



HAL
open science

Détection Prédicative des Anomalies des Moteurs de Moyenne Tension lors des Défauts Combinés

Abdelkarim Bouras

► **To cite this version:**

Abdelkarim Bouras. Détection Prédicative des Anomalies des Moteurs de Moyenne Tension lors des Défauts Combinés. Sciences de l'ingénieur [physics]. université Badji Mokhtar Annaba, 2015. Français. NNT: . tel-04798579

HAL Id: tel-04798579

<https://hal.science/tel-04798579v1>

Submitted on 22 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

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 : 2014/2015

**Faculté des Sciences de l'Ingénierat
Département d'Electromécanique**

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat

Intitulée
**Détection Prédictive des Anomalies des Moteurs de
Moyenne Tension lors des Défaits Combinés**

Option : Electromécanique

Par : BOURAS Abdelkarim

DIRECTEUR DE THESE : HADJADJ Aoul

Pr. Univ. Annaba

CO- DIRECTEUR DE THESE : BOURAS Slimane

MC(A). Univ. Annaba

Devant le Jury

PRESIDENT :

HEROUS Lazhar

Pr. Univ. Annaba

EXAMINATEURS :

BENSLIMANE Tarek

MC (A). Univ. Msila

MOUSSAOUI Abdelkrim

Pr. Univ. Guelma

BOULOUH Messaoud

MC (A). Univ. Guelma

Je dédie ce travail

A mes parents pour leur infini dévouement

A mes amis pour leur fidélité sans failles

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Laboratoire du Département d'Electromécanique ;

Je tiens en premier lieu à remercier Monsieur HADJADJ Aoul Elias, Professeur au 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.

Je tiens aussi à remercier vivement Monsieur BOURAS Slimane pour tout le temps qu'il m'a consacré et pour la patience dont il a fait preuve à mon égard.

Je tiens également à remercier Monsieur HEROUS Lazhar, Professeur au département d'électromécanique, pour l'intérêt qu'il accordé à mon travail en acceptant d'être Président du Jury.

J'adresse mes expressions de reconnaissance et mes remerciements aux Professeurs BENSLIMANE Tarek de l'Université de M'Sila, MOUSSAOUI Abdelkrim et BOULOUH Messaoud de l'Université de Guelma pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail de recherche et d'être membres 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.

RESUME

La maintenance prédictive est un des éléments du développement durable qui est mis en place dans le monde entier. Ce travail de thèse s'intéresse au diagnostic et à la détection prédictive des anomalies simples et combinés affectant les entraînements électriques à base de moteur à induction et particulièrement ceux de moyennes et grandes puissances. Le choix porté sur ce genre de machines est justifié par le simple fait qu'ils sont en général derrière la majorité des gros systèmes industriels (laminage, broyage, forage, soufflante, pompage, etc....) et leurs pannes ont des conséquences financières faramineuses. Par conséquent, leur maintenance se doit d'être prédictive afin d'optimiser les coûts d'immobilisation et de changement de pièces. Les défaillances multiples électriques et particulièrement mécaniques sont susceptibles de se produire aussi bien à l'intérieur de l'unité motrice qu'à son extérieur (accouplement, réducteur). Les méthodes traditionnelles (acoustique, chimique, thermique et vibratoire) à elles seules ont montré leurs limites devant cette variété de dysfonctionnements. A cette fin, une association de méthodes de diagnostic est proposée pour détecter et localiser les défauts uniques et combinés affectant l'entraînement électromécanique et parvenir à donner une lecture correcte de ceux ayant parfois les mêmes signatures. Elle est validée par des expérimentations où des défauts combinés ont été volontairement créés à savoir le déséquilibre massique(ou balourd), le désalignement(ou désaxement), la dégradation des roulements à billes et l'usure des dents du réducteur. Dans le même sillage, des signatures vibratoires et du courant statorique (Motor Current Signature Analysis or MCSA) ont été élaborés pour la détection des défauts. Les deux approches sont supplées par une analyse spectrale du courant neutre et des signatures visuelles découlant de l'interprétation en 3D du carré des intensités des courants phasiques dédiées à la séparation et à la reconnaissance des différentes anomalies. A travers les résultats satisfaisants obtenus sur bancs d'essais montés au laboratoire du département d'Electromécanique, il est conclu que l'application de ces méthodes complémentaires apparaît comme une technique fiable pour la détection et le diagnostic corrects des anomalies précitées simples et multiples.

Mots-clés: Moteur à induction, défauts multiples, balourd, désalignement, dégradation des roulements, défaut d'engrenage, analyse vibratoire, MCSA, théorie du neutre, reconnaissance de formes en 3D.

الملخص:

إنّ الصيانة التنبؤية هي إحدى عناصر التنمية المستدامة التي تم الشروع في تطبيقها في العالم أجمع. يتناول هذا البحث بالدراسة التشخيص و الاكتشاف المسبق للعيوب البسيطة و المركبة التي تظهر في المحركات الكهربائية غير المتزامنة المتوسطة منها و عالية القوّة. إنّ اختيار هذه المحركات بالضبط يرجع إلى كونها تُستعمل في مختلف الأنظمة الصناعية مثل الدرفلة والطحن والحفر والضخ... إلخ) كما أنّ إصابتها بالعطب قد يتسبب في خسائر مالية كبيرة، و لهذا فإنّ عملية التنبؤ في صيانة هذه المحركات مهمة جدا من أجل ترشيد النفقات و عند تغيير قطع الغيار. إنّ الأعطاب الكهربائية و الميكانيكية ممكنة الحدوث في داخل وحدة المحرك و خارجها (الربط، خفض السرعة الميكانيكي) إذ بيّنت الطرق التقليدية (السّمعية و الحرارية و الكيميائية و الاهتزازية) محدوديتها في مواجهة مختلف الاختلالات التي تحصل. و من أجل هذه الغاية، تم اقتراح طرق التشخيص لاكتشاف و تحديد مكان الخلل سواء كان بسيطا أو مركبا و التي من شأنها أن تصيب المحركات الإلكتروميكانيكية و من أجل الحصول على قراءة صحيحة للاختلالات التي لها نفس البصمة. تم التّحقّق من هذا الأمر من خلال التجارب حيث تم خلق خلل عن قصد خاصة ما تعلق باختلال توازن الكتلة و المحاذاة غير الصحيحة و تدهور في محامل الكريات (و تآكل في أسنان مخفض السرعة). تم تطوير البصمات الاهتزازية و بصمات كهرباء الجزء الثابت (تحليل كهرباء الجزء الثابت) من أجل التنبؤ و اكتشاف الاختلالات، و تم تدعيم كلتا الطريقتين بتحليل طيفي للكهرباء المحايدة و البصمات البصرية التي ظهرت نتيجة للتفسير الثلاثي الأبعاد لمربع شدّة التيارات الطورية المخصّصة لمعرفة و التفريق بين مختلف الاختلالات و العيوب. انطلاقا من النتائج المرضية التي حصلنا عليها من خلال طاولة الاختبار التي تم وضعها في قسم الإلكتروميكانيك، يمكن الاستنتاج أنّه يمكن الاعتماد على تطبيق هذه الطرق المكتملة في الكشف المبكر و التشخيص الدقيق للاختلالات و العيوب السابق ذكرها سواء كانت بسيطة أو مركبة.

الكلمات الرئيسية: المحرك غير المتزامن، العيوب المركبة، اختلال التوازن، المحاذاة غير الصحيحة، تدهور محامل الكريات، الخلل في المسننات، التحليل الاهتزازي، تحليل كهرباء الجزء الثابت، نظرية الحياد، التعرف على الأنماط ثلاثية الأبعاد.

ABSTRACT

Predictive maintenance is part of sustainable development implemented worldwide. This thesis focuses on the diagnostic and predictive detection of single and combined anomalies that appear on the electrical drives of induction motor particularly of medium and high voltage. The choice of such machines is justified by the simple fact that they are used in the majority of large industrial systems (rolling, milling, drilling, pumping... etc.) and their failures have enormous financial consequences. Therefore, maintenance of such motors must be predictive for costs optimization and spare parts replacement. Multiple electrical and mechanical failures are likely to occur inside the drive unit and outside it. The traditional methods (acoustic, thermal, chemical and vibratory) have shown their limits to the variety of dysfunctions. To this end, a combination of diagnostic methods is proposed for the detection and localization of single and combined faults affecting the electromechanical drive and come to a correct reading of those having the same signatures. It is validated by experiments where combined defects have been intentionally created mainly the mass unbalance, the misalignment and the degradation of ball bearings (coupling, mechanical reducer). In the same context, vibratory and stator current signatures (Motor Current Signature Analysis (MCSA)) were developed for the detection of defects. Both approaches are supplemented by a spectral analysis of neutral current and visual signatures arising from the 3D interpretation of the square intensities of phasic currents dedicated to the separation and recognition of different anomalies. Through satisfactory results obtained via the test bench set up in the laboratory of Electromechanical Department, it is concluded that the application of these complementary methods appears to be a reliable technique for the detection and accurate diagnosis of the aforementioned single and multiple anomalies.

Key words: Induction motor, combined defects, imbalance, misalignment, bearing degradation, damage in the reducer's teeth, vibratory analysis, MCSA, neutral theory, 3D patterns recognition.

Sommaire

Introduction generale.....	1
formulation du probleme.....	3
objectifs et contributions souhaitees.....	4
originalite du travail.....	5
organisation du memoire	6
chapitre 1 : etude preliminaire sur le moteur asynchrone et les organes de liaison et de transfert de puissance	7
1.1. Introduction	7
1.2. Constitution de la machine asynchrone	7
1.3. Les différents types du moteur asynchrone :.....	9
1.4. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.....	11
1.4.1. Glissement :	11
1.4.2. Fréquence de synchronisme d'une mas :	11
1.4.3. Bilan de puissance :	12
1.5. Les organes de liaisons et de transfert de puissance dans les entraînements électromécaniques [17].....	15
1.5.1. Les accouplements :	15
1.5.2. Les éléments de transmission souple :	17
1.5.3. Les engrenages :	18
1.5.4. Généralités sur les roulements à billes :	19
1.6. Conclusion :	21
chapitre 2 etude bibliographique des anomalies et des methodes de diagnostic des entrainements electromecaniques a base de moteurs a induction	22
2.1. Introduction	22
2.2. Les types de défauts du moteur asynchrone et des organes tournants	22
2.2.1. Défaillances de la machine asynchrone	22
2.2.1.1. Défauts statoriques	23

2.2.1.2. Défauts rotoriques	25
2.2.1.3. Défaut d'excentricités.	25
2.3. Les défauts mécaniques des principaux organes de liaison dans les entraînements électromécaniques	27
2.3.1. Le déséquilibre massique ou « balourd »	27
2.3.2. Désalignement.	28
□ <i>désalignement angulaire</i> : il se produit quand l'axe de rotation de deux machines a un angle différent.	29
2.3.3. Désalignement des paliers	29
2.3.4. Mauvais serrage mécanique	30
2.3.5. Défauts dans les engrenages	30
2.3.6. Défauts des roulements [18, 30, 31, 32]	32
2.3.7. Ecaillage	32
2.3.8. Détérioration indépendante de la fatigue.....	33
2.3.8.1. Usure	33
2.3.8.2. Grippage	34
2.3.8.3. Avarie de cage	34
2.4. Etude statistique des anomalies affectant le moteur asynchrone	35
2.5. Intérêt du diagnostic: synthèse des méthodes de diagnostic	38
2.5.1. Méthodes de détection des défauts de moteur asynchrone.....	38
2.5.2. Panorama des méthodes de diagnostic des machines asynchrones [2].....	39
2.5.2.1. Méthodes de diagnostic avec modèle analytique	39
2.5.2.2. Méthodes de diagnostic sans modèle à priori.....	39
2.5.2.2.1. Méthode par traitement de signal (mts).....	40
2.5.2.2.2. Méthode par intelligence artificielle (mia).....	40
2.5.3. Etude bibliographique des travaux sur le diagnostic des machines asynchrones.....	40
2.6. Conclusion.....	42
chapitre 3 : modelisation de la machine asynchrone et techniques d'analyse du signal en vue du diagnostic des dégradations mecaniques	43
3.1. Introduction.	43
3.2. Description mathématique de la machine asynchrone	43
3.2.1. Présentation d'une machine asynchrone:.....	43
3.2.2. Equations électriques et magnétiques	44
3.2.3. Schéma équivalent à une phase d'une machine asynchrone en régime permanent :	46
3.2.4. Equation du couple électromagnétique	48
3.2.5. Transformation triphasé-biphasé :	49
3.2.6. Equations electriques :	52
3.2.7. Equations magnétiques :	53

3.2.8. Expression du couple électromagnétique :.....	53
3.2.9. Equation du mouvement (ou mécanique) :	54
3.3. Modélisation sous forme d'état de la machine asynchrone.....	54
3.3.1. Représentation d'état :.....	54
3.3.2. Modèle de la machine asynchrone alimentée en tension :	54
3.4. Modélisation des défauts mécaniques d'un entraînement électromécanique asynchrone	55
3.4.1. Transmission du défaut mécanique vers le courant statorique.....	55
3.4.2. Effet sur la force magnétomotrice rotorique	55
3.4.3. Equations d'équilibre mécanique de l'entraînement mécanique.....	55
3.4.4. Effet sur le courant statorique	58
3.4.5. Modélisation du signal du défaut	59
3.4.6. Signature des défauts mécaniques dans les courants statoriques	59
3.5. Techniques d'analyse du signal courant statorique en vue du diagnostic des défauts mécaniques.....	60
3.5.1. Transformée de fourier (ft).....	60
3.5.2. Transformée de fourier à court terme : stft (ou short time fourier transform)	61
3.5.3. Signature des défauts mécaniques via le spectrogramme de gabor.....	62
3.5.4. La transformée en ondelettes continue : cwt (ou continu wavelet transform)	63
3.6. Conclusion.....	64
chapitre 4 : signatures des anomalies et campagne d'expérimentations.....	65
4.1. Introduction :.....	65
4.2. Les signatures vibratoires des principaux défauts affectant l'entraînement asynchrone	65
4.2.1. Déséquilibre massique ou balourd	65
4.2.2. Désalignement	67
4.2.3. Désalignement des paliers	69
4.2.4. Signatures vibratoires des principaux défauts des roulements.....	69
4.2.5. Signatures vibratoires des défauts d'engrènement	71
4.3. Effets des défauts mécaniques sur les courants statoriques et le neutre.....	74
4.3.1. Signatures des défauts balourd et désalignement via l'analyse du courant.....	74
4.3.2. Détection de la combinaison des défauts de balourds et de désalignement par l'analyse des courants de la phase, du neutre et du carré des intensités.....	76
4.3.3. Signatures des anomalies de roulement dans le courant statorique [2]:.....	76
4.3.4. Signatures des anomalies des engrenages dans le courant statorique [2]	79
4.4. Présentation des modèles expérimentaux adoptés et des campagnes d'essais.....	80
4.4.1. Premier banc d'essai.....	80
4.4.2. Deuxième banc d'essai	81

4.4.3. Troisième banc d'essai	82
4.4.4. Quatrième banc d'essai.	84
4.5. Conclusion.....	86
chapitre 5 resultats experimentaux et discussions	87
5.1. Introduction	87
5.2. Résultats expérimentaux et interprétations.....	87
5.2.1. Résultats de la 1ère campagne d'essai sur l'agrégat leroy somer	87
5.2.2. Résultats de la 2ème campagne d'essai sur l'agrégat de machines électriques rosaty : ...	93
5.2.3. Résultats de la 3ème campagne d'essai.....	99
5.2.4. Résultats de la 3ème campagne d'essai sur le moteur-réducteur	105
5.2.5. Analyse et interprétation des signaux issus de la campagne d'expérimentation pour le diagnostic des dents des différents engrenages via le courant statorique.....	114
5.3. Conclusion.....	125
Conclusion generale et perspectives.	126
Bibliographie.....	128
Annexes	135

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Moteur asynchrone [16].....	7
Figure 1.2 Le moteur asynchrone à cages (Siemens) et les éléments constitutants. [Source: CD-Rom ITD]	8
Figure 1.3 Représentation schématique du stator.....	9
Figure 1.4 Représentation schématique du rotor à cage.....	10
Figure 1.5 Rotor bobiné	10
Figure 1.6 Représentation des champs magnétiques tournants.....	11
Figure 1.7 Bilan des puissances de la machine asynchrone	12
Figure 1.8 Couple et courant en fonction du rapport de la vitesse de rotation (n) avec la vitesse de synchronisme (n_0).....	14
Figure 1.9 Fonctionnement en moteur ou en générateur suivant le couple résistant	14
Figure 1.10 Caractéristiques d'un moteur asynchrone	15
Figure 1.11 Différents types d'accouplements	16
Figure 1.12 Les courroies de transmission.....	18
Figure 1.13 Les types d'engrenage.....	19
Figure 1.14 Les roulements à billes	20
Figure 1.15 Palier à roulement	20
Figure 2.1 Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	23
Figure 2.2 Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	23
Figure 2.3 Ouverture dans une phase du stator (a) et court-circuit entre phases (b).....	24
Figure 2.4 Déséquilibre de l'alimentation (a) et endommagement dû à la surcharge (b)	24
Figure 2.5 Masse dans l'encoche (a) et Dégradation causée par une surtension (b)	24
Figure 2.6 Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit.	25
Figure 2.7 Défauts d'excentricité statique et dynamique.....	25
Figure 2.8 Image Vibratoire théorique d'un balourd	27
Figure 2.9 Balourd statique.	27
Figure 2.10 Balourd dynamique.	28
Figure 2.11 Désalignement des arbres.	28
Figure 2.12 Image de désalignement parallèle.....	29
Figure 2.13 Image de désalignement angulaire.....	29
Figure 2.14 Désalignement de paliers se traduisant par une flexion de l'arbre.	29
Figure 2.15 Image de mauvais serrage mécanique.	30
Figure 2.17 Défauts réels d'engrenage localisés.....	31
Figure 2.16 Différents types d'engrenage.	31
Figure 2.18 Roulement à billes.	32
Figure 2.19 L'angle de la zone de charge dépend de la précision du roulement.	33
Figure 2.20 Ecaillage de fatigue et Ecaillage superficiel.	33
Figure 2.21 Usure.....	34
Figure 2.22 Grippage.....	34
Figure 2.23 Répartition des pannes des moteurs de faible et moyenne puissance.....	35
Figure 2.24 Répartition des pannes des moteurs de fortes puissances.....	35

Figure 2.25 Figure. 2.25.	36
Figure 2.26 Pourcentage des défauts (1995)	37
Figure 2.27 Répartition des défauts selon [38].	38
Figure 3.1 Représentation Vectorielle des enroulements de la Machine Asynchrone.	43
Figure 3.2 Schéma équivalent d'une phase en régime permanent.	46
Figure 3.3 Schéma équivalent d'une phase.	47
Figure 3.4 Modèles des fuites totalisées.	47
Figure 3.5 Schéma équivalent ramené au stator.	48
Figure 3.6 Passage du système triphasé au système biphasé.	49
Figure 3.7 Représentation vectorielle des enroulements de la Machine Asynchrone.	52
Figure 3.8 Référentiel tournant (R) et référentiel fixe (S).	57
Figure 3.9 Principe de la Transformée de Fourier (FT). [79]	60
Figure 3.10 Passage de la caractéristique temporelle à la STFT [71].	62
Figure 3.11 Principe de la Transformée d'Ondelettes Continues [71].	63
Figure 4.1 Signal vibratoire généré par un balourd. [11].	66
Figure 4.2 Spectre théorique d'un défaut de balourd. [11]	66
Figure 4.3 Image vibratoire théorique de désalignement. [11]	67
Figure 4.4 Le signal temporel et l'image vibratoire théorique de désalignement parallèle. [11] ...	68
Figure 4.5 Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire.	68
Figure 4.6 Désalignement de paliers se traduisant par une flexion de l'arbre.	69
Figure 4.8 Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure. [11]. ...	70
Figure 4.7 Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure. [11]	70
Figure 4.9 Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant.	71
Figure 4.10 Spectre denture saine	71
Figure 4.11 Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée.	72
Figure 4.12 Spectre réel d'une dent détériorée sur un engrenage. Fr du Pignon 8,9 Hz.	73
Figure 4.13 Image vibratoire théorique d'une denture.	73
Figure 4.14 Dimension de roulement à billes.	77
Figure 4.15 Fréquences des défauts d'un roulement (623)	79
Figure 4.16 Banc d'essai sur L'agrégat de machines Leroy Somer V132S1	80
Figure 4.17 Matériel de Captage des signaux vibratoire et courant.	80
Figure 4.18 Photo du deuxième agrégat dédié au diagnostic des défauts mécaniques.	82
Figure 4.19 Banc d'essai.	83
Figure 4.20 Rotor sain (a), avec balourd (b) et roulement dégradé (c)	83
Figure 4.21 Banc d'essai du Système d'entraînement électromécanique.	85
Figure 5.1 Moteur Sain.	88
Figure 5.2 Moteur en Présence du Défaut Balourd	89
Figure 5.3 Moteur en Présence du Défaut de Désalignement Angulaire.	89
Figure 5.4 Moteur en Présence du Défaut de Désalignement parallèle.	89
Figure 5.5 Moteur en Présence du Défaut combiné Balourd et Désalignement angulaire.	90
Figure 5.6 Moteur en Présence du Défaut combiné Balourd et Désalignement parallèle.	90
Figure 5.7 Caractéristique Temporelle du courant statorique : Moteur sain.	91
Figure 5.8 Spectre du courant statorique du système non dégradé	91
Figure 5.10 Spectre du courant.	91

Figure 5.9 Spectre du courant en présence du Balourd.....	91
Figure 5.12 Les deux spectres	92
Figure 5.11 Spectre présentant la combinaison des deux défauts mécaniques	92
Figure 5.13 Motif en 3D moteur sain.....	92
Figure 5.14 Motif en 3D en présence du balourd.....	92
Figure 5.15 Motif en 3D en présence du défaut combiné: balourd et désalignement.....	93
Figure 5.16 Motif 3D lors du défaut de désalignement.....	93
Figure 5.17 Caractéristique temporelle du courant et son spectre pour le moteur Sain.....	93
Figure 5.18 Spectres du courant statorique du Moteur en présence des Défauts mécaniques : (a) Balourd, (b) Désalignement parallèle, (c) Désalignement angulaire.	94
Figure 5.19 Spectres du courant statorique du moteur en présence des défauts mécaniques combinés : (a) balourd et désalignement parallèle, (b) balourd et désalignement angulaire.	94
Figure 5.20 Spectre du courant neutre: (a) état sain, (b) défaut de balourd.	95
Figure 5.21 Spectre du courant neutre: (a) défaut de désalignement, (b) défaut lors de la combinaison du balourd et du désalignement.	95
Figure 5.22 Motif pour le moteur sain	96
Figure 5.23 Motif pour le défaut de Balourd de 50 gr	96
Figure 5.24 Motif pour le Défaut de Balourd (masse de 150gr):Vue en 3D (a), Vue orthogonale (b)	97
Figure 5.25 Motif symbolisant le défaut de Balourd (masse de 315 gr): Vue en 3D (a), Vue orthogonale (b)	97
Figure 5.26 Motif représentant le défaut de désalignement : (a) Vue en 3D (b) Vue orthogonale en 2D	98
Figure 5.27 Motif marquant le défaut Combiné du balourd et du désalignement):	98
Figure 5.28 Caractéristique temporelle du courant statorique et son spectre.....	99
Figure 5.29 Spectre du courant de la phase statorique du moteur.....	99
Figure 5.30 (a) Caractéristique temporelle et son spectre moteur sain, (b) roulement condition idéale	100
Figure 5.31 (a) Signal temporel du courant de phase, (b) son spectre (c) son zoom en la présence du défaut de graissage.	100
Figure 5.32 Roulement sans graisse et contaminé par la poussière.	101
Figure 5.33 Spectre du courant du moteur en présence du défaut combiné : déséquilibre mécanique et défaut de roulement.....	103
Figure 5.34 Courant Neutre du moteur pour le cas sain.....	103
Figure 5.35 Courant neutre défaut balourd	103
Figure 5.37 Représentation du courant statorique en 3D pour le cas du moteur sain :.....	104
Figure 5.38 Représentation en 3D dans les cas: (a) défaut de roulement; (b) Balourd.....	104
Figure 5.36. Courant Neutre, défaut Combiné Balourd et Roulement.....	104
Figure 5.39 Motif en 3D pour le cas du Moteur dégradé avec défauts multiples :	105
Figure 5.40 Caractéristique temporelle du courant du système moteur –réducteur (a) ; Spectre du courant phasique (b) ; Spectre du courant Neutre (c) ; Motif en 3D (d).....	107
Figure 5.41 Le courant statorique (a) et son spectre (b) du Système moteur-Réducteur en défaillance suite à l'usure de 03 dents de l'engrenage Spectrogrammes de la STFC (c) et de Gabor (d) du signal courant statorique du Système moteur-Réducteur en défaillance suite à l'usure de 03	

dents d'engrenage, Scalogramme de la Transformée d'ondelettes continues (TOC) du courant statorique du Système moteur-Réducteur en défaillance suite à l'usure de 03 dents de la roue dentée.	109
Figure 5.42 Caractéristique temporelle du courant phasique et son Spectre dans le cas du défaut combiné : balourd et désalignement.....	110
Figure 5.43 Caractéristique temporelle de I_{neutre} (a);spectre de I_n (b) ; Motif en 3D (c)	111
Figure 5.44 Caractéristique temporelle de I_{phase} . (a) et son Spectre (b) en présence du défaut combiné balourd et à une cassure de 3 dents du réducteur.	112
Figure 5.45 Caractéristique temporelle de I_{neutre} (a) et Son Spectre (b); (c) Motif en 3D pour le cas du défaut combiné balourd et à une cassure de 3 dents du réducteur.	112
Figure 5.46 Caractéristique temporelle de I_{phase} . (a) et son Spectre (b).	113
Figure 5.47 Caractéristique temporelle de I_{neutre} (a), son Spectre (b) et son Motif en 3D (c)	113
Figure 5.48 Caractéristique temporelle du courant (a) et son Spectre (b).....	115
Figure 5.49 Spectre du courant Neutre.....	115
Figure 5.50 Motif modélisant en 3D la boîte à vitesse non dégradée	116
Figure 5.51 Caractéristique du courant de la phase statorique (a) et son Spectre (b)	116
Figure 5.52 Spectre du courant neutre.....	117
Figure 5.53 Présentation du motif en 3D du défaut d'écaillage de la dent de Z_2	117
Figure 5.54 Spectre du courant phasique	118
Figure 5.55 Spectre du courant neutre.....	118
Figure 5.56 Orbite en 3D représentant le défaut d'écaillage d'une dent de Z_4	119
Figure 5.57 Spectre du courant de la phase.....	120
Figure 5.58 Spectre du courant neutre.....	120
Figure 5.59 Présentation de l'orbite en 3D modélisant le défaut d'écaillage des deux dents.....	121
Figure 5.60 Spectre du courant phasique.	122
Figure 5.61 Spectre du courant neutre.....	122
Figure 5.62 Motif en 3D représentant le Défaut de cassure dents	123
Figure 5.63 Organigramme de Diagnostic des Défauts mécanique	124

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Comparaison des caractéristiques des accouplements à dents rigides	17
Tableau 2.1 Les causes des défauts de la machine asynchrone.....	26
Tableau 5.1 Fréquences relatives aux défauts graissage.....	101
Tableau 5.2 Fréquences relatives aux défauts graissage et contamination du roulement.....	102
Tableau 5.3 Fréquences relatives aux défauts du système Moteur- Réducteur.....	114
Tableau 5.4 Fréquences marqueuses du défaut d'écaillage de la dent de la roue Z_2	118
Tableau 5.5 Fréquences marqueuses du défaut d'écaillage de la dent de la roue Z_4	119
Tableau 5.6 Fréquences marqueuses du défaut d'écaillage simultanément.....	121

LISTE DES 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 ; $g = \frac{n_s - n}{n_s}$

P_a : La puissance électrique absorbée en (W) ; $P_a = UI\sqrt{3} \cos\varphi$

U : La tension entre deux phases en (V).

I : L'intensité du courant de ligne en (A).

P_{js} : Les pertes statoriques, $P_{js} = \frac{3}{2} RI^2$

R : résistance mesurée entre deux bornes du stator.

I : courant Statorique

P_{tr} : La puissance transmise du stator au rotor ; $P_{tr} = P_a - P_{js} - P_f$

P_f : Les pertes magnétiques dues au phénomène d'hystérésis : P_f (pertes fer)

P_{jr} : Les pertes rotoriques par effet joules ; $P_{jr} = g.P_{tr}$

P_m : Les pertes mécaniques dues aux frottements

P_u : La puissance mécanique utile [W] ; $P_u = C.\omega$

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

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

ω : la vitesse angulaire ; $\omega = 2\pi n / 60$ [rd/s]

K : La raideur de flexion de l'accouplement ; $K = k_0 + f(\varphi).g(\alpha)$

$V_{sa}(1), V_{sb}(2), V_{sc}(3)$: 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 α (ou β)

$V_{sd,q}, V_{rd,q}$: 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 α (ou β)

$i_{sd,q}, i_{rd,q}$: 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 α (ou β)

J : Moment d'inertie

$[L]$: Matrice inductance

L_{fs} : Inductance de fuite au stator

L_m : Inductance mutuelle entre le stator et le rotor

l_{ms} : Inductance magnétisante

l_r : Inductance propre cyclique du rotor

l_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

σ : Coefficient de fuite total ; $\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r}$.

L_s : l'inductance cyclique statorique (ou l'inductance mutuelle cyclique)

L_r : l'inductance cyclique rotorique (ou inductance mutuelle cyclique) .

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

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

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

$[I_r]$: vecteur des courants rotorique

$[I_s]$: vecteur des courants statorique

[Lr] : matrice des inductances rotorique

[Ls] : matrice des inductances statorique

[M_{sr}] : 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

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

θ_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.

Ω : 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,

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

ω : pulsation mécanique,

p : nombre de paires de pôles.

$\omega_c = 2\pi fc$: pulsation de l'oscillation et du défaut

C_c : l'amplitude de l'oscillation liée à la sévérité du défaut

C_{moteur} : Couple électromagnétique

C_{const} : couple de charge

ω_{r0} : la vitesse angulaire à vide

θ_r : L'angle mécanique du rotor

f_c : la fréquence caractéristique

F_s : force magnétomotrice statorique fondamentale.

$Fr^{(R)}$: force magnétomotrice rotorique lié au rotor (R)

φ : déphasage des courants rotoriques par rapport aux courants statoriques

θ : angle mécanique dans le repère fixe du stator

ω_{r0} : la vitesse mécanique angulaire du rotor, définie par ; $\omega_{r0} = 1p(1-g)\omega_s$

Φ : Le flux magnétique ; $\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$

B : l'induction magnétique

A : Surface

μ_0 : perméance de l'entrefer

μ_0 : perméance moyenne de l'entrefer

ϕ_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 .

S : rotor glissement fréquence ;

f_1 : fréquence fondamentale (Hz) ;

f_d : fréquence de défaut

$x(t)$: 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

τ : le coefficient de translation.

s : le coefficient d'échelle (ou facteur de dilatation de ψ)

$\psi(t)$: ondelette mère

ψ^* : le complexe conjugué de ψ

α : angle de contact,

Ω : Vitesse de rotation de l'arbre,

D : diamètre moyen du roulement, **N** : nombre de billes.
 F_e : fréquence d'engrènement

F_1 et F_2 : fréquences de rotations des roues 1 et 2

Z_1 et Z_2 : Nombre des dents des roues 1 et 2
 F_{co} , fréquence de coïncidence

F_e : fréquence d'engrènement
 f_r : fréquence de rotation de l'arbre

f_e : fréquence d'engrènement,
 $b(t)$: bruit composé d'harmoniques

ζ_d : nombre de dents d'une roue

R : Rayon de la sphère

$f_{\text{défaut}}$: fréquence caractéristique des vibrations induites par les défauts.

f_v ou f_d : fréquence caractéristique de vibration ou de défaut

f_{bng} : fréquence de défaut d'élément

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

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

f_c : la fréquence caractéristique de la cage

f_{bille} : la fréquence caractéristique de rotation des billes.

f_r : la fréquence de rotation mécanique.

N_b : le nombre de billes.

D_b : le diamètre de la bille.

D_p : le diamètre du centre des billes

Θ : l'angle de contact.

INTRODUCTION GENERALE

Dans les entraînements électromécaniques, en particulier ceux de grandes puissances, les moteurs électriques et les organes qui leur sont liés, à savoir les accouplements et les réducteurs, constituent les éléments clés pour la conversion de l'énergie électrique et le transfert de la puissance mécanique à des vitesses conformes aux différentes charges des procédés technologiques. Ainsi, le diagnostic prédictif de défauts, c'est-à-dire la détection et la localisation de défaillances affectant aussi bien le moteur que ses éléments constituants (tels que les roulements) ou ceux qui lui sont accouplés (tels que les réducteurs), s'avère un outil indispensable à leur maintenance prédictive. Parmi tous les types de machines électriques au service des entraînements électromécaniques, les moteurs à induction constituent de nos jours un exemple fréquent en raison de sa simplicité de construction, sa robustesse, sa grande efficacité et son adaptation aux vitesses variables. Cependant, ces derniers ne sont pas à l'abri de certaines anomalies mécaniques simples ou combinées pouvant avoir des origines aussi bien internes qu'externes à l'unité motrice (roulement, accouplement et denture d'engrenage). Ces dysfonctionnements peuvent avoir des conséquences destructrices immédiates, ce qui justifie leur diagnostic prédictif et leur détection quasi instantanée suivis d'un arrêt ou d'une reconfiguration de l'alimentation de la machine. Suite aux efforts mécaniques considérables auxquels ils sont confrontés, les entraînements électriques à base de moteurs à induction de grandes puissances peuvent être ciblés simultanément par une ou plusieurs anomalies dont les conséquences sont très fâcheuses. Dorénavant, le diagnostic des entraînements électriques doit être une préoccupation fondamentale qui est parfaitement justifiée pour les équipements de forte puissance entraînés par des moteurs à induction de moyenne tension (broyeurs, ventilateurs d'exhaure, pompe soufflante, équipements en pétrochimie, séparateur...) où il s'agit de préserver l'intégrité d'un dispositif coûteux. Mais il ne faut pas perdre de vue que la panne d'un moteur de faible puissance (pompe de graissage) peut elle aussi avoir des répercussions économiques non négligeables suite à l'arrêt d'un équipement stratégique dans une chaîne de production [1][2][3].

Comparés aux résultats issus de publications pendant les toutes dernières décennies dans le domaine du diagnostic de défauts et de la surveillance des machines électriques [4][5][6][7], particulièrement celles de fortes puissances, la répartition des défauts a considérablement variée du fait des conditions de fabrication des moteurs à induction [8][9][10][11]. Les défauts électriques dans le stator et le rotor (court-circuit entre spires, rupture de barres,...) sont de moins en moins fréquents. La principale source de défaillances est constituée par les défaillances mécaniques internes (excentricité, roulement) ou externes à l'unité motrice en l'occurrence les défauts de balourd, de désalignements angulaires et parallèle, de fixation, des roulements, de la boîte d'engrenages et de la charge etc...). Cependant, il est difficile d'identifier à l'aide de modèles analytiques certaines anomalies mécaniques simples et particulièrement lorsqu'elles sont combinées. Ceci est une des raisons justifiant la rareté de leur considération dans les travaux de recherches malgré le fait que ce soit une situation assez courante dans certaines applications industrielles de grandes puissances.

C'est dans cette optique que cette thèse est orientée. Elle s'intéresse, en effet, au développement des techniques de diagnostic et de détection des anomalies combinées subies par les entraînements électromécaniques dont le maillon faible est le moteur à induction. La surveillance d'un dispositif passe par la connaissance de son comportement sain (quel que soit son point de fonctionnement), la connaissance des défaillances pouvant l'affecter, soit directement soit à travers ses organes de liaison, et la caractérisation des fonctionnements défaillants.

Ce travail de thèse est scindé en deux parties: La première partie porte sur la compréhension et l'analyse des défauts mécaniques courants affectant ces entraînements électromécaniques à base de moteur asynchrone ainsi que la recherche et le développement d'outils de surveillance et de diagnostic des défauts.

La seconde partie repose essentiellement sur la campagne d'essais réalisée au sein de notre Laboratoire d'Electromécanique et les discussions des résultats expérimentaux de validation issus de cette dernière par l'application d'une association d'approches développées pour le diagnostic prédictif des défauts mécaniques précités et basée essentiellement sur l'analyse du courant de ligne alimentant le stator du moteur à induction (*MotorCurrent Signature Analysis ou MCSA*) jouant amplement le rôle de capteur [12][13][14].

Ainsi, en dehors de l'approche vibratoire traditionnelle qui a montré ses limites pour des défauts induisant des variations de couple, trois approches signal vont être adoptées à savoir : une approche qui traite des techniques d'extraction de l'information pertinente du signal du courant statorique suivie de celle du courant neutre et suppléés par la représentation en trois dimensions (3D) des carrés des intensités des courants des trois phases statoriques. Cette dernière aura un rôle déterminant pour la fiabilisation de ce diagnostic prédictif d'anomalies mécaniques simple et combinées en tranchant sur la nature exacte du défaut et la séparation des défauts dans le cas où les composantes fréquentielles sont masquées.

FORMULATION DU PROBLEME

Les impératifs de fiabilité et de productivité des machines électriques nécessitent l'intégration de systèmes de détection et de diagnostic des défaillances. Il faut donc doter l'entraînement asynchrone d'outils de surveillance; Ainsi, nous pourrions éviter, ou du moins prévenir, les pannes et les arrêts intempestifs.

L'apparition d'une ou plusieurs anomalies au niveau des organes de la machine ou de ceux qui sont liés à son arbre mécanique peut engendrer des frais de remplacement, des arrêts de production et même des pertes de vies humaines. Il est alors indispensable d'éviter ces dégradations. Il s'avère donc nécessaire d'identifier et de développer une technique ou un système de prévention pouvant prévenir de la présence des défauts simples ou multiples avant la mise hors service des éléments composants.

Il est à noter qu'en dehors des conditions d'exploitation (respect du nombre de démarrages et des normes de charges) parmi les causes externes envisageables contribuant à la dégradation des paliers et des roulements pour les moteurs électriques, en particulier ceux de moyennes et grandes puissances où les efforts mécaniques de l'ensemble moteur et procédé entraîné sont considérables, nous pouvons citer les déséquilibres massiques ou « balourd » et les désalignements angulaires et parallèles. Aussi, les entraînements à base de moteurs à induction, en particulier pour les grandes puissances, peuvent être confrontés à une ou à la fusion de plusieurs défaillances mécaniques à la fois (balourd, désalignement, roulement, ancrage, dents des engrenages).

Seulement, les dysfonctionnements précités, dont il faut préciser que la description mathématiques est complexe pour ne pas dire impossible surtout lorsqu'il s'agit de défauts combinés, n'ont relativement pas suscité de considération de la part des chercheurs bien qu'ils soient très courants dans les applications industrielles légères et lourdes. A cette fin, nous exposons dans ce travail les principales méthodes et techniques de surveillance et de diagnostic de l'entraînement asynchrone et nous nous intéressons particulièrement au diagnostic prédictif d'un défaut de balourd, des défauts de désalignement parallèle et angulaire, des défauts de roulement à billes et l'usure de la denture des engrenages et en particulier la détection prédictive des anomalies de certaines de leurs combinaisons.

OBJECTIFS ET CONTRIBUTIONS SOUHAITES

Les travaux sur le diagnostic et la détection prédictive des anomalies simples et multiples affectant les entraînements électriques, qu'elles soient internes ou externes à la machine, à partir de mesures électriques ont traité en majorité des défauts électriques, tandis que les défauts mécaniques ont été relativement délaissés bien qu'ils représentent plus de 50% des pannes. Ces derniers n'ont pas fait l'objet de beaucoup de communications. L'étude expérimentale des signatures des défauts mécaniques uniques et fusionnés précités via les courants statoriques captés au niveau des armoires électriques vont constituer la suite de cette thèse. Des approches électriques en complément à la technique vibratoire traditionnelle pour la détection prédictive de ces défauts mécaniques seront développées.

Ainsi, ce travail a pour objectif de contribuer par une validation expérimentale à la détection et à l'identification des défauts de déséquilibre massique, du désalignement parallèle et angulaire, des roulements, de l'usure de la denture et de certaines défaillances dues à leur combinaison. Outre l'analyse spectrale traditionnelle du courant (FFT) d'une phase d'alimentation du moteur et du courant circulant dans le neutre, nous proposons dans ce document une signature supplétive de défauts basée sur la reconnaissance de leurs motifs correspondants. Les résultats expérimentaux obtenus par ces approches supplémentaires sont satisfaisants. Ils jouissent d'une interprétation visuelle simple sans recourir à des experts pour juger en continu et à distance de l'état de l'entraînement électromécanique. Par ailleurs, la mise en œuvre de ces trois techniques complémentaires d'exploitation du courant d'alimentation du moteur asynchrone à des fins de diagnostic ne nécessite pas un équipement vraiment coûteux afin d'assurer une maintenance prédictive (PM) [15].

ORIGINALITE DU TRAVAIL

Elle se résume en deux points essentiels. Traditionnellement, ce sont les signatures thermiques vibratoires et acoustiques qui sont exploitées pour la détection prédictive des défaillances mécaniques. Seulement, l'approche de l'analyse vibratoire présente des inconvénients tels que l'insensibilité aux défauts naissants et à ceux présentant les mêmes composantes fréquentielles (masqués), le nombre de capteurs et surtout le problème de proximité. Cependant, tout au long de cette dernière décennie, les signatures électriques à travers la MCSA ont considérablement évolué dans la surveillance des entraînements électriques à base de moteur à induction. Une approche sans modèles, à priori, fondée sur l'analyse des courants d'alimentation du moteur, est essentiellement choisie pour cette tâche.

Cette approche repose sur la connaissance du comportement du système sain. L'étude est basée sur l'existence et la caractérisation des effets des oscillations du couple de charge sur les courants d'alimentation.

Plusieurs résultats expérimentaux seront présentés, illustrant la possibilité et la sensibilité de détection des défaillances mécaniques précitées par des techniques complémentaires basées sur l'analyse du courant statorique absorbé par le moteur à induction tout au long de son cycle de fonctionnement.

ORGANISATION DU MEMOIRE

L'organisation en cinq chapitres retenue pour la présentation de ce manuscrit traduit la démarche suivie pendant les travaux de cette thèse.

Le premier chapitre est scindé en deux parties dont la première est consacrée à un rappel sur la construction de la machine asynchrone triphasée et les caractéristiques de fonctionnement de cette dernière. La deuxième partie, quant à elle, a été réservée à la présentation des organes de liaison pour le transfert de la puissance mécanique vers la charge du procédé industriel.

Le deuxième chapitre est réservé à la présentation des défaillances que peut subir un système électromécanique en service, tout en évoquant les contributions scientifiques sur les différents dysfonctionnements, les différentes techniques de détection des défauts et les différents modèles dynamiques de machines électriques. Par la suite, nous présenterons les méthodes dédiées à l'étude des anomalies mécaniques de notre étude. Nous mettrons surtout l'accent sur les défauts simples et combinés les plus récurrents dans l'industrie, à savoir: le défaut de balourd, les défauts de désalignement, les défauts des roulements et des engrenages.

Le troisième chapitre développera la description mathématique (*modélisation*) de la machine asynchrone saine, dont nous évoquerons par la suite les modèles en présence de certaines défaillances.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des différents bancs d'essais ayant servis à notre campagne expérimentale et que nous avons pu réaliser dans notre Laboratoire de Génie Electromécanique ainsi que les techniques utilisées pour la création volontaire des défaillances simples et combinées précitées.

Le cinquième chapitre sera axé sur la discussion et l'analyse des résultats expérimentaux obtenus concernant les signatures des courants statoriques et celui du courant neutre du moteur en se basant sur la transformée de Fourier rapide (FFT) en complément de l'analyse vibratoire. Ensemble, ces deux approches seront suppléées par une interprétation du carré des intensités des trois phases d'alimentation contribuant à la reconnaissance et à la séparation des défauts qui peuvent avoir les mêmes caractéristiques fréquentielles et, par conséquent, pouvant se masquer l'un l'autre. Le tout apparaît comme une méthodologie suffisamment précise pour détecter et surveiller les anomalies précitées seules et combinées et ceci dès leur naissance. Un organigramme de diagnostic a été conçu afin de simplifier la compréhension et l'application pratique de cette méthodologie.

Une conclusion générale résumant l'aboutissement de ce travail et les perspectives clairement orientés par ce dernier clôturera ce mémoire.

Chapitre 1 : ETUDE PRELIMINAIRE SUR LE MOTEUR ASYNCHRONE ET LES ORGANES DE LIAISON ET DE TRANSFERT DE PUISSANCE

1.1. Introduction

Ce premier chapitre a pour objectif de revenir rapidement sur la constitution des machines asynchrones et donne un aperçu sur les organes qui leur sont accouplés pour assurer le transfert de la puissance mécanique avec la vitesse et le rendement souhaités par l'application industrielle. Ce rappel est suivi par une synthèse des différents défauts pouvant survenir sur chacun de ces organes en passant brièvement par les techniques de détection couramment utilisées dans ce domaine.

1.2. Constitution de la machine asynchrone

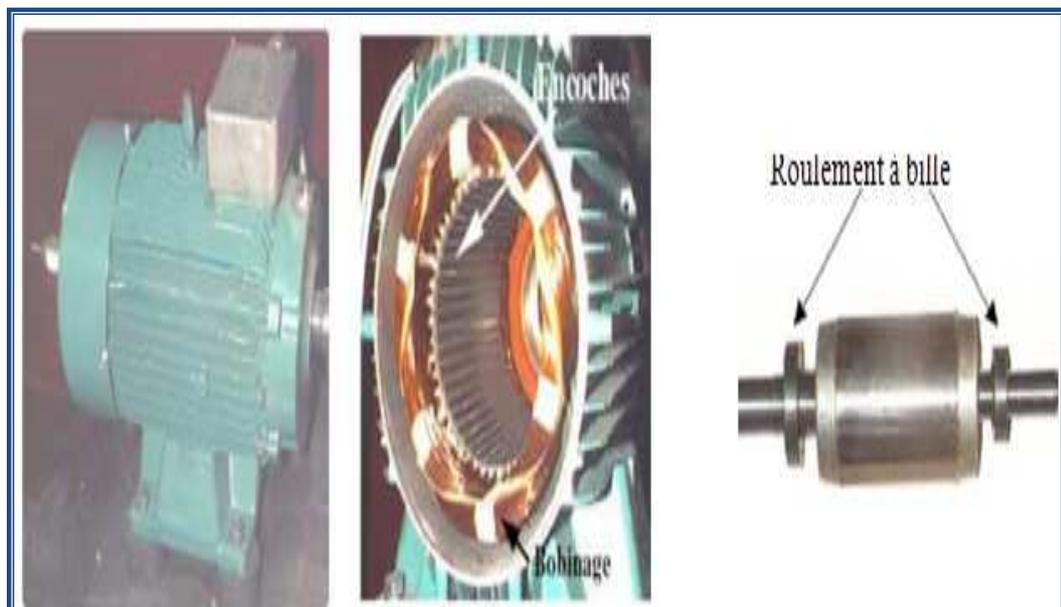


Figure 1.1 Moteur asynchrone [16]

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

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

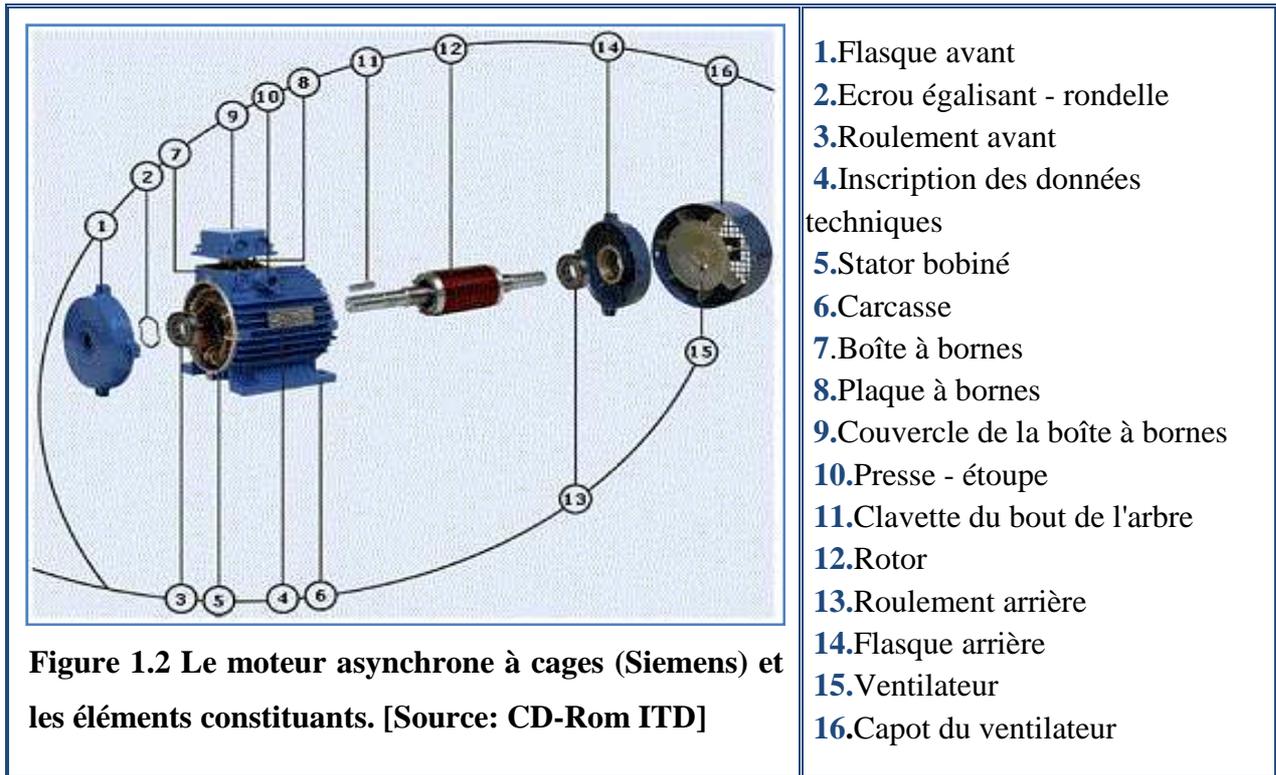


Figure 1.2 Le moteur asynchrone à cages (Siemens) et les éléments constitutants. [Source: CD-Rom ITD]

Le moteur asynchrone ou moteur d'induction est actuellement le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Du fait de son faible encombrement, de son bon rendement, de son excellente fiabilité et de sa facilité de mise en œuvre. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple et robuste facile à construire.

Le domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts. Relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constantes, il tourne à vitesse variable peu différente de la vitesse synchrone; c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante. Le moteur asynchrone permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il prend dans ce domaine ne cesse de croître.

a. Le stator :

C'est la partie fixe du moteur. Il est constitué d'une carcasse sur laquelle est fixée une couronne de tôles d'acier de qualité spéciale munies d'encoches. Des bobinages de section appropriée sont répartis dans ces dernières et forment un ensemble d'enroulements qui comporte autant de circuits qu'il y a de phases sur le réseau d'alimentation.



Figure 1.3 Représentation schématique du stator

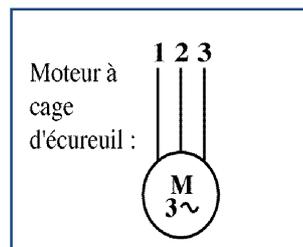
b. Le rotor:

C'est la partie mobile du moteur, il tourne à une vitesse inférieure à la vitesse du champ tournant ; il est placé à l'intérieur du stator, et constitué d'un empilage de tôles d'acier formant un cylindre court-circuité à chaque extrémité par une couronne en cuivre ou aluminium, l'ensemble forme une cage d'écureuil, il doit être feuilleté pour réduire les pertes par courant de Foucault.

1.3. Les différents types du moteur asynchrone :

Les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste le même, du moins dans son principe.

a. Le rotor à cage



Symbole

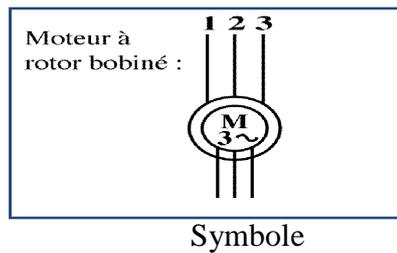
Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension (*par exemple 230/400 V*), la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium.



Figure 1.4 Représentation schématique du rotor à cage

❖ Le rotor bobiné



Symbole

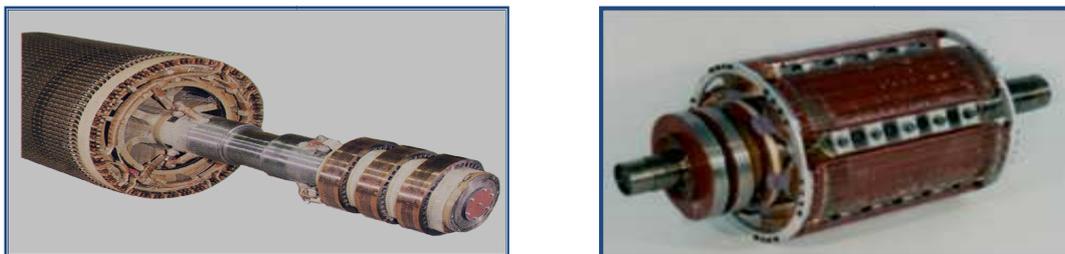


Figure 1.5 Rotor bobiné

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

1.4.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Les 3 enroulements statoriques alimentés par un réseau triphasé équilibré créent dans l'entrefer un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation de synchronisme n_s . Les conducteurs du rotor sont soumis à ce champ tournant. Ils sont alors traversés par des courants de Foucault induits. D'après la loi de Lenz (*"les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur donne naissance"*). Les enroulements du rotor étant en court-circuit, la circulation des courants est alors possible. Les forces de Laplace qui en résultent exercent des moments sur le rotor. Le rotor tourne alors à la fréquence de rotation n . De par son principe la fréquence de rotation du rotor est inférieure à la fréquence de synchronisme n_s : $n < n_s$. Les deux fréquences de rotation ne peuvent donc pas être synchrones d'où le nom du moteur asynchrone.

