



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : machine électrique

Présenté par :

- **LABID Djaouaher**
- **DJEBLOUN Karima Zineb**

Intitulé :

**Analyse et traitement du courant statorique pour
diagnostic des défauts rotorique de la machine
asynchrone en utilisant le FFT et DWT**

Soutenue le :03/06/2024

Devant le jury composé de :

Dr : HALEM Noura	Président	Université
Dr : MAAMRI Ousama	Examineur	Université
Pr : BESSOUS Noureddine	Encadreur	Université

Année académique : 2023/2024

Remerciements

Notre premier Remerciement va à Allah Soubhanhou watahala.

Nous tenions à remercier vivement notre encadreur, Pr. '**BESSOUS Noureddine**' pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa contribution générale à l'élaboration de ce travail.

Nous remercions aussi tous nos collègues de la promotion de la spécialité:

"machine électrique 2024"

Merci tout le monde.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amies qui nous ont toujours soutenu et encouragé pour la réalisation de ce mémoire.

NB : Les étudiants ont toute la responsabilité de rédiger ce travail et d'avoir leurs résultats sous la supervision et les suggestions du comité de soutenance.

Dédicace

(وَأَخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنْ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ)

بسم خالقي وميسر أموري وعصمة أمري. لك كل الحمد والامتنان .

أهدي هذا النجاح لنفسني نظير التعب المستميت في سنوات الدراسة لنيل هذه الشهادة ثم إلى كل من سعى معي لإتمام هذه المسيرة، دمت لي سنداً لا عُمر له .

من كلله الله بالهيبة والوقار ... إلى من أحمل اسمه بكل فخر .. إلى من حصد الأشواك عن دربي ليمهد لي طريق العلم بعد فضل الله ما أنا فيه يعود إلى - أبي - الرجل الذي سعى طوال حياته لكي أكون أفضل منه - أبي الغالي -

إلى ملاكي في الحياة إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان والتفاني .. إلى بسمه الحياة وسر الوجود إلى من كان دعاؤها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي التي كانت لي الأم والأخت والصديقة فهي داعمي الأول ووجهتي التي استمد منها القوة - أمي الحبيبة -

إلى مصدر قوتي فهم الداعمين الساندين، أرضي الصلبة وجداري المتين ، إلى من راهنوا على نجاتي .. وذكروني بمدى قوتي واستطاعتي، الذين لا يحبطونني ويؤمنوا بشجاعتي مهما ضعفت وارتخيت واقفين دوما خلفي .. مثل ظل مهما كثرت تخططاتي . إلى من بذلوا جهداً في مساعدتي وكانوا عوناً وسنداً إلى الشموع التي تنير طريقي - إخوتي وأخواتي - و إلى صغيري - يزن وبسمله -

ولا أنسى رفقاء الروح الذين شاركوني خطوات هذا الطريق إلى من هَوَّنوا تعب الطريق إلى من شجعوني على المثابرة وإكمال المسيرة إلى رفقاء السنين ممتنة لكم .. - منال وزينب -

إلى من زرعت داخلي رغبة حفظ كتاب الله و جعلتني أفهم معانيه لأصبح الآن حافظة لكتاب الله، أتقدم لك بكل الشكر والتنهاني والحب أستاذتي الغالية على كل العطاء الذي منحتني إياه، بارك الله فيك زادك الله من جزيل فضله وعطائه -أستاذتي رتيبة غرايسة-

ختاماً لله الشكر كله أن وفقني لهذه اللحظة، فالحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على نبيه الكريم.

جواهر

Dédicace

الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا على البدء والختام
لم تكن الرحلة قصيرة ولا الطريق محفوا بالتسهيلات لكني فعلتها فالحمد لله الذي يسر البدايات وبلغنا
النهايات بفضلته وكرمه، وبكل حب اهدي ثمرة نجاحي وتخرجي
إلى الذي زين اسمي بأجمل الألقاب ومن دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل إلى من علمني أن الدنيا
كفاح وأساسها العلم والمعرفة داعمي الأول في مسيرتي فخري واعتزازي
أبي أدامك الله ظلا لنا
إلى من جعل الله الجنة تحت قدميها واحتضنني قلبها قبل يديها وسهلت لي الشدائد بدعائها قدوتي الأولى
التي منها تعرفت على القوة والثقة بالنفس لمن رضاها يخلق لي التوفيق
أمي أطال الله عمرك بالصحة والعافية
إلى من بهم أكبر وعليهم اعتمد ومن بوجودهم اكتسب قوة ومحبة لا حدود لها إلى من عرفت معهم معنى
الحياة
إخوتي وأخواتي (أكرم أشرف آية هناء)
إلى الوجه البريء والقلب الطيب ابن أختي (محمد العربي)
إلى ذلك الرجل العظيم الكتف الذي لا يميل والظل الذي احتمي عليه (عمي العزيز)
إلى الذين غمروني بالحب والتوجيه وأمدوني بالقوة والذين رزقني الله بهم لأعرف معهم طعم الحياة إلى
من تحلو بالإخاء وتميزوا بالعطاء والوفاء رفيقات عمري
(منال جواهر)
إلى عزيزة القلب ورفيقة الروح الشخص الداعم بلا مقابل (نسرين)
شكرا لكل من علمني حرفا طيل مسيرتي الدراسية بداية من الابتدائية حتى الجامعة .. أسأل الله أن يبارك
عملي ونفع الله بي البلاد والعباد.
ختاما لله الشكر كله أن وفقني لهذه اللحظة، فالحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على نبيه الكريم.

زينب

ملخص

تلعب الآلات الدوارة الكهربائية دورًا مهمًا في الحياة اليومية، فهي تشمل الكثير من الأعمال وتوفر الوقت والجهد. يسعى هذا العمل إلى تشخيص الأخطاء في الآلة غير المتزامنة ذات القفص السنجاني في ظل وجود أخطاء من نوع انكسار الجزء الدوار. يعتمد موضوع تشخيص الأخطاء على تطبيق تقنيتين لمعالجة الإشارات، واللتي تشكلان حلاً فعالاً لمشكلة تشخيص الأخطاء:

1. التحليل الطيفي للتيار الثابت (FFT).

2. التحليل المتقطع للموجات (DWT).

إذ يسمح التحليل الطيفي لتيار الجزء الثابت (FFT) باكتشاف الأخطاء من خلال ملاحظة الاختلافات في طيف تردد التيار. أما بالنسبة لتحليل الموجات، فهو يقدم تحليلاً مفصلاً للغاية للإشارات، مما يجعل من الممكن استخراج المعلومات اللازمة لتشخيص العيوب في ظروف التشغيل المتغيرة للآلة.

الكلمات المفتاحية : الآلات الدوارة الكهربائية، التحليل الطيفي، التحليل المتقطع للموجات، تردد التيار، تشخيص العيوب، التوافقيات .

Abstract

Electric rotary machines play an important role in daily life, as they involve a lot of work and save time and effort. This work seeks to diagnose faults in a squirrel-cage asynchronous machine in the presence of rotor breakage type faults. The subject of fault diagnosis depends on the application of two signal processing techniques, which constitute an effective solution to the problem of fault diagnosis:

1. Fixed current spectroscopy (FFT).
2. Discrete wavelet analysis (DWT).

Stator current (FFT) spectroscopy allows faults to be detected by observing differences in the frequency spectrum of the current. As for wavelet analysis, it provides a very detailed analysis of signals, which makes it possible to extract the information necessary to diagnose faults in variable operating conditions of the machine.

key words : Rotating electrical machines, spectroscopy, discrete wavelet analysis, current frequency, fault diagnosis, harmonics.

Résumé

Les machines rotatives électriques jouent un rôle important dans la vie quotidienne, car elles nécessitent beaucoup de travail et permettent d'économiser du temps et des efforts. Ce travail vise à diagnostiquer les défauts d'une machine asynchrone à cage d'écureuil en présence de défauts de type rupture de rotor. L'objet du diagnostic de défauts dépend de l'application de deux techniques de traitement du signal, qui constituent une solution efficace au problème du diagnostic de défauts :

1. L'analyse spectrale du courant statorique (FFT).
2. Analyse par ondelettes discrètes (DWT).

La spectroscopie du courant statorique (FFT) permet de détecter les défauts en observant les différences dans le spectre de fréquence du courant. Quant à l'analyse par ondelettes, elle fournit une analyse très détaillée des signaux, qui permet d'extraire les informations nécessaires au diagnostic des défauts dans des conditions variables de fonctionnement de la machine.

Mots clés : machines tournantes électriques, spectroscopie, analyse par ondelettes discrètes, fréquence du courant, diagnostic de défauts, harmoniques.

Table des matières

Table des matières

Liste des figures	xiii
Liste des tableaux	xvii
Liste des symboles et abréviations	xix
Introduction générale	1
CHAPITRE I Etat de l'art sur diagnostic des défauts dans Les MAS	
I-1 Introduction	4
I-2 Constitution de la machine asynchrone a cage	4
I-2-1 Stator	5
I-2-2 Rotor	5
I-2-3 Paliers	6
I-3 Différents défauts dans les machines asynchrone	6
I-3-1 Défauts statoriques	7
I-3-2 Défauts rotorique	8
I.3-2-1 Cassure des barres	8
I.3-2-2 Excentricité d'entrefer	9
I-3-3 Défauts de roulement	10
I-4 Etude statistique des défauts	11
I-5 Causes des défauts	13
I-6 Conséquences des défauts	13
I-7 Méthode de diagnostic et de détection des défauts dans la machine asynchrone	13
I-7-1 Diagnostic par analyse du couple électromagnétique	14
I-7-2 Diagnostic par analyse vibratoire de la machine	14
I-7-3 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée	14
I-7-4 Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites	15
I-7-5 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite	15
I-7-6 Diagnostic par analyse du courant statorique	15
I-9 Conclusion	15

CHAPITRE II :Techniques dédiées à la détection des défauts d'excentricité

II-1	Introduction	18
II-2	Defauts rotoriques	18
II-2-1	Défauts d'excentricité	18
II-3	Phase de detection	19
II-4	Phase d'analyse	20
II-5	Notions fondamentales sur les techniques FFT- DWT	20
II-5-1	Transformée de Fourier	20
II-5-2	Transformée en ondelettes (TO)	21
II-5-3	Transformée en ondelettes discrète (TOD)	21
II-6	Avantages et inconvenients de la FFT	22
II-7	Diagnostic par l'analyse du courant statorique	22
II-8	Conclusion	24

CHAPITRE III : Analyse des défauts rotoriques en utilisant MCSA- FFT et MCSA- DWT

III-1	Introduction	26
III-2	Detection des defauts d'excentricite par MCSA-FFT	26
III-2-1	Excentricité statique	26
III-2-1-1	Fonctionnement à vide	26
III-2-1-2	Fonction en charge	33
III-2-2	Excentricité Dynamique	40
III-2-2-1	Fonctionnement à vide	40
III-2-2-2	Fonction en charge	46
III-3	La methode de MCSA-DWT	53
III-3-1	Energies et bandes fréquentielles pour DWT	53
III-4	Technique d'ondelettes pour le défaut d'excentricite rotorique	54
III-4-2	Défaut d'excentricité statique	54
III-4-2	Défaut d'excentricité dynamique	57
III-7	Conclusion	60
	Conclusion générale	62
	Bibliographie	64

Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE I : Etat de l'art sur diagnostic des défauts dans Les MAS

Figure I.1. Eléments de constitution d'une moteur asynchrone à cage d'écureuil	4
Figure I.2. Stator d'une machine	5
Figure I.3. Rotor d'une machine	6
Figure I.4. Bille de roulement rotorique	6
Figure I.5. Représentation des différents défauts statoriques possible	8
Figure I.6. Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique.	10
Figure I.7. Dimension du roulement à bille	11
Figure I.8. Distribution des défauts	12

CHAPITRE II :Techniques dédiées à la détection des défauts d'excentricité

Figure II.1. Moteur asynchrone avec rotor excentrique	18
Figure II.2. schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique	23
Figure II.3. Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique utilisé pour avoir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté de la technologie (Université d' El Oued)	24

CHAPITRE III : Analyse des défauts rotoriques en utilisant MCSA- FFT et MCSA- DWT

Figure III.1. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($g=0.004$, à vide) :0-1000 Hz	27
Figure III.2. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($g=0.004$, à vide), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (0Hz-200Hz).	28

Figure III.3. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($g=0.004$, à vide), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (200Hz-400Hz).	30
Figure III.4. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($g=0.004$, à vide), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (400Hz-600Hz).	31
Figure III.5. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($s=0.004$, à vide);, (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour des PSHs. (600Hz-700Hz)	33
Figure III.6. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($g=0.032$, en charge) :0-1000 Hz	33
Figure III.7. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=32\%$ ($g=0.032$, en charge), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (0Hz-200Hz)	35
Figure III.8 Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=32\%$ ($g=0.032$, en charge), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (200Hz-400Hz)	36
Figure III.9. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=32\%$ ($g=0.032$, en charge), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (400Hz-600Hz)	37
Figure III.10. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=32\%$ ($g=0.032$, en charge), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (600Hz-800Hz)	39
Figure III.11. Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.004$, à vide); (a) : 0-1000 Hz	40
Figure III.12. Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.004$); (a)et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental. (0Hz-200Hz)	42
Figure III.13. Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.004$); (a)et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental. (200Hz-400Hz)	43
Figure III.14. Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.004$); (a)et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental. (400Hz-600Hz)	44

Figure III.15. Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.004$); (a)et (c):Autour du fondamental, (b)et(d): Autour de fondamental. (600Hz-800Hz)	46
Figure III.16. Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.035$); (a)et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental 0à1000Hz	46
Figure III.17. Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.035$); (a)et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental (0Hz-200Hz)	48
Figure III.18. Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.035$); (a)et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental (200Hz-400Hz)	49
Figure III.19. Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.035$); (a)et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental (400Hz-600Hz)	50
Figure III.20. Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.035$); (a)et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental (600Hz-800Hz)	52
Figure III.21. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement à vide (ES) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	55
Figure III.22. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (ES).	55
Figure III.23. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement en charge (ES) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	56
Figure III.24. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (ES).	56
Figure III.25 Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement à vide (ED) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	58
Figure III.26. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (ED)	58
Figure III.27. Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement en charge (ED) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).	59
Figure III.28. Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (ED).	60

Liste des tableaux

Liste des tableaux

CHAPITRE III : Analyse des défauts rotoriques en utilisant MCSA- FFT et MCSA- DWT

Tableau III. 1. Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta s=45\%$).	39
Tableau III. 2. Récapitulation des harmoniques théoriques et pratiques ($\delta d=30\%$)	52
Tableau III.3 Bandes fréquentielles des détails ($f_e=12.8$ kHz).	54

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles et abréviations

MAS :	Machine asynchrone.
FMM :	Force magnétomotrice.
MCSA :	Motor Current Signature Analysis.
FFT :	Fast Fourier Transform.
TOC :	Transformée en ondelettes continues.
TOD :	Transformée en ondelettes discrètes.
DWT :	Discrete Wavelet Transform.
g,s :	Le glissement.
f_s :	Fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation.
p :	Le nombre de paires de pôles.
v :	Ordre d'harmoniques du temps.
N_b :	Nombre de billes de roulement.
f_{cc} :	Fréquence de court-circuit.
N :	Fonction d'enroulement.
n :	Fonction de distribution.
f_{roul} :	Fréquence caractéristique du défaut de roulement.
f_v :	Fréquence de vibration.
f_b :	Fréquence caractéristique du défaut de la bille du roulement.
f_{rot} :	Fréquence de rotation mécanique du rotor.
β :	Angle de contact de la bille avec la cage.
N_d :	Ordre de l'excentricité dynamique.
f_{es} :	Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité statique.
f_{ed} :	Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité dynamique.
L -PSH :	Lower Principal Slot Harmonic.
U -PSH :	Upper Principal Slot Harmonic.
f_{Mix} :	fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte.
f_r :	fréquence de rotation du rotor.
RSHs :	Rotor Slot Harmonics.

Introduction Générale

Introduction Générale

Les machines asynchrones, souvent appelées moteurs à induction, sont largement utilisées dans diverses applications industrielles en raison de leur robustesse, de leur fiabilité et de leur coût relativement bas. Cependant, comme tout autre équipement électromécanique, elles ne sont pas exemptes de défaillances. Les défauts rotorique, tels que la cassure des barres rotoriques ou l'excentricité rotorique, peuvent entraîner des dysfonctionnements graves, affectant l'efficacité de la machine et entraînant des coûts de maintenance élevés. Le diagnostic précoce de ces défauts est crucial pour minimiser les interruptions de service et les coûts associés. Parmi les diverses méthodes de diagnostic, l'analyse du courant statorique s'est avérée être une technique efficace et non invasive. Cette méthode repose sur le principe que les défauts rotorique modifient le comportement électromagnétique du moteur, ce qui se reflète dans les signaux de courant statorique.

L'analyse du courant statorique pour le diagnostic des défauts rotorique peut être réalisée en utilisant différentes techniques de traitement du signal. Parmi les techniques couramment utilisées sont la Transformée de Fourier Rapide (TFR sous l'abréviation anglaise FFT) et la Transformée en Ondelettes Discrète (TOD sous l'abréviation anglaise DWT).

La FFT est une technique classique qui permet de décomposer un signal en ses composantes fréquentielles. Dans le contexte du diagnostic des machines asynchrones, la FFT est utilisée pour détecter des fréquences spécifiques qui apparaissent en présence de défauts rotorique. Par exemple, un défaut de la cassure des barres du rotor génère des fréquences latérales autour de la fréquence fondamentale du courant statorique, connues sous le nom de fréquences de modulation de défaut.

En plus, la Transformée en Ondelettes Discrète (DWT) est souvent utilisée. La DWT permet une analyse temps-fréquence, ce qui en fait un outil puissant pour examiner les signaux non stationnaires. En décomposant le signal en différentes échelles de temps et de fréquence, la DWT peut détecter les anomalies et les caractéristiques transitoires associées aux défauts rotorique.

La DWT offre une résolution temporelle accrue pour les hautes fréquences et une résolution fréquentielle pour les basses fréquences, ce qui permet une meilleure localisation des caractéristiques des défauts dans le signal de courant statorique.

L'analyse du courant statorique en utilisant la FFT et la DWT fournit un moyen efficace de diagnostiquer les défauts rotorique dans les machines asynchrones. La combinaison de ces techniques permet de bénéficier des avantages de chacune, offrant ainsi une méthode robuste et précise pour la surveillance conditionnelle des moteurs à induction. Un diagnostic précoce et précis peut significativement améliorer la fiabilité et la durée de vie des machines, réduisant ainsi les coûts de maintenance et les interruptions de service.

Dans les sections suivantes de ce document, nous détaillerons les concepts théoriques de la FFT et de la DWT, leurs applications spécifiques pour le diagnostic des défauts d'excentricité rotorique, ainsi que des études de cas illustrant leur efficacité en conditions réelles (par l'exploitation des données expérimentales).

Pour cela, on a structurer ce mémoire comme suit:

Le premier chapitre sera présenter une synthèse bibliographique sur les défauts des machines asynchrones (MAS). Ce chapitre va citer aussi quelques les techniques utilisées pour diagnostiquer les défauts dans les MAS.

Nous allons traiter dans le deuxième chapitre les techniques à utiliser attentivement.

Le chapitre trois va analyser les défauts d'excentricité rotorique en utilisant la FFT et la DWT afin d'avoir des bons résultats.

Chapitre I

Etat de l'art sur diagnostic des défauts dans Les MAS

I.1-Introduction:

Les moteurs asynchrones à rotor à cage d'écureuil sont largement utilisés dans de nombreux processus industriels et jouent un rôle important dans divers domaines industriels. Malgré leur faible coût, du point de vue de la fiabilité et de la robustesse, les moteurs asynchrones peuvent affecter aux plusieurs problèmes. Les environnements difficiles et les conditions de fonctionnement incorrectes ou des défauts de fabrication sont considérés comme des causes à créer ou à amplifier les défauts [1].

Dans ce chapitre, nous examinerons le comportement d'un système particulier, à savoir une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Nous allons commencer de définir et/ou d'identifier les différents défauts dans cette machine ainsi que leurs causes

. Ensuite, nous aborderons brièvement les techniques couramment utilisées dans le domaine du diagnostic des défauts. Enfin, nous citerons les méthodes de modélisation de la machine, en mettant l'accent sur le diagnostic des défauts rotoriques et statoriques.

1.2-Constitution de la machine asynchrone à cage :

Effectivement, la connaissance des éléments constitutifs des machines asynchrones est essentielle pour comprendre leur fonctionnement physique. Les machines asynchrones triphasées se composent généralement de trois parties principales : le stator, le rotor et les paliers. Le stator est la partie fixe de la machine où l'alimentation électrique est connectée. Le rotor est la partie mobile qui entraîne la rotation de la charge mécanique. Les paliers sont des composants mécaniques qui soutiennent l'arbre moteur et facilitent sa rotation.

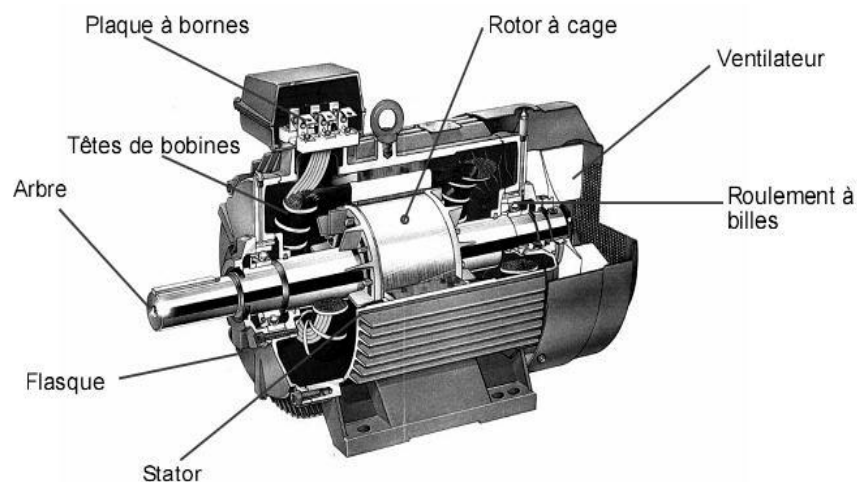


Figure (I.1):Eléments de constitution d'une moteur asynchrone à cage d'écureuil

I.2.1-Stator:

Le circuit magnétique du stator est réalisé par un assemblage de tôles ferromagnétiques fines et découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. L'utilisation de stôles minces permet de minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique [2], [3].

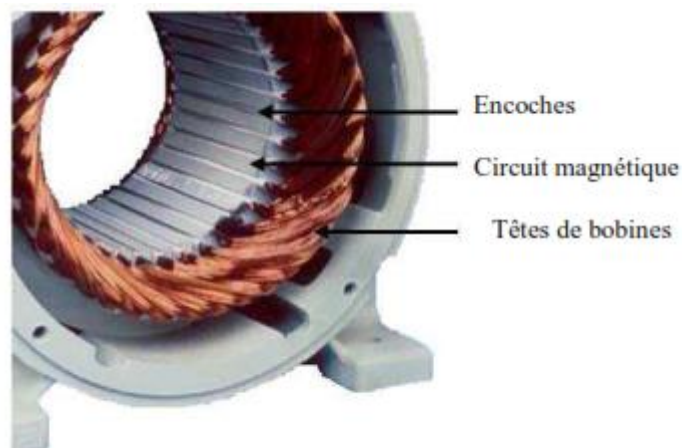


Figure (I.2):Stator d'une machine

I.2.2- Rotor:

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écureuil.

Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à

chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium. [4]

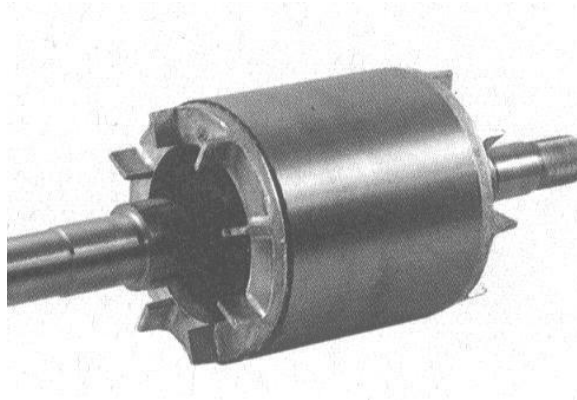


Figure (I.3):Rotor d'une machine

I.2.3-Paliers:

Sont des éléments de base d'une machine rotative, comme un moteur électrique ou une turbine. Les flasques sont les parties externes qui maintiennent les roulements à billes en place, permettant ainsi la rotation du rotor. Les roulements à billes quant à eux fournissent un support mécanique en réduisant les frottements et en permettant une rotation en douceur du rotor.

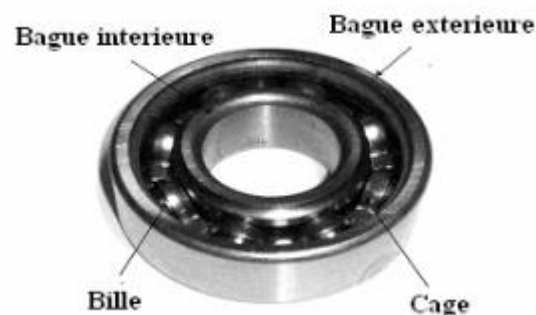


Figure (I.4):Bille de roulement rotorique

I.3-Différents défauts dans les machines asynchrone:

Le diagnostic des machines asynchrones, telles que les moteurs électriques, implique généralement l'analyse de plusieurs paramètres, y compris les mesures électriques (tension, courant, fréquence), les vibrations, la température, etc. Ces données sont souvent recueillies à l'aide de capteurs et analysées à l'aide de techniques telles que l'analyse de Fourier, l'analyse

spectrale, les méthodes de traitement du signal, etc. L'objectif est de détecter les défauts potentiels, tels que des enroulements défectueux, des roulements endommagés ou des déséquilibres, afin de prévenir les pannes et d'optimiser la maintenance. Il y'a trois types de défauts qui sont les suivants:

I.3-1-Défauts statorique:

L'origine des défauts dans les circuits électriques du stator de la machine asynchrone peut être variée. Parmi ceux-ci, on peut évoquer les courts-circuits inter-spires qui se manifestent à l'intérieur des encoches statoriques. Ces anomalies peuvent résulter d'une détérioration des isolants entourant les spires du bobinage statorique.

On peut citer aussi les courts-circuits qui apparaissant entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques. Les courts-circuits entre spires est donc le défaut le plus fréquemment rencontré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est [5]:

$$f_{cc} = f_s \left[\frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right] \quad (\text{I.1})$$

Où

f_{cc} : fréquence de court-circuit

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

p = nombre de pair de pôles

g = glissement

$k = 1, 2, 3, \dots, k \in \mathbb{N}$.

