

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département: Génie Electrique
Réf. :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الكهربائية
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Spécialité: Génie électrique

Option: ELECTROTECHNIQUE

Contribution au Diagnostic des Défaits dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation

Présentée par :

BESSOUS Nouredine

Soutenue publiquement le 28 /09 /2017

Devant le jury composé de :

M. BETKA Achour	Professeur	Président	Université de Biskra
M. ZOUZOU Salah Eddine	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
M. YAHIA Khaled	Professeur	Examineur	Université de Biskra
M. NAIT SAÏD Mohamed Saïd	Professeur	Examineur	Université de Batna
M. DRID Saïd	Professeur	Examineur	Université de Batna
M. BAHI Tahar	Professeur	Examineur	Université de Annaba

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu de m'avoir béni. Chaque jour que Dieu fasse réussir toutes nos entreprises, je le remercie de me donner la force et la détermination de poursuivre ce travail.

Je voudrais remercier le professeur **Salah Eddine ZOUZOU**, pour l'accueil qu'ils m'ont réservé au sein du laboratoire de génie électrique à Biskra (LGEB) en tant que le directeur et le responsable du laboratoire, pour ses conseils, son soutien, sa vision et ses initiatives, qui ont permis de formuler mon travail de thèse.

Je voudrais vivement à remercier les membres du jury :

– Monsieur **Achour BETKA**, Professeur à l'université de Mohamed khider, Biskra, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury. J'ai beaucoup apprécié son intérêt pour notre travail. Les remarques constructives que l'on a pu échanger.

– Monsieur **Khaled YAHIA**, Maître de conférences à l'université de Mohamed khider, Biskra, pour avoir accepté la lourde tâche de rapporteur. J'ai beaucoup apprécié son intérêt pour notre travail et ses avis apporteront sans aucun doute les éclairages opportuns.

– Monsieur **Said DRID**, Professeur à l'université de Batna, pour avoir accepté d'être rapporteur, pour ses commentaires et remarques constructives, ainsi que pour son grand intérêt pour notre travail.

– Monsieur **Mohamed Said NAIT SAID**, Professeur à l'université de Batna, d'avoir accepté d'être parmi le jury en tant qu'examineur, d'avoir porté autant d'intérêt à nos travaux à travers ses questions pertinentes sur notre approches et de nos résultats.

– Monsieur **Tahar BAHI**, Professeur à l'université de ANNABA, d'avoir accepté d'examiner ce travail, en l'enrichissant avec son expérience, son avis judicieuses, ses remarques et conseils.

Mes remerciements vont également aux :

- Madame **Métera BIA** (Ma chère mère), pour ses conseils, son soutien et ses encouragements tout au long de mes études. Ses qualités humaines m'ont permis de terminer ce travail.
- Monsieur **Mohamed SAHRAOUI**, Maître de conférences à l'université de Mohamed khider, Biskra, pour ses aides et ses conseils dans de nombreux points qui nous ont aidés à structurer ce travail.
- Monsieur **Salim SBAA**, Maître de conférences à l'université de Mohamed khider, Biskra, pour son soutien et ses conseils concernant l'amélioration de ce travail.

Je voudrais saluer et remercier chaleureusement : Wafa BENTRAH, Zoubir BECER, Djalal SOLTANI, Djamel GHARBI, Messaoud MOHAMMEDI, Islam Nacereddine EL

GHOUL, Adel GHOGGAL, Laid ZAAROUR, Riadh AJGOU, Mokhtar HABIBI, Hamza SLIMANI, Mohamed Salah AIDA pour leur vision, leurs conseils et leurs gentillesse.

Je tiens à remercier les personnels administratifs (ingénieur du laboratoire « LGEB ») qui par leur gentillesse et leur disponibilité ont su me faciliter toutes les tâches.

J'adresse également une pensée toute particulière aux enseignants, chercheurs et étudiants qui m'ont appris à aimer la science, la recherche pendant mes études et ma recherche scientifique.

Je voudrais remercier mon épouse (**Z. TLIBA**), qui a partagé ma vie au quotidien, qui m'a soutenu et supporté durant cette thèse. J'admire sa patience et sa bonté.

Mes pensées vont également à ma famille : mes parents, mes frères, mes sœurs et mes filles (**ARIDJ** et **DJOURMANA**).

Je voudrais également remercier mes amis et mes collègues qui m'ont encouragé et suivi depuis longtemps.

Enfin, que ceux qui se sentent oubliés de près ou de loin, trouvent dans cette phrase ma profonde gratitude et mes remerciements pour l'aide et le soutien apporté durant ces années.

Noureddine BESSOUS

ملخص الأطروحة

إنه من غير الممكن تصور الحياة اليوم من دون آلات (ماكينات) كهربائية و من جملة هذه الآلات نذكر الدورانية، هذه الأخيرة التي لها الأثر الكبير للعديد من المنتجات و الأشغال، لتكون متواجدة في عديد من المجالات.

إن عملية صيانة هذه الآلات تؤدي إلى الربح في الوقت و المال، لذا فإن عملية التشخيص لاكتشاف العيوب (الخلل) في وقت مبكر أضحت ضرورة حتمية.

إن تشخيص أي عيب (خلل) قبل تحوله إلى عطل يتم بعدة تقنيات، و الأكثر استعمالاً في الجانب العملي اليوم هي تقنية تحليل الإشارات الاهتزازية، إذ تعتمد في الأساس على التحليل الطيفي بتحويلات فورييه.

إلا أن مجال البحث اليوم يتنافس و يتسارع لأجل إيجاد طريقة أكثر نجاعة لاكتشاف العيوب في الآلات الدوارة، و نذكر منها على سبيل الذكر لا الحصر: تقنية التحليل الطيفي لإشارة تيار الجزء الساكن، و في نفس السياق نذكر تقنية التحويل إلى موجات متقطعة أو إلى حزمة موجات مركزة في دراستها على ذات التيار الكهربائي.

إن الهدف من دراستنا هذه هو المقارنة بين الطرق التالية: طريقة تحليل التيار الكهربائي بتقنية التحليل الطيفي (فورييه) و تقنية التحويل إلى موجات متقطعة و كذا طريقة تحليل الإشارة الاهتزازية قصد الوصول إلى قرار فيصل يقود إلى تشخيص محكم.

هذه الدراسة طرحت نموذج خاص و جديد لخلل المدحرجات، و هو الأول من نوعه الذي سمح لنا بإجراء المحاكاة الرقمية له، و تميمنا لذلك أنجزنا العمل التطبيقي (التجريبي) قصد محاكاة و مقارنة العمل الرياضي (التحليلي) مع التجريبي.

في هذا العمل كذلك، و بخصوص تقنية التحويل إلى موجات متقطعة، اقترحنا مؤشر جديد للعيوب، و هو ما يساعد على تحليل الإشارات بصورة أدق (كمياً و وصفيًا).

لقد قمنا بتشخيص العيوب التالية تجريبياً بمختلف الطرق المذكورة آنفاً، و هذه العيوب هي: انكسار قضبان الجزء الدوار، عدم تمركز الجزء الدوار و كذا خلل المدحرجات.

الكلمات المفتاحية: الآلات (الماكينات) الدورانية، الآلات غير المتزامنة على شكل قفص السنجاب، التشخيص، تحويل فورييه، الطيف، التحويل إلى الموجات المتقطعة، انكسار القضبان، عدم تمركز الجزء الدوار، المدحرجات، التحليل الاهتزازي.

Résumé de la thèse

Il est impossible d'imaginer notre vie d'aujourd'hui sans machines électriques (tournantes), ces dernières qui ont un impact significatif pour la plupart des produits et des œuvres, d'être présentés dans de nombreux domaines.

Le processus de la surveillance des machines tournantes menant à un bénéfice en temps et en argent, donc le processus de diagnostic a pour objectif de détecter les défauts d'une manière précoce, est devenu un impératif.

Le diagnostic des défauts avant ses conversions à un dysfonctionnement s'effectue de diverses techniques, et le plus largement utilisé pratiquement, aujourd'hui, est la technique d'analyse des signaux vibratoires, car elle se base principalement sur l'analyse spectrale (FFT) des images de vibration.

Cependant, les chercheurs, aujourd'hui, sont en concurrence et accélèrent afin de trouver un moyen plus efficace pour détecter les défauts dans les machines tournantes, et parmi ces techniques on cite, mais sans s'y limiter: l'analyse des signatures du courant statorique par la transformée de Fourier rapide (ASCS ou MCSA en Anglais) et l'analyse du même courant, mais par la transformée en ondelettes discrètes (ASCS-TOD ou MCSA-DWT en Anglais).

L'objectif de cette étude est de faire une comparaison entre les méthodes d'analyses du courant : MCSA-FFT, MCSA-DWT et la méthode d'analyse vibratoire afin d'accéder à une décision précieuse.

Cette étude a d'abord porté sur le développement d'un nouveau modèle dédié au défaut de roulement. Ce dernier nous a permis de faire la simulation numérique. Dans l'appréciation d'accomplir et justifier les résultats théorique, nous avons présenté des résultats expérimentaux pour faire la comparaison avec l'étude analytique (MCSA-FFT).

Concernant la méthode de la MCSA-DWT, nous avons proposé un nouvel indicateur qui aide aux analyses des signaux d'une manière plus précise (quantitativement et qualitativement).

Nous avons diagnostiqué le défaut de la cassure de barres, l'excentricité rotorique et le défaut de roulement par différentes techniques mentionnées plus haut, et aussi, notre étude pour différents défauts a été exploitée expérimentalement.

Mots clés : Machines tournantes, machines asynchrones à cage d'écureuil, diagnostic, transformée de Fourier, spectre, transformée en ondelettes discrètes, cassure de barres, excentricité, roulement, analyse vibratoire.

Abstract of the thesis

It is impossible to imagine our lives today without electrical machines (rotating), they have a significant impact for most products and works, to be present in many areas.

The process of monitoring of rotating machinery leading to a profit in time and money, so the diagnostic process is to detect the faults at an early date, has become an imperative.

Fault diagnosis before its conversion to a malfunction is carried out in various techniques, and the most widely used practically today is the technical of analysis of vibration signals, because it is mainly based on the spectral analysis (FFT) of vibration images.

However, researchers today are in competition and accelerate in order to find a more effective way to detect the faults in rotating machinery, and among these techniques, we mention, but not limited to: the motor current signature analysis (MCSA) by the fast Fourier transform and analysis of the same current, but by the discrete wavelet transform (MCSA-DWT).

The objective of this study is to make a comparison between the current analysis methods (MCSA-FFT and MCSA-DWT) and the vibration analysis method to access a valuable decision.

This study initially focused on the development of a new model dedicated to rolling element bearing faults; this allowed us to make a numerical simulation. In appreciation, we have presented the experimental results.

In this study, and regarding to the MCSA-DWT method, we have proposed a new indicator which helps to analyze the signals by a more precise manner (quantitatively and qualitatively).

We have studied the broken rotor bars, the rotor eccentricity and rolling bearing faults by various techniques mentioned above, and also, our study of different faults was performed experimentally.

Keywords: rotating machines, asynchronous machines (induction machine), diagnosis, Fourier transform, spectrum, discrete wavelet transform, broken bars, eccentricity, rolling element bearings, vibration analysis.



TABLE DES MATIERES

Table des matières

Liste des figures	iv
Liste des tableaux	ix
Liste des symboles et abréviations	xi
INTRODUCTION GENERALE	1
<u>CHAPITRE – I -</u> Contexte et état de l’art de la surveillance des machines asynchrones	
I.1 INTRODUCTION	6
I.2 ETUDE STATISTIQUE	6
1) Rotor	8
1) Roulements à billes	8
2) Stator	8
I.3 LES DEFAILLANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE	9
I.3.1 Défauts statoriques	10
I.3.1.1 Les courts-circuits	10
I.3.1.1.1 Exemple : (Les décharges partielles)	10
I.3.1.1.2 Court-circuit entre phases	11
I.3.1.1.3 Court-circuit entre spire	12
I.3.1.1.4 Circuit ouvert sur une phase	13
I.3.1.1.5 Court-circuit avec le bâti (la carcasse)	13
I.3.1.2 Les défauts combinés : CC-encoches	13
I.3.2 Défauts rotoriques	14
I.3.2.1 Défauts de barres	14
I.3.2.2 Ruptures d’anneaux	16
I.3.2.3 Dissymétrie du rotor (excentricité)	17
I.3.3 Défauts de roulement	20
I.3.3.1 L’usure	22
I.3.3.2 Le piquetage	22
I.3.3.3 Le grippage	22
I.3.3.4 Jeu de roulement	23
I.3.3.5 La corrosion	23
I.3.3.6 Les contraintes mécaniques	23
I.3.3.7 La lubrification	24
I.4 SYNTHESE DES DEFAUTS DE ROULEMENT	24
I.4.1 Analyse de fréquences des défauts de roulements	24
I.4.1.1 Equation théorique (analytique)	24
I.4.1.2 Modulation de la fréquence du signal	26
I.4.1.3 Règles empiriques	26

I.4.1.4 Equations réelles déduites de l'expérimentation	27
I.4.2 Confirmation des règles et équations des fréquences	27
I.4.2.1 Confirmation des règles empiriques	28
I.4.2.2 Confirmation des équations expérimentales	28
I.5 LA SELECTION DES DEFAUTS	31
I.6 LE CHOIX DES METHODES DE DIAGNOSTIC	31
I.7 CONCLSION	32
<u>CHAPITRE – II - Analyse des défauts rotoriques par la méthode de la MCSA</u>	
II.1 INTRODUCTION	34
II.2 LA METHODE DE MCSA	34
II.3 PRESENTATION ET REALISATION DU BANC D'ESSAI	35
II.3.1 Schéma synoptique général de l'ensemble	36
II.3.2 Premier banc d'essais	37
II.3.3 Deuxième banc d'essais	37
II.4 RESULTATS EXPERIMENTAUX DE RUPTURE DE BARRES	38
II.5 ANALYSE DU DEFAUT D'EXCENTRICITE ROTORIQUE	51
II.5.1 Résultats expérimentaux dédiés à l'excentricité statique	52
II.5.2 Analyse spectrale du courant statorique avec excentricité statique	53
II.5.3 Analyse spectrale du courant statorique avec excentricité dynamique	61
II.6 CONCLUSION	71
<u>CHAPITRE – III - Analyse des défauts de roulements par la méthode de la MCSA</u>	
III.1 INTRODUCTION	73
III.2 ANALYSE DU DEFAUT DE ROULEMENT ANALYTIQUEMENT	73
III.2.1 Simulation numérique de défauts des roulements	74
III.2.2 Contraintes de charges avec un défaut dans la bague externe	75
III.2.3 Développement de la fonction de la perméance	76
III.2.4 Discussion des études antérieures	79
III.2.5 Calcul de l'inductance mutuelle stator-rotor	80
III.2.6 Simulation da MAS en présence de DBE	83
III.3 ANALYSE DU DEFAUT DE ROULEMENT EXPERIMENTALEMENT	88
III.3.1 Résultats expérimentaux dédiés au défaut de la bague extérieure du roulement	88
III.3.2 Résultats expérimentaux dédiés au défaut de la bague intérieure du roulement	95
III.4 CONCLUSION	99

CHAPITRE – IV - Analyse des défauts par la méthode de la TOD

IV.1 INTRODUCTION	101
IV.2 LA METHODE DE MCSA-DWT	102
IV.2.1 Théorie de la TOD (DWT)	102
IV.2.2 Energies et bandes fréquentielles pour DWT	106
IV.2.3 Erreur quadratique moyenne (EQM ou MSE) pour le diagnostic	107
IV.4 TECHNIQUE D'ONDELETTES POUR LA DETECTION DU DEFAUT DE LA CASSURE DE BARRES	108
IV.4 TECHNIQUE D'ONDELETTES POUR LE DEFAUT D'EXCENTRICITE ROTORIQUE	117
IV.4.1 Défaut d'excentricité statique	117
IV.4.2 Défaut d'excentricité dynamique	121
IV.5 LA TECHNIQUE D'ONDELETTES POUR LES DEFAUTS DE ROULEMENT	125
IV.5.1 Détection du défaut de la bague extérieure (BE)	125
IV.5.2 Détection du défaut de la bague intérieure (BI)	129
IV.7 CONCLUSION	133

CHAPITRE – V - Analyses vibratoires des défauts de la MAS

V.1 INTRODUCTION	136
V.2 DEFINITIONS	136
V.2.1 Mesure de la vibration	137
V.2.1 Mesure de la vibration	137
V.2.3 Type de détection	139
V.2.4 Analyse fréquentielle	139
V.2.5 Fixation de l'accéléromètre sur le palier	140
V.2.6 Les points de mesure	140
V.3 LES SOURCES DES VIBRATIONS ET DES BRUITS	141
V.4 REDUCTION DE BRUIT ET LES VIBRATIONS D'EXCITATION	142
V.5 RESULTATS EXPERIMENTAUX DE SIGNAUX VIBRATOIRES	143
V.5.1 Détection du défaut de la cassure des barres par la méthode de MVSA	143
V.5.2 Détection du défaut d'excentricité statique et dynamique par la méthode de MVSA	153
V.5.2.1 MVSA pour un défaut d'excentricité statique	153
V.5.2.2 MVSA pour un défaut d'excentricité dynamique	162
V.5.3 Détection du défaut de roulement par la méthode de MVSA	168
V.5.3.1 Mesure de vibration pour un défaut dans la bague externe	168
V.5.3.2 Mesure de vibration pour un défaut dans la bague interne	176
V.6 BILAN D'ETUDE	181
V.7 ETUDE COMPARATIVE ENTRE LA MCSA ET LA MVSA	182

V.7.1 Interprétation et discussion des résultats	183
V.7.2 Description de chaque défaut	183
<i>Premièrement : la cassure de barres</i>	183
<i>Deuxièmement : l'excentration du rotor</i>	184
<i>Troisièmement : le roulement</i>	184
V.7.3 Remarques importantes	185
V.8 BILAN DE LA COMPARAISON	187
V.9 CONCLUSION	189
CONCLUSION GENERALE	191
ANNEXES	195
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	217

Liste des figures

CHAPITRE I : Contexte et état de l'art de la surveillance des machines asynchrones

Figure I.1. Répartition des défauts.	7
Figure I.2. Répartition des défauts liés au stator.	7
Figure I.3. Schéma illustratif de certains défauts associés à la machine.	8
Figure I.4. Représentation des différents défauts statoriques possible.	11
Figure I.5. Court-circuit spire-spire.	12
Figure I.6. Court-circuit phase-phase.	12
Figure I.7. Détérioration d'isolation : CC entre spires (à gauche), extension aux encoches (au centre) et une extension à la profondeur des encoches (à droite).	14
Figure I.8. Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.	16
Figure I.9. Type d'excentricité, (a) : statique, (b) : dynamique.	18
Figure I. 10. Eléments constitutifs d'un roulement à billes.	21
Figure I. 11. Bille saine et une autre défailante.	22
Figure I. 12. Fissure (cassure) et piquetage dans la bague extérieure.	22
Figure I. 13. Jeu de roulement (axial et radial).	23
Figure I. 14. Progression d'un écaillage.	23
Figure I. 15. Angle de contact d'un roulement oblique.	25

CHAPITRE II : Analyse des défauts rotoriques par la méthode de la MCSA

Figure II.1. Schéma de principe de l'acquisition des signaux.	36
Figure II.2. Photo du banc d'essai dédié au diagnostic (Dspace1104).	37
Figure II.3. Photo du banc d'essai dédié à l'analyse vibratoire.	38
Figure II.4. Photographie du rotor de la MAS de 3 kW pour un état sain (à gauche), une barre cassée (au centre), deux barres cassées (à droite).	38
Figure II.5. Le courant statorique en fonction du temps (1BC) ; (a) : 0% de la charge, (b) : 75% de la charge, (c) : Phénomène du battement ($s=3.6\%$).	40
Figure II.6. Spectre de la tension d'alimentation.	41
Figure II.7. Spectre du courant statorique (1BC, à vide) ; (a): Bande : 0-1000Hz, (b) et (c) : Basses fréquences, (d) et (e) : Alentours des <i>PSHs</i> , (f) et (g) : Alentours des 5 et 7.	42
Figure II.8. Spectre du courant statorique ($s=3.6\%$, 1BC) ; (a) : 0-1000Hz, (b) et (c) : 0-200Hz, (d) et (e): 200-400Hz, (f) et (g): 600-800Hz.	44
Figure II.9. Spectre du courant statorique ($s=3.6\%$, 1BC) ; (a) et (b): 20-800Hz, (c) et (d): 600-650Hz.	45

Figure II.10. Courant statorique en fonction du temps ($s=3.6\%$, 2BC).	46
Figure II.11. Spectre du courant statorique (MAS sain, 1BC et 2BC) ; (a) : Autour du fondamental, (b) : Autour de L -PSH, (c) : Autour de 5, (d) : Autour de 7.	47
Figure II.12. Spectre du courant statorique (2BC) de 0 à 100 Hz.	48
Figure II.13. Stratégie et principe de préparation de l'ES et l'ED.	53
Figure II.14. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($s=0.004$, à vide); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour de 5 et 7, (f) et (g) : Autour des PSHs.	56
Figure II.15. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($s=0.032$); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour de 5 et 7, (f) et (g) : Autour des PSHs.	58
Figure II.16. Evolution d'amplitude en fonction des RSHs ($\delta_s=45\%$) avec 75% de charge nominale ($s=0.032$).	61
Figure II.17. Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique $\delta_d=30\%$ ($s=0.004$); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour de 5 et 7, (f) et (g) : Autour des PSHs.	63
Figure II.18. Spectre du courant statorique en charge avec un degré d'excentricité dynamique $\delta_d=30\%$ ($s=0.035$); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour de 5 et 7, (f) et (g) : Autour des PSHs.	65
Figure II.19. FBL pour un degré d'excentricité statique $\delta_d=30\%$ ($s=0.035$); (a) : Autour de 525.4 Hz, (b) : Autour de L -PSH, (c) : Autour de U -PSHs.	66
Figure II.20. Evolution d'amplitude en fonction des RSHs ($\delta_d=30\%$).	70

CHAPITRE III : Analyse des défauts de roulements par la méthode de la MCSA

Figure III.1. Position du rotor avec le mouvement des billes.	76
Figure III.2. Contrainte radiale de la charge appliquée.	76
Figure III.3. Schéma d'une bille autour d'un petit trou dans la bague extérieure.	77
Figure III.4. Forme du signal triangulaire en présence d'un défaut de la bague extérieure (DBE).	77
Figure III.5. Inductances mutuelles entre les phases a, b, c et une maille rotorique pour $\alpha=0.1$ mm et $\delta_s=20\%$.	82
Figure III.6. Evolution des inductances mutuelles stator-rotor ; (a): $L_{sr}=f(\delta_s)$, $\alpha=\text{constant}=1\text{mm}$, (b): $L_{sr}=f(\alpha)$, $\delta_s=\text{constant}=20\%$.	82
Figure III.7. Grandeurs électromécanique "fonctionnement à vide"; (a): Vitesse de rotation (b): Couple électromagnétique, (c): Courant statorique.	83
Figure III.8. Grandeurs électromécanique "fonctionnement en charge"; (a): Vitesse de rotation (b): Couple électromagnétique, (c): Courant statorique.	84
Figure III.9. Spectre du courant statorique par simulation "fonctionnement à vide" ; (a) et (b) Bande: 0-300 Hz, (c) et (d) Bande: 550-1500Hz.	86
Figure III.10. Spectre du courant statorique par simulation "fonctionnement en charge" ; (a) et (b) Bande: 0-300 Hz, (c) et (d) Bande: 550-1500Hz.	87
Figure III.11. Photos d'un roulement défectueux dans la BE.	88
Figure III.12. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BE, $s\approx 0$) (a) : 0-1000Hz, (b) : 0-150Hz, (c) : 140-300 Hz, (d) : 450-600 Hz, (e) : Autour des PSHs.	90

Figure III.13. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BE, $s=0.04$) (a) : 0-1000Hz, (b) : 0-150Hz, (c) : 140-300 Hz, (d) : 450-600 Hz, (e) : Autour des <i>PSHs</i> .	91
Figure III.14. Spectre du courant statorique pour la bande de 1000-1500Hz ($s\approx 0.04$) ; (a) : Etat sain, (b) : Etat défectueux (BE).	93
Figure III.15. Photos d'un roulement défectueux dans la BI.	95
Figure III.16. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BI, $s=0.004$) (a) : 0-1000Hz, (b) : 0-200Hz, (c) : 200-500 Hz, (d) : 500-760 Hz.	96
Figure III.17. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BI, $s=0.048$) (a) : 0-1000Hz, (b) : 0-200Hz, (c) : 200-500 Hz, (d) : 500-750 Hz.	98

CHAPITRE IV : Analyse des défauts par la méthode de la TOD

Figure IV.1. Echelle de décomposition par la TO.	103
Figure IV.2. Filtres de décomposition d'un signal original $f(t)$ en approximations et détails.	104
Figure IV.3. Décomposition en multi-niveau du signal $f(t)$.	105
Figure IV.4. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s en fonctionnement à vide (1BC) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	110
Figure IV.5. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement en charge (1BC) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	111
Figure IV.6. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s en fonctionnement à vide (2BC) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	112
Figure IV.7. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement en charge (2BC) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	113
Figure IV.8. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide.	114
Figure IV.9. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge.	114
Figure IV.10. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide.	115
Figure IV.11. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge.	115
Figure IV.12. Evolution de l'EQM pour une barre cassée.	117
Figure IV.13. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement à vide (ES) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	118
Figure IV.14. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (ES).	118
Figure IV.15. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement en charge (ES) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	119
Figure IV.16. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (ES).	119
Figure IV.17. Evolution de l'EQM pour un défaut d'excentricité statique.	121
Figure IV.18. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement à vide (ED) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	122
Figure IV.19. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (ED).	122
Figure IV.20. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement en charge (ED) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	123
Figure IV.21. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (ED).	123

Figure IV.22. Evolution de l'EQM pour un défaut d'excentricité dynamique.	125
Figure IV.23. Décomposition en multi-niveaux du courant statorique pour un fonctionnement à vide (BE) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	126
Figure IV.24. Evolution de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (BE).	126
Figure IV.25. Décomposition en multi-niveaux du courant statorique pour un fonctionnement en charge (BE) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	127
Figure IV.26. Evolution de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (BE).	127
Figure IV.27. Evolution de l'EQM pour un défaut de la bague externe.	129
Figure IV.28. Décomposition en multi-niveaux du courant statorique pour un fonctionnement à vide (BI) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	130
Figure IV.29. Evolution de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (BI).	130
Figure IV.30. Décomposition en multi-niveaux du courant statorique pour un fonctionnement en charge (BI) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	131
Figure IV.31. Evolution de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (BI).	131
Figure IV.32. Evolution de l'EQM pour un défaut de la bague interne.	133
CHAPITRE V : Analyses vibratoires des défauts de la MAS	
Figure V.1. Schéma de principe d'un capteur de vibration.	138
Figure V.2. Exemple des points de fixations dans un système électromécanique.	140
Figure V.3. Différents points de mesure des vibrations d'une MAS.	141
Figure V.4. Signal temporel de vibration dans l'état sain et pour 2BC du MAS ; (a) : fonctionnement à vide, (b) : fonctionnement en charge.	144
Figure V.5. Spectre du signal vibratoire pour différentes plages de fréquences (2BC, $s=0.004$) ; (a) et (b) :0-200Hz, (c) et (d) :200-400Hz, (e) et (f) :400-600Hz.	146
Figure V.6. Spectre du signal vibratoire pour différentes plages de fréquences (2BC, $s=0.004$) ; (a) et (b) :600-800 Hz, (c) et (d) :1100-1300 Hz.	147
Figure V.7. Evolution d'amplitudes de $2kf_s$ (2BC, $s=0.004$).	148
Figure V.8. Bande latérales alentour de kf_r (2BC, $s=0.004$).	149
Figure V.9. Spectre d'un signal de vibration pour différentes plages de fréquences (2BC, $s=0.034$) ; (a) et (b) :0-200Hz, (c) et (d) :200-400Hz, (e) et (f) :400-600Hz.	150
Figure V.10. Spectre d'un signal de vibration pour différentes plages de fréquences (2BC, $s=0.034$) ; (a) et (b) :600-800 Hz, (c) et (d) :1100-1300 Hz.	151
Figure V.11. Spectre d'un signal de vibrations pour une ES et $s=0.004$ « (a) et (b) : 0-200 Hz ».	154
Figure V.12. Spectre d'un signal de vibrations pour une ES et $s=0.004$ « (a), (b) et (c) : 0-100 Hz».	154
Figure V.13. Spectre d'un signal de vibrations pour une ES alentour de $2f_s$ pour $s=0.004$.	155
Figure V.14. Différentes plages des fréquences du spectre d'un signal de vibrations pour une ES et $s=0.004$ « (a), (b) : 500-600 Hz ; (c), (d) : 900-1000 Hz ».	156
Figure V.15. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES ($s=0.032$), 0-200 Hz.	157
Figure V.16. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES ($s=0.032$), 0-100 Hz.	157

Figure V.17. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES ($s=0.032$), 20-80 Hz.	159
Figure V.18. Spectre d'un signal de vibrations pour une ES alentour de $2f_s$ pour $s=0.032$.	159
Figure V.19. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES aux alentours la fréquence <i>RBPF</i> ; « (a) et (b) : 550-800 Hz 'à vide' », « (c) et (d) : 550-800 Hz 'en charge' ».	161
Figure V.20. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ED ($s=0.004$), 0-200 Hz.	163
Figure V.21. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ED ($s=0.004$), 0-100 Hz.	163
Figure V.22. Spectre d'un signal vibratoire pour différentes plages de fréquences (ED, $s=0.004$).	164
Figure V.23. Bande latérale de kf_r alentour de <i>RBPF</i> pour un défaut d'ED ($s=0.004$).	165
Figure V.24. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ED ($s=0.032$), « (a) et (b) : 0-200 Hz ».	166
Figure V.25. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ED ($s=0.032$), 0-100 Hz.	166
Figure V.26. Bande latérale de kf_r alentour de <i>RBPF</i> pour un défaut d'ED ($s=0.032$).	167
Figure V.27. Signal vibratoire en fonction du temps pour un MAS défectueux (BE, $s=0.004$).	169
Figure V.28. Différentes plages des fréquences du spectre d'un signal vibratoire (BE, $s=0.004$).	170
Figure V.29. Spectre d'un signal vibratoire ; (a) et (b) : 0-100 Hz, (c) et (d) : 100-200 Hz, (e) et (f) : 200-400 Hz (BE, $s=0.004$).	171
Figure V.30. Signal vibratoire en fonction du temps pour un MAS défectueux (BE, $s=0.032$).	172
Figure V.31. Différentes plages des fréquences du spectre d'un signal vibratoire (BE, $s=0.032$).	173
Figure V.32. Présentation des fréquences de bandes latérales alentours de $k \times f_{be}$ dans le spectre du signal vibratoire (BE, $s=0.032$).	174
Figure V.29. Présentation des fréquences de bandes latérales alentours de $k \times f_{be}$ dans le spectre du signal vibratoire (BE, $s=0.032$).	175
Figure V.30. Signal vibratoire en fonction du temps 'BI' ; (a) : à vide, (b) : en charge.	177
Figure V.31. Différentes plages des fréquences du spectre d'un signal vibratoire (BI, $s=0.004$).	177
Figure V.32. Spectre d'un signal vibratoire aux alentours de différentes plages fréquentielles (BI, $s=0.004$).	178
Figure V.29. Présentation des fréquences caractéristiques et latérales pour différentes plages des fréquences dans le spectre d'un signal vibratoire (BI, $s=0.032$).	180

Liste des tableaux

CHAPITRE I : Contexte et état de l'art de la surveillance des machines asynchrones

Tableau I.1. Synthèse des signatures des défauts.	30
--	-----------

CHAPITRE II : Analyse des défauts rotoriques par la méthode de la MCSA

Tableau II.1. Récapitulation des raies dans le spectre du courant statorique (1BC).	45
Tableau II.2. Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques (2BC, $s=3.2\%$).	49
Tableau II.3 Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques (1BC+2BC).	50
Tableau II. 4. Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta_s=45\%$).	60
Tableau II. 5. Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta_d=30\%$).	70

CHAPITRE III : Analyse des défauts de roulements par la méthode de la MCSA

Tableau III.1 Valeurs théoriques des <i>PSHs</i> .	85
Tableau III.2 Valeurs théoriques des fréquences caractéristiques.	85
Tableau III.3 Valeurs théoriques et pratiques des harmoniques (BE, $s=0$).	92
Tableau III.4 Valeurs théoriques et pratiques des harmoniques (BE, $s=0.04$).	94
Tableau III.5 Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague interne ($s=0.004$).	97
Tableau III.6 Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague interne ($s=0.048$).	99

CHAPITRE IV : Analyse des défauts par la méthode de la TOD

Tableau IV.1. Bandes fréquentielles des détails ($f_e=12.8$ kHz).	107
Tableau IV.2. Tableau récapitulatif des EQMs pour 1BC (fonctionnement à vide).	116
Tableau IV.3. Tableau récapitulatif des EQMs pour 1BC (fonctionnement en charge).	116
Tableau IV.4. Valeurs des EQMs (fonctionnement à vide-ES).	120
Tableau IV.5. Valeurs des EQMs (fonctionnement en charge-ES).	121
Tableau IV.6. Valeurs des EQMs (fonctionnement à vide-ED).	124
Tableau IV.7. Valeurs des EQMs (fonctionnement en charge-ED).	124
Tableau IV.8. Valeurs des EQMs (fonctionnement à vide-BE).	128
Tableau IV.9. Valeurs des EQMs (fonctionnement en charge-BE).	128
Tableau IV.10. Valeurs des EQMs (fonctionnement à vide-BI).	132
Tableau IV.11. Valeurs des EQMs (fonctionnement en charge-BI).	132

CHAPITRE V : Analyses vibratoires des défauts de la MAS

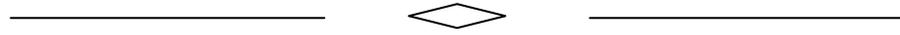
Tableau V.1. Valeurs théoriques et pratiques des harmoniques dans le spectre d'un signal vibratoire (2BC, $s=0.034$, $f_r=24.15\text{Hz}$).	152
Tableau V.2. Valeurs théoriques et pratiques de quelques harmoniques du signal vibratoire (ES, $s=0.004$).	155
Tableau V.3. Valeurs théoriques et pratiques de quelques harmoniques du signal vibratoire (ES, $s=0.032$).	158
Tableau V.4. Résumé de quelques valeurs théoriques et pratiques des harmoniques causés par le défaut d'ES dans le spectre d'un signal vibratoire ($s=0.032$).	160
Tableau V.5. Bilan d'amplitudes caractéristiques du défaut d'ES autour de RBPF.	162
Tableau V.6. Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BE, $s=0.004$).	172
Tableau V.7. Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BE, $s=0.032$).	176
Tableau V.8. Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BI, $s=0.004$).	179
Tableau V.9. Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BI, $s=0.032$).	181
Tableau V.10. Récapitulation des avantages et des inconvénients de la MCSA et la MVSA.	189

Liste des symboles et abréviations

f_s :	fréquence d'alimentation statorique
ω_s :	pulsation du courant statorique
f_r :	fréquence de rotation du rotor
g, s :	glissement
e, g_0 :	épaisseur d'entrefer
D	diamètre extérieur du stator
p :	nombre de paires de pôles
K_{bh} :	coefficients de bobinage relatif à l'harmonique de rang h
A :	perméance d'entrefer
n_{br}, n_b :	nombre de barres rotoriques
μ :	perméabilité magnétique du matériau utilisé
μ_0 :	perméabilité du vide
μ_r :	perméabilité relative
δ_s :	degré d'excentricité statique du rotor
δ_d :	degré d'excentricité dynamique du rotor
l :	longueur du fer rotorique
r :	rayon moyen de la machine
N_t :	nombre de spires en série par phase
N_e :	nombre d'encoches par pôle et par phase
Q :	nombre de dents par pas d'enroulement
f_{roul}, f_c :	fréquence caractéristique du défaut de roulement
α_r :	angle d'ouverture d'une maille rotorique
T_c :	période caractéristique
HERs :	Harmoniques d'Encoches Rotoriques
RSHs :	Rotor Slot Harmonics
f_{RSHs} :	fréquences d'harmoniques d'encoches rotoriques
L-PSH :	Lower Principal Slot Harmonic
U-PSH :	Upper Principal Slot Harmonic
f_{PSHs} :	fréquences d'harmoniques principaux rotoriques
f_{FBL} :	fréquences de bande latérale
f_{cb} :	fréquence caractéristique du défaut de la cassure de barres
f_{ES} :	fréquence caractéristique du défaut d'excentricité statique
f_{ED} :	fréquence caractéristique du défaut d'excentricité dynamique
$f_{Mix}, f_{Exc-Mix}$:	fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte
f_{be}, f_{BE}, f_{OR} :	fréquence caractéristique du défaut de la bague externe du roulement
f_{bi}, f_{BI}, f_{IR} :	fréquence caractéristique du défaut de la bague interne du roulement
f_{ball}, f_B :	fréquence caractéristique du défaut de la bille du roulement
f_{cage} :	fréquence caractéristique du défaut de la cage du roulement
$f_{caract-be}$:	fréquence caractéristique du défaut de la bague externe dans le

	spectre du courant statorique
$f_{caract-bi}$:	fréquence caractéristique du défaut de la bague interne dans le spectre du courant statorique
f_{sat} :	fréquence de saturation
f_{fmm} :	fréquence de force magnétomotrice
f_v :	fréquence de vibration
$f_{désal}$:	fréquence de désalignement
f_e :	fréquence d'échantillonnage
f_s :	fréquence de glissement
N_b :	nombre de billes de roulement
δ_{go} :	profondeur du petit trou dans la bague extérieure
α :	largeur du petit trou dans la bague extérieure
ν :	ordre d'harmoniques du temps
n_d :	ordre de l'excentricité dynamique
f_{mm}, FMM :	force magnétomotrice
J :	moment d'inertie
C_{em} :	couple électromagnétique
C_r :	couple résistant
ASCS :	Analyse des Signatures de Courant statorique
MCSA :	Motor Current Signal Analysis
TFR :	Transformée de Fourier Rapide
FFT :	Fast Fourier Transform
TOD :	Transformée en ondelettes discrètes
DWT :	Discrete Wavelet Transform
ASSV :	Analyse des Signatures du Signal Vibratoire
MVSA :	Motor Vibration Signature Analysis
RBPF :	Rotor Bar Pass Frequency
DBE :	Défaut de la Bague Extérieure
DBI :	Défaut de la Bague Intérieure
DB :	Défaut de la bille du roulement
EQM :	Erreur Quadratique Moyenne
MSE :	Mean Square Error
CA_j :	coefficients d'approximation
CD_j :	coefficients de détails
Db44 :	ordre d'ondelette mère de Daubechies
N_{SA} :	seuil d'arrêt pour la TOD
BC :	Barre Cassée
CB :	Cassure de Barre
MAS :	Machine (Moteur) Asynchrone
AFEM :	Approche de la Fonction d'Enroulement Modifiée
F_{ab} :	Force magnétomotrice du circuit magnétique –ab-
H :	Rang d'un harmonique.
K_{bh} :	Coefficient de bobinage.

K_{dh} :	Coefficient de distribution.
K_{rh} :	Coefficient de raccourcissement.
N_c :	Nombre de conducteur par encoche du stator.
N_e :	Nombre d'encoches par pôle et par phase.
N_s :	Nombre d'encoches statoriques.
N_t :	Nombre de spires en série par phase.
θ_r :	Position mécanique du rotor.
φ :	Ouverture angulaire (position dans l'espace).
n :	Fonction de distribution.
N :	Fonction d'enroulement.
R_b :	Résistance d'un barreau du rotor.
R_e :	résistance d'une portion d'anneau
R_s :	Résistance d'une phase statorique.
L_a :	Inductance de fuite d'une portion d'anneau de court circuit du rotor.
L_b :	Inductance de fuite d'un barreau du rotor.
L_{jk} :	Inductance mutuelle entre deux mailles rotoriques.
L_{mq} :	Inductance de magnétisation d'une phase statorique.
L_{rk} :	Inductance de magnétisation d'une maille rotorique.
M_s :	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
L_{sr} :	Inductance mutuelle entre une phase statorique et une maille rotorique.



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La machine asynchrone à cage (machine à induction) est aujourd'hui très appréciée dans les milieux industriels pour sa qualité de robustesse, la quasi-absence d'entretien, l'avantage d'être alimentée directement par le réseau triphasé, son prix d'achat est moins élevé à puissance donnée par rapport à la machine à courant continu et la machine synchrone ; grâce aux progrès de l'électronique, elle est utilisée dans les applications nécessitent une vitesse variable, en faisant appel à plusieurs types de commandes. La machine asynchrone est apparaît, maintenant, comme un élément de base des actionneurs électriques performants dans des endroits les plus divers, tels que : éolienne, les applications militaires, la propulsion électrique des véhicules, de tramway et de trains de grandes vitesses, voire même de bateaux de croisières.

Cependant, comme toute autre machine, elle peut être affectée par une faiblesse indésirable aux moments inattendus. Les raisons de ces faiblesses sont nombreuses, telles que, problèmes de charge, mauvaises conditions de travail, problèmes d'installation et de fabrication, etc.

Avec les progrès dans le processus des systèmes de contrôle, la phase de la surveillance est assez primordiale afin d'assurer le bon fonctionnement des machines asynchrones. Le diagnostic est une partie de la surveillance qui a pour objectif de détecter et isoler les défauts dans les machines asynchrones d'une manière précoce [CAS03]. Autrement, lorsque les défauts ne sont pas détectés à l'avance, ils peuvent entraîner des pertes importantes, ainsi qu'ils peuvent provoquer une menace pour la fiabilité et la sécurité dans le fonctionnement de la machine tournante.

Récemment, la détection et l'isolation des défauts (FDI : Fault Detection and isolation) est devenu un souci majeur pour de nombreux chercheurs orientés aux applications de l'ingénierie [SAL13]. Les deux principaux objectifs des processus de la FDI sont la décision précieuse sur l'état de la machine pour localiser le défaut et l'élimination du problème. Cette stratégie de diagnostic a comme rôle d'améliorer le contrôle, de réduire les coûts de maintenance, d'augmenter la disponibilité et la fiabilité, d'éviter les temps d'arrêt non planifiés, et d'améliorer l'efficacité opérationnelle des systèmes.

De façon générale, dans un moteur asynchrone peut se développer un défaut interne ou un défaut externe. En se référant à l'origine, un défaut peut être mécanique ou électrique. Il peut être classifié comme un défaut statorique ou rotorique et autres défauts qui sont associés aux pièces mobiles comme les roulements. Plus précisément, les défauts de la MAS peuvent se

trouver aux roulements, au stator et au rotor, qui se traduisent, généralement par une vibration mécanique [BELH14].

Les vibrations sont omniprésentes dans la plupart des machines électriques. Les machines tournantes vibrent pour plusieurs raisons comme : défauts d'équilibrage et d'alignement et les imperfections des paliers, les cassures partielles ou totales des barres rotoriques, les problèmes aux roulements, et l'excentricité. Généralement, les vibrations diminuent la durée de vie de l'équipement et dans les cas extrêmes peuvent endommager celui-ci ou même provoquer des défaillances catastrophiques.

Pour cela, plusieurs méthodes ont été proposées pour la détection des défauts et le diagnostic, mais la plupart des méthodes nécessitent une bonne connaissance et un savoir-faire pour les appliquer avec succès.

Les approches doivent être plus simples afin de permettre aux utilisateurs (opérateurs) ayant une connaissance basique sur le système, de le surveiller afin d'analyser l'état de défaut et de prendre des décisions fiables.

L'observation de phénomènes vibratoires est une technique largement utilisée dans l'industrie, notamment pour la surveillance des composants sensibles, comme les roulements à billes, les engrenages ou les rotors. L'analyse vibratoire permet de dénoter et de détecter les problèmes dans les machines tournantes.

La procédure de l'analyse des signatures vibratoires du moteur (ASVM ou MVSA en Anglais), consiste à détecter l'apparition d'un défaut sans démontage de la machine en prélevant l'image vibratoire à l'aide d'un capteur de vibration. Dans la plupart des cas, le traitement des signaux vibratoires s'effectue par l'analyse du contenu spectral.

Le même principe d'analyse vibratoire (spectre), est appliqué au courant statorique de la machine asynchrone. Cette technique se basant sur l'analyse des signatures du courant statorique (ASCS ou MCSA en Anglais) en utilisant la transformée de Fourier rapide (TFR ou FFT en Anglais), est actuellement en concurrence avec la méthode de MVSA.

La richesse d'informations dans le courant statorique, permet de l'exploiter par différentes techniques. Parmi elles, on trouve la transformée en ondelettes discrètes (TOD ou en Anglais DWT), qui est dernièrement très utilisée sous plusieurs formes, surtout, dans l'aspect de filtrage.

Pour toutes ces raisons, et pour bénéficier des avantages que procurent ces approches, nous posons la question sur la méthode la plus efficace au diagnostic des machines asynchrones. L'objectif de cette étude est de faire une comparaison entre la méthode d'analyse du courant par MCSA-FFT, MCSA-DWT et MVSA afin d'accéder à une décision précieuse.

Cette étude vise tout d'abord à présenter un nouveau modèle analytique adéquat au traitement des différents défauts de roulement. Ce dernier nous a permis de faire une simulation numérique. Dans l'appréciation d'accomplir et justifier les résultats théorique, nous avons présenté des résultats expérimentaux pour les simuler et les comparer avec l'étude analytique.

En plus, notre travail traite différents défauts par la technique de la MCSA-DWT, mais avec un nouvel aspect qui se base sur l'*erreur quadratique moyenne*.

Le plan du mémoire est résumé et agencé en cinq chapitres, comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous allons rappeler le contexte de notre étude : une synthèse très générale de la problématique pour rendre compte de l'étude menée, nous présenterons d'abord, à travers une analyse bibliographique, l'état de la recherche dans ce domaine.
- Le deuxième chapitre sera consacré aux analyses des défauts rotoriques: rupture de barres et excentricité (statique et dynamique) par la technique de la MCSA.
- Le troisième chapitre regroupera le nouveau modèle analytique de simulation concernant le défaut mécanique (roulement). Nous allons dans ce chapitre faire une validation expérimentale des défauts du roulement qui nous permettra de confirmer nos résultats de simulation en se basant sur la méthode de la MCSA.
- La technique de la transformée en ondelettes discrètes (MCSA-DWT) sera appliquée dans le quatrième chapitre pour les trois défauts cités auparavant.
- Le cinquième chapitre sera consacré à l'étude des défauts de la machine asynchrone par l'analyse vibratoire (MVSA). Et afin de bien tirer profit des résultats obtenus, nous consacrerons une partie dans ce chapitre à une discussion détaillée des différentes techniques appliquées dans ce travail.

Une conclusion générale donnera une synthèse du travail effectué, et résumera les principaux résultats obtenus, ainsi que les perspectives envisagées pour d'éventuelles améliorations.



CHAPITRE I

***Contexte et état de l'art de la
surveillance des machines asynchrones***

I.1 INTRODUCTION

Les équipements de surveillance des machines sont des matériels qui assurent l'entretien et la maintenance des machines. La surveillance des machines permet de vérifier la compatibilité matérielle et le taux de consommation afin de garantir une utilisation optimale des ressources. La surveillance des équipements industriels a pour objet également d'observer l'état d'un dispositif, dans le but de faire face aux aléas d'un système au cours de la phase d'exploitation [BES07]. Bien que le diagnostic est une partie de la surveillance, sa définition adoptée par les instances internationales de normalisation, est la suivante : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test ». [LAL04]. Le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application.

En général, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers, que l'on retrouve souvent sous le nom : FDI (Fault Detection and Isolation). Le rôle d'une telle procédure est de fournir une information sur l'apparition d'un défaut et sa provenance le plus rapidement possible. Les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70 [ISH79], [HAR82], [CAM86], [KLI88], [ELK92], [PEN94]. En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications [ARK96], [TRZ00], [BEN03], [JES14], [MUS16], [BES16-1].

Dans ce chapitre, nous allons décrire l'état de l'art de défauts concernant le système étudié, dans notre cas, qui est la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil (MAS). Nous allons effectuer une introduction à l'état de l'art du diagnostic des défauts dans les systèmes physiques. L'intérêt portera essentiellement sur le problème de détection et d'isolation des défauts.

I.2 ETUDE STATISTIQUE

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 différents pour chaque auteur, comme par exemple le critère des variations dues à l'amélioration des isolants.

Pour [MEL99], le partage se fera comme suit : 50% pour les défauts statoriques, 20% comme défauts rotoriques, 20% sont des défauts mécaniques et 10% autres.

Pour [CAS02], (voir figure I-1) plus de 50% de défauts affectent 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.

D'après l'article de [RAZ03], 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 près de 20 % et autres pour environ 10%.

Les statistiques, présentées par [EPR85] et [LU04], les destinent quant à eux, pour 40 à 50% comme étant des défauts de roulement, 30-40% pour des défauts statoriques et enfin pour 5 à 10% de défauts rotoriques.

De manière plus spécifique, au niveau du stator, on prend à titre d'exemple, la répartition donnée par la figure (I-2) [RAI00].

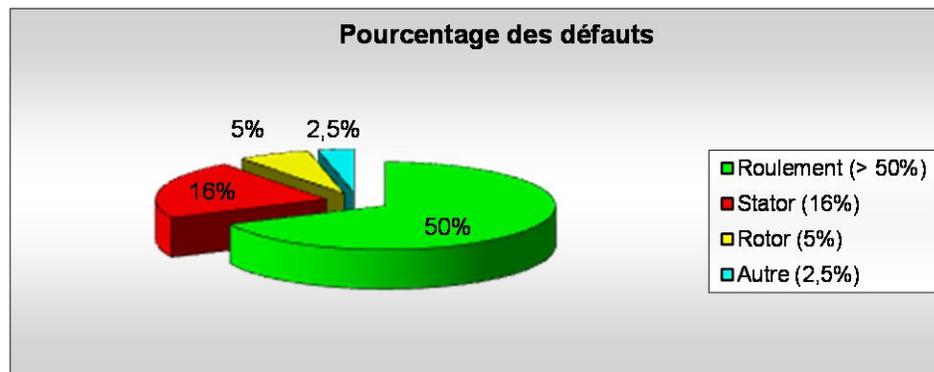


Figure I.1. Répartition des défauts selon [CAS02].

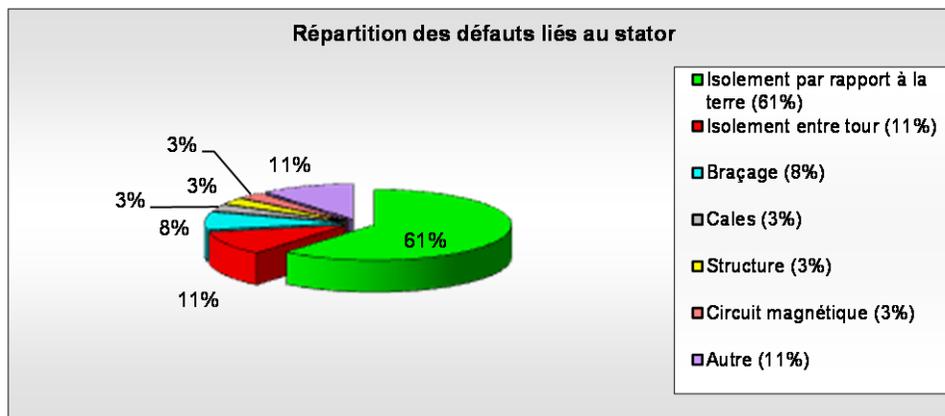


Figure I.2. Répartition des défauts liés au stator [RAI00].

L'étude précédente permet de classer les défauts suivant leur localisation [KLI96]:

1) Rotor

- Rupture de barreaux (Cassures partielles ou totales des barres).
- Cassure de l'anneau de court-circuit de la cage (Cassures partielles ou totales des anneaux).
- Excentricité statique ou dynamique.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).

2) Roulements à billes

- Trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures.
- Ondulation de leur surface de roulement.
- Attaque des billes.
- Corrosion due à l'eau.
- Défaut de graissage, problème du à la température.
- Décollement, effritement de surface, provoquée par une surcharge.

3) Stator

- Court-circuit entre spires, court-circuit entre bobines de la même phase.
- Ouvertures de phases, court-circuit phase-phase ou phase-terre.
- Coupure d'une phase.
- Défaut du circuit magnétique (ruptures de tôles).
- Défaut de l'isolation de masse.

On peut illustrer certains défauts par le schéma (I-3).

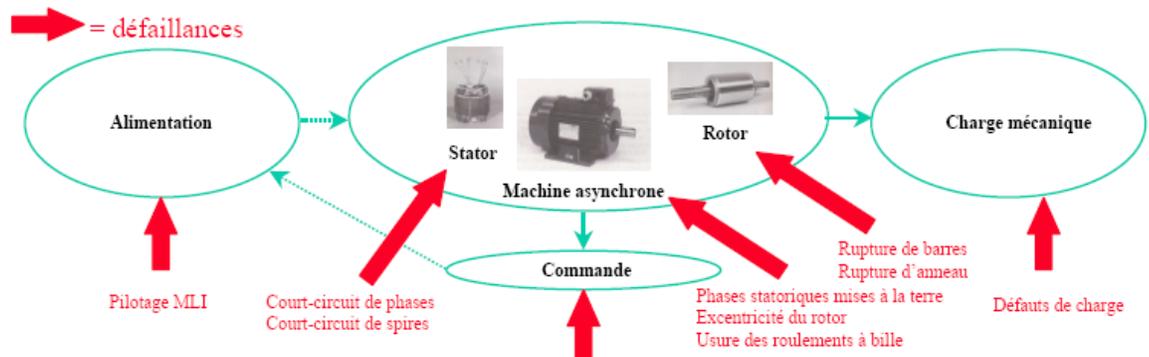


Figure I.3. Schéma illustratif de certains défauts associés à la machine.

Les plus préoccupants de ces défauts sont :

- 1) Les défauts statoriques.
- 2) Les défauts de roulements.
- 3) Les cassures partielles ou bien totales des barres et des portions d'anneaux de court-circuit de la cage rotorique.
- 4) Les défauts d'excentricité.

I.3 LES DEFAILLANCES DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Parmi les méthodes les plus utilisées, nous citerons l'analyse du courant statorique et l'analyse vibratoire. Ces dernières sont l'objectif de notre travail ; nous allons mettre en lumière une étude comparative en présence des défauts.

La première (basée sur le courant du stator) dépend de la distribution de champ dans l'entrefer et son influence sur les courants statoriques, elle porte l'abréviation ASCM ou ASCS (Analyse les Signatures de Courant du Moteur 'ou du Stator', ou en anglais Motor Current Signature Analysis 'MCSA').

En réalité, l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est en fonction de différents paramètres, tels que la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage [ALG65], [HEL69], [CAM86], [VAS93], [GHO05], [FAI16]. A cause de cette structure, il a été démontré, qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique, des harmoniques dites d'encoches rotoriques (*RSHs*), ayant pour fréquences [ALG65], [ISH84], [CAM86], [THO01]:

$$f_{RSHs} = \left[\frac{\lambda n_b}{p} (1-s) \pm n_{os} \right] \cdot f_s \quad (\text{I. 1})$$

Avec, p est le nombre de paire de pôles, n_b le nombre de barres, n_{os} l'ordre des harmoniques de temps de la FMM ($n_{os} = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$), et λ un entier positif. Pour $\lambda=1$ et $n_{os}=1$ on définit ce qui est appelé " harmoniques d'espaces ou d'encoches principales " (*PSHs*).

La seconde, est la méthode d'analyse des signatures vibratoires du moteur (ASVM), qui est un des moyens les plus utilisés dans l'industrie, par des équipements disponibles aux mesures des signaux de vibration. L'ASVM a le rôle de suivre la santé des machines tournantes en

fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une politique de maintenance prévisionnelle de l'outil de production industrielle.

La connaissance des différents organes d'une machine, savoir comment déterminer les fréquences prévisibles de vibration et savoir configurer une chaîne de mesures vibratoires, sont des étapes primordiales avant d'utiliser cette méthode. Le relèvement des signaux vibratoires donne l'occasion de les traiter, les analyser et les manipuler par une diversité d'idées. L'analyse vibratoire est encore un sujet actuel, de nos jours. Beaucoup de techniques d'analyse vibratoire orientées aux équipements industriels, ont été proposées par les chercheurs, surtout avec l'introduction et le développement du traitement de signal [IMM13], [FOU15], [SHAO16], [KUM16].

I.3.1 Défauts statoriques

Même si les vibrations des conducteurs d'encoches et les divers frottements qui en résultent, suite à de grandes sollicitations de la machine, accélèrent l'usure des isolants, il reste que le facteur principal de vieillissement est l'échauffement anormal de bobinages. En effet, pour les machines fonctionnant en milieu hostile, poussière et humidité viennent se déposer pour les machines fermées entre les ailettes extérieures, et pour les machines ouvertes au niveau des têtes de bobine, affaiblissant ainsi l'isolation électrique et court-circuitant ainsi les conducteurs [KLI96], [REF15].

I.3.1.1 Les courts-circuits

Comme précité, l'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses [DUV15], [BESS15].

I.3.1.1.1 Exemple : (Les décharges partielles)

Ce phénomène naturel, dû aux décharges dans les isolants entre conducteurs ou entre conducteurs et la masse, s'amplifie avec le vieillissement des isolants. Il est pratiquement imperceptible dans les isolants neufs par les moyens de mesures classiques, car son effet n'est pas discernable par rapport aux bruits de mesure. Sa présence précède l'apparition des courts-circuits entre phases ou entre phase et masse, lorsque ces décharges partielles ont suffisamment détérioré les isolants [BARM15].

Nous avons aussi les causes suivantes :

- ✓ Déconnection des attaches des enroulements ;
- ✓ Une augmentation de la température des enroulements ou de l'armature statorique ;
- ✓ courts-circuits ou contraintes de démarrage ;
- ✓ contamination due à l'humidité et à la saleté.

On peut clarifier les différents défauts possibles de court circuit par la figure (I-4).

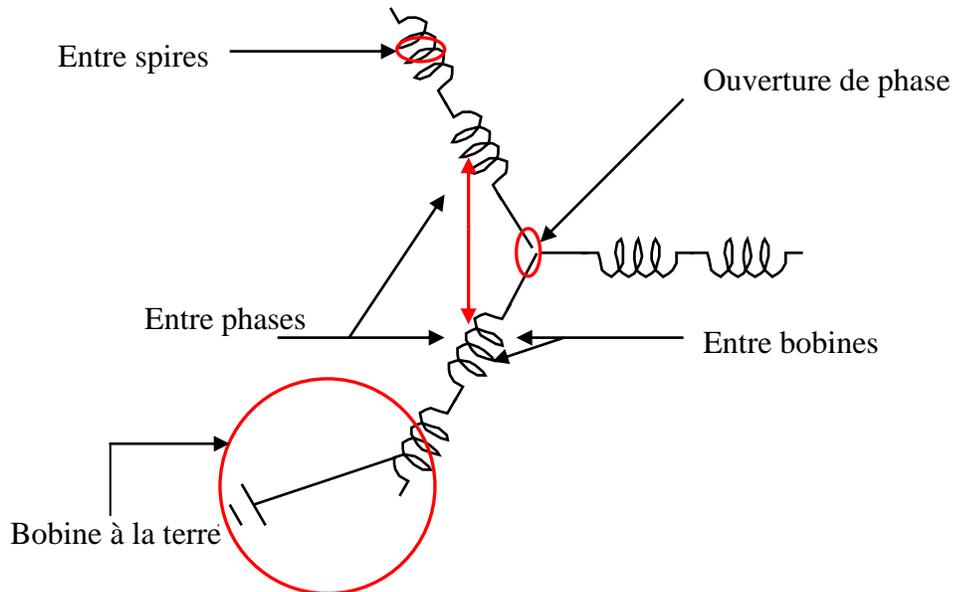


Figure I.4. Représentation des différents défauts statoriques possible.

I.3.1.1.2 Court-circuit entre phases : Un court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Cependant, un court-circuit au bobinage près du neutre où entre spires n'a pas d'effet aussi radical. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui provoque une répercussion directe sur le couple [TOL95], [BOU01]. Ce type de défauts perturbe également de manière sensible les commandes développées sur la base du modèle de Park (Hypothèse d'un modèle équilibré).

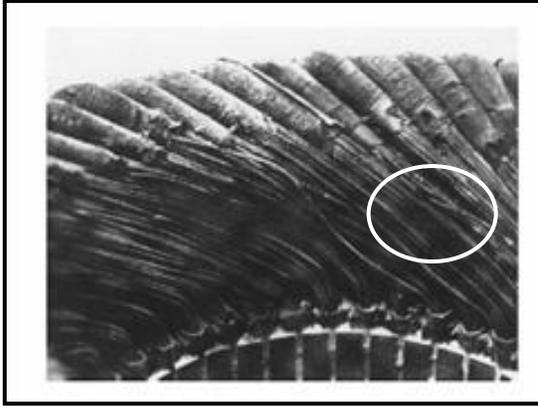


Figure I.5. Court-circuit spire-spire.

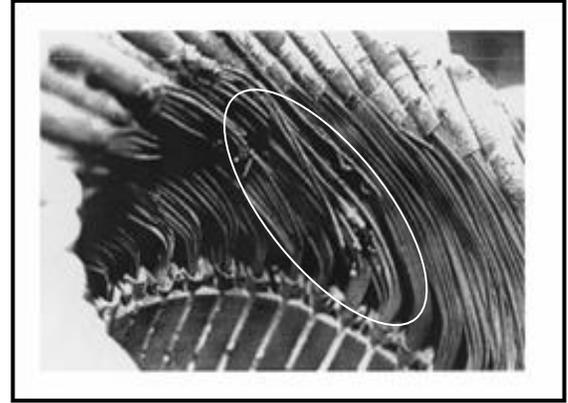


Figure I.6. Court-circuit phase-phase.

Pour déceler ces défauts, plusieurs approches ont été mises en œuvre, par exemple l'utilisation d'une bobine concentrique placée autour de l'arbre de la machine afin de capter, puis analyser le flux axial de la machine. Ce type de défauts entraîne l'apparition d'une série d'harmoniques dans le spectre du flux axial donné par [PEN94] :

$$f_{st} = f_s \cdot \left(k \pm \frac{n(1-s)}{p} \right) \quad (\text{I. 2})$$

avec $k=1, 3$ et $n=1, 2, 3 \dots (2p-1)$.

Parmi les auteurs à avoir utilisé cette technique, nous pouvons citer [GEN03], [BON92] qui montrent que certains composants fréquentiels augmentent en amplitude, lorsque un défaut de court-circuit apparaît. Cependant, ils pensent qu'il est difficile de préciser le pourcentage du défaut, car les amplitudes des composants harmoniques sont également affectées par la saturation magnétique des dents rotoriques ainsi que le déséquilibre d'alimentation [BOU01].

I.3.1.1.3 Court-circuit entre spire : Un court-circuit entre spire de même phase entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée [JOK00], [REF15], une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence, une augmentation de la température au niveau du bobinage, et de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer un deuxième court-circuit [OND06], [ZOU10]. Il faut aussi prendre en compte que des spires en court-circuit engendrent un couple résistant, dû aux courants induits par le flux d'excitation circulant et les mutuelles de la machine en fonctionnement. Ce couple résistant est une valeur à

caractériser, pour en prévoir les conséquences sur le fonctionnement, suite à la panne de la machine. Le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique, hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [STA01].

I.3.1.1.4 Circuit ouvert sur une phase : Les conséquences d'ouverture de phase sont moins graves qu'un court circuit entre spires ou entre phases. Le courant ne peut pas circuler, et ça ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de bobinage. De même, un circuit ouvert ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine.

I.3.1.1.5 Court-circuit avec le bâti (la carcasse) : Le bâti est raccordé généralement avec une masse de terre. Si le bâti n'a pas d'importance dans la sécurité, il crée les effets capacitifs ; le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement en cas court-circuit. La sécurité des personnes est donc soumise à un danger inattendu, et les dispositifs de protection sont nécessaires (disjoncteurs de sécurité).

I.3.1.2 Les défauts combinés : CC-encoches

Les défauts répartis sur certaines ou toutes les dents statorique : La circonférence intérieure de stator porte un nombre fixé par le constructeur, la qualité de matière du circuit magnétique, type de charge et la vitesse du glissement du bobinage par la force de Laplace exercée sur le faisceau de spires. Tous ces effets aux dents statorique, impose un phénomène local, caractérisé par la déformation des lignes de champ dans la surface d'entrefer. Le problème réside donc, dans une zone d'échange *critique*, qui assure la transformation d'une énergie électrique à une énergie mécanique, et vice versa.

Les défauts de court-circuit (CC) au stator peuvent être distribués aux autres points, comme les encoches statoriques. L'origine du problème électrique est un court-circuit, mais, il peut dépasser le bobinage aux dents (circuit magnétique). La réparation du problème ne réside pas au changement du bobinage, puisque la nouvelle structure ou la forme d'encoche ne prend pas sa forme originale de l'état sain.

Ces problèmes engendrent principalement des défauts d'isolation, qui à leurs tours, provoquent d'autres défauts inattendus dans la machine asynchrone.

La figure (I-7) représente deux types de court-circuit, à gauche un CC entre spires, au centre une extension de défaut de CC entre spires aux encoches (dents).



Figure I.7. Détérioration d'isolation : CC entre spires (à gauche), extension aux encoches (au centre) et une extension à la profondeur des encoches (à droite).

I.3.2 Défauts rotoriques

Malgré ses qualités, la machine asynchrone, peut présenter des défauts structurels parmi lesquels, la cassure totale ou partielle de barres ou des anneaux de court-circuit.

I.3.2.1 Défauts de barres

On distingue deux principaux types de cages rotoriques, les cages coulées et les cages fabriquées. Les rotors fabriqués sont en général, employés dans les grosses machines ou les machines à applications spéciales. Les rotors coulés, qui n'étaient destinés qu'aux petits moteurs, sont actuellement employés même pour des moteurs pouvant atteindre les 3 MW, et cela grâce au développement remarquable des techniques de moulage. Cependant, ceux-ci présentent l'inconvénient de ne pouvoir être réparés, suite à une cassure partielle ou bien totale de barres [VIC05], [SAI17-1].

Suivant la puissance du moteur, la cage d'écureuil à des barres en cuivre ou en aluminium. Il peut donc exister ou non des courants inter-barres.

La détection des barres cassées et de rupture des anneaux de court-circuit du rotor, dans les moteurs asynchrones à cage d'écureuil par l'outil paramétrique, est basée sur l'hypothèse que

la résistance apparente du rotor d'un moteur augmente quand une barre ou une portion d'anneau de court-circuit du rotor se casse [THO92], [BEL00], [ZOU05]. Ici, la résistance apparente du rotor est celle qui est située dans le modèle électrique équilibré par phase d'un moteur asynchrone à cage d'écurueil. Pour détecter les cassures des barres et des portions d'anneau de court-circuit de la cage du rotor, des mesures de courant du stator, de tension du stator, la fréquence d'excitation du stator, et la vitesse du rotor sont effectuées. Ces mesures sont traitées par un estimateur de moindres carrés récursifs pour évaluer les états et les paramètres du moteur. En particulier, on estime la résistance apparente du rotor et on la compare avec sa valeur nominale pour détecter les défauts.

Plusieurs méthodes de diagnostics de défauts rotoriques par le traitement de signal ont été le siège d'études de plusieurs auteurs [NAN00], [BEN98], [BEN03], [ZOU11] et [SAH15] qui utilisent l'analyse spectrale de la signature du courant moteur, pour la détection des défauts dans les barres rotoriques. Les défauts apparaissent aux fréquences selon la formule suivante:

$$f_{cb} = (1 \pm 2ks) \cdot f_s \quad (\text{I. 3})$$

La composante $(1-2s)f_s$ du courant interagit avec le fondamental du flux de l'entrefer et produit des ondulations dans la vitesse à la fréquence $2sf_s$, ce qui provoque une augmentation de la composante du courant aux fréquences : $f_{cb} = (1 \pm 2ks)f_s$.

L'inertie de la charge affecte également l'amplitude du courant à ces fréquences, et d'autres composantes spectrales sont observées pour [DEL82]:

$$f_{cb} = \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1-s) \pm s \right] \cdot f_s \quad (\text{I. 4})$$

D'autres travaux sont présentés concernant la détection des barres rotoriques cassées par l'utilisation des signaux de tensions et de courants statoriques destinés à l'estimation simultanée de la vitesse et de la résistance rotorique. Cette dernière est comparée à sa valeur nominale pour détecter les barres cassées en tenant compte de l'influence de la température [NAI00].

Une autre référence [CAM86], a mentionné l'existence de deux défauts rotoriques :

Le premier est l'oscillation de l'arbre le long de l'entrefer, qui cause la variation de la densité du flux dans ce dernier, l'oscillation produit alors des harmoniques de courant statorique pour des fréquences prédites par :

$$f_{osc} = \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1-s) \pm 1 \right] \cdot f_s \quad (\text{I. 5})$$

Le deuxième défaut est l'asymétrie du rotor qui perturbe la densité du flux dans l'entrefer [FIL98], les fréquences des composantes spectrales de la densité du flux dans l'entrefer sont données par : $f_{ra} = f_s(k(I-s)/p \pm s)$.

avec $k=1, 5, 7, \dots$

Dans cet axe, de nombreux articles traitent ce genre de défaut, et nous rappelons parmi ces articles: [FAI07], [KAR15], [BENO15] et [ISHK15].

I.3.2.2 Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux (figure I-8).

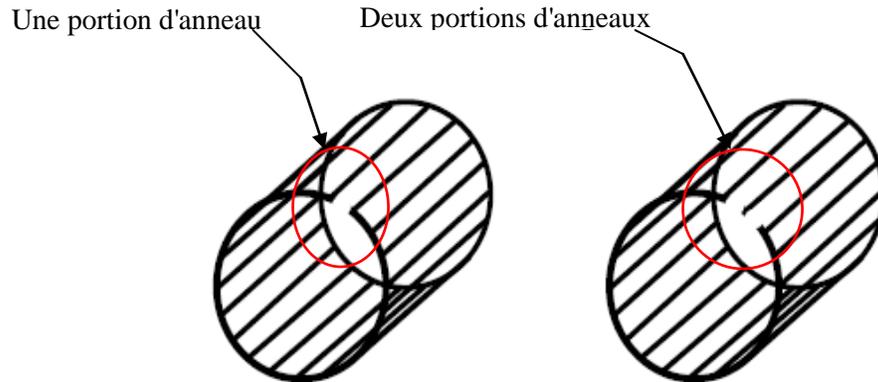


Figure I.8. Rupture d'une et deux portions adjacentes d'anneau de court-circuit.

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité, ...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

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

Comme la cassure de barre, nous pouvons rappeler que [RIT94], [TOL95], [ZOU14], ont fait des recherches importantes pour détecter la rupture d'une portion d'anneau ($f_{ca} = (1 \pm 2ks).f_s$).

L'analyse vibratoire discute les signatures qui apparaissent au niveau de signaux de vibration, et comme les autres défauts, la conséquence essentielle est représentée par l'asymétrie du champ rotorique dû aux causes suivantes:

- Barres rotoriques cassées, fissurées, desserrées, ...etc. ;
- Tôles ou spires de rotor en court-circuit ou défaut résistif sur les liaisons barres-anneaux ;
- Anneaux de court-circuit fissurés ou cassés.

Ces défauts peuvent être détectés dans le spectre vibratoire, par la mise en évidence de:

- Répartition asymétrique des bandes latérales espacées de deux fois la fréquence d'alimentation, $f_{défaut}=2.f_s$.
- Fréquences d'encoches f_{bar} (ou de barres) visibles, c-à-d. $f_{bar} = f_r \times n_b$.
- Fréquence principale d'alimentation avec bandes latérales espacées de la fréquence de glissement, avec $f_{glissement} = 2f_s/(p - fr)$.

I.3.2.3 Dissymétrie du rotor (excentricité)

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations du couple (décalage entre le centre du stator et le centre du rotor, figure (I-9) [ISHK15], [BIN15]. Ce phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage).

Celui-ci provoque la variation de l'entrefer dans le moteur, une répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques.

Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple global non constant [BOU01]. Quand l'excentricité devient grande, les forces radiales résultantes causées par le stator avec la bande de frottement du rotor, conduisent à des dommages du stator et du rotor.

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries d'ordre naturel. Celles-ci relèvent de trois catégories d'excentricité de l'entrefer [SMI96], [DOR97] ; à savoir :

- **L'excentricité statique** : correspond au cas où le centre de rotation de l'arbre du rotor n'est pas celui du centre géométrique du stator [RAZ02], [BES16-3].

Dans ce type d'excentricité, la position de l'épaisseur minimale de l'entrefer est fixe dans l'espace. Elle peut être causée par l'ovalité de la partie intérieure du stator ou encore par le mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction [BAB14].

- **L'excentricité dynamique** : correspond à un centre de rotation du rotor diffère du centre géométrique du stator mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator [RAZ02], [BES16-2].

Dans ce type d'excentricité, le centre du rotor n'est pas en son centre de rotation et de ce fait la position d'épaisseur minimale d'entrefer tourne avec le rotor. Parmi les causes de ce type d'excentricité, on cite : la flexion de l'arbre du rotor, l'usure ou le défaut d'alignement du roulement [BAB14].

- **L'excentricité mixte** : est la plus fréquente, elle fait la combinaison des deux excentricités précédemment citées.

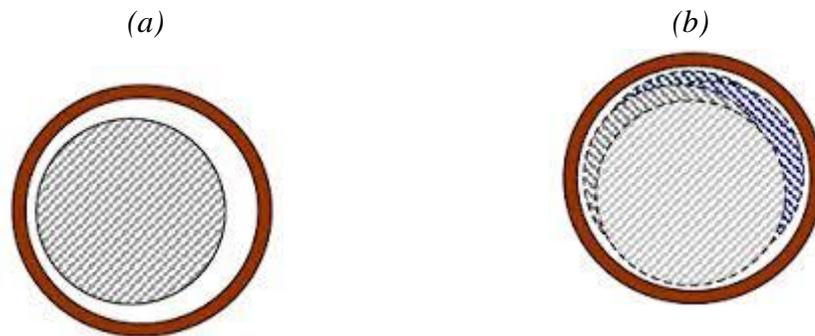


Figure I.9. Type d'excentricité, (a) : statique, (b) : dynamique.

Le rotor peut être le siège d'autres défauts tels que l'excentricité, il est nécessaire de signaler ici l'*excentricité inclinée*, cette dernière assure un entrefer variable spatialement et constant dans chaque point bien déterminé, c.-à-d. le rotor ne porte qu'une seule position malgré son inclinaison. Généralement, les effets et les dégâts dus à l'excentricité ont été l'objet d'études de plusieurs travaux [DOR97], [CAM86], [FAI16].

Deux méthodes présentent la détection de défauts qui utilisent la signature du courant moteur [BEN99], [OBA03], [BEN99], [LU04], [BEN99], [VER16] :

La première, par le contrôle du comportement du courant autour des fréquences d'encoches, et les fréquences associées sont :

$$f_{slot+enc} = f_s [(k.Z \pm n_d)(1 - s) / p] \pm n_\omega \quad (I. 6)$$

où $k=1, 2, 3, \dots$; $m=1, 2, 3$; p : nombre de paires de pôles ;

Z : nombre d'encoches rotoriques, s : glissement ;

n_{ω} : ordre des harmoniques de la FMM statorique.

La seconde, par le contrôle du comportement du courant autour du fondamental de la fréquence d'alimentation et ces fréquences sont données par : $f_{exc}=f_s[1 \pm m(1-g)/p]$.

Parmi ceux qui étudient les défauts d'excentricité, on cite [NAN01], [NAN02], [GHO06] et autres. Les chercheurs montrent la présence de certains harmoniques dans le spectre du courant de ligne sous un défaut d'excentricité, les fréquences additionnelles qui apparaissent dans le spectre du courant statorique sont [CAM86] :

$$f_{exc} = \left[\left(\frac{kn_b \pm n_d}{p} \right) (1-s) \pm n_{os} \right] \cdot f_s \quad (\text{I. 7})$$

Avec k un entier et $n_{os}=1, 2, 3, \dots$ est l'ordre d'harmonique du temps, n_b est le nombre de barres rotorique, n_d est égal à 0 pour l'excentricité statique et 1, 2, 3, ... pour l'excentricité dynamique.

Cependant, il a été démontré par Nandi [NAN98] qu'une seule combinaison particulière, d'une machine de paires de pôles p et un nombre d'encoches du rotor Q_2 , donnera lieu à des composants importants liés uniquement à l'excentricité statique ou seulement à l'excentricité dynamique.

Cette relation pour une machine triphasée est donnée par :

$$Q_2 = 2p[3(m \pm q) \pm r] \pm k \quad (\text{I. 8})$$

avec, $m \pm q=0, 1, 2, 3$, $k=1$ et $r=0$ ou 1.

Une autre série d'harmoniques liées à la coexistence des deux types d'excentricité en même temps, apparaît de part et d'autre de la fondamentale, à des fréquences données par [THO94], [DOR97], [OBA00], [NAN98]:

$$f_{mix} = |f_s \pm kf_r| \quad (\text{I. 9})$$

Tel que k est un entier positif.

Il n'est pas besoin avec cette expression de connaître les paramètres de la machine comme le nombre de barres n_b , et ce qui la rend parfois avantageuse.

La présence de l'excentricité se manifeste donc dans une autre distribution de champ (flux) ou en anglais " unbalanced magnetic pull (UMP) ", donc cela donne une attraction magnétique, et pour cette raison, on trouve beaucoup de travaux qui ont traité l'essentiel de cet axe [BRA68], [DOR95], [DOR97], [DI15], [DOR15], [CHU16], [ZHO16].

Nous distinguons aussi, [BAN01], [FAI02], [MAR03], [JOK05], [HAL13], [FIR16] et autres qui utilisent la méthode des éléments finis pour détecter ce type de défauts.

On peut consulter aussi les travaux de [AND08], [SAH08], [FIR13], [ZAA14], [FIR16] ...etc.

Du point de vue de la méthode d'analyse de vibration, ce défaut est créé par l'asymétrie du champ de moteurs électriques, mais aussi il est causé par d'autres défauts comme l'armature du stator. Les fréquences signalées par les signaux de vibration sont [BAT80], [NAR13]:

- Deux fois la fréquence d'alimentation, $f_{\text{défaut}}=2.f_s$, ($f_s=50$ Hz).
- Pas de bandes latérales visibles à $2.f_s$.
- Pour une machines bi-polaires: Présence de la deuxième harmonique de la vitesse de rotation f_r ($2.f_r$).

Les défauts les plus répandus à ces fréquences sont non seulement l'excentricité, mais aussi les suivants [FIN99]:

- Excentricité statique, entrefer non constant sans défaut d'angle (concentrique uniquement) ;
- Déséquilibre de phase ;
- Défaut d'isolement ;
- Spires en court-circuit.

I.3.3 Défauts de roulement

Les défauts de roulement se manifestent comme des défauts d'asymétrie au rotor, qui sont usuellement rangés dans la catégorie des défauts relatifs à l'excentricité [KER92], [SCH95], [BES15-1]. Un défaut de roulement se manifeste par la répartition continue du contact défectueux [BARK00], [OCA01], [OJA15], [SID15], [YUA15], [SAI17-2]. Le type de roulement dans notre étude est les roulements à billes qui sont constitués de quatre éléments : une *bague externe*, une *bague interne* et une rangée de *billes* gardées par une *cage*, ainsi que de la graisse pour un mouvement souple (lubrification). La figure (I-10) illustre les différents éléments constitutifs le roulement.

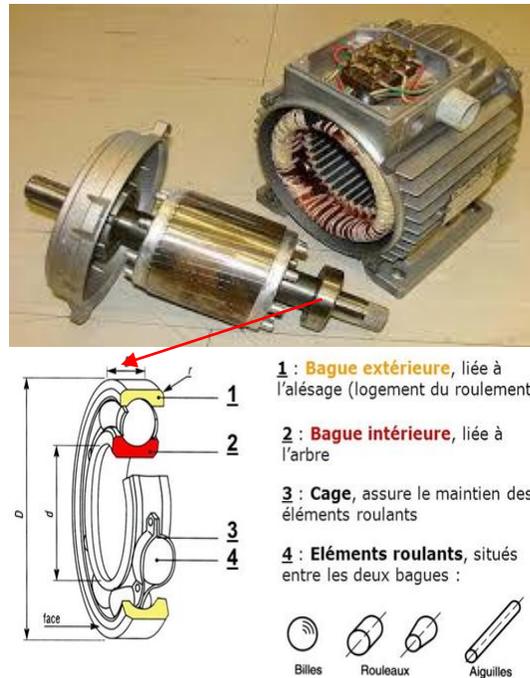


Figure I. 10. Éléments constitutifs d'un roulement à billes.

Le roulement de notre machine a une bague extérieure fixe en contact avec le stator, et une bague intérieure tournante en contact avec le rotor. Par ailleurs, les billes sont en contact avec les deux pistes des deux bagues.

La durée de vie normale d'un roulement sous une charge est déterminée par la durée de l'usage et la fatigue des surfaces des éléments du roulement. La durée de vie a la notation L_{10} et se compte par un nombre d'heures. L_{10} est calculée comme suit [PHI09]:

$$L_{10} = L_h = \frac{\left(\frac{C_R}{P_R}\right) \cdot 10^6}{60 \cdot f_r} \quad [h] \quad (\text{I. 10})$$

avec, C_R est une constante caractéristique de roulement, P_R : c'est la charge équivalente sur le roulement.

Les défauts qui peuvent affecter le roulement sont nombreux, on peut décrire dans cette partie, certains de ces défauts:

I.3.3.1 L'usure

Le glissement des différents éléments, progresse avec l'introduction de particules contaminant au montage ou pendant le fonctionnement. Il est vrai que l'usure d'un roulement à billes peut être une source de contamination.

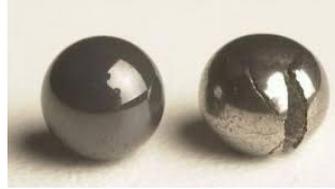


Figure I. 11. Bille saine et une autre défaillante.

I.3.3.2 Le piquetage

Ce phénomène important est créé par des arcs électriques qui traversent le roulement, ce courant se traduit par des points de fusions, des stries circumférentielles, des micro-trous ou des soudures. Le problème va donc s'aggraver en présence d'un refroidissement rapide, c.-à-d. l'élément visé peut être exposé aux fissurations [BES16-4].



Figure I. 12. Fissure (cassure) et piquetage dans la bague extérieure.

I.3.3.3 Le grippage

Le frottement métal-métal produit des échauffements, ces derniers font des microsoudures. Le manque de lubrifiant, résulte le grippage. Selon le type, les dimensions et l'application du roulement, la lubrification initiale est une opération indispensable, en particulier quand il s'agit de roulements à faible bruit, haute précision ou de roulements de broche à hautes vitesses. La lubrification des roulements à l'aide de graisses ou d'huiles empêchent tout contact métallique direct entre les composants et la cage. La lubrification empêche par ailleurs les infiltrations de corps étrangers dans les roulements et protège ces derniers contre la corrosion.

I.3.3.4 Jeu de roulement

Comme indiqué sur la figure ci-dessous, on peut distinguer plusieurs positions des vides ; bagues intérieure ou extérieure, billes ou cage, le jeu est très dangereux puisqu'il aggrave l'état de roulement rapidement (ex. écaillage) et fait une dégradation des contacts mécaniques surtout dans un milieu pollué.

Le jeu radial ou axial au niveau de roulement peut provoquer l'usure (Fig. I-13 et I-14).

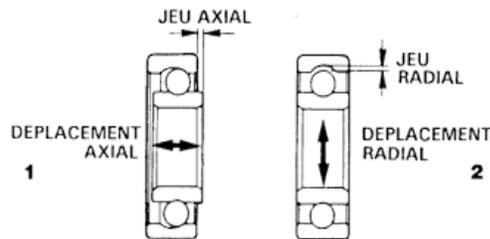


Figure I. 13. Jeu de roulement (axial et radial).

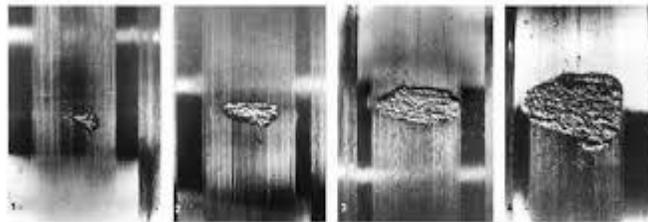


Figure I. 14. Progression d'un écaillage.

I.3.3.5 La corrosion

Des réactions chimiques à l'aide des paramètres atmosphériques d'humidité ou des acides dans le roulement. Les composants oxydés modifient la qualité de lubrifiant, ce qui conduit à l'apparition de rouille.

I.3.3.6 Les contraintes mécaniques

Lorsqu'un roulement est placé dans une machine, il subit des contraintes mécaniques radiales et axiales. Une charge insupportable par le roulement conduit à des dégâts inattendus.

I.3.3.7 La lubrification

Le choix du type de lubrification dépend plus de l'application prévue que du type de roulement. Dans de nombreuses applications, le lubrifiant a pour fonction principale, de réduire les frottements et l'usure, l'effet des particules et le bruit. Les particules indésirables peuvent endommager les surfaces et conduire à la dégradation rapide des éléments machines.

La présence de grains de sable (pollution) dans le lubrifiant provoque des pertes de cotes notables aux premiers cycles de fonctionnement.

I.4 SYNTHÈSE DES DÉFAUTS DE ROULEMENT

Les défauts dans les roulements à billes, sont l'une des raisons principales des défaillances des entraînements électriques et la réduction de leur durée de vie [BES15-2], [BES16-1]. L'analyse et le traitement des grandeurs mesurables par l'analyse vibratoire ou par l'analyse des courants statoriques occupe une place importante pour diagnostiquer les défauts des roulements [BES15-3]. Les signaux vibratoires à analyser permettent de détecter la présence du défaut à partir d'indications bien précises. L'analyse fréquentielle est l'une des méthodes les plus utilisées pour l'identification de l'élément défaillant. Le roulement a des fréquences caractéristiques générées par le défaut [SCH94], [STAC04-1], [STAC04-2], [FRO15], [PRU15], [BOUD16]. En effet, des quatre éléments constitutifs du roulement, on trouve quatre fréquences caractéristiques. Ces fréquences peuvent être fournies par le constructeur ou par une estimation théorique d'après une considération cinématique [VAS93], [KLI97], ou par des logiciels spécialisés.

I.4.1 Analyse de fréquences des défauts de roulements

On trouve pour les formules des fréquences caractéristiques des défauts de roulement des formules théoriques et autres approximatives, ces formules sont expliquées en détail dans cette partie.

I.4.1.1 Equation théorique (analytique)

Les fréquences analytiques (théoriques) et caractéristiques qui se trouvent dans le contenu spectral d'un signal de vibration sont [VAS93]:

- Défaut de la bague extérieure :

$$f_{be} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} \left(1 - \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \quad (\text{I. 11})$$

- Défaut de la bague intérieure :

$$f_{bi} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} \left(1 + \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \quad (\text{I. 12})$$

- Défaut de la cage :

$$f_c = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \quad (\text{I. 13})$$

- Défaut de la bille :

$$f_{bille} = \frac{f_r}{2} \frac{D_m}{D_b} \left(1 - \left(\frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right)^2 \right) \quad (\text{I. 14})$$

– f_{be} : la fréquence caractéristique de la bague extérieure ;

– f_{bi} : la fréquence caractéristique de la bague interne ;

– f_r : la fréquence de rotation de la cage ;

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

– N_b : le nombre de billes ;

– D_b : le diamètre de la bille ;

– D_m : le diamètre du centre des billes (diamètre moyen = $D_m = \frac{D_{bag-ext} + D_{bag-int}}{2}$);

– α : l'angle de contact (le roulement oblique possède les valeurs de $\alpha=15^0$, 25^0 ou 40^0 et pour un roulement à gorge profonde, il présente une charge purement radiale $\alpha=0^0$).