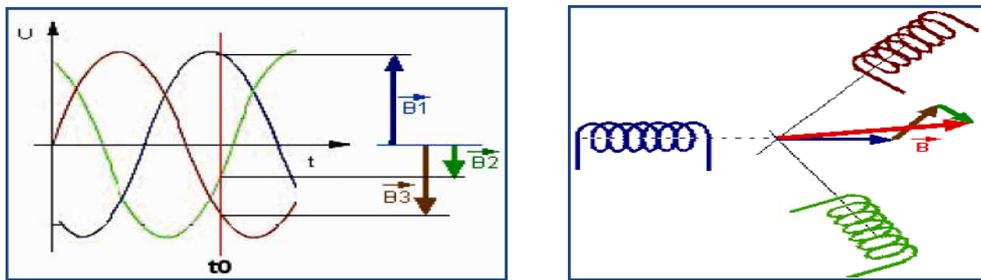


Figure 1.6 Représentation des champs magnétiques tournants

1.4.1. Glissement :

Le rotor tourne à la fréquence de rotation n , il tourne moins vite que le champ tournant qui lui tourne à la fréquence de rotation n_s . La fréquence de glissement est la différence entre ces deux fréquences de rotation :

$$n_g = n_s - n \quad (1.1)$$

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

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.2)$$

1.4.2. Fréquence de synchronisme d'une MAS :

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

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (1.3)$$

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

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

Les pertes rotoriques :

❖ Pertes par effet joules :

Dues aux courants de Foucault (correspond à la perte de vitesse : glissement).

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} \quad (1.7)$$

❖ Pertes mécaniques :

Dues aux frottements : P_m

La puissance mécanique utile :

Soit M le moment du couple moteur, on a :

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_f \quad (1.8)$$

$$P_u = 2\pi \cdot n \cdot M$$

n en tr/s ou f en Hz

Les pertes constantes :

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_f \quad (1.9)$$

Elles ne dépendent pas du régime de fonctionnement du moteur et peuvent donc être mesurée à vide.

1.4.4. Couple :

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

$$C = (P \times 9\,550) / n \quad (1.10)$$

Avec :

- ❖ P = Puissance du moteur [W].
- ❖ n = la vitesse de rotation du moteur [tr/min].

Une des courbes la plus caractéristique des moteurs asynchrones est celle du couple en fonction du glissement ou Caractéristique mécanique :

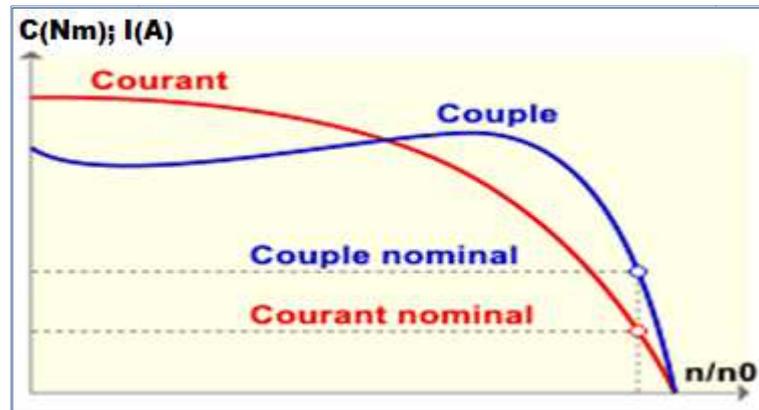


Figure 1.8 Couple et courant en fonction du rapport de la vitesse de rotation (n) avec la vitesse de synchronisme (n_0)

Sur le graphe ci-dessus on voit tout de suite qu'il faut choisir le type de moteur en fonction de l'application : pour les motorisations des ascenseurs, on préférera les moteurs à double cage présentant un profil de courbe plus plat en fonction du glissement afin de bénéficier d'un couple relativement constant quelle que soit la charge.

Une des caractéristiques importante du moteur asynchrone, est qu'il peut, dans certaines conditions, se transformer en générateur asynchrone. Lorsqu'une cabine d'ascenseur redescend en charge maximum, le moteur renvoie de l'énergie au réseau. Les courbes suivantes montrent ce phénomène :

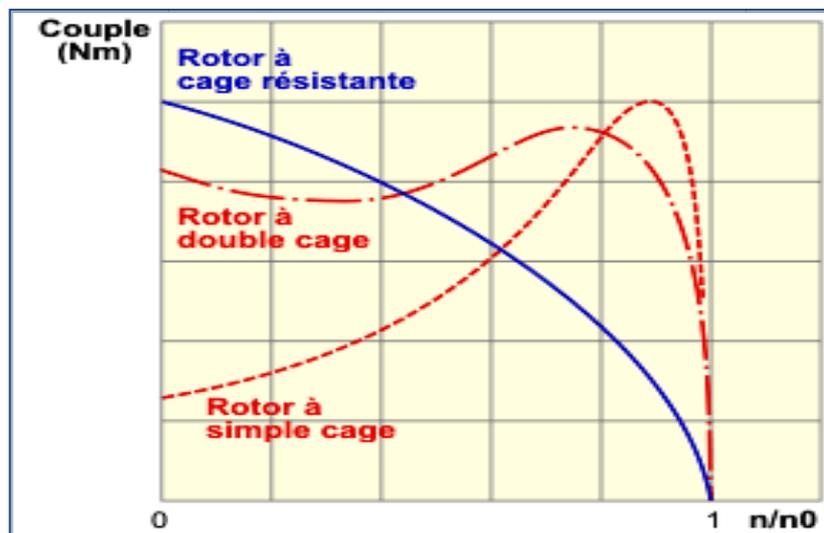


Figure 1.9 Fonctionnement en moteur ou en générateur suivant le couple résistant

On peut noter qu'un moteur asynchrone classique a les caractéristiques suivantes :

- Le courant de démarrage est de l'ordre de **6 à 7** fois le courant nominal. Il est impératif de prévoir des systèmes de limitation de courant au démarrage (*étoile/triangle, variateur de fréquence...*).
- Le couple de démarrage est important (*de l'ordre de 2,5 fois le couple nominal*).
- Le couple est maximum pour un glissement de l'ordre de **30 %**.

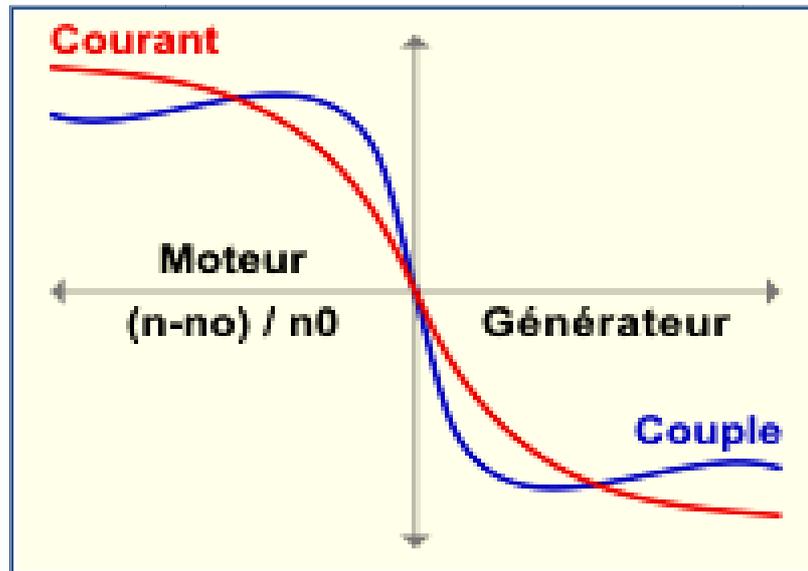


Figure 1.10 Caractéristiques d'un moteur asynchrone

L'étude détaillée que ce soit pour sa commande ou sa surveillance nécessite l'élaboration d'un modèle qui porte sur les différentes équations issues d'une succession de transformations, c'est ce qui fera l'objet du troisième chapitre.

1.5. Les organes de liaisons et de transfert de puissance dans les entraînements électromécaniques [17]

Les machines sont constituées d'éléments simples, assemblés entre eux. La défaillance de l'un de ces éléments peut être détectée par l'observation des signaux des capteurs qui mesurent les paramètres relatifs à ces éléments.

1.5.1. Les accouplements :

Ils lient les arbres en rotation de deux machines, ils peuvent être :

- rigides
- à dents

Plus ou moins souples afin d'absorber les vibrations de torsion et les désalignements des deux machines à accoupler

- à cardan : transmettant les vibrations de torsion mais permettant un désalignement important des deux arbres.

- Interruptibles : embrayage, coupleurs.

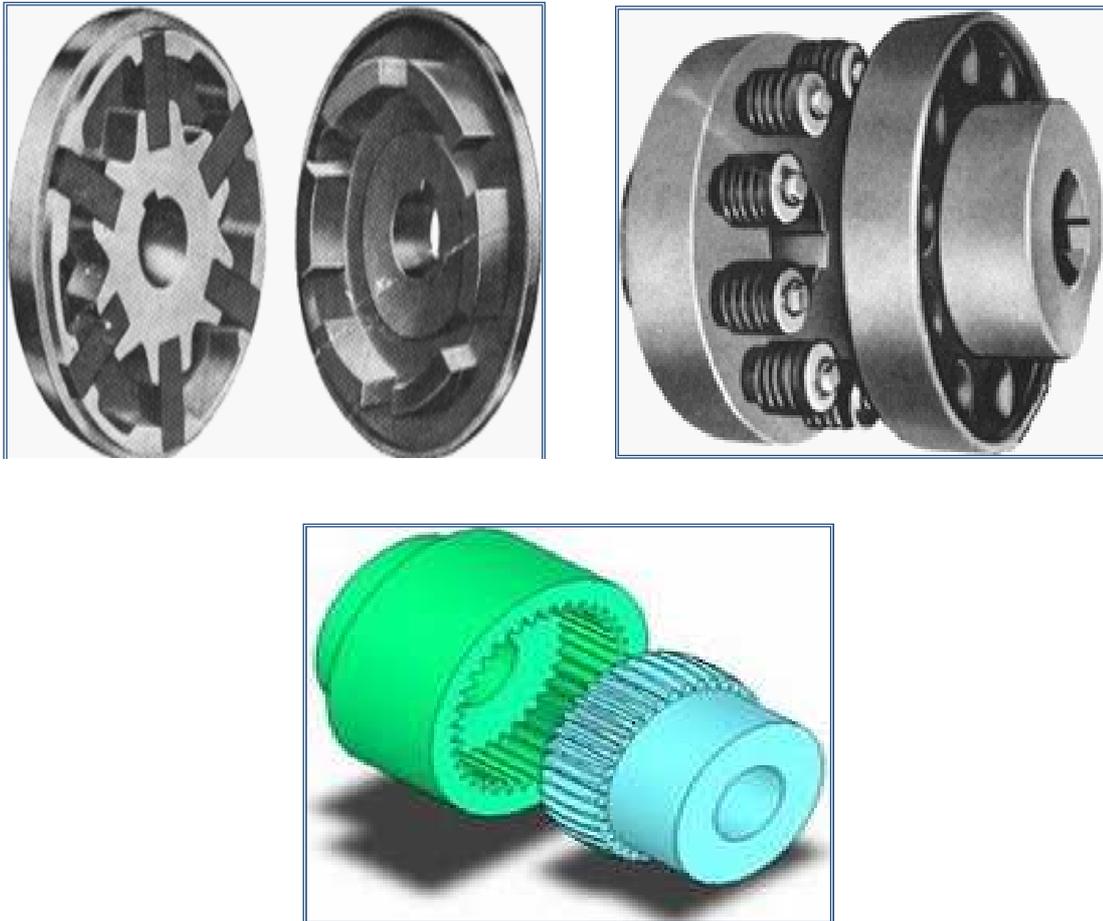


Figure 1.11 Différents types d'accouplements

Les différences entre accouplements rigides ou à dents sont présentées dans le **tableau 1.1**.

Les défauts des accouplements rigides ou élastiques proviennent du non alignement important des arbres, du manque de souplesse accouplement ou d'un manque d'amortissement.

La mise en évidence de ces défauts fait intervenir des techniques de mesures vibratoires, de position des arbres, de température. Ils ont des conséquences sur l'ensemble des organes de la ligne d'arbre.

	Accouplement à dents	Accouplement rigide
Transmission de puissance	Par pignon et roue dentée	Manchon fretté
Montage	Très soigné	Normal
Graissage	De l'huile très pure est nécessaire. Problématique à partir de certaines vitesses périphériques	Supprimé
Usure des différentes parties	Possible en cas de montage peu soigné	inexistante
Nombre de paliers axiaux	Paliers axiaux séparés pour la turbine et le compresseur	Un seul palier axial est possible (côté turbine)
Contraintes des paliers axiaux	Influencée par le coefficient de frottement	Uniforme
Compensation de poussée	Impossible	Possible
Transmission de la dilatation différentielle	Non	Oui
Influence réciproque sur la vitesse de rotation critique	Faible	Normale

Tableau 1.1 Comparaison des caractéristiques des accouplements à dents rigides

La modélisation de l'accouplement est effectuée par la méthode des éléments finis. La raideur de flexion de l'accouplement peut être exprimée par la relation :

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_0 + \mathbf{f}(\varphi) \cdot \mathbf{g}(\alpha) \quad (1.11)$$

1.5.2. Les éléments de transmission souple :

Les transmissions par poulies et courroies sont silencieuses ; elles sont surtout utilisées aux vitesses élevées avec de grands entraxes possibles entre poulies. La tension initiale des courroies est indispensable pour garantir l'adhérence et assurer la transmission du mouvement. Un système à entraxe réglable ou un dispositif annexe de tension (galet enrouleur, etc) est souvent nécessaire pour régler la tension initiale et compenser l'allongement des courroies au cours du temps.

À l'exception des courroies crantées, en fonctionnement normal, il existe un léger glissement de la courroie sur les poulies amenant une imprécision du rapport de transmission ; celui-ci n'est pas exactement égal au rapport des diamètres des deux poulies.

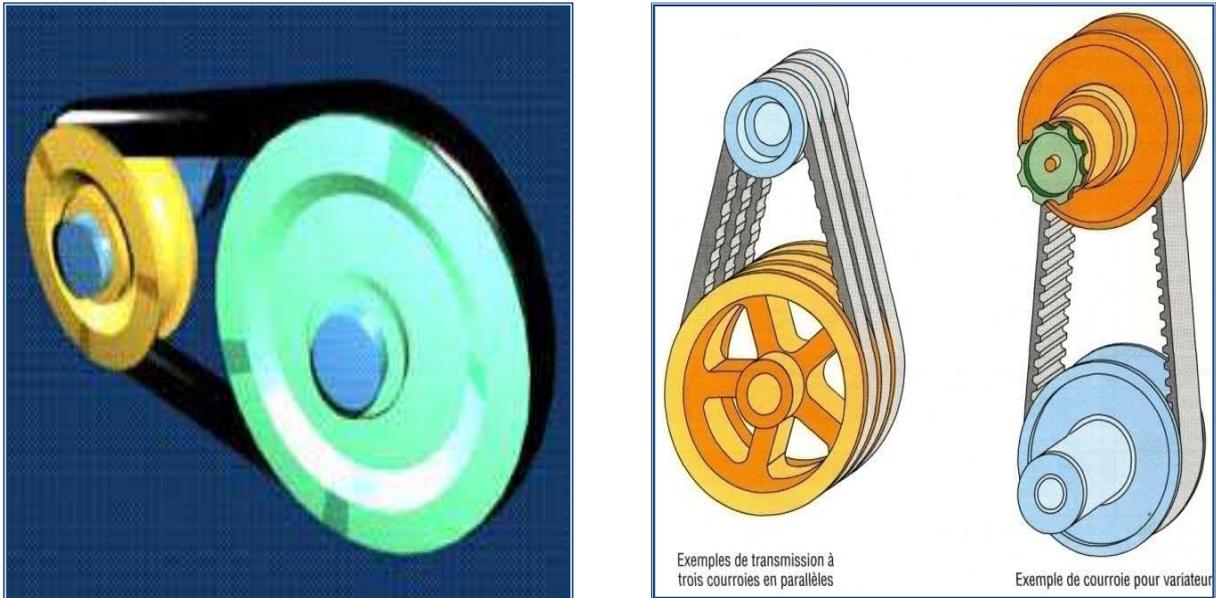


Figure 1.12 Les courroies de transmission

Les courroies :

Ce sont les courroies plates, en V ou crantées et les chaînes. La courroie peut engendrer plusieurs fréquences.

Chaînes et Courroies crantées :

Les fréquences caractéristiques des chaînes et courroies crantées sont liées au nombre de dents des poulies dentées ou crantées et aux vitesses de rotation de ces poulies

1.5.3. Les Engrenages :

Un **engrenage** est un système mécanique composé de deux roues dentées engrenées servant :

- ❖ soit à la transmission du mouvement de rotation entre elles ;
- ❖ soit à la propulsion d'un fluide (on parle alors de pompe à engrenages).

Dans le cas de la transmission de mouvement, les deux roues dentées sont en contact l'une avec l'autre et se transmettent de la puissance par obstacle.

Un engrenage est composé d'un pignon, c'est ainsi que l'on nomme la seule roue ou la roue la plus petite, et d'une roue, d'une crémaillère, d'une couronne ou d'une vis. Quand plus de deux roues dentées sont présentes, on parle de train d'engrenages.

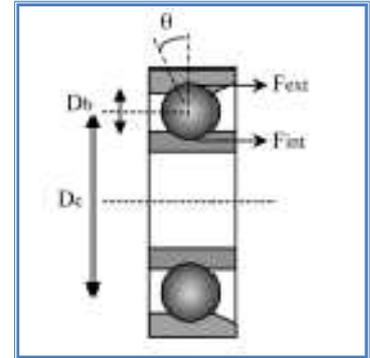
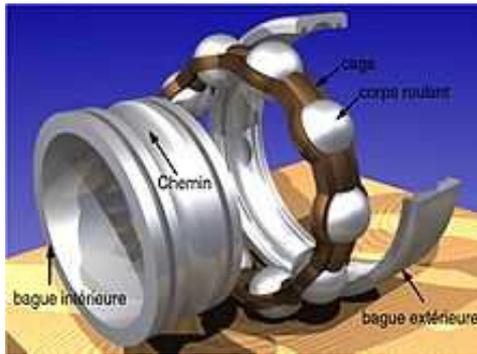


Figure 1.13 Les types d'engrenage

1.5.4. Généralités sur les roulements à billes :

Un roulement à billes se présente sous la forme de deux bagues coaxiales entre lesquelles sont placées des billes, légèrement lubrifiées, et maintenues espacées par une cage. De manière générale, les roulements sont constitués de quatre composants essentiels. Un organe externe, un organe interne, des organes roulants et un organe de lubrification. En fonction de l'application envisagée, les organes de roulement peuvent être des billes, des rouleaux ou des aiguilles. Chaque type de roulement possède des caractéristiques spécifiques en termes de charges radiales et axiales supportées, de vitesse limite ou encore de défaut d'alignement admissible.

Notre travail en ce qui concerne l'organe roulement portera sur un type de roulements couramment utilisé, à savoir les roulements métalliques, graissés, à une rangée de billes, à contact radial, soit le modèle le plus courant dans les machines électriques de moyenne gamme de puissance. Les roulements concernés sont donc constitués d'une bague externe, d'une bague interne et d'une rangée de billes maintenues par une cage, ainsi que de graisse pour la lubrification. Une vue éclatée de ce type de roulement est présentée en figure 2.2. Dans le cas de la machine d'étude, la bague externe est en contact avec le stator, donc fixe, alors que la bague interne est en contact avec le rotor, donc tournante. Par ailleurs, les billes sont en contact, d'une part avec la piste de roulement interne et d'autre part avec la piste de roulement externe. On parlera d'ailleurs sans distinction de piste de roulement, de bande de roulement ou bien de chemin de roulement.



Éclaté d'un roulement à billes.

Figure 1.14 Les roulements à billes



Figure 1.15 Palier à roulement

Les paliers qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fontes, sont fixé sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage établi. Les paliers sont des organes utilisés en construction mécanique pour supporter et guider, en rotation, des arbres de transmission. Suivant l'usage désiré, ces paliers peuvent être :

- ❖ lisses où les arbres qui reposent sur des coussinets sont soumis au frottement de glissement entre les surfaces en contact.
- ❖ à roulement où le contact s'effectue par l'intermédiaire de billes ou de rouleaux contenus dans des cages. On a là un phénomène de frottement de roulement qui permet une plus grande charge sur les paliers et une plus grande vitesse de rotation.

1.6. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté en première partie les principaux éléments de constitution du moteur asynchrone à cage d'écureuil, ce moteur qui s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction. On a également donné un aperçu sur le bilan énergétique et les caractéristiques mécaniques de cette machine.

On a représenté les courbes caractéristiques en fonction des différents paramètres de la machine, qui montrent que le point de fonctionnement statique dépend exclusivement des caractéristiques du réseau, de la machine, et de la charge entraînée. Bien entendu toute variation des caractéristiques de la machine, de la charge, et du réseau d'alimentation se traduira par un déplacement de point de fonctionnement. Les accélérations et décélérations dépendent, elle aussi, exclusivement des caractéristiques de la machine, de la charge et du réseau d'alimentation.

Comme deuxième partie on a tenu à exposer brièvement les éléments traditionnels qui sont liés à l'arbre rotorique pour assurer la transmission du mouvement et de la puissance mécanique à la charge mécanique du procédé technologique.

Chapitre 2 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES ANOMALIES ET DES METHODES DE DIAGNOSTIC DES ENTRAINEMENTS ELECTROMECHANIQUES A BASE DE MOTEURS A INDUCTION

2.1.Introduction

Un défaut dans un élément peut résulter d'une usure normale, d'une mauvaise conception, d'un mauvais montage (désalignement), d'une mauvaise utilisation, ou d'une combinaison de ces différentes causes [19].

Ce Chapitre s'intéresse aux anomalies rencontrées dans les entraînements tournants et plus précisément les défaillances courantes qui peuvent affecter l'unité motrice et son arbre rotorique ainsi que les composants tournants qui lui sont solidaires tels que les accouplements, les roulements, les courroies et les engrenages qui assurent le transfert de la puissance mécanique conformément aux exigences de la charge mécanique.

Le fonctionnement du moteur est lié à chaque instant à son état. Dans les entraînements électromécaniques, si un défaut n'est pas détecté suffisamment tôt, il peut entraîner la dégradation complète du moteur et par conséquent immobiliser tout le système d'entraînement.

2.2. Les types de défauts du moteur asynchrone et des organes tournants

2.2.1.Défaillances de la machine asynchrone

Quoique robuste, la machine asynchrone peut présenter différents types de défauts qui peuvent être classés comme suit [19,20,21] :

- Les défauts du stator qui résultent d'un défaut dans un ou plusieurs enroulements de phase statorique, ou d'un mauvais raccordement des enroulements statoriques.
- Les défauts rotoriques: cassure de barres de la cage rotorique, rupture des jonctions de l'anneau de court-circuit.
- Les irrégularités statiques et/ou dynamiques dans l'entrefer pouvant avoir comme conséquence une bande de frottement entre le rotor et le stator, endommageant sérieusement le stator et ses enroulements.
- Les défauts des roulements du moteur

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

Dans le but d'une présentation synthétique, ces défauts peuvent se classer en deux familles principales, les figures (2.1) et (2.2) regroupent ces causes [22, 2, 23]

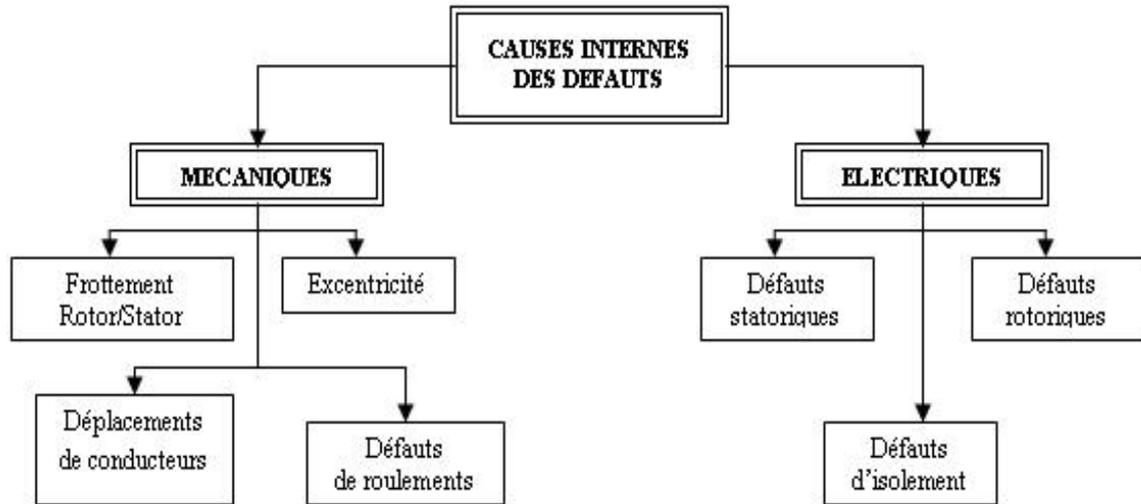


Figure 2.1 Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

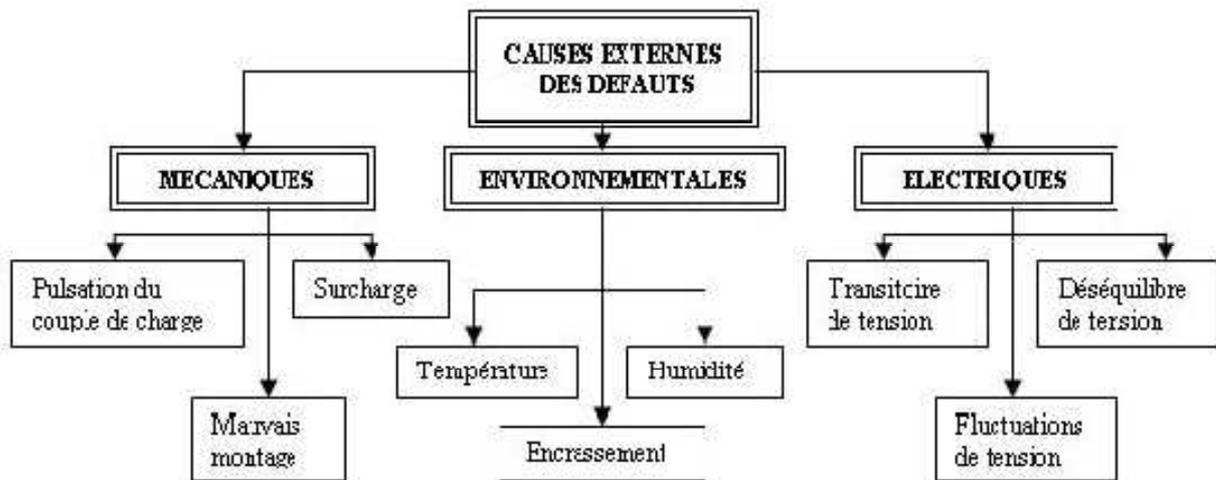
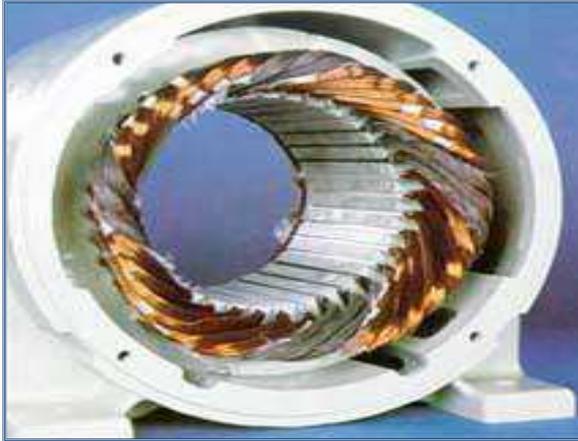


Figure 2.2 Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

2.2.1.1. Défauts statoriques

L'apparition d'un défaut au niveau du stator de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, par exemple, les défauts d'isolement dans un enroulement. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

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



(a)



(b)

Figure 2.3 Ouverture dans une phase du stator (a) et court-circuit entre phases (b)



(a)



(b)

Figure 2.4 Déséquilibre de l'alimentation (a) et endommagement dû à la surcharge (b)



(a)



(b)

Figure 2.5 Masse dans l'encoche (a) et Dégradation causée par une surtension (b)

2.2.1.2. Défauts Rotoriques

Pour un rotor à cage les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit (figure 1.6). Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues par exemple à une surcharge mécanique (démarrages fréquents...), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures) [24, 25]. Ce défaut fait apparaître des oscillations.

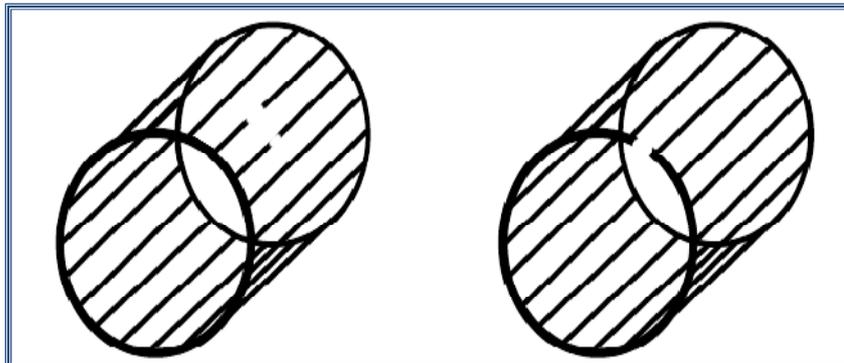


Figure 2.6 Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit.

2.2.1.3. Défaut d'Excentricités.

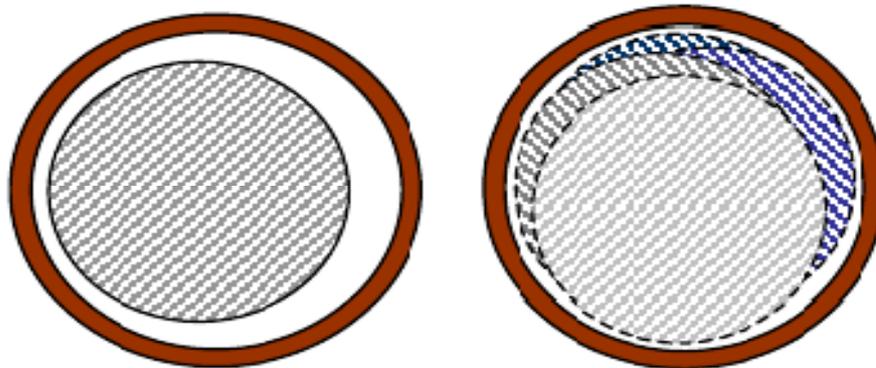


Figure 2.7 Défauts d'excentricité statique et dynamique.

Une analyse vibratoire, une analyse par ultrasons, une analyse fréquentielle des courants absorbés par les moteurs électriques d'entraînement ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permettent de détecter ces types de défaillance.

Nous pouvons trouver dans la littérature des ouvrages très complets qui traitent ces divers problèmes [26, 27, 28]. Le tableau 2.1 [29] présente un peu plus explicitement les causes provoquant les défauts statoriques et rotoriques.

	Défauts	Causes
Défauts statoriques	Vibration du support	Un déséquilibre magnétique, mouvement des enroulements, un déséquilibre de l'alimentation, surcharge, mauvaise installation, un contact avec le rotor.
	Un défaut entre le stator et la carcasse	Écrasement des spires par la carcasse, le cycle thermique, une abrasion de l'isolant, présence de points anguleux dans les encoches, un choc.
	Défaut d'isolation	endommagement de l'isolant lors de l'insertion des enroulements, démarrage fréquent, condition de température ou d'humidité extrême.
	Court-circuit inter spires	Température excessive, humidité, vibration, sur-tension.
	Court-circuit inter phases	Défaut d'installation, haute température, alimentation déséquilibrée, contrainte d'écrasement au niveau des enroulements.
	Déplacement des conducteurs	choc dû à un défaut, démarrage fréquent, vibration des têtes de bobines.
	Défaillance des connecteurs	Écrasement des conducteurs, vibration excessive.
Défauts rotoriques	Défaut de roulements	Mauvaise installation, déséquilibre magnétique, perte de lubrifiant, haute température, manque de propreté, charge déséquilibrée.
	Rupture de barres	Déséquilibre magnétique, régime transitoire à longue durée, fatigue thermique.
	Défaut du circuit magnétique	Défaut de fabrication, fatigue thermique, surcharge.
	Désalignement des roulements	Défaut de couplage, surcharge, mauvaise installation, jeu au niveau des paliers.
	Désalignement du rotor	Mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défaut de roulements.
	Roulements mal lubrifiés	Température excessive, mauvaise qualité de lubrifiant.
	Déséquilibre mécanique	Mouvement des anneaux de court-circuit, problème d'alignement.

Tableau 2.1 Les causes des défauts de la machine asynchrone.

2.3. Les Défauts mécaniques des principaux organes de liaison dans les entraînements électromécaniques

2.3.1. Le Déséquilibre massique ou « Balourd »

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor « figure 2.6 ». On dit que le rotor présente un balourd.

Ce balourd provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage, ou sont la conséquence du déséquilibre massique de la charge que le moteur est supposé entraîner.

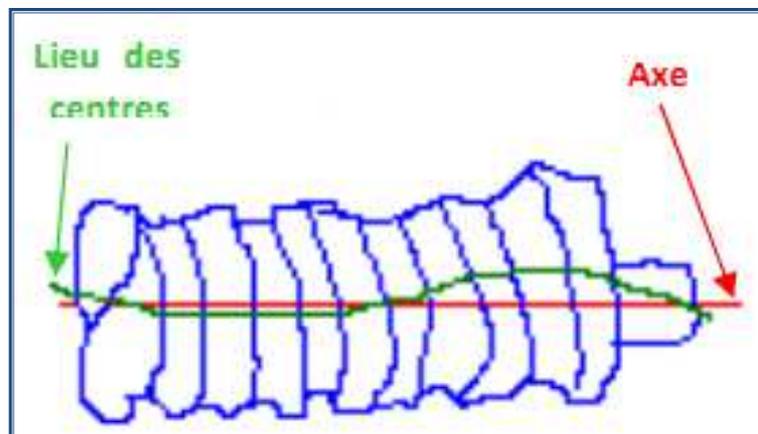


Figure 2.8 Image Vibratoire théorique d'un balourd

Soit un rotor parfaitement en équilibre. Mettons une masse à un endroit du rotor « Figure 2.9 ». Le rotor présentera un déséquilibre même à l'arrêt. On parlera de balourd statique. Si le rotor est en rotation, la masse exercera une force radiale proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor

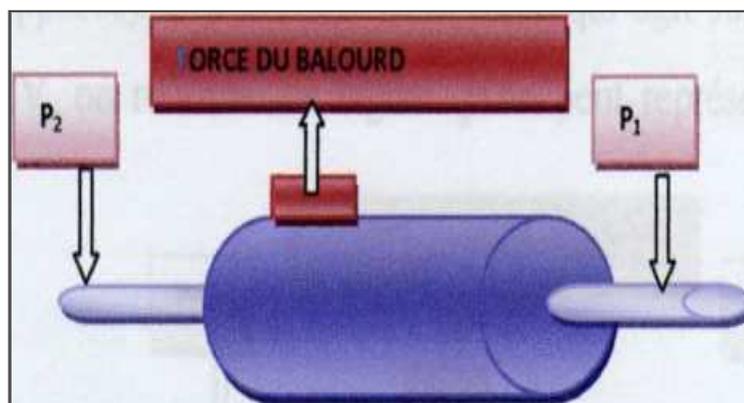


Figure 2.9 Balourd statique.

Contrairement au cas du balourd statique, le rotor sera parfaitement en équilibre si le rotor ne tourne pas. Quand le rotor commence à tourner, les deux forces génèrent un couple « ces forces de même grandeur, tournent en effet à la même vitesse de rotation mais dans une direction opposée ».

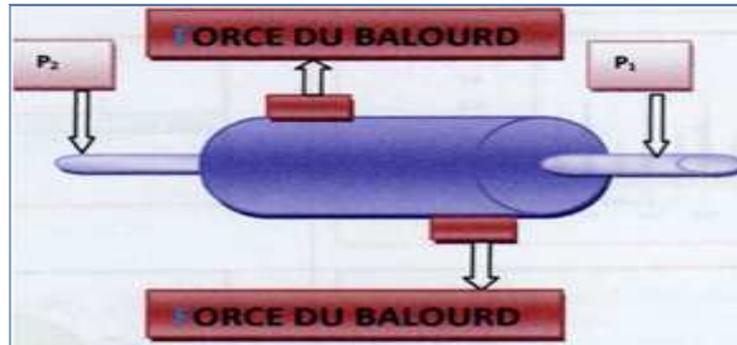


Figure 2.10 Balourd dynamique.

2.3.2. 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



Figure 2.11 Désalignement des arbres.

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

- **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.

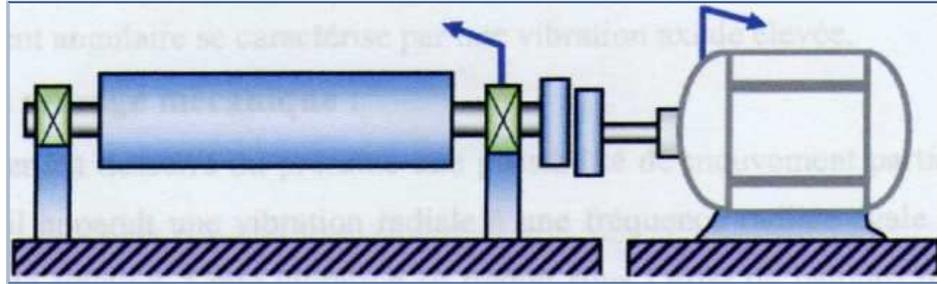


Figure 2.12 Image de désalignement parallèle.

- **Désalignement angulaire** : Il se produit quand l'axe de rotation de deux machines a un angle différent.

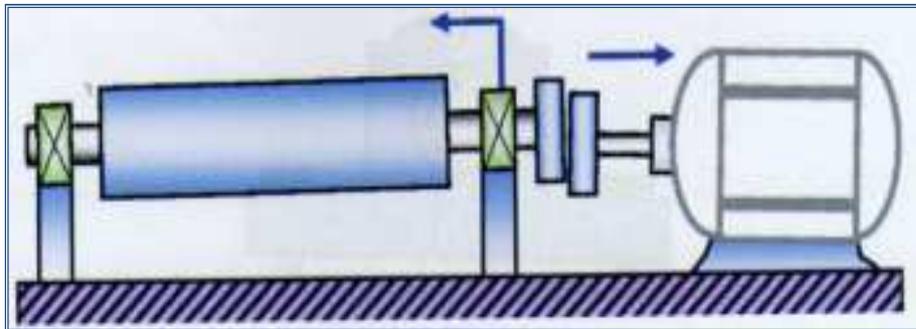


Figure 2.13 Image de désalignement angulaire.

2.3.3. Désalignement des paliers

Les axes des deux paliers d'un même corps de machine ne sont pas concentriques « figure 1.19 ». Cette anomalie peut être la conséquence d'un défaut de montage d'un palier, mais également d'un mauvais calage des pattes de fixation ou d'une déformation de châssis « par exemple à la suite de contraintes thermiques », qui se traduit par une flexion de l'arbre du rotor.

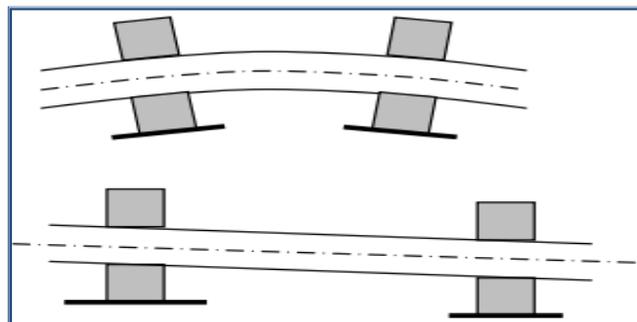


Figure 2.14 Désalignement de paliers se traduisant par une flexion de l'arbre.

2.3.4. Mauvais serrage mécanique

Lorsqu'un palier est desserré ou présente une possibilité de mouvement partiel dans le plan radial, il se traduit sous l'effet d'un balourd initial et peut prendre une amplitude vibratoire élevée en fonction du degré de desserrage du palier.

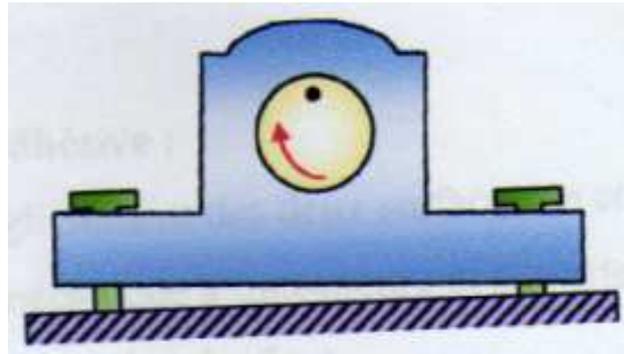


Figure 2.15 Image de mauvais serrage mécanique.

2.3.5. 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 2.16) :

- 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.



Figure 2.16 Différents types d'engrenage.

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 pour les dents cémentées.
- 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 2.17 Défauts réels d'engrenage localisés.

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

2.3.6. Défauts des roulements [18, 30, 31, 32]

Souvent pour le guidage en rotation, de nombreuses machines sont équipées de paliers de roulements car ils présentent une meilleure solution pour lutter contre le frottement pour les organes de machines en mouvement de rotation. Les roulements en général se constituent par:

- Bague extérieure.
- Bague intérieure.
- Cage, Bille.

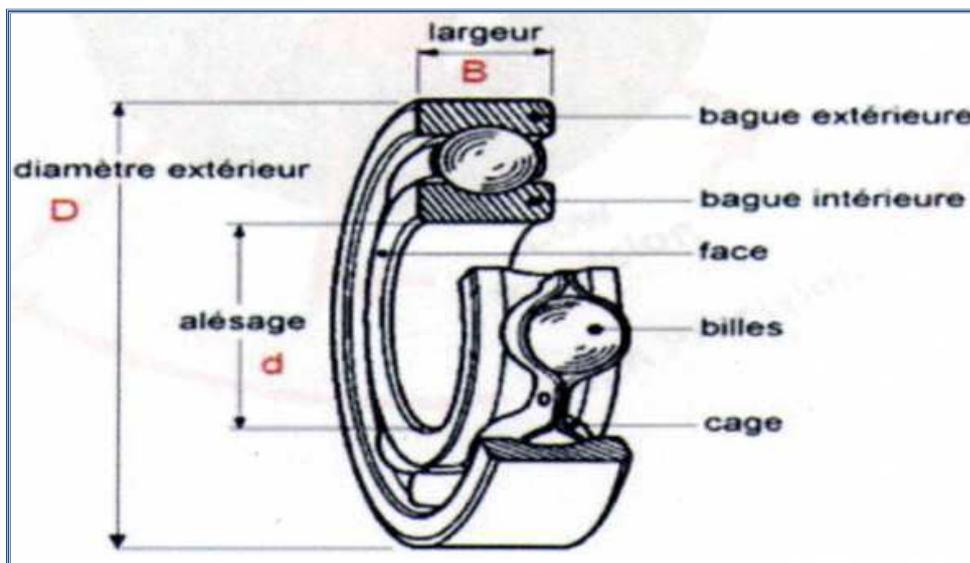


Figure 2.18 Roulement à billes.

Dans la plupart des cas, la dégradation se traduit par un écaillage d'une des pistes ou d'un élément roulant du roulement, produisant un choc à chaque passage.

2.3.7. Ecaillage

Les pressions importantes entre les éléments roulants et les bagues conduisent à des fissures, leur jonction en surface produit des écaillages qui provoquent des arrachements de matière, l'angle de la zone de charge dépend de la précision du roulement.

L'écaillage peut se produire par:

- ⊕ Flexion du rotor.
- ⊕ Serrage excessif des bagues intérieures.
- ⊕ Serrage excessif des bagues extérieures.

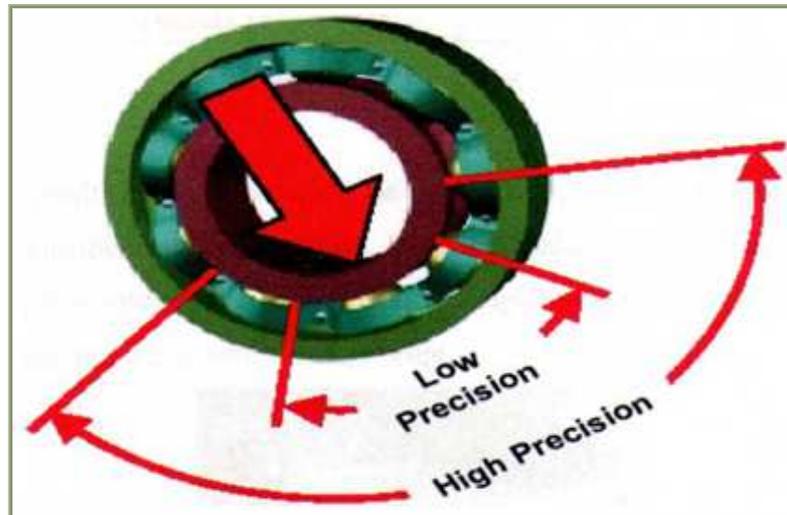


Figure 2.19 L'angle de la zone de charge dépend de la précision du roulement.

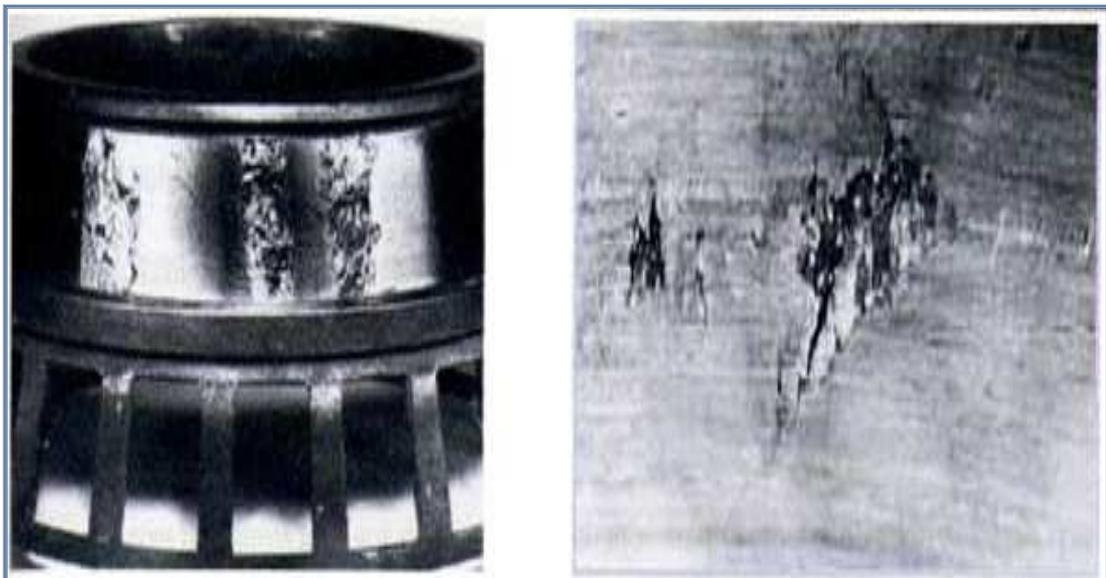


Figure 2.20 Ecaillage de fatigue et Ecaillage superficiel.

2.3.8. Détérioration indépendante de la fatigue

2.3.8.1. Usure

Que les roulements soient lubrifiés ou non, le roulement sans glissement des éléments roulants sur les bagues extérieures et intérieures n'est pas assuré, le film d'huile peut se rompre et des glissements entraînent l'usure.

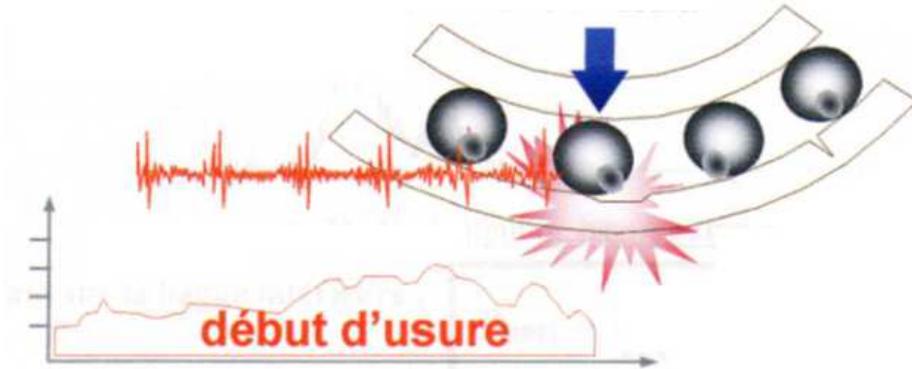


Figure 2.21 Usure.

2.3.8.2. Grippage

Le grippage résulte d'un manque de lubrifiant ; les contacts métal-métal entraînent des échauffements qui facilitent les microsoudures. Une graisse durcie, une usure qui entraîne la rotation des rouleaux ou des aiguilles autour d'axes non parallèles à l'axe des bagues peuvent conduire à un grippage.

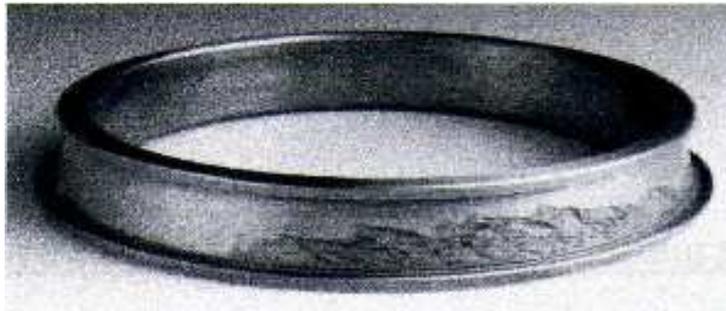


Figure 2.22 Grippage.

2.3.8.3. Avarie de cage

Les cages sont fragiles, lors du montage du roulement elles peuvent subir des déformations susceptibles d'entraîner le coincement des éléments roulants, le montage peut également conduire à leur rupture.

- Déversement de Bague Extérieure.
- Déversement de Bague Intérieure.
- Déversement simultané des deux Bagues.

2.4. Etude Statistique des Anomalies affectant le moteur asynchrone

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de faible et moyenne puissance (**50KW à 200KW**) a donné les résultats suivants (Fig. 2.23) [33, 16]

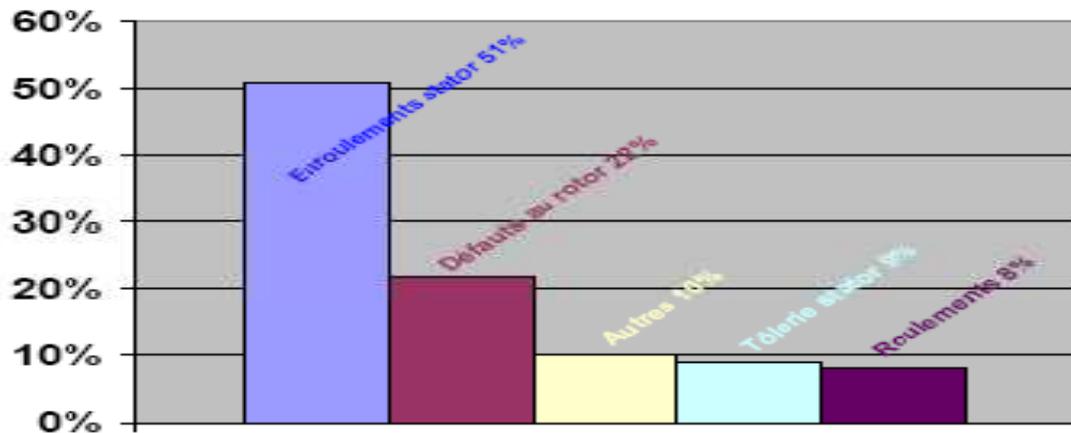


Figure 2.23 Répartition des pannes des moteurs de faible et moyenne puissance.

Les défauts électriques statoriques sont les plus rencontrés dans ces types de machines électriques. Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (**100KW à 1MW**) a donné les résultats suivants (Fig. 2.24) [16, 9]

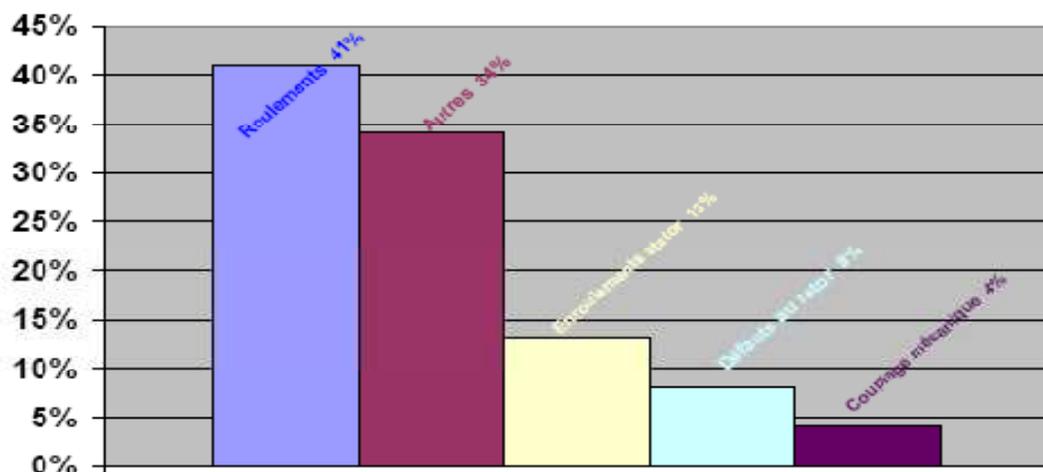


Figure 2.24 Répartition des pannes des moteurs de fortes puissances.