Les différents courts-circuits sont représentés dans la figure ci-dessous :

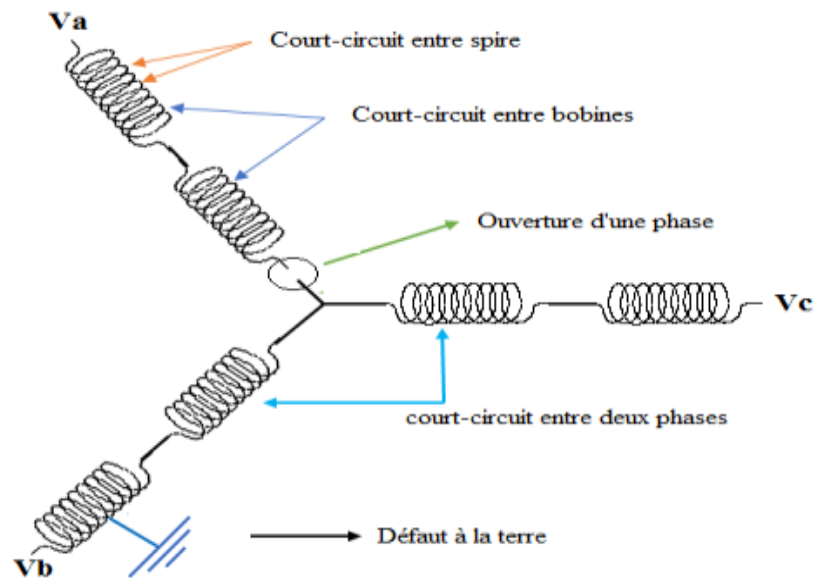


Figure (I.5): Représentation des différents défauts statoriques possible

I.3-2-Défauts rotoriques :

L'analyse du spectre du courant statorique en régime permanent fournit des indications sur les défaillances rotoriques telles que les ruptures de barres, d'anneaux de court-circuit ou l'excentricité d'entrefer [6] [7].

I.3-2-1-Cassure des barres :

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées .[8]

Un grand nombre de communications présentant de nombreuses techniques utilisées pour détecter une barre de rotor cassée dans les moteurs à induction en raison de propriétés non invasives. Outils de traitement de signal tels que Fast Fourier Transforme (FFT), Transformée de Fourier en temps court (STFT) et Prony Analyses (PA) ont été introduits pour extraire la fautive informations connexes des signaux de courant du stator [6].

I.3-2-2-Excentricité d'entrefer :

Il existe deux types d'excentricité : l'excentricité statique se distingue par le fait que le centre du rotor n'est pas confondu avec celui du stator, tel que des rotors ou noyaux statoriques ovales. Et l'excentricité dynamique fait que le centre du rotor tourne autour du centre du stator, dans ce type d'excentricité, l'épaisseur minimale de l'entrefer est en fonction de la position du rotor.

Les excentricités d'entrefer peuvent être détectées, en surveillant les raies latérales fondamentales de la fréquence d'alimentation [9] :

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées, [10]:

- ❖ **L'excentricité statique:** généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle résulte d'un défaut de centrage des flasques et se manifeste même dans des machines fabriquées récemment en raison des méthodes de fabrication et d'assemblage [11] (**voir figure I.6.b**).
- ❖ **L'excentricité dynamique:** ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes. Elle correspond au décalage du centre de rotation du rotor par rapport au centre géométrique du stator, avec en plus, une rotation du centre du rotor autour du centre géométrique de ce stator [11] (**voir figure I.6.c**).
- ❖ **L'excentricité mixte:** en réalité, les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à co-exister, [12]. Un niveau inhérent d'excentricité statique existe toujours, même dans des machines de fabrication récentes. Cela provoque des efforts réguliers d'attraction magnétiques non compensés dans une seule direction [13], et avec le temps cela peut conduire à la flexion d'un arbre et la dégradation de roulement ..., tout cela entamant une excentricité dynamique. Sans détection précoce, l'excentricité devient suffisamment grande pour développer des forces radiales déséquilibrées qui peuvent créer un frottement entre le stator et le rotor, ce qui mène à une panne très grave de la machine.

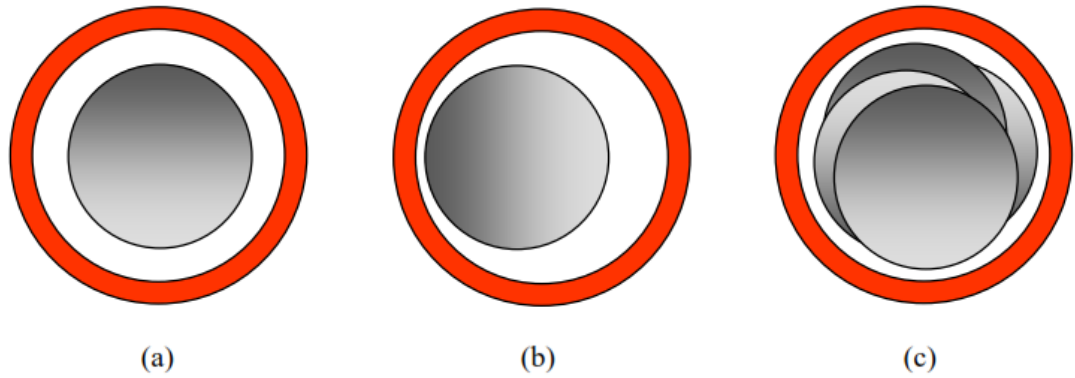


Figure (I.6): Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique; (c) excentricité dynamique.

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [14].

I.3-3-Défauts de roulement :

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et une extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (**figure I.7**). En fonctionnement normal la défaillance est due à la fatigue qui commence par des petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences [15].

$$f_{roul} = |fs - k \cdot fv| \quad (I.2)$$

Où $k=1,2,3,\dots$ est un entier et fv est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations.

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres du roulement. Les fréquences des vibrations qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont:

- Défauts au niveau d'une bille :

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (I.3)$$

- Défauts sur la bague intérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (I.4)$$

- Défauts sur la bague extérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (I.5)$$

Où BD le diamètre d'un élément roulant, PD la distance entre les centres des billes diamétralement opposées, n_b est le nombre d'éléments roulants, β angle de Contact des billes avec les bagues du roulement et f_{rot} est la fréquence de rotation du rotor [15].

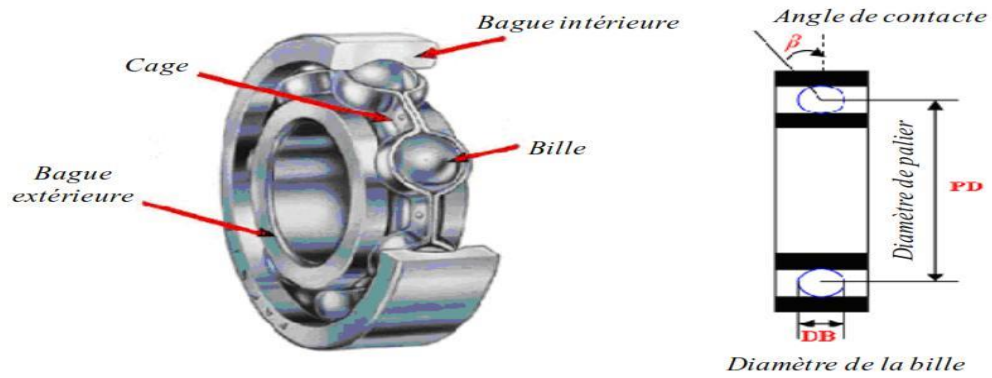


Figure (I.7): Dimension du roulement à bille

I.4-Etude statistique des défauts:

Un défaut dans un composant peut résulter d'une usure normale, d'une mauvaise conception, d'un mauvais montage (désalignement), d'une mauvaise utilisation ou d'une combinaison de ces différentes causes. Si un défaut n'est pas détecté suffisamment tôt, il peut entraîner la dégradation complète de la machine. Plusieurs études ont été effectuées sur la fiabilité des machines électriques réalisées par différents groupes industriels. L'étude principale, effectuée par la compagnie "General Electric", a été publiée dans EPRI (*Electric Power Research Institute*) en 1982 [16], elle couvre environ 5000 moteurs, dont approximativement 97% étaient des moteurs asynchrones triphasés à cage. La figure (I.8) récapitule la distribution des défauts dans les moteurs examinés dans cette étude. Il faut noter que cette figure représente des données de machines fonctionnant dans différentes applications et dans différentes branches dans l'industrie. Il est connu que l'occurrence d'un

type quelconque de défauts dépend fortement de l'application spécifique de la machine. Par exemple, il a été constaté que dans des machines asynchrones à cage, les défauts de la cage rotorique sont plus élevés que les défauts d'enroulement statorique pour les applications où la machine est fréquemment arrêtée et remise en marche sous une charge importante (machines à outils et les industries minières) [17].

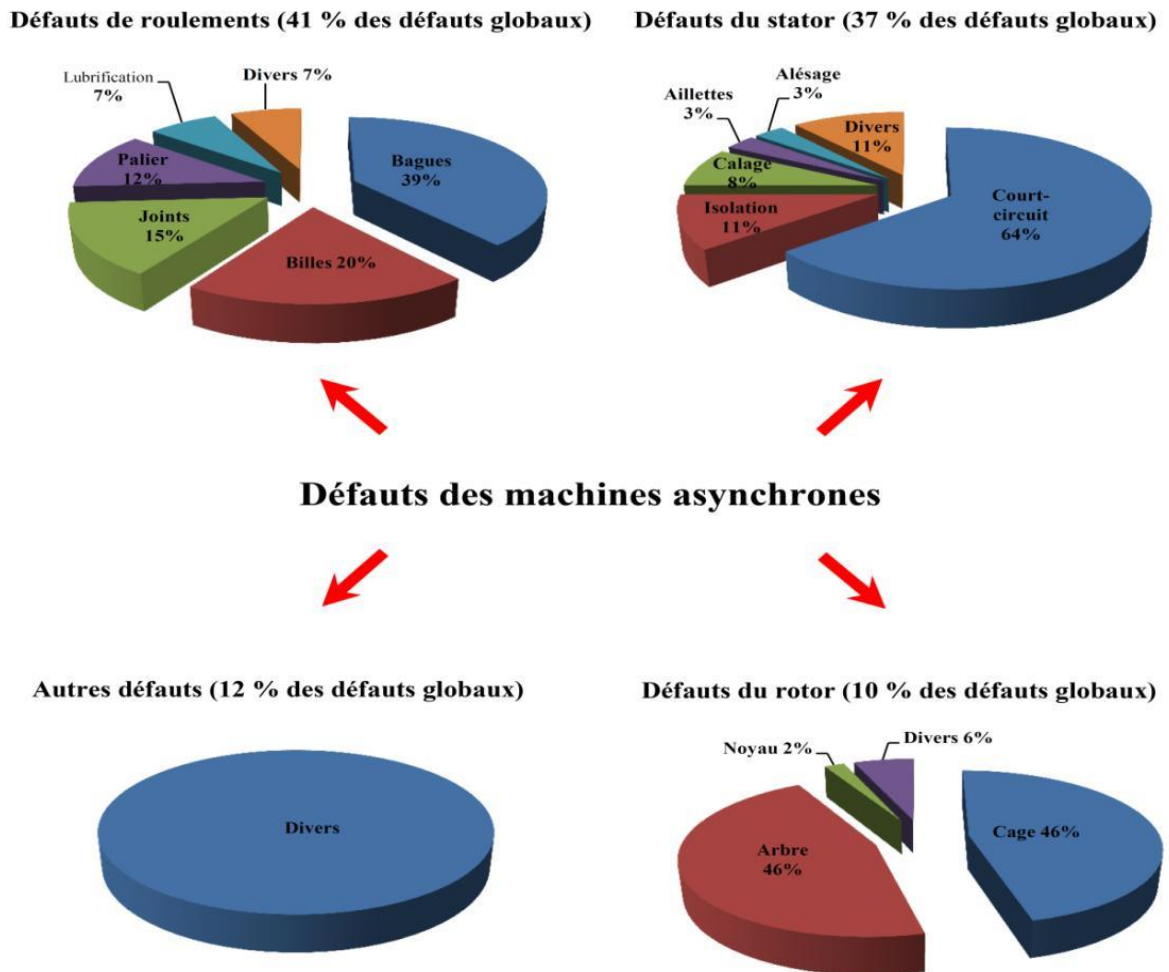


Figure (I.8): Distribution des défauts [16].

I.5- causes des défauts:

Pour le stator, les effets sont principalement dus à un problème [7] :

- thermique (surcharge).
- électrique (diélectrique).
- mécanique (bobinage).
- environnemental (agression).

Pour le rotor, les effets sont essentiellement dus à un problème :

- thermique (surcharge).
- électromagnétique (Force en fonction $B^2(t)$).
- résiduel (déformation).
- dynamique (arbre de transmission).
- mécanique (roulement).
- environnemental (agression).

I.6-Conséquences des défauts :

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total. On cite parmi les conséquences des défauts : [18]

- Dégradation des caractéristiques mécaniques au niveau du couple et de la vitesse.
- Appel supplémentaire de courant.
- Déséquilibre au niveau de la tension et de courant de ligne.
- Augmentation des arrêts non programmés, des pertes de production et par conséquent le rendement global.

I.7-Méthode de diagnostic et de détection des défauts dans la machine asynchrone:

Les méthodes de traitement de signal sont essentielles pour analyser les signaux provenant de capteurs mesurant diverses grandeurs physiques affectées par des défauts. Parmi ces méthodes, on retrouve l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle via des systèmes experts. Étant donné que les caractéristiques temporelles offrent peu d'informations, les techniques de traitement de signal, telles que l'analyse spectrale, sont privilégiées. Ces méthodes permettent une analyse indépendante des variations internes du système, préservant ainsi l'information des signaux de toute erreur de modélisation potentielle. La transformée de

Fourier rapide (FFT) et la transformée en ondelettes sont deux techniques couramment utilisées pour analyser le contenu spectral des signaux provenant de machines électriques, couvrant un large éventail de grandeurs telles que les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, et les vibrations.

I.7-1-Diagnostic par analyse du couple électromagnétique:

Le couple électromagnétique développé dans la machine, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique [19].

L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé de la machine [20].

I.7-2-Diagnostic par analyse vibratoire de la machine:

Les signaux de vibrations détectés contiennent des informations essentielles sur l'état de la machine. L'analyse spectrale de ces signaux nous renseigne sur les différents défauts qui sont à l'origine de ces vibrations [21].

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques, rotoriques et l'excentricité). Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode [22].

I.7-3-Diagnostic par mesure de la puissance instantanée:

La puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statorique. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [20].

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans la machine asynchrone a fait l'objet de nombreux travaux [23], [24].

I.7-4-Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites:

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statorique pendant la déconnexion de la machine du réseau. En utilisant cette approche, les effets de non idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées [25].

I.7-5- Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite:

Dans une machine idéal sans défauts, les courants et les tensions statorique sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux défruite axial de Valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine au tourde l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de la tension induite dans cette bobine, peut être exploité pour détecter les différents défauts [20].

I.7-6- Diagnostic par analyse du courant statorique:

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA(Motor Current Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain(harmoniques d'espace) [26].

I.8-Conclusion:

Ce chapitre est principalement consacré à l'état de l'art des méthodes de surveillance et de diagnostic des machines électriques, en mettant l'accent sur la machine asynchrone à cage d'écureuil. Il décrit de manière non exhaustive la constitution de cette machine, les différents types de défauts qui peuvent l'affecter ainsi qu'un aperçu des méthodes utilisées dans son

diagnostic. La détection précise du défaut exige une connaissance approfondie des défauts et leurs causes. Ce dernier est l'objectif du prochain chapitre.

Chapitre II

Techniques dédiées à la détection des défauts d'excentricité

II.1- Introduction:

L'analyse des défauts rotoriques par la méthode de la Transformée de Fourier Rapide (FFT) et la Transformée en Ondelettes Discrètes (DWT) est cruciale pour diagnostiquer les problèmes de machines asynchrones. La FFT permet de convertir les signaux temporels en domaine fréquentiel, identifiant ainsi les fréquences caractéristiques des défauts. En revanche, la DWT offre une résolution temporelle et fréquentielle adaptative, ce qui permet de détecter des défauts à différentes échelles de temps et de fréquence. Cette combinaison permet une analyse exhaustive et précise des défauts rotoriques, facilitant ainsi la maintenance prédictive et la réduction des temps d'arrêt non planifiés.

II.2- Défauts rotoriques :

II.2-1- Défauts d'excentricité:

L'excentricité est un phénomène qui fait l'objet de nombreuses publications, car elle est responsable de multiple dommages sur les machines électriques, surtout lorsqu'il s'agit de la machine asynchrone où l'entrefer est volontairement d'épaisseur très faible.

L'excentricité est le résultat de la non uniformité de ce dernier, ce qui signifie l'existence de longueurs radiales différentes entre le stator et le rotor, donc une asymétrie d'entrefer. Cette asymétrie faite, va décaler les axes des deux armatures l'un par rapport à l'autre d'une d'épaisseur qui dépend du degré d'excentricité et de la longueur moyenne de l'entrefer (Fig. II.1). Les causes d'une excentricité sont multiples : elle peut être due à la flexion de l'arbre, à un phénomène d'usure ou au désalignement des roulements, à un positionnement incorrect du rotor ou du stator au moment de l'assemblage, à l'ovalité du rotor ou de la partie intérieure du stator ou à un fonctionnement du moteur au-delà d'une vitesse limite qui provoque des résonances [27].

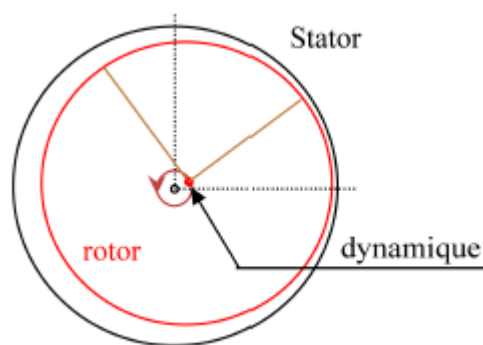


Figure (II.1) : Moteur asynchrone avec rotor excentrique

La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant statorique à des fréquences (f_d) données par l'expression ci-dessous [28] [29]:

$$f_d = f \left[\frac{(kn_b \pm n_d)}{p} (1 - s) \pm v \right] \quad (\text{II.1})$$

Où :

- n_b : le nombre de barres rotoriques,
- n_d : le nombre d'ordre d'excentricité : $n_d = 0$ pour l'excentricité statique et $n_d = 1, 2, 3, \dots$ pour l'excentricité dynamique,
- p : le nombre de paires de pôles,
- v : l'ordre des harmoniques de temps de la F.M.M, ($v \pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \dots$ etc.)

La présence de l'excentricité mixte crée des harmoniques de basses fréquences données par la relation :

$$f_m = |f \pm k f_r| \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Où} \quad f_r = f (1 - s) / p \text{ et } k = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{II.3})$$

Ces défauts engendrent les problèmes suivants :

- déséquilibre des tensions et courants de ligne.
- augmentation des pulsations de couple.
- réduction du couple moyen.
- échauffement excessif.
- augmentation des pertes et réduction du rendement

II.3- Phase de détection :

Il s'agit généralement de la phase la plus importante et de la base de l'ensemble du programme de PdM. La phase de détection consiste à contrôler périodiquement les caractéristiques de fonctionnement de l'équipement sélectionné. Ces valeurs font l'objet d'une tendance et d'un contrôle pour détecter tout changement. Le processus de collecte des données doit être effectué rapidement et soigneusement, dans le but de contrôler le plus grand nombre de machines possible. Lorsqu'un changement est détecté, des données supplémentaires sont alors recueillies à des fins d'analyse, afin de déterminer la cause du changement d'état de la machine.

Dans la phase de détection, l'objectif est d'identifier les machines défaillantes. Cela signifie qu'un maximum de machines sont passées au crible dans un laps de temps aussi court

que possible. La plupart des logiciels de PdM consultent ensuite les données collectées et identifient les machines suspectes [30].

II.4- Phase d'analyse :

Cette phase consiste à recueillir des données supplémentaires et peut-être différentes de celles de la phase de détection. Ces données supplémentaires nécessitent généralement une collecte de données supplémentaire. Étant donné que seules quelques machines, au cours de la phase de détection (entre 2 et 3 % dans un programme mature), présentent des changements significatifs, il est généralement plus rapide de prendre rapidement les données nécessaires pour identifier un changement au cours du processus de détection, puis de revenir en arrière pour un examen plus détaillé une fois le changement détecté.

Toutefois, si le site de l'usine est éloigné ou présente d'autres limitations d'accès, il sera justifié de recueillir des données plus détaillées au cours de la phase de détection. De nombreuses usines et sites décident d'installer en permanence des systèmes de surveillance pour ces applications. [30]

II.5-Notions fondamentales sur les techniques FFT- DWT:

II.5-1-Transformée de Fourier :

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

En 1807, la transformation de Fourier a vu le jour, elle consiste à décomposer un signal périodique quelconque en une somme de signaux sinusoïdaux de différents amplitudes et déphasages [31].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{II.4})$$

La transformée de Fourier Discrète, généralement notée TFD, est une suite finie de N termes $x(0), x(1), x(2), \dots, x(N-1)$ et elle est calculée par la relation :

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi n k}{N}} \text{ pour } k = 0, \dots, N-1 \quad (\text{II.5})$$

Où le terme N représente le nombre de points de calcul de la TFD. Ce terme joue sur la précision du tracé alors que le terme X est lié à la résolution en fréquence [32].

II.5-2-Transformée en ondelettes (TO) :

La transformée en ondelettes est similaire à la transformée de Fourier, avec une fonction de mérite complètement différente. La différence principale est la suivante : la transformée de Fourier décompose le signal en sinus et en cosinus, c'est-à-dire en fonctions localisées dans l'espace de Fourier; contrairement à la transformée en ondelettes qui utilise des fonctions localisées à la fois dans l'espace réel et dans l'espace de Fourier [33-34]. La transformée en ondelettes est en fait un ensemble infini de diverses transformées, dépendant de la fonction de mérite utilisée pour la calculer. Il existe aussi de nombreuses manières de classer les types de transformées en ondelettes. On peut utiliser les ondelettes orthogonales pour le développement en ondelettes discret et les ondelettes non orthogonales pour le développement en ondelettes continu [35],[33-34].

L'ondelette est une forme d'onde qui a une durée limitée et avec une valeur moyenne égale à zéro. La transformation en ondelettes permet d'appliquer une analyse multi-résolution sur le signal étudié. L'analyse multi-résolution de la transformation en ondelettes équivaut à une décomposition atomique temps-échelle. Chacun des atomes peut s'interpréter comme étant une projection locale du signal analysé et est obtenu à partir d'une ondelette $\psi(t)$ unique par une translation en temps et une dilatation. Partant d'une fonction bien localisée, dans le plan temps-échelle. La transformée en ondelettes d'un signal f est la famille S(u) coefficients d'ondelettes qui dépend des deux paramètres a et b où a est l'échelle et b est le facteur de position à analyser suivant les besoins de l'analyse du signal f les paramètres (a, b) peuvent être utilisés de façon continue (TOC) ou discrète (TOD). La transformée continue d'ondelettes exigeant une continuité des valeurs des paramètres (a, b) est plutôt utilisée dans l'analyse de l'allure du signal (approximation) tandis que la transformée discrète d'ondelettes basée beaucoup plus sur l'utilisation de la complémentarité des deux filtres, passe-haut et passe bas, va servir à l'extraction d'informations caractérisant les transitions rapides du signal (détails).

II.5-3-Transformée en ondelettes discrète (TOD):

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la différence de cette dernière. La TOD ou en Anglais Discrete Wavelet Transform (DWT) utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. On appelle transformée en ondelettes discrète

dyadique toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur d'échelle $u=2^i$. Il est clair que la transformée en ondelettes discrète est pratique en implémentation sur tout système numérique (PC, DSP, CARTE à μP ...).

Il est à noter que la transformée en ondelette continue TOC est aussi implantable sur les systèmes digitaux avec un lourd calcul provenant de la nature continue du facteur d'échelle et de la dilatation (toutes les valeurs sont possibles). L'analyse en multi-résolution permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue de la plus fine à la plus grossière.

II.6- Avantages et inconvénients de la FFT:

Le FFT présente plusieurs avantages :

- **Rapidité** : Le FFT est beaucoup plus rapide que la méthode directe pour calculer la transformée de Fourier, surtout pour les signaux de grande taille, grâce à des optimisations algorithmiques.

- **Efficacité** : Il nécessite moins de calculs que la méthode directe, ce qui le rend plus efficace en termes de temps et de ressources computationnelles.

- **Large application** : Il est largement utilisé dans de nombreux domaines tels que le traitement du signal, l'imagerie médicale, la compression de données, etc., en raison de sa rapidité et de son efficacité.

- **Précision** : Le FFT donne des résultats précis pour les signaux discrets.

Cependant, il y a aussi quelques inconvénients :

- **Taille de l'échantillon limitée** : Le FFT est généralement plus efficace pour les signaux de taille puissance

- **Nécessite de la mémoire** : Le FFT nécessite généralement une quantité significative de mémoire pour stocker les données intermédiaires, ce qui peut être un inconvénient pour les applications avec des contraintes de mémoire.

- **Interprétation des résultats** : Comprendre et interpréter les résultats du FFT peut être difficile pour les non-initiés, surtout en ce qui concerne les aspects fréquentiels et les artefacts de traitement.

Malgré ces inconvénients, le FFT reste un outil indispensable pour l'analyse et le traitement des signaux numériques.

II.7- Diagnostic par l'analyse du courant statorique :

Cette méthode est un outil puissant pour détecter la présence des défauts mécaniques et électriques. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes, parce qu'elle

ne demande ni l'introduction d'un capteur au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant mais seulement un capteur de courant (sonde à effet de hall ou transformateur de courant) qui donne une image sur le courant de phase statorique.

C'est cette méthode de diagnostic qui sera utilisée comme outil de diagnostic dans la recherche des différents défauts dans ce travail. C'est Cette méthode est basée sur la comparaison entre le spectre de courant de stator sain et le spectre de courant de stator défectueux.

Les nouvelles composantes de fréquence apparaissent lorsque le moteur a souffert d'un défaut. La technique d'analyse spectrale du courant de stator (MCSA) est l'une des méthodes utilisées pour diagnostiquer de manière précise différents défauts dans les moteurs à induction [36].

Dans le cas d'une répartition non sinusoïdale de la Fmm en plus du fondamental apparaît des harmoniques de l'encoche rotorique, cas d'un moteur à cage [37].