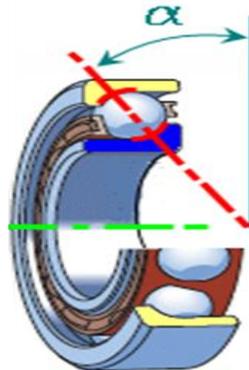


Figure I. 15. Angle de contact d'un roulement oblique.

Les autres relations entre ces fréquences sont les suivantes :

$$f_{be} + f_{bi} = N_b \cdot f_r \text{ et } f_{be} = N_b \cdot f_c$$

Cependant, elles ne sont connues que pour un roulement neuf géométriquement parfait et pour une vitesse de rotation donnée de la machine. Dûs à certains facteurs comme le vieillissement des roulements et les fluctuations de la vitesse de rotation de la machine, les fréquences caractéristiques actuelles peuvent *dévier* de celles théoriquement estimées [TAY94]. De plus, la présence des fréquences caractéristiques dépend de plusieurs facteurs comme : le type du défaut lui-même et la répartition de la charge [ONG00], [OCA01], [BES15-3], [BES16-4]. Parfois, le défaut peut aussi persister sans générer la fréquence caractéristique associée [HAR14]. On cite maintenant d'autres règles intéressantes qui expliquent le déplacement ou l'approximation des fréquences caractéristiques du défaut de roulement.

I.4.1.2 Modulation de la fréquence du signal

En tenant compte de la modulation du signal par fréquence f_m , les équations des fréquences caractéristiques sont modifiées ainsi [PHI09] :

- Défaut sur la bague intérieure :

$$f_{bi-Mod} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} \left(1 + \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \pm f_m \quad (\text{I. 15})$$

- Défaut sur la bille :

$$f_{bille-Mod} = \frac{f_r}{2} \frac{D_m}{D_b} \left(1 - \left(\frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right)^2 \right) \pm f_m \quad (\text{I. 16})$$

Cette modulation du signal résulte des imperfections de construction, de montage ou de fonctionnement.

I.4.1.3 Règles empiriques

Schoen [SCH95] a montré que les fréquences caractéristiques de vibration peuvent être rapprochées pour la plupart des roulements en prenant N_b entre 6 et 12 billes par les formules suivantes:

- Bague extérieure :

$$f_{be} = 0,4 \cdot N_b \cdot f_r \quad (\text{I. 17})$$

- Bague intérieure :

$$f_{bi} = 0,6.N_b.f_r \quad (\text{I. 18})$$

- Cage :

$$f_c = 0,4.f_r \quad (\text{I. 19})$$

I.4.1.4 Equations réelles déduites de l'expérimentation

Ces équations sont basées sur l'expérimentation de plus de 2000 roulements de différents types [SCHI89] :

▪ Bague extérieure :

$$f_{be} = f_r \cdot \left(0,5.N_b - 1,2 \right) \quad (\text{I. 20})$$

▪ Bague intérieure :

$$f_{bi} = f_r \cdot \left(0,5.N_b + 1,2 \right) \quad (\text{I. 21})$$

▪ Cage :

$$f_c = f_r \cdot \left(0,5 - \frac{1,2}{N_b} \right) \quad (\text{I. 22})$$

▪ Bille :

$$f_{bille} = f_r \cdot \left(0,2.N_b - \frac{1,2}{N_b} \right) \quad (\text{I. 23})$$

Il existe une dispersion [ARQ99] entre les fréquences des défauts des roulements calculés avec les formules théoriques et expérimentales développées.

I.4.2 Confirmation des règles et équations des fréquences

Notre travail est focalisé sur la détection précise du défaut. Pour cela, tout écart ou toute fausse information conduit à des résultats indiscutables. Pour éviter au départ tout problème à venir en cours du diagnostic des machines asynchrones, nous voulons faire une vérification des formules (théoriques et expérimentales) avec notre roulement. Le roulement monté à la machine

asynchrone est de la série 6206 à gorge profonde, c.-à-d. α presque 0^0 pour une charge radiale, et les dimensions dont nous avons besoin sont:

$D_b=9,5$ mm, $D_m=46$ mm, $N_b=9$ billes.

I.4.2.1 Confirmation des règles empiriques

D'après le calcul, on trouve :

✓ Bague extérieure :

$$f_{be} = 0,3967 \cdot N_b \cdot f_r \approx 0,4 \cdot N_b \cdot f_r$$

✓ Bague intérieure :

$$f_{bi} = 0,60326 \cdot N_b \cdot f_r \approx 0,6 \cdot N_b \cdot f_r$$

✓ Cage :

$$f_c = 0,3967 \cdot f_r \approx 0,4 \cdot f_r$$

✓ Bille :

$$f_{bille} = 2,31779 \cdot f_r \approx 2,32 \cdot f_r$$

I.4.2.2 Confirmation des équations expérimentales

De la même façon, en remplaçant les valeurs de dimensions, on trouve :

▪ Bague extérieure :

$$f_{be} = N_b \cdot f_r \cdot \left(0,5 - \frac{1,2}{N_b} \right) = 0,3666 \cdot N_b \cdot f_r \approx 0,37 \cdot N_b \cdot f_r \neq 0,4 \cdot N_b \cdot f_r$$

▪ Bague intérieure :

$$f_{bi} = N_b \cdot f_r \cdot \left(0,5 + \frac{1,2}{N_b} \right) = 0,6333 \cdot N_b \cdot f_r \approx 0,64 \cdot N_b \cdot f_r \neq 0,6 \cdot N_b \cdot f_r$$

▪ Cage :

$$f_c = f_r \cdot \left(0,5 - \frac{1,2}{N_b} \right) = 0,3666 \cdot f_r \approx 0,37 \cdot f_r \neq 0,4 \cdot f_r$$

▪ Bille :

$$f_{bille} = f_r \cdot \left(0,2 \cdot N_b - \frac{1,2}{N_b} \right) = 1,666 \cdot f_f \approx 1,67 \cdot f_f \neq 2,32 \cdot f_f$$

D'après ce calcul, nous confirmons qu'il y a une dispersion des fréquences entre les valeurs analytiques et expérimentales proposées. Il est clair que cette dispersion peut nous conduire à une divergence au niveau des résultats. La différence a été remarquée pour toutes les fréquences, et précisément à la fréquence de la *bille*. Tout écart, même infime, influe sur les placements des fréquences caractéristiques. D'autant plus que la machine a une vitesse pratiquement non constante, c.-à-d. un glissement qui se déplace. Pour cette raison, la fréquence de rotation du rotor f_r sera également changée, cette dernière fait donc le changement des fréquences caractéristiques de roulement à cause de l'intégration de celle-ci aux formules des fréquences.

Une autre notation, plus utilisée dans la littérature pour les fréquences caractéristiques de roulement, est la suivante :

- **BPFO** : la fréquence de passage des billes (ou rouleaux) sur la couronne externe pour un défaut sur la couronne externe (**B**all **P**ass **F**requency of **O**uter ring);
- **BPMI** : la fréquence de passage des billes (ou rouleaux) sur la couronne interne pour un défaut sur la couronne interne (**B**all **P**ass **F**requency of **I**nnner ring);
- **BSF**: la fréquence de rotation des billes (ou rouleaux) pour un défaut sur l'élément roulant (**B**all **S**pin **F**requency) ;
- **FTF** : la fréquence de cage pour un défaut de cage (**F**undamental **T**rain **F**requency).

Plusieurs chercheurs ont tracé pour objectif, la détection de défauts de roulements dans la machine asynchrone par l'analyse des signatures de courant statorique (ASCS ou MCSA en Anglais) [LN03], [BES16-2], [SAI17-2], [DON16]. Les défauts de roulements entraînent des oscillations du couple de charge à des fréquences caractéristiques du roulement [KLI97]. A cause de ces oscillations du couple de charge, on trouve des modulations aux courants de phase. Ces modulations de phase se manifestent dans le domaine fréquentiel par l'apparition d'une série d'harmoniques dans le spectre du courant qui sont utilisées pour la détection des défauts de roulements. Les fréquences caractéristiques du défaut de roulement dans le spectre du courant, sont définies par la formule suivante :

$$f_{caract} = |f_s \pm k \cdot f_v| \quad (\text{I. 24})$$

où, f_v est la fréquence caractéristique de vibration ($f_v = f_{be}, f_{bi}, f_c$ ou f_{bille}) et $k=1, 2, 3, \dots$ etc.

Avant d'étudier les détails de diagnostic des différents défauts, nous proposons de résumer toutes les fréquences caractéristiques de chaque défaut au tableau (I.1).

Tableau I.1. Synthèse des signatures des défauts.

Type de défaut	Signaux et signatures	
	Courants statoriques	Vibrations
Cassure de barres	$f_{cb} = (1 \pm 2kg).f_s$ ou $f_{cb} = \left[\frac{k}{p}(1-s) \pm s \right].f_s$ et ($k/p=1,5,7,11,\dots$)	$f_r \pm 2.s.f_s$ ou $\left[\frac{(1-s)}{p} \pm 2 \right].f_s$
Excentricité: - Statique - Dynamique - Mixte	Statique : $f_{ES} = \left[\left(\frac{kn_b}{p} \right) (1-s) \pm n_{os} \right].f_s$ Dynamique : $f_{ED} = \left[\left(\frac{kn_b \pm n_d}{p} \right) (1-s) \pm n_{os} \right].f_s$ Mixte : $f_{mix} = f_s \pm kf_r $	Statique : $2.f_s$ ou $k.f_r \pm f_s$ Dynamique : $f_r \pm 2.s.f_s$ ou f_r
Roulement : - Bague extérieure - Bague intérieure - Cage - Bille	Bague extérieure : $f_{c-be} = f_s \pm k.f_{be}$ Bague intérieure : $f_{c-bi} = f_s \pm k.f_{bi}$ Cage : $f_{c-cage} = f_s \pm k.f_{cage}$ Bille : $f_{c-bille} = f_s \pm k.f_{bille}$	Bague extérieure : $f_{be-vib} = k.f_{be} = 0,4.k.N_b.f_r$ Bague intérieure : $f_{bi-vib} = k.f_{bi} = 0,6.k.N_b.f_r$ ou $f_{bi-vib} = f_{bi} \pm k.f_r$ Cage : $f_{cage-vib} = k.f_{cage} = 0,4.k.f_r$ Bille : $f_{bille-vib} = k.f_{bille} = 2,32.k.f_f$
Désalignement	$f_{désal} = \left[1 \pm \frac{k.(1-s)}{p} \right].f_s$	f_r et $2.f_r$

I.5 LA SELECTION DES DEFAUTS

Les critères de sélection des défauts étudiés se basent sur les causes suivantes :

- 1- Pourcentage et statistique d'occurrence importante;
- 2- Phénomène électromagnétique directement ou indirectement touché ;
- 3- L'impact sur le rendement et la puissance de la machine;
- 4- Conséquences du défaut sur la machine, les équipements, l'environnement et l'être humain ;
- 5- Objectif de notre application ;
- 6- Multi-symptômes du défaut;
- 7- La mise au point de modèle en présence du défaut.

D'après ces critères, nous allons retenir les défauts suivants :

- Défaut de cassure de barres ;
- Défaut d'excentricité statique, dynamique et mixte ;
- Défaut de roulement (bague extérieure, bague intérieure).

I.6 LE CHOIX DES METHODES DE DIAGNOSTIC

Les points essentiels de la sélection des méthodes étudiées sont les suivants :

- 1- Statistique d'utilisation (d'après la littérature) ;
- 2- Réaction du défaut aux grandeurs exploitées ;
- 3- Savoir utiliser les applications de chaque technique ;
- 4- Connaissance, compréhension, compétence et possibilité de développement des méthodes;
- 5- Etude de la correspondance des méthodes avec le modèle proposé ;
- 6- Intérêt d'aboutir à un choix judicieux ;
- 7- Contribution au diagnostic des machines électriques.

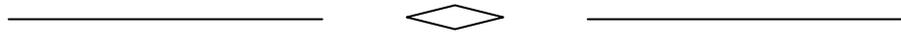
D'après ces points, nous allons mettre plus particulièrement la lumière sur les méthodes de diagnostic suivantes :

- Analyse des signatures de courant statorique en utilisant la FFT « ASCS-FFT ou MCSA-FFT » ;

- Analyse des signatures de courant statorique par la transformée en ondelettes discrète « ASCS-TOD ou MCSA-DWT » ;
- Analyse des signaux vibratoires (analyse vibratoire).

I.7 CONCLUSION

Dans ce premier chapitre, nous nous sommes intéressés à répertorier (synthèse bibliographique) les principales défaillances qui peuvent affecter les différentes parties de la machine asynchrone. Pour mieux comprendre les phénomènes affectés par les défauts, une analyse complète sera réalisée dans le chapitre suivant qui se base sur l'analyse du contenu spectral du courant statorique de la MAS (MCSA-FFT) sous le défaut de la cassure des barres et le défaut d'excentricité rotorique.



CHAPITRE II

Analyse des défauts rotoriques par la méthode de la MCSA

II.1 INTRODUCTION

Les défauts qui apparaissent dans les machines électriques ont des causes variées. La rupture des barres dans les moteurs a fait l'objet de nombreux travaux. D'autres recherches ont suivi dans la même voie, où ont été étudiées dans le diagnostic d'autres défauts de la machine (désalignement entre la machine et la charge, les courts circuits statoriques, usure des paliers,...). L'excentricité est l'une des principales causes de défaillance des entraînements électriques. L'apparition de l'excentricité crée des vibrations :

- elles sont à l'origine d'une partie du bruit rayonné par cette machine et sont donc indésirables pour les utilisateurs situés à leur proximité ;
- elles peuvent être transmises aux structures avoisinantes et accélèrent la détérioration ou le vieillissement de la machine électrique ;
- elles peuvent également endommager les machines tournantes elles-mêmes ;
- elles sont considérées comme une source de dangers écologique et économique.

Il est certain que la non uniformité de l'entrefer est causée par l'excentricité ; cette dernière est due dans la plupart des cas à un défaut de roulement.

Les machines électriques, particulièrement les machines asynchrones, jouent de nos jours un rôle important dans toutes les applications industrielles. L'assurance de la disponibilité et la sûreté de fonctionnement de celles-ci sont fondamentales. Il est donc nécessaire de développer des systèmes, permettant de surveiller et de diagnostiquer l'état de santé de ces dispositifs.

La méthode d'analyse de signature du courant statorique (ASCS) ou du courant de moteur (ASCM) sous l'abréviation Anglaise MCSA est la plus utilisées.

Dans ce chapitre, nous allons essayer d'exploiter les résultats expérimentaux des machines défectueuses, ayant pour objectif d'apporter un bon diagnostic en utilisant la méthode de MCSA.

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

II.2 LA METHODE DE MCSA

Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressant, car il est facile à mesurer et nous permet de détecter les défauts électriques, y compris les défauts purement mécaniques [KLI92], [SCH95], [BEN99], [THO01], [BES15-

2]. Cette méthode qui est connue sous le nom "Motor Current Signature Analysis" (MCSA), se base sur les phénomènes électromagnétiques qui se transforment, par influence à une information dans le courant statorique. Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique par :

- ✓ L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux paramètres physiques de la machine (nombre de barres rotoriques et nombre des paires de pôles).
- ✓ La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présents dans le spectre du courant. La surveillance via le courant statorique, nécessite une bonne connaissance des défauts et de leurs signatures. Elles sont utilisées pour le moment dans le contexte de machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquences caractéristiques de défauts [MER06].

Une analyse spectrale du courant statorique (à l'aide de la transformée de Fourier rapide 'FFT') a permis de mettre en évidence, la présence d'harmoniques caractérisant les défauts de la MAS [BES07], [BES15-2], [BES16-2], [BES16-3], [BES16-4].

Plusieurs techniques peuvent traiter le signal du courant statorique afin d'extraire un ensemble d'informations en se basant sur la signature de celles-ci.

Notre objectif est de détecter, localiser ou bien identifier les défauts dès leur apparition dans les MAS. Autrement dit, nous proposons des méthodes d'aide à la décision, avec précision sur le type du défaut afin de bien diagnostiquer les MAS.

Nous allons discuter et analyser les défauts par des méthodes de diagnostic actuellement appliquées à la machine asynchrone afin d'aboutir à un choix judicieux.

II.3 PRESENTATION ET REALISATION DU BANC D'ESSAI

Lorsqu'on veut surveiller un système ou un processus physique, on doit, à un certain stade des opérations, mesurer et surveiller les grandeurs physiques dépendantes, souvent directement du dispositif. Pour présenter des résultats, il faut que les grandeurs mesurées restent dans une fourchette acceptable de valeurs, dans le but d'assurer la qualité de l'ensemble des systèmes.

La réalisation d'un banc d'essai a été étudiée et conçue au niveau du laboratoire de génie électrique Biskra (LGEB).

Nos travaux consistent à utiliser quelques méthodes de diagnostic, comme la MCSA et l'analyse vibratoire. Pour cette raison, on présentera dans cette partie la conception de deux

bancs d'essais de moteurs asynchrones, dont les paramètres sont présentés dans l'annexe. Parmi les grandeurs mesurées, on cite : les courants, les tensions, les signaux de vibration et le couple. Ces grandeurs sont mesurées, éventuellement acquises et mémorisées.

Les capteurs sont les moyens les plus importants pour accomplir les tests. Si le choix de ces capteurs n'est pas adapté, le reste du traitement ne pourra pas donner de bonne mesure ou aider à prendre la bonne décision. Un capteur peut être défini comme un convertisseur d'une grandeur physique en un signal électrique.

Le banc est constitué d'une machine asynchrone de test accouplée à une charge (frein). Ces tests expérimentaux nous ont permis d'effectuer les analyses sur les défauts électriques et mécaniques afin de faire la validation avec certains algorithmes de diagnostic. L'élaboration du banc de test exige plusieurs machines de même type sous différents états tels que, moteur sain, avec barres cassées, rotor excentrique, défauts de roulement, court-circuit statorique et autres.

II.3.1 Schéma synoptique général de l'ensemble

La figure (II-1) présente la structure générale du dispositif expérimental. Le diagnostic est réalisé à travers une carte d'acquisition raccordée à un micro-ordinateur PC. Cette carte de développement comprend tout l'environnement proche du processeur du PC avec des outils logiciels nécessaires aux applications visées (Matlab et LabView).

Il faut écrire des algorithmes précis en langage de correspondance, c'est la solution pour aboutir à une meilleure lisibilité et compréhension, en vue des évolutions ultérieures. Un autre point indispensable, est l'échantillonnage ; en principe, et afin d'éviter toute perte d'information, la fréquence f_e à laquelle s'effectue l'échantillonnage doit satisfaire à la condition de Nyquist : $f_e > 2f_{max}$.

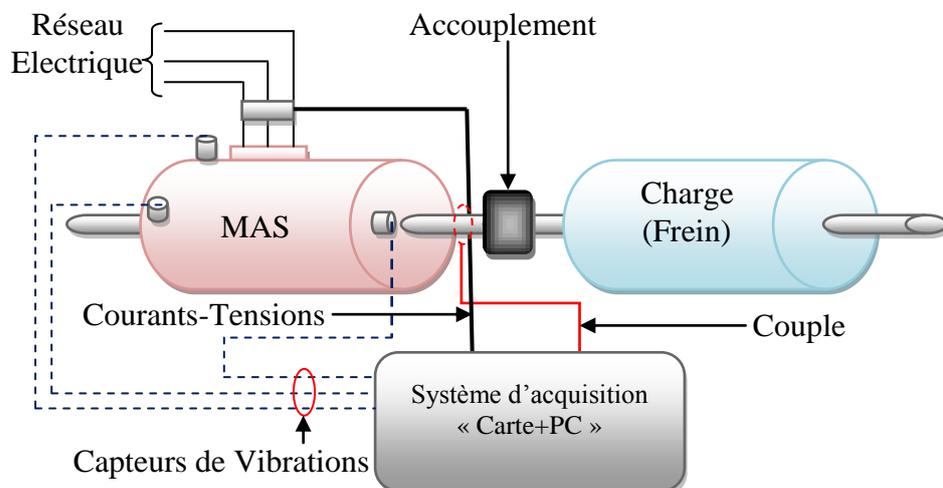


Figure II.1. Schéma de principe de l'acquisition des signaux.

Le bon choix de la résolution fréquentielle, permet de séparer les composantes les plus proches du fondamental. Notre acquisition des données a été effectuée par une fréquence d'échantillonnage de 10Khz ou de 12.8 Khz et un temps d'acquisition de 10 s. Ceci nous amène à obtenir une très bonne résolution fréquentielle de $\Delta f = \pm 0.1\text{Hz}$.

II.3.2 Premier banc d'essais

La plate-forme d'essais a essentiellement été utilisée jusqu'à présent pour détecter, analyser et valider expérimentalement les résultats théoriques. Ce premier banc de tests est dédié à l'analyse des courants, tensions ou couple. D'une autre manière et d'après la carte d'acquisition, il n'est pas possible de relever les signaux vibratoires.

Les constituants principaux de la plate-forme sont :

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

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



Figure II.2. Photo du banc d'essai dédié au diagnostic.

II.3.3 Deuxième banc d'essais

Le second banc permet la mesure des signaux suivants : vibrations, courants, tensions et couple. Il est associé à une carte d'acquisition de type NI (National Instruments) piloté par LabView avec une valeur de fréquence d'échantillonnage $f_e=12800\text{Hz}$.

La photo de ce banc d'essais est montrée dans la figure (II-3).

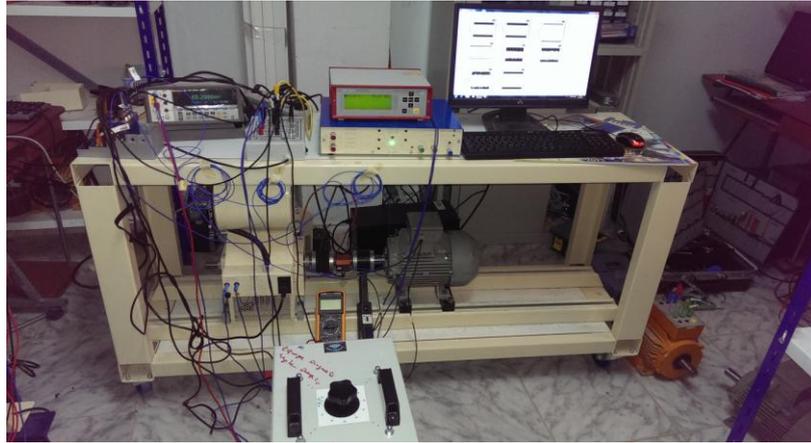


Figure II.3. Photo du banc d'essai dédié à l'analyse vibratoire.

Nous allons présenter une analyse complète de trois défauts : cassures de barres, excentricité et les défauts de roulement en se basant sur les résultats expérimentaux obtenus à partir des bancs d'essais.

II.4 RESULTATS EXPERIMENTAUX DE LA RUPTURE DE BARRES

Prenons la MAS à l'état sain afin de garder un ensemble d'informations de référence. Alors, tous les symptômes ou variations qui seront identifiées après, dépendent de la base des données de l'état normal de la machine.

Nous avons réalisé deux tests, le premier pour une seule barre cassée et le second pour deux barres cassées. La figure (II-4) représente la photographie des rotors de la machine asynchrone utilisée pratiquement pour les différents états.



Figure II.4. Photographie des rotors de la MAS de 3 kW pour un état sain (à gauche), une barre cassée (au centre), deux barres cassées (à droite).

Le courant électrique d'une phase statorique du MAS est représenté dans la figure (II-5) sous un défaut de 01 BC pour les deux conditions, à vide et en charge. La figure (II-7) montre le spectre du courant statorique pour un fonctionnement à vide des deux machines : l'une saine et l'autre défectueuse avec une barre cassée (01 BC).

Il est important de noter que les fréquences qui correspondent aux ordres : 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, ... $(6k \pm 1)$; ont les fréquences $(6k \pm 1)f_s$. Ces harmoniques sont connus sous le nom des harmoniques de la force magnétomotrice (FMM). On explique ses apparitions par l'existence de la rupture de barres rotorique avec un glissement s . La formule ci-après montre bien les valeurs des autres fréquences appelées : fréquences de bande latérale (FBL).

Généralement, les harmoniques du courant statorique de fréquence $(6k \pm 1)f_s$ sont modulés en amplitude à la fréquence $2(6k \pm 1)sf_s$ par l'expression suivante [DEL03], [KLI88], [KLI92], [DOU03], [LEB11] :

$$f_{cb} = [(6k \pm 1) \pm 2ks] f_s, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{II. 1})$$

Cette formule a été vérifiée dans notre étude par des bandes latérales présentées dans la figure (II-7). On va voir un autre indicateur du défaut de la rupture des barres qui est représenté par des bandes latérales autour des harmoniques d'encoches rotoriques ($RSHs$). Ces fréquences sont attachées avec les $RSHs$ et espacées de $2sf_s$; on conclut, donc, à la formule suivante :

$$f_{cb} = RSH \pm 2ksf_s \quad (\text{II. 2})$$

Ou bien,

$$f_{cb} = \left(\frac{kn_b(1-s)}{p} \pm v \pm 2ks \right) \cdot f_s = kn_b \cdot f_r \pm v f_s \pm 2ks \cdot f_s \quad (\text{II. 3})$$

On remarque que les composants harmoniques du courant statorique ne sont pas influencés par le changement de l'état de la MAS à vide pour une barre cassée. Dans ce cas, les fréquences supplémentaires causées par la rupture de barre sont encore presque invisibles ; ceci est dû à la valeur du glissement pour un fonctionnement à vide proche de zéro.

On peut voir les composantes de fréquence à $f_s - f_r$, $f_s + f_r$, $f_s + 2f_r$, etc. qui sont déjà présentes dans le spectre de la machine saine due à l'excentricité mixte. Ces séries des fréquences caractéristiques sont décrites par la formule (I.9).

En outre, des fréquences dues à la saturation sont apparues au spectre des résultats expérimentaux. Ces fréquences ont des raies importantes et remarquables.

$$f_{sat} = 3kf_s \quad k \text{ est impair} \quad (\text{II. 4})$$

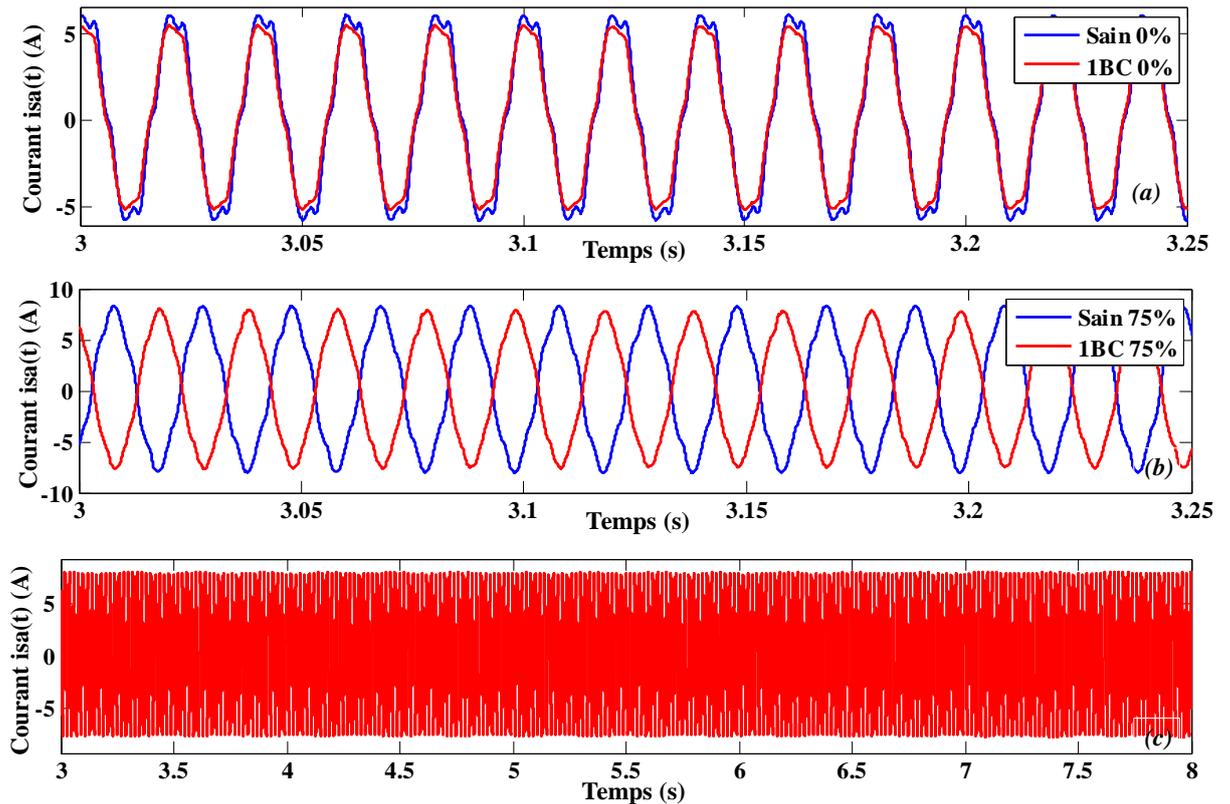


Figure II.5. Le courant statorique en fonction du temps (IBC) ; (a) : 0% de la charge, (b) : 75% de la charge, (c) : Phénomène du battement ($s=3.6\%$).

Une fréquence a été trouvée dans le spectre de la MAS pour les deux états du moteur (sain et défectueux) ; c'est la composante de double de la fréquence d'alimentation 100 Hz, la formule générale est :

$$f_{doub-s} = f_{100Hz} = 2f_s \quad (\text{II. 5})$$

D'après la littérature, cette fréquence a plusieurs sources, telles que : le déséquilibre d'alimentation (champ statorique) et/ou la déformation du stator. Nous avons effectué une acquisition (mesure) de la tension d'alimentation par un oscilloscope numérique qui nous permet de faire l'opération FFT. La figure (II-6) représente le contenu spectral de la tension d'alimentation qui est mesurée deux fois par jour. On voit clairement l'existence de la fréquence de 100 Hz qui est le double de la fréquence d'alimentation 50 Hz.

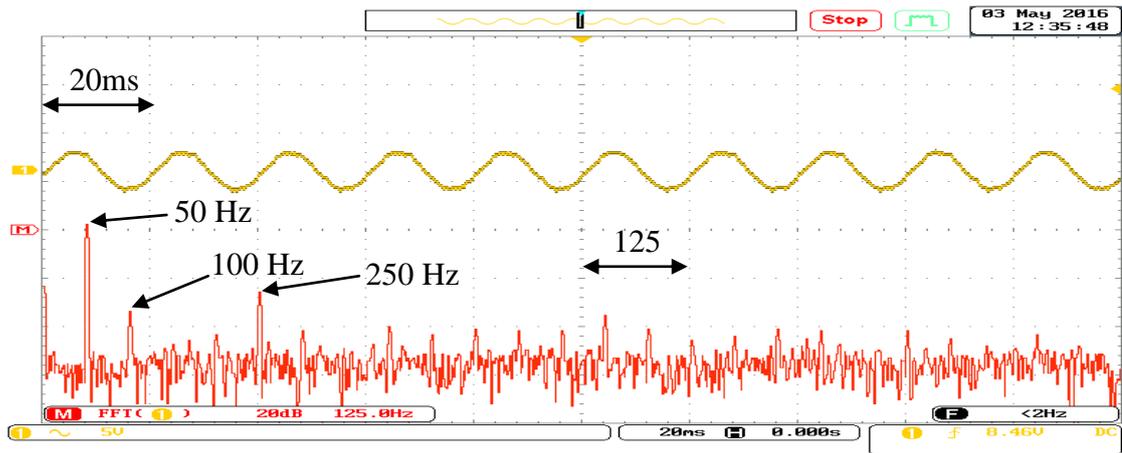
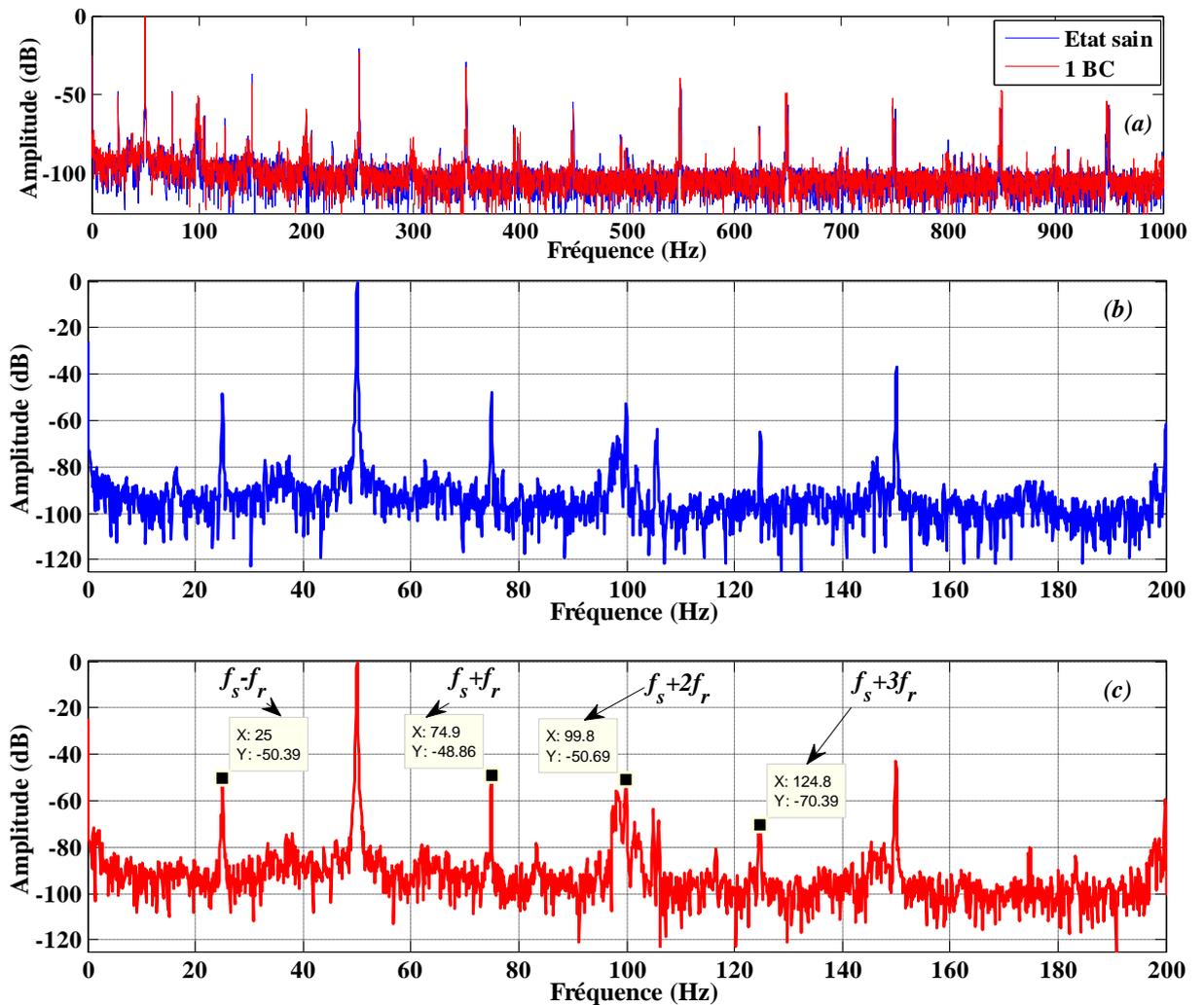


Figure II.6. Spectre de la tension d'alimentation.



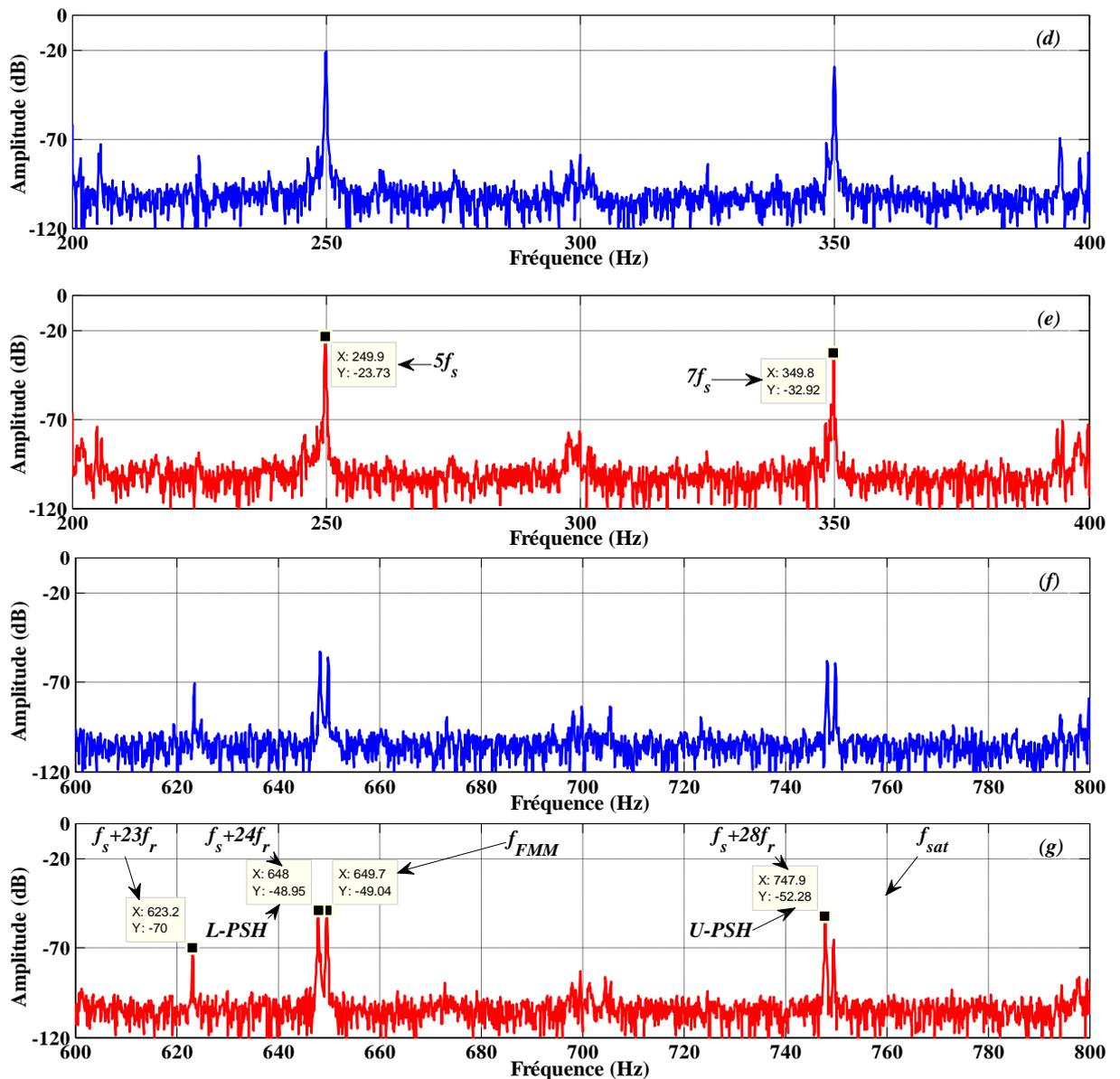
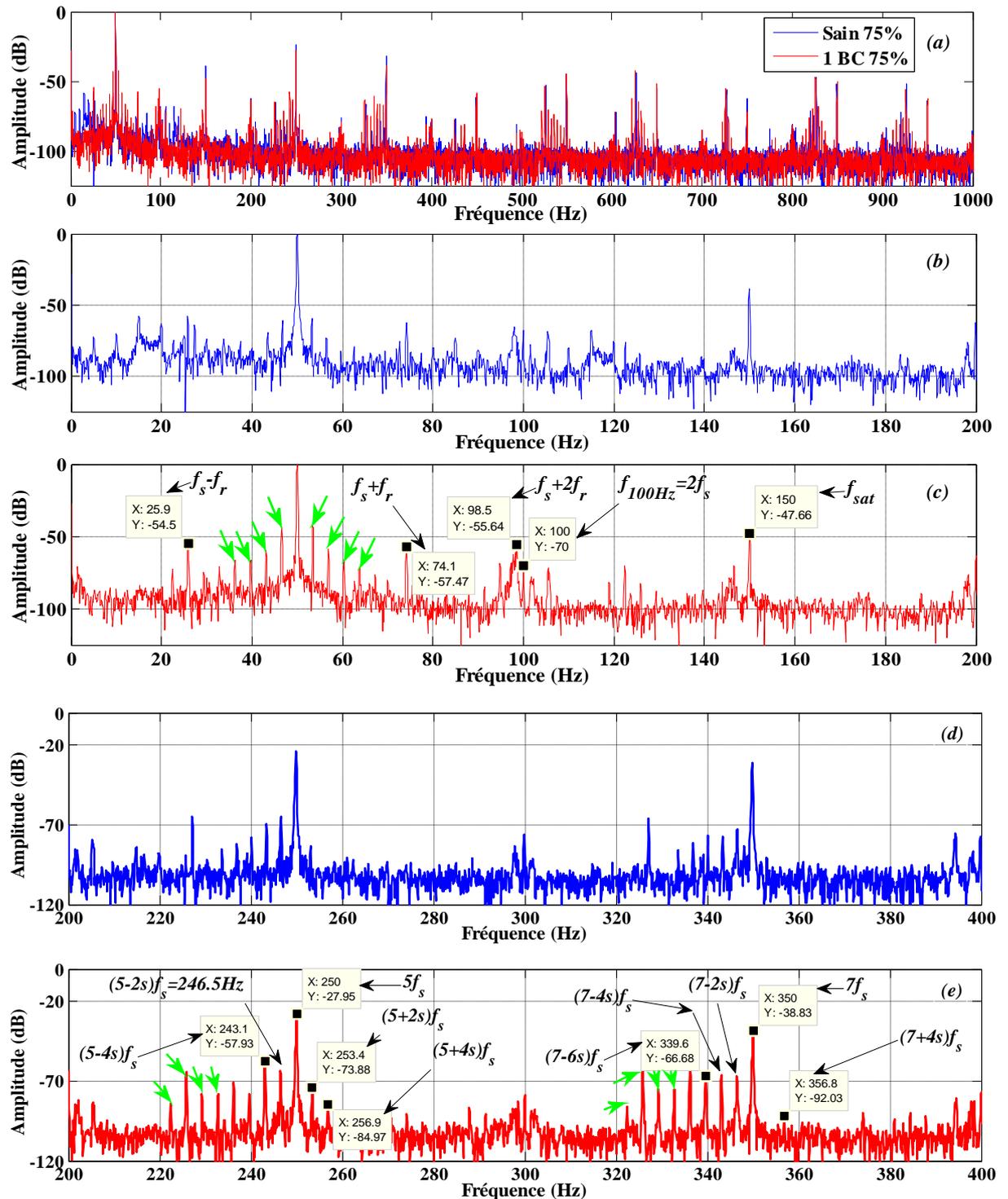


Figure II.7. Spectre du courant statorique (1BC, à vide) ; (a) : Bande : 0-1000Hz, (b) et (c) : Basses fréquences, (d) et (e) : Alentours des *PSHs*, (f) et (g) : Alentours des 5 et 7.

La variation de la charge affecte une variation du glissement. On applique maintenant un couple résistant qui assure une charge de 75% ($s=3.6\%$). La représentation temporelle du courant statorique a été montrée dans la figure (II-5-b). Nous vérifions que le défaut de cassure de barres induit des fréquences de bandes latérales (FBL) autour des fréquences suivantes : la fondamentale f_s , les harmoniques 5, 7 et les *RSHs*. La figure (II-8) représente les FBL dans laquelle les fréquences se déplacent avec l'ordre d'harmonique.

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

Une série de nouvelles composantes fréquentielles de valeurs $(1 \pm 2ks)f_s$ et autres citées précédemment, caractérise ce type de défaut. Ces nouveaux harmoniques apparaissent dans le spectre du courants statorique. Les valeurs de raies qui caractérisent le défaut de cassure des barres autour de la fréquence fondamentale, 5, 7, et des *RSHs* sont résumées dans le tableau (II.1). Les vérifications des trois types des FBL sont liées aux formules (I.5), (II.1), (II.3), (II.4) et aux formules indiquées dans le tableau (I.1).



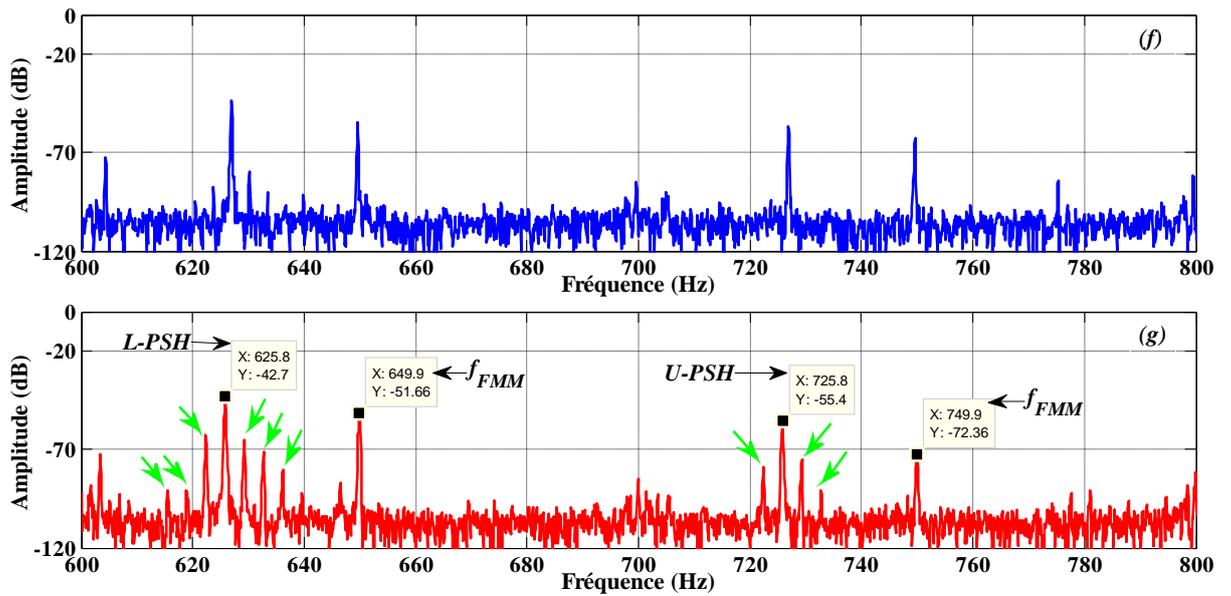
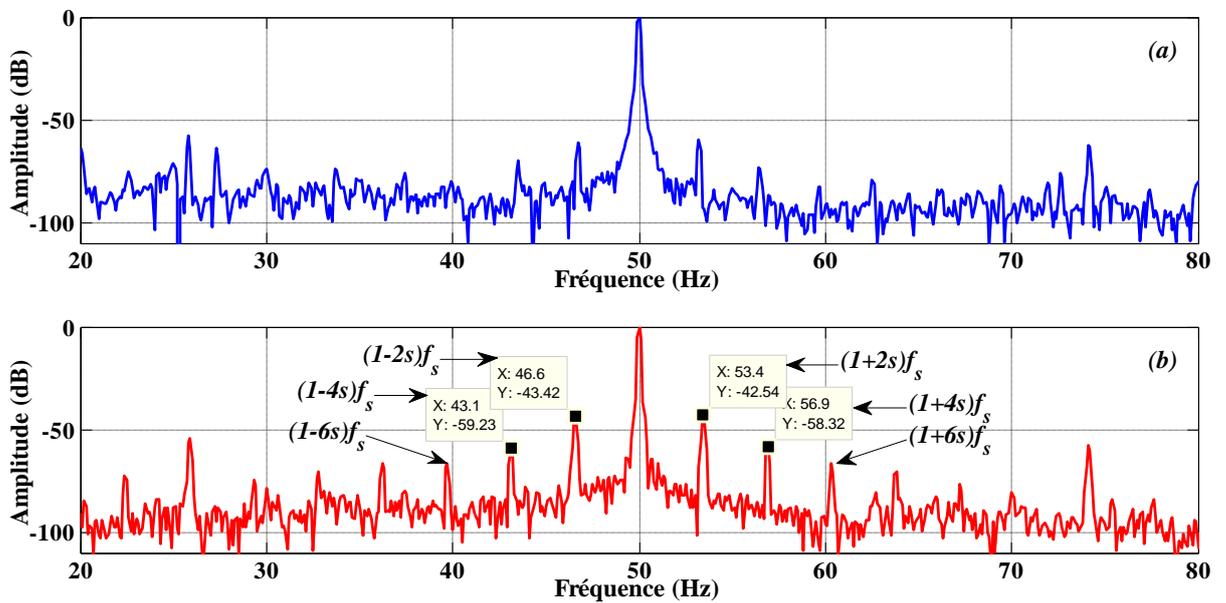


Figure II.8. Spectre du courant statorique ($s=3.6\%$, 1BC) ; (a) : 0-1000Hz, (b) et (c) : 0-200Hz, (d) et (e) : 200-400Hz, (f) et (g) : 600-800Hz.

Un zoom autour de quelques bandes pour clarifier l'influence du défaut de la rupture de barres est présenté dans la figure (II-9).



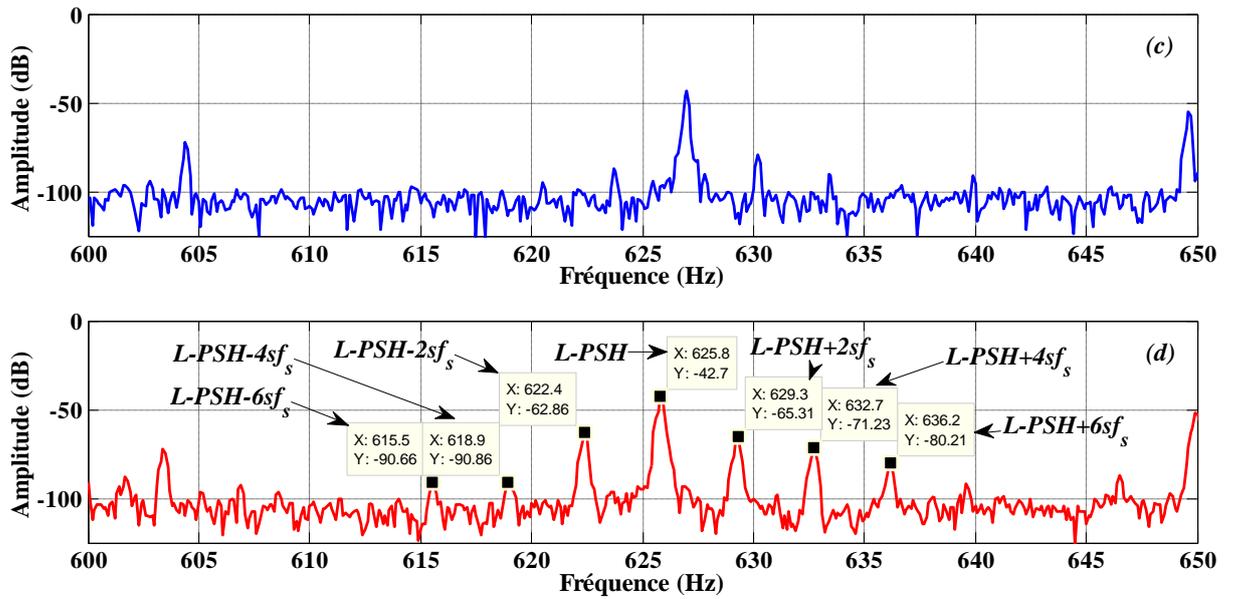


Figure II.9. Spectre du courant statorique ($s=3.6\%$, 1BC) ; (a) et (b): 20-800Hz, (c) et (d): 600-650Hz.

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

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

L'évolution de l'amplitude des harmoniques est un indicateur qui vérifie plusieurs points intéressants. L'un est la sévérité du défaut ; pour cette raison, on présente une troisième machine défectueuse avec deux barres cassées. L'évolution de l'amplitude du courant statorique en fonction du temps est indiquée sur la figure (II-10). Il est clair que l'influence du degré de sévérité du défaut, se traduit par une déformation du courant. Généralement, et d'après la littérature, la cassure de barres rotorique impose une allure du courant statorique qui est similaire au phénomène du battement. Une superposition du FFT de trois machines : saine, avec 1BC et avec 2BC est présentée dans la figure (II-11).

En outre, lorsque le rotor est défectueux, les fréquences du défaut sont clairement présentées dans le spectre. Les composantes de $f_s \pm f_r$ données par l'équation (I.9) apparaissent dans le spectre du courant pour l'état sain et l'état défectueux ; cela explique que l'excentricité mixte.

La figure (II-11) représente les plages fréquentielles autour des harmoniques fondamentaux, *PSHs* ainsi que les 5^{ème} et 7^{ème} harmonique. Nous trouvons de façon évidente, les raies engendrées par une oscillation de vitesse provoquée par la rupture d'une barre du rotor. Ces résultats ont conduit à une émergence claire de raies significatives qui nous permettent de décider judicieusement sur le type du défaut.

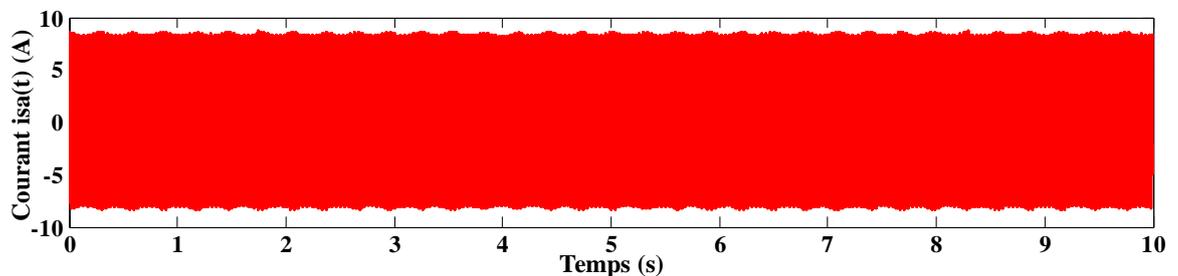


Figure II.10. Courant statorique en fonction du temps ($s=3.6\%$, 2BC).

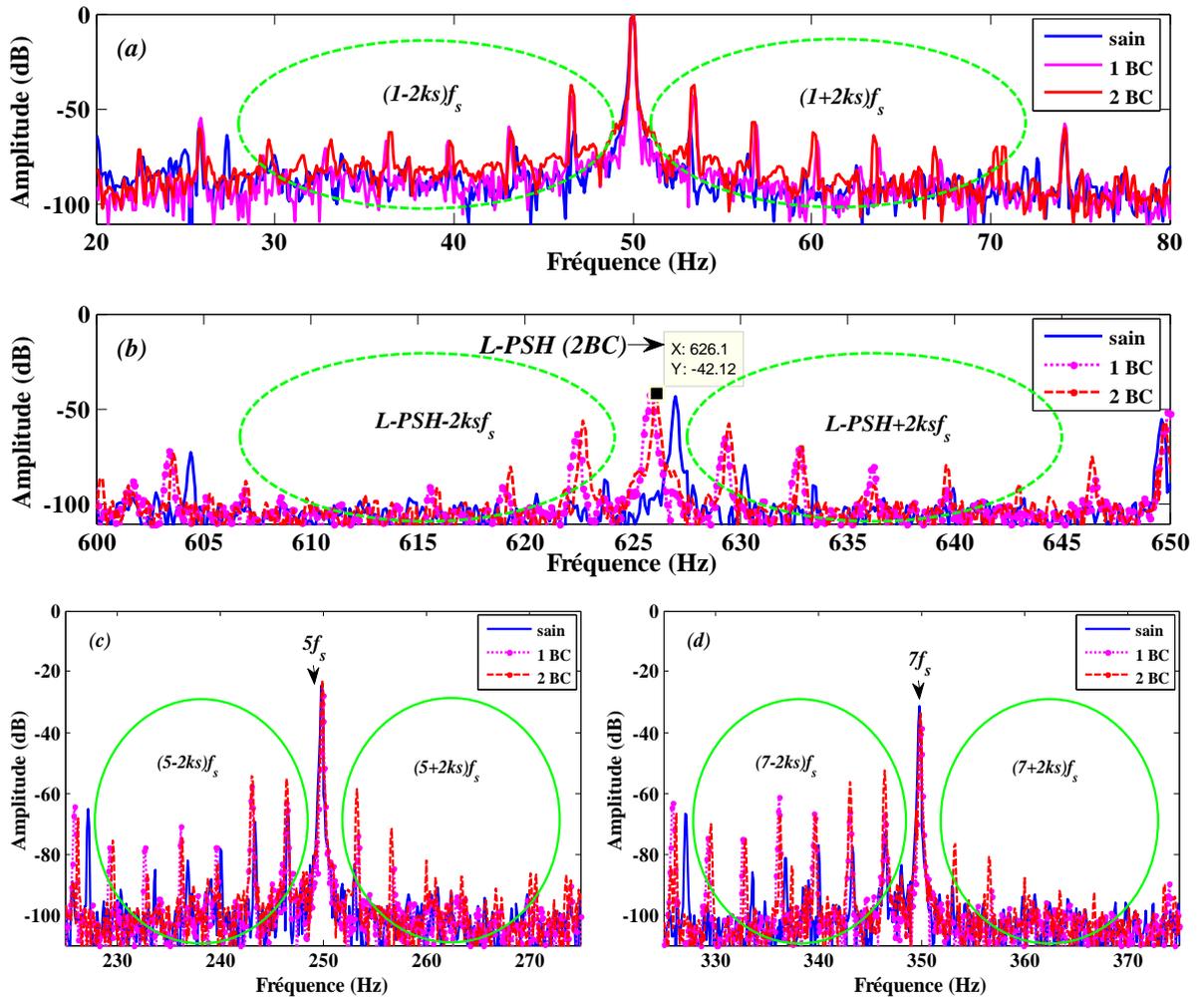


Figure II.11. Spectre du courant statorique (MAS sain, 1BC et 2BC) ; (a) : Autour du fondamental, (b) : Autour de $L-PSH$, (c) : Autour de 5, (d) : Autour de 7.

Un autre facteur important qui entre en jeu, est le pourcentage de la charge appliquée à la sortie du MAS. Plusieurs représentations fréquentielles du courant statorique ont été effectuées afin de calculer l'amplitude. Le glissement dans ce cas sera changé systématiquement ; et les positions des harmoniques seront déplacées.

La sévérité de la cassure de barres peut provoquer aussi des déplacements des raies harmoniques, même avec des valeurs faibles. Il est important d'indiquer la valeur du glissement qui peut être calculé par plusieurs méthodes. Parmi elles, les fréquences caractéristiques de l'excentricité mixte autour de la fréquence fondamentale sont $f_s - f_r$ et $f_s + f_r$. Ces dernières, donnent les valeurs du glissement $s=0.032$ et $s=0.036$ respectivement. On remarque aux alentours des $PSHs$, l'influence de nombre des barres cassées sur ses valeurs. Les valeurs logiques des glissements sont dues à la variation de la vitesse en régime permanent qui impose quelques marges de différences entre les résultats théoriques et

pratiques. La figure ci-dessous montre les FBL autour de l'harmonique fondamental pour deux barres cassées.

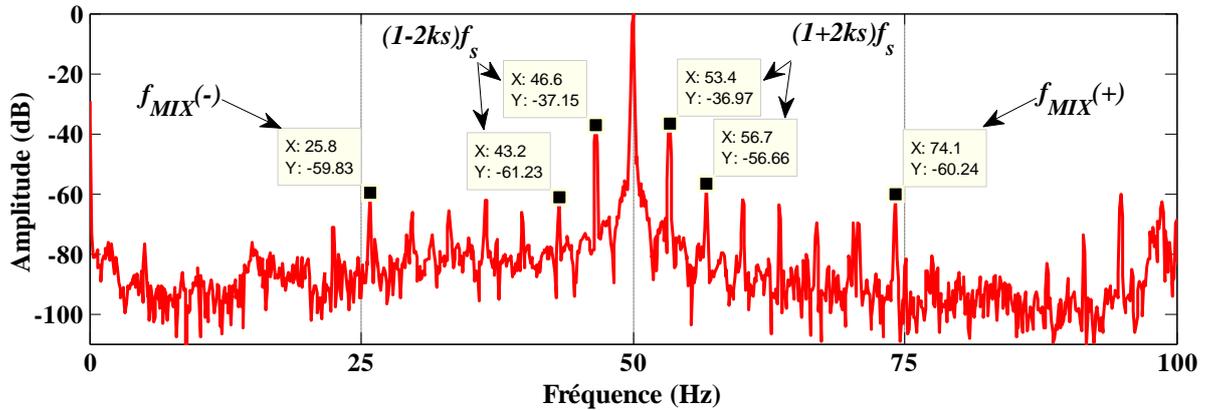


Figure II.12. Spectre du courant statorique (2BC) de 0 à 100 Hz.

Le tableau (II.2) décrit et généralise les harmoniques du défaut de rotor induites dans les bobinages statoriques avec deux barres cassées (2BC). Nous rappelons que cette étude nous permet de vérifier l'existence des harmoniques d'une part, et d'autre part de suivre les positions de celles-ci.

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

Tableau II.2 Récapitulation des raies induites dans les enroulements statoriques (2BC, $s=3.2\%$).

Formules des fréquences caractéristiques	Valeurs théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amplitude «état sain » (dB)	Amplitude pour 2BC (dB)
$(1-2s)f_s$	46.8 Hz	46.6 Hz	-61.7	-37.15
$(1+2s)f_s$	53.2 Hz	53.4 Hz	-59.67	-36.97
$5f_s$	250 Hz	249.9 Hz	-23.91	-22.72
$(5-2s)f_s$	246.8 Hz	246.5 Hz	-65.15	-55.03
$(5+2s)f_s$	253.2 Hz	253.4 Hz	-83.2	-58.64
$7f_s$	350 Hz	349.9 Hz	-31.51	-33.57
$(7-2s)f_s$	346.8 Hz	346.5 Hz	-72.53	-52.56
$(7+2s)f_s$	353.2 Hz	353.3 Hz	-90.46	-76.71
$(7-4s)f_s$	343.6 Hz	343.1 Hz	-77.46	-56.46
$(7+4s)f_s$	356.4 Hz	356.7 Hz	-100.4	-80.97
$RSH_1^{(-)} = L - PSH$	627.6 Hz	626.1 Hz	-43.55	-42.12
$RSH_1^{(-)} - 2sf_s$	624.4 Hz	622.7 Hz	-87.38	-56.2
$RSH_1^{(-)} + 2sf_s$	630.8 Hz	629.5 Hz	-79.64	-57.78
$RSH_1^{(-)} - 4sf_s$	621.2 Hz	619.3 Hz	-94.66	-80.14
$RSH_1^{(-)} + 4sf_s$	634 Hz	632.9 Hz	-90.06	-69.48

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

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

Après avoir décrit les effets qui peuvent survenir suite à une rupture de barres ; notre étude montre la bonne correspondance et l'exactitude en comparant avec la littérature. Toutes les formules, le déplacement des harmoniques et le degré de sévérité du défaut de la rupture de barres sont vérifiés.

En présence du défaut en régime permanent, le système inverse de courant au rotor produit la composante oscillatoire de pulsation $2s\omega_s$ [FIL92].

On a constaté, l'apparition d'harmoniques de fréquences lié à $2ksf_s$ dans le spectre du courant statorique. On a remarqué également que le spectre du courant donne des informations plus claires et plus visibles par une série des FBL aux alentours de la fondamentale, les $(6k\pm 1)f_s$ et les RSH_s .

On peut signaler aussi qu'il est possible d'observer les oscillations dans la vitesse ou dans le couple de pulsation $2s\omega_s$ d'origine purement mécanique [FIL92].

Une analyse spectrale par la transformée de Fourier rapide a été appliquée sur le signal du courant statorique afin de déterminer le contenu fréquentielle du courant et par conséquent de trouver les harmoniques caractéristiques des cassures de barres qui conduisent à un diagnostic efficace.

II.5 ANALYSE DU DÉFAUT D'EXCENTRICITÉ ROTORIQUE

Les machines électriques peuvent être soumises à un décentrement du rotor. La présence d'un certain degré d'excentricité est normale dans les machines électriques. Les fabricants et utilisateurs spécifient un degré naturel maximum de 5%, tandis que dans d'autres cas, un pourcentage maximum de 10% est acceptable [THO3]. Cependant, un degré d'excentricité très faible réduit les vibrations et le bruit, et minimise les forces radiales résultantes que peuvent créer un frottement entre stator-rotor qui peut endommager la machine. Généralement, l'entrefer d'une machine asynchrone est plus petit que dans d'autres types de machines ayant les mêmes grandeurs et performances, la machine asynchrone est la plus sensible aux excentricités [IBR10].

L'excentration du rotor se traduit par des oscillations du couple. Ce phénomène est appelé excentricité statique ou dynamique, dont l'origine peut être liée à une position incorrecte des paliers, à un défaut de roulement, à un problème de charge, ou à un défaut de fabrication. Il existe trois types d'excentricités : l'excentricité statique, l'excentricité dynamique et l'excentricité mixte qui associe les deux premiers cas [BES07], [BES16-2]. Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que sur l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables [AND08], [VAS09].

Notre étude, dans cette partie, consiste à détecter le défaut d'excentricité rotorique en se basant sur la méthode de MCSA-FFT. Comme nous l'avons déjà vu ; l'analyse spectrale du courant joue un rôle important pour la détection du défaut de la cassure de barres. Nous allons étudier soigneusement le défaut d'excentricité statique (ES) et dynamique (ED). Les essais expérimentaux réalisés au laboratoire (LGEB) nous ont permis de tester, analyser et traiter les données afin d'atteindre un bon diagnostic.

II.5.1 Résultats expérimentaux dédiés à l'excentricité statique

Notre choix de la MAS n'est pas anodin, ou pour une disposition d'un banc d'essai complet. Le choix dépend de plusieurs facteurs, et le plus important est l'existence de cette machine partout. Le banc expérimental préparé comprend la MAS considérée, couplée avec un frein commandé. Ce banc est destiné à l'étude de différents défauts des machines électriques. La création du défaut d'excentricité nécessite une grande précision à cause de la valeur d'entrefer. Les manières de préparation d'un défaut d'ES ou d'ED sont nombreuses. Notre disposition de l'excentricité se base sur des modifications des bagues de roulement selon le besoin. Nous savons que tout problème au niveau de la bague intérieure provoque une excentricité dynamique ; et tout défaut lié à la bague extérieure crée une excentricité statique [BES15-1], [BES16-2]. L'objectif est d'ajouter des bagues supplémentaires qui ont une forme ovale avec des dimensions suffisamment précises pour éviter tout problème de frottement entre le stator et le rotor. Sur cette base, et pour l'excentricité statique, on dispose d'une bague entre la bague extérieure du roulement et le flasque en maintenant les mêmes dimensions de la bague intérieure. Cette création est plus au moins adéquate pour créer une ES ou bien une excentricité statique inclinée. De la même façon, et pour disposer d'une ED, sauf que, l'on garde les dimensions de la bague extérieure et l'on place une bague d'une forme ovale entre l'arbre de rotation et la bague intérieure du roulement.

Il faut signaler ici que, pratiquement, on ne peut pas assurer un type d'excentricité (ES ou ED) à 100%. On trouve toujours un certain degré d'une autre excentricité qui nous conduit à une excentricité mixte. Le but de cette réalisation est de faire un *renforcement* d'une excentricité par rapport à une autre [BES16-1], [BES16-2]. La figure (II-13) représente une photographie de roulement avec les bagues supplémentaires pour clarifier l'opération de création de l'ES et de l'ED.



Figure II.13. Stratégie et principe de préparation de l'ES et l'ED.

II.5.2 Analyse spectrale du courant statorique avec excentricité statique

L'analyse spectrale est utilisée pour détecter des défauts dans les MAS, essentiellement ici, l'excentricité statique. Ce cas se prête bien à l'approche dans la mesure du courant qui se peut se traduire par l'apparition de fréquences additionnelles.

La surveillance par analyse spectrale du courant de la machine asynchrone consiste donc à effectuer une transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences supplémentaires constituant la signature d'un défaut dans la machine.

Pour cette configuration du défaut d'ES, nous avons la possibilité de faire une analyse du spectre de courant statorique pour les deux fonctionnements de la machines : à vide ($s \approx 0.4\%$) et à 75% de la charge ($s \approx 3.2\%$).

Afin d'étudier les défauts d'excentricités, il est nécessaire de comprendre la règle de [NAN11], sur l'apparition des *PSHs* qui ont une importance pour la détection de l'ES ou l'ED seule.

Les références de [NAN98], [NAN01], [NAN05] et [NAN11] ont proposé une formule qui relie le nombre de barres avec le nombre de paires de pôles. La formule proposée ne signifie pas seulement l'apparition des *RSHs*, elle impose aussi la condition d'apparaître ou non du défaut d'excentricité statique et dynamique. Le principe de cette dernière est organisé comme suit :

a/ On trouve les *PSHs*, si et seulement si cette formule est vérifiée :

$$n_b = 2.p.[3.(m \pm n) \pm r] \quad (\text{II. 6})$$

avec, $m \pm n = 0, 1, 2, 3, \dots$; $r = 0$ ou 1 .

En effet, cette proposition est vérifiée pour notre machine, c'est-à-dire :

$$n_b = 2.p.[3.(m \pm n) \pm r] = 28 = 2.(2).[3.(2) + 1] = 28$$

Dans ce cas et selon Nandi et al. , les *PSHs* sont apparaissent seules.

b/ On trouve les fréquences caractéristiques de l'excentricité statique ou l'excentricité dynamique seulement, si la formule suivante est vérifiée :

$$n_b = 2.p.[3.(m \pm n) \pm r] \pm d \quad (\text{II. 7})$$

avec, $m \pm n = 0, 1, 2, 3, \dots$, $r = 0$ ou 1 ; $d = 1$ ou 2 .

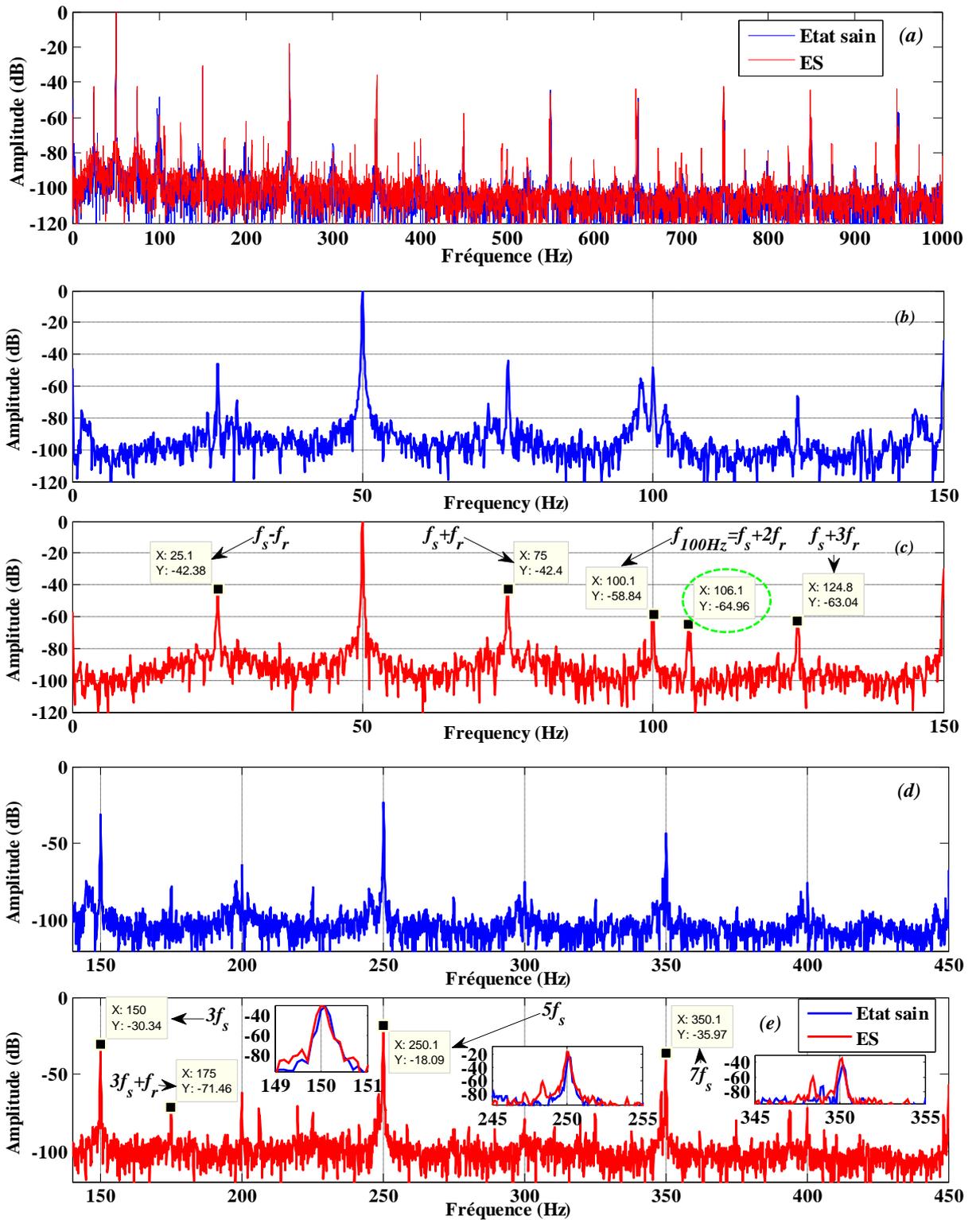
Il est signalé que l'excentricité mixte n'est pas soumise à la règle de combinaison et leurs harmoniques vont apparaître systématiquement.

Cette étude contribue au diagnostic des défauts d'excentricités statique et dynamique pures. Cette formule pour notre cas ($n_b = 28$) n'est pas vérifiée ; donc la question qui se pose : Est-ce-que les fréquences caractéristiques de l'un des défauts (ES ou DE pure) sont absents ?

La figure (II-14) présente les raies du courant statorique pour un état sain et un autre état défectueux du moteur ($s \approx 0.4\%$). Les résultats obtenus confirment la similarité du spectre d'un état sain et autre défectueux. La règle d'existence de [NAN11] a été vérifiée pour un nombre de barres rotoriques 28 ; d'après lui, les fréquences caractéristiques d'une ES pure ou un ED pure n'apparaissent pas (ou faiblement apparues), simultanément, les *PSHs* ont la possibilité d'exister.

Il est clair, expérimentalement, que les courbes sont en concordance avec la théorie dans la figure (II-14). Les fréquences caractéristiques de l'ES f_{ES} n'apparaissent pas ou sont superposées avec les *RSHs* due à une formule commune qui les rassemble [BES16-3]. Cependant, d'autres raies font leur apparition à la fréquence 106.1 Hz, 494.1 Hz et autres qu'ils n'ont pas une expression mathématique (Figures II-14-c et II-14-g).

De plus, le spectre de la figure (II-14-e) montre clairement les harmoniques d'ordre 3, 5 et 7, avec les amplitudes -31.35 dB, -23.65 dB et -43.69 dB respectivement pour un état sain. En revanche, ils ont les valeurs -30.34 dB, -18.11 dB et -35.97 dB pour un état défectueux.



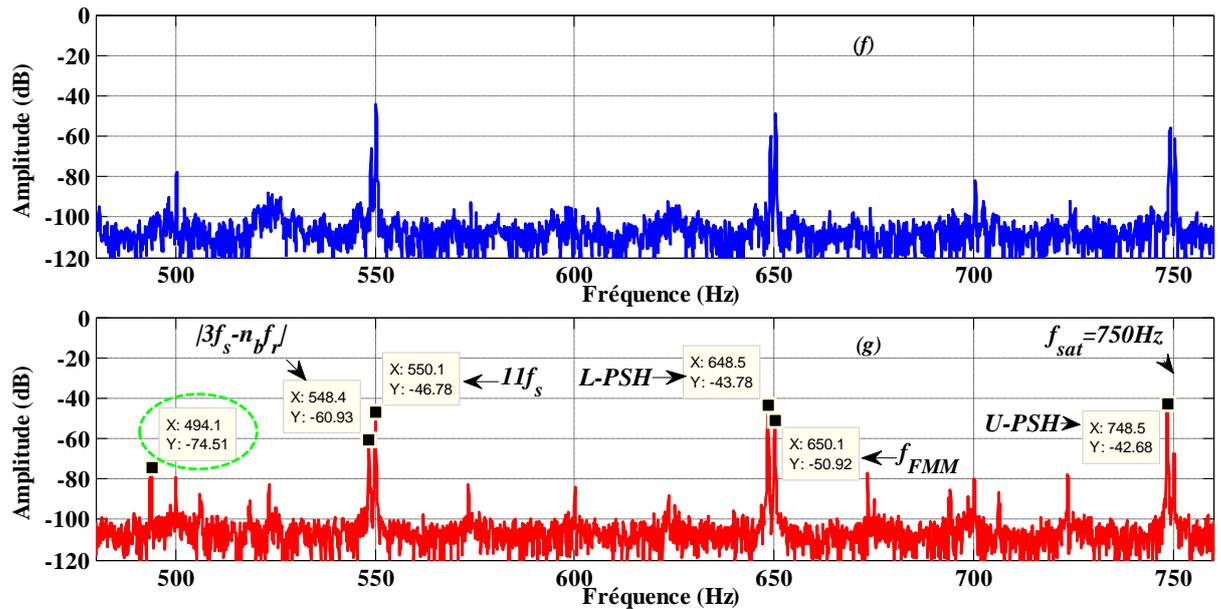


Figure II.14. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($s=0.004$, à vide); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour de 5 et 7, (f) et (g) : Autour des *PSHs*.

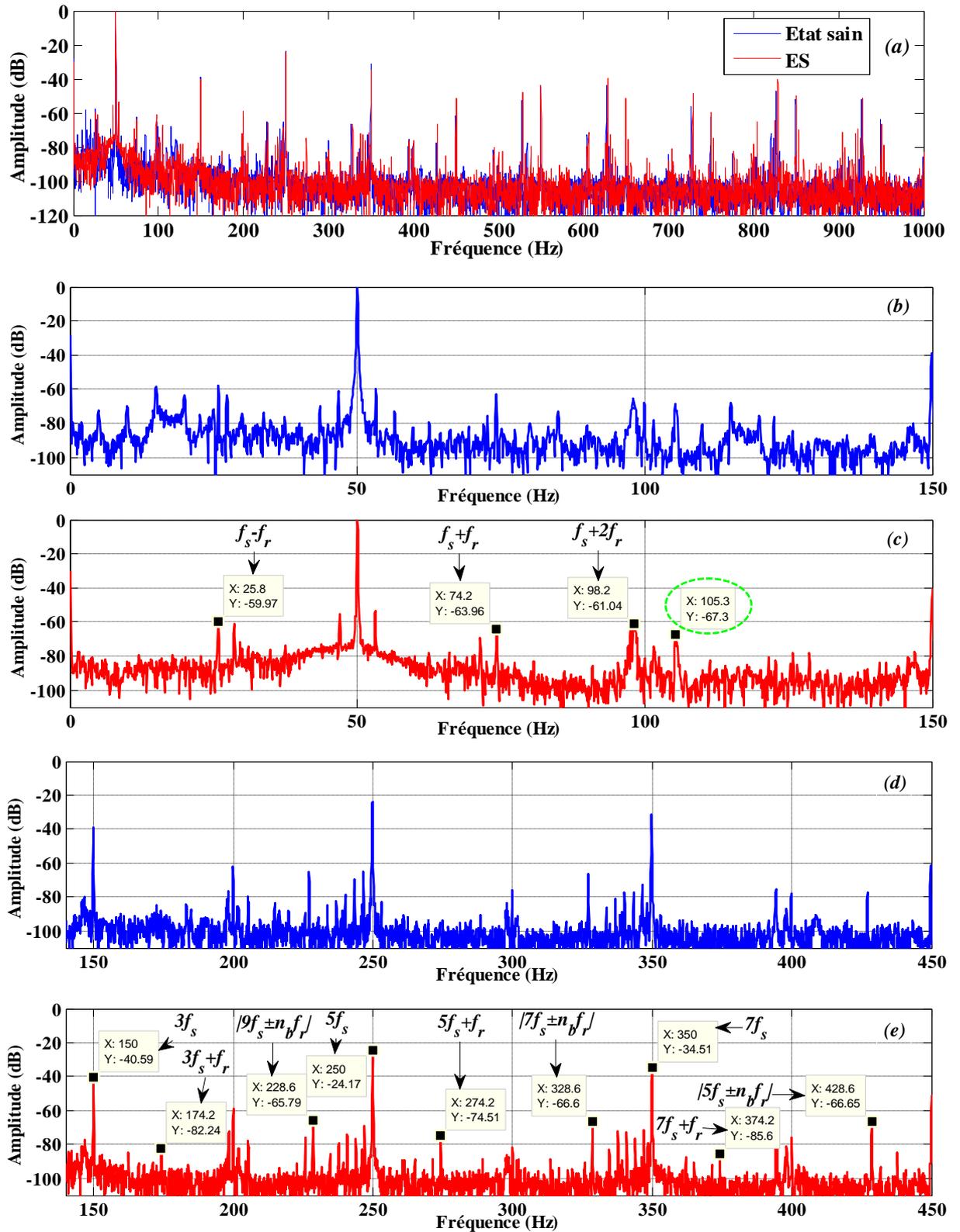
On applique maintenant à la machine asynchrone un couple résistant de 75% de la charge ($s=3.2\%$) ; l'objectif est d'étudier le comportement de la machine quand le glissement est différent de zéro. La figure (II-15) montre le spectre du courant statorique pour 75% de la charge. Les fréquences dues à l'excentricité mixte apparaissent systématiquement et logiquement par la série des fréquences $f_s \pm f_r$. Cela peut s'expliquer, en effet, par l'existence d'un faible déséquilibre, dû à la fabrication du rotor. Les *PSHs* ont les valeurs 628.6 Hz et 728.6 Hz, avec des amplitudes un peu supérieures comparant avec l'état sain de la machine.

Le suivi d'amplitude des raies d'harmoniques est considéré comme un indicateur du défaut. En effet, et pour un spectre du courant qui contient les deux *PSHs*, dans ce cas, on parle d'une autre série d'ordres $3k'$ et $(6k \pm 1)$ qui ont une amplitude importante (k' est impair).

Le spectre de la figure (II-15-d) montre que les harmoniques d'ordres 3, 5 et 7 possèdent les amplitudes -38.97 dB, -23.91 dB et -31.51 dB respectivement pour un état sain. En revanche, ils ont les valeurs -40.59 dB, -24.17 dB et -34.51 dB pour un état défectueux (figure II-15-e). On conclut à une observation sur laquelle les amplitudes augmentent en présence du défaut pour un fonctionnement à vide. Cependant, elles diminuent dans le cas de 75% de la charge.

En outre, les amplitudes des premiers harmoniques d'encoches rotoriques $L-PSH=628.6$ Hz et $U-PSH=728.6$ Hz ont augmentées lorsqu'on les compare avec -43.55 dB et

-56.4 dB pour un état normal. Par conséquent, ils portent les valeurs -39.54 dB et -48.44 dB pour le moteur avec un défaut d'ES.



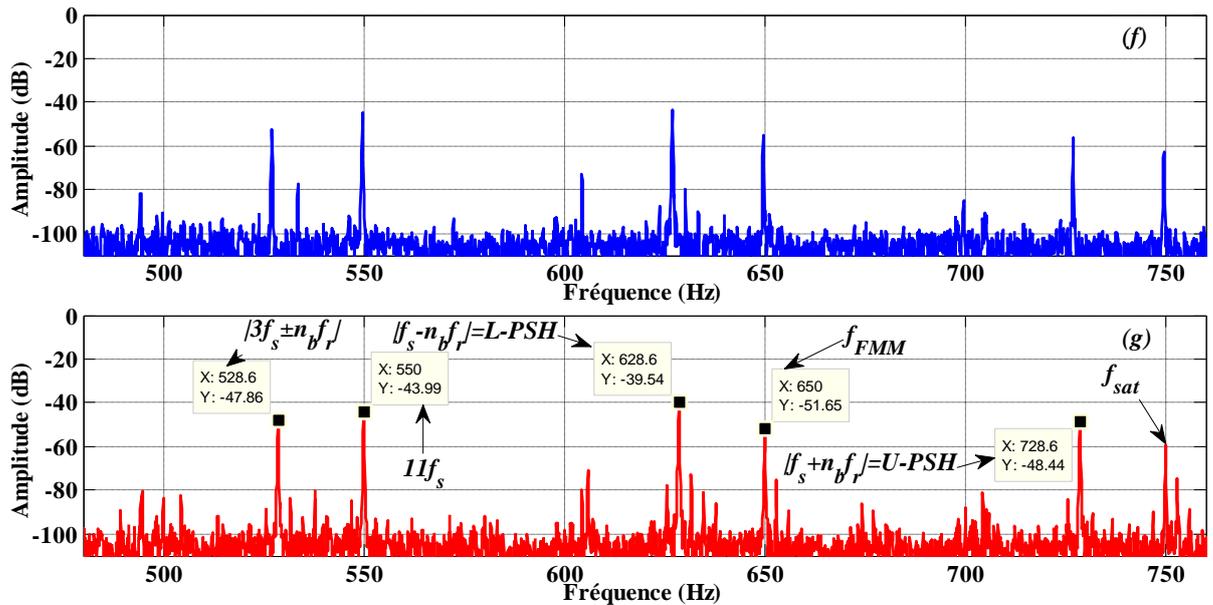


Figure II.15. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($s=0.032$); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour de 5 et 7, (f) et (g) : Autour des *PSHs*.

Dans le cas d'une excentricité du rotor, nous notons l'apparition de nouvelles composantes des harmoniques, au contenu spectral du courant statorique qui caractérisent ce défaut. Ces harmoniques (fréquences) dépendent du nombre des paires de pôles et le nombre des barres rotoriques. Ces fréquences peuvent être décrites par la relation (I.7).

Les deux types de défauts se conjuguent souvent en même temps ; nous l'appelons donc, l'excentricité mixte. Le contenu spectral du courant statorique a des harmoniques additionnels causés par l'excentricité mixte. La formule qui montre l'existence de cette excentricité est (I.9).

Les figures (II-14), (II-15) montrent le spectre du courant statorique pour des bandes fréquentielles différentes. Un zoom effectué dans chaque zone (autour de la fréquence fondamentale, autour des *RSHs*, ...etc.) nous a amené à un bon diagnostic.

On peut clairement remarquer les fréquences dues à l'excentricité mixte (à vide), et pour $k=1$, on trouve $f_s+f_r=74.9$ Hz et $f_s-f_r=25.1$ Hz.

Dans cette partie, nous avons présenté les différents essais expérimentaux (à vide et en charge) d'excentricité statique. Le courant statorique nous a permis de vérifier (d'après son spectre) les harmoniques des défauts.