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de moteurs et c'est ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue [34].

D'autres études ont été effectuées sur la fiabilité des machines électriques réalisées par différents groupes industriels. L'étude principale, effectuée par la compagnie "General Electric", a été publiée dans EPRI (Electric Power Research Institute) en 1982 [EPR82]; elle couvre environ 5000 moteurs, dont approximativement 97% étaient des moteurs asynchrones triphasés à cage. Il est connu que l'occurrence d'un type quelconque de défauts dépend fortement de l'application spécifique de la machine. Par exemple, il a été constaté que dans les moteurs asynchrones à cage, les défauts de la cage rotorique sont plus élevés que les défauts d'enroulement statorique pour les applications où la machine est fréquemment arrêtée et démarrante sous une charge importante telles que dans les machines à outils et les celles utilisées dans industries minières et les forages.

Le travail de Thorsen et Dalva [9], a mis en évidence la distribution de défauts parmi les organes défectueux dans 483 grands moteurs asynchrones fonctionnant dans un même domaine lié à l'industrie pétrochimique. De tels moteurs fonctionnent très souvent en conditions extrêmes dans des activités sous-marines. Ils sont souvent directement amorcés, ce qui génère de grands courants de démarrage et des variations de couple assez importantes.

Ces conditions sont nocives pour le moteur, et mènent à l'usure rapide des différents composants de la machine. En Comparant les résultats de ce travail à EPRI, il apparaît clairement que l'occurrence d'un type spécifique de défaut dépend considérablement de l'application spécifique de la machine et de l'environnement de fonctionnement. Il est aussi important d'avoir une idée de la dépendance de la panne à l'environnement.

Thorsen et Dalva indiquent que le taux de panne pour des moteurs utilisés dans un milieu ambiant humide (usines terrestres et en mer), peut-être 2 à 5 fois plus grand que le taux d'échec pour des moteurs utilisés à l'intérieur.

L'étude menée par [8] sur les moteurs à induction à cage d'écureuil, exploitées par exemple dans le domaine de l'industrie pétrochimique, nous révèle que certaines anomalies susceptibles d'affecter les machines de grande puissance sont plus courantes que d'autres.

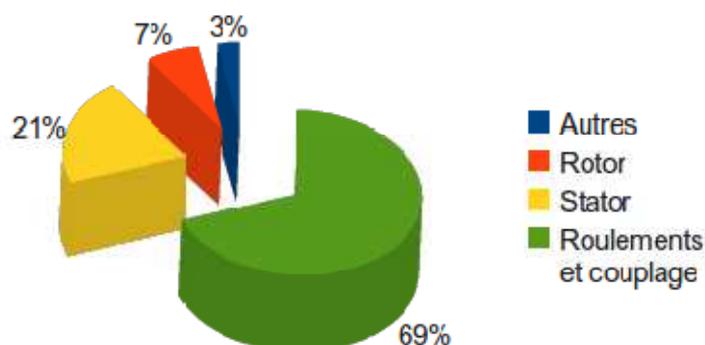


Figure 2.25 Figure. 2.25.

Cette répartition (fig. 2.25) montre que les défauts des machines de grandes puissances proviennent principalement des roulements et du bobinage statorique, ceci est dû aux contraintes mécaniques plus importantes dans le cas de ces machines et la forte demande en courant au démarrage de ces moteurs de moyenne tension.

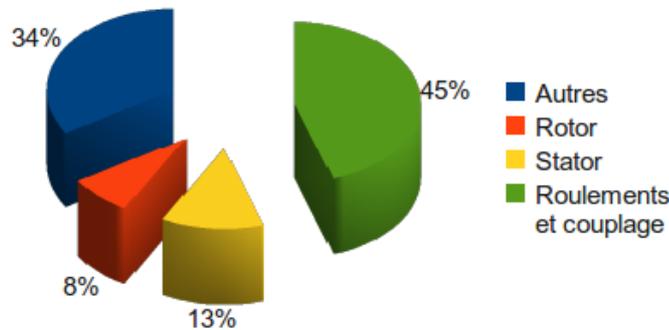


Figure 2.26 Pourcentage des défauts (1995)

Comparés aux résultats issus de publications plus anciennes réalisés par [9] sur des machines de **100KW à 1MW**, il est à noter que la répartition des défauts a changé [2] du fait des conditions de fabrication des moteurs. Les défauts électriques dans le stator et le rotor sont de moins en moins fréquents, la principale source de défaillances est constituée actuellement par les défaillances mécaniques (roulements, excentricité, balourd, désalignements...). Il est à remarquer que ces défauts sont très sensibles aux conditions d'exploitation et que leurs origines peuvent être très variées [1]. Contrairement à la conception du stator, la conception du rotor à cage et la fabrication ont peu changé au fil des années. Les cas de rupture du rotor comptent environ **10%** du total des défaillances du moteur asynchrone [18, 35, 36, 37]; Cependant, dans le domaine du diagnostic de défaut et la surveillance des machines électriques, la plupart des recherches présentée dans la littérature traite les défauts du rotor, alors que les défauts mécaniques (*excentricité, palier, roulement, balourd, désalignement, fixation,..*) comptant plus de **50%** des pannes des entraînements électriques ne sont pas aussi largement étudiés. L'attention suscitée au défaut de la cage peut être due au fait que les composantes fréquentielles des défauts sont très bien définies et que leur modélisation numérique est maîtrisée comparée aux défauts mécaniques internes et externes au moteur asynchrone d'entraînement. Dans la littérature, des statistiques ont été émises concernant les défauts qui peuvent affecter la machine.

La classification se fait selon des critères précis mais diffère d'un auteur à un autre comme par exemple le critère des variations dues à l'amélioration des isolants. Pour [38], (voir figure 2.27) plus de **50%** de défauts affecte les roulements, environ **16%** comme des défauts localisés au stator, **5%** apparaîtront au rotor et **2.5%** seront des défauts de l'axe et d'accouplement.

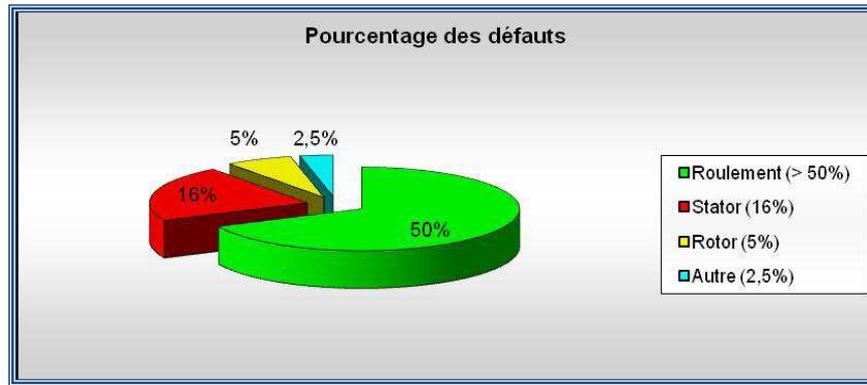


Figure 2.27 Répartition des défauts selon [38].

Dans l'article de [39], on trouve une répartition des défauts que peut rencontrer la machine de la manière suivante:

- Les défauts statoriques : **40%**, les défauts rotoriques pour presque : **20%**,
- Les pannes de types mécaniques pour presque : **20%** et autres pour environ : **10%**.

2.5. Intérêt du diagnostic: Synthèse des Méthodes de Diagnostic

2.5.1. Méthodes de Détection des défauts de Moteur asynchrone.

Tous les types de défauts évoqués se rapportent habituellement à la détérioration progressive de la machine qui peut mener à l'immobilisation de celle-ci s'ils ne sont pas détectés au moment opportun et à leur naissance.

Pour détecter de tels défauts, plusieurs méthodes de diagnostic ont été développées impliquant plusieurs domaines scientifiques et technologiques. Elles peuvent être décrites comme suit [40, 19] :

1. Surveillance du champ électromagnétique.
2. Mesures de la température.
3. Rayonnement infrarouge.
4. Surveillance du bruit et de vibration.
5. Analyse chimique.
6. Mesures acoustiques.
7. Analyse de la signature du courant (MCSA).
8. Méthodes basées sur le modèle électrique de la machine, intelligence artificielle, et Réseau de neurones.

2.5.2. Panorama des Méthodes de diagnostic des machines asynchrones [2].

Les moteurs à induction jouent de nos jours un rôle important dans toutes les applications industrielles. Assurer la disponibilité et la sûreté de fonctionnement de celles-ci est une tâche fondamentale. Il est donc nécessaire de développer des systèmes permettant de surveiller et de diagnostiquer l'état de santé de ces dispositifs. La surveillance et la supervision ne doivent pas se limiter à la machine électrique seule, en effet cette machine fait toujours partie de tout un processus industriel. Assurer la sûreté de fonctionnement fait partie de la supervision du processus industriel.

Une fois que les couches de supervision et de diagnostic ont rempli leur rôle en détectant et en identifiant la défaillance, la deuxième étape est d'agir sur la commande pour rattraper cette dégradation du fonctionnement, cette intervention se faisant à plusieurs niveaux selon la sévérité et le caractère destructeur de la défaillance.

Ces méthodes de diagnostic appliquées aux machines électriques sont classées en deux grandes catégories, celles qui utilisent un modèle analytique du système et celles qui se dispensent de ce modèle. L'approche analytique est plutôt inspirée par les automaticiens, alors que les communautés du génie électrique et du traitement du signal préfèrent s'intéresser à des méthodes plus heuristiques.

2.5.2.1. Méthodes de diagnostic avec modèle analytique

Ces méthodes de détection reposent sur des connaissances a priori du système. Elles supposent la connaissance des modèles et des paramètres représentant le processus physique à étudier. La comparaison des signaux expérimentaux représentant le fonctionnement du système et des signaux générés par les modèles (ou des paramètres estimées) permet la détection ainsi que l'identification de la défaillance susceptible de se produire.

Ces techniques supposent la connaissance de la plage de variation de ces modèles et de ces paramètres selon les conditions de fonctionnement du système. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories :

- *Techniques d'estimation d'état*
- *Technique de génération de résidu*
- *Techniques d'identification*

Cette première famille de méthodes de diagnostic nécessite la connaissance du comportement dynamique de la machine à l'aide d'un modèle de connaissance. Toutefois, ces méthodes ne permettent pas d'étudier tous les défauts de la machine (*défauts de roulements par exemple*).

2.5.2.2. Méthodes de diagnostic sans modèle à priori.

Ces méthodes de diagnostic sans modèle sont basées sur le suivi et l'analyse des grandeurs telles que les courants, les vibrations, les flux et le couple. Elles ne nécessitent pas forcément de modèle précis du système mais reposent plutôt sur une reconnaissance de signatures. Les signatures de défauts, obtenues par modélisation ou par mesure sur maquette, sont généralement

classées dans une base de données. L'analyse est réalisée par une interprétation du type signal ou par système expert...Les défauts étudiés par ces méthodes de diagnostic sont: la rupture de barres ou de portions d'anneaux au rotor, l'excentricité statique et dynamique, la défaillance des paliers, le court-circuit entre spires au stator.

2.5.2.2.1. Méthode par Traitement de Signal (MTS)

Pour des raisons de simplicité et d'efficacité, l'approche signal est très utilisée actuellement en diagnostic. Cette approche repose sur la connaissance du comportement du système sain, elle est ensuite comparée avec les signaux mesurés. Les méthodes courantes d'analyse des signaux de diagnostic en régime transitoire et en régime permanent sont l'analyse spectrale, le spectrogramme, L'analyse temporelle et la distribution de Wigner-Ville [41].

2.5.2.2.2. Méthode par Intelligence Artificielle (MIA)

L'intelligence artificielle est de plus en plus utilisée dans le domaine de la supervision et du diagnostic, elle a permis d'augmenter l'efficacité et la stabilité du diagnostic. Dans le domaine de la supervision des machines électriques, les industriels et les chercheurs ont de plus en plus recours à ce genre de technique pour augmenter l'efficacité du système [42, 43].

En fait, le terme « *Intelligence Artificielle* » comprend diverses techniques telles que les systèmes experts, les réseaux de neurones, la logique floue, qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés pour améliorer leur capacité.

2.5.3. Etude Bibliographique des travaux sur le Diagnostic des Machines asynchrones

Durant les trois dernières décennies le diagnostic de la machine asynchrone a connu un engouement croissant de la part de la communauté scientifique. L'approche modèle consiste en la modélisation analytique de la machine [44]. Ensemble, les travaux de Lipo [45, 46, 47] et de Cornell [48] portent sur la modélisation fine de la machine. Par contre, les études de Ritchie [49] se basent sur le modèle multi-enroulements. Ces travaux ont largement enrichi la modélisation fine orientée vers le diagnostic. Les recherches de Filippetti pour le diagnostic des défauts du moteur à induction par l'utilisation de la technique de l'intelligence artificielle [50] et les réseaux de neurones [19].

L'approche système consiste à l'extraction et à la classification ou l'interprétation des résultats. Une forme d'automatisation de la procédure de diagnostic depuis l'acquisition jusqu'à la prise de décision a été développée et présentée [13]. Les travaux se rapportant au sujet de la surveillance et du diagnostic ont commencé dès le début des années soixante-dix [45][46][48].

En 1984, Kerszenbaum [51] a présenté, analytiquement et expérimentalement, des résultats sur la présence de courants inter-barres très importants dans les machines où les impédances des inter-barres sont similaires à celles des barres rotoriques. Ces courants sont produits par la présence d'une cassure de barre ou d'une portion d'anneau. En 1985, O' Donnell [52] a présenté une étude statistique sur les causes des défauts dans la machine asynchrone.

Bonnett, en 1992 [24], a exposé une étude d'identification des différentes causes de défauts dans le stator et le rotor à cage. Une analyse des défauts de roulements est publiée ultérieurement par le même auteur.

En 1993, Filippetti, [53] a introduit les réseaux de neurones, pour le diagnostic des défauts rotoriques de la machine asynchrone, notamment pour la détection et l'estimation du nombre de barres cassées. Schoen[54]a présenté une nouvelle méthode pour la détection en ligne des défauts dans la MAS par la surveillance du courant statorique en se basant sur les réseaux de neurones artificiels. Ses essais prouvent l'intérêt des réseaux de neurones pour la classification et la prise de décision. Une autre étude statistique des défauts a été réalisée par Thorsen, [9], sur des machines de grande puissance utilisées dans l'industrie pétrochimique.

En 2000, Naït Saïd [55] a introduit le filtre de Kalman dans une étude paramétrique pour la détection des barres cassées en vue de l'estimation, sans capteur, de la résistance rotorique. Une autre étude [56] dans laquelle il a présenté une méthode pour le diagnostic des défauts électriques, basée sur l'approche du vecteur de Park en utilisant la technique des réseaux de neurones artificiels comme critère de décision pour la discrimination entre les cas sain et défaillant. Devanneaux[57] a implanté un modèle transitoire de machine à cage d'écureuil avec défauts rotoriques, en utilisant une approche basée sur le couplage magnétique des circuits électriques. Bachir [58] a abordé une étude sur le diagnostic et la surveillance de la machine asynchrone par estimation paramétrique. Il a présenté les différents outils théoriques nécessaires à l'identification et à la modélisation en vue du diagnostic des procédés industriels. Cette méthodologie de surveillance est appliquée expérimentalement au cas élémentaire d'une bobine à noyau de fer. Finalement, il a proposé un modèle de défauts simultanés stator/rotor « court-circuit de spires dans les enroulements, ruptures de barres,... » Pour une surveillance généralisée de la machine.

L'auteur [38] a appliqué la reconnaissance de formes (*RdF*) pour le diagnostic des défauts de la machine asynchrone. Didier [44]a développé, pour le diagnostic et la surveillance de la machine asynchrone en absence et en présence de défaillances, un modèle basé sur le couplage magnétique des circuits électriques. Trois méthodes de diagnostic sont présentées, pour détecter la présence du défaut au sein de la cage rotorique « *cassure de barres* ». La première est basée sur l'analyse du spectre fréquentiel du courant statorique. La deuxième méthode utilise l'information donnée par la phase du spectre du courant statorique. La troisième emploie l'information donnée par la phase de la transformée de Hilbert du module du spectre du courant statorique. Les résultats obtenus par les trois méthodes de diagnostic proposées sont validés expérimentalement.

En 2004, Ritchie [49] a proposé un système d'identification et de classification des défauts de la machine asynchrone. Ce système est basé sur les réseaux de neurones à base de fonction radiale (*RBF*). Le système développé par cet auteur permet la détection des défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone.

L'auteur [16] a proposé une méthode de sélection des paramètres basée sur un algorithme génétique. Il permet une réduction notable de la dimension de ce vecteur sans perte sensible d'information signal qui consiste à la détection d'indicateurs ou signatures de défauts. Cette opération est réalisée par l'extraction et la quantification des grandeurs électriques ou mécaniques mesurables d'indices fiables liées aux défauts. Des travaux ont été illustrés par la recherche

d'indicateurs internes « champ magnétique, .. » d'une part, et d'autres parts, par des indicateurs externes « tensions, courant, couple, vitesse... » .

L'approche développée, pour le diagnostic et la surveillance de la machine asynchrone en l'absence et en la présence de défaillances par un modèle basé sur le couplage magnétique des circuits électriques.

Hemsas kameleddine et al [59] ont présenté un nouveau modèle d'estimation sans capteurs des grandeurs non accessibles de la machine asynchrone en vue de la commande et la surveillance, en se basant sur les techniques de l'intelligence artificielle, telle que les réseaux de neurones artificiels et les réseaux neuro-flous. En outre, il a donné la notion de filtres de Kalman étendue neuro-floue pour l'estimation des paramètres internes de la MAS.

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé que les principales défaillances d'une machine asynchrone et des organes qui lui sont liés entraînent la plupart du temps un arrêt intempestif du procédé technologique. C'est pour pallier à ce problème que le diagnostic de défaut a pris une importance de plus en plus grandissante dans les milieux industriels.

Pour chaque type de défaut électrique ou mécanique, nous avons cité les causes principales, les mécanismes et les symptômes produits, ainsi que les techniques de détection.

Ce chapitre donne des informations sur les statistiques anciennes et récentes des défauts affectant les machines asynchrones. Par suite, une étude biographique a retracé des travaux réalisés par les chercheurs dans le domaine du diagnostic et de la commande robuste sur les entraînements électriques.

Les travaux sur le diagnostic des pannes des entraînements asynchrones à partir des mesures électriques ont traité en majorités les défauts électriques, tandis que les défauts mécaniques simples et multiples qui représentent plus de 60% des pannes du moteur asynchrone et particulièrement de moyenne tension n'ont pas fait l'objet de beaucoup de communications.

Vu la complexité des modèles analytiques des défauts mécaniques simples et en particulier combinés auxquels on s'intéresse dans le cadre du travail de diagnostic et de détection prédictives faisant l'objet de notre thèse. C'est la méthode sans modèle à priori utilisant le traitement de signal qui est choisie parmi toutes ces méthodes de diagnostic prédictif évoquées ci-dessus.

L'étude de l'effet des anomalies simples et combinées via les courants statoriques constitue la suite de cette thèse où nous proposerons une association d'approches pour le diagnostic et la détection prédictive correcte et fiable des défauts affectant l'entraînement électrique à base de moteur asynchrone (balourd, désalignement et défauts de roulements).

Chapitre 3 : MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE ET TECHNIQUES D'ANALYSE DU SIGNAL EN VUE DU DIAGNOSTIC DES DEGRADATIONS MECANIKES

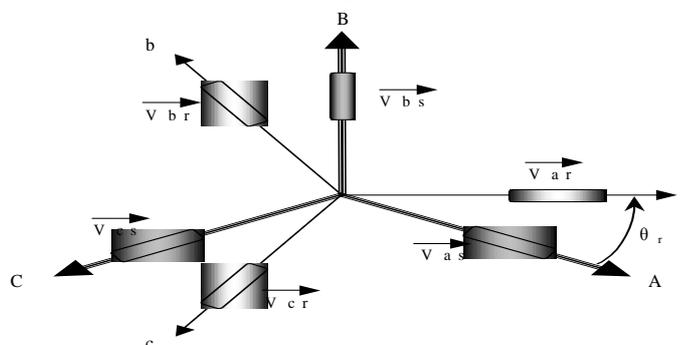
3.1.Introduction.

Dans ce chapitre, nous recherchons une meilleure compréhension des effets des défauts mécaniques sur le moteur électrique d'entraînement et comment s'effectue le transfert des informations mécaniques vers les grandeurs électriques. Il existe un certain nombre de papiers témoignant de la détection et du diagnostic des défauts mécaniques, basés sur l'analyse des courants d'alimentation de la machine. Nous proposerons une modélisation du transfert du défaut mécanique affectant le moteur asynchrone à cage et les éléments qui lui sont accouplés vers les quantités électriques. Dans un premier temps nous reprenons les équations électriques d'une machine asynchrone en régime sain et nous construisons un modèle de simulation sous MatLab et Simulink. Des résultats de simulation, dans le cas d'un fonctionnement sain de la machine asynchrone seront présentés.

3.2.Description mathématique de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée par deux circuits couplés électro-magnétiquement. Elle est représentée par un schéma équivalent vu du stator, analogue à celui d'un transformateur [61, 62, 63, 19]. Le principe de fonctionnement d'une machine asynchrone a été développé dans le chapitre précédent. Il est basé sur l'interaction électromagnétique du champ tournant, créée par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs du rotor sont dans le champ tournant. Cette interaction électromagnétique du stator et du rotor de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor. Le fonctionnement d'une machine asynchrone est comparable à celui d'un transformateur dont l'enroulement secondaire est tournant. Tout type de modélisation ne peut se faire sans effectuer quelques hypothèses qui font l'objet de la suite de cette partie. Nous développerons ensuite les équations des circuits électriques statoriques et rotoriques pour permettre la résolution numérique du modèle proposé.

3.2.1.Présentation d'une machine asynchrone:



3.1Représentation Vectorielle des enroulements de la Machine Asynchrone.

La machine asynchrone comporte trois bobinages au stator alimentés par un système de courants triphasés et trois bobinages au rotor court-circuités sur eux-mêmes traversés par un système de courants triphasé. Les axes de chaque système de bobinage sont décalés de **120°**

3.2.2. Equations électriques et magnétiques

3.2.2.1. Hypothèses simplificatrices :

Pour la mise en équations de la machine asynchrone, nous supposons que :

- Le bobinage est réparti de manière à donner une f.m.m sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux,
- Le circuit magnétique n'est pas saturé,
- L'entrefer constant,
- Les pertes fer négligeables.

Parmi les significations de ces hypothèses, on peut citer:

- Les flux sont additifs,
- Les inductances propres sont constantes,
- Il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

3.2.2.2. Equations des tensions.

Pour l'ensemble des enroulements statoriques et rotoriques, on écrira en notation matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{s1} \\ \phi_{s2} \\ \phi_{s3} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Ou bien :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \quad (3.2)$$

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

De même pour le rotor.

$$\begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{r1} \\ \phi_{r2} \\ \phi_{r3} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Ou bien:

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \quad (3.4)$$

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

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \quad (3.5)$$

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

3.2.2.3.Équations des flux :

Les hypothèses citées précédemment conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants.

Les équations des flux statoriques sous forme matricielle s'écrivent comme suit:

$$\begin{bmatrix} \phi_{s1} \\ \phi_{s2} \\ \phi_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_{sr} \cos(\theta) & m_{sr} \cos(\theta-4\pi/3) & m_{sr} \cos(\theta-2\pi/3) \\ m_{sr} \cos(\theta-2\pi/3) & m_{sr} \cos(\theta) & m_{sr} \cos(\theta-4\pi/3) \\ m_{sr} \cos(\theta-4\pi/4) & m_{sr} \cos(\theta-2\pi/3) & m_{sr} \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$[\phi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad (3.7)$$

$[M_{sr}]$ est la matrice des inductances mutuelles stator-rotor

De même pour les flux rotoriques :

$$\begin{bmatrix} \phi_{r1} \\ \phi_{r2} \\ \phi_{r3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_{sr} \cos(\theta) & m_{sr} \cos(\theta-4\pi/3) & m_{sr} \cos(\theta-2\pi/3) \\ m_{sr} \cos(\theta-4\pi/3) & m_{sr} \cos(\theta) & m_{sr} \cos(\theta-2\pi/3) \\ m_{sr} \cos(\theta-2\pi/4) & m_{sr} \cos(\theta-2\pi/3) & m_{sr} \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Ou bien

$$[\phi_r] = [L_r][i_r] + [M_{rs}][i_s] \quad (3.9)$$

On note que la matrice des mutuelles du rotor est obtenue en transposant celle du stator:

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad (3.10)$$

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

$$\overline{\phi}_s = L_s \overline{I}_s + M_{sr} \overline{I}_r \quad (3.11)$$

$$\overline{V}_s = R_s \overline{I}_s + j \omega_s \overline{\phi}_s \quad (3.12)$$

$$\overline{\phi}_r = L_r \overline{I}_r + M_{rs} \overline{I}_s \quad (3.13)$$

$$0 = R_r \overline{I}_r + j \omega_s g \overline{\phi}_r \quad (3.14)$$

L_s et L_r représentent respectivement l'inductance cyclique statorique et rotorique $M_{rs} = (3/2)m_{sr}$ est l'inductance mutuelle cyclique.

3.2.3. Schéma équivalent à une phase d'une machine asynchrone en régime permanent :

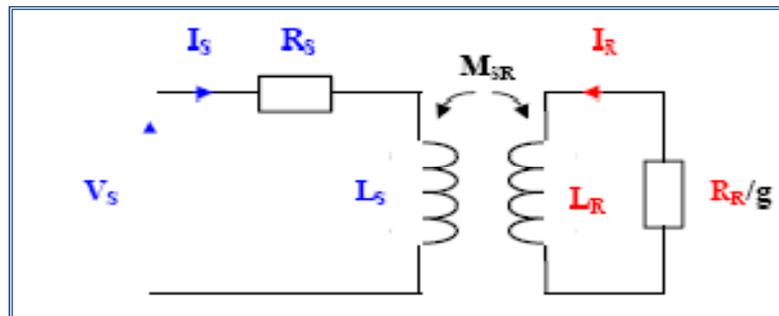
3.2.3.1. Modèle à inductances couplées :

En utilisant les relations (3.12), (3.13), (3.14) et (3.15), on peut écrire:

$$\overline{V}_s = R_s \overline{I}_s + j \omega_s L_s \overline{I}_s + j \omega_s M_{sr} \overline{I}_r \quad (3.15)$$

$$0 = \frac{R_r}{g} \overline{I}_r + j \omega_s L_r \overline{I}_r + j \omega_s M_{sr} \overline{I}_s \quad (3.16)$$

On déduit le schéma suivant:



3.2 Schéma équivalent d'une phase en régime permanent.

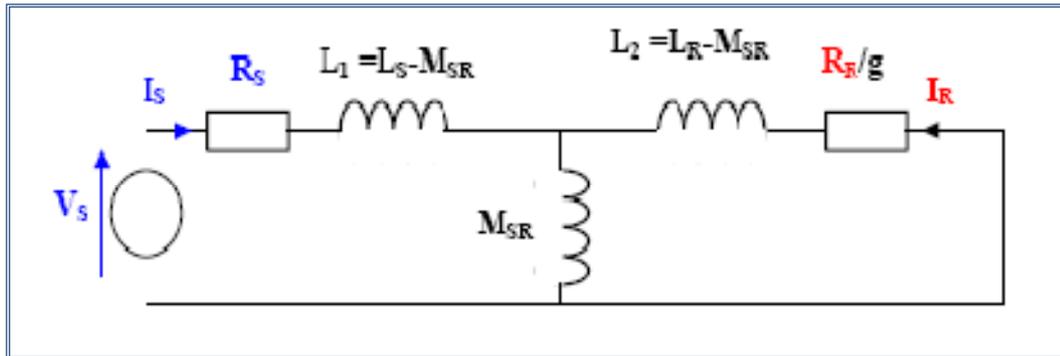
3.2.3.2. Modèle à inductances réparties :

Les équations (3.16), (3.17) peuvent être réécrites comme suit:

$$V_s = R_s \bar{I}_s + j \omega_s (L_s - M_{sr}) \bar{I}_s + j \omega_s M_{sr} (\bar{I}_r + \bar{I}_s) \quad (3.17)$$

$$0 = \left(\frac{R_r}{g}\right) \bar{I}_r + j \omega_s (L_r - L_{sr}) \bar{I}_r + j \omega_s M_{sr} (\bar{I}_s + \bar{I}_r) \quad (3.18)$$

Ces équations permettent de dessiner le schéma ci-dessous:



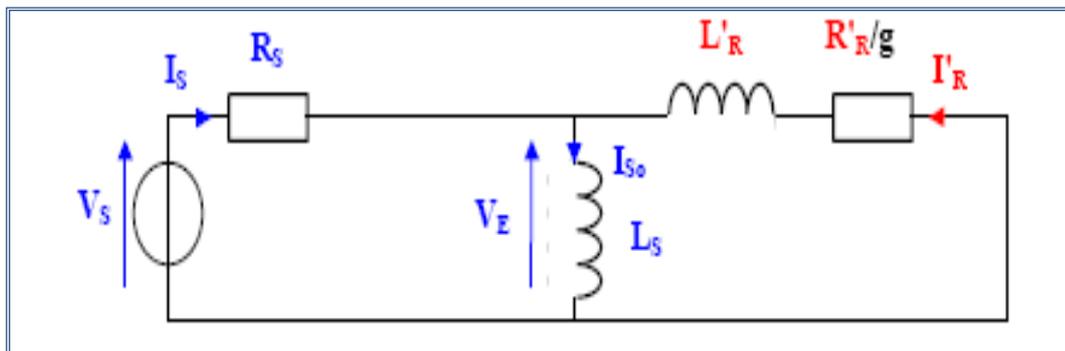
3.3 Schéma équivalent d'une phase.

L_1 : inductance cyclique de fuite du stator.

L_2 : inductance cyclique de fuite du rotor.

Dans un moteur sans fuites les inductances L_1 et L_2 sont nulles.

3.2.3.3. Modèle à fuites totalisées au rotor :



3.4 Modèles des fuites totalisées.

Par équivalence des deux schémas précédents (Fig. 3.3 et 3.4), on peut identifier les nouveaux paramètres du schéma ci-dessus.

I_{s0} : Courant absorbé à vide ($g=0$)

$$I'_r = \frac{M_{sr}}{L_s} I_r \quad (3.19)$$

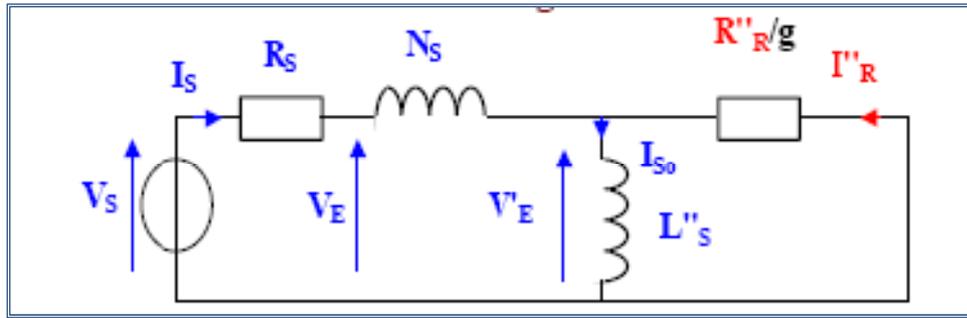
$$R'_r = \left(\frac{L_s}{M_{sr}}\right)^2 R_r \quad (3.20)$$

$$L'_r = \sigma \left(\frac{L_s}{M_{sr}}\right)^2 L_r \quad (3.21)$$

$$\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r} : \text{Coefficient de dispersion de } \mathbf{BLONDEL}$$

3.2.3.4. Modèle à fuites totalisées au stator :

On peut ramener les fuites au niveau du stator et on aura le schéma suivant.



3.5 Schéma équivalent ramené au stator.

L'équivalence de ce schéma avec le schéma de la (figure 3.5) nous conduit au calcul des nouveaux paramètres qui sont comme suit:

$$V'_E = j \omega_s \left(\frac{M_{sr}}{L_r}\right) \phi_r \quad (3.22)$$

$$L''_s = (1 - \sigma) L_s = \frac{M_{sr}^2}{L_r} = \left(\frac{M_{sr}}{L_r}\right)^2 L_r \quad (3.23)$$

$$R''_r = \left(\frac{M_{sr}}{L_r}\right)^2 R_r \quad (3.24)$$

$$N_s = \sigma L_s \quad (3.25)$$

3.2.4. Equation du couple électromagnétique

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

En se référant au schéma de (la figure 3.4), le couple électromagnétique en régime permanent s'écrit:

$$C_e = \frac{P_m}{\Omega} = 3 \frac{p}{\omega_s} \frac{R'}{g} (I'_r)^2 \quad (3.26)$$

$$\bar{I}'_r = \frac{V_s - R_s \bar{I}'_s}{\frac{R'_r}{g} + jL'\omega_s} \quad (3.27)$$

Si on néglige la résistance statorique on aura:

$$I'_r = \frac{V_s^2}{\sqrt{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + (L'\omega_s)^2}} \quad (3.28)$$

Pour un glissement faible on peut écrire:

$$C_e = 3 \frac{p}{\omega_s} V_s^2 \frac{g}{R'_r} \quad (3.29)$$

Le couple varie linéairement en fonction du glissement.

Le couple maximum correspond à:

$$\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 = (L'\omega_s)^2 \quad (3.30)$$

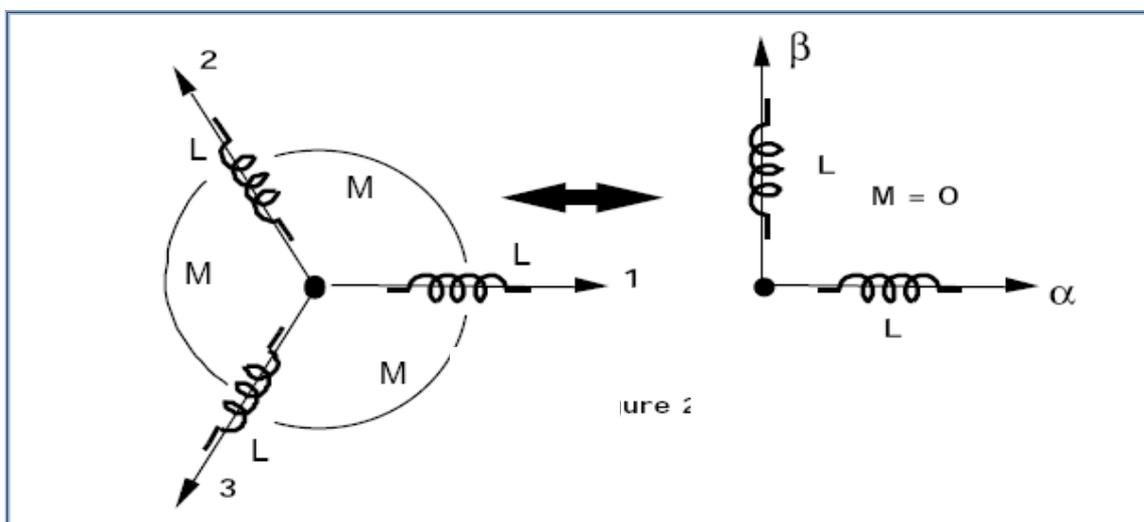
$$g_m = \frac{R'_r}{L'\omega_s} \quad (3.31)$$

On aura alors:

$$C_{e \max} = \frac{p}{L'_r} \left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2 \quad (3.32)$$

3.2.5. Transformation triphasé-biphasé :

Le but de l'utilisation de cette transformation est de passer d'un système triphasé **abc** vers un système biphasé **$\alpha\beta$**



3.6 Passage du système triphasé au système biphasé.

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

3.2.5.1. Transformation de Clarke :

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

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{23}} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \text{ c.à.d. } [X_{\alpha\beta}] = C_{23} [X_{abc}] \quad (3.33)$$

Avec :

$$C_{23} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Le passage inverse s'écrit:

$$[X_{abc}] = C_{32} [X_{\alpha\beta}] \text{ Avec } C_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

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

3.2.5.2. Transformation de Concordia :

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

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \xrightarrow{T_{23}} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \text{ c.à.d. } [X_{\alpha\beta}] = T_{23} [X_{abc}] \quad (3.36)$$

Avec :

$$T_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Le passage inverse s'écrit :

$$[X_{abc}] = T_{32} [X_{\alpha\beta}] \text{ Avec } T_{32} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

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

3.2.5.3. Transformation de Park :

3.2.5.3.1. Principe de la transformation de Park :

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

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

Le repère (**d, q**) est tournant ou fixe.

3.2.5.3.2. Matrices de passage :

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

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Sous forme plus compacte.

$$[X_{0dq}] = p(\theta)[X_{abc}] \quad (3.40)$$

$$p(\theta) = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

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

$$p(\theta) = 2/3 \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

3.2.5.3.3. Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone.

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

$$[V_{0dq}]_i = p(\theta)[V_{abc}]_i \quad (3.43)$$

$$[i_{0dq}]_i = p(\theta)[i_{abc}]_i \quad (3.44)$$

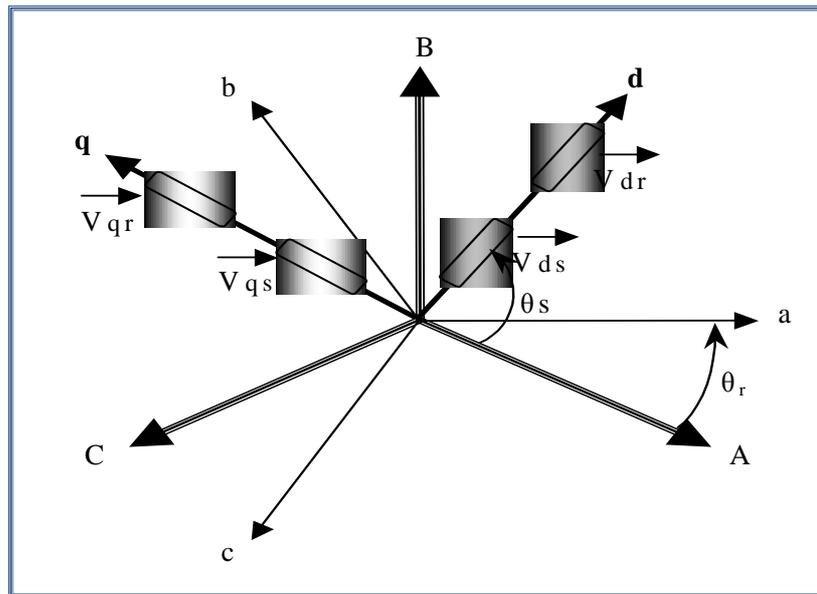
$$[\varphi_{0dq}]_i = p(\theta)[\varphi_{abc}]_i \quad (3.45)$$

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

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

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

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



3.7 Représentation vectorielle des enroulements de la Machine Asynchrone.

3.2.6. Equations Electriques :

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

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

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

Notons :

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

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

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

Nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s i_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\
 V_{qs} &= R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\
 0 &= R_r i_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\
 0 &= R_r i_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt}
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

3.2.7. Equations Magnétiques :

$$\begin{aligned}
 \phi_{ds} &= L_s i_{ds} + M i_{dr} \\
 \varphi_{qs} &= L_s i_{qs} + M i_{qr} \\
 \varphi_{dr} &= L_r i_{dr} + M i_{ds} \\
 \varphi_{qr} &= L_r i_{qr} + M i_{qs}
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

3.2.8. Expression du Couple Electromagnétique :

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

$$P_e = V_{s1} i_{s1} + V_{s2} i_{s2} + V_{s3} i_{s3} = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \tag{3.48}$$

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

$$\begin{aligned}
 P_e &= [R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq}] I_{sd} + [R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} + \omega_s \varphi_{sd}] I_{sq} \\
 P_e &= [R_s I_{sd}^2 + R_s I_{sq}^2] + [\frac{d\varphi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} I_{sq}] + [\omega_s (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd})]
 \end{aligned} \tag{3.49}$$

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:

$$P_e = C_e \Omega_s = \omega_s (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \tag{3.50}$$

$$C_e = p (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \tag{3.51}$$

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

3.2.9. Equation du Mouvement (ou Mécanique) :

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

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r \quad (3.52)$$

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

3.3. Modélisation sous forme d'état de la machine asynchrone

3.3.1. Représentation d'état :

La modélisation de la machine revient à mettre l'ensemble des équations régissent le fonctionnement de la machine sous forme d'état :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = [A][X] + [B][U] \quad (3.53)$$

- $[X]$: Vecteur d'état.
- $[U]$: Vecteur de commande
- $[A]$: Matrice d'évolution
- $[B]$: Matrice de commande

Cette forme dépend du type d'alimentation et des grandeurs à réguler (*flux rotorique ou statorique, courant, vitesse, couple*).

3.3.2. Modèle de la machine asynchrone alimentée en tension :

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

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

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} &= -R_s \cdot i_{ds} + V_{ds} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} &= -R_s \cdot i_{qs} + V_{qs} \end{aligned} \quad (3.54)$$

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

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

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} \left[\frac{p}{j} \varphi_{ds} \cdot i_{qs} - \frac{p}{j} \varphi_{qs} \cdot i_{ds} \right] - \frac{C_r}{j}$$

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

3.4. Modélisation des Défauts Mécaniques d'un Entraînement Electromécanique Asynchrone

3.4.1. Transmission du défaut Mécanique vers le courant statorique

En partant de l'hypothèse argumentée dans le paragraphe précédent nous montrons dans cette partie l'influence des variations de couple 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.

3.4.2. Effet sur la force magnétomotrice rotorique

En présence d'un défaut, le couple de charge C_{charge} peut être écrit comme la somme d'une partie constante et d'une partie oscillante à la fréquence caractéristique f_c :

3.4.3. Equations d'Equilibre Mécanique de l'Entraînement mécanique

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

$$C_{em} = C_{charge} \quad (3.55)$$

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 dynamique :

$$J d\omega_m / dt = C_{em} - C_{charge}$$

Avec

J : Moment d'inertie des parties tournantes.

ω_m : Vitesse angulaire mécanique du rotor ($\omega_m = p \omega$).

ω : Pulsation mécanique.

p : Nombre de paires de pôles.

Les paramètres J et C_{charge} dépendent directement de la machine étudiée et de sa charge.

Nous proposons ci-après un récapitulatif des équations électriques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone à cage.

$$C_{charge} = C_{const} + C = C_{const} + C_c \cos(\omega_c \cdot t) \quad (3.56)$$

Avec :

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

C_c : L'amplitude de l'oscillation liée à la sévérité du défaut.

L'équation d'équilibre des couples (3.56) nous permet de calculer la vitesse de la machine :

$$\omega_r(t) = \frac{1}{J} \int (C_{moteur} - C_{charge}) dt \quad (3.57)$$

En régime permanent, le couple moteur C_{moteur} (couple électromagnétique) est égal à la partie constante C_{const} du couple de charge et la vitesse angulaire est égale à ω_{r0} .

Nous pouvons donc écrire :

$$\omega_r(t) = \frac{1}{J} \int -C_c \cos(\omega_c t) dt + const. = -\frac{C_c}{J\omega_c} \sin(\omega_c t) + \omega_{r0} \quad (3.58)$$

Compte tenu de l'équation mécanique de la machine, le couple de charge oscillant conduit à des oscillations périodiques de période $1/fc$ de la vitesse rotorique.

L'angle mécanique θ_r du rotor s'obtient en intégrant la vitesse :

$$\theta_r(t) = \int \omega_r(t) dt = \frac{C_c}{J\omega_c^2} \cos(\omega_c t) + \omega_{r0} t + const \quad (3.59)$$

De même, les oscillations se propagent vers la position angulaire du rotor et possèdent la fréquence caractéristique f_c .

Dans le cas d'un stator triphasé d'une machine idéale, la distribution de courant surfacique est parfaitement sinusoïdale. Nous obtenons donc une force magnétomotrice statorique F_s qui ne contient que l'onde fondamentale.

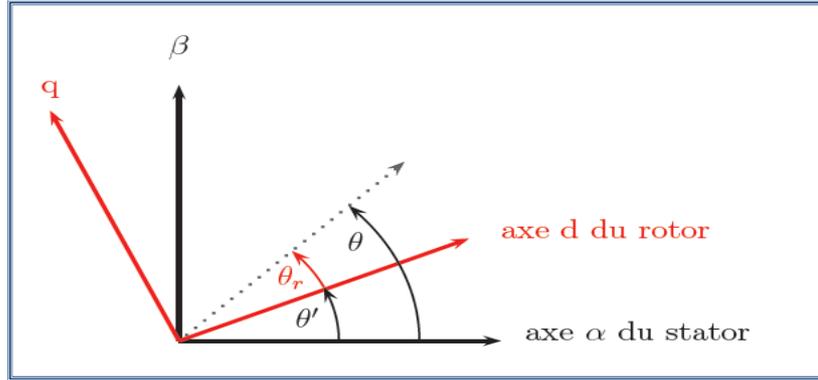
$$F_s = F_{s,1} \cos(p\theta - \omega_s t) \quad (3.60a)$$

Cette onde fondamentale tourne à la vitesse angulaire ω_s et possède une périodicité mécanique p égale au nombre de paires de pôles de la machine. Par la suite, nous désignerons cette périodicité mécanique comme le nombre de paires de pôles de l'onde.

La force magnétomotrice (**F.M.M**) rotorique dans un référentiel lié au rotor (R) (figure 3.8) est une onde avec p paires de pôles, tournant à la fréquence des courants induits rotoriques. Cette fréquence est égale à ω_s , donc :

$$F_r^{(R)} = F_{r,1} \cos(p\theta' - g\omega_s t) \quad (3.60b)$$

Avec g = glissement



3.8 Référentiel tournant (R) et référentiel fixe (S)

Après la transformation dans le référentiel fixe (S) lié au stator avec $\theta = \theta' + \theta_r$,

La F.M.M. rotorique s'écrit :

$$F_r = F_{r,1} \cos(p\theta - p\theta_r - g\omega_s t) \quad (3.61)$$

Dans le cas d'un couple oscillant, θ_r sera remplacé par $\theta_r(t)$. La F.M.M. du rotor s'écrit donc en remplaçant θ_r suivant (2.34) :

$$F_r = F_{r,1} \cos(p\theta - m \cos(\omega_c t) - p\omega_{r0} t - g\omega_s t + \phi) \quad (3.62)$$

Avec :

$$m = \frac{pC_c}{J\omega_c^2}$$

ϕ : déphasage des courants rotoriques par rapport aux courants statoriques

ω_{r0} : représente la vitesse mécanique angulaire du rotor, définie par :

$$\omega_{r0} = 1p(1-g)\omega_s \quad (3.63)$$

D'où :

$$F_r = F_{r,1} \cos(p\theta - \omega_s t - m \cos(\omega_c t) + \phi) \quad (3.64)$$

Cette équation montre que la force magnétomotrice rotorique tourne à la même vitesse que la FMM statorique et l'effet des variations de couple apparaît par une modulation de phase, caractérisée par l'introduction du terme $m \cos(\omega_c t)$ dans la phase de la FMM.

La somme des deux F.M.M. nous donne la force magnétomotrice totale présente dans l'entrefer de la machine :

$$F_{tot} = F_{s,1} \cos(p\theta - \omega_s t) + F_{r,1} \cos(p\theta - \omega_s t - m \cos(\omega_c t) + \phi) \quad (3.65)$$

3.4.4. Effet sur le courant statorique

L'onde d'induction est le produit de la perméance \mathbf{P} de l'entrefer avec la FMM totale.

Si l'effet d'encoches et la saturation de fer sont négligés, la perméabilité de l'entrefer est supposée constante. Par conséquent, la densité de flux dans l'entrefer prend l'expression

Suivante :

$$B = F_{tot} A = F_{s,l} A \cos(p\theta - \omega_s t) + F_{r,l} A \cos(p\theta - \omega_s t - m \cos(\omega_c t) + \varphi) \quad (3.66)$$

Le fondamental de cette onde est donc une somme de deux composantes : La composante résultante de la FMM rotorique est modulée en phase à la fréquence caractéristique du défaut f_c , la composante de la FMM statorique est inchangée. La modulation de phase de la FMM se traduit donc de la même façon sur l'induction dans l'entrefer.

Le flux magnétique Φ est défini par l'intégrale de l'induction magnétique \mathbf{B} sur une Surface \mathbf{A}

$$\Phi = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (3.67)$$

Afin d'obtenir le flux dans chaque phase de la machine, nous intégrons l'induction B selon la longueur l_m de la machine et selon l'angle mécanique θ dans le repère du stator.

Par conséquent, et en tenant compte seulement des fondamentaux de la densité de flux, le flux $\Phi(t)$ dans une bobine arbitraire peut être exprimé sous la forme générale :

$$\Phi(t) = \Phi_s \cos(\omega_s t) + \Phi_r \cos(\omega_s t + m \cos(\omega_c t) - \phi_r) \quad (3.68)$$

La tension induite $V_i(t)$ correspondant à ce flux est :

$$V_i(t) = \frac{d\Phi}{dt} = -\omega_s \Phi_s \sin(\omega_s t) - \omega_s \Phi_r \sin(\omega_s t + m \cos(\omega_c t) - \phi_r) + m \sin(\omega_c t) \Phi_r \sin(\omega_s t + m \cos(\omega_c t) - \phi_r) \quad (3.69)$$

Nous étudions des oscillations du couple relativement faibles. Le dernier terme peut donc être négligé dans la suite. La tension induite totale est la somme des tensions induites dans toutes les bobines de l'enroulement. Le signal résultant est également un signal modulé en phase avec le même indice de modulation m .

La tension dans les phases du stator est imposée par la source de tension, le courant statorique résultant est linéairement lié à la tension induite $V_i(t)$ et a la même fréquence. En conséquence, le courant statorique modulé en phase $i_{to}(t)$ pour une phase arbitraire en présence d'un couple oscillant s'exprime par :

$$i_{to}(t) = i_s(t) + i_s(t) = I_s \sin(\omega_s t) + I_r \sin(\omega_s t + m \cos(\omega_c t - \phi_A) - \phi_r) \quad (3.70)$$

Où ϕ_A désigne l'angle de phase de la modulation.

Cela montre 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 $i_r(t)$, qui est une conséquence directe de la FMM rotorique, montre la modulation de phase due aux oscillations du couple et de la vitesse.

On peut conclure que la transmission des défauts mécaniques sur le courant statorique s'explique par son effet sur les forces magnétomotrices et par la suite sur l'induction et le courant statorique [40].

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

3.4.5. Modélisation du signal du défaut

Le signal $\mathbf{X}(t)$ généré par le défaut est supposé à caractère transitoire. En effet, de nombreux défauts naissants des machines tournantes produisent une série périodique de forces transitoires qui, à leur tour, excitent certaines résonances dans la structure. Par conséquent, le signal $\mathbf{X}(t)$ pourra être écrit comme suit [68] :

$$\mathbf{X}(t) = \sum \mathbf{Xk}h(t - \tau_k) \quad (3.71)$$

Où $h(t)$ est la réponse impulsionnelle résultant d'un seul à-coup, $\{\mathbf{Xk}\}_{k \in \mathbb{Z}}$ et $\{\tau_k\}_{k \in \mathbb{Z}}$ sont des séquences des variables aléatoires qui expliquent probablement des amplitudes aléatoires et des occurrences aléatoires des impacts, respectivement.

Ainsi, il a été montré aussi que n'importe quelle oscillation dans le couple de charge à un multiple de la fréquence de rotation f_r induira les fréquences correspondantes dans le spectre du courant statorique à [40]:

$$f_s \pm k.f_r = f_s[1 \pm (1-g)/p] \quad (3.72)$$

La transmission des défauts mécaniques sur le courant statorique s'explique ainsi par son effet sur les forces magnétomotrices et par la suite sur l'induction et le courant statorique [69, 70, 63, 64].

3.4.6. Signature des défauts mécaniques dans les courants Statoriques

Pour établir la signature des défauts mécaniques dans les courants statoriques de la machine asynchrone surveillée, la dynamique des phénomènes mécaniques étant bien plus lente que celle des phénomènes électriques, la machine peut dans notre cas être considérée en régime électrique permanent. De plus, on se place dans le cas le plus courant où la machine est triphasée et câblée en étoile. Bien que parfois rencontré en pratique, le cas du câblage en triangle ne sera pas considéré dans notre travail.

La grandeur électrique à considérer est donc le système triphasé formé par les trois courants statoriques de la machine. Cette grandeur a une nature multi composante, qui est le plus souvent ignorée par les méthodes classiques de surveillance des machines tournantes. En effet, ces méthodes sont basées sur l'analyse d'un courant de phase indépendamment des autres. Une part importante de l'information contenue dans la grandeur triphasée, souvent cruciale pour le diagnostic, est ainsi ignorée

3.5. Techniques d'analyse du signal courant statorique en vue du diagnostic des défauts mécaniques

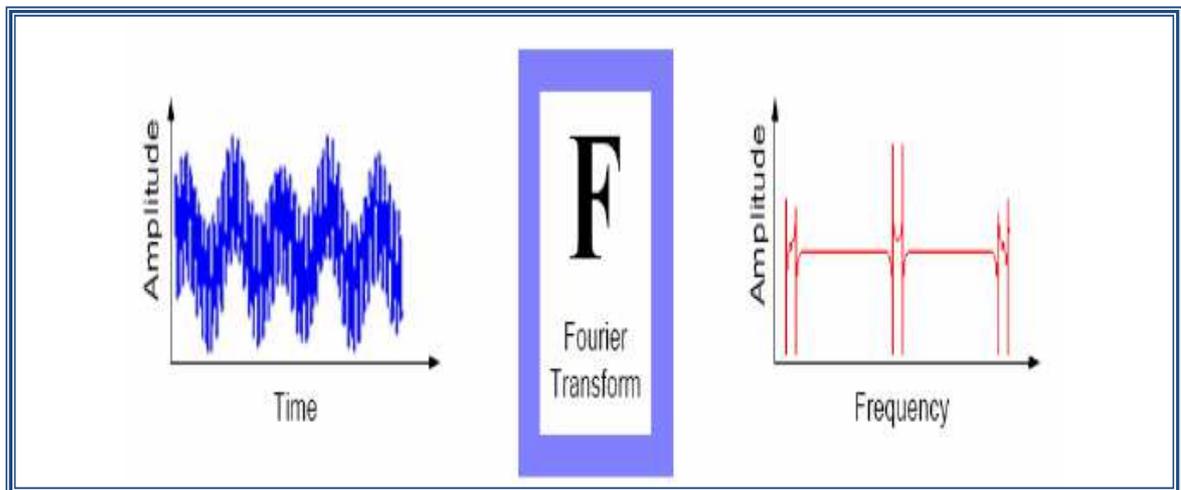
L'approche du signal courant est très utilisée actuellement en diagnostic. Cette approche comme pour l'analyse vibratoire repose sur la connaissance des signaux du comportement du système sain, auxquels seront comparés les signaux mesurés pendant les situations en défaillance. Les méthodes courantes d'analyse des signaux de diagnostic en régime transitoire et en régime permanent sont l'analyse spectrale, le spectrogramme, l'analyse temporelle et la distribution de Wigner-Ville [41].

