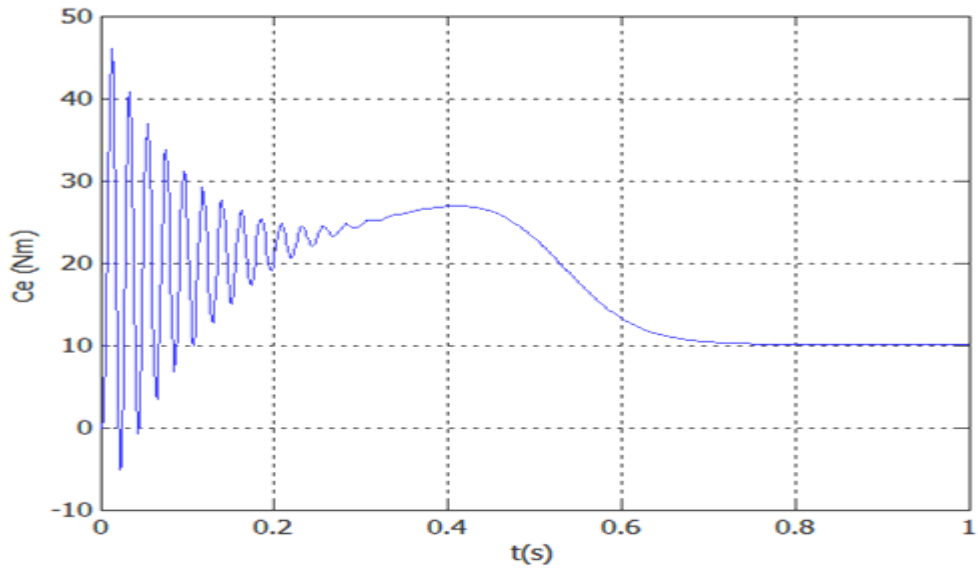


Figure 2.9 couple électromécanique en charge

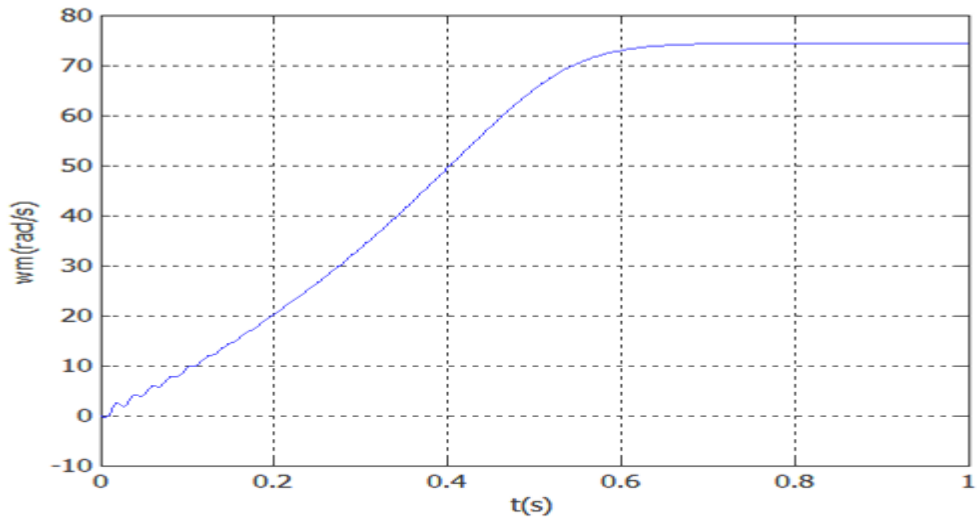


Figure 2.10 Vitesse en charge

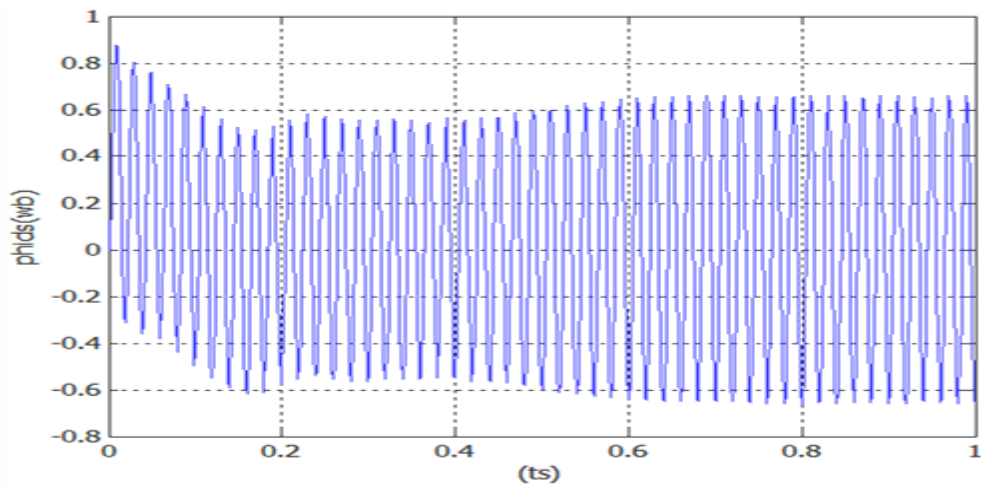


Figure 2.11 Flux statorique direct en charge

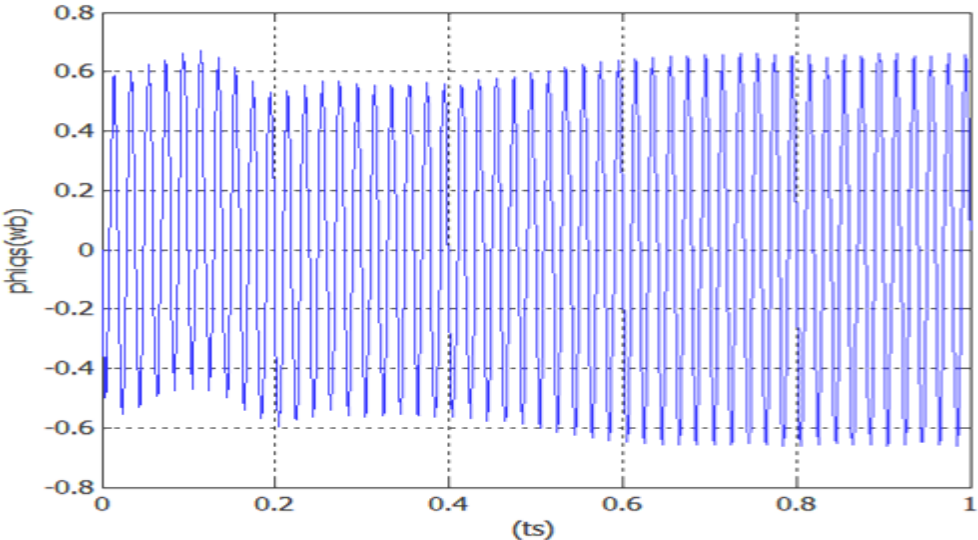


Figure 2.12 Flux statorique quadratique en charge

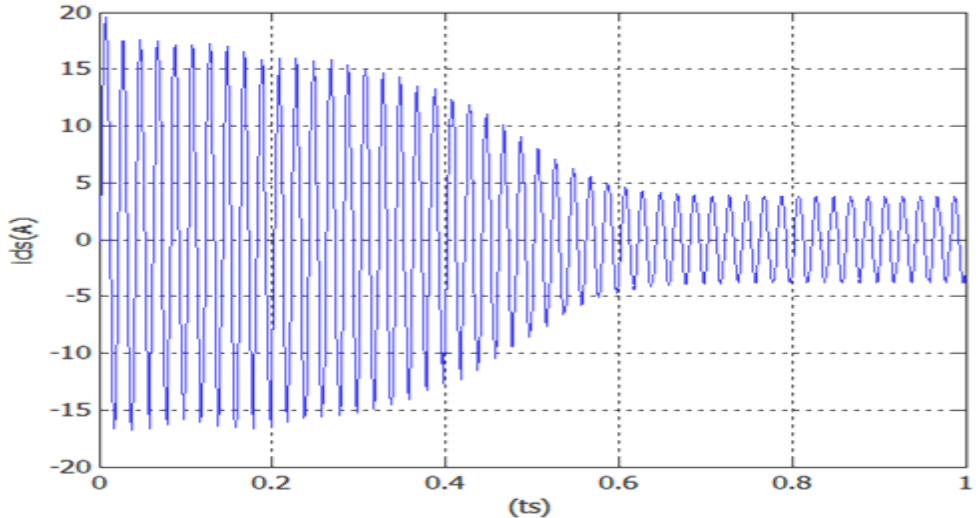


Figure 2.13 Courant statorique direct en charge

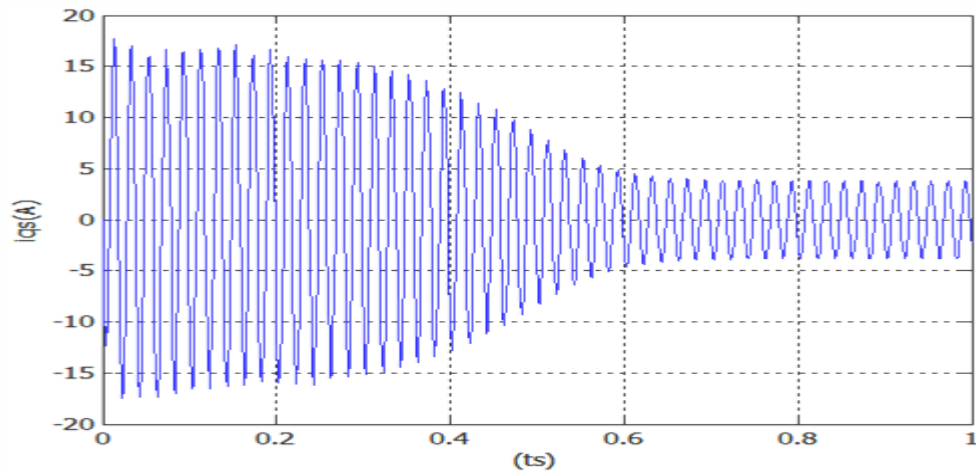


Figure 2.14 Courant statorique quadratique en charge

L'exploration des différentes caractéristiques obtenues par simulation pour la machine asynchrone (courants, flux, couple et vitesse) peut nous renseigner sur son état de santé (sain et dégradé). Seulement le modèle ci-dessus reflète l'état sain. Pour parvenir à un diagnostic de la machine électrique lorsqu'elle est en présence d'une défaillance électrique, magnétique ou mécanique. Il faut arriver à écrire le modèle mathématique en tenant compte de la nature du défaut et son influence exacte sur les différents paramètres de la machine qui entre dans sa description mathématique.

## 2.5. Modélisation des Défauts d'un Entraînement Electromécanique Asynchrone

### 2.5.1. Modélisation des Défauts électriques d'un Entraînement Electromécanique Asynchrone

Ainsi les expressions des vecteurs d'état des tensions, de flux et par conséquent des courants, peuvent être exploités pour la modélisation et la simulation des machines asynchrones saines et en présence des défauts électriques et magnétiques au niveau [72]:

- du circuit statorique (court circuit spires, rupture phases, ..) en manipulant :

$$[R_s] = \text{diag}(R_s) \quad (2.28)$$

- du circuit rotoriques (ruptures barres, fissure anneau,...) en manipulant :

$$[R_r] = \text{diag}(R_r) \quad (2.29)$$

## 2.5.2. Modélisation des Défauts Mécaniques d'un Entraînement Electromécanique Asynchrone

Pour arriver à développer des modèles mathématiques du système d'entraînement électromécanique lorsque ce dernier subit des dégradations mécaniques simples ou multiples, le problème se complique

Seulement, l'idée qui se dégage pour modéliser analytiquement les dégradations mécaniques est de se Diriger vers l'expression d'équilibre des couples appelée aussi l'équation mécanique et essayer de De faire l'étude théorique des effets des défauts mécaniques sur le courant du stator [66].

### 2.5.2.1. Expression du Couple Electromagnétique

On sait que la transformation de PARK conserve la puissance instantanée ce qui nous permet d'écrire [72]:

$$P_e = V_{s1}i_{s1} + V_{s2}i_{s2} + V_{s3}i_{s3} = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \quad (2.30)$$

Faisons intervenir les équations (2.15), (2.16) on obtient :

$$P_e = [R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq}] I_{sd} + [R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} + \omega_s \varphi_{sd}] I_{sq} \quad (2.31)$$

$$P_e = [R_s I_{sd}^2 + R_s I_{sq}^2] + [\frac{d\varphi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} I_{sq}] + [\omega_s (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd})] \quad (2.32)$$

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:

$$P_e = C_e \Omega_s = \omega_s (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (2.33)$$

$$C_e = p(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (2.34)$$

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

### 2.5.2.2. Equation du Mouvement(ou Mécanique)

L'équation de mouvement est donnée d'après la loi fondamentale de la dynamique [72].

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r$$

$J$  : 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).

L'hypothèse clé pour développer des modèles théoriques est que les défauts mécaniques produisent principalement deux effets sur les machines à induction:

- des oscillations additionnelles au couple de charge à des fréquences caractéristiques
- une excentricité de l'entrefer.

Les Oscillations du couple de charge peuvent être causées par les défauts suivants:

- déséquilibre massique « Balourd » ou déséquilibre de la charge
- désalignement de l'arbre
- défaut de la boîte de vitesses « Réducteur ou multiplicateur »
- défaut des roulements et des paliers
- défaut de fixation, etc...

### 2.5.2.3. Equations d'Equilibre Mécanique de l'Entraînement mécanique

La Transmission du défaut Mécanique vers le courant statorique peut s'expliquer en partant de l'influence des variations de couple de charge sur le courant électrique. Ces variations entraînent également des oscillations dans le couple électromécanique afin que la machine garde un régime de fonctionnement stable. Ces fluctuations ont la particularité de se produire à la même fréquence caractéristique du défaut en question. Pour comprendre la transmission du défaut mécanique sur le courant statorique, il est important d'étudier son effet sur les forces magnétomotrices et par la suite sur l'induction et le courant statorique [72].

L'équation d'équilibre des couples s'écrit :

$$C_{em} = C_{charge}$$

Avec  $C_{em}$  le couple électromagnétique et  $C_{charge}$  le couple résistant extérieur.

Si, pour une raison quelconque, cette égalité entre les couples est perturbée

( $C_{em} - C_{charge}$ ), dans ce cas, l'équation d'équilibre des couples est réalisée grâce au couple

$$C_{charge} = C_{const} + C = C_{const} + C_c \cos(\omega_c \cdot t)$$

### 2.5.2.4. Effet sur les FMM (force magnétomotrices du Rotor et du stator)

En vertu d'une défaillance mécanique, le couple de charge en fonction du temps est modélisé par une composante constante  $C_{const}$  et une composant  $C_{addit.}$ , variant à la fréquence caractéristique  $f_c$ , selon le type de défaut.



Il peut s'agir par exemple de la fréquence  $f_r$  de rotation avec déséquilibre de charge ou d'une fréquence particulière de la boîte de vitesses dans le cas d'un défaut à la boîte de vitesses.

Le premier terme de la variable série de Fourier est un composant cosinus avec une fréquence  $f_c$ .

Par souci de clarté et comme ils sont généralement de faible amplitude, les termes d'ordre supérieur à  $k f_c$  sont négligés seul le terme fondamental est considéré [72].

Le couple de charge peut être décrit comme :

$$C_{\text{charge}}(t) = C_{\text{const}} + C_c \cos(\omega_c t) \quad (2.35)$$

où  $C_c$  est l'amplitude de l'oscillation du couple de charge et  $\omega_c = 2\pi f_c$ .

L'équation mécanique de la machine concernant le couple à la vitesse  $\omega_r$  de rotation du moteur et à la position mécanique du rotor s'écrit comme suit:

$$\Sigma C(t) = C_{\text{motor}} - C_{\text{charge}}(t) = J d\omega_r / dt = J d^2\Theta_r / dt^2 \quad (2.36)$$

$$\Theta_r(t) = \int_{t_0}^t \omega_r(\tau) d\tau = C_c / J \omega_c^2 \cos \omega_c(t) + \omega_{r0} t \quad (2.37)$$

Où  $\omega_{r0}$  est la partie constante de la vitesse du moteur. Cette équation montre que, contrairement à la machine saine où  $\Theta_r(t) = \omega_{r0} t$ , des oscillations à des fréquences caractéristiques sont présentes sur la position mécanique du rotor. Les oscillations à la position mécanique du rotor  $\Theta_r$  vont agir sur la FMM du rotor.

A l'état sain (sans défaut), la fondamentale de la FMM du rotor dans le cadre référentiel du rotor ( $\mathbf{R}$ ) qui est une onde avec  $p$  paires de pôles et de fréquence  $s f_s$  (ou  $g f_s$ ), est donné par:

$$F_r^{(\mathbf{R})}(\Theta', t) = F_r \cos(p \Theta' - s \omega_s t) \quad (2.38)$$

Où,  $\Theta'$  est l'angle mécanique dans le référentiel rotorique ( $\mathbf{R}$ ) et  $s$  (ou bien  $g$ ): le glissement.

Les harmonique de temps et d'espace son négligés

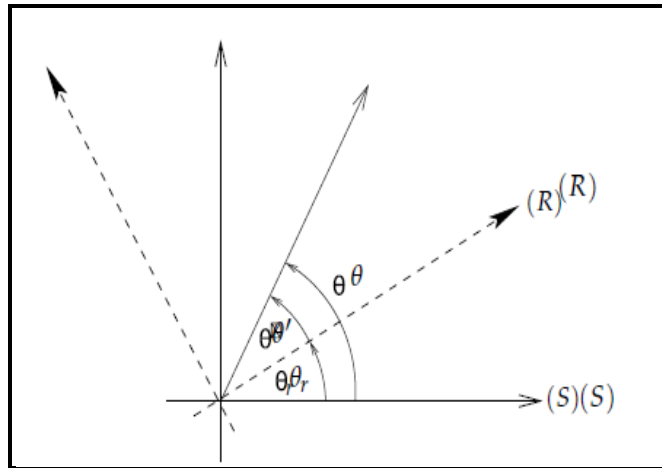


Figure 2.15. Cadre référentiel du Stator (S) et du rotor (R) frame [72]

La Figure 2.15 illustre la transformation entre les cadres référentiels du rotor et du stator par  $\Theta = \Theta' + \Theta_r$ .