Pour montrer le principe de cette méthode, on considère le cas d'une asymétrie rotorique d'un moteur asynchrone, l'existence de ce défaut engendre un courant de défaut dans le rotor .Ce courant produit une Fmm pulsatoire dont la fréquence d'ondulation est (f_s), cette Fmm produit dans l'enroulement statorique une harmonique à deux composantes, la première ayant la fréquence $(1 - 2s) f$ et la deuxième ayant la fréquence $(1 + 2s) f$ (Figure II.2)

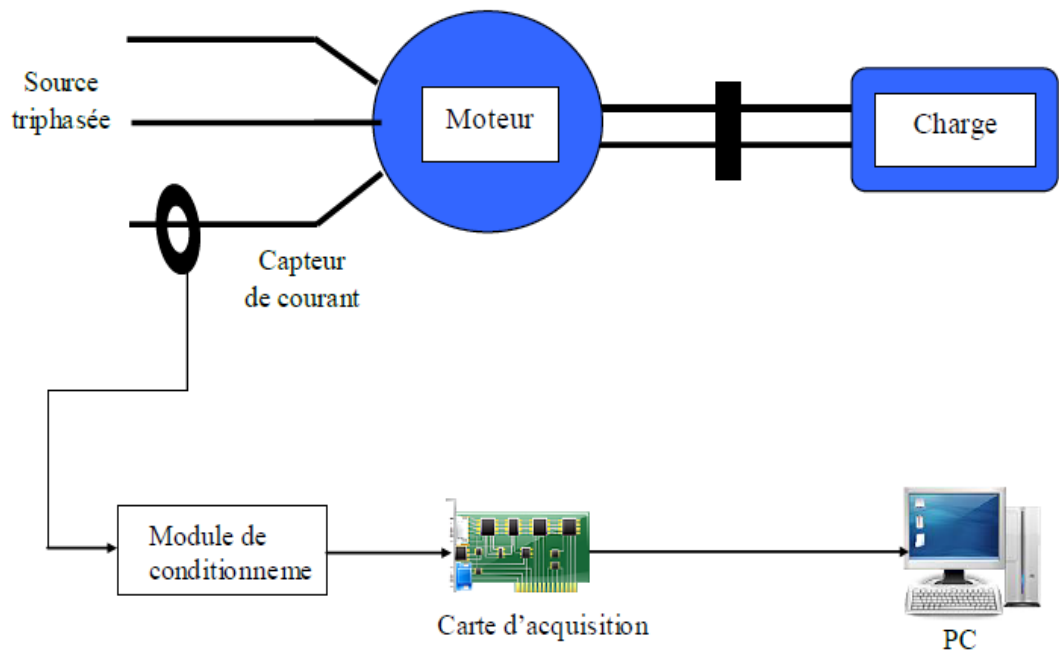


Figure (II.2):schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique [38].

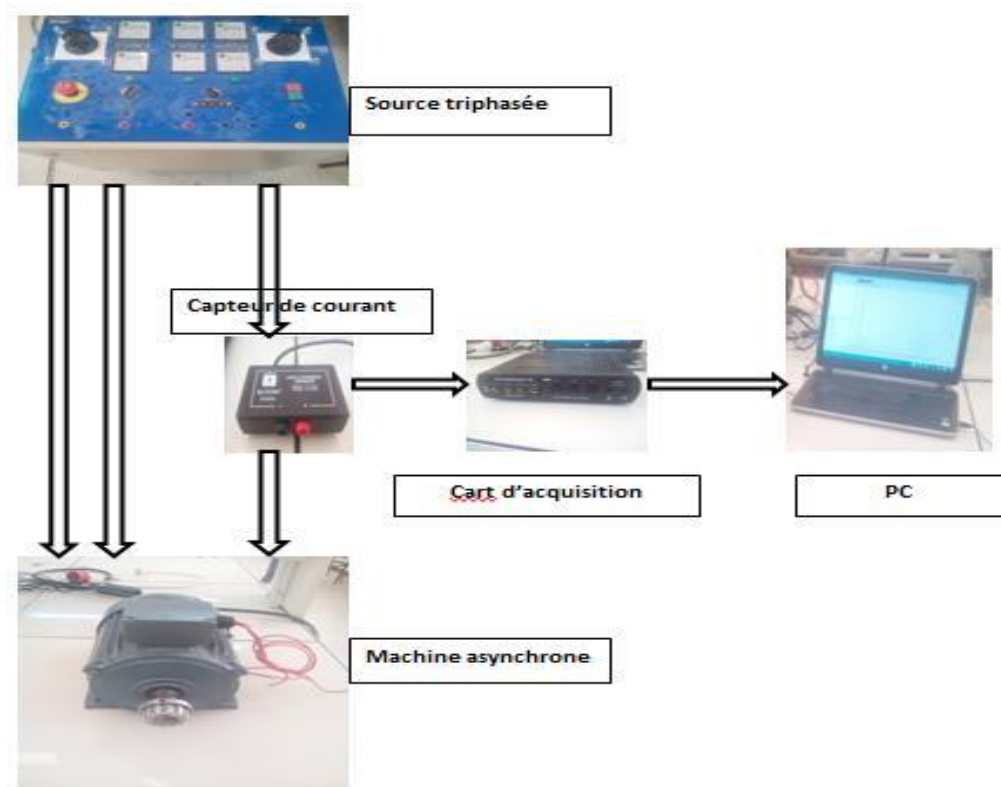


Figure (II.3): Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique utilisé pour avoir les résultats expérimentaux dans le laboratoire de la faculté de la technologie (Université d' El Oued).

II.8- Conclusion:

La transformée en ondelettes discrète (DWT) et la transformée de Fourier discrète (FFT) sont deux techniques de traitement du signal largement utilisées. En conclusion, la DWT est efficace pour l'analyse de signaux non stationnaires et pour la détection des changements locaux dans un signal, tandis que la FFT est plus adaptée à l'analyse de signaux stationnaires et périodiques. Le choix entre les deux dépendra des caractéristiques spécifiques du signal et des objectifs de l'analyse.

CHAPITRE III

Analyse des défauts rotoriques en utilisant MCSA- FFT et MCSA- DWT

III.1- Introduction:

L'analyse des défauts rotoriques par la méthode de la MCSA-FFT et MCSA-DWT représente une approche essentielle dans le domaine de la maintenance prédictive des machines tournantes. Les défauts rotoriques, tels que l'excentricité rotorique, les fissures ou les défauts d'alignement, etc. peuvent avoir des répercussions graves sur les performances et la durée de vie des équipements industriels. La combinaison de la MCSA-FFT (Analyse de la Signature Courant du Moteur) avec MCSA-DWT (Transformation en Ondelettes Discrètes) offre une méthode puissante pour détecter et diagnostiquer ces défauts.

III.2- Détection des défauts d'excentricité par MCSA-FFT :

Dans cette partie, on va présenter une analyse détaillée des défauts d'excentricité rotoriques où nous avons deux types de celles-ci. En plus, nous allons analyser ce défauts en se basant sur l'outil de FFT pour différents régimes (à vide et en charge).

Il est important d'indiquer ici que cette analyse va exploiter des données expérimentales afin de vérifier l'état de la MAS. Les fréquences caractéristiques du défaut d'excentricité seront vérifiées attentivement.

III.2-1 Excentricité statique :

L'analyse spectrale du courant est utilisée pour détecter les défauts dans les machines asynchrones, en particulier l'excentricité statique. Cette approche permet de visualiser les fréquences supplémentaires qui apparaissent en raison du défaut. Pour cette configuration spécifique de l'excentricité statique, il est possible d'analyser le spectre du courant statorique lors du fonctionnement à vide (le glissement $g \approx 0.4\%$) et à 75% de charge ($g \approx 3.2\%$) pour identifier les signatures du défaut.

III.2-1-1 Fonctionnement à vide :

On va consulter le spectre du courant statorique sous un fonctionnement de la machine asynchrone à vide. L'objectif est d'avoir les fréquences cachées. Ainsi, comme indiqué dans la figure (III.1), le spectre du courant statorique est présenté avec un glissement $s \approx 0.004$. Notre objectif est de détecter la présence d'harmoniques caractéristiques liées au défaut d'excentricité statique, telles que données par l'expression suivante:

$$f_{es} = \left[\frac{kn_b}{p} (1 - g) + v \right] \cdot f_s \quad (III.1)$$

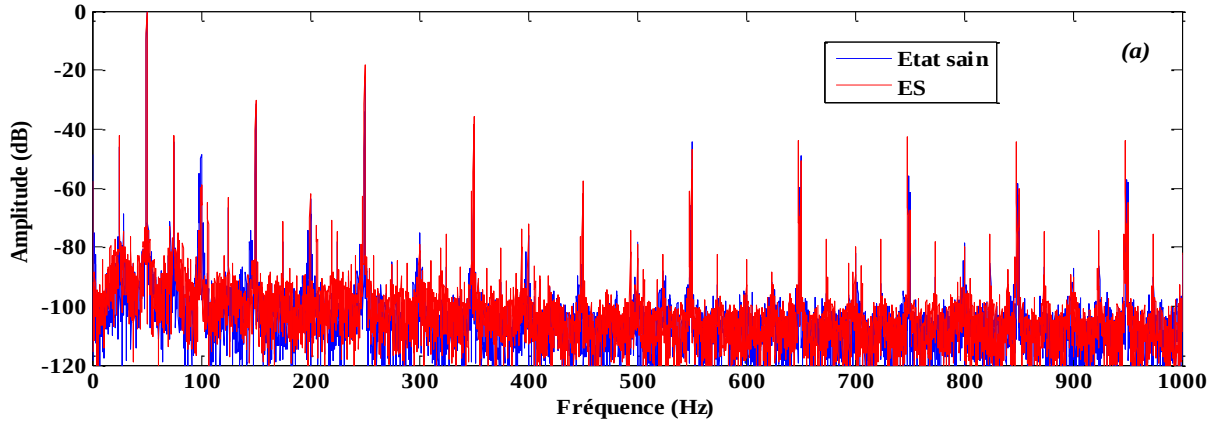


Figure (III.1): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($g=0.004$, à vide) :0-1000 Hz

D'après la figure ci-dessous, le spectre des bandes fréquentielles de 0 à 100 Hz et de 100-200Hz montrent clairement des fréquences additionnelles comme: 10Hz, 16.7Hz, 41.6Hz, 47.3 Hz et 106.1 Hz qui en correspondance avec la formule (III.1) sauf que 106.1Hz qu'elle n'a pas en correspondance avec la formule ci-dessus.

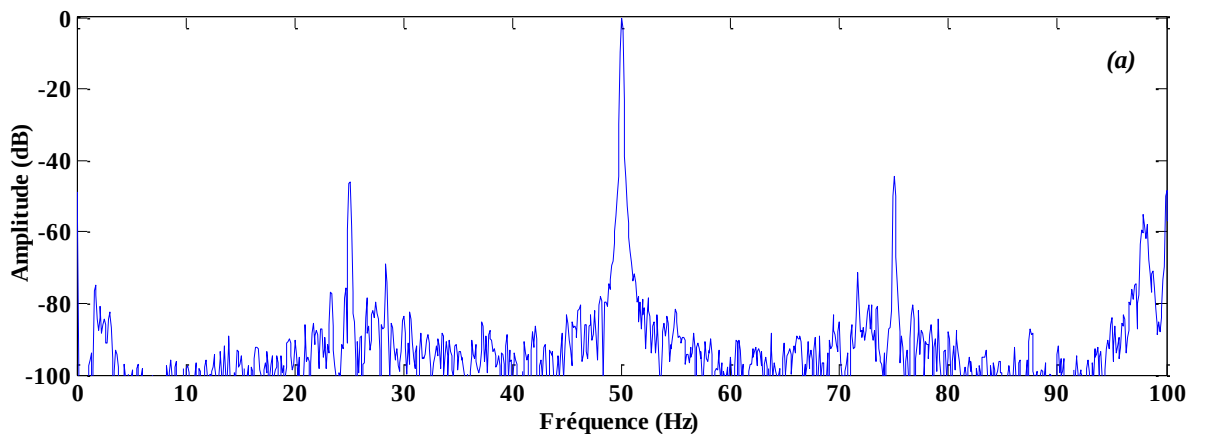
En plus, d'autres fréquences qui ont été apparues dans le spectre qui se situent autour de a fréquence fondamentale $f_s=50\text{Hz}$. Ces fréquences sont dues à l'excentricité mixte qui sont existe meme dans une MAS saine. Les valeurs des fréquences d'excentricité mixte sont les suivantes:

$$f_s + f_r = 75\text{Hz}$$

$$f_s - f_r = 25.1\text{Hz}$$

Ces fréquences ont la formule généralisée suivante:

$$f_{\text{Mix}} = f_s \pm f_r \quad (\text{III.2})$$



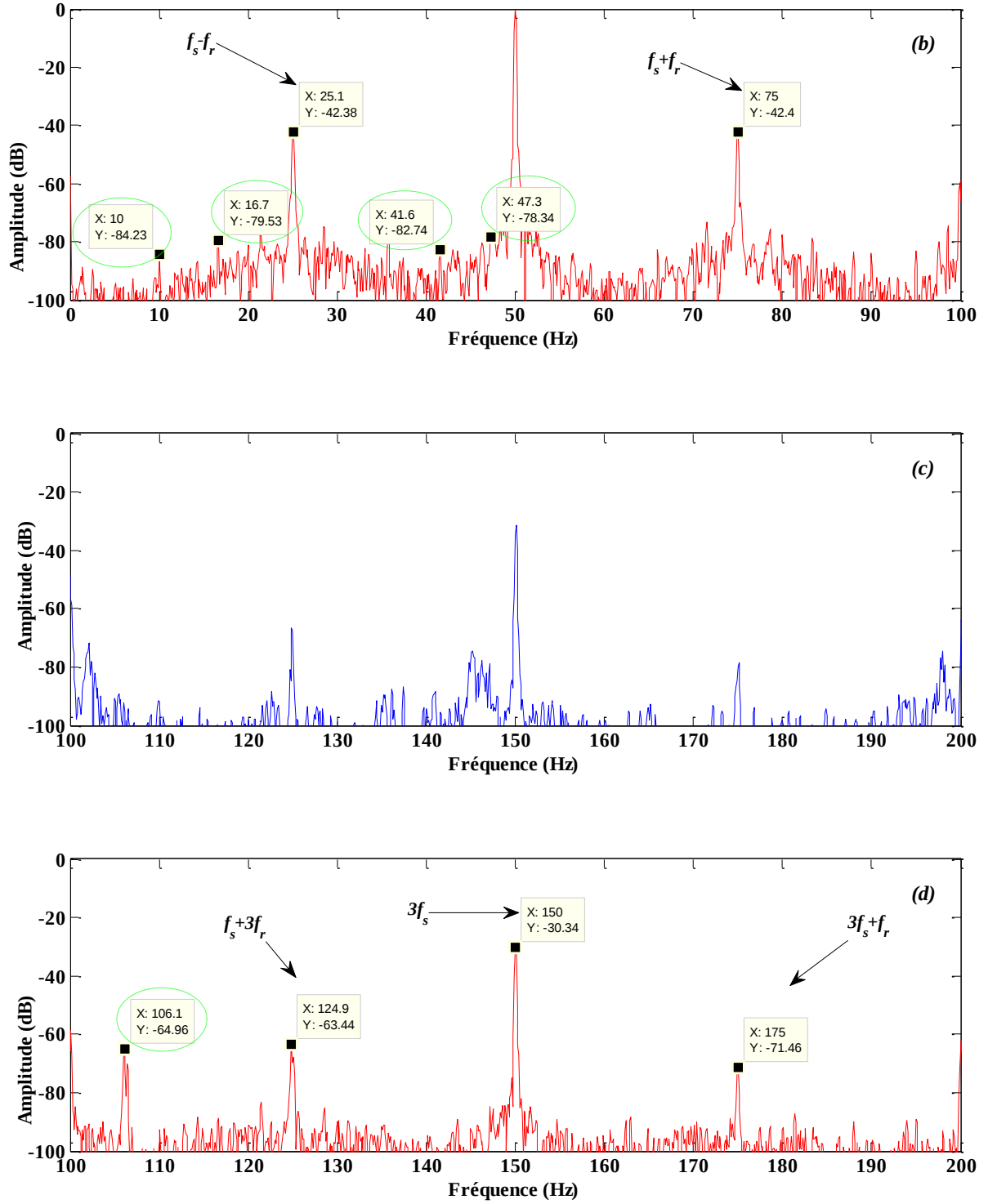
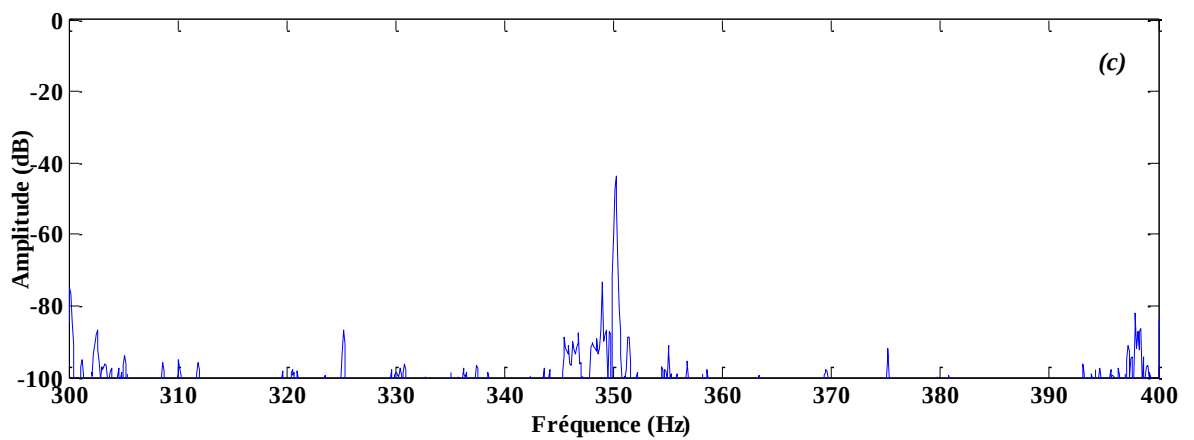
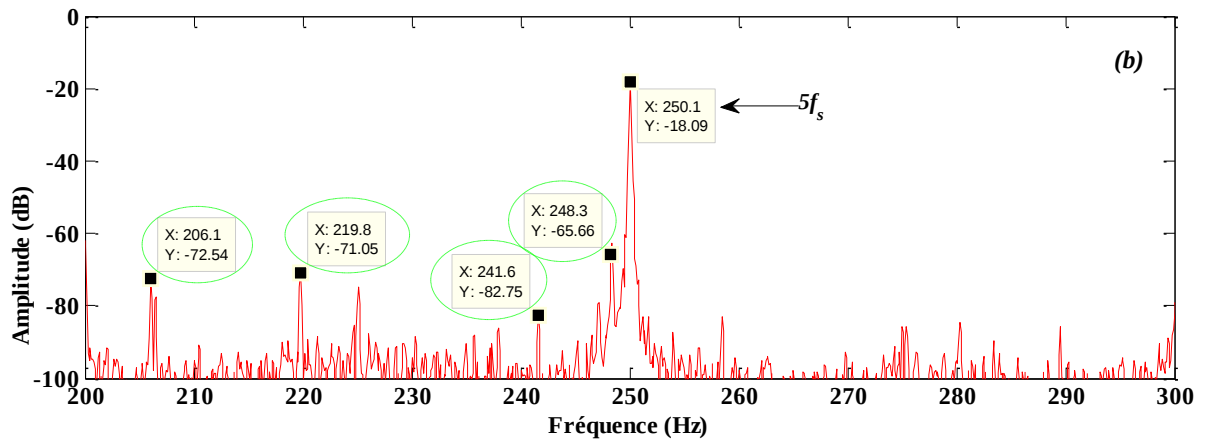
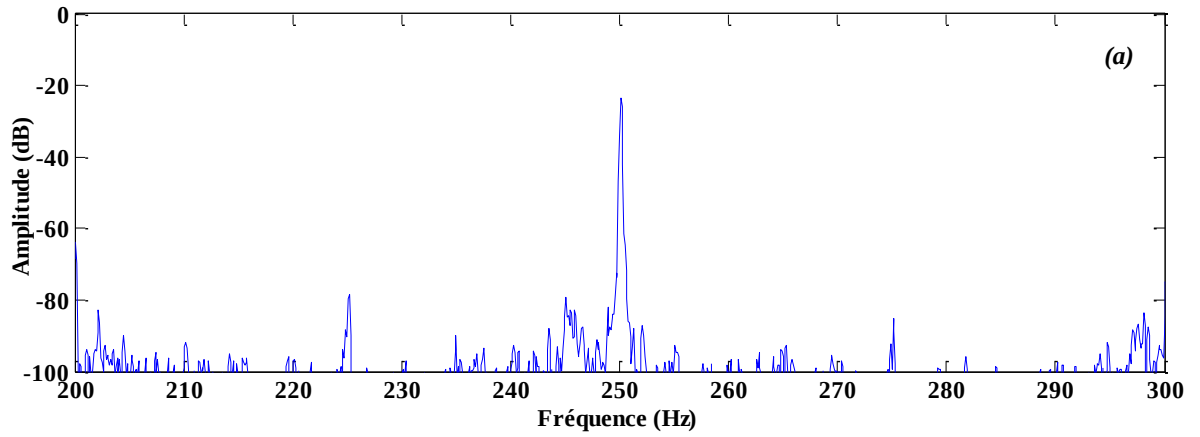


Figure (III.2): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta s=45\%$ ($g=0.004$, à vide), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (0Hz-200Hz).

D'après la figure ci-dessous, le spectre des bandes fréquentielles de 200 à 300 Hz et de 300-400Hz montrent clairement des fréquences additionnelles comme: 219.8Hz, 241.6Hz, 310.6Hz, et 325.1 Hz qui en correspondance avec la formule (III.1) sauf que 376Hz, 394.1Hz qui sont n'a pas en correspondances avec la formule ci-dessus.



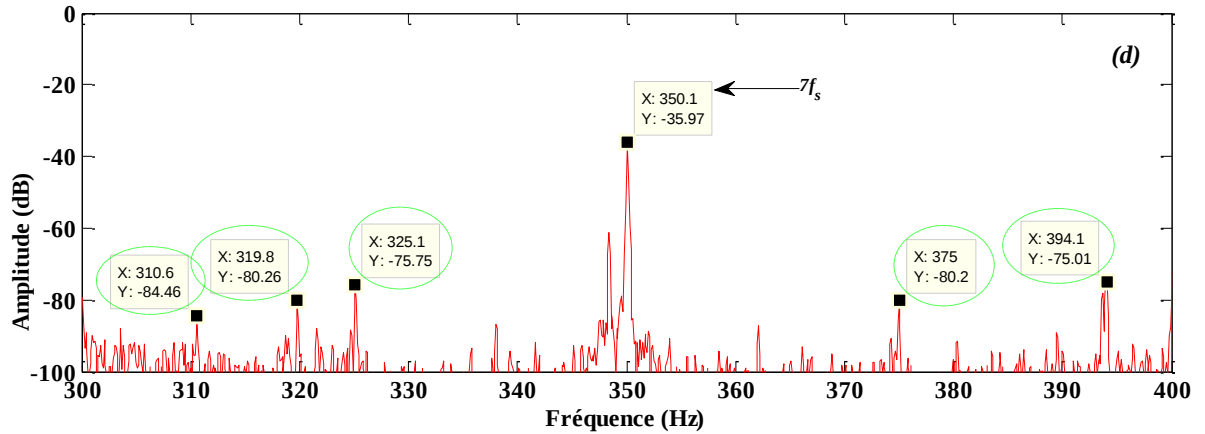
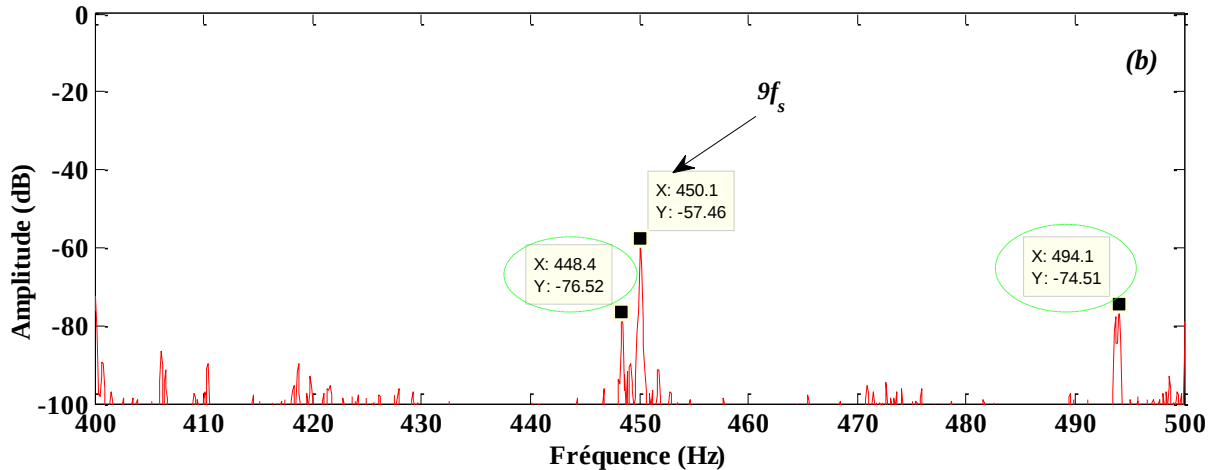
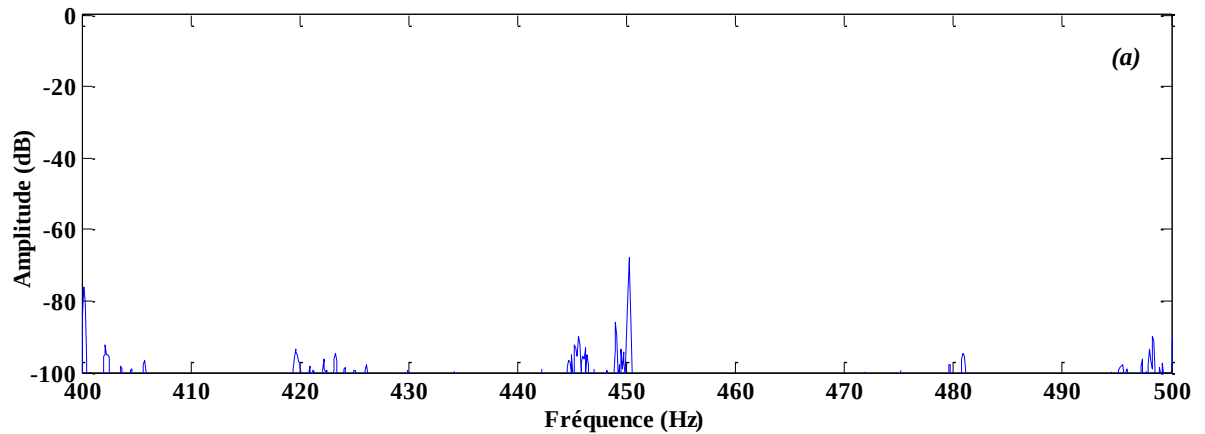


Figure (III.3): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta s=45\%$ ($g=0.004$, à vide), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (200Hz-400Hz).

La figure (III.4) montre le spectre des bandes fréquentielles de 400 à 500 Hz et de 500-600Hz montrent clairement des fréquences additionnelles qui en correspondance avec la formule (III.1) sauf que certaines fréquences qui ne correspondent pas à la formule.