Actuellement, dans le domaine de la supervision des machines électriques, les industriels et les chercheurs ont de plus en plus recours à l'intelligence artificielle comme technique pour augmenter l'efficacité et la stabilité du diagnostic [43]. L'Intelligence Artificielle comprend diverses techniques telles que les systèmes experts, les réseaux de neurones, la logique floue, qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinée pour améliorer leur capacité.

3.5.1. Transformée de Fourier (FT)

Parmi les méthodes d'analyse du courant pour la détection précoce et le diagnostic des défauts mécaniques la FFT (*Fast Fourier Transform*) est la plus utilisée. Elle est porteuse de précieuses informations sur le signal courant analyser.

Généralement, la FFT décompose un signal en fonctions exponentielles complexes de différentes fréquences. Les coefficients de la décomposition sont les coefficients de la transformée de Fourier $X(f)$.



3.9 Principe de la Transformée de Fourier (FT).[79]

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi ft} df \quad (3.73)$$

La valeur d'un coefficient de Fourier à la fréquence f s'obtient en multipliant le signal $x(t)$ par une exponentiel de fréquence f et en l'intégrant sur tout le temps.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.74)$$

L'analyse spectrale par l'application de la FFT du courant statorique permet d'identifier les signatures fréquentielles causées par les oscillations de couple pendant le fonctionnement dégradé de la machine. L'émergence des raies spectrales aux fréquences $|f_s \pm k \cdot f_c|$ est très significative pour la détection des défauts mécaniques simples et multiples affectant le système électromécanique. [72, 73, 54]. Généralement, les fréquences caractéristiques de défauts mécaniques sont données par la formule suivante :

$$f_d = f_1 \{ k \pm n/p(1-s) \} \quad (3.75)$$

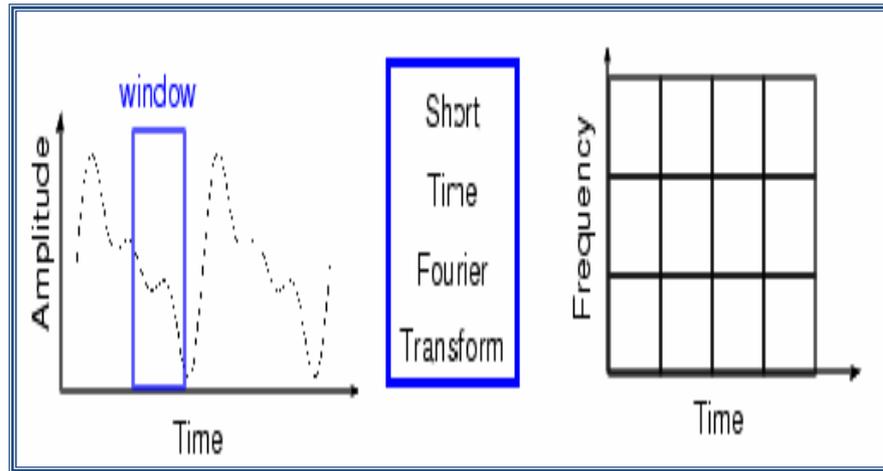
Où p : nombre de paires de pôles ; s : fréquence de glissement du rotor; f_1 : fréquence fondamentale (Hz) ; f_d : la fréquence de défaut lié en (Hz) ; $k = 1,3, 5...$ et $n = 1,2,3...$ p : nombre de paires de pôles

Cependant, cette technique permet de dire en quelles quantités les fréquences existent mais elle ne dit pas à quels instants ces fréquences sont présentes. Par conséquent, elle a pour handicap de ne pas convenir aux signaux non stationnaires bien que ces derniers sont plus fréquents que les signaux stationnaires. En outre, certains éléments du système peuvent se coupler dans le spectre [AFIM], ce qui rend difficile de distinguer les apparitions et les évolutions des différentes composantes fréquentielles suite à des dégradations électriques et/ou mécaniques du système.

L'adaptation de techniques avancées d'analyse du signal telle que la STFT, l'analyse de Gabor et la CTW dans le domaine temps-fréquence est fortement recommandée. Ces outils d'analyse temps - fréquence permettent d'obtenir une image à haute résolution et exige nécessairement un traitement plus élevé que les techniques de diagnostic classiques de la FFT [74, 75, 76].

3.5.2. Transformée de Fourier à court terme : STFT (ou Short Time Fourier transform)

La transformée de Fourier à court terme offre des cartes d'un signal à deux dimensions (temps - fréquence) (figure 1).



3.10 Passage de la caractéristique temporelle à la STFT [71].

La transformée de Fourier à court terme (**STFT**), 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 [76]. L'idée est d'analyser le signal fenêtre par fenêtre. La **TF** de chaque portion de signal fenêtrée est calculée comme suit:

$$STFT_x^w(\tau, f) = \int_t x(t) \cdot w^*(t - \tau) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.76)$$

$\mathbf{x(t)}$: représente le signal temporel échantillonné, $\mathbf{w(t)}$: est la fenêtre temporelle de largeur T et centrée en τ qui permet d'extraire une portion de signal, $\mathbf{w^*}$: dénote le complexe conjugué de w

$$S_x(t, f) = | \int x(t) \cdot h(t - \tau) \cdot e^{j\omega t} |^2 \quad (3.77)$$

Le Spectrogramme de la STFT 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:

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \text{ Avec } \begin{cases} \Delta t^2 = \frac{\int t^2 |w(t)|^2 dt}{\int |w(t)|^2 dt} \\ \Delta f^2 = \frac{\int f^2 |W(f)|^2 df}{\int |W(f)|^2 df} \end{cases} \quad (3.78)$$

3.5.3. Signature des défauts mécaniques via le Spectrogramme de Gabor

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 (7) un signal du domaine de temps, $s(t)$, avec la combinaison linéaire de fonctions élémentaires [78].

$$s(t) = \sum_{m=0}^{m-1} \sum_{n=0}^{n-1} c_{m,n} h_{m,n}(t) \quad (3.79)$$

Où :

$h_{m,n}(t)$ Est la fonction élémentaire de la fréquence de temps,

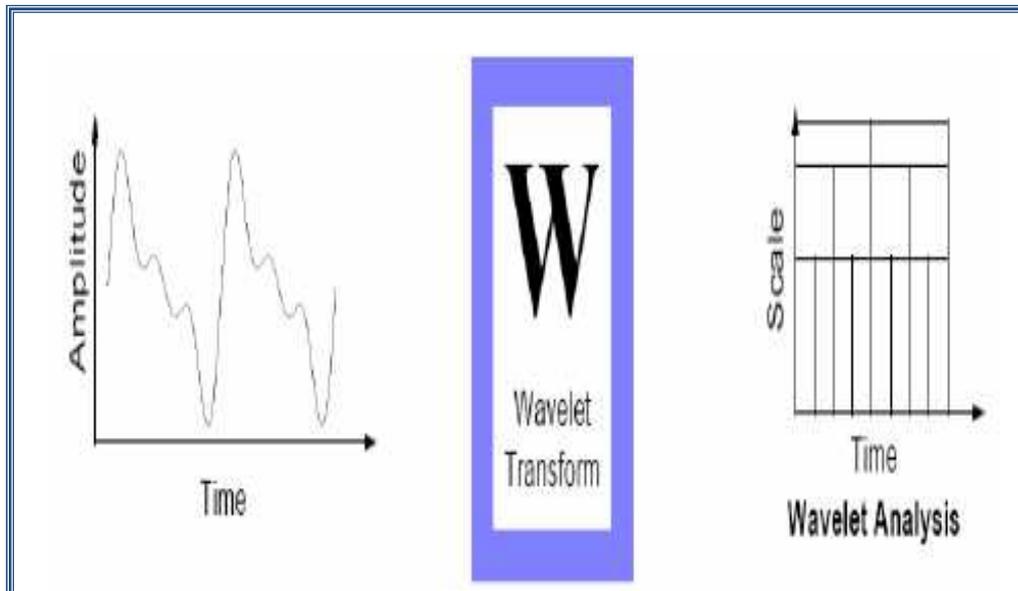
$c_{m,n}$ Est le poids de $h_{m,n}(t)$,

$c_{m,n}$ 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 STFT et la distribution de Wigner-Ville, elle dispose d'une meilleure résolution temps-fréquence (RTF) pour le diagnostic et la détection prédictive des défauts.

3.5.4. La Transformée en ondelettes continue : CWT (ou Continu Wavelet Transform)



3.11 Principe de la Transformée d'Ondelettes Continues [71].

Elle est définie comme suit :

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \cdot \int_t x(t) \cdot \psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (3.80)$$

τ est le coefficient de translation. Il s'agit d'un nombre réel. s est le coefficient d'échelle, également appelé facteur de dilatation de ψ . Il s'agit d'un nombre réel. $\psi(t)$ est l'ondelette mère. Ψ^* dénote le complexe conjugué de ψ . Les $CWT_x^\psi(\tau, s)$ sont les coefficients d'ondelettes.

L'amélioration de l'analyse de la STFT peut se faire par la TO 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 TO peuvent 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 [79, 80, 81].

3.6. Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons étudié les équations électriques et mécaniques qui décrivent le comportement dynamique de la machine asynchrone. Cela nous a permis d'établir un modèle de Park qui réduit le système électrique de la machine de six à quatre équations. Après la présentation du modèle de Park nous avons formulé des modèles pour la machine triphasée associée à sa source d'alimentation.

A cet effet nous avons traité le modèle en tension, la représentation en programme est utilisée pour faciliter la simulation. Le transfert du défaut mécanique vers le signal électrique a été développé en s'inspirant de certaines travaux de recherches dans la littérature qui s'intéresse aux défaillances mécaniques et leur lecture par l'électrique.

Dans la suite du mémoire, nous allons développer des outils de détection et de localisation de défauts qui seront validés sur les bancs d'essai du Laboratoire du Génie Electromécanique localisé dans le département d'Electromécanique.

Chapitre 4 : SIGNATURES DES ANOMALIES ET CAMPAGNE D'EXPERIMENTATIONS

4.1.Introduction :

Il existe essentiellement deux approches pour le diagnostic des systèmes électromécaniques, celle des électrotechniciens basée sur la mesure des courants et tensions électriques, et celle des mécaniciens basée sur la mesure des vibrations et éventuellement de la vitesse et du couple rotorique. Il y a un intérêt certain à savoir concilier les deux approches dans une démarche plus globale, d'abord pour identifier les connaissances communes ou spécifiques à l'une et à l'autre, ensuite pour mieux orienter les techniques de diagnostic en fonction des modes de défaillance considérés. Pour ce faire, il est nécessaire d'étudier les interactions et les relations de passage entre le domaine des signaux électriques et celui des signaux mécaniques. Le diagnostic de l'état d'une machine n'est possible que si l'on connaît les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible d'affecter la machine considérée, c'est à dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts. La connaissance de ces images vibratoires et de la cinématique de la machine permet de formuler un diagnostic de l'état de la machine.

Malheureusement, une même image vibratoire peut correspondre plusieurs défauts. Les défauts des différentes machines ne se présentent pas dans la même plage de fréquence. Cette plage devra être choisie en fonction du type de défaut possible. Il faut donc établir la liste de tous les défauts correspondant à chaque image et, par des signatures vibratoires. La surveillance d'un dispositif passe par la connaissance de son comportement sain (quel que soit son point de fonctionnement), la connaissance des défaillances pouvant l'affecter et la caractérisation des fonctionnements défaillants. Cette démarche d'analyse et d'évaluation de l'état d'un système impose une solide connaissance du procédé dans son contexte d'utilisation.

4.2.Les Signatures Vibratoires des Principaux Défauts Affectant l'entraînement Asynchrone [17]

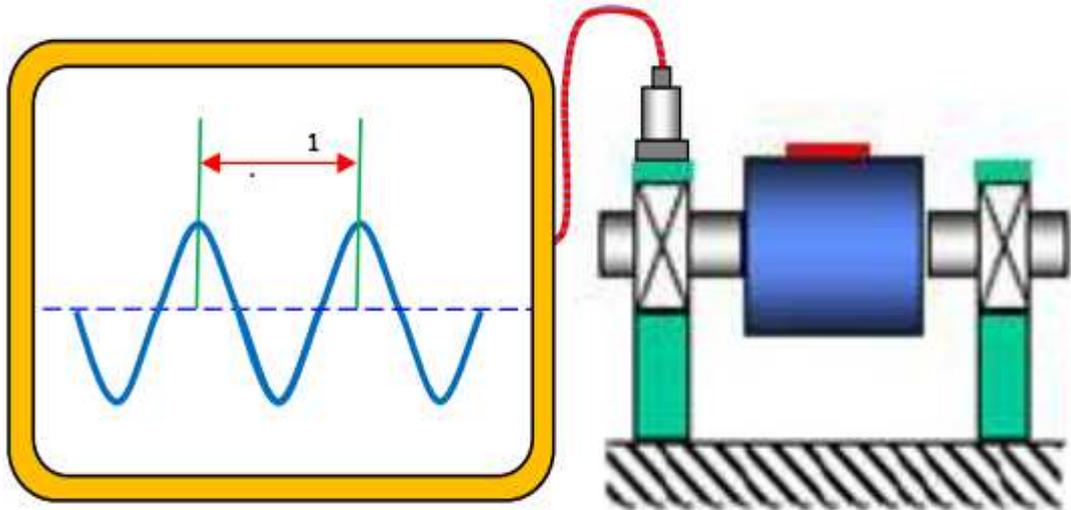
4.2.1.Déséquilibre Massique ou Balourd

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor. De cette non concentricité, résulte l'application de forces centrifuges proportionnelle à la vitesse de rotation selon la relation $F = Mr \omega^2$ qui déforment le rotor. On dit que le rotor présente un balourd. Ce balourd provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage et démontage, ou sont la conséquence:

- D'une altération mécanique : perte d'ailette, érosion ou encrassement.
- D'une altération thermique : déformation suite à des dilatations différentes des matériaux constituant le rotor ou à des différences de température localisées

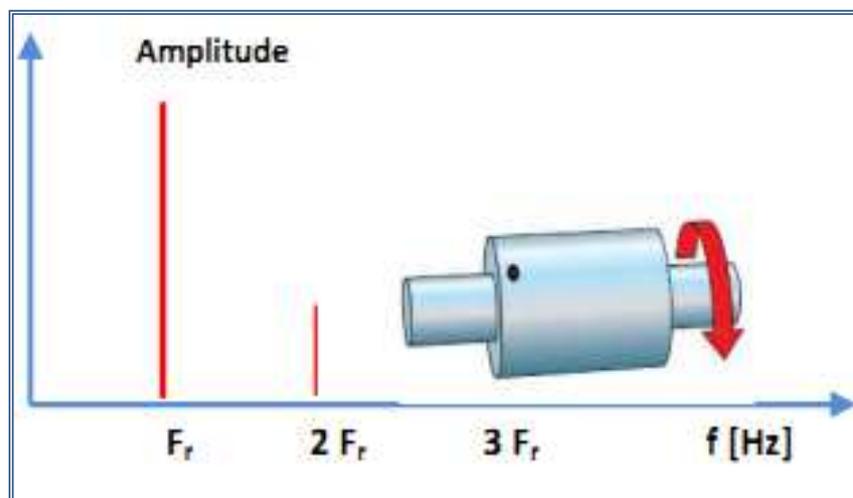
Si on mesure l'amplitude du signal vibratoire délivré par un capteur placé sur le palier supportant un rotor déséquilibré (figure 4.1) , on remarque que l'amplitude sera maximale lorsque la masse sera en haut du rotor et elle sera minimale lorsqu'elle sera en bas, et

ainsi de suite, à chaque tour du rotor. Le signal vibratoire est périodique de période 1 tour, donc de fréquence égale à la fréquence de rotation du rotor.[11]



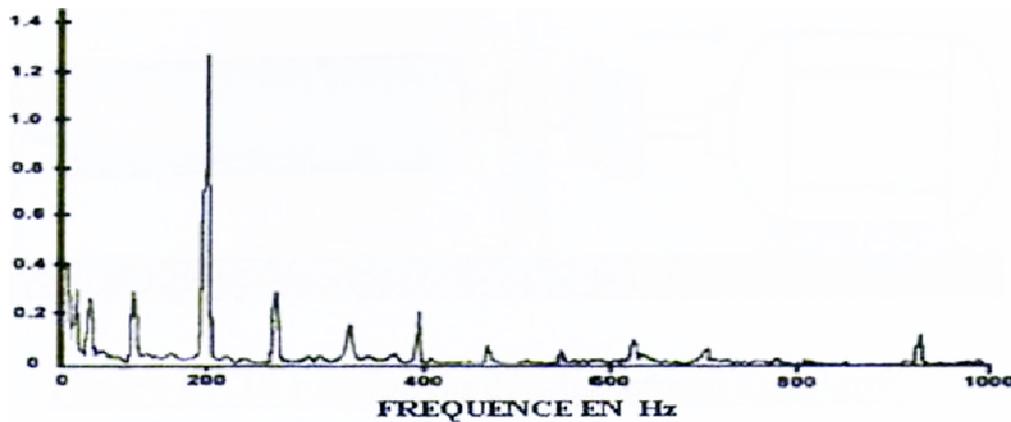
4.1 Signal vibratoire généré par un balourd.[11]

Le balourd va induire, dans un plan radial, une vibration dont le spectre présente une composante dont la fréquence de base correspond à la fréquence de rotation F_r . Elle représente alors le pic le plus élevé avec des pics d'amplitudes plus faibles sur les harmoniques de F_r (figure 4.2). La bande de mesure est conçue de façon à prendre en compte de légères variations autour de la vitesse de rotation affichée par le constructeur.



4.2 Spectre théorique d'un défaut de balourd.[11]

4.2.2. Désalignement



4.3 Image vibratoire théorique de désalignement.[11]

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.

Un désalignement provoque des vibrations aux fréquences de rotation, ainsi qu'aux harmoniques d'arbre 2, 3 et 4 de la fréquence de rotation. Un désalignement se produit par des niveaux :

- Axiaux très élevés à deux fois la fréquence de rotation.
- Radiaux élevés à deux fois la fréquence de rotation.

On constate deux types de désalignement :

4.2.2.1. Désalignement parallèle

Le signal temporel d'un défaut de désalignement a l'allure de la figure 4.4. On retrouve un phénomène périodique à la fréquence de rotation (période = 1 tour), mais également des phénomènes se répétant chaque 1/2 tour et 1/3 tour. Cela se traduira le plus souvent par la présence des composantes de l'ordre 2, 3 ou même 4 fois la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles de la composante d'ordre 1.

Un défaut d'alignement est révélé par un pic d'amplitude prépondérante à, généralement, 2 fois la fréquence de rotation (parfois 3 ou 4 fois). Il apparaît une vibration dans la direction radiale de composante d'ordre 2 de la fréquence de rotation (rarement d'ordre 3, voire exceptionnellement d'ordre 4), avec des amplitudes supérieures aux composantes d'ordre 1 (fig.4.4). Le même phénomène se manifeste dans la direction axiale.

Le désalignement parallèle se caractérise par une vibration radiale élevée.

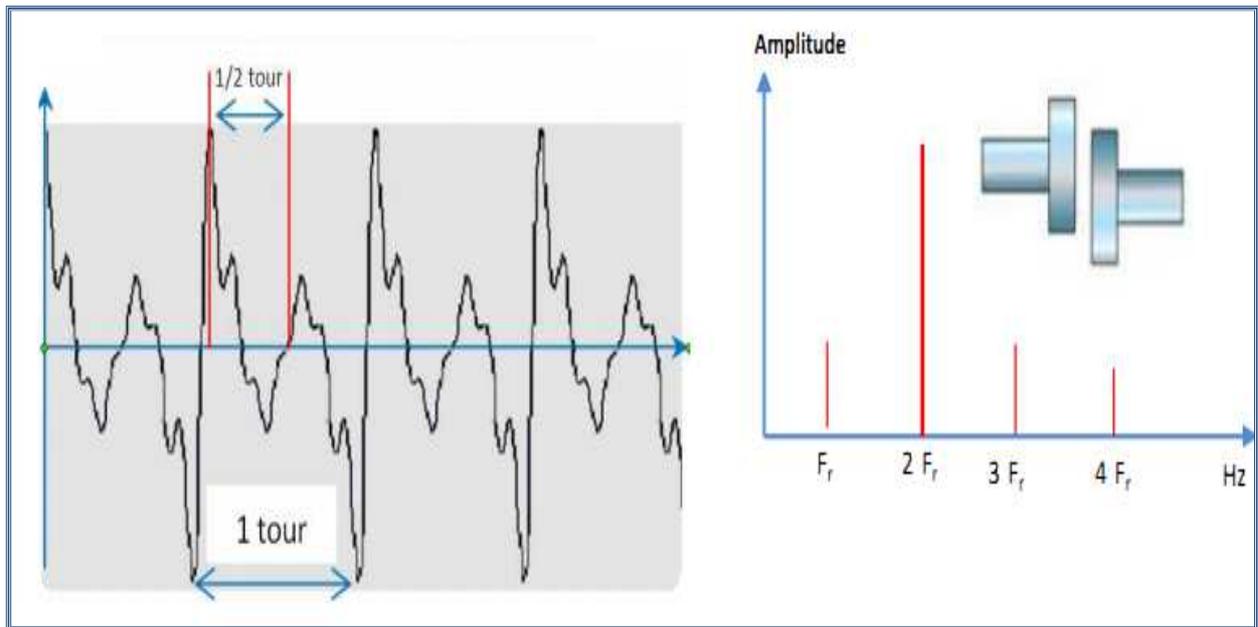
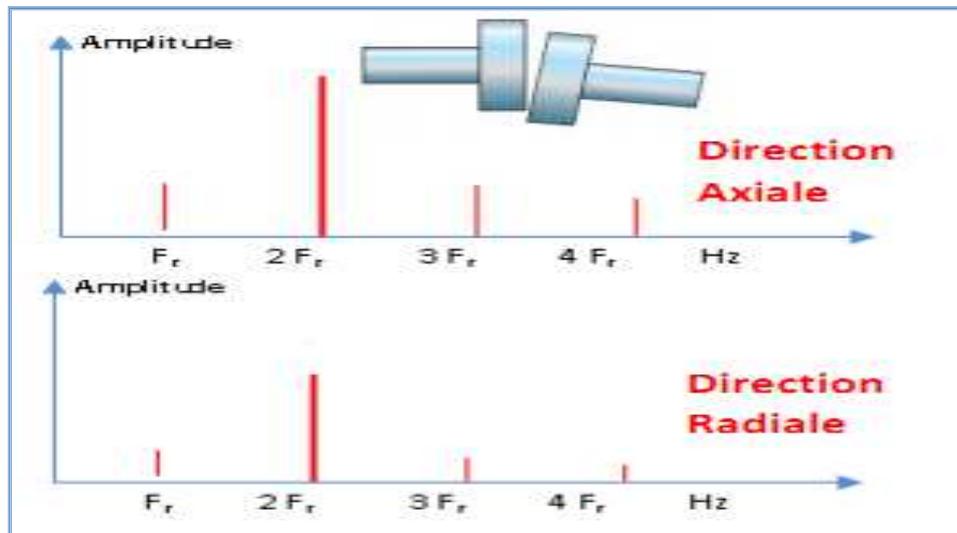


Figure 4.4 Le signal temporel et l'image vibratoire théorique de désalignement parallèle. [11]

Il apparaît une vibration axiale de composante d'ordre 1, 2, 3 ou 4 de la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles des composantes radiales correspondantes



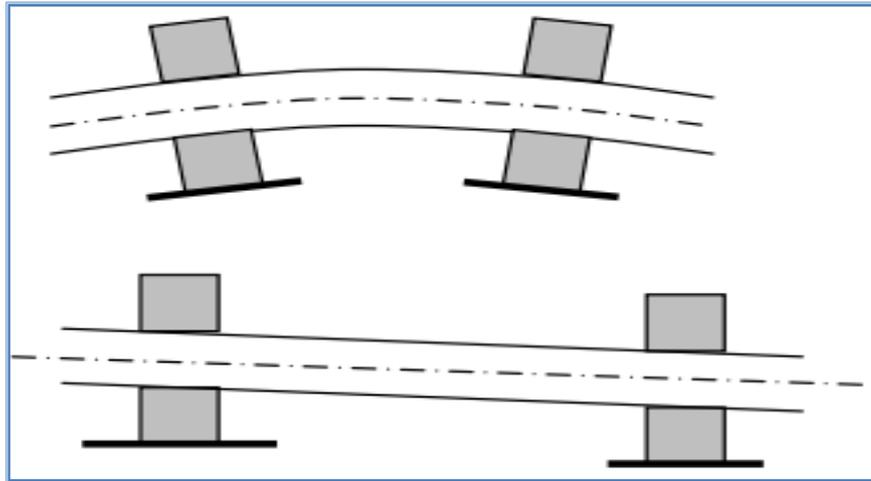
4.5 Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire.

Le désalignement angulaire se caractérise par une vibration axiale élevée.

4.2.3. Désalignement des Paliers

Les axes des deux paliers d'un même corps de machine ne sont pas concentriques (figure 4.6). Cette anomalie peut être la conséquence d'un défaut de montage d'un palier, mais également d'un mauvais calage des pattes de fixation ou d'une déformation de châssis « par exemple à la suite de contraintes thermiques », qui se traduit par une flexion de l'arbre du rotor.

La manifestation spectrale de ce type de désalignement est identique à celle du désalignement angulaire.



4.6 Désalignement de paliers se traduisant par une flexion de l'arbre.

4.2.4. Signatures vibratoires des principaux défauts des roulements

4.2.4.1. Défaut sur la bague extérieure

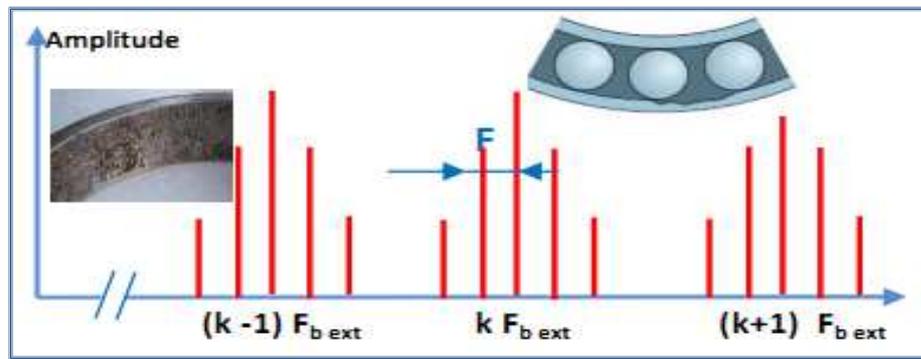
Un défaut de type écaillage affectant la bague externe d'un roulement a pour image vibratoire un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence du défaut.

À chaque composante de ce peigne, est associée à une paire de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique importante (fig.4.7).

$$f_{bext} = EP = \frac{N\Omega}{120} \left[1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right] \quad (4.1)$$

α : angle de contact, Ω : Vitesse de rotation de l'arbre,

d : diamètre des billes, D : diamètre moyen du roulement, N : nombre de billes.



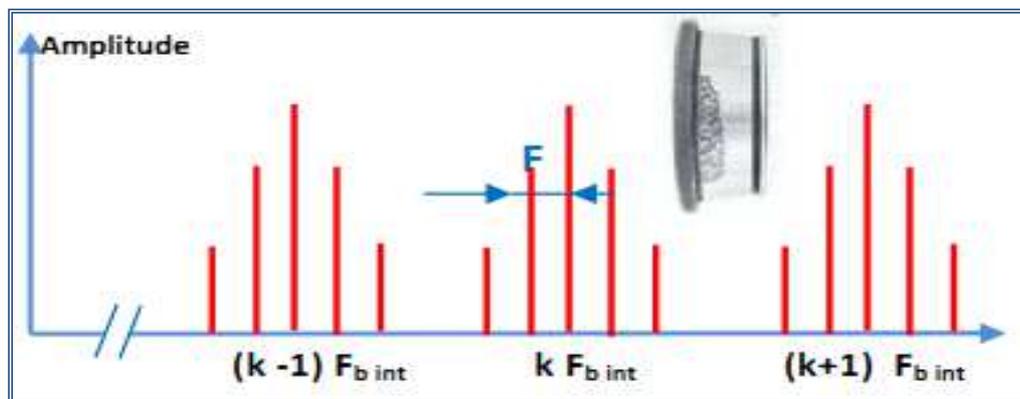
4.7 Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure.[11]

4.2.4.2. Défaut sur la bague intérieure

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation (fig.4.8)

$$f_{B \text{ int}} = \frac{N\Omega}{120} \left[1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right] \quad (4.2)$$

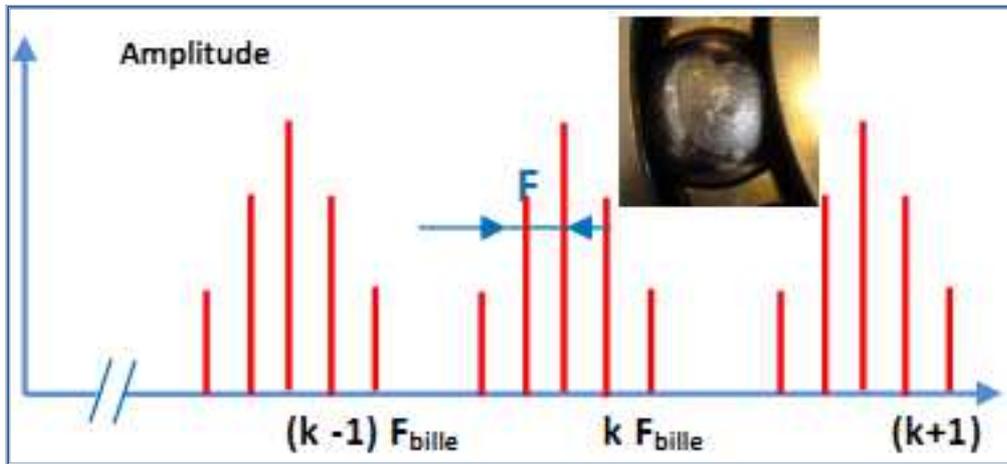
Fréquence de passage de bille sur la cage interne « Bail Passe Frequency Inner Race », **BPMI** avec bandes latérales de la vitesse de rotation **F.rot** « défaut tournant ».



4.8 Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure. [11]

4.2.4.3. Défaut de type écaillage sur un élément roulant

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant « bille, rouleau ou aiguille » a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de la cage (fig.4.9).



4.9 Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant.

4.2.5. Signatures vibratoires des défauts d'engrènement

❖ Fréquence d'engrènement de deux engrenages

Observons un engrènement, composé de deux roues dentées 1 et 2, présentant $Z1$ et $Z2$ dents et tournant aux fréquences $F1$ et $F2$. Chaque fois qu'une dent de la roue menante 1 s'engage dans la roue menée 2, il se produit une prise de charge périodique au rythme d'engagement des dents selon une fréquence d'engrènement F_e égale à la fréquence de rotation de la roue multipliée par son nombre de dents.

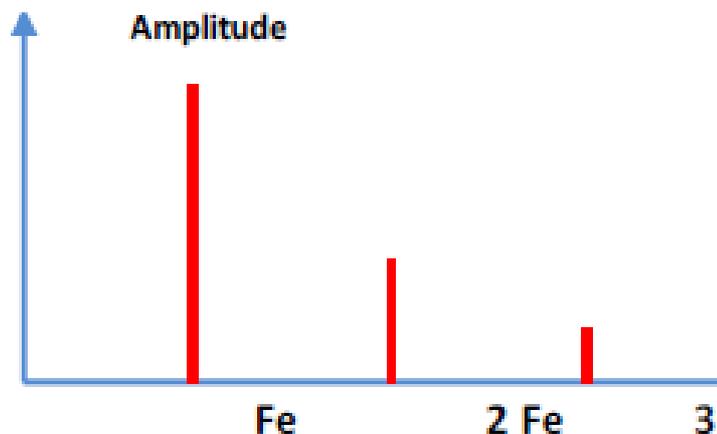
$$F_e = F1 \cdot Z1 = F2 \cdot Z2 \quad (4.3)$$

F_e : Fréquence d'engrènement

$F1$ et $F2$: Fréquences de rotations des roues 1 et 2

$Z1$ et $Z2$: Nombre des dents des roues 1 et 2.

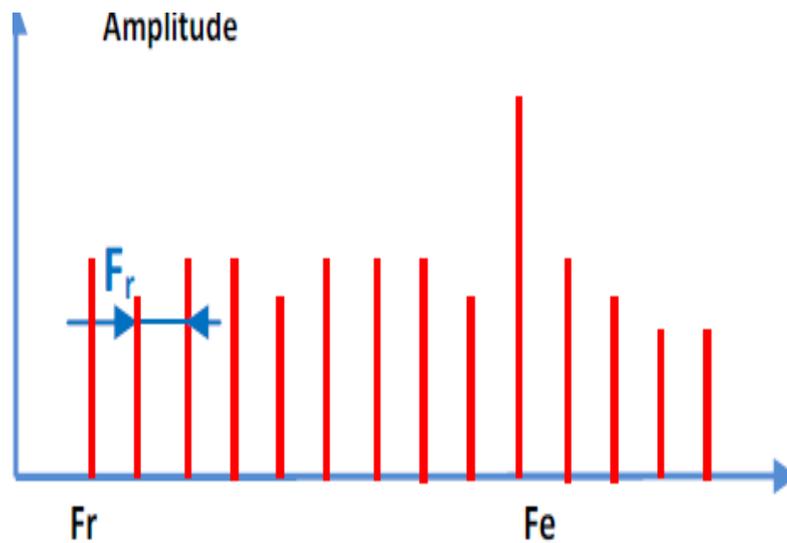
Si la denture est correcte, le spectre (fig. 4.10), est constitué de composantes dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement ou à ses harmoniques.



4.10 Spectre denture saine

❖ **Détérioration d'une dent sur un pignon**

Si l'une des roues présente une dent détériorée, il se produit un choc dur, à chaque tour du pignon. Le spectre correspondant (figure 4.11) montre un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de rotation du pignon détérioré s'étalant jusqu'aux hautes fréquences c'est-à-dire f_1 et f_2 et les harmoniques de $f_1 : f_1, 2 f_1, 3f_1, \dots, nf_1 \dots$. La figure 4.12 montre l'exemple d'un spectre réel de ce type de défaut.



4.11 Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée.

❖ **Détérioration de deux dents sur les deux roues**

Si les deux roues dentées présentent chacune une dent détériorée, les chocs peuvent être importants lorsque les deux défauts se rencontrent « *coïncidence* ».

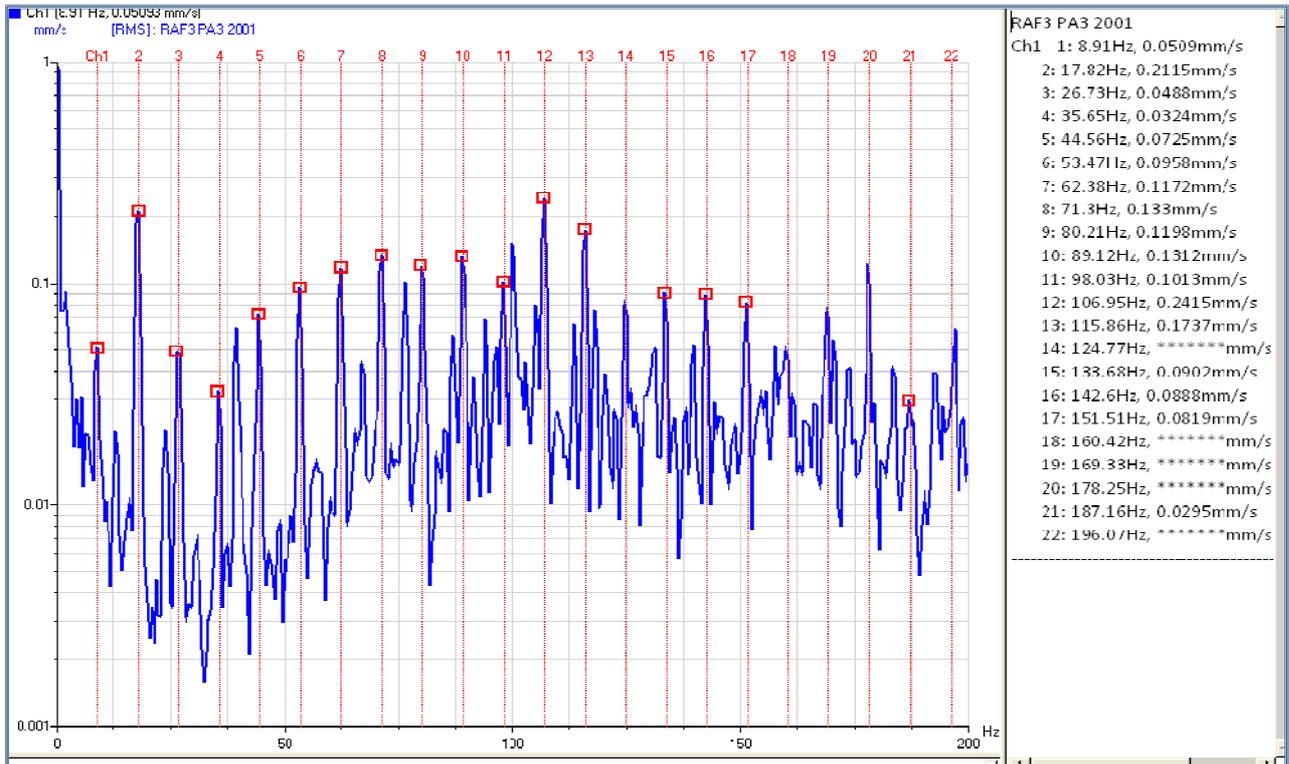
La rencontre s'effectue à la fréquence F_{co} , appelée fréquence de coïncidence et telle que :

$$F_{co} = \frac{F_e}{PPCM(Z_1, Z_2)} \tag{4.4}$$

F_e : fréquence d'engrènement

PPCM : plus petit commun multiple de Z_1 et Z_2

La fréquence de coïncidence F_{co} est inférieure aux fréquences de rotation F_1 et F_2 , le spectre montre non seulement les deux peignes correspondant aux fréquences de rotation de chaque roue, mais aussi un peigne de raies de pas correspondant à la fréquence de coïncidence F_{co} .

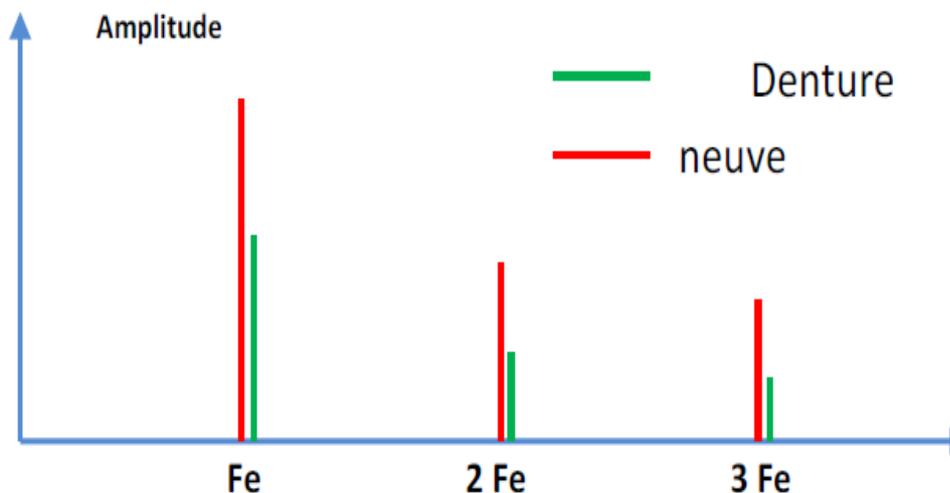


4.12 Spectre réel d'une dent détériorée sur un engrenage. Fr du Pignon 8,9 Hz

❖ Détérioration de l'ensemble de dentsures

Lorsque l'ensemble de la denture est usé ou détérioré, les chocs se produisent au passage de chacune des dents. Le spectre est constitué d'un peigne de raies dont la fréquence correspond à la fréquence d'engrènement, mais cette fois avec une amplitude beaucoup plus élevée (figure 4.13).

Le spectre peut présenter des raies à la fréquence de rotation correspondant à des équilibrages imparfaits.



4.13 Image vibratoire théorique d'une denture.

❖ **Fréquences des vibrations émises par les engrenages :**

Le signal vibratoire engendré par les efforts sur les dents au niveau d'un palier a pour expression :

$$X_p(t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) \cdot \sin(2\pi \cdot m \cdot \zeta_d \cdot f_r \cdot t + \phi_m(t)) + b(t) \quad (4.5)$$

f_r : fréquence de rotation de l'arbre, $f_e = \zeta_d \cdot f_r$: fréquence d'engrènement, ζ_d : nombre de dents de la roue, $b(t)$: bruit composé d'harmoniques non synchrones avec la rotation de l'arbre et de composantes aléatoires à large spectre : frottement, etc.,

$a_m(t)$ et $\phi_m(t)$: amplitude et phase modulées dues aux jeux, torsion, etc.

4.3.Effets des défauts mécaniques sur les courants statoriques et le neutre.

Le déséquilibre massique(ou balourd), le désalignement et leur combinaison créent une excentricité dans l'entrefer affectant une variation des inductances du moteur et par conséquent une variation du flux magnétique qui contribue à la modification du spectre du courant d'alimentation [17, 18, 19]

$$\Phi(t) = \Phi_S \cos(\omega_S t) + \Phi_R \cos(\omega_S t + m \cos(\omega_C t) - \varphi_R) \quad (4.6)$$

La tension induite $V_i(t)$ correspondant à ce flux est:

$$V_i(t) = d\Phi / dt = -\omega_S \Phi_S \sin(\omega_S t) - \omega_S \Phi_R \sin(\omega_S t + m \cos(\omega_C t) - \varphi_R) \quad (4.7)$$

En conséquence, le courant statorique modulé en phase $i_{t0}(t)$ pour une phase arbitraire en présence d'un couple oscillant s'exprime par:

$$i_{t0}(t) = i_s(t) + i_r(t) = I_S \sin(\omega_S t) + I_R \sin(\omega_S t + m \cos(\omega_C t) - \varphi_A) - \varphi_R \quad (4.8)$$

Où : φ_A désigne l'angle de phase de la modulation.

Cela montre que la composante fondamentale du courant $i_{t0}(t)$ 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 $i_r(t)$, qui est une conséquence directe de la FMM rotorique, montre la modulation de phase due aux oscillations du couple et de la vitesse. Le cas sain est obtenu pour $m=0$

4.3.1.Signatures des Défauts balourd et désalignement via l'analyse du courant.

4.3.1.1.Le Courant de phase

Dans les spectrogrammes du courant il y a la présence d'harmoniques conditionnés par la qualité de la tension d'alimentation. Les défauts du moteur et des mécanismes qui lui sont

accouplés font apparaître aussi des harmoniques correspondants dans le spectre du courant. Les plus grandes dynamiques présentes dans le spectre du courant se produisent à la fréquence d'alimentation électrique et ses harmoniques. Les défauts de déséquilibre et de désalignement sont détectés par la surveillance des fréquences appropriées de la phase du courant statorique [20, 21]

$$f_{\text{déf.}} = [f_s \pm n f_r] \quad (4.9)$$

Le balourd conduit à l'augmentation de l'amplitude des fréquences définies par:

$$F_{\text{bal.}} = f_{s \pm} f_r \quad (4.10)$$

Où

f_d est la fréquence porteuse du défaut mécanique

f_s est la fréquence d'alimentation électrique

f_r est la fréquence de rotation

La plupart des désalignements est une combinaison du désalignement angulaire et du désalignement parallèle. Il génère des amplitudes et des fréquences additives modulées dans les courants statoriques.

$$f_{\text{dés.}} = f_s + n f_r \quad \text{où } n = 2, 3, 4. \quad (4.11)$$

4.3.1.2. Le courant neutre.

Le changement du spectre du courant du neutre au voisinage du troisième harmonique et de ses multiples est révélateur d'informations précieuses sur l'état de santé du moteur. Elles sont comparables à celles du courant de phase voire meilleures [22].

Lorsqu'une défaillance mécanique survient au rotor d'une machine asynchrone, les composantes dont les fréquences sont données par la relation (4.12) augmentent en amplitude. Les fréquences porteuses spécifiques au défaut du déséquilibre massique et du désalignement peuvent être exprimées par (4.12) avec surtout une prépondérance de l'amplitude pour $k = 1$ lorsqu'il s'agit du balourd et pour $k = 2$ pour les désalignements.

$$f_{\text{déf.}} = [h f_s \pm k f_r] \quad (4.12)$$

Avec: $h = 3, 5, 7 \dots$ et $k = 1, 2, 3, 4 \dots$

4.3.1.3. L'analyse du carré de l'intensité des courants des 3 phases

$$\begin{cases} I_A = I_m \sin(\omega t - \varphi) \\ I_B = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi) \\ I_C = I_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi) \end{cases} \quad (4.13)$$

I_A, I_B et I_C : ce sont les courants statoriques des trois phases respectives.

I_m : Valeur maximale du courant. ω : Pulsation. φ : Angle de la phase. T : temps.

$$R^2 = I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 \quad (4.14)$$

La représentation spatiale du courant d'alimentation du courant est un cercle parfait en vue orthogonale pour un cas idéal d'un moteur sain. C'est le reflet de l'image du champ tournant dans l'entrefer. Le cercle est déformé au fur et à mesure que le moteur présente des défaillances tendant vers des formes orbitales ellipsoïdales, polygonales ou hypocycloïdales selon la nature du défaut affectant l'entraînement [73]. Sur la base des caractéristiques des motifs obtenues pour chaque défaillance par cette approche simple et efficace de reconnaissance des formes, une amélioration significative dans la détection de défauts et son indice de sévérité est apportée.

4.3.2. Détection de la combinaison des défauts de balourds et de désalignement par l'analyse des courants de la phase, du neutre et du carré des intensités.

Les fréquences caractéristiques de la combinaison des différents défauts précités apparaissent respectivement dans les spectres des courants des phases et du neutre aux harmoniques et aux fréquences propres concernées par ces défauts spécifiques mais avec une augmentation prépondérante des amplitudes des raies concernées. En outre, le neutre de la machine asynchrone est assez simple à sortir pour que l'industriel accepte de le faire afin de faciliter son diagnostic.

4.3.3. Signatures des anomalies de roulement dans le courant statorique [2]:

Les roulements à billes peuvent faire l'objet de défauts dus au montage/assemblage ou indirectement par les efforts mécaniques de l'ensemble moteur et procédé entraîné.

La détérioration peut aussi être induite par des courants lors d'une alimentation utilisant un onduleur de puissance (variation de vitesse). La détection d'un défaut peut être envisagée soit par une analyse des vibrations, soit par l'analyse du contenu spectral du courant absorbé ou encore par la modification du bruit sonore.

D'une part, Schoen *et al*, [54] montrent que la relation de la vibration de roulement au spectre du courant statorique peut être déterminée en se rappelant que n'importe quelle excentricité dans l'entrefer produit des anomalies dans la densité de flux de celui-ci et donne par conséquent la relation suivante :

Dans la mesure où les billes du roulement supportent le rotor, chaque défaut de roulement produira un mouvement radial du rotor par rapport au stator.

Ce déplacement mécanique conduit à une modification de la répartition de l'induction au sein de la machine [54].

Ces variations génèrent alors des courants statoriques aux fréquences suivantes :

$$|f_{a \pm k * f_{\text{défaut}}}| \text{ ou } k = 1, 2, 3, \dots \quad (4.15)$$

Avec : f_s ou $f_a = 50 \text{ HZ}$: fréquence d'alimentation ou source)

$f_{\text{défaut}}$: fréquence caractéristique des vibrations induites par les défauts.

Où $k = 1, 2, 3, \dots$ et f_v ou f_d , est une fréquence caractéristique de vibration ou de défaut.

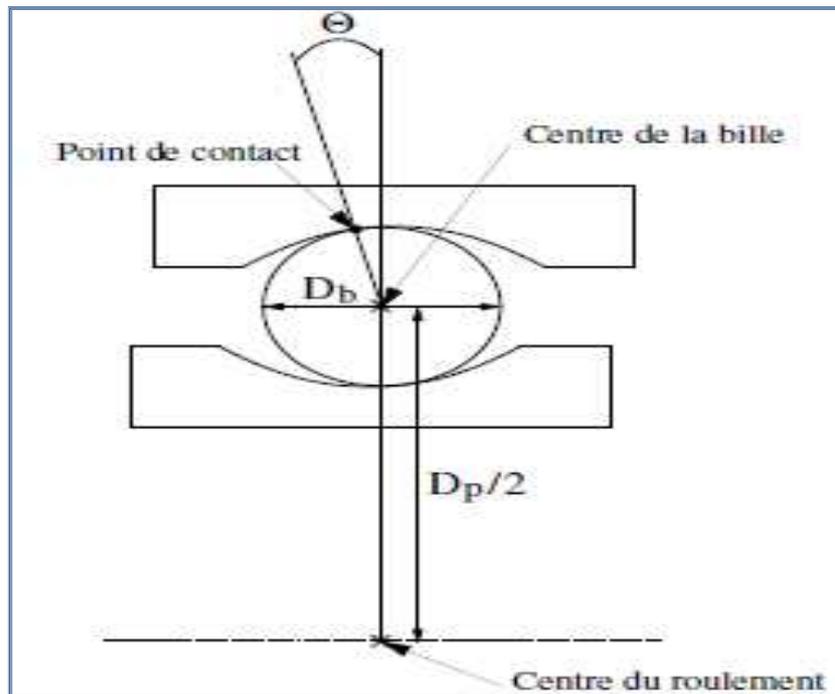
D'autre part Blodt [66], suggère une expression caractéristique aux troistypes de défaut comme suit:

$$\text{Défaut de bague extérieure : } f_{bng} = / f_s \pm k f_0 / \quad (4.16)$$

$$\text{Défaut bague intérieure : } f_{bng} = / f_s \pm f_r \pm k f_i / \quad (4.17)$$

$$\text{Défaut de bille : } f_{bng} = / f_s \pm f_{cage} \pm k f_b / \quad (4.18)$$

Quoi qu'il en soit, les fréquences caractéristiques théoriques de vibration liées aux défauts sur chacun des éléments tournants des roulements sont en fonction de ses dimensions et s'écrivent (Figure.4.14) :



4.14 Dimension de roulement à billes.

Un défaut sur la bille entre en contact à la fois avec la bague externe et la bague interne du roulement à chaque rotation de la bille autour de son axe, la fréquence associée à ce défaut est alors [54] :

$$f_{bille} = f_r \cdot \frac{D_p}{D_b} \left[1 - \left(\frac{D_b \cos \Theta}{D_p} \right)^2 \right] \quad (4.19)$$

Les fréquences de défauts sur la bague externe et interne sont produites quand chaque bille passe sur le défaut. Ceci se produit N fois pendant un tour complet de la bague (ou N est le nombre de billes), les fréquences sur les bagues externes et internes sont donc définies ainsi [54] :

$$\begin{aligned} f_{be} &= \frac{f_r}{2} N_b \left(1 - \frac{D_b \cos \Theta}{D_p} \right) \\ f_{bi} &= \frac{f_r}{2} N_b \left(1 + \frac{D_b \cos \Theta}{D_p} \right) \\ f_c &= \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{D_b \cos \Theta}{D_p} \right) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Avec :

- ✓ f_{be} : la fréquence caractéristique de la bague externe.
- ✓ f_{bi} : la fréquence caractéristique de la bague interne.
- ✓ f_c : la fréquence caractéristique de rotation de la cage.
- ✓ f_{bille} : la fréquence caractéristique de rotation des billes.
- ✓ f_r : la fréquence de rotation mécanique.
- ✓ N_b : le nombre de billes.
- ✓ D_b : le diamètre de bille.
- ✓ D_p : le diamètre du centre des billes
- ✓ Θ : l'angle de contact.

On remarquera que cinq paramètres physiques doivent être connus pour déterminer les fréquences caractéristiques de défaut du roulement. A savoir : le diamètre de la bille D_b , le diamètre moyen ou diamètre de la cage D_p , le nombre de billes N_b , l'angle de contact β en radians et la fréquence de rotation f_r .

Les composants défectueux du roulement produisent une fréquence unique par rapport à la dynamique du mouvement de roulement et les vibrations mécaniques produites sont une fonction des vitesses de rotation de chaque composant.

Cependant, en cas de dimensions géométriques des roulements installés dans la machine asynchrone inconnues, nous ne pourrions pas déterminer les fréquences fondamentales exactes des défauts de roulement.