En utilisant (2.37), on obtient:

$$\Theta' = \Theta - \omega_{r0}t - C_c/J\omega_c^2 \cos(\omega_c t) \quad (2.39)$$

Ainsi, la FMM du rotor donnée par l'équation (2.38) peut être transformée dans le cadre référentiel stationnaire du stator l'aide de l'équation (2.39) et la relation  $\omega_{r0} = \omega_s (1 - s) / p$  :

$$F_r(\Theta, t) = F_r \cos(p \Theta - \omega_s t - \beta \cos(\omega_c t)) \quad (2.40)$$

Où

$$\beta = p C_c/J\omega_c^2 \quad (2.41)$$

L'équation (2.40) montre clairement que les oscillations du couple de charge à la fréquence  $f_c$  conduisent à une phase de la modulation de la FMM du rotor dans le cadre de référence du stator. Cette modulation de phase est caractérisée par l'introduction du terme  $\cos \beta (\omega_c t)$  dans la phase de l'onde de la FMM.

Le paramètre  $\beta$  est généralement appelé l'indice de modulation.

Pour les valeurs physiquement raisonnables  $J$ ,  $C_c$  et  $\omega_c$ , le rapprochement  $\beta \ll 1$  tient dans la plupart des cas.

L'erreur n'a pas d'effet direct sur la FMM du stator et il est considéré comme ayant la forme suivante:

$$F_s(\Theta, t) = F_s \cos(p \Theta - \omega_s t - \varphi_s) \quad (2.42)$$

$\varphi_s$ , est la différence entre les phases initiales des FMM du rotor et du stator

Comme pour le cas des FMM du rotor, seuls l'harmonique fondamentale de temps et d'espace de la FMM est considérée ; les harmoniques du temps et d'espace d'ordre supérieur sont négligés .

### 2.5.2.5. Effet sur la densité de flux et du courant statorique

La densité de flux de l'entrefer  $B(\Theta, t)$  est le produit de la FMM totale et de la perméance  $\Lambda$  de l'entrefer. La perméance  $\Lambda$  de l'entrefer est censée être une constante parce que les effets d'amortissements et l'excentricité ne sont pas prise en considération pour des raisons de clarté et de simplicité [72].

$$\begin{aligned} B(\Theta, t) &= [F_s(\Theta, t) + F_r(\Theta, t)] \cdot \Lambda \\ &= B_s \cos(p \Theta - \omega_s t - \varphi_s) + B_r \cos(p \Theta - \omega_s t - \beta \cos(\omega_c t)), \end{aligned} \quad (2.43)$$

La modulation de la phase de la densité du flux  $B(\Theta, t)$  existe pour le flux  $\Phi(t)$  lui-même, comme  $\Phi(t)$  est obtenu par simple intégration de  $B(\Theta, t)$  par rapport à la structure d'enroulement. La structure de l'enroulement possède une influence seulement sur l'amplitude des composantes harmoniques du flux, et non sur leurs fréquences.

Par conséquent,  $\Phi(t)$  dans une phase arbitraire peut être exprimée sous une forme générale:

$$\Phi(t) = \Phi_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) + \Phi_r \cos(\omega_s t - \beta \cos(\omega_c t)) \quad (2.44)$$

La relation entre le flux et le courant du stator dans la phase considérée est donnée par l'équation des tensions du stator

$$V(t) = R_s I(t) + d\Phi(t)/dt \quad (2.45)$$

Avec :

$V(t)$  imposée par la source de tension, le courant résultant du stator sera dans une relation linéaire à la dérivée de la phase du flux  $\Phi(t)$  dans le temps et aura un contenu de fréquence équivalent. La dérivée de l'équation (2.44) nous conduit à:

$$\begin{aligned} d\Phi(t)/dt &= -\omega_s \Phi_s \sin(\omega_s t + \varphi_s) \\ &\quad - \omega_s \Phi_r \cos(\omega_s t + \beta \cos(\omega_c t)) \\ &\quad + \omega_c \beta \Phi_r \sin(\omega_s t + \beta \cos(\omega_c t)) \sin(\omega_c t) \end{aligned} \quad (2.46)$$

L'amplitude de la dernière période est plus petite que celle des autres termes parce que  $\beta \ll 1$ . Ainsi, le dernier terme de l'expression (2.46) doit être négligé dans la suite. Par conséquent, le courant  $I_s(t)$  d'une phase arbitraire du stator peut être exprimé sous une forme générale:

$$\begin{aligned} I_{to}(t) &= i_{st}(t) + i_{rt}(t) \\ &= I_{st} \sin(\omega_S t + \varphi_S) + I_{rt} \sin(\omega_S t + \beta \cos(\omega_c t)) \end{aligned} \quad (2.47)$$

Par conséquent, le courant du stator  $I(t)$  peut être considéré comme la somme de deux composantes :

- le terme  $i_s(t)$  résultant de la FMM du stator et qui n'est pas modulée.
- le terme  $i_{rt}(t)$ , qui est une conséquence directe de la FMM du rotor et qui montre la modulation de la phase suite aux oscillations du couple de charge considéré.

L'absence de défauts mécaniques (Système sain) correspond à  $\beta = 0$ .

Il est clair que la composante fondamentale du courant  $i_{to}(t)$  est la somme de deux

Composantes : Le terme  $i_s(t)$  résulte de la force magnétomotrice statorique et il n'est pas Modulé. Le terme  $i_{rt}(t)$ , qui est une conséquence directe de la FMM rotorique, montre la Modulation de phase due aux oscillations du couple et de la vitesse.

Une validation expérimentale et par simulation de cette théorie par rapport aux variations De couple et leurs effets sur le courant statorique sera présentés dans la suite.

### 2.6. Conclusion

L'étude dynamique effectuée a permis de modéliser le système électromécanique. Les transformations de park ont permis le passage des enroulements statorique  $a, b, c$ , et rotorique  $A, B, C$  aux enroulements orthogonaux  $ds, qs$  et  $dr, qr$ . Ainsi, nous avons pu développer le modèle mathématique sous forme de variables d'état. Cette représentation temporelle est avantageuse pour suivre l'évolution des grandeurs internes du système pendant les différents régimes de service. Après établissement du modèle mathématique de la machine asynchrone généralisée dont la complexité a été réduite moyennant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Des idées à des fins de détection de défaut et de diagnostic à travers l'exploitation de ce modèle ont été exposées. Pour ce qui concernera notre travail de recherche vu la difficulté de modéliser précisément le défaut mécanique, nous nous sommes dirigés vers l'approche du traitement du signal courant capté sur le banc d'essai. Ce ci sera développé dans les chapitres qui suivront.

# **Chapitre 3 LES METHODES DE DIAGNOSTIC ET LA TECHNIQUE DE L'ANALYSE DES COURANTS STATORIQUES**

## **3.1. Introduction**

Dans ce chapitre présenté les Méthodes et les techniques plus utilisé pour la détection des défauts mécanique, électrique et combiné dans la machine asynchrone.

## **3.2. Les Méthodes de diagnostic**

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

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

On peut classer les méthodes de diagnostic en premier lieu dans les deux grandes

Familles [41][42][44] :

- Les méthodes internes et externes
- Les méthodes inductives et déductives

### **3.2.1. Diagnostic par les méthodes internes**

Le diagnostic de défaillances par des méthodes internes requiert un modèle du système à surveiller, et s'il n'y en pas, on élaborer un qui convienne (fiable et suffisamment précis). Ce modèle peut varier selon les objectifs. Il peut être plus ou moins agrégé, représentatif d'un modèle de bon fonctionnement ou de fonctionnement caractéristique d'une ou plusieurs défaillances. Habituellement un modèle est une description formelle (Mathématique) du système à surveiller. Mathématiquement on peut avoir plusieurs modèles du même système comme en automatique par exemple, peuvent être à temps continu ou discret, descriptibles au moyen

d'équations différentielles ou d'équations aux différences. Un modèle peut aussi être très difficile à obtenir, de plus, il peut être plus ou moins approximatif [41] [42] [44].

Ces méthodes de diagnostic internes reposent sur la comparaison de mesures réelles sur le système à surveiller et des informations que fournit le modèle. Les écarts caractérisent le fonctionnement du système:

- à un écart nul, correspond un fonctionnement de type normal.
- à un écart non nul, correspond un fonctionnement de type défaillant.

Ces méthodes internes se classent en deux grandes catégories ; les méthodes de redondance analytiques qui utilise les techniques d'estimation d'état et les techniques d'estimations paramétriques qui ont pour but l'estimation des paramètres du modèle.

Les méthodes internes de diagnostic se distinguent selon le modèle utilisé :

**Modèle de simulation:** c'est une description de la structure physique et du comportement du système. Les modèles analytiques utilisés dans ce mode de diagnostic sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert. Les perturbations sont présent en compte de manière additive à travers des matrices. Les défauts sont présent en compte soit de la même manière soit en modifiant la structure même du modèle.

**Equation de parité:** une relation ou équation qui génère un résidu est appelée relation ou équation de parité. Les équations de parité primaire peuvent être obtenues à partir des équations qui décrivent la structure et le comportement du système et les équations de parité additionnelles sont obtenues par l'intermédiaire de transformations afin d'améliorer la tâche de diagnostic.

**Observateur :** Un modèle capable d'engendrer une approximation du vecteur d'état est appelé estimateur d'état ou observateur d'état. Le modèle est décrit sous une représentation de variables d'état. L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic.

**Estimation paramétrique :** La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique, consiste à déterminer les valeurs numériques des paramètres structuraux d'un modèle de connaissance qui gouverne le comportement dynamique du système. La première étape est donc, l'élaboration d'un modèle mathématique de complexité raisonnable pour caractériser la machine en fonctionnement sain et dégradé. Le type de défaut que l'on pourra

détecter dépend du choix du modèle. En effet, les défauts statoriques ou rotoriques doivent être discriminés au niveau des paramètres physique estimés, pour qu'on puisse les détecter et les localiser. Le modèle de Park est souvent utilisé en diagnostic pour l'estimation paramétrique. Les cassures de barres provoquent une augmentation dans la résistance rotorique apparente [43].

**Modélisation des signaux :** Dans cette méthode, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts. L'analyse spectrale plus particulièrement est utilisée depuis de très nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux défauts (rupture de barres, dégradations des roulements,...) se traduisent par l'apparition de fréquences caractéristiques directement liées à la vitesse de la machine.

### **3.2.2. Diagnostic par les méthodes externes**

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine par apprentissage. Le module de reconnaissance utilise les observateurs issues du système, des entrées et des sorties, afin de trouver les relations de cause à effet. Dans ces méthodes de diagnostic le facteur déterminant est l'algorithme de classification.

### **3.2.3. Diagnostic par les Méthodes inductives**

Ces méthodes de diagnostic correspondent à une approche montante ou recherche en avant. Il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système. Ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons afin de trouver le défaut.

### **3.2.4. Diagnostic par les Méthodes déductives**

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes. Les méthodes déductives doivent trouver quels sont les effets dans les systèmes. Une vérification des «effets trouvés par rapport aux effets possibles » permet de confirmer Ou d'infirmier l'existence du défaut. Ce qui justifie notre raisonnement [3] [41] [36].

Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou Arrière) soit une combinaison de raisonnements (avant et arrière). Dans ce dernier cas, le raisonnement est appelé raisonnement mixte ou avant arrière. La connaissance "à priori" de la cause " défaut " implique la connaissance de certains effets [41].

### 3.3. Les techniques de l'analyse de signal dans la machine asynchrone

Beaucoup de méthodes d'analyse du signal ont été proposées pour le diagnostic de défauts, parmi ces méthodes on trouve la FFT (Fast Fourier Transform), une des méthodes les plus utilisées et les mieux établies. Malheureusement, les méthodes basées sur la FFT ne sont pas appropriées à l'analyse des signaux non-stationnaires et ne peuvent pas indiquer l'information inhérente dans ces signaux. Habituellement, les composants non stationnaires contiennent des informations abondantes sur les défauts de la machine.

L'application consécutive de la FFT, 3D, l'APV et la STFC a pour objectif de concilier les avantages des signatures spectrales, orbitales et temporelles au profit d'une détection et une lecture fiable des défauts naissants et de leur fusion affectant un système.

En outre, cette panoplie de signatures, a le privilège de préconiser un matériel simple et à faible coût et peut être exploitée par des opérateurs pas forcément expert en la matière. Les résultats peuvent contribuer à établir une perspective d'approche automatique par l'ajout de techniques de prise de décision qui serait capable de donner un diagnostic fiable et améliorer la gestion en maintenance du parc de machines

#### 3.3.1. La transformée de Fourier

L'analyse de Fourier est une base majeure de la physique et des mathématiques. Elle est indissociable du traitement du signal, et ce pour deux raisons principales. La première est l'universalité du concept de fréquence sur lequel elle repose. La seconde tient à la structure même de l'analyse de Fourier qui se prête aisément à des transformations communes comme le filtrage linéaire en les traduisant de manière particulièrement simple [45].

Le principe de la transformée de Fourier repose sur le fait que toute fonction périodique peut être représentée comme la somme d'une série de sinus et de cosinus dont on fait varier d'une part les amplitudes en les multipliant par des coefficients, et d'autre part les phases en les décalant de manière à ce qu'elles s'additionnent ou se compensent.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (3.1)$$

Cependant, l'analyse de Fourier, de par sa nature, montre assez vite ses limitations:

Son calcul nécessite la connaissance de toute l'histoire temporelle du signal (équ 3.1, transformation de Fourier, équ (3.2) transformation de Fourier inverse), de plus, dans une



transformée de Fourier l'information sur le temps est présente (la transformée inverse est donc possible), mais elle est cachée dans les phases: elle est en pratique impossible à extraire. On en est donc réduit à étudier un signal soit en fonction du temps soit en fonction des fréquences qu'il contient sans possibilité de conjuguer les deux analyses.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{j2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (3.2)$$

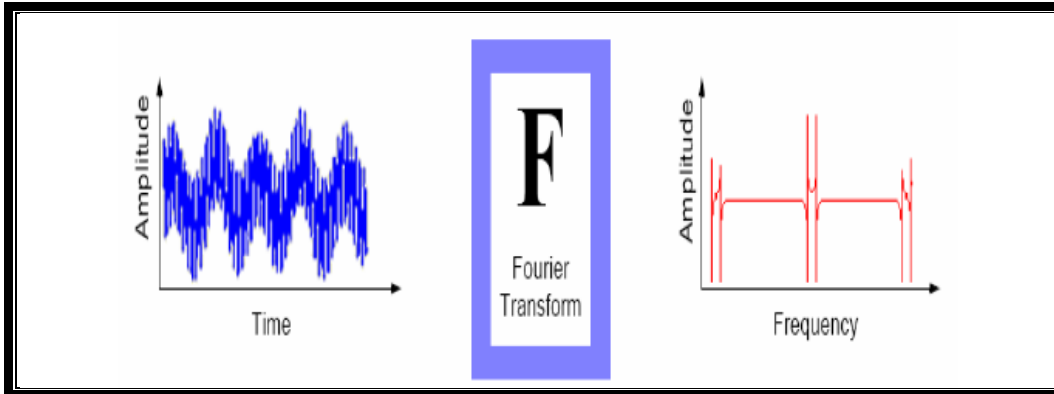


Figure 3.1 Principe de la Transformée de Fourier (FT) [72]

Malgré l'introduction et les succès de la transformée de Fourier rapide (FFT), est donc par définition peu adaptée à l'étude des signaux non-stationnaires. Hors, ces signaux se rencontrent beaucoup plus souvent que les signaux stationnaires.

### 3.3.2. Méthode de représentation tridimensionnelle des courants statoriques (3D)

Cette détection basée sur l'analyse des trois courants ( $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ). La plupart des méthodes employées pour identifier et classifier les défauts du moteur asynchrone défectueux sont basées sur l'analyse des courants statoriques. L'approche proposée emploie également l'analyse des courants statoriques, Cependant, dans cette méthodologie le problème est converti dans une analyse de reconnaissance des structures. Avec les conditions idéales pour le moteur asynchrone et une alimentation non équilibrée de tensions, les courants statoriques sont donnés par l'équation (3.3) [46]

$$\begin{cases} I_A = I_m \sin(\omega t - \varphi) \\ I_B = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi) \\ I_C = I_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi) \end{cases} \quad (3.3)$$

$I_A$ ,  $I_B$ , and  $I_C$  : les courants statoriques des trois phases;

$I_m$  : la Valeur maximale du courant;

$\omega$  : Pulsation;  
 $\varphi$  : Angle de la phase;  
 $t$  : temps.

