

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Bejaia

Faculté de Technologie
Département de Génie électrique



Mémoire de Fin d'étude
En vue de l'obtention du diplôme
MASTER
En Electromécanique, option :
Maintenance Industrielle

Thème

*Grandeurs électrique et mécanique et aide au diagnostic d'une
génératrice éolienne.*

Devant le jury composé de :

- ✓ **Mr. Radouane Laggoune**
- ✓ **Mr. El Hassene Ait mokhtar**

Encadré par :

- ✓ **Mr. Yacine Imaouchen**

Présenté par :

- ✓ **Achour Rochdi**
- ✓ **Ouslimani Idir**

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Nous remercions Dieu pour le courage, la patience et la santé qui nous ont été utiles tout au long de notre parcours.

*Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à **Mr Imaouchen Yacine** qui a proposé et dirigé ce projet et pour son entière disponibilité, son aide et ces conseils.*

Notre sincère gratitude va aussi aux membres du jury qui ont bien accepté de juger ce présent travail.

Nous tenons à remercier aussi tous les enseignants qui ont contribué à notre formation

Enfin, que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouve ici l'expression de nos sincères remerciements.

Dédicaces

Chaleureusement je dédie ce modeste travail :

A la lumière de ma vie, mes chers parents en témoignage pour leur amour et leur sacrifice sans limites qui je souhaite la bonne santé et que Dieu me la garde.

*Mes très chers frères et mes sœurs, et toute la famille **Achour** et **Ouslimani** A tous mes amis de promotion de Maintenance Industrielle 2021 A tous mes amis **Fawzi** et **Mohamed**.*

Table des matières

Introduction générale	1
 Chapitre I : Grandeurs électriques et mécaniques pour l'aide au diagnostic et Défaillances des machines asynchrone	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Machine asynchrone.....	3
I.3 Constitution de la machine	4
I.3.1 Le stator.....	4
I.3.2 Le rotor.....	5
I.4 Grandeurs électriques	5
I.4.1 Intensité de courant	5
I.4.2 La puissance électrique	5
I.5 Grandeurs mécanique	6
I.5.1 La vitesse.....	6
I.5.2 Le couple électromagnétique.....	6
I.6 Le diagnostic	6
I.6.1 Généralités sur le diagnostic.....	6
I.6.2 Diagnostic d'un système	6
I.6.3 Procédure du diagnostic	7
I.6.3.1 Diagnostic pronostic	7
I.6.3.1.1 Diagnostic par bruit.....	7
I.6.3.1.2 Diagnostic par mesure ultrason.....	7
I.6.3.1.3 Diagnostic par thermographie infrarouge.....	8
I.6.3.1.4 Diagnostic d'huile.....	8
I.6.3.2 Diagnostic approfondi	8
I.6.3.2.1 Diagnostic par mesure de courant statorique.....	9
I.6.3.2.2 Diagnostic par mesure de puissance.....	9
I.6.3.2.3 Diagnostic par mesure de couple électromagnétique.....	9
I.6.3.2.4 Diagnostic par mesure de vitesse.....	9

Table de matière

I.6.3.2.5 Diagnostic par analyse vibratoire.....	10
I.6.3.2.5.1 Objectif de l'analyse vibratoire.....	10
I.7 Analyse temporelle.....	10
I.7.1 Indicateurs classiques.....	11
I.8 Analyse spectrale	12
I.8.1 La transformation de Fourier rapide FFT.....	13
I.8.2 Signal analytique	15
I.8.3 L'origine de la modulation d'un signal.....	15
I.8.4 Analyse d'enveloppe.....	16
I.9 Défaillances d'une machine asynchrone	16
I.9.1 défaillance électrique	16
I.9.1.1 Défauts statoriques	17
I.9.1.2 Défauts rotorique.....	18
I.9.2 Défaillances mécaniques	19
I.9.2.1 Défauts de roulement à billes.....	19
I.9.2.2 Balourd	21
I.9.2.3 Excentricité	21
I.10 Conclusion	22

Chapitre II : Extraction des indicateurs et aide au diagnostic d'une génératrice

II.1 Introduction	24
II.2 Description de l'expérience	24
II.3 Evaluation des indicateurs pour la surveillance du défaut	27
II.3.1 L'indicateur de valeur efficace (RMS)	27
II. 3.2 L'indicateur de l'Energie	32
II.3.3 L'indicateur Kurtosis	36
II.3.4 L'INDICATEUR Facteur crête.....	40
II.3.5 L'indicateur Entropie.....	44
II.3.6 L'indicateur Complexité	48
II.4 Conclusion	51

Chapitre III: analyse des composantes fréquentielles

III.1 Introduction	53
III.2 Résultats de l'analyse des composantes fréquentielles	53

Table de matière

III.2.2 La Puissance électrique	56
III.2.3 Le Couple électromagnétique	59
III.2.4 La vitesse de rotation de la génératrice	62
III.3 Conclusion.....	65
Conclusion générale	67
BIBLIOGRAPHIE	68

Liste des figures

Figure I.1 : le stator d'une machine asynchrone	4
Figure I.2 : rotor bobiné.....	5
Figure I.3 : Différents représentations d'un signal brut par décompositions les domaines temporel et fréquentiel [13]	14
Figure I.4 : Représentation graphique de la fonction $S(t)$ et de sa transformée de Fourier	15
Figure I.5 : représentation des défauts statorique possibles	17
Figure I.6 : Court-circuit dans unephase.....	18
Figure I.7 : masse dans l'encoche	18
Figure I.8 : Défauts des roulements à billes	20
Figure I.9 : défauts de balourd	21
Figure I.10 : Types d'excentricité	22
Figure II.1 : Schéma d'expérience sur le banc d'essai et les instruments d'acquisition des mesures électriques et mécaniques [12].....	24
Figure II.2 : Les signaux des courants statoriques en fonction du temps pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min), pour chaque % de défaut.....	25
Figure II.3 : Les signaux des puissances électriques en fonction du temps pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min), pour chaque % de défaut.....	26
Figure II.4 : Les signaux du couple électromagnétique en fonction du temps pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min), pour chaque % de défaut.....	26
Figure II.5 : Les signaux des vitesses de rotation de génératrice en fonction du temps pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min), pour chaque % de défaut.....	27
Figure II.6 : (1) courbes des valeurs efficaces du courant statorique (2) courbes des valeurs efficaces de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	28
Figure II.7 : (1) courbes des valeurs efficaces de la puissance électrique (2) courbes des valeurs efficaces de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	29

Liste des figures

Figure II.8: (1) courbes des valeurs efficaces du couple électromagnétique (2) courbes des valeurs efficaces de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min).....	30
Figure II.9: (1) courbes des valeurs efficaces de la vitesse de rotation de la génératrice (2) courbes des valeurs efficaces d'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	31
Figure II.10 : (1) courbes des valeurs de l'énergie du courant statorique (2) courbes des valeurs de l'énergie de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	32
Figure II.11: (1) courbes des valeurs énergie de la puissance électrique(2) courbes des valeurs énergie de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	33
Figure II.12: (1) courbes des valeurs énergie du couple électromagnétique (2) courbes des valeurs énergie de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	34
Figure II.13: (1) courbes des valeurs de l'énergie de la vitesse de rotation de la génératrice (2) courbes des valeurs de l'énergie de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	35
Figure II.14: (1) courbes des valeurs Kurtosis du courant statorique (2) courbes des valeurs Kurtosis de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	36
Figure II.15: (1) courbes des valeurs du Kurtosis de la puissance électrique (2) courbes des valeurs du Kurtosis de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min).....	37
Figure II.16: (1) courbes des valeurs du Kurtosis du couple électromagnétique (2) courbes des valeurs du Kurtosis de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	38
Figure II.17 : (1) courbes des valeurs du Kurtosis de la vitesse de rotation de la génératrice (2) courbes des valeurs du Kurtosis de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	39

Liste des figures

Figure II.18: (1) courbes des valeurs du Facteur crête du courant statorique (2) courbes des valeurs du Facteur crête de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min).....	40
Figure II.19: (1) courbes des valeurs du Facteur crête de la puissance électrique (2) courbes des valeurs du Facteur crête de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	41
Figure II.20: (1) courbes des valeurs du Facteur crête du couple électromagnétique (2) courbes des valeurs du Facteur crête de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min).....	42
Figure II.21: (1) courbes des valeurs du Facteur crête de la vitesse de rotation de la génératrice (2) courbes des valeurs du Facteur crête de l'enveloppe de la vitesse rotation de la génératrice en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min).....	43
Figure II.22: (1) courbes des valeurs de l'Entropie du courant statorique (2) courbes des valeurs de l'Entropie de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	44
Figure II.23: (1) courbes des valeurs de l'entropie de la puissance électrique (2) courbes des valeurs de l'entropie de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	45
Figure II.24: (1) courbes des valeurs de l'entropie du couple électromagnétique(2) courbes des valeurs de l'entropie de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	46
Figure II.25: (1) courbes des valeurs de l'entropie de la vitesse de rotation de la génératrice (2) courbes des valeurs de l'entropie de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	47
Figure II.26: (1) courbes des valeurs de complexité du courant statorique (2) courbes des valeurs de complexité de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	48
Figure II.27: (1) courbes des valeurs de complexité de la puissance électrique (2) courbes des valeurs de complexité de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min).....	49

Liste des figures

Figure II.28: (1) courbes des valeurs de complexité du couple électromagnétique (2) courbes des valeurs de complexité de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)	50
Figure II.29: (1) courbes des valeurs de complexité de la vitesse de rotation de la génératrice (2) courbes des valeurs de complexité de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min).....	51
Figure III.1 : spectres de courant statorique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) a une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min	54
Figure III.2: spectres des amplitudes du courant statorique) pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) a une vitesse d'entraînement de 1590 tr/min.....	54
Figure III.3: spectres de l'enveloppe du courant statorique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) a une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min.....	55
Figure III.4: spectres de l'enveloppe du courant statorique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1590 tr/min.....	55
Figure III.5: Amplitudes des harmoniques du courant statorique (1) Amplitudes des harmoniques de l'enveloppe du courant statorique (2) en fonction du % de défaut pour deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min à la fréquence de défaut (DER)	56
Figure III.6: spectres de la puissance électrique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min	57
Figure III.7: spectres des amplitudes de la puissance électrique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1590 tr/min	57
Figure III.8: spectres des amplitudes de l'enveloppe de la puissance électrique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min	58
Figure III 9: spectres des amplitudes de l'enveloppe de la puissance électrique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) a une vitesse d'entraînement de 1590 tr/min	58
Figure III.10: Amplitudes des harmoniques de la puissance électrique (1) Amplitudes des harmoniques de l'enveloppe de la puissance électrique (2) en fonction du % de défaut pour deux vitesse d'entraînement 1560 et 1590 tr/min à la fréquence de défaut (DER)	59
Figure III.11: spectres des amplitudes du couple électromagnétique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min.....	60

Liste des figures

Figure III.12: spectres des amplitudes du couple électromagnétique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1590 tr/min.....	60
Figure III.13: spectres des amplitudes de l'enveloppe du couple électromagnétique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min	61
Figure III.14: spectres des amplitudes de l'enveloppe du couple électromagnétique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min	61
Figure III.15: Amplitudes des harmoniques du couple électromagnétique (1) Amplitudes des harmoniques de l'enveloppe du couple électromagnétique (2) en fonction du % de défaut pour deux vitesse d'entraînement 1560 et 1590 tr/min à fréquence de défaut (DER)	62
Figure III.16: spectres de la vitesse de rotation de la génératrice pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min	63
Figure III.17: spectres de la vitesse de rotation de la génératrice pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1590 tr/min	63
Figure III.18: spectres de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min	64
Figure III.19: spectres de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1590 tr/min	64
Figure III.20: Amplitudes des harmoniques de la vitesse de rotation de la génératrice (1) Amplitudes des harmoniques de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice (2) en fonction du % de défaut pour deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min à la fréquence de défaut (DER)	65

Liste des Abbreviations

I_s = courant satorique.

P_e = Puissance électrique.

f_s = Fréquence d'alimentation.

Ω_s = vitesse statorique.

DER= déséquilibre électrique au rotor.

E_s = énergie du signal.

ApEn = Entropie approximative.

LZC = Complexité lempel-Ziv.

MA = modulation en amplitude.

MF = modulation en fréquence.

RMS = Root Mean square.

FFT = Fast Fourier Transformation.

V = vitesse de rotation de la génératrice.

P_M = puissance électromagnétique.

P_{tr} = Puissance transmission.

$f_{crête}$ = facteur crête.

$V_{crête}$ = Valeur crête.

C_{em} = couple électromagnétique.

Introduction générale

La maintenance industrielle, qui a pour vocation d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est une fonction stratégique dans les entreprises. Intimement liée au remarquable développement technologique, à l'apparition de nouveaux modes de gestion, à la nécessité de réduire les coûts de production, elle est en constante évolution. Elle n'a plus aujourd'hui comme seul objectif de réparer l'outil de travail mais aussi de prévoir et éviter les dysfonctionnements.

Dans les secteurs industriels, la fonction « maintenance » consiste de moins en moins souvent à remettre en état l'outil de travail mais de plus en plus fréquemment à anticiper ses dysfonctionnements. L'arrêt ou le fonctionnement anormal de l'outil de production, et le non-respect des délais qui s'en suit, engendrent en effet des coûts que les entreprises ne sont plus en état de supporter. Elles ne peuvent plus attendre que la panne se produise pour y remédier mais doivent s'organiser pour procéder aux diverses opérations qui permettent de l'éviter. On est ainsi passé d'une « maintenance curative » à une « maintenance préventive », qui se traduit par la définition de plans d'actions et d'interventions sur l'équipement, par le remplacement de certaines pièces en voie de dégradation afin d'en limiter l'usure, ainsi que le graissage ou le nettoyage régulier de certains ensembles. Ces actions préventives étaient dans un premier temps effectuées de façon systématique selon des calendriers prédéfinis. Elles permettaient effectivement d'anticiper les pannes, mais au prix d'un alourdissement important des coûts de maintenance. Grâce à l'évolution des technologies de diagnostic et de contrôle, en particulier des capteurs, une nouvelle maintenance se développe aujourd'hui. Elle utilise des techniques de prévision des pannes comme, par exemple, l'analyse des composantes fréquentielles, des courants moteurs. Ce stade de la maintenance, dite « prédictive » ou « préventive conditionnelle », permet de remplacer des pièces justes avant leurs ruptures ou leurs détériorations [1].

Il vient de cela, que la maintenance ne peut plus se limiter à être corrective ou préventive, mais se doit d'être « proactive » et « prédictive ». Pour les électrotechniciens, la surveillance des composantes fréquentielles et des courants des moteurs est un art en soit, qui permet de diagnostiquer les défauts potentiels, d'en évaluer la gravité et de prendre les mesures correctrices nécessaires. Les fonctionnalités avancées offertes actuellement dans le

Introduction générale

cadre du traitement de signal et notamment la FFT (fast Fourier transformation), sont amplement exploitées au service de l'analyse des composantes fréquentielles des courants.

Dans ce contexte le mémoire comporte trois chapitres. Le premier consiste en deux grandes parties : une présentation des différentes méthodes de diagnostic basées sur l'exploitation des grandeurs électrique et mécanique, ensuite, il expose les différentes défaillances qui peuvent toucher les machines asynchrones.

Le deuxième chapitre fait l'objet d'étude sur d'extraction des indicateurs statistique (valeurs efficace (RMS), énergie, Kurtosis, Facteur crête, Entropie et Complexité) à partir des grandeurs électriques et mécaniques mesurées sur une génératrice à double alimentation réelle. Ceci afin déduire l'indicateur le plus fiable pour surveiller et anticiper les défauts au rotor d'une machine asynchrone.

Dans le troisième chapitre, une analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier et analyse d'enveloppe des signatures du courant statorique, la puissance électrique, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation de la génératrice. À la fin, nous allons suivre l'évolution des amplitudes sur les spectres calculés. En effet, ces spectres nous permettront d'extraire les amplitudes des harmoniques de la fréquence modulée créée par le défaut, ensuite appliquer la démodulation par l'analyse d'enveloppe pour extraire la fréquence exacte liée au défaut.

**Chapitre I : Grandeurs électriques et mécaniques pour
l'aide au diagnostic et Défaillances des machines
asynchrone**

I.1 Introduction

Les machines tournantes, telles que les moteurs Asynchrone et les générateurs, sont des composants essentiels dans les applications industrielles et la production d'énergie, occupent actuellement une place prépondérante dans les applications faisant intervenir des systèmes de transmission de puissance. Ces machines peuvent être affectées par des défauts potentiels qui se répercutent sur la production, c'est la raison pour laquelle elles requièrent un niveau élevé de fiabilité et de disponibilité. Une défaillance prématurée peut générer des coupures planifiées, détérioré la machine et conduire à des pertes économiques considérables.

Le diagnostic des machines asynchrone s'est fortement développées dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûr devient, pour certaines applications indispensables. Les chaînes de production doivent être dotées de système de protection fiables car une quelconque défaillance, même le plus anodine peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche sur le plan mondial s'emploi depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic.

I.2 Machine asynchrone

La machine asynchrone (MAS), est par dominante, la machine la plus utilisé dans l'industrie. Cet intérêt croissant est justifié par de nombreux avantages ; tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût ... etc. La machine asynchrone, connue également sous le terme anglo-saxon de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Bien que la machine asynchrone soit robuste, elle peut présenter, comme toutes autres machines électriques, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un intérêt grandissant depuis les deux dernières années [2].

I.3 Constitution de la machine

La machine asynchrone comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier en silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence. On définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil, mais nous admettrons que sa structure est, électriquement, équivalente à celle du rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit [2].

I.3.1 Le stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure I.1). 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 approuvent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique [1].



Figure I.1 : Le stator d'une machine asynchrone

I.3.2 Le rotor

C'est l'élément mobile du moteur. Comme le circuit magnétique du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces, isolées entre elles, et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Le rotor est constitué de conducteurs en court-circuit donc n'est relié à aucune alimentation électrique et il tourne à une vitesse (N) inférieure à celle du champ tournant.

Selon la construction du rotor, on peut distinguer deux familles de moteurs asynchrones : Les moteurs à cage dont le rotor forme une cage d'écureuil et les moteurs à bague dont le rotor est bobiné (figure I.2) [1].

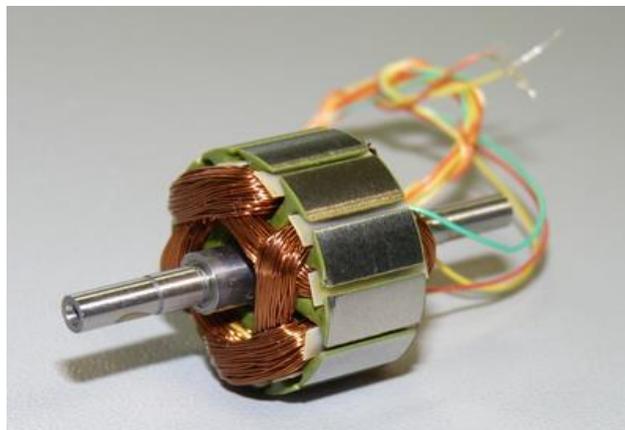


Figure I.2 : Rotor bobiné

I.4 Grandeurs électriques

I.4.1 Intensité de courant

Le courant électrique correspond à un déplacement de particules électriques appelées électrons. L'intensité en un point du circuit correspond au débit du courant en ce point, autrement dit à la quantité d'électrons qui traversent une section du circuit par unité du temps, est une grandeur ayant pour symbole (I) et pour unité l'ampère (A) [3].

I.4.2 La puissance électrique

Il s'agit de l'énergie produite ou consommée par unité de temps. Sa définition mathématique est le rapport mathématique : ΔE l'énergie produit ou consommée durant une durée Δt .

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (I.1)$$

La puissance se mesure en watts, une unité égale à un joule (unité d'énergie) divisée une seconde [3].

I.5 Grandeurs mécaniques

I.5.1 La vitesse

Est le rapport d'une longueur par un temps. Son unité du système international est le mètre par seconde (m/s). La vitesse ayant une direction et une intensité. La vitesse est représentée par un vecteur de vitesse [3].

I.5.2 Le couple électromagnétique

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse Ω_s , elles glissent sur le rotor, qui lui il tourne à la vitesse Ω , l'action de l'ensemble des forces électromagnétiques, il réduit à l'application d'un moment de couple électromagnétique [3].

$$C_{em} = \frac{P_{méc}}{\Omega} \quad (I.2)$$

avec : $P_{méc}$ est la puissance mécanique de la machine, et Ω est la vitesse de rotation de son arbre.

I.6 Le diagnostic

I.6.1 Généralités sur le diagnostic

Le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application. Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver la cause d'une défaillance ou d'un défaut. La définition de ce dernier, adoptée par les instances internationales de normalisation, est la suivante : « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test » [4].

I.6.2 Diagnostic d'un système

Diagnostic d'un système est l'identification du mode de fonctionnement, à chaque instant, par ses manifestations extérieures (symptômes). Son principe général consiste à confronter les

données relevées au cours du fonctionnement réel du système avec la connaissance que l'on a de son fonctionnement normal ou défaillant. Si le mode de fonctionnement identifié est un mode défaillant, le système de diagnostic devrait localiser sa cause. Il est évident que si l'on veut représenter tous les défauts possibles d'une installation industrielle, la tâche peut être considérable [5].

I.6.3 Procédure du diagnostic

Dans le but de faire un diagnostic des défauts qui peuvent se produire dans un système physique, avant l'échec total, et dans la mesure du possible déterminer les causes qui en sont à l'origine, une procédure de reconnaissance doit être appliquée, cette procédure comporte les étapes suivantes.

I.6.3.1 Diagnostic pronostic

Les méthodes de diagnostic à base de modèle sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance a priori du système. Elles prennent en compte les équations régissant les phénomènes internes du système et qui expriment les connaissances profondes sous la forme d'un modèle mathématique (équations d'état, forme matricielle). Il y a quatre méthodes

I.6.3.1.1 Diagnostic par bruit

Le changement de bruit est souvent un phénomène créé par une défaillance et la mesure du bruit des machines par mesure des vibrations [ISO 7849 (1987)] peut être un indice de défektivité. Le stéthoscope, qui comprend un casque et une sonde, est un instrument qui permet par contact de détecter les composants défectueux par l'écoute des bruits de la machine, pour des fréquences variantes entre 30 et 15 000 Hz.

La technique consiste à comparer subjectivement les bruits avec des bruits de référence déjà préenregistrés [6].

I.6.3.1.2 Diagnostic par mesure ultrason

Certains instruments ultrasonores sont sensibles à la détection d'émissions sonores de très hautes fréquences comprises entre 20 kHz et 100 kHz. Cette large bande de détection accroît la pertinence du diagnostic. Les signaux sont alors transformés par hétérodyne en fréquences

audibles. La technique consiste à émettre une onde ultrasonore et à mesurer le temps de réception des échos de l'onde à l'aide d'un capteur piézoélectrique.

Les Ultrasons dit "classiques" permettant de déceler des indications au cœur de la matière en utilisant des traducteurs de type Ondes longitudinales ou à Ondes transversales. Les mesures d'épaisseurs permettent de vérifier l'usure et l'épaisseur restante d'un matériel. (En établissant si besoin, une cartographie des zones examinées et d'étudier son évolution dans le temps). L'investissement à prévoir pour ce type de mesure va de 1500 DT, pour un simple contrôleur, à 15 000 DT pour un détecteur enregistreur collecteur de données qui peut également enregistrer des mesures de température, de bruit, de vitesse de rotation et de débit de fuite [6].

I.6.3.1.3 Diagnostic par thermographie infrarouge

Elle suscite un intérêt encore récent dans le domaine de la maintenance, alors elle est réservée au contrôle d'installations électriques. Elle est peu utilisée pour la surveillance des machines tournantes notamment pour la détection de défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement. La thermographie permet de réaliser des mesures à distances et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée [6].

I.6.3.1.4 Diagnostic d'huile

Elle est appliquée à toutes les machines contenant des fluides de lubrification (réducteurs, motoréducteurs, moteurs thermiques...), elle consiste à prélever un échantillon d'huile et de l'analyser (particules d'usure) pour déduire l'état de l'équipement ; Les résultats permettent de déceler des anomalies caractéristiques telles que :

- Sur moteur thermique : problèmes d'étanchéité de la filtration d'air, infiltration de liquide de refroidissement
- Sur multiplicateurs, réducteurs et engrenages : mauvais état d'un roulement ou d'un palier, Transmission défectueuse (engrenages endommagés) [6].

I.6.3.2 Diagnostic approfondi

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leurs fonctionnements à plusieurs contraintes de différentes natures, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur. Pour remédier au problème de détection des défauts, il existe une variété de méthodes de diagnostic et de détection des défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure (mesure de champ magnétique, mesure de bruit) d'autres

sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut (courant du stator, puissance, couple et vitesse).

I.6.3.2.1 Diagnostic par mesure de courant statorique

Les méthodes basées sur l'examen du courant du stator sont désignées sous le nom de « l'analyse des signatures des courants statorique » (MCSA). Cette méthode consiste à détecter les défauts par l'étude de certains composants fréquentiels ou par la vérification de la variation de certains des composants déjà existants [2].

I.6.3.2.2 Diagnostic par mesure de puissance

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet des nombreux travaux. Car la puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques.

Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase (oscillations plus importantes et plus visibles). Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [2].

I.6.3.2.3 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ du stator et celui rotor. Par conséquent, tout défaut soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé) donne des informations sur l'état de santé du moteur [2].

I.6.3.2.4 Diagnostic par mesure de vitesse

Détecte les défaillances en mesurant les fluctuations dans la période de rotation du moteur. Cette méthode est particulièrement utile pour détecter les défauts au rotor : les vibrations, l'excentricité, l'asymétrie du rotor, des roulements défaillants et des désalignements d'arbre. Cependant, la machine fonctionnant généralement à vitesse et couple de charge variables, les instruments de mesure doivent être capables de distinguer les variations de vitesse dues au couple de charge et celles dues à des défauts au rotor [2].

I.6.3.2.5 Diagnostic par Analyse vibratoire

Est la plus connue et la plus largement employée. Il faut dire qu'elle permet de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes : Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement, un roulement usé ou endommagé... Les variations d'efforts générés par la rotation des éléments sont souvent la cause des vibrations qui peuvent endommager les composants des machines. La mesure de ces vibrations va permettre d'identifier ces efforts dès qu'ils apparaissent, avant qu'ils aient causé de dommages irréversibles. Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée [7].

I.6.3.2.5.1 Objectif de l'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- La détection des défauts.
- L'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés, soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel ou bien dans les deux à la fois.