Aussi, Schoen a montré dans [54] que les fréquences de vibration peuvent être approchées pour la plupart des roulements ayant entre 6 et 12 billes par les formules suivantes :

$$f_{b.e.} = 0,4 \cdot N_b \cdot f_r \quad (4.21)$$

$$f_{b.i} = 0,6 \cdot N_b \cdot f_r \quad (4.22)$$

$$f_{cage} = 0,4 \cdot f_r \quad (4.23)$$

Ces règles empiriques (*USA*), qui sont définies pour permettre d'évaluer grossièrement les fréquences qui apparaissent lors de la défaillance d'un roulement, ne sont qu'approximatives. Néanmoins, il existe des équations [3] qui sont basées sur l'expérimentation de plus de 2000

roulements de différents types pour estimer les fréquences f_{cage} , f_i et f_o . Ainsi, pour la série 6300, ses approximations donnent :

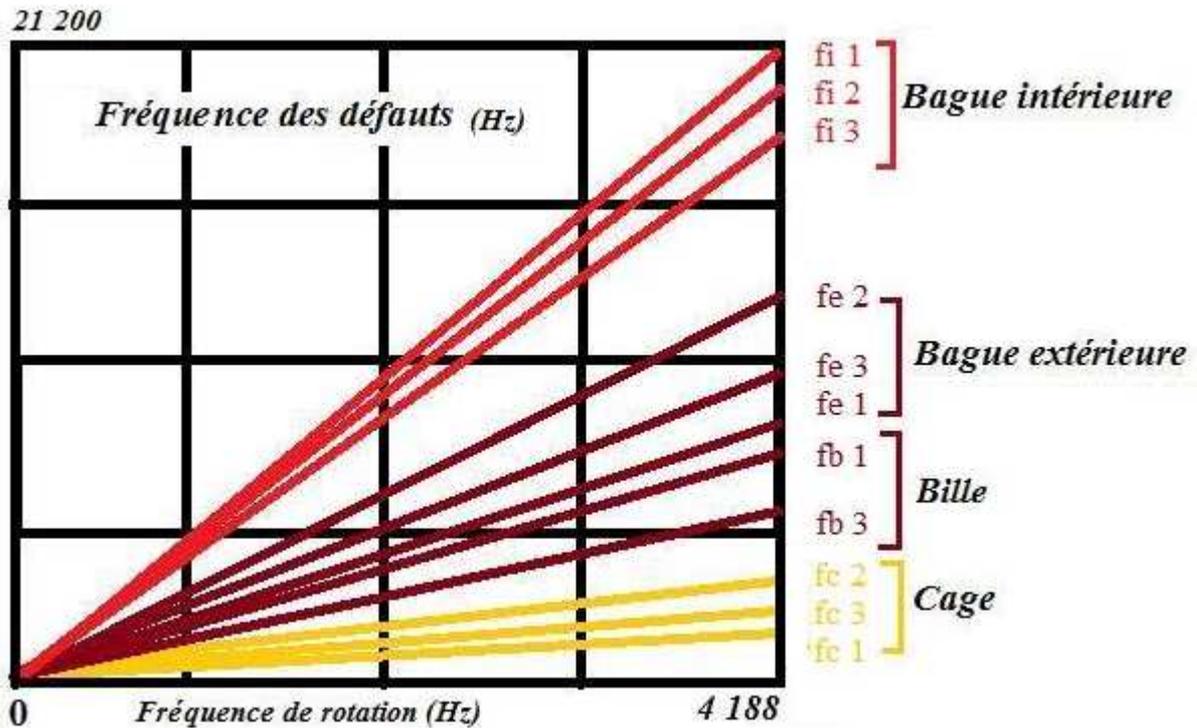
$$f_{b,e} = f_r \cdot (0.5 - 1.2/N_b) \quad (4.24)$$

$$f_{bi} = f_r \cdot (0.5 + 1.2/N_b) \quad (4.25)$$

$$f_{bille} = f_r \cdot (0.2 - 1.2/N_b) \quad (4.26)$$

$$f_{cage} = f_r \cdot (0.5 - 1.2/N_b) \quad (4.27)$$

Il existe une dispersion entre les fréquences des défauts des roulements calculés avec les formules théoriques et expérimentales développées ci-dessus.



4.15 Fréquences des défauts d'un roulement (623)

1- théorique. 2- empirique. 3- moyenne sur 2000 roulements. [3]

4.3.4. Signatures des anomalies des engrenages dans le courant statorique [2]

Dans le cas où l'on a une dent cassée sur un pignon on aura pour les roues dentées Z1 et Z2.

$$f_a \pm f_1, f_a \pm f_2 \text{ et } f_a \pm n f_1 \quad (4.28)$$

Si c'est une dent détériorée sur chaque pignon on aura :

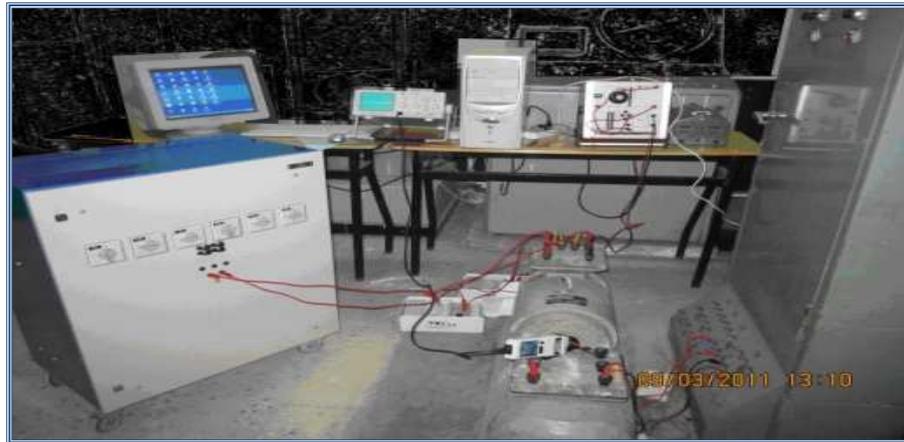
$$f_d = f_a \pm f_{co}$$

4.4. Présentation des Modèles Expérimentaux adoptés et des Campagnes d'Essais

Notre travail de recherche a pour objectif d'établir des éléments de diagnostic de défauts mécaniques simples et combinés de déséquilibre massique ou balourd, de désalignement angulaire et parallèle, de roulements et d'engrenage à partir d'expérimentations.

Les choix des techniques et des défauts ciblés ont été pris suite à l'étude bibliographique où ces défauts malgré leur importance et la fréquence de leur présence dans les applications industrielles n'ont pas fait l'objet de beaucoup d'études vu les difficultés de leurs modélisations analytiques.

4.4.1. Premier Banc d'essai.



4.16 Banc d'essai sur L'agrégat de machines Leroy Somer V132S1



Figure 4.17 Matériel de Captage des signaux vibratoire et courant

Dans l'objectif de mener une étude expérimentale sur le diagnostic des différents défauts mécaniques simples et multiples : balourd, désalignement angulaire et parallèle, roulement et engrenage à travers le signal courant statorique du moteur asynchrone d'entraînement, nous avons réalisé des expériences sur des moteurs à induction de différentes puissances et différents nombres de paires de pôles. Les caractéristiques de ces machines seront détaillées annexe.

Des bancs d'essais ont été réalisés au laboratoire du département d'électromécanique Le premier stand est composé d'un agrégat de machines électriques *Leroy Somer* composé d'un moteur asynchrone à cage MAS1 2.6 Kw accouplé à une génératrice à courant continu à poly-excitations lui servant de charge mécanique en débitant dans un bloc de charge active.

Le matériel nécessaire pour le mesurage et l'acquisition des bases de données et leur interprétation est composé de:

- Un collecteur de données bi-voies de marque B&K Vibro, de type : VT60 : avec 02 capteurs
- Un accéléromètre de marque SCHENCK de type : AS-065.
- Une carte PCMCIA ; un capteur pointe de touches de vibrations.
- Un capteur de courant 0.01 - 10 A (pince ampérométrique) de marque Chauvin Arnoux, type : PAC 12.
- Un oscilloscope numérique équipé d'un logiciel SP107 E 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.
- 01 Computer

Cette première campagne pratique est consacrée à la présentation des résultats expérimentaux obtenus par l'application de l'approche vibratoire et celle du courant statorique. Au départ nous provoquons un balourd avec la fixation d'une masse de 50g sur le bout d'arbre du moteur (*côté attaque*); puis nous faisons subir à l'agrégat de machines électriques les deux types de désalignement (*angulaire et parallèle*).

Le désaxement angulaire du moteur avec la génératrice est obtenu par l'insertion de deux plaquettes d'aluminium de 2mm d'épaisseur sous les deux pattes avant du moteur. Pour le désalignement parallèle nous procédons à l'emplacement des plaquettes sous les pattes de fixation avant et arrière du moteur asynchrone.

Nous clôturons par la création de la combinaison des défauts d'alignement et du balourd. A chaque essai pratique, les opérations de mesurage et d'acquisition sont suivies du traitement respectivement du signal vibratoire par '*le logiciel software xms*' et du courant statorique par le biais de la FFT avec le logiciel Matlab seront effectuées.

4.4.2. Deuxième Banc d'essai

Le moteur asynchrone **MAS₂** de ce deuxième agrégat de machines électriques nous offre la possibilité de le connecter en étoile étant donné l'accessibilité au neutre sur la plaque à bornes. Ceci va nous permettre d'exploiter une autre approche complémentaire qui consiste à analyser le courant neutre en plus de l'analyse des courants des trois phases.



Figure 4.18 Photo du deuxième agrégat dédié au diagnostic des défauts mécaniques.

Ce banc d'essai a été aussi nécessaire pour reprendre l'étude expérimentale des défauts mécaniques de déséquilibre et de désaxement parallèle et angulaire simples et combinés qui peuvent affecter les entraînements électriques à base moteur asynchrone et particulièrement de forte puissance pendant leur fonctionnement.

Il se compose essentiellement d'un agrégat de machines électriques constitué d'un moteur asynchrone **4.05 kW** accouplé à une génératrice à courant continu de **4 kW** servant de charge. Le matériel ayant servi pour le mesurage et l'acquisition des bases de données est le même que pour l'expérience précédente.

Le traitement des données est fait en utilisant le logiciel MATLAB à des fins d'analyse des signaux. Les défauts mécaniques de balourds, désalignements parallèle, désalignement angulaire et leur combinaison ont été créés artificiellement.

Des masses de **50 gr**, de **150 gr** et de **315 gr** fixés successivement sur l'arbre du moteur ont servi pour la création intentionnelle des balourds. Les désalignements parallèle et angulaire ont été exercés pratiquement en soulevant le moteur asynchrone au moyen de plaquettes de 2mm sous les quatre pattes de fixation et pour le désaxement parallèle et uniquement sous les deux pattes avant ou arrière pour le désalignement angulaire en desserrant légèrement les accouplements. Puis nous avons procédé à la combinaison des défauts de balourds et de désalignements axiale et angulaire sur l'agrégat. Ce dernier a été soumis à des variations de charge (à vide puis à **50%** et à **75%**). Seuls les essais à mi-charge ont été représentés pour ne pas encombrer le document.

4.4.3. Troisième Banc d'essai

Ce Stand présenté en figure 4.19 a concerné deux moteurs asynchrones à cage d'écureuil MAS₃ et MAS₄ utilisée pour les différents essais expérimentaux concernant beaucoup plus le diagnostic des anomalies mécaniques combinées.



Figure 4.19 Banc d'essai.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.20 Rotor sain (a), avec balourd (b) et roulement dégradé (c)

Il s'agit de combiner un défaut de balourd de **90grammes** et un défaut de roulement. Les caractéristiques des deux moteurs et du roulement sont présentées dans les Annexes. L'accessibilité au neutre est réalisable au niveau de la plaque à borne. Mais pour cela, nous avons utilisé deux moteurs identiques afin d'avoir la possibilité de combiner sur l'un les deux défauts mécaniques simultanément et préserver un moteur sain pour le référentiel. Le premier essai a été réservé au défaut de balourd sur **MAS₃** par la fixation de masses sur un disque qui lui est solidaire (Fig.4.20b), qu'on a retiré par la suite. Après la prise de mesure on a procédé à la détérioration volontaire du roulement (Fig.4.20c) en lui retirant toute la graisse et en le saupoudrant avec des grains de sable. Puis le balourd a été remis de nouveau pour faire l'essai des deux anomalies combinées.

Ainsi sur **MAS₄**, nous avons procédé au mesurage et au traitement du courant des trois phases lors de la combinaison des deux défauts : défaut du graissage du roulement aggravé par la présence de grains de sable dans les cages du roulement et la présence du balourd de **90grammes**. L'acquisition des courants pour le diagnostic a été faite par un oscilloscope **HAMEG 507** relié à un capteur de courant. La transformée rapide de Fourier **FFT** est réalisée à l'aide d'un programme écrit dans l'environnement Matlab.

4.4.4. Quatrième Banc d'essai.

Ce banc d'essai est composé essentiellement d'un moteur asynchrone à cage **3Kw** entraînant un réducteur à 3 étages à engrenage parallèle et à denture droite hélicoïdale (fig.4.21). Les caractéristiques du système moteur- réducteur sont données dans les annexes.





Figure 4.21 Banc d'essai du Système d'entraînement électromécanique.

Cette campagne expérimentale a concerné le diagnostic et la détection prédictive par le traitement du courant statorique et du courant neutre des défauts de déséquilibre massique ou Balourd, du désalignement et de la dégradation de la denture des engrenages du réducteur et les défauts combinés obtenus par la fusion de ces derniers réducteur. Il est à noter que ces systèmes Moteur-Réducteur sont très fréquents pour l'entraînement des mécanismes de fortes puissances. 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.

La campagne d'essai est scindée en deux parties. Au départ, il a été procédé à la fixation d'une masse de **246** gr sur l'arbre du moteur puis, 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 2 mm Ensuite on a procédé à la cassure partielle de 3 dents successives de la roue Z_2 et on termine par un essai concernant la combinaison des défauts précités. 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.

La deuxième partie s'est déroulée comme suit : en première étape, il a été procédé à la défaillance artificielle d'une dent de la roue Z_2 uniquement puis à celle de la roue de sortie Z_4 ; comme deuxième étape il s'est agi de l'écaillage volontaire et en même temps des dents concernés de Z_2 et Z_4 et comme Le traitement des données est fait en utilisant le logiciel MATLAB à des fins d'analyse des signaux.

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé au départ par établir les différentes signatures vibratoires et électriques des anomalies les plus en vue dans les entraînements électriques à base de moteur asynchrone et particulièrement de gros calibres.

Les dégradations du bon fonctionnement de ces installations électromécaniques de grandes puissances sont dues essentiellement au problème des balourds et des désalignements en premier lieu et ce sont ces défaillances qui sont la cause de la détérioration des roulements (*ou des paliers lisses*) et l'usure de la denture des engrenages qui sont considérées actuellement comme les pannes les plus redoutables pour les mainteniciens car les forts ampérages se répercutent directement sur la mise hors service du moteur et des composants électroniques s'ils lui sont associés.

Comme deuxième partie nous avons décrit aussi bien les stands d'essais ayant servi pour le diagnostic et la détection que les déroulements des essais et la création intentionnelle des défauts sur l'installation. Cependant, pour des raisons de coût, il est généralement de taille réduite par rapport au dispositif réel.

Par ailleurs, certaines caractéristiques obtenues sur le banc d'essai ne sont peut-être pas exploitables directement sur l'application visée et certains défauts sont difficiles ou coûteux à réaliser.

Chapitre 5 Résultats expérimentaux et Discussions

5.1.Introduction

Comme il a été mentionné dans ce qui a précédé, la détection prédictive et la localisation fiable des défauts mécaniques simples et combinés affectant le moteur à induction, maillon faible de l'entraînement électromécanique, de l'intérieur comme de l'extérieur, tels que le balourd, le désalignement, la dégradation des roulements et des dents d'engrenage n'est pas une tâche aisée. Ces défauts naissants apparaissent d'une part avec des décibels faibles et d'autre part peuvent se masquer l'un l'autre.

Par conséquent, leur reconnaissance prématurément se complique. Aussi, devant la complexité de leurs modélisation analytiques, il est judicieux de procéder à un diagnostic sans modèle à priori par le traitement du signal. Les résultats expérimentaux, qui vont suivre ont été obtenus par une association de différentes approches de traitement du signal vont contribuer à assurer un diagnostic fiable et correct des défauts mécaniques précités qui sont courants de nos jours en milieu industriel. La validation expérimentale a été réalisée au sein de nos laboratoires du Département d'électromécanique et a nécessité quatre campagnes d'essais.

Elle a été exercée sur un agrégat de machines *Leroy Somer* de **2.6 KW**, un agrégat de machines «*Rosaty*» de **4.05 KW**, un moteur de **270 W** entraînant un mini séparateur et un système moteur asynchrone – réducteur de **3 KW**.

Le signal courant statorique de chaque moteur et celui du courant neutre ont servi de signatures pour les défaillances précitées et elles ont été fiabilisées par une technique complémentaire se résumant à une interprétation visuelle des motifs en **3D** propres à chaque type d'anomalie. Cette dernière approche est obtenue par la représentation du vecteur résultant des carrés des intensités des courants des trois phases respectives.

Afin de mieux encadrer et d'automatiser cette méthodologie de diagnostic et de détection prédictive des anomalies simples et combinées et parvenir à trancher pour celles d'entre elles qui sont masquées en basse fréquence nous concluons par un prototype d'organigramme dédié à cette tâche mais qui a concerné certains défauts (balourd, désalignement et leur fusion) mais qui peut se généraliser à tous les défauts étudiés sans ambiguïté.

5.2. Résultats Expérimentaux et Interprétations

5.2.1. Résultats de la 1ère Campagne d'essai sur l'agrégat Leroy Somer

5.2.1.1.L'approche vibratoire

Les Spectres vibratoires sont réalisés avec le Logiciel de maintenance conditionnelle: *“logiciel extended monitoring software xms”* Le moteur a été testé dans les trois directions (Axiale, Horizontale et Verticale) à l'état sain et en présence des défauts mécaniques et ceci pour les régimes à vide et en charge (50% et 75% de son nominal). La représentation sur le document n'a concernée que la charge de 50% et la direction correspondant à l'apparition clairement des défauts.

L'analyse spectrale (fig.5.1) du moteur sain et chargé à 50% montre que les vibrations globales sont dans la norme, le moteur est jugé tranquille seulement, les vibrations augmentent avec la charge et particulièrement pour la vibration axiale. Lorsque le moteur est "balourdé" avec la masse de 50g et est chargé à 50% de son nominal, la mesure vibratoire en direction horizontale (fig.5.2) laisse apparaître un pic prépondérant à la fréquence de rotation f_r (24.5 Hz), ce qui justifie clairement la présence du défaut de balourd. La présence des autres pics est liée seulement aux problèmes d'ancrage de l'agrégat au sol. Par contre pour la vibration en axiale, le changement n'est pas significatif. Pour le défaut d'alignement angulaire et dans la direction axiale (fig.5.3), on passe de la prépondérance de la fondamentale $1f_r$ à la prépondérance de l'harmonique $2f_r$.

L'augmentation de l'amplitude est agressive. Le désalignement angulaire n'a rien à voir avec la direction verticale. Le défaut de désalignement parallèle (fig.5.4) fait apparaître l'augmentation de la vibration verticale ce qui est synonyme beaucoup plus au problème d'ancrage de l'agrégat. Les vibrations se sont atténuées avec l'augmentation de la charge parce que la machine s'alourdit.

En présence du défaut combiné balourd et désalignement angulaire (fig.5.5 et fig.5.6) et pour la vibration en axiale on passe de la prépondérance de la fondamentale à la prépondérance du 2^{ème} harmonique de la fréquence de rotation.

L'augmentation de l'amplitude agressive en vibration horizontale représente le défaut balourd. En outre, il y a la présence d'autres pics à $2f_r$ (49 Hz) et $3f_r$ (73.5 Hz) générant le défaut de désalignement des arbres mais, ils sont minimes par rapport au fondamentale.

La vibration axiale est considérée comme un vrai danger pour la machine lorsqu'elle augmente et surtout lorsqu'elle est supérieure au radial, elle est encore plus augmentée que pour le désalignement angulaire seul. Les spectres vibratoires représentant les défauts de balourd et de désalignement parallèle affectant ensemble le moteur de l'agrégat sont les mêmes que ceux représentant le défaut isolé du désalignement. Seulement, la présence en plus du balourd rend les amplitudes importantes et par conséquent une augmentation de l'énergie vibratoire.

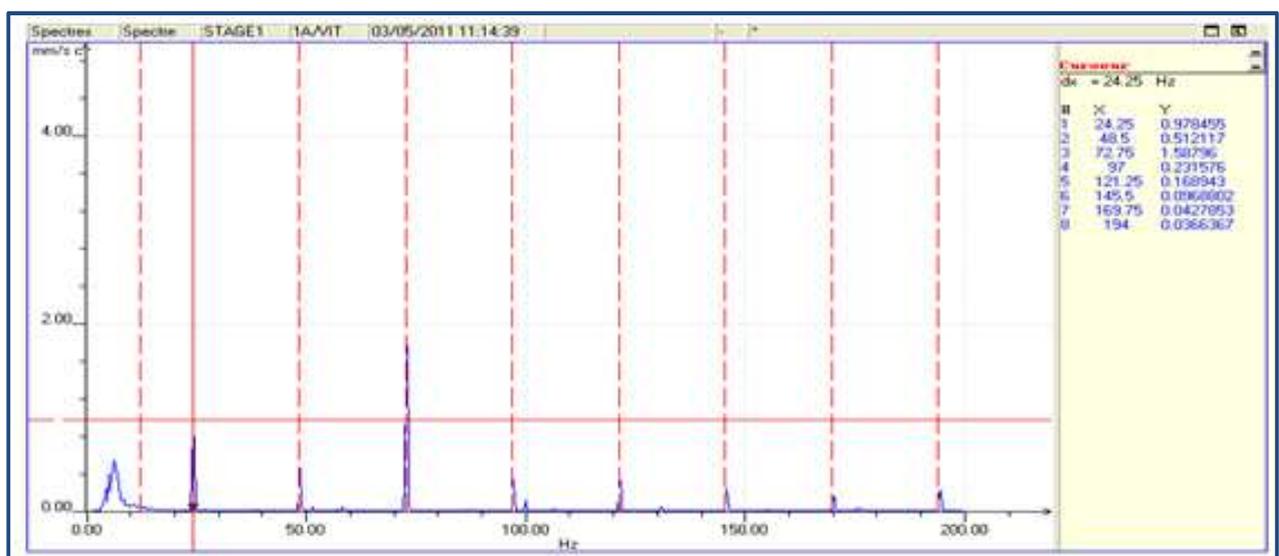


Figure 5.1 Moteur Sain

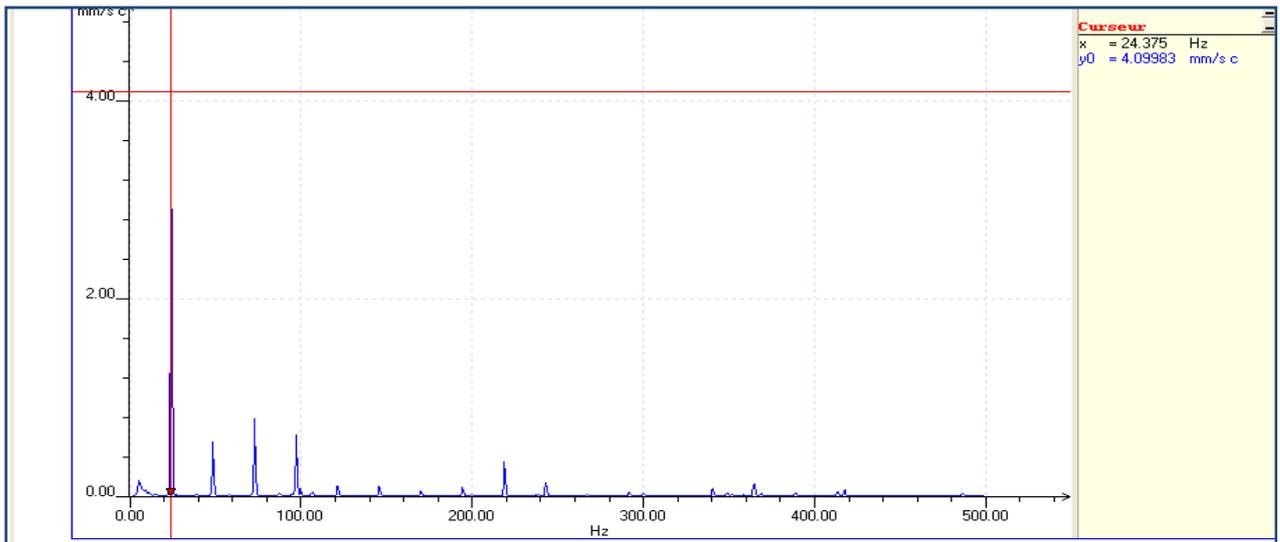


Figure 5.2 Moteur en Présence du Défaut Balourd



Figure 5.3 Moteur en Présence du Défaut de Désalignement Angulaire.

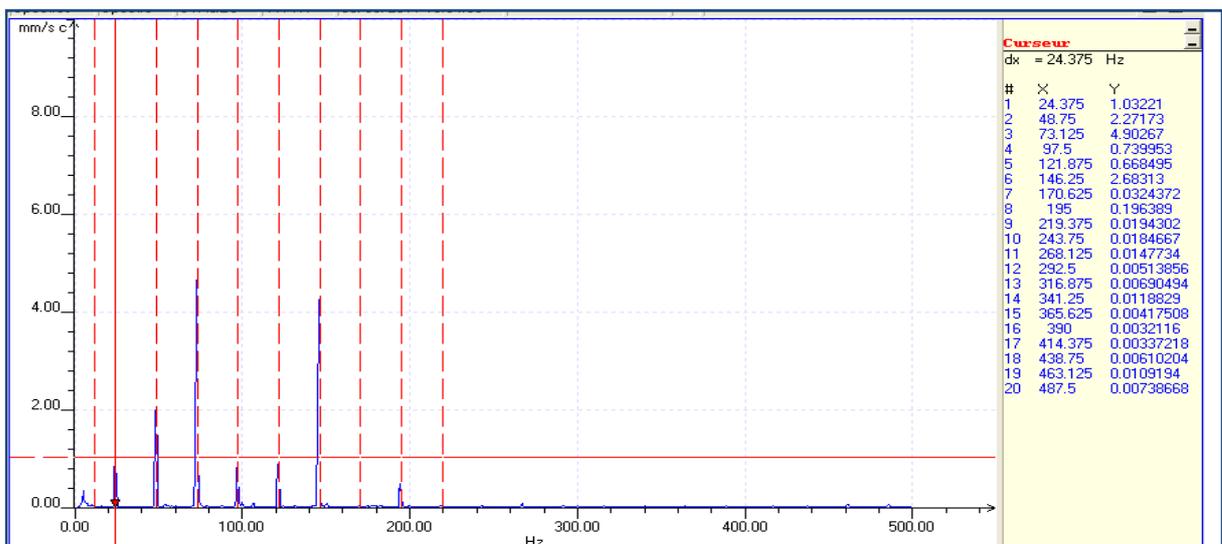


Figure 5.4 Moteur en Présence du Défaut de Désalignement parallèle.

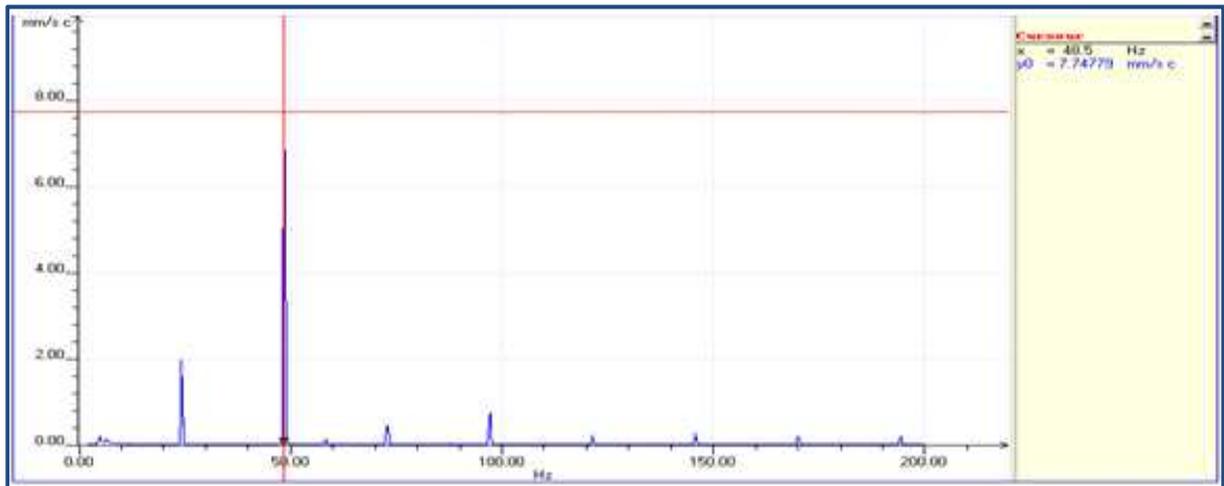


Figure 5.5 Moteur en Présence du Défaut combiné Balourd et Désalignement angulaire.

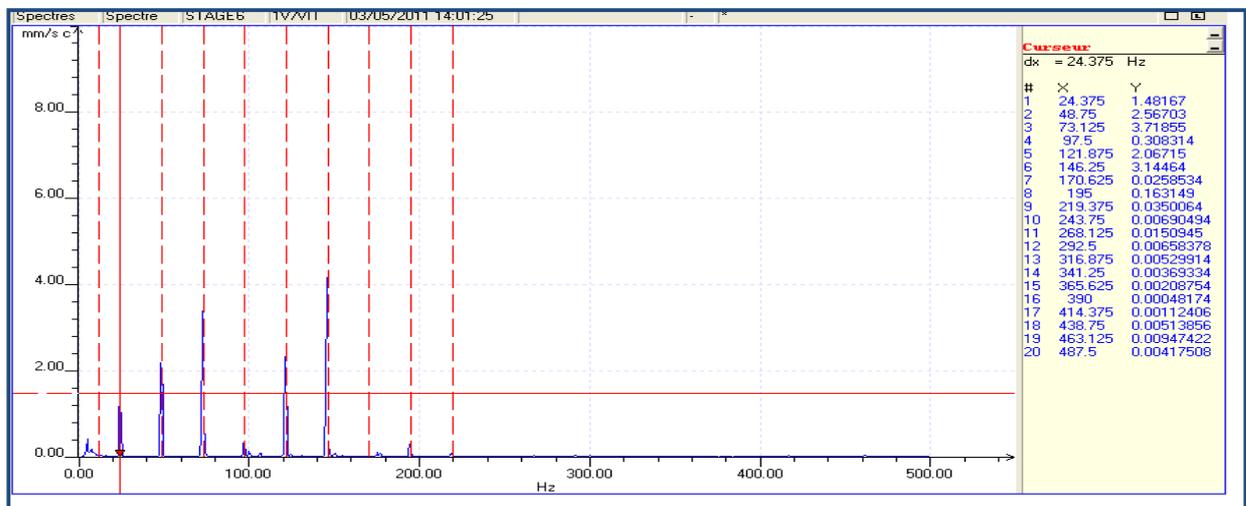


Figure 5.6 Moteur en Présence du Défaut combiné Balourd et Désalignement parallèle.

5.2.1.2. L'approche Courant Statorique

La figure 5.7 représente la caractéristique temporelle du courant statorique capté au niveau du coffret d'alimentation du moteur asynchrone. Le spectre du courant de la figure 5.8 est obtenu pour le moteur asynchrone de l'agrégat en l'absence de toute anomalie (Sain). La figure 5.9 donne le spectre lorsque le système d'entraînement est en présence d'un balourd de 50g.

Les fréquences porteuses du balourd sont repérées à 25.5 Hz et à 74.5 Hz ; Une fois le balourd supprimé nous avons provoqué un désalignement entre l'axe du moteur et celui de la génératrice dont nous représentons le spectre du courant en figure 5.10. La fréquence caractéristique du défaut est générée à 99 Hz et 123.5 Hz. La variation de la charge (50 % et 75%) n'a pas eu effet sur les fréquences porteuses des défauts mécaniques et leurs amplitudes.

La figure 5.11 illustre les spectres du courant pour les deux types de défauts mécaniques. Par la suite, nous représentons le spectre du courant statorique du moteur subissant la combinaison des deux défauts en même temps (*balourd et désalignement*) avec une pondération de la fenêtre de Bartlet. Il est à remarquer une addition linéaire des raies indiquant la présence du

défaut sur le domaine fréquentiel (figure 5.12). La variation de la charge (50 % et 75%) n'a pas eu effet sur les fréquences porteuses des défauts mécaniques et leurs amplitudes.

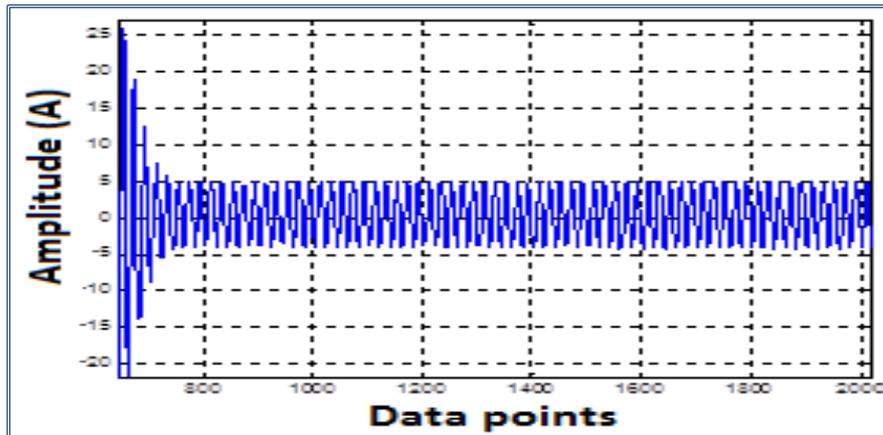


Figure 5.7 Caractéristique Temporelle du courant statorique : Moteur sain

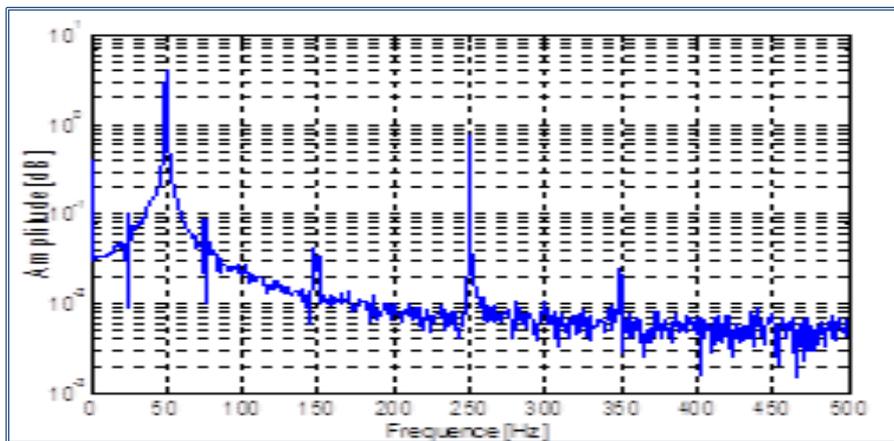


Figure 5.8 Spectre du courant statorique du système non dégradé

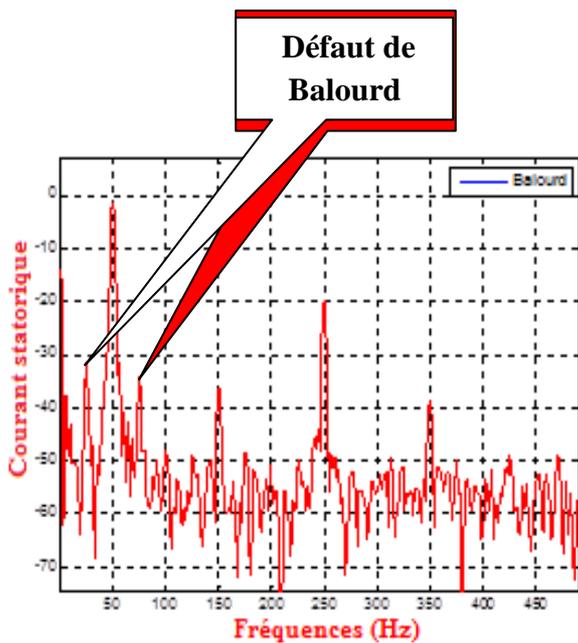


Figure 5.9 Spectre du courant en présence du Balourd

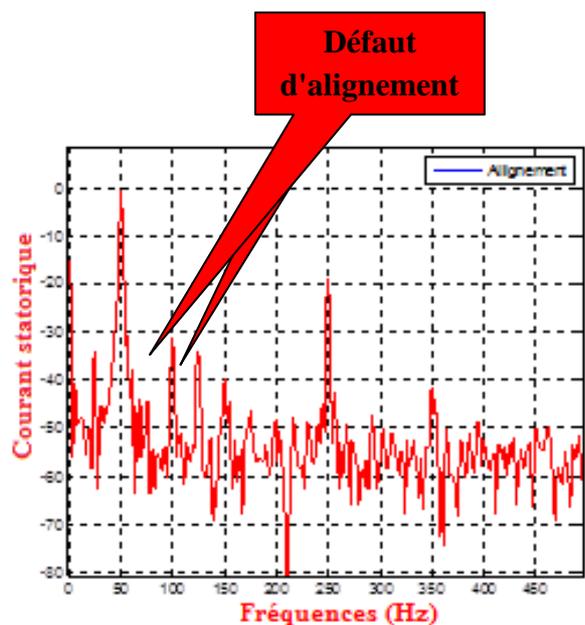


Figure 5.10 Spectre du courant en présence du désalignement

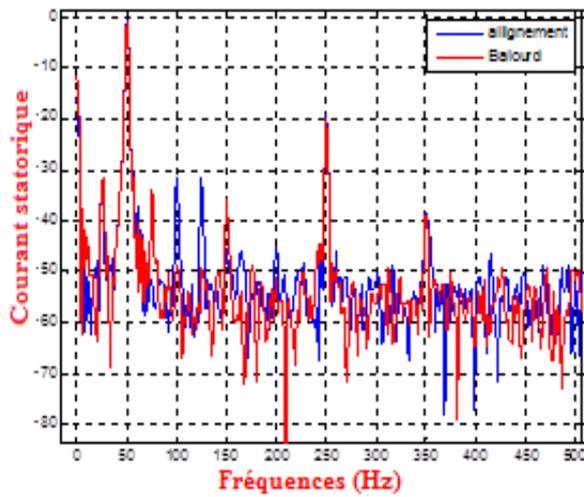


Figure 5.12 Les deux spectres présentant chacun un défaut

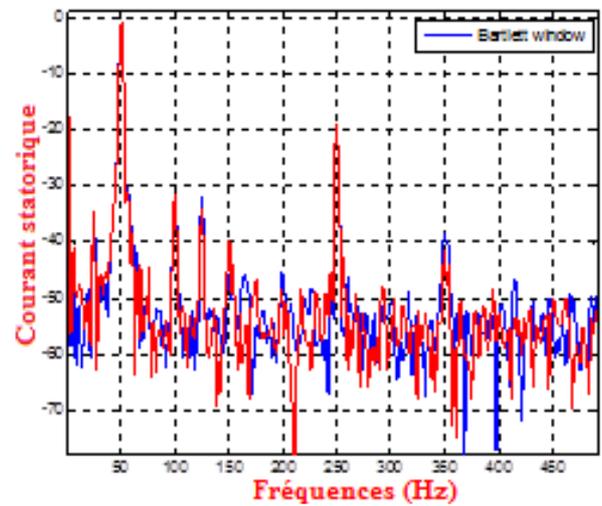


Figure 5.11 Spectre présentant la combinaison des deux défauts mécaniques

5.2.1.3. L'Approche du Carré des Intensités de courants statoriques

La figure 5.13 donne la représentation du motif (M_1) lorsque l'entraînement électrique ne présente aucune détérioration. L'orbite n'est pas circulaire mais plutôt ellipsoïdale; ceci est dû généralement à des imperfections de fabrication des machines.

Lorsque le système est en présence du balourd, le motif M_2 obtenu a une forme géométrique polygonale (fig.5.14). Suite à un désalignement, le motif M_3 est un polygone dont les côtés s'entrecroisent (fig.5.15). Lorsque la dégradation du système est causée par la combinaison du balourd et du désalignement, le motif M_4 apparaît comme une fusion (ou une superposition) des motifs M_2 et M_3 représentant les deux défauts mécaniques respectivement (fig.5.16).

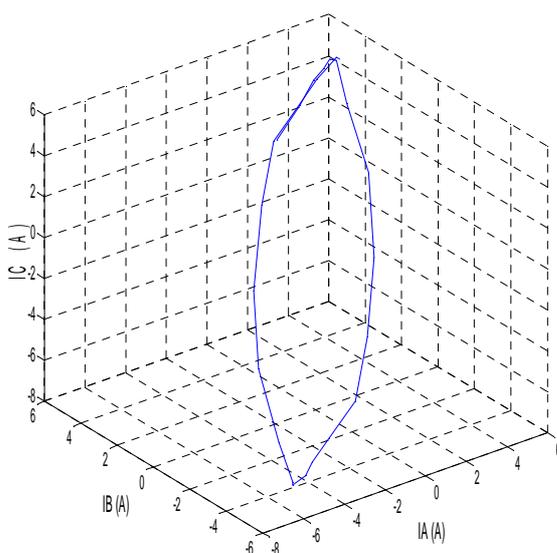


Figure 5.13 Motif en 3D moteur sain

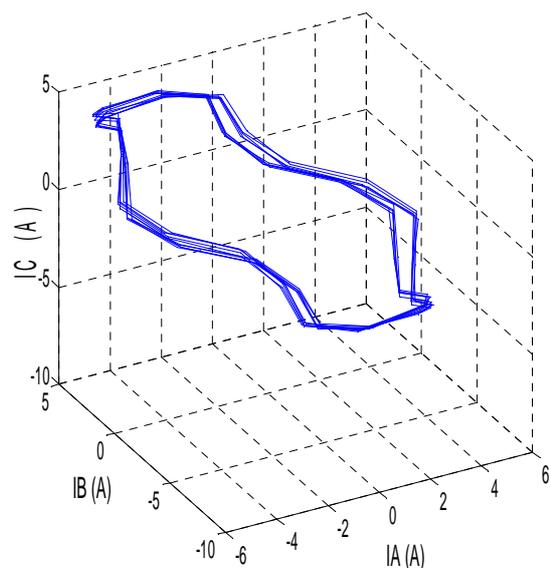


Figure 5.14 Motif en 3D en présence du balourd

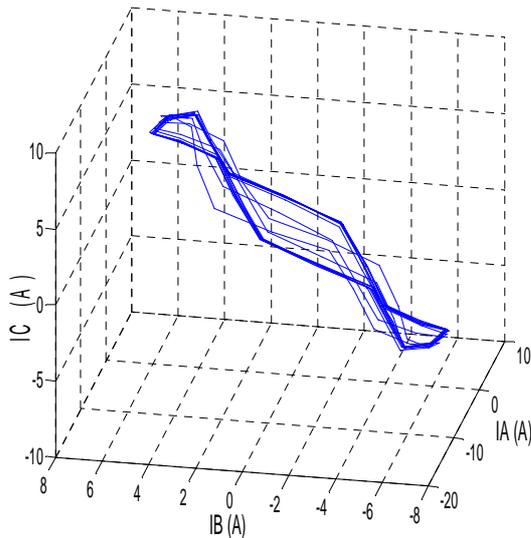


Figure 5.16 Motif 3D lors du défaut de désalignement

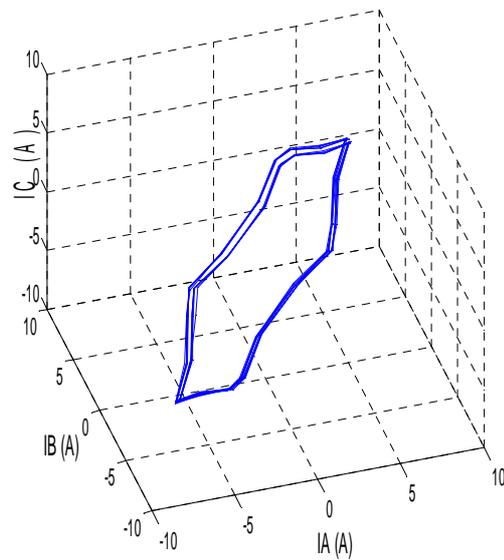


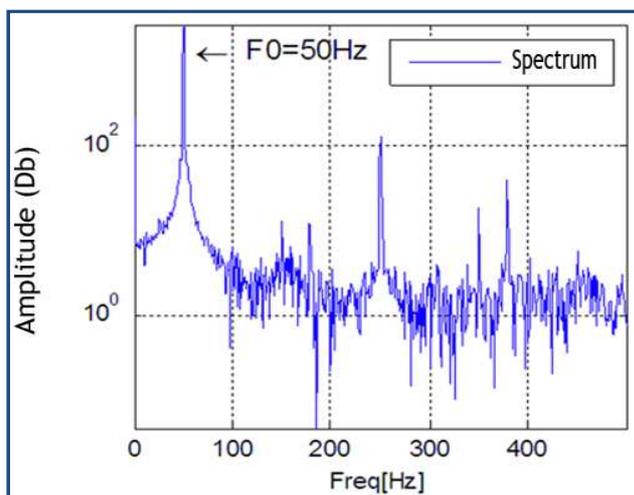
Figure 5.15 Motif en 3D en présence du défaut combiné: balourd et désalignement

5.2.2. Résultats de la 2ème Campagne d'essai sur L'agrégat de Machines électriques ROSATY :

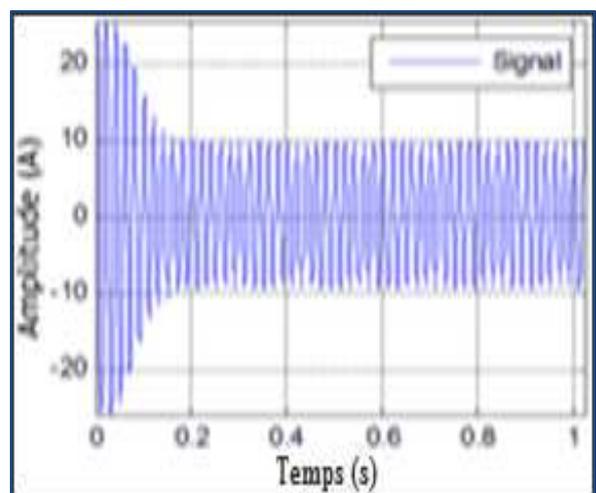
5.2.2.1. Signature du courant statorique

En figure 5.17 sont représentés la caractéristique temporelle et le contenu du spectre du courant de la phase du moteur asynchrone pour l'état sain relatif de l'agrégat de machines électriques. En fait aucune altération n'a été faite mais il existe toujours des imperfections naturelles.

Des bandes latérales autour des harmoniques significatifs peuvent exister même lorsque la machine est saine. En figure 5.18 sont représentés trois spectres du courant de la phase statorique avec à gauche (figure.18 a) le contenu spectral lorsque le moteur est soumis à un balourd de 50 gr et où nous pouvons remarquer la présence de raies aux fréquences porteuses 26.17 Hz et 73.83 Hz, témoignant du défaut de balourd à $f_{umb.} = f_s \pm f_r$ avec $1f_r = 23.83\text{Hz}$.

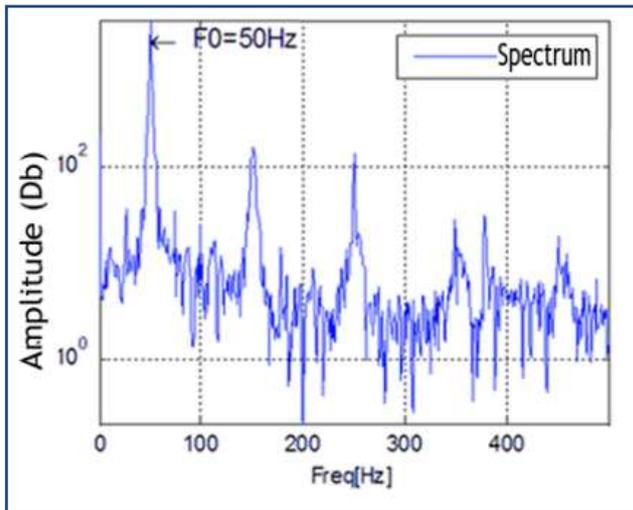


(a)

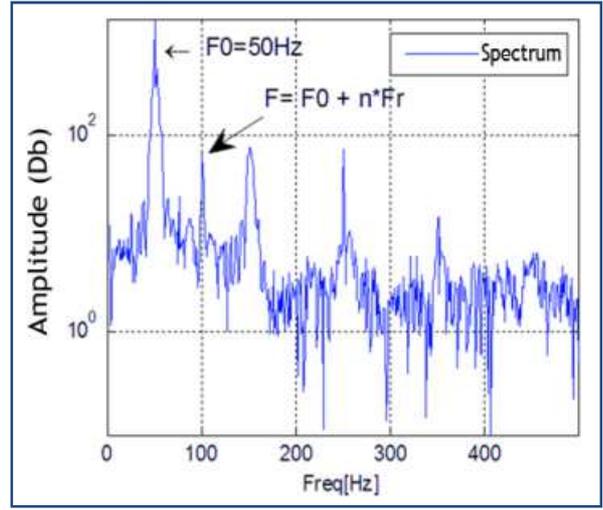


(b)

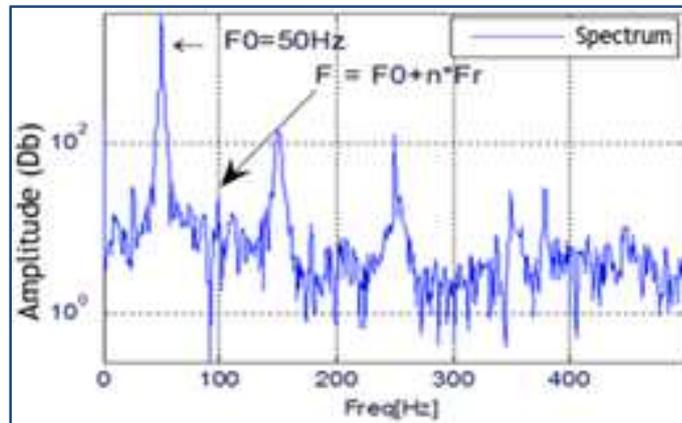
Figure 5.17 Caractéristique temporelle du courant et son spectre pour le moteur Sain.



(a)

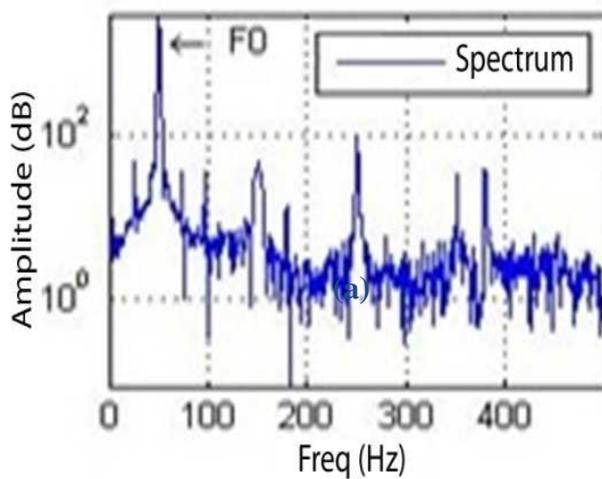


(b)

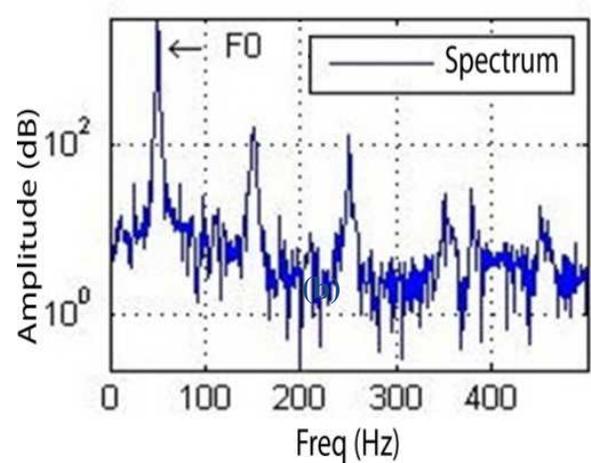


(c)

Figure 5.18 Spectres du courant statorique du Moteur en présence des Défauts mécaniques : (a) Balourd, (b) Désalignement parallèle, (c) Désalignement angulaire.



(a)



(b)

Figure 5.19 Spectres du courant statorique du moteur en présence des défauts mécaniques combinés : (a) balourd et désalignement parallèle, (b) balourd et désalignement angulaire.

Au centre (figure 5.18b) et à gauche (figure 5.18c) sont représentés respectivement les contenus spectraux lorsque le moteur est confronté à un désalignement parallèle puis à un désalignement angulaire.

Nous assistons à une émergence manifeste de raies (marqueurs) à la fréquence $f_{dés} = 50 + 2f_r = 97.76$ Hz avec une amplitude prépondérante et à $f_{dés} = 50 \pm f_r = 73.83$ Hz avec une amplitude relativement atténuée pour le désalignement axial et plus ou moins importante pour le désalignement angulaire. La présence de ces raies témoigne bien d'une excentration du rotor par rapport au stator.

Lorsque l'agrégat de machines est soumis à la combinaison des défauts de balourd et de désalignement (Fig. 5.19 a,b), les signatures fréquentielles $50 \pm f_r$ and $50 + 2f_r$ apparaissent ensemble dans le spectre du courantphasique avec une addition arithmétique insignifiante de leurs amplitudes.