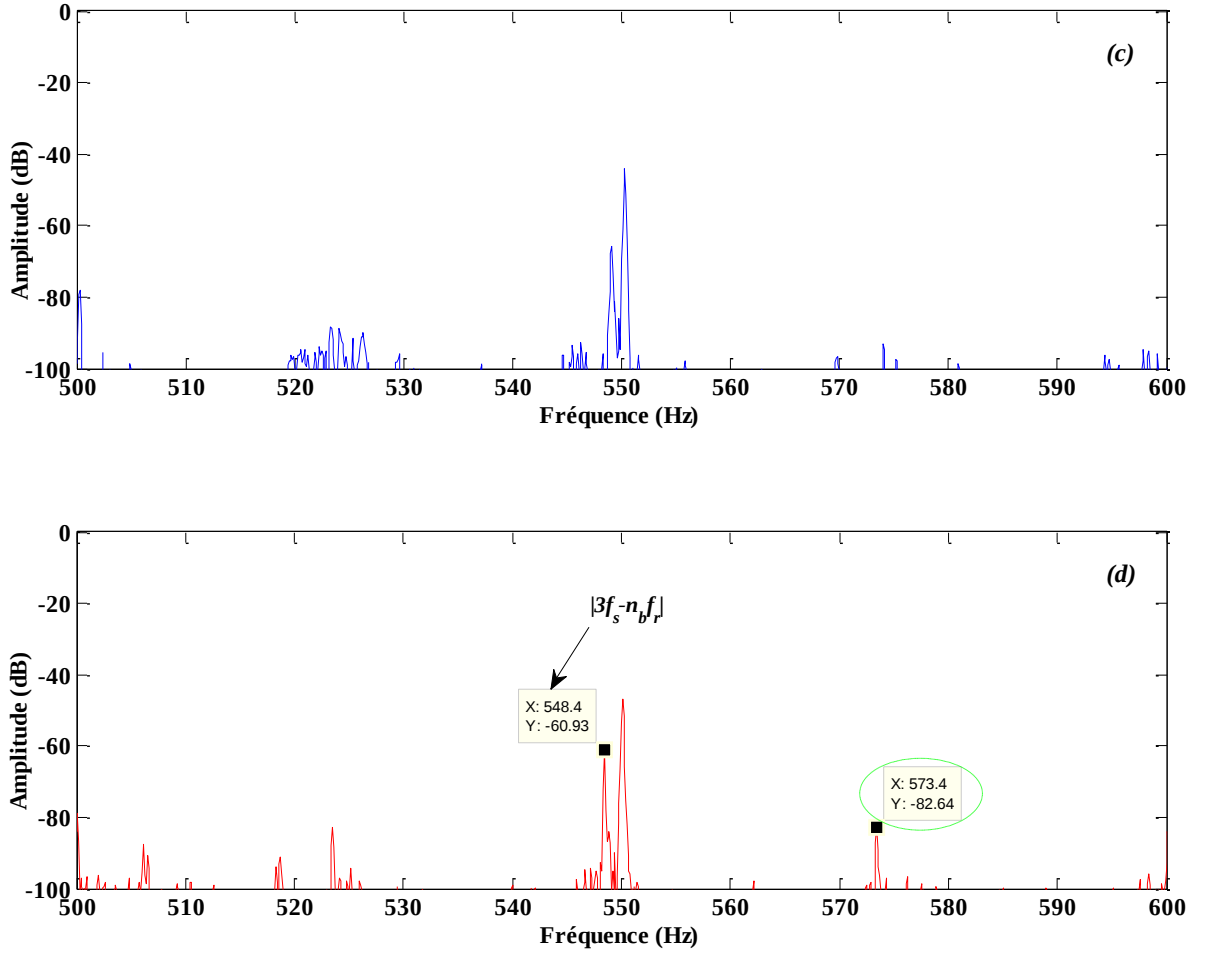
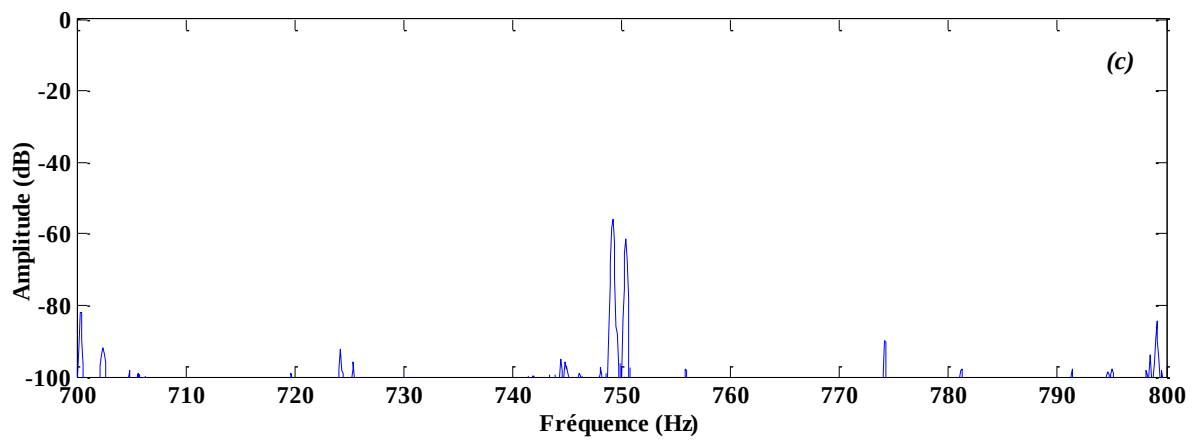
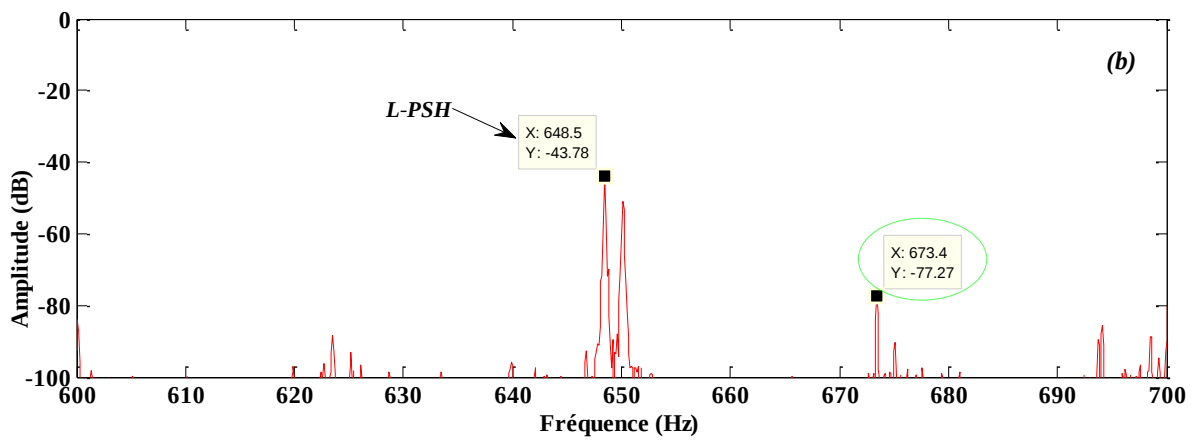
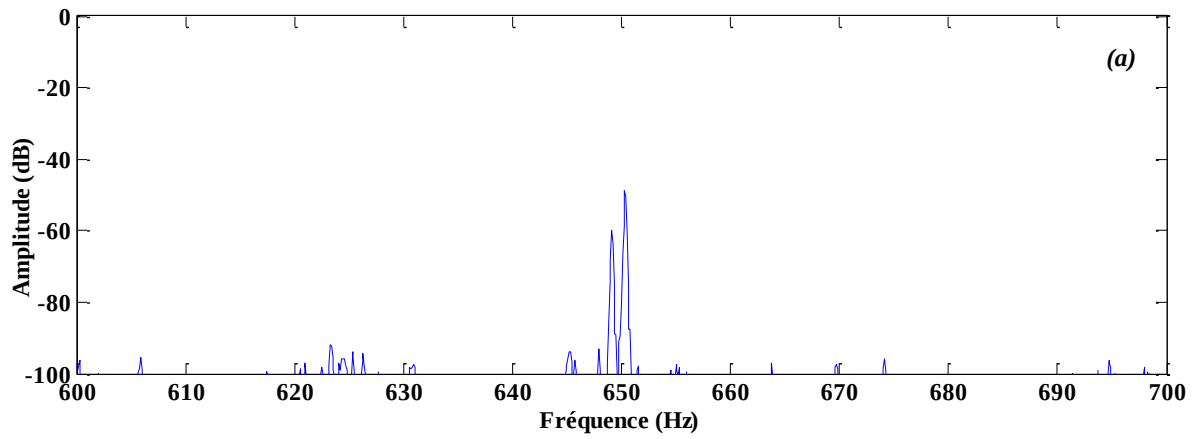


Figure (III.4): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta s=45\%$ ($g=0.004$, à vide), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (400Hz-600Hz).

L-PSH: le premier harmonique principal ou l'harmonique inférieur (Lower Principal Slot Harmonic), qui est localisé à la fréquence 648.5 Hz.

U-PSH: le deuxième harmonique principal ou l'harmonique supérieur (Upper Principal Slot Harmonic), qui est localisé à la fréquence 748.5 Hz.



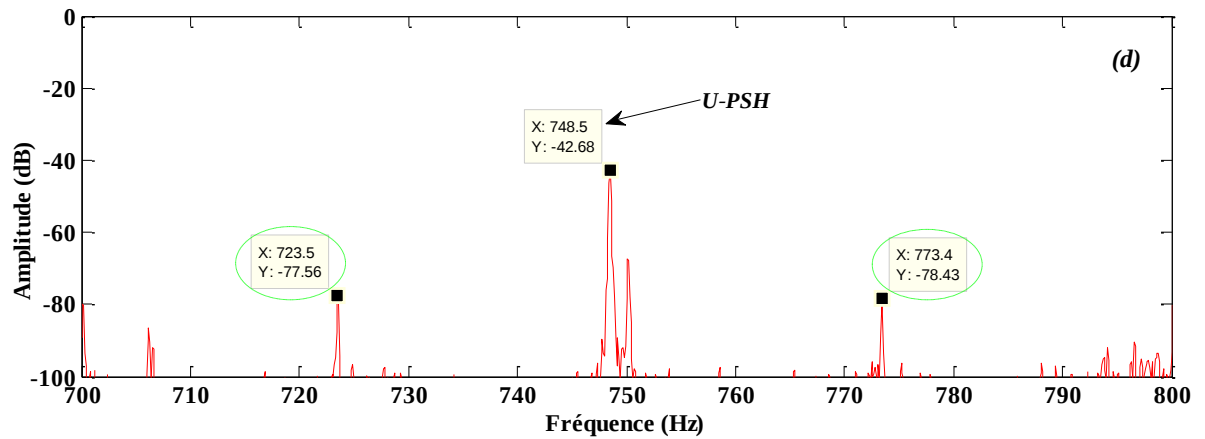


Figure (III.5): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($g=0.004$, à vide);, (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour des PSHs. (600Hz-800Hz)

III.2-1-2 Fonctionnement en charge :

Le fonctionnement de la machine en charge peut offrir aussi la possibilité d'apparition des fréquences supplémentaires. Ainsi, comme indiqué dans la figure (III.6), le spectre du courant statorique est présenté avec un glissement $s \approx 0.032$. Notre objectif est de détecter la présence d'harmoniques caractéristiques liées au défaut d'excentricité statique, telles que données par l'expression.

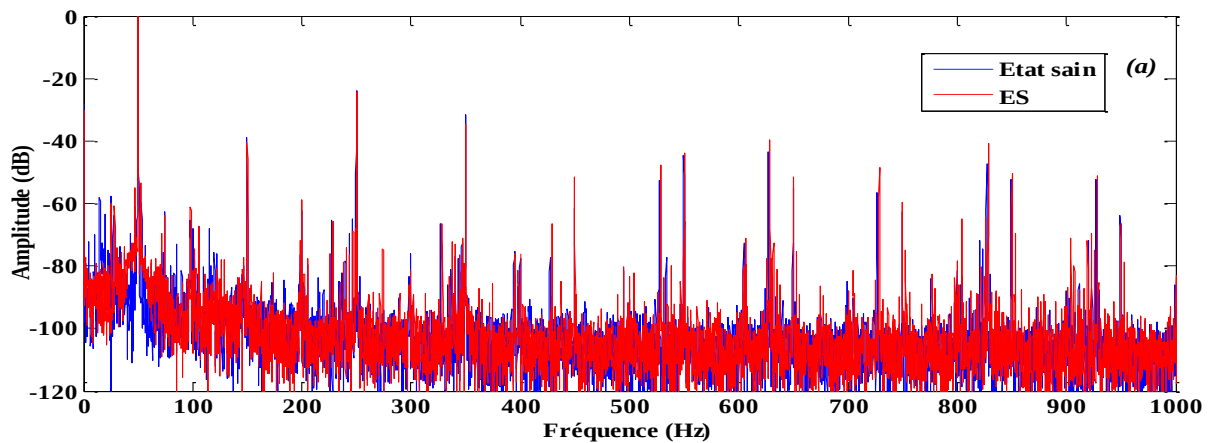
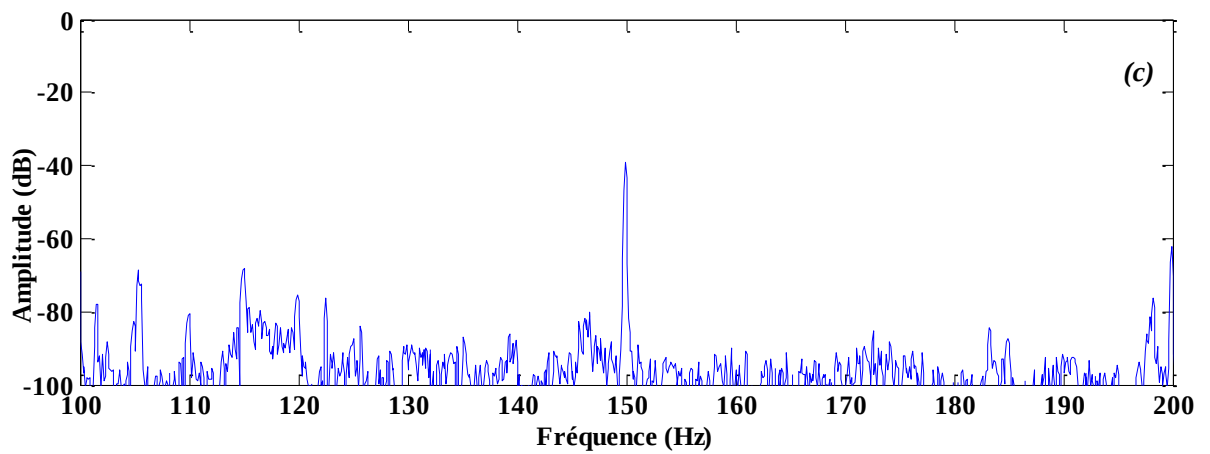
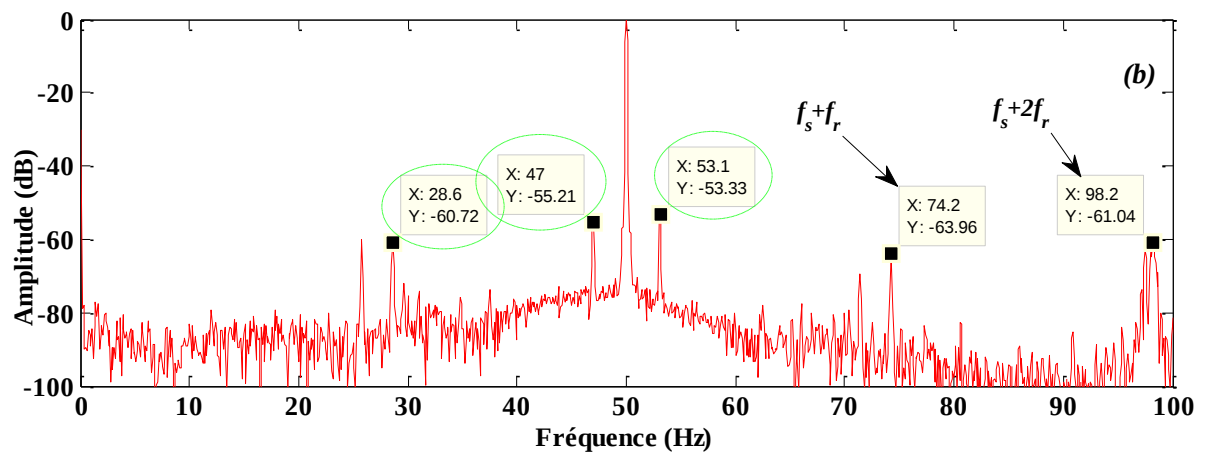
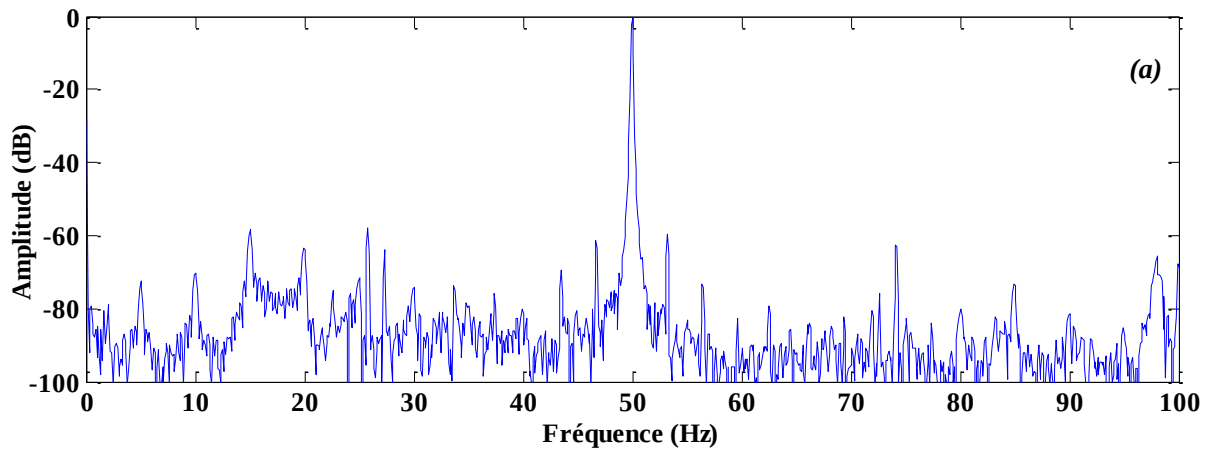


Figure (III.6): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s=45\%$ ($g=0.032$, en charge) : 0-1000 Hz

Le spectre des bandes fréquentielles de 0 à 100 Hz et de 100-200Hz présenté dans la figure (III.6) montre clairement des fréquences additionnelles qui en correspondance avec la formule (III.1) sauf que certaines fréquences qui ne correspondent pas à la formule.



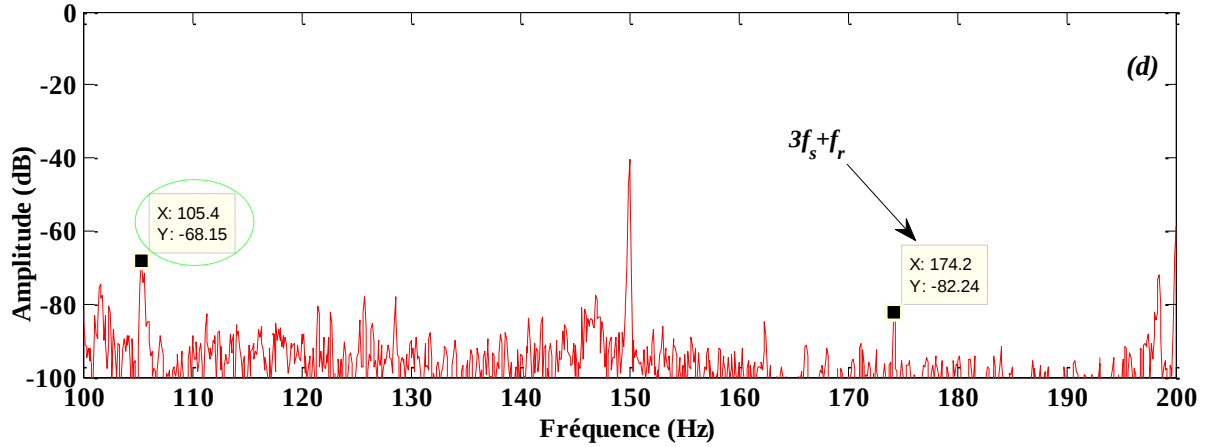
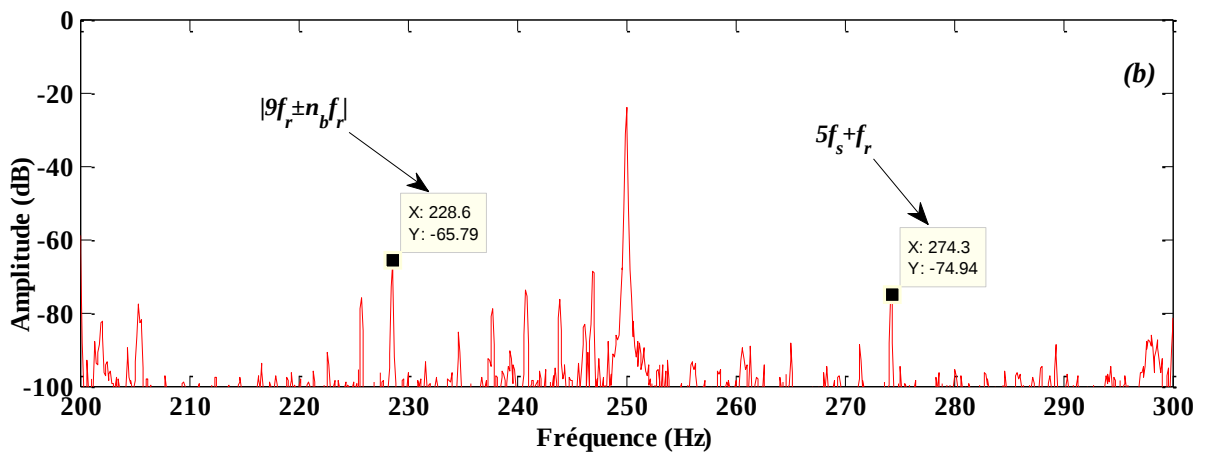
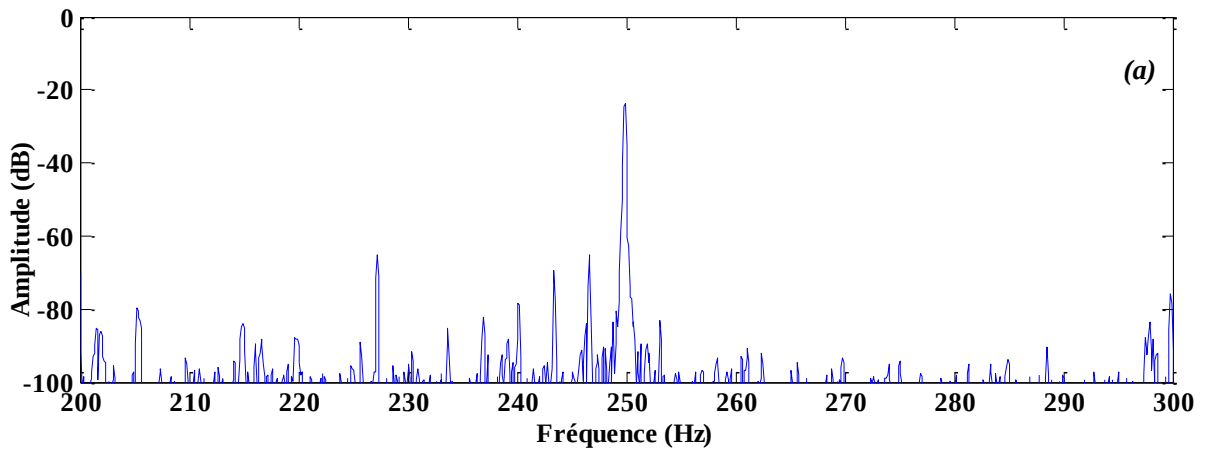


Figure (III.7): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta s=32\%$ ($g=0.032$, en charge), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (0Hz-200Hz)

D'après la figure ci-dessous, le spectre des bandes fréquentielles de 200 à 300 Hz et de 300-400Hz montrent clairement des fréquences additionnelles qui en correspondance avec la formule (III.1) sauf que certaines fréquences qui ne correspondent pas à la formule.