Le calcul des fréquences caractéristique du défaut d'excentricité statique se base sur la formule (I.9). On a fait un calcul concernant le défaut d'excentricité statique et en les comparant avec les résultats obtenus :

Pour $k=1$, $\nu=1$ et $s=0.004$:

$$f_{es} = \left[\frac{kn_b}{p}(1-s) + \nu \right] \cdot f_s = f_{es}(+) = 747.2Hz$$

$$f_{es} = \left[\frac{kn_b}{p}(1-s) - \nu \right] \cdot f_s = f_{es}(-) = 647.2Hz$$

Pour $k=1$, $\nu=3$ et $s=0.004$:

$$f_{es} = \left[\frac{kn_b}{p}(1-s) + \nu \right] \cdot f_s = f_{es}(+) = 847.2Hz$$

$$f_{es} = \left[\frac{kn_b}{p}(1-s) - \nu \right] \cdot f_s = f_{es}(-) = 547.2Hz$$

De même, nous avons vérifié les fréquences supplémentaires dans le cas où la machine asynchrone fonctionne à 75% de la charge ; les fréquences caractéristiques sont:

Pour $k=1$, $\nu=1$ et $s=0.032$:

$$f_{es} = \left[\frac{kn_b}{p}(1-s) + \nu \right] \cdot f_s = f_{es}(+) = 727.6Hz$$

$$f_{es} = \left[\frac{kn_b}{p}(1-s) - \nu \right] \cdot f_s = f_{es}(-) = 627.6Hz$$

Pour $k=1$, $\nu=3$ et $s=0.032$:

$$f_{es} = \left[\frac{kn_b}{p}(1-s) + \nu \right] \cdot f_s = f_{es}(+) = 827.6Hz$$

$$f_{es} = \left[\frac{kn_b}{p}(1-s) - \nu \right] \cdot f_s = f_{es}(-) = 527.6Hz$$

Nous avons remarqué dans cette étude une bonne correspondance des résultats expérimentaux avec la vérification théorique. Cependant, nous avons une autre formule des harmoniques dues aux encoches rotoriques ($f_{her}=f_{RSHs}$) qui assure l'égalité avec la formule des fréquences caractéristiques en cas d'excentricité statique.

$$f_{her} = \left[\frac{kn_b(1-s)}{p} \pm \nu \right] \cdot f_s$$

Cette similarité (égalité), nous conduit de parler de l'existence d'une *ambigüité* entre les fréquences (inconvenient).

Par conséquent, si la machine asynchrone possède les deux *PSHs* (comme dans notre cas), cela provoque la création d'autres composantes fréquentielles d'ordres supérieurs 3, 5, 7, etc. Ces fréquences ont généralement des amplitudes importantes. D'après le spectre présenté dans la figure (II-14), on peut vérifier les harmoniques les plus importants aux ordres 3 et 5 comme suit:

$$f_{RSH_3}^- = \left[\frac{kn_b}{p}(1-0.032) - 3 \right] \cdot f_s = 527.6\text{Hz}$$

$$f_{RSH_3}^+ = \left[\frac{kn_b}{p}(1-0.032) + 3 \right] \cdot f_s = 827.6\text{Hz}$$

$$f_{RSH_5}^- = \left[\frac{kn_b}{p}(1-0.032) - 5 \right] \cdot f_s = 427.6\text{Hz}$$

$$f_{RSH_5}^+ = \left[\frac{kn_b}{p}(1-0.032) + 5 \right] \cdot f_s = 927.6\text{Hz}$$

Les figures (II-14) et (II-15) montrent clairement qu'aucune fréquence additionnelle ne peut surgir suite au défaut d'excentricité statique, cependant, on a constaté une modification dans les amplitudes d'harmoniques d'encoches rotoriques (*RSHs*).

Le tableau (II.4) résume quelques valeurs des harmoniques et les évolutions de leurs amplitudes pour une excentricité statique.

Tableau II. 4. Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta_s=45\%$).

Formules des harmoniques ($s=0.032$)	Valeurs théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amplitude (dB) ($\delta_s=0\%$)	Amplitude (dB) ($\delta_s=45\%$)
$f_s - f_r$	25.8	25.8	-57.80	-59.97
$f_s + f_r$	74.2	74.1	-62.69	-63.96
<i>L-PSH</i>	627.6	628.6	-43.55	-39.54
<i>U-PSH</i>	727.6	728.6	-56.40	-48.44
$ 7f_s - n_b f_r $	327.6	328.6	-66.57	-66.60
$ 5f_s - n_b f_r $	427.6	428.6	-77.35	-66.65
$5f_s$	250	250	-23.91	-24.17
$5f_s + f_r$	274.2	274.2	Inexistant	-74.51
$7f_s$	350	350	-31.51	-34.51
$7f_s + f_r$	374.2	374.2	Inexistant	-85.60

L'évolution d'amplitude est un indicateur du défaut, surtout, les harmoniques de la FMM et les *RSHs*. La figure ci-dessous illustre l'évolution de l'amplitude des harmoniques d'encoches rotoriques (*RSHs*) dans l'état sain et en présence du défaut d'excentricité statique seule.

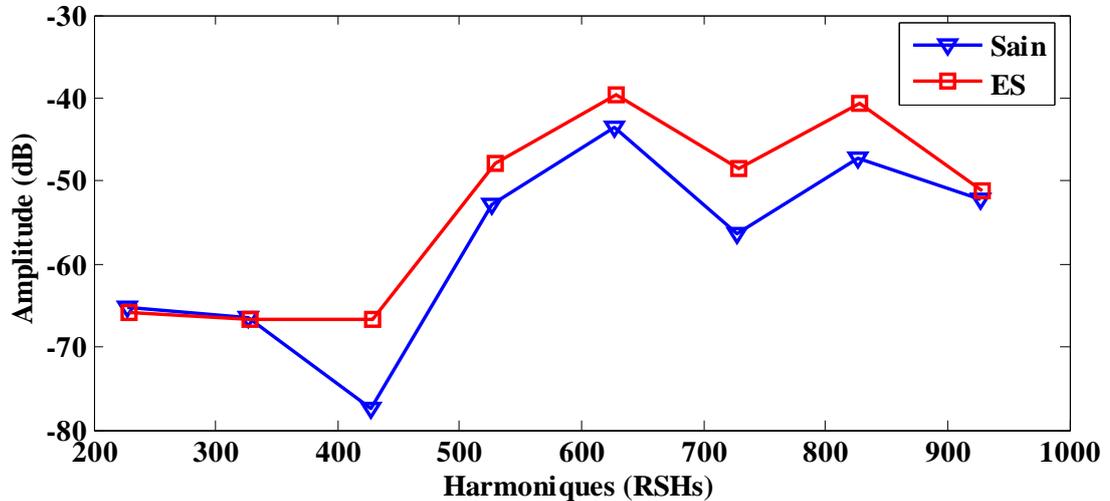


Figure II.16. Evolution d'amplitude en fonction des *RSHs* ($\delta_s=45\%$) avec 75% de charge nominale ($s=0.032$).

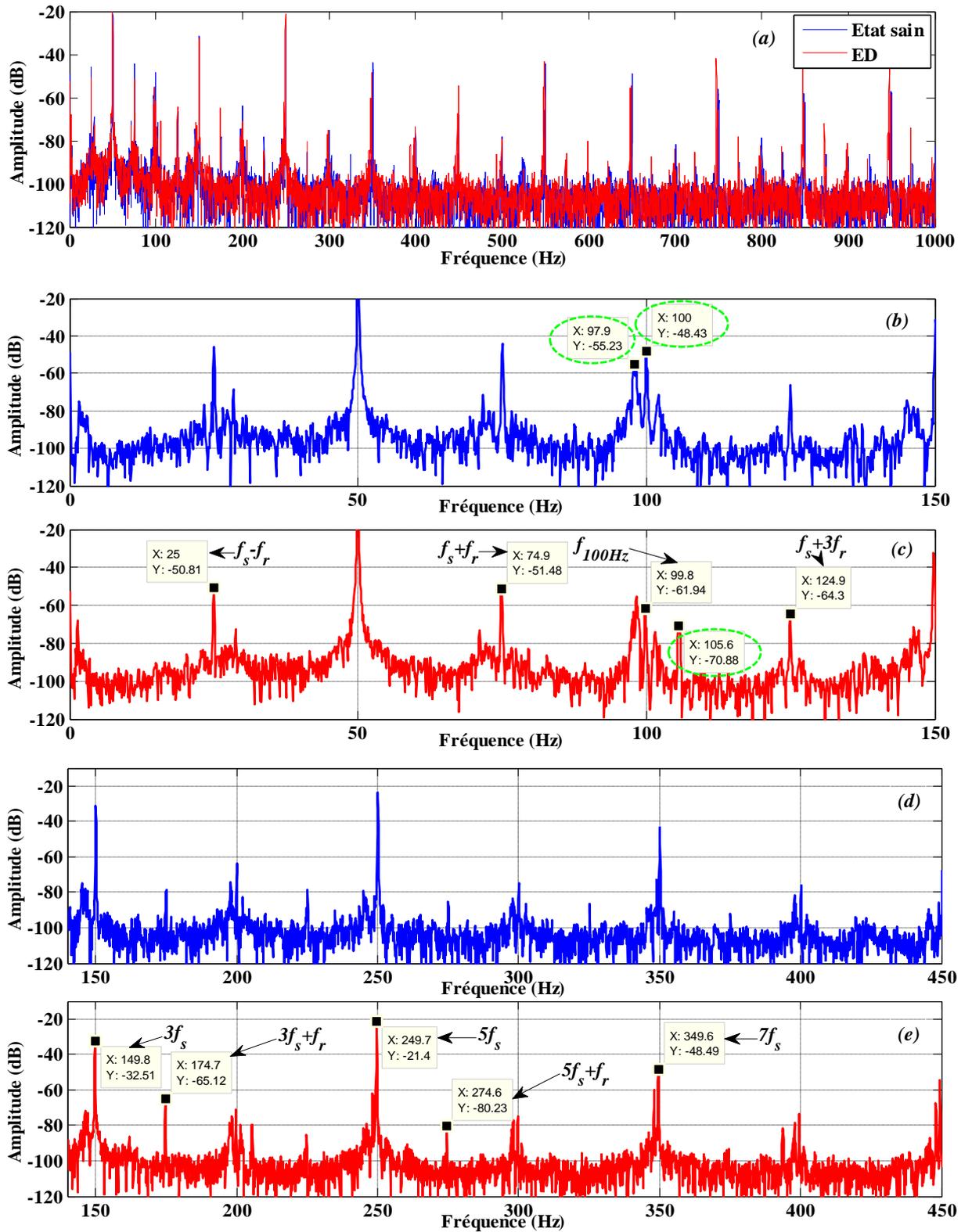
II.5.3 Analyse spectrale du courant statorique avec excentricité dynamique

Dans cette partie, l'analyse de la machine asynchrone triphasée est réalisée avec la présence d'un défaut d'excentricité purement dynamique.

L'objectif de ce paragraphe est la détection des signatures caractérisant le défaut d'excentricité dynamique suivant la formule indiquée au tableau (I.1).

La technique de la MCSA-FFT a pour objectif de déceler les signatures qui indiquent l'existence du défaut d'ES seule ou d'ED seule pour notre moteur asynchrone. La figure (II-17) illustre le spectre du courant statorique pour un moteur asynchrone sain et un autre avec un défaut d'ED sous un fonctionnement à vide ($s \approx 0.4\%$).

Les fréquences proches de la fréquence fondamentale, sont dues à l'excentricité mixte. Ces harmoniques ont l'avantage qui n'oblige pas à une connaissance précise de la machine asynchrone puisqu'ils ne possèdent pas des termes liés à sa conception.



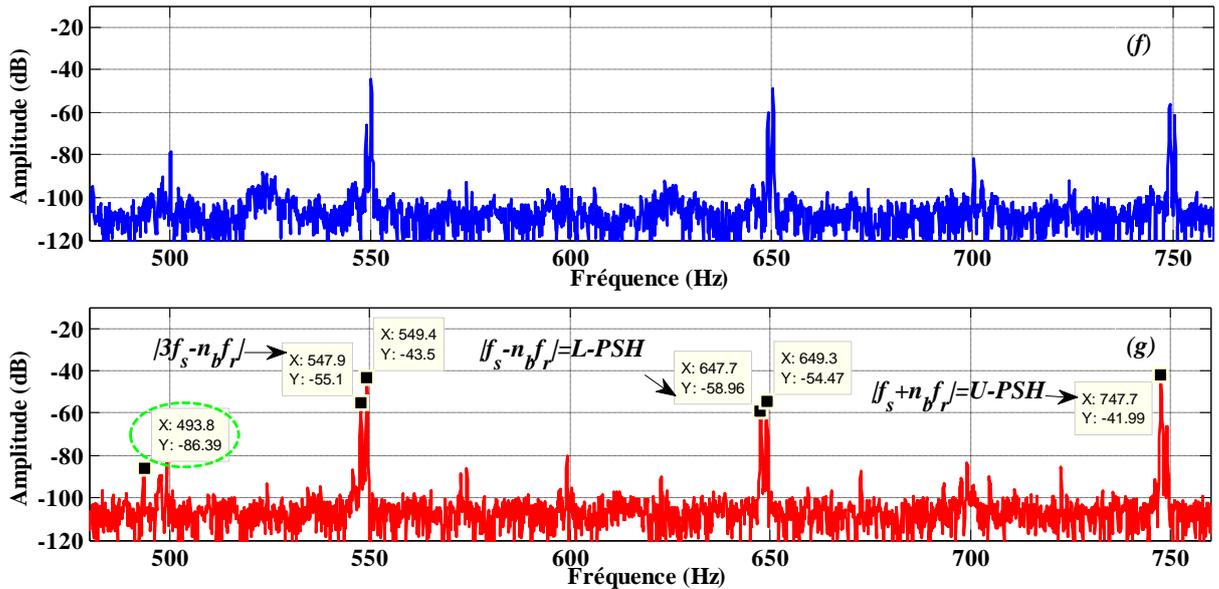


Figure II.17. Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique $\delta_d=30\%$ ($s=0.004$); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour de 5 et 7, (f) et (g) : Autour des PSHs.

Le fonctionnement de la machine en charge donne la possibilité d'apparition des fréquences cachées. Pour cette raison, et comme l'indique la figure (II.18), on présente le spectre du courant statorique avec un glissement $s \approx 0.035$.

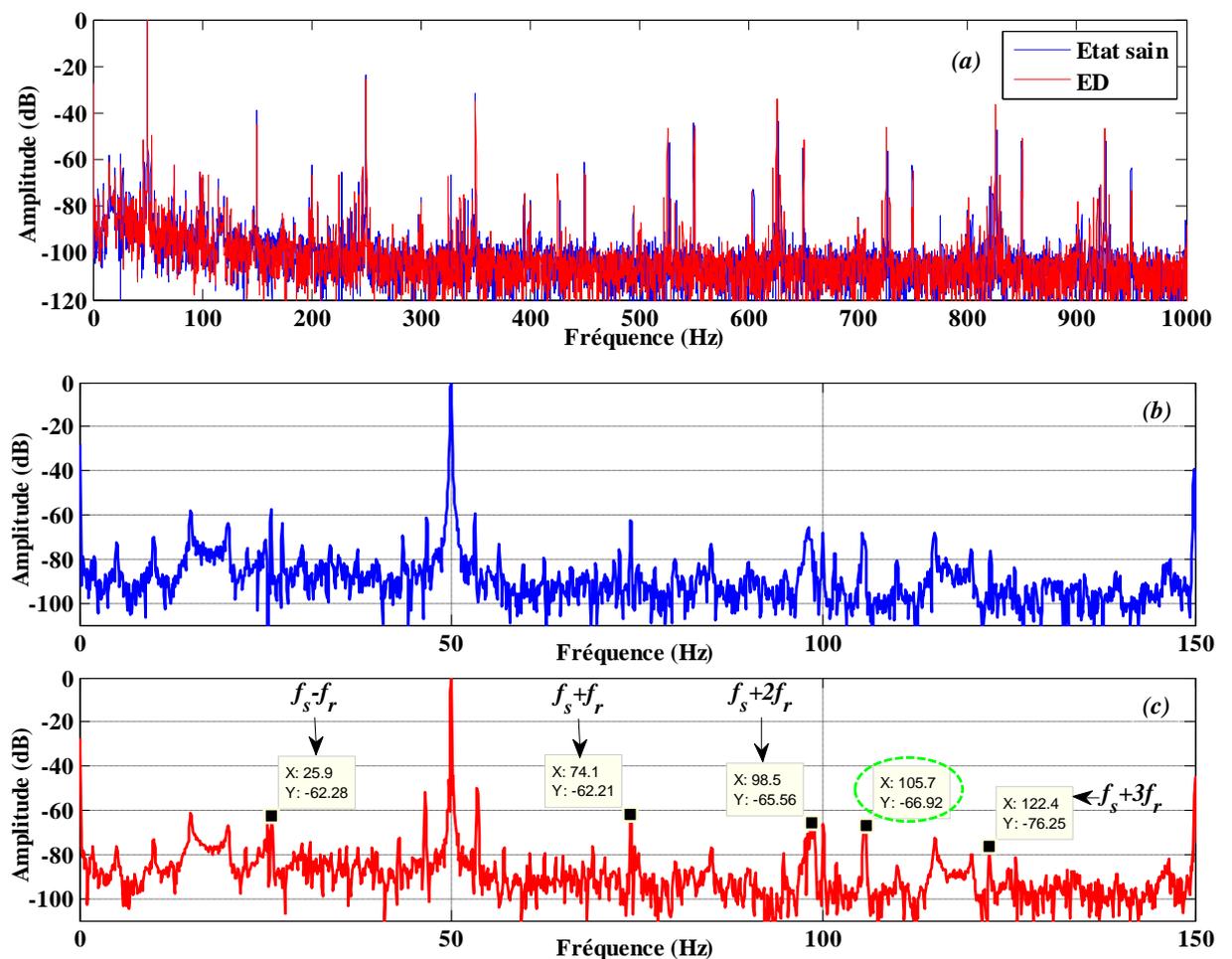
Notre objectif est de détecter la présence d'harmoniques caractéristiques concernant le défaut d'ED qui sont donnés par l'expression (I.7).

Le spectre du courant statorique est riche en harmoniques. Pour un bon suivi, et pour ne pas perdre aucune information, on a présenté les spectres sous forme de bandes séparées avec un zoom qui nous permet une bonne vision.

Comme nous l'avons déjà vu, plusieurs harmoniques se déplacent à cause de la variation de la charge. Les RSHs sont influencés par la charge ; la position des deux premiers se traduit par les fréquences suivantes: 625.4 Hz et 725.4 Hz.

On interprète les spectres présentés (avec différentes bandes fréquentielles séparées de 0—1000Hz) en considérant les amplitudes supérieures à -80dB ; la figure (II-18-c) a montré clairement l'apparition des harmoniques due à l'excentricité mixte. Les valeurs 25.9 Hz, 74.1 Hz, 98.5 Hz et 122.4 HZ sont en concordance avec l'expression (I.9). Ces harmoniques se retrouvent dans les deux états, sain et défectueux ; cela confirme bien l'existence naturelle de cette excentricité mixte, même avec un moteur sain.

D'autre part, le contenu spectral du courant statorique est généralement sensible à toute variation extérieure ou intérieure. Notre remarque réside à suivre le comportement des *RSHs* et les harmoniques d'ordre $(6k\pm 1)$, ses affectations ont plusieurs formes telles que : amplitudes, apparition des nouvelles BL, déplacement, ...etc. Le suivie des composantes supplémentaires demande une étude attentive et précise, surtout, pour les résultats expérimentaux. Les phénomènes qui entrent en jeu pratiquement, sont nombreux, avec un ensemble de groupes de séries d'harmoniques. Les amplitudes des ordres avancés d'harmoniques ont une valeur très faible avec l'augmentation de celles-ci ; mais la quantité et la variété des fréquences additionnelles est difficile à distinguer.



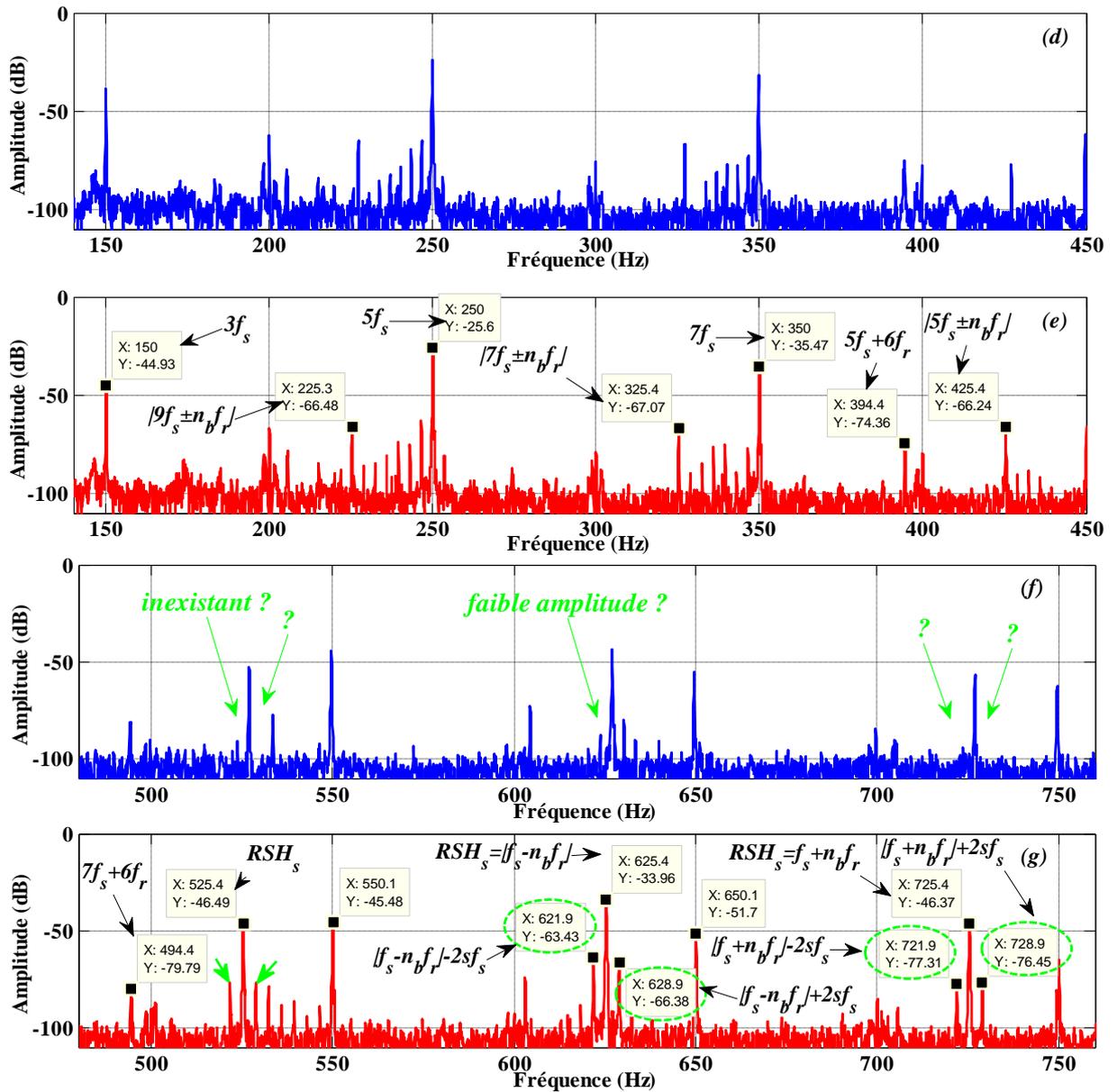


Figure II.18. Spectre du courant statorique en charge avec un degré d'excentricité dynamique $\delta_d=30\%$ ($s=0.035$); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d) et (e) : Autour de 5 et 7, (f) et (g) : Autour des PSHs.

On remarque dans la figure (II-18-g) et autour des RSHs les fréquences de bandes latérales (FBL). Cet indice n'a pas été trouvé en dehors de défaut d'excentricité, il vérifie les valeurs des harmoniques sur la gauche et à la droite par la quantité $\pm 2skf_s$. Pour clarifier le phénomène, on a représenté un zoom aux alentours de quelques fréquences illustratives dans la figure (II-19). La question qui se pose ici, est-ce que l'on peut considérer ces indicateurs comme une signature d'existence du défaut d'ED ?

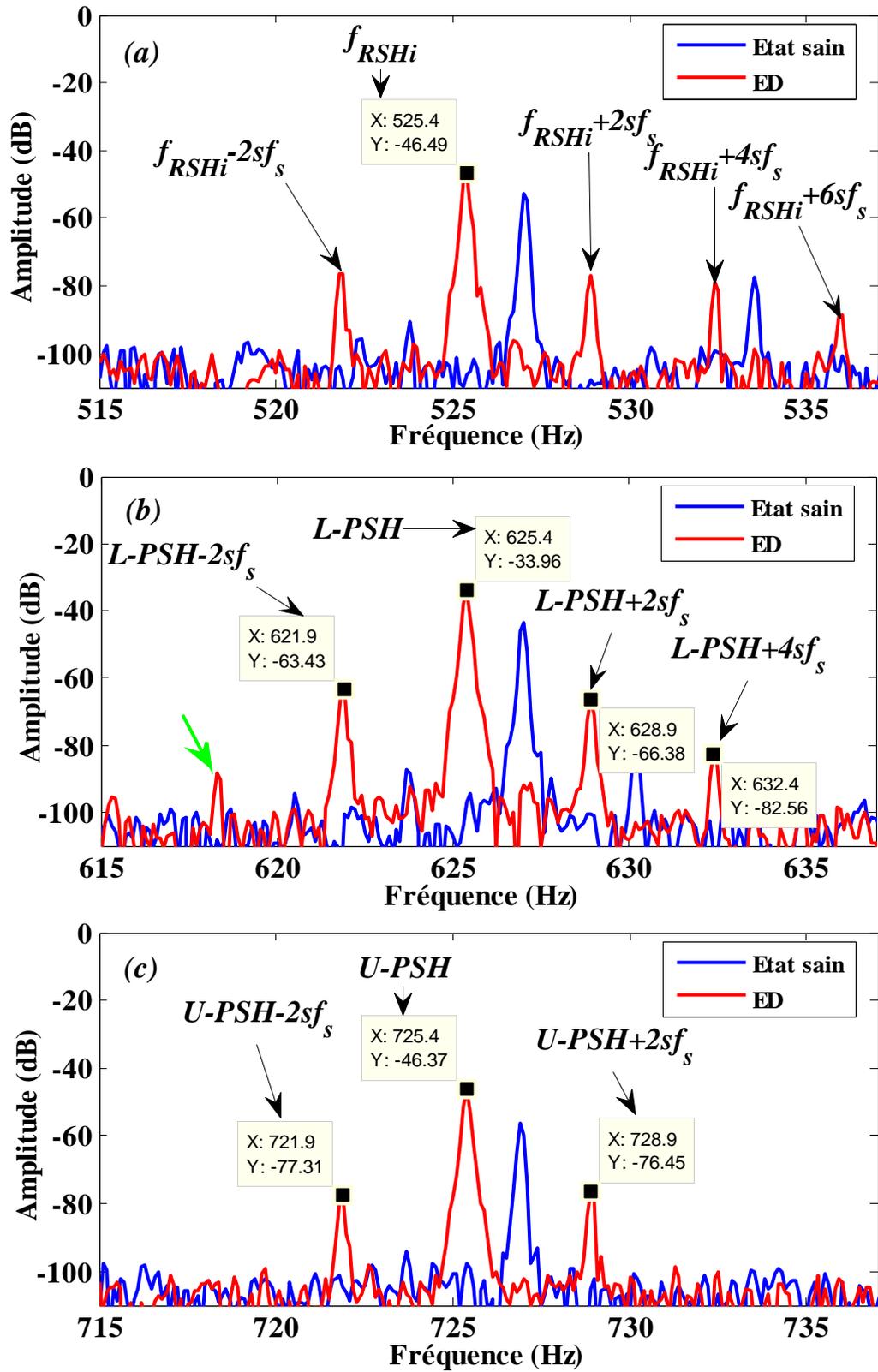


Figure II.19. FBL pour un degré d'excentricité statique $\delta_d=30\%$ ($s=0.035$); (a) : Autour de 525.4 Hz, (b) : Autour de $L-PSH$, (c) : Autour de $U-PSHs$.

Ce second travail consiste à utiliser une expression liant l'excentricité dynamique à celle de l'équation (I.7) ou les formules résumées au tableau (I.1). La vérification ou la détection d'une information du défaut doit être extraite du spectre pour les deux cas de la machine (sans et avec défaut).

Le spectre du courant statorique sous un fonctionnement à vide ($s= 0.004$) ou à 75% de charge ($s= 0.035$) contient toujours les fréquences dues à l'excentricité mixte que l'on peut tirer de l'équation (I.9). Cette formule sous forme compacte, fait apparaître les harmoniques des fréquences relatives à ces défauts.

Les figures (II-17) et (II-18) montrent clairement des fréquences supplémentaires causées par ce défaut comme les FBL autour des *RSHs* ou autres qui n'ont pas une explication physique.

Les valeurs des fréquences caractéristiques sont vérifiées avec la formule (I.9) comme suit:

Pour $s=0.004$, $k=1$, $n_d=1$ and $\nu=1$:

$$f_{ed} = \left[(kn_b + n_d) \frac{(1-s)}{p} + \nu \right] \cdot f_s = f_{ed}(++) = 772.1Hz$$

$$f_{ed} = \left[(kn_b - n_d) \frac{(1-s)}{p} + \nu \right] \cdot f_s = f_{ed}(-+) = 722.3Hz$$

$$f_{ed} = \left[(kn_b + n_d) \frac{(1-s)}{p} - \nu \right] \cdot f_s = f_{ed}(+-) = 672.1Hz$$

$$f_{ed} = \left[(kn_b - n_d) \frac{(1-s)}{p} - \nu \right] \cdot f_s = f_{ed}(--) = 622.3Hz$$

Pour $s=0.035$, $k=1$, $n_d=1$ and $\nu=1$:

$$f_{ed} = \left[(kn_b + n_d) \frac{(1-s)}{p} + \nu \right] \cdot f_s = f_{ed}(++) = 749.62Hz$$

$$f_{ed} = \left[(kn_b - n_d) \frac{(1-s)}{p} + \nu \right] \cdot f_s = f_{ed}(-+) = 701.37Hz$$

$$f_{ed} = \left[(kn_b + n_d) \frac{(1-s)}{p} - \nu \right] \cdot f_s = f_{ed}(+-) = 649.62Hz$$

$$f_{ed} = \left[(kn_b - n_d) \frac{(1-s)}{p} - \nu \right] \cdot f_s = f_{ed}(--) = 601.37Hz$$

Les résultats expérimentaux obtenus sont en concordance avec la théorie. Nous pouvons dire que ces résultats sont des indicateurs de défauts d'excentricité dynamique. On voit même une augmentation d'amplitude de quelques pics à cause du défaut.

Cependant, nous soulevons le problème de cette étude par une *ambigüité* avec d'autres fréquences comme les fréquences $| f_s \pm kf_r |$ de l'excentricité mixte ou autres. Il est admissible

aussi qu'une excentricité dynamique pure ne peut exister seule, et qu'il y'existe toujours avec un certain degré d'excentricité statique résiduelle qui nous amène au troisième type d'excentricité.

Pour les fréquences au voisinage des harmoniques d'encoches principales, les composantes trouvées, dans le cas d'une excentricité purement dynamique, se reproduisent comme le montre la figure (II-19). Nous avons remarqué une création d'autres fréquences caractérisant l'excentricité dynamique, pour $n_d=1$ dans l'équation (I.7).

Mais, il faut indiquer le chevauchement avec les *RSHs* dans le cas où le glissement $s \approx 0$ (fonctionnement à vide). De la formule (I.9), on déduit la concordance avec la relation (I.7) pour une excentricité purement dynamique.

Plusieurs valeurs ici entrent en jeu, dans le calcul des fréquences caractéristiques du défaut d'excentricité *dynamique* ou *mixte*. Dans ce cas, on parle d'une *confusion* intéressante entre les valeurs des harmoniques.

Le second problème réside dans une autre série d'harmoniques qui relie l'ensemble des fréquences qui caractérisent l'excentricité dynamique et les fréquences dues aux harmoniques d'encoches rotoriques (*RSHs*).

Les harmoniques d'encoches rotoriques sont données par la relation suivante [BES16-2]:

$$f_{RSHs} = \left[kn_b \frac{(1-s)}{p} \pm \nu \right] \cdot f_s$$

et pour une excentricité dynamique, on écrit :

$$f_{exc-dyn} = \left[kn_b \frac{(1-s)}{p} \pm \nu \pm n_d \frac{(1-s)}{p} \right] \cdot f_s$$

Dans le premier cas, la machine fonctionne à vide, c.-à-d. $s \approx 0$, donc :

$$f_{exc-dyn} = \left[\frac{kn_b}{p} \pm \nu \pm \frac{n_d}{p} \right] \cdot f_s$$

ou bien,

$$f_{exc-dyn} = \left[\frac{kn_b}{p} + n_{dRSH} \right] \cdot f_s \quad (\text{II. 8})$$

avec,

$$n_{dRSH} = \pm \nu \pm \frac{n_d}{p} \quad (\text{II. 9})$$

La machine asynchrone possède un nombre de paires de pôles égal à 2, le chevauchement est trouvé entre f_{RSHs} et $f_{exc-dyn}$ si et seulement si :

$$n_{dRSH} = \pm v \pm \frac{n_d}{p} = 3, 5, 7, \dots \quad (\text{II. 10})$$

La condition qui vérifie cette égalité est la suivante :

$$n_d = 4(n+1) \quad (\text{II. 11})$$

telle que, $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$

On prend pour le deuxième cas où la machine fonctionne en charge (c.à.d. $s \neq 0$), l'équation (I.7) s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned} f_{exc-dyn} &= \left| (kn_b \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} f_s \pm v f_s \right| \\ &= \left| v f_s \pm (kn_b \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} f_s \right| \end{aligned}$$

où,

$$f_{exc-dyn} = \left| v f_s \pm k' \frac{(1-s)}{p} f_s \right| = \left| v f_s \pm k' f_r \right| \quad (\text{II. 12})$$

avec, k' est un nombre entier.

Pour bien clarifier la formule du chevauchement et le degré de similarité avec l'excentricité mixte, en remplaçant v par 1, on obtient :

$$f_{exc-dyn} = \left| f_s \pm k' f_r \right| = f_{exc-Mix} \quad (\text{II. 13})$$

Le chevauchement est plus clair maintenant entre les valeurs des harmoniques qui caractérisent chaque défaut. On dit aussi qu'il y a une *ambigüité* et difficulté de détection de défaut d'excentricité dynamique en présence d'un autre degré d'excentricité statique. Alors, les deux excentricités produisent une excentricité mixte qui a une autre série de fréquences.

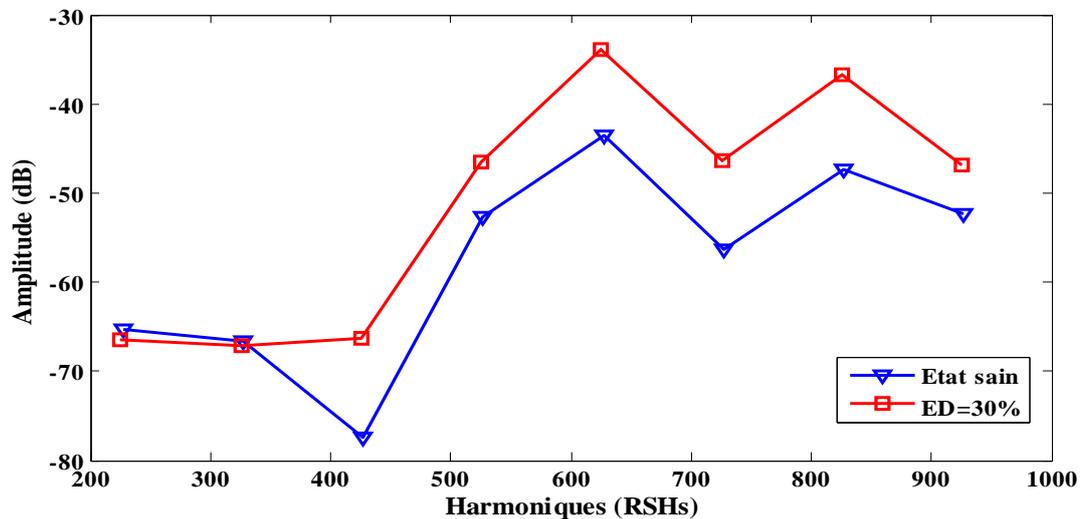
En outre, et en se basant sur la règle de [NAN11], l'apparition des *PSHs* dans le spectre du courant statorique dépend essentiellement du nombre de paires des pôles et du nombre de barres rotoriques. Dans ce cas, et en suivant la logique de la proposition, on ne trouve jamais les harmoniques caractéristiques de l'ED pour cette MAS qui a un $n_b=28$.

Le tableau ci-dessous résume quelques fréquences caractéristiques.

Tableau II. 5. Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta_d=30\%$).

Formules des harmoniques ($s=0.035$)	Valeurs théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amplitude (dB) ($\delta_d=0\%$)	Amplitude (dB) ($\delta_d=30\%$)
$f_s - f_r$	25.87	25.9	-57.80	-62.28
$f_s + f_r$	74.12	74.1	-62.69	-62.21
$L\text{-PSH}$	625.5	625.4	-43.55	-33.96
$U\text{-PSH}$	725.5	725.4	-56.40	-46.37
$ 7f_s - n_b f_r $	325.5	325.4	-66.57	-67.07
$ 5f_s - n_b f_r $	425.5	425.4	-77.35	-66.24
$5f_s$	250	250	-23.91	-25.60
$5f_s + f_r$	274.15	274.2	Inexistant	-87.60
$7f_s$	350	350	-31.51	-35.47
$7f_s + f_r$	374.15	374.2	Inexistant	Inexistant

L'évolution de l'amplitude des $RSHs$ pour un défaut d'excentricité purement dynamique est présentée dans la figure (II-20).

**Figure II.20.** Evolution d'amplitude en fonction des $RSHs$ ($\delta_d=30\%$).

Les résultats expérimentaux présentés dans cette partie ont été obtenus en appliquant la technique d'analyse du courant statorique (MCSA-FFT). On rappelle ici que le traitement des données permet de détecter les défauts d'excentricités statiques et dynamiques.

Une vérification avec les formules théoriques a été faite avec succès. Cette technique de détection impose son efficacité aux plusieurs défauts (cassure de barre par exemple) d'après le contenu spectral du courant. Cependant, et pour notre cas on a trouvé une concordance logique, mais avec une *ambiguïté* remarquable aux autres fréquences. Ce que ne nous permet pas de déterminer précisément le type du défaut.

Une nouvelle méthode de surveillance ou un autre schéma bien orienté de MCSA est nécessaire afin de détecter le défaut d'excentricité statique ou dynamique. Une démarche proposée se base sur l'analyse du courant pour l'amplitude des harmoniques des *RSHs* ou bien des fréquences d'ordre 3, 5, 7, ...etc.

Les résultats obtenus ont montré que le fait de prendre en compte le courant statorique présente une source riche de plusieurs informations importantes.

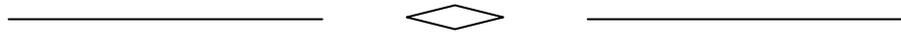
II.6 CONCLUSION

L'analyse spectrale du courant statorique (MCSA) est l'une des techniques les plus utilisées pour le diagnostic des défauts des machines électriques. Les principaux avantages résident dans la facilité de mesure et la possibilité d'une détection en ligne des défauts. L'intérêt croissant pour le MCSA est dû à son importance dans l'industrie avec la disponibilité des outils informatiques avancés. Cette méthode se base sur une analyse précise de spectre du courant ; le but donc, est de détecter des nouvelles raies qui généralement sont considérées comme des indicateurs du défaut.

Néanmoins, cette technique a des problèmes sérieux, parmi lesquels on cite :

- Certains types de défauts peuvent produire des raies semblables aux harmoniques à l'état sain.
- Le chevauchement entre quelques harmoniques du défaut provoque une ambiguïté.
- La difficulté de faire une détection précise pour certain défauts, comme nous l'avons vu pour l'ES pure ou l'ED pure.

Pourtant, le défaut du roulement crée l'excentricité rotorique ; mais sa détection par la MCSA impose d'autres fréquences caractéristiques. Ce défaut mécanique fera l'intérêt du prochain chapitre.



CHAPITRE III

Analyse des défauts de roulements par la méthode de la MCSA

III.1 INTRODUCTION

Les méthodes de diagnostic 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 la communauté du génie électrique préfère s'intéresser à des méthodes plus heuristiques [TRI11].

Notre étude s'intéresse au développement d'un nouveau modèle analytique dédié au diagnostic des défauts de roulement. Dans ce chapitre, nous allons exploiter les résultats expérimentaux pour analyser les défauts de roulement en se basant sur la méthode de la MCSA. La validation du modèle analytique développé sera effectuée pour confirmer l'exactitude de celle-ci.

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

III.2 ANALYSE DU DEFAUT DE ROULEMENT ANALYTIQUEMENT

Les roulements sont présents dans de nombreux types de machines électriques de tailles et d'utilisations les plus diverses. Le roulement est l'une des sources importantes qui crée l'excentricité, les vibrations, les desserrages, ... etc. Il est l'organe qui a pour fonction d'assurer une liaison mobile entre deux éléments d'un système en rotation. Les roulements ne doivent pas seulement assurer la rotation, mais ils doivent également être silencieux, résistants en fonction de leur longévité et, selon l'exécution, présenter une bonne étanchéité.

Le roulement est constitué d'une bague extérieure (BE) qui se positionne dans son logement (alésage), d'une bague intérieure (BI) qui s'ajuste sur l'arbre, d'éléments roulants de formes diverses (eg. billes) qui roulent sur les chemins de roulement des bagues extérieure et intérieure et d'une cage qui maintient les éléments roulants à une organisation régulière.

Lors du chargement d'un moteur asynchrone, il s'en suit une déformation du roulement et donc du chemin de roulement. Cette déformation est supportée par une résistance au roulement. Cette résistance provoque systématiquement un échauffement qui fait interaction avec une lubrification insuffisante ou des charges excessives, le roulement peut donc s'endommager [BES16-4].

Lorsqu'un roulement tourne, avec n'importe quel problème dans les éléments constitutifs de roulement, il provoque des vibrations de fréquences périodiques.

Les défauts de la bague extérieure sont les défauts que l'on retrouve le plus, spécialement dans la zone où la charge est radiale. Le deuxième défaut parmi les plus courants est le défaut de la bague intérieure [ANT04], [BES15-1], [BES16-4].

Le diagnostic des défauts de roulement est l'un des sujets actuels pour plusieurs chercheurs [BES16-1], [BES15-1], [BES15-3], [LEI15], [ELB15], [YUA15]. Les techniques les plus courantes sont celles à base du modèle de la machine, ou à base du traitement de signal. Plusieurs techniques, telles que le spectrogramme temps-fréquence, l'analyse spectrale, la décomposition en ondelettes, la décomposition en bandes d'octaves, et l'analyse cyclostationnaire qui aident au diagnostic des défauts de roulements.

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux composantes fréquentielles dans le spectre du courant statorique en cas du défaut de roulement ; on va faire une analyse spectrale du courant statorique qui est souvent utilisé pour les signaux stationnaires.

III.2.1 Simulation numérique de défauts des roulements

L'utilisation des modèles analytiques peut être une alternative ; ceux-ci permettent d'exploiter assez rapidement l'espace des solutions potentiellement optimales tout en aidant à réduire la durée des étapes de pré-dimensionnement. En effet lorsque les paramètres géométriques varient de manière considérable, il est nécessaire de refaire un nouveau modèle qui se base sur la variation de la perméance. La référence [MCF84] a proposé une représentation du phénomène physique du défaut de roulement ; l'étude de [BLO08] a fait une formule simplifiée de la perméance tout en se basant sur [MCF84]. Une autre étude un peu détaillée orientée vers la simulation de la machine, après avoir fait le calcul des inductances en présence du défaut de roulement et précisément pour le défaut de la bague extérieure (DBE) [BES15-1]. Le modèle proposé par les auteurs a des problèmes dominants pour finaliser la phase de simulation d'une machine asynchrone défectueuse.

Le modèle présenté dans ce chapitre est adéquat et souple pour faire d'autres calculs, pour différents défauts qui peuvent exister dans la machine asynchrone. Le défaut de roulement est l'un des nombreux problèmes sérieux que rencontrent la plupart des machines électriques. Nous allons présenter seulement le calcul des inductances mutuelles stator-rotor en présence du défaut roulement dans la bague extérieure (DBE) [BES16-4].

Notre modèle analytique ici, est basé sur l'explication du phénomène physique du défaut de roulement et la solution formelle pour la fonction de l'entrefer et de la perméance vis-à-vis de la variation réelle de la géométrie [BES16-4].

La plupart des auteurs, utilisent la transformation en séries de Fourier (TSF) pour résoudre les problèmes de calcul [MCF84], [OCA04], [BES07], [BLO08], [BES15-1]. Bien que la plupart des modèles analytiques soient issus de la résolution des équations par plusieurs méthodes. Cependant, il faut mettre la condition que la perspective doit être confondue et vérifiable.

Le modèle développé dans cette partie est basé sur le travail de [BES07] et [BES15-1], tout en liant la continuité de calcul avec le défaut de roulement. Notre modèle analytique se base donc, sur l'utilisation des séries de Fourier qui présentent un comportement similaire dans le domaine fréquentiel. La simulation va vérifier l'aptitude, la réaction et la précision du modèle avec la littérature.

Cependant, il faut noter que la précision et le temps de calcul dépendent du nombre d'harmoniques spatiales considérés dans les différentes régions de la machine. Plus le nombre d'harmoniques est élevé plus la précision augmente et plus le temps de calcul augmente. Ce travail a été pris en considérant ces paramètres intéressants.

L'objet de cette partie consiste donc à présenter un nouveau modèle analytique dédié à la détection du défaut de roulement. La base du modèle s'appuie sur le calcul analytique de la fonction de l'entrefer et de la perméance pour avoir les inductances de la machine asynchrone. Dans un second temps, une phase de validation par simulation (confirmation de l'exactitude du modèle), qui a l'objectif de présenter les différentes grandeurs électromécaniques, sera étudiée. Dans ce chapitre, nous allons traiter le défaut de roulement expérimentalement par la méthode de MCSA-FFT, cette analyse nous aidera à confirmer l'étude analytique.

III.2.2 Contraintes de charges avec un défaut dans la bague externe

Le roulement, est l'organe qui assure la rotation et la fixation de l'arbre rotorique à travers les flasques. Il possède un pourcentage de défaillances important selon la littérature ; il atteint la valeur de 41% ou plus. Les défauts de roulement à billes sont détectés à partir de plusieurs méthodes de diagnostics. Parmi celles-ci, on cite l'analyse spectrale des signaux : acoustiques, vibratoires ou électromécaniques.

En fonctionnement normal en charge, les surfaces actives d'un roulement sont soumises à des contraintes alternées très élevées dues aux passages successifs des corps roulants sur les chemins. Les contraintes finissent par une création, à plus ou moins long terme, de fissurations par fatigue de la matière [BES15-1].

Dans cet exemple, nous allons calculer les inductances mutuelles entre les phases statoriques et les mailles rotoriques pour un défaut de la bague externe du roulement. Notre

proposition se base sur un petit trou (eg. écaillage, fissure, ...) dans la bague extérieure qui se transforme par un mauvais contact des billes pendant le fonctionnement de la machine (figure III-1). Le chemin de roulement se trouve alors endommagé, le roulement perd rapidement de ses propriétés initiales, et n'est donc plus en mesure d'assurer son service surtout en état de fonctionnement où se trouve les contraintes [BES15-1], [BES16-4].

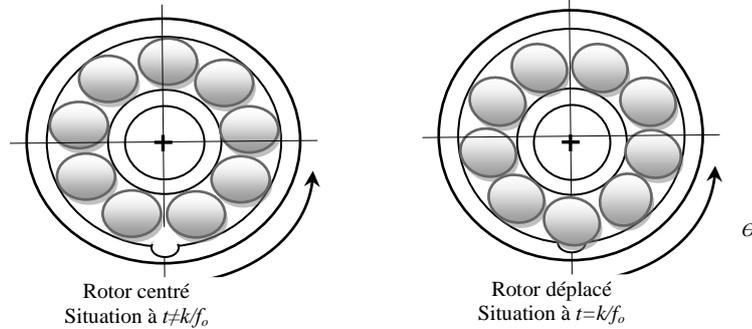


Figure III.1. Position du rotor avec le mouvement des billes.

avec,

f_o est la fréquence caractéristique du défaut de la bague extérieure.

k est un nombre entier.

Le type de contrainte doit être radial, axial ou mixte; Le problème posé par ce phénomène de fatigue est son aspect aléatoire, rend l'étude difficile [BES15-1]. La figure (III-2) illustre l'influence de la charge appliquée de type purement radial.

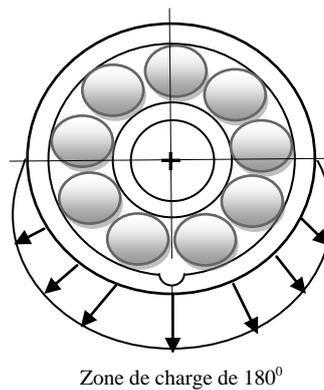


Figure III.2. Contrainte radiale de la charge appliquée.

III.2.3 Développement de la fonction de la perméance

Ce travail propose une nouvelle modélisation de coups successifs des billes pendant le fonctionnement que peut représenter la variation d'entrefer. La figure (III-3) illustre le

nouveau schéma de la bille à la proximité du trou. Ces formes montrent les étapes pour conclure à une forme simplifiée et adéquate avec notre modèle [BES16-4].

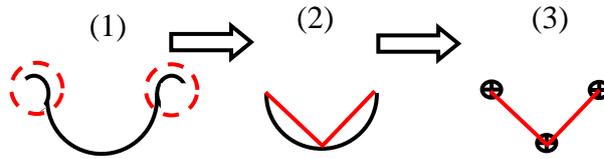


Figure III.3. Schéma d'une bille autour d'un petit trou dans la bague extérieure.

Nous allons utiliser la forme triangulaire; le modèle a une profondeur (δg_o) et une largeur (α). Les dimensions du triangle dépendent de la sévérité des piqûres, pour cette raison, nous pouvons représenter notre signal d'entrefer en fonction de ' g_o ' dans la figure (III-4).

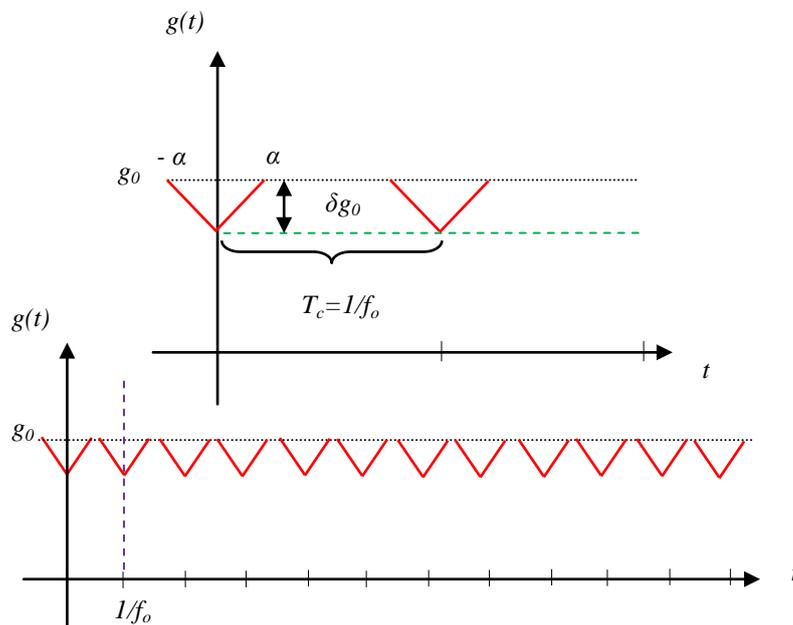


Figure III.4. Forme du signal triangulaire en présence d'un défaut de la bague extérieure (DBE).

avec,

g_o est la valeur d'entrefer à l'état sain.

g est la fonction d'entrefer en fonction du temps.

α est la largeur de petit trou.

L'entrefer d'une machine asynchrone défectueuse, au niveau du défaut de roulement, sera systématiquement changé; cette modification montrera des nouveaux pics importants dans le spectre du courant statorique et une vibration indésirable pour les utilisateurs.

Le défaut de roulement est l'une des principales causes de l'excentricité, telles que, un DBE se traduit par une excentricité statique (ES); et un défaut dans la bague intérieure (DBI) se traduit par une excentricité dynamique (ED) [BES15-1], [BES16-4].

Pour un défaut de roulement, la fonction de l'entrefer dépend de l'excentricité statique ou dynamique ; et aussi par la forme du signal triangulaire qui est répété n fois. Donc, nous pouvons écrire l'expression de la fonction d'entrefer comme suit [BES16-4]:

$$g(\varphi, \theta_r) = g_0 \cdot \left[1 - \delta \cos(\varphi + \psi(t)) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{tri} \left(\frac{t - nT_c}{\alpha} \right) \right] \quad (\text{III. 1})$$

où $T_c = 1/f_c$ est la période caractéristique du défaut de roulement donnée par les formules (I.11), (I.12), (I.13) et (I.14) ; δ est le degré d'excentricité statique ou dynamique, α est la largeur du trou, et $\psi(t)$ est définie comme suit [BES16-4]:

$$\psi(t) = \begin{cases} 0 & \text{Pour un DBE} \\ \omega_r t & \text{Pour un DBI} \\ \omega_{\text{cage}} t & \text{Pour un DB} \end{cases} \quad (\text{III. 2})$$

La transformée en séries de Fourier nous conduit à écrire le signal de répétition triangulaire par:

$$\text{rep}_{T_c} \left(\text{tri} \left(\frac{t}{\alpha} \right) \right) = \frac{\alpha}{T_c} + \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\frac{\pi}{[4(2n+1)]^2} \right) \cos[(2n+1)2\pi f_c t] \quad (\text{III. 3})$$

En remplaçant (III.3) dans (III.1), on trouve :

$$g(\theta, \theta_r) = g_0 \cdot \left[1 - \delta \cos(\varphi + \psi(t)) \left(\frac{\alpha}{T_c} + \frac{\pi}{16} \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\frac{1}{(2n+1)^2} \right) \cos[(2n+1)2\pi f_c t] \right) \right] \quad (\text{III. 4})$$

La nouvelle fonction d'entrefer peut s'écrire donc, sous la forme suivante [BES16-4]:

$$g(\theta, \theta_r) = g_0 \cdot \left[1 - \delta \cos(\varphi + \psi(t)) \left(\frac{\alpha}{T_c} + \frac{\pi}{16} \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\frac{1}{(2n+1)^2} \right) \cos[(2n+1)2\pi f_c t] \right) \right] \quad (\text{III. 5})$$

L'analyse théorique est basée sur la détermination de la longueur d'entrefer g et la perméance Λ (l'inverse de g) qui sont en fonction du temps t et la position φ .

La perméance Λ est proportionnelle à l'inverse de la longueur entrefer g et nous pouvons l'écrire comme suit:

$$\Lambda(\varphi, \theta_r) = \frac{\mu}{g(\varphi, \theta_r)} \quad (\text{III. 6})$$

Avec, $\mu = \mu_0 \mu_r$ et la perméance s'écrit:

$$\Lambda(\varphi, \theta_r) = \Lambda_0 \cdot \frac{1}{\left[1 - \delta \cos(\varphi + \psi(t)) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{tri} \left(\frac{t - nT_c}{\alpha} \right) \right]} \quad (\text{III. 7})$$

$$\text{où, } \Lambda_0 = \frac{\mu}{g_0} \quad (\text{III. 8})$$

Le rapport $1/(1-x)$ est approximé pour des petites variations d'entrefer au terme du premier degré de son développement en série polynomiale, comme suit :

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + \dots \approx 1 + x, \quad \text{pour } |x| \ll 1 \quad (\text{III. 9})$$

On combine les équations (III.7) avec (III.9), on trouve l'expression de la fonction de la perméance comme suit:

$$\Lambda(\varphi, \theta_r) = \Lambda_0 \cdot \left[1 + \delta \cos(\varphi + \psi(t)) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{tri} \left(\frac{t - nT_c}{\alpha} \right) \right] \quad (\text{III. 10})$$

ou,

$$\Lambda(\varphi, \theta_r) = \Lambda_0 \cdot \left[1 + \delta \cos(\varphi + \psi(t)) \left(\frac{\alpha}{T_c} + \frac{\pi}{16} \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\frac{1}{(2n+1)^2} \right) \cos[(2n+1)2\pi f_c t] \right) \right] \quad (\text{III. 11})$$

et pour notre cas du DBE, on écrit :

$$\Lambda(\varphi, \theta_r) = \Lambda_0 \cdot \left[1 + \delta_s \cos(\varphi) \left(\frac{\alpha}{T_c} + \frac{\pi}{16} \sum_{n=0}^{+\infty} \left(\frac{1}{(2n+1)^2} \right) \cos[(2n+1)2\pi f_c t] \right) \right] \quad (\text{III. 12})$$

III.2.4 Discussion des études antérieures

Il est difficile de simuler ce défaut par les formules qui ont été indiquées par [MCF84], [BLO08] et [BES15-1] en raison des points suivants:

Tout d'abord, l'étape qui transforme l'opération des coups de la bille avec la bague extérieure afin de trouver l'impulsion de Dirac, est une bonne idée. Mais, les processus qui surviennent après, génèrent des erreurs ou des problèmes. On voit que les indices de la somme des deux termes (à droite et à gauche) de l'équation (III.13) ne sont pas les mêmes. Cette équation a été développée par [BLO08] est écrite comme suit:

$$\sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta\left(t - \frac{m}{f_c}\right) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} c_m e^{-j2\pi m f_c t} = c_0 + 2 \sum_{l=1}^{+\infty} c_l \cos(2\pi l f_c t) \quad (\text{III. 13})$$

Pour le terme à gauche: 'm' représente le nombre de coups de chaque bille; mais, l'indice de la somme 'l' (à droite) ne représente pas cette situation physique ; 'l' dans ce cas, est un indice qui vérifie l'égalité mathématique seulement.

La seconde raison, indique que l'équation (III.13) ne permet pas de s'arrêter à une valeur de l'indice spécifique. D'autre part, le nombre $c_l = f_c$ ($\forall l$) qui est multiplié par 'cos' ou 'sin' possède une valeur considérable, tel que, les coefficients ne tendent pas vers zéro,

simultanément avec l'augmentation de l'ordre d'harmonique. Le problème rencontré ici, est l'impossibilité de tronquer l'ordre d'harmonique pour compléter la tâche de la simulation.

Nous proposons maintenant une nouvelle idée qui simule l'existence du défaut de roulement avec une précision. Dans notre étude, nous ne considérons pas une impulsion de Dirac pour représenter le phénomène du défaut de roulement (coups des billes). On a schématisé celle-ci par la figure (III-4) qui traduit le plus réel possible les coups des billes.

III.2.5 Calcul de l'inductance mutuelle stator-rotor

Pour développer les nouvelles fonctions d'enroulements modifiées [BES07], [BES15-1], [BES16-4], on remplace la fonction de la perméance dans tous les calculs.

Après le développement, on trouve [BES16-4]:

$$\begin{aligned}
L_{sqri}(\theta_r) = \frac{\mu_0 r l}{g_0} & \left\{ \left(\frac{4N_t}{\pi p} \right) \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h^2 \cdot p} \sin \left(hp \cdot \frac{\alpha_r}{2} \right) \cos \left[hp(\theta_r - \theta_0 - q \frac{2\pi}{3p} + (i - \frac{1}{2})\alpha_r) \right] \right. \\
& + \lambda_{co} \delta_s \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \cdot \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h \cdot (hp+1)} \sin \left((hp+1) \cdot \frac{\alpha_r}{2} \right) \cos \left[(hp+1)\theta_r + (hp+1)(i - \frac{1}{2})\alpha_r - hp(\theta_0 - q \frac{2\pi}{3p}) \right] \\
& + \lambda_{co} \delta_s \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \cdot \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h \cdot (hp-1)} \sin \left((hp-1) \cdot \frac{\alpha_r}{2} \right) \cos \left[(hp-1)\theta_r + (hp-1)(i - \frac{1}{2})\alpha_r - hp(\theta_0 - q \frac{2\pi}{3p}) \right] \\
& + \frac{\delta_s \pi}{16} \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \cdot \cos(\lambda_c \theta_r) \times \\
& \quad \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h \cdot (hp+1)} \sin \left((hp+1) \cdot \frac{\alpha_r}{2} \right) \cos \left[(hp+1)\theta_r + (hp+1)(i - \frac{1}{2})\alpha_r - hp(\theta_0 - q \frac{2\pi}{3p}) \right] \\
& + \frac{\delta_s \pi}{16} \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \cdot \cos(\lambda_c \theta_r) \times \\
& \quad \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h \cdot (hp-1)} \sin \left((hp-1) \cdot \frac{\alpha_r}{2} \right) \cos \left[(hp-1)\theta_r + (hp-1)(i - \frac{1}{2})\alpha_r - hp(\theta_0 - q \frac{2\pi}{3p}) \right] \\
& + \delta_s \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{[4(2n+1)]^2} \cos[(2n+1)\lambda_c \theta_r] \times \\
& \quad \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h \cdot (hp+1)} \sin \left((hp+1) \cdot \frac{\alpha_r}{2} \right) \cos \left[(hp+1)\theta_r + (hp+1)(i - \frac{1}{2})\alpha_r - hp(\theta_0 - q \frac{2\pi}{3p}) \right] \\
& + \delta_s \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{[4(2n+1)]^2} \cos[(2n+1)\lambda_c \theta_r] \times \\
& \quad \left. \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h \cdot (hp-1)} \sin \left((hp-1) \cdot \frac{\alpha_r}{2} \right) \cos \left[(hp-1)\theta_r + (hp-1)(i - \frac{1}{2})\alpha_r - hp(\theta_0 - q \frac{2\pi}{3p}) \right] \right\} \tag{III. 14}
\end{aligned}$$

avec,

$$\lambda_{co} = \frac{\alpha}{T_c} = \alpha \cdot f_c \text{ et } \lambda_c = 0.4N_b$$

r : Le rayon moyen de la machine.

l : La longueur de la machine.

p : Le nombre de paire de pôle.

N_t : Le nombre de spire en série par phase.

K_{bh} : Le coefficient de bobinage.

$$\theta_0 = (Ne - 1 + Q) \frac{\pi}{N_s}$$

N_e : Le nombre d'encoche par pôle et par phase.

N_s : Le nombre d'encoche statorique.

Q : Le nombre de dents par pas d'enroulement.

n_b : Le nombre de barres du rotor.

$$\alpha_r = \frac{2\pi}{n_b} : \text{L'ouverture d'une maille rotorique.}$$

La figure (III-5) et la figure (III-6) montrent l'évolution des inductances mutuelles en présence de DBE. Nous avons étudié l'influence des dimensions de petit trou (profondeur et largeur) sur la forme de l'inductance mutuelle par des différentes valeurs de ' δ ' et ' α '. L'évolution des déformations de L_{sr} dû au DBE est claire.

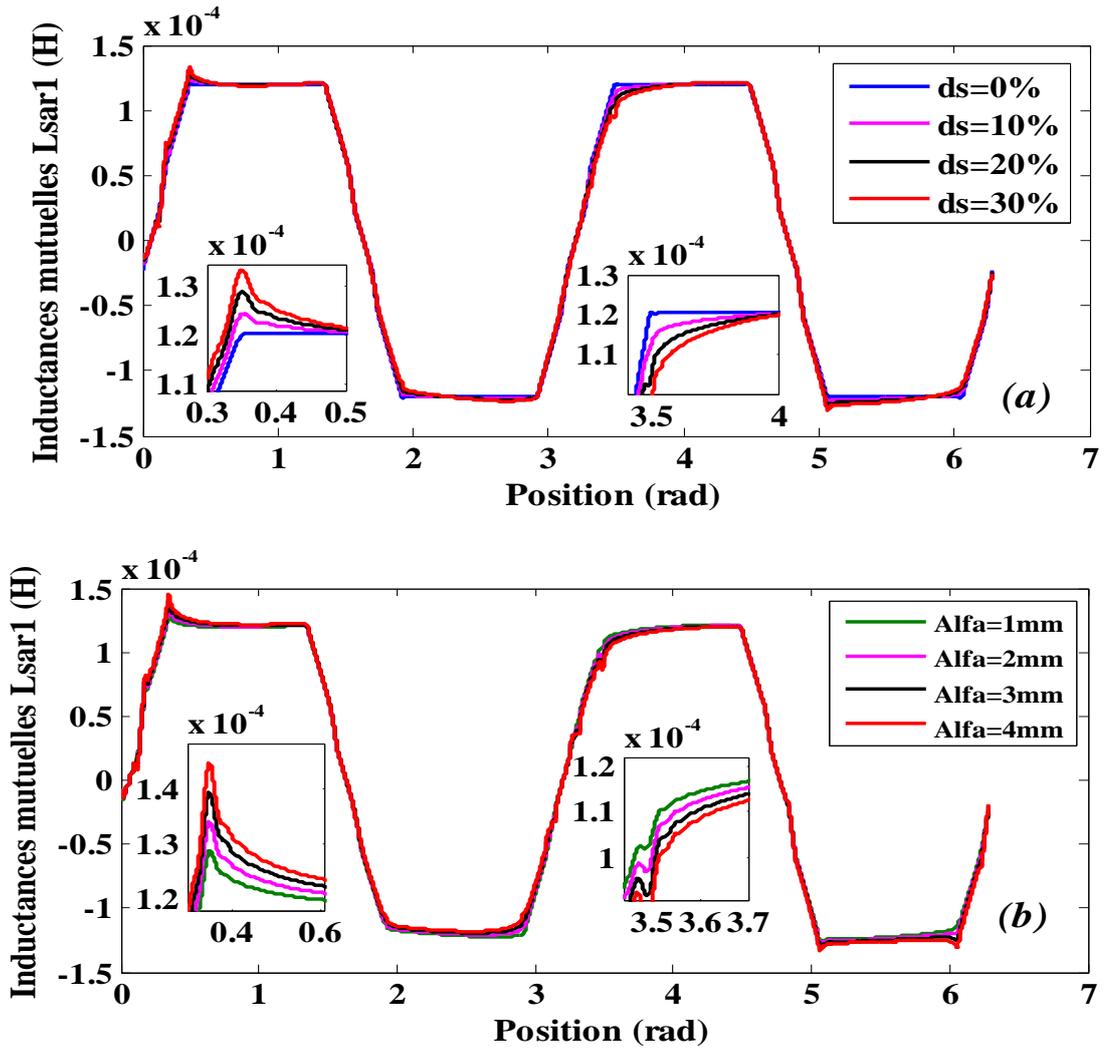


Figure III.5. Evolution des inductances mutuelles stator-rotor ; (a): $L_{sr}=f(\delta_s)$, $\alpha=\text{constant}=1\text{mm}$, (b): $L_{sr}=f(\alpha)$, $\delta_s=\text{constant}=20\%$.

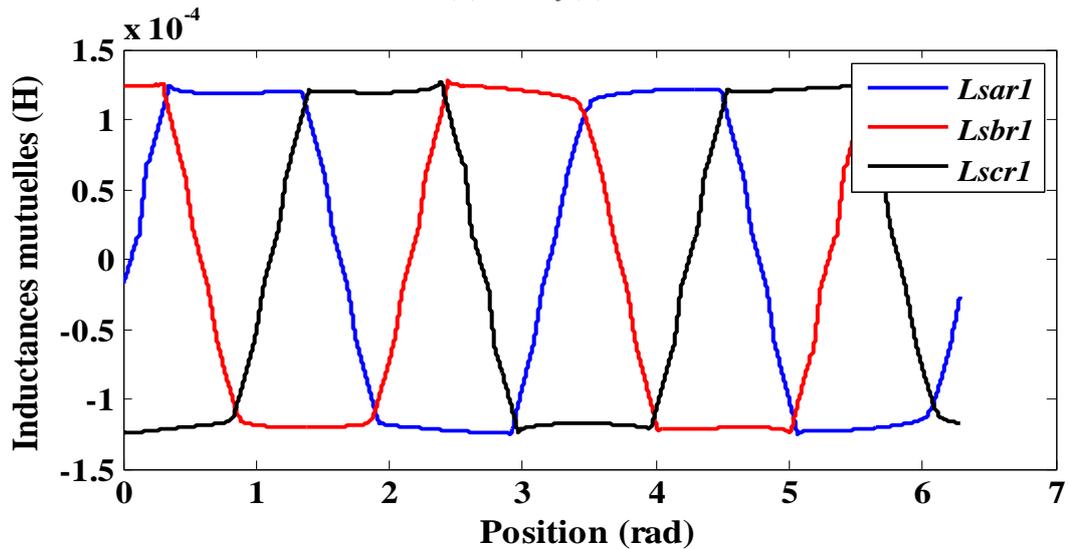


Figure III.6. Inductances mutuelles entre les phases a, b, c et une maille rotorique pour $\alpha=0.1$ mm et $\delta_s=20\%$.

III.2.6 Simulation da MAS en présence de DBE

Afin de valider le modèle, on simule une MAS (la machine de simulation possède, presque, les mêmes caractéristiques de la machine utilisée dans le banc d'essai) dont les paramètres sont donnés dans l'annexe A. Ce défaut sera analysé aussi en détail expérimentalement pour comparer et confirmer ces résultats analytique. Cette machine asynchrone à cage d'écureuil comporte 3 phases, 28 barres de rotor, 36 encoches, 4 pôles et $f_s = 50$ Hz. On va simuler le modèle avec un pas de calcul de 10^{-4} pendant un temps de 10s (100000 points). Le logiciel de simulation utilisé, est Matlab.

Dans un premier temps, le moteur à induction triphasé fonctionne à vide ($s=0.0002$), et après, il va fonctionner en charge ($s \approx 0.0566$, $C_e = T_e = 20$ N.m).

La vitesse mécanique, le couple électromagnétique et le courant statorique en fonction du temps sont présentés dans les figures (III-7) et (III-8).

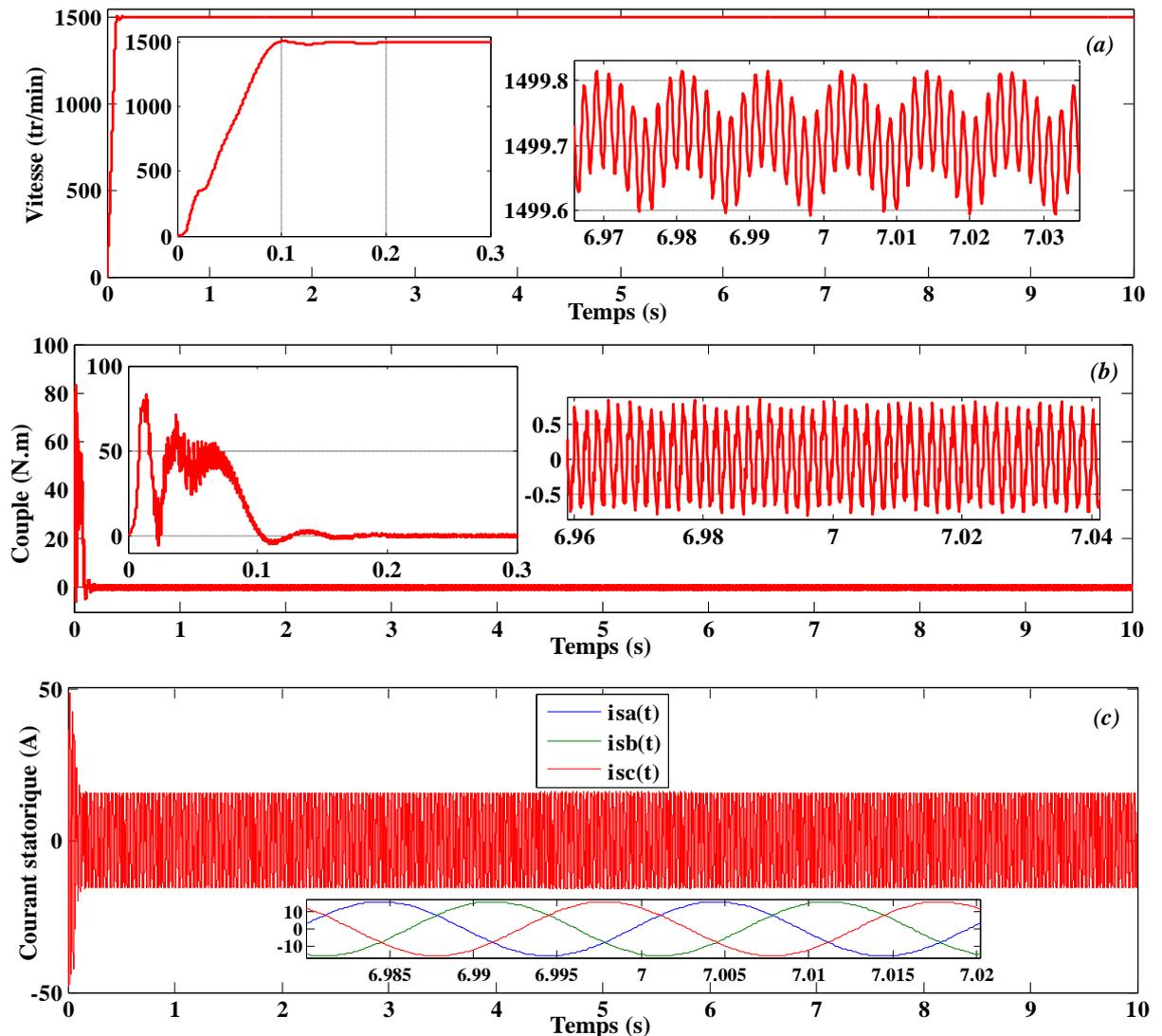


Figure III.7. Grandeurs électromécanique "fonctionnement à vide"; (a): Vitesse de rotation (b): Couple électromagnétique, (c): Courant statorique.

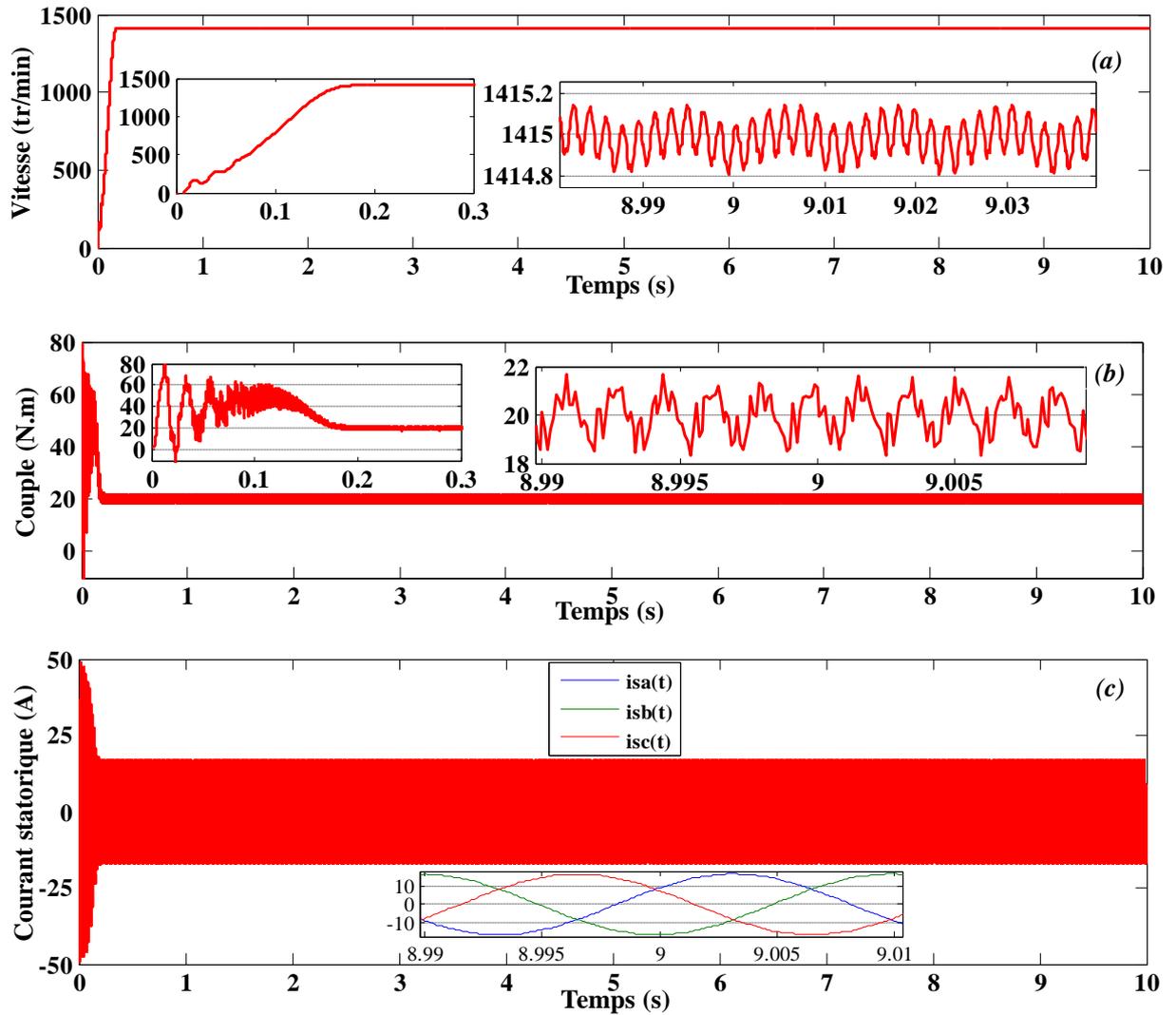


Figure III.8. Grandeur électromécanique “fonctionnement en charge”; (a): Vitesse de rotation (b): Couple électromagnétique, (c): Courant statorique.

Les résultats de simulation, nous amènent à vérifier plusieurs points essentiels qui contribuent au diagnostic des machines asynchrones.

On essaye dans cette partie de vérifier nos résultats par la méthode de MCSA; conformément à l'équation (I.24) qui s'intéresse au calcul des fréquences caractéristiques des défauts de roulement. Avant tout, on calcule la valeur de f_r qui est pour les deux fonctionnements comme suit:

$$f_r = \frac{(1-s)}{p} \cdot f_s = \begin{cases} 24.995 & \text{à vide} \\ 23.583 & \text{en charge} \end{cases}$$

Les harmoniques d'encoches rotoriques (*HERs* ou *RSHs* « rotor slot harmonics » en Anglais) peuvent être calculés théoriquement par le tableau suivant:

Tableau III.1. Valeurs théoriques des *PSHs*.

Fonct. à vide (s=0.0002) v=1 et λ=1, 2. $RSHs = \left(\frac{\lambda n_b (1-s)}{p} \pm v \right) \cdot f_s$	Fonct. en charge (s=0.0566), v=1 et λ=1, 2. $RSHs = \left(\frac{\lambda n_b (1-s)}{p} \pm v \right) \cdot f_s$
$PSH_1^- = (14(1-s) - 1) \cdot f_s = 649.86 \text{ Hz}$ "Principal slot harmonic"	$PSH_1^- = (14(1-s) - 1) \cdot f_s = 610.33 \text{ Hz}$ "Principal slot harmonic"
$RSH_2^+ = (28(1-s) + 1) \cdot f_s = 1449.72 \text{ Hz}$	$RSH_2^+ = (28(1-s) + 1) \cdot f_s = 1374.66 \text{ Hz}$

On peut également, indiquer les *RSHs* dans le spectre du courant de statorique. Le tableau ci-dessous résume les fréquences additionnelles qui ont été calculées d'après l'équation (I.24) [BES16-4].

Tableau III.2. Valeurs théoriques des fréquences caractéristiques.

Fonct. à vide (s=0.0002) v=1, 3, 5, ... et k=1, 2, 3, 4, ... $f_{caract-be} = v f_s \pm 0.4 N_b k \times f_r$	Fonct. en charge (s=0.0566), v=1, 3, 5, ... et k=1, 2, 3, 4, ... $f_{caract-be} = v f_s \pm 0.4 N_b k \times f_r$
$f_{caract-be-1} = f_s - 0.4 N_b \times f_r = 39.982 \text{ Hz}$	$f_{caract-be-1} = f_s - 0.4 N_b \times f_r = 34.898 \text{ Hz}$
$f_{caract-be-2} = f_s + 0.4 N_b \times f_r = 139.982 \text{ Hz}$	$f_{caract-be-2} = f_s + 0.4 N_b \times f_r = 134.898 \text{ Hz}$
$f_{caract-be-3} = f_s - 0.4 N_b (2) \times f_r = 129.964 \text{ Hz}$ $f_{caract-be-4} = f_s + 0.4 N_b (2) \times f_r = 229.964 \text{ Hz}$	$f_{caract-be-3} = f_s - 0.4 N_b (2) \times f_r = 119.797 \text{ Hz}$ $f_{caract-be-4} = f_s + 0.4 N_b (2) \times f_r = 219.797 \text{ Hz}$
$f_{caract-be-5} = 13 f_s + 0.4 N_b \times f_r = 739.982 \text{ Hz}$	$f_{caract-be-5} = 19 f_s - 0.4 N_b (3) \times f_r = 695.303 \text{ Hz}$
$f_{caract-be-6} = 13 f_s + 0.4 N_b (2) \times f_r = 829.964 \text{ Hz}$	$f_{caract-be-6} = 19 f_s - 0.4 N_b (2) \times f_r = 780.202 \text{ Hz}$

En outre, le spectre du courant statorique est montré sur la figure (III-9) et la figure (III-10) en comparant les résultats avec ceux qui sont indiquées au tableau (III.2), on trouve une excellente concordance avec la représentation spectrale du courant. Un accord complet avec l'expérimentation d'après la littérature tout en utilisant la même machine [BES15-2], [BES16-1], [BES16-4].

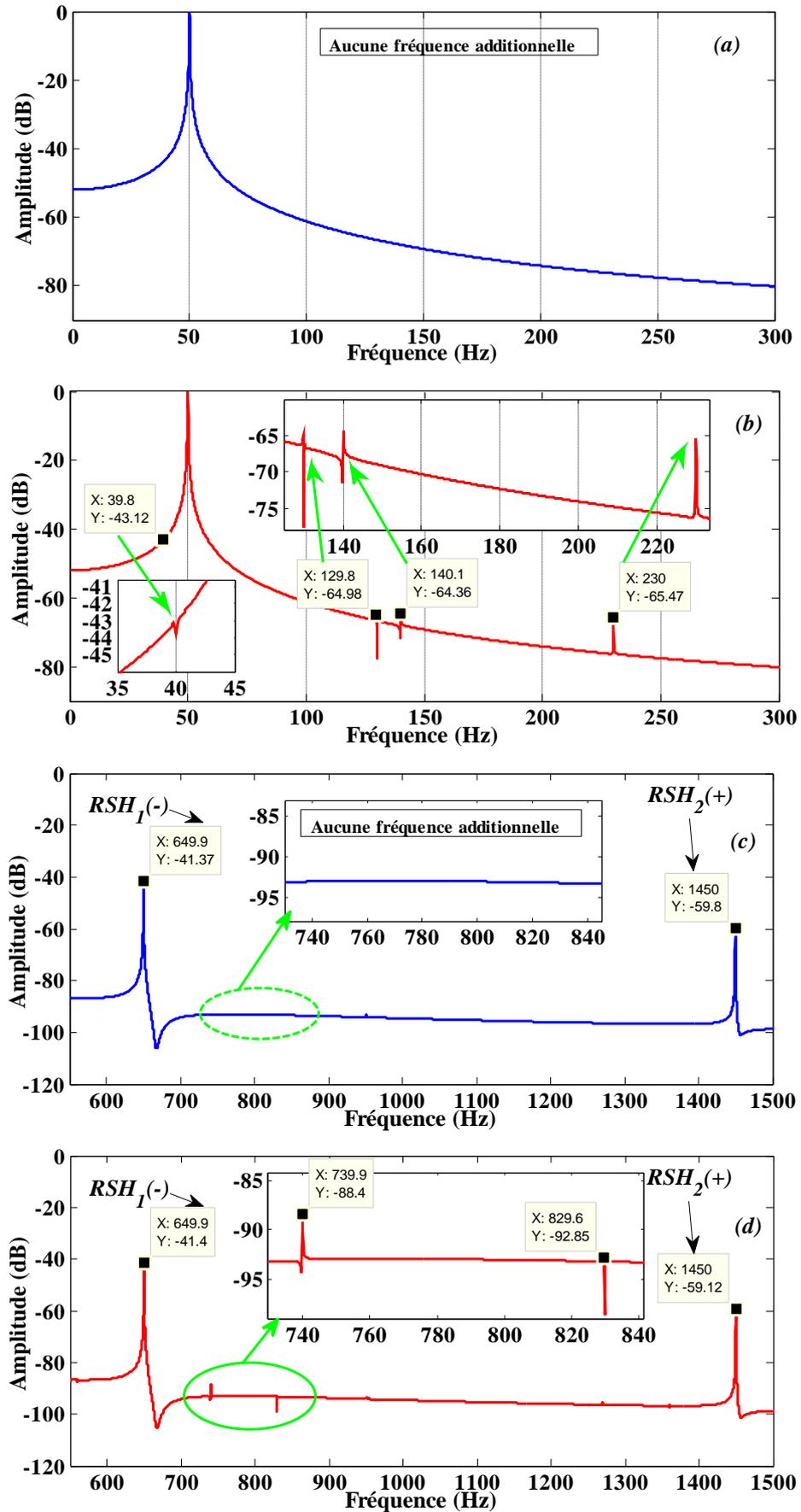


Figure III.9. Spectre du courant statorique par simulation "fonctionnement à vide" ; (a) et (b) Bande: 0-300 Hz, (c) et (d) Bande: 550-1500Hz.

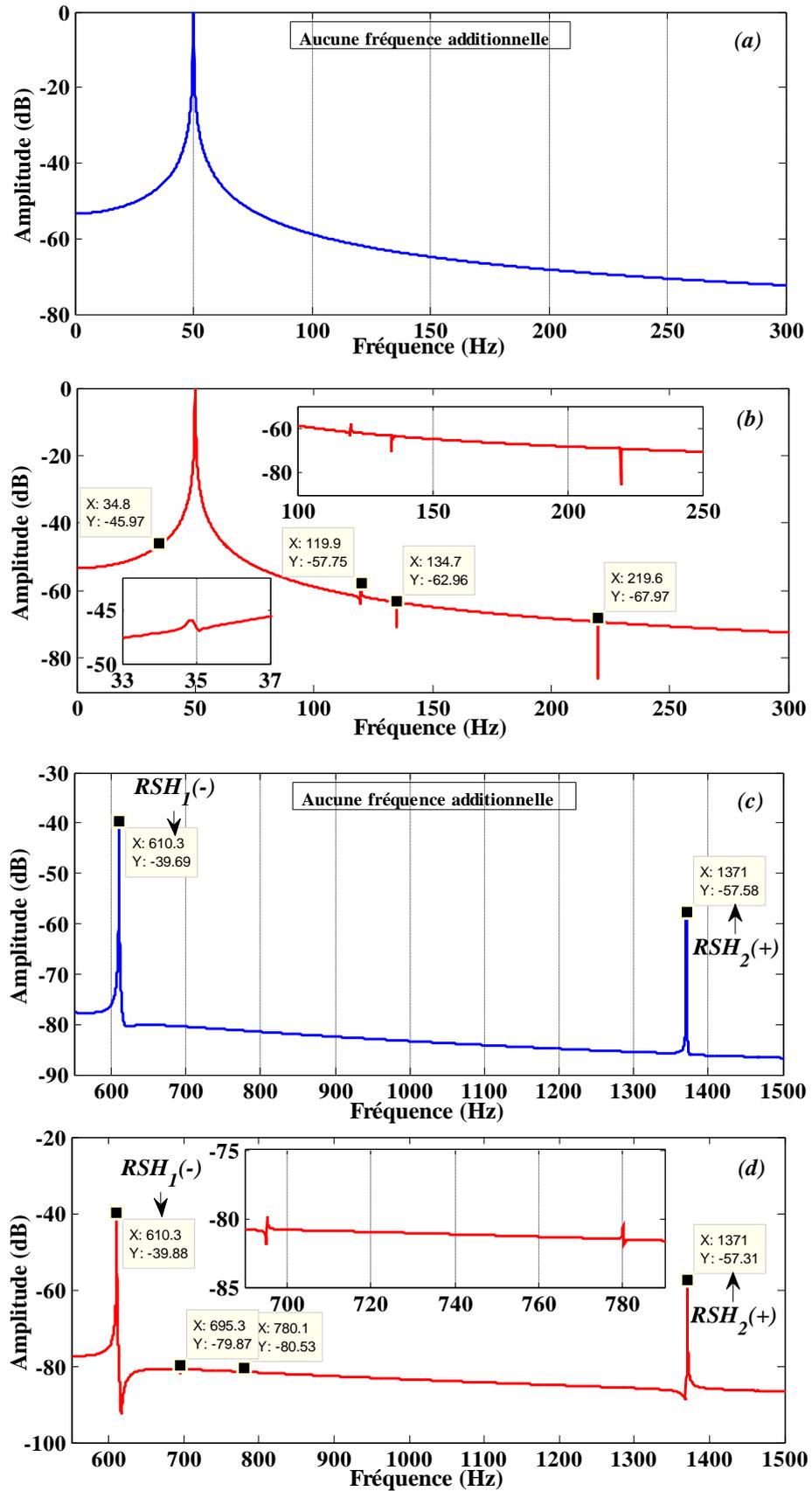


Figure III.10. Spectre du courant statorique par simulation “fonctionnement en charge” ; (a) et (b) Bande: 0-300 Hz, (c) et (d) Bande: 550-1500Hz.