Dans l'approche proposée les courants sont identifiés en tant que modèles typiques pour chaque mode défectueux. Ceci est accompli en l'analysant dans un espace à trois dimensions. Pour un moteur sain, le modèle correspondant du courant est un cercle centré à l'origine des coordonnées (figure 3.2), comme représenté dans la figure 3.,2 où R dénote son rayon.

$$R^2 = I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 \quad (3.4)$$

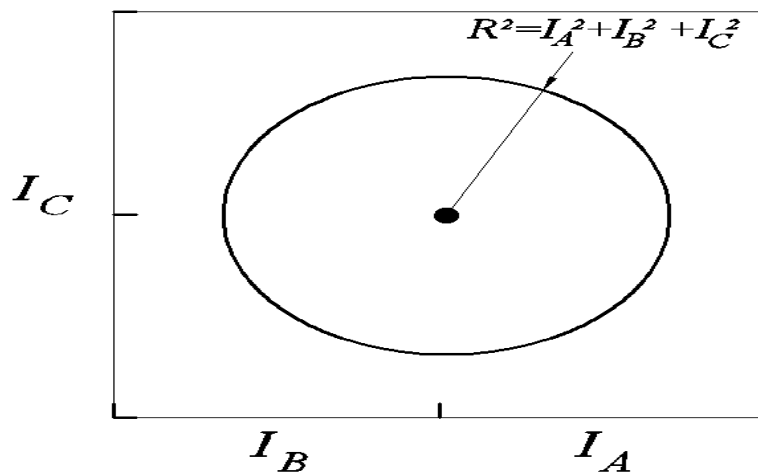


Figure 3.2 : Machine saine

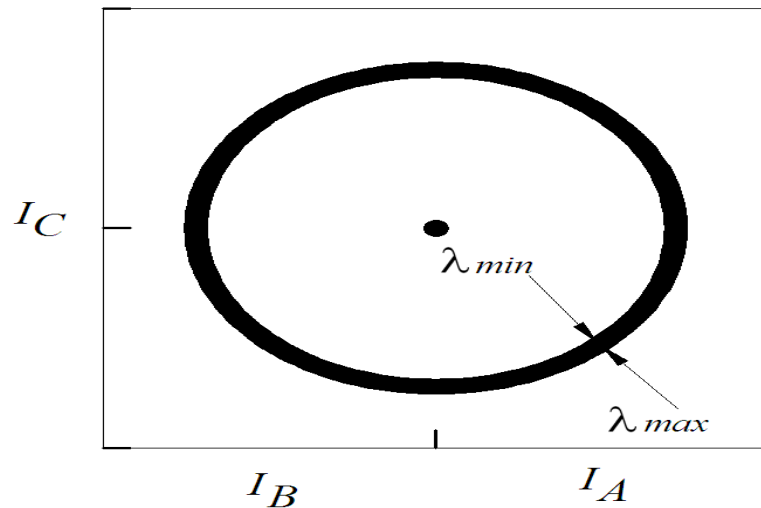


Figure 3.3 : Machine en rupture de barre

Pour un moteur asynchrone fonctionnant en mode défectueux, le modèle précédent n'est plus valide. Ainsi, avec un certain rotor présentant des barres cassées ou des fissurations de l'anneau ,

le modèle représentant les courants n'est plus un cercle mais plutôt une couronne ayant deux rayons:  $\lambda_{\max}$  et  $\lambda_{\min}$  et une épaisseur au niveau de la circonférence du cercle qui peut servir comme indice du 1 degré de gravité du défaut (nombre de barres), correspond à la largeur(section) de cet épaisseur comme l'équation (3.5) c.à.d. la différence entre ces deux rayons, comme est présenté dans la figure 3.3

$$S_{rt} = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \quad (3.5)$$

### 3.3.3. Signature de la composante directe du Vecteur de Park

L'approche du Spectre via la FFT de la composante directe du vecteur de Park donne un spectre plus signifiant que celui obtenu par l'analyse spectrale (FFT) conventionnelle du moteur à induction et nous économise une représentation encombrante des spectres des trois courants phasiques (  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ). [47] [48].

$$\left[ i_{0dq} \right]_i = p(\theta) \left[ i_{abc} \right]_i \quad (3.6)$$

Lorsque Concordia transformée est appliquée au réseau, ( $\alpha$ ) et ( $\beta$ ) composantes du courant de stator sont obtenus. Cette transformation est régie par l'équation (3.7).

$$\begin{aligned} x_d(t) &= \sqrt{\frac{2}{3}} x_a(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} x_b(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} x_c(t) \\ x_q(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}} x_b(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} x_c(t) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Seulement, cette technique **FFT de ( $I_a$ )** peut présenter des restrictions car certains éléments du système peuvent se coupler dans le spectre et leurs composantes fréquentielles seront masquées et il sera difficile d'isoler les différents défauts

### 3.3.4. Signatures orbitales du vecteur de Park

Généralement lorsque le système fonctionne sous des conditions idéales, cette approche donne une représentation sous forme circulaire. Cette orbite va servir de référence pour la détection des dégradations qui peuvent affecter le moteur tout simplement en surveillant les écarts et le degré de déformation des motifs obtenus.

$$x_s(t) = \sqrt{x_d^2(t) + x_q^2(t)} \quad (3.8)$$

### 3.3.5. Transformée de Fourier à court terme (STFT)

La transformée de Fourier à court terme (figure 3.4) offre des cartes d'un signal à deux dimensions (temps - fréquence).

La transformée de Fourier à court terme (TFCT ou STFC 'en anglais)), connue également par la TF à fenêtre glissante est un développement qui étend la technique de la TF standard pour gérer des données non-stationnaires [67]. L'idée est d'analyser le signal fenêtre par fenêtre. La TF de chaque portion de signal fenêtrée est calculée comme suit:

$$STFT_x^w(\tau, f) = \int_t x(t) \cdot w^*(t - \tau) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.9)$$

où

$x(t)$  représente le signal temporel échantillonné

$w(t)$  est la fenêtre temporelle de largeur  $T$  et centrée en  $\tau$  qui permet d'extraire une portion de signal,  $w^*$  dénote le complexe conjugué de  $w$

$$S_x(t, f) = \left| \int x(t) \cdot h(t - \tau) \cdot e^{-j\omega t} \right|^2 \quad (3.10)$$

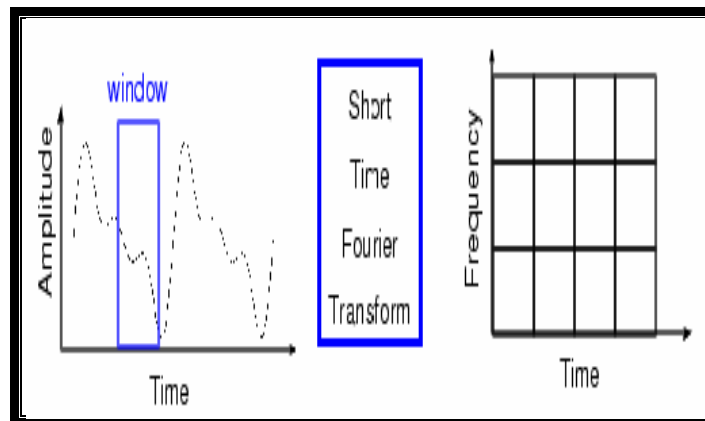


Figure 3.4 Passage de la caractéristique temporelle à la STFT [67]

Le Spectrogramme de la TFCT peut être exploité comme un outil pour l'analyse temps-fréquentielle du signal courant transitoire à des fins de diagnostic et de détection de défauts mécaniques affectant un système d'entraînement électromécanique Moteur à induction- réducteur.

Cependant, il est impossible d'obtenir simultanément les résolutions temporelles et fréquentielles. Ce problème est en fait lié au principe d'incertitude d'Heisenberg exprimant que les résolutions en temps et en fréquence ne peuvent être arbitrairement petites en même temps car:

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \Delta t^2 = \frac{\int t^2 |w(t)|^2 dt}{\int |w(t)|^2 dt} \\ \Delta f^2 = \frac{\int f^2 |W(f)|^2 df}{\int |W(f)|^2 df} \end{cases} \quad (3.11)$$

### 3.3.6. Signatures du Spectrogramme de La Transformée de Gabor (TG)

Tout comme la TF, la transformée de Gabor(TG) d'un signal contient toutes les informations portées par le signal. Le spectrogramme de Gabor est utilisé pour estimer la teneur en fréquence d'un signal. Il représente comme indiquée sur l'équation (3.12) un signal du domaine de temps,  $s(t)$ , avec la combinaison linéaire de fonctions élémentaires [49]:

$$s(t) = \sum_{m=0}^{m-1} \sum_{n=0}^{n-1} c_{m,n} h_{m,n}(t) \quad (3.12)$$

Où  $h_{m,n}(t)$  est la fonction élémentaire de la fréquence de temps,  $c_{m,n}$  est le poids de  $h_{m,n}(t)$ ,  $c_{m,n}$  sont les coefficients de Gabor. La transformée de Gabor calcule les coefficients  $c_{m,n}$  pour le signal  $s(t)$ .

L'idée du spectrogramme de la transformée de Gabor est simple et peut être une bonne alternative au spectrogramme de la TFCT. Elle dispose d'une meilleure résolution temps-fréquence (RTF) pour le diagnostic et la détection prédictive des défauts.

### 3.3.7. La Transformée en ondelettes continue (CWT)

Elle est définie comme suit:

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \cdot \int_t x(t) \cdot \psi^* \left( \frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad (3.13)$$

Où

$\tau$  est le coefficient de translation. Il s'agit d'un nombre réel.

$s$  est le coefficient d'échelle, également appelé facteur de dilatation de  $\psi$ . Il s'agit d'un nombre réel.

$\psi(t)$  est l'ondelette mère. Nous en verrons quelques exemples au paragraphe 7

$\psi^*$  dénote le complexe conjugué de  $\psi$

Les  $CWT_x^\psi(\tau, s)$  sont les coefficients d'ondelettes.

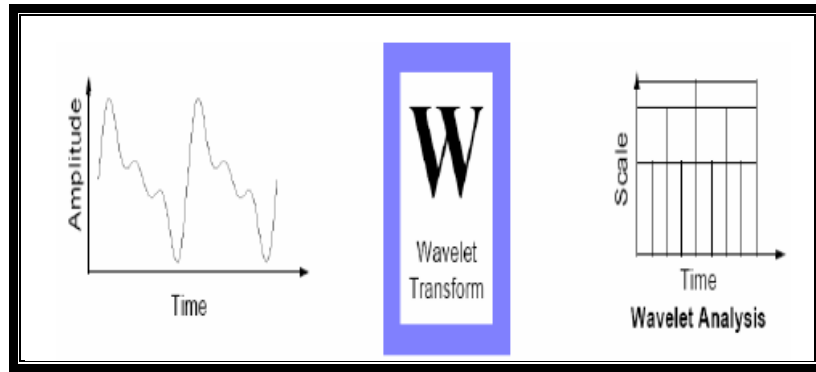


Figure. 3.5 Principe de la Transformée d'Ondelettes Continues [67]

L'amélioration de l'analyse de la STFT peut se faire par la TOC dont l'idée principale est de définir une analyse du même type mais en faisant dépendre la largeur de la fenêtre d'analyse de sa position et le règlement de l'indépendance de l'analyse en temps ou en fréquence mais le principe d'incertitude d'Heisenberg doit toujours être respecté. L'analyse par ondelettes est basée sur le concept d'échelle. Ainsi, la transformée en ondelettes continue apporte quelque part une solution à ce problème. Bien que la STFC et la TOC puissent constituer une alternative à l'analyse de Fourier traditionnelle, seulement, l'analyse de Fourier est plus performante sur certains domaines. En revanche, dans certains cas bien précis, il est nécessaire de rechercher des techniques permettant de s'approcher plus encore de l'optimalité, tout en essayant de conserver les atouts de ces techniques [68] [69][70].

### 3.3.8. Signature du courant neutre

Le neutre est un conducteur actif et le traitement du courant parcourant ce dernier peut être un outil privilégié pour informer sur l'état de santé du moteur à induction et des mécanismes qui lui sont accouplés. Théoriquement, dans un système triphasé équilibré, la somme vectorielle des courants s'annule au point neutre. Par conséquent, lorsqu'une quelconque défaillance mécanique et/ou électrique affecte le système électromécanique, des composantes de défauts émergent dans le spectre du courant neutre. Ainsi, le changement du spectre du courant neutre au voisinage du troisième harmonique et de ses multiples est révélateur d'informations précieuses sur les anomalies multiples présentes sur l'arbre mécanique (balourd et désalignement) et l'usure des dents des roues constituant le réducteur. Les fréquences porteuses spécifiques à ces défauts peuvent être exprimées par l'expression (3.14). Il faut noter que les harmoniques de rang 12 et plus sont généralement négligeables face à l'importance de l'harmonique de rang 3.

$$f_d = [3h \pm n(1-g)/p]f_s \quad (3.14)$$

### **3.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié les outils mathématiques qui permettent de modéliser les systèmes, les causes et les symptômes de défaillance, pour faciliter les démarches inductives et déductives, qui relèvent du domaine des méthodes de diagnostic interne et les méthodes capables de reproduire sous forme informatique, les modes de raisonnement de l'homme. Ces derniers sont basés sur la discipline de l'intelligence artificielle et sont du domaine des méthodes de diagnostic externe. Par suite nous avons exposé les techniques de l'analyse de signal dans la machine asynchrone. Les approches du signal courant sont très utilisées actuellement en diagnostic. Ces approches comme pour l'analyse vibratoire reposent sur la connaissance des signaux du comportement du système sain, auxquels seront comparés les signaux mesurés pendant les situations en défaillance. Les méthodes traditionnelles et avancées d'analyse des signaux à des fins de diagnostic en régime transitoire et en régime permanent sont l'analyse spectrale, la transformée de Fourier à court terme (TFCT) ou STFC (short Time Fourier Transformer), et de Gabor ainsi que la transformée de l'ondelette continue (TOC) ou Continu Wavelet Transformer (CWT) et la signature du courant neutre. Ces outils de détection et de localisation trouveront leur application et seront validés sur les bancs d'essai réalisés au laboratoire du département d'Electromécanique et feront l'objet du chapitre qui suivra.

# Chapitre 4 APPLICATION DE L'APPROCHE COURANT DEDIEE A LA DETECTION ET AU DIAGNOSTIC DU MOTEUR ASYNCHRONE

## 4.1. Introduction

Notre travail de recherche expérimentale a été scindé en deux parties

- La première partie concerne la détection de deux défauts l'un électrique (rupture de barres et portion d'anneau) et l'autre mécanique (balourd) par deux approches complémentaires de traitement du courant statorique
- La deuxième partie a porté sur une étude expérimentale menée sur le diagnostic et la détection des défauts mécaniques simples et multiples du système électromécanique.

Les signatures du courant à travers ces différentes approches permettent d'affirmer la nature des défauts mécaniques.

## 4.2. Premier banc d'Essai

Un banc d'essai (Figure 4.1) a été nécessaire pour le diagnostic du moteur asynchrone à cage (tableau 4.1). Le travail expérimental consiste au captage et à l'acquisition des intensités des trois phases du courant statorique du moteur asynchrone depuis son démarrage jusqu'à sa stabilité pour les modes de fonctionnement sain et dégradés. La première défaillance subie par le moteur est la création volontaire d'un balourd par la fixation d'une masse de 90 grammes sur un disque solidaire à son bout d'arbre. La deuxième défaillance s'est soldée en même temps par la fissuration intentionnelle d'une portion de l'anneau de court circuit et la cassure de 3 barres rotoriques

L'acquisition des signaux pour le diagnostic par un capteur de courant de calibre (0.01-10A) relié à un oscilloscope HAMEG507 relié à un capteur de courant. Cet appareil permet l'acquisition du signal sur 8 bits avec une fréquence d'échantillonnage comprise entre 1 kHz et 2,5 MHz. La visualisation du signal sur l'écran du PC, se fait à l'aide du logiciel appelée *SP107 E*. Le courant statorique est acquis au moyen de la carte d'acquisition intégrée à l'oscilloscope. Le traitement des données est fait en utilisant le logiciel MATLAB à des fins d'analyse des signaux



**Chapitre 4. Application de L'Approche Courant Dédicée à la Détection et au Diagnostic du Moteur Asynchrone**



Figure 4.1. Banc d'Essai

**Tableau 4.1 :** Caractéristiques du moteur asynchrone à rotor en court circuit.

Caractéristique	Moteur asynchrone
Puissance	270 w
Fréquence d'alimentation	50 HZ
Couplage du moteur	Y
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

### 4.3. Deuxième banc d'Essai

L'expérimentation a nécessité un banc d'essai composé essentiellement d'un moteur asynchrone à cage (3Kw ; 2p=6 ; 960trs/mn ; 220V/380V ; 12.5A/7.2A) entraînant une boîte à vitesse à 3 étages à engrenage parallèle et à denture droite hélicoïdale (Figure 4.2).



Figure 4.2. Banc d'essai du Système d'entraînement électromécanique

Sur le moteur à induction, il a été procédé au mesurage et au traitement du courant des trois phases d'alimentation et par suite celui circulant dans le neutre pour le fonctionnement de l'installation non dégradée lors des défauts d'écaillage et de cassure de la denture sur les différents engrenages du réducteur (Figure 4.2). La campagne d'essai s'est déroulée comme suit : en première étape, il a été procédé à la fixation d'une masse de 246 gr sur l'arbre du moteur ; comme deuxième étape il s'agit de créer, en plus du balourd, un désalignement en desserrant légèrement l'accouplement et en soulevant les pattes avant du moteur d'entraînement de 2mm. Comme troisième étape d'essai, il a été procédé à la cassure des dents successives de la roue  $Z_2$ . La quatrième étape consiste à procéder au mesurage des courants en présence du balourd et de la cassure des trois dents de la roue. Pour conclure, il a été opté au captage des courants lors du fonctionnement du système électromécanique en présence des trois anomalies mécaniques : le balourd, le désalignement et la cassure des trois dents de la roue  $Z_2$  du réducteur. A chaque essai, les courants de phases et du neutre sont mesurés depuis l'instant de démarrage du moteur jusqu'à son état stationnaire.