I.7 Analyse temporelle

L'analyse temporelle permet d'extraire des paramètres indicateurs de défauts à partir des données brutes du capteur. Elle consiste à étudier le comportement vibratoire de la machine à partir de ces indicateurs. Un indicateur temporel est une grandeur qui caractérise la puissance, l'amplitude ou la répartition des amplitudes du signal vibratoire. L'évolution de ces indicateurs est significative de l'apparition d'un défaut et donc de son aggravation. Ces indicateurs évaluent l'état de fonctionnement global des équipements mais ne localisent pas le défaut. De nombreux indicateurs existent dans la littérature et certains sont le résultat de la combinaison de plusieurs d'entre eux [8].

I.7.1 Indicateurs classiques

- **RMS**

Mesure qui tient compte de l'évaluation de la valeur des Composantes harmoniques et directement reliée au contenu énergétique de la vibration. A noter que ces valeurs d'amplitudes d'utilité complémentaire peuvent représenter un Déplacement, une vitesse ou une accélération, car vitesse et accélération sont aussi des fonctions sinusoïdales obtenues après dérivation de la fonction déplacement. C'est une valeur très caractéristique du signal, vu qu'elle a une relation directe avec l'énergie contenue dans celui-ci (elle est exprimée en unité physique (m/, m/s, m ou g pour les vibrations) [8]. Par exemple :

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{x^2}{n}} \quad (I.3)$$

- **Kurtosis**

C'est un indicateur permet de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut de roulement. Dans le cas d'un roulement sans écaillage, la distribution des amplitudes contenues dans le signal recueilli est gaussienne ce qui entraîne une valeur de Kurtosis proche de 3. Lorsqu'un défaut est détecté, sa valeur devient supérieure à 3. L'analyse des défauts de roulement par le Kurtosis peut également être réalisée dans différentes bandes de fréquences liées aux résonances de la structure [8].

$$kurtosis = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (X(n) - \bar{X})^4}{[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2]^2} \quad (I.4)$$

Où M4 et M2 sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2, x(n) est le signal temporel, est la valeur moyenne des amplitudes, N est le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

- **Facteur crête (Fc)**

C'est le rapport entre la valeur de crête et la valeur efficace (RMS).

$$Fc = \frac{V_{crête}}{RMS} \quad (I.5)$$

- **Énergie du signal vibratoire**

Dans le traitement de signal on introduit l'énergie d'un signal si on appelle « E_n » l'énergie d'un signal $x(t)$, une fonction du temps, on calculera son énergie par la relation suivante [9] :

$$E_n = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \quad (I.6)$$

- **Indicateur Entropie et Complexité**

La complexité Lempel-Ziv (LZC) et l'entropie approximative (ApEn) ont reçu plus d'attention en tant que deux outils statistiques alternatifs pour l'analyse d'un signal non linéaire. Les opérateurs LZC et ApEn sont devenus de plus en plus familiers dans le domaine de l'analyse et diagnostic des défauts [8].

- **L'entropie** d'un signal de taille N est donné par

$$\text{ApeN}(m, r, N) = \phi^m(r) - \phi^{m+1}(r) \quad (I.7)$$

$$\text{Avec } \phi^m = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln[C_i^m(r)] \quad (I.8)$$

- **La complexité LZC** pour une séquence de taille N la complexité $C(n)$ est donné par

$$C(n) = c(n)/b(n) \quad (I.9)$$

$$\text{Avec } b(n) = N/\log_2(N) \quad (I.10)$$

I.8 Analyse spectrale

Toute anomalie affectant une machine tournante se traduit par des vibrations dont les fréquences correspondent aux fréquences d'apparition des forces les induisant et de leurs harmoniques. Pour le diagnostic, il est intéressant de décomposer le signal vibratoire mesuré en ses sinusoides élémentaires dont les amplitudes et les fréquences peuvent être lues. L'analyse spectrale est basée sur la transformée de Fourier et cette dernière repose sur le fait que toute fonction périodique peut être représentée comme la somme d'une série de sinus et de cosinus dont on fait varier d'une part les amplitudes en les multipliant par les coefficients, et d'autre part les phases on les décalant de manière à ce qu'ils s'additionnent où se compensent [9].

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{I.11})$$

Numériquement, la transformée de Fourier discrète correspondante s'exprime :

$$S(k) = \sum s(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (\text{I.12})$$

$$\text{avec } \omega_N = e^{\frac{-2\pi i}{N}}$$

Elle est calculée à partir d'un signal discret de N point. Elle permet d'obtenir un vecteur de k points, k représentant la fréquence la plus haute, et étant à la fréquence de coupure du signal. La résolution en fréquence est de k/N. Pour une fréquence d'échantillonnage fixée (donc k fixé), plus le vecteur signal est grand, plus la résolution en fréquence est fixe [12].

I.8.1 La transformation de Fourier rapide FFT

La transformation de Fourier rapide FFT est un algorithme permettant de réduire en particulier le nombre de multiplications, pour calculer la TFD (transformation de Fourier discret). il existe différents algorithmes de FFT. Le plus connu et le plus utilisé est celui de Cooley-Tukey. le nombre de multiplication complexes est $(N/2) \log (N)$. Le temps de calcul d'un TFD par FFT peut être réduit d'un facteur supérieur à 100 [12].

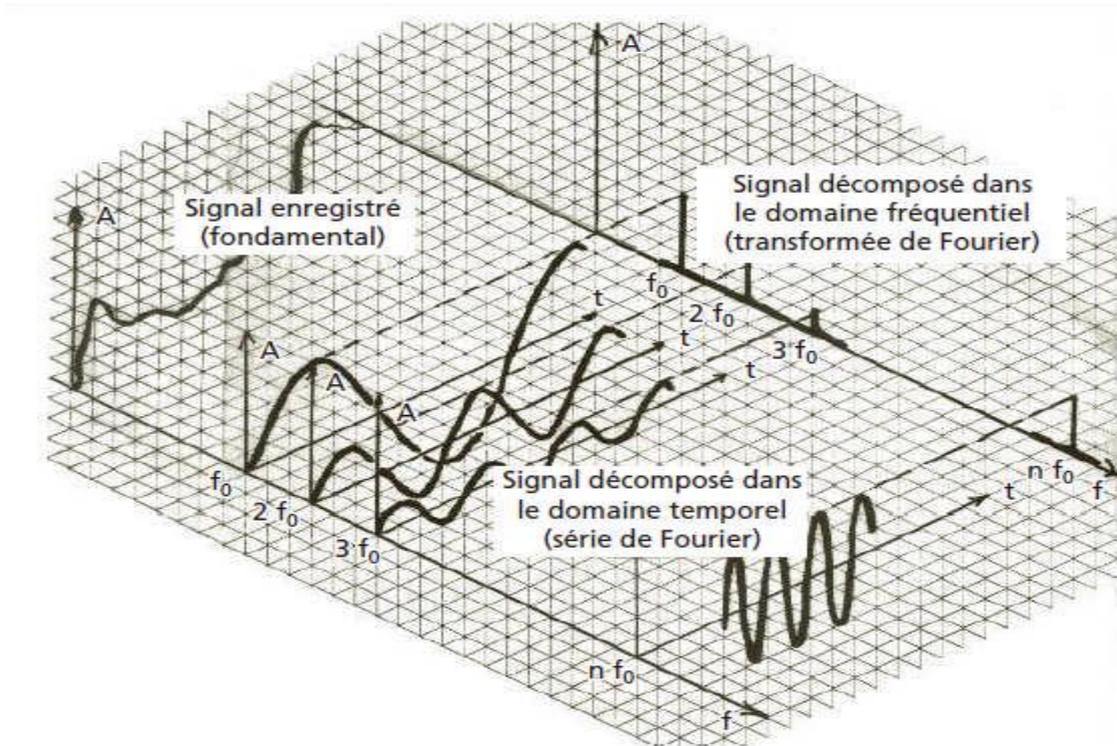


Figure I.3 : Différents représentations d'un signal brut par décompositions les domaines temporel et fréquentiel [13]

Exemple :

Si $S(t)$ peut désigner l'accélération, la vitesse ou le déplacement est une fonction périodique du temps t , on peut donc écrire :

$$S(t) = \sum_{n=0}^N S_n \sin(\omega_n t + \varphi) \quad (\text{I. 13})$$

Représentation graphique (figure I. 4. a) de la fonction :

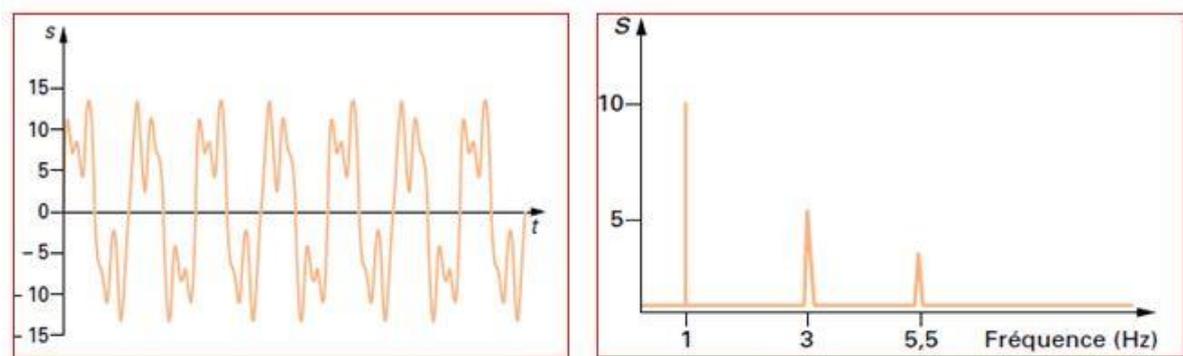
$$S(t) = 10 \sin(2\pi t) + 5 \sin(6\pi t) + 3 \sin(11\pi t) \quad (\text{I.14})$$

Un simple examen visuel du graphe de la figure (I. 4. a) ne permet pas de distinguer les trois phénomènes qui composent le mouvement total. On a besoin d'un outil mathématique supplémentaire. La transformée de Fourier, lorsqu'elle s'applique à une fonction du temps (comme l'accélération, la vitesse ou le déplacement), donne pour résultat une autre fonction dont la variable est la fréquence. La représentation graphique de cette nouvelle fonction

s'appelle « **spectre** ». Le spectre permet d'identifier rapidement tous les termes d'ordre n de la fonction du temps.

$$S(t) = 10 \sin(2\pi t) + 5 \sin(6\pi t) + 3 \sin(11\pi t) \quad (\text{I.15})$$

Si l'on applique la transformation de Fourier on obtient le spectre de la figure (I. 4. b) qui désigne sans équivoque la décomposition des trois fonctions sinusoïdales ayant comme caractéristiques : une première avec une amplitude 10 et une fréquence 1 Hz, une autre d'amplitude 5 et fréquence 3 Hz et enfin une dernière d'amplitude 3 et de fréquence 5,5 Hz [14].



a. Représentation de la fonction $S(t)$.

b. Représentation de la transformée de $S(t)$.

Figure I.4: Représentation graphique de la fonction $S(t)$ et de sa transformée de Fourier

I.8.2 Signal analytique

Les modes MA/MF c'est des notions de base dans l'analyse temps fréquence, qui représentent les modulations en amplitude et/ou en fréquences. Elles prennent la forme analytique définie par la fonction :

$$H(t) = A(t) \cos \varphi(t), (\forall t: A(t) > 0 \text{ et } \varphi'(t) > 0) \quad (\text{I.16})$$

Les fonctions $A(t)$, $\varphi(t)$ et $\nu(t) \equiv \varphi'(t)$ sont respectivement, l'amplitude, la phase et la fréquence instantanées [8].

I.8.3 L'origine de la modulation d'un signal

Un défaut dans le rotor va engendrer une sorte d'asymétrie qui, dans le cas d'une alimentation par un système de tension symétrique ; va être à l'origine d'un champ magnétique tournant

inverse de fréquence ($-2gfs$) dans le circuit rotorique. Cela va engendrer des courants circulant dans le circuit statorique à des fréquences :

$$f = (1 \pm 2ng)f_s \quad (\text{I.17})$$

Ces fréquences en fait correspondent à une modulation d'amplitude du courant [8]. Avec n est un entier.

I.8.4 Analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est une méthode qui permet de détecter des chocs périodiques à partir des résonances de structure. En effet, les défauts de roulement de type choc excitent les hautes fréquences des structures, ainsi un phénomène démodulation se produit entre la fréquence de défaut (basse fréquence) et la résonance déstructure (haute fréquence). Après avoir démodulé le signal, le spectre d'enveloppe fera mieux apparaître les raies d'impulsions dues au défaut. En pratique, pour obtenir le spectre du signal enveloppe, il faut suivre les étapes suivantes :

- Déterminer les fréquences de résonance.
- Filtrer avec un filtre passe bande le signal temporel autour des fréquences de résonance.
- Calculer le signal d'enveloppe à l'aide de la transformée d'Hilbert.
- Calculer le spectre d'enveloppe à l'aide de la transformée de Fourier [9].

I.9 Défaillances d'une machine asynchrone

I.9.1 défaillance électrique

Les machines asynchrones peuvent avoir des défauts électriques interne et externe, les défauts internes sont créés par les composantes de la machine, telles que le bobinage du stator et du rotor, circuits magnétique, entrefer mécanique, cage rotorique, etc. Les défauts externes sont engendrés par les charges mécaniques, l'alimentation de la machine, l'environnement (l'humidité, poussière, la température, etc).

La plupart de ses problèmes on les trouve dans le rotor et le stator [10].

I.9.1.1 Défauts statoriques

On peut clarifier les différents défauts possibles de court-circuit par la figure suivante :

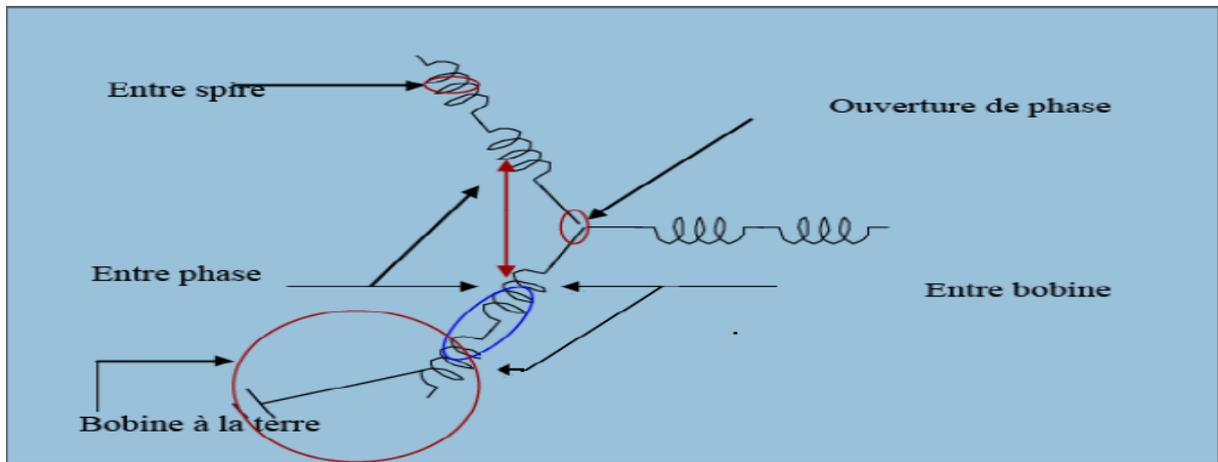


Figure I.5 : Représentation des défauts statorique possibles

I.9.1.1.1 Défauts d'isolation dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut créer des courts circuits entre spires, court-circuit entre deux phases, ou d'un court-circuit entre phase et la carcasse. Effectivement, les différentes pertes (joule, fer, mécanique,) génèrent des phénomènes thermiques causés par une température élevée des composants de la machine. En effet les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique, Ce fait le matériau d'isolation dépasse une de ces limites, Ce matériau se dégrade d'une manière prématurée.

Alors les différentes causes pour ce défaut sont :

- Dégradation du matériau d'isolation.
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- Fonctionnement dans un environnement sévère.
- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit [10].

I.9.1.1.2 Court-circuit entre spires

Parmi les défauts fréquents dans le stator le court-circuit entre spires de la même phase. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolants dans l'enroulement concerné. D'autre part, il entraîne aussi une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les phases et dans le cas des machines

asynchrones, il amplifie les courants dans le circuit rotorique, ceci a pour augmentation de la température au niveau du bobinage, et ce fait menée à la dégradation prématurée des isolants. Cet égard peut entraîner la propagation du défaut à d'autres spires [10].

I.9.1.1.3 Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point de bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines. Cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. L'apparition d'un court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il génère un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs [10]. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.



Figure I.6: Court-circuit dans une phase



Figure I.7: Masse dans l'encoche

I.9.1.1.4 Défaillance de circuit magnétique

Ces défauts arrivent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine. Les causes les plus fréquentes de défaut de circuit magnétiques sont généralement dues à un défaut d'excentricité soit statique ou dynamique qui peut conduire à un contact front entre le stator et le rotor ce qui défaille le circuit magnétique [10].

I.9.1.2 Défauts rotorique

Les défauts qui peuvent être localisé dans le rotor :

- Rupture de barres dans les machines asynchrones.
- Rupture d'une portion d'anneaux de court-circuit dans les machines asynchrones.

- Excentricités statique et dynamique.

I.9.1.2.1 Ruptures de barres

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. On peut les trouver au niveau de son encoche ou 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, Donc un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations causées à la détérioration de la machine.

Ainsi que le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance, aussi influent sur la diminution du couple. Un défaut dans rotor va engendrer une sorte d'asymétrie, et cette dernière va être à l'origine d'un champ magnétique inverse de fréquence ($-gfs$) dans le circuit rotorique. Cela va engendrer des courants circulant dans le circuit statorique à une fréquence de $(1 \pm 2g)fs$ [10].

I.9.1.2.2 Ruptures d'anneaux

La rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit dans machines asynchrones à cage, est un défaut qui apparait aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit portant des courants plus importants que ceux des barres rotoriques.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, génère un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [10].

I.9.2 Défaillances mécaniques

I.9.2.1 Défauts de roulement à billes

L'écaillage d'une piste de roulements provoque des chocs et une résonance du palier qu'il est facile d'identifier avec un appareil à mesure d'ondes de chocs. En analyse spectrale, ce phénomène apparait aux hautes fréquences par une densité spectrale qui augmente au fur et à mesure que les roulements se détériorent.

Les harmoniques contenus dans le spectre du courant statorique peuvent être décrit par ces expressions :

$$f_{exc} = \left(1 \pm k \cdot \left(\frac{1-g}{2} \right) \right) \cdot f \text{ (Hz)} \quad (\text{I.18})$$

$$f_{exc} = |f \pm k \cdot f_{rm}| \text{ (Hz)} \quad f_{bnng} = |f \pm m \cdot f_{vib}| \text{ (Hz)} \quad (\text{I.19})$$

Où f_{vib} est l'une des fréquences des vibrations mécaniques. Les fréquences caractéristiques des roulements à billes reposent sur la figure (I.7).

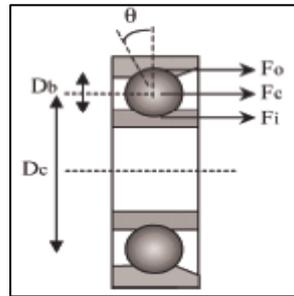


Figure I.8 : Défauts des roulements à billes

Un défaut de roulement à billes se manifeste par la répétition continue du contact défectueux avec la cage de roulement extérieure comme intérieure. Pour cela, la fréquence caractéristique est le double de la fréquence de rotation et on la notera f_b .

$$f_b = \frac{D_c}{D_b} f_r \left(1 - \left(\frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right)^2 \right) \quad (\text{I.20})$$

La fréquence de répétition sera pour la cage intérieure (CI) comme extérieure (CE) décrit par [15] :

$$f_{int} = \frac{n_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right) \quad (\text{I.21})$$

$$f_{ext} = \frac{n_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \theta \right) \quad (\text{I.22})$$

Où :

g = glissement

f = fréquence d'alimentation

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

$k = 1,3,5, \dots, k \in \mathbb{N}$

p =nombre de paires de pôles

n_b =nombre de billes

D_b =diamètres des billes

D_c =distance du centre des billes

θ =L'angle de contact de la bille avec la cage

La plupart des roulements ont entre 6 à 12 billes. Pour cela, il est usuel d'appliquer les deux relations suivantes :

$$f_{CE} = f \pm f_{ext}(0.4 \cdot n_b \cdot f_r) \quad (I.23)$$

$$f_{CI} = f \pm f_{int}(0.6 \cdot n_b \cdot f_r) \quad (I.24)$$

I.9.2.2 Balourd

Le balourd est un défaut qui se rencontre en présence du déséquilibre de l'arbre d'une machine tournante. Le balourd est la cause des vibrations la plus fréquemment rencontrée. La force générée par le balourd est en fonction de la masse, et du rayon du cercle sur lequel le rotor tourne. Donc il est difficile de les équilibrer parfaitement et il existe toujours une vibration à la fréquence de rotation dont l'amplitude est proportionnelle à l'importance du balourd et au carré de la vitesse de rotation [9].

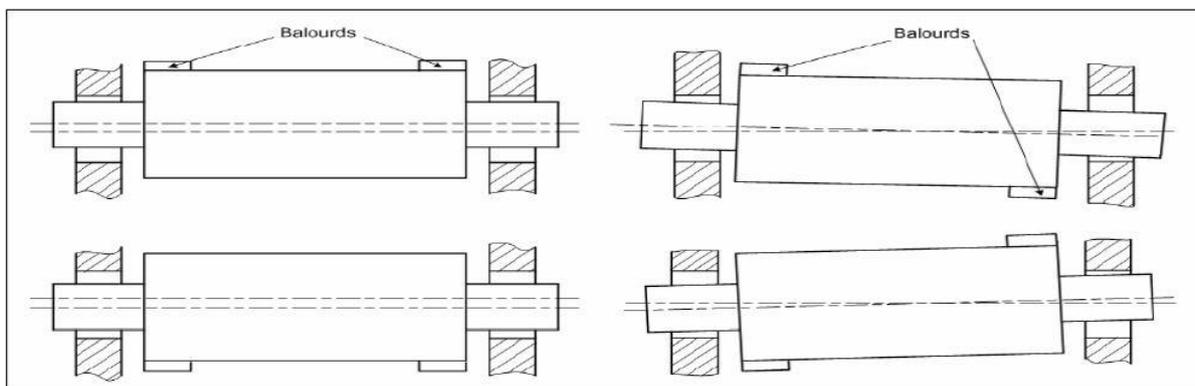


Figure I.9 : Défauts de balourd

I.9.2.3 Excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport

au stator. Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité. La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement. Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine. En effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor [1] [15].

Les fréquences induites, proches du fondamental, sont données par la relation :

$$f_{exc} = \left(1 \pm n \left(\frac{1-g}{p} \right) \right) f_s \quad (I.25)$$

Avec f_{exc} : fréquence d'excentricité

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

p : nombre de pair de pôles

g : le glissement

f : la fréquence d'alimentation

Généralement il y a trois catégories d'excentricité sont illustrées sur la figure (I.10).

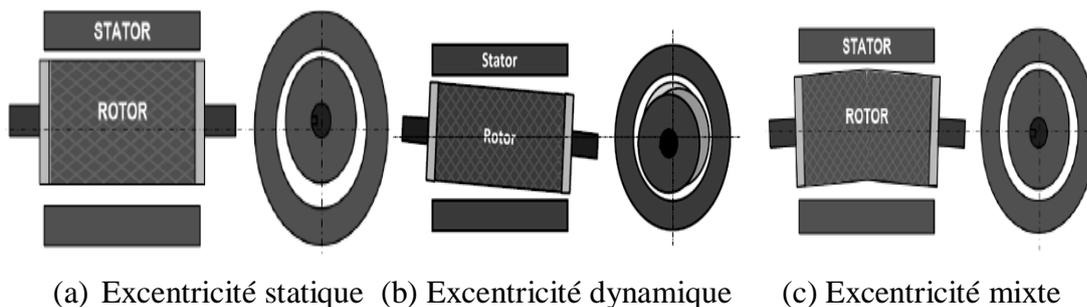


Figure I.10: Types d'excentricité

I.10 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les principales grandeurs mécaniques et électriques utilisées pour la détection des défauts dans les machines électriques, et nous avons abordé les méthodes de diagnostic (diagnostic global et approfondi), déjà utilisées dans le

Chapitre I Grandeurs électriques et mécaniques pour l'aide au diagnostic et Défaillances des machines asynchrone

domaine industriel. Ce chapitre fait aussi état des différentes origines des défaillances qui peuvent se produire sur les machines asynchrone (électriques et mécaniques). Donc, il est essentiel de connaître les défaillances des machines et les facteurs qui mènent à leurs détériorations, telles que les défaillances électriques ou mécaniques.

Chapitre II : Extraction des indicateurs et aide au diagnostic d'une génératrice

II.1 Introduction

Machine asynchrone est la machine la plus utilisée dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Donc, il est essentiel de connaître les défaillances de cette machine. Dans ce chapitre, nous allons proposer de surveiller une génératrice asynchrone à l'aide d'extraction des indicateurs statistiques à partir des grandeurs mesurables : valeurs efficace (RMS), énergie, Kurtosis, Facteur crête, Entropie et Complexité.

II.2 Description de l'expérience

Dans l'objectif de mener une étude expérimentale sur le cas d'un défaut de déséquilibre électrique rotorique qui peut survenir sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), l'université de Durham (Angleterre) a effectué des recherches expérimentales sur un banc d'essai, illustré sur la Figure II.1[12]. Ce banc est constitué d'une génératrice industrielle à double alimentation : 4 poles, triphasée, 240V, 50Hz, 30kW, avec une résistance de phase nominale du rotor 0.066Ω . Elle est entraînée par un moteur à courant continu de 40kW. Un défaut de déséquilibre électrique au rotor (DER) est simulé sur cette génératrice en introduisant une résistance externe R_d dans un enroulement de la phase du rotor de la GADA comme il est indiqué sur la figure suivante.