La MCSA-FFT, est utilisée pour tester l'efficacité du nouveau modèle sous un défaut dans la bague externe (DBE). Nous avons comparé les résultats de simulation et le contenu spectral du courant statorique afin d'examiner l'exactitude et les indicateurs du défaut. La comparaison entre les valeurs théoriques des fréquences caractéristiques dans le tableau (III.2) et les valeurs trouvées par simulation montre une bonne correspondance.

Afin de confirmer l'exactitude et l'aptitude de notre modèle analytique vis-à-vis des défauts de la machine asynchrone ; une présentation détaillée des résultats expérimentaux sera présentée par la suite.

III.3 ANALYSE DU DEFAUT DE ROULEMENT EXPERIMENTALEMENT

III.3.1 Résultats expérimentaux dédiés au défaut de la bague extérieure du roulement

De nombreux types de défauts mécaniques engendrent des oscillations du couple de charge appliqué à la machine asynchrone [IBR09]. Nous allons donc étudier les effets de variations périodiques du couple de charge sur le courant statorique de la machine sous un défaut de la bague extérieure du roulement. La figure (III-11) illustre une photographie d'un roulement défectueux au niveau de la bague externe. Ce roulement sera remonté dans la MAS coté charge. Il appartient à la série de 6206, qu'elle impose les fréquences caractéristiques indiquées au tableau (I.1) ou par les équations citées au premier chapitre.



Figure III.11. Photos d'un roulement défectueux dans la BE.

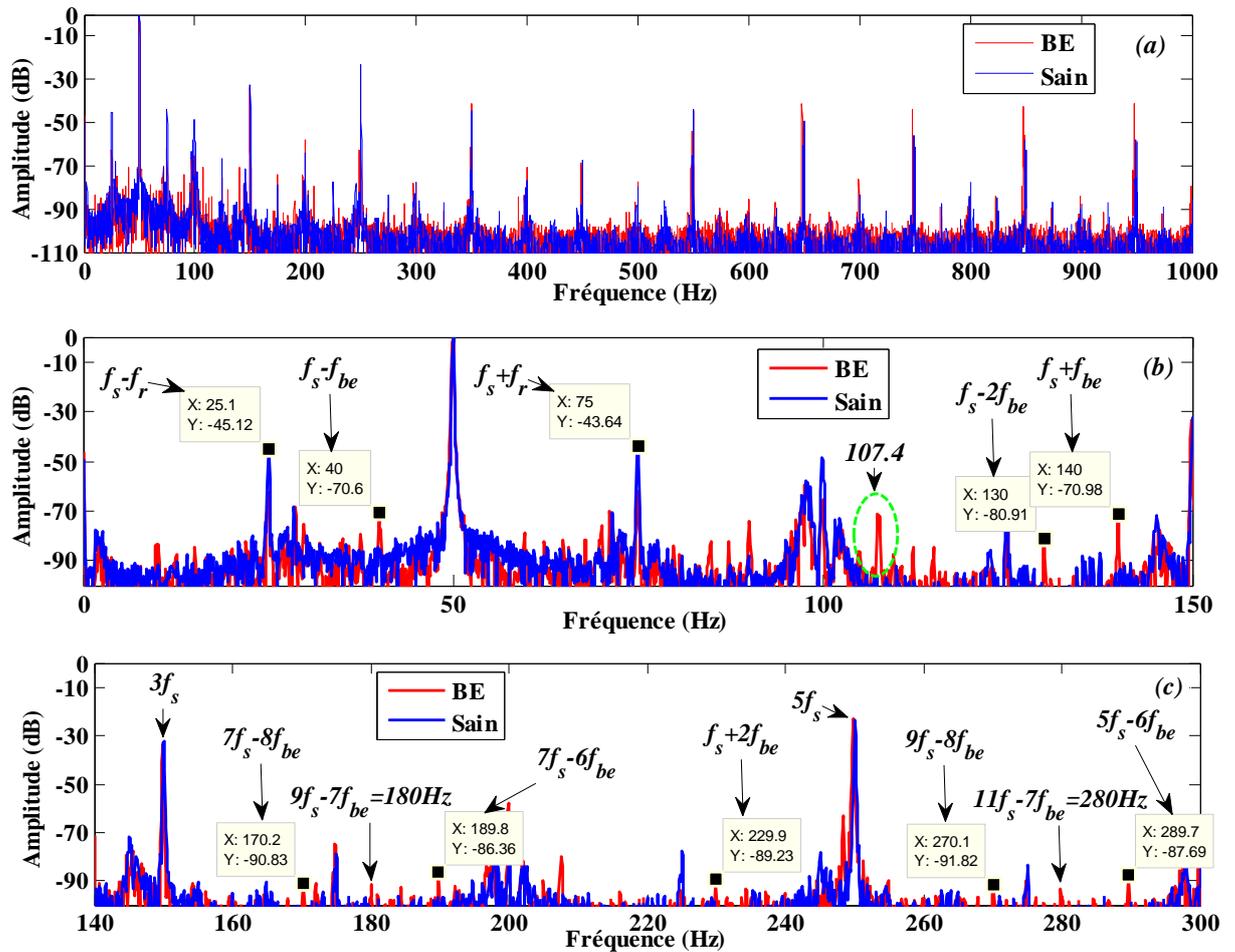
Le spectre du courant statoriques de la MAS, comme nous l'avons vu, en absence et en présence d'un défaut est très riche en harmoniques. En effet, les fréquences présentées dans ce spectre sont principalement les raies spectrales liées à la fréquence de défaut de roulement par :

$$f_{\text{caract-be,bi,cage,bille}} = \left| \nu f_s \pm k f_{\text{be,bi,cage,bille}} \right| \quad (\text{III. 15})$$

Nous allons analyser le contenu du spectre du courant statorique en régime permanent dans les deux états, sain et défectueux d'un défaut dans la BE.

La figure (III-12) et la figure (III-13) représentent respectivement le contenu spectral du courant statorique du MAS pour les deux fonctionnements : à vide ($s=0.004 \approx 0$) et en charge ($s=0.04$).

On remarque, clairement, la présence d'harmoniques dus au défaut de la BE. Si nous portons notre attention sur le spectre du courant statorique à l'état sain ou défectueux.



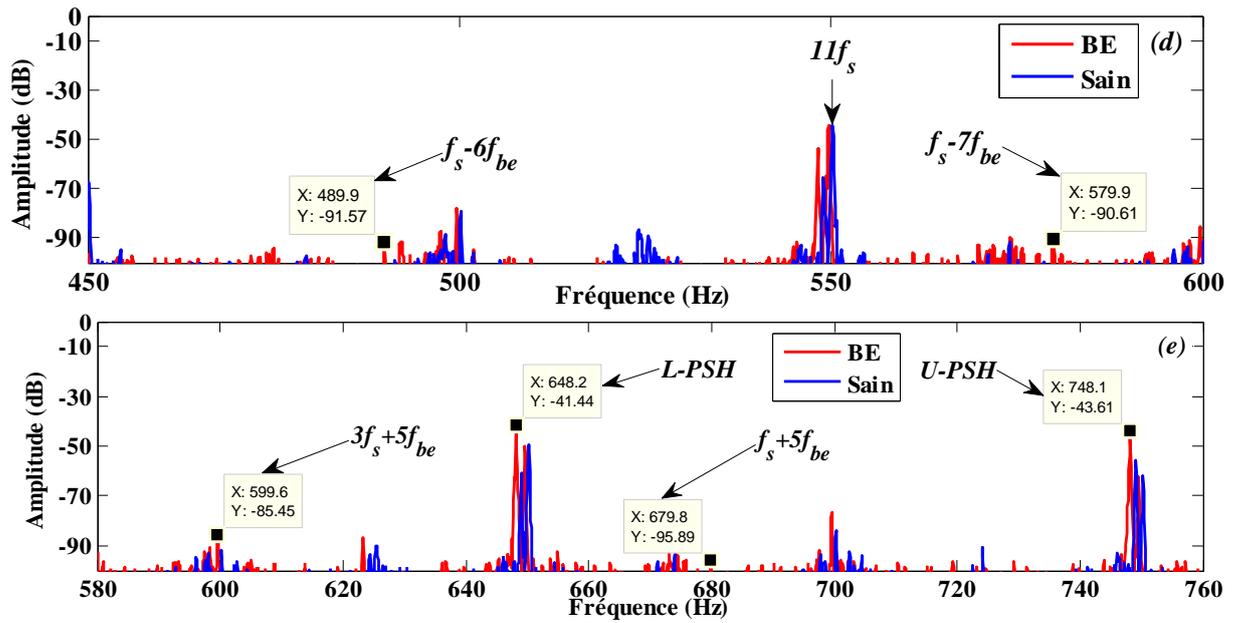
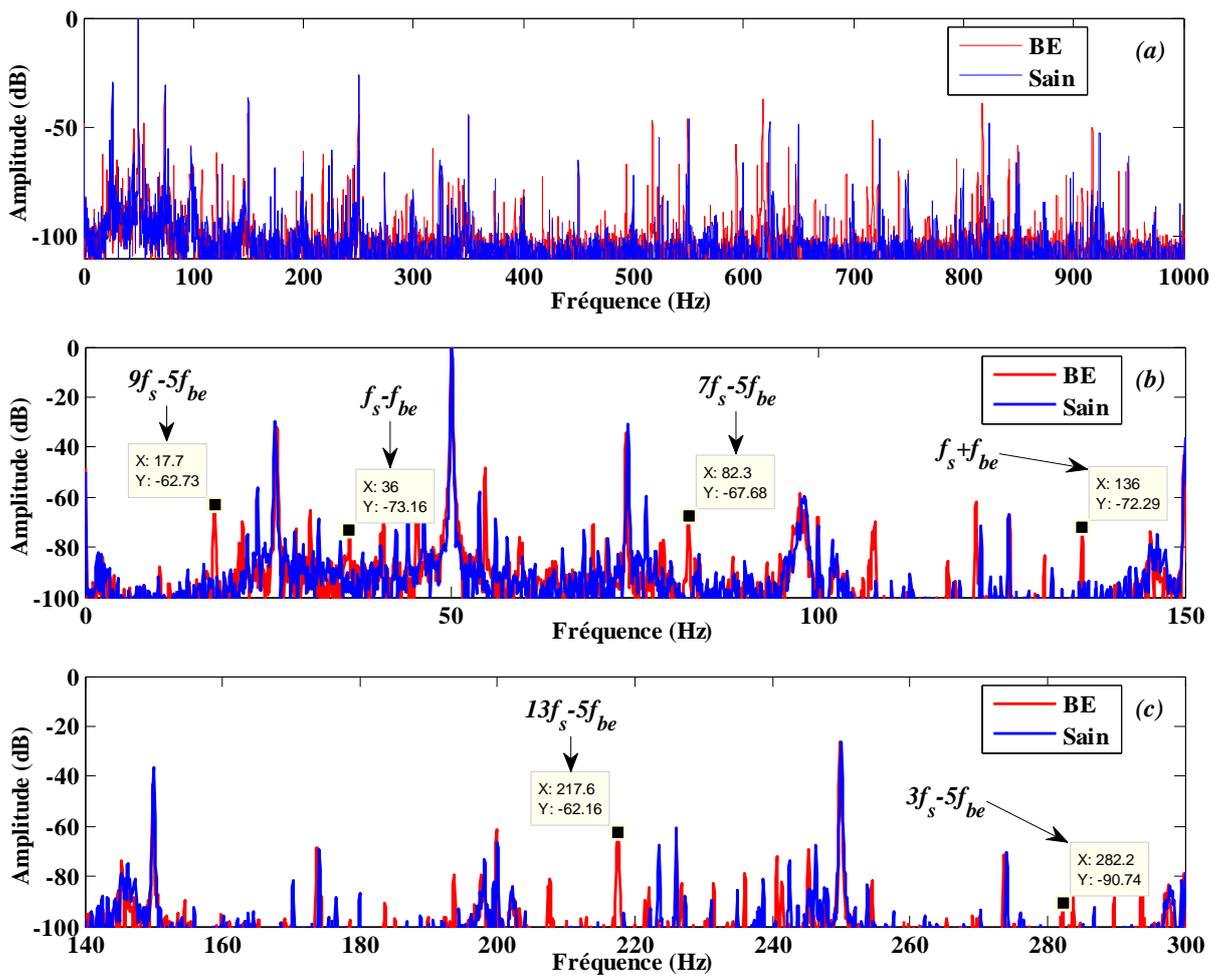


Figure III.12. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BE, $s \approx 0$) (a) : 0-1000Hz, (b) : 0-150Hz, (c) : 140-300 Hz, (d) : 450-600 Hz, (e) : Autour des *PSHs*.



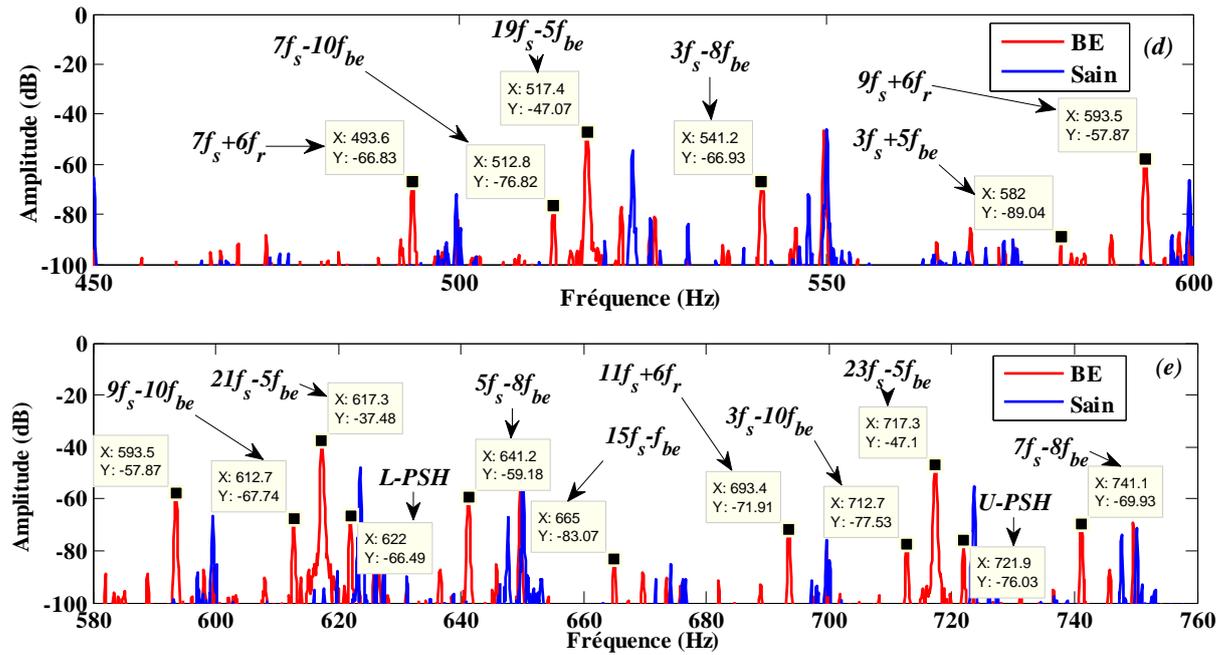


Figure III.13. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BE, $s=0.04$) (a) : 0-1000Hz, (b) : 0-150Hz, (c) : 140-300 Hz, (d) : 450-600 Hz, (e) : Autour des PSHs.

Premièrement, et d'après la *figure (III-12)*, on note les fréquences caractéristiques du défaut d'excentricité mixte autour de la fondamentale : $f_s - f_r = 25.1$ Hz et $f_s + f_r = 75$ Hz. Dans la bande [0-150 Hz] de la figure, nous pouvons remarquer précisément la présence des raies centrées autour du fondamental, dont les fréquences sont en concordance avec la formule des fréquences caractéristiques de l'équation (III-15) ou comme l'indique le tableau (I.1). Les valeurs peuvent s'écrire comme suit :

$$f_{caract-be-1} = f_s - 0.4N_b \times f_r = 40Hz$$

$$f_{caract-be-2} = f_s + 0.4N_b \times f_r = 140Hz$$

$$f_{caract-be-3} = f_s - 0.4N_b(2) \times f_r = 130Hz$$

Aux ordres supérieurs des harmoniques, on a constaté la continuité d'existence de cette série caractérisant le défaut de la BE au long des bandes fréquentielles.

Cette confrontation réussite des tout résultats expérimentaux avec les formules des fréquences caractéristiques du défaut de la BE, nous permet d'assurer l'efficacité de la méthode du diagnostic pour une défaillance dans la BE du roulement. Le tableau ci-dessous représente quelques valeurs de comparaison entre la théorie et l'expérimental pour un fonctionnement à vide ($s \approx 0$).

Tableau III.3. Valeurs théoriques et pratiques des harmoniques (BE, $s=0$).

Formule $f_{\text{caract-be}}^{\pm} = vf_s \pm k \times f_{be} $	Valeurs théoriques [Hz]	Valeurs pratiques [Hz]	Amplitude [dB]
$ f_s - f_{be} $	40	40	-70.6
$ f_s + f_{be} $	140	140	-70.98
$ f_s - 2f_{be} $	130	130	-80.91
$ f_s + 2f_{be} $	230	229.9	-89.23
$ 5f_s - 6f_{be} $	290	289.7	-87.7
$ 7f_s - 6f_{be} $	190	189.8	-86.36
$ 9f_s - 7f_{be} $	180	180	-91.28
$ 9f_s - 8f_{be} $	270	270.1	-91.82
$ f_s - 6f_{be} $	490	489.9	-91.57
$ f_s - 7f_{be} $	580	579.9	-90.61
$ 3f_s + 5f_{be} $	600	599.6	-85.45
$ f_s + 7f_{be} $	680	679.8	-85.89

Deuxièmement, et en présence du glissement, c'est-à-dire d'après la *figure (III-13)*, il est clair que le défaut de la BE a mis son empreinte sur le spectre du courant. Aux alentours de la fréquence fondamentale, on remarque les fréquences qui ont les valeurs :

$$f_{\text{caract-be-1}} = |9f_s - 0.4(5)N_b \times f_r| = 18\text{Hz}$$

$$f_{\text{caract-be-2}} = |7f_s - 0.4(5)N_b \times f_r| = 82\text{Hz}$$

$$f_{\text{caract-be-3}} = f_s - 0.4N_b \times f_r = 36.4\text{Hz}$$

$$f_{\text{caract-be-4}} = f_s + 0.4N_b \times f_r = 136.4\text{Hz}$$

Le défaut de roulement, fait apparaître des composantes dans la partie de fréquences supérieures du spectre de courant statorique. [TRA09] a démontré en basant sur la transformée de Hilbert la cause de l'apparition des ces composantes caractéristiques d'ordre supérieur d'harmonique. Nous avons montré sur la *figure (III-13)* le spectre du courant dans la bande [580-760Hz]. La *figure (III-14)* représente une analyse spectrale du courant dans la bande [1000-1500Hz] ; les raies supplémentaires sont, clairement, apparues.

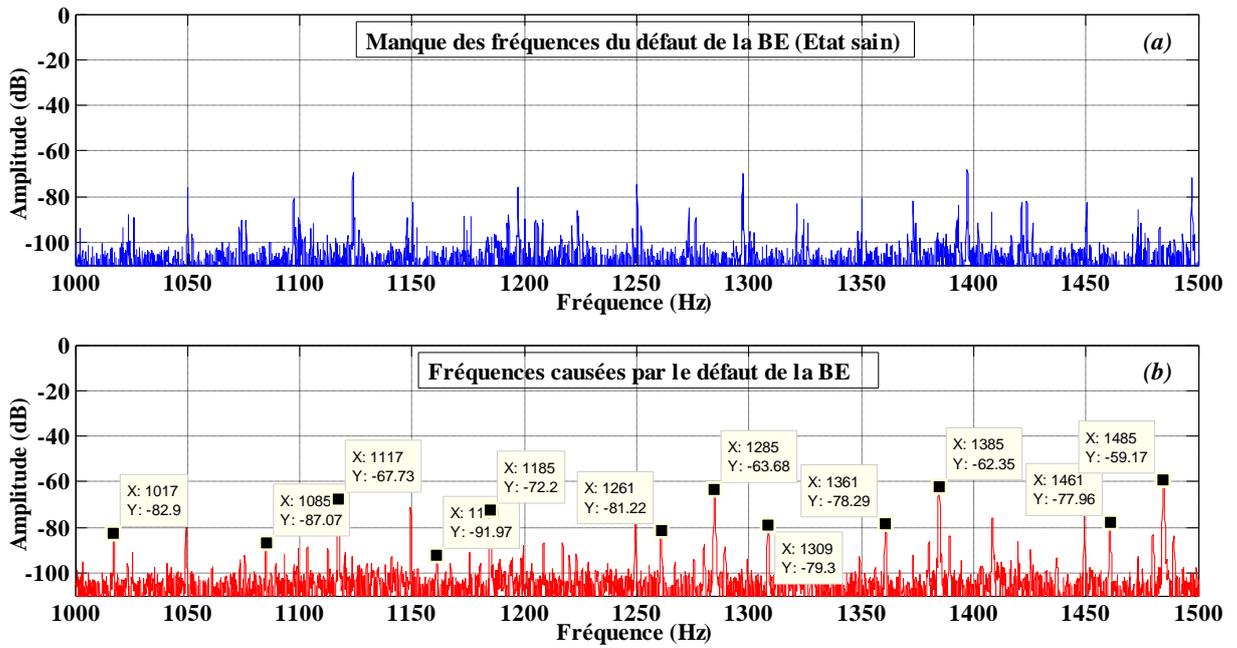


Figure III.14. Spectre du courant statorique pour la bande de 1000-1500Hz ($s \approx 0.04$) ;
(a) : Etat sain, (b) : Etat défectueux (BE).

On remarque l'apparition des raies caractéristiques du défaut de roulement de la bague extérieure situé dans la plage fréquentielle de 1000-1500 Hz, qui ont les valeurs suivantes:

$$f_{\text{caract-be-1}} = |11f_s - 0.4(10)N_b \times f_r| = 712.7\text{Hz}$$

$$f_{\text{caract-be-2}} = |23f_s - 0.4(5)N_b \times f_r| = 717.3\text{Hz}$$

$$f_{\text{caract-be-3}} = |7f_s - 0.4(8)N_b \times f_r| = 741.1\text{Hz}$$

$$f_{\text{caract-be-4}} = |21f_s + 0.4(3)N_b \times f_r| = 1309.2\text{Hz}$$

$$f_{\text{caract-be-5}} = |f_s + 0.4(14)N_b \times f_r| = 1159.6\text{Hz}$$

On peut présenter d'autres fréquences causées par ce défaut dans le tableau (III.4) suivant :

Tableau III.4. Valeurs théoriques et pratiques des harmoniques (BE, $s=0.04$).

Formule $f_{\text{caract-be}}^{\pm} = \nu f_s \pm k \times f_{be} $	Valeurs théoriques [Hz]	Valeurs pratiques [Hz]	Amplitude [dB]
$ 9f_s - 5f_{be} $	18	17.7	-62.73
$ 7f_s - 5f_{be} $	82	82.3	-82.3
$ f_s - f_{be} $	36.4	36	-73.16
$ f_s + f_{be} $	136.4	136	-72.29
$ 13f_s - 5f_{be} $	218	217.6	-62.16
$ 3f_s - 5f_{be} $	282	282.2	-90.74
$ 7f_s - 10f_{be} $	514	512.8	-76.82 → 517.8-2sf _s
$ 19f_s - 5f_{be} $	518	517.4	-47.07 (FBL)
$ 3f_s - 8f_{be} $	541.2	541.2	-66.93 (FBL)
$ 5f_s - 8f_{be} $	641.2	641.2	-37.48 (FBL)
$ 23f_s - 5f_{be} $	718	717.3	-47.1 (FBL)
$ 3f_s - 10f_{be} $	714	712.7	-77.53 = 717.3-2sf _s
$ f_s + 14f_{be} $	1159.6	1161	-91.97
$ 21f_s + 3f_{be} $	1309.2	1309	-79.3

Notre étude a remarqué la série des fréquences additionnelles qui ont des amplitudes sévères le long d'ordre d'harmonique ; ces fréquences sont dues à l'excentricité mixte qui s'écrivent par :

$$f_{\text{Exc-Mix}} = |\nu f_s \pm k f_r| \quad (\text{III. 16})$$

Cette étude est une première approche dans la validation des fréquences caractérisant le défaut de roulement sur un plan d'un nouveau modèle analytique simulé précédemment. En effet ces résultats expérimentaux sont très conformes avec notre simulation présentée auparavant.

Dans cette partie nous avons présenté un modèle de simulation de la machine asynchrone en absence et en présence d'un défaut mécanique (défaut de roulement). Une approche analytique a été faite avec un défaut de la BE. On a montré, clairement, l'influence d'un défaut mécanique (BE) sur les grandeurs électriques et mécaniques.

On a réussi dans cette étude comparative à démontrer que la méthode de l'analyse spectrale du courant statorique, a donnée des résultats adéquats pour ce défaut (BE). Nous avons remarqué l'efficacité, même, autour de fondamental, dont les fréquences sont très claires pour cette machine.

Enfin, les résultats expérimentaux obtenus confirment l'exactitude et la validation des résultats de simulation.

III.3.2 Résultats expérimentaux dédiés au défaut de la bague intérieure du roulement

Le défaut de roulement se manifeste dans la plupart des cas par des bruits, ondulations sur le contour de la surface des billes, par différentes causes. Le défaut de roulement de la bague intérieure (BI) est l'un des défauts qui cause un problème au : couple, vitesse de rotation et le courant statorique. L'objectif visé est la détection du défaut de la BI par la transformée de Fourier rapide (TFR) du courant statorique.

Avant de mettre en place le montage du banc d'essai, il faut préparer artificiellement par perçage le défaut de la bague intérieure, il est créé comme le représente cette figure :

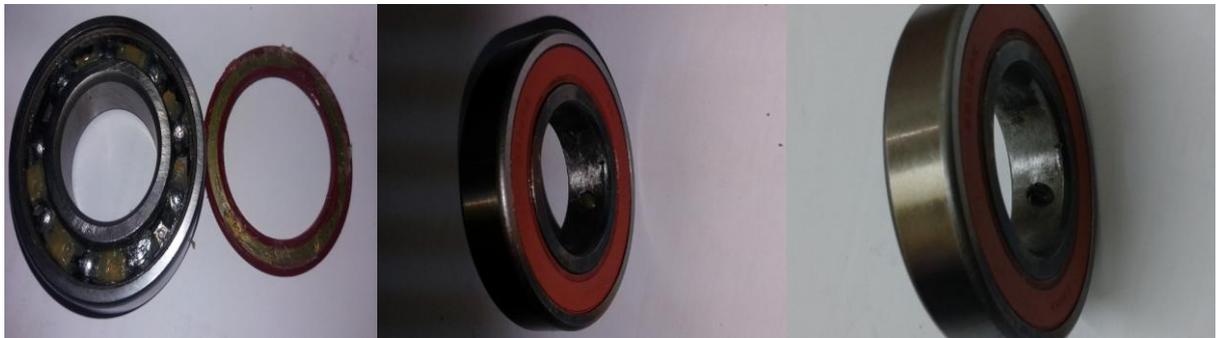


Figure III.15. Photos d'un roulement défectueux dans la BI.

Les différents modes de fonctionnement du moteur réalisés pour valider la procédure de diagnostic sont: un fonctionnement à vide avec un roulement sain et défectueux et un fonctionnement en charge avec un roulement sain et défectueux.

Dans cette première étape, nous allons analyser le courant statorique dans le cas d'un fonctionnement à vide.

La figure (III-16) du spectre du courant montre la présence des harmoniques à la fréquence 15.4 Hz, 84.6 Hz, 115.4 Hz, 159.6 Hz et 184.6 Hz aux alentours du fondamental. De plus, la série d'harmoniques est vérifiée par l'équation (I.18) sur la bande illustrée de [0-

1000] Hz. Les fréquences dues à l'excentricité mixte sont toujours présentes en concordance avec la formule (I.9), on cite parmi elles, $f_s - f_r = 26.2$ Hz et $f_s + f_r = 73.9$ Hz.

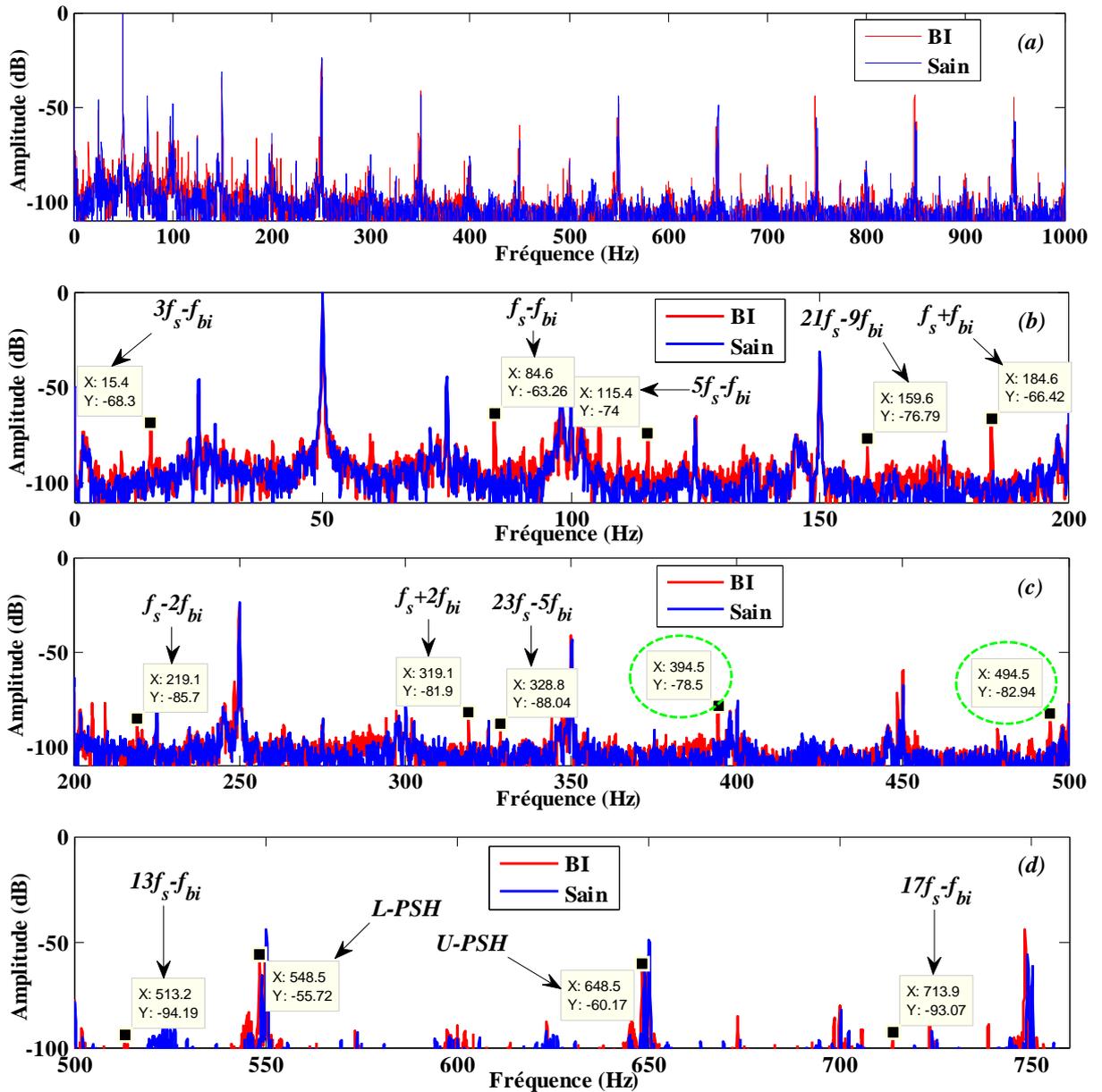


Figure III.16. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BI, $s=0.004$) (a) : 0-1000Hz, (b) : 0-200Hz, (c) : 200-500 Hz, (d) : 500-760 Hz.

L'opération de diagnostic par le FFT du courant permettra de réaliser un suivi acceptable des indicateurs du défaut de la BI.

Par ailleurs, en se basant sur le spectre du courant statorique et l'équation (III.15) pour donner quelques exemples sur les fréquences caractéristiques de la BI. Le tableau (III.5)

résume et compare la fréquence théorique du défaut de la bague interne s'il existe expérimentalement.

Tableau III.5. Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague interne ($s=0.004$).

Formule $f_{\text{caract-bi}}^{\pm} = v f_s \pm k \times f_{bi} $	Valeurs théoriques [Hz]	Valeurs pratiques [Hz]	Amplitude [dB]
$ 3f_s - f_{bi} $	15.54	15.4	-68.3
$ 5f_s - f_{bi} $	115.54	115.4	-74
$ f_s - f_{bi} $	84.46	84.6	-63.26
$ f_s + f_{bi} $	184.46	184.6	-66.42
$ 21f_s - 9f_{bi} $	160.14	159.6	-76.79
$ f_s - 2f_{bi} $	218.92	219.1	-85.7
$ f_s + 2f_{bi} $	318.92	319.1	-81.9
$ 13f_s - f_{bi} $	515.54	513.2	-94.13
$ 17f_s - f_{bi} $	715.54	713.2	-93.07

À partir de ce tableau, on peut dire que les bandes fréquentielles que nous avons analysées, sont susceptibles d'apporter des informations sur l'existence du défaut de la BI.

Le glissement joue un rôle important pour les calculs des harmoniques, il dépend, systématiquement, par la variation de la charge. La figure (III-17) représente le spectre du courant sous un fonctionnement en charge, dont le glissement est égal à 0.048. Elle montre qu'autour de l'harmonique fondamental, existe d'autres harmoniques particuliers du spectre pouvant confirmer qu'il y a un défaut de roulement de la BI. Les valeurs calculées de ces harmoniques sont :

$$f_{\text{caract-bi-1}} = |3f_s - 0.6(1)N_b \times f_r| = 21.48\text{Hz}$$

$$f_{\text{caract-bi-2}} = |5f_s - 0.6(1)N_b \times f_r| = 121.48\text{Hz}$$

$$f_{\text{caract-bi-3}} = |7f_s - 0.6N_b \times f_r| = 78.52\text{Hz}$$

$$f_{\text{caract-bi-4}} = |f_s + 0.6N_b \times f_r| = 178.52\text{Hz}$$

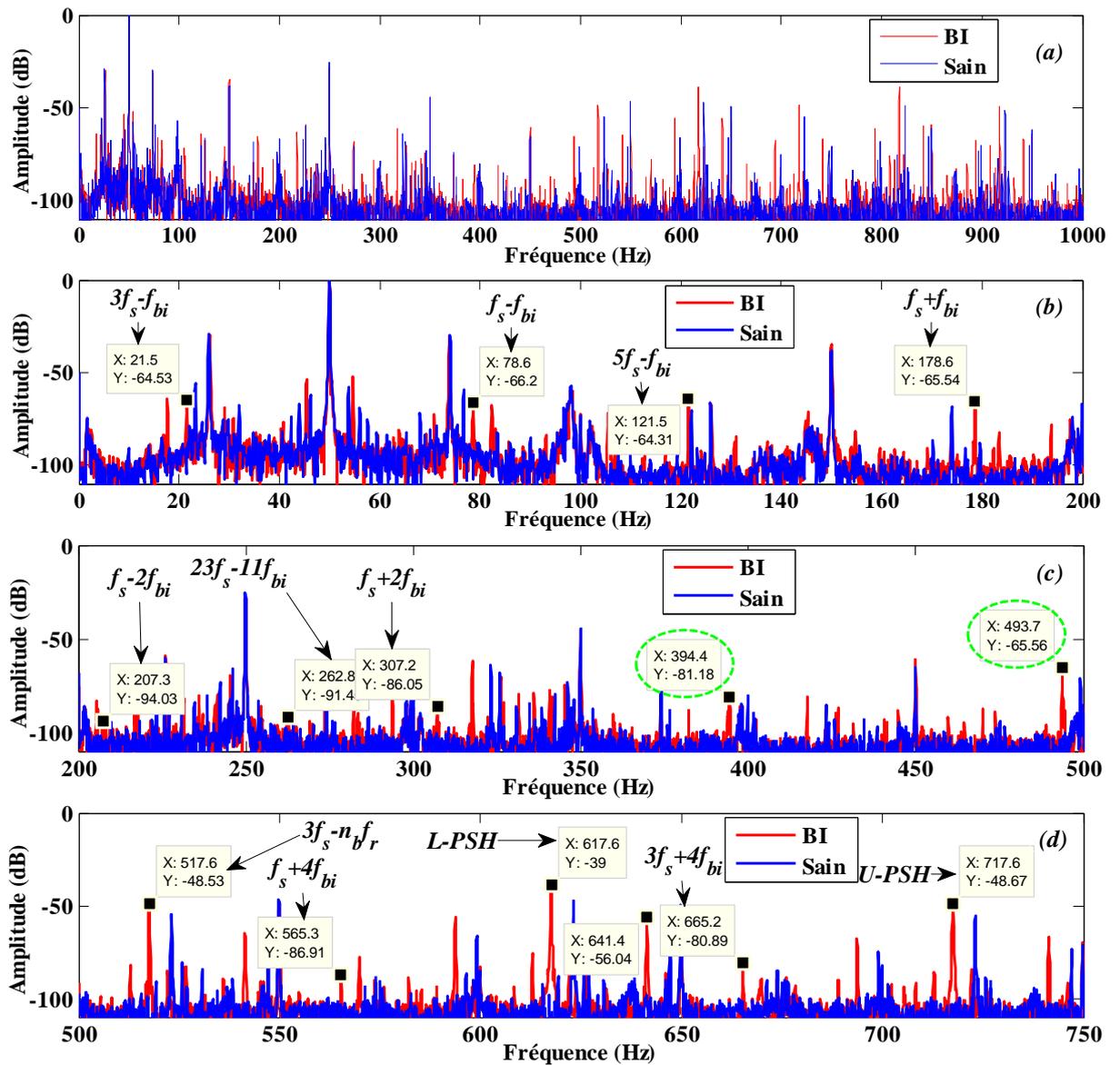


Figure III.17. Spectre du courant statorique pour différentes bandes fréquentielles (défaut de la BI, $s=0.048$) (a) : 0-1000Hz, (b) : 0-200Hz, (c) : 200-500 Hz, (d) : 500-750 Hz.

D'après les calculs théoriques obtenus dans le tableau ci-dessous, on peut dire que les fréquences obtenues expérimentalement démontrent l'existence du défaut de la bague intérieure. Ces harmoniques sont plus ou moins lisibles vu l'ampleur du défaut réalisé (un petit trou).

Tableau III.6. Fréquences caractéristiques théoriques et pratiques du défaut de la bague interne ($s=0.048$).

Formule $f_{\text{caract-bi}}^{\pm} = v f_s \pm k \times f_{bi} $	Valeurs théoriques [Hz]	Valeurs pratiques [Hz]	Amplitude [dB]
$ 3f_s - f_{bi} $	21.48	21.5	-64.53
$ 5f_s - f_{bi} $	121.48	121.5	-64.31 (n'est pas seul, avec état sain = -70.08)
$ f_s - f_{bi} $	78.52	78.6	-66.2
$ f_s + f_{bi} $	178.52	178.6	65.54
$ f_s - 2f_{bi} $	207.04	207.3	-94.03
$ f_s + 2f_{bi} $	307.04	307.2	-86.05
$ 23f_s - 11f_{bi} $	263.73	262.8	-91.45
$ f_s + 4f_{bi} $	564.08	565.3	-86.91
$ 3f_s + 4f_{bi} $	664.08	665.2	-80.4

Nous avons utilisé dans cette étude spécialisée la méthode d'analyse spectrale du courant statorique (MCSA-FFT) pour détecter les défauts dans les bagues (externe et interne) du roulement de la machine asynchrone. Les résultats qui ont été obtenus sont suffisamment acceptables pour l'analyse des deux défauts (BE et BI). Les signatures, aussi, sont claires au long du spectre, et surtout, autour de la fréquence fondamentale.

III.4 CONCLUSION

Les tests expérimentaux du défaut mécanique (roulement) nous ont permis de comparer puis valider la simulation du modèle analytique développé précédemment. Cette constatation s'explique en partie par le fait que le courant statorique est sensible à la sévérité du défaut.

La MCSA ne permet pas de faire une représentation en temps-fréquence ; comme elle ne peut pas étudier les phénomènes du régime transitoire ou les signaux non-stationnaires causés par une charge variable.

Pour ces raisons, nous consacrerons une analyse de signatures du courant statorique par la méthode de la transformée en ondelettes discrètes (ASCS-TOD) pour différents défauts. Cette technique qui a l'abréviation Anglaise MCSA-DWT (Discrete Wavelet Transform) est le principal objectif du quatrième chapitre.



CHAPITRE IV

Analyse des défauts par la méthode de la TOD

IV.1 INTRODUCTION

La signature d'un système est la trace enregistrée en fonction du temps de ces caractéristiques. La signature peut être : mécanique, chimique, électronique, thermique, etc. Cette signature doit être traitée afin d'en extraire les caractéristiques qui permettent de définir la situation du système au temps t [ARQ09].

La clé pour le diagnostic des MAS, est d'avoir une image de plus en plus claire de la nature du défaut pour l'isoler. Un diagnostic réussi du moteur électrique, repose sur la disponibilité de l'information avec des conditions pratiquement raisonnables. Les techniques de la surveillance de l'état des MAS ont été continuellement développées au cours de ces dernières années, ce qui a abouti à une gamme de méthodes disponibles pour un diagnostic sans échec. Diverses techniques ont été exploitées en utilisant l'analyse acoustique, le champ électromagnétique, l'analyse du courant de moteur, la tension induite, la puissance instantanée, la vibration, ...etc. [BIN16], [CUE16], [BES15-1], [PUS15], [KIM15], [FAR16]. Parmi toutes les techniques de surveillance sous des conditions bien traitées, l'analyse du courant statorique est la plus populaire en raison de sa simplicité de mesure, de sa fiabilité et de sa précision. Les technologies les plus récentes utilisées dans le diagnostic des défauts est la transformée en ondelettes discrètes (TOD). En outre, cette méthode est rentable et rehausse grandement la qualité de notre travail, car les capteurs de courant sont faciles à mettre en œuvre et ne nécessitent pas de transducteurs supplémentaires coûteux.

Lorsqu'un défaut est généré dans le moteur électrique, le bon ou le mauvais fonctionnement dépend de la gravité du défaut. Certains paramètres de la machine sont modifiés, par exemple, toute irrégularité dans le rotor provoque un courant distribué irrégulier. Une MAS saine contient une seule composante correspondant à la fréquence d'alimentation dans le spectre du courant et autre qui sont, généralement, fixes. La variation du champ magnétique (sous réaction) induit un harmonique spécifique dans le spectre des courants, qui est ajoutée au courant du stator. Toute asymétrie dans la MAS provoque l'apparition de nouvelles composantes au spectre du courant statorique.

Dans ce travail, on va appliquer la technique de la transformée en ondelettes discrètes (TOD ou en Anglais DWT: Discrete Wavelet Transform) en exploitant le courant statorique. La technique de la MCSA-DWT est utilisée pour l'analyse et la détection de tous les défauts qui ont été étudiés dans le deuxième chapitre et le troisième chapitre.

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

IV.2 LA METHODE DE MCSA-DWT

Les méthodes usuelles, pour extraire une fraction du signal bruité ou un ensemble des harmoniques, sont des filtres afin d'annuler et de conserver la partie la plus intéressante du signal. La méthode de la TOD est l'une des techniques appliquées actuellement au domaine de détection des défauts dans les MAS. Dernièrement, cette technique et ses dérivées ont le fait l'objet d'un nombre important de recherches [YAH12], [ATT15], [BES15-3], [BES16], [YAN16].

La notion d'analyse fréquentielle ne peut être que locale en temps. L'analyse temps-fréquence a toujours été une faveur en traitement du signal. Les signaux transitoires ou non stationnaires qui évoluent dans le temps d'une façon imprévisible ne peuvent plus être représentés visiblement. La TOD nous conduit d'une superposition d'ondes (sinusoïdes de durée infinie) à une superposition d'ondelettes (ondes de courte durée).

IV.2.1 Théorie de la TOD (DWT)

La transformée en ondelettes remplace les sinusoïdes de la transformée de Fourier par une famille de translations et de dilatations d'une même fonction appelée ondelette. Mathématiquement la famille d'ondelettes se met sous la forme [AOU09], [YAH12]:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{IV. 1})$$

Avec $a \neq 0$ est le paramètre d'échelle ou de dilatation et b est un paramètre de translation ($a, b \in \mathbb{R}$). Une ondelette $\Psi(t)$ est une fonction de moyenne nulle [HIT99] :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (\text{IV. 2})$$

On note Ψ^* la conjuguée de Ψ ; la transformée en ondelettes d'une fonction $f(t)$ est écrit par :

$$CWT = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (\text{IV. 3})$$

Cette transformée est dite la transformée en ondelettes continue TOC (CWT : Continuous Wavelets Transform), car c'est une fonction continue de paramètres de dilatation et de translation, on verra que ces paramètres peuvent être discrétisés dont laquelle on obtient la transformée en ondelettes discrètes.

En effet, la transformée en ondelettes continue est une fonction à deux variables réelles (a et b) qui peut être représentée dans le plan euclidien (traditionnellement, on place b en abscisses et a ou $-\log a$ en ordonnées) ce qui permet d'observer toutes les positions et les échelles en même temps (représentation temps-échelles).

La figure (IV-1) représente l'échelle de décomposition pour la transformée en ondelettes, on remarque bien que la résolution est différente, chaque fréquence est analysée avec une résolution adaptée. L'analyse en ondelettes, contrairement à la transformée de Fourier, fait donc la projection d'une fonction $f(t)$ sur une famille de fonctions (les ondelettes) déduites d'une fonction élémentaire (l'ondelette mère) par des translations et des dilatations.

Ceci permet aux hautes fréquences d'avoir une précision en temps accrue correspondant à des phénomènes brefs, pour lesquels l'instant d'apparition et la durée sont des caractéristiques importantes. Aux basses fréquences, la précision fréquentielle s'améliore au détriment de l'aspect temporel, puisque les phénomènes sont de durées beaucoup plus longues [AOU09], [YAH12].

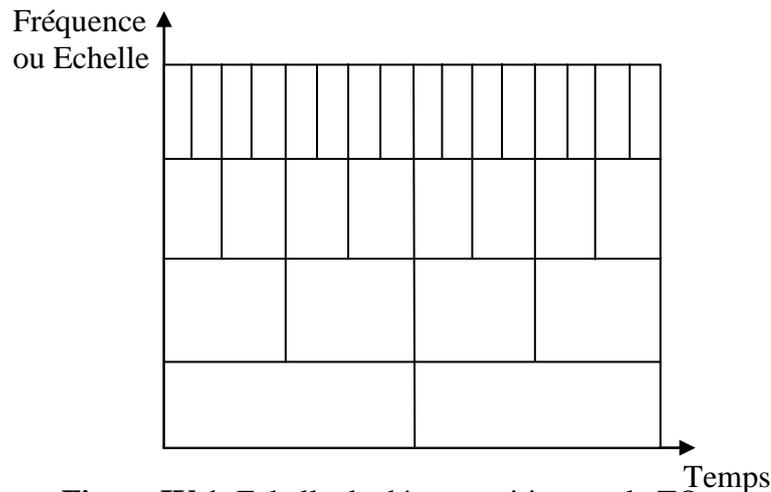


Figure IV.1. Echelle de décomposition par la TO.

La transformée en ondelettes possède la propriété de la conservation de l'énergie, c'est-à-dire, qu'il n'y a pas de perte d'information entre la fonction $f(t)$ et sa transformée en ondelettes. Cette propriété est très importante car elle garantit que la transformée en ondelettes possède des propriétés de stabilité.

Dans les calculs pratiques, les variables a et b de la transformée en ondelettes continue ne varient pas continûment dans \mathfrak{R} , mais sont discrétisées, ainsi la transformée en ondelettes discrètes consiste à trouver une sous famille dénombrable.

La transformée en ondelettes discrètes (DWT) est issue de la version continue, d'un point de vue fonctionnel, il s'agit de changer une représentation continue (par une fonction de

deux paramètres continus) en une représentation discrètes (par une série, ou une suite à deux paramètres). La DWT utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. En remplaçant respectivement a et b par 2^j et $k.2^j$ dans (IV.3), avec $(j, k) \in Z$, l'expression devient donc, [BUR97]:

$$DWT = 2^{-\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) \psi^*(2^{-j}t - k) dt \quad (IV. 4)$$

Soit φ la fonction échelle. Elle doit être dans L^2 et ayant une moyenne non nulle. On trouve plus de détails sur la théorie de la TOD dans : [BENZ05], [AOU09], [YAH12].

On voit que la TOD et la TOC peuvent être implémentées pratiquement sur tout système numérique (digital) (PC carte, carte DSP, micro-processeur ...etc.); mais on aura pour la TOC un lourd calcul provenant de la nature continue du facteur d'échelle et de la translation.

On note par CA_j et CD_j respectivement le niveau des coefficients d'approximation et de détails de f à la $j^{\text{ième}}$ résolution.

Pour passer d'un niveau d'approximation au niveau inférieur, il suffit de calculer une convolution discrète du signal discret avec des filtres passe bas et passe haut h et g respectivement lors d'une décomposition par ondelettes.

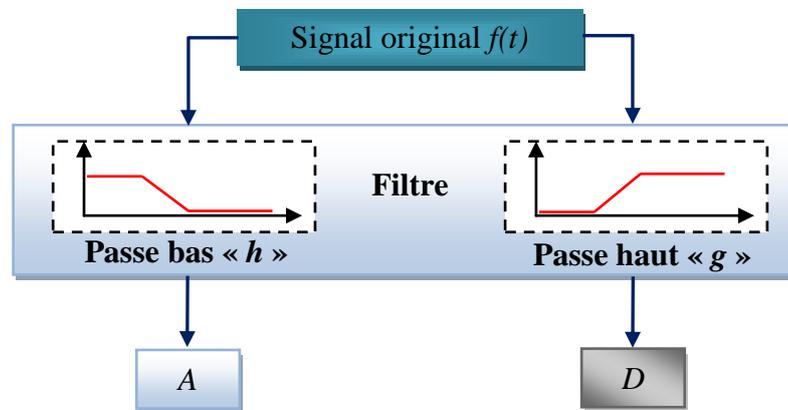


Figure IV.2. Filtres de décomposition d'un signal original $f(t)$ en approximations et détails.

Des décompositions de niveau supérieur peuvent être obtenues d'un mode semblable. Désignant par f_e la fréquence d'échantillonnage du signal mesuré, la bande de fréquence de chaque niveau j revient à $\left[0 - \frac{f_e}{2^j}\right]$ pour les approximations et $\left[\frac{f_e}{2^j} - \frac{f_e}{2^{j-1}}\right]$ pour les détails.

La figure (IV-3) présente un schéma de cet algorithme de décomposition [MEY92], le signe $\downarrow 2$ correspond à une décimation d'un facteur 2, c'est-à-dire, que l'on garde un

coefficient sur deux, on obtient alors un algorithme en cascade qui permet d'obtenir tous les niveaux de résolution inférieure au niveau de départ par itérations.

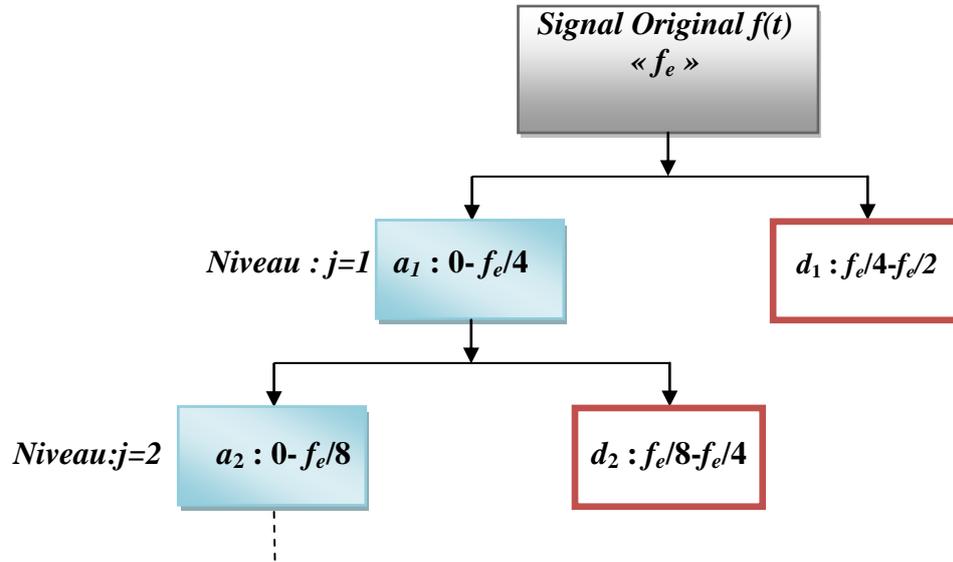


Figure IV.3. Décomposition en multi-niveau du signal $f(t)$.

On peut définir d'après le schéma ci-dessus un autre type d'ondelettes, c'est les paquets d'ondelettes qui ont été développés comme un outil efficace de codage et de compression. Dans l'analyse en ondelettes, un signal est décomposé en approximation et détail ; l'approximation est alors elle-même coupée en approximation et détail de deuxième-niveau, et le processus sera répété. Pour l'analyse en paquet d'ondelettes, les détails aussi bien que les approximations peuvent être décomposés [KAH98], [AHM13], [JAI15], [VIS15].

On rappelle qu'au contraire de l'analyse par la transformée de Fourier ; la transformée en ondelettes permet d'étudier la régularité locale (ponctuelle) d'une fonction. Cette dernière a la possibilité de faire une reconstruction du signal dans le sens inverse.

En pratique, le choix de l'ondelette n'est pas crucial, en effet on cherche une ondelette qui offre un bon compromis entre la résolution temporelle et fréquentielle, un tel choix dépend beaucoup de l'objectif du sujet proposé. Des critères supplémentaires tels que la régularité, la symétrie, une décroissance rapide à l'infini peuvent être nécessaires [BENT06].

Les familles les plus usuelles des ondelettes mères, utilisées pour le calcul de la transformée en ondelette, des signaux analysés, sont : Haar, Daubechies, Symlets, Coiflets, Chapeau mexicain, biorthogonales, Meyer, Battle et Lemarié, gaussiennes, Morlet, Shannon complexes.

Il faut noter que chaque type a une abréviation dans le code Matlab. Des tests ont été réalisés par [BES16-1] pour différents ordres et types d'ondelette mère nous amène à prendre le choix de Daubechies (Db44) pour toutes les analyses concernant cette partie d'application.

IV.2.2 Energies et bandes fréquentielles pour DWT

Le relèvement du signal original du courant statorique, ou de n'importe quel signal, a besoin d'une plate-forme de prétraitement. Notre étude se base sur la MCSA par DWT sous une fréquence d'échantillonnage égale à 12800Hz. Bien que le diagnostic des défauts soit basé sur une analyse finie et une comparaison entre les niveaux de décomposition (d_i ou a_i) qui contiennent l'information du défaut pour différentes machines à diagnostiquer.

Le seuil d'arrêt est limité par un nombre N_{SA} donné par la formule suivante :

$$N_{SA} = \text{int} \left[\frac{\log \left(\frac{f_e}{f_s} \right)}{\log(2)} \right] \quad (\text{IV. 5})$$

Pour avoir des indications plus claires des défauts, on peut ajouter 1 ou 2 à la formule précédente, comme [ANT06]:

$$N_{SA} = \text{int} \left[\frac{\log \left(\frac{f_e}{f_s} \right)}{\log(2)} \right] + 1 \text{ ou } + 2$$

[BES15-3] et [BES16-1] ont bien expliqué la cause du choix de ce seuil d'arrêt. Le seuil d'arrêt pour une fréquence d'échantillonnage $f_e=12.8\text{kHz}$ est calculé comme suit :

$$N_{SA} = \text{int} \left[\frac{\log \left(\frac{12800}{50} \right)}{\log(2)} \right] + 1 = 8 + 1 = 9 \text{ Niveaux}$$

L'indicateur du défaut peut se trouver dans n'importe quel niveau et détail. Les bandes fréquentielles (BF) de tel d_i sont considérées comme une orientation à la zone de détection importante. Le tableau (IV.1) montre les bandes fréquentielles de chaque niveau.

Tableau IV.1 Bandes fréquentielles des détails ($f_e=12.8$ kHz).

Bandes fréquentielles des niveaux de décomposition (Hz)	
d_1	3200 - 6400
d_2	1600 - 3200
d_3	800 - 1600
d_4	400 - 800
d_5	200 - 400
d_6	100 - 200
d_7	50 - 100
d_8	25 - 50
d_9	12.5 - 25

Un autre indicateur du défaut, est l'énergie des détails, on peut calculer l'énergie associée à chaque niveau de décomposition. La valeur propre d'énergie de chaque détail selon la bande de fréquence est définie par :

$$E_j = \sum_{n=1}^N |d_j(n)|^2 \quad (\text{IV. 6})$$

Tel que j est le niveau de décomposition, et N est le nombre total d'échantillons dans le signal.

IV.2.3 Erreur quadratique moyenne (EQM ou MSE) pour le diagnostic

Plusieurs méthodes de distinction entre les signaux qui ont un contenu semblable. Parmi elles, on trouve l'analyse par l'estimateur d'erreur quadratique moyenne 'EQM' (en Anglais : mean square error 'MSE'). Ce facteur peut être utilisé comme un indicateur de qualité ou pour donner un pourcentage de correspondance entre les signaux. Notre nouvelle approche se base sur une étude détaillée sur les détails afin de déterminer une valeur précise (pas par vision) et bien calculée concernant le signal (d_i) qui a une contribution pour la déformation du courant statorique.

L'erreur quadratique moyenne (EQM) est une mesure fréquemment utilisée de la différence entre les valeurs prédites par un modèle dans l'état sain et les valeurs effectivement observées à partir de l'état défectueux qui est en cours de modélisation. Ces différences individuelles sont également appelées l'erreur absolue moyenne (EAM ou MAE : mean absolute error).

Le coefficient EQM de ressemblance pour deux signaux X_1 et X_2 (dans chaque position i) qui ont un nombre de points n est calculé par la formule suivante :

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{1,i} - X_{2,i})^2}{n} \quad (IV. 7)$$

Cet indicateur est utilisé pour tout détail d_i afin de déterminer la bande fréquentielle d'une part, et d'autre pour la détermination du détail dominant dans le nouveau signal.

Il est important de signaler à la racine de l'erreur quadratique moyenne (REQM ou RMSE : root mean square error) et l'erreur quadratique moyenne normalisée (EQMN ou NMSE : normalized root mean square error) qui sont utilisées comme d'autres comparateurs entre les signaux. Notre analyse des défauts sera basée sur l'EQM pour les signaux des détails ou les approximations. La ressemblance des signaux est vérifiée pour une valeur d'EQM qui tend vers zéro.

L'approche est basée sur l'évaluation d'énergie liée aux niveaux de décomposition de la TOD, on fait le diagnostic de défaut de trois manières. En premier lieu, l'information de décomposition des niveaux est exempte de bruit et par conséquent peut être bien interprétée pour la validation de cette méthode ; un dispositif expérimental basé sur une MAS à cage d'écureuil triphasée avec un système d'acquisition a permis d'acquérir les trois courants statoriques en même instant. En second lieu, l'évaluation du glissement (charge) est nécessaire pour la localisation des harmoniques liés aux défauts. Et en dernier lieu, l'introduction du nouvel indicateur (EQM) traite la différence entre les signaux d'une manière quantitative et qualitative.

IV.4 TECHNIQUE D'ONDELETTES POUR LA DETECTION DU DEFAUT DE LA CASSURE DE BARRES

Le développement des systèmes de surveillance pour les machines tournantes n'est pas seulement pour détecter les défaillances, mais aussi pour la façon dont ces défaillances peuvent être rapidement détectées. Le but de cette partie, est de présenter une étude expérimentale de la cassure de barres dans le moteur à induction, sous différentes conditions de charge qui se base sur une analyse de la transformée en ondelettes discrètes.

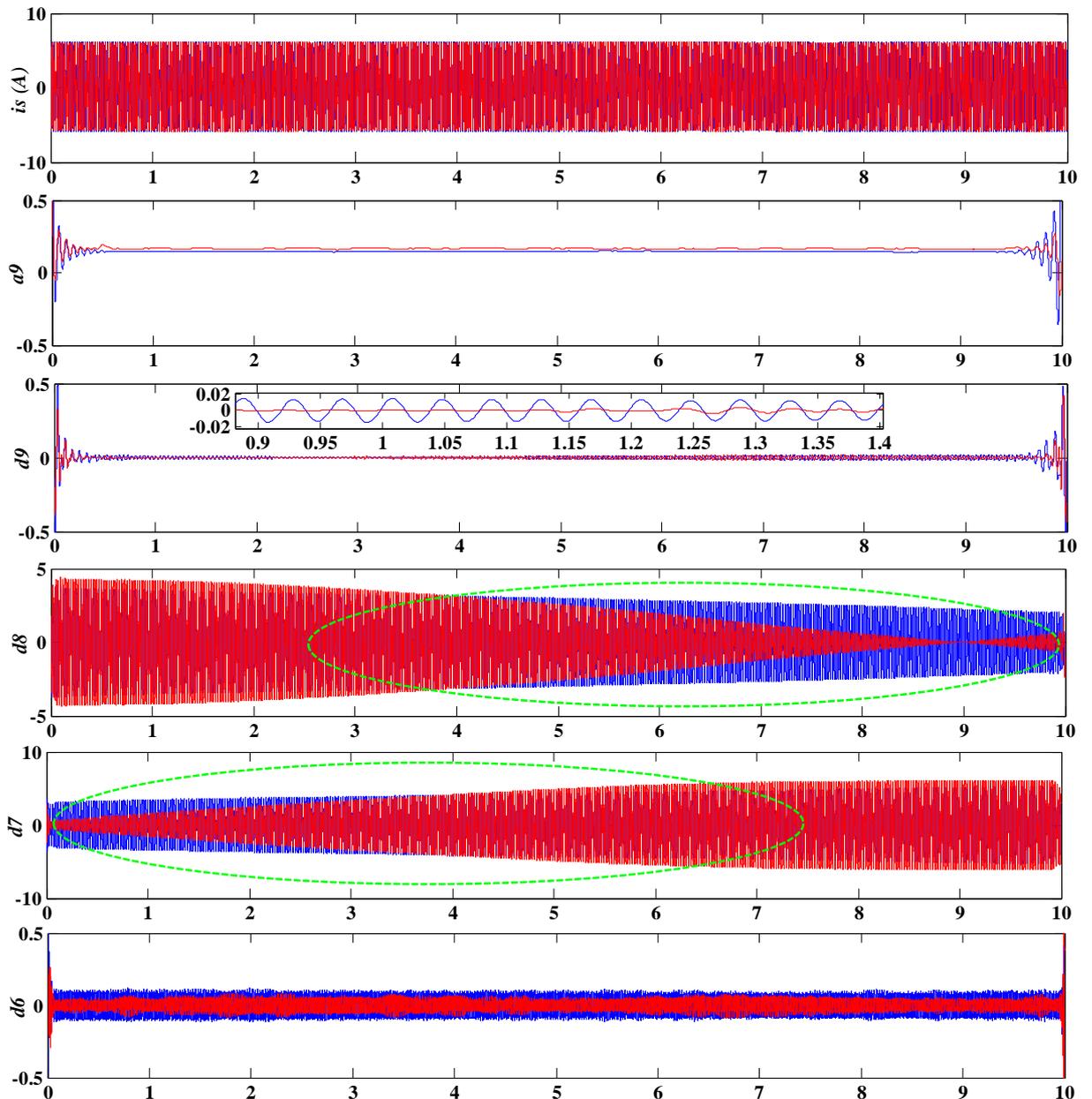
Généralement, la TOD peut être appliquée au domaine du diagnostic des défauts de la MAS par l'exploitation des signaux électriques ou vibratoires.

Notre approche est basée sur l'extraction des signatures à partir du signal du courant statorique. Les différents degrés de sévérité du défaut (1BC ou 2BC) et les conditions de charge mécanique (à vide et en charge) seront prises en considération.

On a appliqué l'ondelette mère de Daubechies 44 (db44) pour faire la décomposition en multi niveaux du courant statorique.

Les figures (IV-4), (IV-5), (IV-6) et (IV-7) montrent la décomposition DWT du courant statorique pour un état sain et un autre état défectueux (une barre cassée puis de deux barres cassées) sous un fonctionnement à vide et en charge. Les figures montrent les détails de $d1$ à $d9$ avec l'approximation $a9$.

Nos résultats ont une partie sur l'analyse de la variabilité du signal pour différents niveaux; et pour les barres cassées naissantes, l'analyse du signal du courant électrique montre bien la fluctuation (variation) de quelques signaux.



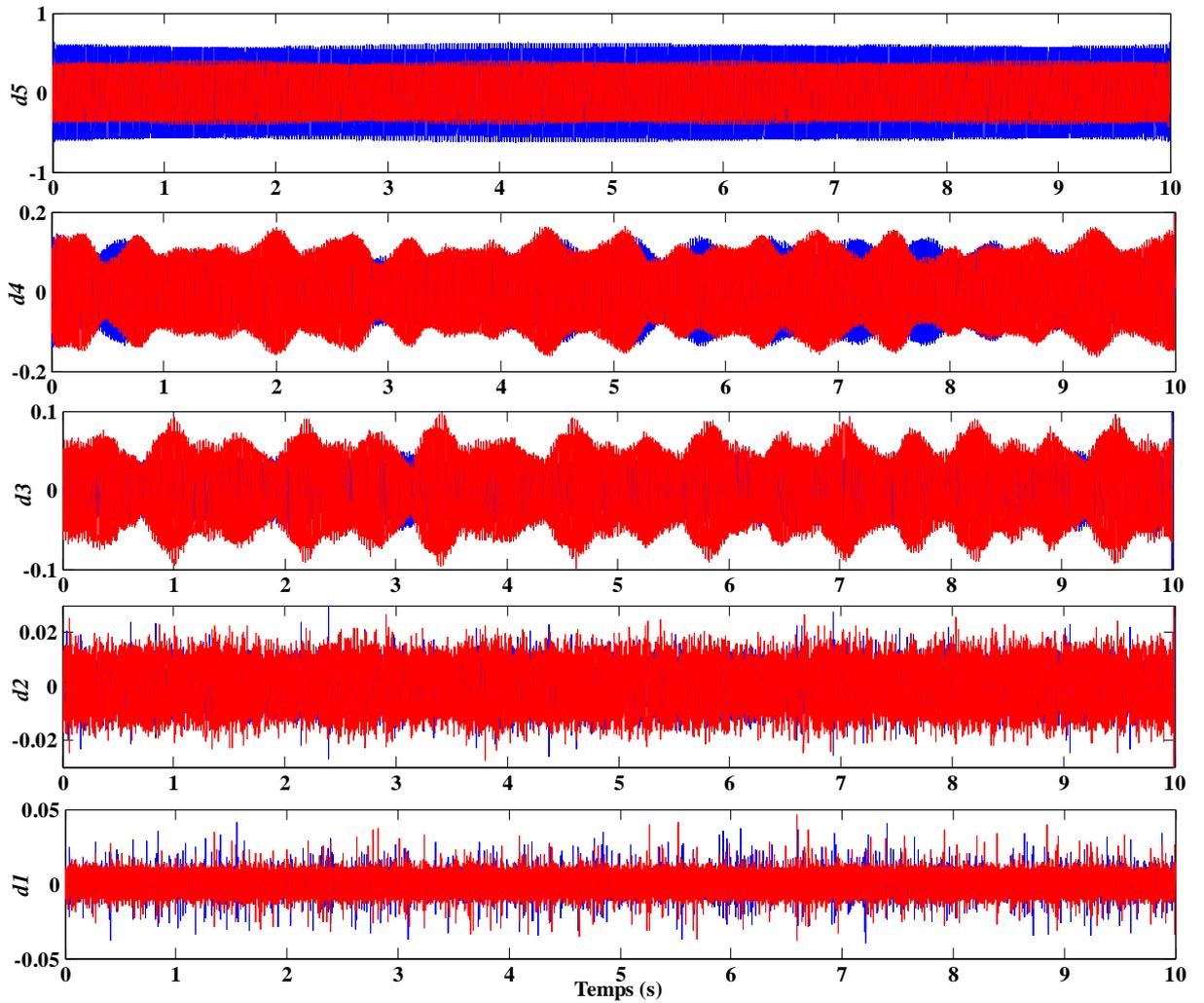
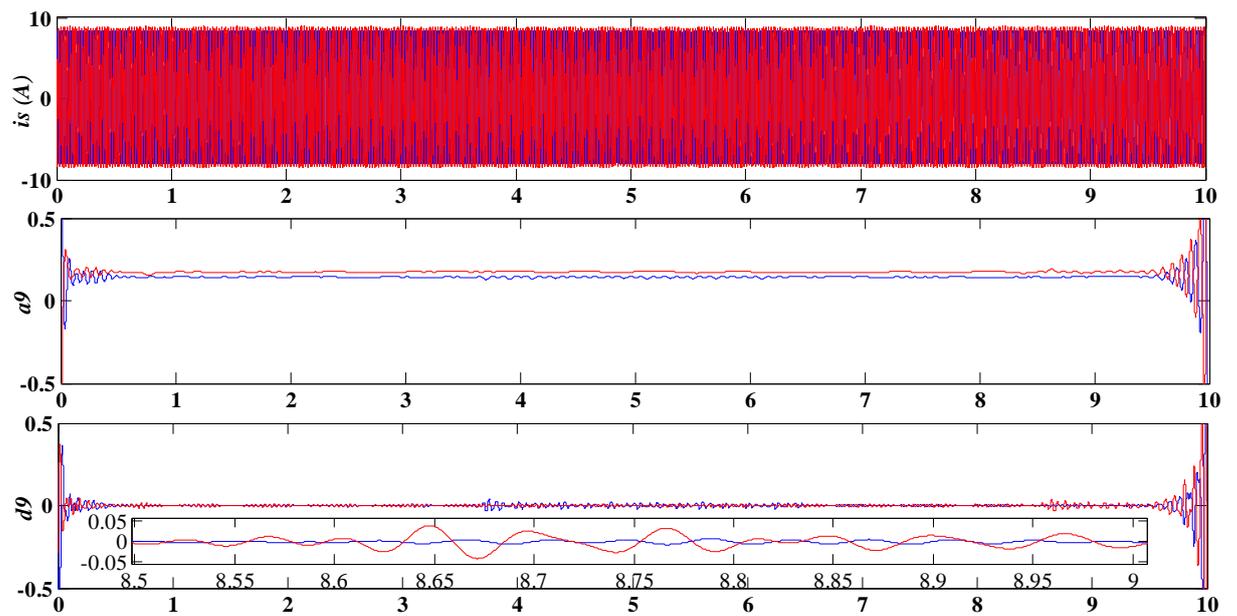


Figure IV.4. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s en fonctionnement à vide (1BC) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).



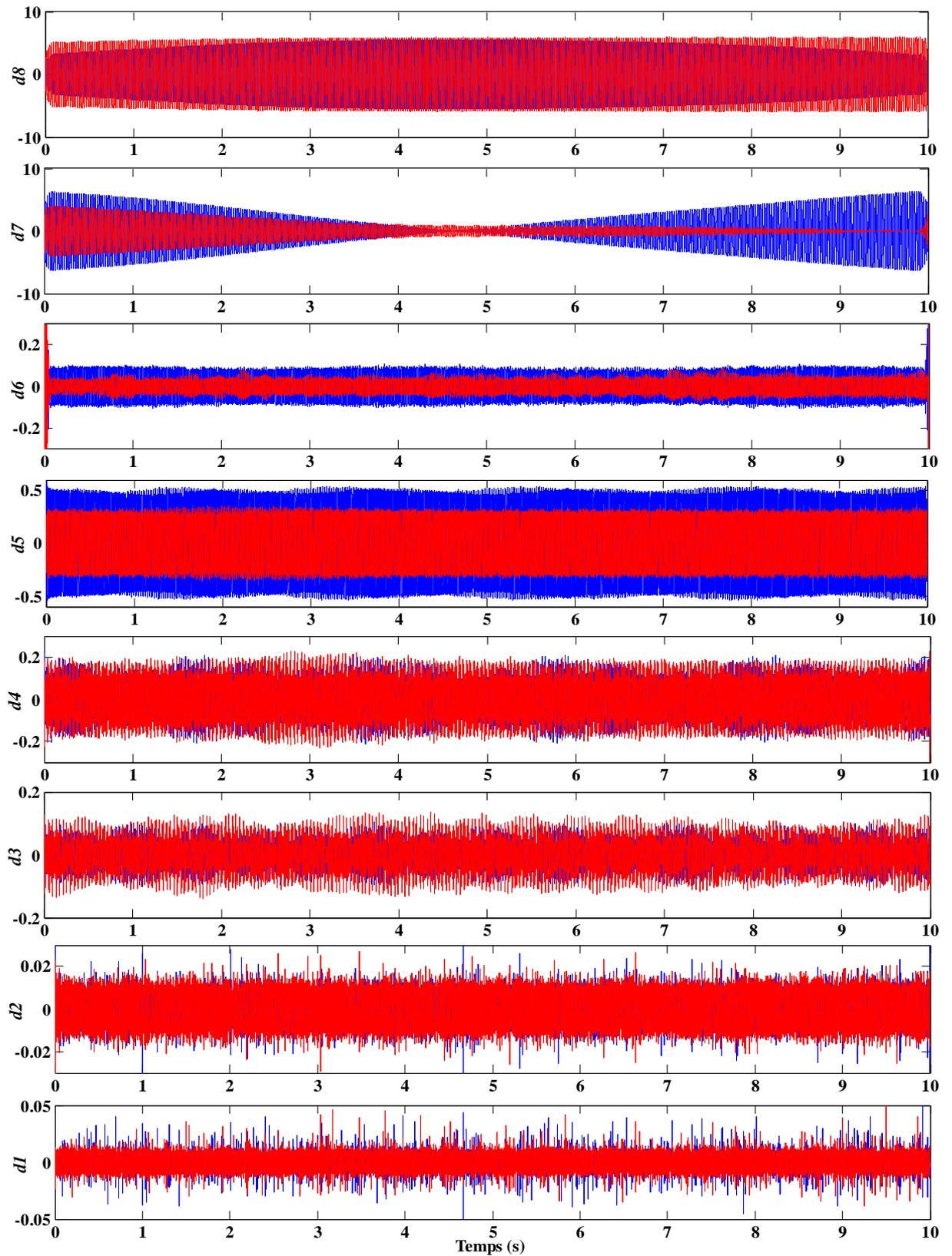


Figure IV.5. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement en charge (IBC) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

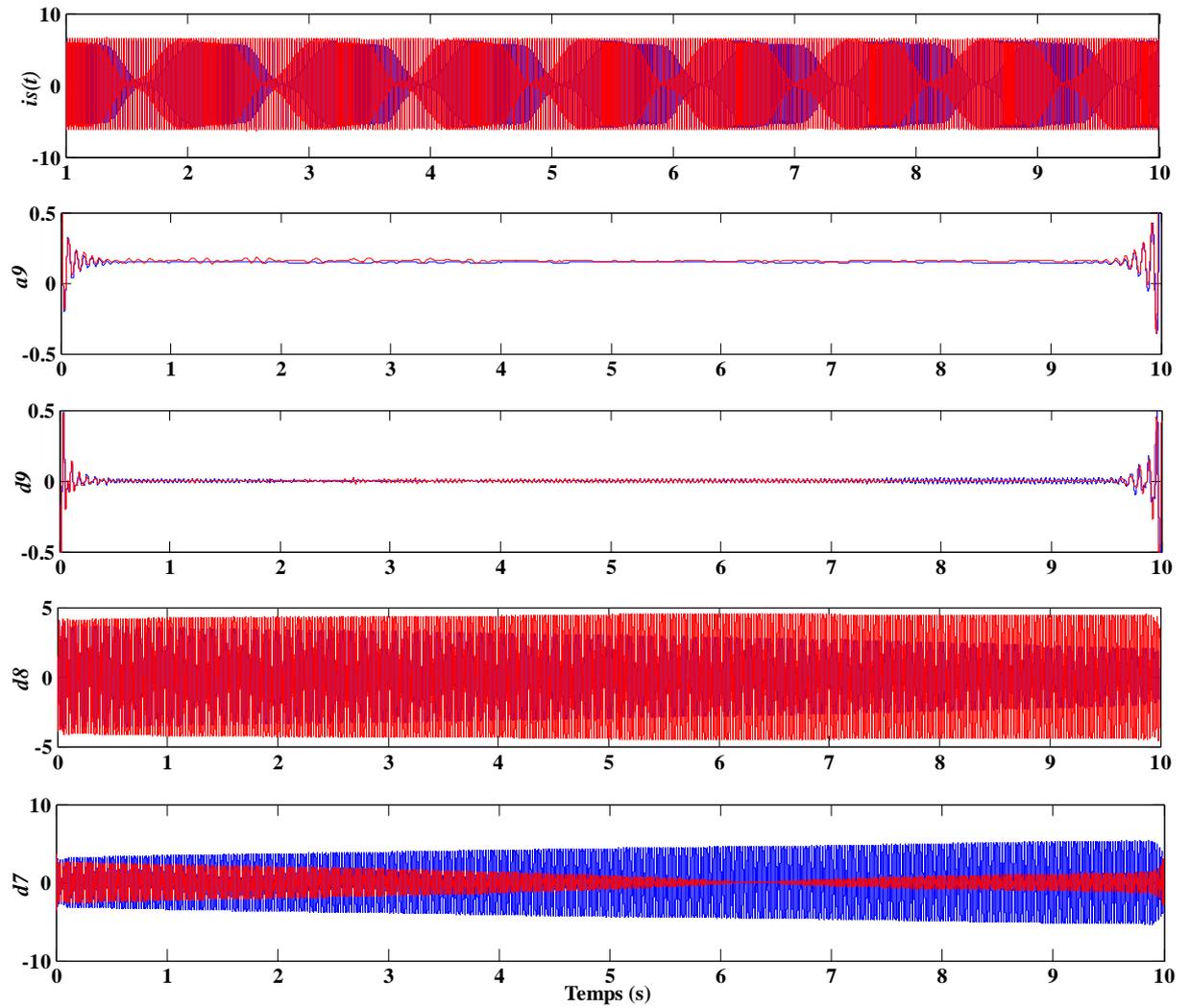


Figure IV.6. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s en fonctionnement à vide (2BC) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

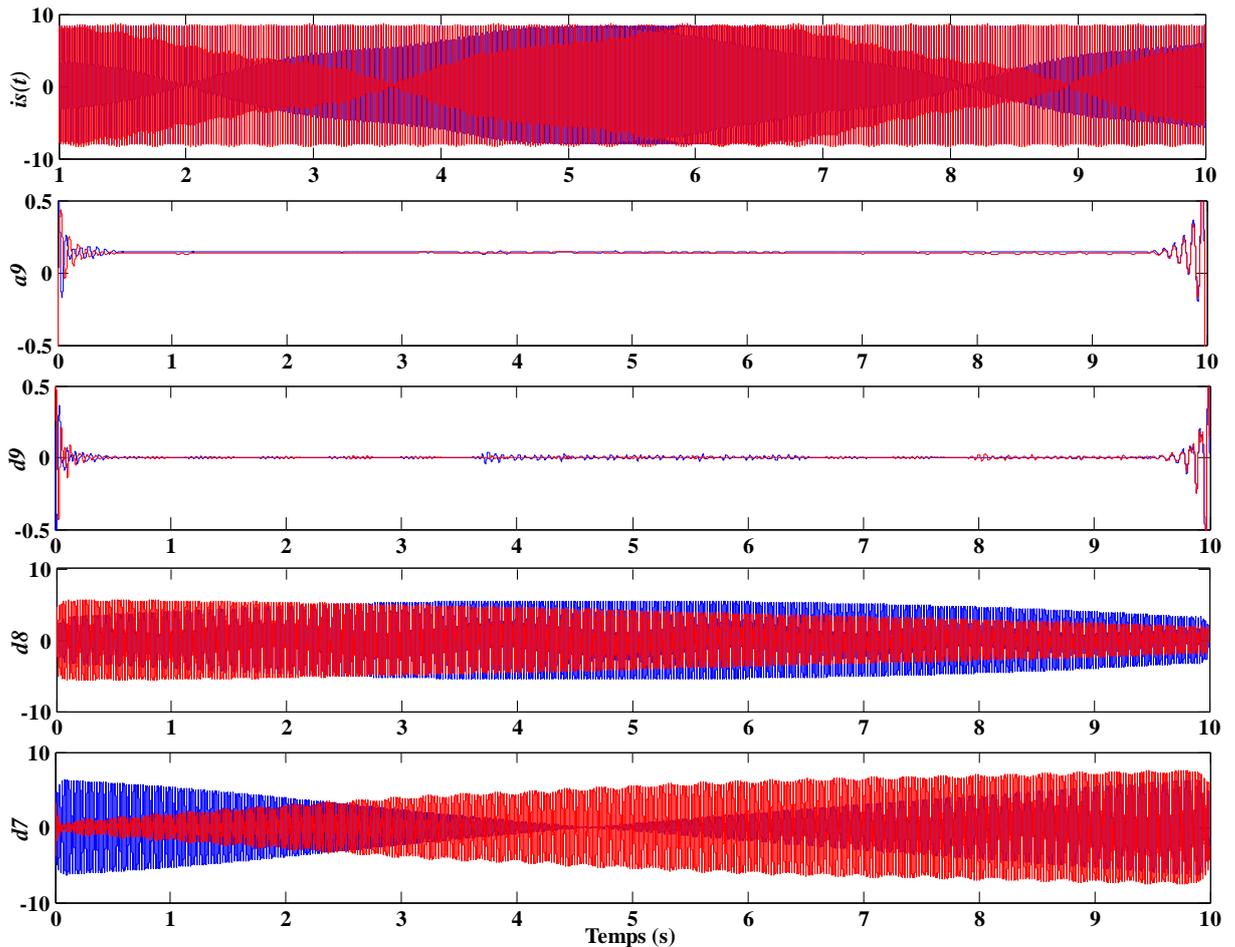


Figure IV.7. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement en charge (2BC) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

Les différentes conditions de la MAS (1BC, 2BC, à vide ou en charge) représentées dans les figures précédentes, montrent bien l'évolution des signaux. En se basant sur les figures (IV-4) et (IV-5) qui montrent les détails de d_1 à d_9 et l'approximation a_9 ; on voit que les résultats d'analyse donnent une variation claire au niveau de d_5 , d_6 , d_7 , d_8 , d_9 et a_9 , avec un faible changement pour les autres (par vision). Il est clair que les signaux sont différents pour les deux conditions (1BC et 2BC) et les bandes fréquentielles touchées sont :

d_5	200 - 400
d_6	100 - 200
d_7	50 - 100
d_8	25 - 50
d_9	12.5 - 25

Les signaux les plus touchés sont d7 et d8 qui correspondent aux bandes [50-100Hz] et [25-50Hz] respectivement ; et cela explique la bande latérale autour de la fréquence fondamentale au spectre du courant statorique ($f_s \pm 2kf_s$).

Le calcul de l'énergie, dans chaque niveau de décomposition, est l'un des indicateurs important qui confirme deux indices très intéressants :

- L'existence du défaut par l'augmentation ou la diminution de celle-ci.
- De viser le niveau important qui a la contribution immense, donc de nous guider à la bande fréquentielle responsable (BFR).

Les figures (IV-8) et (IV-9) montrent l'énergie dans chaque niveau de détail pour 1BC. Les figures (IV-10) et (IV-11) représentent les énergies des détails pour un défaut de deux ruptures de barres (2BC-sévérité). On voit clairement l'effet du défaut de cassure de barre sur l'énergie emmagasinée dans les niveaux 7 et 8, cette augmentation diffère selon la sévérité du défaut et de la charge du moteur. On remarque aussi que l'énergie du détail 5 a été influencée par les conditions des essais.

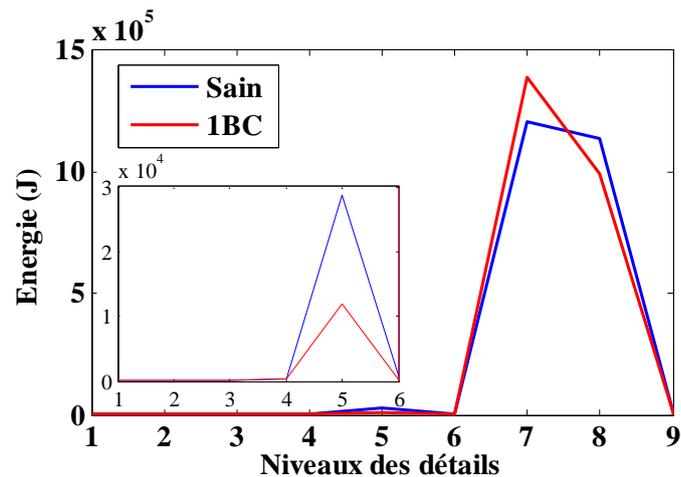


Figure IV.8. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide.

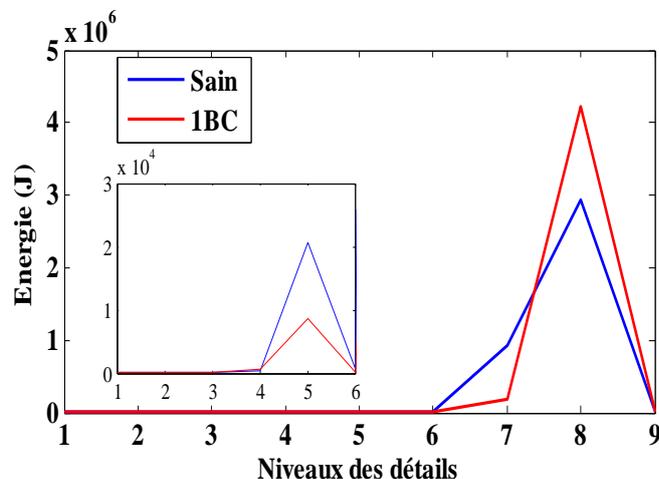


Figure IV.9. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge.

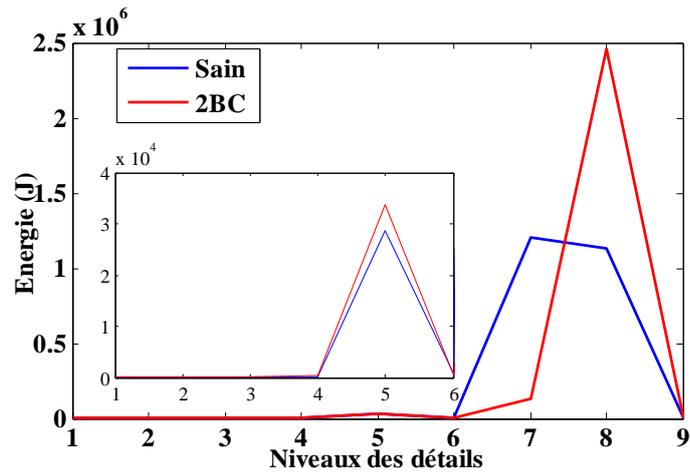


Figure IV.10. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide.