4.4. Résultats Expérimentaux et Interprétations (première partie)

4.4.1. Analyse spectrale

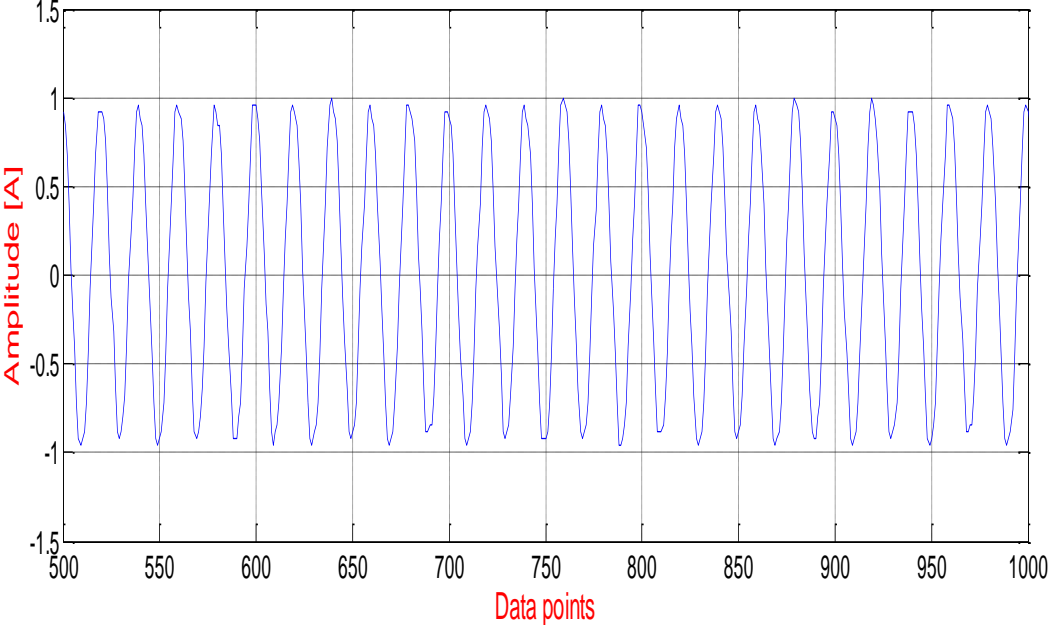


Figure 4.3 : le courant statorique de la machine sain

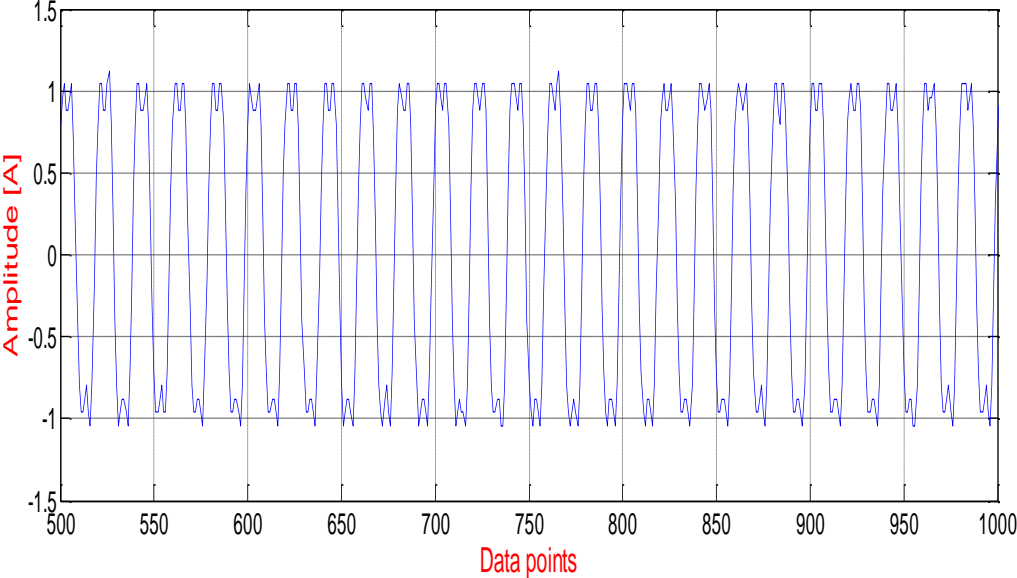


Figure 4.4 le courant statorique de la machine avec défaut

## Chapitre 4. Application de L'Approche Courant Dédiee à la Détection et au Diagnostic du Moteur Asynchrone

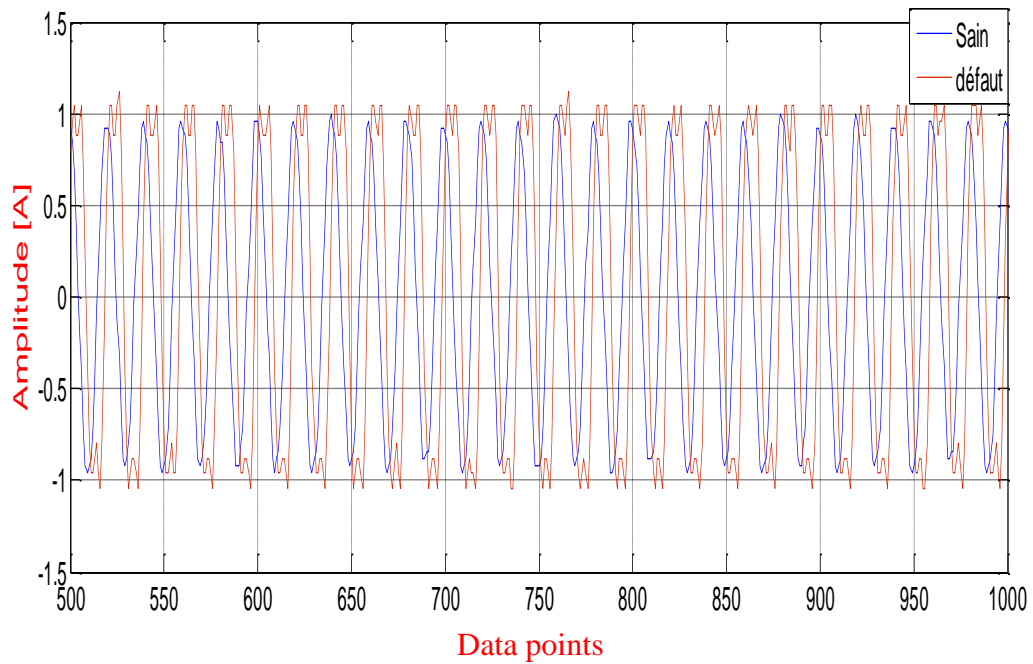


Figure 4.5 le courant statorique de la machine sain et défaut avec le même référentiel

Dans les figures 4.3 et 4.4 et 4.5 montrent respectivement la caractéristique temporelle du courant statorique, ou nous remarquons une modification très importante survient sur la variation temporelle

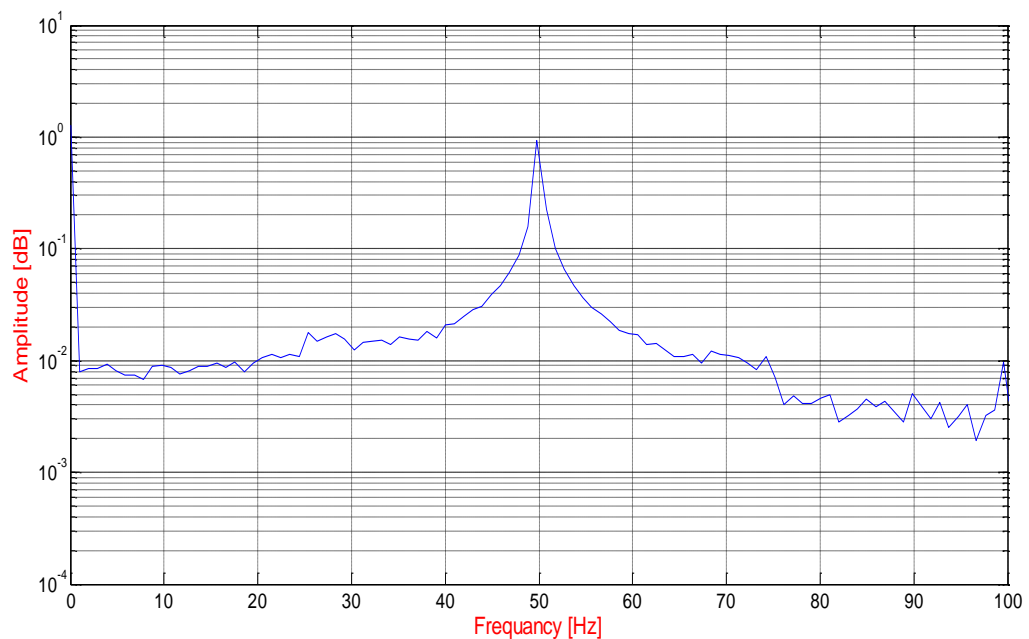


Figure 4.6 Le spectre de la machine saine

**Chapitre 4. Application de L'Approche Courant Dédiee à la Détection et au Diagnostic du Moteur Asynchrone**

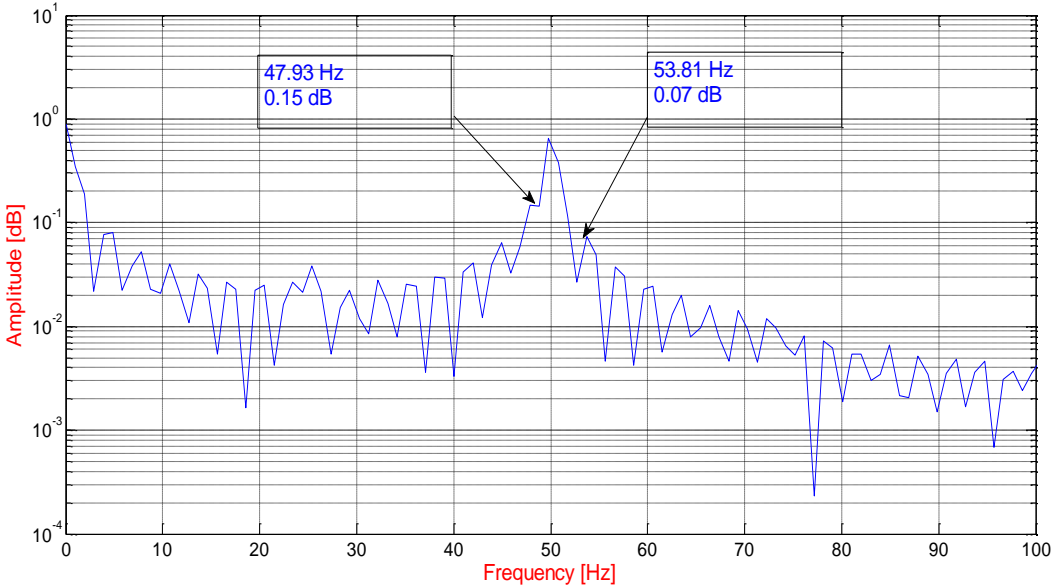


Figure 4.7 Le spectre de la machine avec trois barres casées

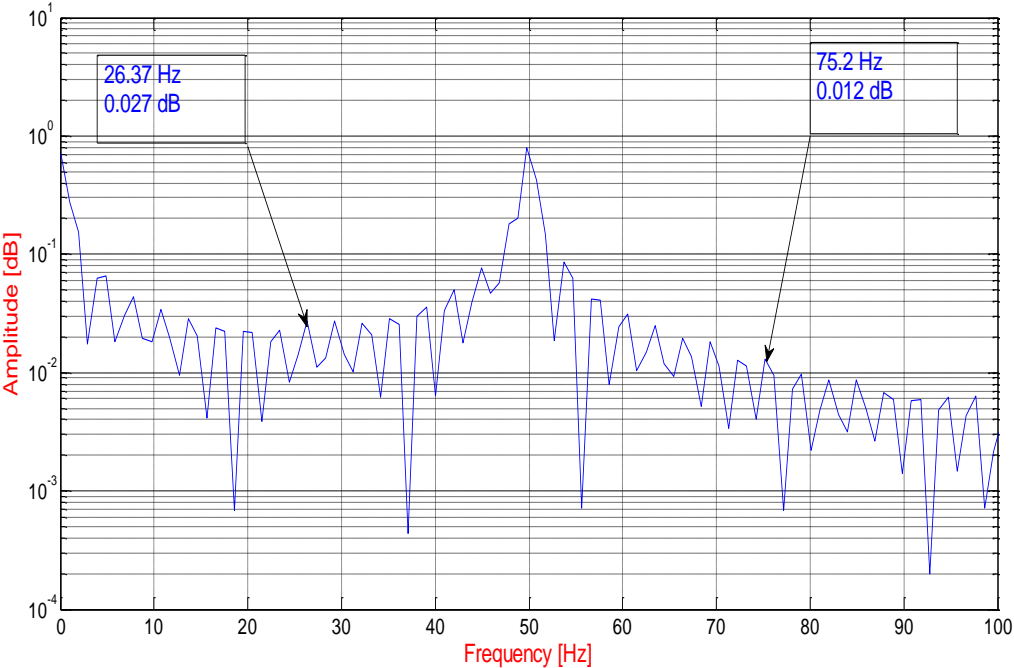


Figure 4.8 : Le spectre de la machine avec défaut balourd (90g)

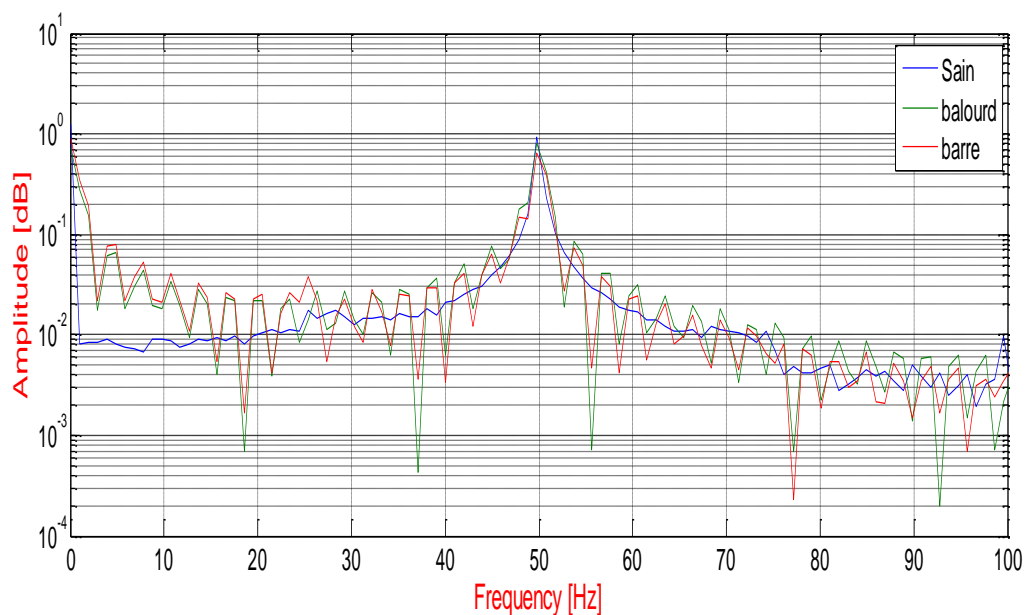


Figure 4.9 Le spectre de la machine sain avec défaut trois barres cassées et balourd (90g) le même plan

Aussi, nous constatons une différence flagrante entre les spectres du courant pour le rotor sain (figure 4.6) où l'on ne voit pas de composantes importantes sur le spectre en basse fréquence et celui en mode dégradé (figure 4.7) où sur le spectre, un peigne de raies latérales apparaît. On note sur la plage (0-100Hz), l'émergence prédominantes des raies de fréquences 47.93 Hz et 53.81Hz qui conformément à la théorie sont des fréquences marqueuses de la défaillance au niveau de cage rotorique.

La figure 4.8 illustre le spectre du courant statorique lorsque le moteur est affecté du défaut mécanique suite à la présence d'un balourd de 90 grammes sur son arbre rotorique. Comme convenu dans la théorie, le déséquilibre massique apparaît à la fréquence de rotation de l'arbre moteur soit  $1f_r$ . Ce qui signifie que les fréquences marqueuses de ce balourd à savoir 26.37 Hz et 75.2Hz sont aussi concernées par la basse fréquence et plus précisément la gamme (0-100Hz). Ainsi, ces deux défauts, bien qu'ils soient de nature différente, apparaissent sur le même intervalle de fréquence (figure 4.9). Il s'avère judicieux de développer une approche qui peut témoigner de leur identification afin de trancher sur leur nature et par conséquent l'origine de leur cause.

#### 4.4.2. Signatures des Défauts par la reconnaissance des formes en 3D.

La figure 4.10 expose le motif obtenu pour l'état sain du moteur. Il est à noter que l'orbite obtenue n'est pas parfaitement circulaire ; ceci est justifié par les imperfections de fabrication du moteur.