5.2.2.2. Signature du Courant Neutre

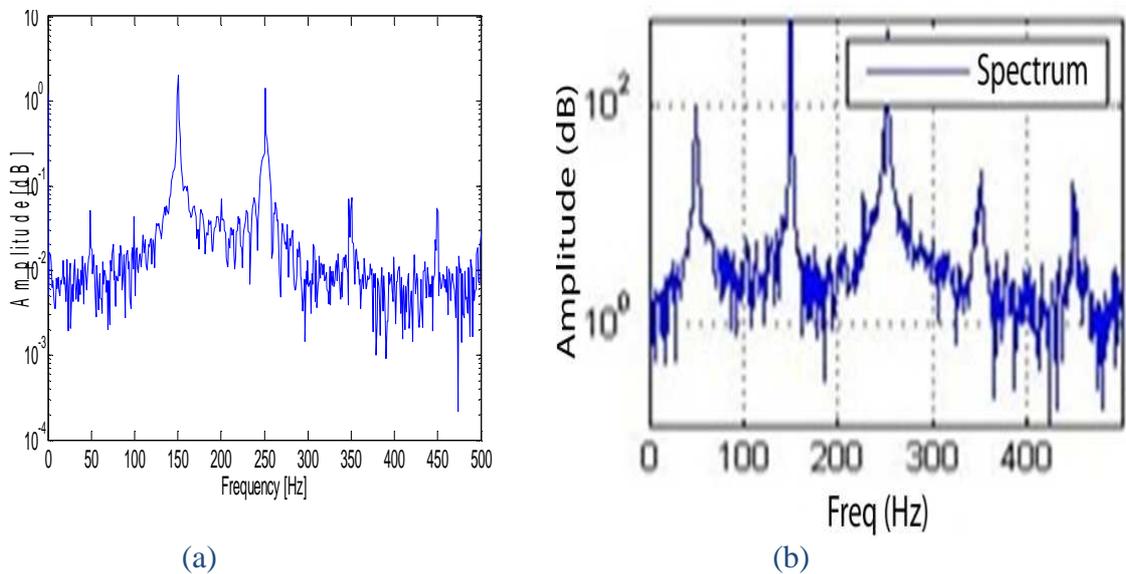


Figure 5.20 Spectre du courant neutre: (a) état sain, (b) défaut de balourd.

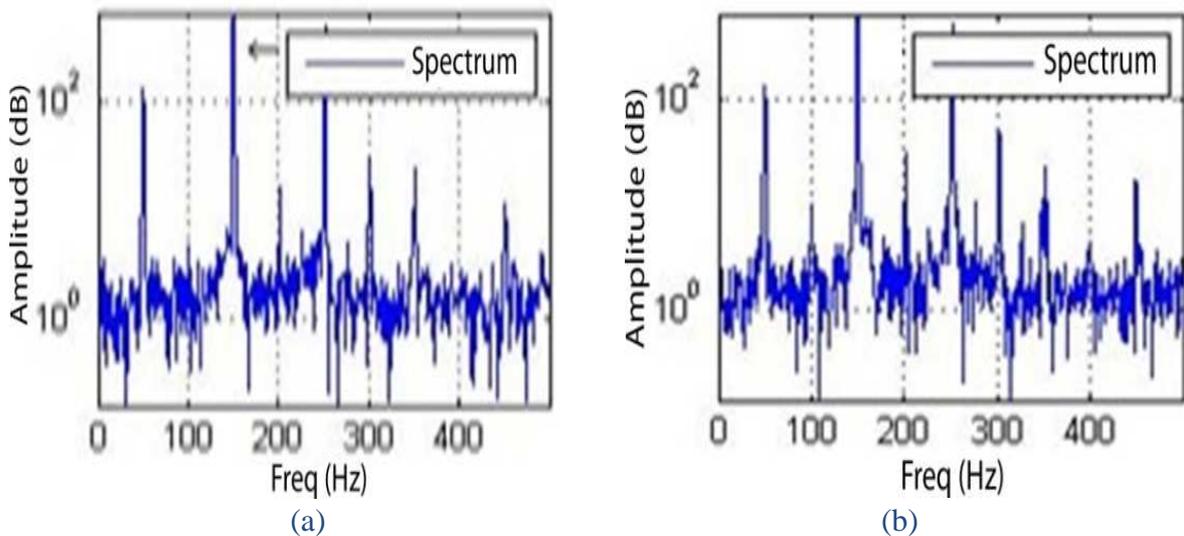


Figure 5.21 Spectre du courant neutre: (a) défaut de désalignement, (b) défaut lors de la combinaison du balourd et du désalignement.

La Figure 5.20a montre le spectre du courant neutre dans le cas de la machine non dégradée, où l'on remarque la prépondérance du troisième harmonique suivi du cinquième harmonique et l'atténuation du fondamental. La Figure 5.20b montre le spectre du courant neutre dans le cas de la dégradation du moteur asynchrone lors de la présence du balourd sur son arbre mécanique de transmission. La Figure 5.21a illustre le spectre du courant neutre lors d'une défaillance de désalignement. La Figure 5.21b expose les fréquences émergentes dans le spectre du courant neutre par suite de la combinaison des défauts combinés du balourd et du désalignement.

5.2.2.3. Analyse par le carré du courant. Représentation en 3D.

La figure.5.22 donne le motif obtenu par la représentation spatiale en 3D du modèle lorsque l'entraînement via le moteur n'est soumis à aucun défaut (sain). La forme de l'orbite n'est pas tout à fait ellipsoïdale suite aux imperfections naturelles de l'agrégat. Les figures 5.23, 5.24 et 5.25 illustrent le cas du moteur en présence successivement de différentes masses de balourds au niveau de l'arbre de transmission mécanique. Pour un balourd de 50 grammes, l'orbite s'est rétrécie pour ressembler presque au chiffre huit.

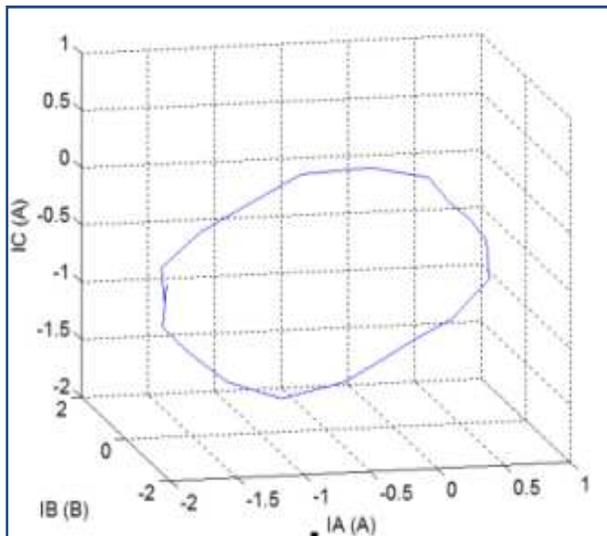


Figure 5.22 Motif pour le moteur sain

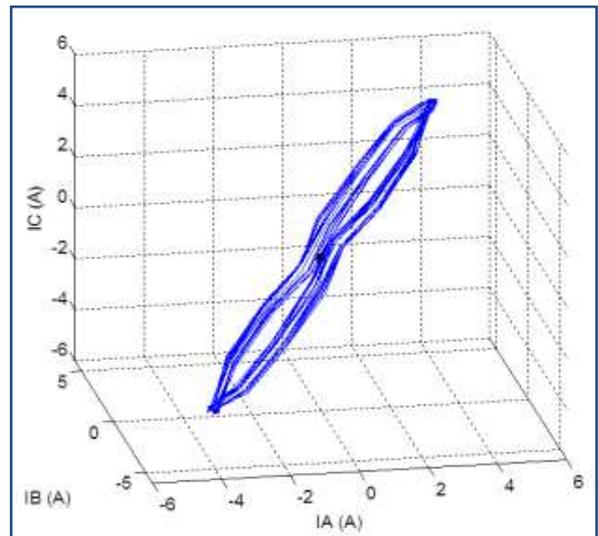
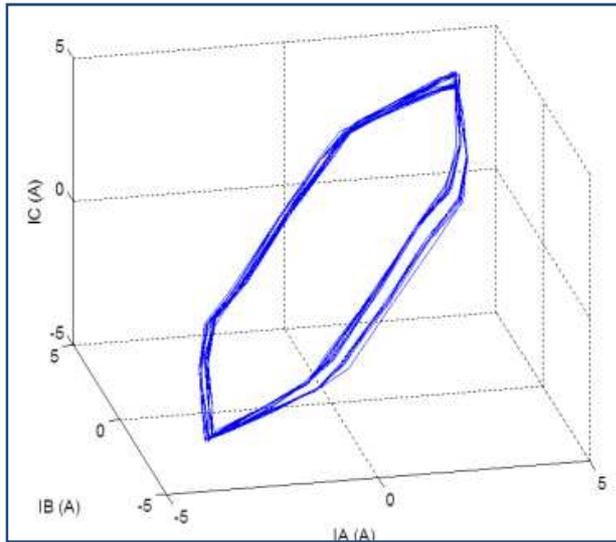
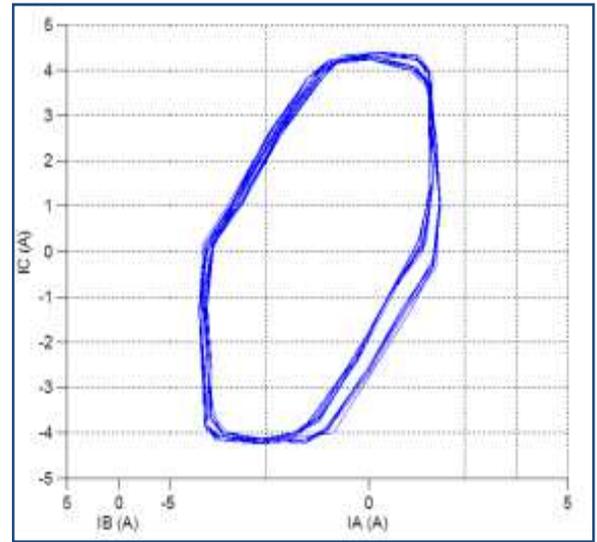


Figure 5.23 Motif pour le défaut de
Balourd de 50 gr

Lorsque la masse constituant le balourd passe de **50gr** à **150gr**, nous remarquons un étirement de l'orbite avec un accroissement de l'aire délimitée par un contour avec une forme de tendance beaucoup plus polygonale (*hexagone*)

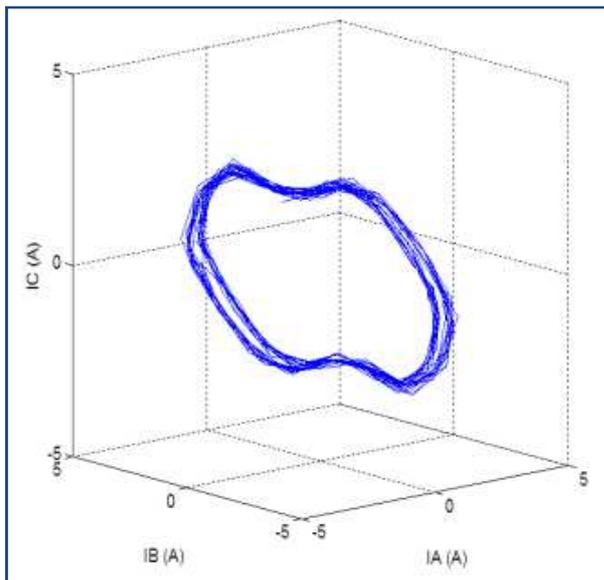


(a)

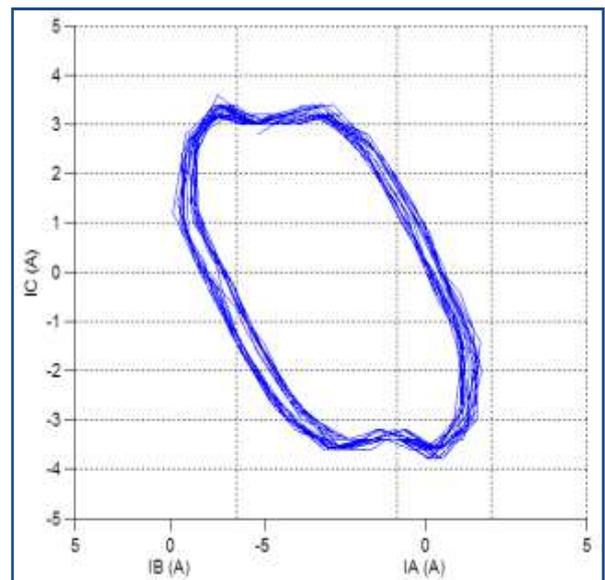


(b)

Figure 5.24 Motif pour le Défaut de Balourd (masse de 150gr): Vue en 3D (a), Vue orthogonale (b)



(a)



(b)

Figure 5.25 Motif symbolisant le défaut de Balourd (masse de 315 gr): Vue en 3D (a), Vue orthogonale (b)

Lorsque on accentue le balourd en augmentant la masse jusqu'à 315 grammes nous observons un motif représenté par une orbite ayant beaucoup plus la forme d'une hypocycloïde.

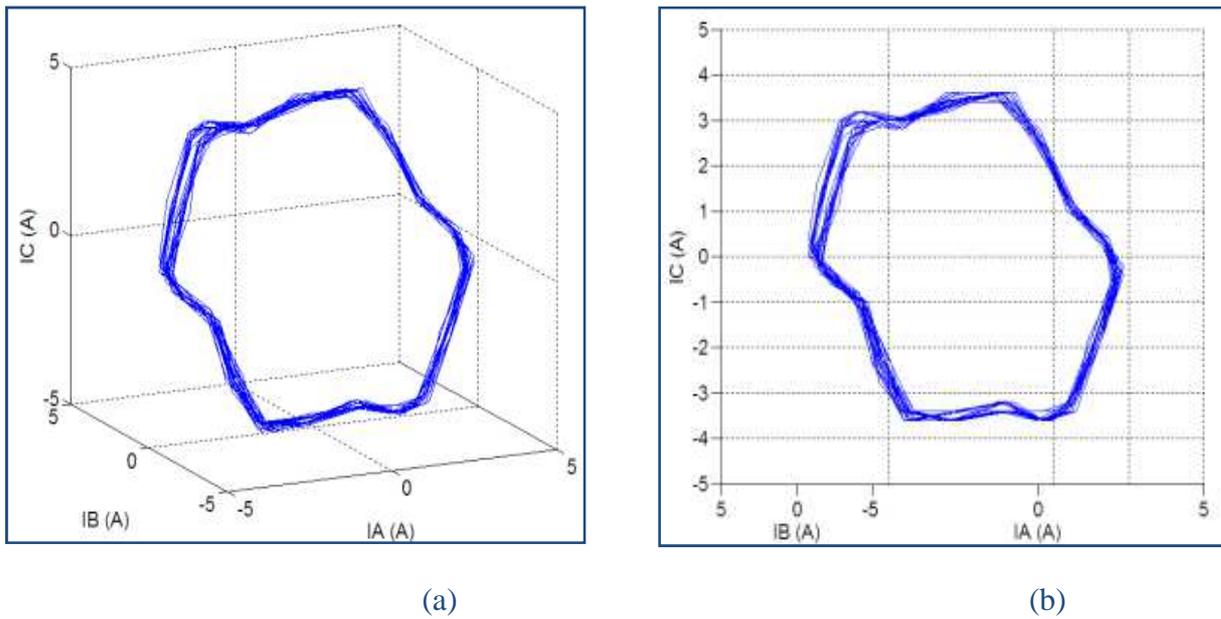


Figure 5.26 Motif représentant le défaut de désalignement : (a) Vue en 3D (b) Vue orthogonale en 2D

La figure. 5.26 a et 5.26 b montrent le motif lorsqu'il ya un désaxement entre les deux machines de l'agrégat.

Le motif est représenté par une orbite dont le contour a pris la forme d'un décagone.

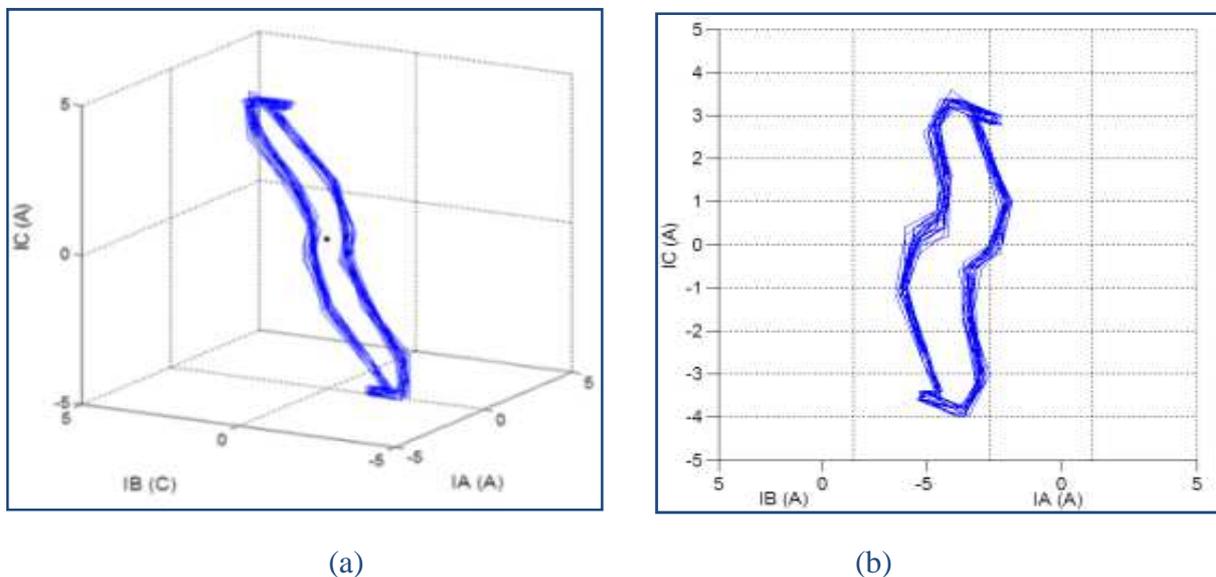


Figure 5.27 Motif marquant le défaut Combiné du balourd et du désalignement):

Les figures 5.27 a et 5.27 b illustrent le motif en 3D et en 2D représentant la signature du défaut combiné du balourd et du désalignement affectant l'entraînement électrique. La forme de l'orbite a viré vers un contour fermé constitué d'une suite de segments brisés.

5.2.3. Résultats de la 3^{ème} Campagne d'essai

5.2.3.1. Courant de la phase statorique:

En figure 5.28 sont représentées les figures concernant le moteur sans la présence d'aucun défaut artificiel (relativement sain).

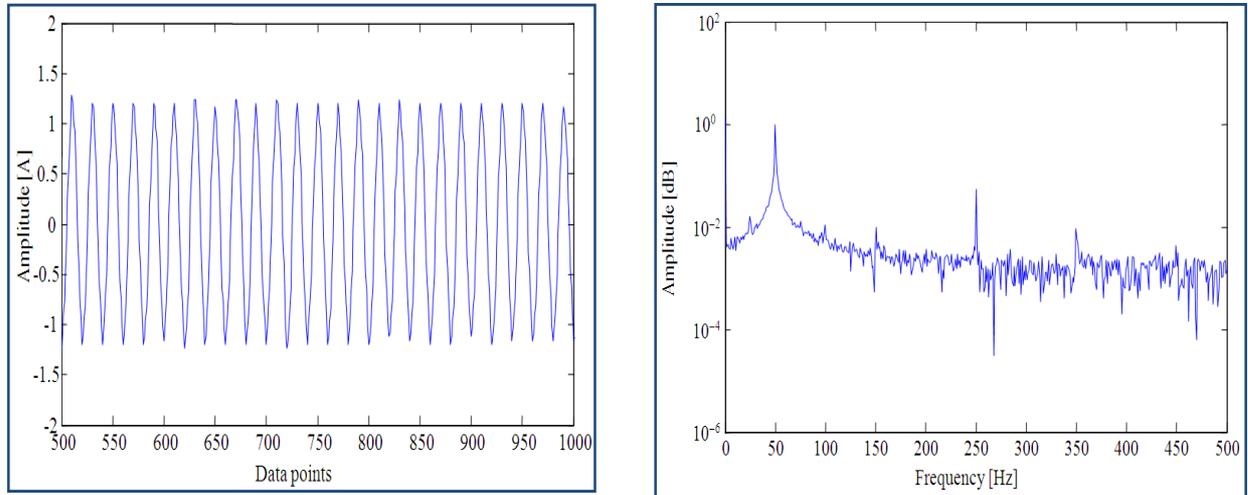


Figure 5.28 Caractéristique temporelle du courant statorique et son spectre

Il faut noter que contrairement aux résultats théoriques (idéal), les spectres obtenus par les expérimentations pour le cas sain contiennent des composantes spécifiques au défaut attestant d'une asymétrie naturelle au rotor, vu que la construction de la machine n'est pas parfaite. Sur le spectre du courant (fig.5.29), une émergence des raies aux fréquences **23.44 Hz** et **72.27 Hz** apparaissent de part et d'autre du fondamental ainsi qu'une émergence de raies autour des harmoniques impairs 3^{ème}, 5^{ème}, 7^{ème} et 9^{ème} harmonique. Ceci atteste bien de la présence d'un déséquilibre massique.

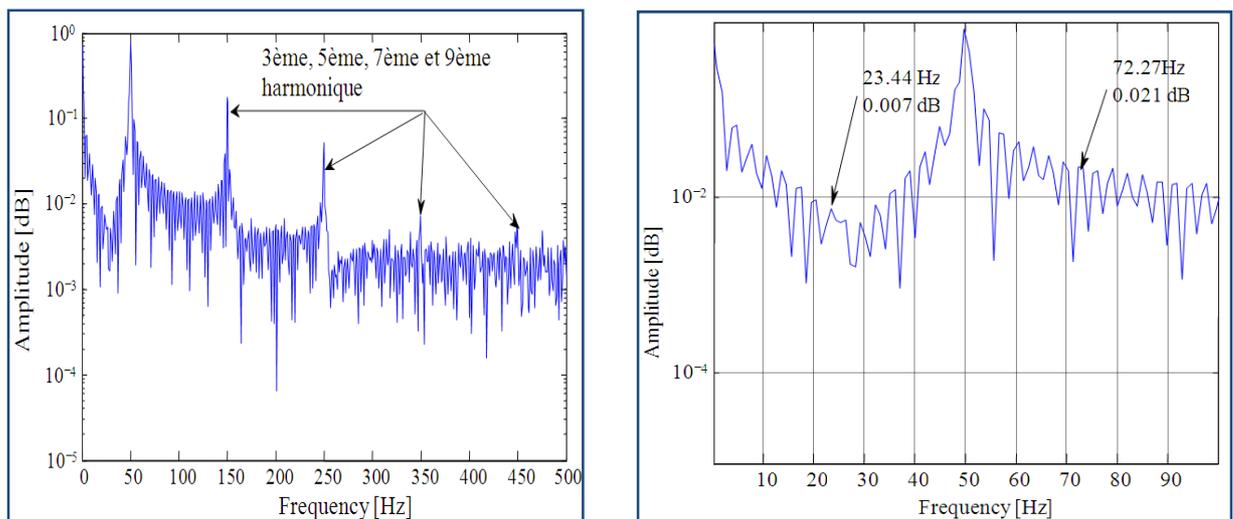


Figure 5.29 Spectre du courant de la phase statorique du moteur

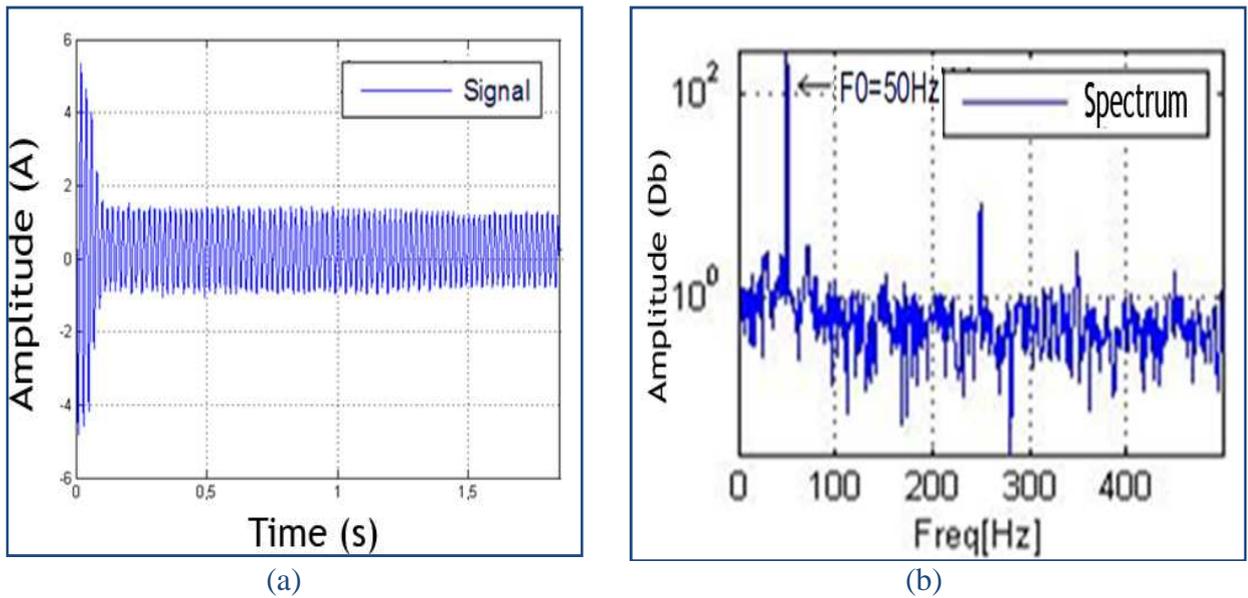


Figure 5.30 (a) Caractéristique temporelle et son spectre moteur sain, (b) roulement condition idéale

La figure 5.30 illustre le cas du moteur sans aucune défaillance. Par contre, la figure 5.31 donne la caractéristique temporelle du courant statorique, le spectre et son zoom en présence d'un défaut de graissage. Les signatures spectrales sont montrées dans le tableau 5.1.

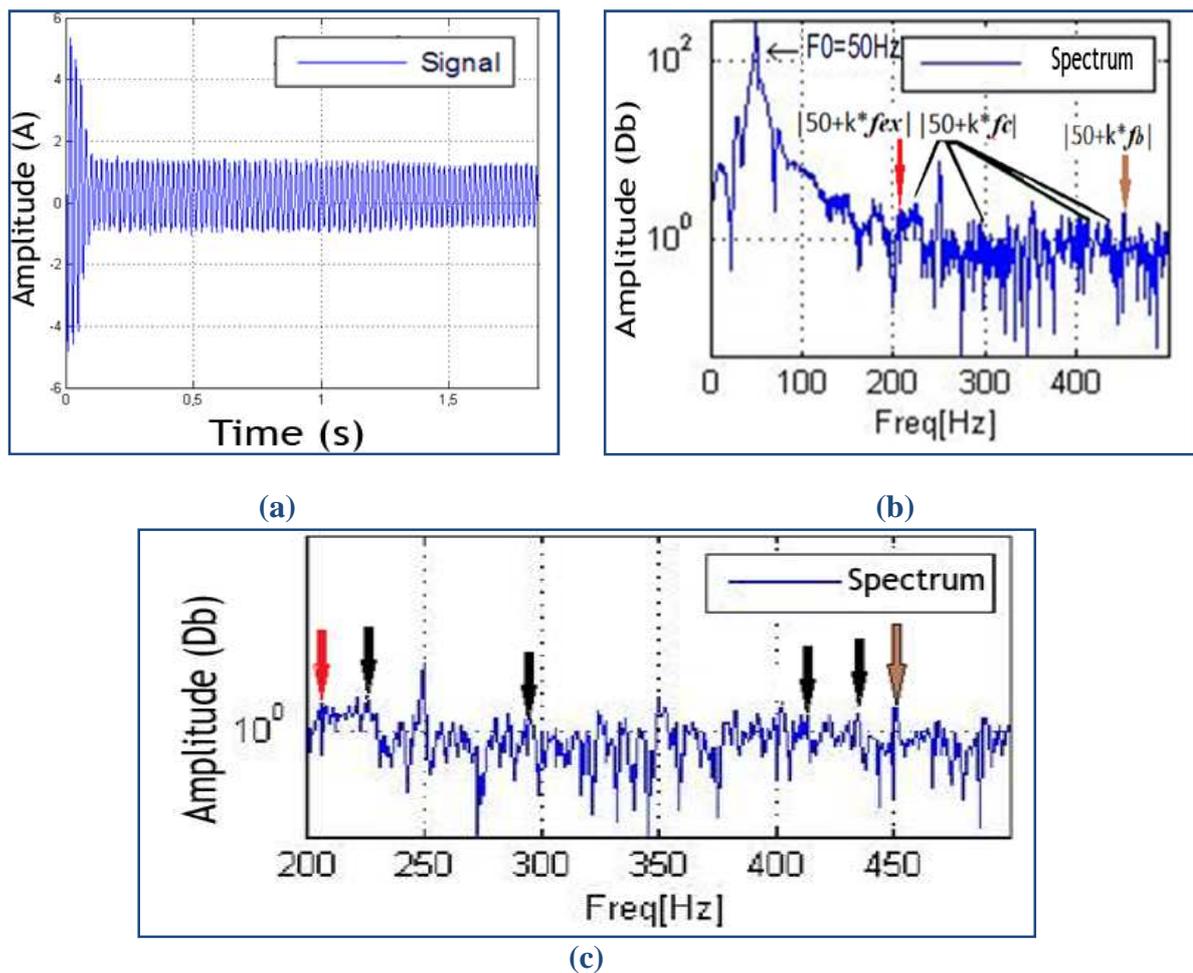


Figure 5.31 (a) Signal temporel du courant de phase, (b) son spectre (c) son zoom en la présence du défaut de graissage.

Eléments du roulement	Fréquence caractéristiques de défauts, Hz	Fréquence du défaut graissage
Bague externe	78.38	206
Cage	9.79	226, 382,422
Bille	136.39	322, 459

Tableau 5.1 Fréquences relatives aux défauts graissage.

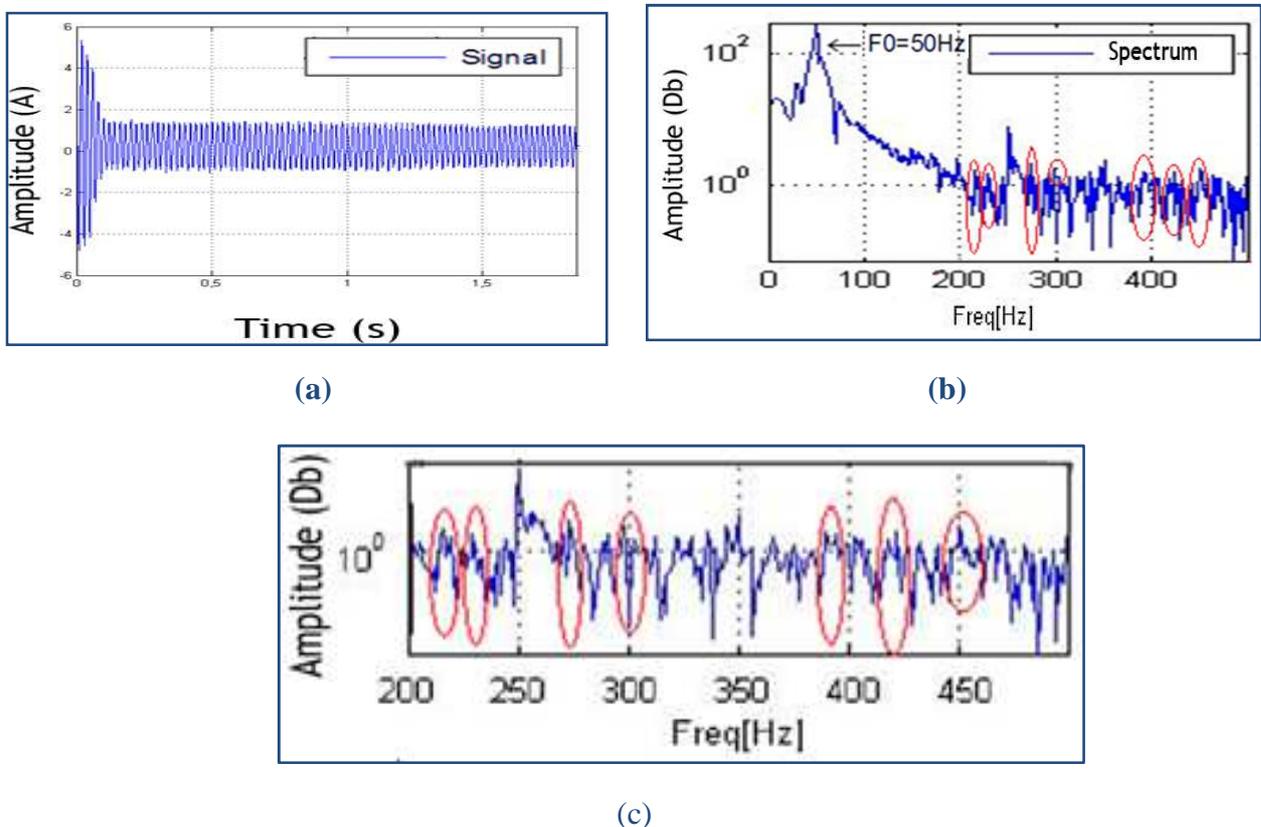


Figure 5.32 Roulement sans graisse et contaminé par la poussière.

(a) Caractéristique temporelle du courant ;(b) Spectre du courant (c) son zoom.

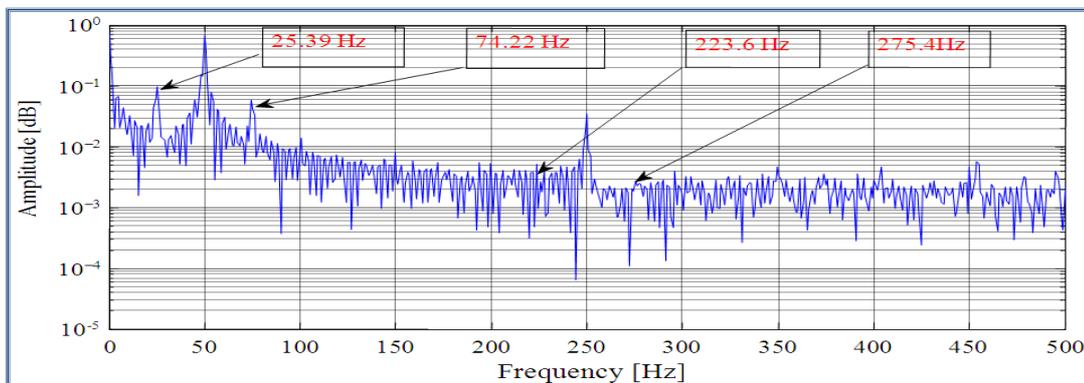
La figure 5.32 montre les caractéristiques temporelle du courant statorique, son spectre et son zoom lors de la détection des défauts d'absence de graissage et environnemental (*contamination par les poussières*). L'absence de lubrification du roulement combiné à l'effet de la présence des grains de sable sur ses éléments (billes, bague et cage) affectent le spectre du courant statorique en laissant apparaître une augmentation de la densité des raies déjà existante, l'apparition de nouvelles raies spectrales en d'autres plages de fréquences comme indiquées sur le tableau 5.2 et la modification de l'amplitude des raies déjà présentes en fonctionnement normale.

Eléments du roulement	Fréquence caractéristiques de défauts, Hz	Fréquence du défaut graissage et poussière
Bague externe	78.38	206
Bague interne	108.25	266
Cage	9.79	226, 382,422
Bille	136.39	322, 459

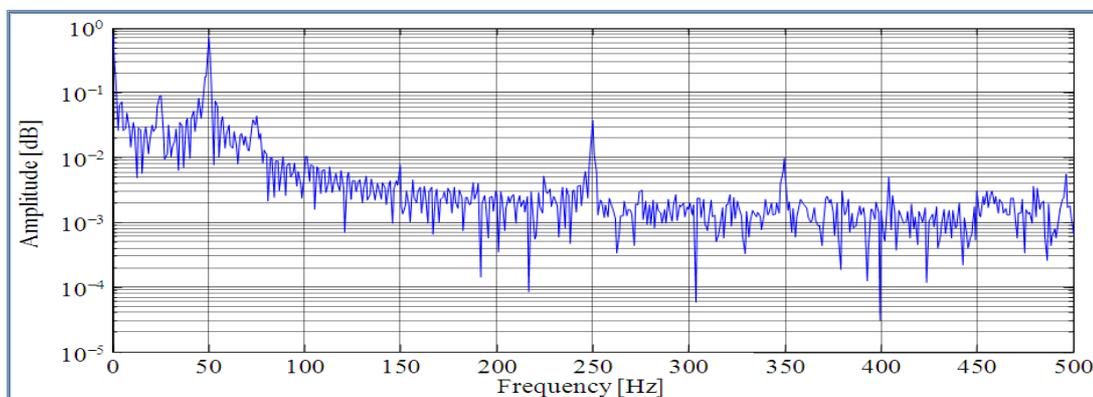
Tableau 5.2 Fréquences relatives aux défauts graissage et contamination du roulement.

5.2.3.2. Défaut Combiné Balourd et Roulement par le courant des 3 phases

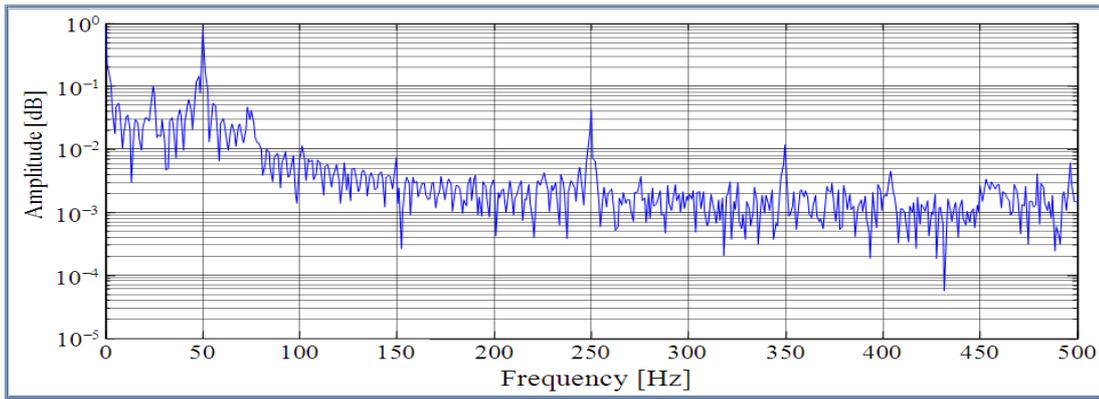
En figure 5.33 sont montrés les spectres respectifs des courants des trois phases d'alimentation du moteur dégradé suite à la combinaison des défauts du balourd et du roulement. L'apparition des raies autour du fondamental dans les spectres du courant ainsi que la présence du cinquième harmonique et de la densité des raies tout autour dans le spectre du courant (figure 5.33 a,b,c) par exemple : 26.67 Hz ; 73.33Hz ; 226.67Hz et 273.33Hz.



(a)



(b)



(c)

Figure 5.33 Spectre du courant du moteur en présence du défaut combiné : déséquilibre mécanique et défaut de roulement.

Figure. 5.33. a) Phase A; **(b)** Phase B; **(c)** Phase C.

5.2.3.3. Analyse du Courant neutre

La présence des harmoniques d'ordre 3 (**Fig.5.34**) prouve la circulation du courant dans le neutre

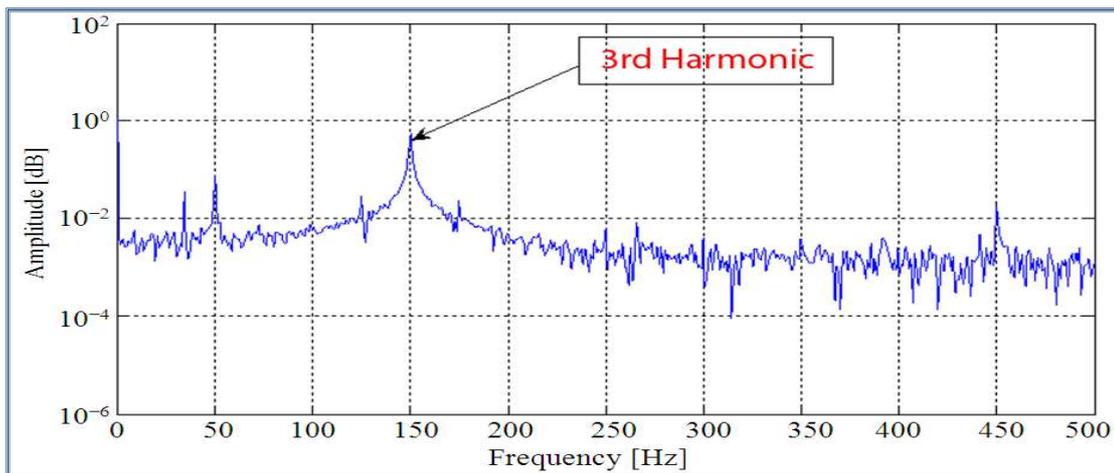


Figure 5.34 Courant Neutre du moteur pour le cas sain

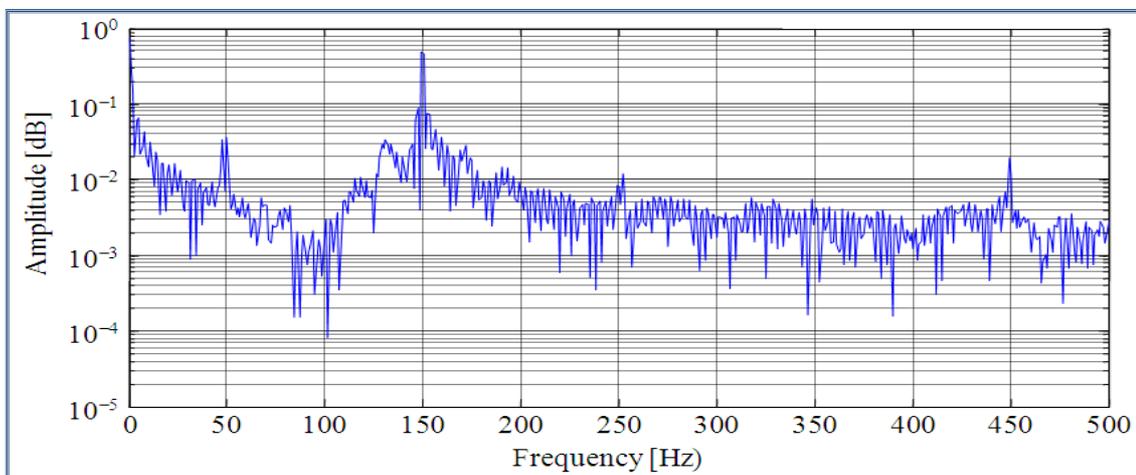


Figure 5.35 Courant neutre défaut balourd

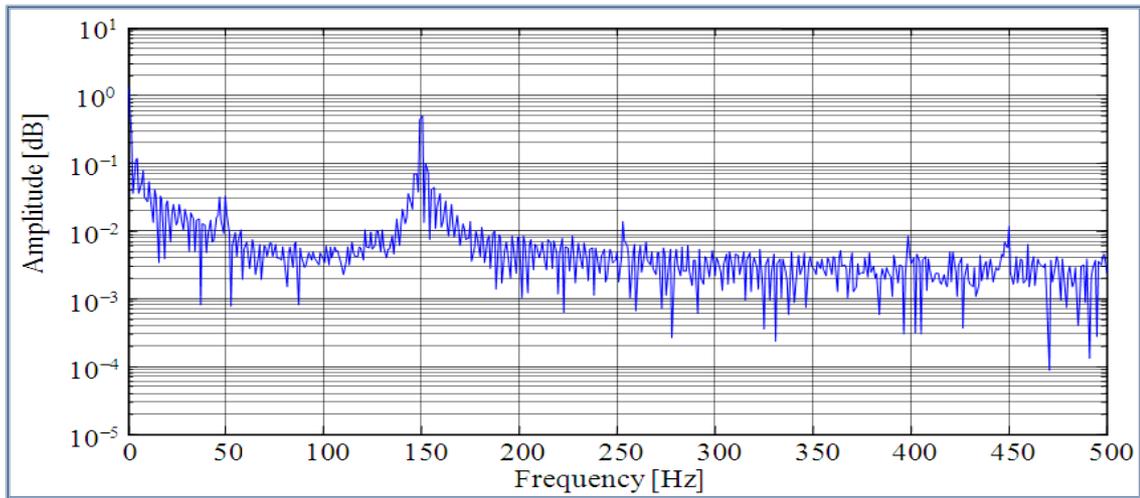


Figure 5.36. Courant Neutre, défaut Combiné Balourd et Roulement

5.2.3.4. Interprétation du Carré des Intensités des Courants Statoriques

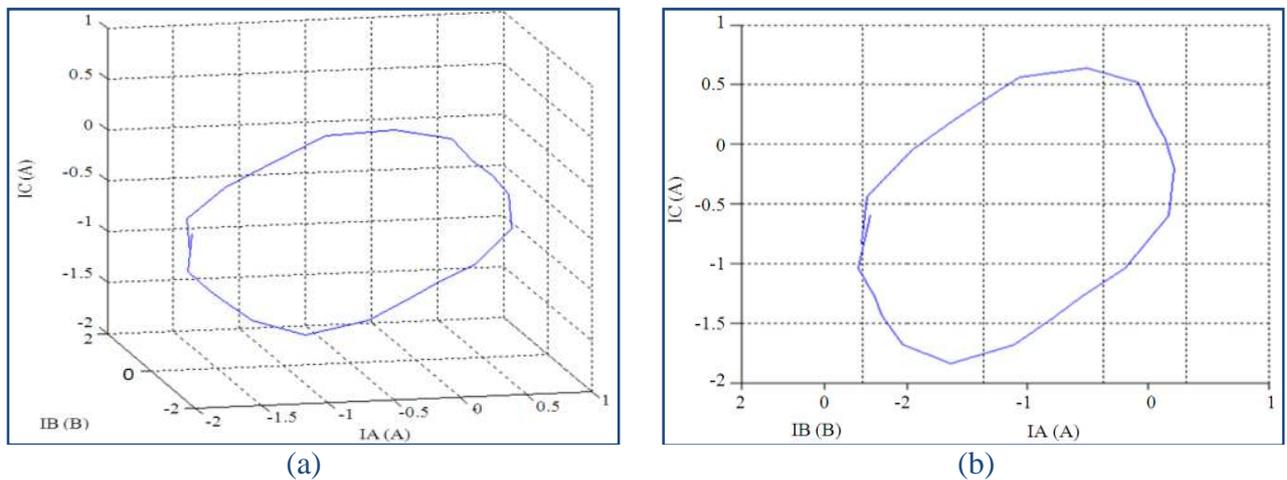


Figure 5.37 Représentation du courant statorique en 3D pour le cas du moteur sain :
(a) Vue en 3 D, (b) Vue orthogonale

La figure 5.37 qui illustre le motif modélisant le cas sain apparaît sous la forme d'une orbite ellipsoïdale et non circulaire. Ceci atteste bien de l'asymétrie du champ tournant due aux imperfections de fabrication de la machine asynchrone.

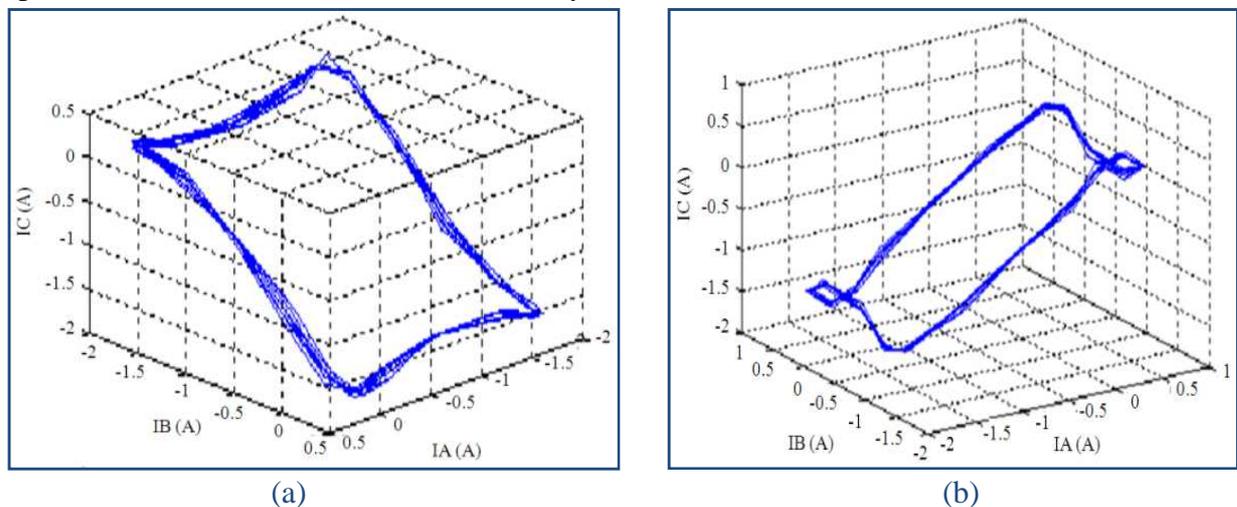


Figure 5.38 Représentation en 3D dans les cas: (a) défaut de roulement; (b) Balourd

La figure 5.38a donne la forme du contour décrit dans l'espace par les carrés du courant des trois phases statoriques lorsque le moteur fonctionne avec un roulement à bille défaillant par contre la figure 5.38b, c'est quand ce dernier est en présence d'un déséquilibre massique (*ou balourd*).

Il est à remarquer que quand il s'agit d'un défaut mécanique la forme ellipsoïdale est substituée par une forme polygonale avec des côtés curvilignes (*une forme hypocycloïdale*).

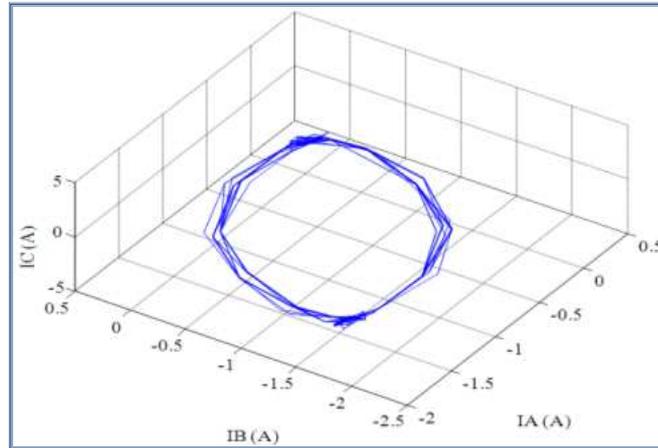


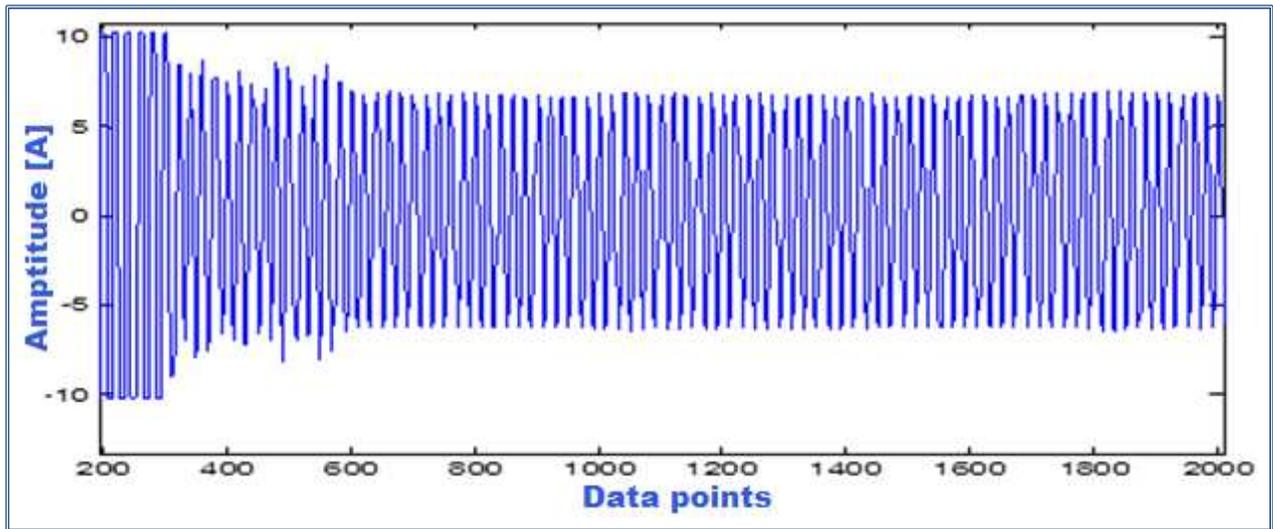
Figure 5.39 Motif en 3D pour le cas du Moteur dégradé avec défauts multiples :

Le modèle affiché par la figure 5.39 se présente comme une orbite résultant de la superposition de contours ellipsoïdaux et polygonaux. Par conséquent, ceci atteste bien de l'addition des contours représentant les trois différents défauts. L'épaississement de la section périphérique, tout comme pour les défaillances uniques, est une signature symbolisant l'évolution de la gravité du défaut. Il est à noter que l'effet de la variation de la charge n'est relativement pas significatif. La détection et le diagnostic des défauts multiples et de nature différente sont rendus robustes par l'analyse et l'interprétation visuelle de l'orbite obtenue avec la représentation spatiale des carrés des intensités des courants d'alimentation du moteur à induction.