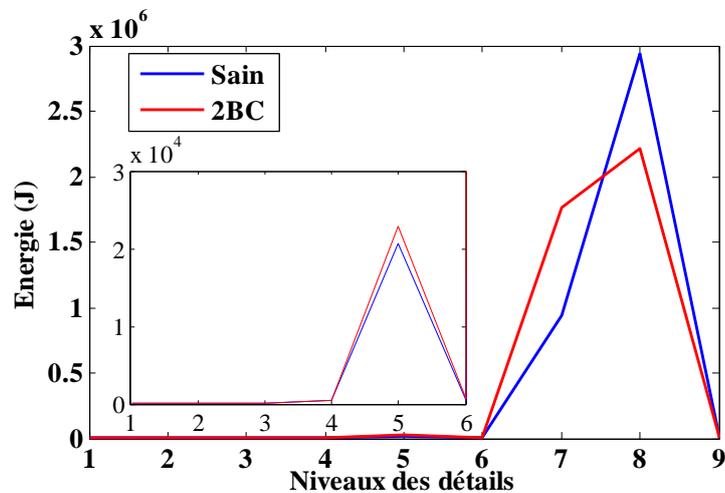


Figure IV.11. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge.

Les détails et les approximations portent des informations sur l'existence du défaut (sans précision le type du défaut) de la cassure de barre. On introduit, maintenant, un nouvel indicateur pour assurer par calcul mathématique tout changement sur les signaux à analyser. Le facteur 'EQM' a été calculé pour tout détail et l'approximation a9 afin de nous amener à une décision judicieuse pour toute contribution de chaque signal (détail ou approximée).

Les tableaux ci-dessous résument tout le calcul de l'EQM pour les détails d_i avec un choix arbitraire de l'étude qualitative sur l'état des signaux.

On propose les règles qualitatives suivantes pour désigner la degré de ressemblance :

- 1- Ressemblance présente : EQM=0.
- 2- Ressemblance presque présente : EQM= $x \times 10^{-3}$ ou $x \times 10^{-4}$ ou $x \times 10^{-5}$ ou ...
- 3- Moins d'absence de Ressemblance : EQM=0,00x.
- 4- Absence de Ressemblance : EQM=0,0x (pour $x < 6$).
- 5- Grande absence de Ressemblance : EQM=0,00x (pour $x > 6$ ou $x = 6$).

Tableau IV.2 Tableau récapitulatif des EQMs pour 1BC (fonctionnement à vide).

EQM (di, a9)	Valeur de l'EQM	Ressemblance
EQM-d1	4.0144×10^{-05}	Presque présente
EQM-d2	5.1614×10^{-05}	Presque présente
EQM-d3	9.4710×10^{-04}	Presque présente
EQM-d4	0.0050	Moins d'absence
EQM-d5	0.1684	Absence
EQM-d6	0.0034	Moins d'absence
EQM-d7	0.6203	Grande absence
EQM-d8	0.9378	Grande absence
EQM-d9	0.0011	Moins d'absence
EQM-a9	0.0064	Moins d'absence

Tableau IV.3 Tableau récapitulatif des EQMs pour 1BC (fonctionnement en charge).

EQM (di, a9)	Valeur de l'EQM	Ressemblance
EQM-d1	3.9660×10^{-05}	Presque présente
EQM-d2	4.9488×10^{-05}	Presque présente
EQM-d3	0.0022	Moins d'absence
EQM-d4	0.0090	Moins d'absence
EQM-d5	0.1246	Absence
EQM-d6	0.0066	Moins d'absence
EQM-d7	13.4238	Grande absence
EQM-d8	56.4244	Grande absence
EQM-d9	0.0099	Moins d'absence
EQM-a9	0.0598	Absence

Les tableaux ci-dessus montrent indirectement le pourcentage de ressemblance entre les signaux avec une précision. L'objectif visé, a été assuré d'après la lecture d'une seule valeur qui indique la BFR. Les détails et les approximations qui ont la grande responsabilité pour la déformation du courant statorique selon les tableaux sont : d8, d7 et d5.

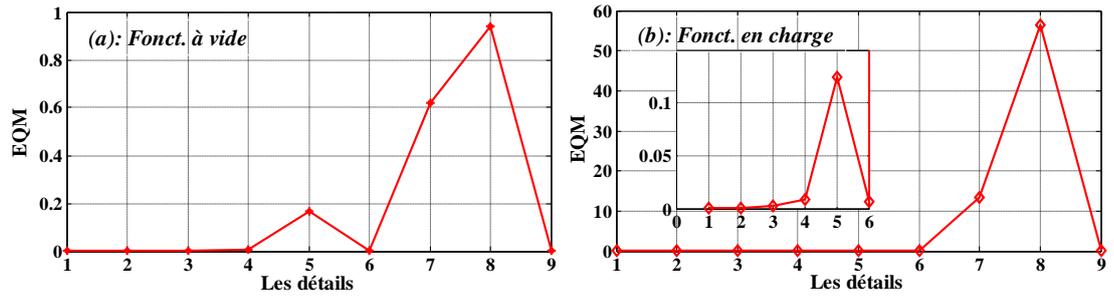


Figure IV.12. Evolution de l'EQM pour une barre cassée.

D'après les tableaux et la figure (IV-12), on voit l'influence de la charge sur la ressemblance de d7 et d8. Cette figure résume bien les aspects qualitatif et quantitatif de notre analyse par l'EQM.

L'étude et l'analyse dans cette partie, s'intéressent à l'effet du défaut de la rupture de barres dans les machines asynchrones en utilisant la technique de la TOD.

L'analyse par la transformée en ondelettes discrètes, est donc un outil très efficace pour la détection du défaut de la cassure de barres, surtout par l'introduction de l'erreur quadratique moyenne comme un indicateur.

On a remarqué que les bandes les plus sensiblement touchées pour cette analyse du défaut de la cassure de barre sont de 25 Hz à 100 Hz (d7 et d8). Cette dernière explique bien les FBLs trouvées dans la FFT du courant statorique.

IV.4 TECHNIQUE D'ONDELETTES POUR LE DEFAUT D'EXCENTRICITE ROTORIQUE

IV.4.1 Défaut d'excentricité statique

L'approche est basée sur l'analyse des signaux pour plusieurs niveaux de détail (et d'approximation), résultant de la décomposition en ondelettes, dont les bandes de fréquence associées sont incluses de 0 Hz jusqu'à la moitié de la fréquence d'échantillonnage.

Les figures (IV-13), (IV-14), (IV-15) et (IV-16) comparent la TOD du courant statorique et l'énergie de chaque détail sous les conditions suivantes :

- Fonctionnement à vide et en charge ;
- Etat sain et avec défaut d'excentricité statique.

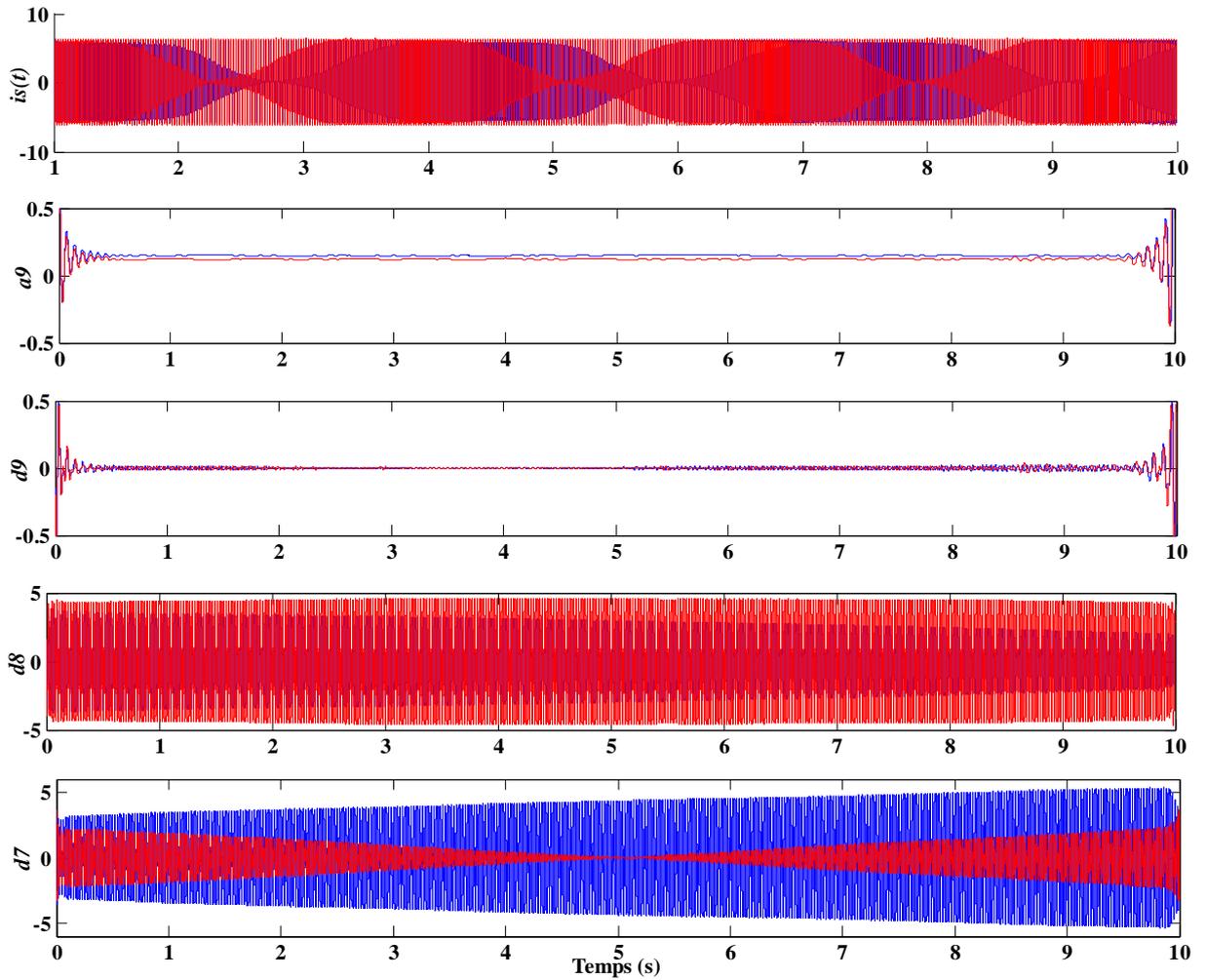


Figure IV.13. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement à vide (ES) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

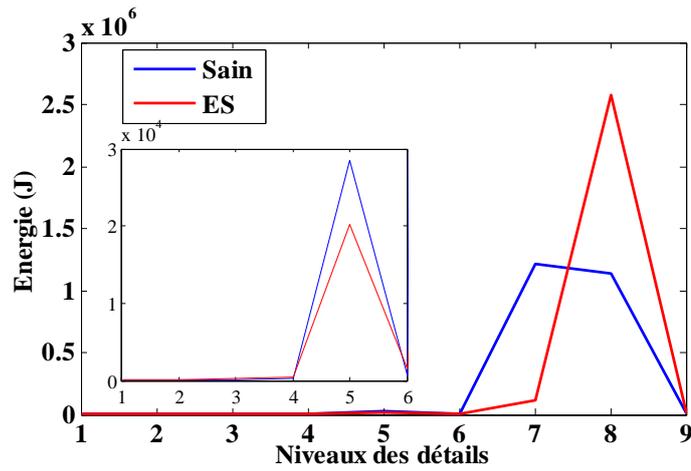


Figure IV.14. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (ES).

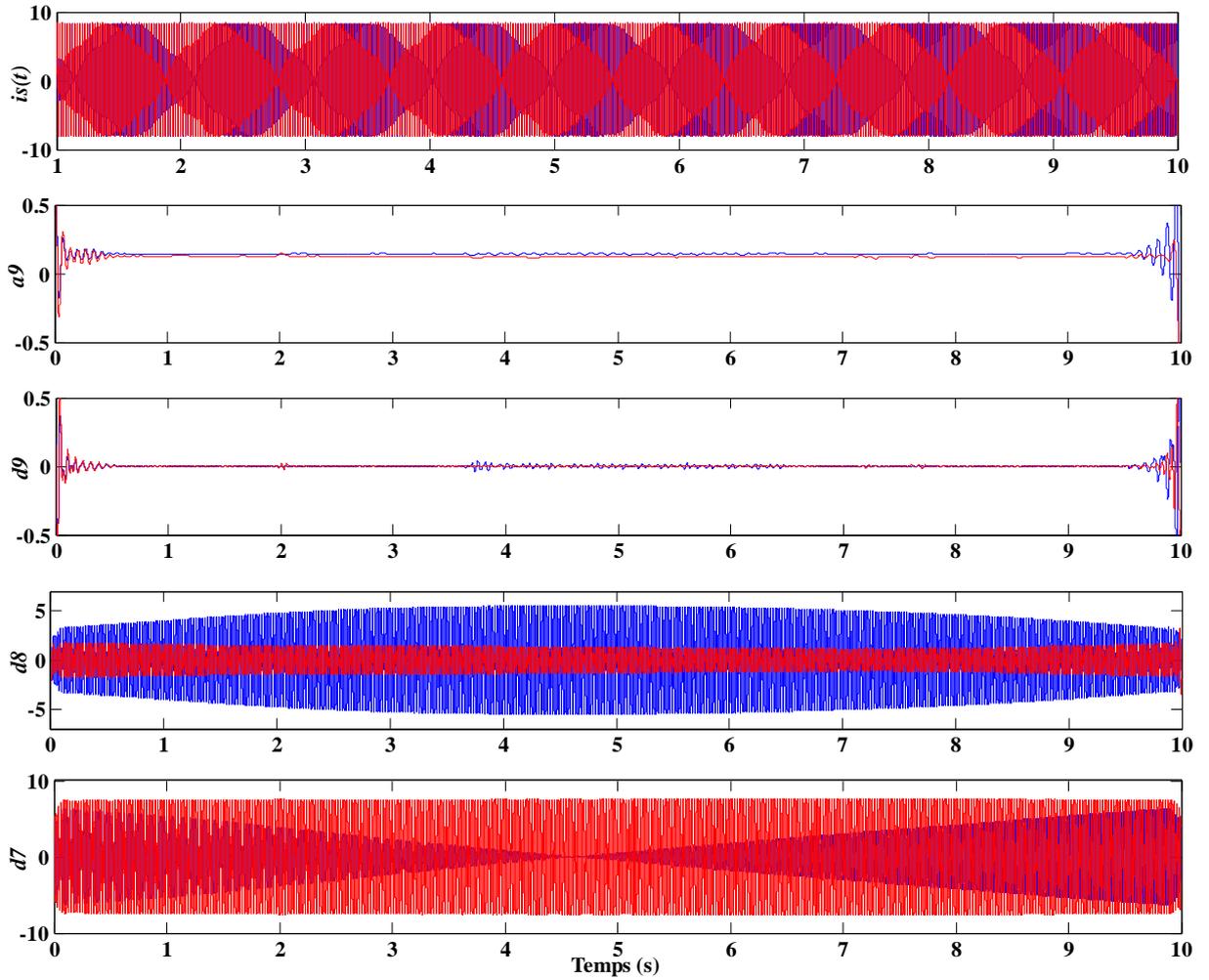


Figure IV.15. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement en charge (ES) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

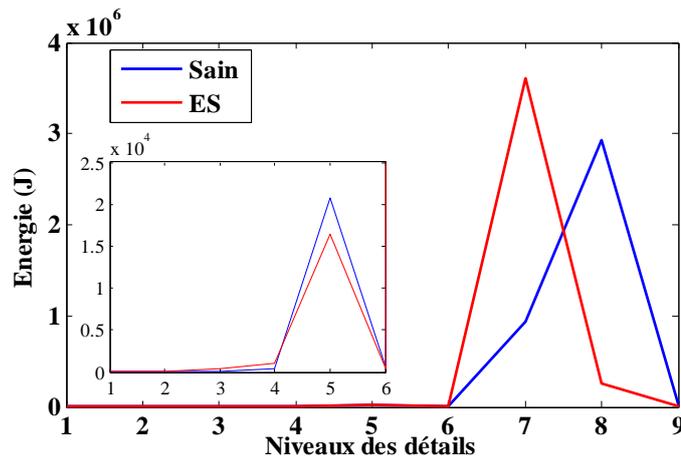


Figure IV.16. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (ES).

La comparaison des signaux de détails et d'approximation pour une machine avec défaut d'excentricité statique, montre que l'amplitude des coefficients $d7$, $d8$, $d9$ et $a9$ a

changée par rapport à celui dans le cas de la machine saine ; cette variation dans les signaux d7, d8, d9 et a9 est due à l'effet du défaut d'ES. Les bandes de fréquence correspondantes sont liées aux détails et l'approximation touchés par la présence du défaut d'excentricité statique.

Ainsi, on remarque qu'il y a des différences plus claires au niveau des détails d7 et d8 qui se traduisent par les énergies de celles-ci. Il faut noter aussi que l'énergie du détail d5 est affectée par l'existence du défaut.

Concernant l'EQM de chaque niveau qui assure une information décisive pour toute contribution de détail. Les tableaux (IV.4) et (IV-5) représentent les différentes valeurs de l'EQM pour chaque niveau et pour les deux fonctionnements de la MAS (à vide et en charge).

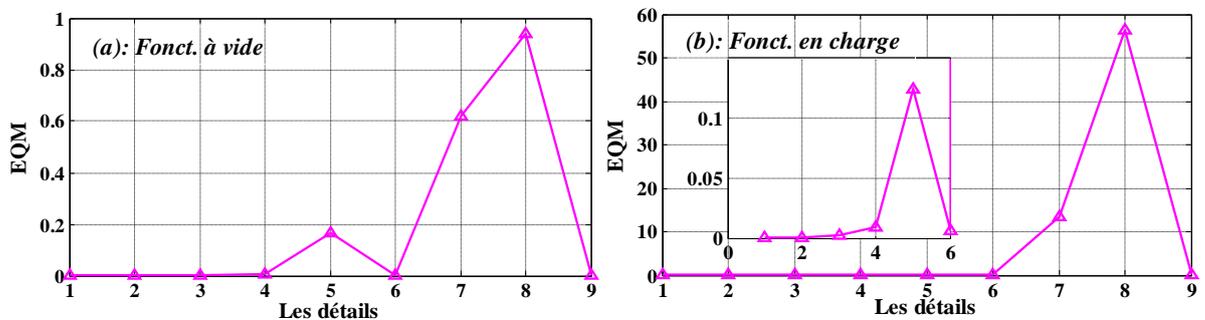
Tableau IV.4 Valeurs des EQMs (fonctionnement à vide-ES).

EQM (di, a9)	Valeur de l'EQM	Ressemblance
EQM-d1	3.2876×10^{-05}	Presque présente
EQM-d2	4.7183×10^{-05}	Presque présente
EQM-d3	0.0029	Moins d'absence
EQM-d4	0.0058	Moins d'absence
EQM-d5	0.2280	Grande absence
EQM-d6	0.0242	Absence
EQM-d7	12.7951	Grande absence
EQM-d8	1.5044	Grande absence
EQM-d9	0.0012	Moins d'absence
EQM-a9	0.0034	Moins d'absence

Tableau IV.5 Valeurs des EQMs (fonctionnement en charge-ES).

EQM (di, a9)	Valeur de l'EQM	Ressemblance
EQM-d1	3.4164×10^{-05}	Presque présente
EQM-d2	5.8419×10^{-05}	Presque présente
EQM-d3	0.0043	Moins d'absence
EQM-d4	0.0132	Moins d'absence
EQM-d5	0.1949	Absence
EQM-d6	0.0078	Moins d'absence
EQM-d7	43.0259	Grande absence
EQM-d8	6.8389	Grande absence
EQM-d9	0.0043	Moins d'absence
EQM-a9	0.0045	Moins d'absence

Les valeurs dans les tableaux précédents montrent bien que les d7 et d8 ont une influence importante lorsqu'on le compare avec l'état sain. L'EQM indique, donc, d'une part l'existence du défaut et d'autre part les BFRs. La figure (IV-17) montre un résumé sur l'évolution de l'EQM en fonction des détails.

**Figure IV.17.** Evolution de l'EQM pour un défaut d'excentricité statique.

IV.4.2 Défaut d'excentricité dynamique

Sur les figures (IV-18), (IV-19), (IV-20) et (IV-21), on peut observer que l'évolution dans les bandes de fréquences d'observation du signal associé au défaut d'excentricité dynamique peut être analysée, en utilisant les coefficients a9 et d7 à d9, ou en utilisant seulement le coefficient d7 qui fournit toute l'information dans la bande de fréquence contenant les informations reliées aux défauts d'ED.

Par comparaison de l'énergie des détails représentée dans les figures (IV-17) et (IV-19), on voit que la différence entre les deux détails 7 et 8 est très claire.

Ceci signifie que l'utilisation de la transformée en ondelettes directement sur le signal du courant du moteur asynchrone peut être efficace. La différence entre les détails (approximations) pour un état sain et un autre état défectueux donne des signatures plus significatives, c'est à dire que plus d'informations sur le défaut sont incluses dans le différentiel du signal.

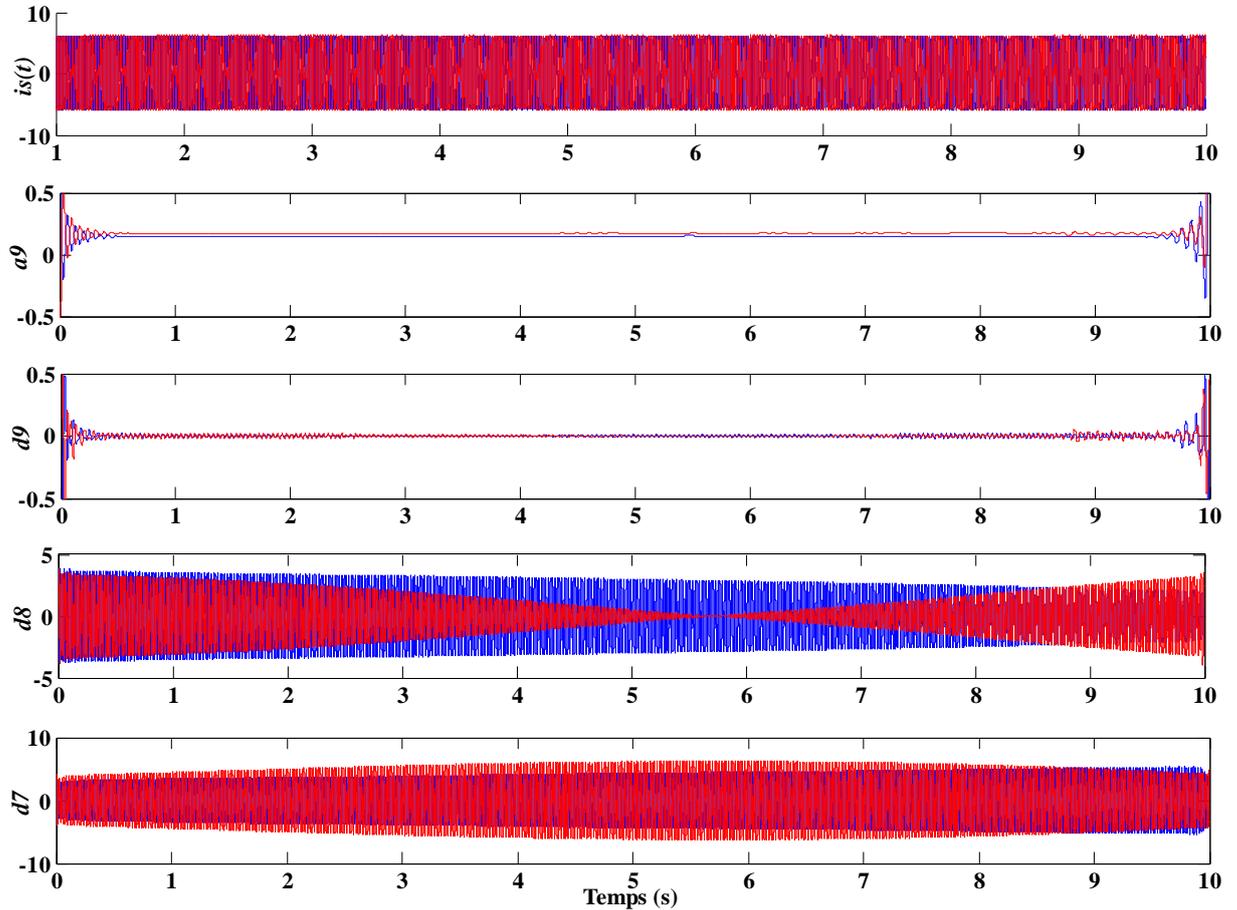


Figure IV.18. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement à vide (ED) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

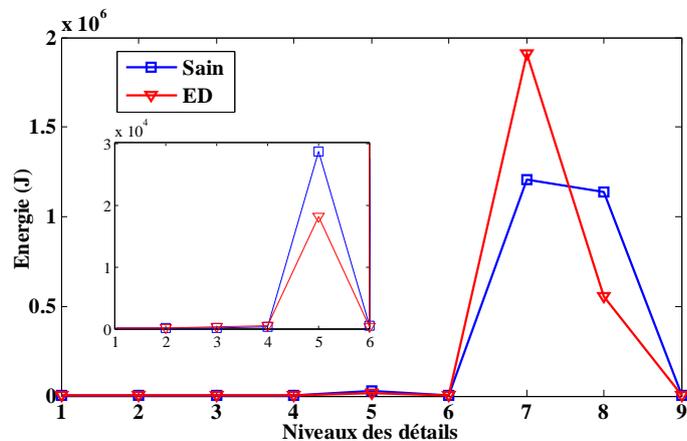


Figure IV.19. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (ED).

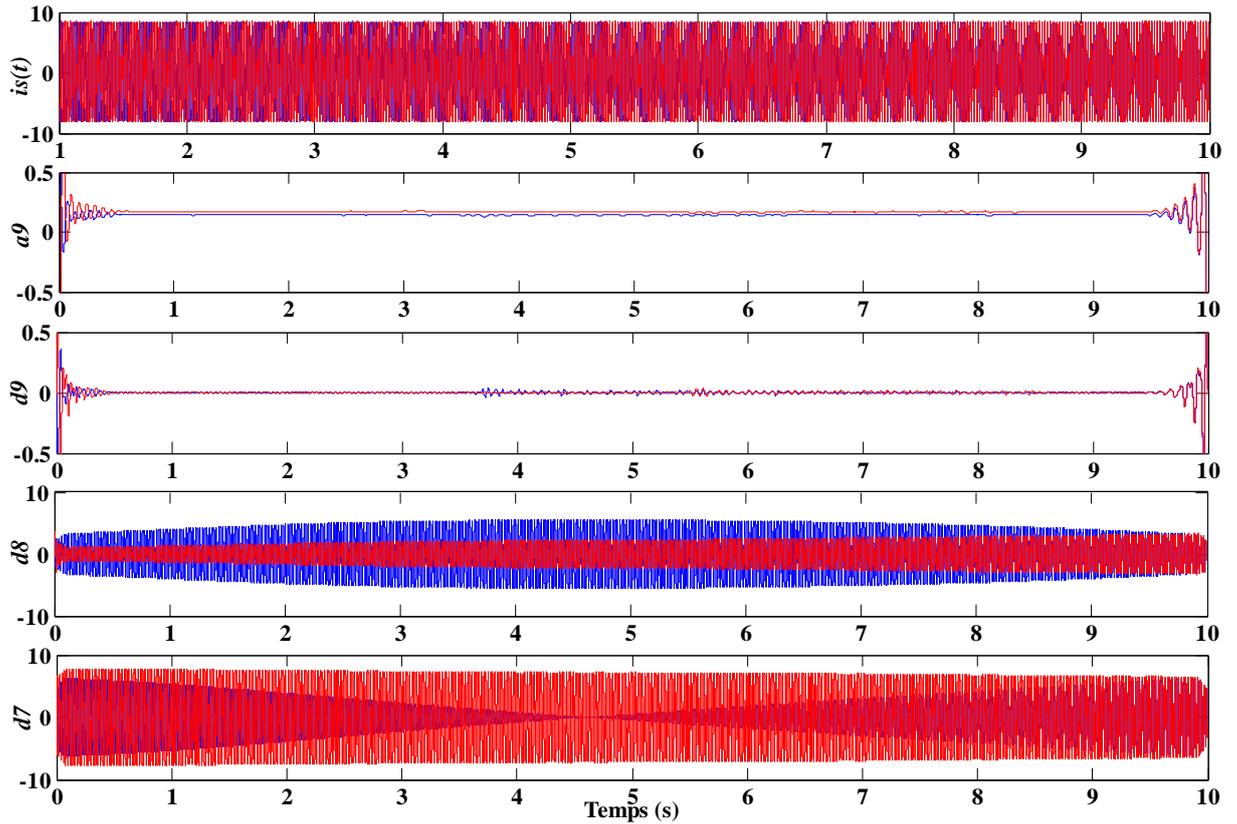


Figure IV.20. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement en charge (ED) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

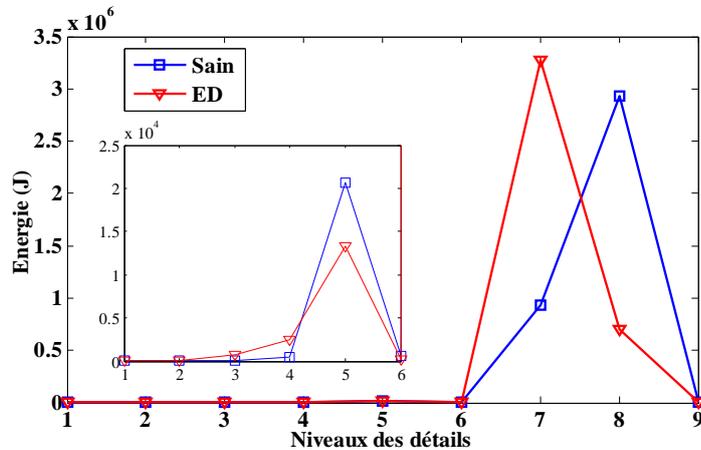


Figure IV.21. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (ED).

L'extraction des signaux de chaque niveau, est considérée comme une source très riche en informations dans le cas d'un défaut par rapport à celui d'une machine sans défaut.

Après la différentiation, l'EQM nous amène d'obtenir la décision correcte sur l'état des signaux défectueux par rapport aux signaux de l'état sain.

Tableau IV.6 Valeurs des EQMs (fonctionnement à vide-ED).

EQM (di, a9)	Valeur de l'EQM	Ressemblance
EQM-d1	2.9176×10^{-05}	Presque présente
EQM-d2	5.0700×10^{-05}	Presque présente
EQM-d3	0.0023	Moins d'absence
EQM-d4	0.0063	Moins d'absence
EQM-d5	0.2014	Absence
EQM-d6	0.0066	Moins d'absence
EQM-d7	54.7415	Grande absence
EQM-d8	10.1193	Grande absence
EQM-d9	0.0064	Moins d'absence
EQM-a9	0.0097	Moins d'absence

Tableau IV.7 Valeurs des EQMs (fonctionnement en charge-ED).

EQM (di, a9)	Valeur de l'EQM	Ressemblance
EQM-d1	3.2727×10^{-05}	Presque présente
EQM-d2	5.1230×10^{-05}	Presque présente
EQM-d3	0.0078	Moins d'absence
EQM-d4	0.0257	Absence
EQM-d5	0.1567	Absence
EQM-d6	0.0063	Moins d'absence
EQM-d7	37.0905	Grande absence
EQM-d8	3.9722	Grande absence
EQM-d9	0.0072	Moins d'absence
EQM-a9	0.0244	Absence

L'étude qualitative arbitraire et l'autre quantitative précise de l'EQM, regroupent un ensemble des signatures importantes concernant le défaut d'ED. La progression de l'EQM avec la charge et le défaut est représentée dans la figure (IV-22).

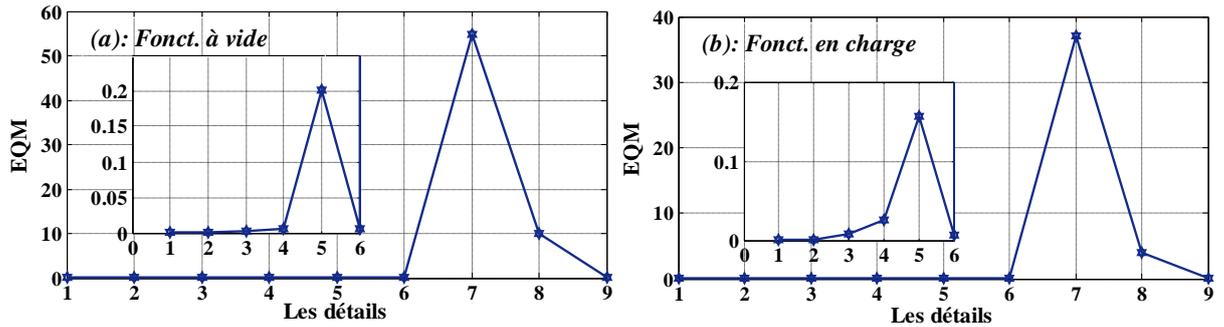


Figure IV.22. Evolution de l'EQM pour un défaut d'excentricité dynamique.

IV.5 LA TECHNIQUE D'ONDELETTES POUR LES DEFAUTS DE ROULEMENT

IV.5.1 Détection du défaut de la bague extérieure (BE)

Les figures (IV-23), (IV-24), (IV-25) et (IV-26) représentent les signaux de détail et d'approximation (d7, d8, d9 et a9), obtenus par la décomposition en multi-niveaux sous un défaut dans la bague externe et pour différentes conditions. Le calcul de l'énergie relative associée à chaque niveau de décomposition nous permet, de différencier également la machine saine de celle défectueuse. Les figures (IV-24) et (IV-26) indiquent la variation de cette énergie pour les deux machines (saine et défectueuse) et pour les deux fonctionnements (à vide et en charge).

Comparons les signaux de détail et d'approximation obtenus pour les machines avec défauts, on voit que l'amplitude des coefficients d7, d8 et d5 est plus sensible par rapport aux autres. Cette variation de l'amplitude dans les signaux d5, d7 et d8 est due à l'effet que, les bandes de fréquences correspondantes sont affectées par le défaut.

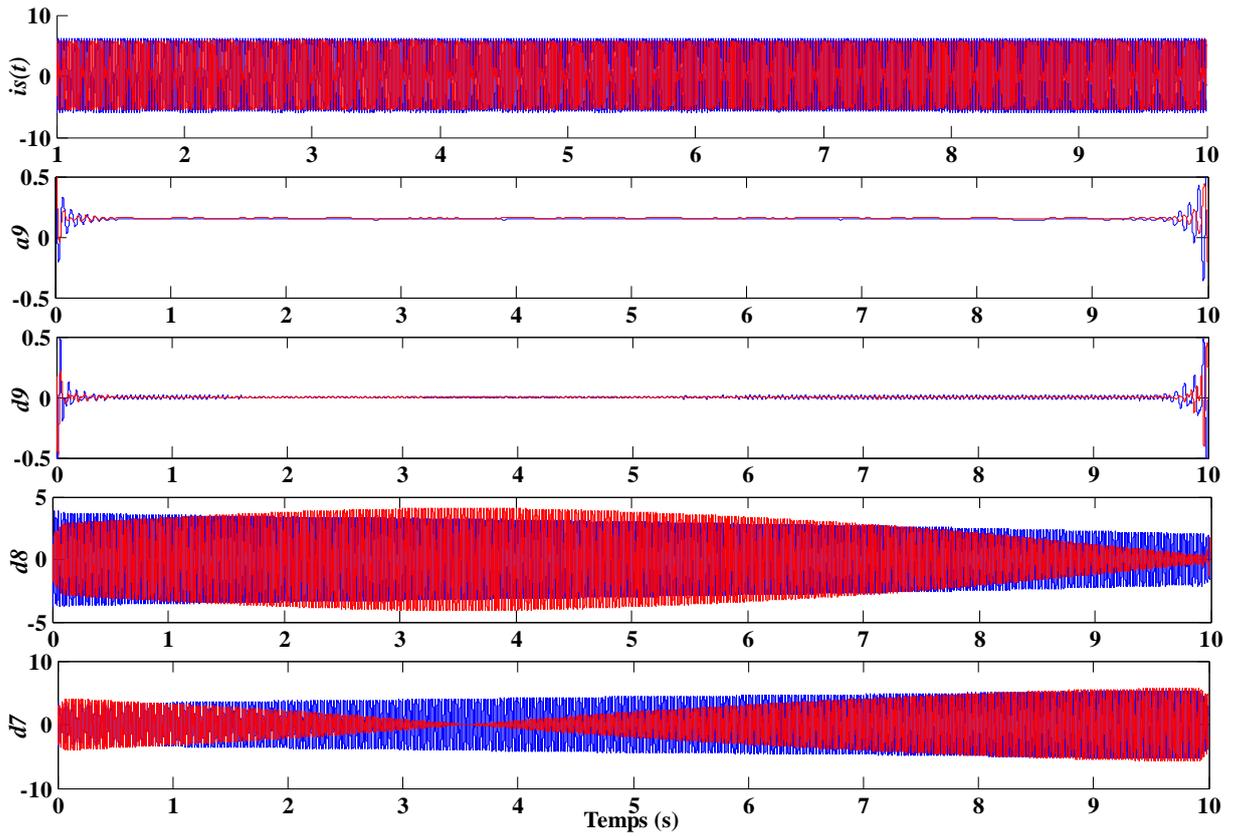


Figure IV.23. Décomposition en multi-niveaux du courant statorique pour un fonctionnement à vide (BE) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

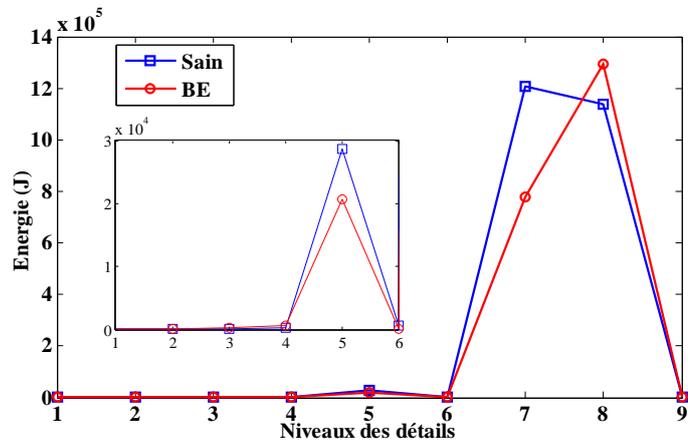


Figure IV.24. Evolution de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (BE).

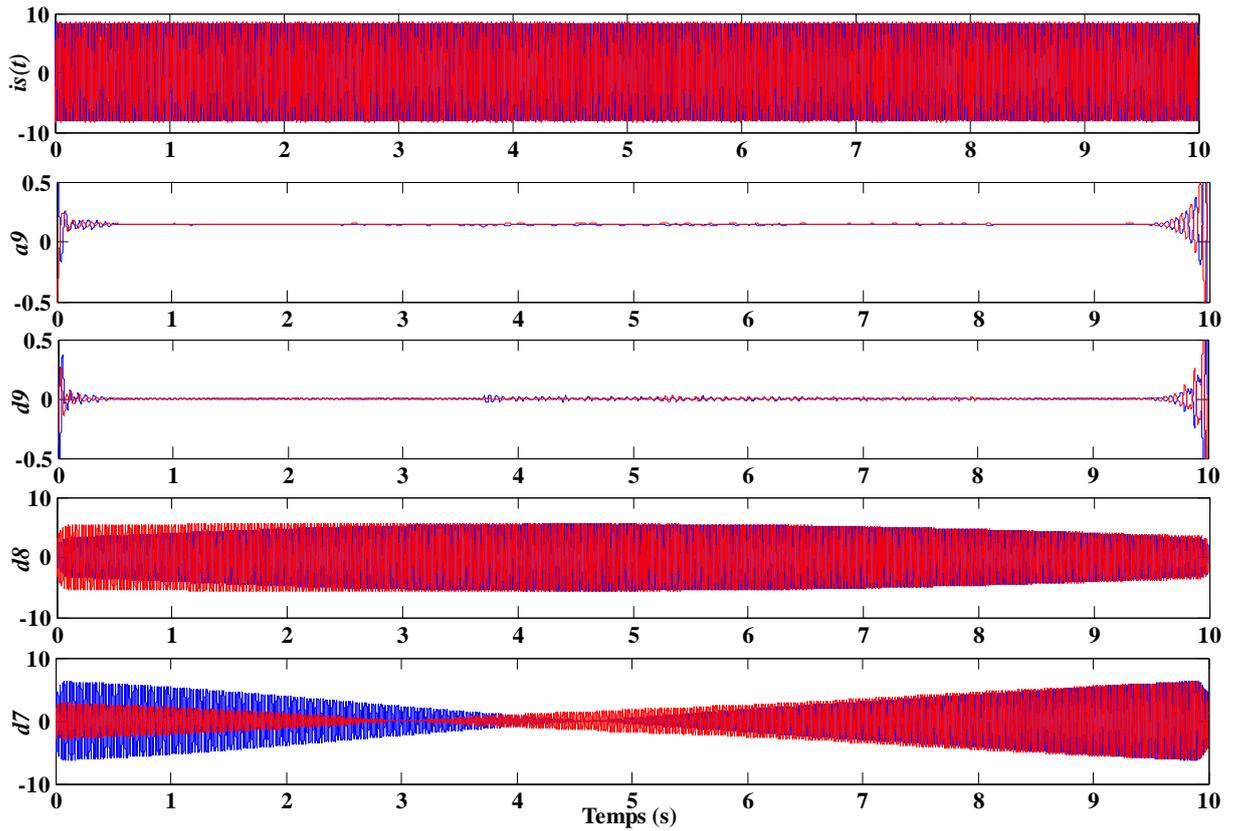


Figure IV.25. Décomposition en multi-niveaux du courant statorique pour un fonctionnement en charge (BE) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

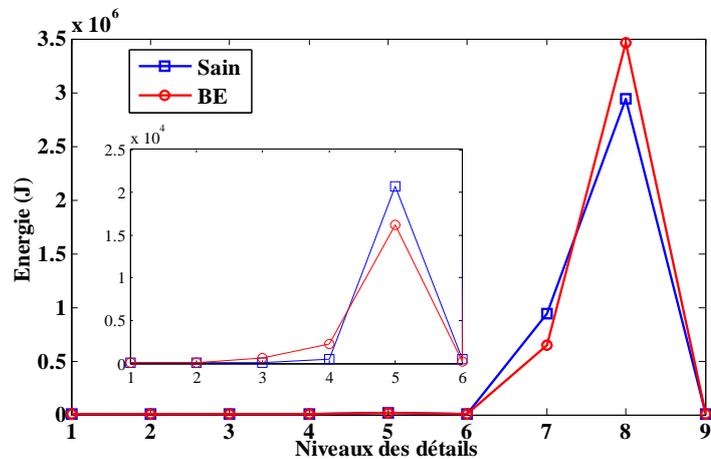


Figure IV.26. Evolution de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (BE).

Comme la plupart des études qui utilisent la TOD, le diagnostic du défaut est basé sur l'observation et la comparaison entre les niveaux de décomposition, qui contiennent l'information du défaut pour différentes machines à diagnostiquer. Notre proposition qui s'intéresse au calcul de l'EQM, a pour objectif d'éviter toute opposition ou chevauchement des

avis humains sur l'évolution visuelle des signaux. Les tableaux (IV.8) et (IV.9) montrent le calcul de cet indicateur en présence du défaut de la BE.

Tableau IV.8 Valeurs des EQMs (fonctionnement à vide-BE).

EQM (di, a9)	Valeur de l'EQM	Ressemblance
EQM-d1	3.4938×10^{-05}	Presque présente
EQM-d2	5.5600×10^{-05}	Presque présente
EQM-d3	0.0028	Moins d'absence
EQM-d4	0.0077	Moins d'absence
EQM-d5	0.2329	Absence
EQM-d6	0.0056	Moins d'absence
EQM-d7	24.9483	Grande absence
EQM-d8	19.2467	Grande absence
EQM-d9	0.0035	Moins d'absence
EQM-a9	0.0068	Moins d'absence

Tableau IV.9 Valeurs des EQMs (fonctionnement en charge-BE).

EQM (di, a9)	Valeur de l'EQM	Ressemblance
EQM-d1	3.2868×10^{-05}	Presque présente
EQM-d2	5.8192×10^{-05}	Presque présente
EQM-d3	0.0057	Moins d'absence
EQM-d4	0.0203	Absence
EQM-d5	0.1741	Absence
EQM-d6	0.0066	Moins d'absence
EQM-d7	24.0351	Grande absence
EQM-d8	51.1002	Grande absence
EQM-d9	0	Présente
EQM-a9	0	Présente

La représentation graphique de l'évolution de l'erreur quadratique moyenne pour les deux types de fonctionnements, est illustrée dans la figure (IV-27). D'après le tableau (IV.9),

on voit que le détail d9 et l'approximation a9 ont une excellente ressemblance (EQM=0). Cette valeur de l'EQM=0 indique que l'on aura une difficulté pour la distinction entre les deux signaux suivants :

- d9-sain VS d9-avec défaut ;
- a9-sain VS a9-avec défaut.

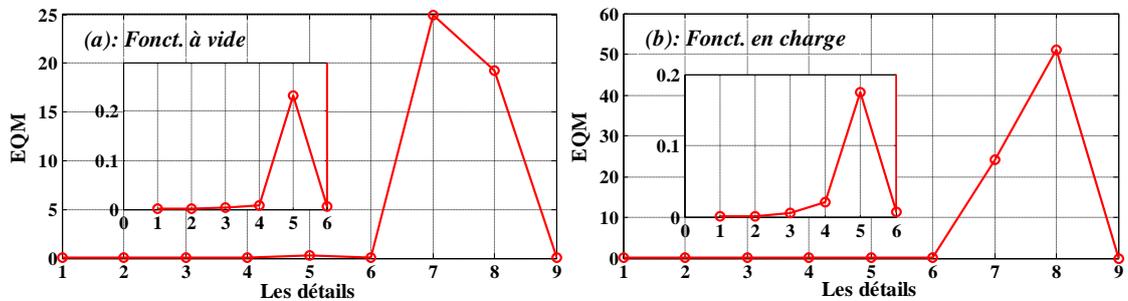


Figure IV.27. Evolution de l'EQM pour un défaut de la bague externe.

IV.5.2 Détection du défaut de la bague intérieure (BI)

L'extraction des informations du courant statorique en régime permanent, est généralement faite en fonctionnement en charge, ce choix est nécessaire à cause de la difficulté rencontrée en fonctionnement à vide, pour extraire l'information concernant un défaut dans la MAS.

L'application de la transformée en ondelettes aux signaux du courant permanent est basée sur la décomposition multi-résolutionnelle du signal du courant statorique.

D'après les figures (IV-28), (IV-29), (IV-30) et (IV-31) qui représentent clairement l'évolution des signaux pour différentes conditions bien signalées. L'effet du défaut de la bague intérieure est clair pour quelques signaux et n'est pas clair pour des autres. Les d7 et d8 sont sensiblement touchées à la présence du défaut de la BI.

Le calcul de l'énergie emmagasinée dans chaque niveau de décomposition, confirme une diminution observée dans les signaux de détail d5 et d8 et une augmentation pour le d7 (Fig. IV-29). En fonctionnement en charge, l'augmentation d'énergie a été trouvée au niveau du détail d8 seulement (Fig. IV-31). Cette variation nous amène de détecter le défaut et de préciser la bande fréquentielle. Les d7 et d8 correspondent à la bande qui se trouve au voisinage et au dessous du fondamental.

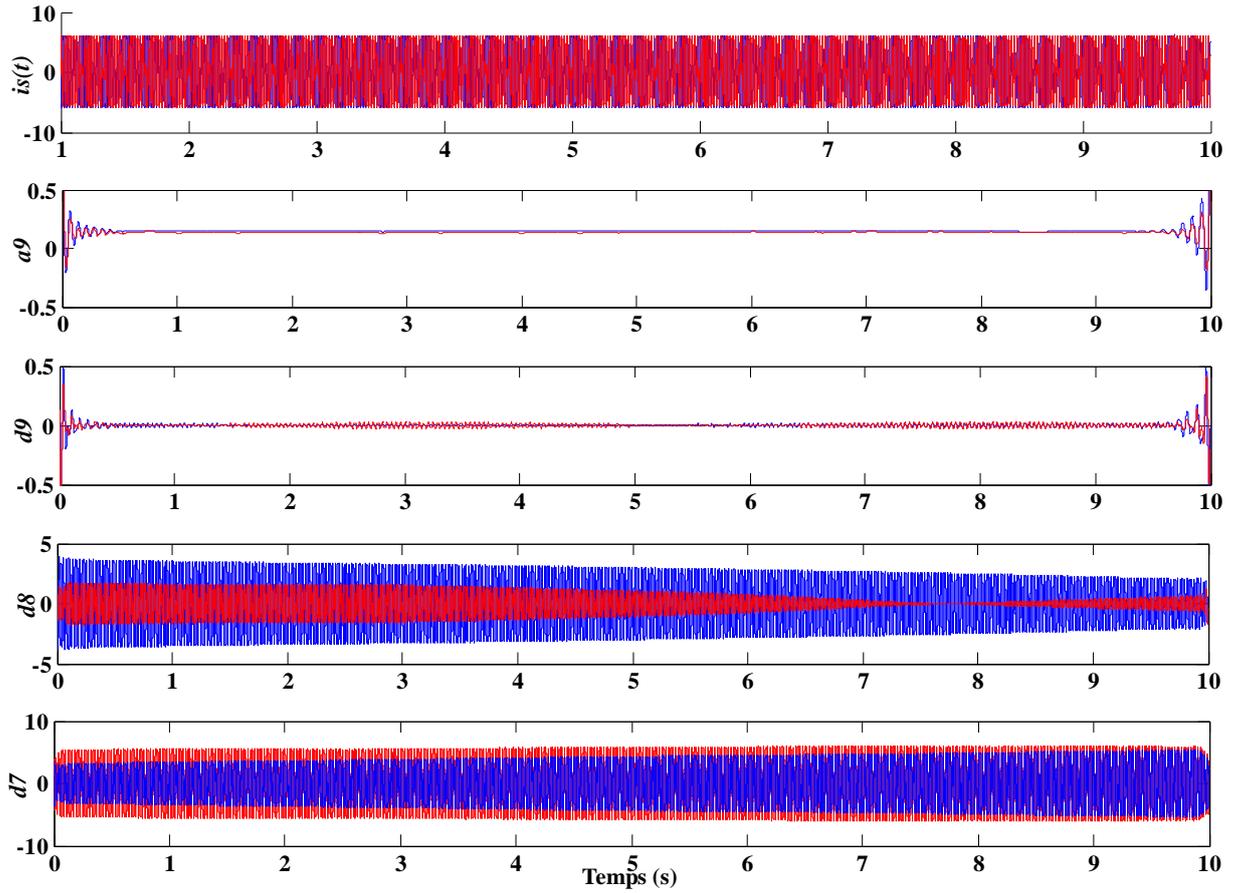


Figure IV.28. Décomposition en multi-niveaux du courant statorique pour un fonctionnement à vide (BI) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

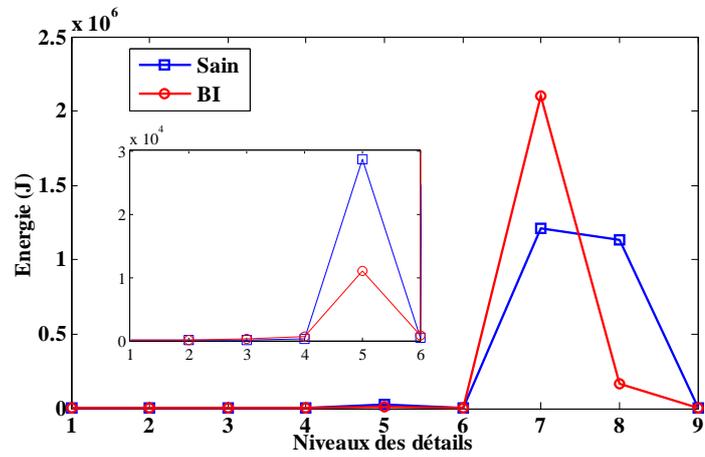


Figure IV.29. Evolution de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (BI).

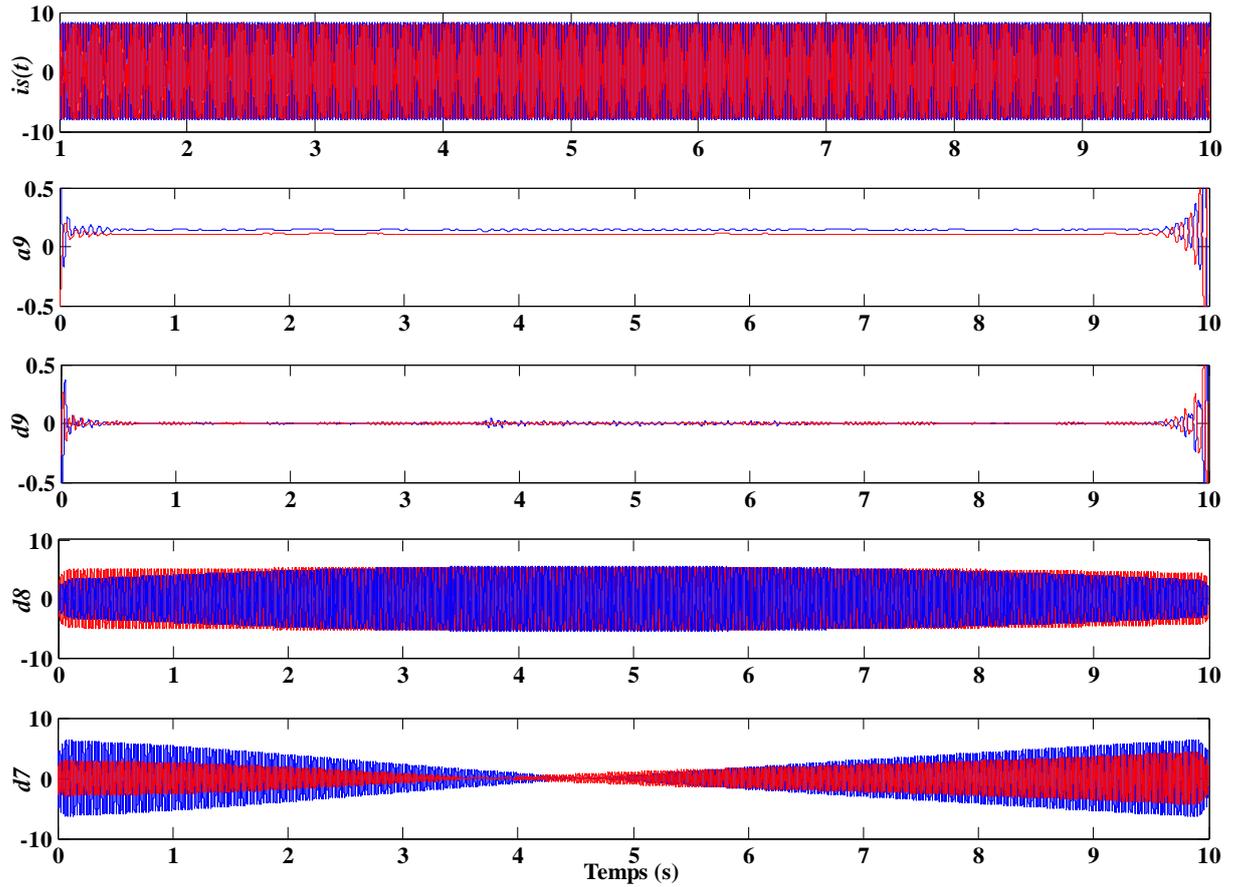


Figure IV.30. Décomposition en multi-niveaux du courant statorique pour un fonctionnement en charge (BI) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

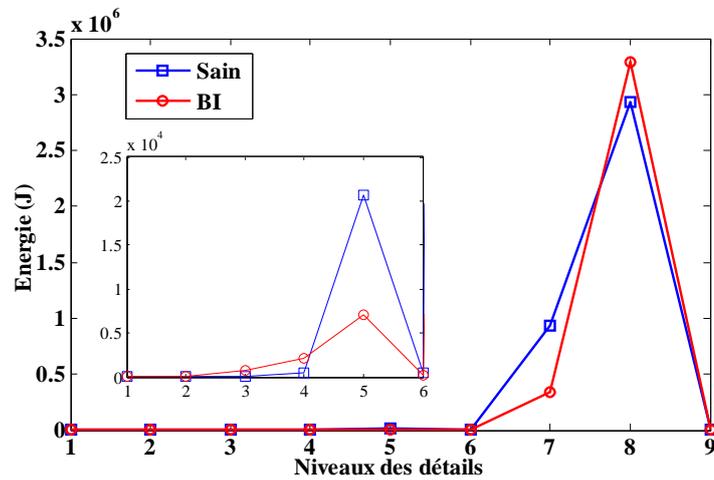


Figure IV.31. Evolution de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (BI).

L'analyse par l'EQM est considérée comme une méthode, qui se base sur un calcul bien défini pour la ressemblance ou non des signaux traités. L'EQM permet de représenter toute l'information de la ressemblance par une valeur unique calculable et visible. Cet intérêt

de l'EQM est montré dans les deux tableaux ci-dessous. La figure (IV-32) donne un résumé illustratif sur l'évolution de cette erreur en fonction de niveaux des détails.

Tableau IV.10 Valeurs des EQMs (fonctionnement à vide-BI).

EQM (di, a9)	Valeur de l'EQM	Ressemblance
EQM-d1	2.7053×10^{-05}	Presque présente
EQM-d2	6.8581×10^{-05}	Presque présente
EQM-d3	0.0029	Moins d'absence
EQM-d4	0.0073	Moins d'absence
EQM-d5	0.1511	Absence
EQM-d6	0.0088	Presque présente
EQM-d7	0.5414	Grande absence
EQM-d8	8.5167	Grande absence
EQM-d9	5.7579×10^{-04}	Presque présente
EQM-a9	0.0034	Moins d'absence

Tableau IV.11 Valeurs des EQMs (fonctionnement en charge-BI).

EQM (di, a9)	Valeur de l'EQM	Ressemblance
EQM-d1	2.9296×10^{-05}	Presque présente
EQM-d2	8.3884×10^{-05}	Presque présente
EQM-d3	0.0075	Moins d'absence
EQM-d4	0.0229	Absence
EQM-d5	0.1668	Absence
EQM-d6	0.0050	Moins d'absence
EQM-d7	21.1149	Grande absence
EQM-d8	55.4360	Grande absence
EQM-d9	0.0103	Absence
EQM-a9	0.0511	Absence

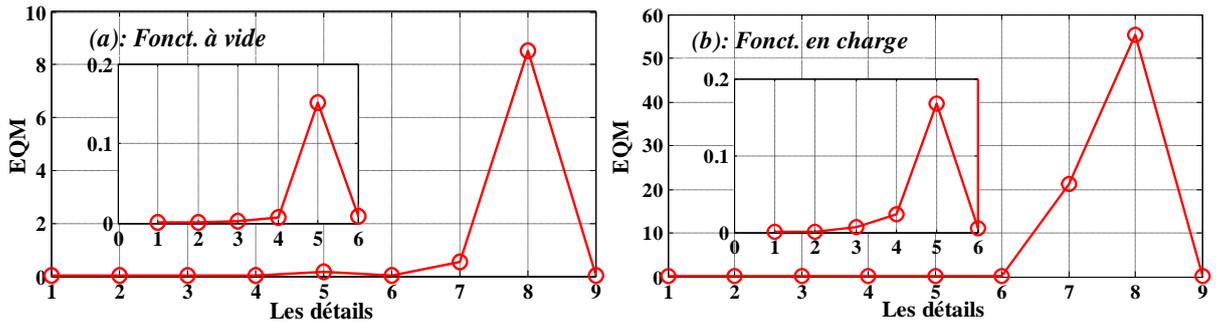


Figure IV.32. Evolution de l'EQM pour un défaut de la bague interne.

On voit clairement l'effet des défauts (cassure de barres, excentricité ou roulement) sur les signaux des détails et les approximations et précisement sur l'énergie emmagasinée dans le niveau 5, 7 et 8 ; cette variation diffère selon le type de défaut et le régime de fonctionnement.

L'erreur quadratique moyenne (EQM) représente un moyen efficace pour diagnostiquer les machines tournantes par des valeurs bien calculées.

IV.7 CONCLUSION

En raison des inconvénients de l'analyse par FFT, il est nécessaire de trouver des méthodes supplémentaires pour l'analyse de la non-stationnarité et de détecter les défauts d'après un signal de test. Les informations importantes dans les signaux stationnaires ou non stationnaires, peuvent être exploitées avec souplesse par la transformée en ondelettes (TO).

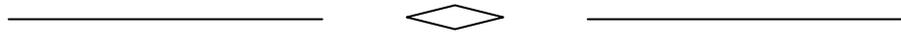
Le rythme d'accélération, pour l'application de la transformée en ondelettes dans le domaine du diagnostic des MAS, se progresse d'une manière incroyable.

Dans cette partie nous avons présenté l'application de la TOD ou l'analyse de la MCSA par DWT pour traiter le diagnostic des défauts de la MAS. Un nouvel indicateur a été introduit dans cette étude, c'est l'erreur quadratique moyenne (EQM ou MSE en Anglais) qui représente une bonne contribution pour la décision finale dans notre analyse des défauts. L'analyse expérimentale montre le changement dans le comportement du signal du courant statorique du à l'état défectueux progressif.

Cette technique est *largement sensible* aux défauts, elle découvre aisément l'existence du défaut mais ne le précise pas. Cet inconvénient, impose d'autres propositions intéressantes pour exploiter les analyses riches de cette méthode (détails, énergies, ...etc.). Il est plus

intéressant, donc, de construire des ondelettes adaptées qui peuvent donner des résultats numériques plus satisfaisants que les ondelettes classiques.

L'analyse vibratoire est un moyen largement utilisé pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre de notre étude qui sera l'objectif du chapitre suivant.



CHAPITRE V

Analyses vibratoires des défauts de la MAS

V.1 INTRODUCTION

Il est difficile, aujourd'hui, d'imaginer le monde sans moteurs électriques. Les utilisations continues et la large exploitation des moteurs électriques dans différents domaines assurent la nécessité de leur existence. Nous sommes de plus en plus exigeants en ce qui concerne la qualité acoustique de ces moteurs. Les fabricants de moteurs et d'autres équipements ont besoin de plus en plus, d'avoir une compétence étendue dans le traitement des vibrations et du bruit [FIN13]. Par conséquent, la concurrence aux marchés a pour objectif d'avoir un tel savoir-faire des moteurs silencieux.

Jusqu'à présent, il n'y a pas eu d'approche dans l'analyse et l'élimination définitive des vibrations et des bruits. La vibration est considérée comme l'une des sources importantes pour réaliser la surveillance [GRA00].

L'analyse vibratoire des machines tournantes est aujourd'hui très utilisée par les industriels, pour diagnostiquer des défauts. L'identification du problème permet de mettre en place des actions curatives comme un réglage ou le remplacement d'une pièce défectueuse avant la panne de la machine. L'analyse des signatures de vibration du moteur électrique (ASVM) ou sous l'abréviation Anglaise MVSA (Motor Vibration Signature Analysis) est l'un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement.

Notre objectif, est d'étudier le diagnostic du défaut de la CB, ES, ED et le défaut de roulement en se basant sur la technique de MVSA ; c'est-à-dire, en analysant les images vibratoires induites par ces défauts. La connaissance de ces images vibratoires et de la cinématique de la machine, nous permettra de formuler une décision judicieuse.

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

V.2 DEFINITIONS

Les machines asynchrones sont constituées d'un ensemble d'éléments, raccordés entre eux. Un défaut se trouvant au niveau de l'un de ces éléments peut transmettre sa vibration aux autres éléments. La vibration est la variation dans le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité oscille autour d'une certaine valeur de référence. On peut dire qu'un corps est en vibration lorsqu'il y a un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence.

Les différents éléments de la MAS : bâti, roulements, bobinage, accouplements, arbre, paliers, etc. peuvent être caractérisés, en particulier sur le plan vibratoire, par des formes de

signaux et des traitements particuliers. L'analyse de vibration permet le diagnostic de [PHI09], [FIN13], [WAN15]:

- L'état des roulements et engrenages ;
- Défauts de serrage ;
- Défauts d'excentricité rotorique et statorique ;
- Défauts des barres rotoriques ;
- Problème de fixation ;
- Défaut d'accouplement (désalignement) ;
- Perturbation électromagnétique dans les moteurs ;
- L'état des pales de ventilation ;
- L'état général du fonctionnement par comparaison avec les vibrations à l'état sain de la machine.

V.2.1 Mesure de la vibration

La mesure est réalisée par deux types de capteurs :

- ✓ Les accéléromètres pour des mesures de vibration absolues (placés sur des paliers à roulement).
- ✓ Les sondes de déplacement ou de proximité pour des mesures de déplacement relatif de l'arbre dans les paliers.

V.2.2 Capteurs et grandeurs mesurées

La plupart des capteurs dans le domaine industriel (pratique) appartient à la famille de MEMSs (Micro Electro Mechanical Systems), qui servent essentiellement à la capture des signaux. Voici quelques applications pratiques de la technologie MEMS :

- Têtes d'impression des imprimantes jet d'encre ;
- Accéléromètres ;
- Gyroscopes ;
- Capteurs de pression ;
- Pilotage de micro-miroirs sur vidéoprojecteur ;
- Commutation optique pour les télécommunications ;
- Biocapteurs, chémorécepteurs.

Un capteur de vibration est un transducteur capable de convertir en signal électrique le niveau de vibrations qu'il a subi à un instant donné.

Dans la plupart des applications de mesure de vibrations, on trouve les paramètres suivants:

- **Accélération (accéléromètre ; mm/s^2 ou $g \approx 9,81m/s^2$ ou mV) :** Les éléments actifs de ce type de capteur sont des disques spéciaux de cristal *piézo-électrique*, qui ont la propriété de transformer une contrainte (solicitation mécanique : pression ou cisaillement) en charges électriques Q (en pC). Ces disques piézo-électriques doivent se trouver entre deux masses relativement importantes par l'intermédiaire d'un ressort. Lorsque le capteur est soumis à une vibration, les masses exercent une pression alternative sur les disques qui, grâce à leur effet piézo-électrique, créent une variation de charge électrique proportionnelle à la force appliquée et donc à l'accélération des masses.
- **Vitesse (vélocimètre ; mm/s ou mV) :** Un aimant permanent génère une induction magnétique constante B . Les lignes de champ se referment par l'intermédiaire du boîtier. Une bobine suspendue par des membranes peut se déplacer dans la direction des lignes de champ. Une force électromotrice (*fém*) d'induction ' e ' est alors générée, qui est le produit de la vitesse v de vibration, de l'induction magnétique B et de la longueur l de l'enroulement ($e=B.l.v$) [BEN08].
- **Déplacement (μm , mm ou mV) :** Il existe en effet des capteurs : (Inductifs, Capacitifs et à courants de Foucault), c'est ce dernier qui s'est imposé dans le monde entier, le circuit oscillant crée un champ magnétique alternatif dans la bobine du capteur. D'après le principe d'induction, il se crée alors des courants de Foucault dans un corps conducteur que l'on approche du capteur. Ces courants de Foucault agissent à leur tour sur la bobine par l'intermédiaire du champ magnétique et consomment ainsi de l'énergie électrique. Elle se traduit alors dans le conditionneur par une diminution de la tension. Cet effet est démodulé dans le conditionneur et transformé en un signal de mesure proportionnel à la distance objet/bobine (de mV à mm) [BEN08].

Pour une sonde de déplacement le signal est exprimé en déplacement (μm).

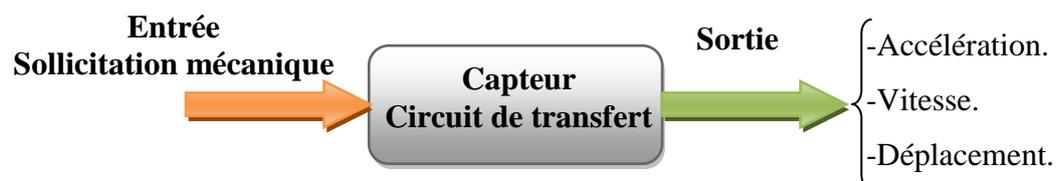


Figure V.1. Schéma de principe d'un capteur de vibration.

Ces paramètres sont des informations qu'il faut les connaître avec la meilleure précision possible.

Pour obtenir la vitesse et le déplacement à partir d'une accélération, il faut intégrer une et deux fois le signal de sortie de l'accéléromètre. C'est précisément pour cela que le choix d'un accéléromètre est très important. Les variations d'amplitude et le décalage peuvent conduire à des erreurs importantes, après intégration (ou inversement par dérivation).

Le choix de l'unité n'est pas indifférent, il dépend, essentiellement, de la bande fréquentielle de chaque capteur. Les mesures en accélération sont à privilégier ($0 < F < 20000$ Hz), les mesures en vitesse (réservées aux basses fréquences $F < 1000$ Hz) et en déplacement (très basses fréquences $F < 100$ Hz) [THO12].

Toutefois, l'accélération est celle qui permet de mettre en évidence les phénomènes vibratoires dont les fréquences sont les plus élevées.

Pour ces raisons, on choisit ici, de représenter l'analyse des signaux vibratoires de la machine asynchrone sur la base d'une accélération, afin de pouvoir caractériser les effets des défauts sur une plage fréquentielle la plus large possible.

V.2.3 Type de détection

Il doit être clairement identifié parmi [THO12]:

- L'amplitude crête à crête A_{pk-pk} (amplitude maximale du signal) ;
- L'amplitude crête A_{0-p} (indique le niveau des chocs de courte durée) ;
- L'amplitude efficace A_{rms} , valeur efficace ou 'rms' (root mean square : tient compte du contenu énergétique et des capacités destructrices de la vibration).

En pratique on utilise souvent :

- La valeur efficace pour les mesures issues d'accéléromètres.
- L'amplitude crête à crête pour les mesures issues de sondes de déplacement.

V.2.4 Analyse fréquentielle

Toute anomalie est traduite par une fréquence correspondante à celle du phénomène qui la provoque, d'où l'analyse de spectre, permet le diagnostic.

La mesure de l'amplitude de certaines raies du spectre (correspondantes au défaut recherché) permettra le suivi de ce défaut. Le tableau (I-1) du premier chapitre résume quelques fréquences caractéristiques des défauts [THO12].

V.2.5 Fixation de l'accéléromètre sur le palier [THO12]

Le montage de l'accéléromètre sur la structure à une influence considérable sur la réponse du capteur. Plus la fixation est rigide, plus la réponse s'élargit vers les hautes fréquences.

Valeur de bandes passantes (exemple):

- vissé : 0 à 12KHz (très bonne réponse mais pas toujours réalisable) ;
- collé : 0 à 12KHz (une pastille peut être collée est le capteur vissé sur cette pastille) ;
- aimant : 0 à 2,5 KHz ;
- tenu à la main : 0 à 1KHz (à n'utiliser que dans le cadre de mesure comparative).

Compte tenu des deux points précédents concernant la bande passante, on doit s'assurer en choisissant un accéléromètre et son mode de fixation, que la gamme de fréquence (bande passante) de l'ensemble accéléromètre plus fixation, couvre la gamme de fréquence de mesure désirée.

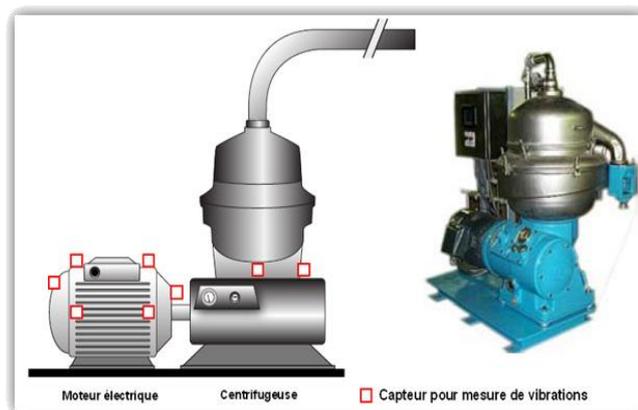


Figure V.2. Exemple des points de fixations dans un système électromécanique.

V.2.6 Les points de mesure

Généralement, la localisation des points de mesure se fait pour les raisons suivantes:

- Les mesures de vibrations sont réalisées sur les paliers de la machine ;
- Le capteur doit être placé de façon à assurer un trajet direct (rotor-structure) aux vibrations.

Les mesures peuvent se faire :

- dans un plan radial (vertical : PRV, horizontal : PRH, oblique : PRO) ;
- et/ou dans un plan axial (axial : PA).

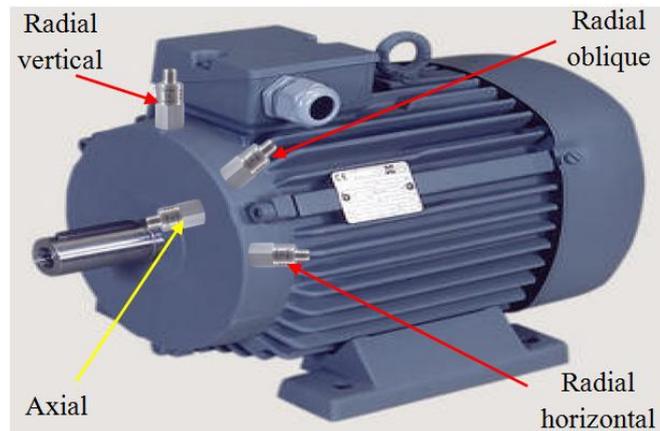


Figure V.3. Différents points de mesure des vibrations d'une MAS.

On fait les mesures de vibrations pour :

- vérifier les fréquences et les amplitudes indésirables ;
- éviter les fréquences de résonance des composants de la structure ;
- être capable d'amortir ou isoler la ou les sources de vibrations ;
- étudier le comportement du système électrique (MAS) ;
- faciliter la maintenance préventive des machines ;
- construire ou vérifier les modèles informatiques qui entrent en jeu.

V.3 LES SOURCES DES VIBRATIONS ET DES BRUITS

Les vibrations d'une machine tournante se transmettent, généralement, du rotor à la structure à travers les paliers. Elles seront donc mesurées au niveau des paliers [ALAM15].

Pour une machine tournante électrique, les forces vibratoires sont de trois natures différentes :

- ✓ Electromagnétique ;
- ✓ Mécanique ;
- ✓ Aérodynamique.

Généralement, les sources d'excitation vibratoires dans les machines tournantes peuvent être classées en différentes catégories :

- Forces périodiques (balourd) ;
- Forces transitoires (variations de charge) ;
- Forces impulsionnelles (chocs) ;
- Forces aléatoires (frottements).

Les phénomènes à l'origine des vibrations dépendent de la constitution de la machine et de ses paramètres de fonctionnement.

La culasse et l'arbre de chaque machine électrique peuvent se déplacer, également, de manière indésirable. En conséquence, la répartition de la densité d'énergie magnétique dans l'entrefer, qui est nécessaire pour générer le couple d'une machine électrique, doit inévitablement être fluctuante dans le temps et l'espace [HEN93]. La distribution magnétique de la perméance magnétique de l'entrefer, la conception des aimants, la distribution de l'enroulement, et l'allure du courant statorique appliqué au fil d'alimentation sont autant de facteurs de ces vibrations. Sur la surface périphérique du rotor et du côté de l'entrefer du stator, la variation de la répartition spatiale de la densité d'énergie magnétique en fonction du temps, entraîne des forces tangentielles et radiales (excitations) qui sont appliquées à différents endroits. Ces forces ont une partie importante de la vibration ou du bruit [FIN91], [FIN02], [ALA03], [ALAM15].

Les forces tangentielles influent sur le couple de la machine, soit, par addition ou soustraction.

La répartition des forces de traction magnétiques orientées radialement provoquent des mouvements et des déformations radiales du stator et du rotor.

Dans le cas le plus général, on appelle 'bruit', toutes les variations intervenant dans un dispositif et ne faisant pas partie du signal utile que l'on désire mettre en évidence [YVO06].

Les amplitudes des vibrations de fréquences les plus élevées, souvent, provoquent de bruits de frottement et deviennent particulièrement désagréables [AIT05]. Comme le manque de lubrifiant du roulement, les contacts mécaniques entre les éléments constitutifs augmentent, et le frottement mécanique qui se produit par d'autres défauts qui affectent la machine. Il en résulte, des vibrations naturelles comme le système à l'état sain du roulement. Il faut noter aussi qu'à une certaine vitesse de rotation, les billes fonctionnent effectivement en phase, plutôt que dans une trajectoire circulaire ondulée ; en conséquence, des vibrations axiales auto-induites [HEN93].

Dans l'ensemble, la majorité des défauts qui créent la vibration, sont dus à un phénomène électromagnétique (eg. cassure de barre) ou mécanique (eg. l'excentricité).

V.4 REDUCTION DE BRUIT ET LES VIBRATIONS D'EXCITATION

Idéalement, le bruit et les vibrations sont plus réduits, lorsqu'on les élimine à leurs racines. Cependant, dans les moteurs électriques, les forces et les couples sont nécessaires, ils

comprennent, souvent et inévitablement d'autres composants indésirables (couples oscillants, couples de démarrages, etc.), qui ne peuvent être complètement évités [FUL96]. La grande variété de concepts de moteurs qui sont actuellement rencontrés avec leurs principes de fonctionnement variables, conduit également à diverses excitations de bruit [GRA00]. Les moteurs asynchrones se comportent différemment des moteurs synchrones et des machines à courant continu.

Un autre facteur important, est les stratégies des commandes, comme la commande de la modulation de largeur d'impulsion (MLI), elle ajoute de nombreuses harmoniques temporelles dans le spectre des forces électromagnétiques qui excitent la structure du stator, et augmente le risque de résonance. Le bobinage statorique induit également des harmoniques spatiales dans les courants rotoriques qui peuvent jouer un rôle vibratoire non négligeable en charge. Le bruit et les vibrations sont aussi fréquemment excités par un déséquilibre du moteur [GRA00], [AIT05].

Par conséquent, la réduction de la vitesse de fonctionnement du moteur est un moyen de réduire avec succès le niveau de bruit qu'il provoque. Un léger changement dans la vitesse de rotation du moteur peut être utile.

Au cours des dernières années, il a été question de plus en plus, de la compensation active électromagnétique du bruit. En d'autres termes, c'est de générer artificiellement un autre signal afin d'annuler le bruit. Pour mettre en œuvre ce procédé, il est nécessaire de générer un signal qui correspond au bruit indésirable [FUL96], [GRA00], [PHI09].

Ainsi, il reste d'autres options pour réduire le bruit indésirable et les vibrations directement à source, c'est le changement de conception du moteur pour qu'il vibre moins [FIN99], [CHR99].

V.5 RESULTATS EXPERIMENTAUX DE SIGNAUX VIBRATOIRES

Les résultats expérimentaux seront présentés en suivant les conditions d'expérimentation citées dans le deuxième chapitre et le troisième chapitre. Les résultats sont présentés sous forme de figures qui montrent l'amplitude du signal en fonction du temps, puis en fonction des fréquences.

V.5.1 Détection du défaut de la cassure des barres par la méthode de MVSA

Les signaux vibratoires ont plusieurs formes, et comme nous l'avons vu, pour le placement des capteurs de vibrations. Ils peuvent être placés sur un PRV, PRH, PRO ou PA ; notre étude

expérimentale consiste à relever les signaux de vibrations sur les trois plans suivants : RV, RH et sur le plan axial.

Le signal temporel sur un PRV pour un moteur sain et un autre défectueux (2BC, $s=0$ et $s=0.032$) est représenté dans la figure (V-4). Nous prendrons soin de choisir dans la suite ce *plan radial vertical* (PRV), pour l'analyser par la transformée de Fourier rapide.

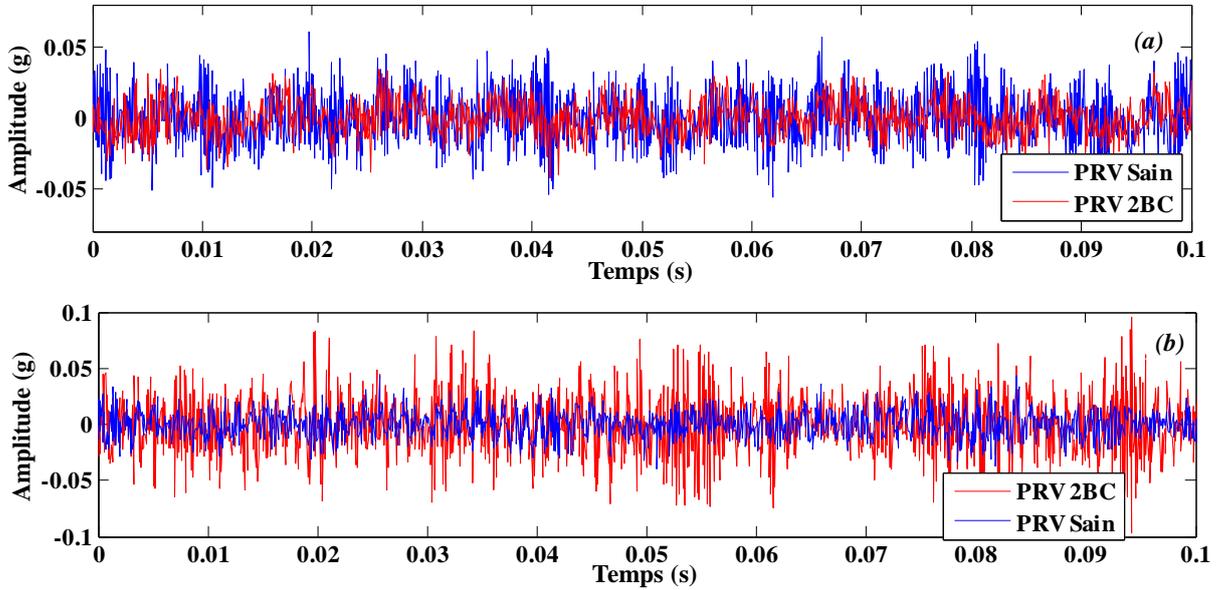


Figure V.4. Signal temporel de vibration dans l'état sain et pour 2BC du MAS ; (a) : fonctionnement à vide, (b) : fonctionnement en charge.

Les fréquences caractéristiques du défaut de la rupture de barres à vérifier, sont les fréquences indiquées au tableau (I-1). De plus, et dans cette analyse, l'accent sera mis sur le suivi des composantes de défaut les plus importantes des séries d'harmoniques [SAD08], [OVI11], [TOM11], [GRI13] :

$$(f_r \pm 2ks.f_s) \quad (\text{V. 1})$$

Une autre série d'harmoniques a été proposée par [TOM01], [MUL03], [CAV04] et [TOM11] selon la formule suivante :

$$(6 \pm 2ks.f_s) \quad (\text{V. 2})$$

D'autres fréquences dues à la cassure des barres proposées par [FIN00] ont la formule :

$$f_{cb} = f_r \pm f_p \quad (\text{V. 3})$$

$f_p = f_g$ est la fréquence de passage (glissement) et donnée par la relation :

$$f_p = (f_s - f_r)p \quad (\text{V. 4})$$

[FIN00] et [SIN03] ont discuté l'existence d'une fréquence liée au nombre des barres rotoriques (f_{nb}) dans le spectre des signaux vibratoires, et plus simplement appelée fréquence d'encoches et égale à la fréquence de rotation multipliée par le nombre d'encoches du rotor. telle que :

$$f_{nb} = RBPF = n_b \cdot f_r \quad (\text{V. 5})$$

ou, $RBPF = 676.2$ Hz est la fréquence de passage de la barre rotorique, en anglais c'est : the rotor bar pass frequency.

$$f_{cb} = f_{nb} \pm 2f_s \quad (\text{V. 6})$$

Cette relation est efficace pour un nombre de barres rotoriques $n_b \in [16-60]$ ou plus.

Par conséquent, l'analyse des signaux vibratoires, ci-dessous, sera axée sur les équations et les formules des fréquences caractéristiques du défaut de la rupture de barres, qui ont été trouvées dans la littérature.

Le spectre du signal de vibration pour deux barres cassées et pour un fonctionnement du moteur à vide est montré dans les figures (V-5) et (V-6).

Les fréquences caractéristiques ne sont pas apparues dans le spectre d'une manière claire, sauf quelques fréquences et autres inexplicables indiquées par les cercles pointillés en vert sur la figure (V-6-d). Un chevauchement a été également signalé dans la figure (V-5-b) entre la fréquence de $5\times$ et la fréquence de la formule $[(1-s)/p+2]f_s$. Il est important de présenter une autre série qui caractérise la CB, c'est $1\times, 1.5\times, 2\times, 2.5\times, 3\times, \text{etc} \dots$ et parmi elles, on a trouvé $1\times, 2\times, 3\times, 4\times, 5\times, 6\times, 7\times$ (même dans l'état sain). Ces fréquences de $(k'/2) \cdot f_r$ pour $k' = 2, 3, 4, \dots$ sont plus proche l'une de l'autre, ce qui impose d'une part un chevauchement avec les bruits, et d'autre part un problème d'une confusion avec d'autres défauts ou phénomènes naturels de la machine, comme par exemple: défaut d'alignement (radial ou angulaire), défaut de serrage, problème sur les pales, excentricité, etc.

Ceci indique l'existence des composantes de défaut du rotor $f_r \pm 2sf_s$ comme 70.3Hz, 79.3Hz, 209Hz, 214.1Hz, 258.9Hz, et autres. On trouve, dans le spectre du signal vibratoire, plusieurs fréquences additionnelles comme : 517.6, 527.2, 536, 537.4, 552.1, 557.3, 569.4, 575, 582.3, 1022, 1154, 1184, 1256, 1380, 1453, 1637. Néanmoins, plusieurs fréquences ont été disparues de l'état sain comme : 20.1, 35, 127, 189.4, 314.3, 319, 328.8, 783.3, 832.2, 850.1, 847.1, 909.9, 958.1, 966.7, 967.9, 981.7, 1008, 1013, 1028, 1043, 1053, 1058, 1186, 1188, 1216, 1218, 1278, 1377, 1440, 1490, ...

La fréquence liée au nombre de barre $RBPF = n_b \cdot f_r = 697.8\text{Hz} = 28 \cdot f_r$ est très claire avec ses bandes latérales de $RBPF \pm 2kf_s$ (figure V-6).

Cette fréquence dépend du nombre de barre rotorique qui est égal 28. Notre raisonnement se base sur l'analyse des fréquences avec deux barres cassées (2BC), c'est-à-dire pour 26 barres. La fréquence qui correspond cette valeur est $(n_b-2).f_r=646.8\text{Hz}=26.f_r$ avec les bandes latérales de $(n_b-2).f_r\pm 2k f_s$ (figure V-6-b). On a trouvé cette nouvelle série d'harmoniques en correspondances avec le multiple de f_r .