**Chapitre 4. Application de L'Approche Courant Dédiee à la Détection et au Diagnostic du Moteur Asynchrone**

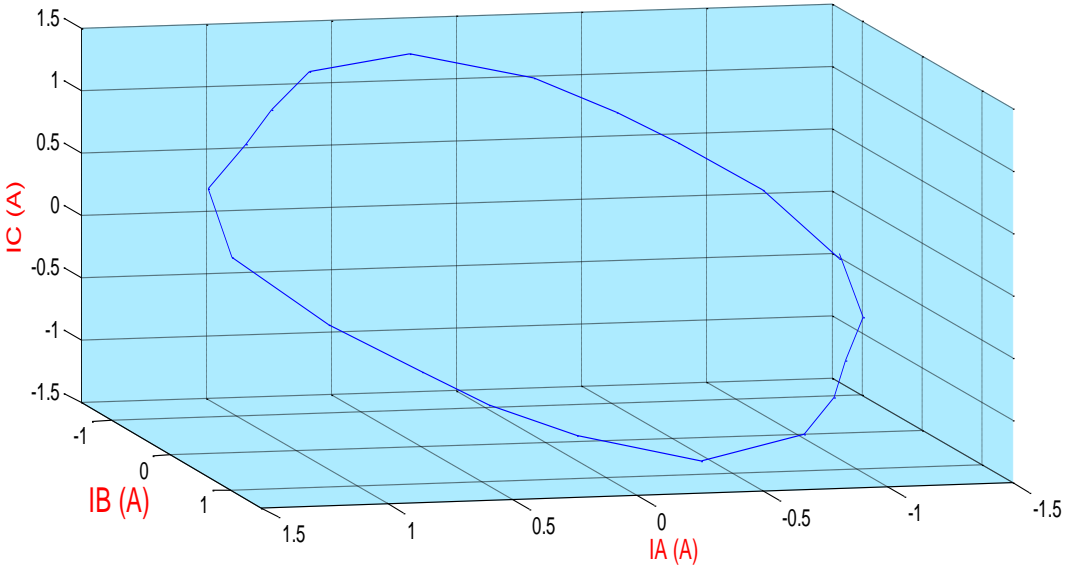


Figure 4.10. Motif en 3 D représentant le fonctionnement sain du moteur

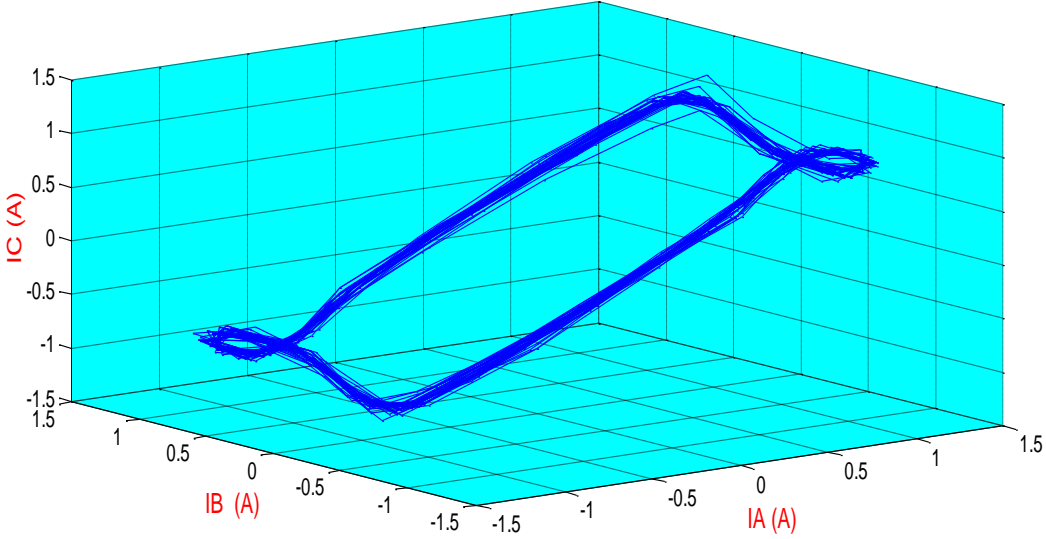


Figure 4.11 Motifs en 3D pour le mode de fonctionnement du moteur à induction en présence : d'un défaut de balourd.

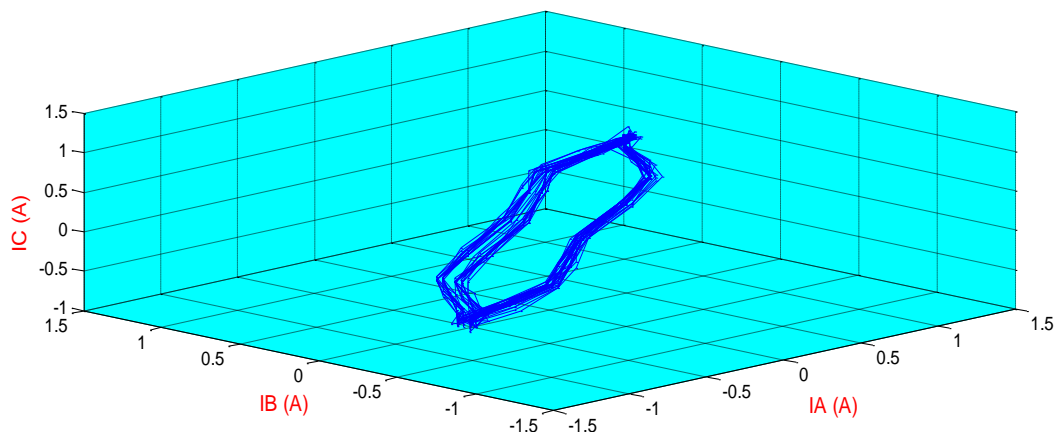


Figure 4.12 Motifs en 3D pour le mode de fonctionnement du moteur à induction en présence : la cassure d'une portion d'anneau de court circuit et de 3 barres rotoriques

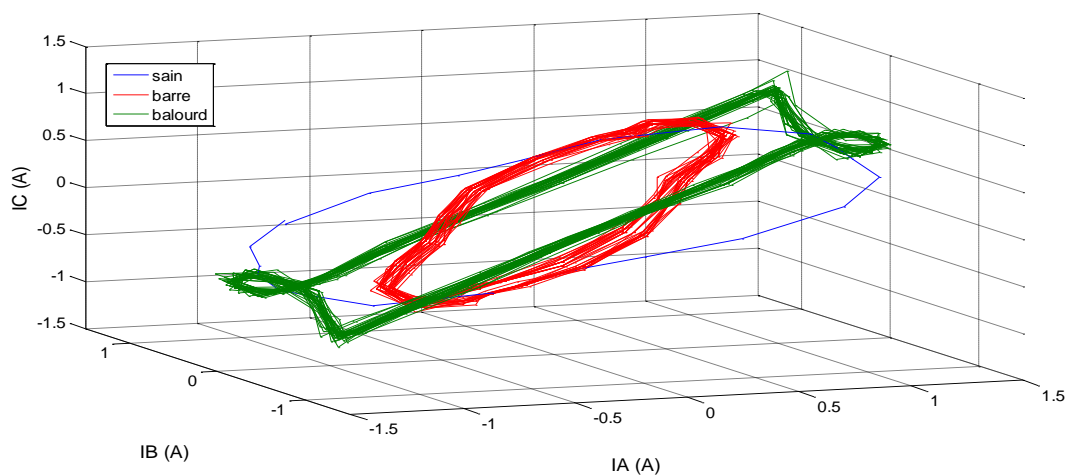


Figure 4.13 Motifs en 3D pour le mode de fonctionnement du moteur à induction en présence :

- Sain
- d'un défaut de balourd
- la cassure d'une portion d'anneau de court circuit et de 3 barres rotoriques

La figure 4.11 représente le motif obtenu suite au fonctionnement du moteur en présence du défaut mécanique de balourd où, l'orbite synonyme de cette défaillance n'est ni circulaire, ni ellipsoïdale. Son contour a la forme d'une hypocycloïde. Par contre, en figure 4.12 où est montré le motif lorsque le moteur fonctionne en présence des anomalies électriques précitées au niveau du rotor ; l'orbite obtenue est ellipsoïdale et que la section de son contour a beaucoup évoluée. Il faut remarquer que l'augmentation de la section est un paramètre indicateur de la gravité de la défaillance (figure 4.13).



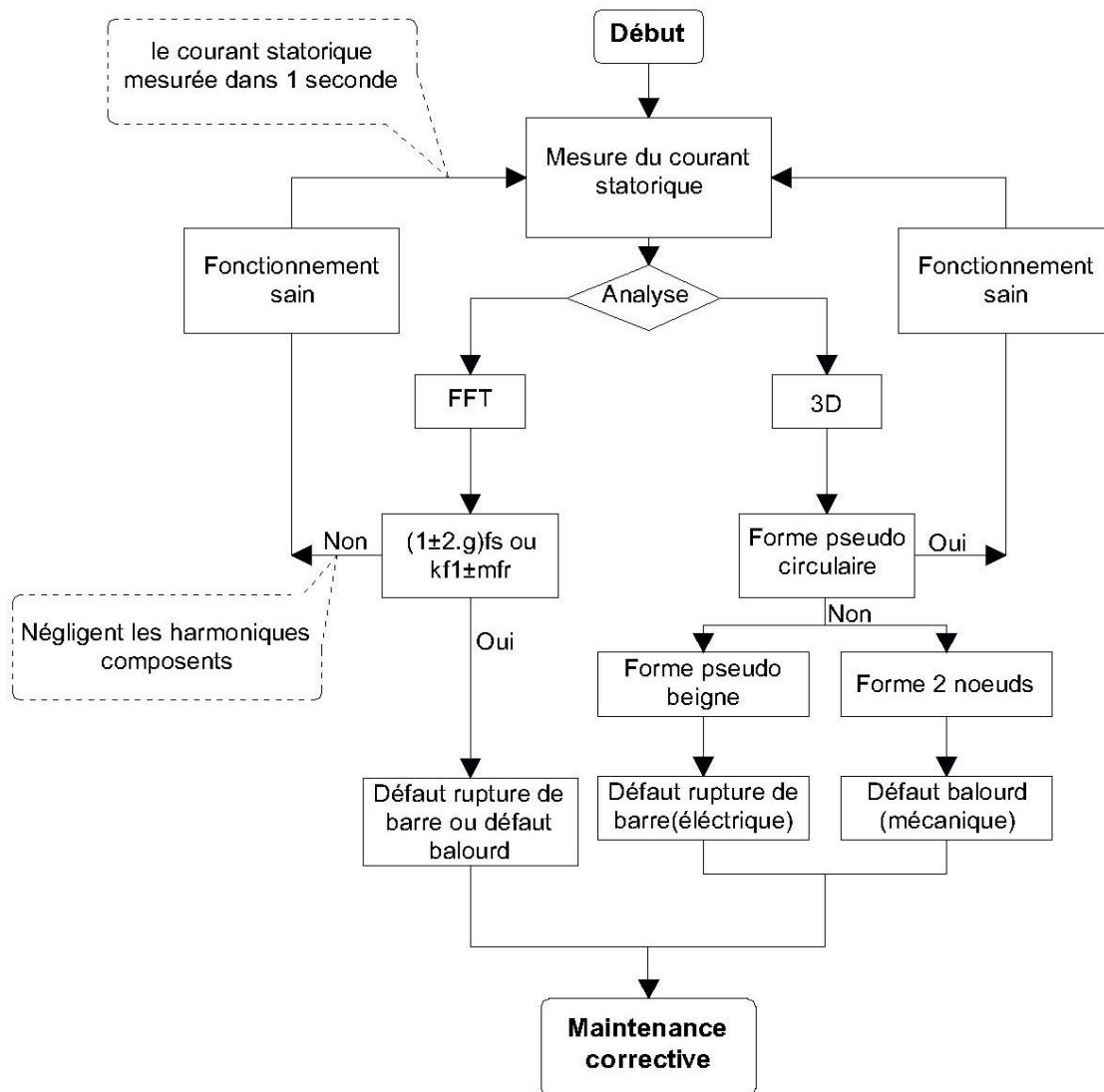
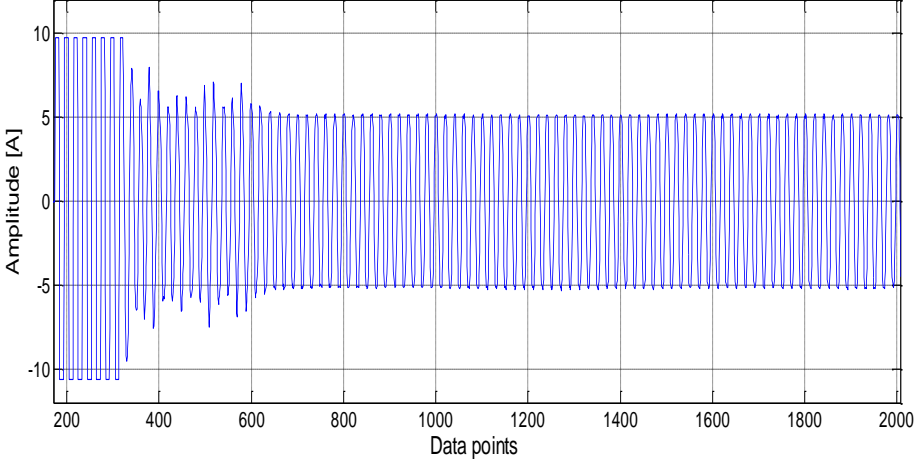


Figure 4.14 : Organigramme

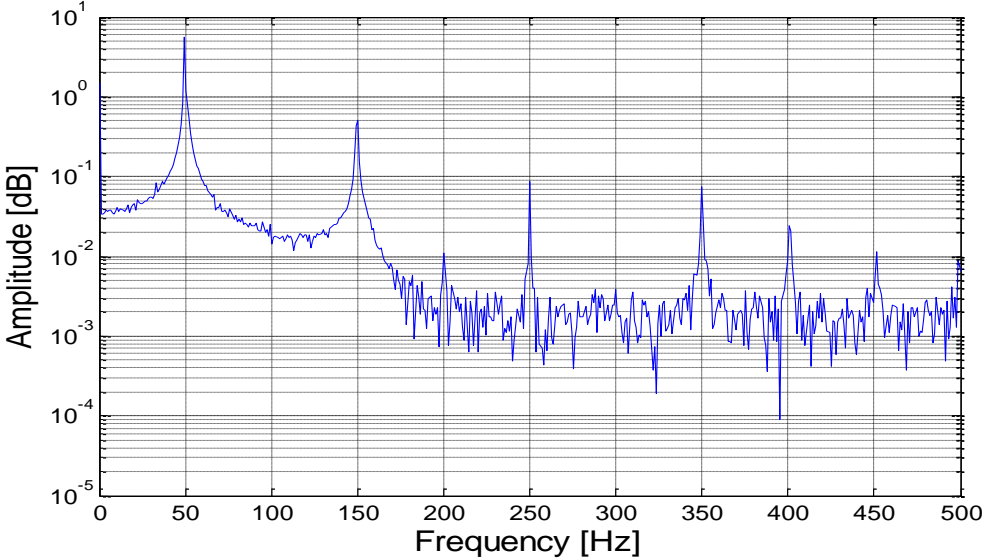
Afin de synthétiser cet organigramme (figure 4.14) nous tenons à résumer notre contribution sur le diagnostic et la détection efficace et simple et à l'extraction de manière précise des informations relatives aux défauts électriques (rupture de barre) et mécanique (balourd) au sein du rotor à cage des moteurs asynchrones en se s'adressant vers le spectre des courants statoriques (FFT) et en suggérant une approche supplémentaire de signatures des défauts sous forme de motifs (3D).

4.5. Résultats Expérimentaux et Interprétations (Deuxième partie)

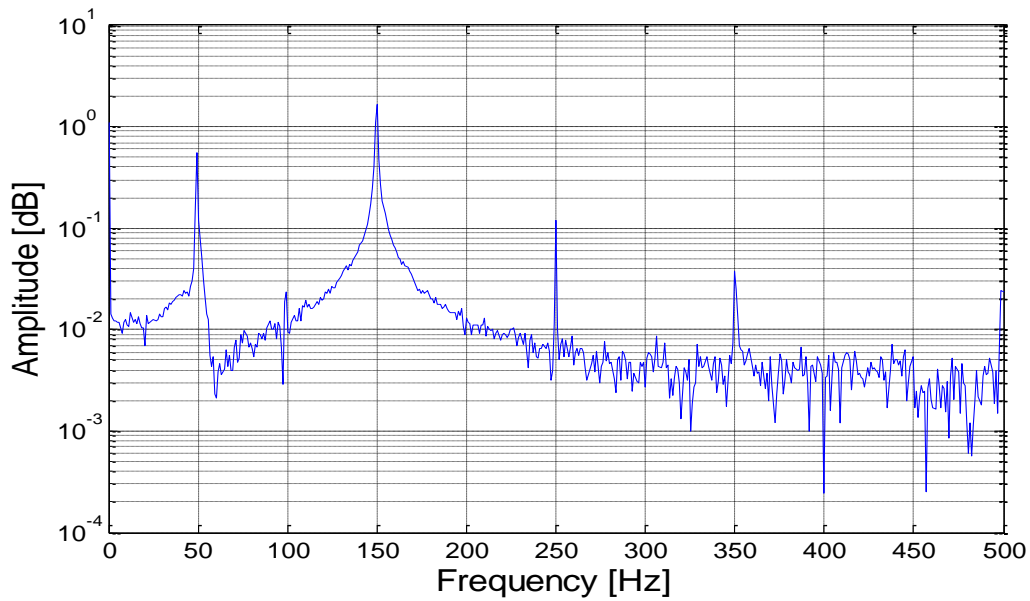
4.5.1. Système Electromécanique non dégradé



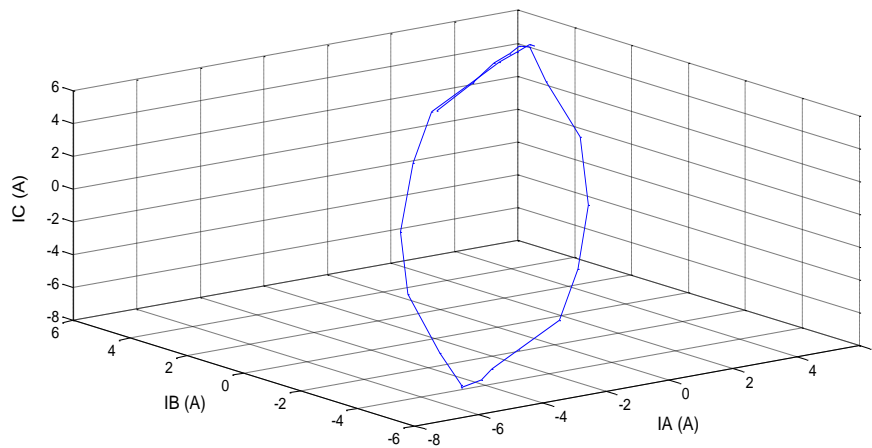
(a)



(b)



(c)