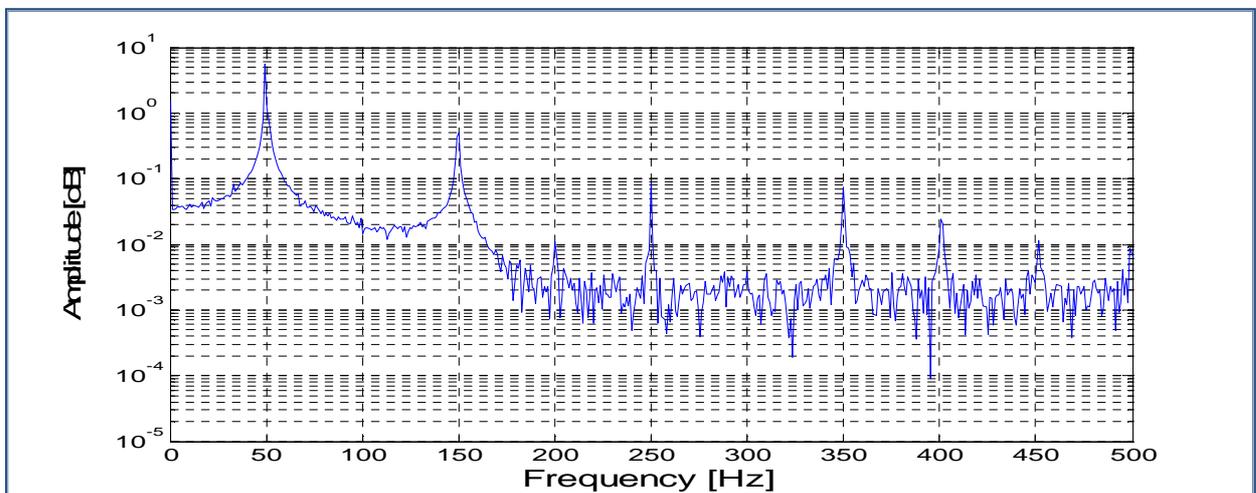
5.2.4. Résultats de la 3ème Campagne d'essai sur le moteur-Réducteur

5.2.4.1. Système Electromécanique non dégradé.

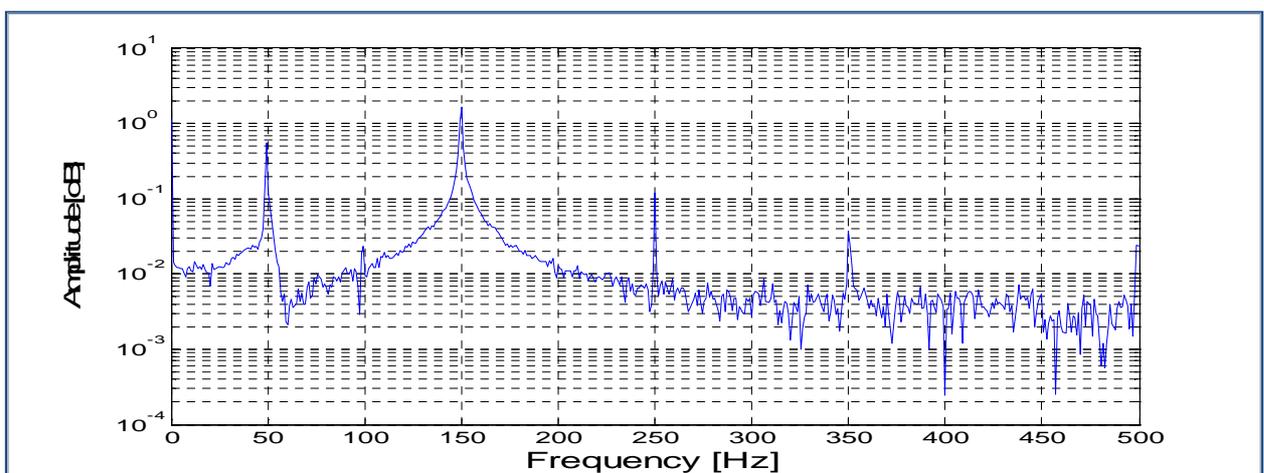
A cet effet, les spectres de l'intensité (**FFT**) du courant circulant dans la phase et le conducteur neutre du moteur asynchrone ont été représentés pour chaque situation. Ils sont suppléés par une représentation spatiale en 3D des carrés des intensités du système triphasé du courant d'alimentation du moteur à induction.



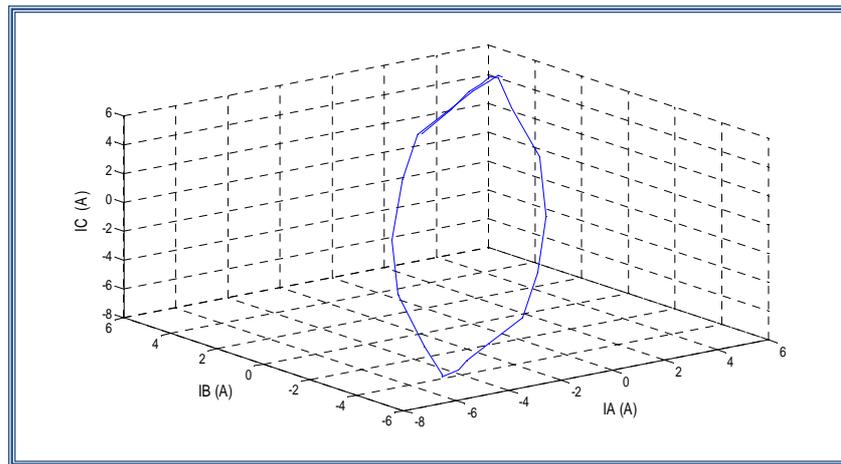
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 5.40 Caractéristique temporelle du courant du système moteur –réducteur (a) ; Spectre du courant phasique (b) ; Spectre du courant Neutre (c) ; Motif en 3D (d)

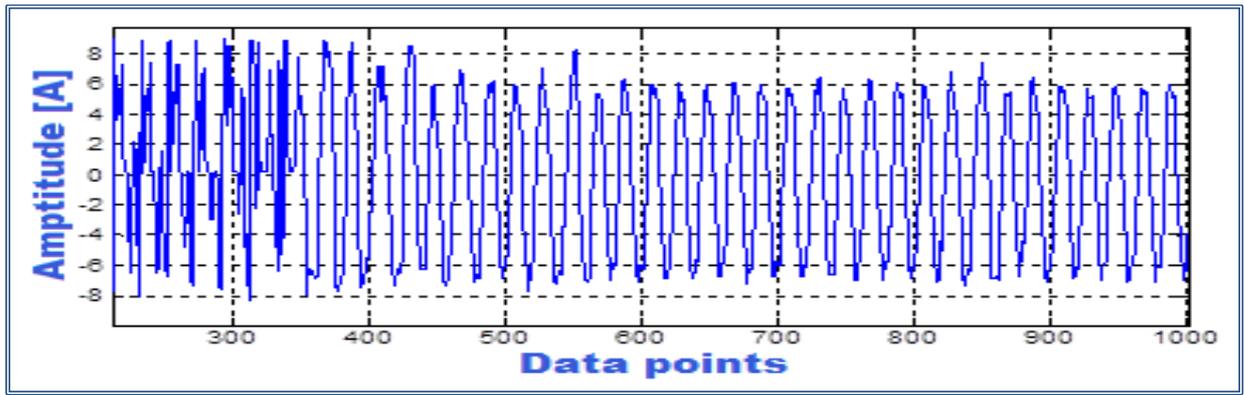
La figure 5.40 a. b, expose la caractéristique temporelle du courant de la phase du stator et son spectre en l'absence de toute dégradation intentionnelle sur le système électromécanique. Pour le spectre du courant du neutre, donné en figure 5.40 c, la prépondérance de l'harmonique d'ordre 3 est remarquable. Ces spectres sont suppléés par une représentation spatiale en 3D des carrés des intensités du système triphasé du courant d'alimentation du moteur à induction (fig. 5.40 d).

Il faut noter que contrairement aux résultats théoriques, les spectres obtenus par les expérimentations contiennent tout de même des composantes spécifiques au défaut dû à des imperfections de fabrication de la machine. Ceci est valable aussi pour la figure 5.40 d qui représente le motif interprétant le fonctionnement du système sain. Il apparaît sous la forme d'une orbite ellipsoïdale et non circulaire.

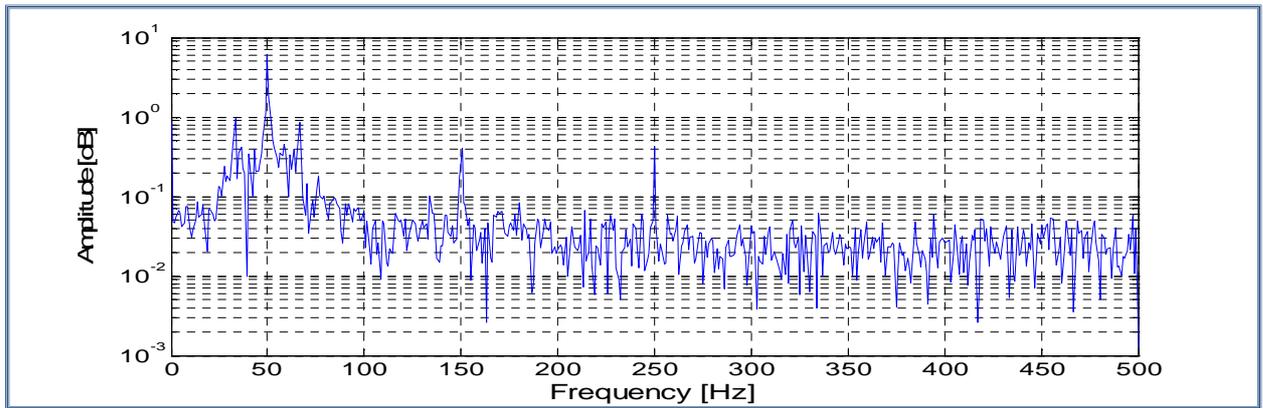
5.2.4.2. Système moteur-Réducteur défaillant suite à l'usure partielle de 3 dents.

Application des techniques de transformées traditionnelles et avancées :

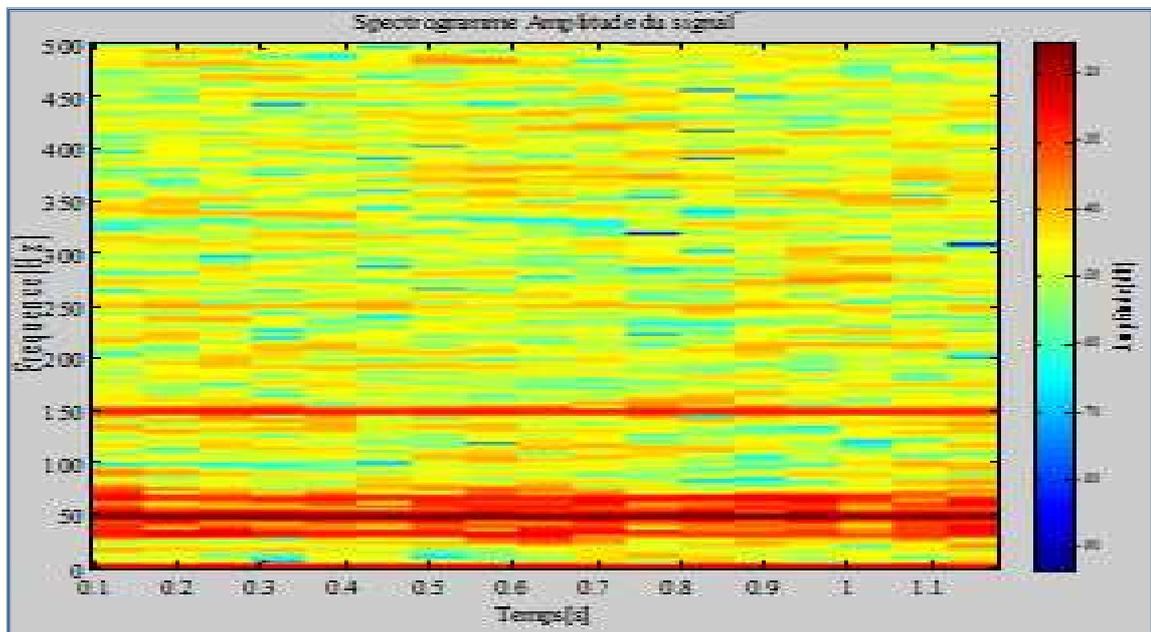
Nous donnons en figure 5.41 la représentation par des techniques de transformée traditionnelle et avancées du courant transitoire pour le cas lorsque la roue dentée du réducteur du système d'entraînement présente une usure sur trois dents adjacentes.



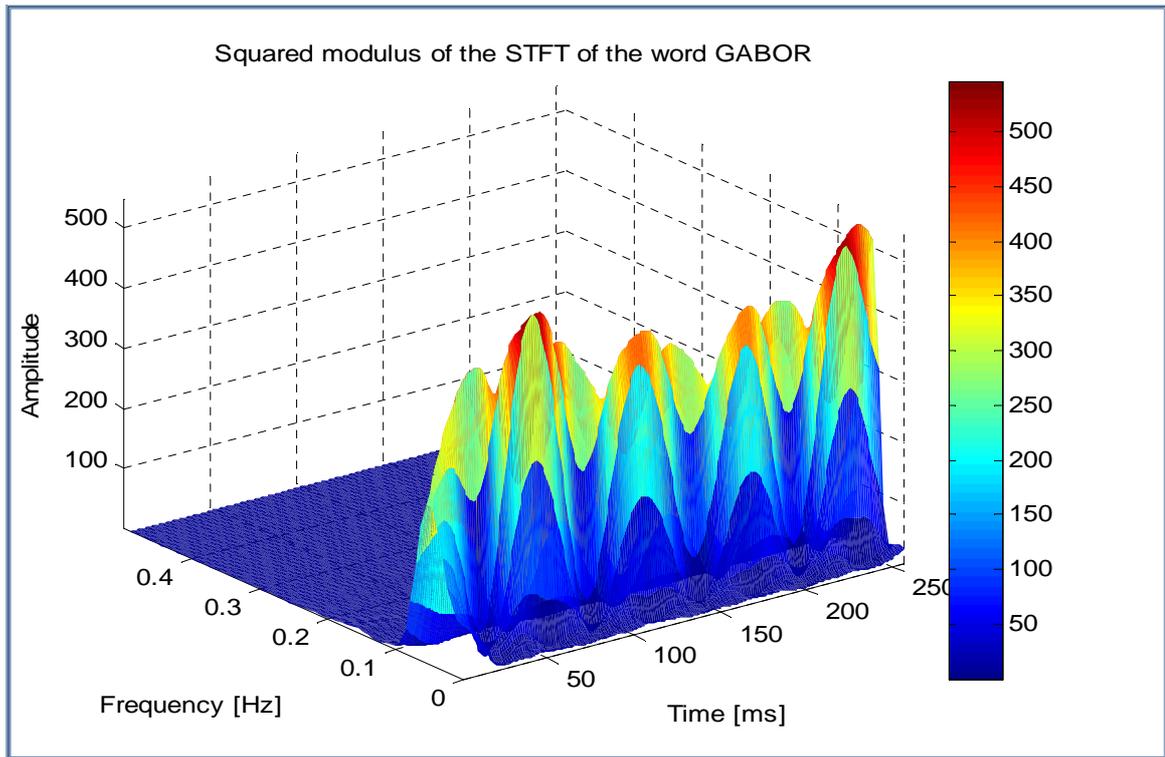
(a)



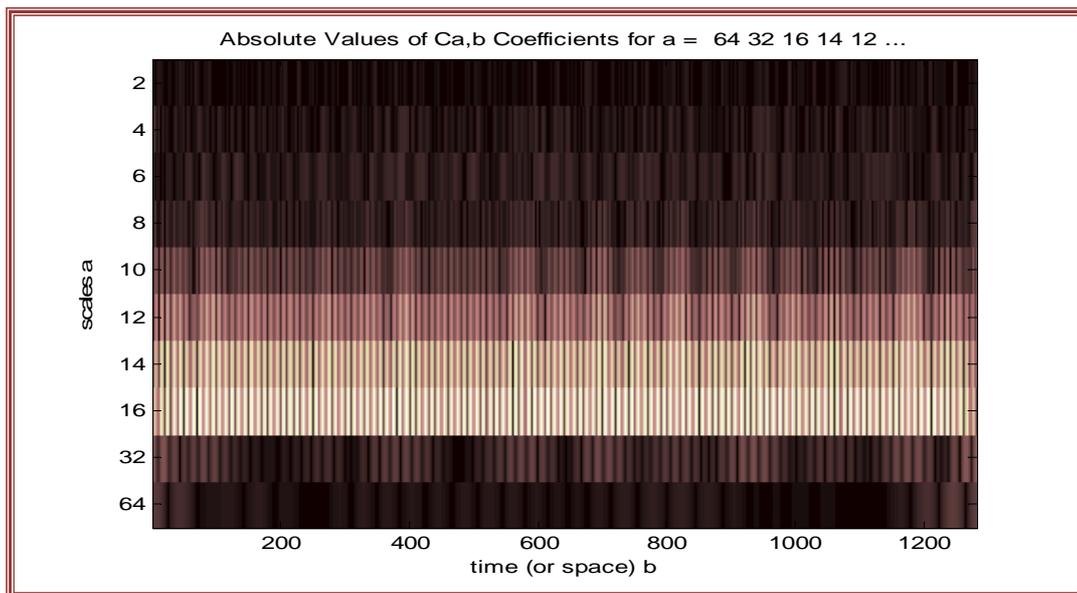
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 5.41 Le courant statorique (a) et son spectre (b) du Système moteur-Réducteur en défaillance suite à l'usure de 03 dents de l'engrenage Spectrogrammes de la STFC (c) et de Gabor (d) du signal courant statorique du Système moteur-Réducteur en défaillance suite à l'usure de 03 dents d'engrenage, €Scalogramme de la Transformée d'ondelettes continues (TOC) du courant statorique du Système moteur-Réducteur en défaillance suite à l'usure de 03 dents de la roue dentée.

La caractéristique temporelle du courant est donnée en figure 5.4 a et son spectre en figure 5.41 b. Le spectrogramme de la **STFC** (*Transformée de Fourier à court terme*) est donné en figure.5.41c. Les défauts des dents d'engrenage se manifestent souvent par des chocs périodiques. Ceci apparaît dans le spectrogramme de Gabor (fig.5.41d).

Le Scalogramme de la **CTW** (*Continue Wavelet Transform*) ou **TOC** (*Transformée d'Ondelettes Continues*) en figure 5.41 e fait apparaître des interférences aux couleurs brillantes aux échelles 8-12.-16-32 et 64 dus aux à-coups des 3dents de Z_2 lors du contact avec les 26 dents du pignon Z_1 pendant la durée du processus transitoire.

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

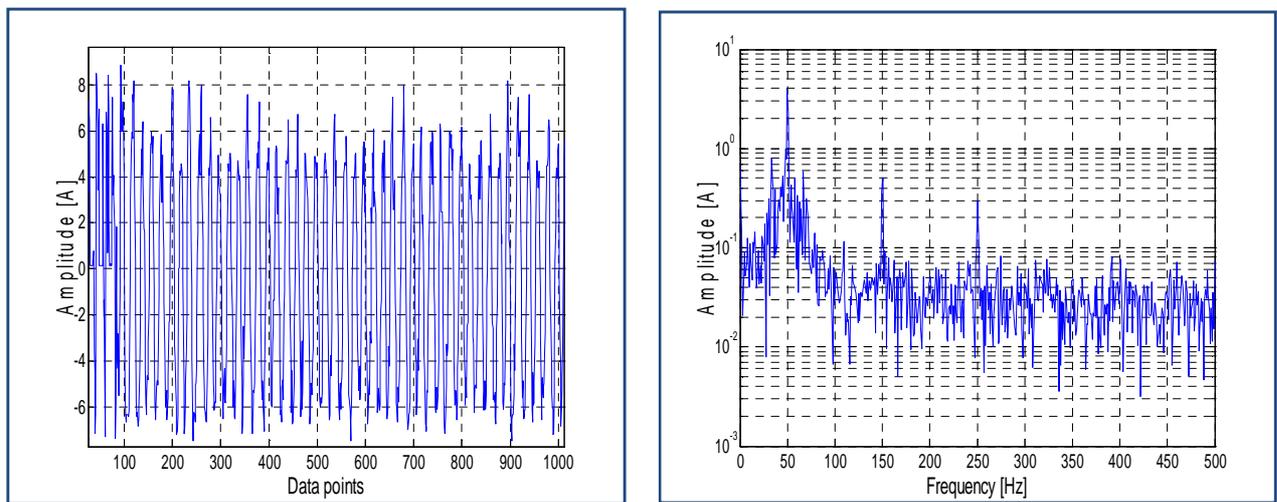


Figure 5.42 Caractéristique temporelle du courant phasique et son Spectre dans le cas du défaut combiné : balourd et désalignement

La figure 5.42, donne le courant statorique temporel et son spectre lorsque le système est confronté à une dégradation combinée d'un balourd avec un désalignement simultanément. On retrouve les harmonique aux fréquences $50 \pm n f_r$ où n est un nombre entier.

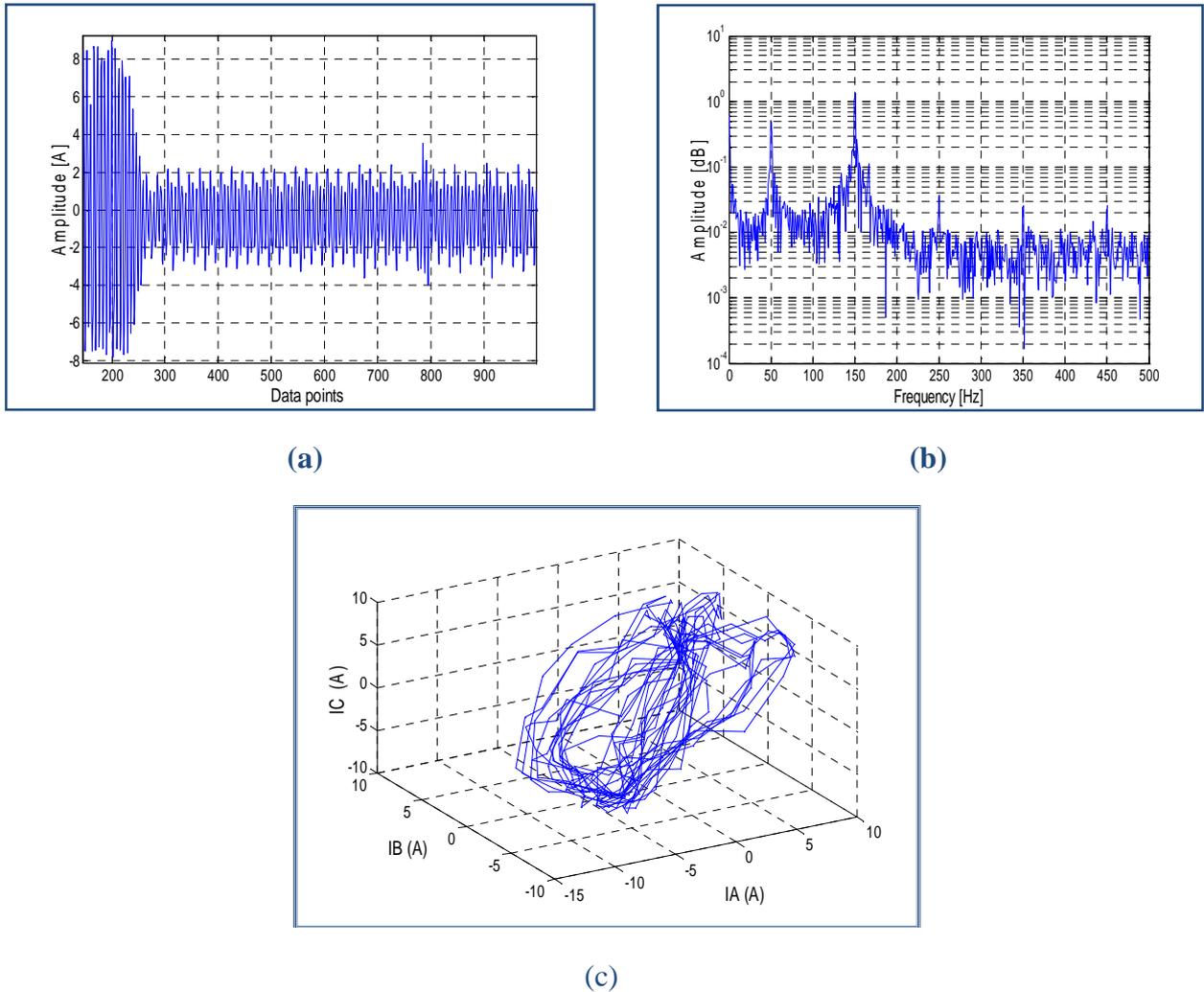


Figure 5.43 Caractéristique temporelle de I_{neutre} (a);spectre de I_n (b) ; Motif en 3D (c)

La figure 5.43b montre l'apparition des raies de fréquences $150 \pm 1f_{r1}$ et $150 \pm 2 f_{r1}$ avec $f_{r1} = 16\text{Hz}$, signant la présence simultanée d'un balourd et d'un désalignement. Ceci est confirmé par la figure 5.43c qui affiche un motif résultant de la fusion des orbites représentant les deux défauts simultanément.

5.2.4.4. Système électromécanique d'entraînement défaillant suite à un balourd et à une cassure de 3 dents du réducteur.

L'émergence des raies de fréquences $150 \pm f_{r1}$, $150 \pm f_{r2}$, $150 \pm 2f_{r2}$, $150 \pm 3f_{r2}$, $150 \pm 4f_{r2}$, et où $f_{r2}=5.7\text{Hz}$, caractérise la détérioration des dents de Z_2 (fig.5. 44 a, b). Le nombre d'harmoniques de f_{r2} , leurs amplitudes et l'épaisseur importante de la section de l'orbite caractérisent le degré de détérioration de la roue Z_2 (3 dents successives).

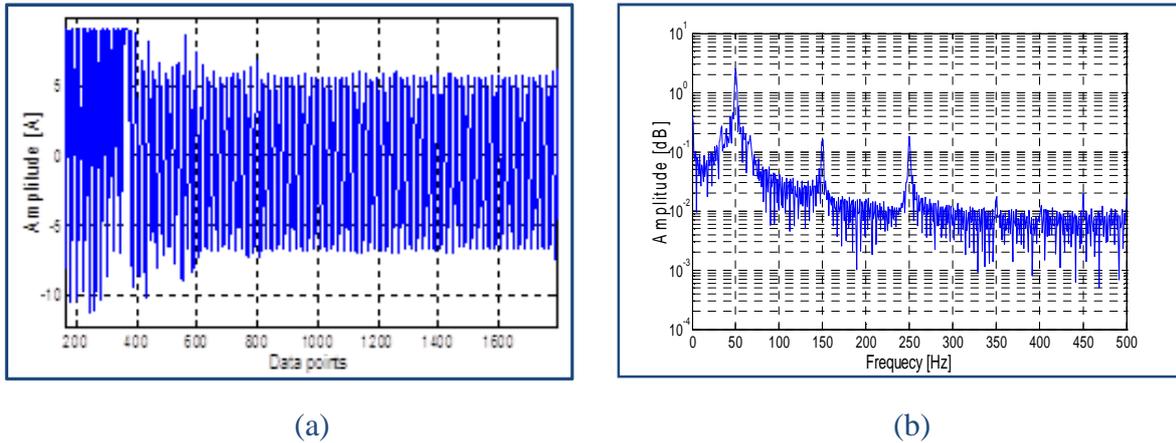


Figure 5.44 Caractéristique temporelle de I_{phase} . (a) et son Spectre (b) en présence du défaut combiné balourd et à une cassure de 3 dents du réducteur.

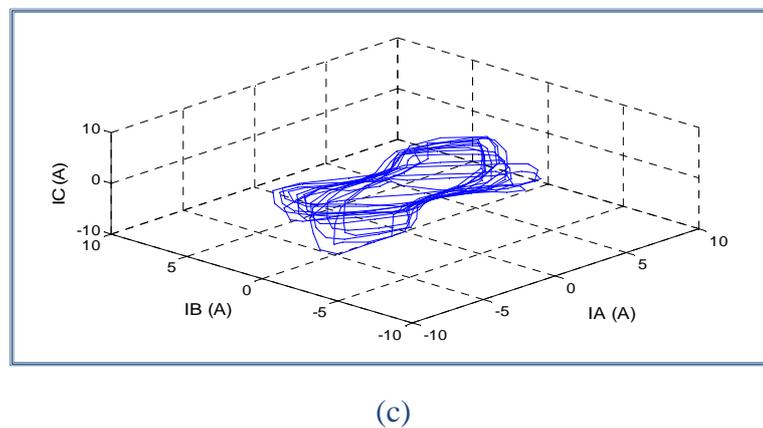
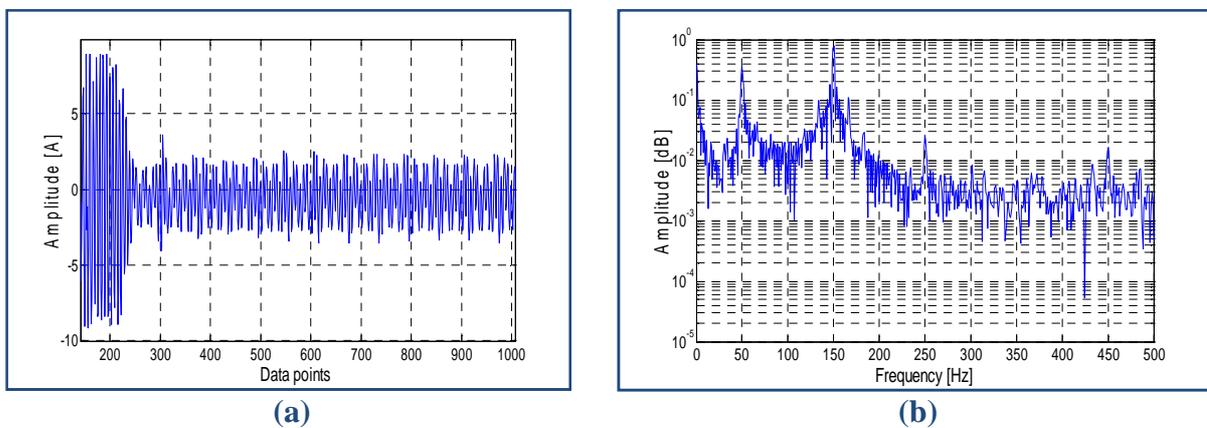


Figure 5.45 Caractéristique temporelle de I_{neutre} (a) et Son Spectre (b); (c) Motif en 3D pour le cas du défaut combiné balourd et à une cassure de 3 dents du réducteur.

La figure 5.45 expose le spectre du courant neutre lors de la combinaison du défaut du balourd avec l'usure des 3 dents. Toutes les fréquences marquant le balourd et la cassure des 3 dents apparaissent sur le spectre de la figure 5.45b avec un accroissement de leurs amplitudes. Le motif de la figure 5.45c donne la représentation de la fusion des contours respectifs validant la présence des défauts considérés. Il tend vers une orbite avec un contour polygonal.

5.2.4.5. Système Electromécanique d'entraînement défaillant suite à un défaut combiné balourd, désalignement et cassure de 3 dents.

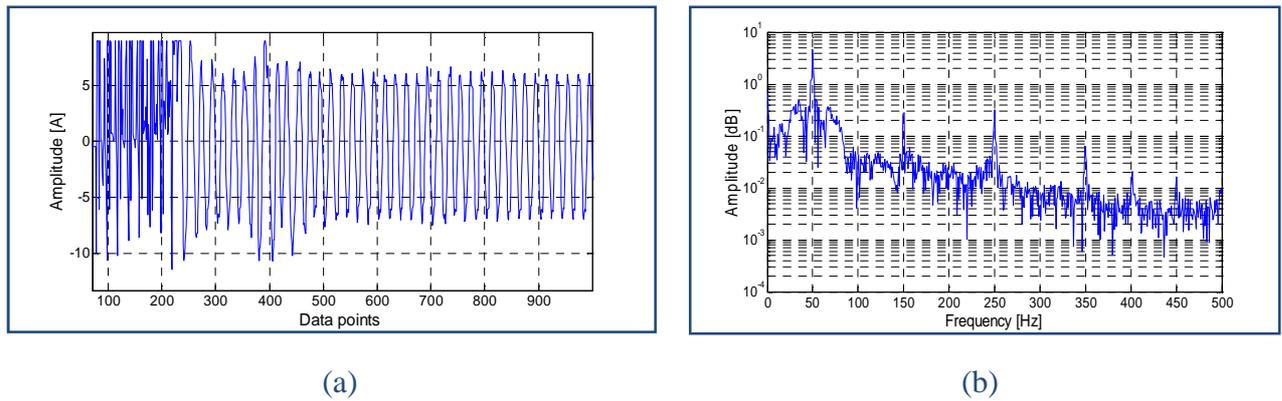


Figure 5.46 Caractéristique temporelle de I_{phase} . (a) et son Spectre (b).

La figure 5.46 illustre le spectre du courant de la phase lorsque le système électromécanique fonctionne en présence des trois défauts précités à la fois.

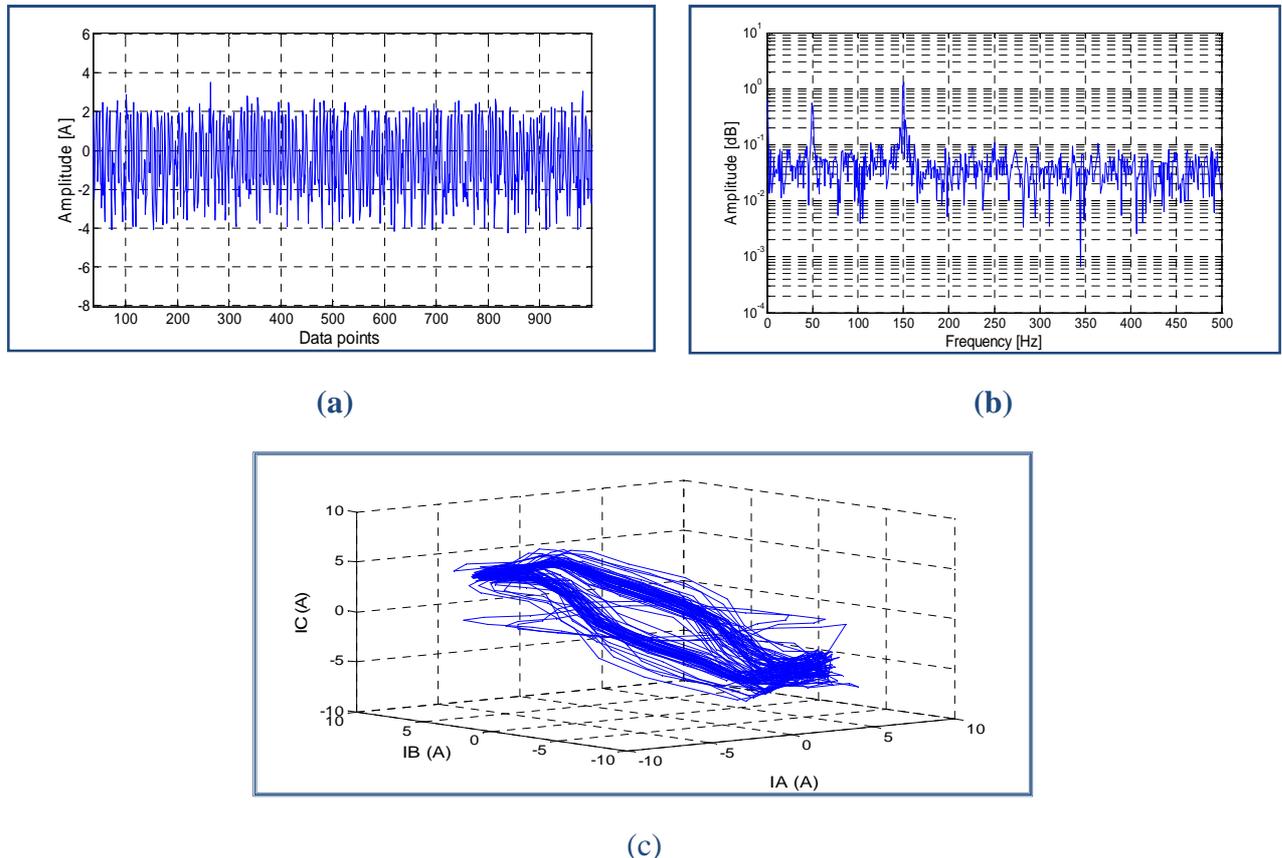


Figure 5.47 Caractéristique temporelle de I_{neutre} (a), son Spectre (b) et son Motif en 3D (c)

Suite à l'aggravation de la défaillance, le courant neutre est remarquablement amplifié (fig.5.47a). L'émergence des fréquences des trois défauts avec un accroissement de leurs amplitudes est observée (fig.5.47b). L'orbite de la figure 5.47c atteste de la fusion du défaut de balourd, du désalignement et de l'usure des dents de la roue Z_2 du réducteur. Il montre clairement la superposition des orbites respectives correspondant aux anomalies précitées. Les signatures spectrales sont montrées dans le tableau 5.3

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

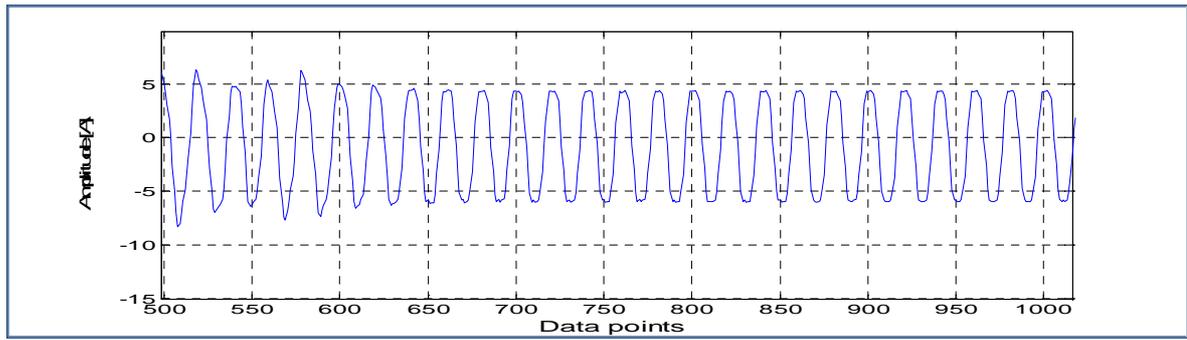
Tableau 5.3 Fréquences relatives aux défauts du système Moteur- Réducteur.

5.2.5. Analyse et interprétation des signaux issus de la campagne d'expérimentation pour le diagnostic des dents des différents engrenages via le courant statorique.

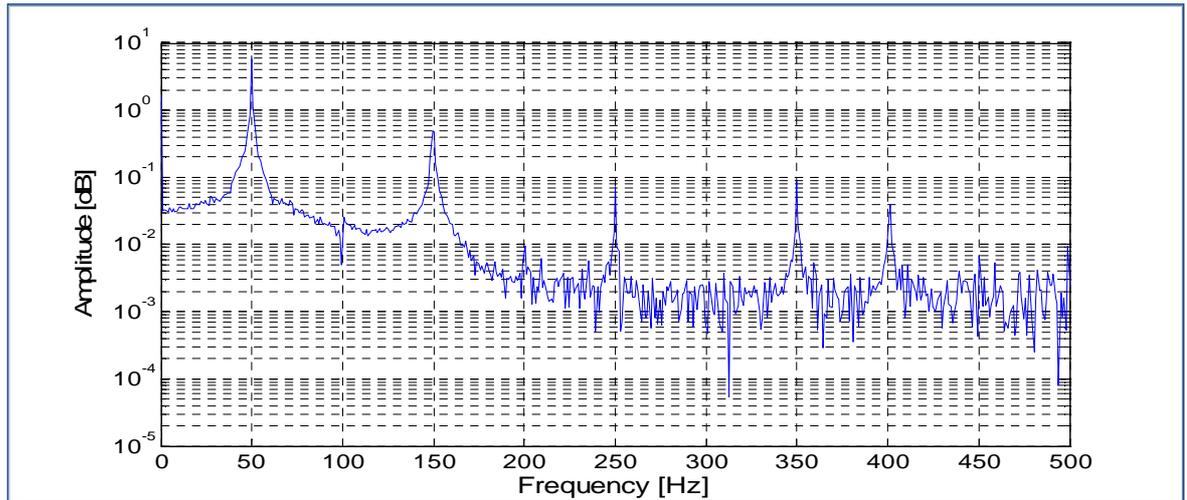
A cet effet, les spectres de l'intensité du courant circulant dans les phases et dans le conducteur neutre du moteur asynchrone ont été représentés. Ils sont suppléés par une représentation spatiale en 3D et en 2D des carrés des intensités du système triphasé du courant d'alimentation du moteur à induction.

5.2.5.1. Réducteur Sain.

La Figure 5.48 expose la caractéristique temporelle du courant d'alimentation du stator et son spectre en l'absence de toute dégradation intentionnelle sur la boîte à vitesse. Ici, il est important de noter que contrairement aux résultats évoqués en théorie, les spectres obtenus par les expérimentations pour le cas sain contiennent des composantes spécifiques au défaut attestant d'une excentricité au rotor à cause de certaines imperfections de fabrication du système électromécanique. La figure 5.49 donne la représentation du spectre du courant neutre. La figure 5.50 donne le motif en **3D** représentant le cas sain et qui apparaît sous une orbite ellipsoïdale et non circulaire. Ceci se justifie par l'absence des conditions idéales propre à la théorie des machines électriques et aux imperfections de fabrication comme évoquées précédemment.



(a)



(b)

Figure 5.48 Caractéristique temporelle du courant (a) et son Spectre (b)

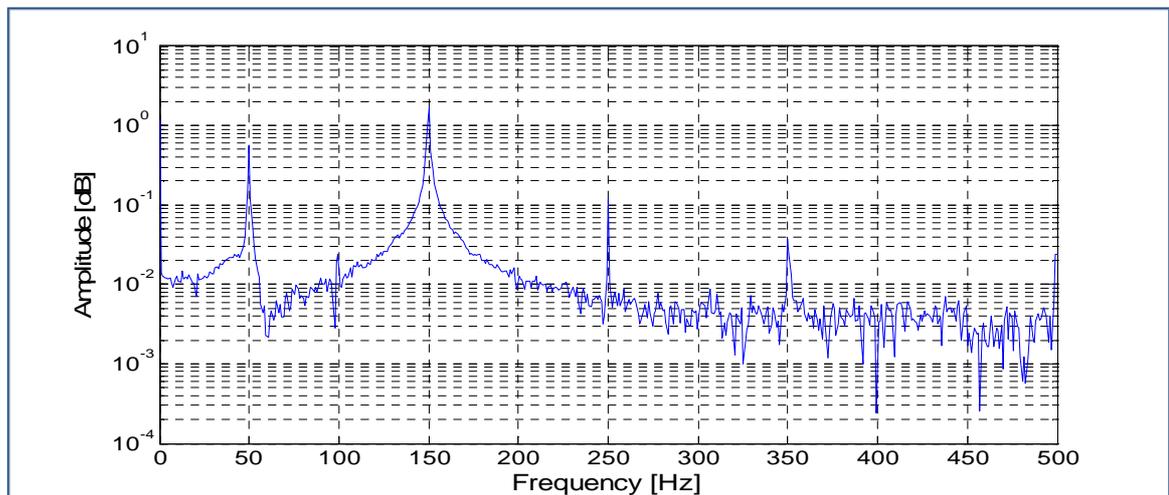


Figure 5.49 Spectre du courant Neutre.

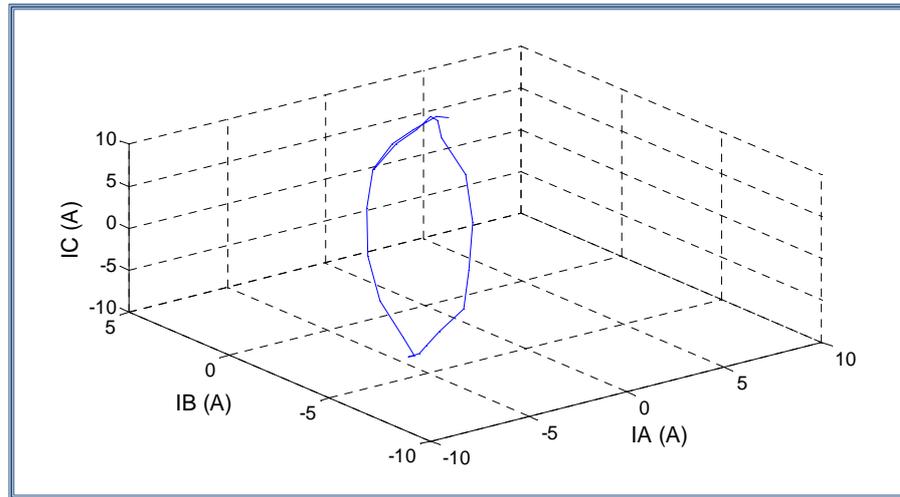
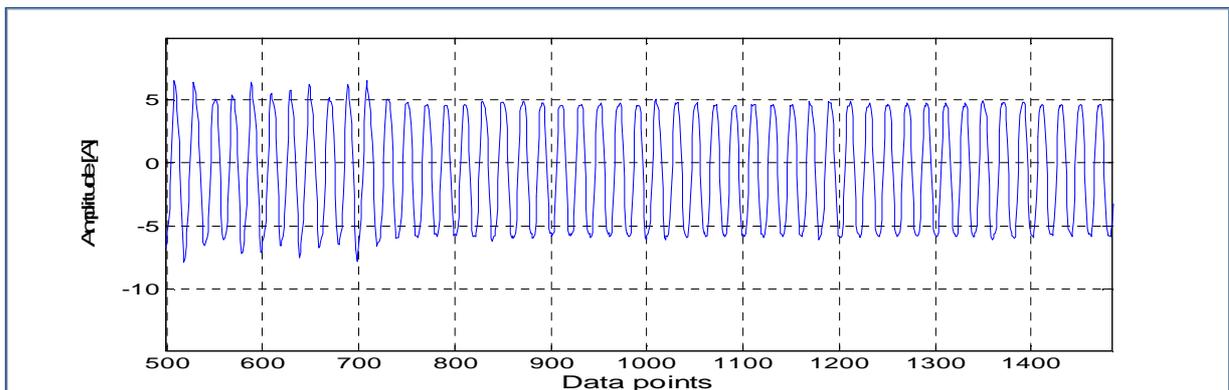


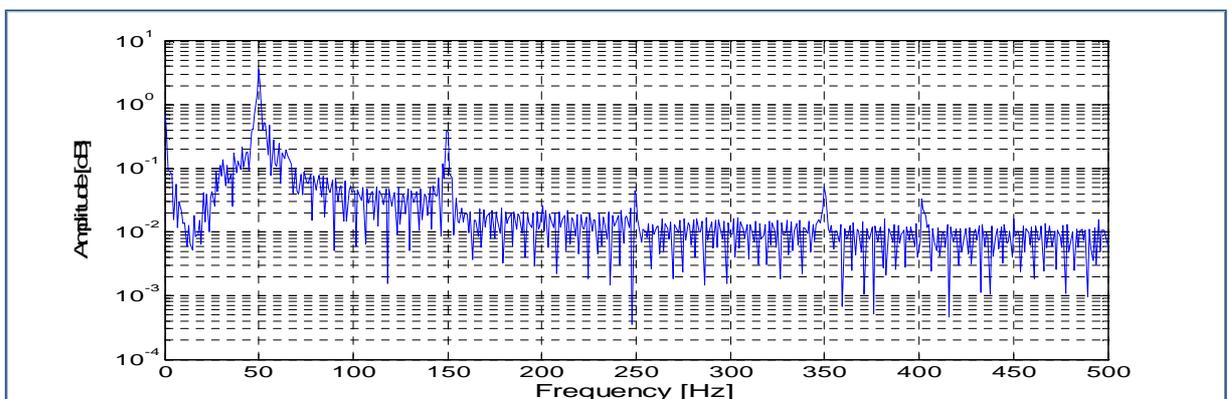
Figure 5.50 Motif modélisant en 3D la boîte à vitesse non dégradée

5.2.5.2. Défaut d'écaillage d'une dent du pignon Z2

La figure 5.51 montre la caractéristique temporelle du courant phasique et son spectre lors du fonctionnement dégradé du réducteur. Sur le spectre du courant une émergence des raies remarquable fait son apparition aux fréquences $[50 \pm f_1]$ $[50 \pm f_2]$ et un peigne de raies latérales avec un pas de nf_2 .



(a)



(b)

Figure 5.51 Caractéristique du courant de la phase statorique (a) et son Spectre (b)

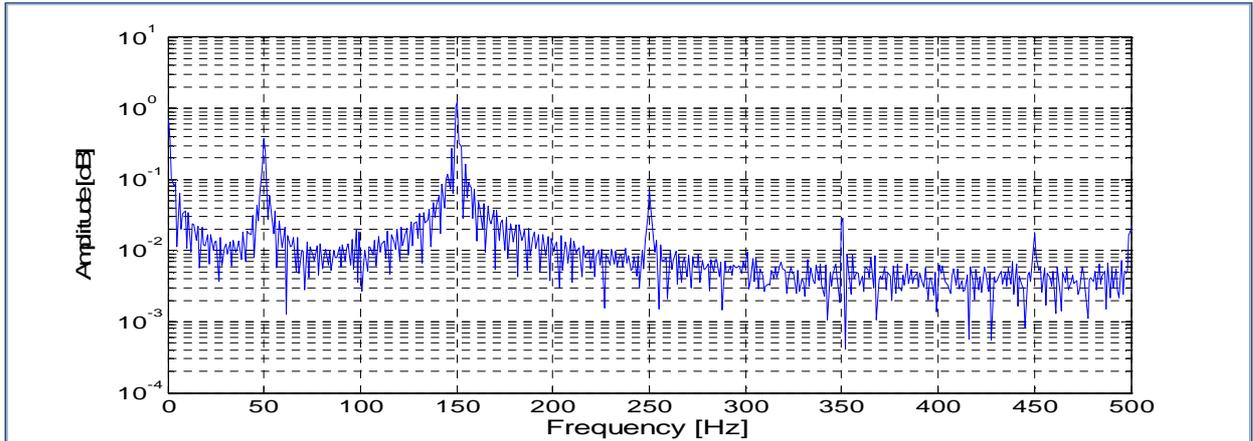


Figure 5.52 Spectre du courant neutre.

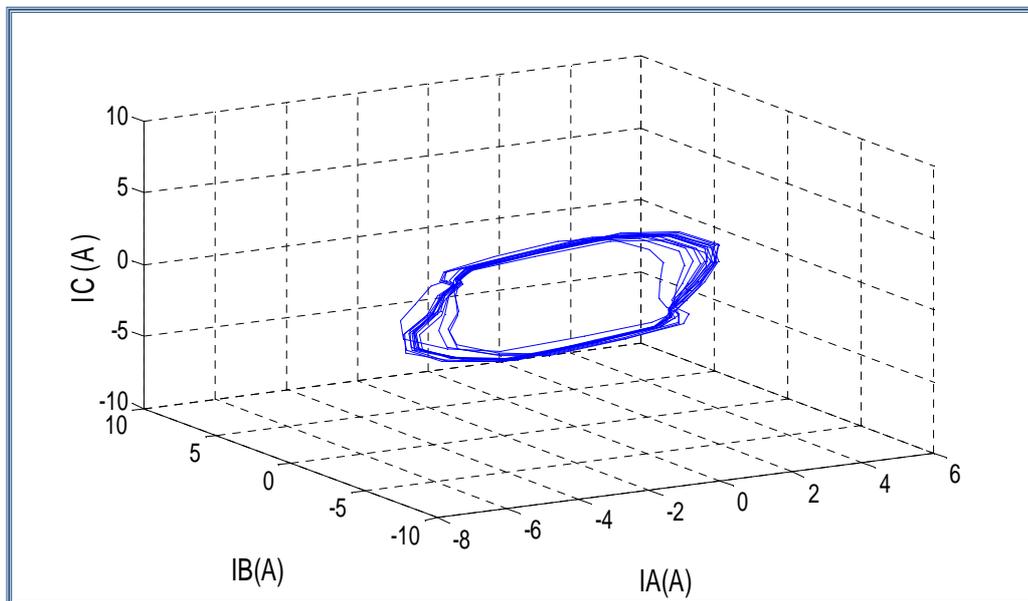


Figure 5.53 Présentation du motif en 3D du défaut d'écaillage de la dent de Z_2

Le spectre du courant neutre est représenté par la figure 5.52 où l'harmonique d'ordre 3 est remarquablement prédominant ; elle est suivie des harmoniques 5, 7, 9 avec des amplitudes moindres.

Le défaut d'écaillage de la dent est représenté par l'émergence d'un peigne de raies de part et d'autre de **150Hz** avec un pas de nf_2 et des bandes latérales de raies avec des amplitudes proches de celles des harmoniques d'ordre 5, 7 et 9.

La figure 5.53 présente le motif obtenu par la représentation tridimensionnelle pour le défaut d'écaillage de la dent de Z_2 . Cette orbite apparait sous la forme d'un contour hypocyloïdal.

Le tableau 5.4 donne la représentation des fréquences des raies émergentes marquant le défaut.

Défaut d'une dent de la roue	Fréquences de rotation	Nature de la Signatures	Emergence de raies aux fréquences
Z_2	$f_2 = 5.7 \text{ Hz}$	<i>Courant de phase</i>	32.9Hz ; 33.05 Hz ; 38.6 Hz ; 44.3 Hz ; 55.7 Hz, 61.4 Hz ; 66.5 Hz ; 67.1 Hz ;
		<i>Courant neutre</i>	132.9 Hz;133 Hz ; 138.6 Hz ; 155.7 Hz ; 144.3Hz; 161.4 Hz ; 166.5 Hz ; 167.1 Hz ; 172.8Hz ; 127.2Hz.