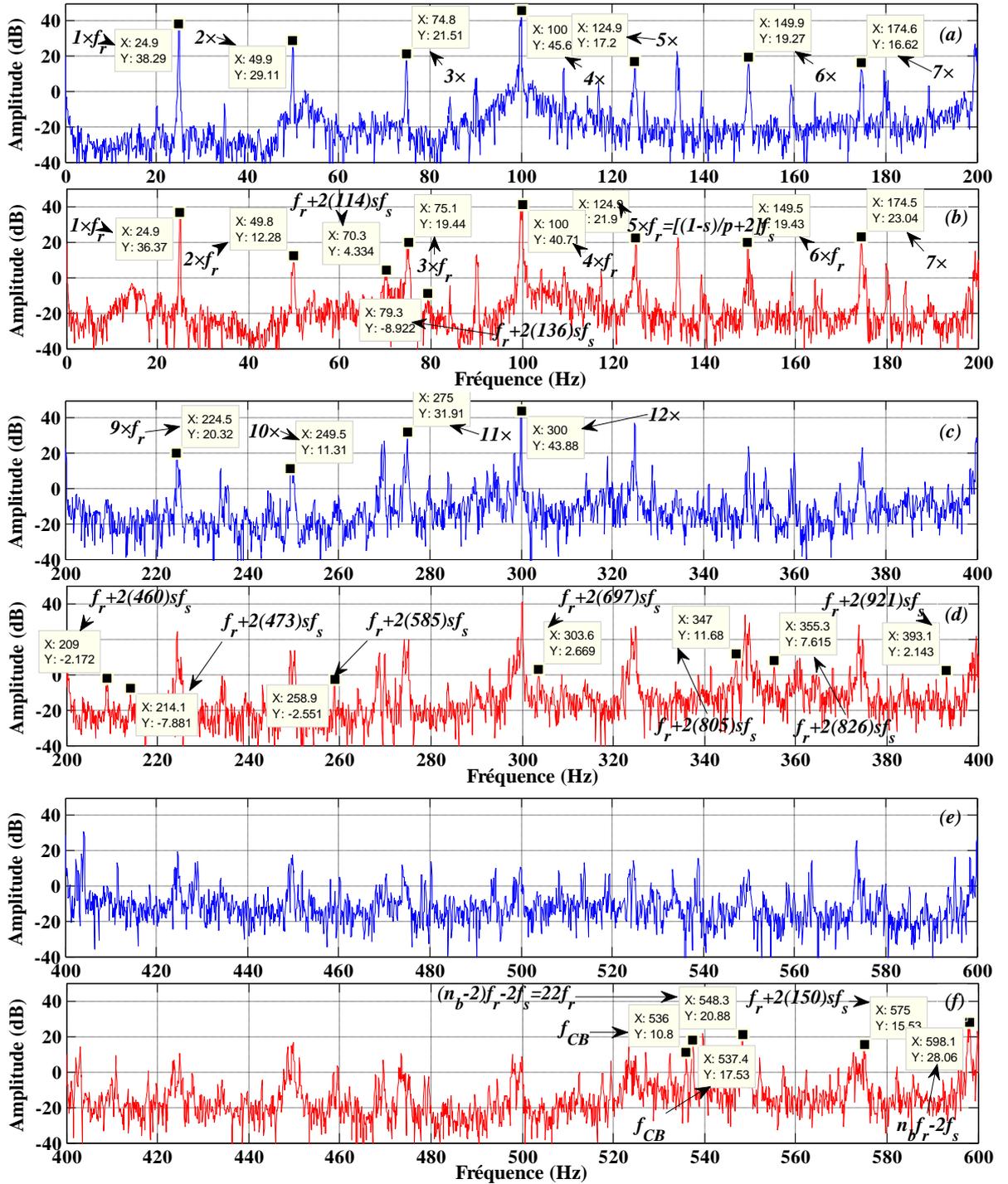


Figure V.5. Spectre du signal vibratoire pour différentes plages de fréquences (2BC, $s=0.004$) ; (a) et (b) :0-200Hz, (c) et (d) :200-400Hz, (e) et (f) :400-600Hz.

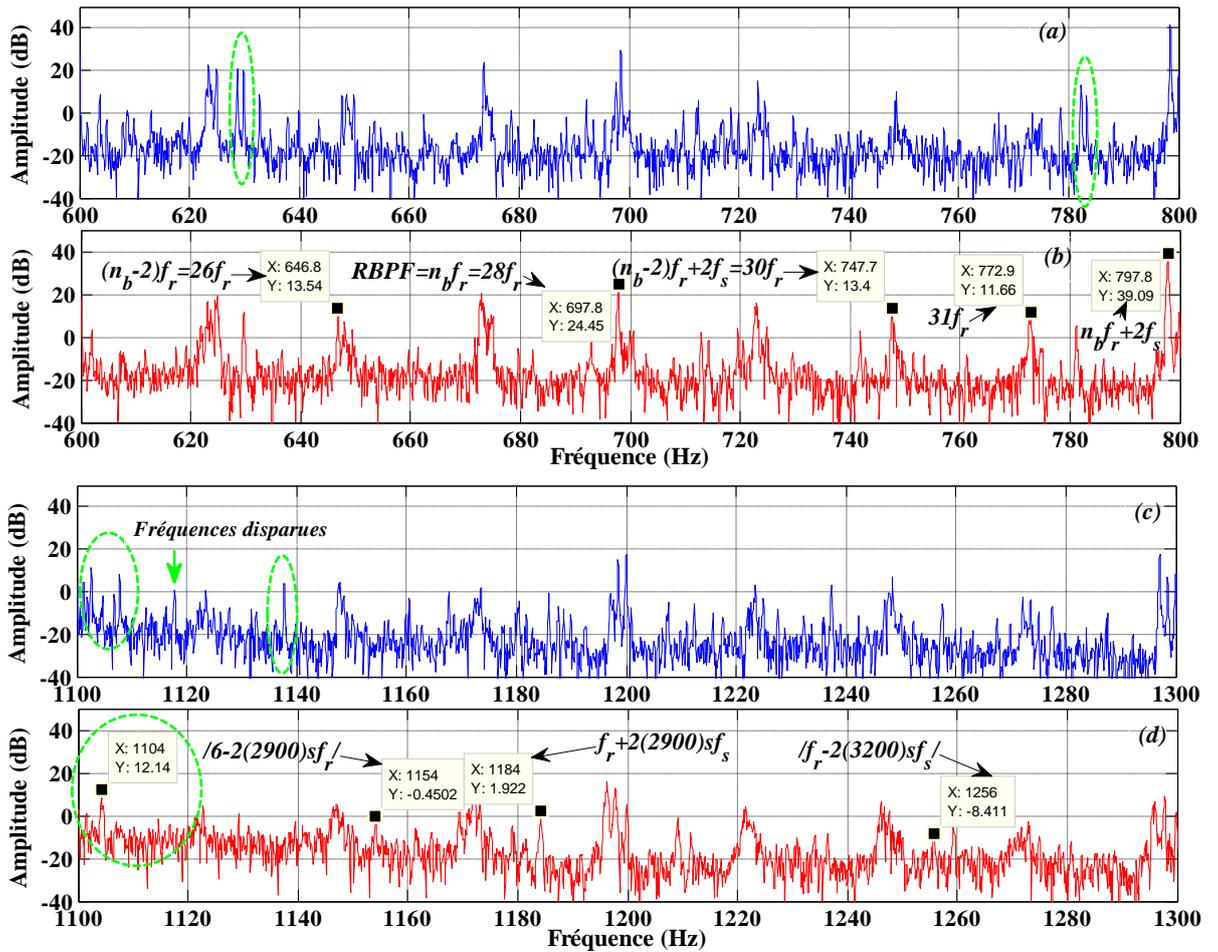


Figure V.6. Spectre du signal vibratoire pour différentes plages de fréquences (2BC, $s=0.004$) ; (a) et (b) : 600-800 Hz, (c) et (d) : 1100-1300 Hz.

Ce cas, plus difficile à diagnostiquer, se caractérise par l'évolution ou l'amplitude anormale de bandes latérales autour de la fréquence de $RBPF$ invisibles (figure V-6), dont le pas correspond $2ksf_s$. La détection de ce défaut nécessite souvent un zoom puissant capable de faire ressortir la fréquence de glissement, qui peut être très faible en cas de moteur peu chargé ($s \approx 0$).

Il est important de signaler les amplitudes de la série de $2kf_s$ tout au long des fréquences dans le spectre du signal vibratoire. Ces fréquences sont amorties lorsqu'on les compare avec l'état sain de la machine. La figure (V-7) illustre bien l'évolution de l'amplitude en fonction des fréquences visées.

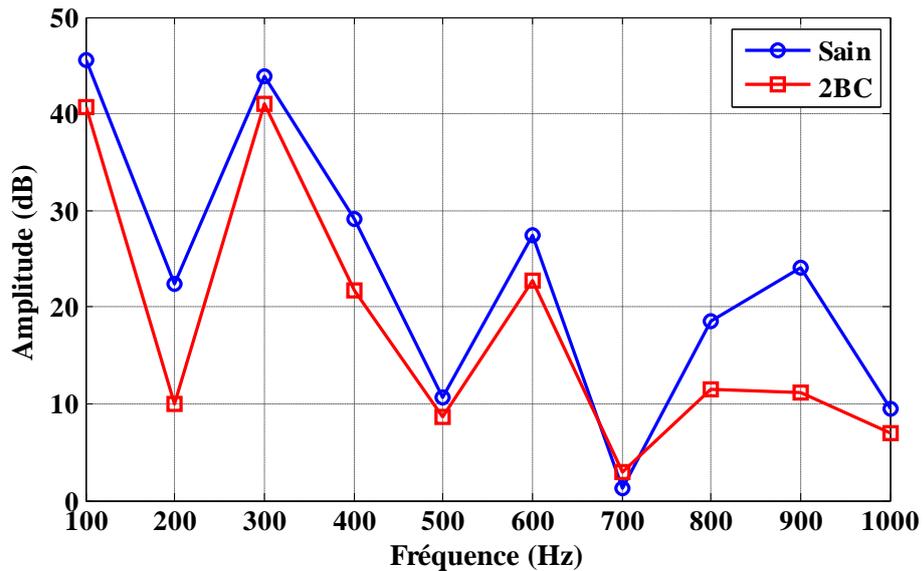


Figure V.7. Evolution d'amplitudes de $2kf_s$ (2BC, $s=0.004$).

Tout défaut rotorique (par exemple, barres cassées ou défaut de liaison barres-anneaux) ou toute variation dynamique d'entrefer va induire une modulation de l'amplitude et/ou de la fréquence de rotation et de ses harmoniques [ALA09].

L'image vibratoire d'un tel défaut se traduit par l'apparition de bandes latérales autour des premiers harmoniques, dont le pas correspond à la fréquence de glissement $f_g = s \cdot f_s / p$ multipliée par deux fois le nombre p de paires de pôles, soit $2p \cdot f_g = 2ksf_s$. L'observation de ce dernier peut nécessiter l'utilisation d'un zoom puissant pour un glissement très faible (moteur peu chargé). La figure (V-8) montre des pics de très faibles amplitudes dus aux bandes latérales citées auparavant.

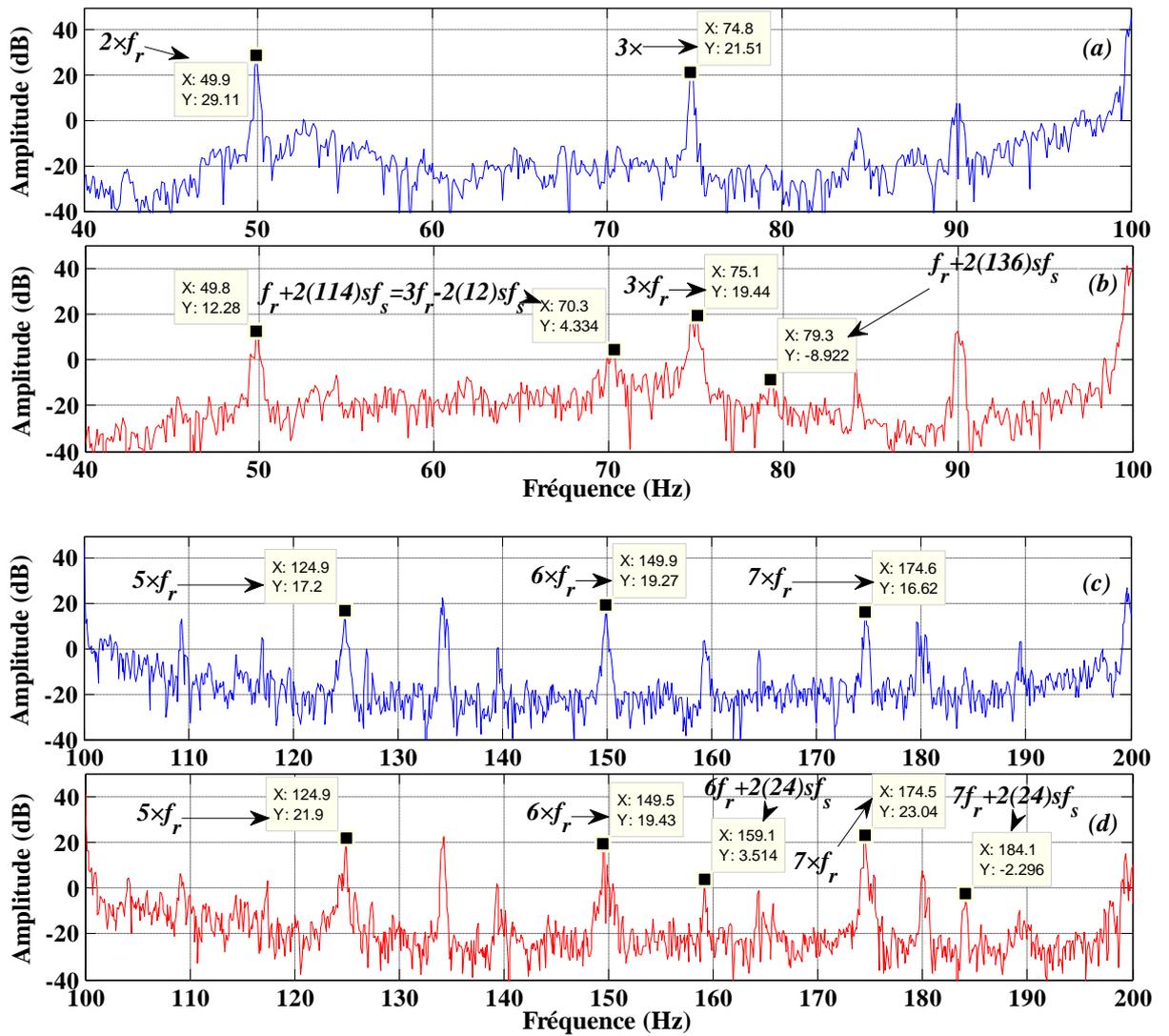


Figure V.8. Bande latérales alentour de kf_r . (2BC, $s=0.004$).

On va maintenant diagnostiquer l'état du moteur pour un fonctionnement en charge ($s=0.034$).

En effet, les variations observées dans la figure (V-9) sont riches en informations sur la présence du défaut autour de $f_r=24.15\text{Hz} \approx 24.2\text{Hz}$, tel que 13.95, 17.35, 20.55, 27.55 et 30.95 qui vérifient la formule $f_r \pm 2ksf_s$. Les résultats obtenus à partir de la bande de [0-200 Hz] présentent des signatures intéressantes sur l'existence du défaut. On voit les bandes des fréquences latérales (FBLs) de $2sf_s=3.4\text{Hz}$ autour de multiple de f_r pour les deux états (sain et défectueux).

D'autres pics dus au nombre de barres rotoriques (n_b) à la fréquence $n_b f_r=676.2\text{Hz}$. Afin de détecter un indice de diagnostic pour un rotor défectueux, on augmente la plage des fréquences jusqu'à 1300 Hz comme le montre la figure (V-10).

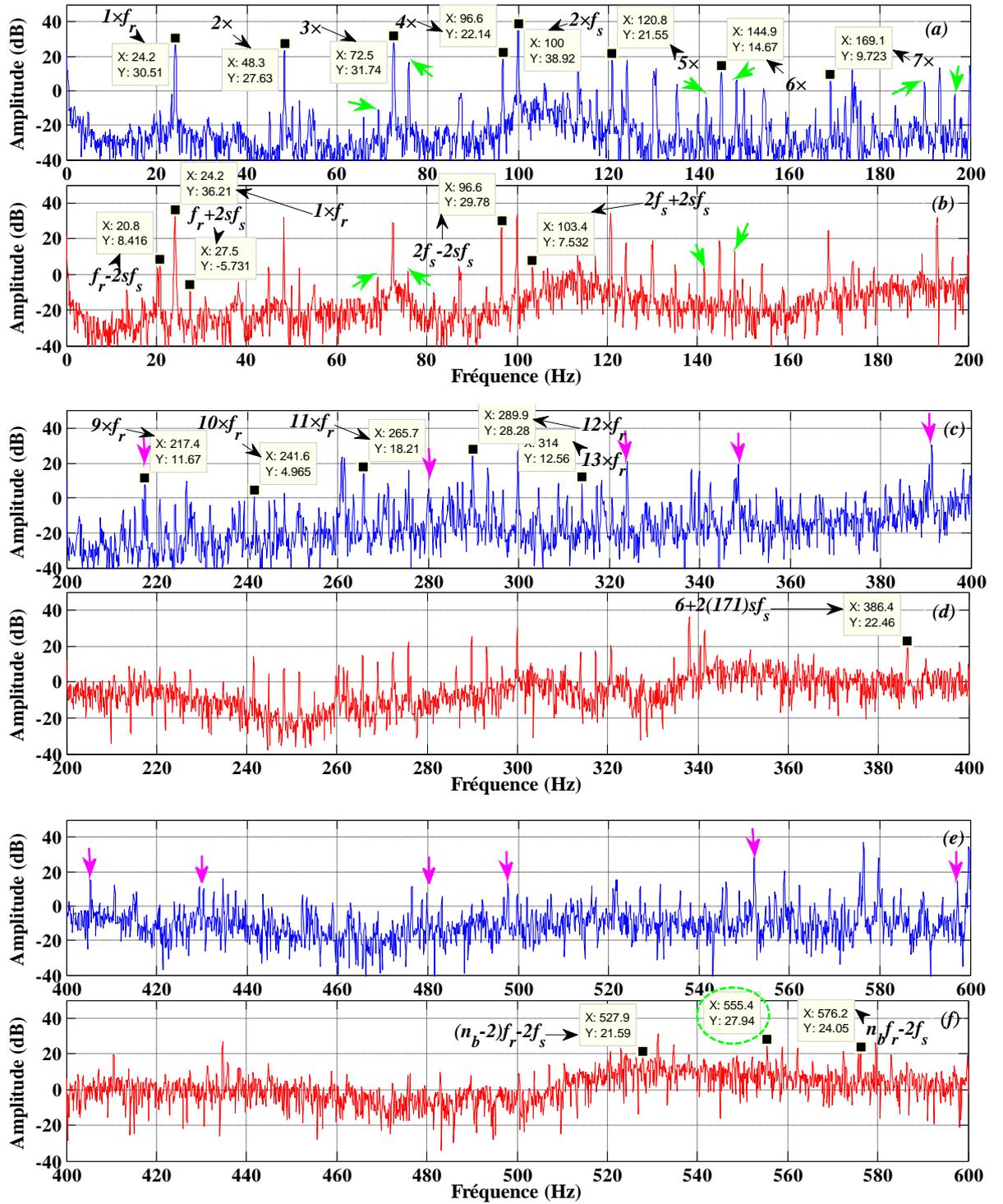


Figure V.9. Spectre d'un signal de vibration pour différentes plages de fréquences (2BC, $s=0.034$) ; (a) et (b) :0-200Hz, (c) et (d) :200-400Hz, (e) et (f) :400-600Hz.

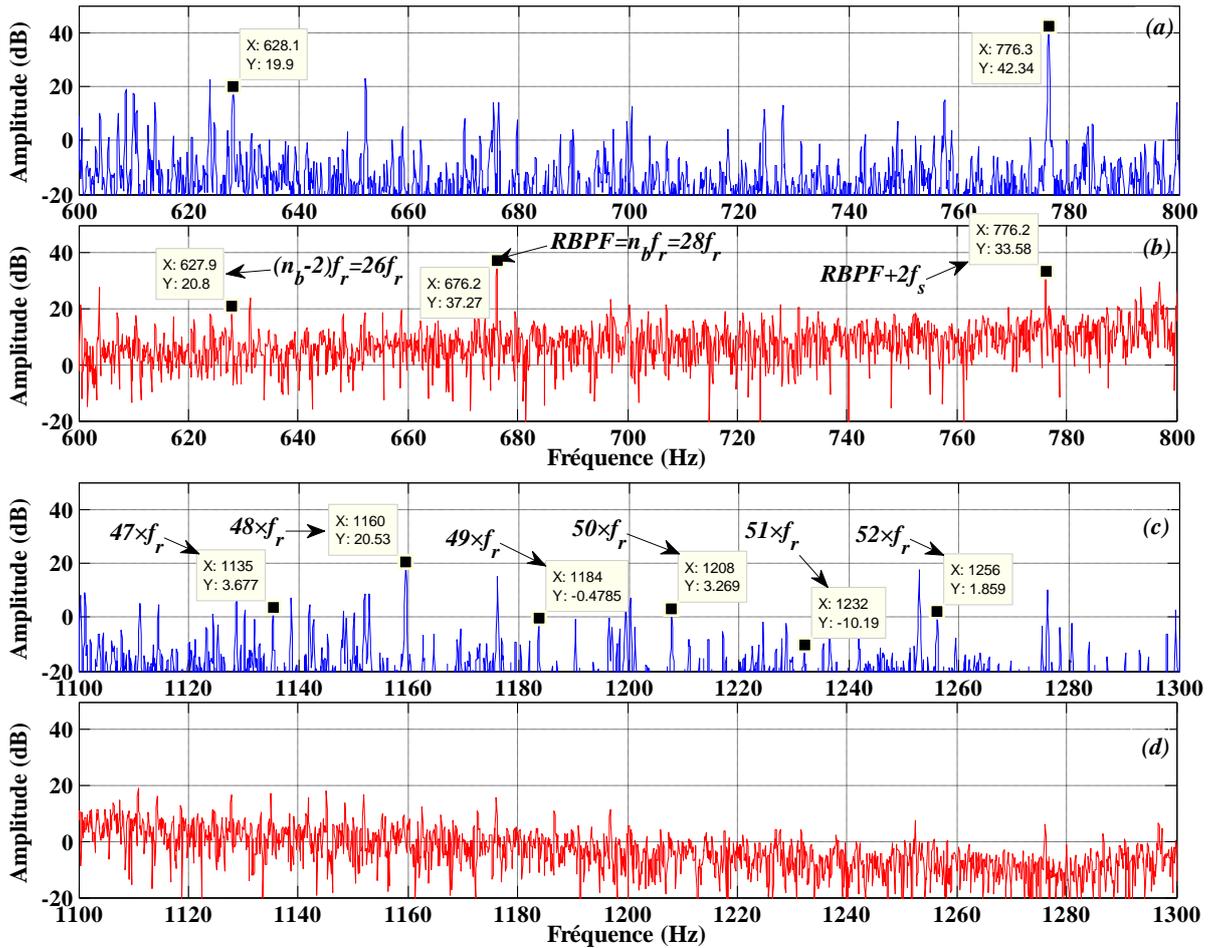


Figure V.10. Spectre d'un signal de vibration pour différentes plages de fréquences (2BC, $s=0.034$) ; (a) et (b) :600-800 Hz, (c) et (d) :1100-1300 Hz.

Comme expliqué dans la section précédente, les composantes du défaut $f_{j \pm 2s f_s}$, $RBPHs$, et autres, seront suivies dans les bandes de fréquences.

Il faut noter que la série des fréquences dues au nombre des barres rotoriques sont vérifiées dans le spectre dans l'équation suivante :

$$f_{RBPF} = RBPF \pm 2k f_s \tag{V. 7}$$

Tous les signaux rapportés ont été enregistrés en régime permanent avec un glissement de 0.034. L'analyse des fréquences caractéristiques présentée sur les figures (V-9) et (V-10), avec un moteur sain et un autre de deux barres cassées, montre les FBL dues au défaut de la CB autour de f_r . Les harmoniques espacés de $2s f_s$ par rapport à la fréquence de rotation sont observés (détectés) avec difficulté.

D'après l'analyse des fréquences caractéristiques du défaut de la rupture de barres, nous amenons à une difficulté sérieuse dans cette partie pour décider l'existence du défaut de la cassure de barre.

Les valeurs caractérisant les raies supplémentaires du défaut de la CB avec ses amplitudes peuvent être résumées au tableau suivant :

Tableau V.1. Valeurs théoriques et pratiques des harmoniques dans le spectre d'un signal vibratoire (2BC, $s=0.034$, $f_r=24.15\text{Hz}$).

Formules de fréquences (CB)	Valeurs théoriques [Hz]	Valeurs pratiques [Hz]	Amplitude [dB]	
			sain	2BC
$1 \times f_r$	Relevée de l'exp.	24.15	30.51	36.21
$2 \times f_r$	Relevée de l'exp.	48.3	27.63*	32.03
$3 \times f_r$	Relevée de l'exp.	72.5	31.74	28.54*
$f_r + 2sf_s$	27.55	27.5	/	-5.73
$f_r - 2sf_s$	20.75	20.8	/	8.41
$f_r + 2(2)sf_s$	30.95	30.9	/	-12.77
$f_r - 2(2)sf_s$	17.35	16.9	/	-13.45
<i>RBPF</i>	676.2	676.2	13.82	37.27
<i>RBPF + 2f_s</i>	776.2	776.2	42.34	33.58
<i>RBPF - 2f_s</i>	576.2	576.2	37.05	24.05

Enfin, l'image de vibrations donne des informations limitées sur l'existence du défaut de la cassure des barres. Malgré cela, les indicateurs du défaut sont apparus en série des fréquences des bandes latérales ; nous avons remarqué que ces derniers n'ont pas une amplitude remarquable. De plus, la détection des fréquences caractéristiques de la CB a été remarquée dans une plage de fréquences un peu avancées (0-500Hz) avec un nombre important des fréquences qui ont été disparues comme : 183.4, 246.1, 280.1, 294.4, 304.4, 308.8, 318.3, 342.4, 348.6, 398.3, 405.3, 415.6, 597.2, ...

V.5.2 Détection du défaut d'excentricité statique et dynamique par la méthode de MVSA

L'utilisation des signaux vibratoires a un sens mécanique, car on peut appréhender les phénomènes dynamiques que l'on rencontre dans les systèmes en fonctionnement.

Lorsque ces défauts sont liés avec l'excentricité du stator, ils peuvent être observés de manières différentes [ALA09]:

- aux basses fréquences, autour de deux fois la fréquence du courant d'alimentation;
- aux moyennes fréquences, autour de la fréquence de passage des encoches et de ses harmoniques.

Il est ainsi possible de caractériser la plupart des défauts et mauvais fonctionnements, à partir de la connaissance ou de la modélisation physique de ces phénomènes. Nous proposons dans cette partie une présentation de l'excentricité rotorique traitée par la FFT.

V.5.2.1 MVSA pour un défaut d'excentricité statique

La figure (V-11) illustre le spectre du signal de vibration pour une plage de fréquences de 0 à 200 Hz. Les ondulations plus prononcées sur la forme temporelle, correspondent à une augmentation d'amplitude des harmoniques existantes et à la création de nouveaux harmoniques. Nous constatons sur le spectre que les fréquences 74.8Hz et 100Hz, ont des causes différentes (figure V-11 et V-12). La valeur 74.8Hz est due à l'ES ou un autre problème qui vérifie $3f_r$; comme la valeur de 100Hz= $2f_s$ qui est en concordance avec la formule de l'ES, même pour un déséquilibre d'alimentation, perturbation de la force électromagnétique ou une excentricité statorique (figure V-13). L'amplitude de double la fréquence d'alimentation est apparaît inchangeable.

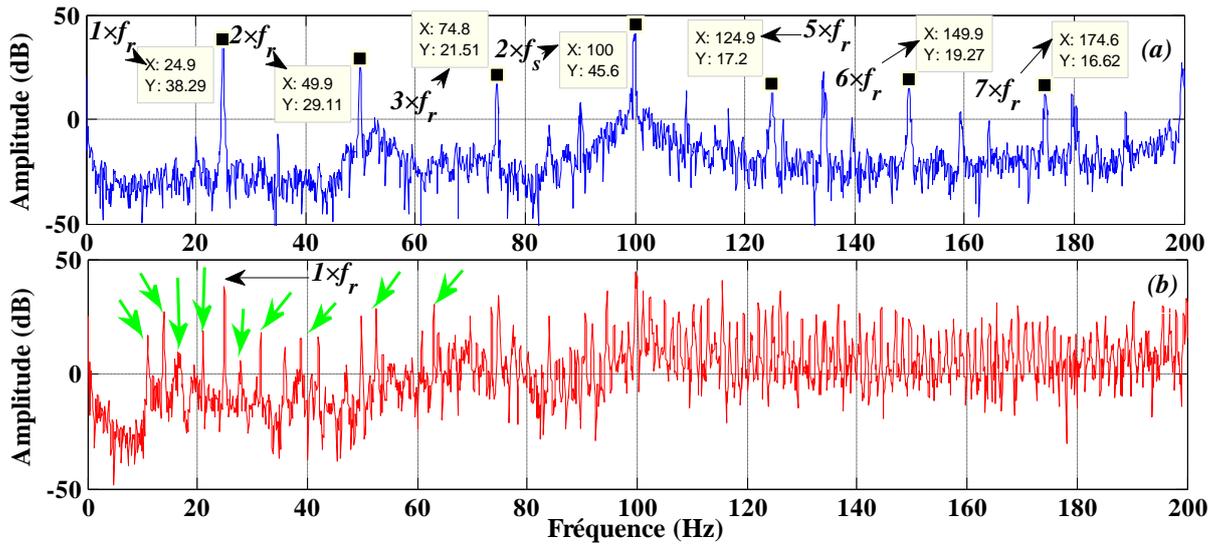


Figure V.11. Spectre d'un signal de vibrations pour une ES et $s=0.004$ « (a) et (b) : 0-200 Hz ».

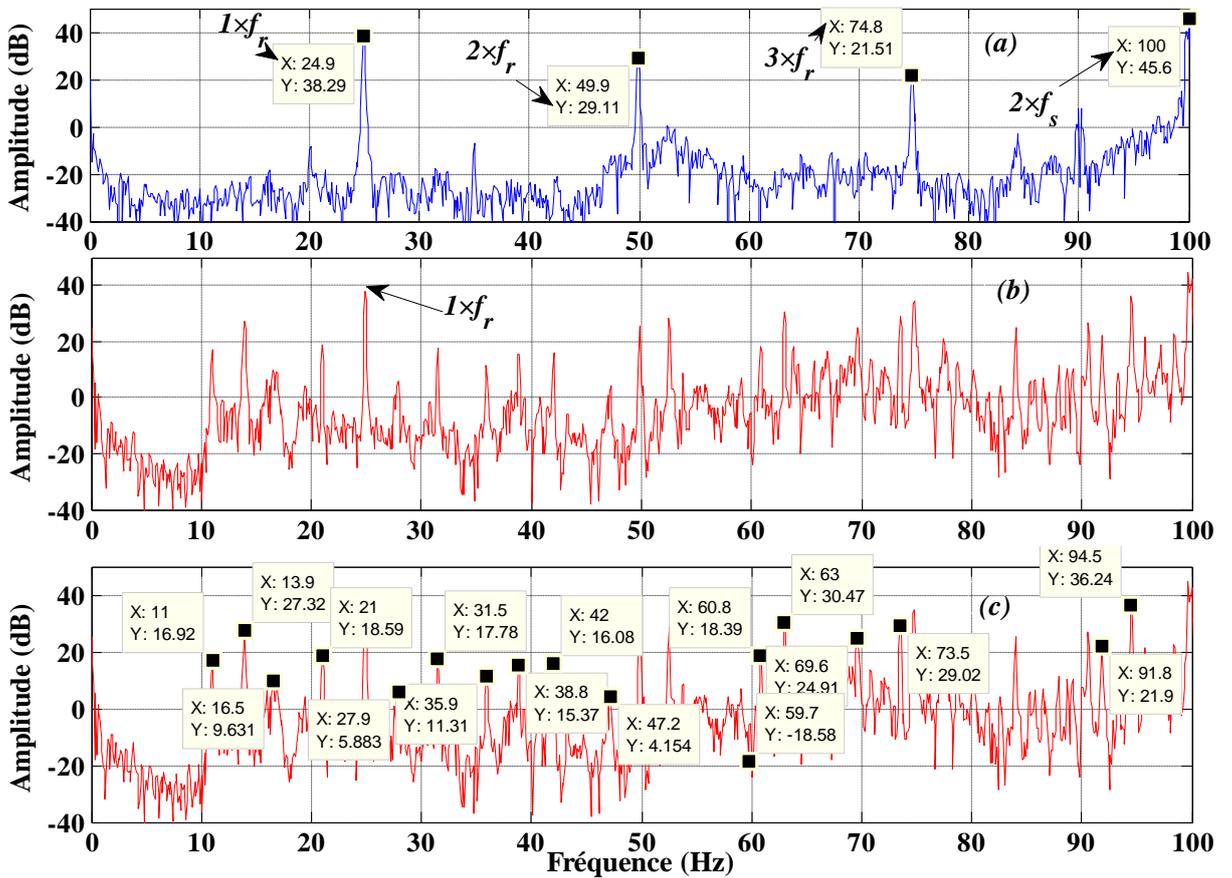


Figure V.12. Spectre d'un signal de vibrations pour une ES et $s=0.004$ « (a), (b) et (c) : 0-100 Hz ».

Beaucoup d'informations concernant l'excentration rotorique représentées par un ensemble important de fréquences additionnelles. La figure (V-12) représente une quantité considérable d'informations dans la plage de fréquence de 0 à 100 Hz. Malgré le bruit trouvé dans le signal vibratoire pour le défaut d'ES, son spectre apparaît sensible au défaut traité. [BAT80] a proposé l'existence des fréquences supplémentaires selon l'équation (I. 7) dans le spectre sur le plan radial. Pour cette raison, nous avons vérifié quelques valeurs par le calcul suivant :

Tableau V.2. Valeurs théoriques et pratiques de quelques harmoniques du signal vibratoire (ES, $s=0.004$).

$f_i = \left[kn_b \cdot f_r \pm v \cdot f_s \right]$ f_i pour (k, v)	Valeur-Amplitude (Hz) → (dB)	$f_i = \left[kn_b \cdot f_r \pm v \cdot f_s \right]$ f_i pour (k, v)	Valeur-Amplitude (Hz) → (dB)
f_1 pour $(13, 181)$	13.6 Hz → 27.32 dB	f_6 pour $(4, 55)$	38.8 Hz → 15.37 dB
f_2 pour $(12, 167)$	16.4 Hz → 9.63 dB	f_7 pour $(3, 41)$	41.6 Hz → 16.08 dB
f_3 pour $(10, 139)$	22 Hz → 18.59 dB	f_8 pour $(1, 13)$	47.2 Hz → 4.15 dB
f_4 pour $(8, 111)$	27.6 Hz → 5.88 dB	f_9 pour $(4, 57)$	61.2 Hz → 18.39 dB
f_5 pour $(5, 59)$	36 Hz → 11.31 dB	f_{10} pour $(7, 99)$	69.6 Hz → 24.91 dB

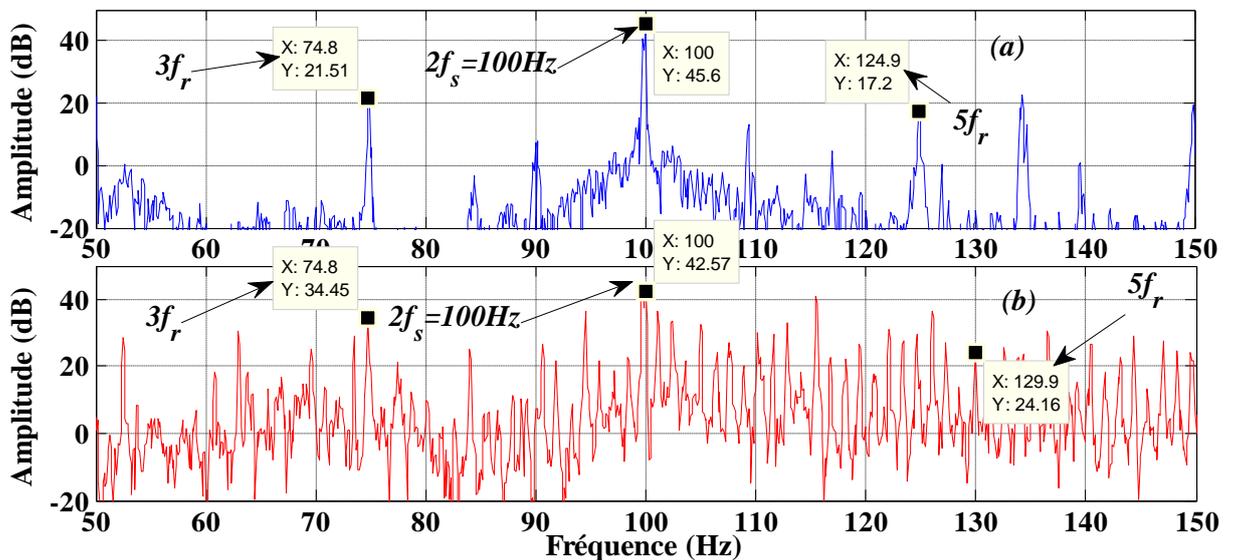


Figure V.13. Spectre d'un signal de vibrations pour une ES alentour de $2f_s$ pour $s=0.004$.

On a remarqué sur une plage de fréquences supérieures à 1000Hz et plus, des raies qui indiquent le changement de l'état de la machine avec des amplitudes importantes. Ces nouveaux indicateurs montrent bien que le moteur a rencontré un problème lorsqu'on le

compare avec le moteur sain. Malgré que la plupart de pics ont une explication mathématique par l'équation (I. 7) ; ils restent d'autres indices représentés par des cercles pointillés qui n'ont pas une formule caractéristique orientée au défaut d'ES (figure V-14). Cette analyse montre bien l'influence du défaut d'excentricité statique sur le signal vibratoire en le comparant avec la technique de la MCSA.

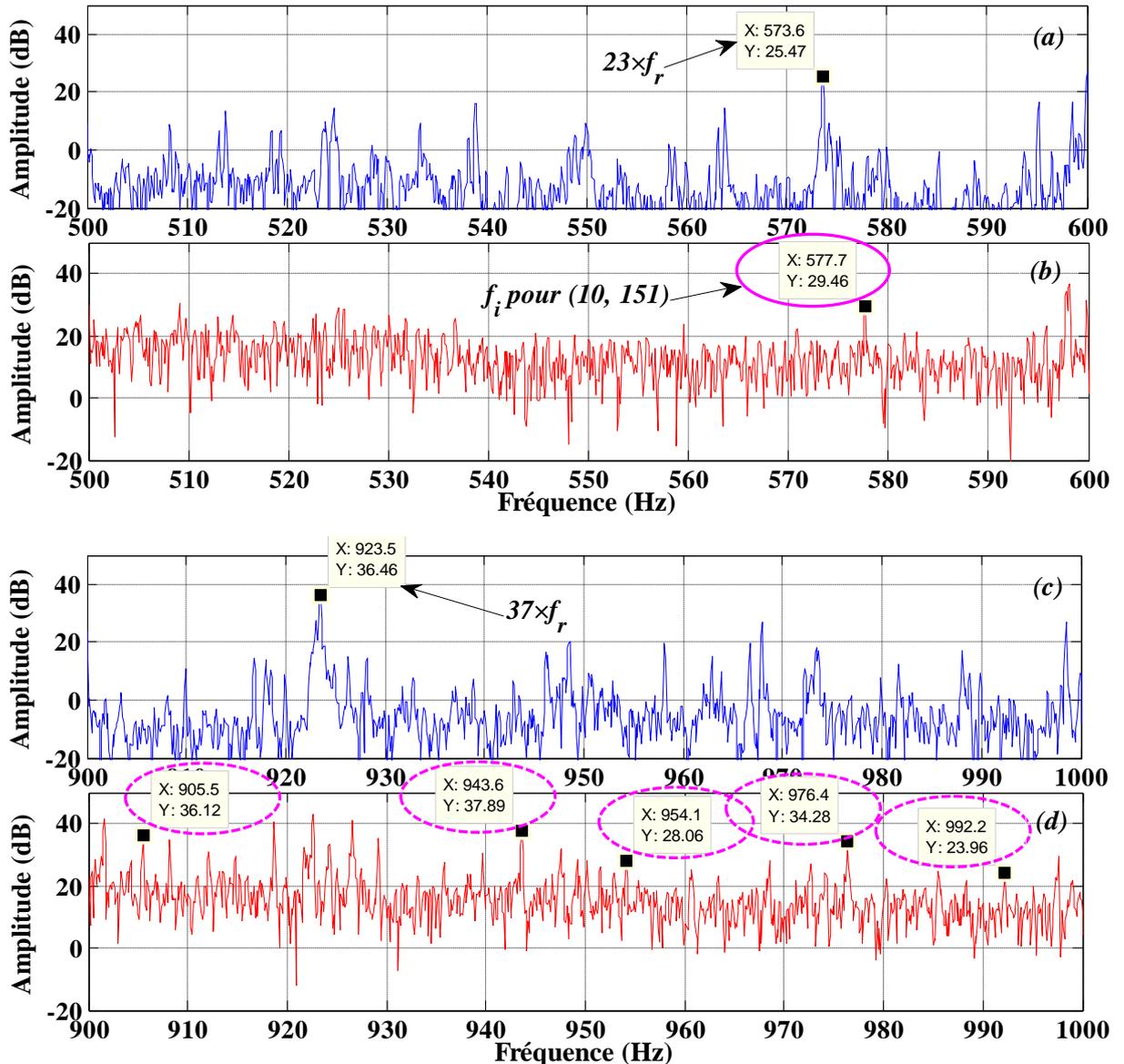


Figure V.14. Différentes plages des fréquences du spectre d'un signal de vibrations pour une ES et $s=0.004$ « (a), (b) : 500-600 Hz ; (c), (d) : 900-1000 Hz ».

Dans le cas d'un fonctionnement du moteur en charge ayant un glissement $s=0.032$, Tous les harmoniques qui ont une relation avec le glissement seront déplacés. La figure (V-15) représente le spectre du signal de vibrations ayant pour objectif de présenter les fréquences supplémentaires dues au défaut d'excentricité statique.

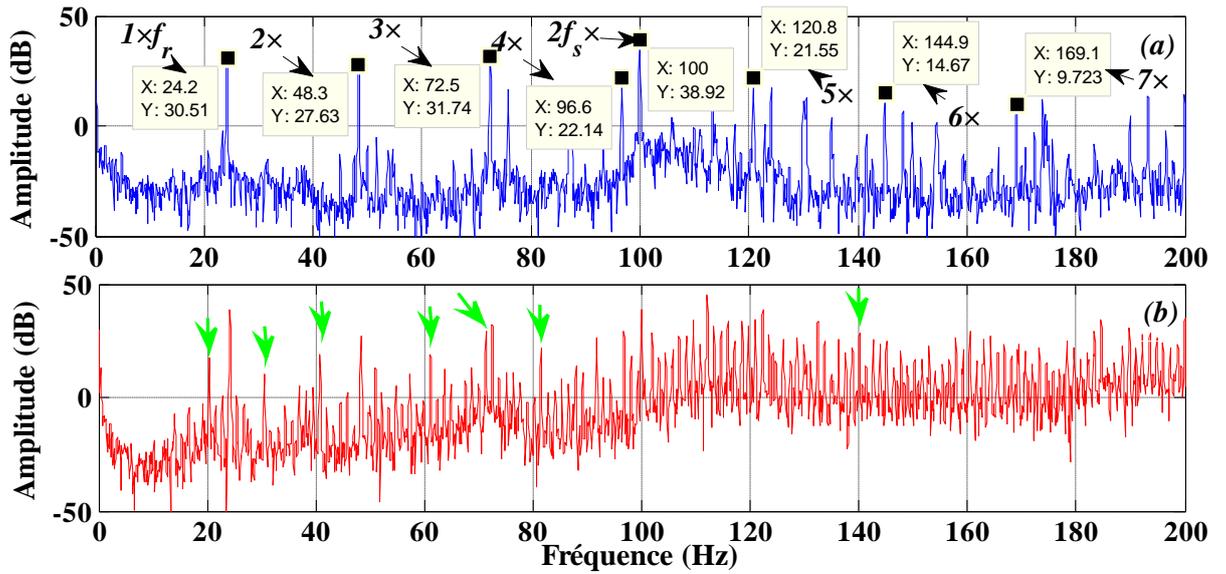


Figure V.15. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES ($s=0.032$), 0-200 Hz.

Afin d'identifier les harmoniques supplémentaires dans la figure ci-dessous, on fait un zoom aux alentours la plage fréquentielle de 0 à 100 Hz. La figure (V-16) représente ces harmoniques en valeurs.

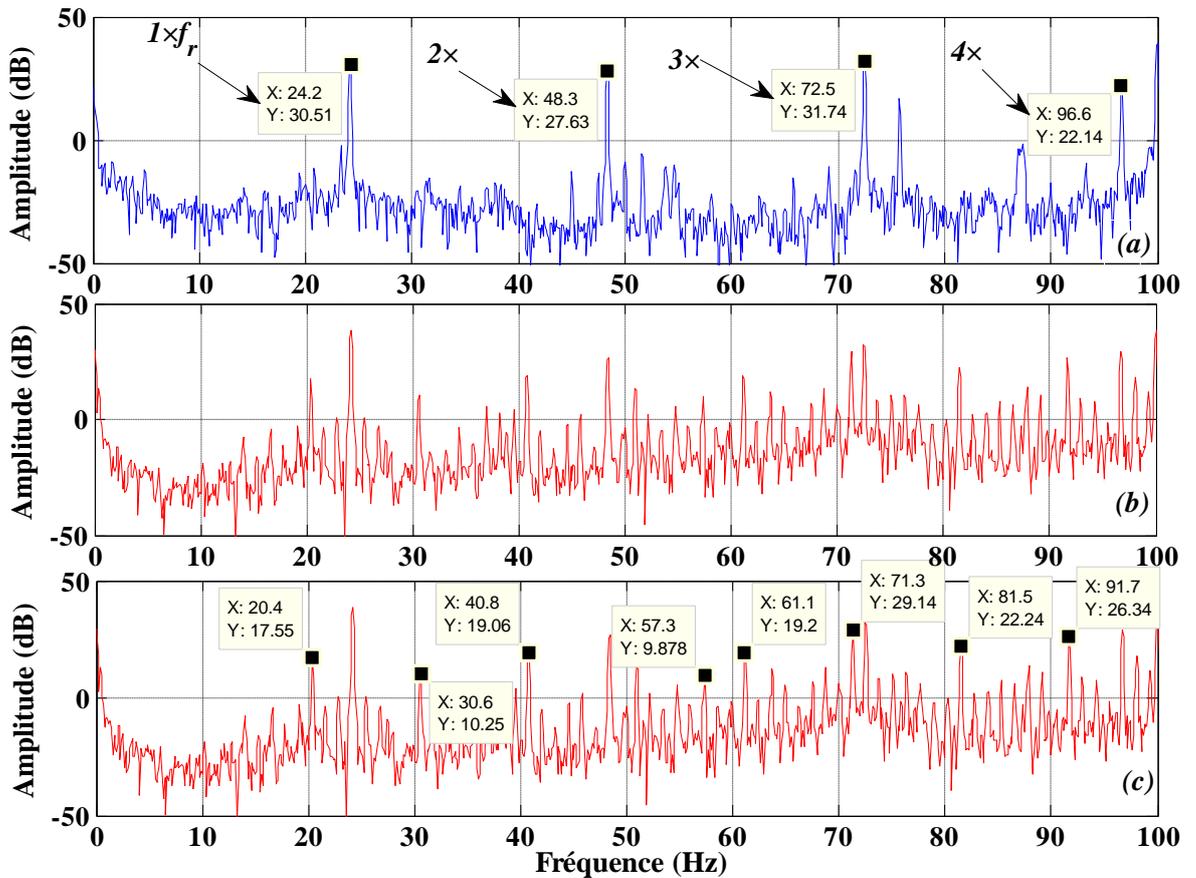


Figure V.16. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES ($s=0.032$), 0-100 Hz.

D'après l'équation (I. 7), on peut résumer quelques valeurs avec leurs amplitudes dans le tableau suivant :

Tableau V.3. Valeurs théoriques et pratiques de quelques harmoniques du signal vibratoire (ES, $s=0.032$).

$f_i = \left[kn_b \cdot f_r \pm v \cdot f_s \right]$ f_i pour (k, v)	Valeur-Amplitude (Hz) → (dB)
f_1 pour (4, 35)	39.6 Hz → 19.06 dB
f_2 pour (13, 175)	58.8 Hz → 9.87 dB
f_3 pour (5, 69)	62 Hz → 19.2 dB
f_4 pour (8, 107)	70.8 Hz → 29.14 dB
f_5 pour (12, 161)	81.2 Hz → 22.24 dB

Il est intéressant de montrer pour cette étude en charge ($s=0.032$) sous un défaut purement statique (ES), que les fréquences caractéristiques indiquées dans les formules du tableau (I.1) ne sont pas vérifiées totalement dans le spectre du signal de vibration. Le problème réside, toujours, au chevauchement entre les fréquences de l'état sain et l'état défectueux, comme la fréquence double de fondamentale $2 \times f_s$. Le suivie d'amplitudes des multiples de f_r est une solution pour détecter le défaut d'ES qui se base sur la comparaison d'amplitudes de $2 \times f_r$ et $3 \times f_r$. Généralement, l'amplitude de $2 \times f_r$ doit être diminuée et l'amplitude de $3 \times f_r$ sera augmentée à cause du défaut (figure V-17). De plus, nous avons remarqué que les raies supplémentaires ont une amplitude importante pour signaler l'existence du défaut d'excentricité. La présence d'harmoniques causés par l'ES est un indicateur important, mais certains n'ont pas une explication mathématique comme : 20.4, 30.6, 91.7, ...

Le tableau (V.4) présente quelques valeurs caractéristiques, théoriques et autres pratiques avec leurs amplitudes.

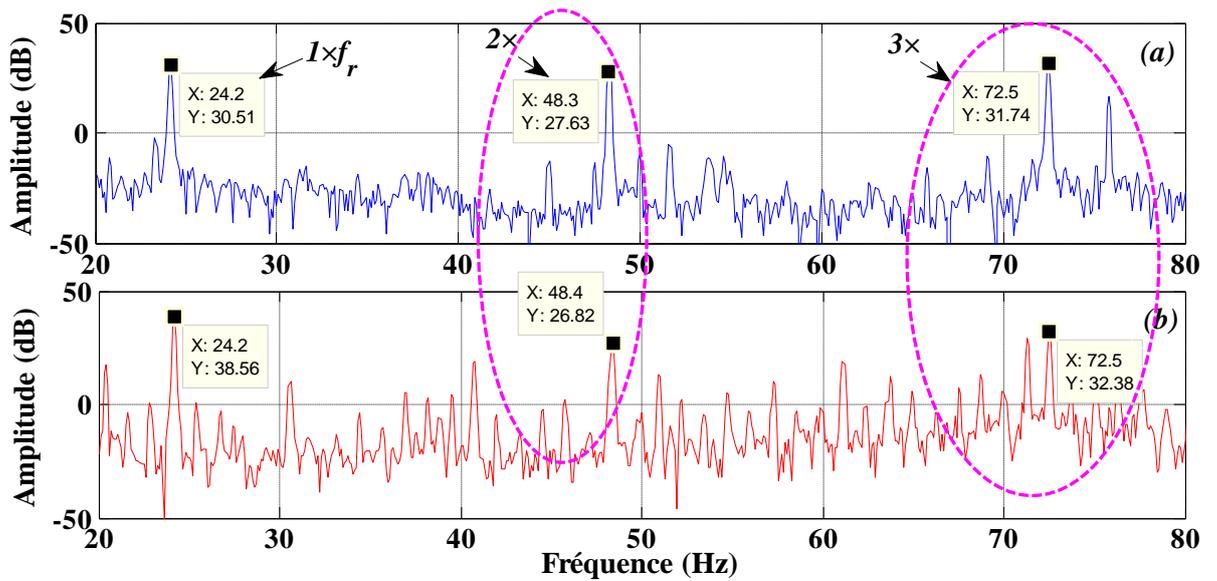


Figure V.17. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES ($s=0.032$), 20-80 Hz.

En outre, et selon la littérature, les images de signaux vibratoires des défauts de type variation de courant statorique ou variation d'entrefer sont identiques avec la prépondérance d'une raie dont la fréquence correspond au double de la fréquence du courant d'alimentation ($2f_s=100\text{Hz}$). De plus, l'amplitude de la fréquence double d'alimentation ne donne pas une information judicieuse (figure V-18). On obtient deux valeurs d'amplitude plus proches l'une à l'autre, telles que : l'amplitude de $2f_s$ pour un état sain égale à 38.92 dB et l'amplitude de $2f_s$ pour une ES égale à 38.53 dB.

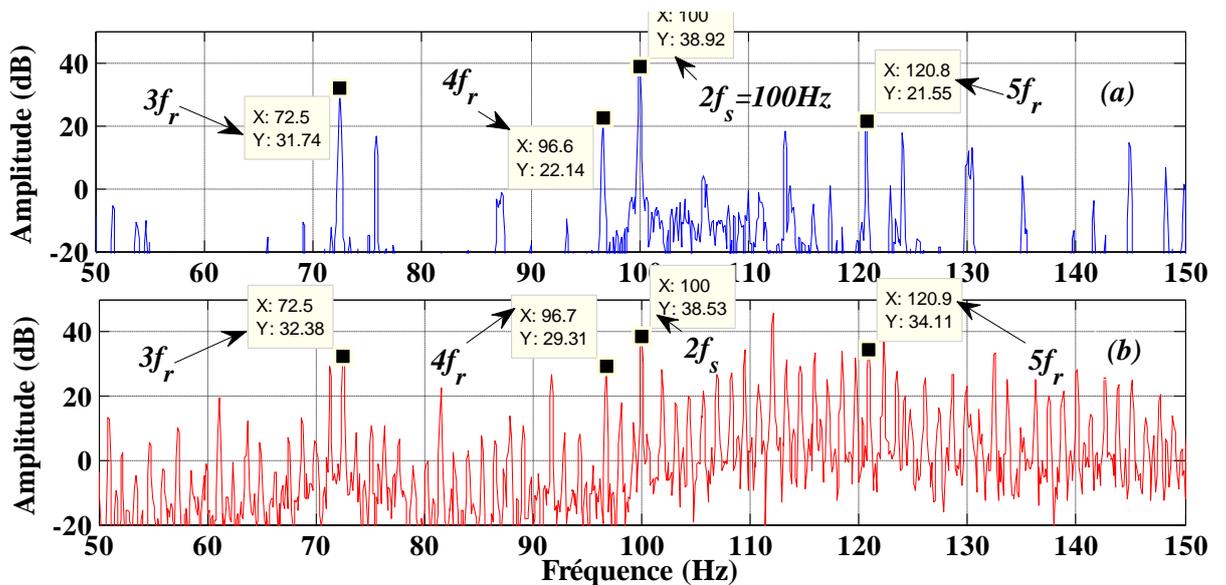


Figure V.18. Spectre d'un signal de vibrations pour une ES alentour de $2f_s$ pour $s=0.032$.

Tableau V.4. Résumé de quelques valeurs théoriques et pratiques des harmoniques causés par le défaut d'ES dans le spectre d'un signal vibratoire ($s=0.032$).

Fréquences caractéristiques de l'ES	Valeurs théoriques [Hz] ($s=0.032$)	Valeurs pratiques [Hz] ($s=0.032$)	Amplitude [dB]
$2f_s$	100	100 (exist par tout)	38.53
$7f_r + f_s$	219.4	219.1	27.26
$8f_r + f_s$	243.6	243.1	20.78
$13f_r - f_s$	264.6	264.8	33.07
$12f_r - 5f_s$	40.4	40.8	19.06

D'après la littérature, les observations aux moyennes fréquences des phénomènes vibratoires revient à les étudier autour de la fréquence de passage des encoches (*RBPF*).

Dans le cas d'une variation d'entrefer, à la raie dont la fréquence correspond à la fréquence d'encoches est associée une famille de bandes latérales dont le pas correspond à deux fois la fréquence du courant d'alimentation, mais avec des valeurs d'amplitude nettement dissymétriques. Cet excentricité statique, et d'après [ALA09] est représentée par deux amplitudes différentes autours de *RBPF*. De plus, ce défaut provoque, normalement, une augmentation d'amplitude de *RBPF*.

Notre étude a vérifié les deux points cités dernièrement. La figure (V-19) et le tableau (V.5) montre l'influence du défaut d'ES sur l'amplitude de la fréquence d'encoche *RBPF* par une augmentation importante. L'égalité d'amplitude pour un état sain n'est pas vérifiée ici, c'est qui impose les deux possibilités suivantes:

- Soit le stator à l'état sain est excentrique ;
- Soit le défaut n'est pas détecté.

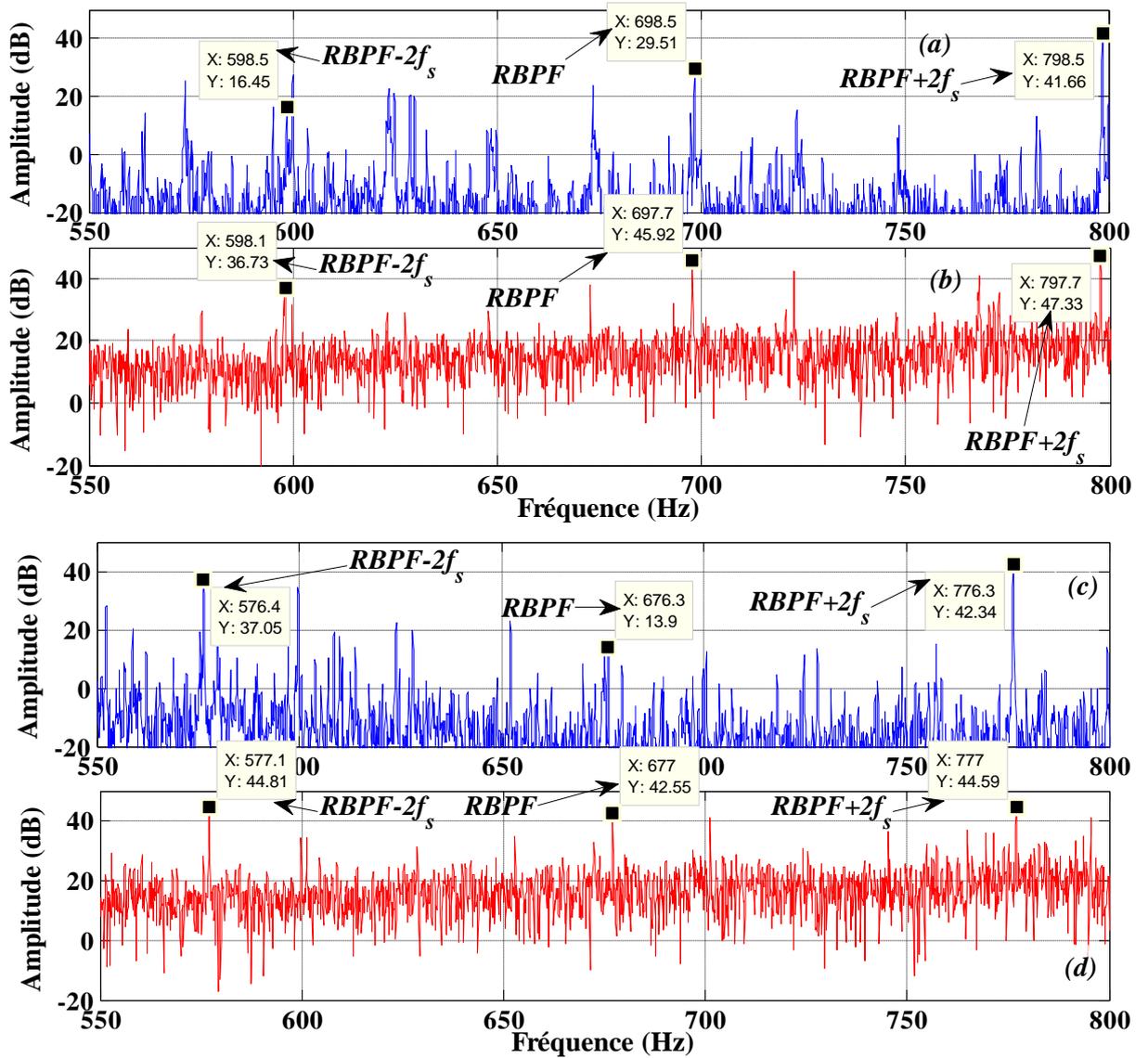


Figure V.19. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES aux alentours la fréquence $RBPF$; « (a) et (b) : 550-800 Hz 'à vide' », « (c) et (d) : 550-800 Hz 'en charge' ».

Tableau V.5. Bilan d'amplitudes caractéristiques du défaut d'ES autour de RBPF.

1- Fonct. A vide (s=0.004)	<i>RBPF-2f_s</i>	<i>RBPF</i>	<i>RBPF+2f_s</i>
Fréquence (Hz)	597.2	697.2	727.2
Amplitude (dB) : MAS sain	16.45*	29.51	41.66*
Amplitude (dB) : MAS avec ES	36.73	45.92	47.33
2- Fonct. En charge (s=0.032)	<i>RBPF-2f_s</i>	<i>RBPF</i>	<i>RBPF+2f_s</i>
Fréquence (Hz)	577.6	677.6	777.6
Amplitude (dB) : MAS sain	37.05*	13.9	42.34*
Amplitude (dB) : MAS avec ES	44.81	42.55	44.59

Remarque : notre étude qui se base sur l'analyse vibratoire pour le défaut d'excentricité statique, a trouvé quelques harmoniques correspondant aux formules du tableau (I.1). Cette équation montre l'ordre des harmoniques du temps, elle s'écrit comme suit :

$$f_{ES} = kf_r \pm \nu f_s \quad (\text{V. 8})$$

avec, $k=1, 2, 3, \dots$; et $\nu=1, 3, 5, 7, \dots$

V.5.2.2 MVSA pour un défaut d'excentricité dynamique

Cette partie a pour objectif de rechercher les indices concernant le défaut d'ED. L'étude se basera sur des mesures vibratoires réalisées sur le banc d'essais cité au deuxième chapitre. Les mesures qui ont été réalisées, apportent une contribution au diagnostic des MAS. Elles ont été réalisées à l'aide d'accéléromètres qui mesurent l'accélération de la vibration en différents points bien déterminés.

Les figures (V-20) et (V-21) montrent le spectre dans les deux conditions (sain et défectueux), avec un fonctionnement à vide (s=0.004).

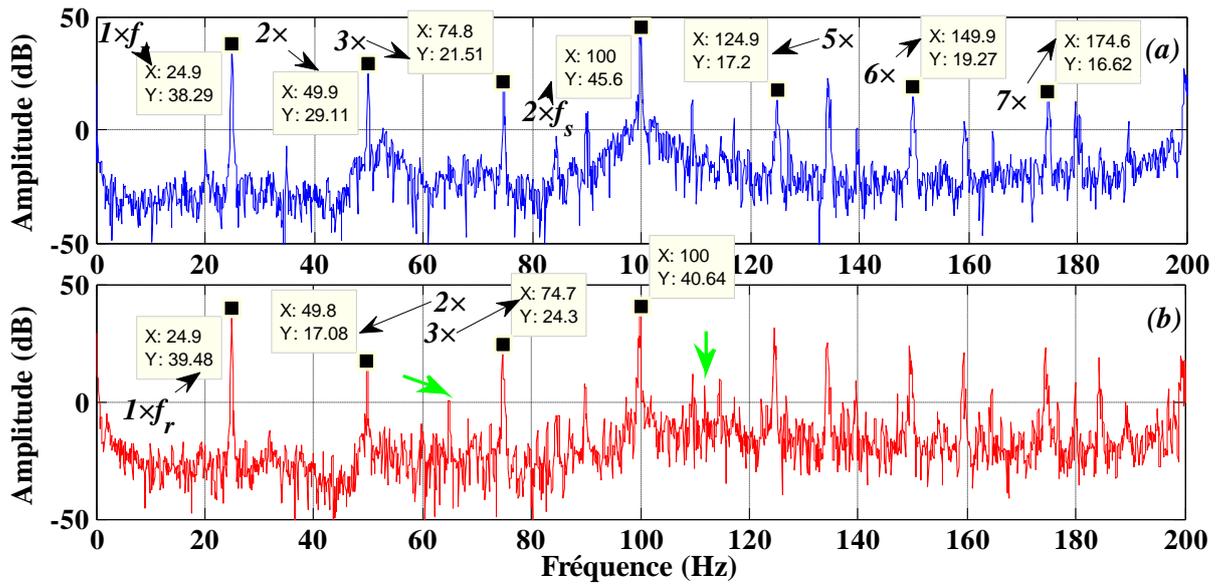


Figure V.20. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ED ($s=0.004$), 0-200 Hz.

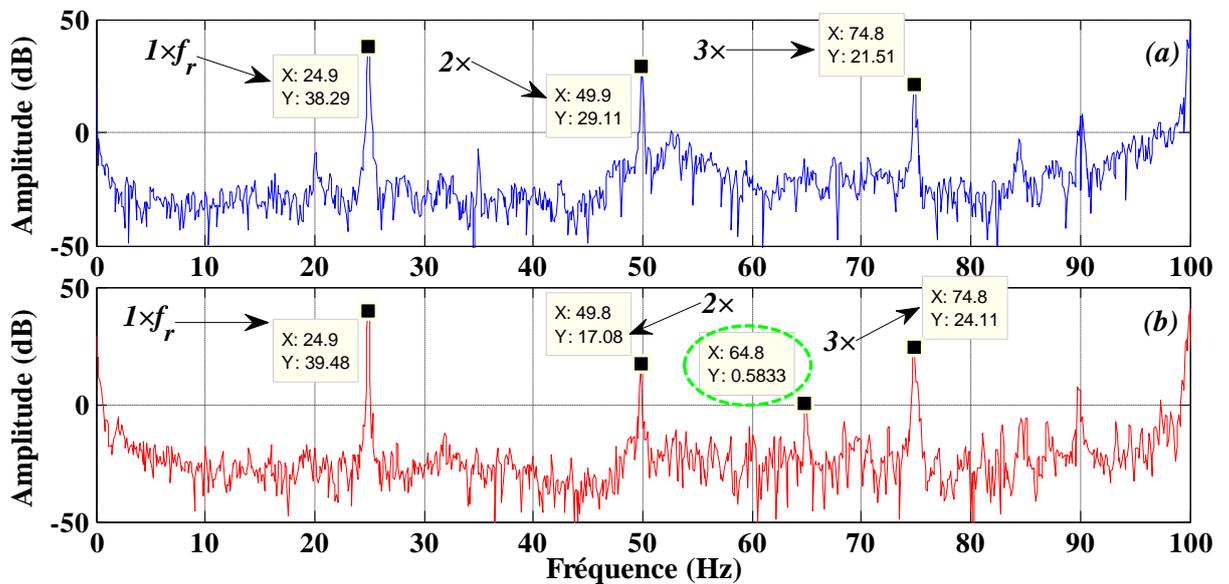


Figure V.21. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ED ($s=0.004$), 0-100 Hz.

On ne voit aucun harmonique caractéristique du défaut, sauf que $f_r=24.9\text{Hz}$ et ses multiples. Pour tous les autres spectres étudiés dans ce travail, nous remarquons que sous un défaut d'ED, l'amplitude de $2 \times f_r$ et $3 \times f_r$ change dans deux sens inverse comme la représentée dans la figure (V-22-a et b). En outre, on a vu des pics très intéressants, surtout leurs amplitudes, qui ont les valeurs : 64.8, 209.6, 222.9, 239.3, 259.5, 309.3, 334.2,... tout au long des plages fréquentielles (figure V-22-c, d, e, et f).

Le spectre du signal vibratoire est riche en informations dans les deux conditions de fonctionnement (sain et avec défaut), et cela explique l'existence du défaut.

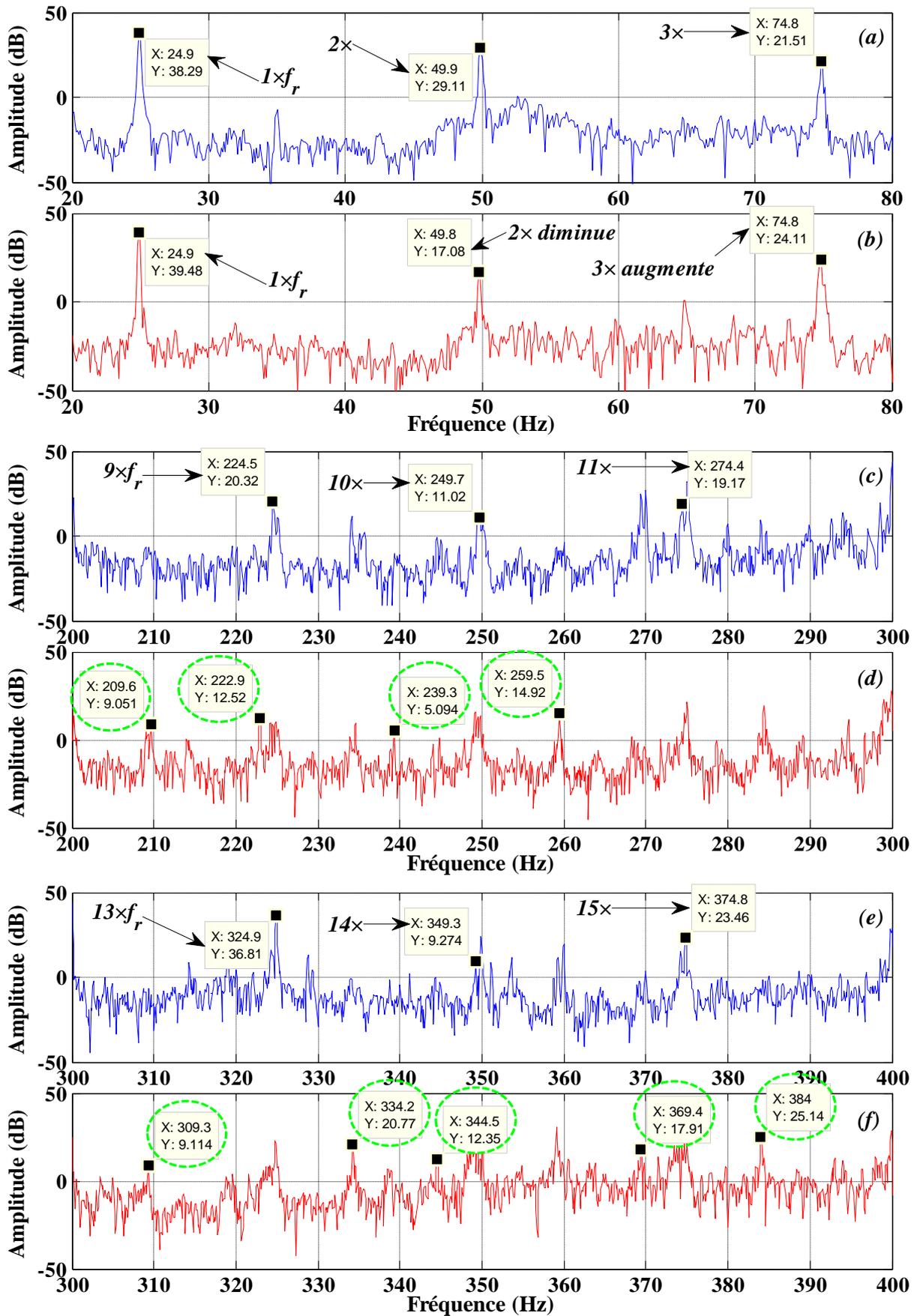


Figure V.22. Spectre d'un signal vibratoire pour différentes plages de fréquences (ED, $s=0.004$).

L'image vibratoire pour le défaut de type excentricité dynamique d'entrefer est caractérisée aussi par de nombreuses bandes latérales situées de part et d'autre de la fréquence $RBPF$ [ALA09], dont le pas correspond à la fréquence de rotation de l'arbre f_r (figure V-23).

On a obtenu cette série pour les deux états de la machine asynchrone qui explique, soit l'existence naturelle de l'excentricité dynamique dans le moteur sain, ou bien la détection du défaut peut être analysée en se basant sur l'amplitude de chaque harmonique.

D'après la figure (V-23), on remarque que certains amplitudes augmentes et autres diminues comme les harmoniques 598 Hz et 622.6 Hz successivement. Il est important de noter la fréquence $RBPF+3 f_r=772.7$ Hz avec son amplitude de 18.46 dB qui est existé seule.

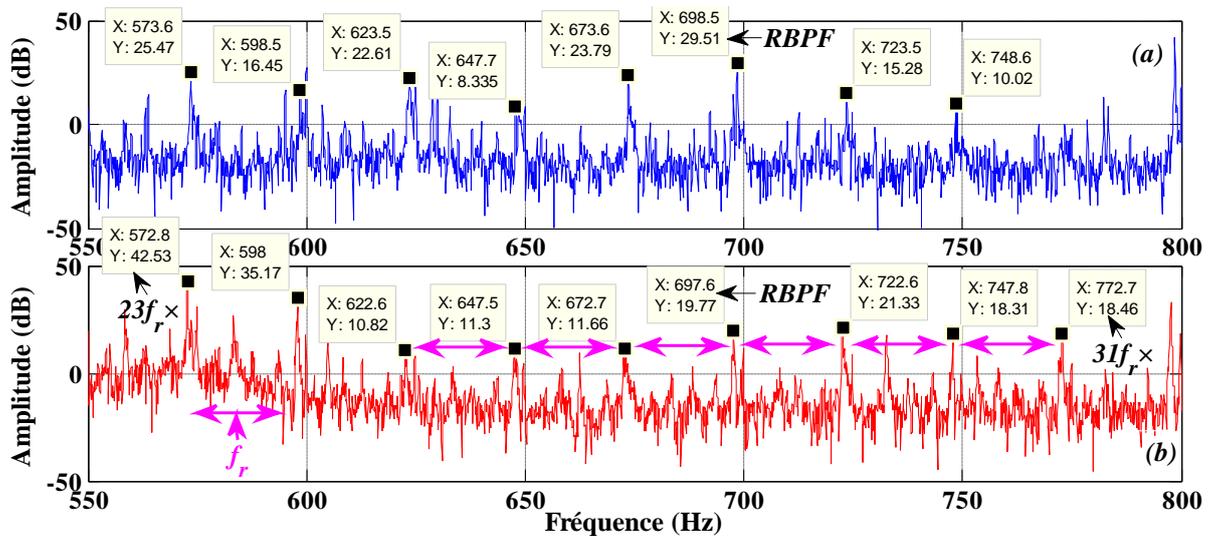


Figure V.23. Bande latérale de kf_r alentour de $RBPF$ pour un défaut d'ED ($s=0.004$).

Par la même stratégie, on charge le moteur qui assure un glissement $s=0.032$ ($f_r=24.2$ Hz). Ce fonctionnement crée une variation de la vitesse, ce qui conduit donc, à un changement du signal de vibration. Le spectre de la figure (V-24) représente les nouvelles signatures pour un fonctionnement à 75% de la charge.

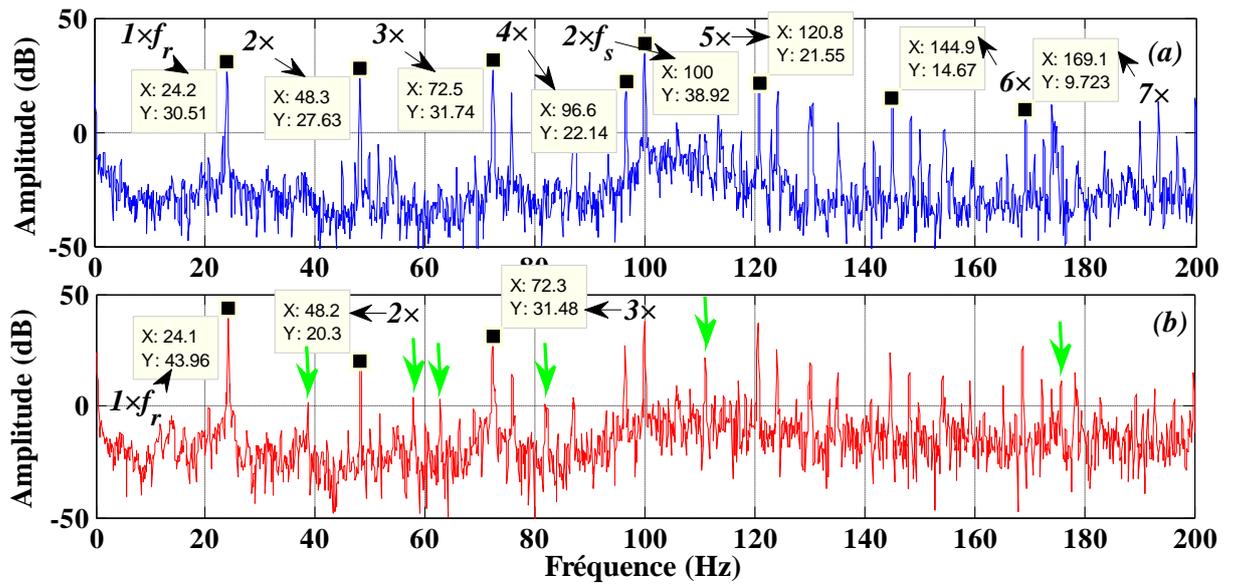


Figure V.24. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ED ($s=0.032$), « (a) et (b) : 0-200 Hz ».

Pour clarifier les fréquences additionnelles, on fait un zoom de 0 à 100 Hz. La figure ci-dessous illustre les harmoniques dues à l'excentricité dynamique.

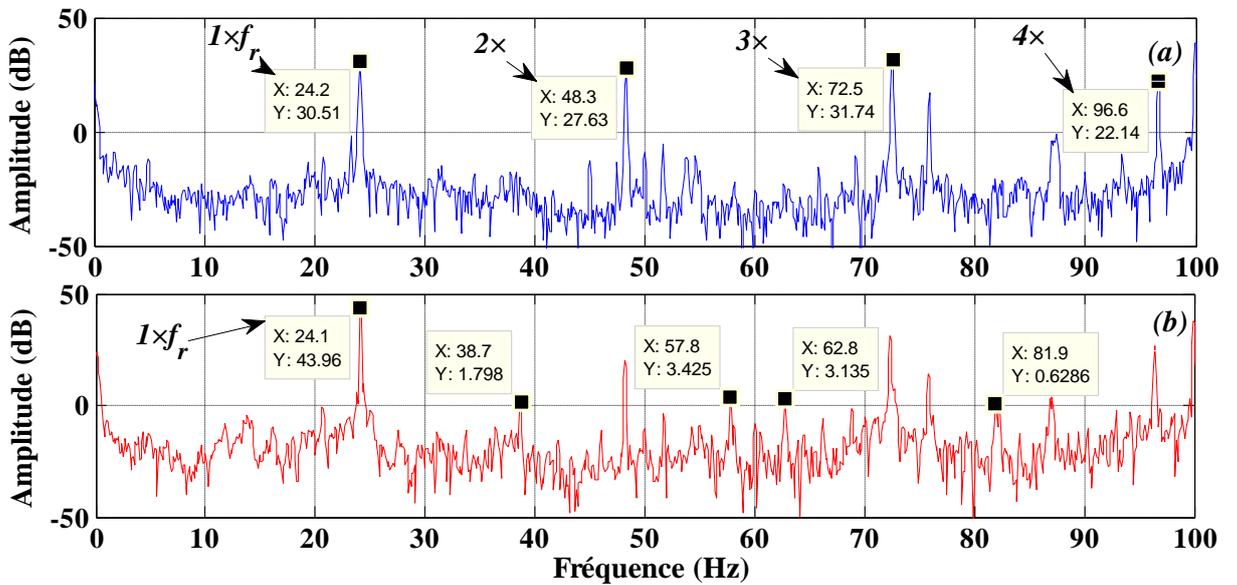


Figure V.25. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ED ($s=0.032$), 0-100 Hz.

Lorsqu'on veut utiliser l'indicateur du défaut de l'excentricité dynamique représenté par les bandes latérales autour de la fréquence $RBPF$. On fait un zoom dans la plage fréquentielle de 550 Hz-800 Hz comme le montre la figure (V-26).

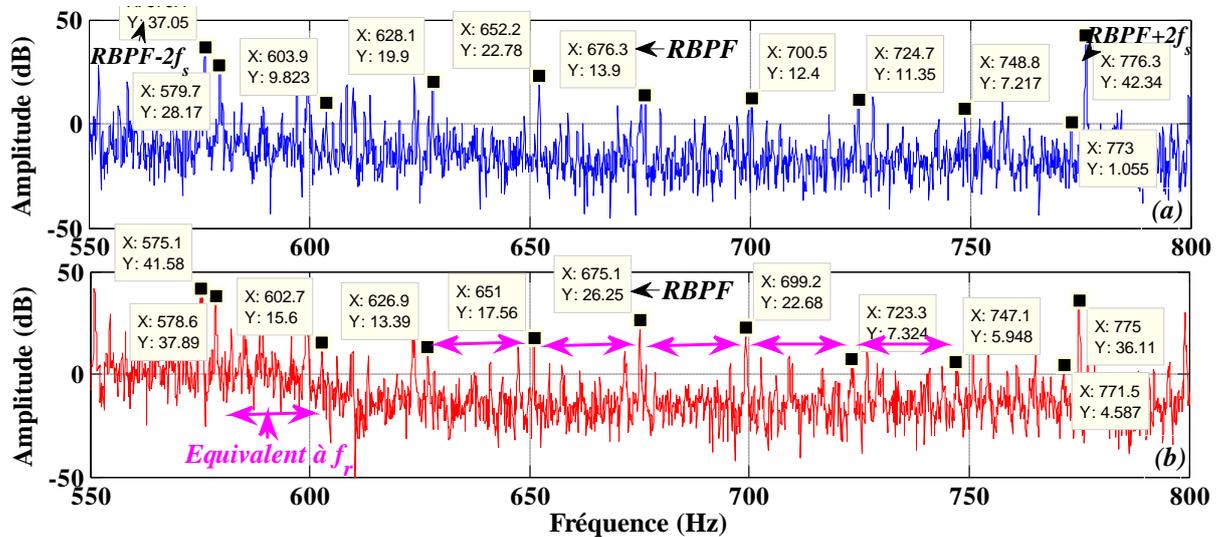


Figure V.26. Bande latérale de kf_r alentour de $RBPF$ pour un défaut d'ED ($s=0.032$).

Nous constatons sur le spectre, plusieurs valeurs multiples de f_r qui provoque un chevauchement précieux. En outre, dans les plages de fréquences inférieures et supérieures, on a trouvé des fréquences supplémentaires, qui expliquent bien l'influence du défaut d'excentricité dynamique sur le signal de vibration. On a essayé de traduire ces indices important en valeurs précises d'après les formules citées par la littérature. Cependant, la correspondance avec les multiples de f_r ne donne pas une décision finale et précise sur le type du défaut d'ED. De plus, cet indicateur (multiple de f_r) est dans la plupart des cas est commun pour plusieurs défauts dans les machines tournantes.

Toutes les formules ici, donnent des valeurs de fréquences l'une proche de l'autre, ce qui exige une forte connaissance des harmoniques avec un traitement très soigneux.

Le chevauchement entre un type d'excentricité avec un autre est possible comme les fréquences 57.8, 62.8, 81.9 et autres qui se trouvent pour l'ES et l'ED. Cette partie nous amène de poser la nécessité d'exploitation de ce changement visible dans le spectre des signaux vibratoires.

D'après cette analyse du défaut d'ED, on propose une méthodologie expérimentale et analytique d'aide à la détection du défaut pour exploiter les informations dans le spectre du signal de vibration. En outre, les modules des fréquences vibratoires ont une partie importante pour le traitement des données concernant le défaut d'excentricité statique et dynamique.

V.5.3 Détection du défaut de roulement par la méthode de MVSA

Le roulement est un composant essentiel dans le domaine industriel, il est l'un des principaux composants d'une grande majorité des organes mécaniques vitaux. Sa consommation est de l'ordre de deux milliards de roulements par année, soit 40% de la production mondiale [TEY03].

Comme tous les organes mécaniques, les causes de dysfonctionnement des roulements sont très nombreuses. Le plus souvent, ce sont l'écaillage, le grippage et la corrosion. Tous ces défauts ont en commun le fait, qu'ils se traduisent tôt ou tard par une perte sur le couple électromagnétique de la machine. Un petit trou au niveau de la BE ou la BI se traduit par des chocs répétés des billes sur la cage ou les chemins du roulement. Ces chocs provoquent une vibration du type impulsionnelle qui se propage sur les bagues, puis sur la cage du roulement. Ces impulsions deviennent la source de modulation d'amplitude du signal de vibrations. Ce type périodique de vibration provoque généralement des vibrations, ou ondes de chocs, de *très courte durée* d'amplitude *importante* qui se manifestent généralement jusqu'en hautes fréquences.

Parmi les différents indicateurs physiques utilisés pour déceler les défauts de roulement pendant le fonctionnement de la machine et donnant une mesure adéquate de son état, nous avons l'analyse vibratoire (MVSA).

V.5.3.1 Mesure de vibration pour un défaut dans la bague externe

Le signal vibratoire d'un choc dû à un défaut dans la BE est présenté dans la figure (V-27). Ce signal temporel pour un fonctionnement à vide ($s=0.004$) sera analysé par la transformée de Fourier rapide. Il nous permet de découvrir les nouveaux harmoniques dues au défaut de la BE. La figure (V-28) représente le spectre des deux états de la machine, sain en bleu et défectueux en rouge. Les différentes plages de fréquences, nous aident à exploiter correctement le signal pour aboutir à une décision finale sur la situation de la MAS. La partie des fréquences inférieures (figure V-28-c-d-e) montre l'existence des fréquences caractéristiques en concordance avec la formule (I.17). Cependant, il est indispensable d'indiquer quelques formules de chevauchement entre les défauts de roulement. D'après les formules des fréquences qui caractérisent les défauts de roulement, et pour une bonne détection ou un bon diagnostic, il faut bien distinguer les fréquences qui ont une même valeur. Pour ce faire, on propose ces formules qui montrent les points d'intersections entre les fréquences à détecter pour les défauts de la BE, la BI et au niveau de la cage.

$$\begin{cases} 3k.f_{be} = 2k.f_{bi} \\ k.f_{be} = 9k.f_{cage} \\ 2k.f_{bi} = 27k.f_{cage} \end{cases} \quad (\text{V. 9})$$

Tels que, $k=1, 2, 3, \dots$ etc.

Ces formules nous amènent à éviter toute confusion dans le spectre à analyser, et pour un exemple illustratif, nous prendrons ce cas qui traite les défauts de la BE et la BI. Si le glissement est égal à 0.004 ($f_r=24.9$ Hz) pour un fonctionnement du moteur à vide, nous aurons dans ce cas: $f_{be}=0.4(9).f_r$ et $f_{bi}=0.6(9).f_r$.

On obtient donc la valeur de $3f_{be}=268.92$ Hz qui est égale à la valeur de $2f_{bi}=268.92$ Hz. La connaissance de ces intersections conduit à un diagnostic plus précis.

Expérimentalement, les valeurs additionnelles des harmoniques sont très claires dans le spectre du signal pour la bande des fréquences inférieures et supérieures (figures V-28 et V-29). Les fréquences caractéristiques du défaut de la bague externe sont successivement apparues clairement avec un module d'amplitude remarquable. Les fréquences qui caractérisent ce défaut sont: $1 \times f_{be}=89.64$ Hz, $2 \times f_{be}=179.28$ Hz, $3 \times f_{be}=268.92$ Hz, $4 \times f_{be}=358.56$ Hz, $5 \times f_{be}=448.2$ Hz, $6 \times f_{be}=537.84$ Hz, ...

On a remarqué aussi, plusieurs raies d'harmoniques espacés autour des fréquences caractéristiques qui ont la formule suivante [PAT12]:

$$f_{FBL-be} = k.f_{be} \pm k'.f_r \quad (\text{V. 10})$$

avec,

k et k' sont égaux 1,2,3,...

Ces valeurs des fréquences (f_{FBL-be}) seront changées systématiquement pour un moteur qui fonctionne en charge.