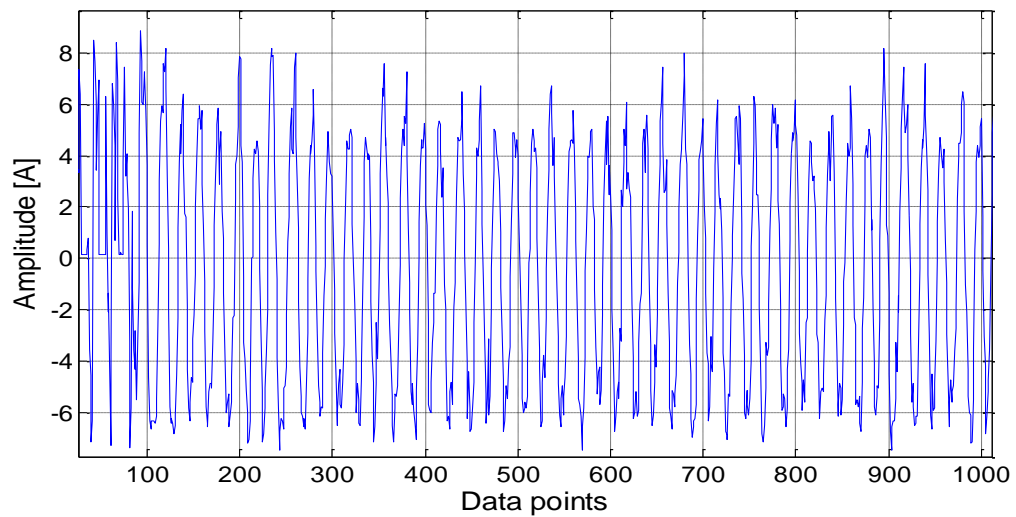
(d)

Figure 4.15 : Caractéristique temporelle du courant (a) ; Spectre du courant phasique (b) ; Spectre du courant Neutre  $I_{\text{neutre}}$  (c) ; Motif en 3D (d)

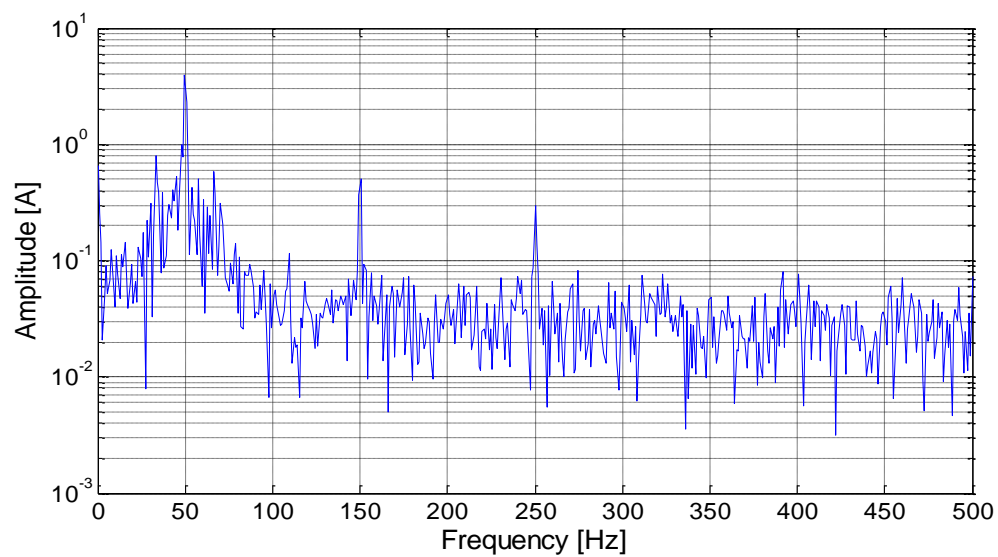
La figure 4.15 a,b. expose les caractéristique temporelle et spectrale du courant phasique et du courant circulant dans le neutre lorsque le système électromécanique est épargné de toute dégradation volontaire. La prépondérance de l'harmonique d'ordre 3 est remarquable s'agissant du neutre. Toutefois, contrairement aux résultats théoriques, des composantes spécifiques dues à des imperfections de fabrication sont remarquées (Figure 4.15.c). Ceci est valable aussi pour la

figure 4.15.d représentant le motif symbolisant le fonctionnement du système sain. Ce dernier apparaît sous la forme d'une orbite ellipsoïdale au lieu d'une circulaire [73].

#### 4.5.2. Système Electromécanique d'entraînement défaillant suite à la fusion balourd et désalignement



(a)

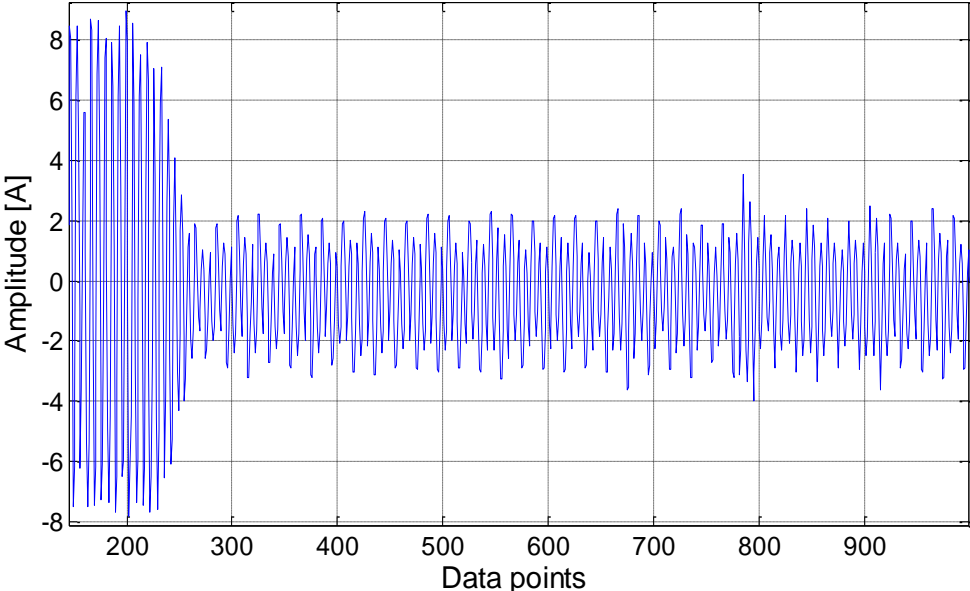


(b)

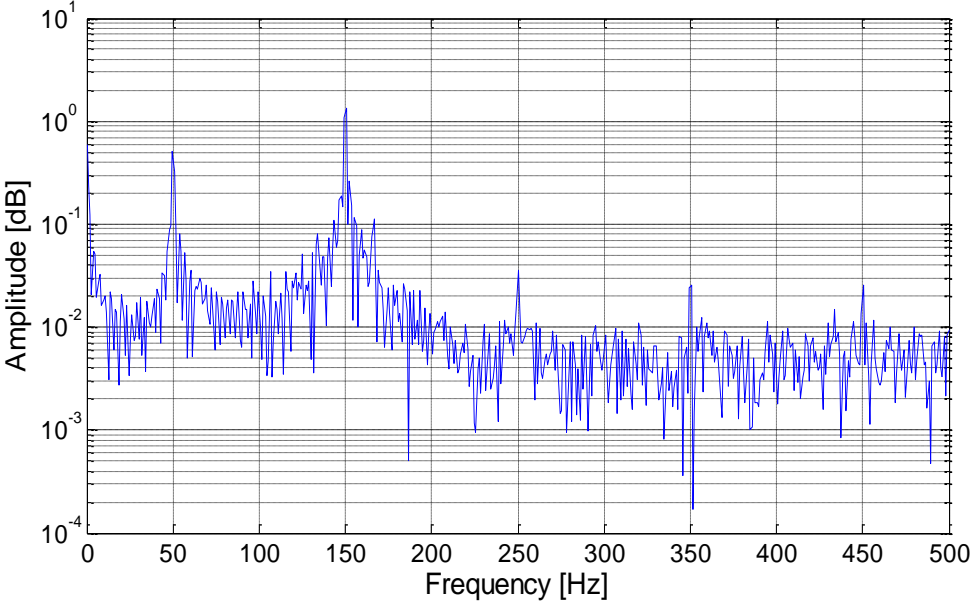
Figure 4.16 Caractéristique temporelle du courant phasique (a) ; Spectre du courant phasique(b) avec défauts balourd et désalignement [73]

**Chapitre 4. Application de L'Approche Courant Dédiee à la Détection et au Diagnostic du Moteur Asynchrone**

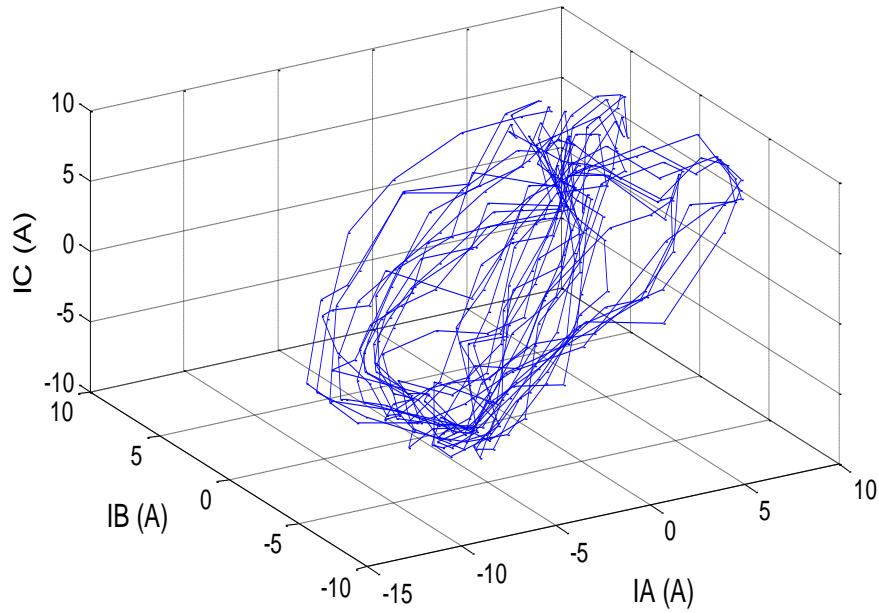
Le courant phasique ainsi que son spectre donnant le moteur à induction avec la présence des deux défauts balourd et désalignement fusionnés sont montrés à la figure 4.16 a,b



(a)



(b)

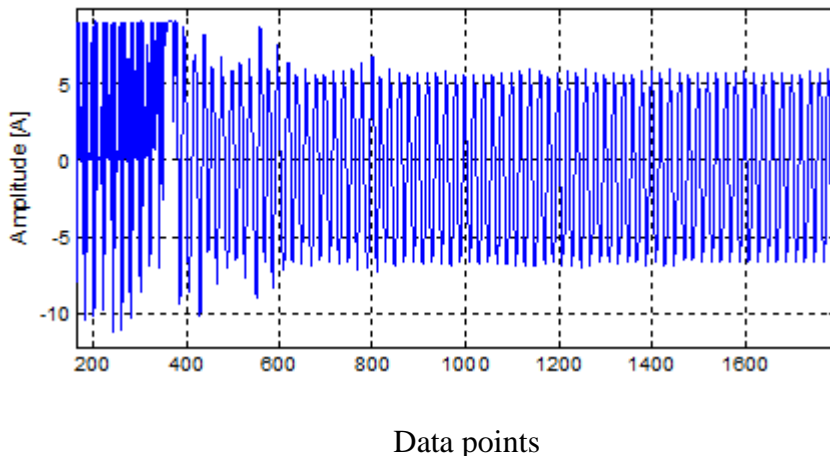


(c)

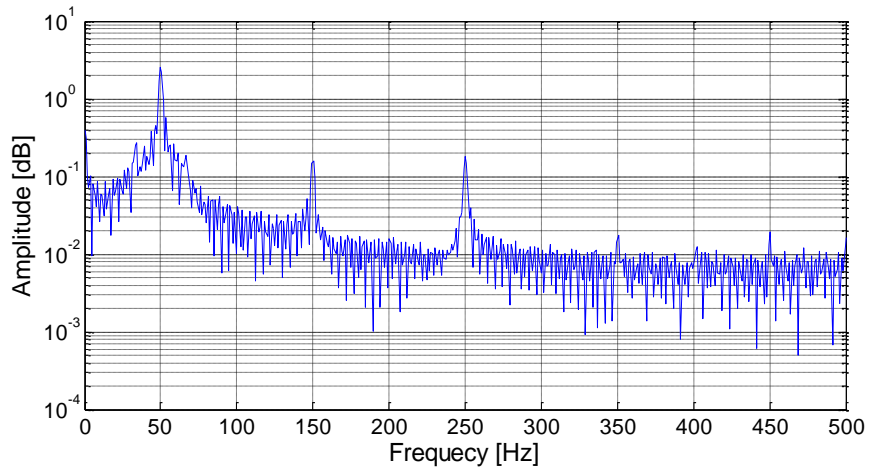
Figure 4.17 Caractéristique temporelle de  $I_{\text{neutre}}$  (a); spectre de  $I_{\text{neutre}}$  (b) ; Motif en 3D (c) avec défauts balourd et désalignement

L'apparition des raies de fréquences  $150 \pm 1f_{r1}$  et  $150 \pm 2f_{r1}$  avec  $f_{r1} = 16\text{Hz}$  (figure.4.17 a,b) signifie la présence simultanée d'un balourd et d'un désalignement. Ce qui est confirmé en figure 4.17c. Cette dernière affiche un motif résultant de la combinaison des orbites marquant les deux défauts simultanément

#### 4.5.3. Système Electromécanique d'entraînement défaillant suite à un balourd et à une dégradation de la denture de la boîte à engrenage



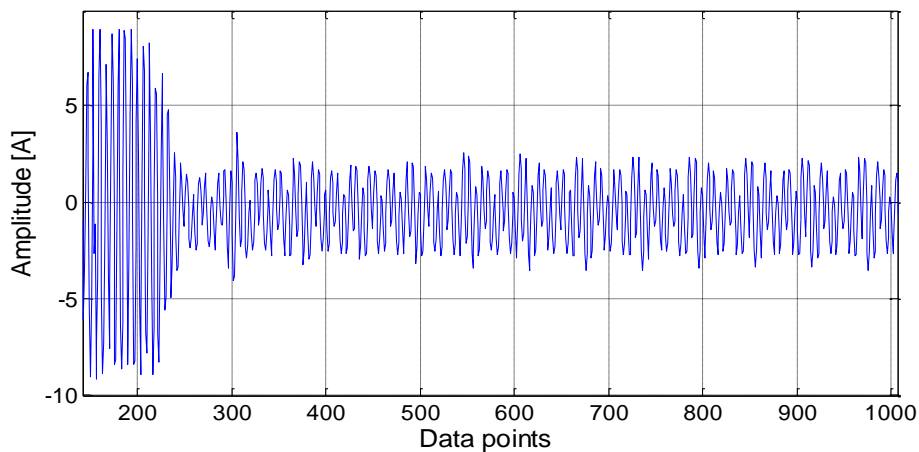
(a)



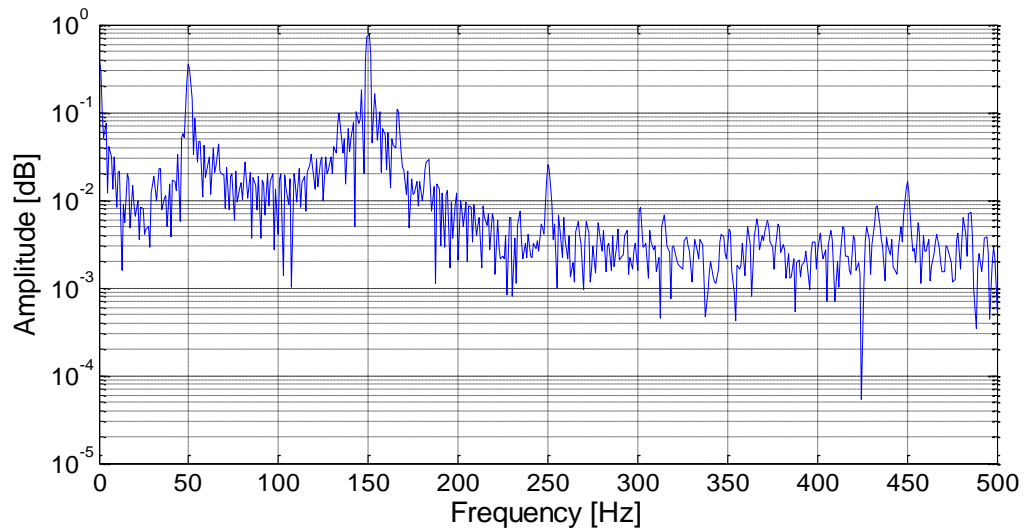
(b)

Figure 4.18 Caractéristique temporelle de  $I_{ph}$ . (a) et son Spectre (b) avec défaut : balourd et à une cassure des dents

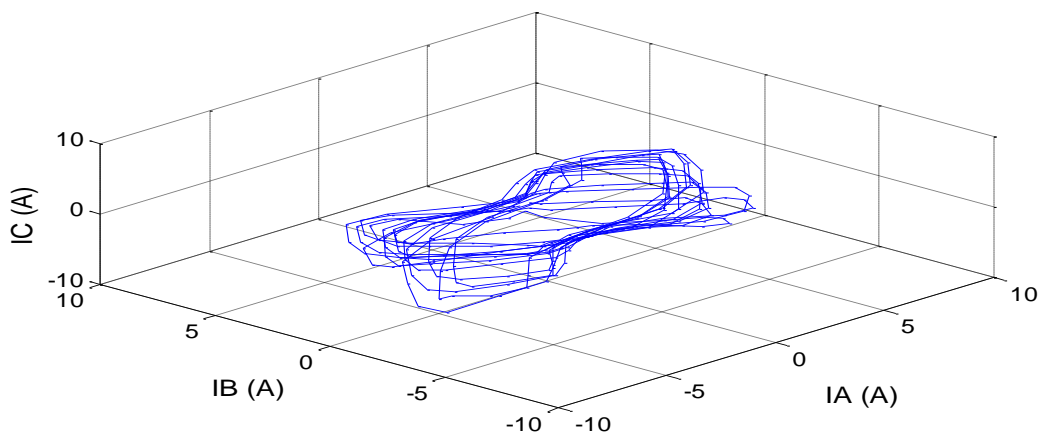
La figure 4.18a présente la caractéristique temporelle du courant de phase. La détérioration de dents adjacents de la roue dentée  $Z_2$  est signifiée par l'émergence des raies (figure.4.18b) aux fréquences  $150 \pm f_{r1}$ ,  $150 \pm f_{r2}$ ,  $150 \pm 2f_{r2}$ ,  $150 \pm 3f_{r2}$ ,  $150 \pm 4f_{r2}$ , et où  $f_{r2} = 5.7\text{Hz}$ . L'agressivité du défaut est donnée par le nombre d'harmoniques de  $f_{r2}$ , l'évolution de leurs amplitudes et l'épaisseur périphérique importante de l'orbite [73]