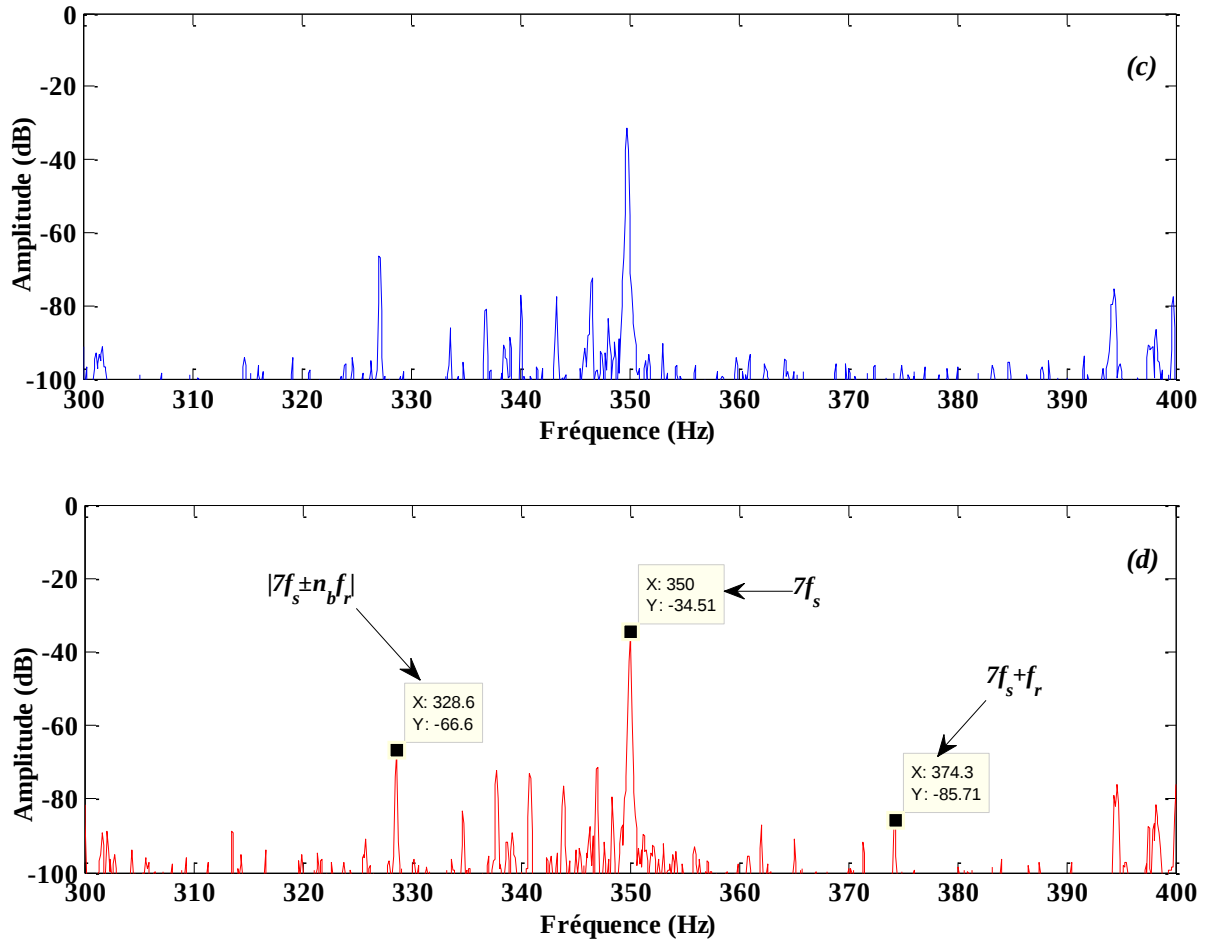
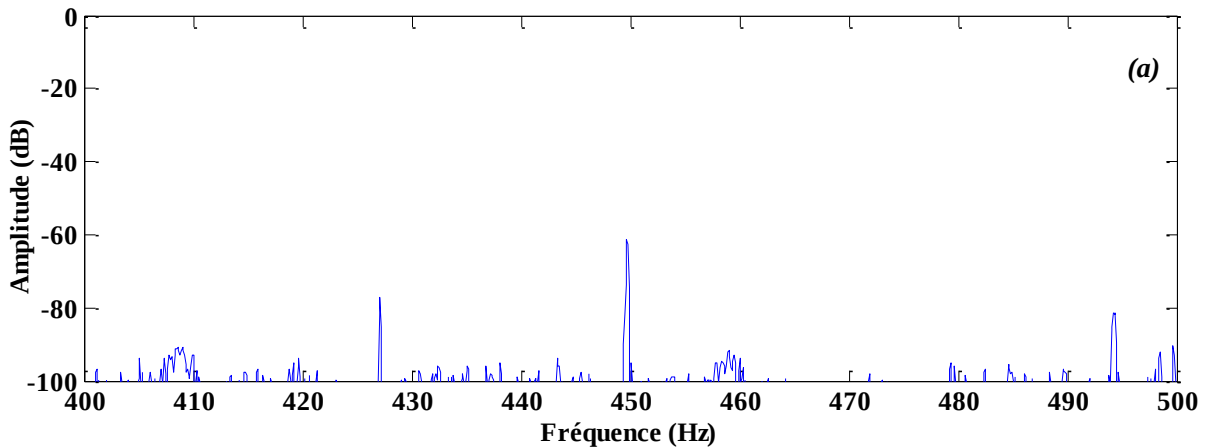


Figure (III.8): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta s=32\%$ ($g=0.032$, en charge), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (200Hz-400Hz)

Le spectre des bandes fréquentielles de 400 à 500 Hz et de 500-600Hz montrent clairement des fréquences additionnelles qui en correspondance avec la formule (III.1) sauf que certaines fréquences qui ne correspondent pas à la formule.



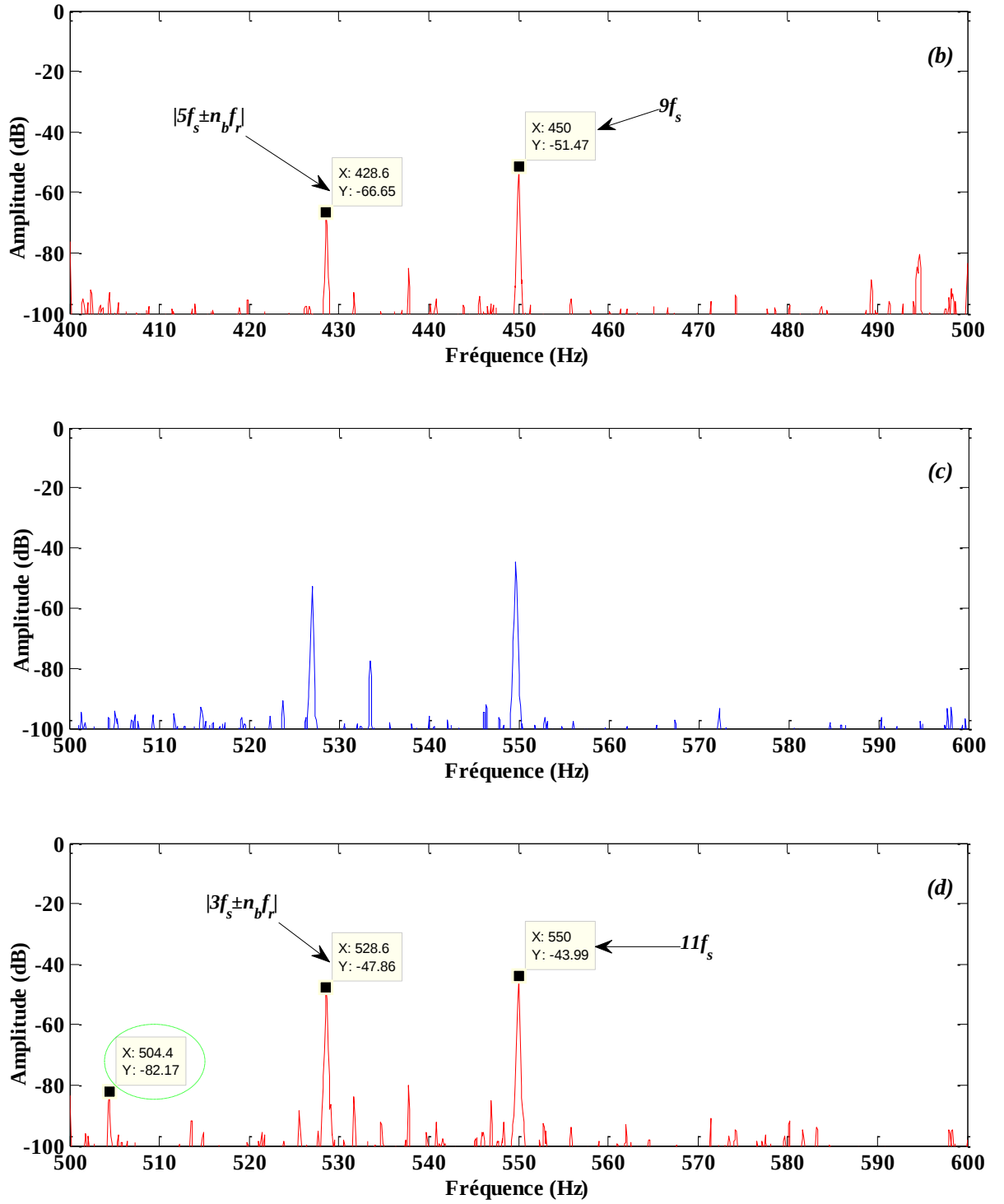
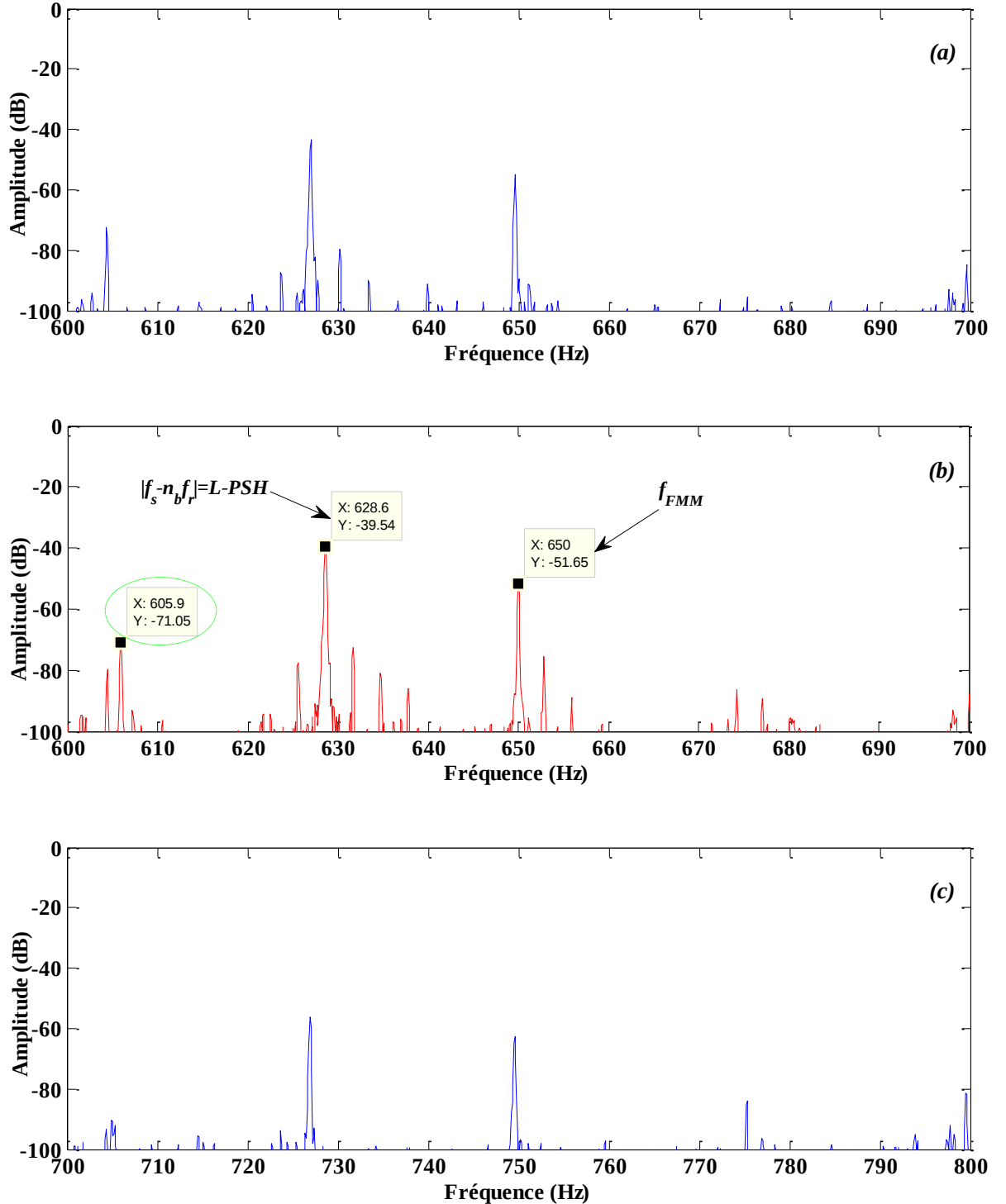


Figure (III.9): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta_s = 32\%$ ($g = 0.032$, en charge), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (400Hz-600Hz)

L-PSH: le premier harmonique principal ou l'harmonique inférieur (Lower Principal Slot Harmonic), qui est localisé à la fréquence 628.6 Hz.

U-PSH: le deuxième harmonique principal ou l'harmonique supérieur (Upper Principal Slot Harmonic), qui est localisé à la fréquence 728.6 Hz.



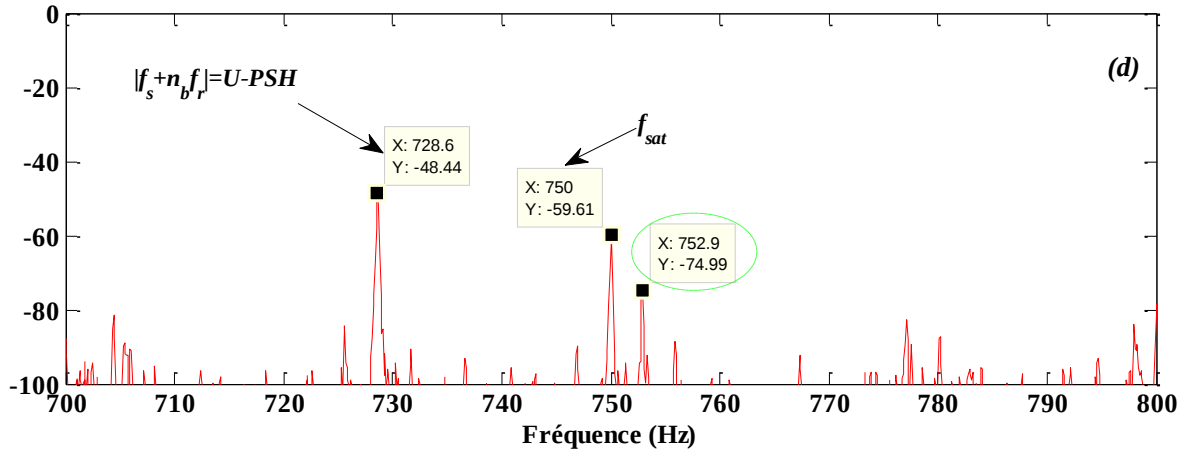


Figure (III.10): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique $\delta s=32\%$ ($g=0.032$, en charge), (a) et (b) : Autour du fondamental, (c) et (d) : Autour du fondamental (600Hz-800Hz)

Tableau (III.1): 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) ($\delta s=45\%$)
$fs - f$	25.8	25.8	-57.80	-59.97
$fs + f$	74.2	74.1	-62.69	-63.96
$L-PSH$	627.6	628.6	-43.55	-39.54
$U-PSH$	727.6	728.6	-56.40	-48.44
$ 7fs - nb fr $	327.6	328.6	-66.57	-66.60
$ 5fs - nb fr $	427.6	428.6	-77.35	-66.65
$5f$	250	250	-23.91	-24.17
$5fs + f$	274.2	274.2	Inexistant	-74.51
$7fs$	350	350	-31.51	-34.51
$7fs + f$	374.2	374.2	Inexistant	-85.60

III.2-2 Excentricité Dynamique:

L'analyse de la machine asynchrone triphasée avec la présence d'un défaut d'excentricité purement dynamique est effectuée dans cette partie.

La technique de la MCSA-FFT vise à détecter les signatures indiquant la présence soit d'un défaut d'excentricité statique seule (ES) soit d'un défaut d'excentricité dynamique seule (ED) sur notre moteur asynchrone. Elle illustre le spectre du courant statorique pour un moteur asynchrone en bon état et un autre présentant un défaut d'excentricité dynamique sous un fonctionnement à vide ($s \approx 0.4\%$).

Les fréquences proches de la fréquence fondamentale, qui sont dues à l'excentricité mixte, présentent l'avantage de ne pas nécessiter une connaissance précise de la machine asynchrone, car elles ne comportent pas de termes liés à sa conception.

$$f_{ed} = \left[(kn_b + n_d) \frac{(1-s)}{p} + v \right] \cdot f_s \quad (III.3)$$

III.2.2.1.Fonctionnement à vide:

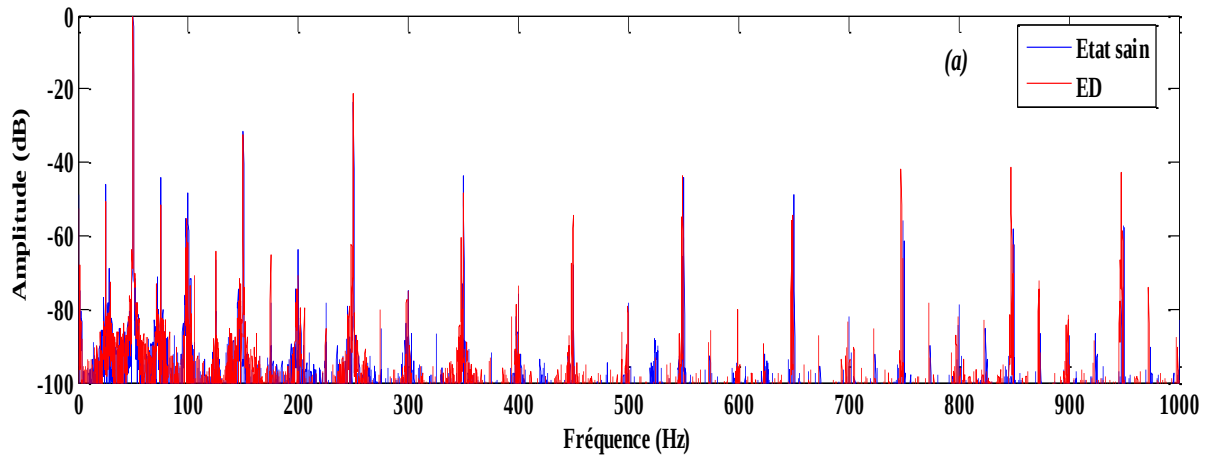
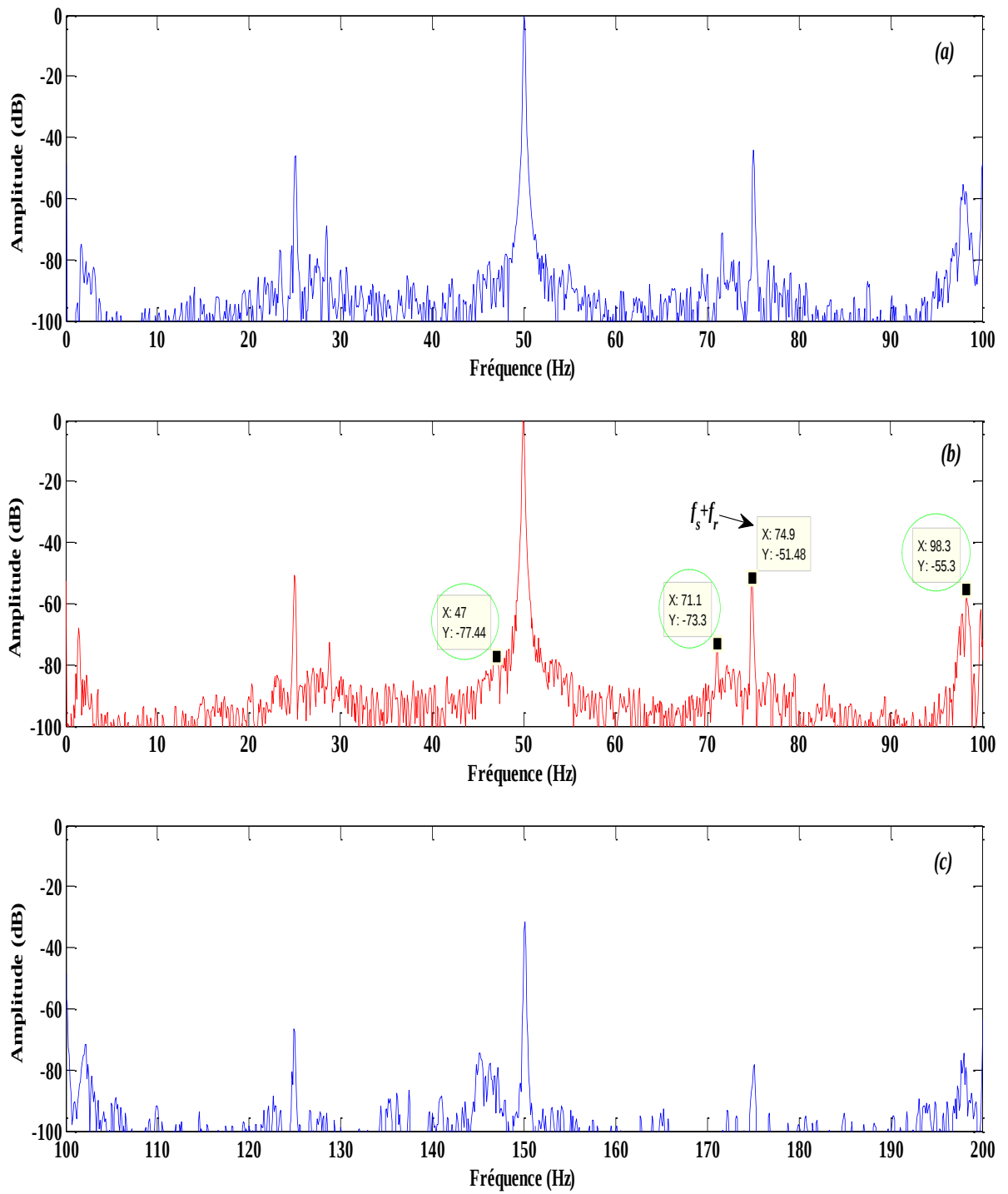


Figure (III.11): Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.004$, à vide); (a) : 0-1000 Hz

D'après la figure ci-dessous, le spectre des bandes fréquentielles de 0 à 100 Hz et de 100-200Hz montre clairement des fréquences additionnelles qui en correspondance avec la formule (III.2) sauf que certaines fréquences qui ne correspondent pas à la formule.



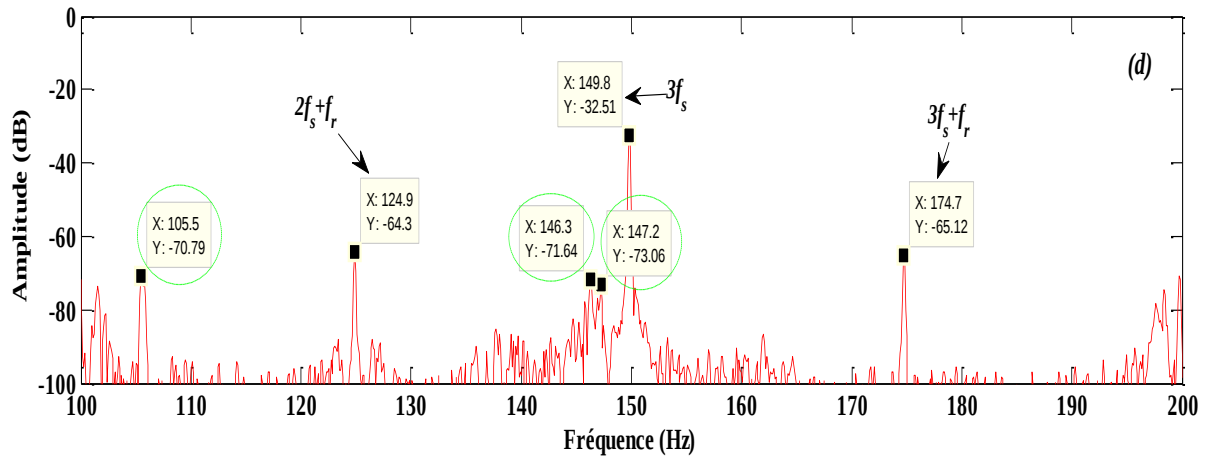
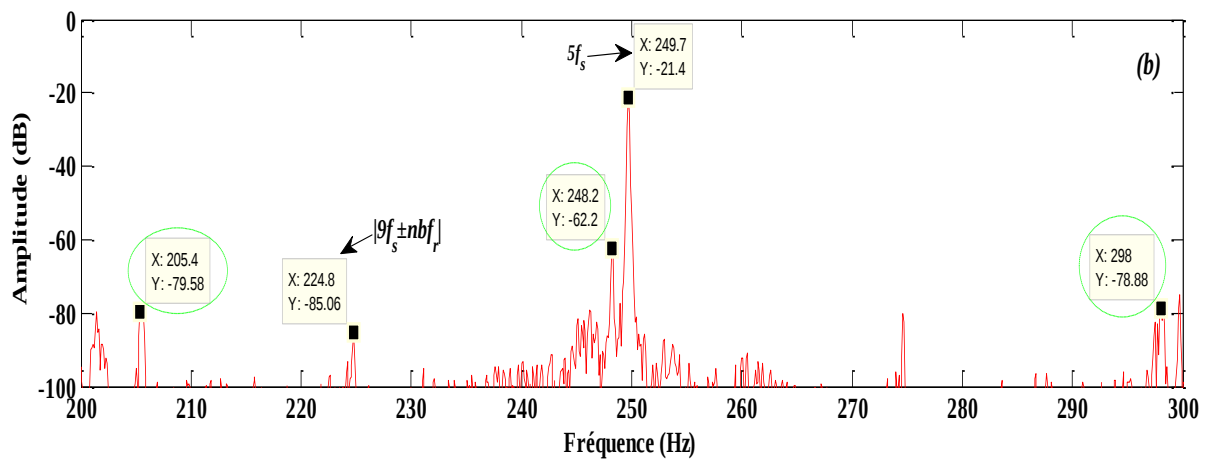
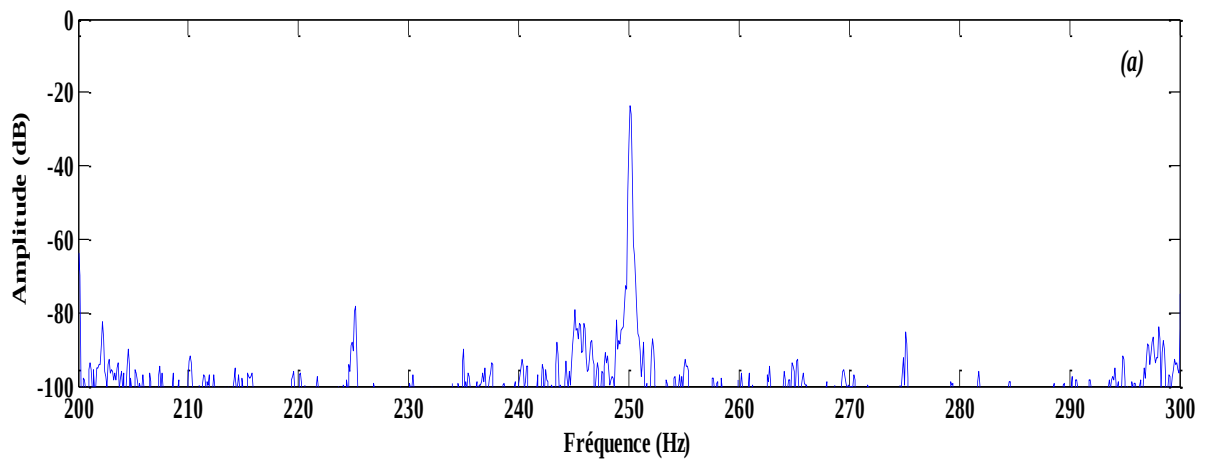


Figure (III.12): Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.004$); (a) et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental. (0Hz-200Hz)

D'après la figure ci-dessous, le spectre des bandes fréquentielles de 200 à 300 Hz et de 300-400Hz montre clairement des fréquences additionnelles qui en correspondance avec la formule (III.2) sauf que certaines fréquences qui ne correspondent pas à la formule.