Tableau 5.4 Fréquences marqueuses du défaut d'écaillage de la dent de la roue Z_2

5.2.5.3. Défaut d'écaillage de denture de la roue Z_4

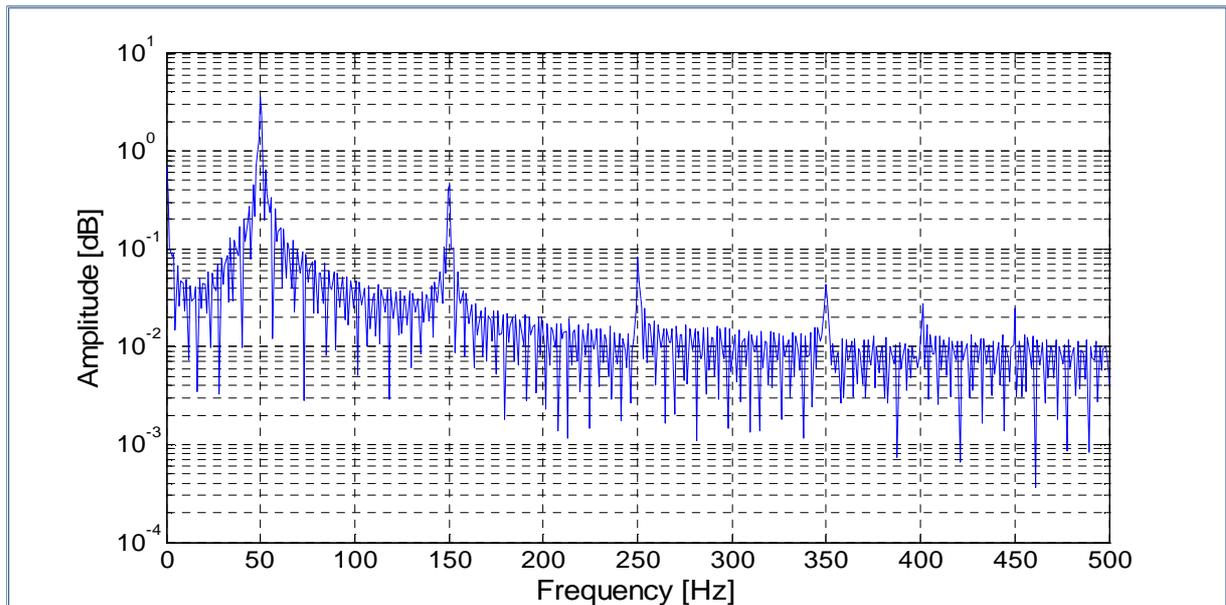


Figure 5.54 Spectre du courant phasique

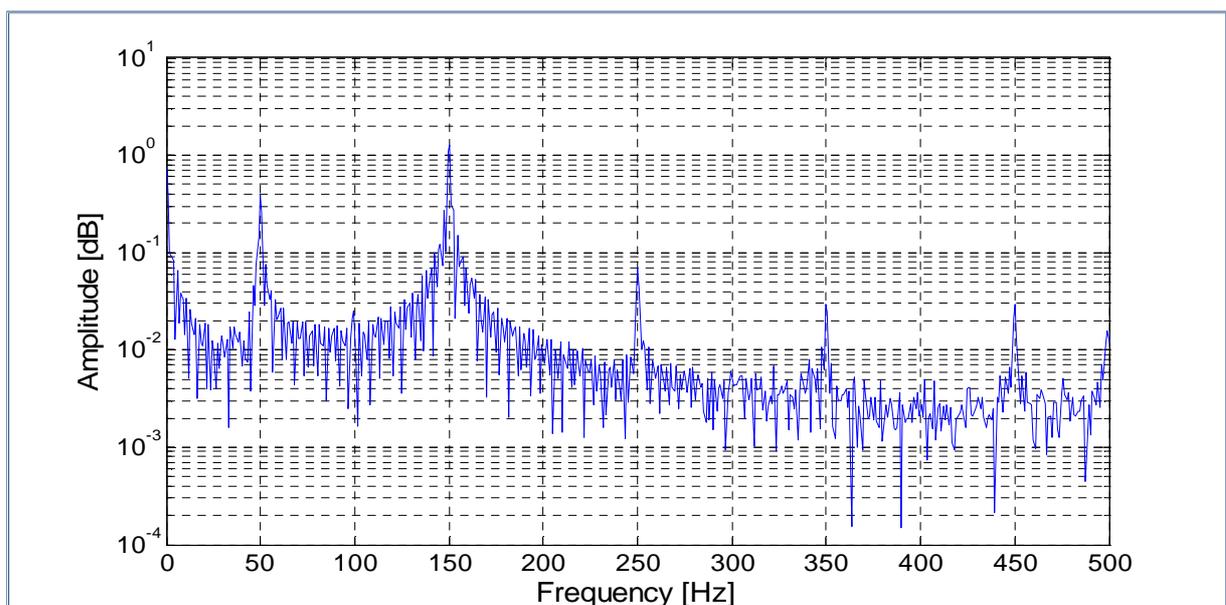


Figure 5.55 Spectre du courant neutre

La figure 5.54 montre le spectre du courant de la phase d'alimentation du stator , où l'on note des raies aux fréquences $[50 \pm f_3]$ et $[50 \pm f_4]$ avec $f_3 = 5.7$ Hz et $f_4 = 1.26$ Hz et un peigne de raies constitué des harmoniques de f_4 autour du fondamental **50Hz** avec un pas égal à f_4 .

La figure 5.55 représente le spectre du courant neutre où l'on observe la prépondérance de l'harmonique d'ordre **3** avec un peigne de raies correspondant aux fréquences $150 \pm f_3$; $150 \pm f_4$ et un peigne de raies constitué des harmoniques de f_4 autour du 3^{ème} harmonique avec un pas égal à f_4 . Les harmoniques 5, 7,9 avec des amplitudes amoindris sont aussi assez remarquables.

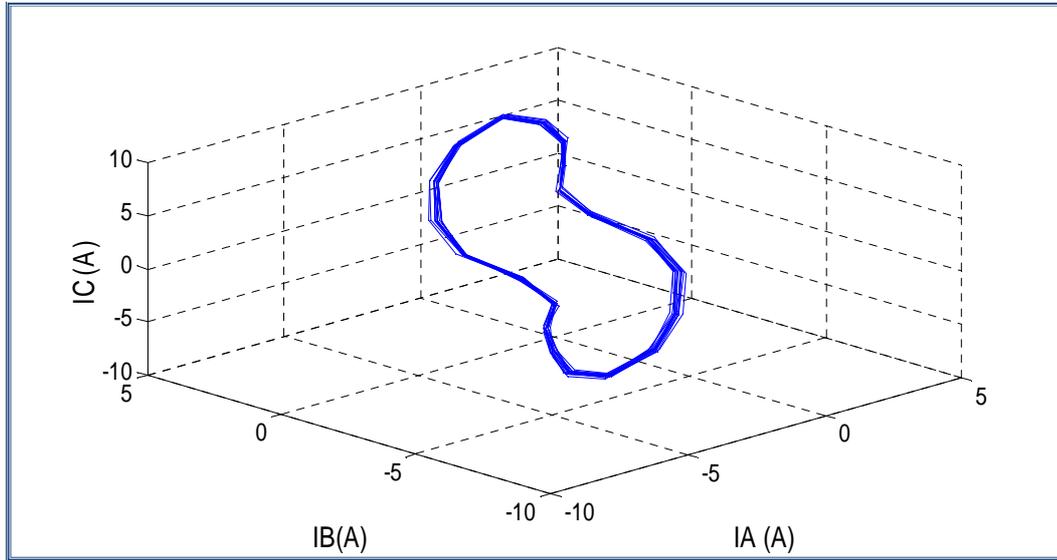


Figure 5.56 Orbite en 3D représentant le défaut d'écaillage d'une dent de Z_4 .

Défaut d'une dent de la roue	Fréquences de rotation	Nature de la Signature	Emergence de raies aux fréquences
Z_4	$f_4 = 1.26$ Hz	Courant de la phase	55.70 Hz;44.30 Hz;51.26Hz;48.74Hz ; 52.52 Hz;47.48 Hz;53.78Hz; 46.22 Hz; 55.04 Hz;44.96 Hz
		Courant neutre	155.70Hz; 144.30Hz; 151.26Hz; 148.74Hz; 152.52Hz; 147.48 Hz;153.78Hz; 146.22 Hz; 155.04Hz; 144.96 Hz .

Tableau 5.5 Fréquences marquées du défaut d'écaillage de la dent de la roue Z_4 .

La figure 5.56 illustre le motif obtenu par la représentation tridimensionnelle (3D) du défaut d'écaillage de la dent de la roue Z_4 . Cette orbite est représentée par un contour hypocycloïdal qui n'est pas tout à fait semblable à celui obtenu pour Z_2 qui peut s'expliquer par le positionnement de Z_4 par rapport à Z_2 . Le tableau 5.5 donne la représentation des fréquences des raies émergentes.

5.2.5.4. Défauts d'écaillage simultanés de la denture des roues dentées Z_2 et Z_4

La figure 5.57 expose le spectre du courant de la phase d'alimentation du moteur à induction en présence de la dégradation simultanée d'une dent de Z_2 et en même temps de celle de Z_4 . Il est à remarquer un léger accroissement des amplitudes correspondantes.

La figure 5.58 montre le spectre du courant circulant dans le conducteur neutre où l'on remarque la prédominance de l'harmonique d'ordre 3 et l'apparition d'harmoniques de part et d'autre de ce dernier avec les pas nf_2 et nf_4 .

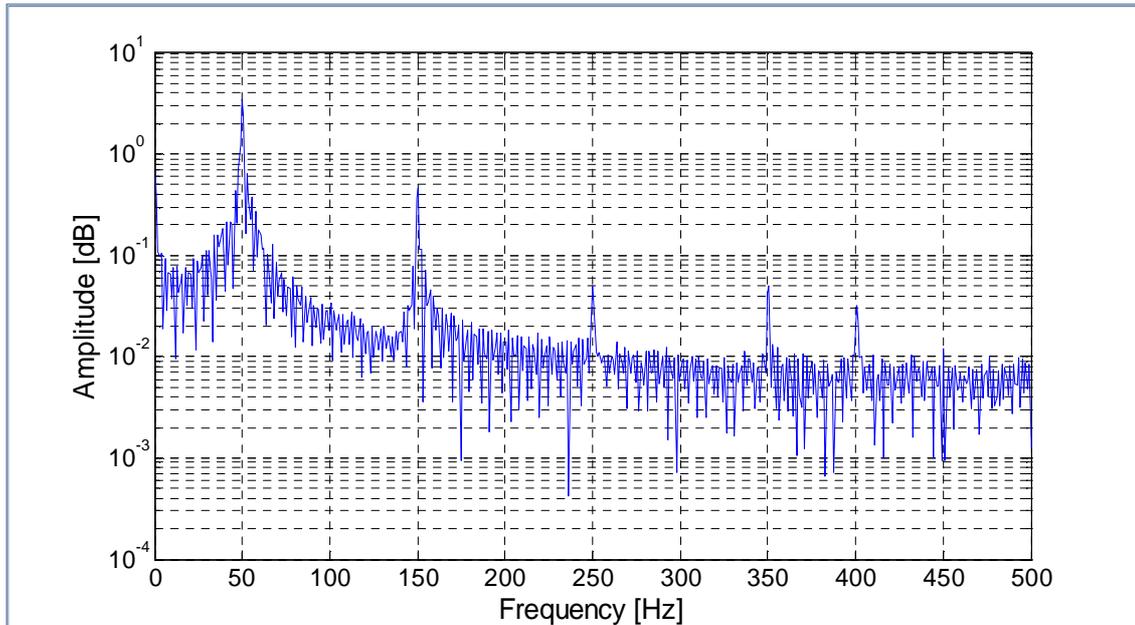


Figure 5.57 Spectre du courant de la phase

Les harmoniques d'ordres 5, 7 et 9 s'affichent mais avec des amplitudes en régression. Les signatures spectrales sont montrées dans le tableau 5.6.

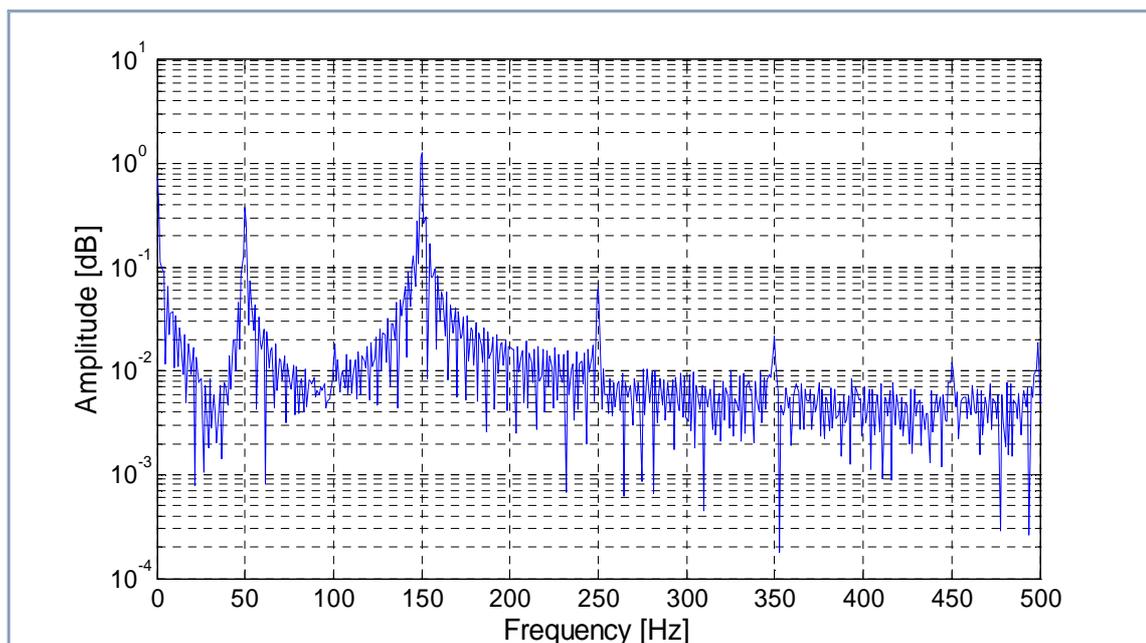


Figure 5.58 Spectre du courant neutre

Défaut d'une dent de la roue	Fréquences de rotation	Nature de la Signature	Emergence de raies aux fréquences
Z_2 et Z_4	$f_2 = 5.7 \text{ Hz}$ $f_4 = 1.26 \text{ Hz}$	<i>Courantphasique</i>	$[50 \pm 16.5\text{Hz}]$, $[50 \pm 5.7\text{Hz}]$, $[50\text{Hz} \pm 1.26\text{Hz}]$; $[50\text{Hz} \pm n.(5.7) \text{ Hz}]$, $[50\text{Hz} \pm n.(1.26) \text{ Hz}]$
		<i>Courantneutre</i>	$[150 \pm 16.5\text{Hz}]$, $[150 \pm 5.7\text{Hz}]$, $[150\text{Hz} \pm 1.26\text{Hz}]$ $[150\text{Hz} \pm n.(5.7\text{Hz})]$ et $[150\text{Hz} \pm n.(1.26\text{Hz})]$

Tableau 5.6 Fréquences marqueuses du défaut d'écaillage simultanément

La figure 5.59 donne le motif obtenu par la représentation tridimensionnelle (3D) pour ce défaut d'écaillage simultané de la denture de deux roues du réducteur n'ayant pas un engrenement entre elles.

Le motif obtenu se présente sous un contour ellipsoïdal étiré horizontalement.

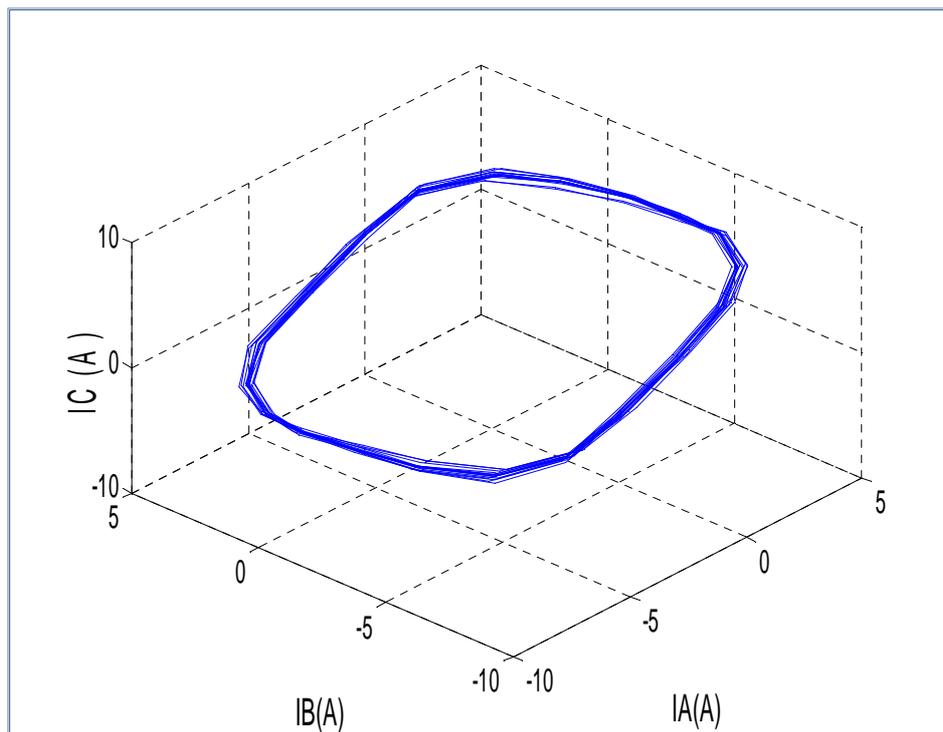


Figure 5.59 Présentation de l'orbite en 3D modélisant le défaut d'écaillage des deux dents.

5.2.5.5. Défaut de cassure partielle d'une dent de chacune des roues dentées Z_2 et Z_4 .

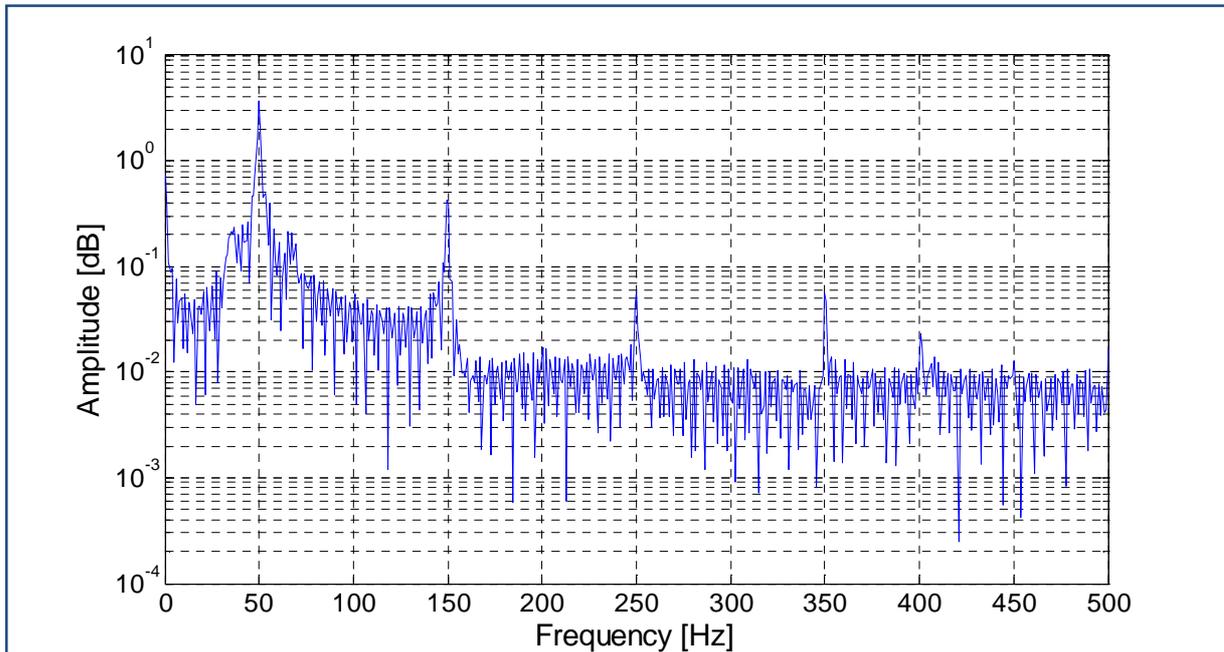


Figure 5.60 Spectre du courant phasique.

En figure 5.60 nous donnons le spectre du courant d'alimentation du moteur lorsque le réducteur auquel il est lié présente simultanément une détérioration de la surface d'une dent de Z_2 et de Z_4 par un arrachage volontaire de matière sur ces dents.

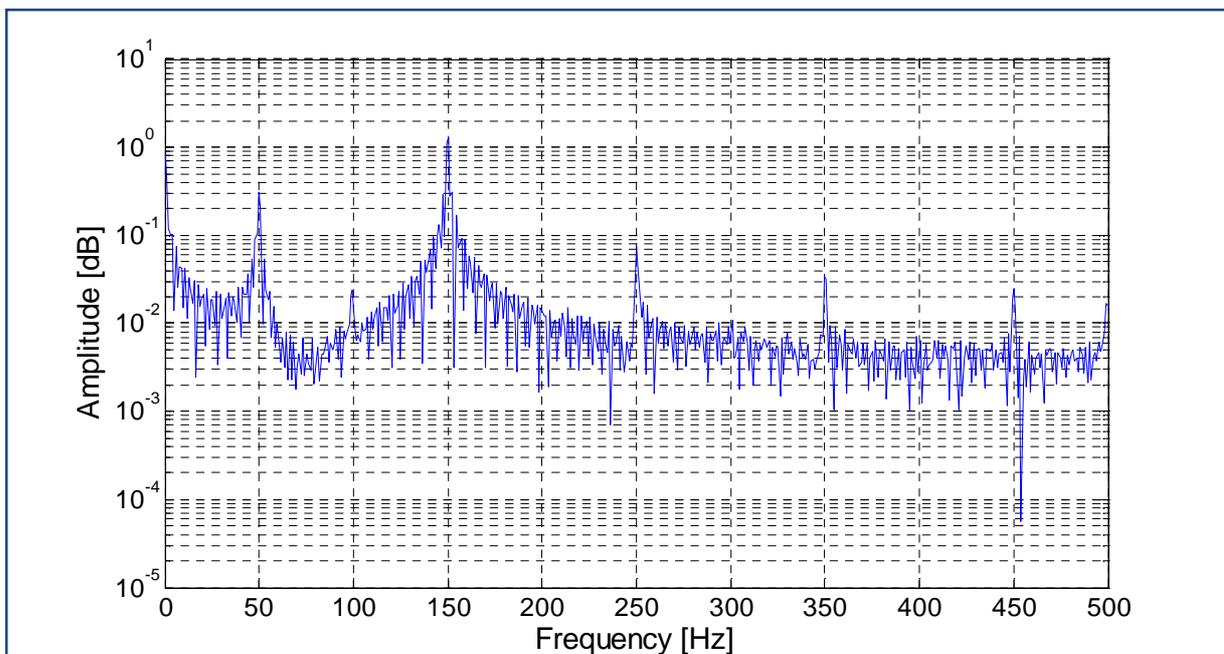


Figure 5.61 Spectre du courant neutre

Ainsi, nous obtenons une émergence d'un peigne de raies aux fréquences $[50\text{Hz} \pm (n \cdot 1.26) \text{ Hz}]$ avec une augmentation de leur nombre qui est relative au degré de dégradation de la surface de contact de la dent.

La figure 5.61 montre le peigne de raies $[150\text{Hz} \pm n (5.7) \text{ Hz}]$ sur le spectre du courant neutre. De part et d'autre des harmoniques d'ordre 5, 7 et 9 jaillissent des raies assez denses avec des amplitudes relativement remarquables.

La figure 5.62 présente le motif obtenu à ce défaut par la représentation tridimensionnelle (3D). Cette orbite du défaut se présente avec un contour hypocycloïdal.

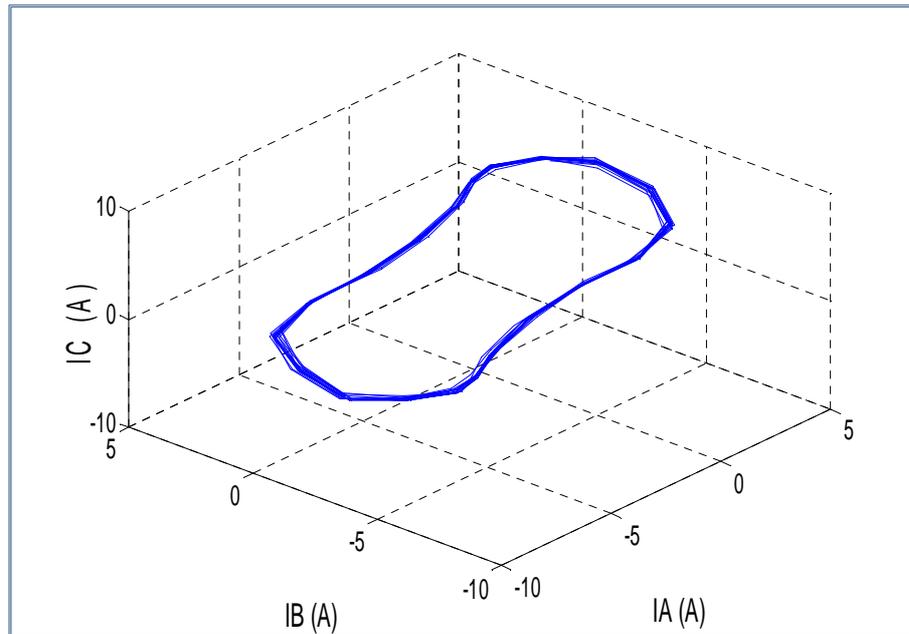


Figure 5.62 Motif en 3D représentant le Défaut de cassure dents

5.2.5.6. Organigramme Dédié au Diagnostic des Anomalies

Afin de synthétiser les résultats expérimentaux et leur compréhension, un organigramme a été prévu dans ce cadre (figure 5.63).

Cet organigramme résume notre contribution sur le diagnostic et la détection des défauts mécaniques Balourd et Désalignement par les trois approches : l'analyse vibratoire, l'analyse du courant statorique et la reconnaissance de formes orbitales obtenues au moyen de la sommation des carrés des intensités des 3 phases du moteur asynchrone.

Ces trois approches nécessitent toujours un référentiel sain. Les signatures des défauts respectifs sont affichées (sous forme fréquentielle ou de contours). Si ces signatures n'apparaissent pas, cela signifie que le système fonctionne sans une dégradation et ne nécessite pas d'intervention (ou programmation d'intervention : d'où le terme de Prédictif). Dans le cas contraire l'affichage de la signature nous informe sur la nature de la dégradation et il faut se préparer à remédier avant que la dégradation ne devienne défaut et paralysa l'installation. Ce type d'organigramme peut être élargi à d'autres défauts mécaniques (roulements, engrenage, etc...).

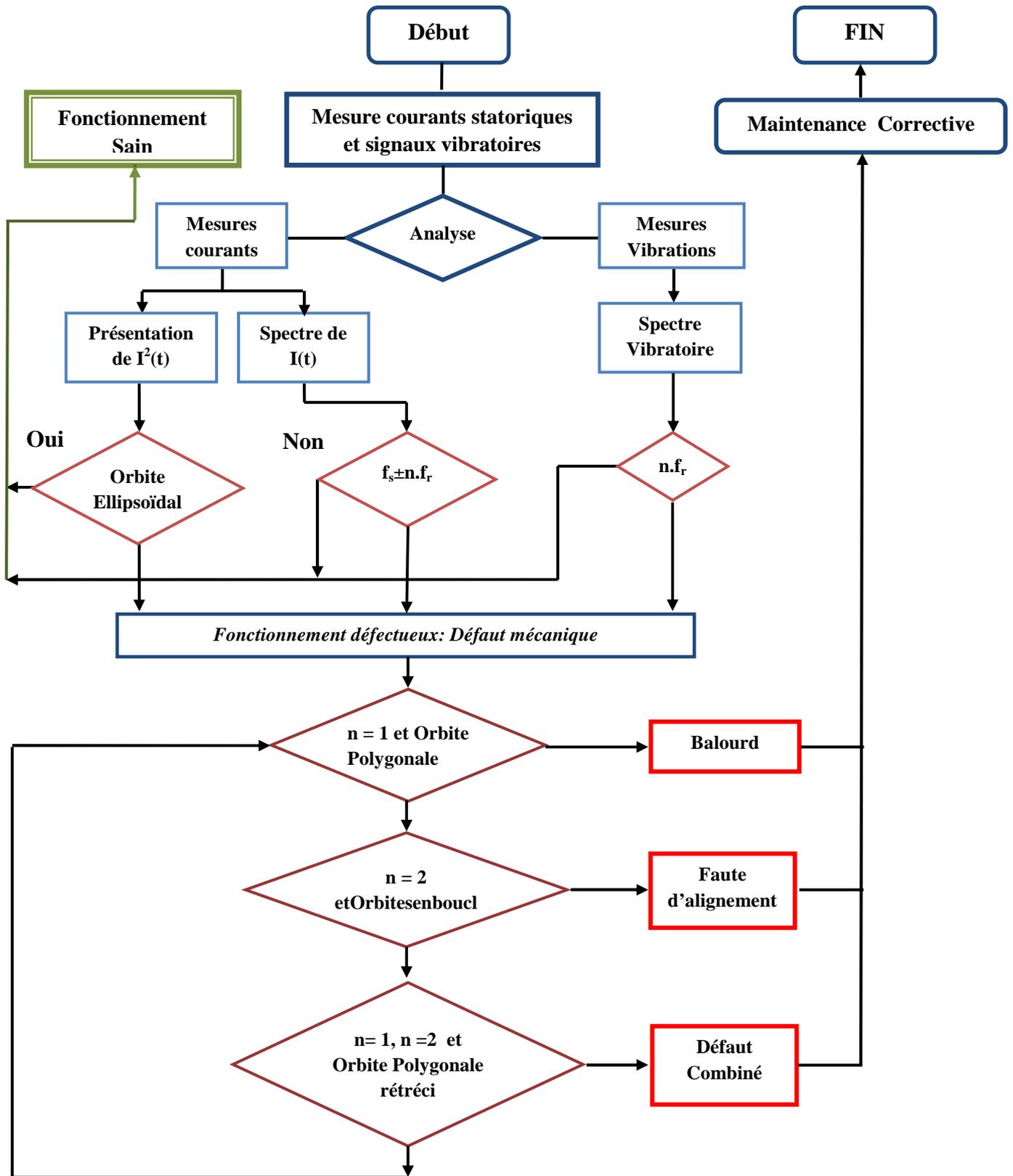


Figure 5.63 Organigramme de Diagnostic des Défauts mécanique

5.3. Conclusion

De nombreux résultats expérimentaux sont présentés. Ils illustrent la possibilité et la sensibilité de détection de défauts multiples par mesure du courant circulant dans le conducteur reliant le neutre du réseau d'alimentation et celui du moteur à induction du système électromécanique.

Il est conclu que l'analyse de la signature des courants du moteur sous forme fréquentielle, de motifs apparaît comme une méthode suffisamment précise pour détecter et surveiller les défauts simples et multiples dans un système de transmission de puissance mécanique à base de moteur à induction. Ces techniques sont beaucoup plus complémentaires qu'alternantes.

L'interprétation des motifs et la lecture des signatures ne posent aucune difficulté et est à la portée d'opérateurs de maintenance pas forcément experts dans le diagnostic. Appliquée 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 accouplé à un réducteur qui jouent un grand rôle dans les applications industrielles en particulier pour les grandes puissances.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.

Ce travail de thèse a pour objectif de traiter le diagnostic et la détection prédictive des anomalies mécaniques simples et combinées affectant les entraînements électromécaniques à base de moteur à induction et en particulier ceux de moyenne tension. Ces moteurs sont derrière la majorité des applications et des procédés industriels de grande puissance. Les problèmes de balourd et de désalignement et leur fusion qui sont à notre sens la cause des dégradations des roulements et bien d'autres défauts mécaniques sont à l'origine des pannes les plus courantes des installations de la grosse industrie. Par conséquent, suite à l'immobilisation de ces moteurs électriques, les pertes de production sont énormes et les réparations, si elles ne sont pas faites à temps, seront coûteuses. Pour cela, la détection prédictive et la localisation de ces défauts mécaniques avant leur évolution s'impose.

L'analyse vibratoire a été de tout temps sollicitée pour le diagnostic des défauts mécaniques. Seulement, elle a montré ses limites devant ces anomalies induisant des variations de couples. Pour les détecter, l'analyse du courant électrique apparaît comme une solution qui ne manque pas d'intérêt et les travaux de recherches réalisés ces dernières décennies peuvent y attester. Etant donné la complexité de leur modélisation, les défauts mécaniques isolés et en particulier combinés n'ont pas suscités une grande attention auprès des chercheurs. Ainsi, la formulation d'un diagnostic correct de ces défauts mécaniques demeure une tâche difficile car ils peuvent générer des fréquences de défauts similaires et seront masqués.

Disposant au départ des renseignements sur le fonctionnement non dégradé de l'entraînement via le courant statorique du moteur asynchrone, par la suite, nous créons intentionnellement des défauts sur l'agrégat de machines électriques et nous captions les signaux à des fins d'analyse. Il faut mentionner que pour des raisons de moyens financiers, les machines utilisées sont généralement de taille petite par rapport aux installations réelles.

Ce travail de thèse innove par l'utilisation de trois approches expérimentales complémentaires dédiées au diagnostic et à la séparation des défauts de balourd, des désalignements parallèle et angulaire et de leurs combinaisons. La signature vibratoire traditionnelle (FFT) succédée par l'analyse des courants d'alimentation (MCSA) renforcée par une analyse fréquentielle du courant neutre qui n'est pas si innocent comme on le croyait. Ce dernier a été toujours un révélateur de défauts Ensemble, les deux approches sont complétée par l'interprétation des motifs déduits de la représentation du vecteur résultant de la somme des carrés des intensités des courants statoriques. C'est cette dernière méthode qui à travers ses motifs respectifs contribue à donner une lecture correcte des défauts mécaniques causant la dégradation de l'application.

La validation expérimentale a été exercée sur trois bancs d'essais au laboratoire du génie Electromécanique du Département utilisant différents calibres de moteurs asynchrones. Un organigramme résumant le diagnostic des défauts mécaniques 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 et peuvent être exploités par un staff de maintenance pas nécessairement expert en la matière. En outre, ce

travail de diagnostic par l'exploitation du courant peut contribuer à briser l'obstacle psychologique, comme suggéré par Pachaud, qui existe entre les différents services de maintenance et d'entretien au sein de l'industrie. Comme perspective c'est d'essayer de trouver des modèles analytiques pour ces défauts mécaniques combinés (balourd, désalignement, roulement et engrenage) , afin de pouvoir les simuler numériquement et les comparer aux 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 industriels à vitesse variable qui sont actuellement de plus en plus nombreux.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Thorsen O. V., Dalva M., « Failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry », Conference Publication, IEE 1997, n°444 Condition monitoring methods, 1-3 Septembre 1997.
- [2] Jean Claude Trigeassou 'Diagnostic des machines électriques' Traité EGEM, 2011 Hermès.
- [3] Philippe Arquès .'Diagnostic Prédicatif et Défaillances des machines' Edition TECHNIP 2009
- [4] S. Nandi, H. A.Toliyat, and L. Xiaodong. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review.IEEE Trans. EnergyConvers., vol. 20(no. 4): pp.719–729, December 2005
- [5] A.Boulenger et C.Pachaud.Analyse vibratoire en maintenance-Surveillance et diagnostic des machines. Dunod,2007.
- [6]Bachir S., Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, Decembre2002.
- [7] Bazine I. B. A., Bazine S., Tnani S., Champenois G., « On-line brokenbars detection diagnosis by parameters estimation », 13th European Conferenceon Power Electronics and Applications EPE, SPAIN, Barcelona, September 8-10 ,2009.
- [8] Bonnett A. H., Yung C., « Increased efficiency versus increased reliability», IEEE Industry Applications Magazine, p. 1077-2618, Jan./Feb. 2008.
- [9] Thorsen O. V., Dalva M., « A survey of fault on induction motors ino_shore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries »,IEEE Industry Applications Magazine, vol. 31, n°5, Septembre 1995.
- [10] Stack J. R., Habetler T. G., Harley R., « Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines », IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, n°3, p. 735-739, May./Jun. 2004.
- [11] Stack J. R., Habetler T. G., Harley R., « Experimentally generating faults in rolling element bearings via shaft current », IEEE Transactions on In-dustry Applications, vol. 41, n°1, p. 25-29, Jan./Feb. 2005.
- [12] W. T. Thomson, M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults". IEEE Industry Application Magazine. July/August 2001
- [13] Hubert RAZIK « Le Contenu Spectral Du Courant Absorbe Par La Machine Asynchrone En Cas De Défaillance», la revue 3EI n°=29 juin 2002.
- [14] Pierre GRANJON « Surveillance Du Désalignement D'un Moteur Asynchrone Par Analyse Du Vecteur D'espace Courant », Saint Martin d'Hères cedex.

- [15] Jain, M. and Naresh, P. (2012) 'A multi-state degraded system with inspection and maintainability', *Int. J. of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp.165–187.
- [16] Ondel O., «Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone» Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon France, 2006.
- [17]Mikhail Kostenko et Ludvik Piotrovski, *Machines électriques*, tomes I et II, Éditions de Moscou (Mir), 1969 (réédité en 1979), 1348 p.
- [18]Foued LANDOLSI « Cours De Techniques De Surveillance »
- [19] Ali Ibrahim, François Guillet, Mohamed Elbadaoui, and Frédéric Bonnardot "Techniques to estimate the instantaneous frequency withan aim of induction machines faults diagnosis. In Proceedings of IEEE, IECON'08,Orlando Florida, USA,10-13Nov.2008.IEEE.
- [20]P. Vas. Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines. Oxford, U.K., 1993.
- [21] S. Nandi, H. A. Toliyat, and L. Xiaodong.Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review.IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20(no. 4) :pp. 719–729, December 2005.
- [22] F. Babaa, "Modélisation et diagnostic des machines asynchrones : application à la détection des défauts statoriques", Mémoire de Magister en Electrotechnique, université Mentouri Constantine, 2005.
- [23] A.Khatir. Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts .Thèse de Magister .Université Ferhat Abbas de Sétif .Algérie 2009.
- [24] Bonnett A. H., Soukup G. C., « Cause and analysis of stator and rotor Industry Applications, vol. 28, p. 921-937, Jul./Aug. 1992.failures in tree-phase squirrel-cage induction motor », IEEE Transactions on
- [25] Casimir R., Bouteleux E., Yahoui H., Clerc G., Henao H., DelmotteC., Capolino G., G.Houdouin, Barakat G., Dakyo B., Didier G.,Razik H., Foulon E., Loron L., Bachir S., Tnani S., Champenois G., Trigeassou J., Devanneaux V., B.Dagues, Faucher J. Rostaing G., Rognon J., « Synthèse de plusieurs méthodes de modélisation et de diagnostic de la machine asynchrone _a cage en présence de défauts », *Revue Internationale de Génie Electrique*, vol. 8, n°2, p. 287-330, 2005.
- [26] Bigret R., Feron J. L., *Diagnostic - maintenance - disponibilité des machines tournantes*, Editions Masson, 1995.
- [27] Bonnett A. H., « Understanding motor shaft failures », *IEEE Applications Magazine*, p. 25-41, 1999.
- [28] Bonnett A. H., « Root cause ac motor failure analysis with a focus on shaft failures », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, p. 1435-1448, 2000

- [29] Kazzaz S. A. S. A., Singh G. K., «Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques», ELSEVIER, Electric Power Systems Research, vol. 65, p. 197-221, 2003.
- [30] M. F. Cabanas, M. G. Melero, J.G. Aleixandre et J. Solares, "Shaft misalignment diagnosis of induction motors using current spectral analysis :A theoretical approach" Proc. *International Conference on Electrical*
- [31] G. Salles, " Surveillance et diagnostic des défauts de la charge d'un entraînement par machine asynchrone" *Thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard Lyon1*, Janvier 1997
- [32] W. T. Thomson, "A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors: Past, present and future" Proc. *IEEE SDEMPED 1999 – Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, pp.3-18, Septembre 1999 Gijon, Espagne
- [33] « *Présentation des avaries. Machines électriques tournantes* » cahier des préventions. CP2, Allianz, 1988
- [34] 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
- [35] EPRI. Improved motors for utility applications. final report PublicationEL-2678, vol. 1, 1763-1, EPRI, October 1982.
- [36] A. H. Bonnett and G. C. Soukup. Rotor failures in squirrel cage induction motors. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-22(no. 6) :pp. 1165–1173, Nov./Dec.1986.
- [37] G. B. Kliman, W. J. Premerlani, R. A. Koegl, and D. Hoeweler. A new approach to on-line fault detection in ac motors. In Proc. IEEE Industry Applications Soc. Annual Meeting Conf., pages pp. 687–693, San Diego, CA,1996.
- [38] R. Casimir, "Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes" *Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, CEGELY, 2003*.
- [39] 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.
- [40] M. E. K. Oumaamar, H. Razik, A. Khezzar “Experimental investigation of stator current signature in defective induction motor” IECON '09. Porto, Portugal, 3-6 novembre 2009, pp. 3443-3448
- [41] G. Andria, M. Savino, A. Trotta, "Application of Wigner – Ville distribution to measurement on transient signals" *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 45, Issue 4, pp. 187-193, April 1994.

- [42] Altug S., Chen M.-Y., Trussell H. J., « Fuzzy inference systems implemented on neural architectures for motor fault detection and diagnosis », IEEE Transaction on Industry Electronics, vol. 46, n°6, p. 1069-1079, 1999.
- [43] Awadallah M. A., Morcos M., « Application of AI tools in fault diagnosis of electrical machines and drives-an overview », IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 18, n°2, p. 245-251, 2003.
- [44] Didier G., Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances, Thèse de doctorat, Université Nancy 1, France, 2004.
- [45] Lipo T. A., « The analysis of induction motors with voltage control by symmetrically triggered thyristors » IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 90, (2), 1971.
- [46] Lipo T. A., Cornell E. P., « State-variable steady-state analysis of a controlled current induction motor drive » IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 11, (6), 1975.
- [47] Lipo T. A., Consoli A., « Modeling and simulation of induction motors with saturable leakage reactances », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 20(1), pp. 180-189, 1984.
- [48] Cornell E.P., Lipo T. A., « Modeling and design of controlled current induction motor drive systems », IEEE Transactions on Industry applications, Vol. Ia-1 3 (4), pp 321-330, 1977.
- [49] Ritchie E., Deng X. and Jokinen T., "Dynamic model of 3-phase squirrel cage induction motors with rotor faults ", ICEM '94, B6(2), pp. 694-698, France, 2004.
- [50] Filippetti F., Fanceschini G. and tassoni C., "Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques" IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 47(5), pp. 994-1004, 2000.
- [51] Kerszenbaum L. and Landy C. F., "The existence of large interbar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and end-ring faults" IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. 103(7), pp.1854-1862, 1984.
- [52] O'Donnell P., "Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, Part 1", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 21(4), pp, 853 – 864, July/August 1985. motors" IEEE Transactions on Industry Application, pp 14 - 23, Sept/Oct 1993
- [53] Filippetti F., Fanceschini G. and tassoni C., "Neural networks aided on-line diagnostics of induction motor rotor faults" IEEE Transactions on Industry. Applications, Vol. 31, (4), pp. 892-899, 1995.
- [54] Shoen R.R. et al., 1995. Motor bearing damage detection using stator current monitoring", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 31, Issue 6.
- [55] Naït-Saïd M. S., Benbouzid M. E. H. and Benchaid A., "Detection of broken bars induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensor less estimation" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, (1), pp. 66-70, Mars 2000.

- [56] Nejjari H. and Benbouzid M. E. H., "Monitoring and diagnosis of induction motor selectrical faults using a current Park's vector pattern learning approach ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36 , (3) , p.730-735. May/June 2000.
- [57] Devanneaux V., Kabbaj H., Dagues B. et Faucher J., "An accurate model of squirrel cage induction machines under static, dynamic or mixed eccentricity" Proc. IEEE SDEMPED 2001 – Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, pp.121-126, Grado, Italie ,1-3 Septembre 2001
- [58] Bachir S, « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2002.
- [59] Hemsas K.E.," Développement d'un nouveau modèle de la machine asynchrone pour la commande et la surveillance", Thèse de Doctorat, Encadrée par Prof. Leulmi S., Université Ferhat Abbas, Sétif, Alegria, 2006.
- [60] M. Pouloujadoff and M. Ivanes. "comparaison des schémas équivalents au moteur asynchrone polyphasé". Revue Générale d'Electricité, vol. Tome 76(no.1), Juin 1967.
- [61] Luc Mutrel « ELECTROTECHNIQUE. Le moteur asynchrone – Régimes statique et dynamique . Ellipses Edition 1999
- [62] Damien Grenier and al. "Electromécanique – Convertisseurs d'énergie et actionneurs. Dunod, Paris,2001.
- [63] Martin Blödt. Condition Monitoring of Mechanical Faults in Variable Speed. Induction Motor Drives : Application of Stator Current Time-Frequency Analysis and Parameter Estimation. Thèse de doctorat, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de l'ENSEEIH, Institut National Polytechnique de Toulouse, 14 septembre 2006.
- [64] 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.
- [65] Blodt, M., P. Granjon, B. Raison and J. Regnier. 2010. Mechanical fault detection Induction motor drives through stator current monitoring – Theory and Application example. Fault Detection, Wei Zhang (Ed.). ISBN: 9533070377 9789533070377.
- [66] Blodt M.,Granjon P., Raison B., Rostaing G., « Models for bearing damage detection in induction motors », IEEE trans,ind. Electron. vol.55,n°4,p.1813-1822,avril2008.Pp.570-575.
- [67] BlodtM ,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.
- [68] J. Antoni and R.B. Randall. The spectral kurtosis: a useful tool for characterizing non-stationary signals. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 20(no.2):pp. 282–307, February 2006.

- [69] Ramzy R. Obaid and Thomas G.Habetler "effect of load on detecting Mecanical faults in small induction motors " SDEMPEDS Atlanta GA USA 24-26 August 2003.
- [70] 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).
- [71] M. Misiti., Y. Misiti., G. Oppenheim. J. M. Poggi. *Wavelet Toolbox for Use with Matlab* 2010.
- [72] Thomson, W.T. and M. Fenger. 2001. Current signature analysis to detect induction motor faults. *IEEE Industry Application Magazine*.
- [73] Pires, F.V., Kadivonga, M., Martins, J.F. and Pires, A.J. (2013) 'Motor square current signature analysis for induction motor rotor diagnosis', *Measurement*, Vol. 46, pp.942–948, Elsevier.
- [74] M. Blölt, J. Regnier, and J. Faucher, "Distinguishing load torque oscillations and eccentricity faults in induction motors using stator current Wigner distributions," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 45, n°6, pp. 1449-1456, November/December **2009**.
- [75] Baydar. N., Ball, A., "A comparative study of acoustic and vibration signals in detection of gear failures using Wigner-Ville distribution", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 15, no. 6, pp. 1091–1107, **2001**.
- [76] K.M. Siddiqui and V. K. Giri, "Broken rotor bar fault detection in induction motors using transient current analysis," *Int. J. Electron. Commun. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 114–119, 2011
- [77] Nabih FEKI. « Modélisation Electro-Mécanique de Transmission par Engrenages – Applications à la Détection et au suivi des Avaries » Thèse de doctorat École doctorale : Mécanique, Energétique, Génie Civil, Acoustique (MEGA) 2012
- [78] 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°. 6, June **2012**.
- [79] 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**.
- [80] 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**.
- [81] 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**.

Contributions scientifiques

Publications Internationales :

A.K. Bouras, A.E. Hadjadj, S. Bouras. 'Behavior technical Analysis of the Asynchronous Motor'. International journal of Electrical and Power Engineering *IJEPE* **2011**, Vol. 5(1): p49-53

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

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.

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)*, **2014**. *INDERSCIENCE PUBLISCHER*

Communications :

S.Bouras, A.E. Hadjadj, A.K. Bouras. 'Nouvelles Approches de surveillance des machines électriques' Conférence Internationale : Maitrise et Management des risques Industriels (Oujda 24-25 Avril 2008)

S. Bouras, A.K. Bouras, A.E. Hadjadj, L. Abdelmalek. 'L'incidence du nombre de démarrage et du type de freinage sur la sûreté de Fonctionnement des moteurs électriques dans les Applications Industrielles. Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées CPI 2011 19-20 Octobre 2011

A.K. Bouras, S. Bouras, A.E. Hadjadj 'Assymetrical Analysis Modes of Asynchronous Motors.' 5th International Conference Electrical Engineering 27-29 October 2008, Batna

A.K. Bouras, S. Bouras, A.E. Hadjadj, L. Abdelmalek, H. Bouras. "L'analyse Spectrale des Courants statoriques au Service de la Surveillance des Moteurs Asynchrones". First Maghrebien Conference C2MSI'09 Génie Universitaire de S/Ahras ; 28-29 Octobre

A.K. Bouras, S. Bouras, A.E. Hadjadj, L. Abdelmalek, H. Bouras. "Analyse du nombre de démarrage des entraînements Electriques dans les Services Types en vue de leur protection". 1^{er} Séminaire Internationale sur les Mines au Service du Développement durable. 8- 9 Décembre 2009.

ANNEXES

Caractéristiques des Différents Moteurs électrique :

1. Caractéristiques MAS₁

MAS ₁	Leroy Somer
<i>Puissance</i>	2.6 KW
<i>Fréquence d'alimentation</i>	50 HZ
<i>Couplage du moteur</i>	triangle/étoile
<i>Tension</i>	220/380V
<i>courant</i>	6.8 / 5A
<i>Nombre de paires de pôles</i>	2
<i>Vitesse nominale</i>	1450 trs/min

2. Génératrices à courant continu :

3 kW, 220 V; 14A; 1500trs/mn

3. Caractéristiques MAS₂

MAS ₂	Rosaty -Italien
<i>Puissance</i>	4.05 KW w
<i>Fréquence d'alimentation</i>	50 HZ
<i>Couplage du moteur</i>	triangle / étoile
<i>Tension</i>	220/380 V
<i>courant</i>	13 / 7.5 A
<i>Nombre de paires de pôles</i>	2
<i>Vitesse nominale</i>	1430 trs/min

4. Caractéristiques Génératrice à courant continu:

4 kW, 220 V; 32A; 1500trs/mn

5. Caractéristiques MAS₃ et MAS₄

MAS ₃ et MAS ₄	Russe
<i>Puissance</i>	270 w
<i>Fréquence d'alimentation</i>	50 HZ
<i>Couplage du moteur</i>	triangle / étoile
<i>Tension</i>	220/380 V
<i>courant</i>	1,43 / 0,8 A
<i>Nombre de paires de pôles</i>	2
<i>Nombre de barres au rotor</i>	18
<i>Vitesse nominale</i>	1400 trs/min

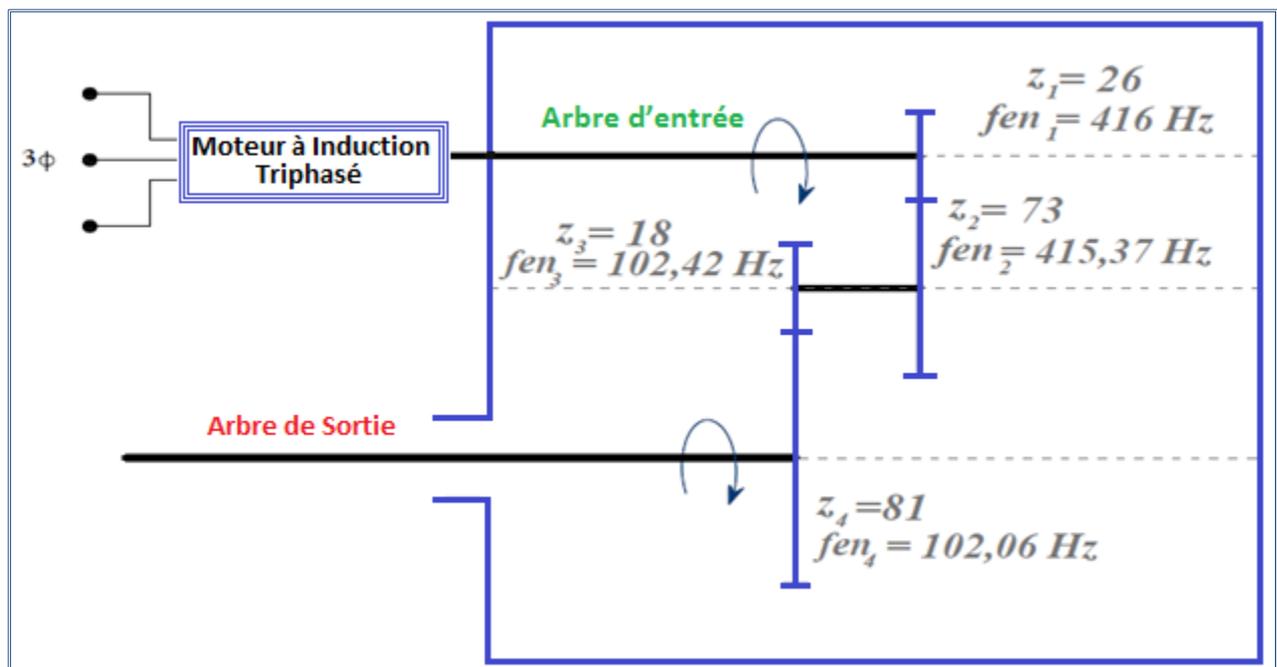
6. Caractéristiques MAS₃ et MAS₅

MAS ₅	Russe
<i>Puissance</i>	3 KW
<i>Fréquence d'alimentation</i>	50 HZ
<i>Couplage du moteur</i>	triangle /étoile
<i>Tension</i>	220 / 380 V
<i>courant</i>	12.5 / 7.2 A
<i>Nombre de paires de pôles</i>	3
<i>Vitesse nominale</i>	960trs/min

7. Caractéristiques des roulements à billes

Description	Roulement
Type	6200
Nombre de billes	8
Diamètre moyen	40 mm
Diamètre de la bille	5 mm
Angle de contact	0°

Cinématique du Réducteur :



Modèle du Système Moteur- Réducteur

$$Z_1 = 26; Z_2 = 73; Z_3 = 18; Z_4 = 81$$