(a)



(b)



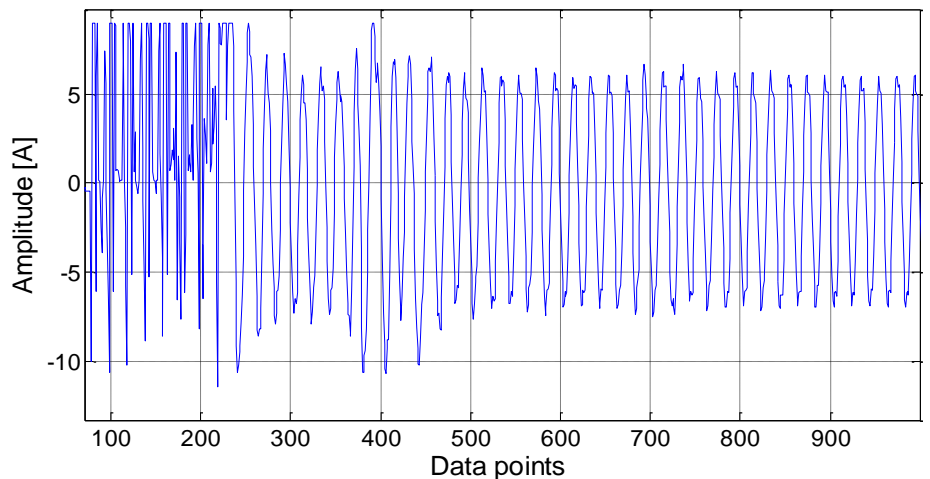
(c)

Figure 4.19 Caractéristique temporelle de  $I_{\text{neutre}}$  a) et Son Spectre (b); c. Motif en 3D en présence de défauts : balourd et à une cassure des dents du réducteur

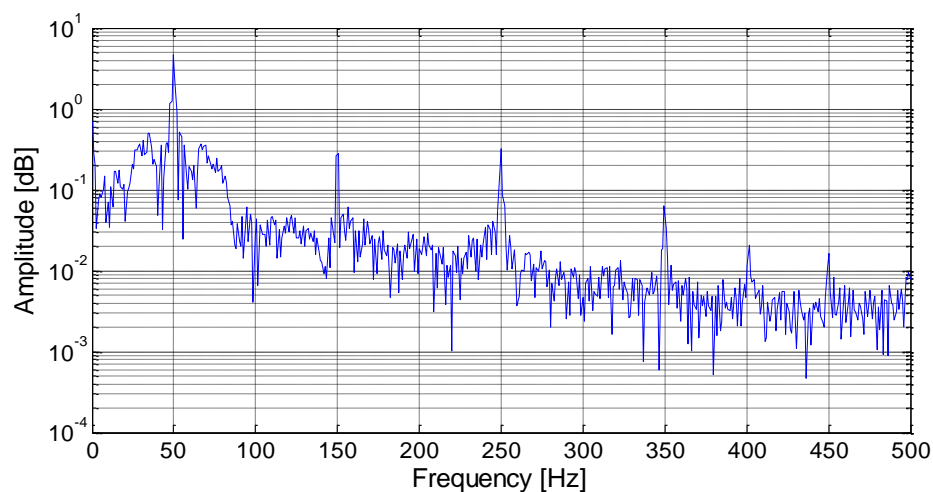
Les figures 4.19a et 4.19 b montrent respectivement la caractéristique temporelle du courant neutre et son spectre, ceci lorsque le balourd est combiné avec l'usure des dents de l'engrenage. Les fréquences marquées aussi bien du balourd que celles représentant la cassure des dents adjacentes apparaissent sur le spectre de la figure 4.19 b avec un accroissement de leurs amplitudes. La représentation orbitale de la fusion des contours respectifs (figure 4.19c) valident bien la présence des deux défauts considérés



#### 4.5.4. Système Electromécanique d'entraînement défaillant suite à un défaut combiné balourd, désalignement et cassure des dents



(a)



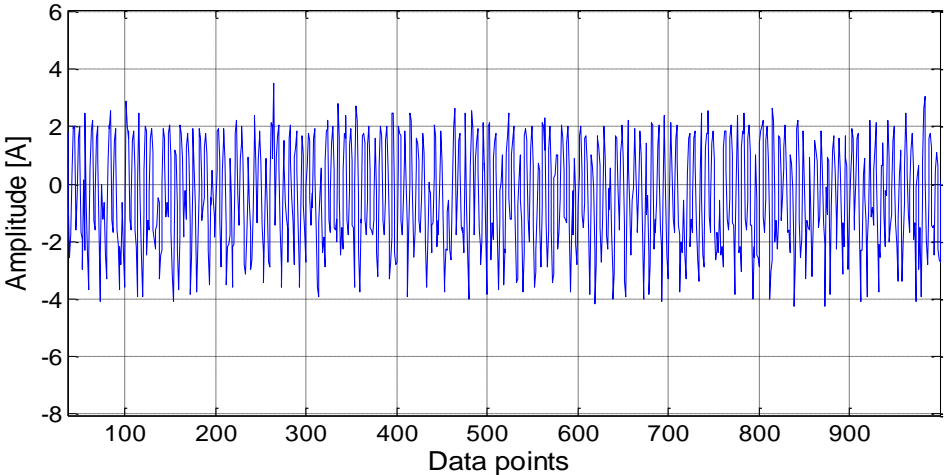
(b)

Figure 4.20 Caractéristique temporelle de  $I_{ph}$ . (a) et son Spectre (b) avec défauts combinés balourd, désalignement et cassure des dents

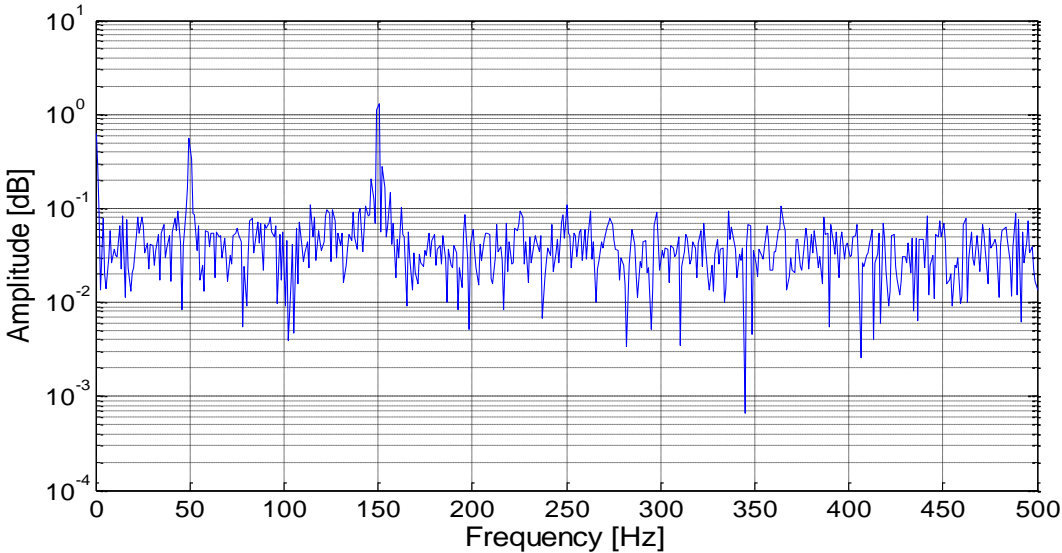
La figure 4.20a montre la caractéristique temporelle quand le système électromécanique fonctionne en présence des trois défauts cités ci-dessus en même temps. Ce défaut probable est illustré par le spectre de la figure 4.20b. L'aggravation de la défaillance mixte est interprétée aussi par l'accroissement remarquable de l'amplitude du courant neutre (figure.4.21.a). La figure.4.21.b expose l'émergence des fréquences des trois défauts réunis où l'on remarque bien un

**Chapitre 4. Application de L'Approche Courant Dédicée à la Détection et au Diagnostic du Moteur Asynchrone**

accroissement de leurs amplitudes. La figure 4.21.c atteste de la fusion du défaut de balourd, du désalignement et de l'usure des dents de l'engrenage  $Z_2$  du réducteur. La superposition des orbites relatives à chaque défaut démontre clairement que les trois anomalies sont présentes sur notre système d'entraînement électromécanique [73]



(a)



(b)

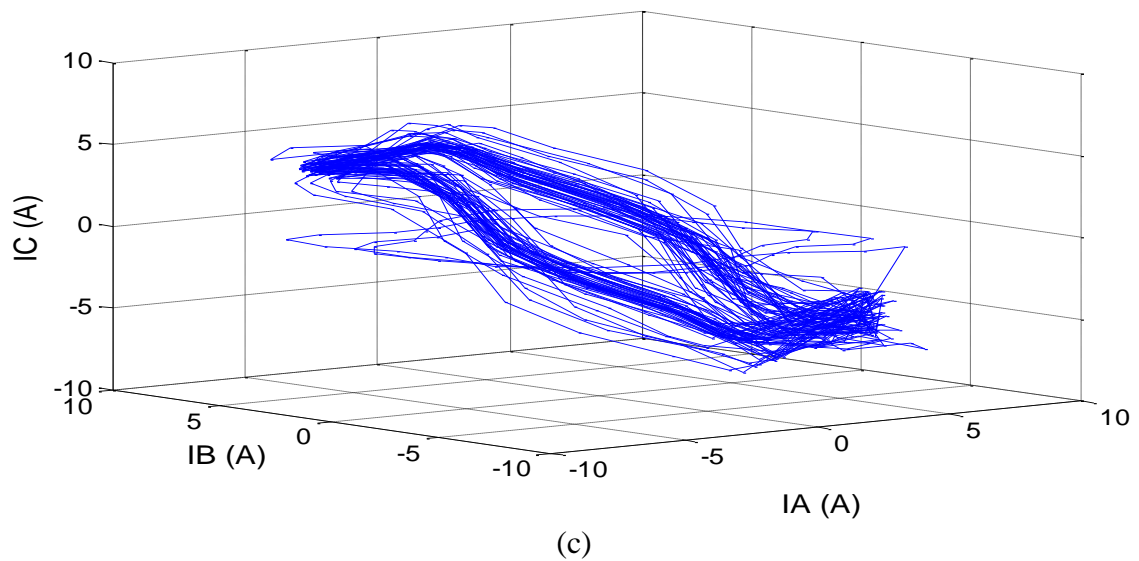


Figure 4.21 Caractéristique temporelle de  $I_{neutre}$  (a) et son Spectre (b); Motif en 3D (c) avec défauts combiné Balourd, désalignement et casseur des dents

Tableau 4.2. Tableau de Signatures des Défauts [73]

Etat du système électromécanique	Fréquences des Composantes
Balourd $3fs \pm f_{r1}$	133.5Hz; 166.5Hz
Balourd + Désalignement $3fs \pm 2 f_{r1}, 3fs \pm f_{r1}$	133.5Hz; 166.5Hz ; 183Hz ; 199.5Hz ; 216Hz
Balourd + Denture $3fs \pm f_{r1}; 3fs \pm nf_{r2}$	133.5Hz; 166.5Hz ; 155.7Hz ; 161.4 Hz; 167 Hz ; 172.8 Hz; 127.2 Hz ; 132.9 Hz ; 138.6 Hz; 144.3Hz.
Balourd + Désalignement+ denture $3fs \pm 2 f_{r1} ; 3fs \pm nf_{r2} ; 3fs \pm f_{r1}$	133.5Hz ; 166.5Hz ; 183Hz ; 199.5Hz ; 216Hz ; 155.7Hz ; 161.4 Hz; 167 Hz ; 172.8 Hz; 127.2 Hz ; 132.9 Hz ; 138.6 Hz; 144.3Hz.

Dans le tableau 4.2 qui suit, nous avons fait apparaître les fréquences relevées sur les spectres respectifs précités qui caractérisent les défauts fusionnés du déséquilibre massique ou balourd, du défaut d'alignement et de la dégradation de dents adjacentes appartenant au même engrenage. Ces défaillances entravent le bon fonctionnement du système électromécanique (moteur-Réducteur).

#### **4.6. Conclusion**

Dans ce chapitre les résultats expérimentaux et leurs interprétations sont indiquées. Ils illustrent la possibilité et la sensibilité de détection de défauts multiples moyennant le captage du courant circulant dans le stator et le courant circulant dans le conducteur neutre du moteur asynchrone à rotor en court circuit servant à l'entraînement du réducteur mécanique de vitesse. Il est conclu que l'analyse de la signature des courants du moteur sous forme fréquentielle et à travers les motifs et apparaît comme une méthode qui peut contribuer à l'amélioration de la fiabilité de la détection et la surveillance des défauts simples et multiples aussi bien électriques que mécaniques pouvant affecter les entraînements électriques à base de moteur à induction. Il faut noter aussi que ces techniques jouent un rôle beaucoup plus complémentaires qu'alternatives. En outre, l'interprétation des motifs et la lecture des signatures ne posent aucune difficulté et elle est à la portée de mainteniciens pas forcément experts dans le diagnostic. Appliquées ensemble, ces approches de traitement du signal peuvent être un moyen très sensible, sélectif et rentable pouvant contribuer à la surveillance des entraînements électromécaniques à base de moteur asynchrone à vitesse constante et à vitesses variables peuvent être injecté dans l'automatisation du diagnostic.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

De nos jours, la surveillance, le diagnostic industriel et la détection rapide et prématurée des dégradations des machines asynchrones sont devenus indispensables et incontournables pour leur sûreté de fonctionnement, d'autant plus que ces dernières, qu'elles soient en régime moteur ou générateur, sont très répandues dans les applications industrielles et en particulier lorsqu'elles sont associées aux convertisseurs de puissance. Ainsi, la maintenance et la surveillance des machines asynchrones deviennent nécessaires afin de rentabiliser les installations industrielles et contribuer à obtenir un meilleur gain de productivité. Pour cela il s'avère important de développer des outils de diagnostic prédictif des défauts de la machine. Pour aborder l'étude, nous avons établi un état de l'art de la machine asynchrone et des défauts pouvant y intervenir dans cette dernière et des techniques classiques et avancées permettant de les identifier.

Dans ce travail, nous avons ciblé deux catégories de défauts de nature différente (électrique et mécanique) que nous avons créées volontairement sur deux actionneurs asynchrones de différentes puissances. Les dégradations ont concerné pour le premier moteur à induction la fusion de défauts électrique et mécanique, à savoir le balourd, la rupture des barres de la cage rotorique et la fissure de l'anneau de court circuitage. Le second moteur accouplé à une boîte à engrenages (réducteur mécanique), a fait l'objet en premier lieu du diagnostic de défaillances mécaniques isolées et leurs fusions telles que le déséquilibre massique « balourd », le désalignement et les dégradations sur la denture des roues dentées. Parmi les défauts simples ou multiples pouvant affecter les entraînements asynchrones à base de moteur à induction, c'est pratiquement à notre sens, cette deuxième catégorie d'anomalies qui est très courante. La description mathématique ou modélisation de ces types de systèmes électromécaniques à l'état dégradé est complexe. Ceci nous a incités à contribuer en vue du diagnostic spécifique de la machine asynchrone par l'application des approches qui consistent à analyser les courants mesurés sur l'actionneur à l'état sain et défaillant en cours de fonctionnement. Ceci a nécessité la réalisation de deux bancs d'essais afin d'y mener notre campagne expérimentale. L'analyse du courant de ligne pour le diagnostic des machines asynchrones peut conduire à une réelle économie sur le coût de la maintenance par l'élimination des capteurs mécaniques coûteux et fragile, l'accessibilité et la minimisation du temps d'intervention sur les installations. Tous ces arguments technico-économiques concourent à expliquer le regain d'intérêt de notre recherche.

Les approches de la transformée de Fourier FFT et la représentation en 3D du courant statorique phasique et du courant circulant dans le conducteur neutre ont été exploitées. Ces techniques sont

simples à mettre en œuvre et leurs résultats sont facilement interprétables. Par conséquent, elles permettent de réaliser un diagnostic approfondi et sont à la portée d'une population de techniciens d'un niveau technique moyen. Un organigramme résumant le diagnostic des défauts de notre étude par une association de méthodes a été réalisé pour éclairer mieux cette méthodologie basée sur l'analyse de signaux réels et leurs traitements. Les résultats obtenus par ces approches complémentaires sont satisfaisants.