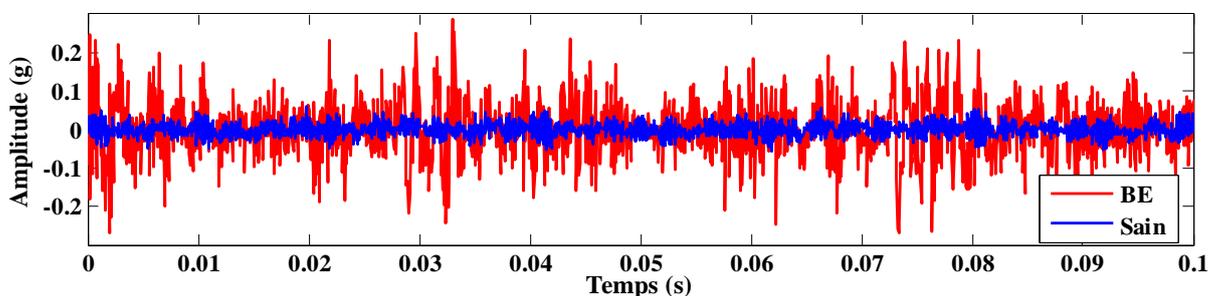


Figure V.27. Signal vibratoire en fonction du temps pour un MAS défectueux ($BE,s=0.004$).

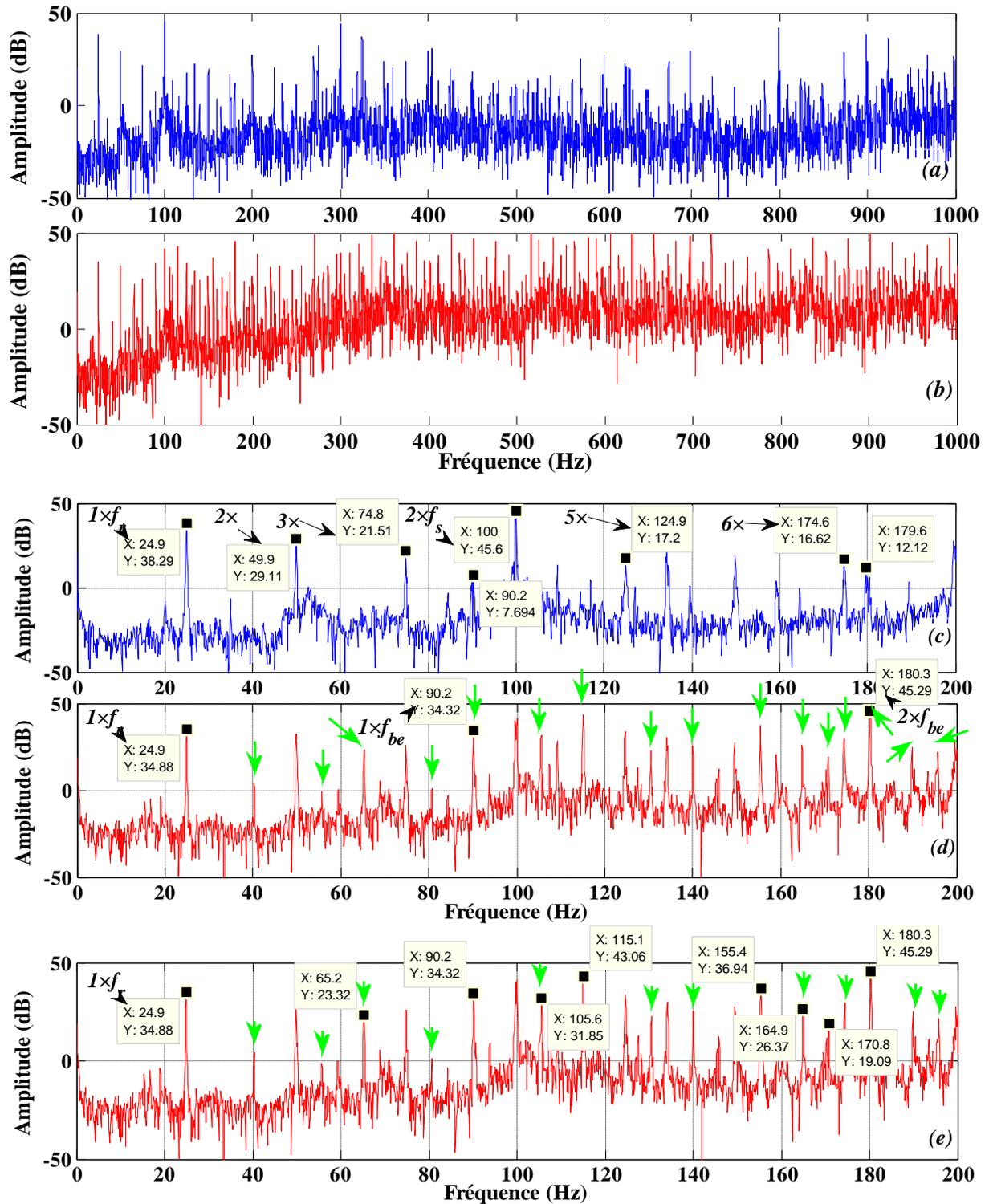


Figure V.28. Différentes pages des fréquences du spectre d'un signal vibratoire (BE, $s=0.004$).

Pour bien clarifier les indices du défaut, nous présentons un zoom pour différentes pages de fréquences. La figure (V-29) montre les fréquences dues au défaut de la bague extérieure avec ses amplitudes.

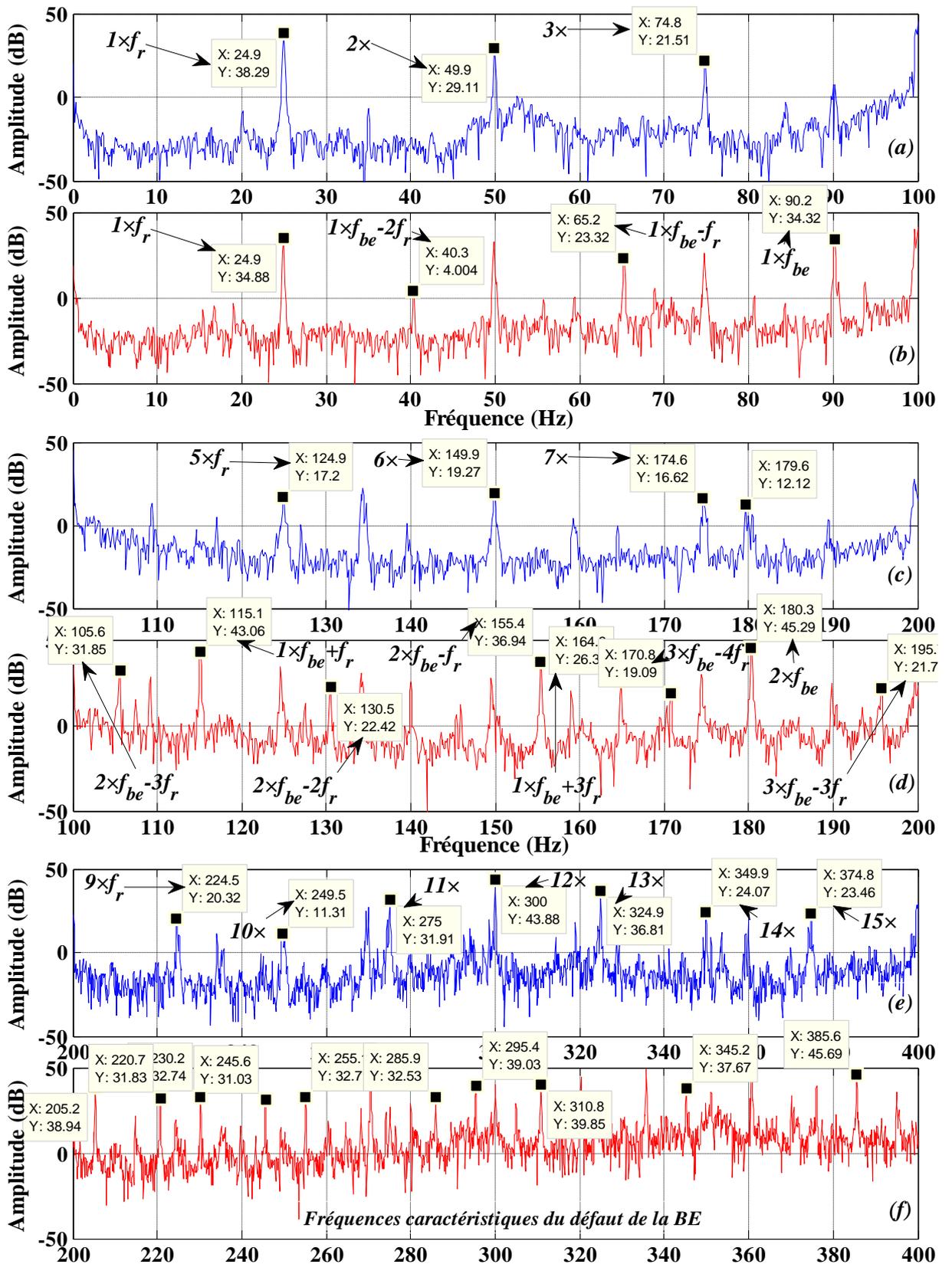


Figure V.29. Spectre d'un signal vibratoire ; (a) et (b) : 0-100 Hz, (c) et (d) : 100-200 Hz, (e) et (f) : 200-400 Hz (BE, $s=0.004$).

Le spectre du signal vibratoire et pour un fonctionnement à vide est très riche en informations concernant l'état de la MAS sous un défaut dans la BE du roulement. Les fréquences liées avec les $k \times f_{be}$ sont bien déterminées (figure V-29). Le tableau ci-dessous résume quelques fréquences avec ses amplitudes.

Tableau V.6. Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BE, $s=0.004$).

Formules caractéristiques du défaut de la BE	Valeurs théoriques [Hz] ($s=0.004$)	Valeurs pratiques [Hz] ($s=0.004$)	Amplitude [dB]	
			Sain	BE
$1 \times f_{be}$	89.64	90.2	7.69	34.32
$2 \times f_{be}$	179.28	180.3	12.12	45.29
$1 \times f_{be} - 2f_r$	39.84	40.3	/	4.004
$1 \times f_{be} - f_r$	64.74	65.2	/	23.32
$2 \times f_{be} - 3f_r$	104.58	105.6	/	31.85
$1 \times f_{be} + f_r$	114.54	115.1	/	43.04
$1 \times f_{be} + 3f_r$	164.34	164.9	/	26.3

La variation de la charge provoque, logiquement, une variation au niveau de la vitesse de rotation, donc au glissement 's'. On applique au MAS un couple de charge de 75% ; il rend le glissement à la valeur $s=0.032$. Dans ce cas, les valeurs des fréquences caractéristiques seront déplacées. Le signal temporel du signal vibratoire est présenté dans la figure (V-30). Le spectre du signal vibratoire de la figure (V-31) présente les fréquences, 87.12Hz, 174.24Hz, 261.36Hz, 348.48Hz, 435.6Hz, ... qui vérifient correctement la formule spécialisée au défaut de la BE. Les autres plages des fréquences confirment bien l'exactitude des formules théoriques avec les résultats pratiques.

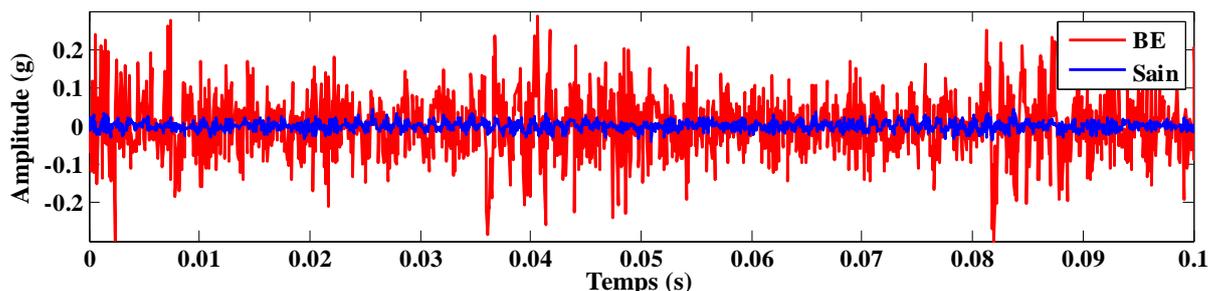


Figure V.30. Signal vibratoire en fonction du temps pour un MAS défectueux (BE, $s=0.032$).

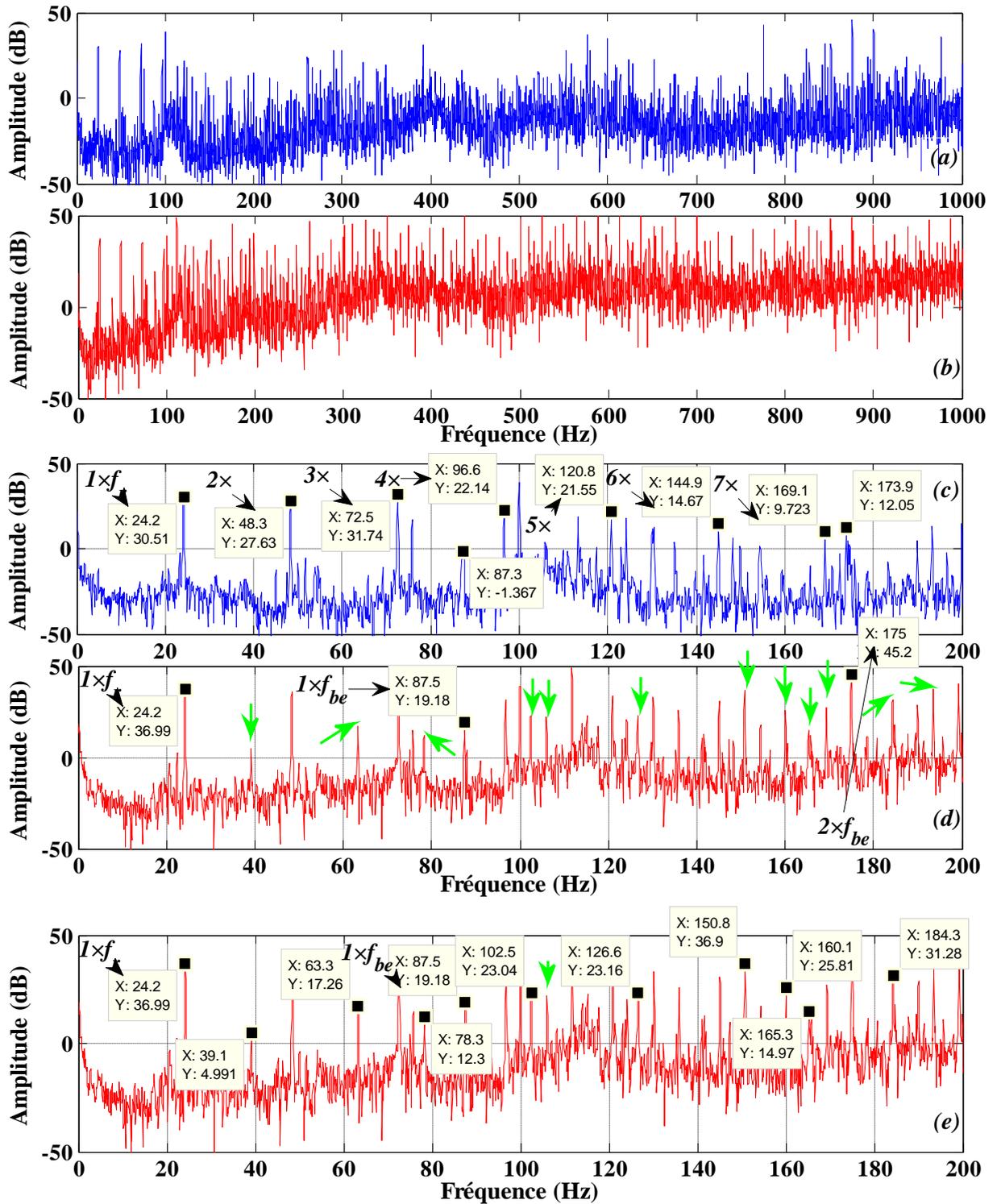


Figure V.31. Différentes pages des fréquences du spectre d'un signal vibratoire (BE, $s=0.032$).

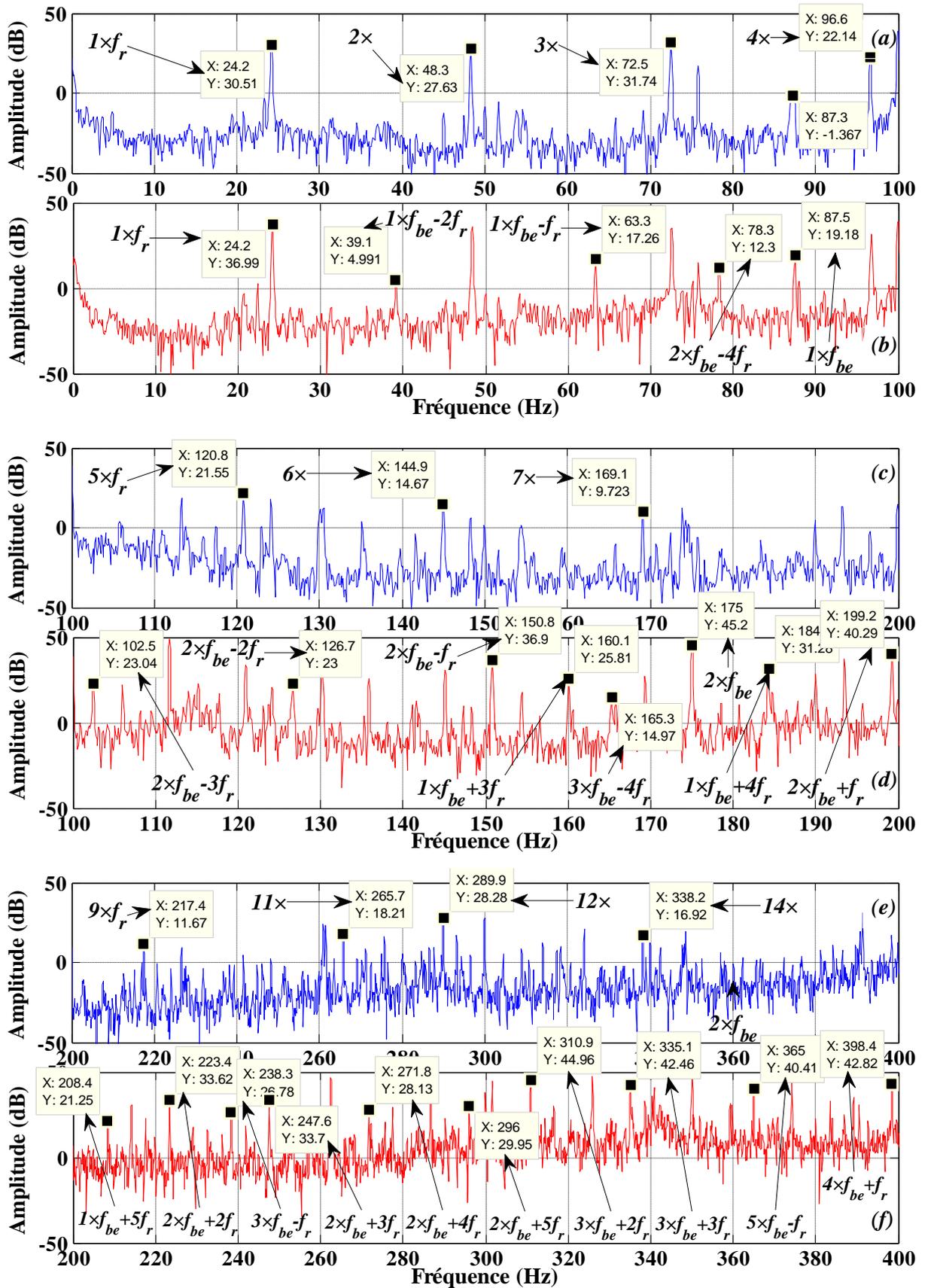


Figure V.32. Présentation des fréquences de bandes latérales alentours de $k \times f_{be}$ dans le spectre du signal vibratoire (BE, $s=0.032$).

Toutes les fréquences montrées dans la figure (V-31-e) sont reliées avec la formule (V. 10). Le tableau ci-après résume quelques exemples de calcul pour ces fréquences caractéristiques. D'après cette analyse, nous avons trouvé les mêmes remarques de l'état du fonctionnement à vide pour les valeurs des FBL aux alentours des fréquences caractéristiques du défaut de roulement. En outre, le spectre du signal vibratoire est riche en harmoniques pour des plages de fréquences un peu plus avancées (fréquences supérieures) ; la figure (V-32) montre bien ces deux points intéressants. Le tableau (V-7) résume un ensemble d'harmoniques caractérisant le défaut de la BE.

Lorsqu'on admet une marge d'amplitude plus de 0dB, on trouve d'après la figure (V-33) l'apparition des fréquences significatives au défaut de roulement.

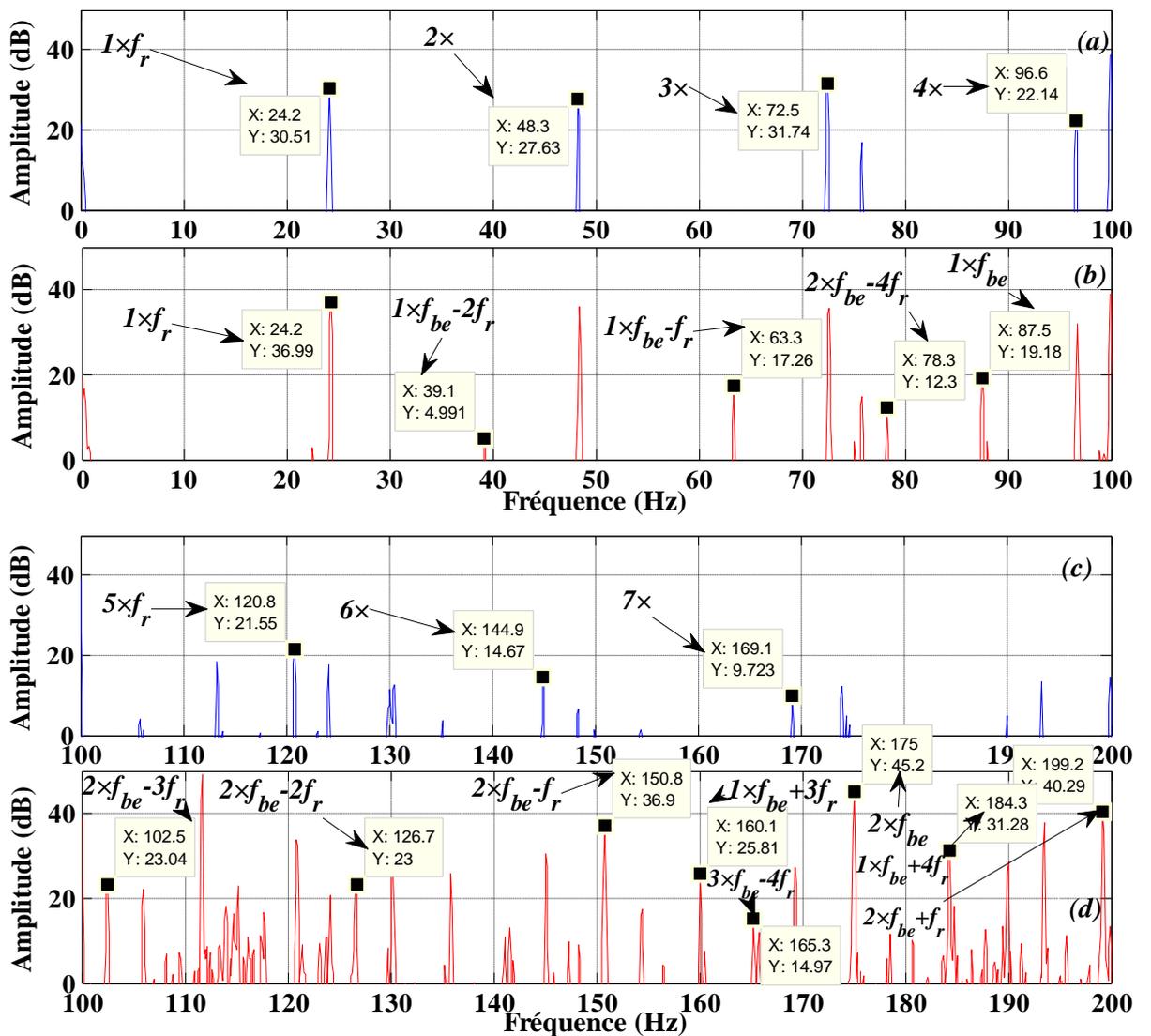


Figure V.33. Présentation des fréquences de bandes latérales alentours de $k \times f_{be}$ dans le spectre du signal vibratoire (BE, $s=0.032$).

Tableau V.7. Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BE, $s=0.032$).

Formules caractéristiques du défaut de la BE	Valeurs théoriques [Hz] ($s=0.032$)	Valeurs pratiques [Hz] ($s=0.032$)	Amplitude [dB]	
			Sain	BE
$1 \times f_{be}$	87.12	87.5	-1.36	19.18
$2 \times f_{be}$	174.24	175	12.05	45.2
$1 \times f_{be} - 2f_r$	38.72	39.1	/	4.99
$1 \times f_{be} - f_r$	62.92	63.3	/	17.26
$2 \times f_{be} - 4f_r$	77.44	78.3	/	12.3
$2 \times f_{be} - 3f_r$	101.64	102.5	/	23.04
$3 \times f_{be} + 3f_r$	333.96	335.1	/	42.46

D'après cette étude, et dans le cadre de diagnostic du défaut de la BE en se basant sur la MVSA ; on peut dire que les valeurs importantes des fréquences caractéristiques de ce défaut sont visibles. Donc, l'analyse en fréquence des signaux vibratoires permet d'identifier la provenance du défaut de roulement dans la bague externe.

V.5.3.2 Mesure de vibration pour un défaut dans la bague interne

Pour déterminer la nature du défaut de la bague interne, nous suivons les mêmes étapes de l'analyse spectrale d'un signal de vibration présenté dans la figure (V-34) pour les deux régimes de fonctionnement (à vide et en charge). La vérification des fréquences caractéristiques du défaut dans la bague interne du roulement est présentée dans la figure (V-35) pour un fonctionnement à vide ($s=0.004$, $f_r=24.9\text{Hz}$).

On remarque sur la figure (V-35), l'apparition très nette des harmoniques signalés d'après la formule (I.18), plus d'autres fréquences latérales (FL) autour de ces fréquences qui portent la formule suivante ($f_r=24.1\text{Hz}$ et $s=0.004$):

$$f_{FBL-bi} = kf_{bi} \pm k'f_r \quad (\text{V. 11})$$

L'observation du spectre, pour des plages différentes de fréquences, montre l'efficacité de la méthode de diagnostic appliquée. Les fréquences caractéristiques de défauts ont été calculées en fonction de la vitesse de rotation et des caractéristiques du roulement ($N_b=9$).

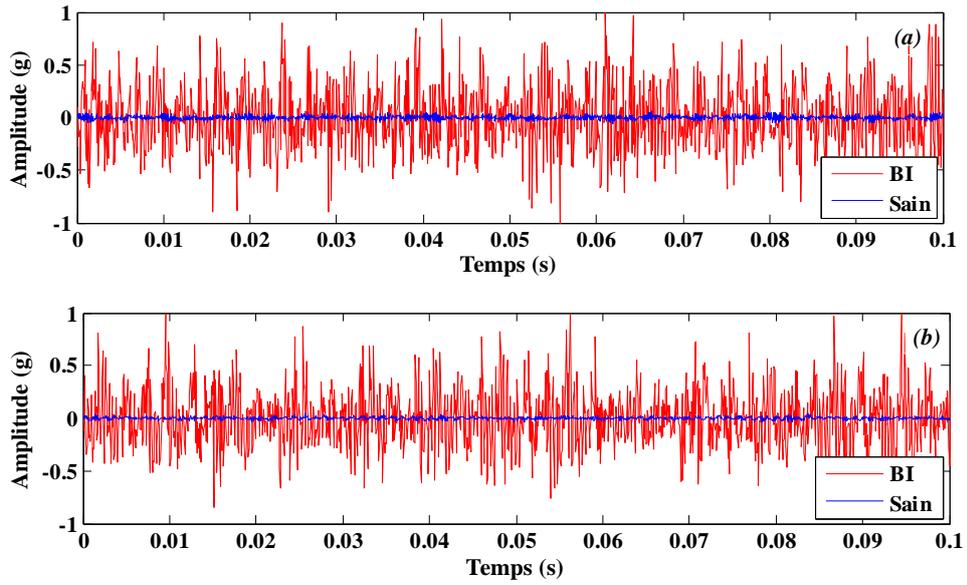


Figure V.34. Signal vibratoire en fonction du temps 'BI' ; (a) : à vide, (b) : en charge.

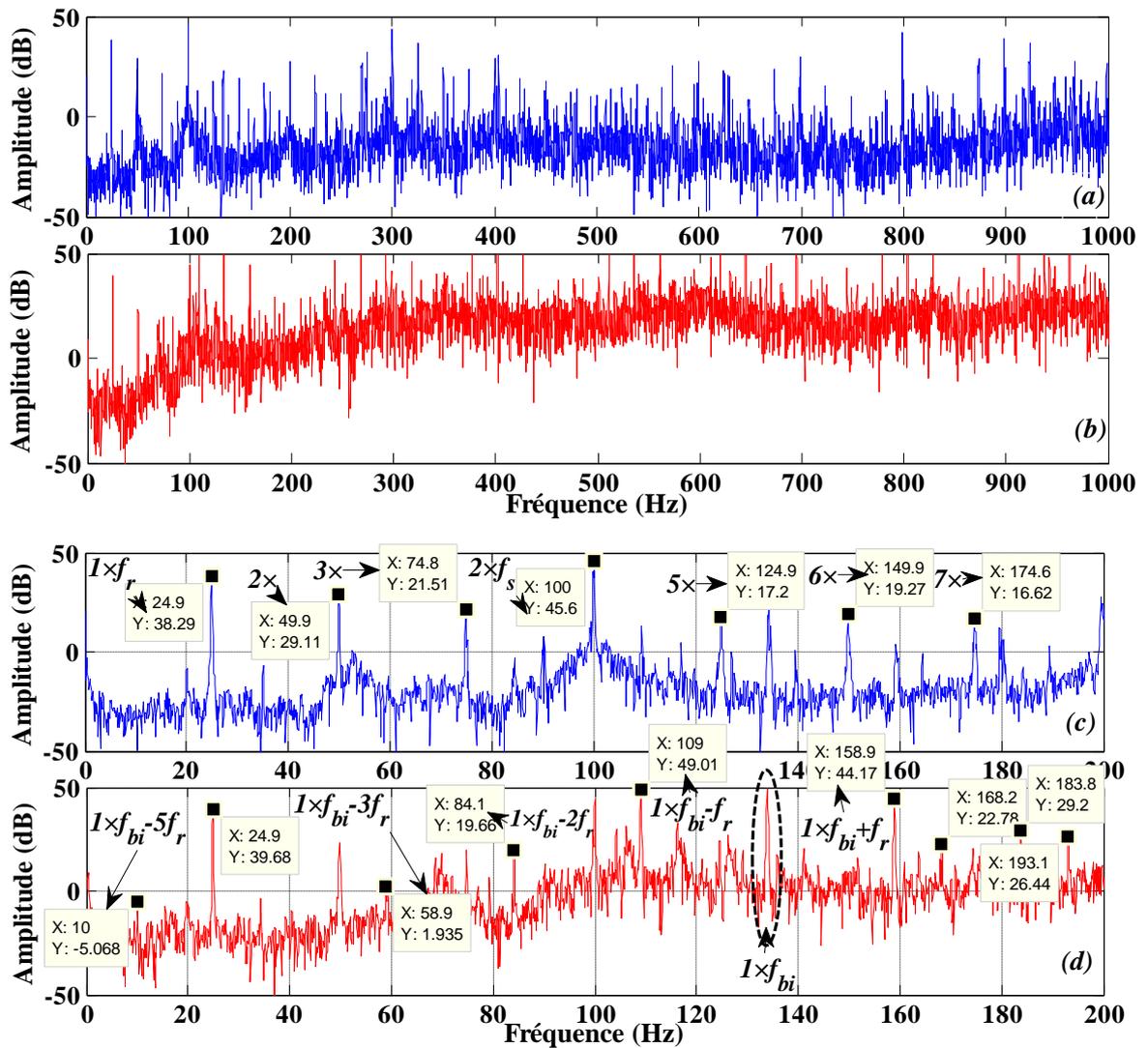


Figure V.35. Différentes plages des fréquences du spectre d'un signal vibratoire (BI, $s=0.004$).

On fait un zoom aux alentours de différentes plages fréquentielles afin de bien visualiser les harmoniques supplémentaires dus au défaut de la bague interne. Ce zoom du spectre est présenté dans la figure (V-36).

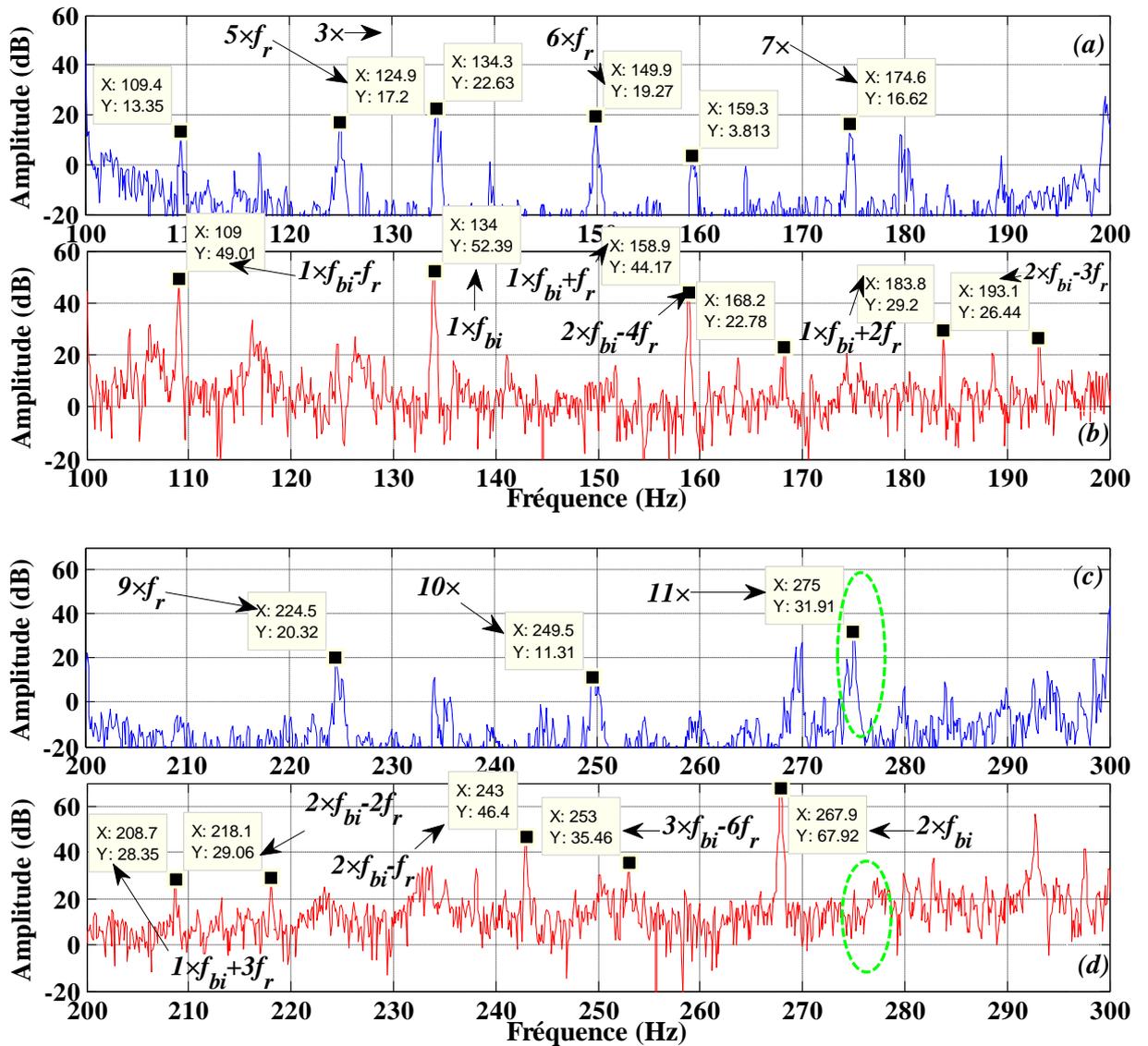


Figure V.36. Spectre d'un signal vibratoire aux alentours de différentes plages fréquentielles (BI, $s=0.004$).

Une présentation d'amplitudes de quelques harmoniques caractéristiques avec leurs valeurs est organisée dans le tableau suivant :

Tableau V.8. Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BI, $s=0.004$).

Formules caractéristiques du défaut de la BI	Valeurs théoriques [Hz] ($s=0.004$)	Valeurs pratiques [Hz] ($s=0.004$)	Amplitude [dB]	
			Sain	BI
$1 \times f_{bi}$	134.46	134	22.63	52.39
$2 \times f_{bi}$	268.92	267.9	2.08	67.92
$1 \times f_{bi} - 3f_r$	59.76	58.9	/	1.93
$1 \times f_{bi} - 2f_r$	84.66	84.1	-3.07	19.66
$1 \times f_{bi} + f_r$	159.36	158.9	3.81	44.17
$2 \times f_{bi} - 3f_r$	194.22	193.1	/	26.44
$3 \times f_{bi} - 6f_r$	253.98	253	/	35.46

Nous présentons maintenant le spectre du signal de vibration sous un fonctionnement de la machine en charge ($s=0.032$). Le signal vibratoire est l'identité de la machine, lié à chaque instant aux conditions de fonctionnement. Pour faire un bon diagnostic, on peut passer à l'analyse spectrale pour confirmer les signatures du défaut.

La figure (V-37) permet de présenter le FFT du signal de vibration pour différentes plages fréquentielles. On remarque que les valeurs des harmoniques caractérisant ce défaut apparaissent clairement ; ce qui démontre, bien, l'efficacité de l'analyse spectrale des signaux vibratoires. Les FL autour des kf_{bi} existent le long du spectre par $kf_{bi} \pm k'f_r$; avec $f_r=24.2\text{Hz}$ (pour $s=0.032$). De plus, ces fréquences caractéristiques apparaissent clairement, même, pour des plages de fréquences plus avancées. Parmi elles, on obtient : 498.52 Hz, 546.92 Hz, 759.88 Hz, 808.28 Hz, 905.03 Hz, ...

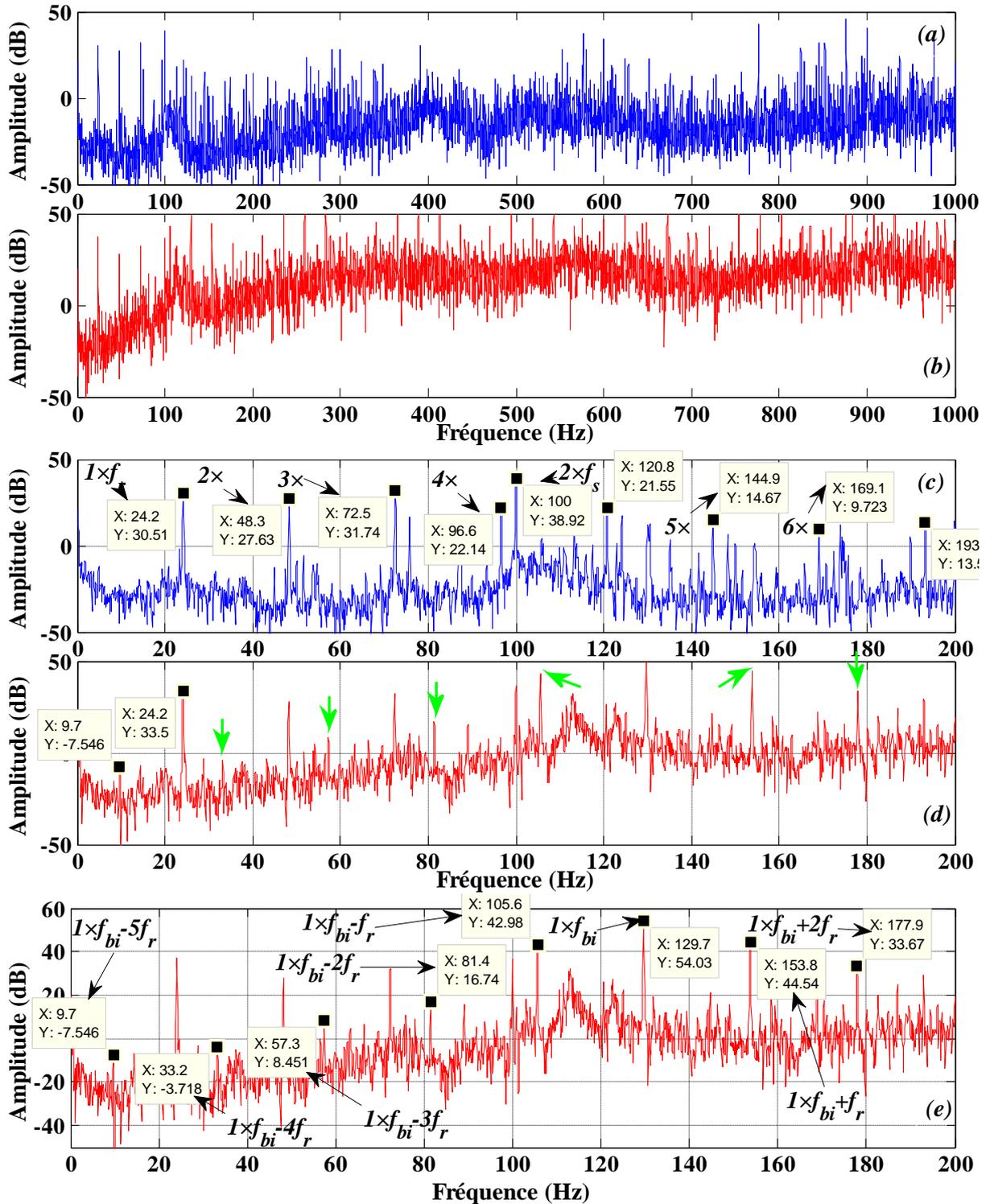


Figure V.37. Présentation des fréquences caractéristiques et latérales pour différentes pages des fréquences dans le spectre d'un signal vibratoire (BI, $s=0.032$).

Le défaut de roulement est dominant dans l'industrie d'un pourcentage important. Notre analyse confirme la détection d'une partie intéressante au diagnostic des machines tournantes. Les résultats obtenus assurent la précision des valeurs de fréquences caractéristiques dans le

spectre du signal vibratoire pour le défaut de la bague interne. Les fréquences additionnelles du défaut de la bague intérieure sont nombreuses tout au long du spectre.

Dans le tableau (V.9), on présente quelques calculs théoriques et pratiques pour certaines valeurs des harmoniques du défaut de la bague interne.

Tableau V.9. Récapitulation de quelques harmoniques théoriques et pratiques dans le spectre d'un signal vibratoire (BI, $s=0.032$).

Formules caractéristiques du défaut de la BI	Valeurs théoriques [Hz] ($s=0.032$)	Valeurs pratiques [Hz] ($s=0.032$)	Amplitude [dB]	
			Sain	BI
$1 \times f_{bi}$	130.68	129.7	12.78	54.03
$2 \times f_{bi}$	261.36	267.9	2.08	67.92
$1 \times f_{bi} - 3f_r$	58.08	57.3	/	8.45
$1 \times f_{bi} - 2f_r$	82.28	81.4	/	16.74
$1 \times f_{bi} - f_r$	106.48	105.6	4.07	42.98
$1 \times f_{bi} + f_r$	154.88	153.8	1.41	44.54
$1 \times f_{bi} + 2f_r$	179.88	177.9	/	33.67

Nous avons étudié le cas d'un roulement à billes, pour des conditions de fonctionnement différentes (à vide et en charge), c'est à dire pour différentes valeurs de vitesses de rotation. Le défaut dans la bague extérieure a donné de bons indices dans le spectre des signaux vibratoires. Les mêmes résultats positifs ont été obtenus pour un défaut dans la bague intérieure du roulement. Ce qui explique l'efficacité de la méthode de MVSA pour le diagnostic du défaut de roulement.

V.6 BILAN D'ETUDE

L'observation des phénomènes vibratoires est une technique largement utilisée dans l'industrie, notamment pour la surveillance des composants sensibles ou stratégiques d'un système, par exemple les roulements à billes, les engrenages ou les rotors.

Le diagnostic vibratoire des machines tournantes, est basé sur la connaissance des images vibratoires où se manifestent les défauts, afin de regrouper et de déterminer le seuil de la

décision finale. Cette partie a traité la détection des défauts de la rupture de barres rotoriques, l'excentricité (ES, ED) et le défaut de roulement (BE, BI) en utilisant la méthode de MVSA pour des conditions de fonctionnement variables (à vide et en charge).

La technique vibratoire a donné dans cette étude, de bons indicateurs sur les défauts analysés, et surtout pour les défauts de roulement et d'excentricité statique et dynamique. Pour cette raison, la MVSA est privilégiée jusqu'à maintenant dans l'utilisation industrielle pour la détection des défauts (surtout les défauts mécaniques) dans les machines tournantes. Malheureusement, la fiabilité des résultats est fortement liée à la position précise des accéléromètres sur les paliers d'une part, et la richesse des signaux vibratoires aux bruits (problème de bruit) d'autre part.

Ainsi, nous pouvons dire qu'à travers ce travail, il existe d'autres moyens de diagnostic pratique grâce à de simples outils. La recherche a besoin de développer d'autres techniques qui permettront de séparer et/ou d'éliminer les chevauchements entre les différents symptômes des défauts.

V.7 ETUDE COMPARATIVE ENTRE LA MCSA ET LA MVSA

Le diagnostic des machines tournantes est une partie essentielle de la surveillance. Ce domaine de recherche est toujours croissant pour plusieurs raisons, telles que, la puissance, la commande, et les performances les plus élevées. La détection des défaillances permet d'assurer le bon fonctionnement (meilleure production) et la durée de vie des machines tournantes. Aujourd'hui, les méthodes de diagnostic progressent continuellement, grâce aux matériels informatiques et le développement du traitement du signal. Parmi celles-ci, on trouve l'analyse du signal du *courant statorique* (fréquence et/ou amplitude, etc.) ou du *signal vibratoire*. Ces méthodes ont été appliquées en détail pour différents défauts, successivement aux chapitres 2, 3, 4 et 5.

L'analyse du courant statorique par la transformée de Fourier rapide (TFR) est recommandée dans le cas d'une mauvaise qualité causée par un défaut « x ». De la même façon, et avec l'utilisation de la FFT (MVSA-FFT) sur un signal vibratoire peut être détecté les défauts comme la méthode de la MCSA-FFT. La MCSA-DWT est une solution adéquate pour des conditions limitées. ***La question qui se pose à présent, est de savoir qu'elle est la technique la plus efficace pour détecter les défauts dans les MAS ?***

V.7.1 INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTAS

Certains défauts dans les machines tournantes sont caractérisés par des phénomènes physiques, se traduisant par des perturbations différentes sur les signaux à traiter; c'est le cas dans les défauts de la rupture de barres, excentricité et le roulement.

L'existence de ces défauts peut être de faibles ou fortes amplitudes lorsque le défaut est naissant. Le défaut évolue rapidement, surtout, pour un fonctionnement intensif de la machine (charge variable). Pour cette raison, il est nécessaire de les détecter à une phase précoce ; pour pouvoir éviter des dégâts, il faut planifier une maintenance efficace et sécuriser le système d'utilisation. Les techniques de détection des défauts qui se basent sur l'analyse spectrale de Fourier, ont démontré les meilleures performances dans le diagnostic.

La MVSA-FFT est aujourd'hui très utilisée dans l'industrie pour diagnostiquer les défauts des machines tournantes. Durant les trois dernières décennies, cette technique est concurrencée dans le milieu industriel.

La technique des ondelettes est utilisée dans plusieurs domaines. Dernièrement, elle a été utilisée pour détecter les défauts dans les machines tournantes. La détection est basée sur un fait, quel que soit le défaut qui induit une variation de la FMM de l'entrefer, il se traduit par des composantes supplémentaires dans les courants statoriques. La technique est validée pour des signaux expérimentaux obtenus à partir de la MAS. Les résultats, obtenus dans une certaine mesure, génèrent des avantages et des inconvénients.

V.7.2 Description de chaque défaut

Premièrement : la cassure de barres :

- 1- Nous avons vu dans le chapitre 2, une analyse complète du défaut électrique concernant la cassure de barres rotoriques (dans des fois classé défaut mécanique). Les résultats, qui ont été obtenus par la méthode de MCSA-FFT, présentent une grande richesse d'informations sur l'existence du défaut de la CB. Les fréquences et les bandes fréquentielles qui caractérisent le défaut sont clairement présentées dans le spectre du courant statorique, pour les fréquences inférieures et supérieures. Il est important de signaler ici, ***la difficulté*** de la détection pour ***un fonctionnement à vide*** de la MAS. En plus, il faut faire attention à la variation de la charge qui a des signatures spectrales similaires à celle du défaut de la cassure de barres.
- 2- La MCSA-DWT est très sensible aux défauts qui affectent la MAS (avantage). L'EQM est un indice significatif et important sur l'existence et la contribution de

chaque défaut. Néanmoins, le sujet est ouvert pour cette technique afin de déterminer, précisément, le type du défaut (inconvenient).

- 3- La MVSA a été appliquée afin de détecter les signatures du défaut de la rupture de barres. Cette technique a donné de bons résultats, surtout, aux harmoniques supérieurs ; et malgré la littérature qui diverge sur l'apparition des harmoniques latérales autour de f_r (*inexistants*). Il est important de noter ici, que pour un glissement $s \approx 0$, les fréquences caractéristiques n'apparaissent pas clairement, et les harmoniques d'ordre $1\times$, $2\times$, ... crée une *confusion* avec d'autres défauts, comme le défaut d'alignement. De plus, l'*amplitude* des raies pour les deux fonctionnements est un handicap sérieux pour cette technique.

Deuxièmement : l'excentration du rotor:

- 1- La technique de la MCSA-FFT *souffre* d'un manque, pour trouver quelques *indicateurs décisifs* aux défauts d'ES ou bien de l'ED pour plusieurs types des MAS. La condition imposée à l'avance pour l'existence ou non des fréquences supplémentaires du défaut d'excentricité, est un problème à résoudre. L'ES rencontre un *problème d'ambiguïté* entre les harmoniques qui caractérisent le défaut et les harmoniques des *RSHs*. En outre, les fréquences caractéristiques du défaut d'ED, ont un *chevauchement* avec les *RSHs* et les harmoniques de l'excentricité mixte [BES16-3].
- 2- Contrairement à la méthode de la MCSA-FFT, la technique de *l'analyse vibratoire est efficace pour la détection des deux types de défauts* d'excentricité (défaut mécanique). Les signatures, pour une excentricité statique pure, montrent bien *l'existence du défaut d'ES seul*. Une richesse d'informations pour le défaut d'ED, telles que, la variation remarquable d'amplitude de quelques raies et un ensemble des fréquences additionnelles causées par ce défaut (ED) qui provoque des pics très intéressants.

Troisièmement : le roulement:

- 1- D'après les résultats, présentés au chapitre 3 qui se basent sur l'analyse spectrale du courant statorique, les indices sont en concordance avec les formules théoriques tout au long des différentes plages fréquentielles. Le défaut de la bague externe ou interne a été détecté *clairement* par cette méthode.
- 2- La technique de la MVSA-FFT a donné des signatures bien précises pour les deux défauts du roulement (BE et BI). Les pics sont en concordance avec les relations qui caractérisent ce défaut mécanique. Cependant, il est important de noter la présence

d'un *chevauchement d'égalité* entre les fréquences caractéristiques pour certaines valeurs (kf_{be} et $k'f_{bi}$).

Comme nous l'avons déjà signalé, l'exploitation du signal du courant statorique s'effectue par différentes techniques. Parmi elles, la transformée en ondelettes discrètes (ASCA-TOD) qui a été utilisée dans le chapitre 4 pour différents défauts ; elle démontre son efficacité pour indiquer ou pour donner une *indication* sur l'existence du défaut. Cette méthode a une *sensibilité remarquable* aux défauts comme l'excentricité statique. De plus, elle a l'avantage d'étudier simultanément les informations temporelles et fréquentielles (temps-fréquences). Malgré que cette méthode couvre la zone des fréquences caractéristiques ; elle ne permet pas, à ce stade, de déterminer le type du défaut lorsqu'on n'a pas une pré-information sur le problème rencontré.

V.7.3 Remarques importantes

Plusieurs remarques intéressantes peuvent témoigner d'un défaut d'ordre électromagnétique ou mécanique dans un moteur asynchrone, d'après notre étude on peut conclure aux points essentiels suivants:

- 1- Un spectre peut être interprété de plusieurs façons, non pas totalement différentes, mais pouvant présenter quelques variantes en fonction de l'expérience de l'expert et de l'expérience acquise sur la machine.
- 2- Les fréquences caractéristiques sont généralement remarquées avec un chevauchement avec d'autres harmoniques. Ce point est surtout pour la méthode de MVSA-FFT.
- 3- L'analyse d'amplitude doit être accompagnée avec des stratégies bien définies comme : le niveau d'alarme normal, le pourcentage inquiétant, l'alerte et l'alarme.
- 4- Le bruit est une source inévitable dans les signaux à analyser. L'image de vibration, généralement, est très riche en bruit, surtout, pour un système connecté avec d'autres sous-systèmes.
- 5- Le type de fenêtre et la fréquence d'échantillonnage influent sur les résultats d'analyses.
- 6- La qualité des capteurs et leurs placements (positions) peuvent conduire à certains problèmes indésirables.
- 7- Les capteurs de vibrations sont très sensibles, ils dépendent de leur fixation 'implantation' (vissée, collée, par aimant, ...) et du choix de la grandeur à mesurer (déplacement : basse fréquence, vitesse : moyenne fréquence ou accélération : haute fréquence).

- 8- Chaque essai de mesures doit être effectué en des points précis et toujours les mêmes.
- 9- Un phénomène mécanique peut donner des images vibratoires différentes, sensiblement en fonction du point de mesure.
- 10- Pour avoir une image complète des vibrations (en trois dimensions), il faut prendre les mesures selon trois directions perpendiculaires et sur chaque palier de la machine surveillée : deux directions radiales (horizontale et verticale) et une direction axiale.
- 11- A certains moments, le réseau électrique est pollué naturellement, il faut, donc, prendre en considération ce phénomène expérimentalement.
- 12- La construction de la machine joue un rôle important dans l'apparition ou la disparition de quelques harmoniques, comme le type de bobinage.
- 13- L'attraction magnétique déséquilibrée modifie le comportement vibratoire du système.
- 14- Un pic important a deux fois la fréquence du courant d'alimentation (100 Hz) ; et afin de bien l'identifier, il est parfois nécessaire de faire un zoom sur cette fréquence pour la différencier de la 2^{ème} fréquence fondamentale ou de l'excentricité mixte, ou encore du $4 \times f_r$ pour le signal vibratoire.
- 15- L'ambiguïté est une mauvaise contrainte que rencontre l'analyse spectrale pour quelques défauts.
- 16- Pour le grand nombre de raies spectrales dont les éléments se produisent pendant le fonctionnement normal (stationnaire), il peut être difficile de les détecter avec un changement dans le régime de fonctionnement (non-stationnaire).
- 17- La modulation du signal de vibration dans le début de fissures et de fatigue des éléments mécaniques, produit souvent des bandes latérales qui s'étendent sur une large gamme de fréquences de faibles amplitudes. Dans ces circonstances, le niveau de bruit de fond dans le spectre peut facilement masquer la présence de bandes latérales, et les défauts mécaniques dans le système peuvent passer inaperçus.
- 18- Lorsque le signal n'est pas quasi périodique dans le temps, la transformée de Fourier n'est plus applicable. Il faut alors recourir à un autre outil mathématique comme : la transformée en ondelettes (TO).

Généralement, les capteurs sont utilisés pour surveiller les machines tournantes. Leurs évolutions permettent d'alerter le technicien d'une dégradation du fonctionnement et de désigner l'élément défectueux. Ils sont utilisés lorsque l'on détecte une anomalie. Cette anomalie est souvent une évolution jugée importante d'après sa signature.

Le diagnostic du défaut détecté demande, souvent une précision complémentaire, pour prendre une décision judicieuse.

Jusqu'à présent, il n'y a pas eu d'approche fixe dans l'analyse des défauts des machines asynchrones. Le sujet est ouvert pour implémenter et proposer toute technique adéquate au diagnostic des MAS. D'un autre côté, la vibration est, aujourd'hui, considérée comme l'une des sources importantes pour réaliser le diagnostic industriel. Les signaux vibratoires sont, dernièrement, exploités par plusieurs techniques comme la TO. De nos jours, les signaux vibratoires peinent à diagnostiquer autrement les défauts dans les machines électriques.

La connaissance de la machine (type de bobinage, type de fonctionnement, position des barres, alimentation ...) permet de déterminer les fréquences caractéristiques du défaut. Les techniques de traitement de signal nécessitent un suivi et un calcul bien précis aux indicateurs de celles-ci.

V.8 BILAN DE LA COMPARAISON

Pour comparer entre les méthodes de diagnostic, il faut aborder les caractéristiques de chacune. Notre cas présente un principe d'analyse qui est le même que pour la MCSA-FFT et la MVSA-FFT. La TFR (FFT) a été appliquée soigneusement sur le signal du courant statorique ; et sur la même stratégie de travail, on a exploité un signal vibratoire pour détecter les trois défauts.

Avant de mettre un point final à cette étude, nous rappelons quelques contraintes de chaque méthode [PHI09].

- La plage de fréquences vibratoires du défaut permet de choisir le capteur de vibration et son mode de fixation.
- L'enregistrement de l'amplitude vibratoire d'une machine, en fonction de la fréquence, est souvent difficile pour déterminer le type du défaut.
- L'installation des capteurs de vibrations, demande une grande précision (capteur bien fixé).
- L'amplitude des harmoniques dans le spectre des signaux vibratoires, est généralement faible.
- De nombreux défauts sont impliqués aux mêmes fréquences, surtout dans le spectre du signal vibratoire (alignement, excentricité, ...).
- Le niveau de bruit est gênant pour les signaux vibratoires.
- L'ambiguïté et le chevauchement entre les valeurs des harmoniques sont un problème qui rencontrent les deux méthodes (MCSA-FFT et MVSA-FFT).

Actuellement, la MVSA-FFT est la technologie de surveillance la plus utilisée. Néanmoins, la MCSA-FFT possède des avantages et s'impose spécialement sur la machine asynchrone par des capteurs du courant. Le mouvement du rotor dans le stator conduit à un changement au niveau du champ magnétique, ce dernier est détectable dans le courant statorique [COR15]. En outre, le déplacement du rotor ne peut pas être mesuré directement par l'intermédiaire des vibrations. Les vibrations sont fortement dépendantes de : l'emplacement de mesure, le montage et le bâti de la machine. Le déplacement radial du rotor dans le stator est donc plus facilement détectable par la MCSA [COR15].

La MCSA est basée sur la mesure du courant statorique, cette technique est des plus complètes pour détecter les défauts électriques. Les défauts qui ne conduisent pas à un changement du niveau de vibration, par exemple courants de roulement, ne sont donc pas détectables avec l'analyse des vibrations [COR15]. En outre, dans de nombreuses applications, les courants sont mesurés facilement par l'utilisateur, donc il n'est pas nécessaire de pratiquer des investigations supplémentaires.

Généralement, la MCSA est orientée vers la détection des défauts électriques. Ici, nous avons un exemple de détection d'une excentricité purement statique ; ce défaut était difficile à détecter par la MCSA-FFT, au contraire de la technique de la MVSA qui l'a détectée clairement.

Actuellement, la MCSA n'a pas encore de références pour interpréter l'amplitude des signatures concernant le stade des défauts mécaniques. En général, le rapport : signal- bruit dans la mesure des vibrations est nettement plus élevé que dans la MCSA [COR15].

Les défauts mécaniques sont, généralement, plus faciles à détecter à un stade précoce par l'analyse vibratoire [IMM10]. Les mesures de vibrations permettent également de mesurer différentes positions, alors que la MCSA est seulement le résultat du mouvement du rotor radial. De fait pour la MCSA, il est difficile de connaître plus d'informations sur l'état global de la machine en cours de fonctionnement. Le tableau ci-dessous représente un résumé récapitulatif des avantages et inconvénients de chaque méthode.

Tableau V.10. Récapitulation des avantages et des inconvénients de la MCSA et la MVSA.

Expressions caractéristiques	MCSA-FFT	MVSA-FFT
Détection des défauts électriques	☆	/
Facile à interpréter le déplacement radial du rotor	☆	/
Applicable dans les milieux difficiles	☆	/
La mise en œuvre est moins chère	☆	/
Détection des défauts mécaniques	/	☆
Plus des informations sur la sévérité d'amplitude	/	☆
Le signal le plus bruité	/	☆
La plus riche aux fréquences de similarités (semblables)	/	☆
Exige plus d'une précision pour faire le montage	/	☆
Efficacité pour le régime non stationnaire	/	/

Les exemples présentés aux chapitres 2 et 3 montrent clairement, la nette performance de l'analyse de l'intensité du courant statorique, en la comparant avec l'analyse vibratoire traditionnelle en présence de défauts d'origine électromagnétique et/ou parfois mécanique, induisant des fluctuations de couple et d'ondulation de la vitesse de rotation. Malheureusement, cette technique d'investigation dont les fondements remontent à plus de 25 ans, a beaucoup de difficultés à s'implanter dans le milieu industriel.

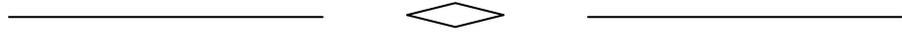
Les analyses de vibrations ne donnent pas d'informations très significatives. L'amplitude de la composante d'ordre 1 de la fréquence de rotation (f_r) est multipliée tout au long du spectre (dans des fois à cause de mauvaise fixation de la bague externe du roulement). Cela nous amène à une difficulté de la détection de quelques défauts qui ont comme base de diagnostic l'existence de la série de la fréquence f_r .

V.9 CONCLUSION

La comparaison entre l'analyse des vibrations (MVSA-FFT) et l'analyse du courant statorique (MCSA-FFT et MCSA-DWT) se base sur l'analyse de défauts de la rupture de barres, excentricité (ES, ED) et le défaut de roulement (BE, BI). Il est devenu clair que la machine souffre sous des symptômes communs de ces défauts. Cela, a été détecté facilement par une méthode et plus difficile par une autre. Nous avons remarqué la relation entre le type du défaut et la technique appliquée au diagnostic des défauts. Les défauts d'origines électriques peuvent être détectés facilement par MCSA-FFT ; et pour les défauts mécaniques, la MVSA-FFT est meilleure. Cependant, il reste encore très difficile de déterminer le type

exact du défaut dans certains cas, à cause du manque d'informations qui regroupent les mêmes formules et les mêmes symptômes. Par conséquent, même dans des conditions difficiles en raison de la commande (onduleur) et pour une charge variable, le défaut peut encore être caché entre les autres plages de fréquences. La MCSA-DWT joue un rôle primordial au diagnostic des défauts à condition que ses points négatifs puissent être améliorés.

D'autres recherches se concentrent aujourd'hui, sur les grandeurs des signatures actuelles (courant ou vibration) afin de traiter les défauts dans les machines asynchrones par différentes stratégies et/ou conditions de charge variables.



CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans le milieu industriel, les systèmes de production sont de plus en plus complexes et ne peuvent être exempts de perturbations ou de défaillances. Ces défauts influent sur la qualité du produit, et peuvent provoquer un arrêt immédiat d'une machine. Le diagnostic de défauts de ces machines, s'appuie essentiellement sur la surveillance de symptômes liés à différentes conditions de dégradation. Ces symptômes peuvent être tirés et extraits de diverses sources d'informations, parmi lesquelles, l'analyse vibratoire qui occupe une place prépondérante dans l'industrie.

L'objectif de ce travail est de contribuer à la surveillance et la bonne évaluation de l'état de fonctionnement des moteurs industriels, comme les moteurs asynchrones. Le diagnostic des défauts de ces moteurs, est considéré comme une étape primordiale dans l'industrie. Pour cette raison, on assiste à une concurrence entre chercheurs pour élaborer une meilleure technique, c'est un sujet d'actualité. Les méthodes appliquées au domaine de diagnostic des machines tournantes sont nombreuses. Parmi elles, la méthode d'analyse des signatures du courant statorique en utilisant la transformée de Fourier rapide et la méthode de l'analyse vibratoire. La plupart des techniques de diagnostic de défaut sont destinées à identifier les défauts d'une manière précise. Cette étude présente deux techniques de détection de défaut permettant de sélectionner la méthode la plus appropriée en fonction du résultat recherché.

Tout d'abord, nous avons présenté un *nouveau modèle* analytique orienté vers la simulation des *défauts du roulement*. Ce modèle a été testé et comparé avec les résultats expérimentaux. Notre modèle montre clairement la précision des calculs d'après le spectre du courant statorique qui présente les nouveaux harmoniques caractéristiques au défaut de la bague extérieure du roulement.

Après avoir constaté depuis plusieurs années, une forte exploitation de l'intensité du courant statorique pour déceler les défauts dans les machines tournantes, on en conclue que cette technique est très simple et facile d'intégration au système de la surveillance. Cette méthode se base sur l'apparition des fréquences caractéristiques du défaut dans le spectre du courant statorique.

La transformée en ondelettes (TO) est l'une des méthodes les plus sensibles aux défauts des machines tournantes.

L'analyse vibratoire est une technique d'investigation de plus en plus utilisée dans l'industrie dans le cadre de la maintenance des machines tournantes. Cependant, le champ

d'investigation offert par cette technique, ne couvre pas la totalité des défauts susceptibles d'affecter une machine tournante.

Par contre, les relations sont beaucoup plus directes liant les variations instantanées de l'intensité du courant statorique avec celles du couple et de la vitesse de rotation. Une étude d'investigation des défauts a été réalisée expérimentalement afin de les comparer entre les trois méthodes.

La méthode de la MCSA-FFT n'est pas en mesure de détecter tous les défauts de la machines asynchrones de façon définitive. L'excentricité statique pure ou dynamique pure est un défaut à détecter pour de nombreux moteurs. Par contre, les signatures de ces défauts mécaniques apparaissent dans le spectre du signal vibratoire. De plus, le problème de chevauchement entre quelques fréquences est considéré comme un obstacle pour prendre une décision finale sur l'état de la machine.

En termes de sensibilité et au début de la révélation de défaut, toutes les méthodes temps-fréquence étaient plus fiables et descriptive pour indiquer les symptômes du défaut. En raison de la capacité commune d'illustrer à la fois le temps et l'information de fréquence, ainsi que dotées d'un système de localisation temps-fréquence, il y a une amélioration de la sensibilité de ces techniques pour la détection précoce des défauts.

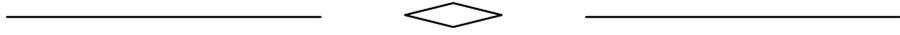
Parmi les méthodes temps-fréquence, la transformée en ondelettes discrètes, non seulement plus rapide grâce à l'outil informatique, mais aussi plus à même de révéler des symptômes de défaut à un stade plus précoce. Cette technique est très efficace et très sensible à tous les défauts étudiés dans cette thèse. La MCSA-DWT a l'avantage, également, d'être utiliser en régime non-stationnaire. Parmi les inconvénients de cette dernière, est la difficulté d'identifier d'une manière précise le type du défaut.

La mesure des vibrations est largement utilisée pour le diagnostic de l'état des machines tournantes; mais parfois la mesure directe peut être difficile et coûteuse dans les régions éloignées ou difficiles d'accès, dans des environnements difficiles et où il est onéreux d'installer des capteurs à proximité de la machine. En plus, la MVSA est sensible aux défauts mécaniques lorsque l'on la compare avec sa sensibilité aux défauts électriques. Par conséquent, des approches alternatives concernant cette technique ont pour objectif de la remplacer ou de l'améliorer.

Bien qu'il n'existe à ce jour aucun outil spécialement conçu à cet effet traitant directement et définitivement tous les défauts de la machine asynchrone. Les outils actuels de diagnostic essayent de combiner simultanément *facilité* et *précision*.

Par conséquent, ce travail suggère qu'une combinaison de MCSA-FFT, MCSA-DWT et la MVSA serait plus efficace au diagnostic des MAS.

Enfin, on peut conclure à travers cette étude qu'il existe d'autres moyens d'évaluation de la durée de vie, d'une manière pratique en faisant appel à l'outil combinatoire.



ANNEXES (A et B)

ANNEXE A

PATAMETRES DU MOTEUR DE L'EXPERIMENTATION

Puissance	3KW
Nombre de paires de pôles	2
Nombre d'encoches statoriques	36
Nombre de barres rotoriques	28
Moment d'inertie	$6.2 \times 10^{-3} \text{ Kg.m}^2$

PATAMETRES DU MOTEUR DE SIMULATION

Puissance	4 KW
Nombre de paires de pôles	2
Nombre d'encoches statoriques	36
Nombre de barres rotoriques	28
Epaisseur de l'entrefer	0.456438 mm
Rayon moyen de l'entrefer	63.2968 mm
Nombre de spires en série par phase	90
Longueur de la machine	0.1024128 m
Moment d'inertie	0.023 Kg.m^2
Résistance d'une phase statorique	3.5332 Ω
Résistance d'une barre rotorique	$68.34 \times 10^{-5} \Omega$
Inductance de fuite d'une barre rotorique	$0.28 \times 10^{-6} \text{ H}$
Résistance d'un segment d'anneau de court-circuit	$1.56 \times 10^{-6} \Omega$
Inductance de fuite d'un segment d'anneau de court-circuit	$0.28 \times 10^{-6} \text{ H}$

ANNEXE B

THEORIE ORIENTE A LA MODELISATION DE LA MAS

1. Le modèle multi-enroulements

Dans le cadre du diagnostic de la machine, les objectifs d'un modèle de simulation sont cependant différents, ce qui a motivé la mise au point de nouveaux modèles, spécifiquement dédiés à la simulation des défauts [FIL94], [SCHA99], [TOL96], [BES15-1], [BES16-4] mettant comme hypothèses simplificatrices les suivantes :

- L'effet d'extrémité des têtes des bobines est négligé ;
- Les pertes fer sont négligées et tous les effets d'ordre capacitif ;
- La saturation du circuit magnétique est négligée ;
- Le stator est considéré comme lisse et l'entrefer constant (l'effet des encoches est négligé) ;
- La linéarité du circuit magnétiques tout en négligeant les effets pelliculaires.

Un modèle dédié à la machine a pour nombreux objectifs, il nous amène à :

- ✓ Déterminer les performances de cette machine ;
- ✓ Etudier les paramètres de la machine ;
- ✓ Faire une correspondance entre la pratique et la théorie.
- ✓ Vérifier la réponse de la machine (sans et avec commande) ;
- ✓ Evaluer les interactions avec le système: onduleur, système de refroidissement, etc.
- ✓ Faire la conception de la machine ;
- ✓ Intégrer le aux cartes d'acquisitions pratiques ;
- ✓ Diagnostiquer la machine ;
- ✓ Faciliter les tâches (donc, gagner du temps).
- ✓ ...etc.

Donc la modélisation des machines électriques est une étape aussi bien pour le concepteur. Elle permet aussi d'observer et d'analyser des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques.

Dans notre étude, nous utiliserons la méthode des circuits électriques, pour simuler le fonctionnement de la machine asynchrone. En effet, le calcul de ces inductances par une décomposition en séries de Fourier nécessite une connaissance précise du bobinage de la machine.

La photographie de la figure (1) montre bien l'insertion réelle de bobinage (des enroulements) sur les encoches de la machine d'essai de type AZAZGA.



Figure 1. Photo de la disposition des enroulements sur les encoches statoriques.

Le type du rotor est à cage d'écureuil. La barre et la portion d'anneau sont représentés par des résistances et des inductances, R_b , R_e (ou R_a) et L_b , L_e (ou L_a) respectivement (figure 2).

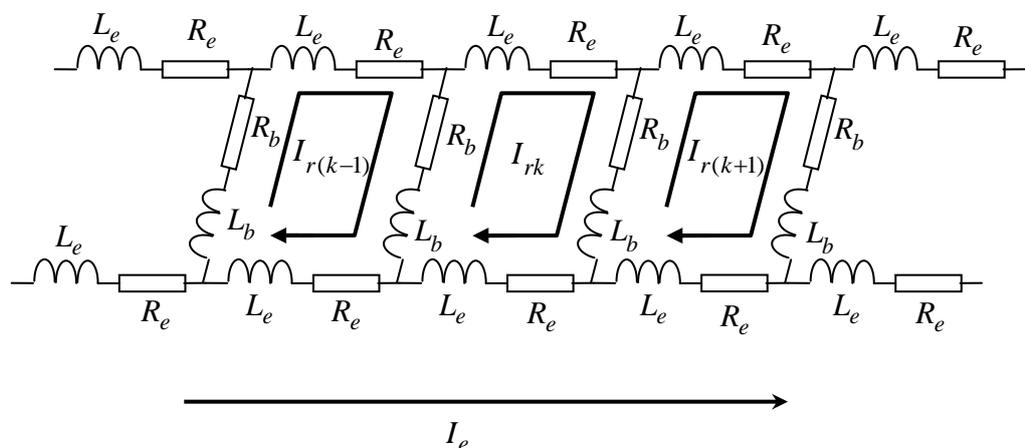


Figure 2. Circuit équivalent du rotor à cage d'écureuil.

R_b , L_b , R_e et L_e : représentent respectivement la résistance d'une barre, l'inductance de fuite d'une barre, la résistance d'une portion de l'anneau de court-circuit et l'inductance de fuite d'une portion d'anneau de CC.

Toutes les simulations qui se suivent seront effectuées par une autre machine asynchrone similaire (presque) de l'expérimentation.

2. Calcul avec prise en compte des harmoniques d'espace (notion de la fonction d'enroulement)

L'approche de la fonction d'enroulement (FE) a été en premier lieu appliquée pour considérer les harmoniques d'espaces de l'induction magnétique, donc pour un modèle à distribution non sinusoïdale. Cette approche prend en considération la géométrie réelle de la machine ainsi que la distribution de l'enroulement, ce qui permet donc le calcul des inductances en tenant compte de toutes les harmoniques d'espaces.

[BES07] et [HAD08] ont développé ce modèle analytique dédié au diagnostic des machines asynchrones. Ce modèle est adéquat pour clarifier tout changement pointillé sur le comportement ou les paramètres de la machine. Les auteurs [BES07] et [HAD08] ont été basé de leurs calculs sur la transformée en série de Fourier d'une distribution réelle des enroulements ou de la fonction d'enroulement (FE).

On peut illustrer aussi le contour 'abcd' en trois dimensions par la figure (3).

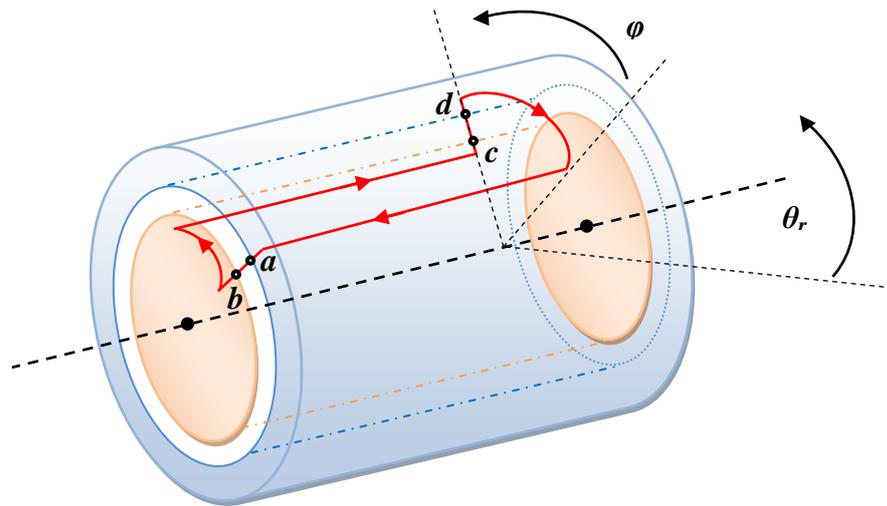


Figure 3. Schéma de contour 'abcd' pour une MAS en 3D.

3. Inductances mutuelles entre une phase 'q' et une maille k (état sain)

L'inductance mutuelle entre la $q^{\text{ème}}$ phase et la $k^{\text{ème}}$ maille est obtenue à l'aide de l'intégrale suivante :

$$L_{kq} = L_{sr} = \frac{\mu_0 r l}{g_0} \int_0^{2\pi} n_{rk}(\varphi', \theta_r) N_q(\varphi') d\varphi' \quad (1)$$

Après transformation dans un repère lié au rotor pour la fonction d'enroulement d'une phase 'q' du stator, on obtient :

$$N_q(\varphi') = \frac{2N_t}{p\pi} \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h} \cos[h.p(\theta_r + \varphi' - \theta_0 - q.\frac{2\pi}{3p})] \quad (2)$$

L'inductance mutuelle stator-rotor est donc :

$$L_{sr} = M_{sr} = \sum_{h=1}^{\infty} M_h \cos \left[hp \left(\theta_r - \theta_0 + (j - \frac{1}{2})\alpha_r - q \frac{2\pi}{3p} \right) \right] \quad (3)$$

avec,

$$M_h = \frac{4\mu_0 r l}{g_0} \frac{N_t}{P^2 \pi} \frac{K_{bh}}{h^2} \sin\left(\frac{hp\alpha_r}{2}\right)$$

4. Calcul des inductances avec rotor excentrique

La figure (4) illustre une machine avec rotor excentrique, où R et r représente respectivement les rayons du stator et du rotor. L'entrefer moyen est représenté par un cercle en ligne discontinue. O et O' représentent respectivement le centre du stator et du rotor, les angles φ et φ' représentent respectivement la position d'un point dans un référentiel lié au stator et au rotor, θ_r donne la position du rotor et δ_g représente le décalage entre les deux centres [BES07].

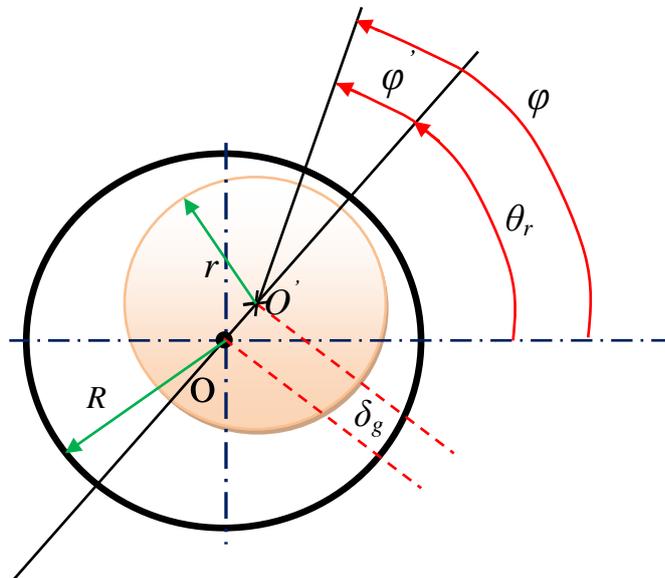


Figure 4. Entrefer de la machine avec rotor excentrique.

La variation de la longueur de l'entrefer entraîne des variations de la densité du flux dans l'entrefer. Les enroulements statoriques sont électriquement affectés, et les performances de la machine sont dégradées. La modélisation prend un autre degré de complexité en introduisant la variation de l'épaisseur d'entrefer $g(\varphi, \theta_r)$ lors de la modélisation. La géométrie des encoches du stator et du rotor détermine la formule de la perméance d'entrefer [BRU97].

Exemple : On considère l'effet des encoches statoriques seulement, dans ce cas le rotor est considéré lisse comme la représente la figure (5), et la formule de la perméance est donnée par [BRU97] :

$$P_{h_s}(\theta_s) = P_0 + \sum_{h_s=1}^{+\infty} P_{h_s} \cdot \cos(h_s \cdot N_{sp} \cdot \theta_s) \quad (4)$$

Tel que, θ_s et N_{sp} sont la position angulaire par rapport à l'axe de référence statorique et le nombre d'encoche par paire de pôles au stator.

avec,

$$P_0 = \mu_0 \left(\frac{1}{g_0 + H_s} \right) \cdot \left(\frac{1 + H_s}{g_0} \right) \quad (5)$$

$$P_{h_s} = 2\mu_0 \left(\frac{H_s}{g_0 \cdot (g_0 + H_s)} \right) \cdot \left(\frac{\sin(h_s \cdot r_d^s \cdot \pi)}{h_s \pi} \right) \quad (6)$$

Et r_d^s c'est le rapport de denture statorique donné par :

$$r_d^s = \frac{L_d^s}{L_{enc}^s + L_d^s} \quad (7)$$

L_d^s et L_{enc}^s sont les largeurs respectivement d'une dent statorique et d'une encoche.

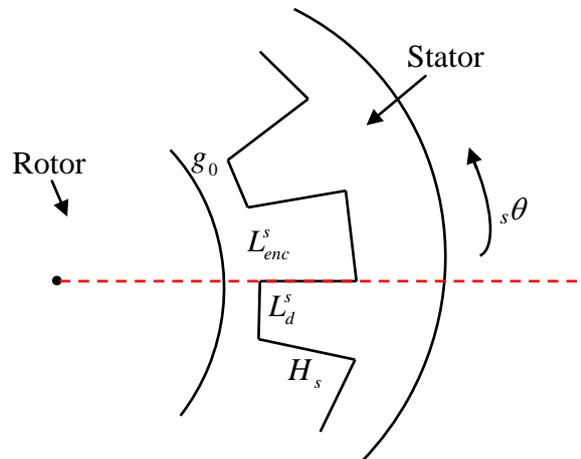


Figure 5. Topologie des dents statoriques.

Les encoches ont plusieurs formes, trapézoïdales, semi-trapézoïdales, rectangulaires, fermés, semi-fermés, ...etc. La figure (6) illustre deux types des encoches qui portent un faisceau de conducteur.

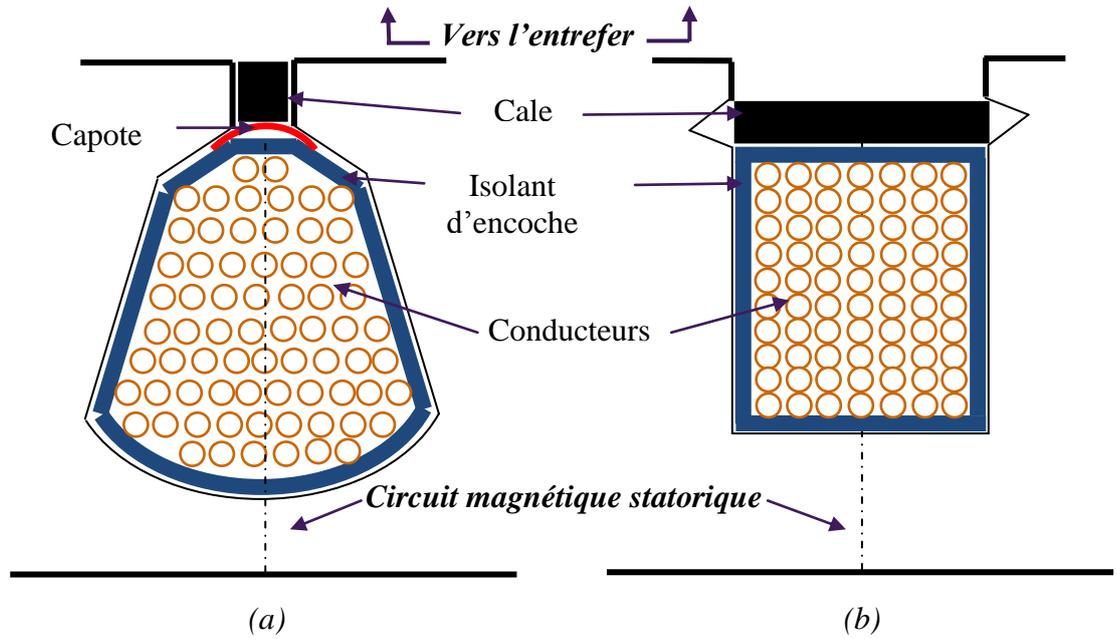


Figure 6. Encoche à une seule couche, (a) : encoche semi-trapézoidale, (b) : encoche rectangulaire.

La fonction d'entrefer dans le cas d'une excentricité, peut prendre l'expression suivante [FRO68] :

$$g(\varphi) = g_0 \cdot \left(1 - \delta_s \cos \varphi - \delta_d \cos(\varphi - \theta_r) \right) \quad (8)$$

Le calcul de l'inverse de cette fonction est une opération exigée afin de reformuler des différentes inductances.

$$g^{-1}(\varphi, \theta_r) = \frac{1}{g_0 \cdot (1 - \delta_s \cos \varphi - \delta_d \cos(\varphi - \theta_r))} \quad (9)$$

4.1 Première approximation de la perméance

Pour ceci, on définit l'approximation confirmée par M. Bradford [BRA68] et autres comme [HEL69], [JOR81], [FRÜ82] et [BRU97]:

$$g^{-1}(\varphi, \theta_r) = \frac{1}{g_0} \cdot [1 + \delta_s \cos \varphi + \delta_d \cos(\varphi - \theta_r)] \quad (10)$$

[JOR81] a développé une autre approximation de la perméance par une série de polynômes de Taylor.

4.2 Deuxième approximation de la perméance

L'inverse de la fonction d'entrefer de l'équation (9) s'écrit [CAM86], [FAI02], [NAN02]:

$$g^{-1}(\varphi, \theta_r) = \frac{1}{g_0 \cdot (1 - \delta \cos(\varphi - \theta_r))} \quad (11)$$

avec,

$$\delta = \sqrt{\delta_s^2 + \delta_d^2 + 2 \cdot \delta_s \delta_d \cos(\theta_r')} \quad (12)$$

et

$$\theta_r' = \arctan\left(\frac{\delta_d \sin(\theta_r)}{\delta_s + \delta_d \cos(\theta_r)}\right) \quad (13)$$

Cependant, une résolution analytique doit impérativement faire appel à une expression approximative en effectuant un développement en série de Fourier.

Nous avons constaté qu'un parfait résultat sera obtenu en s'arrêtant au troisième terme, tel que :

$$g^{-1}(\theta, \theta_r) = P_0 + P_1 \cos(\theta - \theta_r') + P_2 \cos(2 \cdot (\theta - \theta_r')) \quad (14)$$

avec,

$$P_0 = \frac{1}{g_0 \sqrt{1 - \delta^2}}, \quad (15)$$

$$P_1 = 2 \cdot P_0 \cdot \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \delta^2}}{\delta} \right), \quad (16)$$

$$P_2 = 2 \cdot P_0 \cdot \left(\frac{1 - \sqrt{1 - \delta^2}}{\delta} \right)^2 \quad (17)$$

Malgré que cette approche soit la plus proche à la fonction réelle de la perméance, cependant, le problème réside *seulement* à la simulation de l'excentricité *mixte* (vitesse, courant, ...etc.) où, le dénominateur contient une complexité de superposition de l'angle ' θ_r '.

4.3 Troisième approximation de la perméance

Le développement en série de Fourier de donne la formule suivante [FRO68], [FRO69], [JOR81], [FRÜ82]:

$$g^{-1}(\beta) = \frac{1}{g_0} (\Lambda_0 + \Lambda_1 \cos \beta + \dots) \quad (18)$$

avec,

$$\Lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \delta^2}}, \quad \Lambda_1 = 2 \frac{1 - \sqrt{1 - \delta^2}}{\delta \sqrt{1 - \delta^2}} \quad (19)$$

et

δ est définit le type d'excentration, statique ($\delta = \delta_s$) ou dynamique ($\delta = \delta_d$).