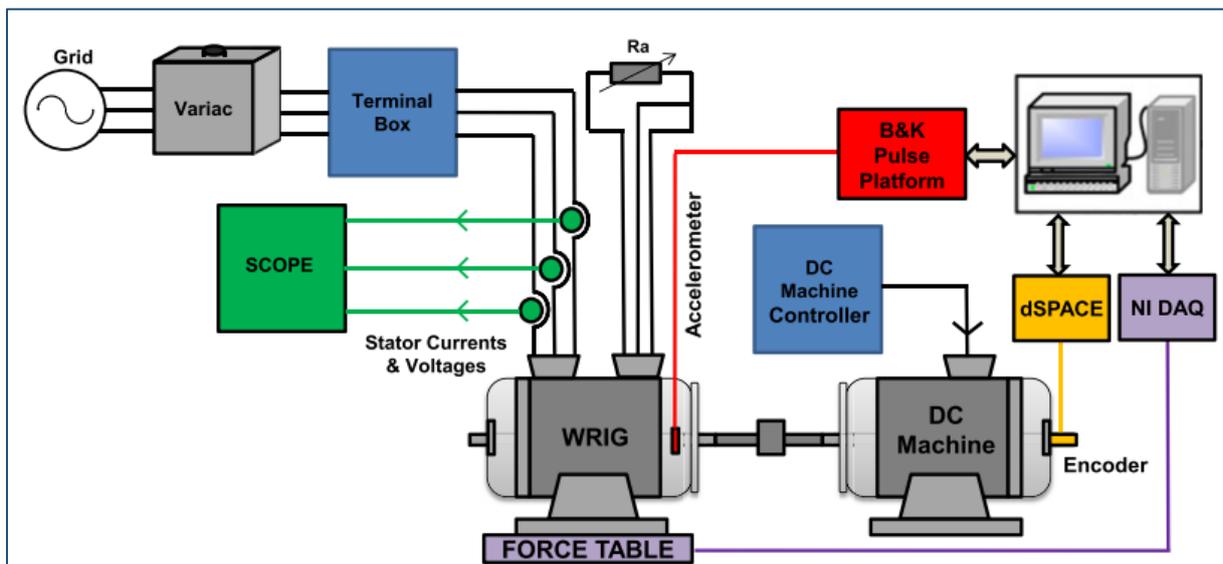


Figure II.1: Schéma d'expérience sur le banc d'essai et les instruments d'acquisition des mesures électriques et mécaniques [12]

Les essais ont été menés sur la génératrice pour deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min) afin de mesurer différentes grandeurs électriques et mécaniques telles que les courants, la puissance, le couple et la vitesse de rotation de la génératrice pour différents cas de défauts de déséquilibre : 0, 150, 225 et 300 % de la résistance de phase rotorique (0.066Ω).

Les figures (II.2 à II.5) montrent les signaux des grandeurs électriques et mécaniques mesurés en fonction du temps pour deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min) et dans les quatre cas de défaut (DER). Ces signaux sont d'abord traités dans le domaine temporel dans ce chapitre, ensuite analysés dans le domaine fréquentiel au chapitre suivant.

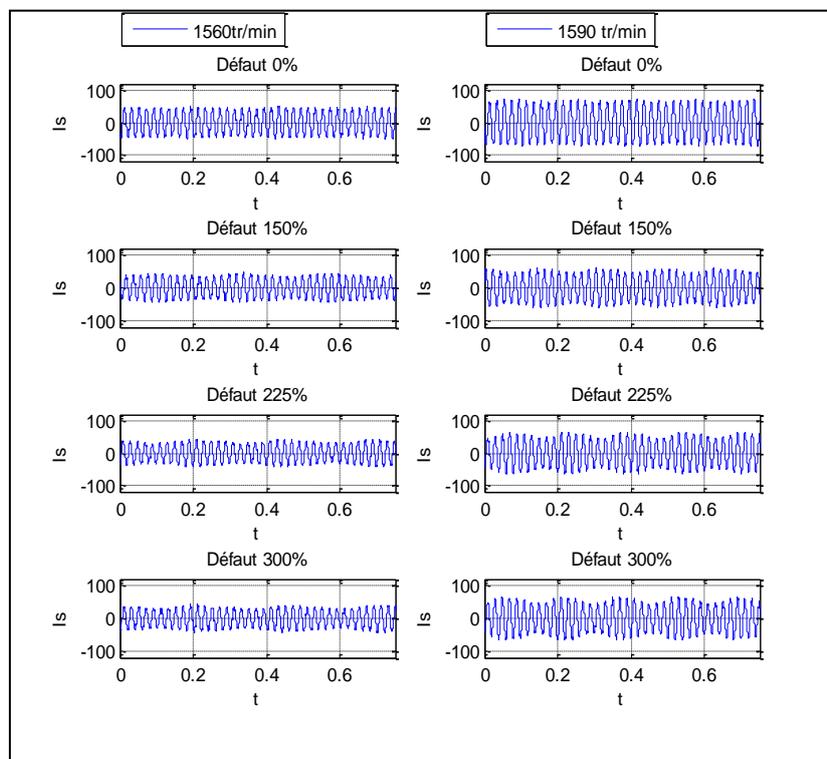


Figure II.2: Les signaux des courants statoriques en fonction du temps pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min), pour chaque % de défaut

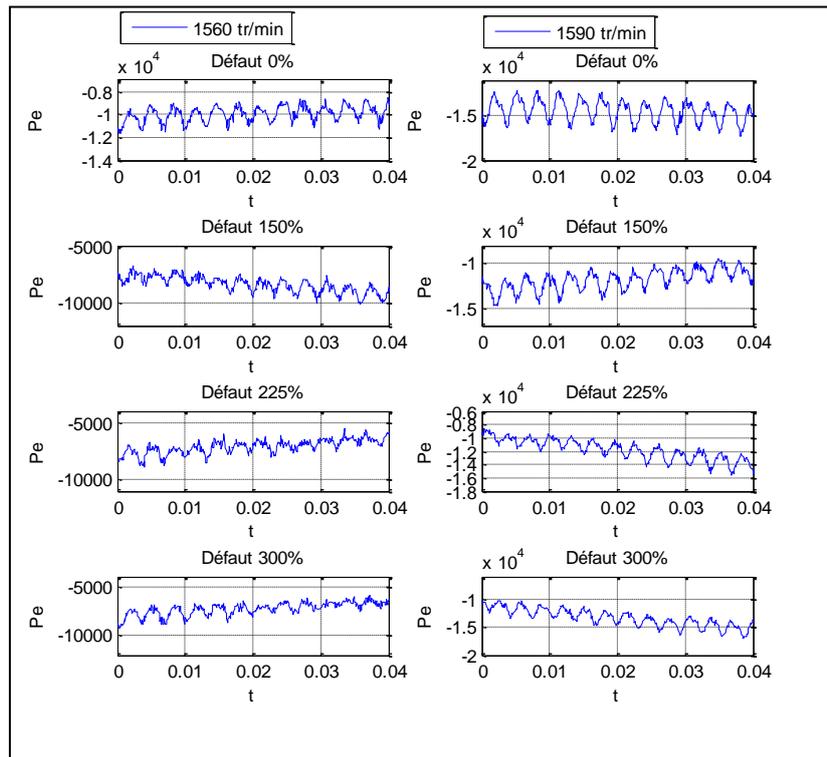


Figure II.3: Les signaux des puissances électriques en fonction du temps pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min), pour chaque % de défaut

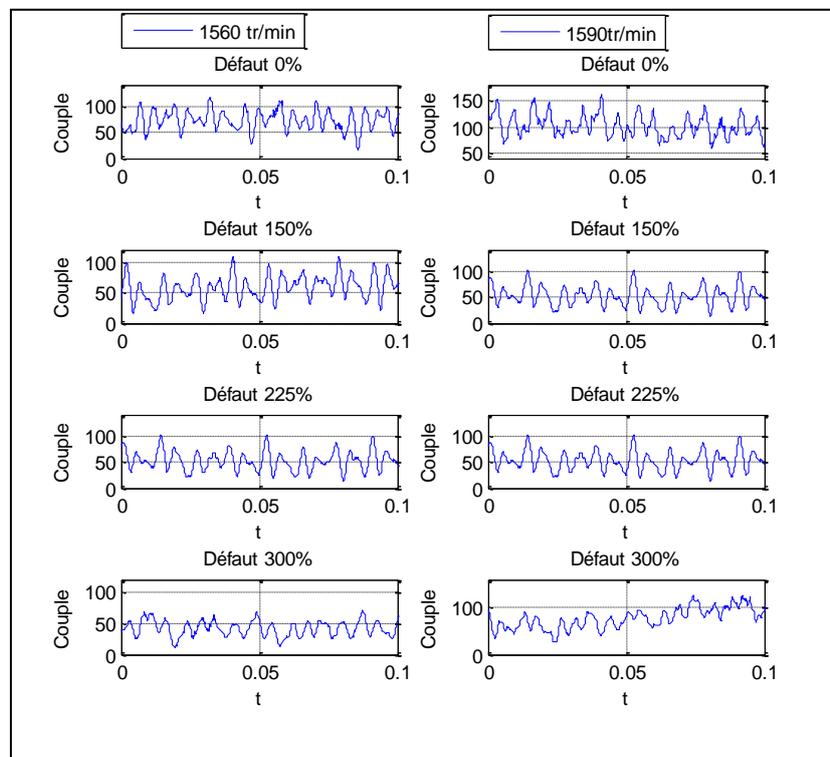


Figure II.4: Les signaux du couple électromagnétique en fonction du temps pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min), pour chaque % de défaut

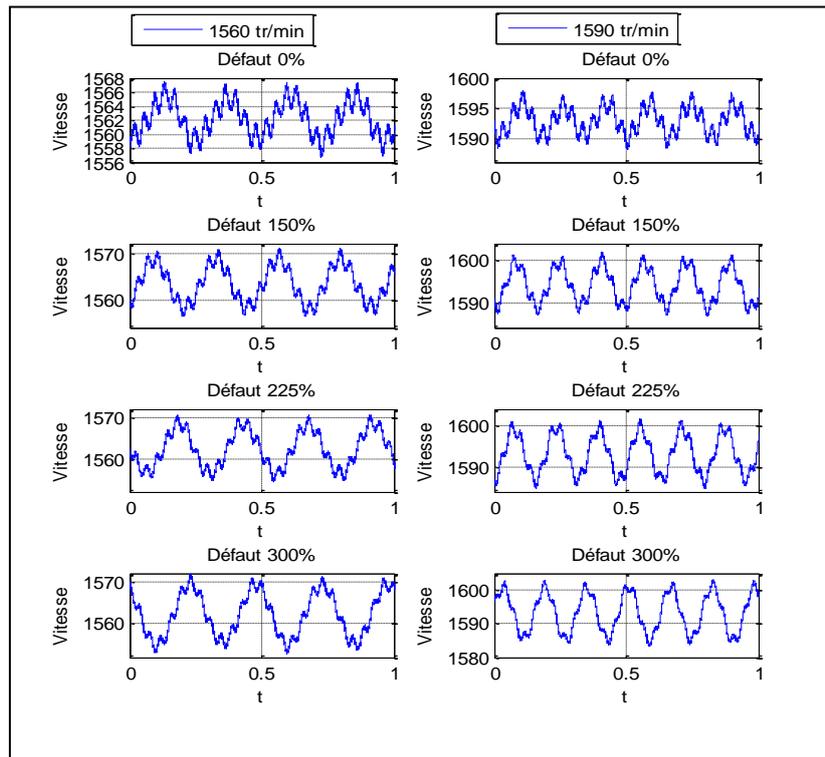


Figure II.5: Les signaux des vitesses de rotation de génératrice en fonction du temps pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min), pour chaque % de défaut

II.3 Evaluation des indicateurs pour la surveillance du défaut

Le travail dans cette partie consiste à calculer les valeurs des indicateurs statistiques (valeurs efficaces RMS, Energie, Kurtosis, Facteur crête, Entropie et complexité) pour les signaux de mesures effectuées sur la machine à savoir ; le courant statorique, la puissance électrique, le couple électromagnétique et vitesse de rotation de la génératrice (figure II.2 - figure II.5) ainsi que les valeurs des indicateurs de leurs enveloppes (obtenues par la transformée de Hilbert), Ensuite, de tracer les graphes de ces valeurs obtenues, pour constater l'indicateur le plus approprié à la surveillance de défaut. En effet, L'analyse de l'enveloppe consiste à démoduler les signaux modulés, comme exposé au premier chapitre.

II.3.1 L'indicateur de valeur efficace (RMS)

Pour chaque cas de défaut, nous avons calculé les valeurs efficaces des signaux des figures II.2 à II.5 et les valeurs efficaces de leurs enveloppes pour deux vitesses d'entraînement du moteur 1560 et 1590 tr/min. A la fin, nous avons tracé les figures II.6 à II.9 suivantes :

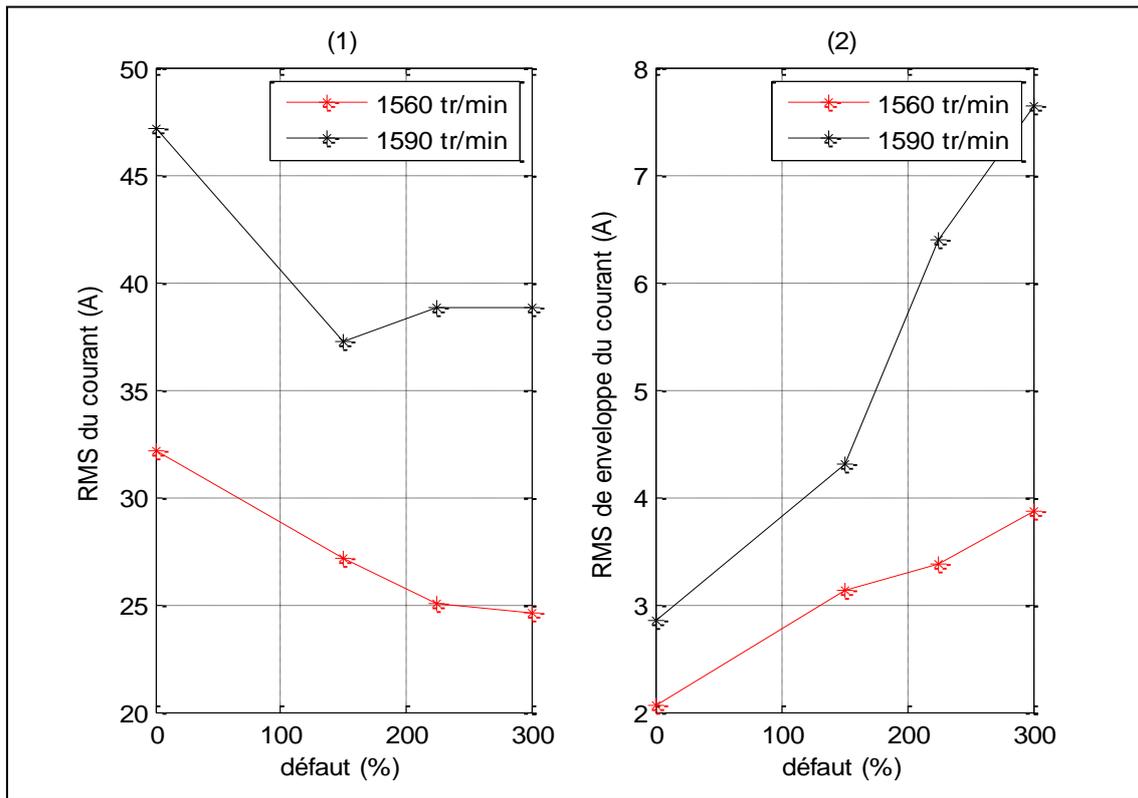


Figure II.6 : (1) courbes des valeurs efficaces du courant statorique (2) courbes des valeurs efficaces de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.6 donne l'évolution des valeurs efficaces du courant statorique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs efficaces de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les valeurs du RMS augmentent. Cependant, sur le graphe (1) les valeurs efficaces du courant statorique ne décroissent pas de façon claire pour les deux vitesses, pour cela on ne peut pas déduire que cet indicateur est efficace pour surveiller ce défaut de la machine. Par contre le graphe (2) montre des valeurs efficaces de l'enveloppe du courant statorique qui augmentent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut et ce pour deux vitesses d'entraînement.

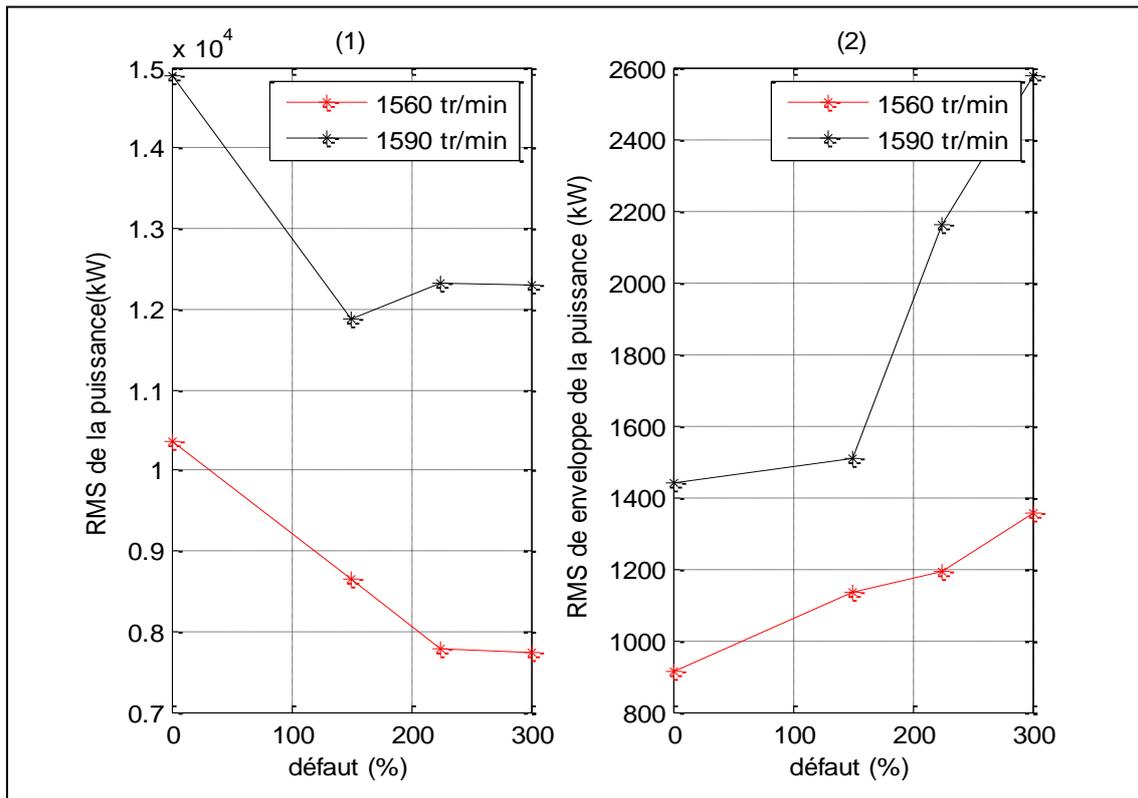


Figure II.7 : (1) courbes des valeurs efficaces de la puissance électrique (2) courbes des valeurs efficaces de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Nous pouvons mettre les mêmes déductions que la figure précédente pour les graphes des valeurs efficaces de la puissance électrique de la machine, exposée sur la figure II.7.

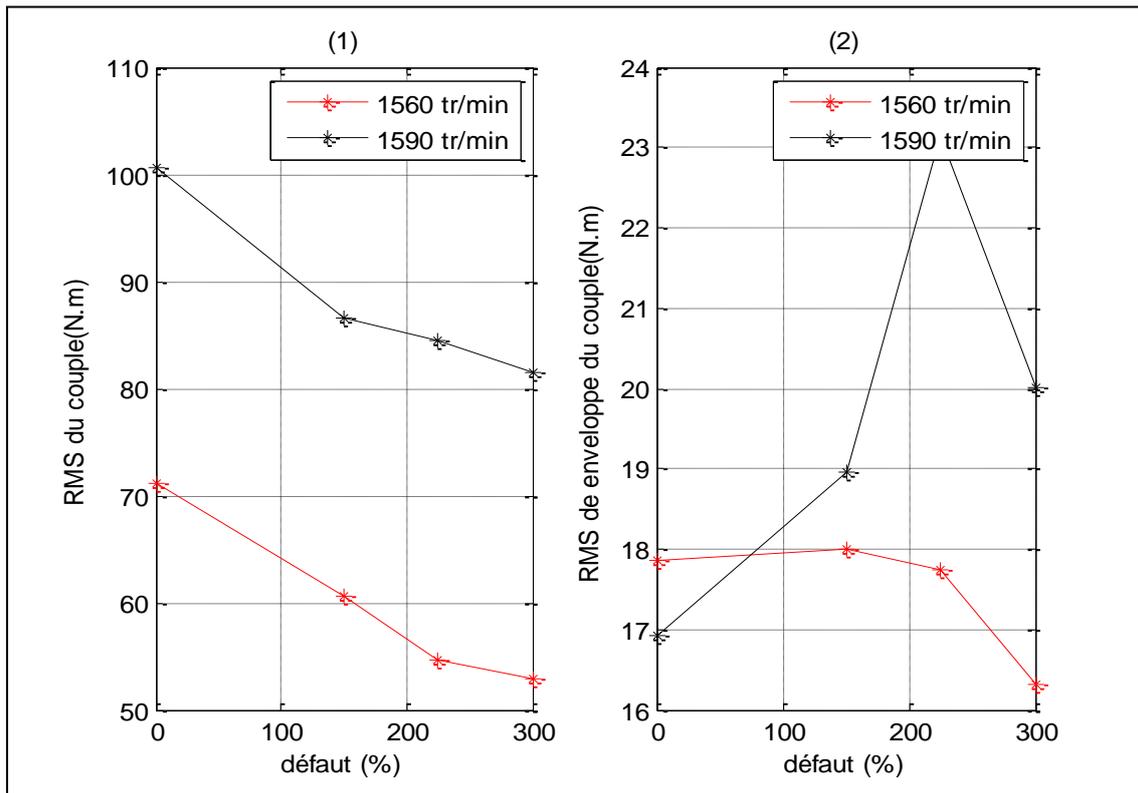


Figure II.8: (1) courbes des valeurs efficaces du couple électromagnétique (2) courbes des valeurs efficaces de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.8 donne l'évolution des valeurs efficaces du couple électromagnétique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs efficaces de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente plus les valeurs efficaces du couple électromagnétique augmentent, sur le graphe (2) les valeurs efficaces de l'enveloppe du couple électromagnétique ne prennent pas un rythme continu (soit augmenter ou diminuer) pour les deux vitesses d'entraînement pour cela on ne peut pas distinguer si cet indicateur est efficace pour surveiller la machine. Par contre le graphe (1) montre des valeurs efficaces du couple électromagnétique qui diminuent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut et ce pour deux vitesses d'entraînement.

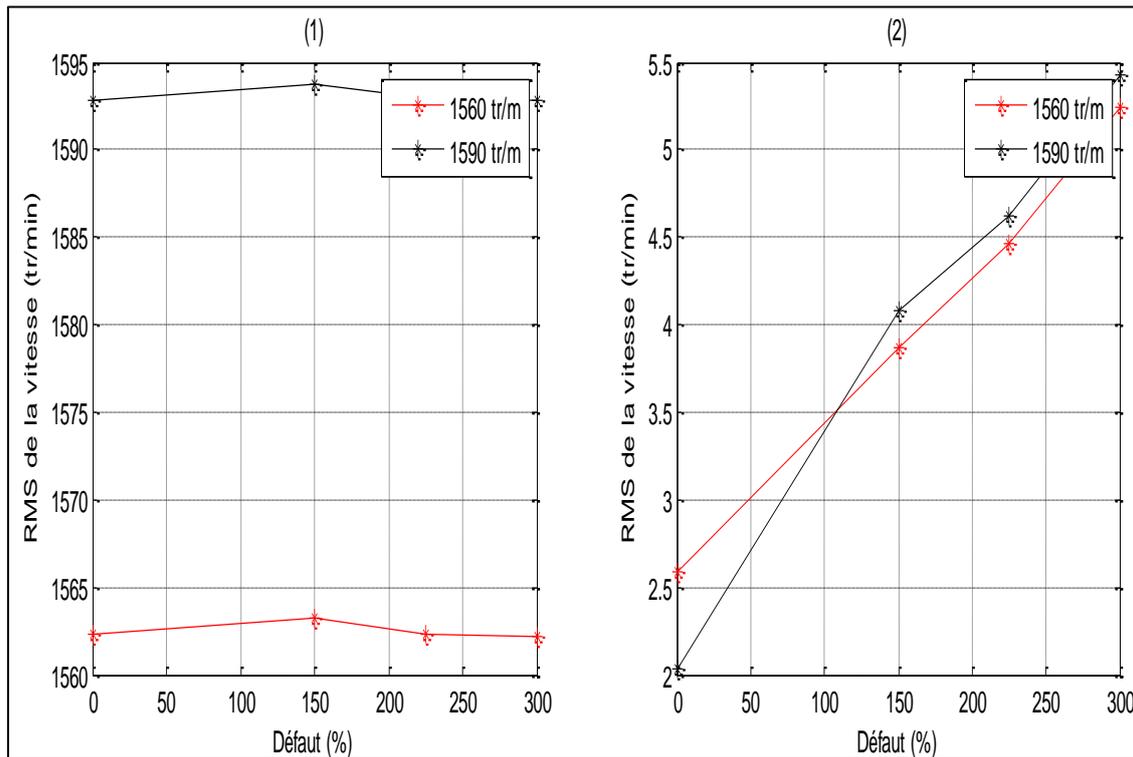


Figure II.9 : (1) courbes des valeurs efficaces de la vitesse de rotation de la génératrice (2) courbes des valeurs efficaces d'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.9 donne l'évolution des valeurs efficaces de la vitesse de rotation de la génératrice et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs efficaces de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les valeurs RMS de la vitesse de rotation de la génératrice augmentent. Sur le graphe (1) les valeurs efficaces de la vitesse de rotation de la génératrice restent très proches et presque pour les deux vitesses d'entraînement et pour les deux vitesses pour cela on ne peut pas déduire si cet indicateur est efficace pour surveiller le défaut de la machine. Par contre le graphe (2) montre des valeurs efficaces de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice qui augmentent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut et ce pour deux vitesses d'entraînements.