Comme perspective, c'est d'essayer de trouver des modèles analytiques pour ces défauts mécaniques simples et multiples (fissures de la cage rotorique, balourd, désalignement, roulement et engrenage) , afin de pouvoir les simuler numériquement et les valider par les résultats expérimentaux obtenus. En outre, cette étude expérimentale peut apporter aussi des éléments de réflexion sur l'automatisation du diagnostic et la détection prédictive des défauts mécaniques multiples des systèmes d'entraînement électromécanique des procédés industriels et ceux utilisés dans la conversion des énergies renouvelables.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] [http://www.memoireonline.com/07/08/1267/m\\_regulation-tension-electrique-installations-industrielles3.html](http://www.memoireonline.com/07/08/1267/m_regulation-tension-electrique-installations-industrielles3.html)
- [2] S. A. S. Al Kazzaz and G. K. Singh, "Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques," *Electric Power Systems Research*, vol. 65, pp. 197-221, 2003.
- [3] Didier G., « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances », Thèse de doctorat, Université Nancy 1, France, 2004.
- [4] ALSTOM Moteurs SA. Autorisation de publication donnée par Mr Lionel Durantay.
- [5] ANDRIAN CEBAN 2012 « METHODE GLOBALE DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ELECTRIQUES » Thèse de doctorat , 2012.
- [6] P. Tavner, L. Ran, J. Penman, and H. Sedding, "Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines", 2 ed. London, United Kingdom: Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [7] IEEE, "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-21, pp. 853-864, 1985.
- [8] D. Thailly, "Etude du champ de dispersion des machines à courant alternatif : Application au diagnostic," Thèse de doctorat, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE), Université d'Artois, Béthune, France, 2007
- [9] Allianz, 1988 "Présentation des avaries. Machines électriques tournantes" Cahier des Préventions.CP2.
- [10] Thorsen O. V. and Dalva M., "A survey of fault on induction motors in offshore oil Industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.31 (5), pp. 1186-1196, September 1995.
- [11] A. H. Bonnett and C. Yung, "Increased Efficiency Versus Increased Reliability," *Industry Applications Magazine*, IEEE, vol. 14, pp. 29-36, 2008.
- [12] Elkasabgy, N.M.; Eastham, A.R., Dawson, G.E. (1992). Detection of Broken Bars in the Cage Rotor on an Induction Machine. *IEEE Trans on Industry Applications*, Vol.28, No.1, (1992), pp. 165 –171, ISSN 0093-9994

- [13] Bellini, A.; Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C., Kliman, G.B. (2001). Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Bars by Means of Electrical Signature Analysis. IEEE Trans on Industry Applications, Vol.37, No.5, (2001), pp. 1248-1255, ISSN 0093-9994
- [14] Said, M.S.N.; Benbouzid, M.E.H., Benchaib,A. (2000). Detection of Broken Bars in Induction Motors Using an Extended Kalman Filter for Rotor Resistance Sensorless Estimation. IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.15, No.1, (March 2000), pp. 66-70, ISSN 0885-8969
- [15] Mohammed, O.A.; Abed, N.Y., Ganu, S. (2006). Modeling and Characterization of Induction Motor Internal Faults Using Finite-Element and Discrete Wavelet Transforms. IEEE Trans. Magnetics, Vol.42, No.10, (October 2006), pp. 3434–3436, ISSN 0018-9464
- [16] Mirafzal, B. & Demerdash, N.A.O. (2004). Induction Machine Broken-bar Fault Diagnosis Using the Rotor Magnetic Field Space-vector Orientation. IEEE Trans. Industry Applications, Vol.40, No.2, (February 2004), pp. 534–542, ISSN 0093-9994
- [17] Xie Ying. (2009). Characteristic Performance Analysis of Squirrel Cage Induction Motor with Broken Bars. IEEE Trans. Magnetics, Vol.45, No.2, (February 2004), Part:1, pp. 759–766, ISSN 0018-9464
- [18] Sprooten, J. & Maun, J.-C.(2009). Influence of Saturation Level on the Effect of Broken Bars in Induction Motors Using Fundamental Electromagnetic Laws and Finite Element Simulations. IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.24, No.3, (September 2009), pp. 557–564, ISSN 0885-8969
- [19] Bentounsi, A. & Nicolas, A. (1988). on Line Diagnosis of Defaults on Squirrel Cage Motor Using FEM. IEEE Trans. Magnetics, Vol.34, No.5, (September 1998),Part:1, pp. 3511–3514, ISSN 0018-9464
- [20] Xie Ying. (2010). Performance Evaluation and Thermal Fields Analysis of Induction Motor with Broken Rotor Bars Located at Different Relative Positions. IEEE Trans. Magnetics, Vol.46, No.5, (May 2010), pp. 1243–1250, ISSN 0018-9464
- [21] Kliman, G.B.; Koegl, R.A., Stein, J., Endicott, R.D., Madden, M.W. (1988). Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors. IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.3, No.4, (December 1988), pp. 873-879, ISSN 0885- 8969
- [22] Costa, F.F.; de Almeida, L.A.L., Naidu, S.R., Braga-Filho, E.R., Alves, R.N.C. (2004). Improving the Signal Data Acquisition in Condition Monitoring of Electrical Machines. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, Vol. 53, (August 2004), pp.1015-1019, ISSN 0018-9456
- [23] Walliser, R.F. & Landy, C.F. (1994). Determination of Interbar Current Effects in the Detection of Broken Rotor Bars in Squirrel Cage Induction Motor. IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.9, No.1, (March 1994), pp. 152-158, ISSN 0885-8969
- [24] Bacha, K.; Gossa, M., Capolino, G.-A. (2004). Diagnosis of Induction Motor Rotor Broken Bars. 2004 IEEE International Conference on Industrial Technology, pp.979-984, ISBN 0-7803-8662-0, Hammamet, Tunisia, December 8-10,200



- [25] W.Thomson. & M.Fenger. (2001). Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults. IEEE Industry Applications Magazine, Vol.7, No.4, (July/August 2001), pp. 26-34, ISSN 0093-9994
- [26] Mueller, M.A.; Williamson, S., Flack, T.J., Atallah, K., Baholo, B., Howe, D., Mellor, P.H. (1995).Calculation of Iron Losses from Time-stepped Finite-element Model of Cage Induction Machines. IEEE Conference Publication, No.412, (September 1995), pp. 88-92, ISSN 0537-9989
- [27] Boglietti, A.; Cavagnino, A., Staton, D.A. (2005). TEFC Induction Motors Thermal Models: A Parameter Sensitivity Analysis. IEEE Trans on Industry Applications, Vol.41, No.3, (May/June 2005), pp. 756-763, ISSN 0093-9994
- [28] Staton, D.; Boglietti, A., Cavagnino, A. (2005). Solving the More Difficult Aspects of Electric Motor Thermal Analysis in Small and Medium Size Industrial Induction Motors. IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.20, No.3, (September 2005), pp.620-628, ISSN 0885-8969
- [29] Alberti, L. & Bianchi, N. (2008). a Coupled Thermal-Electromagnetic Analysisfor a Rapid and Accurate Prediction of IM Performance. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 10, (October 2008), pp. 3575–3582, ISSN 0278-0046
- [30] R. Casimir, E. Bouteleux, H. Yahoui, G. Clerc, H. Henao, C. Delmotte, G. A. Capolino, G. Rostaing, J. P. Rognon, E. Foulon, L. Loron, H. Razik, G. Didier, G. Houdouin, G. Barakat, B. Dakyo, S. Bachir, S. Tnani, G.Champenois, J. C. Trigeassou, V. Devanneaux, B. Dagues, and J. Faucher, "Comparison of modelling methods and of diagnostic of asynchronousmotor in case of defects," in 9th IEEE International Power Electronics Congress CIEP 2004, 2004, pp. 101-108.
- [31] Cho, K.R.; Lang, J.H., Umans, S.D. (1992). Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using State and Parameter Estimation. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28,No.3, (May/Jun 1992), pp. 702-709, ISSN 0093-9994
- [32] Lopez-Fdez, X.M.; Donsion, M.P., Cabanas, M.F., Melero, M.G., Rojas, C.H. (1999). Thermal performance of a 3-phase induction motor with a broken bar, SDEMPED'99 Record, pp. 529-533, ISBN 978-0-7803-9124-6, Gijón, Spain, September 1999
- [33] Antal, M. & Zawilak, J. (2005). Coupling Magneto-thermal Field of Induction Motor with Broken Rotor Bars. Maszyny Elektryczne, Vol.72, (2005), pp. 267-272, ISBN 83-204-0335-9
- [34] Roland casimir ,92 « diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes »
- [35] Razik H., « Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone », Groupe de Recherches en Electrotechnique et Electronique, Université de Henri Poincaré Nancy, France, 2003.

- [36] Tarek BOUMEGOURA . « Recherche de Signatures Electromagnétiques des défauts dans une machine asynchrone et Synthèse d'observateurs en vue du diagnostic » Thèse de Doctorat ; E.C.L. 2001-08.
- [37] Babak Vaseghi « Contribution a l'étude des machines électrique en présences de défaut entre spires Modélisation –Réduction du courant de défaut », Thèse de doctorat l'institut national polytechnique de Lorraine, Université de Nancy, 2009.
- [38]Hamid A, Toliyat, Mohammed S, Arefeen, et Alenxender G,Parlos «A method for dynamic Simulation of Air-Gap Eccentricity in Induction Machines », IEEE Transaction on Industry Applications,32(4) ;910-917, July –August1996.
- [39] BELHAMDI Saad « Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande » Thèse doctora Faculté des Sciences et de la technologie Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [40] Ayman Hussain « Contribution a la commande adaptative robuste par modes glissants » thèse doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, 2009[41]Abed. A « Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy, 2002.
- [42] Bui Viet Phuong « Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite application a l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur a vide », Thèse de doctorat, l'institut National polytechnique, Université de Gre.
- [43] Smail Bachir, Jean Claude Trigeassau,Slim Tnani « Diagnostic des défauts statorique et rotoriques par identification paramétrique sans capteur de vitesse » , Conférence internationale francophone d'automatique Nantes8-10 juil 2002.
- [44] Saliou Diouf « Contribution au diagnostic industriel de défauts de roulement et de Balourd par techniques Neuronales Application a la machine asynchrone », thèse de doctorat, Université Paris XII Val De MARNE –CRETEIL ,2007.
- [45]Camille Diou « Contribution à l'intégration sur silicium de la transformée en ondelettes Application au traitement d'images », thèse de doctorat université de Montpellier II, 2000.
- [46] V. Fernao Pires a,c,\*, J.F. Martins b, A.J. Pires a,b “Eigenvector/eigenvalue analysis of a 3D current referential fault detection and diagnosis of an induction motor” Energy Conversion and Management 51 (2010) 901–907.
- [47] Pierre Granjon, Michelle Vieira, Sophie Sieg-Zieba . ‘Surveillance du désalignement d'un moteur asynchrone par analyse du vecteur d'espace courant ‘ . *Workshop du GIS "Surveillance, Sureté, Sécurité des Grands Systèmes"*, Jun 2009, Nancy, France. 7 p., 2009.
- [48 ] Jafar Zarei, Javed Poshtan,“An Advanced Park's Vectors Approach for Bearing Fault Detection,” Proc.of IEEE Conference on Industrial Technology, pp.1472-1479, December, 2006.

- [49] M. Riera-Guasp, M. Pineda-Sanchez, J. Perez-Cruz, R. Puche-Panadero, J. Roger-Folch, and Jose A. Antonino-Daviu, "Diagnosis of Induction Motor Faults via Gabor Analysis of the Current in Transient Regime, IEEE Transaction on Instrumentation and measurement, vol. 61, n<sup>o</sup>. 6, June 2012.
- [50] Intesar Ahmed , Manzar Ahmed , Kashif Imran, M. Shuja Khan, S. Junaid Akhtar," Detection of eccentricity Faults in Machine using Frequency Spectrum Technique,". International Journal of Computer and Electrical Engineering, vol.3,no.1 , February, 2011 pp.111-119.
- [51] 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.
- [52] CARON J.P.et HAUTIER J.P. « Modélisation et commande de la machine asynchrone » Paris : Edition Technip ,1995.
- [53]CHATELAIN J « Machines Electrique », Traité d'électricité volume XPresses Polytechnique Romande, Lausanne ,Edition Georgi, 1983.
- [54] PARK R.H., « Two-Reaction Theory of Synchronous machines-generalized Method of analysis » AIEE Transaction, Vol. 48, 1929.
- [55] M.E.H. Benbouzid et al., "Induction motor faults detection using advanced spectral analysis technique," Proceedings of the 1998 International Conference on Electrical Machines,Istanbul(Turkey).
- [56] S.H. Kia, H. Henao, G.-A. Capolino, "A comparative study of acoustic, vibration and stator current signatures for gear tooth fault diagnosis," in *Proc. of ICEM'2012*, Marseille (France), 2-5 Sept. 2012, pp. 1512-1517.
- [57] Mariana IORGULESCU, Robert BELOIU,. "Faults diagnosis for electrical machines based on analysis of motor current" Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2014 International Conference on 22-24 May 2014.
- [58] M. Blodt, P. Granjon and B. Raison, J. Regnier" Mechanical fault detection Induction motor drives through stator current monitoring- Theory and Application example" Hal-00485734, version 1-21 May 2010.
- [59]Jee-Hoon Jung . Erosion Models of Rotor Bar and End Ring Faults in Progress to Diagnose Induction Motor Status, Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on Page(s): 110 .
- [60] S. H. Kia, H. Henao, G . A. Capolino. Diagnosis of broken bar fault in induction machines using discrete wavelet transform without slip estimation, IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(4): 1395-1404.

- [61] L. Saidi a,b,n, F.Fnaiech , H.Henao , G-A.Capolino , G.Cirrincione ., “Diagnosis of broken-bars fault in induction machines using higher order spectral analysis” ISA Transactions 52 (2013) 140–148.
- [62] M. E. K. Oumaamar, H. Razik, A. Rezzoug, H. Chemali, A. Khezzar “Experimental Investigation of New Indices of Broken Rotor Bar in Induction Motor” acemp, Electromotion 2011, pp. 305-308, 8-10 Sept 2011, Istanbul (Turkey).
- [63] M. Blodt, J. Faucher, B. Dagues , M. Chabert, Mechanical load fault detection in induction motors by stator current time-frequency analysis, IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Mai 2005, pp.1881-1888.
- [64] Thomson, W.T. On-Line Motor Current Signature Analysis Prevents Premature Failure of large Induction Motor Drives. Maintenance & Asset Management, vol. 24, no 3, pp. 30-35 (2009).
- [65] Krishna, Merugu Siva Rama ; Kishan, Srikonda Hari Neural network for the diagnosis of rotor broken faults of induction motors using MCSA , Intelligent Systems and Control (ISCO), 2013 7th International Conference on 2013, Page(s): 133 – 137.
- [66] Ali Ibrahim « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée ». Thèse de Doctorat, 10 Mars 2009. ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES, INGÉNIERIE, SANTÉ Université Jean Monnet.
- [67] M. Misiti., Y. Misiti., G. Oppenheim. J. M. Poggi. Wavelet Toolbox for Use with Matlab 2010.
- [68] K. S. Gaeid and H. W. Ping, “Wavelet fault diagnosis and tolerant of induction motor: A review,” Int. J. Phys. Sci., vol. 6, no. 3, pp. 358–376, 2011.
- [69] J. Cusido, L. Romeral, J.A. Ortega, J.A. Rosero, and A.G. Espinosa, “Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition,” IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 55, n°2, pp. 633-643, February 2008.
- [70] Myeongsu Kang and Jong-Myon Kim. “Reliable Fault Diagnosis of Multiple Induction Motor Defects Using a 2-D Representation of Shannon Wavelets. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 50, NO. 10, OCTOBER 2014.

[71]Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone.

[http://www.clubeea.org/documents/mediatheque/Cours\\_modele\\_cmde\\_MAS.pdf](http://www.clubeea.org/documents/mediatheque/Cours_modele_cmde_MAS.pdf)

[72] Abdelkarim bourase « Détection Prédictive des Anomalies des Moteurs de Moyenne Tension lors des Défauts Combinés » thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba 2015

[73] Samir kerfali, Slimane bouras, and Abdelkarim bourase“Diagnosis of Fusion Defects an Electromechanical Training System (SEEM) through analysis of current: Experimental Approaches“International Journal of Automation and Control (IJAAC), 2016 *INDERSCIENCE PUBLISCHER*.

## Contributions scientifiques

### Publications Internationales:

- 1- Samir kerfali, Slimane bouras, Abdelkarim bourase“Diagnosis of Fusion Defects an Electromechanical Training System (SEEM) through analysis of current: Experimental Approaches“International Journal of Automation and Control (IJAAC), 2016.Vol .10 N.2 2016 *INDERSCIENCE PUBLISCHER*.
- 2- Samir Kerfali, Slimane Bouras, Abdelkarim Bouras “Experimental investigation on different faults diagnosis by combining two stator current approaches” Technics Technologies Education Management (TTEM) Vol.10 N.3:P313-318, 2015.
- 3- A.K. Bouras, S. Bouras, A.E. Hadjadj, N. Benamira, S Kerfali .’MCSA to Detect Mechanical Faults of the High Power Set “International journal on Energy Conversion *I.R.E.CON, 2013*. Vol. 1 N. 5: p232-237
- 4- A.K. Bouras, S. Bouras, A.E. Hadjadj, N. Benamira, S Kerfali .’ Investigation on The Diagnosis of Simple and Combines Mecanical faults in Asynchronous Motor Based Electric drives. “*AJAS 2014*, American Journal of Applied Sciences Vol.11. issue 6: p994-1004.
- 5- A.K. Bouras,S. Bouras, A.E. Hadjadj, S Kerfali. ,‘Gearbox degradation diagnosis using supplementary approaches based on the stator current analysis: experimental research’’ *Int. J. Industrial and Systems Engineering,(IJISE)*, 2016 Vol.22, No.2, pp.191 - 206

### Communications :

- 1- Samir Kerfali, Sliman Bouras, Nadir Benamira, Abde elkarim Bouras « Validation Expérimentale de la Détection des Défauts de Barres rotoriques d’un Moteur Asynchrone par Différents Modes d’Analyse du Courant » Séminaire national sur électromécanique Annaba14-15 MAI 2014
- 2- Soumaya Bennedjai, Sliman Bouras, Samir Kerfali « Diagnostic des défauts d’un moteur à induction par la méthde de Prony » Séminaire national sur électromécanique Annaba14-15 MAI 2014.

## ANNEXES

**Caractéristiques du moteur asynchrone à rotor en court circuit (Premier Banc d'Essai)**

Caractéristique	Moteur asynchrone
Puissance	270 w
Fréquence d'alimentation	50 HZ
Couplage du moteur	Y
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

**Caractéristiques du moteur asynchrone (Deuxième banc d'Essai)**

Caractéristique	Moteur asynchrone
Puissance	3 kw
Fréquence d'alimentation	50 HZ
Couplage du moteur	Y
Tension	220/380V
Courant	12.5 / 7.2A
Nombre de paires de pôles	3
Vitesse nominale	960 trs/min