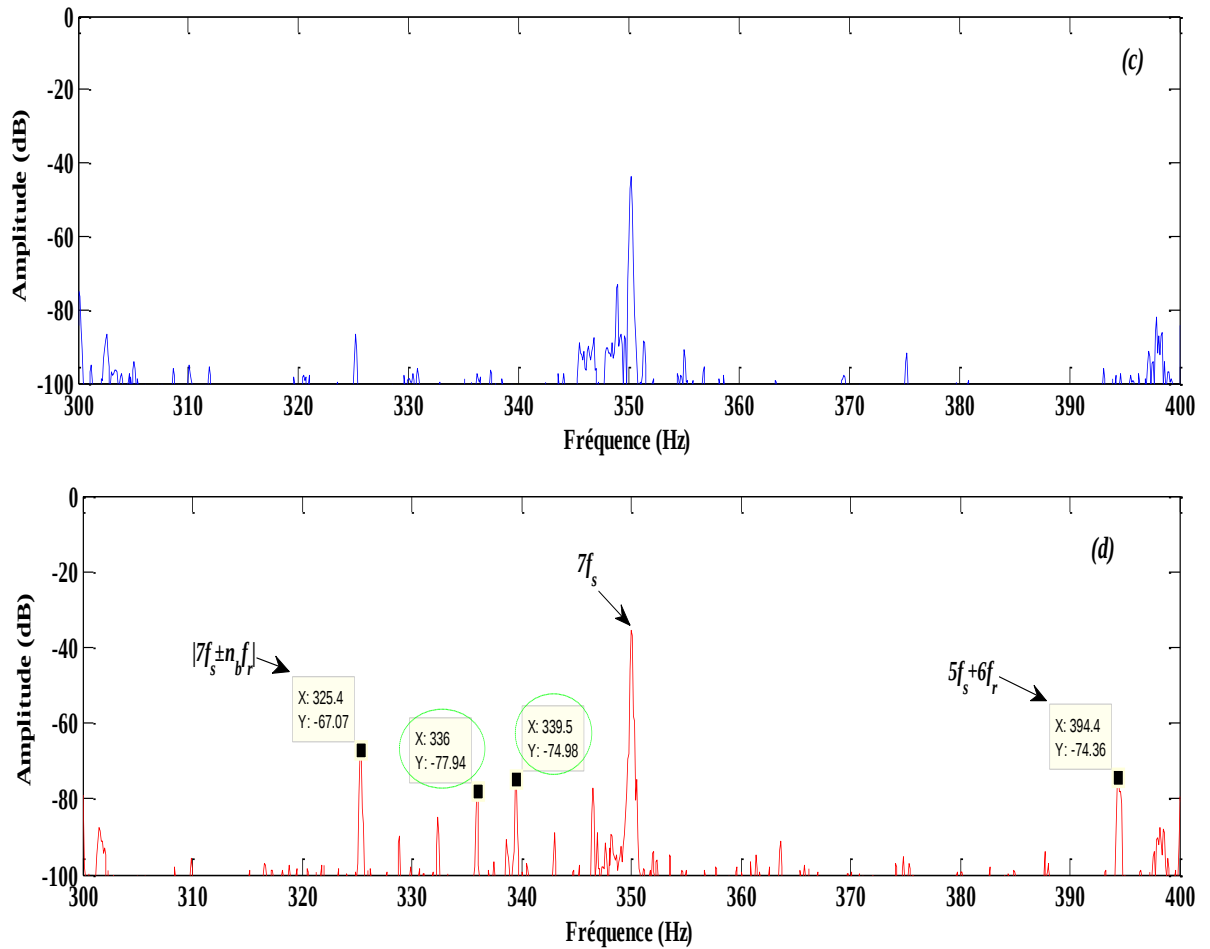
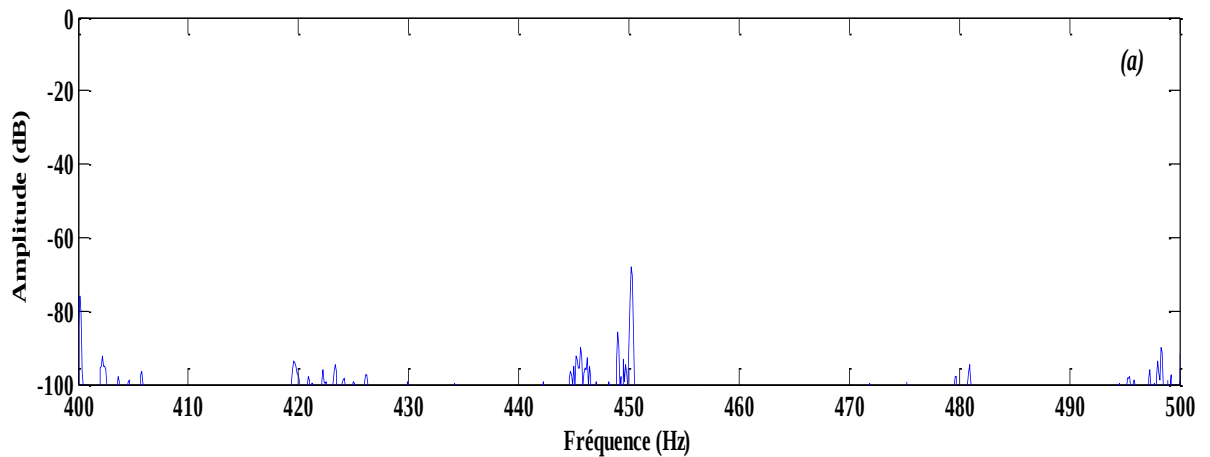


Figure (III.13): Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.004$); (a) et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental. (200Hz-400Hz)

Le spectre des bandes fréquentielles de 400 à 500 Hz et de 500-600Hz montre clairement des fréquences additionnelles qui en correspondance avec la formule (III.2) sauf que certaines fréquences qui ne correspondent pas à la formule.



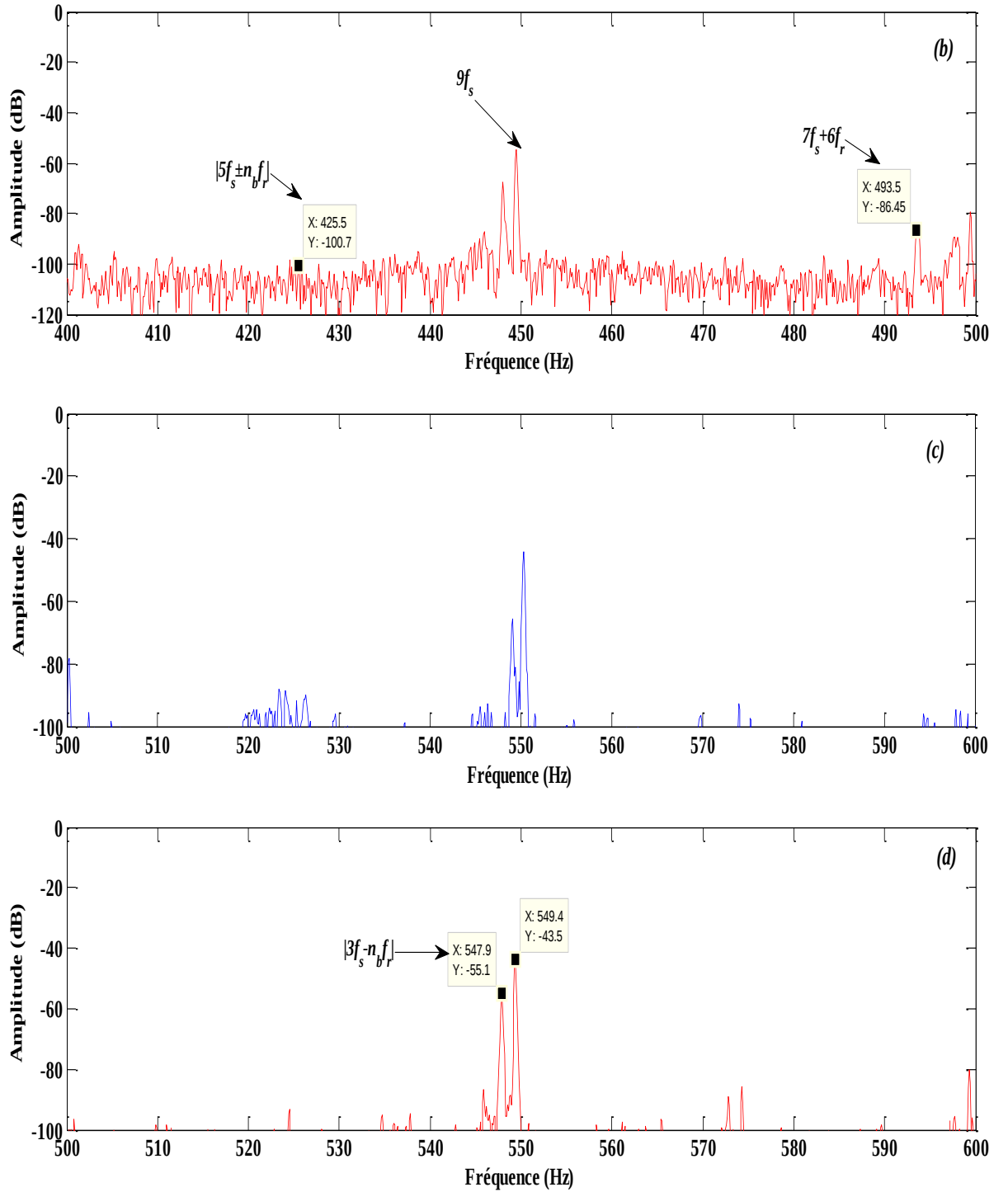
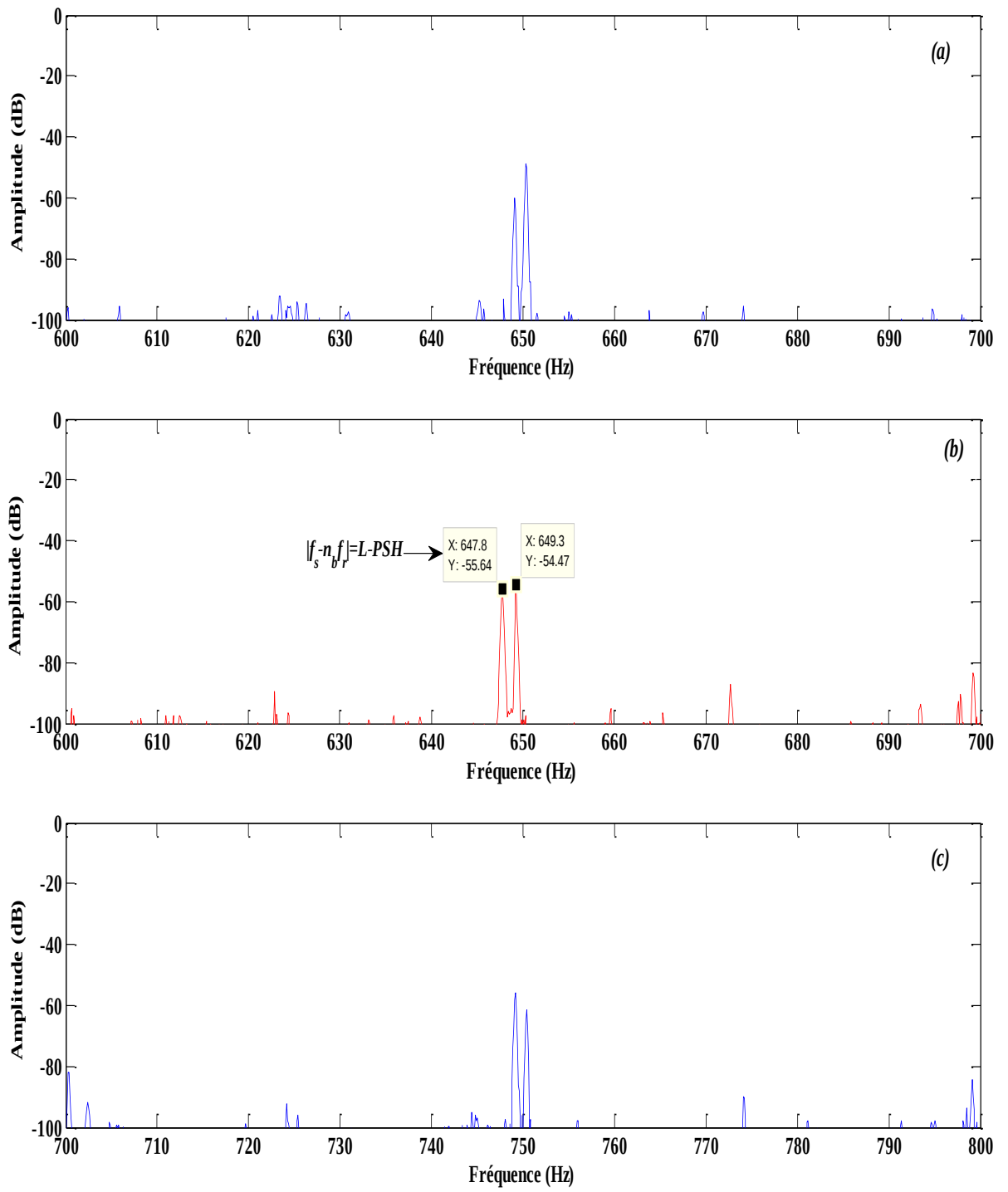


Figure (III.14): Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.004$); (a) et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental. (400Hz-600Hz)

L-PSH: le premier harmonique principal ou l'harmonique inférieur (Lower Principal Slot Harmonic), qui est localisé à la fréquence 647.8 Hz.

U-PSH: le deuxième harmonique principal ou l'harmonique supérieur (Upper Principal Slot Harmonic), qui est localisé à la fréquence 747.8 Hz.



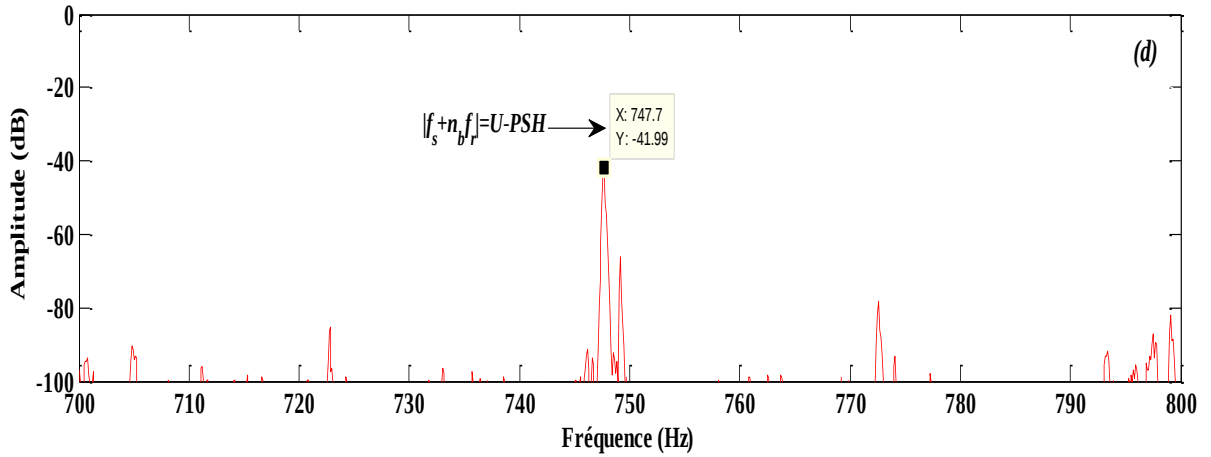


Figure (III.15): Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.004$); (a) et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental. (600Hz-800Hz)

III.2.2.2. Fonctionnement en charge:

Le fonctionnement de la machine sous charge offre la possibilité d'apparition des fréquences cachées. Ainsi, comme indiqué dans la figure (III.16), le spectre du courant statorique est présenté avec un glissement $s \approx 0.032$.

Notre objectif est de détecter la présence d'harmoniques caractéristiques liées au défaut d'excentricité dynamique.

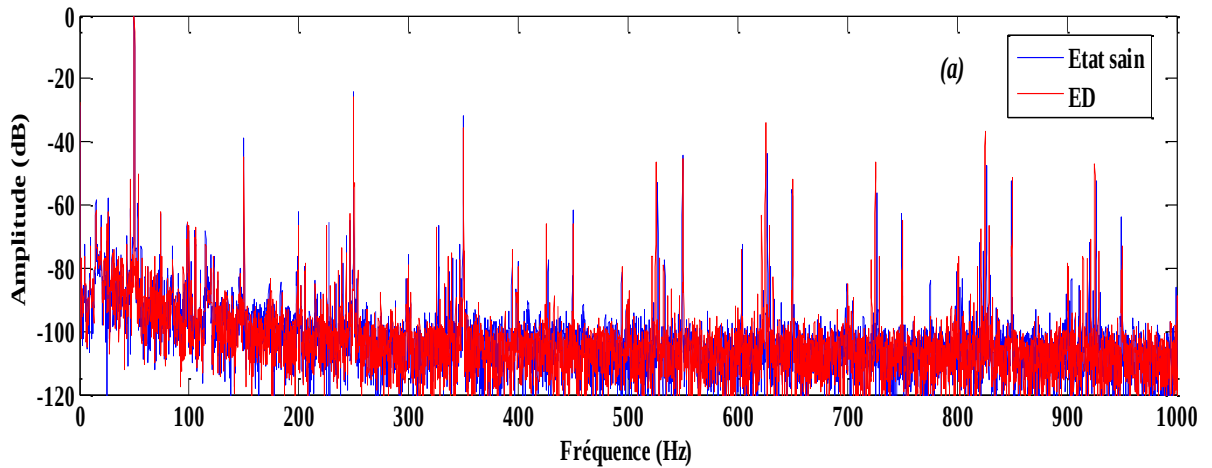
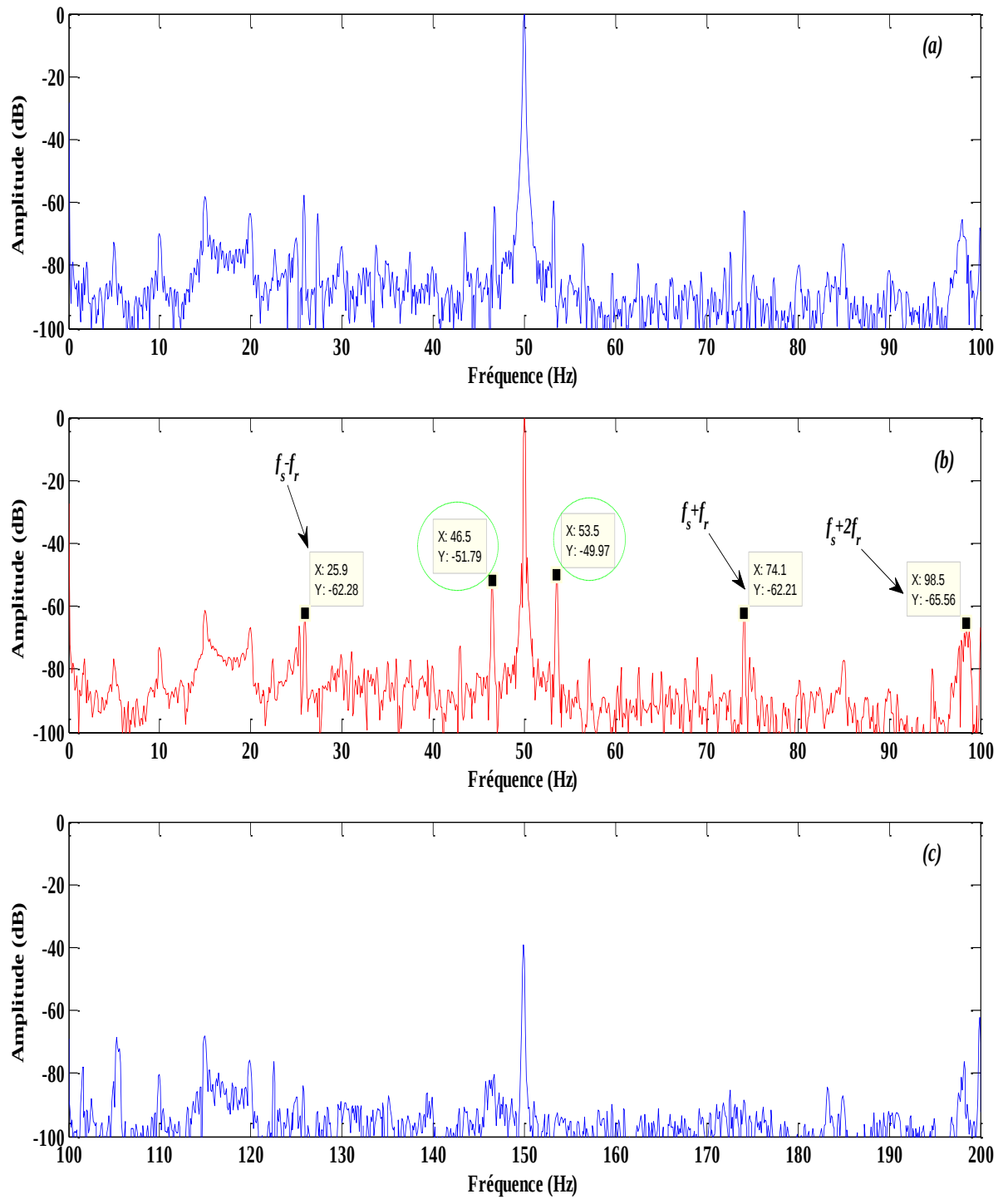


Figure (III.16): Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.035$); (a) et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental 0 à 1000Hz

D'après la figure ci-dessous, le spectre des bandes fréquentielles de 0 à 100 Hz et de 100-200Hz montre clairement des fréquences additionnelles qui en correspondance avec la formule (III.2) sauf que certaines fréquences qui ne correspondent pas à la formule.



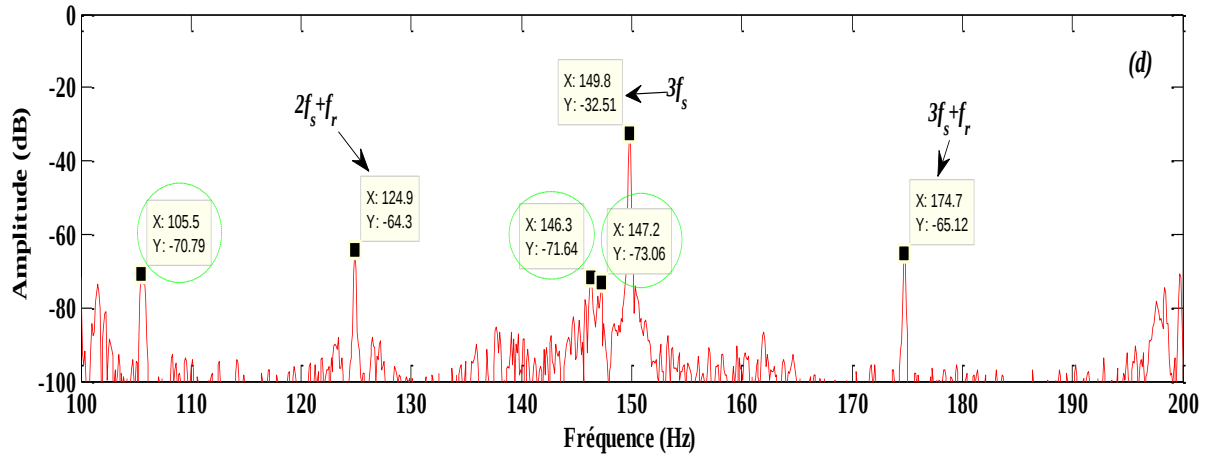
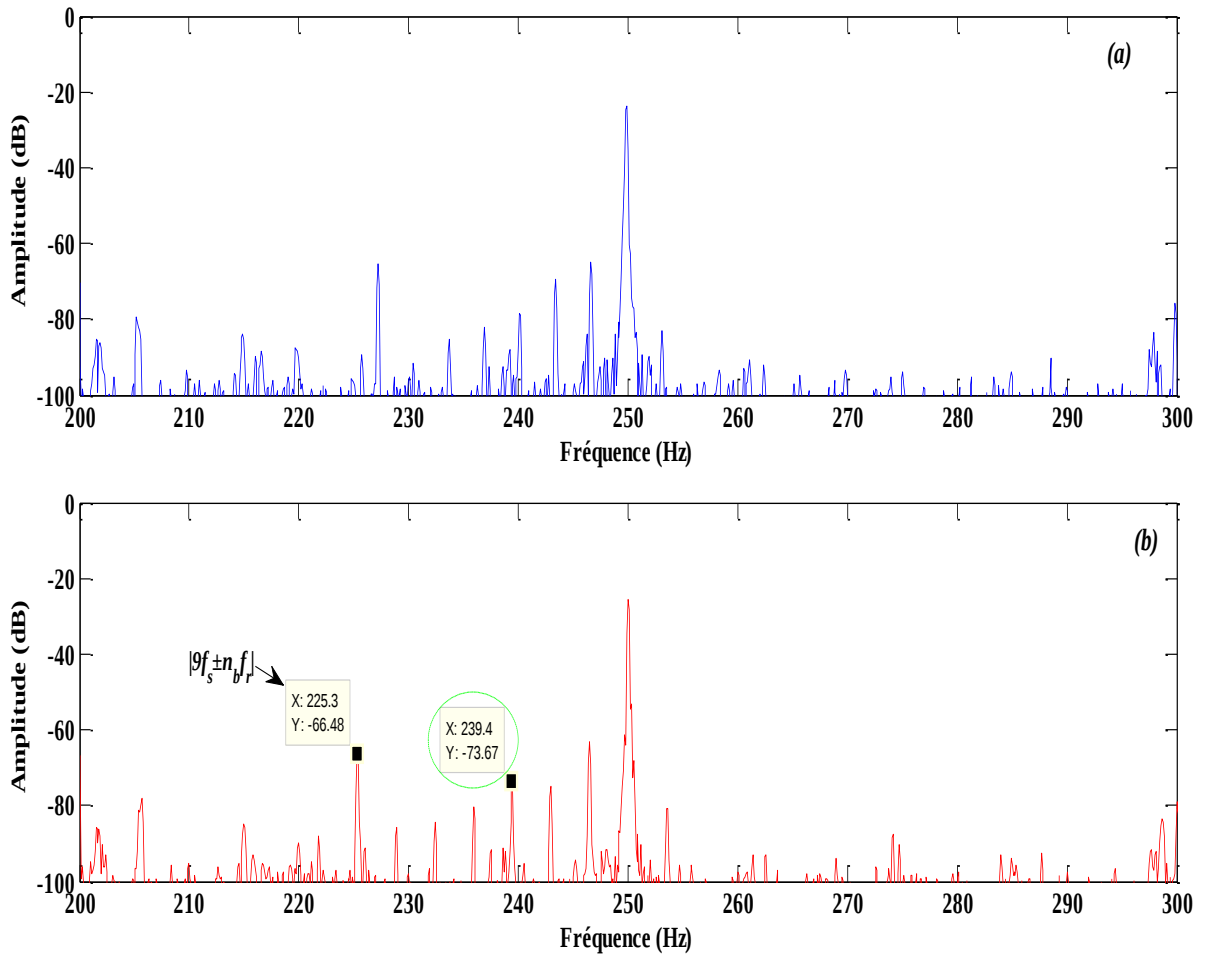


Figure (III.17): Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.035$); (a) et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental (0Hz-200Hz)

Le spectre des bandes fréquentielles de 200 à 300 Hz et de 300-400Hz montrent clairement des fréquences additionnelles qui en correspondance avec la formule (III.2) sauf que certaines fréquences qui ne correspondent pas à la formule.