II. 3.2 L'indicateur de l'Energie

Pour chaque cas de défaut nous avons calculé les valeurs de l'énergie des signaux des figures II.2 à II.5 et les valeurs de l'énergie de leurs enveloppes pour deux vitesses d'entraînement du moteur 1560 et 1590 tr/min. A la fin, nous avons tracé les figures II.10 à II.13 suivantes :

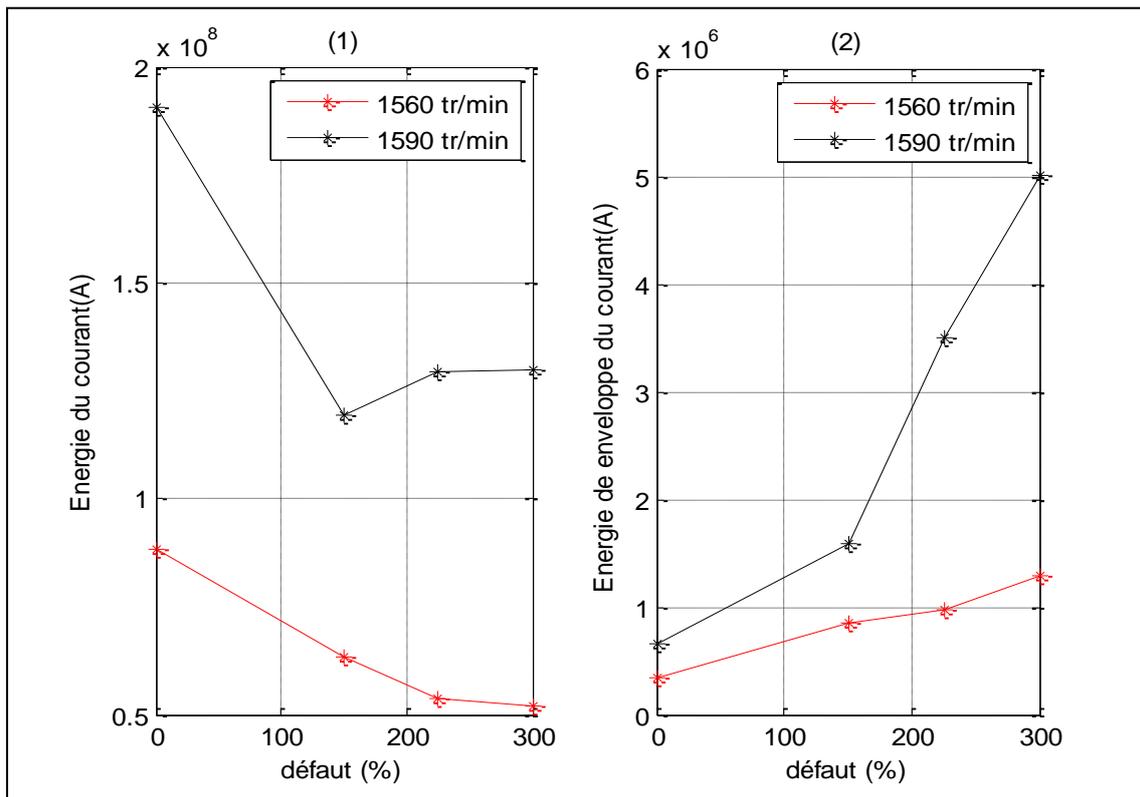


Figure II.10 : (1) courbes des valeurs de l'énergie du courant statorique (2) courbes des valeurs de l'énergie de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.10 donne l'évolution des valeurs de l'énergie du courant statorique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs de l'énergie de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les valeurs de l'énergie du courant augmentent. Sur le graphe (1) les valeurs de l'énergie du courant statorique ne décroissent pas de façon claire pour les deux vitesses pour cela on ne peut pas déduire que cet indicateur est efficace pour surveiller ce défaut de la

machine. Par contre le graphe (2) montre des valeurs de l'énergie de l'enveloppe du courant statorique qui augmentent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut et ce pour deux vitesses d'entraînement.

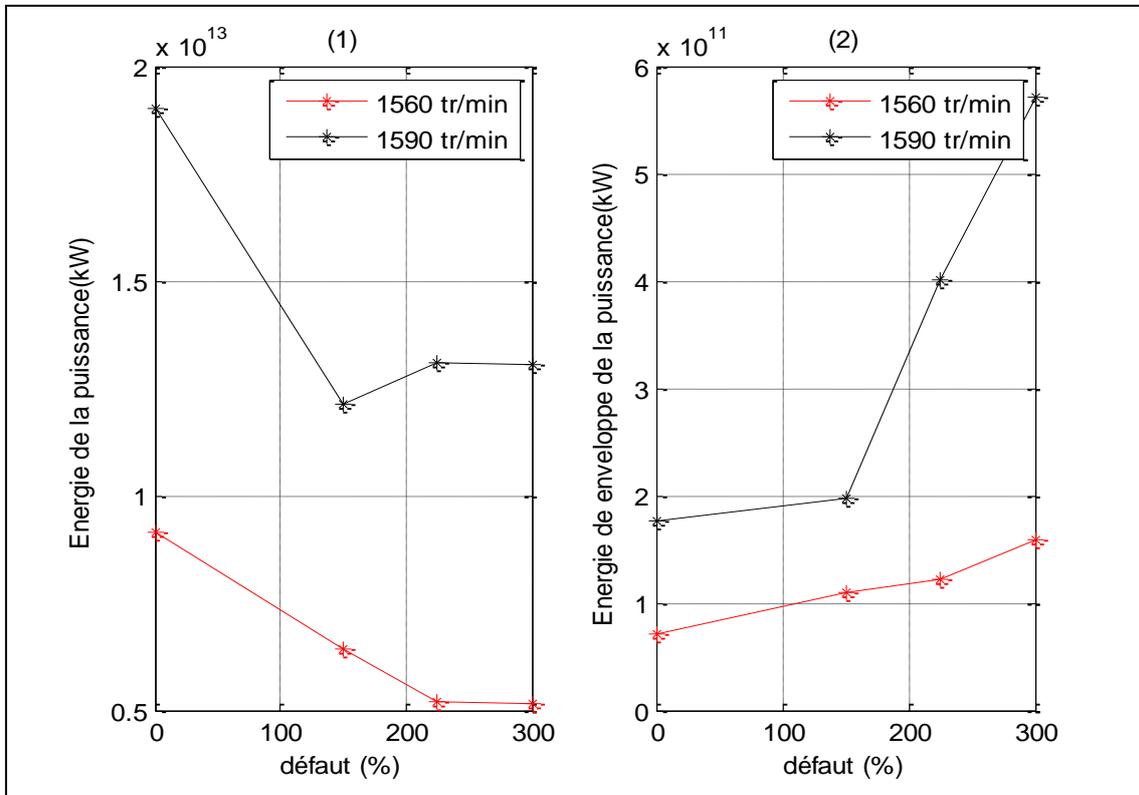


Figure II.11 : (1) courbes des valeurs énergie de la puissance électrique(2) courbes des valeurs énergie de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Nous pouvons mettre les mêmes déductions que la figure précédente pour les graphes des valeurs de l'énergie de la puissance électrique de la machine, exposée sur la figure II.10.

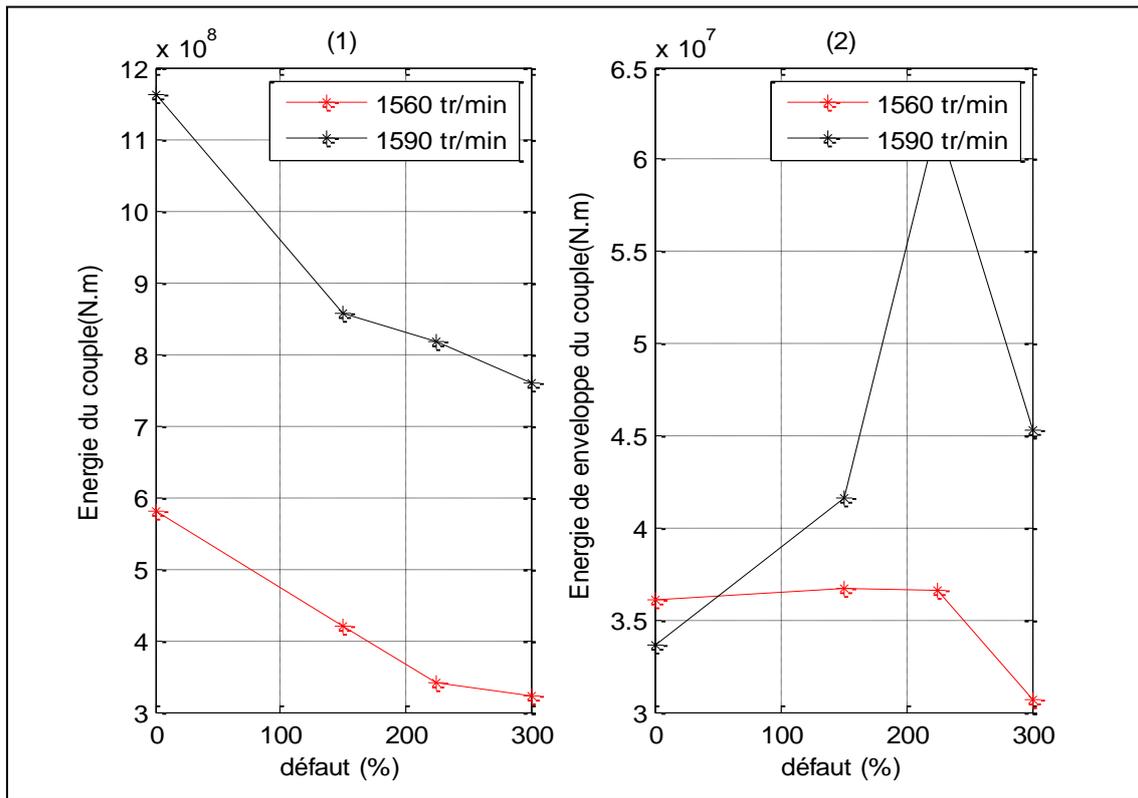


Figure II.12 : (1) courbes des valeurs énergie du couple électromagnétique (2) courbes des valeurs énergie de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.12 donne l'évolution des valeurs de l'énergie du couple électromagnétique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs de l'énergie de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min, Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les valeurs de l'énergie du couple électromagnétique augmentent. Sur le graphe (2) les valeurs de l'énergie de l'enveloppe du couple électromagnétique ne changent pas proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut, alors on ne peut pas distinguer si cet indicateur est efficace pour surveiller la machine. Par contre le graphe (1) montre des valeurs de l'énergie du couple électromagnétique qui diminuent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut et ce pour deux vitesses d'entraînement.

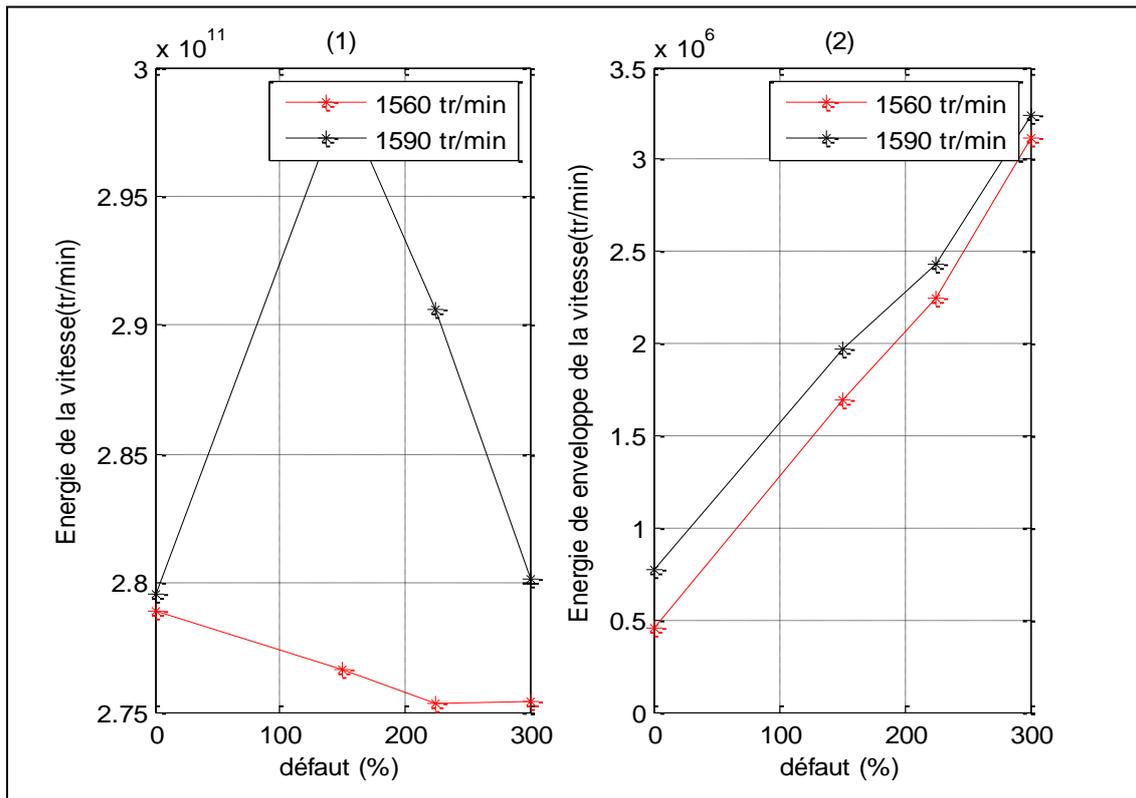


Figure II.13 : (1) courbes des valeurs de l'énergie de la vitesse de rotation de la génératrice (2) courbes des valeurs de l'énergie de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.13 donne l'évolution des valeurs de l'énergie de la vitesse de rotation de la génératrice et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs de l'énergie de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Sur le graphe (1) on ne peut pas déduire que cet indicateur est efficace pour surveiller le défaut de la machine, Par contre le graphe (2) montre des valeurs de l'énergie de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice qui augmentent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut et ce pour deux vitesses d'entraînement, donc cet indicateur est efficace pour anticiper ce défaut de la machine, alors on déduit que cet indicateur est efficace pour anticiper ce défaut de la machine, par l'analyse des signaux qui montrent l'évolution des valeurs de l'énergie de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice.

II.3.3 L'indicateur Kurtosis

Pour chaque cas de défaut nous avons calculé les valeurs du Kurtosis des signaux des figures II.2 à II.5 et les valeurs du Kurtosis de leurs enveloppes pour deux vitesses d'entraînement du moteur 1560 et 1590 tr/min. A la fin nous avons tracé les figures de II.14 à II.17 suivantes :

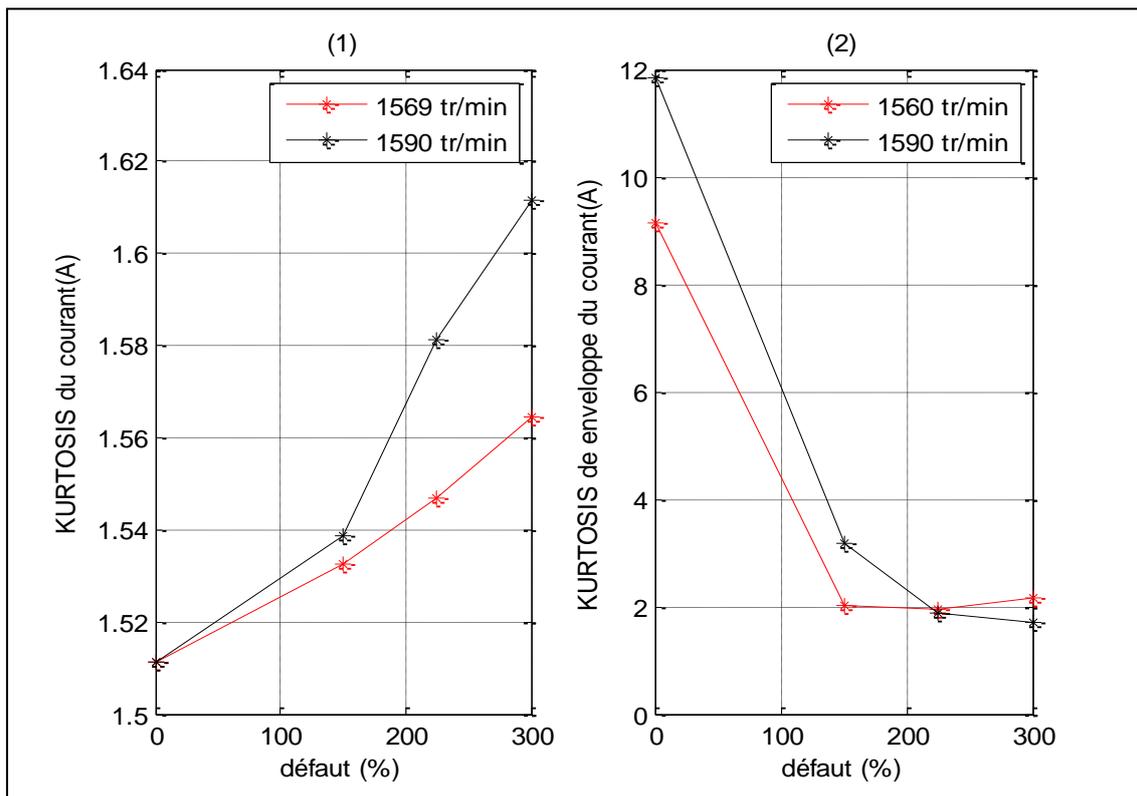


Figure II.14 :(1) courbes des valeurs Kurtosis du courant statorique (2) courbes des valeurs Kurtosis de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.14 donne l'évolution des valeurs du Kurtosis du courant statorique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs du Kurtosis de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les valeurs du Kurtosis du courant augmentent. Sur le graphe (2) les valeurs du Kurtosis de l'enveloppe du courant statorique ne décroissent pas de façon claire pour les deux vitesses, pour cela on ne peut pas déduire si cet indicateur est efficace pour surveiller ce défaut de la machine. Par contre le graphe (1) montre des valeurs du Kurtosis du courant statorique qui augmentent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut et ce pour

deux vitesses d'entraînement, donc cet indicateur est efficace pour anticiper ce défaut de la machine, par l'analyse des signaux qui montrent l'évolution des valeurs du Kurtosis du courant statorique.

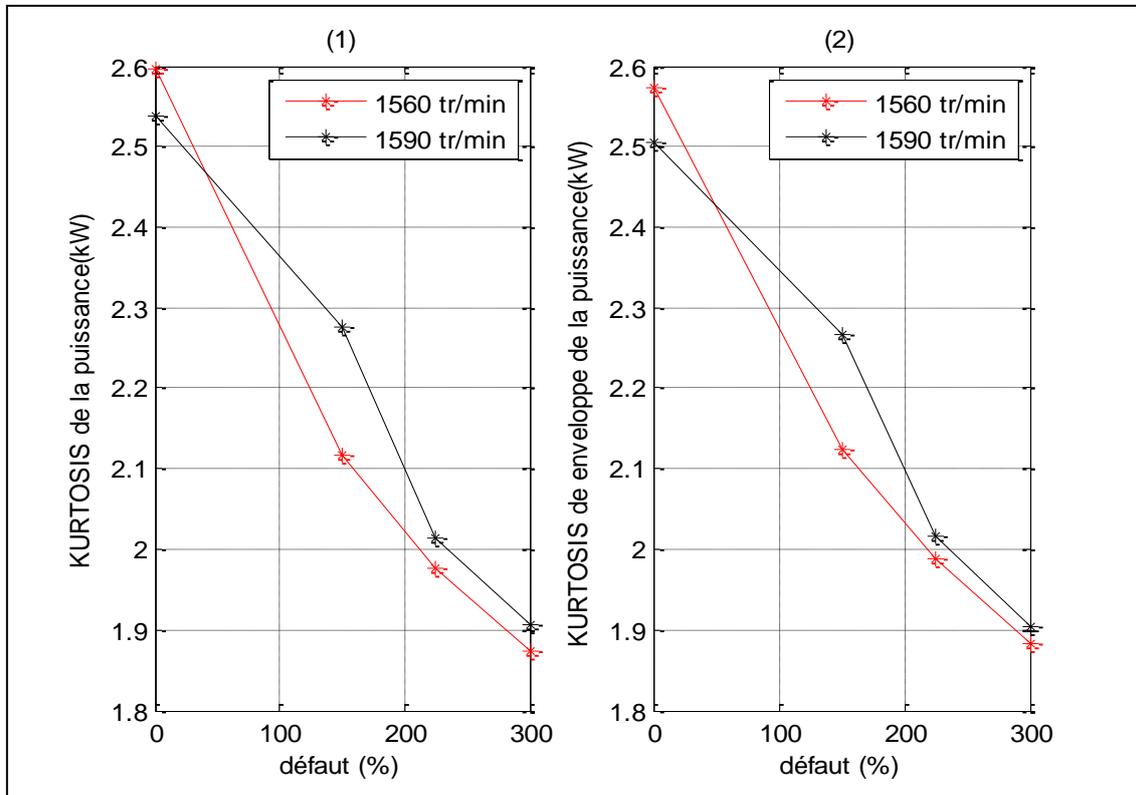


Figure II.15 : (1) courbes des valeurs du Kurtosis de la puissance électrique (2) courbes des valeurs du Kurtosis de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.15 donne l'évolution des valeurs du Kurtosis de la puissance électrique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs du Kurtosis de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les valeurs du Kurtosis de la puissance électrique diminuent. Les graphes (1) et (2) montrent que les valeurs du Kurtosis et les valeurs du Kurtosis de leurs enveloppes de la puissance électrique diminuent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut et ce pour les deux vitesses d'entraînement, donc cet indicateur est efficace pour anticiper ce défaut de la machine, par l'analyse des signaux qui montrent l'évolution des valeurs du Kurtosis de la puissance électrique.

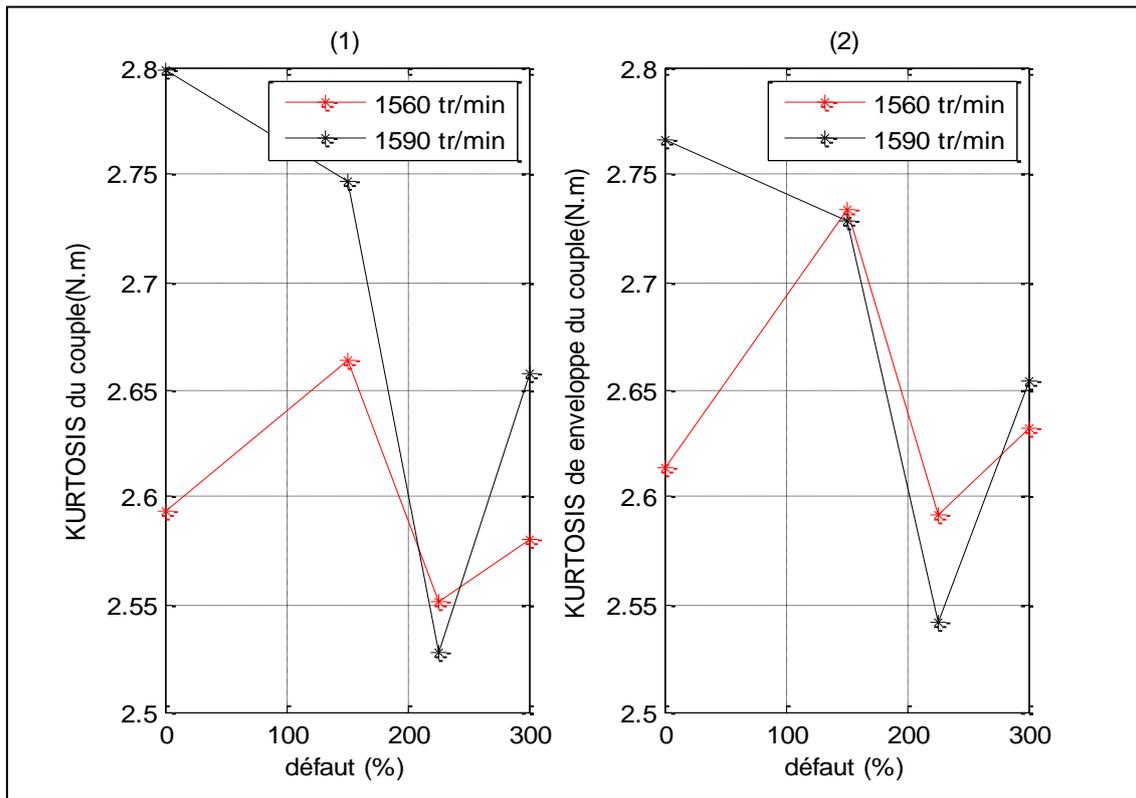


Figure II.16 : (1) courbes des valeurs du Kurtosis du couple électromagnétique (2) courbes des valeurs du Kurtosis de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.16 donne l'évolution des valeurs du Kurtosis du couple électromagnétique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs du Kurtosis de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Les valeurs du Kurtosis et les valeurs du Kurtosis de l'enveloppe du couple électromagnétique : graphes (1) et (2) ne prennent pas le même rythme (soit augmentent ou diminuent) pour les deux vitesses d'entraînement pour cela on peut ne pas déduire si cet indicateur est efficace pour surveiller ce défaut de la machine.

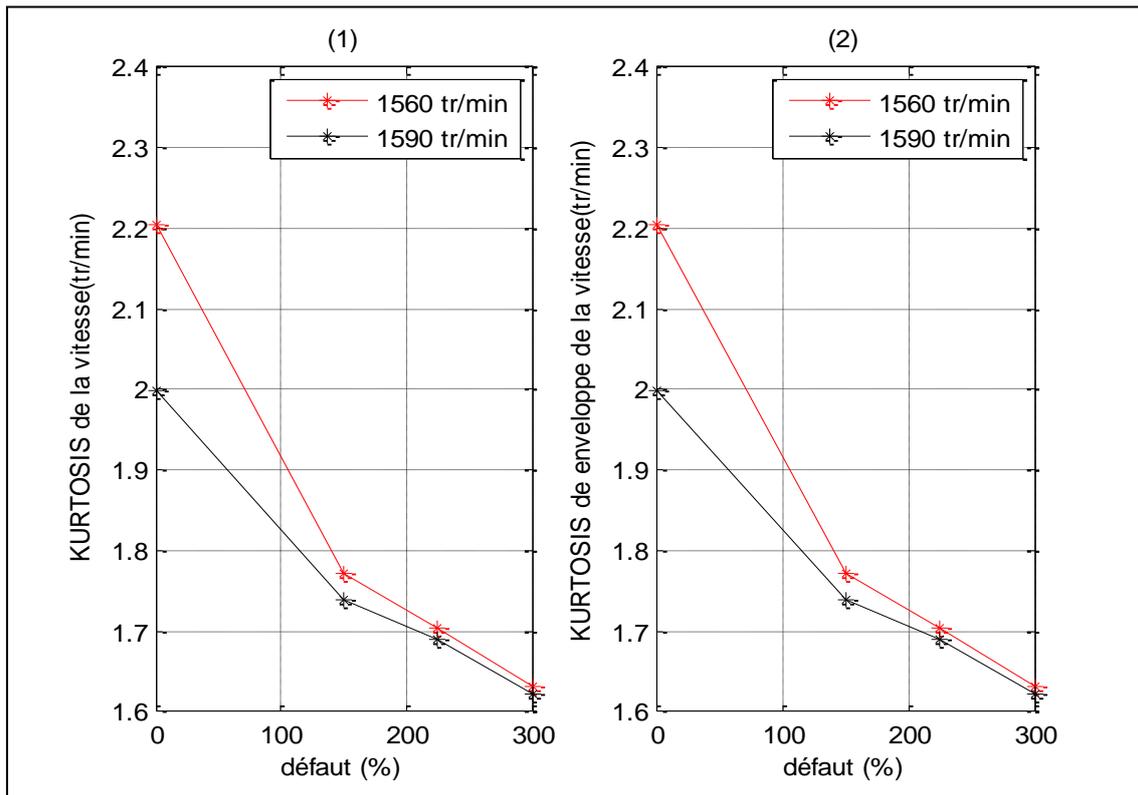


Figure II.17 : (1) courbes des valeurs du Kurtosis de la vitesse de rotation de la génératrice (2) courbes des valeurs du Kurtosis de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.17 donne l'évolution des valeurs du Kurtosis de la vitesse de rotation de la génératrice et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs du Kurtosis de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min, Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les valeurs du Kurtosis et les valeurs du Kurtosis de leurs enveloppes de la vitesse de rotation de la génératrice diminuent. Les graphes (1) et (2) montrent que les valeurs du Kurtosis et les valeurs du Kurtosis de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice diminuent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut ce pour les deux vitesses d'entraînement, donc cet indicateur est efficace pour anticiper ce défaut de la machine par l'analyse des signaux qui montrent l'évolution des valeurs du Kurtosis de la vitesse de rotations de la génératrice.