Pour des valeurs de $\delta < 0.7$, les amplitudes des termes A_i d'ordre supérieur par rapport aux deux premiers termes sont négligeables, par conséquent nous ne tenons compte que des deux premiers termes. Pour la valeur limite ($\delta < 0.7$), les deux premiers termes peuvent être approximés comme suit :

$$\Lambda_0 \cong \frac{1}{1 - \delta^2 / 2} \quad , \quad \Lambda_1 = \frac{\delta}{1 - \delta^2 / 2} \quad (20)$$

Plusieurs auteurs ont exploité ces formules afin d'élaborer un modèle adéquat dédié au diagnostic [CAM86], [TOL96], [DOR97], [NAN02], [FAI02], [BES07], [BES15-1].

Après une étude comparative entre les formules citées, et d'après un calcul un peu long par toutes les approximations de la perméance orienté aux inductances à un état défectueux de la MAS ; Nous avons décidé de présenter dans ce qui suit le calcul qui a été réalisé tout en se basant sur la *première approximation de la perméance*.

5. Calcul des inductances de la MAS à l'état d'excentricité statique (ES : $\delta_d=0$)

5.1. La fonction d'enroulement modifiée statorique [BES07]

En suivant les étapes de calcul indiqué à la référence [BES07], on trouve :

Cas numéro 1 : Le nombre de paires de pôles est égal à 1 ($p=1$).

$$M(\varphi, \theta_r) = \frac{2N_t}{p\pi} \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h} \cdot \cos \left[hp \left(\varphi - \theta_0 - q \frac{2\pi}{3p} \right) \right] - \delta_s \frac{K_{b1} \cdot N_t}{p\pi} \cos \left(\varphi + \theta_0 + q \frac{2\pi}{3p} \right) \quad (21)$$

Cas numéro 2 : Le nombre de paires de pôles est supérieur à 1 ($p > 1$).

$$M(\varphi, \theta_r) = \frac{2N_t}{p\pi} \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h} \cdot \cos \left[hp \left(\varphi - \theta_0 - q \frac{2\pi}{3p} \right) \right] \quad (22)$$

5.2. La fonction d'enroulement modifiée rotorique

De la même façon, on trouve la fonction de distribution rotorique comme suit:

$$n_{rk}(\varphi') = \frac{\alpha_r}{2\pi} + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(m \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[m \left(\varphi' - (k - \frac{1}{2}) \alpha_r \right) \right] \quad (23)$$

D'après le calcul nous présentons l'approche de la fonction d'enroulement modifiée (AFEM) comme :

$$M_{rk}(\varphi') = \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(m \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[m \left(\varphi' - (k - \frac{1}{2}) \alpha_r \right) \right] - \frac{\delta_s}{\pi} \sin \left(\frac{\alpha_r}{2} \right) \cos \left[\theta_r + (k - \frac{1}{2}) \alpha_r \right] \quad (24)$$

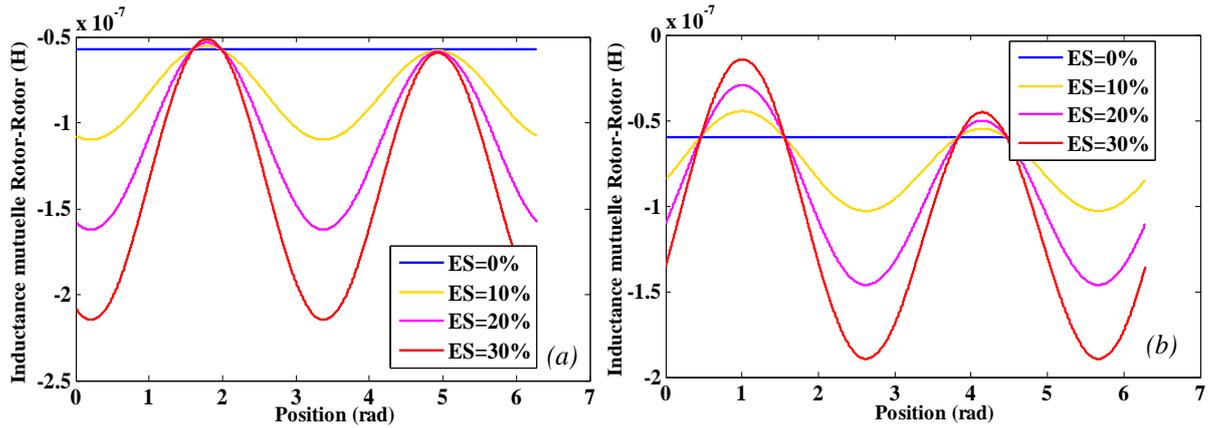


Figure 7. L'évolution des mutuelles rotoriques en fonction de δ_s , (a) : L_{r27r28} et (b) : L_{r1r5} .

L'inductance mutuelle dans ce cas est donnée par :

$$\begin{aligned}
 L_{sr} = & \frac{\mu_0 r L}{g_0} \left(\frac{4N_t}{\pi p^2} \right) \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h^2} \sin(hp \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[hp(k - \frac{1}{2})\alpha_r + hp(\theta_r - \theta_0 - q \frac{2\pi}{3p}) \right] \\
 & + \frac{\mu_0 r L}{g_0} \delta_s \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h(hp+1)} \sin((hp+1) \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[(hp+1)(k - \frac{1}{2})\alpha_r + hp(\theta_r - \theta_0 + q \frac{2\pi}{3p}) + \theta_r \right] \\
 & + \frac{\mu_0 r L}{g_0} \delta_s \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h(hp-1)} \sin((hp-1) \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[(hp-1)(k - \frac{1}{2})\alpha_r + hp(\theta_r - \theta_0 + q \frac{2\pi}{3p}) - \theta_r \right]
 \end{aligned} \tag{25}$$

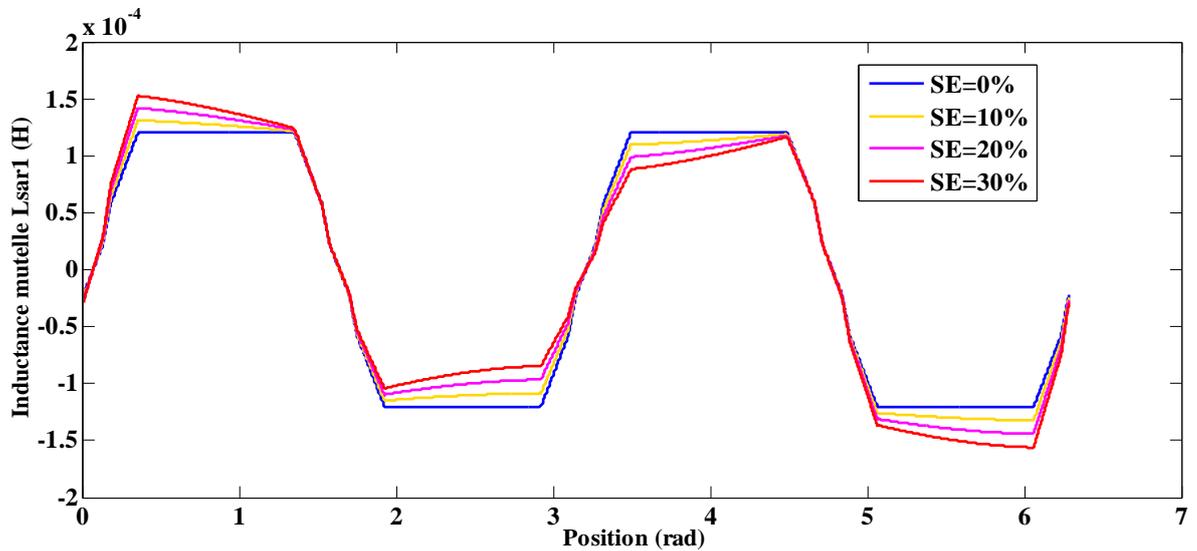


Figure 8. Evolution des inductances mutuelles stator-rotor (L_{sar1}).

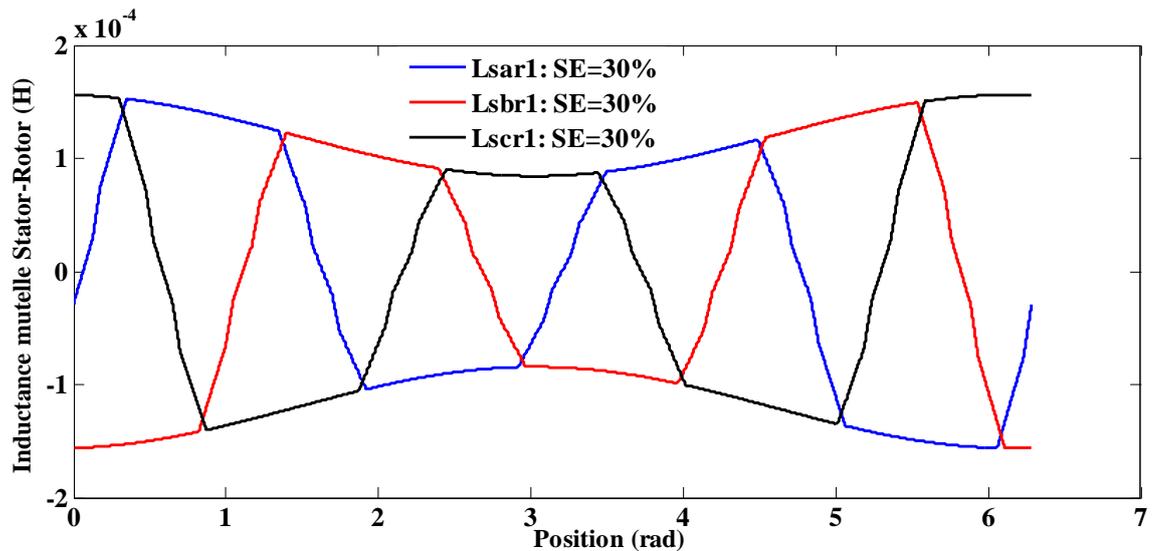


Figure 9. Les inductances mutuelles stator-rotor pour les phases 'a', 'b' et 'c', avec la maille '1' pour $\delta_s = 30\%$.

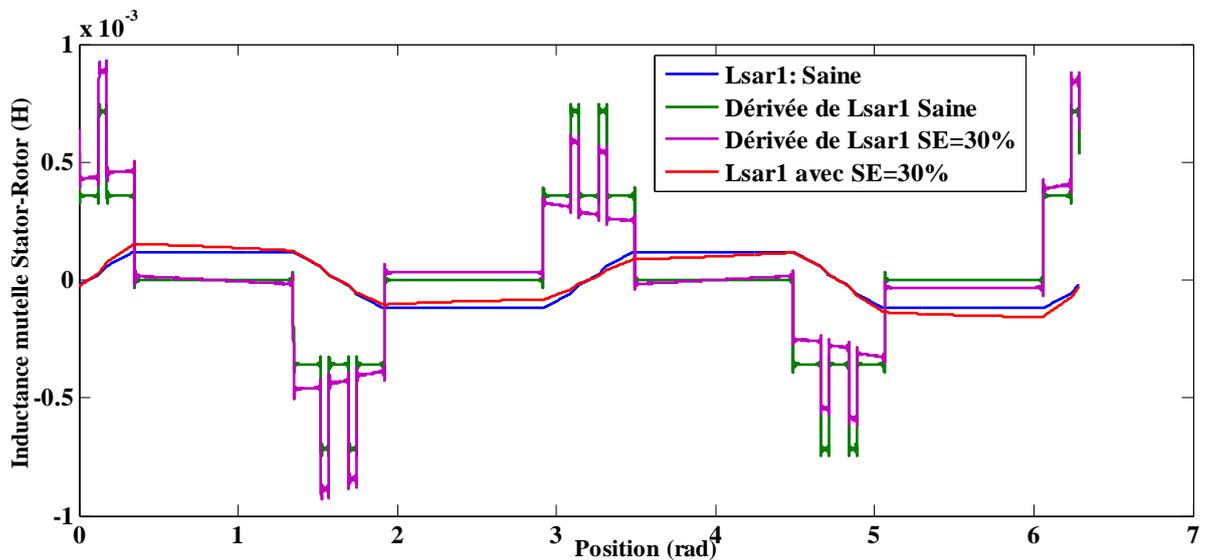


Figure 10. Evolution de la dérivée de l'inductance mutuelle L_{sar1} pour $\delta_s = 30\%$.

La règle d'existence (d'apparition) des *RSHs* ou non selon l'équation (II.6) est vérifiée pour une ES seule. En outre, nous avons remarqué que ce défaut se traduit par un déplacement des *RSHs* en fonction du degré d'ES (δ_s). La figure (11) illustre le spectre du courant et l'évolution de *L-PSH* pour différente valeur de δ_s .

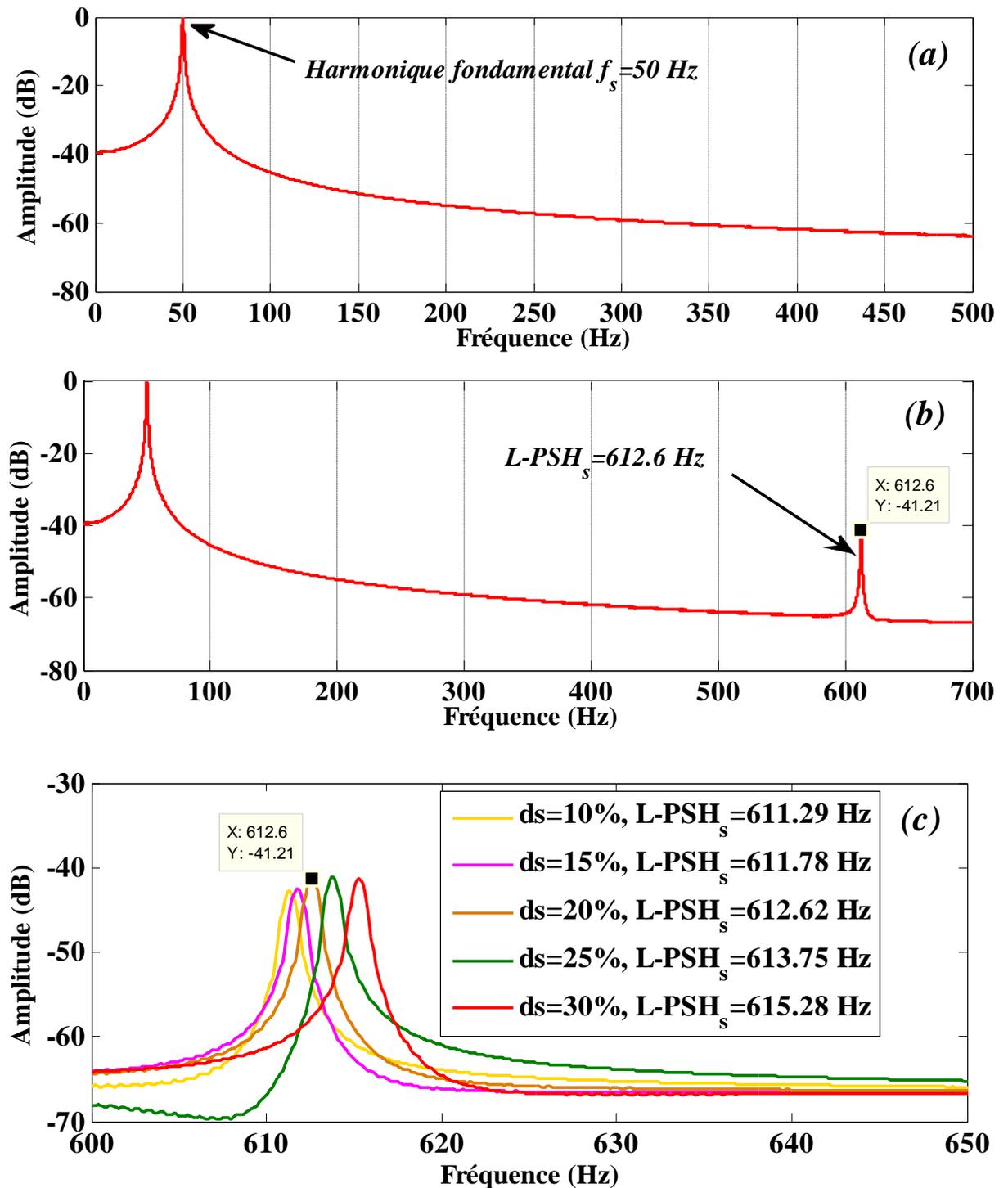


Figure 11. Le spectre du courant statorique avec une excentricité de $\delta_s=20\%$; (a) : Bande de 0-500Hz, (b) : Bande de 0-700Hz, (c) : Evolution de $L\text{-PSH}_s$ en fonction de δ_s .

6. Calcul des inductances de la MAS à l'état d'excentricité dynamique (ED : $\delta_s=0$)

La méthodologie de calcul se base sur l'intégration de la perméance et après, on recalcule les inductances de chacune avec sa formule correspondante. La fonction d'enroulement (FE) sera modifiée automatiquement dû à la variation de l'entrefer (la

perméance). L'étape de calcul des fonctions des enroulements du stator ou du rotor est indispensable. En suivant les mêmes procédures de travail on trouve les fonctions d'enroulement modifiées statorique et rotorique selon le nombre de paires de pôles.

6.1. La fonction d'enroulement modifiée statorique

Les démarches de calculs étant analogues à celles de l'excentration statique, on arrive aux relations suivantes :

Cas numéro 1 : Le nombre de paires de pôles est égal à 1 ($p=1$).

$$M(\varphi, \theta_r) = \frac{2N_t}{p\pi} \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h} \cdot \cos \left[hp \left(\varphi - \theta_0 - q \frac{2\pi}{3p} \right) \right] - \delta_d \frac{K_{b1} \cdot N_t}{p\pi} \cos \left(\varphi + \theta_0 + q \frac{2\pi}{3p} \right) \quad (26)$$

Cas numéro 2 : Le nombre de paires de pôles est supérieur à 1 ($p > 1$).

$$M(\varphi, \theta_r) = \frac{2N_t}{p\pi} \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h} \cdot \cos \left[hp \left(\varphi - \theta_0 - q \frac{2\pi}{3p} \right) \right] \quad (27)$$

6.2. La fonction d'enroulement modifiée rotorique

La fonction de distribution rotorique est donnée par:

$$n_{rk}(\varphi') = \frac{\alpha_r}{2\pi} + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(m \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[m \left(\varphi' - (k - \frac{1}{2}) \alpha_r \right) \right] \quad (28)$$

et l'AFEM se trouve comme suit :

$$M_{rk}(\varphi') = \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin(m \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[m \left(\varphi' - (k - \frac{1}{2}) \alpha_r \right) \right] - \frac{\delta_d}{\pi} \sin \left(\frac{\alpha_r}{2} \right) \cos \left[\theta_r + (k - \frac{1}{2}) \alpha_r \right] \quad (29)$$

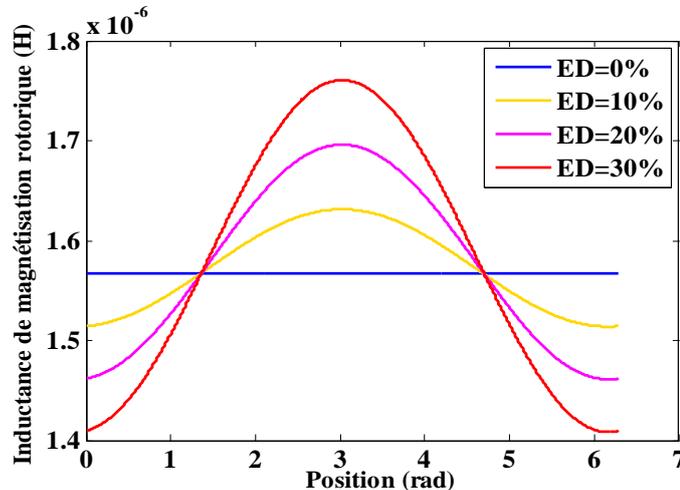


Figure 12. L'inductance de magnétisation d'une maille rotorique (L_{rm}).

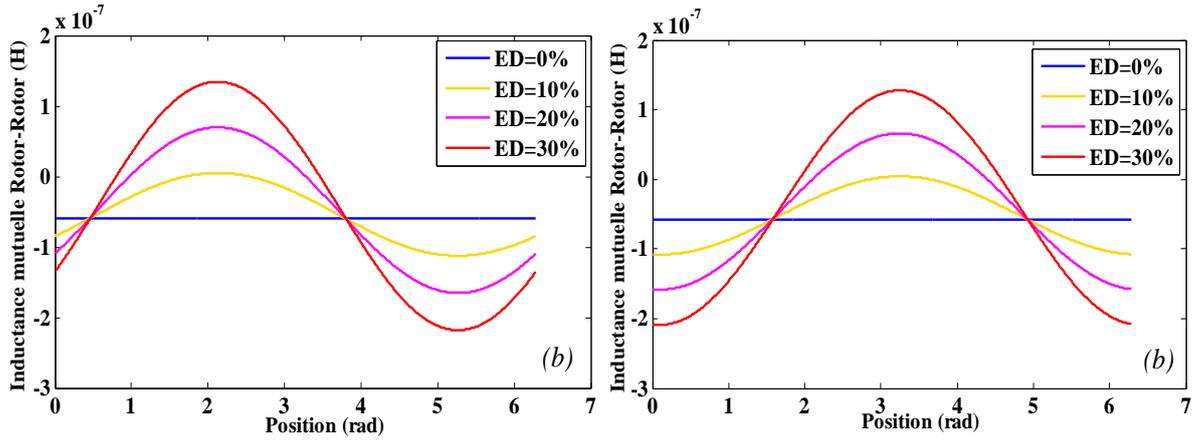


Figure 13. L'évolution des mutuelles rotoriques en fonction de δ_d , (a) : L_{r27r28} et (b) : L_{r1r5} .

On écrit l'inductance mutuelle sous une excentricité dynamique comme suit :

$$\begin{aligned}
 L_{sr} = & \frac{\mu_0 r L}{g_0} \left(\frac{4N_t}{\pi p^2} \right) \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h^2} \sin(hp \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[hp(k - \frac{1}{2})\alpha_r + hp(\theta_r - \theta_0 - q \frac{2\pi}{3p}) \right] \\
 + & \frac{\mu_0 r L}{g_0} \delta_d \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h(hp+1)} \sin((hp+1) \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[(hp+1)(k - \frac{1}{2})\alpha_r + hp(\theta_r - \theta_0 + q \frac{2\pi}{3p}) \right] \\
 + & \frac{\mu_0 r L}{g_0} \delta_d \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h(hp-1)} \sin((hp-1) \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[(hp-1)(k - \frac{1}{2})\alpha_r + hp(\theta_r - \theta_0 + q \frac{2\pi}{3p}) \right]
 \end{aligned} \tag{30}$$

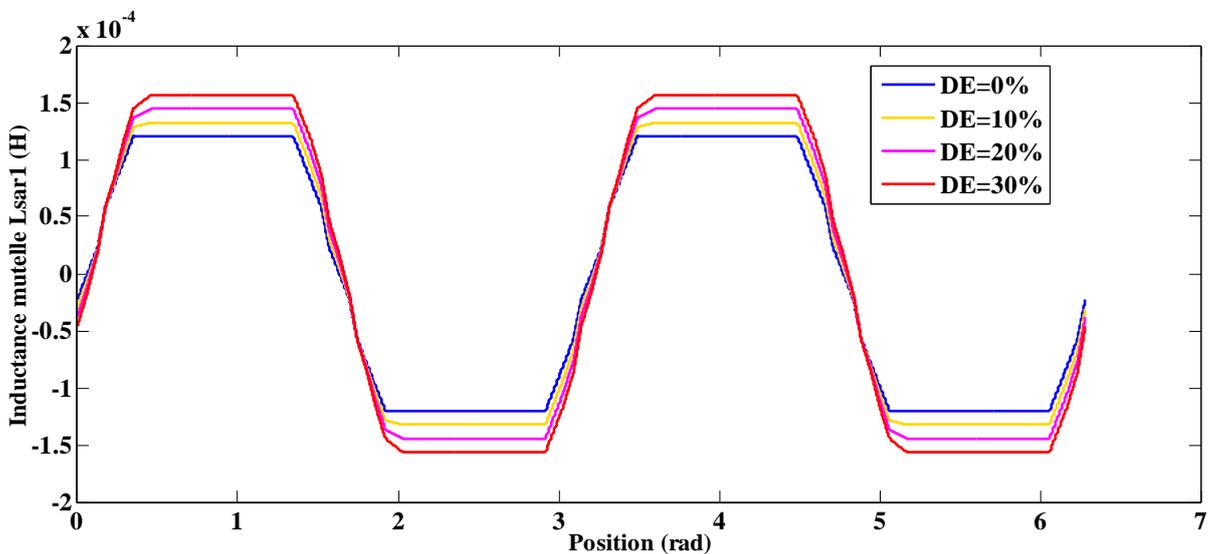


Figure 14. Evolution des inductances mutuelles stator-rotor (L_{sar1}).

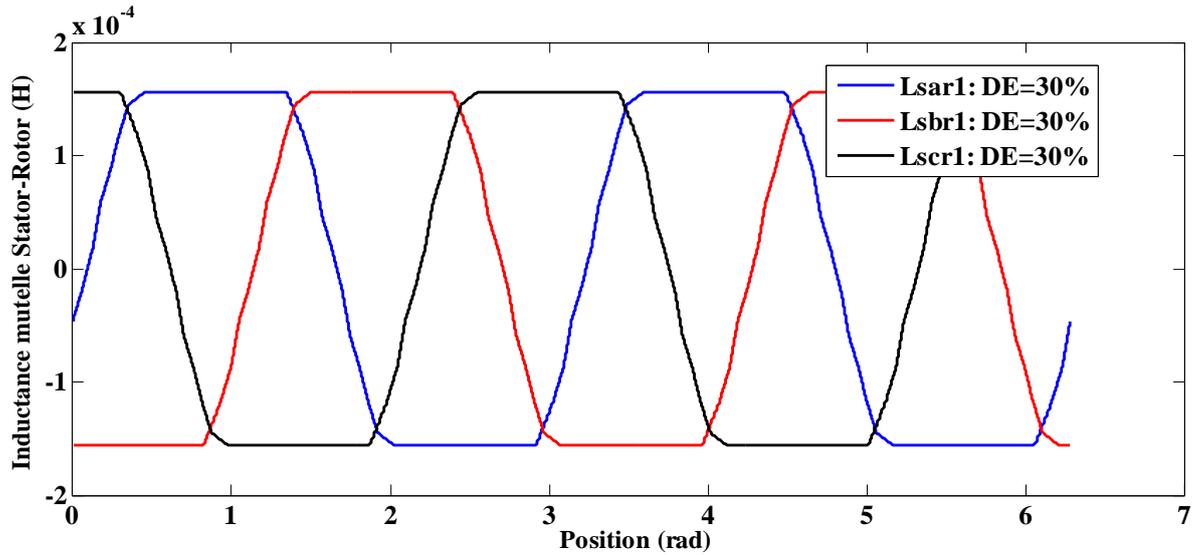


Figure 15. Les inductances mutuelles stator-rotor pour les phases 'a', 'b' et 'c', avec la maille '1' pour $\delta_d=30\%$.

La figure (16) montre bien l'évolution de la première dérivée de l'inductance mutuelle stator-rotor avec δ_d .

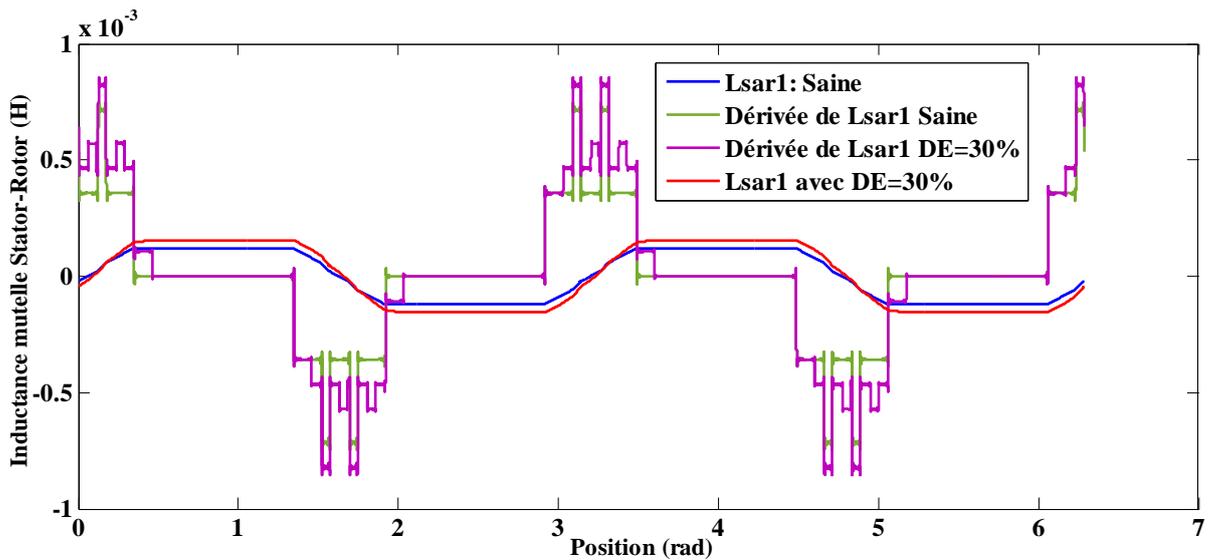


Figure 16. Evolution de la dérivée de l'inductance mutuelle L_{sar1} pour $\delta_d=30\%$.

La vérification de quelques fréquences qui caractérisent ce défaut a été effectuée pour une bande fréquentielle de 600 Hz à 3000 Hz (figure 17). On note que les fréquences du défaut sont résumées dans le tableau (1) ne sont pas apparaît pour une ED seule ; cela explique la règle proposée par Nandi et al. [NAN11].

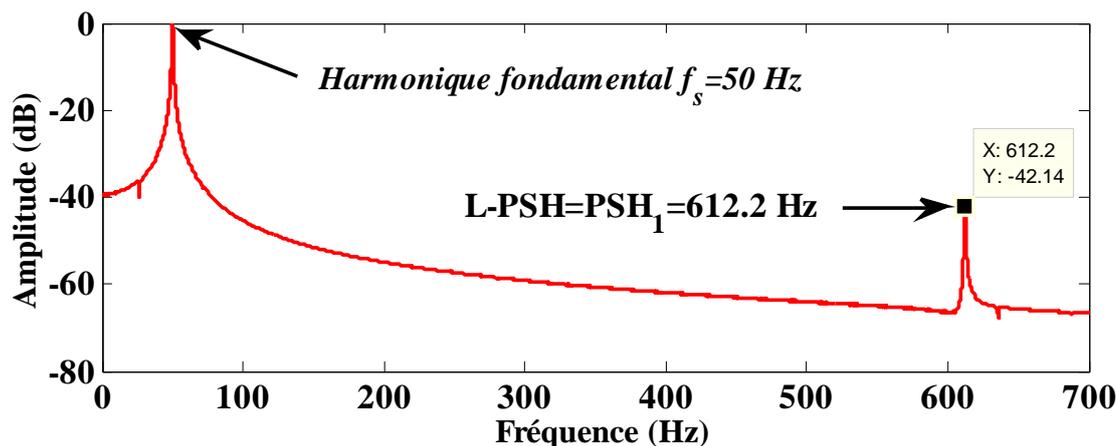


Figure 17. Le spectre du courant statorique avec une excentricité de $\delta_d=20\%$.

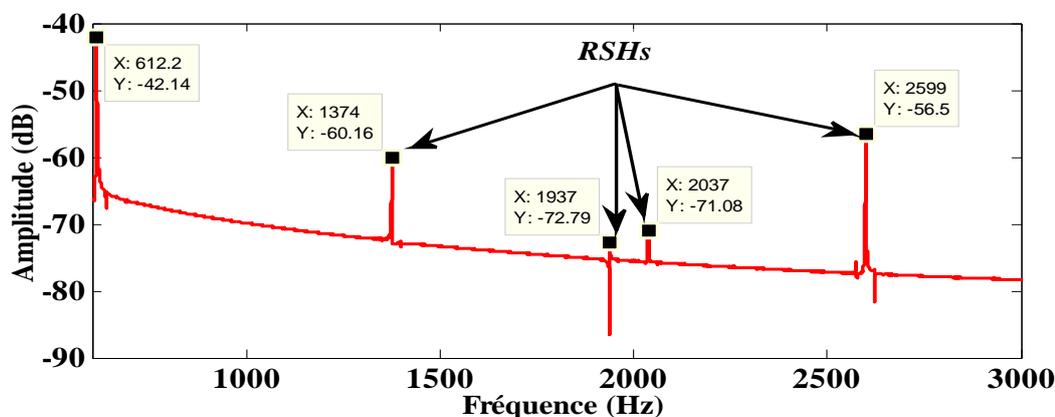


Figure 16. Le spectre du courant statorique avec une excentricité de $\delta_d=20\%$: Bande de 600-3000Hz.

Un indice important concernant le mouvement des *RSHs* dû aux différents degrés d'ED ; la figure (17) montre ces déplacements (évolutions) dû à l'excentricité dynamique. Cette dernière est la première cause qui fait le changement du glissement.

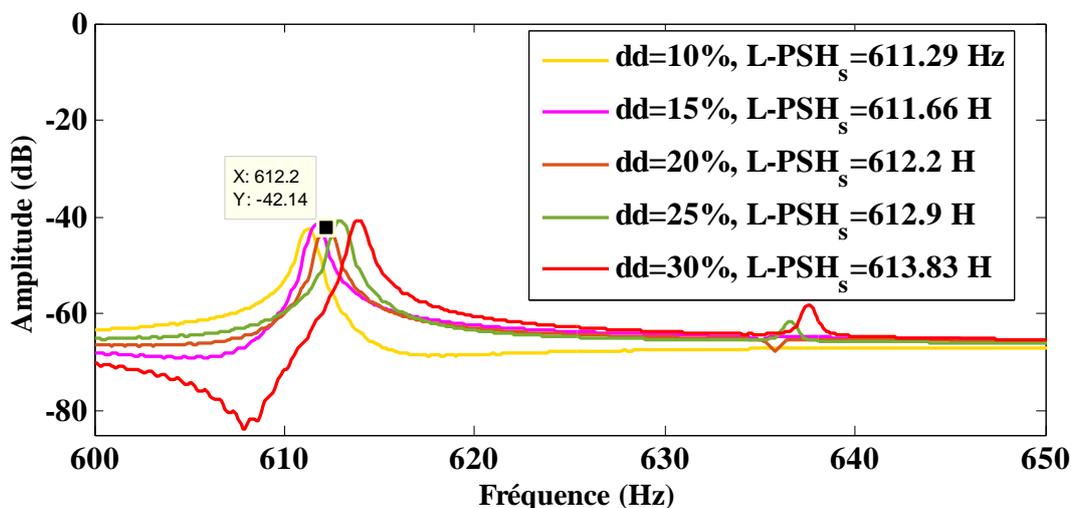


Figure 18. Evolution de *L-PSH* pour différentes valeurs du degré d'excentricité dynamique.

Tableau 1. Fréquences caractéristiques du défaut d'excentricité dynamique.

$f_{exc-dyn} = \left[\left(\frac{kn_b \pm n_d}{p} \right) (1-g) \pm n_{os} \right] \cdot f_s$ avec, $k=1$ et $n_{os}=1$	Harmonique
Pour $n_d=1$	Introuvable
Pour $n_d=2$	Introuvable
Pour $n_d=3$	Introuvable
Pour $n_d=4$	Introuvable

En essayant maintenant de vérifier l'existence des fréquences caractéristiques de l'excentricité dynamique pour un nombre de barres est égal à 27 ($n_b=27$). D'après la formule (II.6), la valeur du nombre de barres rotoriques n'est pas vérifiées et en conjonction avec la formule (II.7), on trouve :

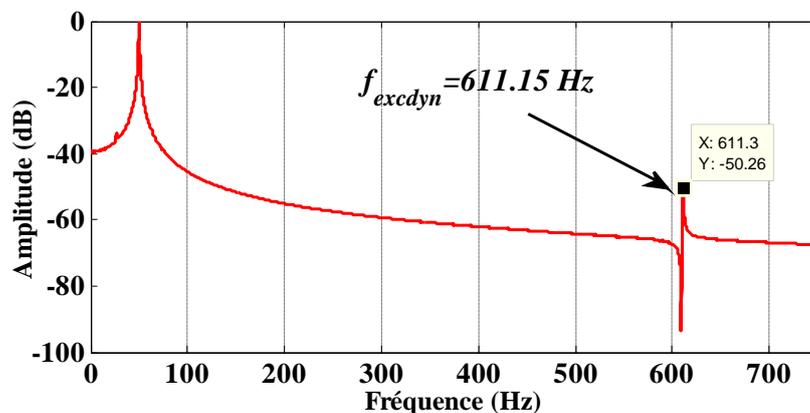
$$n_b = 2 \cdot p \cdot [3 \cdot (m \pm n) \pm r] = 27 = 2 \cdot (2) \cdot [3 \cdot (2) + 1] - 1 = 27$$

Donc, et selon la règle d'existence des harmoniques qui caractérisent le défaut d'ED ; les fréquences de la formules (I.7) seront existées. La simulation nous aide à vérifier ces composants fréquentiels sans considérer les changements des paramètres de la machines, mais par un autre nombre de barres qui introduit aux équations de notre modèle.

La figure (19) montre clairement l'apparition de la fréquence caractéristique du défaut d'ED au spectre du courant pour un glissement $s=0.055$, cette fréquence est calculée comme suit :

$$f_{exc-dyn} = \left[\frac{k(n_b \pm n_d)}{p} (1-s) \pm n_{os} \right] \cdot f_s = \left[\frac{1 \cdot (27+1)}{2} (1-0.055) - 1 \right] \cdot 50 = 611.15 \text{ Hz}$$

Il est clair aussi que la formule (I.7) orientée aux calculs des *PSHs* n'est pas vérifiée. Dans ce cas, on dit que les *PSHs* sont introuvables [NAN11]. Réellement, le spectre de la figure (19) ne contient que les fréquences caractéristiques du défaut d'excentricité dynamique.

**Figure 19.** Spectre du courant statorique pour un nombre de barres « $n_b=27$ et $\delta_d=20\%$ ».

7. Inductance mutuelle de la MAS sous un défaut d'excentricité mixte (EM)

Comme l'ES et l'ED ne se trouvent pas seules en pratique ; ce qui nous oblige de parler sur l'existence des deux au même temps ; c'est l'excentricité mixte (EM). Ceux qui nous disent aujourd'hui que tout cela sera un défi pour nous tous, notamment lors du travail au diagnostic dans les laboratoires.

Avant d'aborder ce problème (EM), il faut passer sur les notions des fonctions d'enroulement (bobinage) modifiées et de rappeler le calcul des inductances d'une MAS parfaitement asymétrique.

L'expression usuelle de la fonction perméance offre dans ces conditions la possibilité de calcul des inductances de la machine. Ces inductances de la machine excentrée statiquement et dynamiquement du point de vu de la variation de l'entrefer permettent de caractériser les signatures de défaut dans les courants statoriques.

En disposant la fonction de la perméance, nous pouvons, donc, achever le calcul des inductances d'une machine asynchrone. Pour déterminer les inductances statoriques et rotorique, il suffit de suivre le même parcours de calcul. Les inductances obtenues seront permettre de simuler et caractériser les fréquences des harmoniques en présence de l'EM. Ainsi après développements, on aboutit à l'expression de l'inductance mutuelle stator-rotor (L_{sr}), qui s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned}
L_{sr} = & \frac{\mu_0 r L}{g_0} \left(\frac{4N_t}{\pi p^2} \right) \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h^2} \sin(hp \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[hp(k - \frac{1}{2})\alpha_r + hp(\theta_r - \theta_0 - q \frac{2\pi}{3p}) \right] \\
+ & \frac{\mu_0 r L}{g_0} \delta_s \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h(hp+1)} \sin((hp+1) \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[(hp+1)(k - \frac{1}{2})\alpha_r + (hp+1)(\theta_r - \theta_0 + q \frac{2\pi}{3p}) \right] \\
+ & \frac{\mu_0 r L}{g_0} \delta_s \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h(hp-1)} \sin((hp-1) \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[(hp-1)(k - \frac{1}{2})\alpha_r + (hp-1)(\theta_r - \theta_0 + q \frac{2\pi}{3p}) \right] \\
+ & \frac{\mu_0 r L}{g_0} \delta_d \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h(hp+1)} \sin((hp+1) \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[(hp+1)(k - \frac{1}{2})\alpha_r + hp(\theta_r - \theta_0 + q \frac{2\pi}{3p}) \right] \\
+ & \frac{\mu_0 r L}{g_0} \delta_d \left(\frac{2N_t}{\pi p} \right) \sum_{h=1}^{\infty} \frac{K_{bh}}{h(hp-1)} \sin((hp-1) \frac{\alpha_r}{2}) \cos \left[(hp-1)(k - \frac{1}{2})\alpha_r + hp(\theta_r - \theta_0 + q \frac{2\pi}{3p}) \right] \quad (31)
\end{aligned}$$

On voit dans la figure (20) l'allure des différentes inductances mutuelles stator-rotor avec ses premières dérivées et leurs évolutions en fonction des degrés d'excentricités combinés.

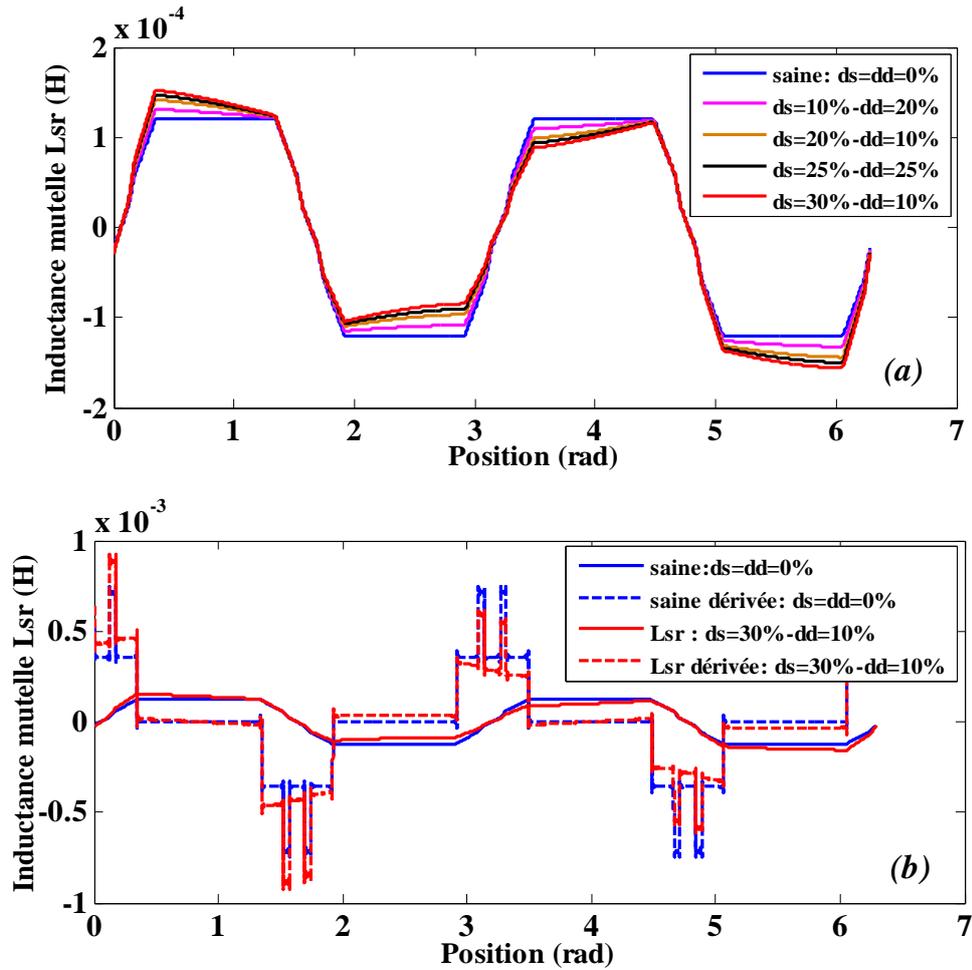


Figure 20. Evolution de l'inductance mutuelle L_{sr1} ; (a) : $L_{sr1}=f(\delta_s, \delta_d)$, (b) : Dérivée de L_{sr1} .

Le spectre du courant statorique représenté dans la figure (21) montre bien la validité du calcul des inductances concernant le défaut d'EM. Les valeurs théoriques correspondant à l'excentricité mixte de la formule (I.9) ont été vérifiées par une série de fréquences de $|f_s \pm kf_r|$. La figure (22) représente le spectre du courant et précisément les bandes latérales autour des $RSHs$; ceux-ci peuvent représenter un indicateur important pour la détection du défaut d'EM. Il faut signaler aussi que cet indicateur n'est pas le seul utilisé pour la détection de l'excentricité aux machines asynchrones.

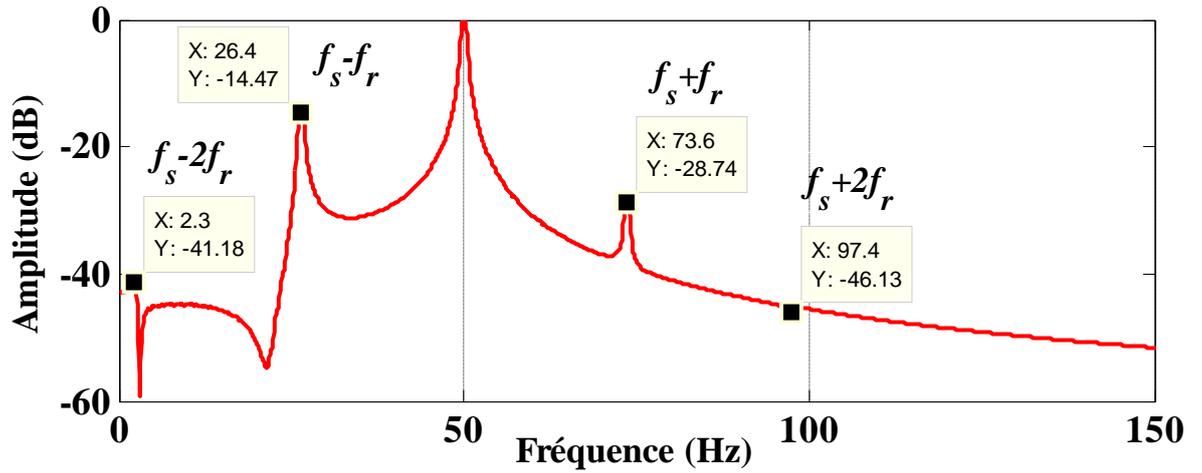


Figure 21. Le spectre du courant statorique autour du fondamental pour $\delta_s=15\%$ et $\delta_d=15\%$.

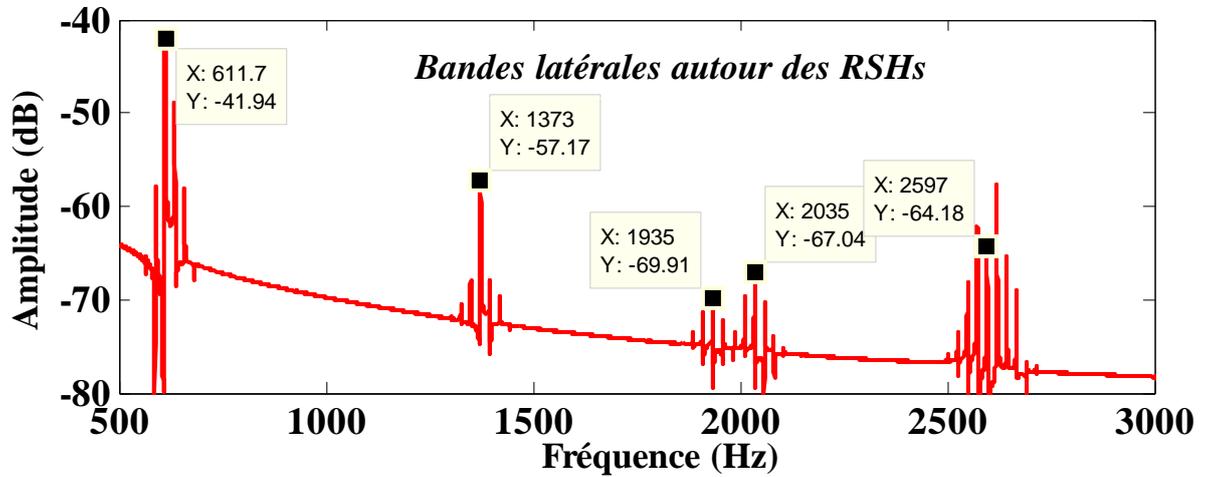
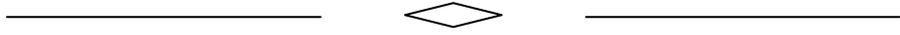


Figure 22. Bandes latérales autour des *RSHs* sous une excentricité mixte ($\delta_s=15\%$ et $\delta_d=15\%$).

Le tableau (2) résume les valeurs des fréquences caractéristiques dû à l'excentricité mixte.

Tableau 2. Fréquences caractéristiques du défaut d'excentricité mixte.

$f_{exc-mix} = f_s \pm kf_r $ pour, $k=1$ et $k=2$ $s=0.054, f_s=50$ Hz	Harmonique par le calcul	Harmonique de la simulation
$f_{exc-mix} = f_s - f_r $	26.35 Hz	26.4 Hz
$f_{exc-mix} = f_s + f_r $	73.65 Hz	73.6 Hz
$f_{exc-mix} = f_s - 2f_r $	2.7	2.4 Hz
$f_{exc-mix} = f_s + 2f_r $	97.3	97.4 Hz



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [AHM13]: Ahmadi, M., Poshtan, J., Poshtan, M. "Static eccentricity fault detection in induction motors using wavelet packet decomposition and Gyration radius". In Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA), the 1st International Conference, pp. 1-5, IEEE 2013.
- [AIT05]: Ait-Hammouda, A. "Pré-dimensionnement et étude de sensibilité vibro-accoustique de machines à courant alternatifs et à vitesses variables ". Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2005.
- [ALA03]: Alain Boulenger, Christian Pachaud, "Analyse vibratoire en maintenance (surveillance et diagnostic des machines) ". Dunod Paris, livre édition 2003.
- [ALA09]: Alain Boulenger, Christian Pachaud, "Aide-mémoire Surveillance des machines par analyse des vibrations". Dunod Paris, livre édition 2009.
- [ALAM15]: K. Alameh, N. Cité, G. Hoblos, G. Barakat, "Vibration-based fault diagnosis approach for permanent magnet synchronous motors". IFAC-Papers OnLine, pp.1444-1450, 2015.
- [ALG65]: P. L. Alger, "The nature of induction machines", Gordon and Breach, science publisher inc., New York, 1965.
- [AND08]: R. N. Andriamalala, H.Razik, L. Baghli, F-M. Sargos, "Eccentricity Fault Diagnosis of a Dual-Stator Winding Induction Machine Drive Considering the Slotting Effects", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55 , pp. 4238 – 4251, Dec. IEEE 2008.
- [ANT04]: Antoni J., Sidahmed M., "Contrôle et diagnostic à partir des signaux acoustiques et vibratoires". Special congrès surveillance No5, acoustique et techniques, 2004.
- [ANTO06]: J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, J. R. Folch, M. P. M. Palomares, "Validation of a new a method for the diagnosis of rotor bar failures in induction machines". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, pp. 990-996, IEEE 2006.
- [AOU09]: AOUABDI, S. "Diagnostic et détection des cassures des barres du rotor d'une machine asynchrone a cage par l'analyse en ondelettes". Thèse de Doctorat, Université de Badji Mokhtar de Annaba, Algérie, 2009.
- [ARK97] : Arkkio A. "Unbalanced Magnetic Pull in a High Speed Induction Motor with an Eccentric Rotor". Conference Publications, International Conference on Electrical Machines and Drives, pp. 36-40, IET 1997.
- [ARQ99]: PH. Arqès, "Pour la surveillance de roulement". Revue Maintenance, No 517, pp. 48, 1999.
- [ATT15]: Attoui, I., Boudiaf, A., Fergani, N., Oudjani, B., Boutaseta, N., Deliou, A. "Vibration-based gearbox fault diagnosis by DWPT and PCA approaches and an adaptive neuro-fuzzy inference system". 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), pp. 234-239, IEEE 2015.
- [BAB14]: F. Babaa. "Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : "Application au diagnostic des défauts statoriques"". Thèse de Doctorat, université de Mentouri, Constantine, Alger, 2014.
- [BARM15]: D. Barman, S. Sarkar, G. Das, S. Das, P. Purkait, "DFA and DWT based severity detection and discrimination of induction motor stator winding short circuit fault from incipient insulation failure". Presented at the Intern. Conf. Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization, Visakhapatnam, India, IEEE 2015.

- [BAT80] : Bate, G. H. “ Vibration diagnostics for industrial electric motor drives”. Brüel and Kjaer application note, 1980.
- [BELH14]: Belhamdi, S. “Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Controlée Par Différentes Techniques De Comande”. Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2014.
- [BEL00]: Bellini, A., Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C., Kliman, G. B., 2000, “Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis”. Industry Applications Society Conference: The 35th IAS Annual Meeting, Rome, Italy, vol. 1, pp. 484-491, IEEE 2000.
- [BEN98]: Benbouzid.M, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection ". University of Picardie-Jules Verne, pp.1950-1955, IEEE 1998.
- [BEN99]: Benbouzid.M, Vieira.M, Theys.C, "Induction motors' faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques". IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, pp.14-22, IEEE 1999.
- [BEN03]: Benbouzid, M. E. H., Kliman, G. B., 2003, “What stator current processing-based technique to use for Induction motor rotor faults diagnosis?”. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, pp.238-244, IEEE 2003.
- [BENO15]: Benouzza, N., Boudinar, A. H., Bendiabdellah, A., Khodja, M., “Slot harmonic frequency detection as a technique to improve stator current spectrum approach for broken rotor bars fault diagnosis”. International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), (ELECTROMOTION), pp. 118-122, IEEE 2015.
- [BENS08]: Toufik, Bensana, “Diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une turbine à vapeur”. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar de Annaba, Algérie, 2008.
- [BENT06]: Bentaleb, Y. “Analyse par ondelettes des signaux sismiques: Applications aux ondes de surface”. Thèse de Doctorat, Université Mohammed v-agdal, Rabat, Maroc, 2006.
- [BENZ05]: Benzid, R. “Ondelettes et statistiques d'ordre supérieur appliquées aux signaux uni et bidimensionnels”. Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, Algérie, 2005.
- [BES07]: Bessous Noureddine, “Contribution au diagnostic des machines asynchrones”. Magister en électrotechnique, option: machines électriques, université de Mentouri Constantine, Algérie, 2007.
- [BES15-1]: Bessous N., S. E. Zouzou, N. Halem, “Calculation of induction machines inductances under outer raceway defect”. Intern. Symp. Diagnostics for Electrical Machines Power Electronics and Drives Guarda Portugal, IEEE 2015.
- [BES15-2]: Bessous N., Z. S. Eddine, S. Mohamed, “Experimental exploitation for the diagnosis to the induction machine under a bearing fault-using MCSA”. 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 1-4 IEEE 2015.
- [BES15-3]: Bessous N., Z. S. Eddine, W. Bentrach, S. Sbaa, “A Comparative Study between the FFT and DWT Method Applied to a Bearing Fault in Induction Motors – Results Dedicated to the Industry –”. WSEAS, Transactions on systems and control, 2015.
- [BES16-1]: Bessous N., S. E. Zouzou, W.Bentrach, S. Sbaa, M. Sahraoui, “Diagnosis of bearing defects in induction motors using discrete wavelet transform”.

- International Journal of System Assurance Engineering and Management, pp. 1-9, 2016.
- [BES16-2]: Bessous N., Z. S. Eddine, "Detection of Static and Dynamic Eccentricity Faults in Induction Machines by MCSA Method". International Conference on Electrical Sciences and Technologies CISTEM, Marrakesh, Morocco, 2016.
- [BES16-3]: Bessous N., Z. S. Eddine, W. Bentrach, S. Sbaa, "Detection and Diagnosis of Static Eccentricity Fault in Induction Machines Using the MCSA and DWT Method". International Conference on Electrical Sciences and Technologies CISTEM, Marrakesh, Morocco, 2016.
- [BES16-4]: Bessous N., Z. S. Eddine, A. Chemsas "A New Analytical Model Dedicated to Diagnose the Rolling Bearing Damage in Induction Motors -Simulation and Experimental Investigation-". International Conference on Control Engineering and Information Technology, CEIT, Hammamet, Tunisia, 2016.
- [BESS15]: Bessam, B., Menacer, A., Boumehraz, M., Cherif, H. "A novel method for induction motors stator inter-turn short circuit fault diagnosis based on wavelet energy and neural network". In Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), pp. 143-149, IEEE 2015.
- [BIN15]: Bindu, S., Thomas, V. V. "Characteristic signature identification of air-gap eccentricity faults using extended dq model for three phase induction motor". International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), pp. 157-162, IEEE 2015.
- [BINO16]: Binoj Kumar, A. C., Saritha, B., Narayanan, G. "Experimental Comparison of Conventional and Bus-Clamping PWM Methods Based on Electrical and Acoustic Noise Spectra of Induction Motor Drives". IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 4061-4073, IEEE 2016.
- [BLÖ08]: Blödt, M., Granjon, P., Raison, B., Rostaing, G., Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring. IEEE transactions on industrial electronics, pp. 1813-1822, 2008.
- [BON92]: Bonnett, A.H., Soukup, G.C., "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors", IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 921-937, IEEE 1992.
- [BOU01]: Boumegoura. T, "Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic". Thèse Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2001.
- [BOUD16]: Boudiaf, A., Djebala, A., Bendjma, H., Balaska, A., Dahane, A. "A summary of vibration analysis techniques for fault detection and diagnosis in bearing". In Modelling, Identification and Control (ICMIC), pp. 37-42, IEEE 2016.
- [BRU97]: J. F. Brudny "Modélisation de la denture des machines asynchrones". Phénomènes de résonances, J. Phys. III, pp.1009-1023, 1997.
- [BRA68]: Bradford, M. "Unbalanced magnetic pull in a 6-pole induction motor". Electrical Engineers, Proceedings of the Institution, pp. 1619-1627, 1968.
- [BUR97]: Burrus, C. S., Gopinath, R. A., Guo, H. "Introduction to wavelets and wavelet transforms". 1997.
- [CAM86]: Cameron. J. R, Thomas. W. T. Dow. A. B., "Vibration and current monitoring for detecting air gap eccentricity in large induction machines". IEE Proceeding, vol.133, pp.155-163, May 1986.
- [CAS02]: Casimir, R., Boutleux, E., Clerc, G., Chappuis, F., "A decision system to detect failures in induction motors", Systems, Man and Cybernetics, International, Conference, vol. 5, pp. 6-9 pp, IEEE 2002.

- [CAS03]: R. Casimir, "Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des Formes". Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 2003.
- [CAV04]: C. Cavallaro, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, A. Raciti, G. Ricco Galluzzo, M. Trapanese, "Monitoring and Diagnoses by a Vibration Analysis Procedure of Incipient Failures in Squirrel Cage Induction Motors Due to Cracked or Broken Bars". SPEEDAM 2004, Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Capri (Italy), 2004.
- [CHR99]: Christian Lalane, "vibrations et chocs mécaniques, Vibrations aléatoires". Tome 3, Hermes Paris, livre édition 1999.
- [CHU16]: Chuan, H., Shek, J. K. H. "Reducing unbalanced magnetic pull of an induction machine through active control", 2016.
- [COR15]: Corne, B., Vervisch, B., Debruyne, C., Knockaert, J., Desmet, J., "Comparing MCSA with vibration analysis in order to detect bearing faults A case study". International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), pp. 1366-1372, IEEE 2015.
- [CUE16]: Cuevas, M., Romary, R., Lecointe, J. P., Jacq, T. "Non-invasive Detection of Rotor Short-Circuit Fault in Synchronous Machines by Analysis of Stray Magnetic Field and Frame Vibrations". IEEE Transactions on Magnetics, IEEE 2016.
- [DEL82]: Deleroi W. "Squirrel cage motor with broken bar in the rotor-physical phenomena and their experimental assessment". 5th International Conference on Electrical Machines-ICEM '82, Budapest, Hungary, pp. 767-770, ICEM 1982.
- [DEL84]: Deleroi W. "Broken Bar in Squirrel Cage Rotor of an Induction Motor, Part I: Description by Superimposed Fault Currents." Arch. fur Elektrotechnik, pp. 91-99, 1984.
- [DI15]: Di, C., Bao, X., Wang, H., Lv, Q., He, Y. "Modeling and analysis of unbalanced magnetic pull in cage induction motors with curved dynamic eccentricity". IEEE Transactions on Magnetics, pp. 1-7, IEEE 2015.
- [DON16]: P. Donolo, G. Bossio, C. De Angelo, G. García, M. Donolo, "Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations". Electric Power Systems Research, 2016.
- [DOR95]: Dorrell, D.G., Thomson, W.T., Roach, S., "Combined effects of static and dynamic eccentricity On airgap flux waves and the application of current monitoring to detect dynamic eccentricity in 3-Phase induction motors". The 7th International Conference on Electrical Machines and Drives Conference-EMD'95, Durham, U.K, pp. 151-155, 1995.
- [DOR97]: Dorrell, D. G., Thomson, W. T., Roach, S. "Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors". IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 24-34, IEEE 1997.
- [DOR15]: Dorrell, D. G., Salah, A., Kayani, O. "The detection and suppression of unbalanced magnetic pull in wound rotor induction motors using pole-specific search coils and auxiliary windings". Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 277-284, IEEE 2015.
- [DOU03]: Douglas, H., Pillay, P., & Ziarani, A. "Detection of broken rotor bars in induction motors using wavelet analysis". In Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03, pp. 923-928, IEEE 2003.
- [DUV15]: Duvvuri S. S., Detroja K. "Model-based stator interturn short-circuit fault detection and diagnosis in induction motors". The 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), pp. 167-172, IEEE 2015.

- [ELK92]: Elkasabgy N. M., Eastham A.R., Dawson G.E., “Detection of broken bars in the cage rotor on induction machine”. IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 165-171. IEEE 1992,
- [EPR82]: EPRI, “Improved Motors for Utility Applications”. Publication EL-2678, vol. 1, 1763-1, final report, October, 1982.
- [FAI02]: Faiz, J., Tabatabaei, I. “Extension of winding function theory for nonuniform air gap in electric machinery”. IEEE Transactions on Magnetics, 3654-3657, IEEE 2002.
- [FAI07]: Faiz, J., Ebrahimi, B. M., Akin, B., Asaie, B. “Criterion function for broken-bar fault diagnosis in induction motor under load variation using wavelet transform. Electromagnetics”. pp. 220-234, 2007.
- [FAI16]: Faiz J., S. M. M. Moosavi, “Eccentricity fault detection—From induction machines to DFIG—A review,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 55, pp. 169-179, 2016.
- [FAR16]: Farajzadeh-Zanjani, M., Razavi-Far, R., Saif, M., Rueda, L. “Efficient feature extraction of vibration signals for diagnosing bearing defects in induction motors”. In Neural Networks (IJCNN), pp. 4504-4511, IEEE 2016.
- [FIL92]: Filippetti F., Martelli M., Franceschini G., Tassoni C. “Development of expert system knowledge base to on-line diagnosis of rotor electrical faults of induction motors”. In Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record, pp. 92-99, IEEE 1992.
- [FIL94] P. Vas, F. Filippetti, G. Franceschini, et C. Tassoni. "Transient modeling oriented to diagnosis of induction machines with rotor asymmetries ". International Conferences on Electrical Machines, pp. 62–67, 1994.
- [FIL98] : Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C., Vas P., "AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect". IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 98 – 108, IEEE 1998.
- [FIN99]: Finley, W. R., Hodowanec, M. M., Holter, W. G. “An analytical approach to solving motor vibration problems”. In Petroleum and Chemical Industry Conference, Industry Applications Society 46th Annual, pp. 217-232. IEEE 1999.
- [FIN00]: Finley, W.R., Hodowanec, M. M., Holter, W.G. “An Analytical Approach to Solving Motor Vibration Problems”. IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 1467-1480, IEEE 2000.
- [FIN02]: Finley, W. R., Hodowanec, M. M., Holter, W. G., Energy, S., Norwood, O. H. “Résolution des problèmes de vibrations de moteurs—approche analytique”. 2002.
- [FIN13]: Finley, W., Loutfi, M., Sauer, B. J. “Motor vibration problems—Understanding and identifying”. IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference, pp. 1-20, IEEE 2013.
- [FIR13] : Fireteanu, V., Constantin, A. I., Romary, R., Pusca, R., Ait-Amar, S. “Finite element investigation of the short-circuit fault in the stator winding of induction motors and harmonics of the neighboring magnetic field”. In Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), pp. 257-262, IEEE 2013.
- [FIR16] : Fireteanu, V., Constantin, A. I. “From the 2D to 3D finite element analysis of the broken bar fault in the squirrel-cage induction motors”. In Applied and Theoretical Electricity (ICATE), pp. 1-6, IEEE 2016.
- [FOU15]: Fournier, E., Picot, A., Régnier, J., Yamdeu, M. T., Andréjak, J. M., Maussion, P. “Current-based detection of mechanical unbalance in an induction machine

- using spectral kurtosis with reference”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 1879-1887, IEEE 2015.
- [FRO68]: Frohne, H. “Über den einseitigen magnetischen Zug in Drehfeldmaschinen”. Archiv für Elektrotechnik, pp. 300-308, 1968.
- [FRO68]: Frohne, I. H. “Berechnung der Exzentrizitätsfelder und des einseitigen magnetischen Zuges in Drehfeldmaschinen unter Berücksichtigung von Sättigung und Dämpfung”. Archiv für Elektrotechnik, pp. 232-239, 1969.
- [FRO15]: L. Frosini, C. Harlisca, L. Szabó, “Induction machine bearing fault detection by means of statistical processing of the stray flux measurement”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, pp. 1846-1854, IEEE 2015.
- [FRÜ82]: Früchtenicht, I. J., Seinsch, I. H. “Exzentrizitätsfelder als Ursache von Laufinstabilitäten bei Asynchronmaschinen”. Archiv für Elektrotechnik, pp. 271-281, 1982.
- [GEN03]: G. Gentile, S.Meo, A. Ometto, "Induction motor current signature analysis to diagnostics of stator short circuits". SDEMPED, Power Electronics and drives, Atlanta, GA, USA, 2003.
- [GHO05]: Ghoggal, A. “Diagnostic de la machine asynchrone triphasée: Modèle Dédié à la Détection des défauts”. Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, Algérie, 2005.
- [GHO06]: A. Ghoggal, A. Aboubou, S. E. Zouzou, M. Sahraoui, "consideration about the modelling and simulation of air-gap eccentricity in induction motors", In proceeding of SDEMBED, IEEE 2006.
- [GRA00]: P. GRANJON, "Contribution à la compensation active des vibrations des machines électriques". Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, France, 2000.
- [GRI13]: Gritli, Y., Di Tommaso, A. O., Miceli, R., Filippetti, F., Rossi, C. “Vibration signature analysis for rotor broken bar diagnosis in double cage induction motor drives”. In Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), pp. 1814-1820, IEEE 2013.
- [HAD08]: Hadjami Marouane, “Diagnostic des machines asynchrones : étude et modélisation dédiées à la détection des défauts”. Mémoire de magister, skikda, Algérie 2008.
- [HAL13]: N. Halem, S. E. Zouzou, K. Srairi, S. Guedidi, F. A. Abbood “Static eccentricity fault diagnosis using the signatures analysis of stator current and air gap magnetic flux by finite element method in saturated induction motors”. Int Jour Syst Assur Eng Manag, vol. 2, pp. 118–128, 2013.
- [HAR82]: Hargis, C., Gaydon, B. G., Kamish, K., “The detection of rotor defects in induction motors”. Proceedings IEE EMDA Conference, London, 1982, pp. 216-220, 1982,
- [HARM14]: Harmouche, J., Diallo, D., Delpha, C. “Discrimination des défauts de roulements par une analyse spectrale globale”. In Symposium de Génie Électrique, 2014.
- [HEL69]: Heller, B., Jokl, A. L. “Tangential forces in squirrel-cage induction motors”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 484-492, IEEE 1969.
- [HEND93]: Hendershot, J. “Causes and sources of audible noise in electrical motors”. In Proc. 22nd Incremental Motion Control Systems and Devices Symposium, pp. 259-270, 1993.
- [HIT99]: Hitti, E. “Sélection d'un banc optimal de filtres a partir d'une décomposition en paquets d'ondelettes. Application a la détection de sauts de fréquence dans des signaux multicomposantes”. Thèses de Doctorat, 1999.

- [IBR09]: Ali Ibrahim. "Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée". Thèse de Doctorat, laboratoire d'Analyse des Signaux et des Processus Industriels, université Jean Monnet. Lyon, Mars 2009.
- [IMM10]: F. Immovilli, A. Bellini, R. Rubini, C. Tassoni, "Diagnosis of bearing faults in induction machines by vibration or current signals: A critical comparison". IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 1350-1359, IEEE 2010.
- [IMM13]: Immovilli, F., Bianchini, C., Cocconcelli, M., Bellini, A., Rubini, R. "Bearing fault model for induction motor with externally induced vibration". IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 3408-3418, IEEE 2013.
- [ISH79]: Ishida, M., Hayashi, K., Ueda, M. "A speed detection method of squirrel cage induction motor utilizing rotor slot harmonics in the air gap and its application to slip frequency control". Electrical Engineering in Japan, pp. 74-84, 1979.
- [ISH84]: Ishida, M., Iwata, K. "A new slip frequency detector of an induction motor utilizing rotor slot harmonics. IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 575-582, IEEE 1984.
- [ISHK15]: Ishkova, I., Vítek, O. "Diagnosis of eccentricity and broken rotor bar related faults of induction motor by means of motor current signature analysis". In Electric Power Engineering (EPE), The 16th International Scientific Conference, pp. 682-686, IEEE 2015.
- [JAI15]: Jaipradidtham, C., Yampoo, T. "A new hybrid transient energy like improvement for current feature analysis of induction motor under dynamic mechanical faults using wavelet packet decomposition". In Electrical Machines and Systems (ICEMS), The 18th International Conference, pp. 173-176. IEEE 2015.
- [JES14]: J. de Jesus Rangel-Magdaleno, H. Peregrina-Barreto, J. M. Ramirez-Cortes, P. Gomez-Gil, R. Morales-Caporal, "FPGA-based broken bars detection on induction motors under different load using motor current signature analysis and mathematical morphology". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, pp. 1032-1040, IEEE 2014.
- [JOK00]: Gojko M. Joksimovic, Jim Penman, "The Detection of Inter-Turn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, IEEE 2000.
- [JOK05]: Joksimović, G. M. "Dynamic simulation of cage induction machine with air gap eccentricity". IEE Proceedings-Electric Power Applications, pp. 803-811, 2005.
- [JOR81]: Jordan, H., Schroeder, R. D., Seinsch, H. O. "Zur Berechnung einseitigmagnetischer Zugkräfte in Drehfeldmaschinen". Electrical Engineering, Archiv für Elektrotechnik, pp. 117-124, 1981.
- [KAH98]: J. P. Kahane, P. G. Lemarié-Rieusset, "Série de Fourier and ondelettes". Cassini, Cambridge, 1998.
- [KAR15]: P. Karvelis, G. Georgoulas, I. P. Tsoumas, J. A. Antonino-Daviu, V. Climente-Alarcon, C. D. Stylios, "A Symbolic representation approach for the Diagnosis of broken rotor bars in induction motors". IEEE Transactions on Industrial Informatics, pp. 1028-1037, IEEE 2015.
- [KIM15]: Kim, J., Shin, S., Lee, S. B., Gyftakis, K. N., Drif, M. H., Cardoso, A. J. M. "Power spectrum-based detection of induction motor rotor faults for immunity to false alarms". IEEE Transactions on Energy Conversion, pp. 1123-1132, IEEE 2015.

- [KLI88]: Kliman, G.B., Koegl, R. A., Stein, J., Endicott, R. D., Madden, M. W., “Noninvasive detection Of broken rotor bars in operating induction motors”. IEEE Transactions on Energy Conversion, pp. 873-879, IEEE 1988.
- [KLI92]: Kliman, G. B., & Stein, J. “Methods of motor current signature analysis”. Electric Machines and power systems, pp. 463-474, 1992.
- [KLI96]: Kliman, G.B., Premerlani, W. J., Koegl, R.A., Hoeweler, D., 1996, “A new approach to on-line fault detection in ac motors”. Industry Applications Society Conference: The 30th IAS Annual Meeting, San Diego-CA, pp. 687-693, IEEE 1996.
- [KLI97]: Kliman, G.B., Premerlani, W.J., Yazici, B., Koegl, R.A., Mazereeuw, J., “Sensorless, online Motor diagnostics”. Computer Applications Power, vol.10, pp. 39-43, 1997.
- [KUM16]: Kumar, T. C. A., Singh, G., Naikan, V. N. A. “Effectiveness of vibration and current monitoring in detecting broken rotor bar and bearing faults in an induction motor”. In Power Systems (ICPS). The 6th International Conference, pp. 1-5, IEEE 2016.
- [LAL04]: T.M. Laleg, “Contribution aux Méthodes de Diagnostic à Base d’Observateurs et à la Commande Tolérante aux Défauts Application à la Machine Asynchrone et au Robot SCARA ”. Mémoire d’ingéniorat en automatique, Ecole Militaire Polytechnique, Alger, Algérie, Juin 2004.
- [LEB11]: Lebaroud, A., Clerc G. “Study of Rotor Asymmetry Effects of an Induction Machine by Finite Element Method”. JEET, Journal of Electrical Engineering and Technology, vol. 6, pp. 342-349, 2011.
- [LIN03]: Lindh, T., Ahola, J., Kamarainen, J. K., Kyrki, V., Partanen, J., “Bearing damage detection Based on statistical discrimination of stator current”. The 4th International Symposium on Diagnostics For Electric Machines, Power Electronics and Drives–SDEMPED’03, Atlanta-GA, pp.177-181, IEEE 2003.
- [LU04]: Q.F. Lu, E. Ritchie, Z.T. Cao, “Experimental Study of MCSA to Detect Stator Winding Inter-turn Short Circuit Faults on Cage Induction Motors”. ICEM 2004.
- [MCF84]: P. D. McFadden J. D Smith, “Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing”. Journal of sound and vibration, pp. 69-82, 1984.
- [MEL99]: M. G. Melero, M. F. Cabanas, F. R. Faya, C. H. Rojas, J. Solares, “Electromagnetic torque harmonics for on-line interturn shortcircuits detection in squirrel cage induction motors”. EPE 1999.
- [MEY92]: Meyer, Y. “Les ondelettes: algorithmes et applications”. 1992
- [MÜL03]: G. H. Müller, C. F. Landy, “A novel method to detect broken rotor bars in squirrel cage induction motors when interbar currents are present”. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, IEEE 2003.
- [MUS16]: M. O. Mustafa, D. Varagnolo, G. Nikolakopoulos, T. Gustafsson, “Detecting broken rotor bars in induction motors with model-based support vector classifiers”. Control Engineering Practice, pp. 15-23, 2016.
- [MIC14]: Michon, M., Holehouse, R. C., Atallah, K., Wang, J. “Unbalanced magnetic pull in permanent magnet machines”. In Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 7th IET International Conference, pp. 1-6, 2014.
- [NAN00]: Nandi S., Rajmohan.B, Tolyat.H, Parlos.A, “Simulation of the three phase induction motor with incipient rotor cage faults”. Electrical machines and power electronics laboratory. Texas A and M University, College station, 2000.

- [NAN01] : Nandi S., H. Toliyat, "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages". Electric Machines and Motor drives Laboratory Department of electrical Engineering Texas A and M University, 2001.
- [NAN02]: Nandi, S., Toliyat, H.A., "Novel frequency-domain-based technique to detect stator inter-turn faults in induction machines using stator-induced voltages after switch-off". IEEE Transactions on Industry Applications, pp.101-109, IEEE 2002.
- [NAN03]: Nandi S., H. Toliyat, "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages". Electric Machines and Motor drives Laboratory Department of electrical Engineering Texas A and M University, 2003.
- [NAN05]: Nandi, S., Toliyat, H. A., Li, X. "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review". IEEE Transactions on energy conversion, pp. 719-729, IEEE 2005.
- [NAN98]: S. Nandi; H. A. Toliyat, "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages". International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1998.
- [NAR13]: Narwade, S., Kulkarni, P., & Partil, C. Y. "Fault Detection of Induction Motor Using Current and Vibration Monitoring". International Journal of Advanced Computer Research, pp. 272, 2013.
- [OBA03]: Obaid, R. R., Habetler, T. G., Stack, J. R., 2003, "Stator current analysis for bearing damage detection In induction motors".The 4th International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives-SDEMPED '03, Atlanta-GA, pp.182-187, IEEE 2003.
- [OCA01]: Ocak, H., Loparo, K. A., "A new bearing fault detection and diagnosis scheme based on hidden Markov modelling of vibration signals". International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing ICASSP '01, Salt Lake City-UT, USA, pp. 3141-3144, IEEE 2001.
- [OJA15]: Ojaghi, M., Sabouri, M. "Dynamic modeling and simulation of induction motors with different bearing faults". In Electrical Machines and Systems (ICEMS). The 18th International Conference, pp. 726-731, IEEE 2015.
- [OND06]: O. Ondel, "Diagnostic par Reconnaissance des Formes: Application a un Ensemble Convertisseur-Machine". Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2006.
- [ONG00]: Ong, R., Dymond, J.H., Findlay, R.D., "Bearing damage analysis in a large oil-ring-lubricated Induction machine". IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, Issue 5, pp. 1085-1091, IEEE 2000.
- [PAT12]: Patel, R. K., Agrawal, S., & Joshi, N. C. "Induction motor bearing fault identification using vibration measurement". Engineering and Systems (SCES), pp. 1-5, IEEE 2012.
- [PEN94] : J. Penman, J. Sedding, H.G. Loyed, B.A. Fink, "Detection and localization of interturn short circuits in the stator winding of operating motors". IEEE Transactins on Energy Conversion, vol. 9, pp. 652-658, IEEE 1994.
- [PHI09]: Philippe Arquès, "Diagnostic prédictif et défaillance des machines (théorie-traitement-analyse reconnaissance-prédiction". Technipe Paris, livre édition 2009.
- [PRU15]: A. Prudhom, J. Antonino-Daviu, H. Razik, V. Climente-Alarcon, "Time-frequency vibration analysis for the detection of motor damages caused by bearing currents". Mechanical Systems and Signal Processing, 2015.

- [PUS15]: Pusca, R., Romary, R. "Advances in diagnosis of electrical machines through external magnetic field. In Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)". The 7th International Conference, pp. P-5, IEEE 2015.
- [RAI00]: Bertrand Raison, "Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique". Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble, 2000.
- [RAZ02]: H. Razik, "Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art," La revue 3EI, vol. 29, pp. 48-52, Juin 2002.
- [RAZ03]: Hubert Razik, "Modelling of double star induction motor for diagnosis purpose". International Electric Machines and Drives Conference, pp. 807-812, IEEE 2003.
- [REF15]: S. S. Refaat, H. Abu-Rub, "ANN-based diagnosis of incipient stator winding turn faults for three-phase induction motors in the presence of unbalanced supply voltage". Annual Conference Industrial Electronics Society, Yokohama, Japan, IEEE 2015.
- [RIT94]: Ritchie, E, Deng X, Jokinen T. "Dynamic model of 3-phase squirrel cage induction motors with rotor faults". ICEM 94, pp.694-698, 1994.
- [SAI17-1]: Saidi, L. "The deterministic bispectrum of coupled harmonic random signals and its application to rotor faults diagnosis considering noise immunity". Applied Acoustics, 122, pp. 72-87, 2017.
- [SAI17-2]: Saidi, L., Ali, J. B., Bechhoefer, E., Benbouzid, M. "Wind turbine high-speed shaft bearings health prognosis through a spectral Kurtosis-derived indices and SVR". Applied Acoustics, 120, pp. 1-8, 2017.
- [SAH08]: M. Sahraoui, A. Ghoggal, S. E. Zouzou, M. E. Benbouzid, "Dynamic eccentricity in squirrel cage induction motors—Simulation and analytical study of its spectral signatures on stator currents". Simulation Modeling Practice and Theory, vol. 16, pp. 1503-1513, 2008.
- [SAH15]: Sahraoui, M., Cardoso, A. J. M., Ghoggal, A. "The use of a modified prony method to track the broken rotor bar characteristic frequencies and amplitudes in three-phase induction motors". IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 2136-2147, IEEE 2015.
- [SAL13]: Sallem, F. "Détection et isolation de défauts actionneurs basées sur un modèle de l'organe de commande". Doctoral dissertation, Université de Toulouse III-Paul Sabatier, France, 2013.
- [SCH94]: Schoen, R.R., Lin, B.K., Habetler, T.G., Schlag, J.H., Farag, S., "An unsupervised, on-line System for induction motor fault detection using stator current monitoring". The Industry Applications Society Conference, The 29th IAS Annual Meeting, Denver-CO, USA, pp.103-109, IEEE 1994.
- [SCH95]: Schoen, R.R., Habetler, T.G., Kamran, F., Bartfield, R.G., "Motor bearing damage detection Using stator current monitoring" IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, pp. 1274-1279, IEEE 1995.
- [SCHA99]: E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.
- [SHA16]: Shao, S., Sun, W., Wang, P., Gao, R. X., Yan, R. "Learning features from vibration signals for induction motor fault diagnosis". In Flexible Automation (ISFA), International Symposium, pp. 71-76, IEEE 2016.
- [SID15]: Siddiqui, K. M., Sahay, K., Giri, V. K. "Modelling and detection of bearing fault in SPWM inverter fed squirrel cage induction motor drives". In Circuit, Power

- and Computing Technologies (ICCPCT), International Conference, pp. 1-9. IEEE 2015.
- [SMI96]: Smith, A.C., Dorrell, D.G., “Calculation and measurement of unbalanced magnetic pull in cage induction motors with eccentric rotors. I. Analytical model”. IEE Proceedings on Electric Power Applications, vol. 43, pp. 193-201, 1996.
- [STA01]: Andreas Stavrou, Howard G. Sedding, James Penman, “Current Monitoring for Detecting Inter-Turn Short Circuits in Induction Motors”. IEEE Transactions on energy conversion, vol. 16, pp. 32-37, IEEE 2001.
- [STAC04-1]: Stack, J. R. Habetler, T.G. Harley, R.G., “Bearing fault detection via autoregressive stator current modelling”. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, pp. 740-747, IEEE 2004.
- [STAC04-2]: Stack, J. R., Habetler, T. G., Harley, R. G. “Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines”. IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 735-739, IEEE 2004.
- [TEY03]: S.Teyar, “Diagnostic de l'état des machines tournantes par l'analyse vibratoire”. Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, 2003.
- [THO01]: W.T. Thomson, M. Fenger, “Current signature analysis to detect induction motor faults”. IEEE Industry Applications Magazine, pp. 26-34, IEEE 2001.
- [THO92]: Thomson, W. T., “On-line current monitoring—The influence of mechanical loads or a unique Rotor design on the diagnosis of broken bars in induction motors”. The 10th International Conference on Electrical Machines—ICEM'92, Manchester, U.K., pp. 1236-1240, 1992.
- [THO94] : W.T. Thomson, “On-line current monitoring to diagnose shaft misalignment in three-phase induction motor drive systems”. ICEM94, D.9 Monitoring and Diagnostic, vol. 2, Paris, France, pp. 238-243, 1994.
- [THOM12]: Thomas Bertolini, Thomas Fuchs “Vibrations and Noises in Small Electric Motors (Measurement, Analysis, Interpretation, Optimization)”. 2012.
- [TOL95]: Toliyat, H.A., Lipo, T.A., “Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults”. IEEE Transactions Energy Conversion vol. 10, pp. 241-247, IEEE 1995.
- [TOL96] : Hamid A. Toliyat, Mohammed S. Arefeen, et Alenxender G. Parlos. "A Method for dynamic simulation of air-Gap eccentricity in induction machines". Transactions on Industry Applications, pp. 910–917, IEEE 1996.
- [TOM11]: A.O. Di Tommaso, R. Miceli, G. Ricco Galluzzo, “Monitoring and Diagnosis of Failures in Squirrel-Cage Induction Motors Due to Cracked or Broken Bar”. SDEMPED'2011, Bologna, pp. 39-44, IEEE 2011.
- [TRZ00]: Trzynadlowski, A.M., Ritchie, E., 2000, “Comparative investigation of diagnostic media for induction motors: a case of rotor cage faults”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, pp.1092-1099, IEEE 2000.
- [VAS93]: Vas, P., “Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines”. Oxford, Clarendon, 1993.
- [VER16]: C. Verucchi, J. Bossio, G. Bossio, G. Acosta, “Misalignment detection in induction motors with flexible coupling by means of estimated torque analysis and MCSA”. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016.
- [VIC05]: Vicente, P., Rodriguez, J., Negrea, M., Arkkio, A. “A general scheme for induction motor condition monitoring”. In Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED'05, the 5th IEEE International Symposium, pp. 1-6. IEEE 2005.
- [VIS15]: Vishwakarma, H. O., Sajjan, K. S., Maheshwari, B., Dhiman, Y. D. “Intelligent bearing fault monitoring system using support vector machine and wavelet

- packet decomposition for induction motors”. In Power and Advanced Control Engineering (ICPACE), International Conference, pp. 339-343, IEEE 2015.
- [WAN15]: Wang, L., Bao, X., Di, C., Li, J. “Effects of Novel Skewed Rotor in Squirrel-Cage Induction Motor on Electromagnetic Force”. IEEE Transactions on Magnetics, pp. 1-4, IEEE 2015.
- [YAH12]: Yahia, K., “Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée par une Approche Signal”. Thèse de Doctorat en sciences, Université de Mohamed Khider, Biskra, 2012.
- [YAN16]: Yang, H., Zhao, J., Wu, F. “Current similarity based fault diagnosis for induction motor drives with discrete wavelet transform”. In Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu), pp. 1-6. IEEE 2016.
- [YUA15]: Yuan, L., et Wu, D. “Motor bearing fault detection based on the second generation wavelet theory”. The 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), vol. 1, pp. 1537-1540, IEEE 2015.
- [ZAA14]: Zaabi, W., Bensalem, Y., Trabelsi, H. “Fault analysis of induction machine using Finite Element Method (FEM)”. In Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), the 15th International Conference, pp. 388-393, IEEE 2014.
- [ZHO16]: Zhou, Y., Bao, X., Di, C., Wang, L. “Analysis of Dynamic Unbalanced Magnetic Pull in Induction Motor With Dynamic Eccentricity During Starting Period”. IEEE Transactions on Magnetics, pp. 1-4, IEEE 2016.
- [ZOU05]: Zouzou, S. E., Ghoggal, A., Aboubou, A., Sahraoui, M., Razik, H. “Modeling of induction machines with skewed rotor slots dedicated to rotor faults”. In Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED’05, the 5th IEEE International Symposium, pp. 1-6, IEEE 2005.
- [ZOU10]: Zouzou, S. E., Sahraoui, M., Ghoggal, A., Guedidi, S. “Detection of inter-turn short-circuit and broken rotor bars in induction motors using the partial relative indexes: application on the MCSA”. In Electrical Machines (ICEM), International Conference, pp. 1-6, IEEE 2010.
- [ZOU11]: Zouzou, S. E., Khelif, S., Halem, N., Sahraoui, M. “Analysis of induction motor with broken rotor bars using finite element method”. In Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), the 2nd International Conference, pp. 1-5, IEEE 2011.
- [ZOU14]: Zouzou, S., Sahraoui, M., Aboubou, A., Menacer, A., Derghal, A. “Méthodes Dédiées à la Détection des Cassures de Barres dans les Moteurs Asynchrones Triphasés à Cage”. JTEA'04, Hammamet, Tunisie, 2014.