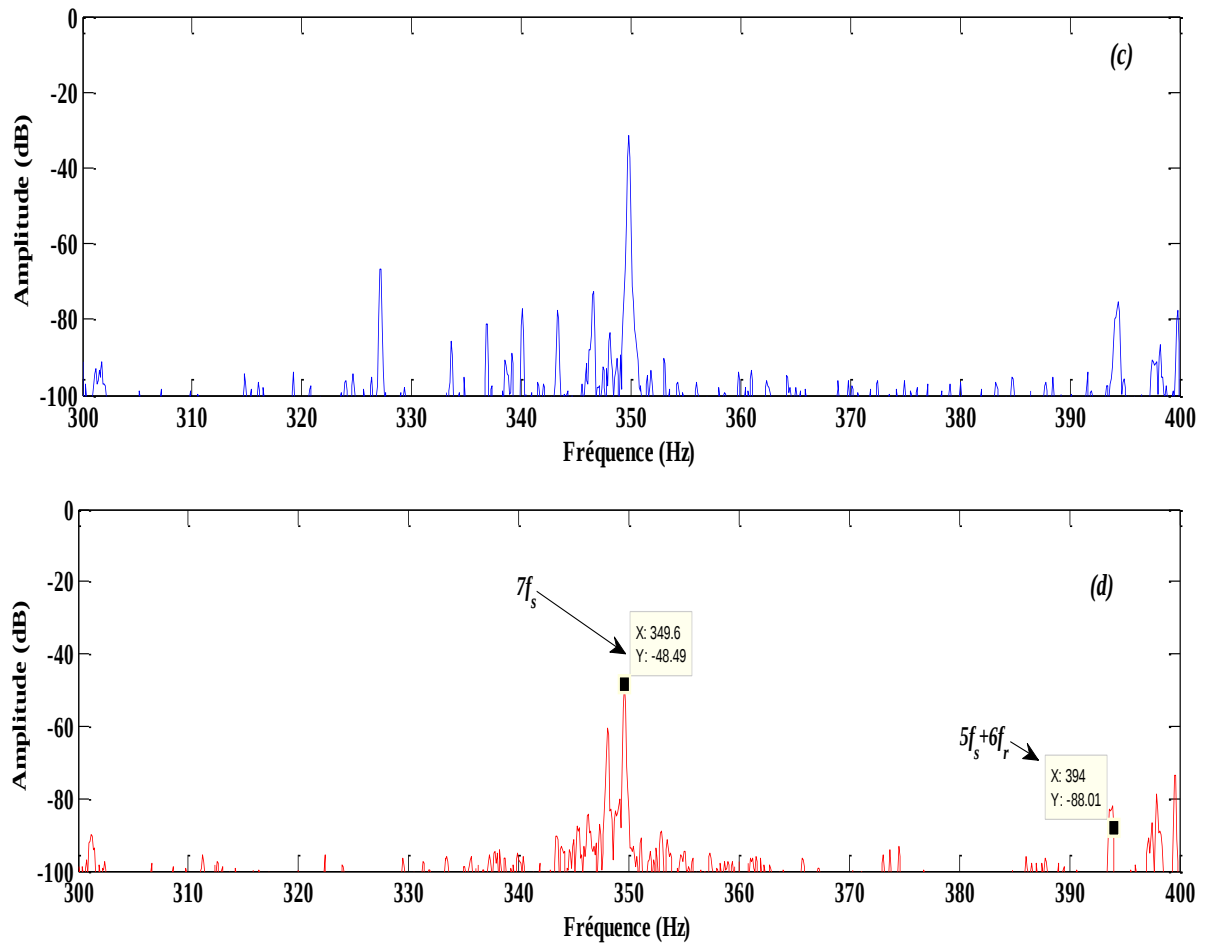
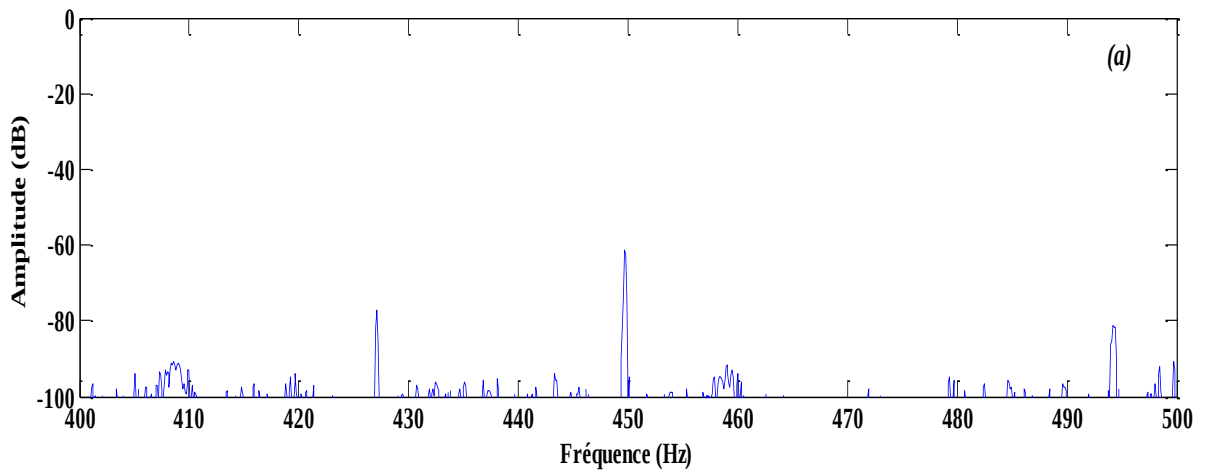


Figure (III.18): Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.035$); (a) et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental (200Hz-400Hz)

D'après la figure ci-dessous, le spectre des bandes fréquentielles de 400 à 500 Hz et de 500-600Hz montre clairement des fréquences additionnelles qui en correspondance avec la formule (III.2) sauf que certaines fréquences qui ne correspondent pas à la formule.



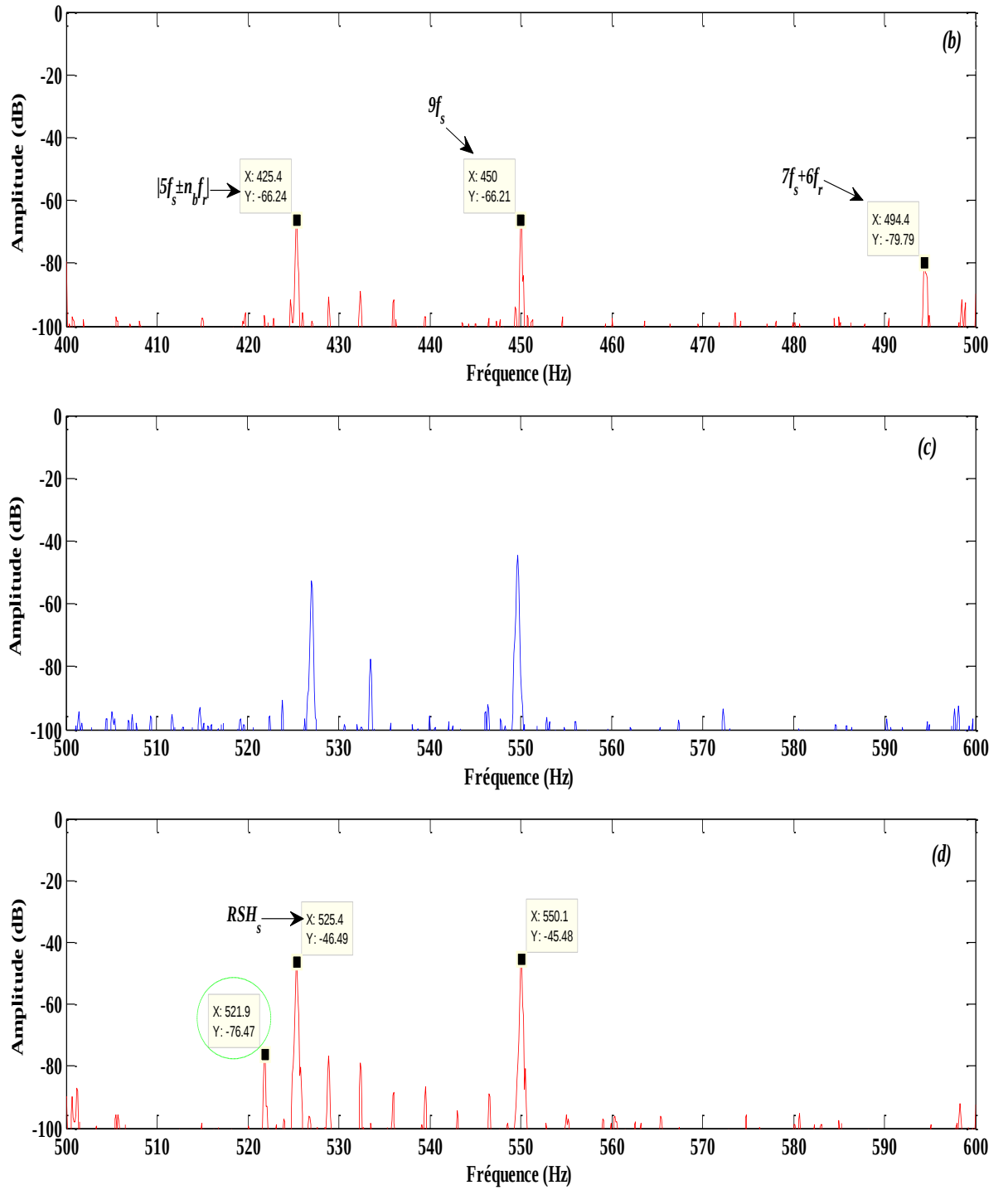
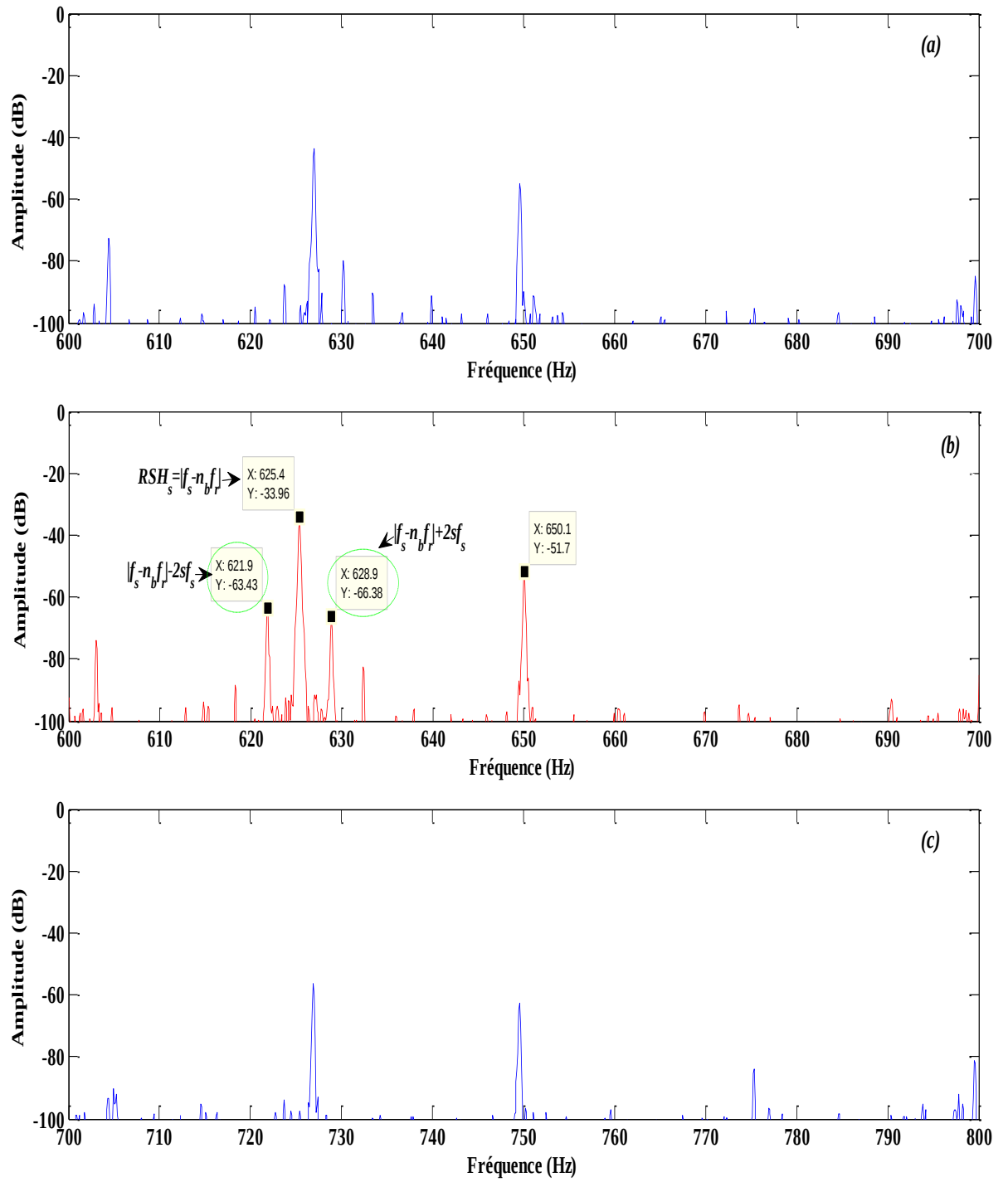


Figure (III.19): Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.035$); (a) et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental (400Hz-600Hz)

L-PSH: le premier harmonique principal ou l'harmonique inférieur (Lower Principal Slot Harmonic), qui est localisé à la fréquence 625.4 Hz.

U-PSH: le deuxième harmonique principal ou l'harmonique supérieur (Upper Principal Slot Harmonic), qui est localisé à la fréquence 725.4 Hz.



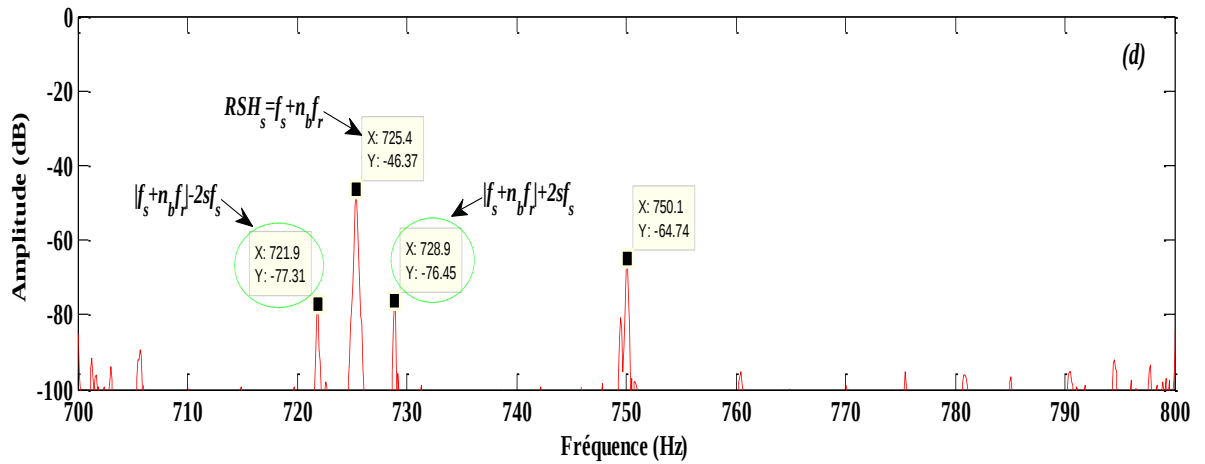


Figure III.20. Spectre du courant statorique à vide avec un degré d'excentricité dynamique ($g=0.035$); (a) et (c) : Autour du fondamental, (b) et (d) : Autour de fondamental (600Hz-800Hz)

Tableau (III.2): 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
$L-PSH$	625.5	625.4	-43.55	-33.96
$U-PSH$	725.5	725.4	-56.40	-46.37
$ 7f_s - nb f_r $	325.5	325.4	-66.57	-67.07
$ 5f_s - nb 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

III.3- La Méthode De MCSA-DWT:

La méthode de la transformée en ondelettes (TOD) est devenue une technique prisée dans la détection des défauts dans les machines tournantes. Contrairement aux filtres classiques qui visent à supprimer ou à conserver une partie spécifique du signal, la TOD permet une analyse temps-fréquence locale, adaptée aux signaux non stationnaires et transitoires.

En passant d'une superposition d'ondes sinusoïdales à une superposition d'ondelettes, elle offre une représentation plus adaptée à la nature changeante de ces signaux.

III.3-1 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 :

$$N_{SA} = \text{int} \left[\frac{\log\left(\frac{f_e}{f_s}\right)}{\log(2)} \right] \quad (\text{III.4})$$

Pour avoir des indications plus claires des défauts, on peut ajouter 1 ou 2 à la formule précédente, comme [39]:

$$N_{SA} = \text{int} \left[\frac{\log\left(\frac{f_e}{f_s}\right)}{\log(2)} \right] + 1 \text{ ou } + 2 \quad (\text{III.5})$$

[40] a 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 :

$$N_{SA} = \text{int} \left[\frac{\log\left(\frac{12800}{50}\right)}{\log(2)} \right] + 1 = 8 + 1 = 9 \text{ Niveaux} \quad (\text{III.6})$$

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 (III.3) montre les bandes fréquentielles de chaque niveau.

Tableau (III.3): Bandes fréquentielles des détails ($f_e=12.8$ kHz).

Bandes fréquentielles des niveaux décomposition (Hz)	
$d1$	3200 - 6400
$d2$	1600 - 3200
$d3$	800 - 1600
$d4$	400 - 800
$d5$	200 - 400
$d6$	100 - 200
$d7$	50 - 100
$d8$	25 - 50
$d9$	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 :

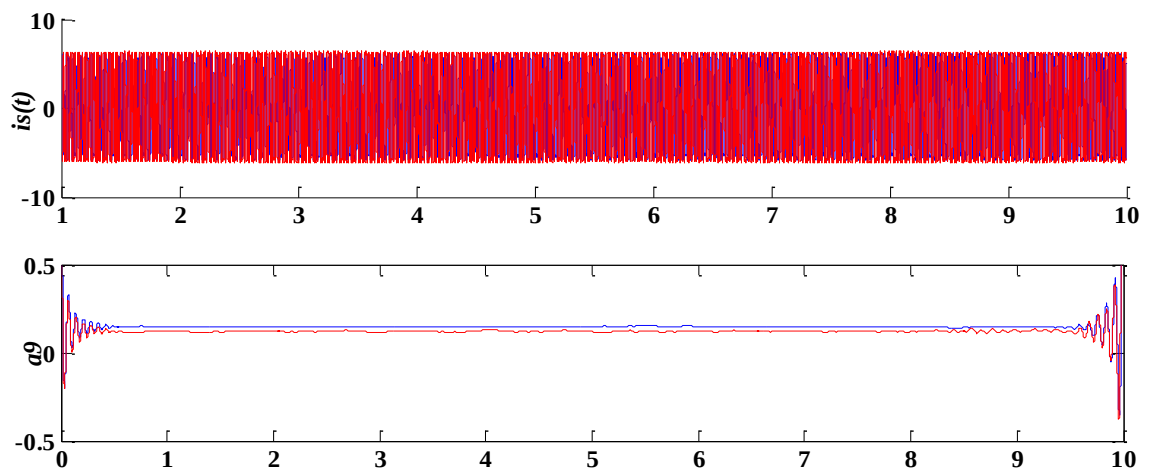
$$E_j = \sum_{n=1}^N |d_j(n)|^2 \quad (\text{III.7})$$

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

III.4- Technique d'ondelettes pour le défaut d'excentricité rotorique:

III.4-1 Défaut d'excentricité statique:

Cette approche repose sur l'analyse des signaux à différents niveaux de détail grâce à la décomposition en ondelettes, incluant les bandes de fréquence de 0 Hz à la moitié de la fréquence d'échantillonnage. Les figures (III-21), (III-22), (III-23) et (III-24) comparent la Tension de Déphasage (TOD) du courant statorique et l'énergie de chaque détail dans différentes conditions : à vide et en charge, et dans un état sain ou avec un défaut d'excentricité statique.



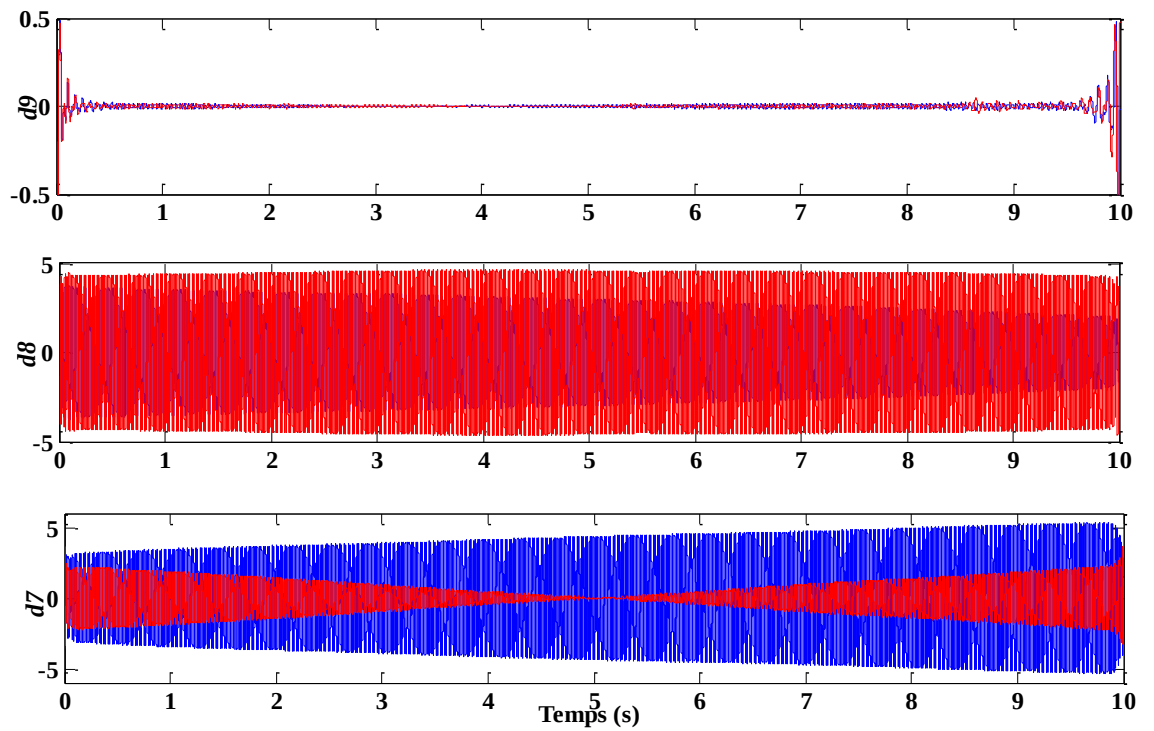


Figure (III.21): Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement à vide (ES) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

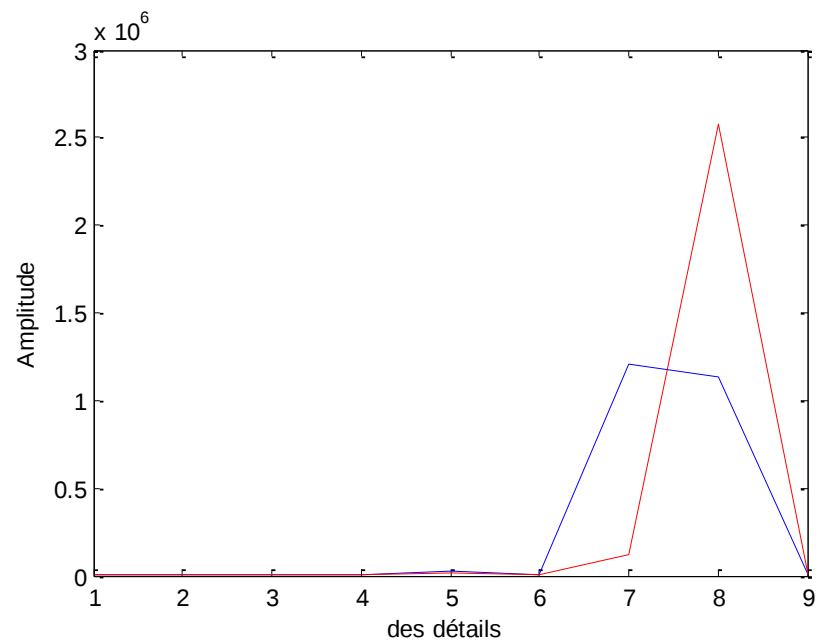
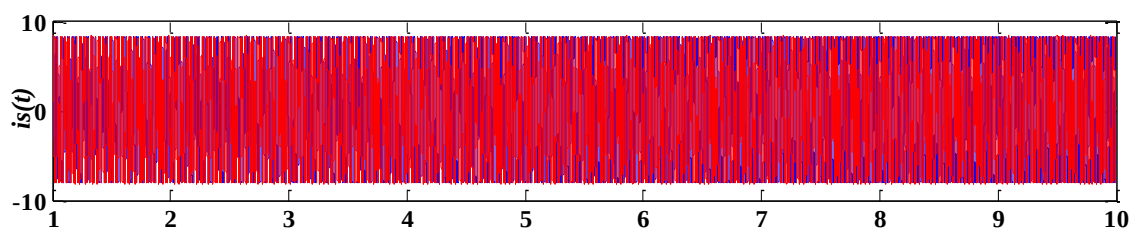


Figure (III.22): Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (ES).