II.3.4 L'indicateur facteur crête

Pour chaque cas de défaut nous avons calculé les valeurs du Facteur crête des signaux des figures II.2 à II.5 et aussi les valeurs du Facteur crête de l'enveloppe pour deux vitesses d'entraînement du moteur 1560 et 1590 tr/min. A la fin nous avons tracé les figures II.18, II.19, II.20, II.21 suivantes :

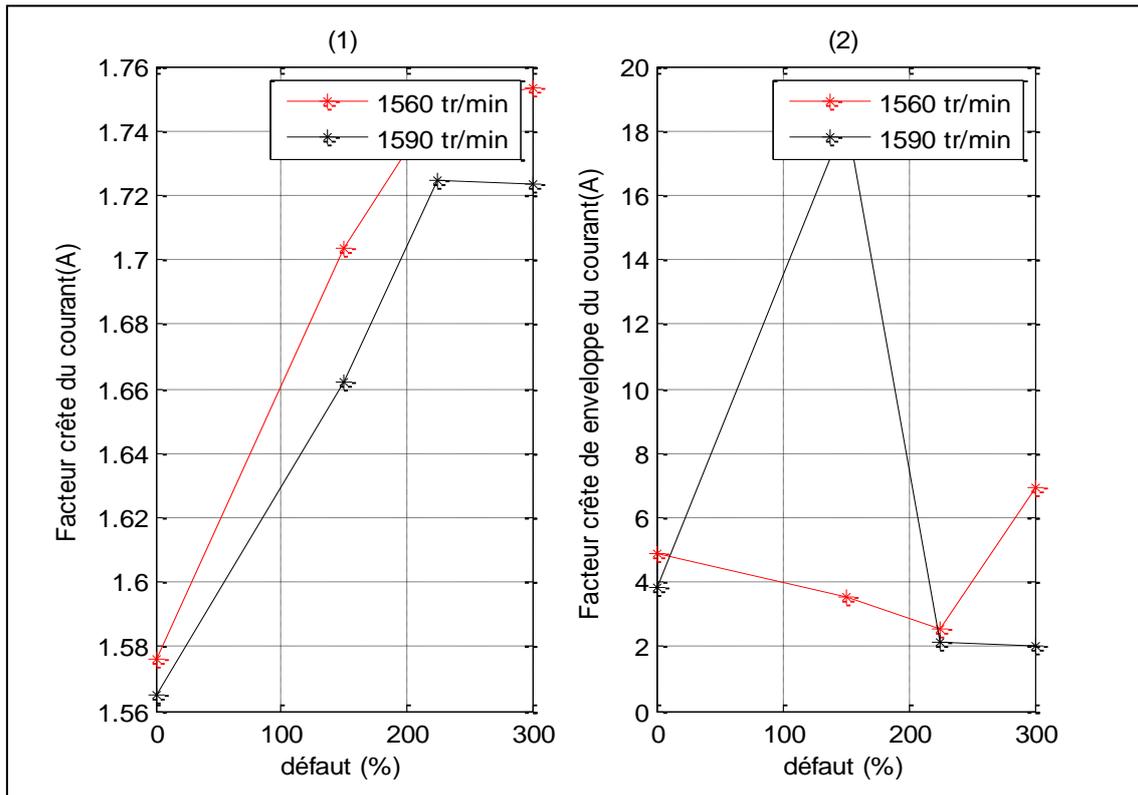


Figure II.18 : (1) courbes des valeurs du Facteur crête du courant statorique (2) courbes des valeurs du Facteur crête de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.18 donne l'évolution des valeurs du Facteur crête du courant statorique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs du Facteur crête de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Sur le graphe (1), les valeurs du Facteur crête du courant statorique ne croient pas de façon claire et les valeurs du facteur crête de leurs enveloppes (graphe 2) ne prennent pas le un rythme (soit augmenter ou diminuer) pour les deux vitesses pour cela on ne pas déduire que cet indicateur est efficace pour surveiller le défaut de la machine.

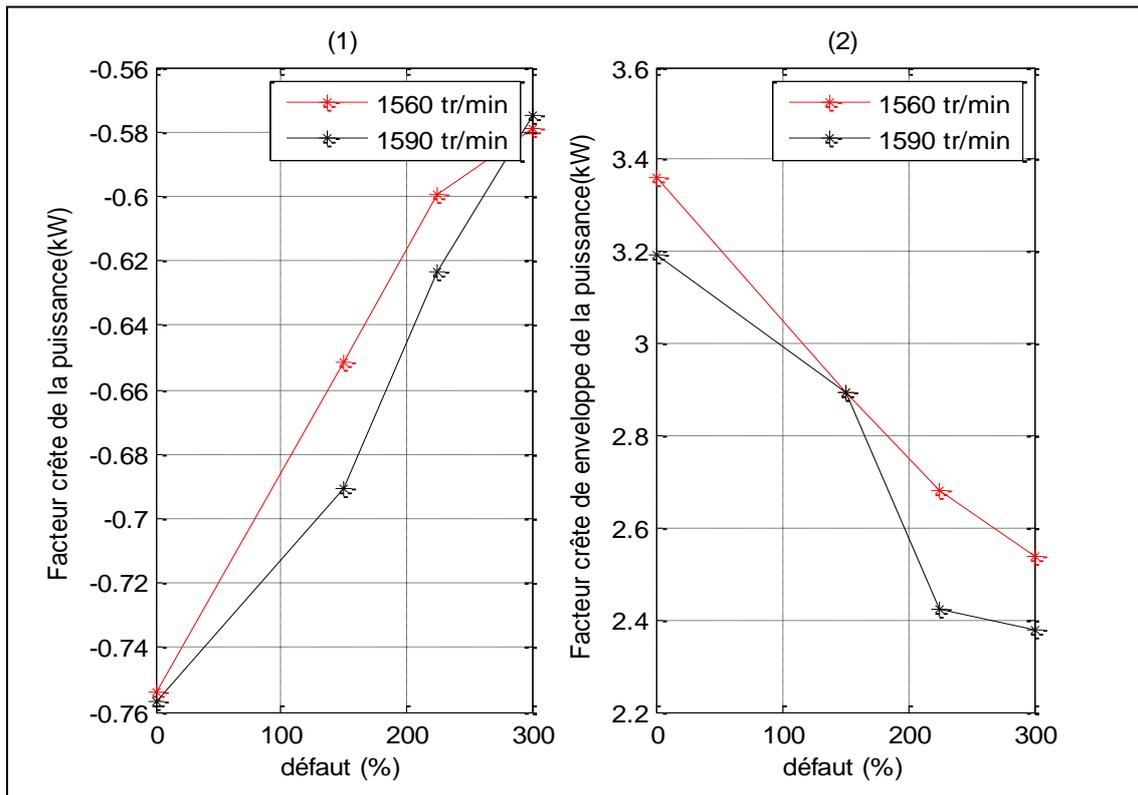


Figure II.19 : (1) courbes des valeurs du Facteur crête de la puissance électrique (2) courbes des valeurs du Facteur crête de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.19 donne l'évolution des valeurs du Facteur crête de la puissance électrique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs du Facteur crête de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les valeurs du facteur crête de la puissance diminuent. Cependant, sur le graphe (1) les valeurs du facteur crête de la puissance électrique augmentent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut. Sur le graphe (2) les valeurs du facteur crête de l'enveloppe de la puissance électrique diminuent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut ce pour deux vitesses d'entraînement, donc cet indicateur est efficace pour anticiper le défaut de la machine par l'analyse des signaux qui montrent l'évolution des valeurs de facteur crête de la puissance électrique.

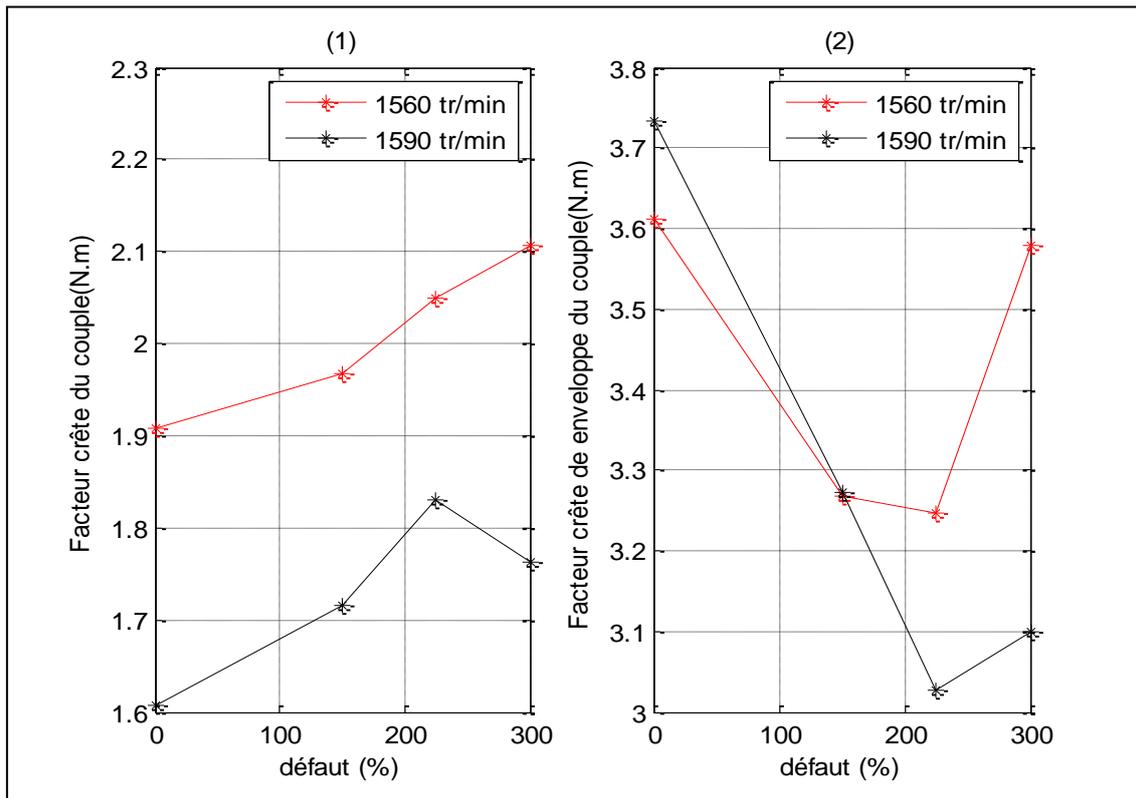


Figure II.20 : (1) courbes des valeurs du Facteur crête du couple électromagnétique (2) courbes des valeurs du Facteur crête de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.20 donne l'évolution des valeurs du Facteur crête du couple électromagnétique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs du Facteur crête de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les valeurs du facteur crête du couple électromagnétique diminuent. Sur le graphe (1) les valeurs du facteur crête du couple électromagnétique ne décroissent pas de façon claire, et sur le graphe (2) les valeurs du facteur crête de l'enveloppe du couple électromagnétique ne croient pas de façon claire ce pour deux vitesses d'entraînement pour cela on ne peut pas déduire que cet indicateur est efficace pour surveiller de défaut de la machine.

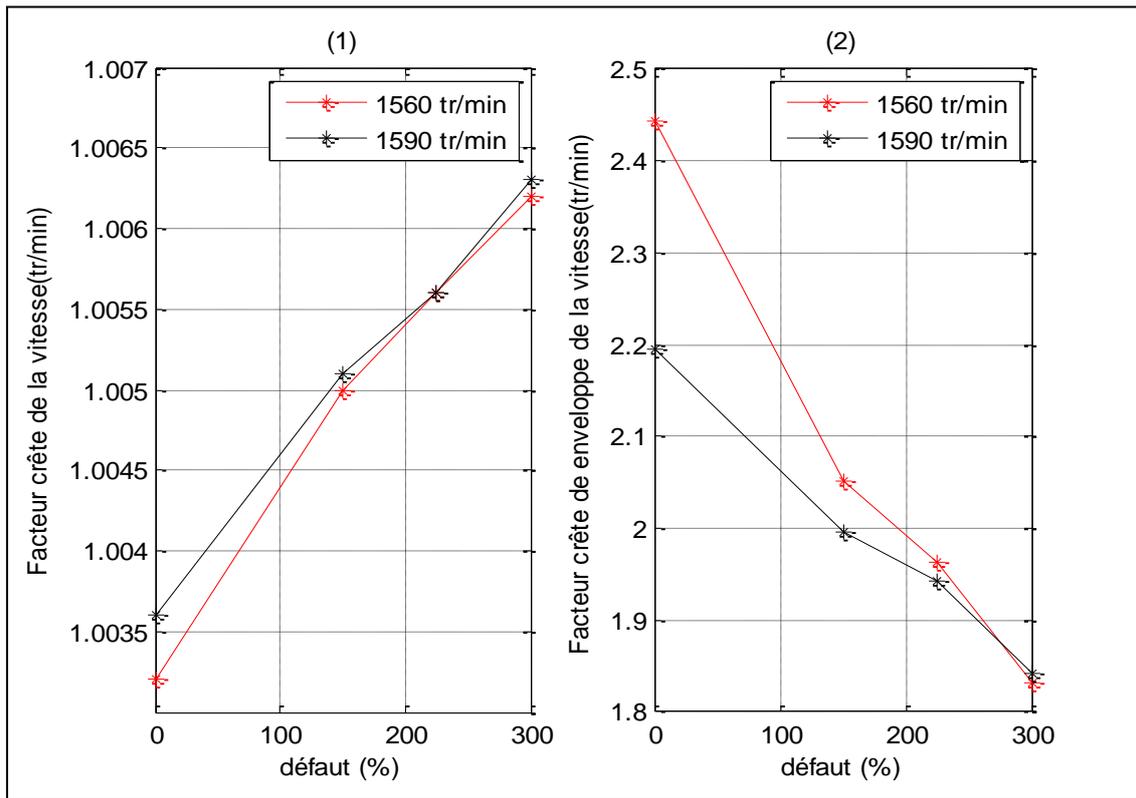


Figure II.21 : (1) courbes des valeurs du Facteur crête de la vitesse de rotation de la génératrice (2) courbes des valeurs du Facteur crête de l'enveloppe de la vitesse rotation de la génératrice en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.21 donne l'évolution des valeurs du Facteur crête de la vitesse de rotation de la génératrice et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs du Facteur crête de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Sur le graphe (1) les valeurs du facteur crête de la vitesse de rotation de la génératrice augmentent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut, et sur le graphe (2) les valeurs du facteur crête de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice diminuent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut ce pour deux vitesses d'entraînement.

II.3.5 L'indicateur Entropie

Pour chaque cas de défaut nous avons calculé les valeurs de l'entropie des signaux des figures II.2 à II.5 et les valeurs de l'entropie de leurs enveloppes pour deux vitesses d'entraînement du moteur 1560 et 1590 tr/min. A la fin, nous avons tracé les figures II.22, II.23, II.24, II.25 suivantes :

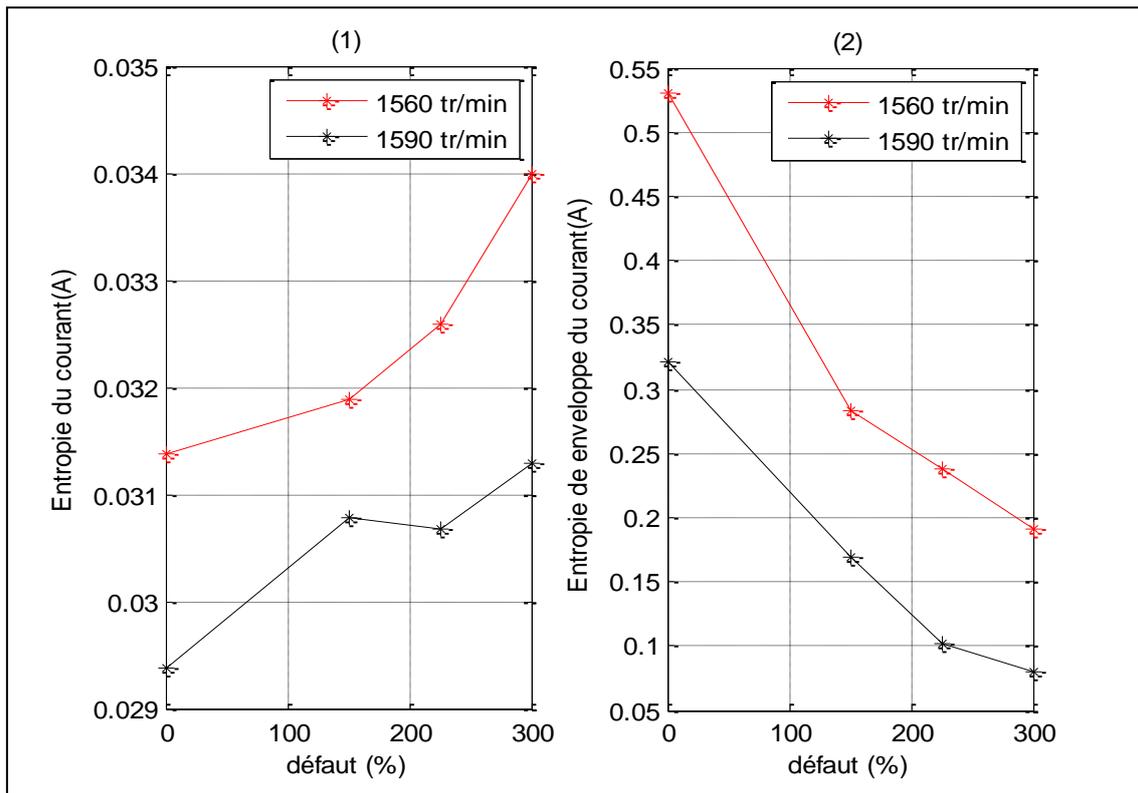


Figure II.22 : (1) courbes des valeurs de l'Entropie du courant statorique (2) courbes des valeurs de l'Entropie de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.22 donne l'évolution des valeurs de l'entropie du courant statorique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs de l'entropie de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min, Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les valeurs de l'entropie diminuent. Sur le graphe (1), les valeurs de l'entropie du courant statorique ne croient pas de façon claire pour deux vitesses d'entraînement pour cela on ne peut pas déduire si cet indicateur est efficace pour surveiller le défaut de la machine. Par contre le graphe (2) montre des valeurs de l'entropie de l'enveloppe du courant

statorique qui diminuent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut et ce pour deux vitesses d'entraînement, alors on déduit que cet indicateur est efficace pour anticiper ce défaut de la machine par l'analyse des signaux qui montrent l'évolution des valeurs de l'entropie de l'enveloppe du courant statorique.

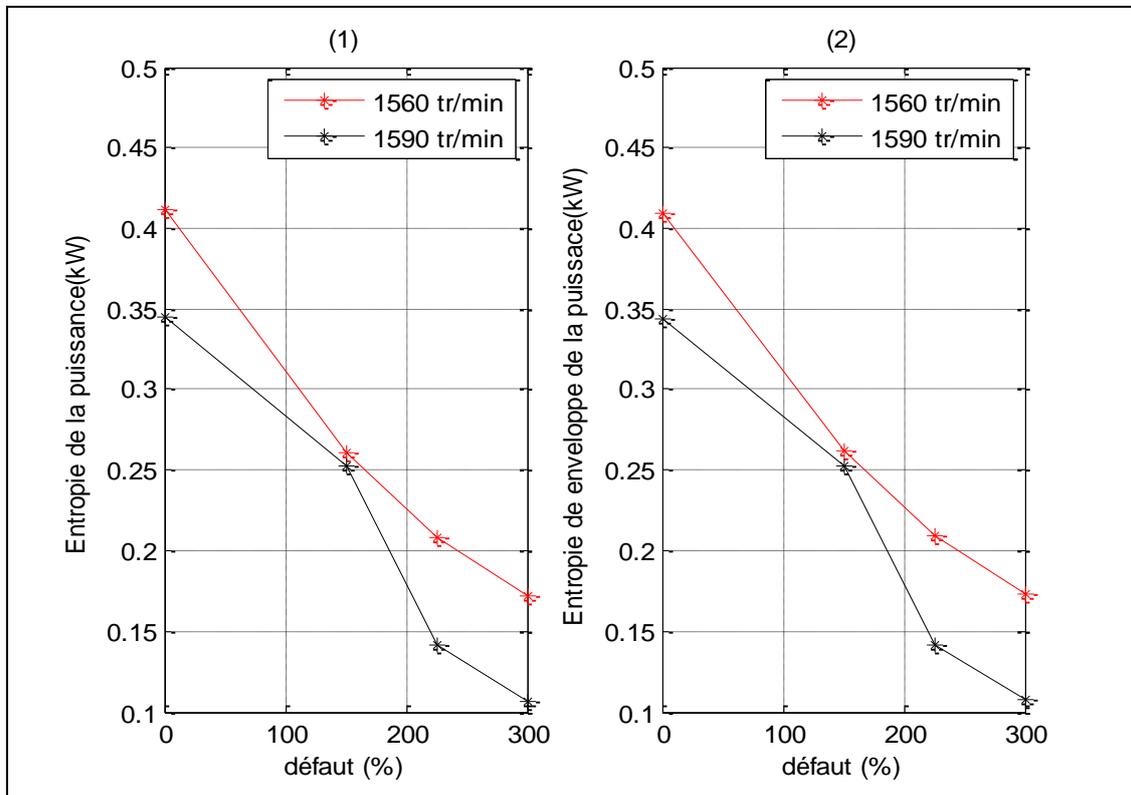


Figure II.23: (1) courbes des valeurs de l'entropie de la puissance électrique (2) courbes des valeurs de l'entropie de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.23 donne l'évolution des valeurs de l'entropie de la puissance électrique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs de l'entropie de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min, nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les valeurs de l'entropie de la puissance électrique diminuent. Sur les graphes (1) et (2) les valeurs de l'entropie de la puissance électrique et les valeurs de l'entropie de l'enveloppe de la puissance électrique diminuent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut, alors on déduit que cet indicateur est efficace pour anticiper ce défaut de la machine par l'analyse des signaux qui montrent l'évolution des valeurs de l'entropie de la puissance électrique.

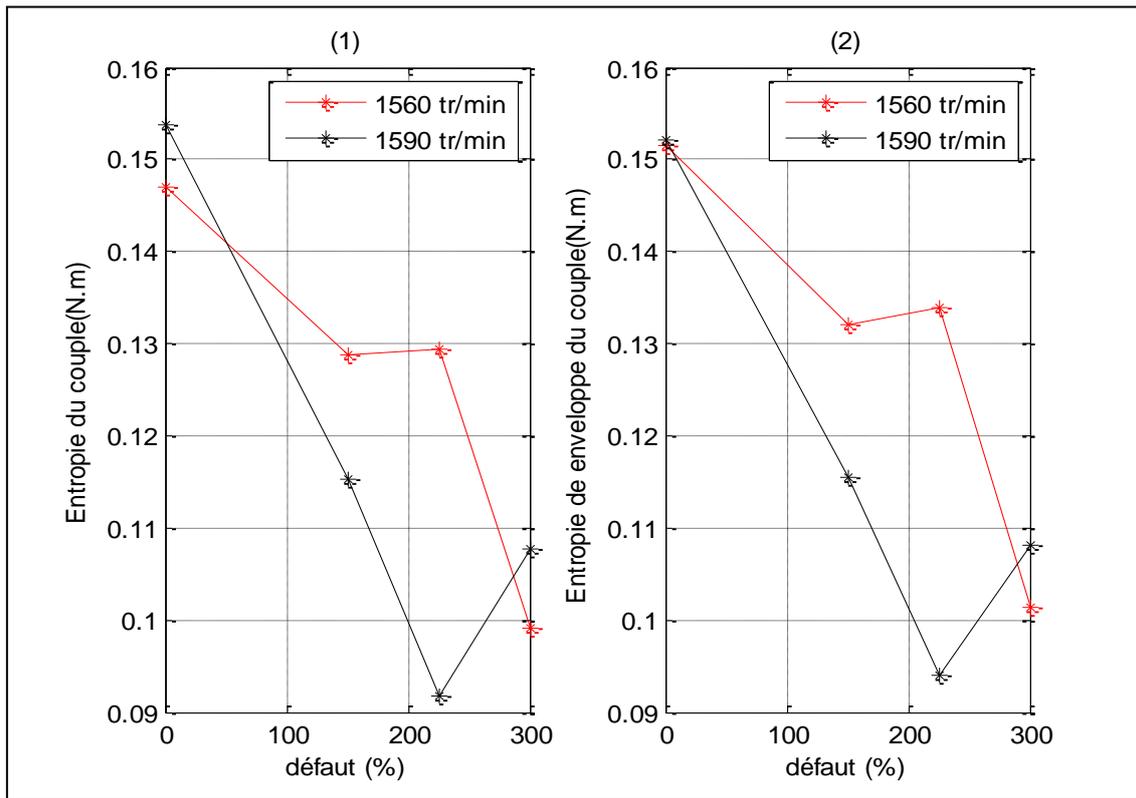


Figure II.24 : (1) courbes des valeurs de l'entropie du couple électromagnétique(2) courbes des valeurs de l'entropie de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.24 donne l'évolution des valeurs de l'entropie du couple électromagnétique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs de l'entropie de enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min, les graphes (1) et (2) montrent les valeurs de l'entropie du couple électromagnétique et les valeurs de l'entropie de leur enveloppes qui ne prennent un rythme continue (soit augmenter ou diminuer) ce pour deux vitesses d'entraînement pour cela on ne peut pas déduire que cet indicateur est efficace pour surveiller le défaut de la machine.

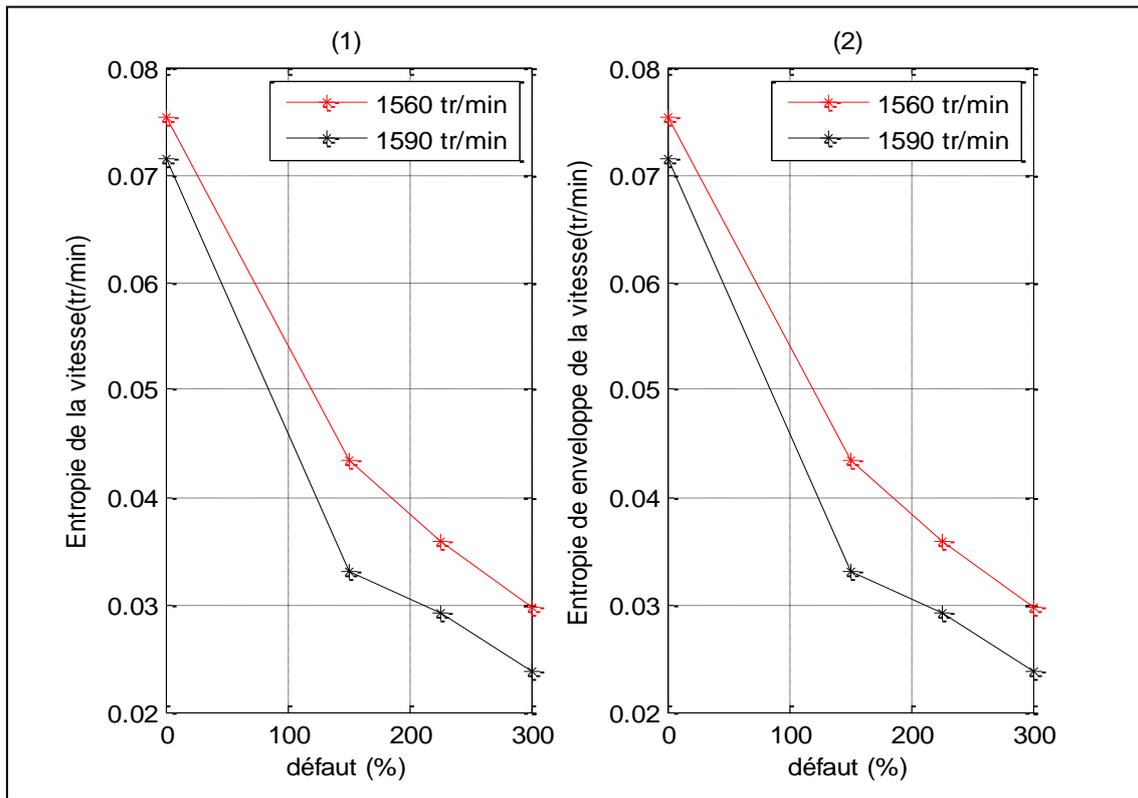


Figure II.25 : (1) courbes des valeurs de l'entropie de la vitesse de rotation de la génératrice
 (2) courbes des valeurs de l'entropie de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice
 en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590
 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.25 donne l'évolution des valeurs de l'entropie de la vitesse de rotation de la génératrice et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs de l'entropie de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min, nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les valeurs de l'entropie de la vitesse de rotation de la génératrice diminuent. Les graphes (1) et (2) montrent que les valeurs de l'entropie et les valeurs de l'entropie de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice diminuent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut, donc ce indicateur est efficace pour surveiller le défaut de la machine par l'analyse des signaux qui montrent l'évolution des valeurs de l'entropie de la vitesse de rotation de la génératrice.

II.3.6 L'indicateur Complexité

Pour chaque cas de défaut nous avons calculé les valeurs de complexité des signaux des figures II.2 à II.5 et aussi les valeurs de complexité de l'enveloppe pour deux vitesses d'entraînement du moteur 1560 et 1590 tr/min. A la fin, nous avons tracé les figures II.26, II.27, II.28, II.29 suivantes :

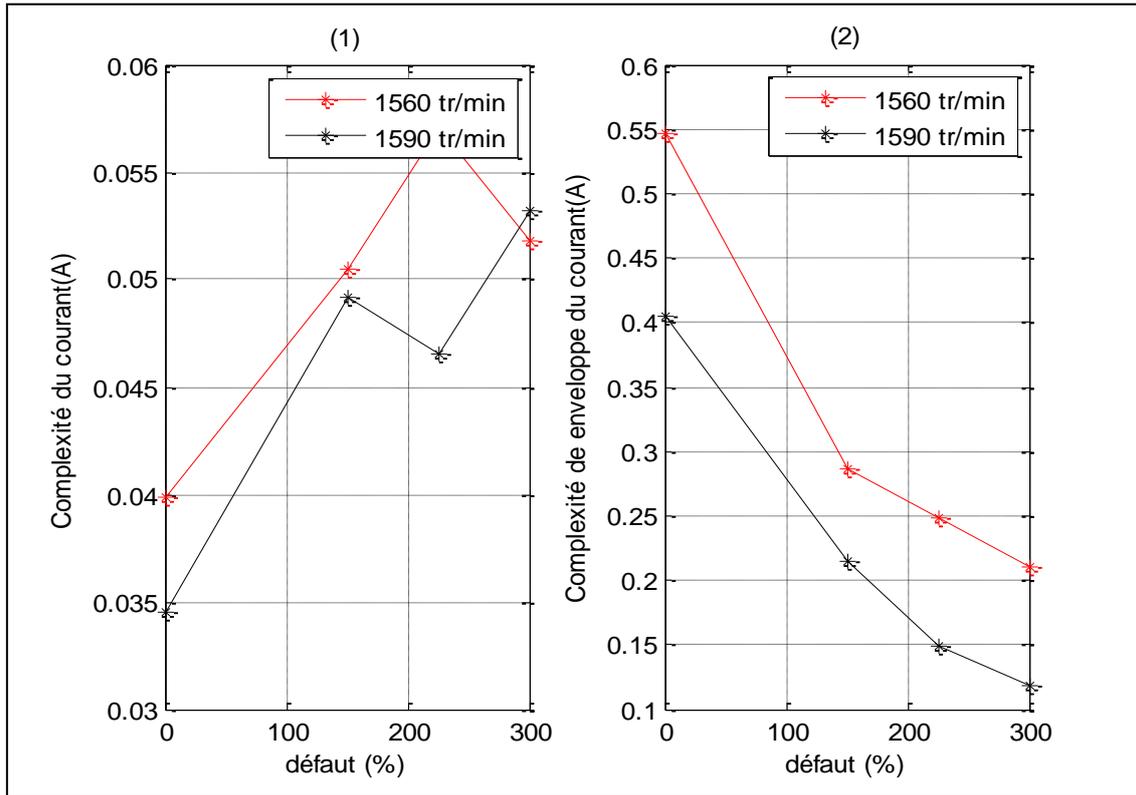


Figure II.26 : (1) courbes des valeurs de complexité du courant statorique (2) courbes des valeurs de complexité de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.26 donne l'évolution des valeurs de complexité du courant statorique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs de Complexité de l'enveloppe du courant statorique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augment, plus les valeurs de complexité du courant statorique ne diminuent. Sur le graphe (1) les valeurs de complexité du courant statorique ne croient pas de façon claire pour les deux vitesses d'entraînement pour cela on ne peut pas déduire que cet indicateur est efficace pour surveiller le défaut de la machine. Par contre le graphe (2) montre les valeurs de

complexité de l'enveloppe du courant statorique qui diminuent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut, alors on déduit que cet indicateur est efficace pour anticiper ce défaut de la machine par l'analyse des signaux qui montrent l'évolution des valeurs de complexité de l'enveloppe du courant statorique.

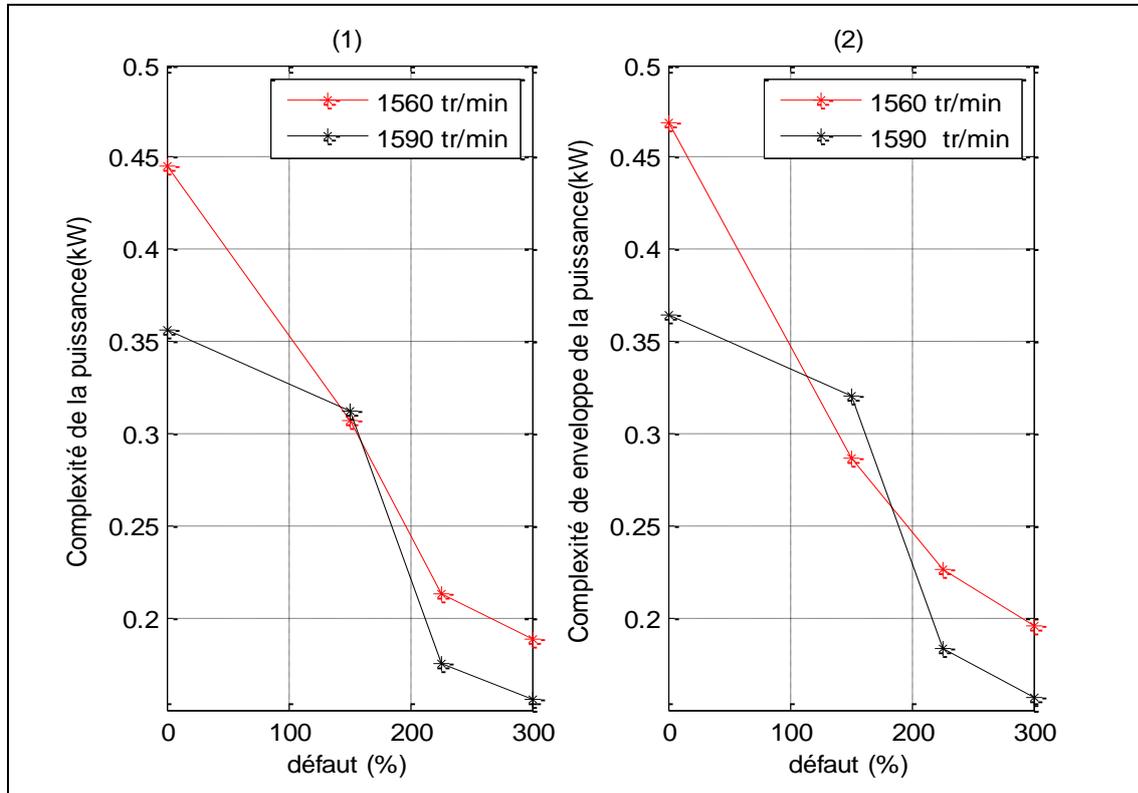


Figure II.27 : (1) courbes des valeurs de complexité de la puissance électrique (2) courbes des valeurs de complexité de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.27 donne l'évolution des valeurs de complexité de la puissance électrique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs de complexité de l'enveloppe de la puissance électrique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les valeurs de complexité de la puissance électrique diminuent. Les graphes (1) et (2) montrent que les valeurs de complexité de la puissance électrique et les valeurs de complexité de l'enveloppe de la puissance électrique diminuent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut donc cet indicateur est efficace pour surveiller le défaut de la machine, alors on déduit que cet indicateur est efficace pour

anticiper ce défaut de la machine par l'analyse des signaux qui montrent l'évolution des valeurs de complexité de la puissance électrique.

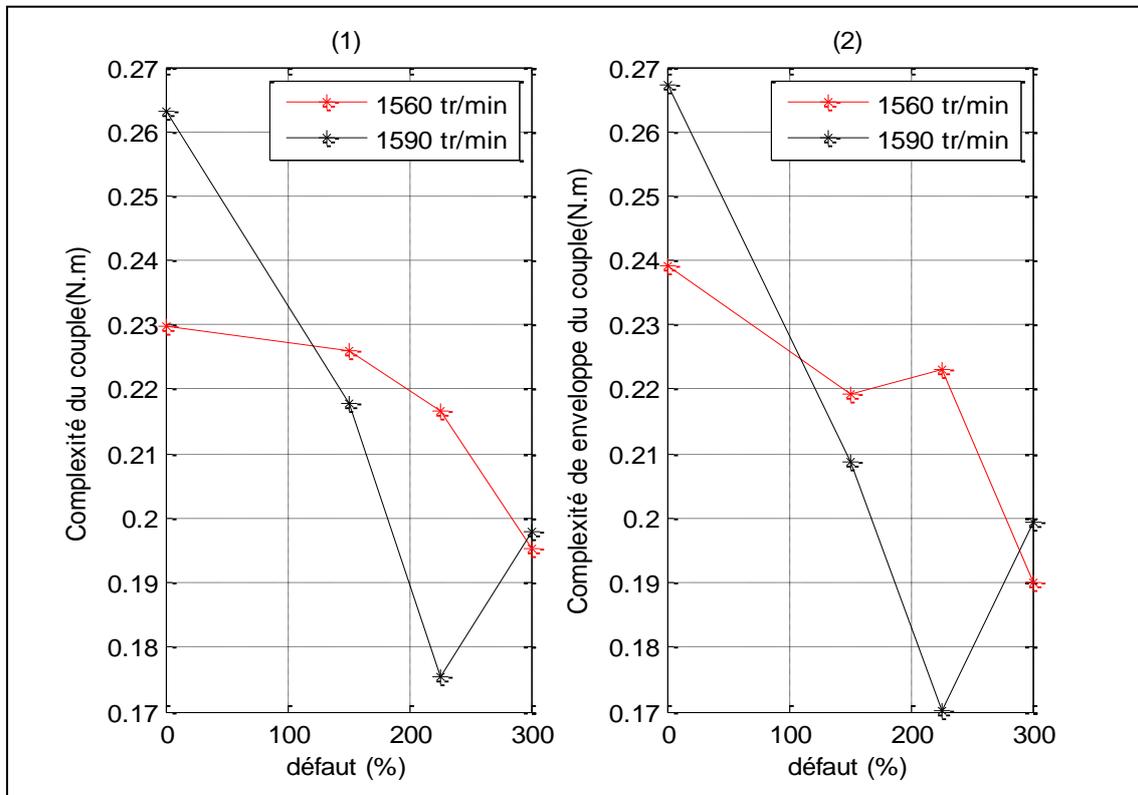


Figure II.28: (1) courbes des valeurs de complexité du couple électromagnétique (2) courbes des valeurs de complexité de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.28 donne l'évolution des valeurs de complexité du couple électromagnétique et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs de complexité de l'enveloppe du couple électromagnétique en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Les graphes (1) et (2) montrent que les valeurs de complexité du couple électromagnétique ne décroissent pas de façon claire ce pour deux vitesses d'entraînement donc on ne peut pas déduire si cet indicateur est efficace pour surveiller le défaut de la machine.

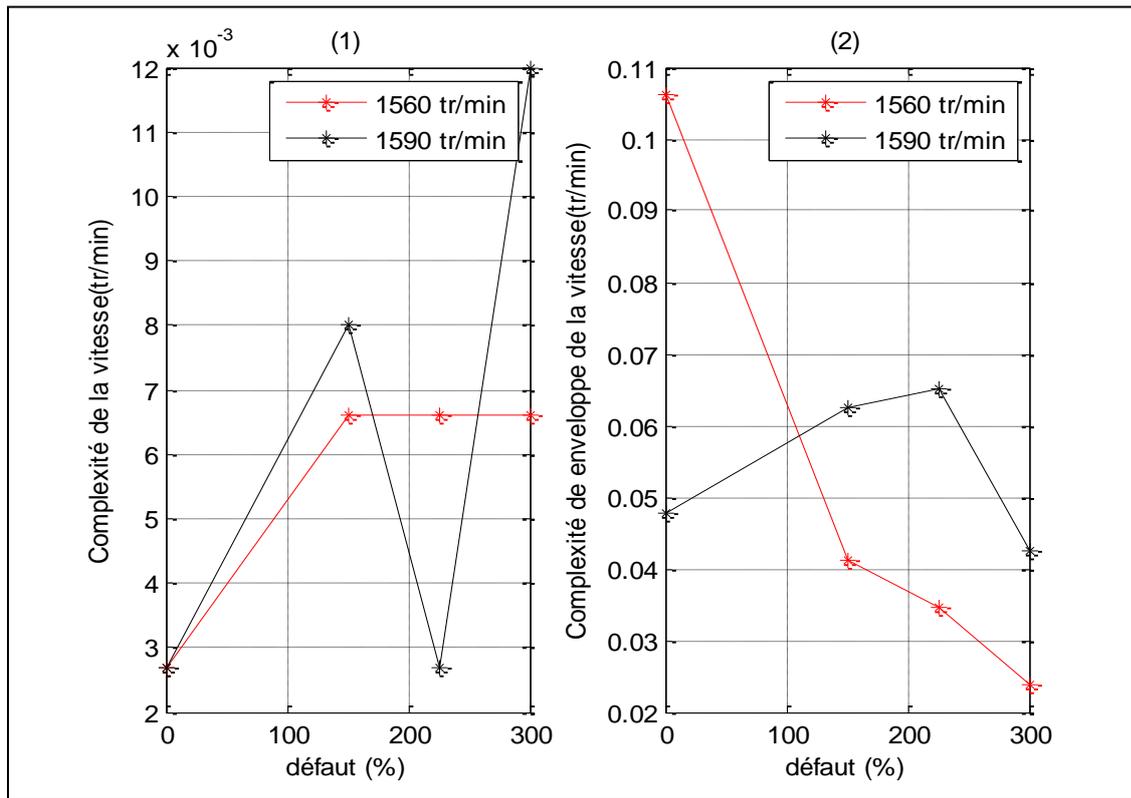


Figure II.29 : (1) courbes des valeurs de complexité de la vitesse de rotation de la génératrice
 (2) courbes des valeurs de complexité de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut (DER) pour les deux vitesses d'entraînement (1560 et 1590 tr/min)

Le graphe (1) de la figure II.29 donne l'évolution des valeurs de complexité de la vitesse de rotation de la génératrice et le graphe (2) donne l'évolution des valeurs de complexité de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice en fonction du % de défaut pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Les graphes (1) et (2) montrent que les valeurs de complexité et de complexité de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice ne prennent pas un rythme continu (soit augmenter ou diminuer) ce qui pour deux vitesses d'entraînement donc on ne peut pas déduire si cet indicateur est efficace pour surveiller le défaut de la machine.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué les différents indicateurs statistiques calculés pour les signaux des grandeurs mesurées sur la génératrice étudiée et pour les enveloppes de ces

signaux. Après, nous avons analysé les courbes obtenues pour déduire les indicateurs efficaces pour surveiller et anticiper le défaut sur la machine.

Dans le chapitre suivant, nous allons faire une analyse dans le domaine fréquentiel sur les signaux mesurés pour suivre l'influence du défaut sur le contenu fréquentiel (variation des composantes fréquentielles).

Chapitre III : Analyse des composantes fréquentielles

III.1 Introduction

Donc dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de l'analyse spectrale des signaux mesurés sur la génératrice étudiée au deuxième chapitre : le courant statorique, la puissance électrique, couple électromagnétique et la vitesse de rotation. Cette pratique nous permettra de voir l'efficacité de cette analyse à détecter le déséquilibre au rotor (DER) de cette génératrice. Il est essentiel de rappeler que le défaut au rotor devrait engendrer sur le courant statorique une modulation d'amplitude autour de la fréquence d'alimentation de cette machine à des fréquences $(1 \pm 2ng)fs$, comme expliquer au premier chapitre. Ainsi, l'analyse d'enveloppe permet la démodulation des signaux afin d'obtenir les harmoniques exactes liées au défaut de rotor $2ngfs$.

Le plus important dans le diagnostic par l'analyse des composantes fréquentielles est de suivre les amplitudes de ces harmoniques. A partir des spectres calculés, nous allons extraire les amplitudes des harmoniques de la fréquence modulée créée par le défaut $(1 \pm 2g)fs$, ensuite appliquer la démodulation par l'analyse d'enveloppe pour extraire la fréquence exacte liée au défaut qui est $2ngfs$.

III.2 Résultats de l'analyse des composantes fréquentielles

III.2.1 Le Courant statorique

Nous représentons sur les figures III.1 et III.2 les spectres de courant statorique modulée en amplitude et contiennent les harmoniques liées au défaut autour de la fréquence d'alimentation fs à des fréquences $(1 \pm 2ng)fs$, et ce pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min respectivement.

Nous représentons sur les figures III.3 et III.4 les spectres de courant statorique démodulée en amplitude et contiennent les harmoniques exactes liées au défaut de rotor $2ngfs$, et ce pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min respectivement.

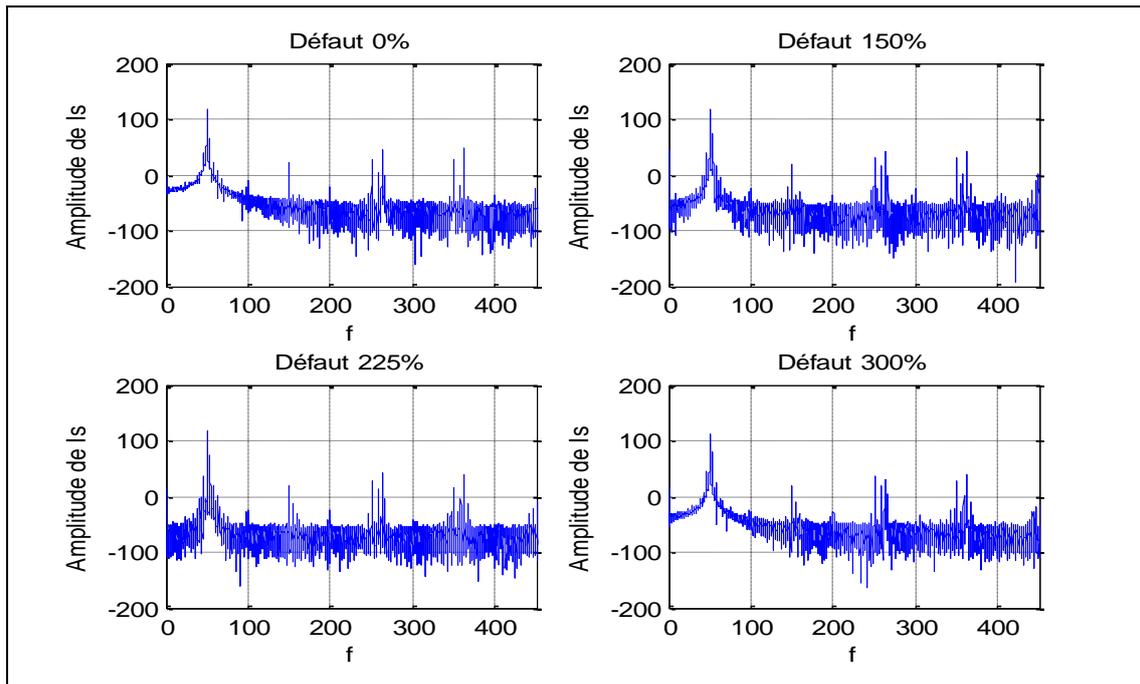


Figure III.1: Spectres de courant statorique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min

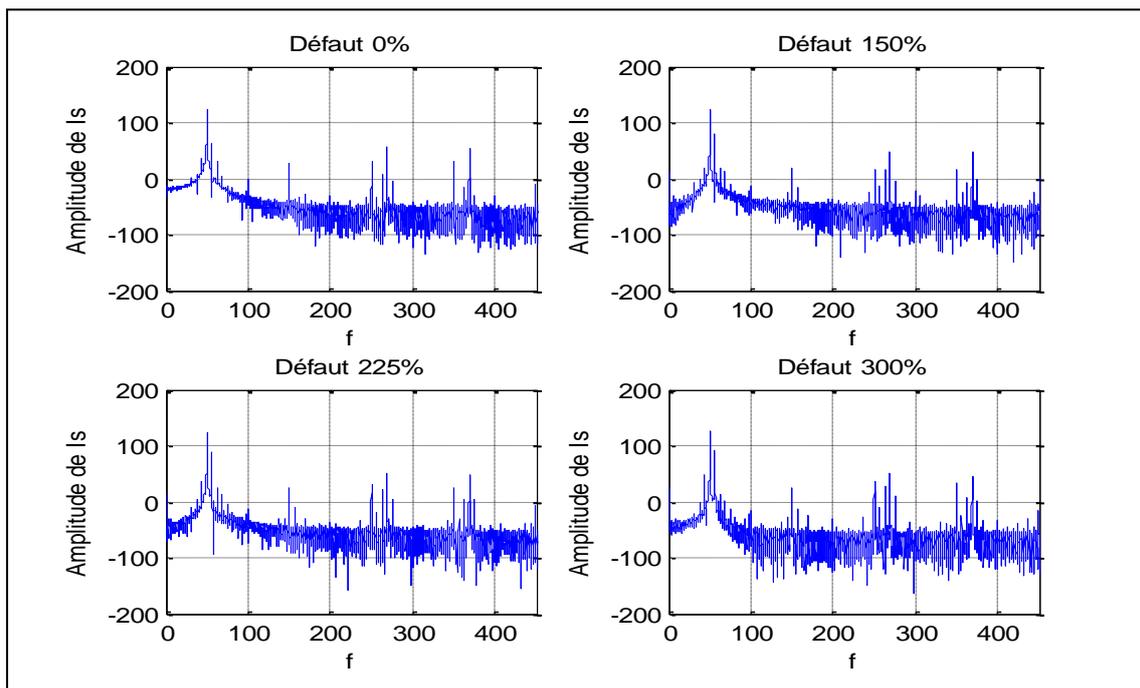


Figure III.2: Spectres des amplitudes du courant statorique) pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1590 tr/min

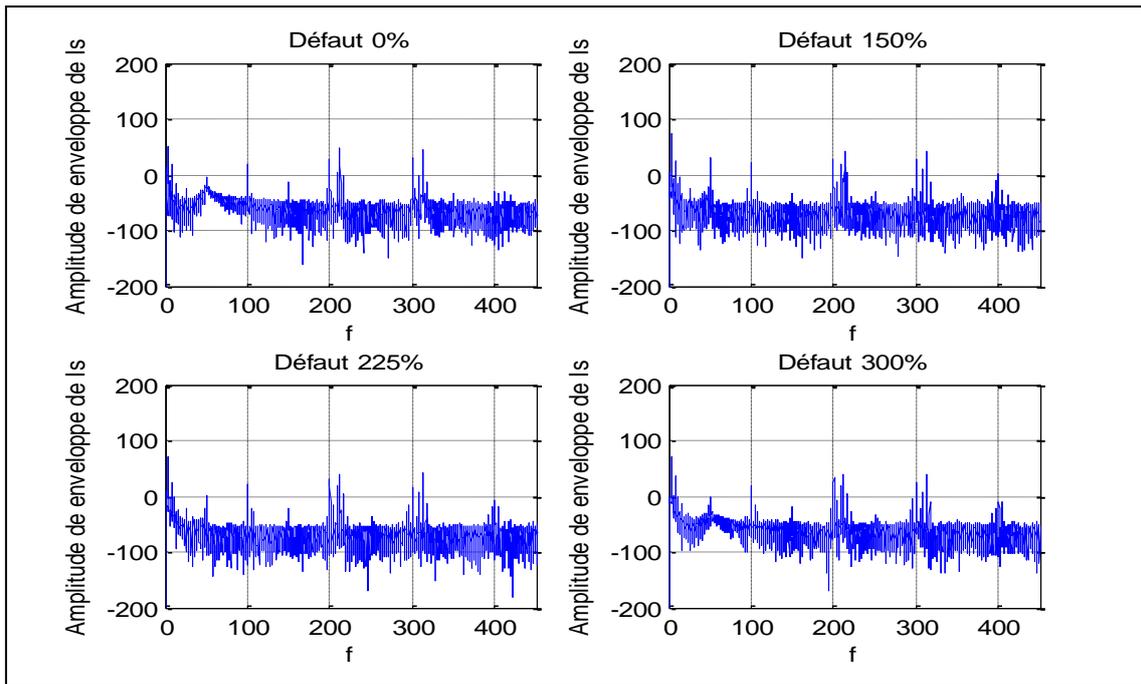


Figure III.3: Spectres de l'enveloppe du courant statorique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min