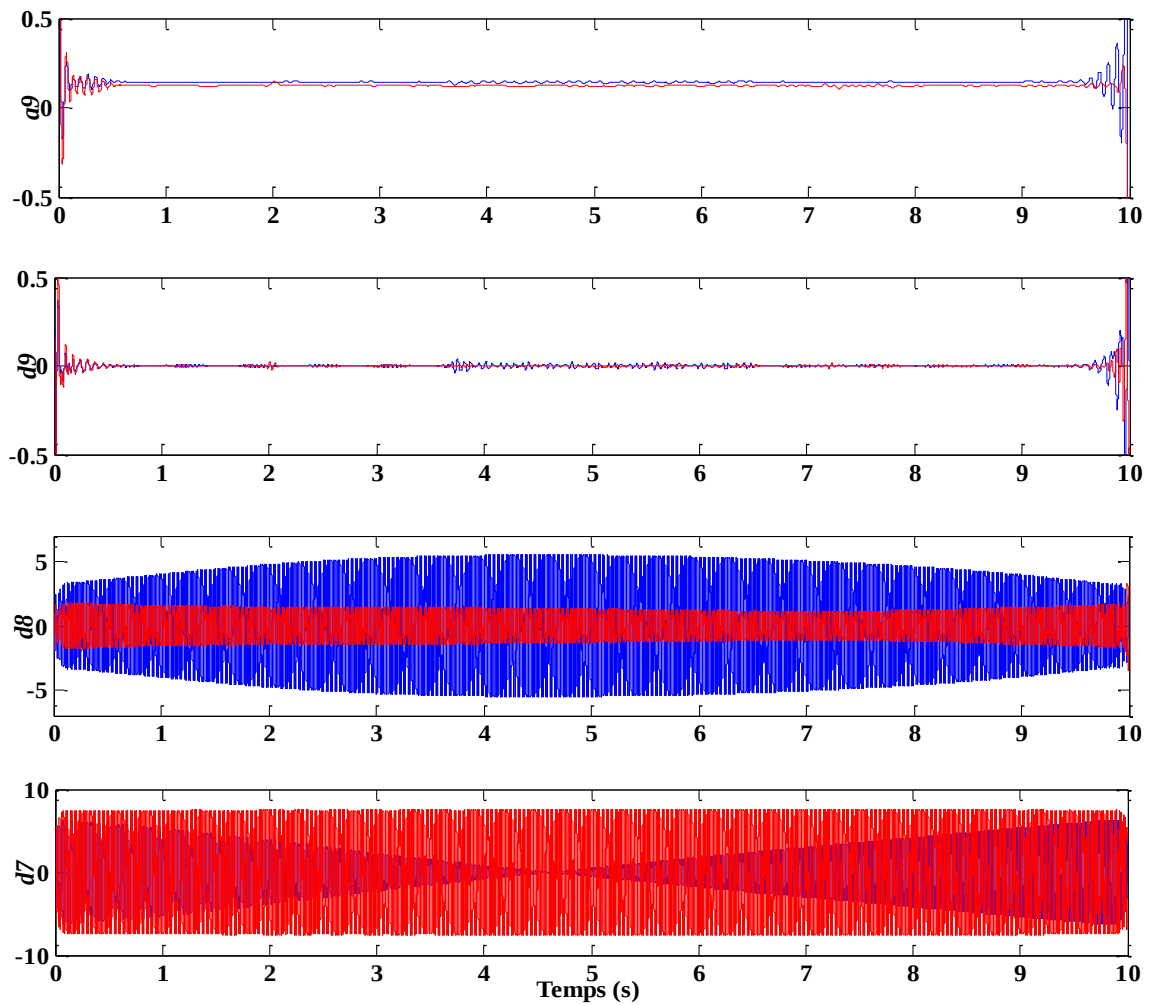


Figure (III.23): Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement en charge (ES) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

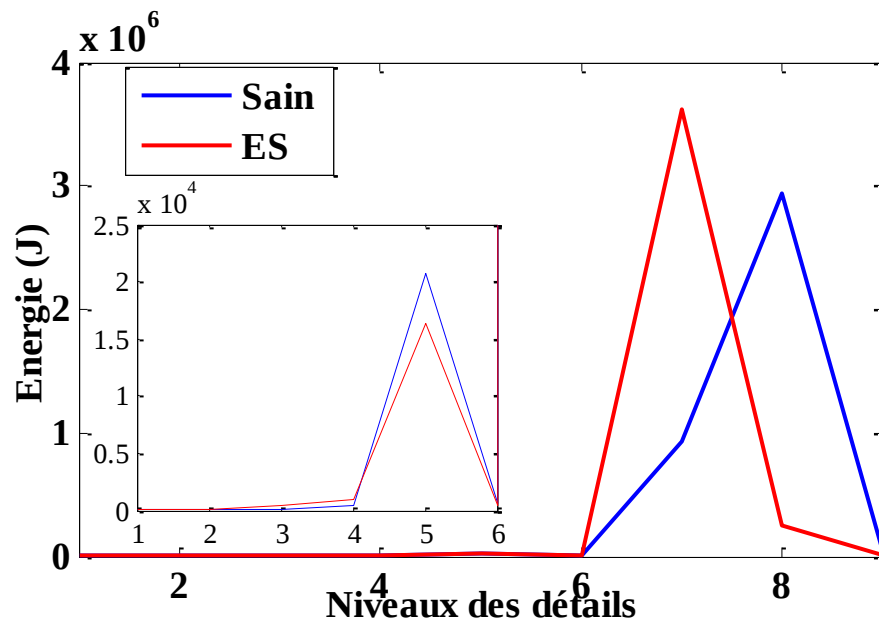


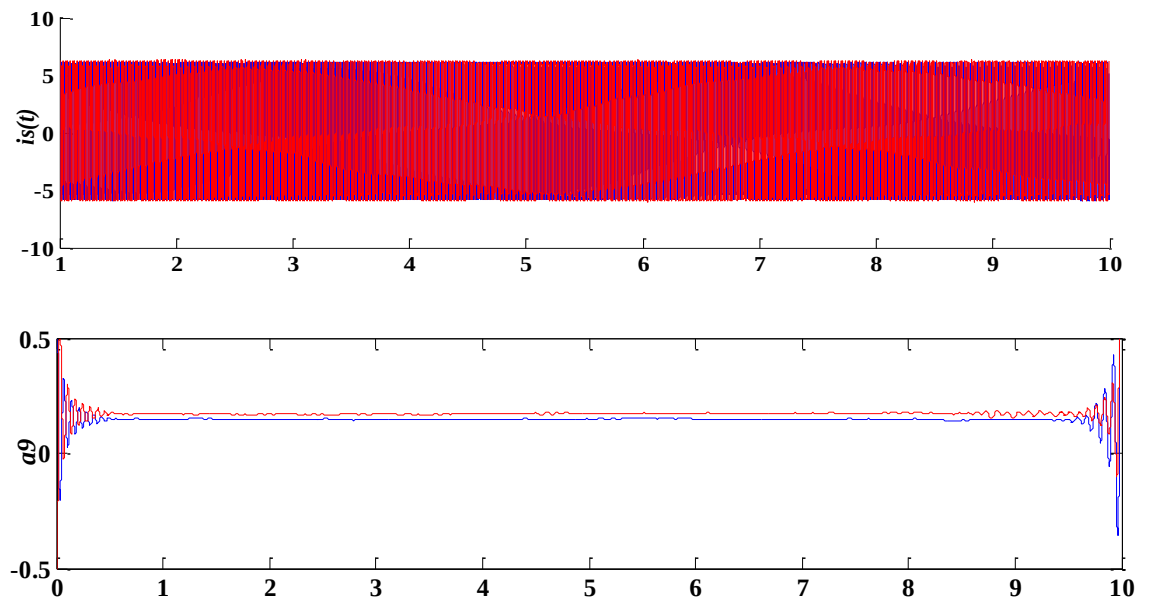
Figure (III.24): Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (ES).

L'analyse des coefficients d'approximation pour une machine présentant un défaut d'excentricité statique révèle des changements dans l'amplitude des coefficients d7, d8, d9 et a9 par rapport à ceux observés dans le cas d'une machine saine. Ces variations dans les signaux d7, d8, d9 et a9 sont attribuables à l'effet du défaut d'excentricité statique. Les bandes de fréquence correspondantes sont affectées par ce défaut, ce qui se traduit par des différences plus marquées au niveau des détails d7 et d8, avec des conséquences sur leurs énergies respectives. De plus, l'énergie du détail d5 est également impactée par la présence du défaut.

III.4-2 Défaut d'excentricité dynamique:

Sur les figures (III-25), (III-26), (III-27) et (III-28), 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.

L'utilisation des coefficients a9 et d7 à d9, ainsi que du coefficient d7 seul, permet d'analyser l'évolution dans les bandes de fréquences du signal. De plus, la comparaison de l'énergie des détails entre les états sain et défectueux montre une différence significative, ce qui suggère que l'utilisation de la transformée en ondelettes directement sur le signal du courant du moteur peut être efficace pour détecter ce type de défaut.



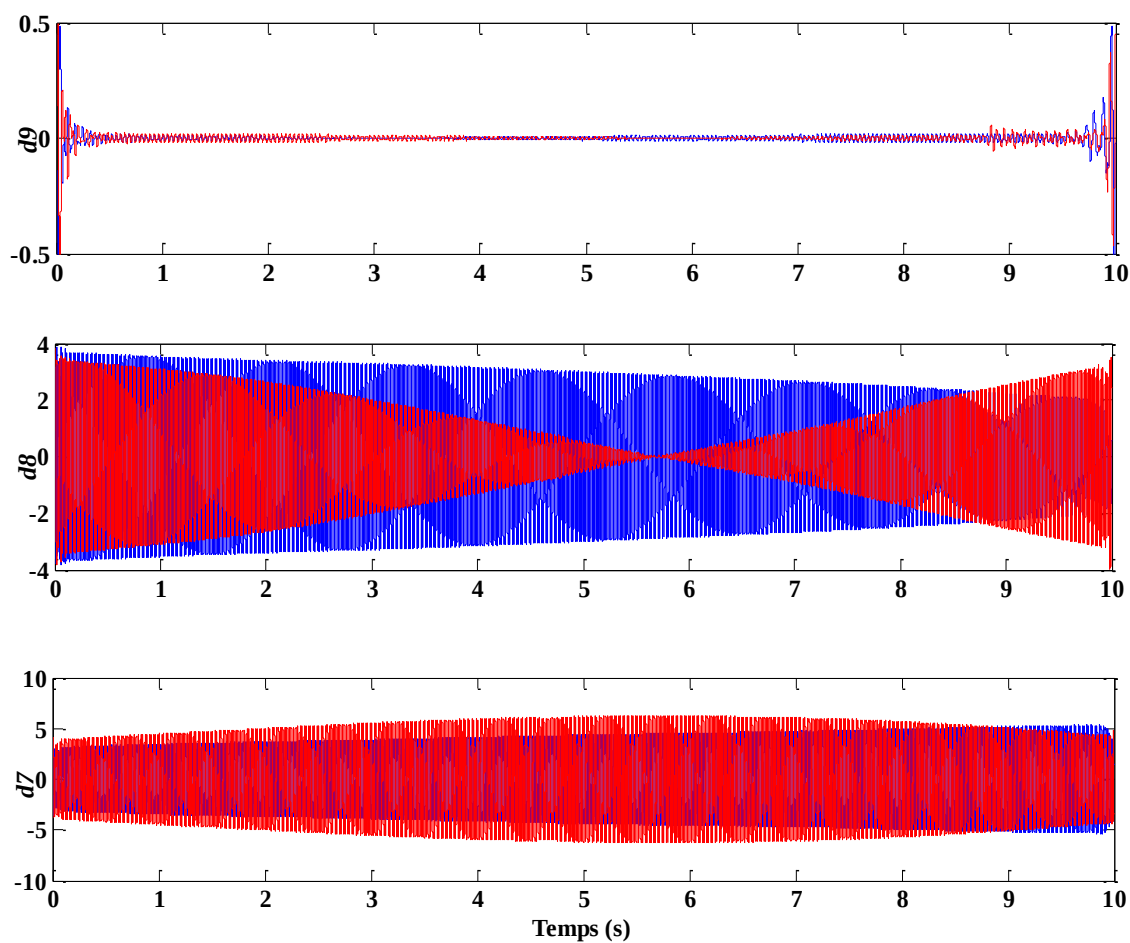


Figure (III.25): Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement à vide (ED) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

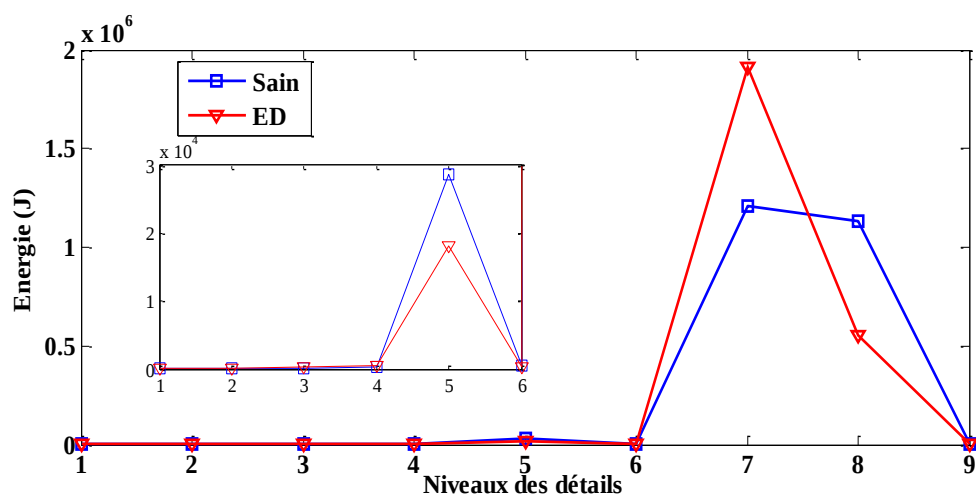


Figure (III.26): Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement à vide (ED)

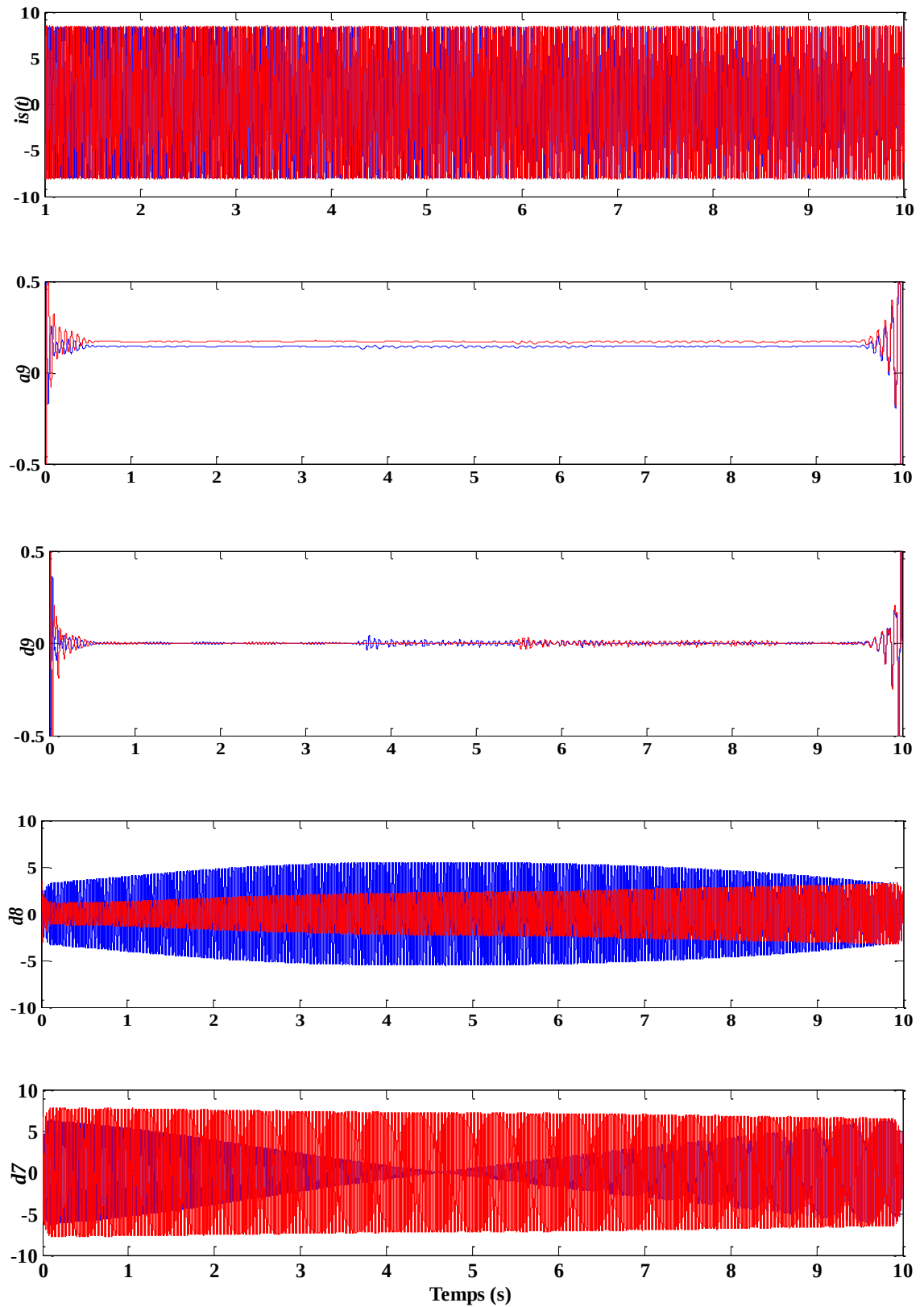


Figure (III.27): Analyse par TOD d'une phase statorique i_s pour un fonctionnement en charge (ED) : sain (en bleu), défectueux (en rouge).

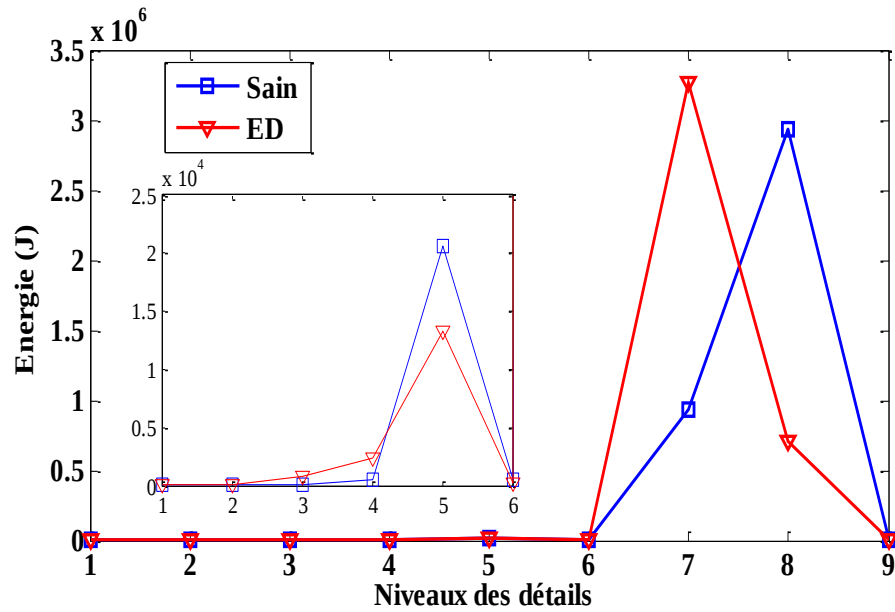


Figure (III.28): Variation de l'énergie des détails pour un fonctionnement en charge (ED).

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.

III-7 Conclusion:

L'extraction des signaux à chaque niveau de la transformée en ondelettes (TO) est en effet très riche en informations, ce qui est précieux pour détecter les défauts par rapport à une machine en bon état. Les variations dans ces signaux peuvent révéler des anomalies ou des dysfonctionnements qui seraient difficiles à détecter avec d'autres méthodes, comme l'analyse par la transformée de Fourier (FFT). La TOD offre donc une approche flexible et puissante pour l'analyse et la détection des défauts, ce qui la rend particulièrement utile dans le diagnostic des machines tournantes.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ce mémoire s'est concentré sur l'utilisation des méthodes de diagnostic pour la surveillance des entraînements électriques, en particulier pour les machines asynchrones à cage d'écureuil.

L'analyse et le traitement du courant statorique pour le diagnostic des défauts rotoriques d'une machine asynchrone, à l'aide de la FFT (Transformée de Fourier Rapide) et de la DWT (Transformée en Ondelettes Discrètes), démontrent la robustesse et l'efficacité de ces techniques dans la détection précoce et précise des défauts rotorique. Ces méthodes offrent une approche fiable pour identifier divers types de défauts, tels que la cassure des barres, les fissures et les courts-circuits, en analysant les caractéristiques spectrales et temporelles du courant statorique. En combinant la FFT pour l'analyse fréquentielle et la DWT pour l'analyse temporelle, on peut obtenir une approche complète permettant une meilleure fiabilité et précision dans le diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones.

La méthode MCSA-FFT n'est pas en mesure de détecter tous les défauts des machines asynchrones de façon définitive. Par exemple, l'excentricité statique pure ou dynamique pure est un défaut important à détecter pour de nombreux moteurs, mais les signatures de ces défauts mécaniques apparaissent principalement dans le spectre du signal vibratoire. De plus, le chevauchement de certaines fréquences constitue un obstacle à une décision finale précise sur l'état de la machine.

En termes de sensibilité et de détection précoce des défauts, toutes les méthodes temps-fréquence sont plus fiables et descriptives pour indiquer les symptômes des défauts. Parmi ces méthodes, la transformée en ondelettes discrètes (DWT). Non seulement elle est plus rapide grâce aux outils informatiques, mais elle est également plus capable de révéler les symptômes de défauts à un stade précoce. Cette technique est très efficace et sensible à tous les défauts étudiés dans ce mémoire. De plus, la MCSA-DWT a l'avantage d'être utilisable en régime non-stationnaire.

Cela, puisque la FFT présente des limitations, notamment en ce qui concerne l'analyse des signaux non stationnaires. Les défauts rotorique peuvent induire des variations temporelles dans le signal de courant, ce qui n'est pas toujours bien capturé par la FFT.

Enfin, nous concluons que la méthode MCSA-DWT est plus efficace pour détecter les défauts des machines asynchrones que la méthode MCSA-FFT.

Référence bibliographiques

Référence bibliographiques

[1]	C.C. CESAR DA COSTA , M.K. Masamori Kashiwagi and M. H .Mauro Hugo Mathias, Rotor failure detection of induction motors by wavelet transform and Fourier transform in non-stationary condition", Contents lists available at Science Direct Case Studies in Mechanical Systems and Signal
[2]	A. Abed, " <i>Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone</i> ", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002.
[3]	S. Bachir, " <i>Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique</i> ", Thèse de Doctorat, Université de Poitier, France, 2003.
[4]	Bouzida Ahcene "Diagnostic de défauts de la machine asynchrone a cage par la technique des ondelettes"
[5]	Hakima Cherif " détection des défaut statorique et rotorique dans une machine asynchrones en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes" Thèse de Magister Univ Mohammed khider Biskra 30/09/2014.
[6]	Bessam Besma «Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des techniques intelligentes » Thèse de Doctorat LMD en :Automatique Univ Mohammed khider Biskra 02/06/2016
[7]	Hubert Razik, “ Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l’art”, Green-UHP.Faculté des Sciences. Revue 3EI n°29-Juin 2002 page 48 52 -
[8]	Olivier Ondel «Diagnostic par reconnaissance des formes: application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone» Thèse de doctorat. L'école centrale de Lyon 2006.
[9]	M. M. Benbouzid, "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium For Detection" , IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol 47 , N°5, October 2000 , pp.984-993.
[10]	U. Werner, " <i>FE-Analysis of a Soft-Mounted Two-Pole Induction Motor Regarding Relative Shaft Vibration Caused by Static Rotor Eccentricity</i> ", IEEE Conference Publications, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 20-22

[11]	A. Ceban, " <i>Méthode Globale de Diagnostic des Machines Electriques</i> ", Thèse de Doctorat, Université d'Artois, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement, France, 2012.
[12]	J. Faiz, B. M. Ebrahimi, H. A. Toliyat, " <i>Effect of Magnetic Saturation on Static and Mixed Eccentricity Fault Diagnosis in Induction Motor</i> ", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, N°8, PP. 3137-3144, 2009
[13]	D. G. Dorrell, W. T. Thomson, S. Roach, " <i>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</i> ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, N°1, PP. 24-34, 1997.
[14]	B. Vaseghi, " <i>Contribution à l'Etude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut</i> ", Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009.
[15]	R. Bousseksou Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic. Mémoire de Magister. Université Mentouri Constantine. Algérie 2007.
[16]	Y. Nacera "Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter- spires et des cassures de barres et d'anneaux" thèse de magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2009.
[17]	Ayadi Bilal et Laib Bachir, Guemari EL Hadi Diagnostic des défauts statoriques et rotoriques dans la machine asynchrone
[18]	Labiod Laid Boutadjine Fares Dr: Allal Abderrahim Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones (Résultats expérimentaux et de simulation) Thèse de MASTER ACADEMIQUE , UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar D'El-oued soutenu en Juin 2019.
[19]	J. S. Hsu, "Monitoring of Defects in Induction Motors Through Air-Gap Torque Observation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No.5, Sept./Oct. 1995, pp. 1016-1021.
[20]	M. Sahraoui, "Contribution aux diagnostics des machines asynchrones triphasées à cage," Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider, Biskra, Décembre 2003.

[21]	Khatraoui Abderrezak, Zaid Mansour «Diagnostic Des Machines Asynchrones Triphasées», Thèse de MASTER ACADEMIQUE , UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar D'El-oued soutenu en Mai 2017.
[22]	Bennedjai Soumaya «Contribution à l'amélioration de la sûreté d'exploitation des moteurs à induction», Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de : Doctorat universite badji mokhtar annaba, Année : 2015/2016
[23]	R. Maier, "Protection of Squirrel-Cage Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 2, March/April 1992, pp. 376-380.
[24]	S. E. Legowski, A and al., "Instantaneous Power as Medium for the Signature Analysis of Induction Motors". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No.4, July/August 1996, pp. 904-909.
[25]	A.Khatir. Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts .Thèse de Magister .Université Ferhat Abbas de Sétif .Algérie 2009.
[26]	A.Ghoggal , "Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : modèle dédié à la détection des défauts, " Thèse de Magistère, Université de Batna, Algérie, May 2005.
[27]	Drif.Malika, “Diagnostic des Défauts dans les Machines Electriques et leur Surveillance par Emploi de l’Intelligence Artificielle ”, Thèse Magister 2004.USTMBO.
[28]	P.Vas,“Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines”, Clarendon Press, Oxford, 1993. IEEE Trans.Ind.Appl.vol.28 N°4,July/August 1992.
[29]	J. R Cameron, W. T.Thomson, and A. B.Dow,“Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors”, IEE Proceedings, vol.133, no.3,May 1986, pp.155- 163.
[30]	Site web HTTPS://ALLTESTPRO.COM
[31]	Belhamdi. Saad "Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différentes techniques de commande," <i>Thèse de doctorat, université de Biskra</i> , Mai 2014.

[32]	Steven T. Karris, "Signals and Systems with Matlab Computing and Simulink Modeling," Fourth Edition, 2008 Orchard Publications. www.orchardpublications.com
[33]	Transformée en ondelettes-Gwyddion http://gwyddion.net/documentation/userguide-fr/wavelet-transform.html
[34]	Montaine Bernard, "Méthodologie d'analyse des synchronisations neuronales dans les signaux EEG à l'aide de graphes d'informations temps-fréquence, " Thèse pour l'obtention du Grade de docteur de l'université de Poitiers, Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées (30 novembre 2006).
[35]	Frédéric Truchetet, " Ondelettes pour le signal numérique, " Editions Hermes, Paris, 1998.
[36]	T.Boumegoura, Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone, et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic, Thèse de doctorat, école doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, Mars 2001.
[37]	J.R.Cameron, W.T.Thomson, A.B.Dow, "Vibration and current monitoring for detecting air gap eccentricity in large induction motors", IEE Proceedings, Vol. 133, no.3, pp. 155-163, May 1986.
[38]	M.Bouزيد, Diagnostic de défauts de la machine asynchrone par réseaux de neurones, Thèse de Doctorat, Université de El Manar, Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis ,2009
[39]	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.
[40]	Bessous Noureddine." Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones :Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation." (28 /09 /2017)