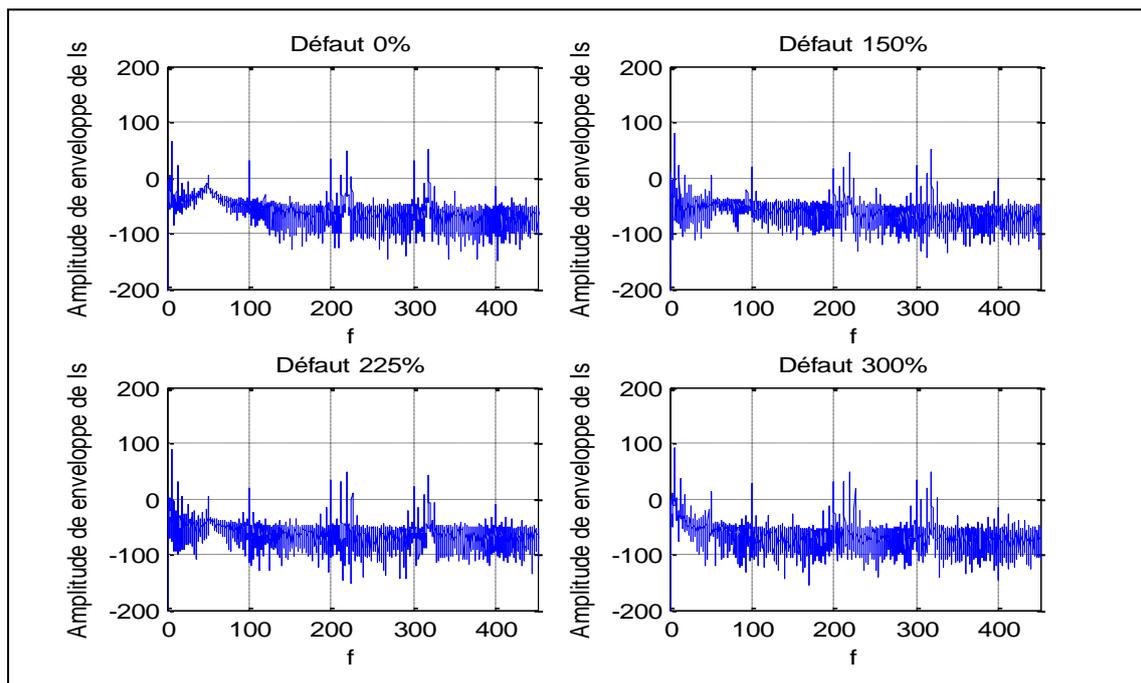


Figure III.4: Spectres de l'enveloppe du courant statorique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1590 tr/min

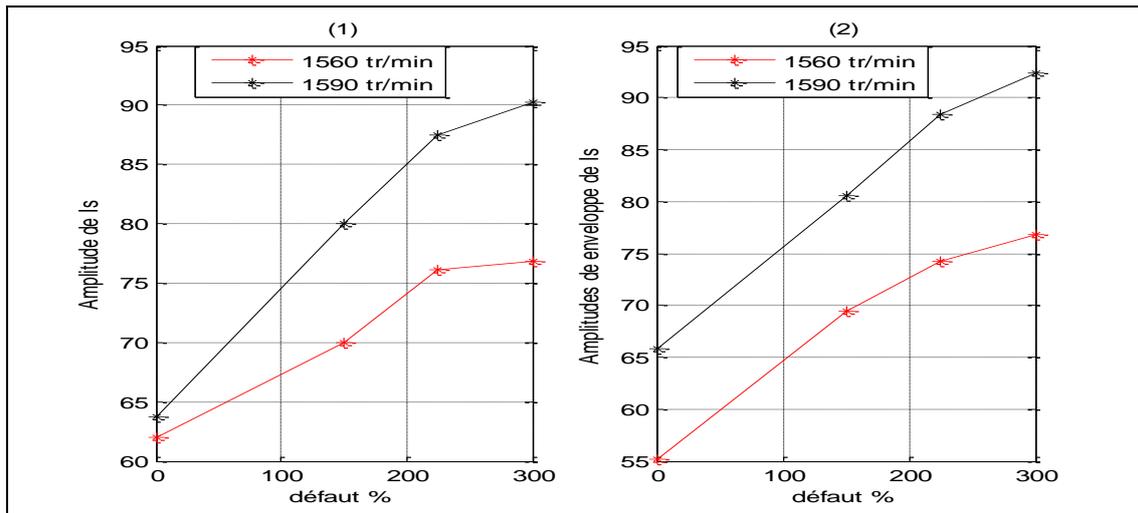


Figure III.5: Amplitudes des harmoniques du courant statorique (1) Amplitudes des harmoniques de l'enveloppe du courant statorique (2) en fonction du % de défaut pour deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min à la fréquence de défaut (DER)

Le graphe (1) de la figure III.5 montre l'évolution des amplitudes du courant statorique à fréquence modulée de défaut $(1 \pm 2ng)fs$ en fonction du % de défaut pour deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. Le graphe (2) montre l'évolution des amplitudes à la fréquence de défaut $2ngfs$ après démodulation des signaux du courant statorique par analyse d'enveloppe. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les amplitudes du courant statorique correspondantes à la fréquence de défaut augmentent. Les graphes (1) et (2) montrent que les amplitudes des courants statoriques liées à la fréquence modulée de défaut et les amplitudes liées à la fréquence de défaut de leurs augmentent proportionnellement avec augmentation du % de défaut, et ce pour deux vitesses d'entraînement.

III.2.2 La Puissance électrique

Nous représentons sur les figures III.6 et III.7 les spectres de la puissance électrique modulée en amplitude et contiennent les harmoniques liées au défaut autour de la fréquence d'alimentation fs à des fréquences $(1 \pm 2ng)fs$, et ce pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min respectivement.

Nous représentons sur les figures III.8 et III.9 les spectres de la puissance électrique démodulée en amplitude et contiennent les harmoniques exactes liées au défaut de rotor $2ngfs$, et ce pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min respectivement.

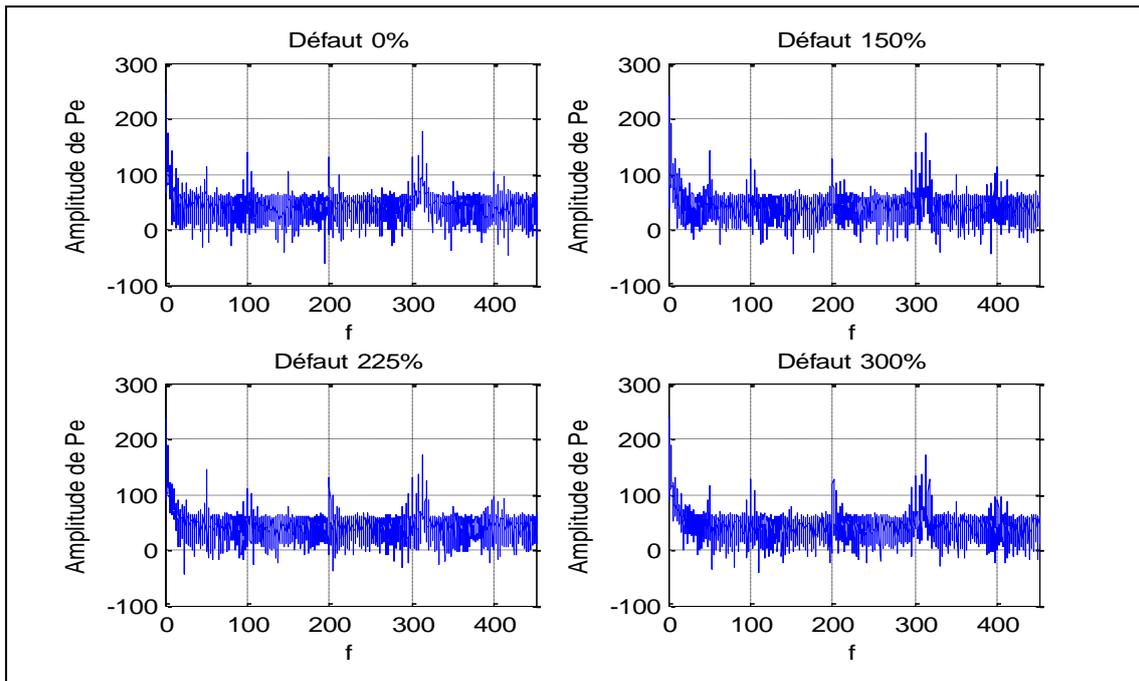


Figure III.6: Spectres de la puissance électrique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min

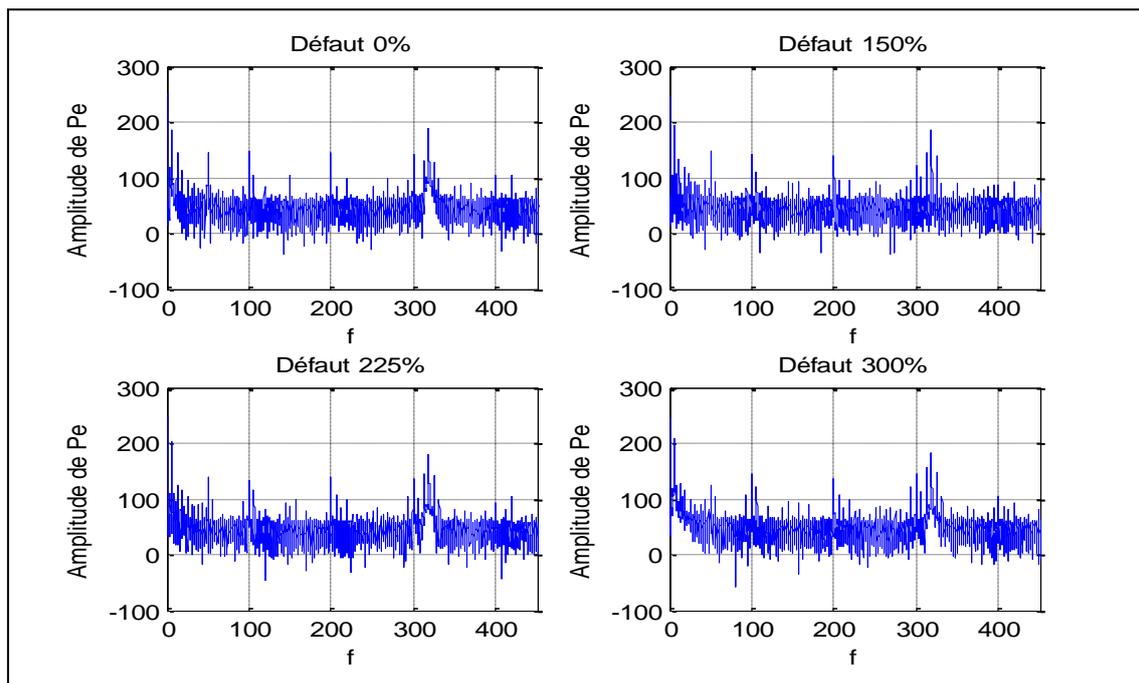


Figure III.7: Spectres des amplitudes de la puissance électrique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1590 tr/min

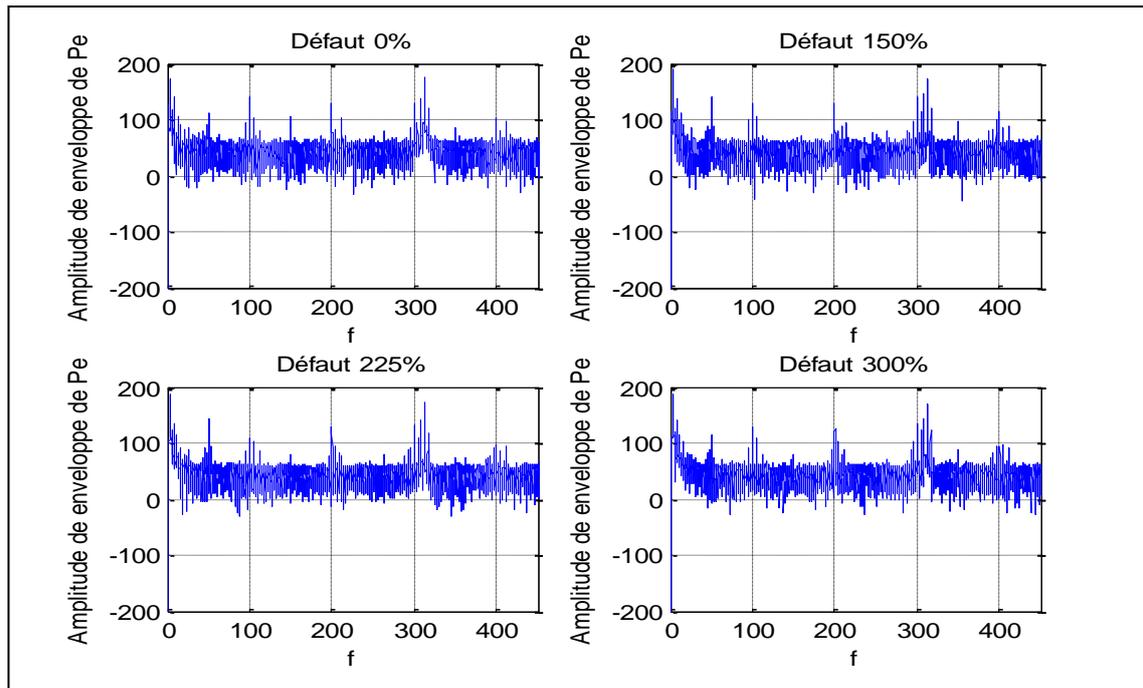


Figure III.8: Spectres des amplitudes de l'enveloppe de la puissance électrique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min

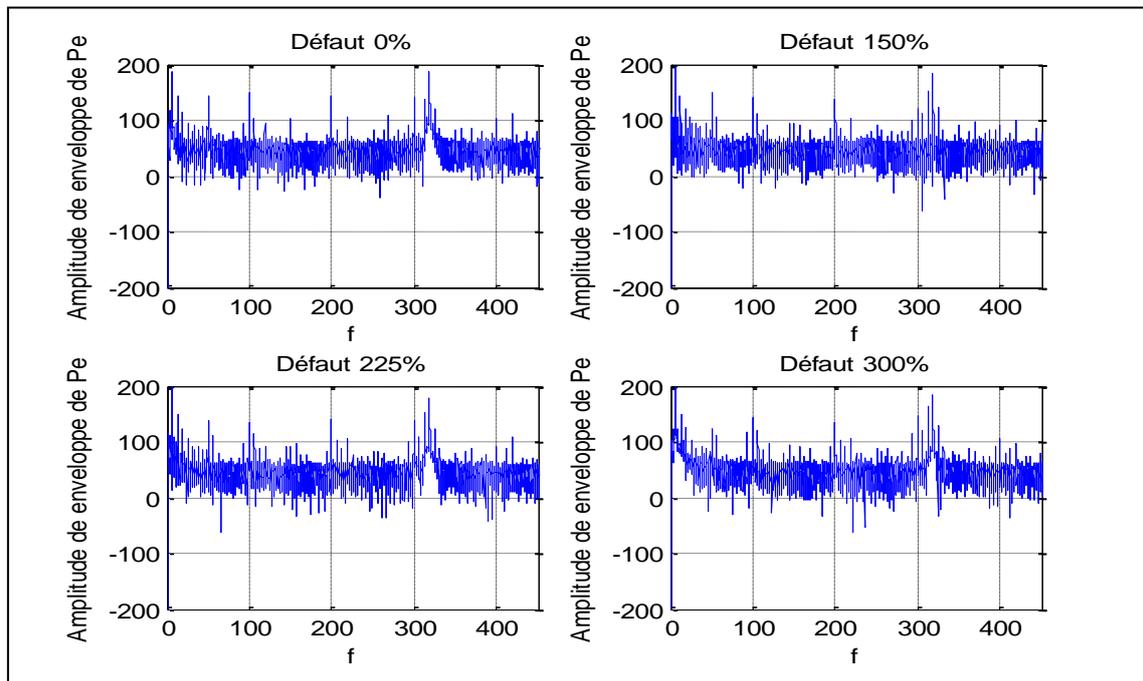


Figure III.9: Spectres des amplitudes de l'enveloppe de la puissance électrique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1590 tr/min

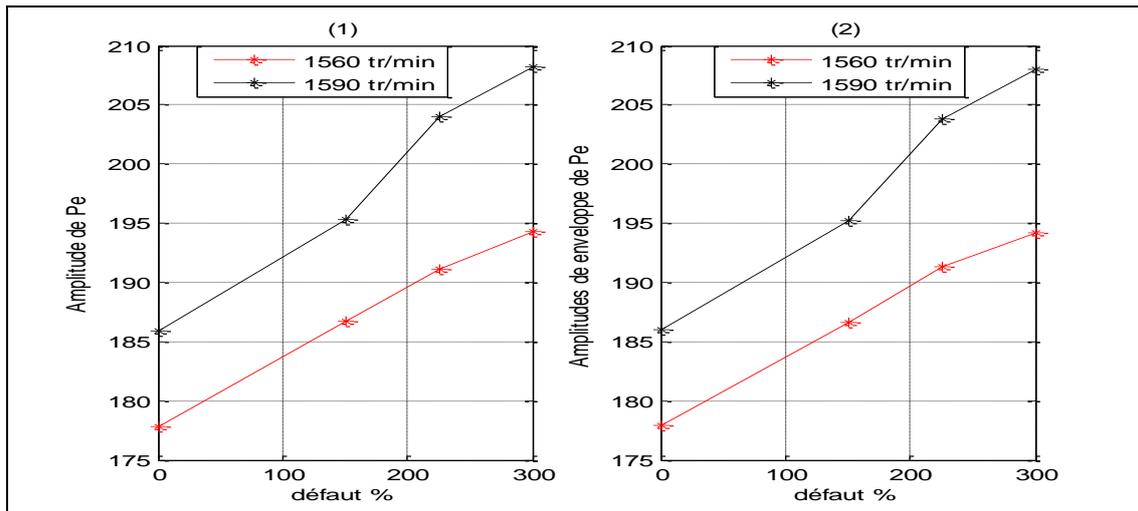


Figure III.10: Amplitudes des harmoniques de la puissance électrique (1) Amplitudes des harmoniques de l'enveloppe de la puissance électrique (2) en fonction du % de défaut pour deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min à la fréquence de défaut (DER)

Le graphe (1) de la figure III.10 montre l'évolution des amplitudes de la puissance électrique à fréquence modulée de défaut $(1 \pm 2ng)fs$ en fonction du % de défaut pour deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. le graphe (2) montre l'évolution des amplitudes à la fréquence de défaut $2ngfs$ après démodulation des signaux de la puissance électrique par analyse d'enveloppe. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les amplitudes de la puissance électrique correspondantes à la fréquence de défaut augmentent. Les graphes (1) et (2) montrent aussi que les amplitudes de la puissance électrique liées à la fréquence modulée du défaut et les amplitudes liées à la fréquence de défaut de leurs enveloppes augmentent proportionnellement avec l'augmentation du % de défaut, et ce pour deux vitesses d'entraînement.

III.2.3 Le Couple électromagnétique

Nous représentons sur les figures III.11 et III.12 les spectres du couple électromagnétique modulée en amplitude contiennent les harmoniques liées au défaut autour de la fréquence d'alimentation fs à des fréquences $(1 \pm 2ng)fs$, et ce pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min respectivement.

Nous représentons sur les figures III.13 et III.14 les spectres du couple électromagnétique démodulée en amplitude contiennent les harmoniques exactes liées au défaut de rotor $2ngfs$, et ce pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min respectivement.

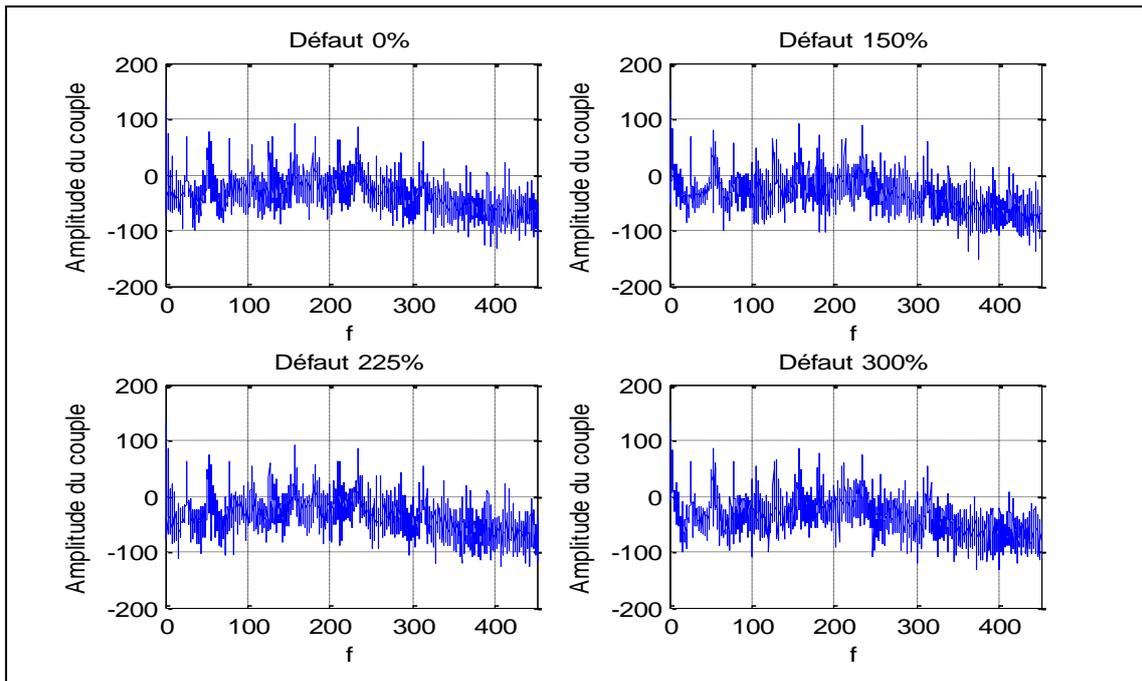


Figure III.11: Spectres des amplitudes du couple électromagnétique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min

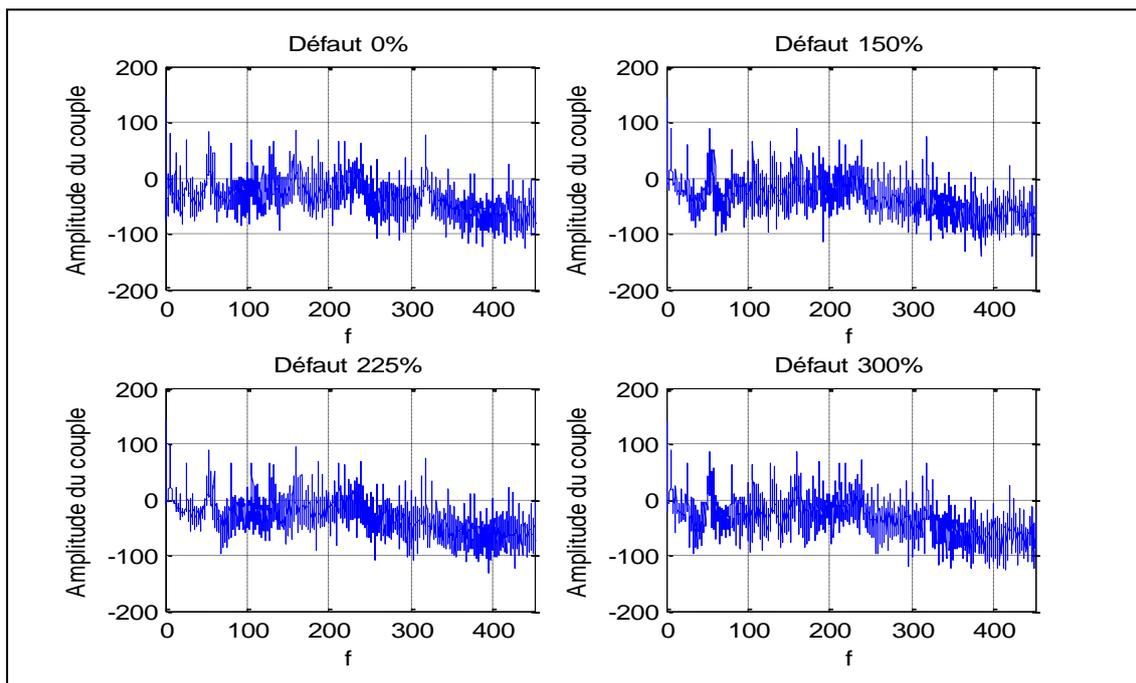


Figure III.12: Spectres des amplitudes du couple électromagnétique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1590 tr/min

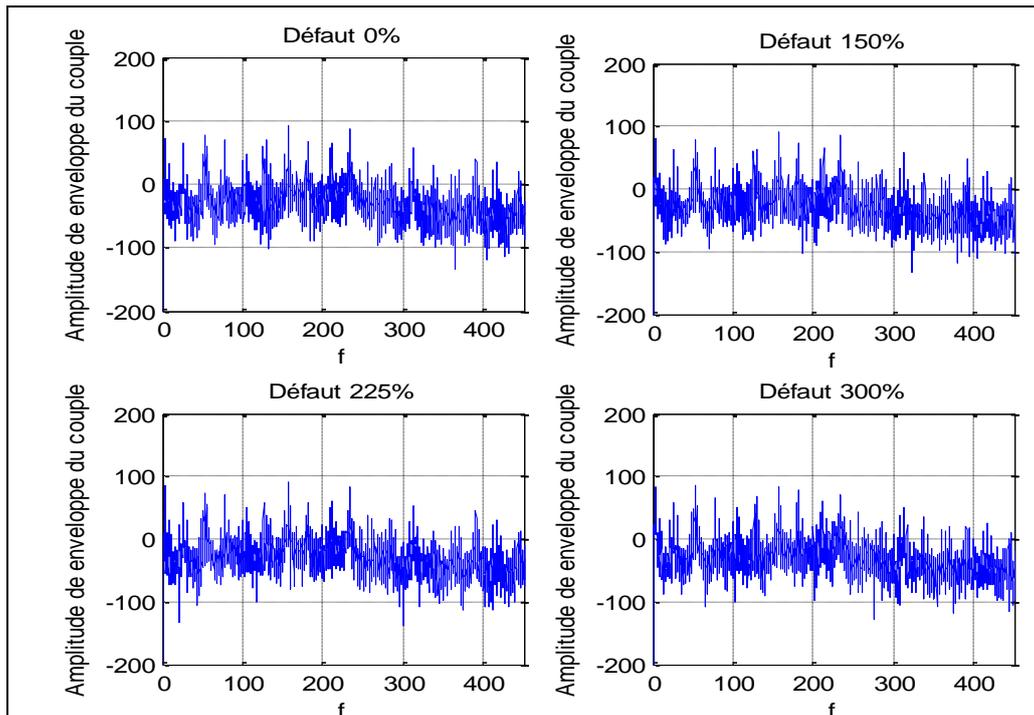


Figure III.13: Spectres des amplitudes de l'enveloppe du couple électromagnétique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min

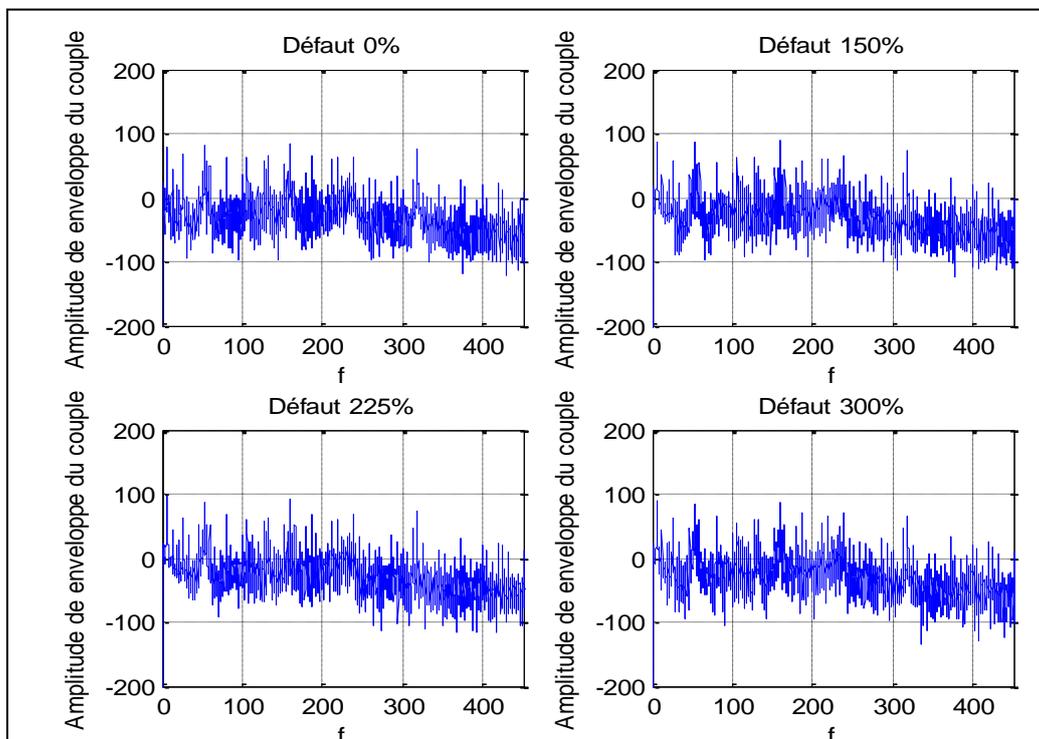


Figure III.14: Spectres des amplitudes de l'enveloppe du couple électromagnétique pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min

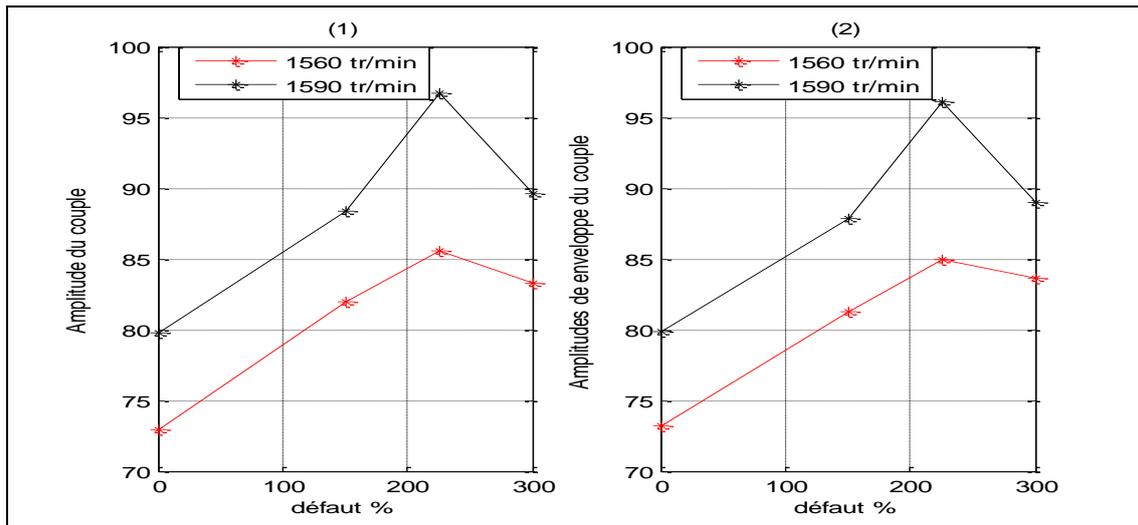


Figure III.15: Amplitudes des harmoniques du couple électromagnétique (1) Amplitudes des harmoniques de l'enveloppe du couple électromagnétique (2) en fonction du % de défaut pour deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min à fréquence de défaut (DER)

Le graphe (1) de la figure III.15 montre l'évolution des amplitudes du couple électromagnétique à fréquence modulée de défaut $(1 \pm 2ng)fs$ en fonction du % de défaut pour deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. le graphe (2) montre l'évolution des amplitudes à la fréquence de défaut $2ngfs$ après démodulation des signaux du couple électromagnétique par analyse d'enveloppe. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les amplitudes du couple électromagnétique correspondantes à la fréquence de défaut augmentent. Les graphes (1) et (2) montrent aussi que les amplitudes liées à la fréquence modulée du défaut et les amplitudes liées à la fréquence de défaut de leurs enveloppes augmentent proportionnellement avec augmentation du % de défaut et diminuent sensiblement dans les % élevés, et ce pour deux vitesses d'entraînement.

III.2.4 La vitesse de rotation de la génératrice

Nous représentons sur les figures III.16 et III.17 les spectres de la vitesse de rotation de la génératrice modulée en amplitude et contiennent les harmoniques liées au défaut autour de la fréquence d'alimentation fs à des fréquences $(1 \pm 2ng)fs$, et ce pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min respectivement

Nous représentons sur les figures III.18 et III.19 les spectres de la vitesse de rotation de la génératrice démodulée en amplitude et contiennent les harmoniques exactes liées au défaut de rotor $2ngfs$, et ce pour les deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min respectivement.

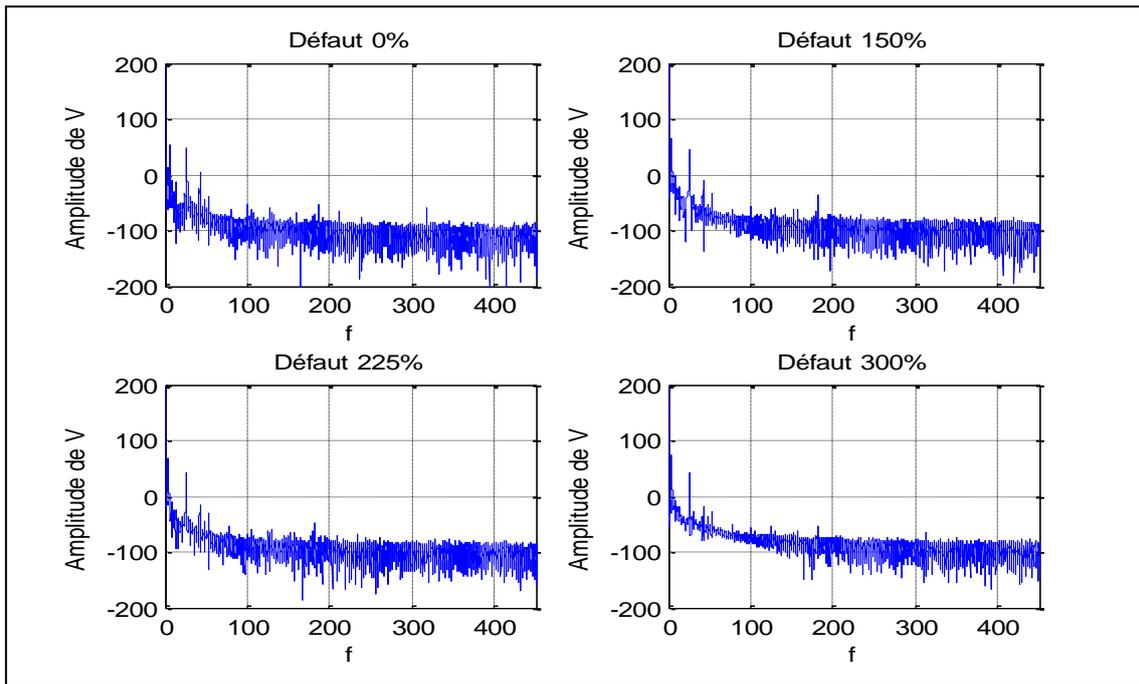


Figure III.16: Spectres de la vitesse de rotation de la génératrice pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min

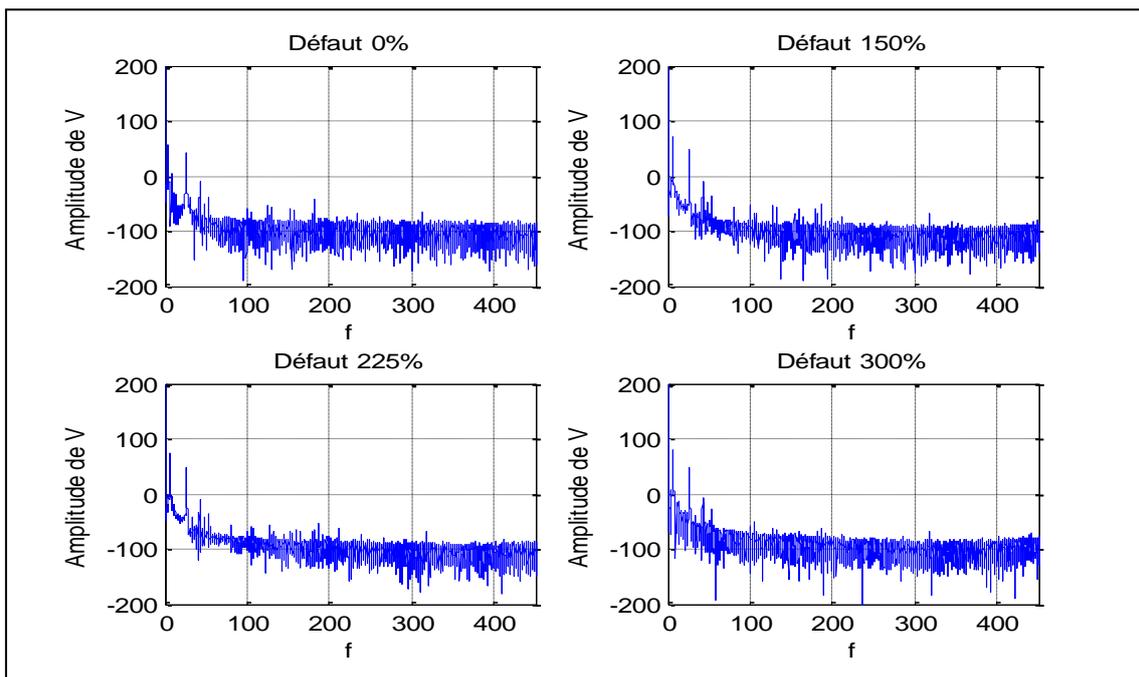


Figure III.17: Spectres de la vitesse de rotation de la génératrice pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1590 tr/min

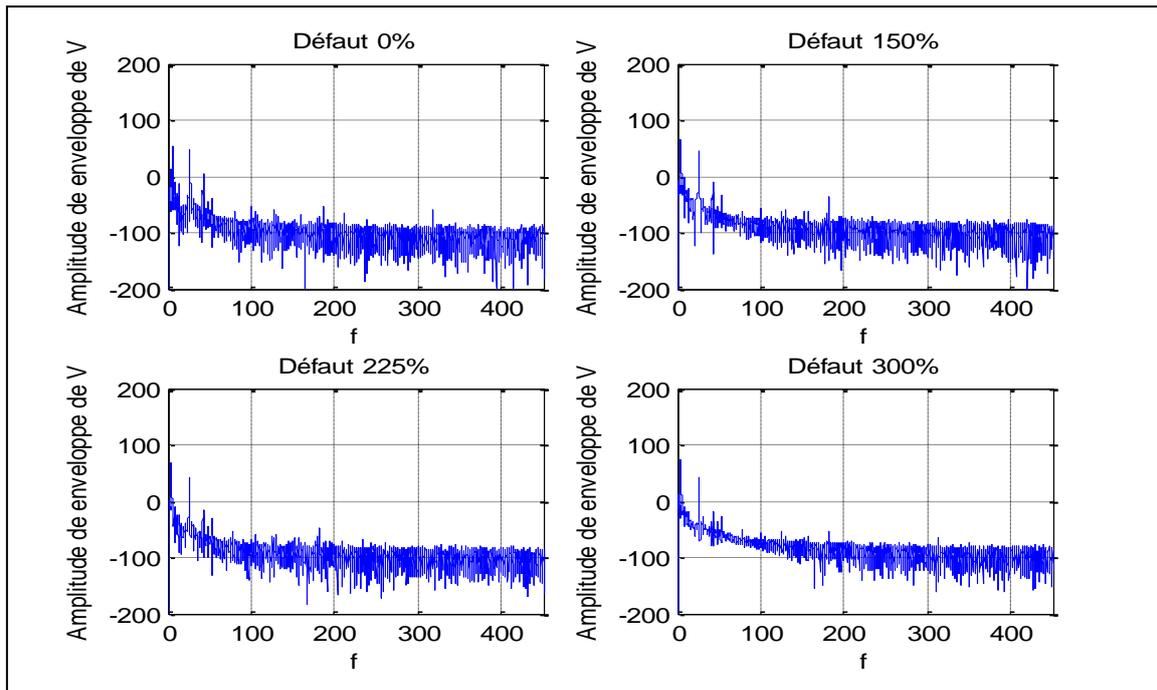


Figure III.18: Spectres de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1560 tr/min

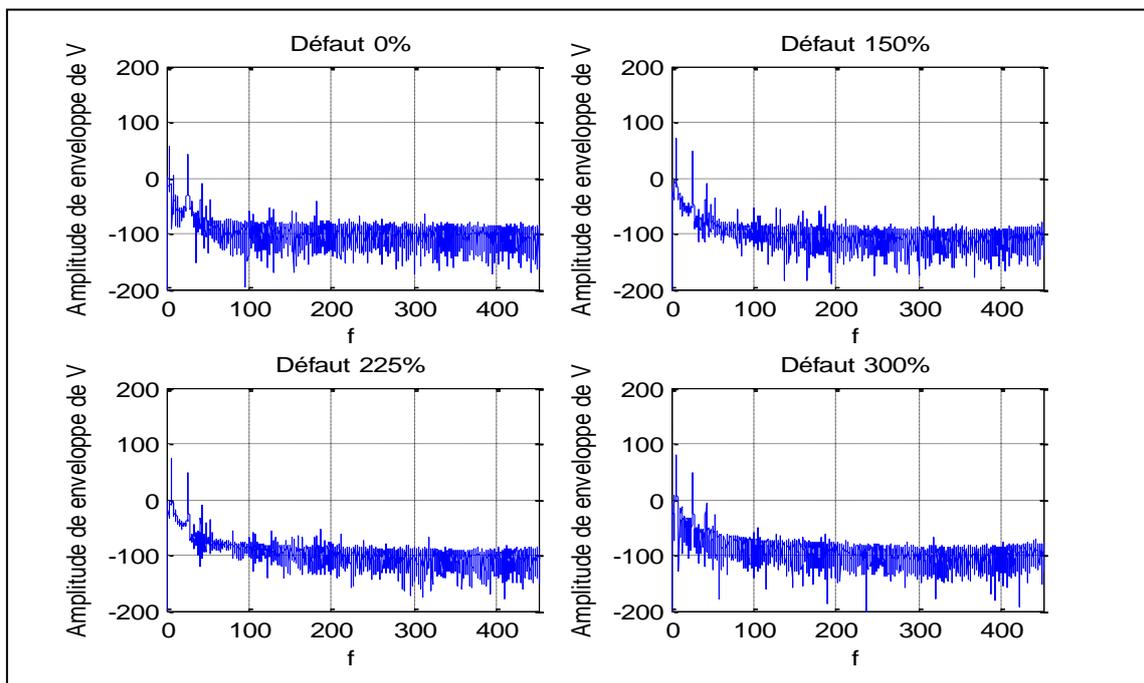


Figure III.19: Spectres de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice pour différents % de défaut (0%, 150%, 225% et 300%) à une vitesse d'entraînement de 1590tr/min

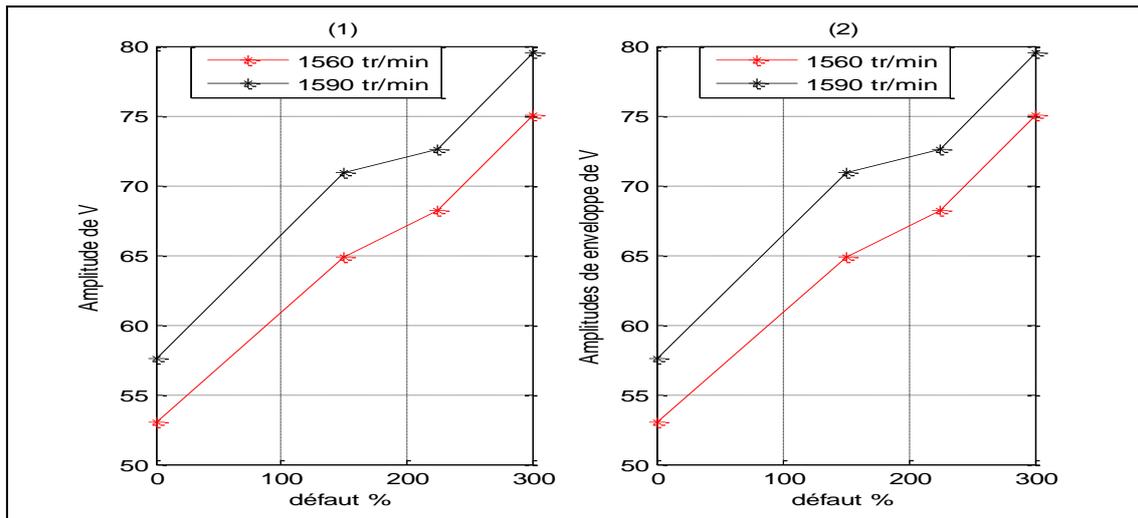


Figure III.20: Amplitudes des harmoniques de la vitesse de rotation de la génératrice (1) Amplitudes des harmoniques de l'enveloppe de la vitesse de rotation de la génératrice (2) en fonction du % de défaut pour deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min à la fréquence de défaut (DER)

Le graphe (1) de la figure III.10 montre l'évolution des amplitudes de la vitesse de rotation de la génératrice à fréquence modulée de défaut $(1 \pm 2ng)fs$ en fonction du % de défaut pour deux vitesses d'entraînement 1560 et 1590 tr/min. le graphe (2) montre l'évolution des amplitudes à la fréquence de défaut $2ngfs$ après démodulation des signaux de la vitesse de rotation de la génératrice par analyse d'enveloppe. Nous constatons sur les deux graphes que plus la vitesse d'entraînement augmente, plus les amplitudes de la vitesse de rotation de la génératrice correspondantes à la fréquence de défaut augmentent. Les graphes (1) et (2) montrent aussi que les amplitudes de la vitesse de rotation de la génératrice liées à la fréquence modulée du défaut et les amplitudes liées à la fréquence de défaut de leurs enveloppes augmentent proportionnellement avec augmentation du % de défaut, et ce pour deux vitesses d'entraînement.

III.3 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'établir une étude sur les performances de l'analyse spectrale et l'analyse d'enveloppe. En effet, l'analyse spectrale nous a permis de bien suivre le développement de défaut (évolution), et nous a montré que les fréquences harmoniques liées au défaut au rotor augmentent proportionnellement avec l'évolution du défaut. Et à la fin, pour améliorer notre diagnostic, nous avons eu recours à la démodulation des signaux par l'analyse de l'enveloppe basée sur la transformée de Hilbert. Il a été montré que les

amplitudes liées à la fréquence démodulée ($2ngfs$) varient de façon significative avec l'évolution du défaut.

Conclusion générale

Le travail de ce projet s'inscrit dans le cadre du diagnostic d'un défaut de déséquilibre électrique au rotor (DER) d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Alors, ce mémoire est scindé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé la construction de la machine afin de définir les grandeurs électrique et mécaniques pour l'aide au diagnostic, et nous avons rappelé les différents types des défaillances qui touchent la machine asynchrone.

Dans le deuxième chapitre, le travail consiste à calculer les valeurs des indicateurs statistiques (valeurs efficaces (RMS), Energie, Kurtosis, Facteur crête, Entropie et complexité) pour les signaux de mesures effectuées sur la machine à savoir ; le courant statorique, la puissance électrique, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation de la génératrice, ainsi que les valeurs des indicateurs de leurs enveloppes (obtenues par la transformée de Hilbert). Ensuite, de tracer les graphes de ces valeurs obtenues, pour constater l'indicateur le plus approprié à la surveillance de ce défaut.

Le troisième chapitre, est dédié à la comparaison des spectres en amplitude pour différentes signatures de diagnostic de défaut (DER) dans une machine à induction. Nous avons utilisé la méthode de l'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier. Afin de faire une comparaison concise, nous avons fait aligner toutes les composantes fréquentielles liées aux défauts du rotor pour chacune des grandeurs mesurées, et nous avons trouvé que les modulations d'amplitude, créées par le défaut (DER), augmentent significativement avec la gravité du défaut appliqué. Le même constat est soulevé pour les composantes liées au défaut après démodulation par la transformée de Hilbert (analyse d'enveloppe). Il est important à ce stade de conclure que l'analyse spectrale peut à elle seule, comme méthode de calcul facile et rapide, de suivre et de détecter les défaillances au rotor d'une machine asynchrone à rotor bobiné.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Olivier Ondel « Diagnostic par reconnaissance des formes : application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone », thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, 2006.
- [2] Boudboudi Mohamed « Commande et diagnostic des défauts de la machine asynchrone », thèse doctorat université de Annaba, 2016.
- [3] Huber Razik, « La machine asynchrone à vitesse variable: capteurs, modèles, contrôle et diagnostic », Livre, 2006.
- [4] AFNOR, « Maintenance - Concepts et définitions des activités de maintenance », article scientifique (Norme NF X 60-010), 1994.
- [5] Hamou Mamar, « Analyse Temps-Échelle et Reconnaissance des Formes pour le Diagnostic du Système de Guidage d'un Tramway sur Pneumatiques » thèse doctorat de l'université Blaise Pascal Clermont II, 2008.
- [6] Adel Boudiaf, « Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Tournantes par Analyse Multi résolution ». Thèse doctorat université de Guelma, 2016.
- [7] Mohamed Sahraoui, « Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones » thèse de doctorat Biskra, 2010.
- [8] Yacine Imaouchen « Mesure et analyse des vibrations des machines électriques tournantes » thèse de doctorat de l'université de Bejaia ,2015.
- [9] Ilyes Khelf « Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificielle » thèse de doctorat en génie mécanique Annaba, 2014.
- [10] Samir Kerfali « Contribution à la Surveillance et au Diagnostic des Défauts De la Machine Asynchrone » thèse de doctorat, Université d'Annaba, 2016.

Bibliographie

- [11] D. Zappala et al. Electrical & mechanical diagnostic indicators of wind turbine Induction generator rotor faults. *Journal of Renewable Energy*, 131 (2019) 14-24.
- [12] F. Cottet, « Traitement des signaux et acquisitions des données », Livre, 2^{ème} Edition Dunod, juillet 2005.
- [13] A. Boulenger, C. Pachaud, « Surveillance des machines par analyse vibratoire : Aide Mémoire », Dunod, Paris, 2009.
- [14] David Augex , « Analyse Vibratoire Des Machines Tournantes », Livre, Technique de L'ingénieur, BM5145, 2001.
- [15] Razik Hubert, « Le contenu spectral Du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art », La revue 3EI n°29, juin 2002.

RESUME

Le travail de ce mémoire concerne le diagnostic de défaut d'un déséquilibre électrique au rotor (DER) dans une machine asynchrone à double alimentation destinée à être entraînée par une éolienne. L'étude s'est portée sur la surveillance de l'évolution de ce défaut par l'analyse des grandeurs électriques (courants statoriques et puissance) et mécaniques (couple électromagnétique et vitesse de rotation) mesurées sur la génératrice. Après avoir décrit les différents éléments constitutifs d'une machine asynchrone et les principaux défauts pouvant survenir sur ceux-ci, nous proposons deux méthodes de diagnostic. La première se base sur le calcul d'indicateurs statistiques et la deuxième se repose sur l'analyse spectrale. En effet, le calcul des indicateurs (RMS, énergie, kurtosis, entropie et complexité) pour ces grandeurs a permis de suivre l'évolution du défaut de façon moins, puisque certains de ces indicateurs ne sont pas fiables lors de l'analyse de toutes les mesures. Pour y pallier, l'analyse spectrale par transformée de Fourier et la démodulation de ces signaux par la transformée de Hilbert, deux méthodes faciles et rapides, permettent d'avoir un suivi plus approprié de l'état de la machine. Cela s'explique par l'influence du défaut sur le contenu spectral des grandeurs mesurées qui, en fait, agit de façon directe sur le champ tournant de la machine.

ABSTRACT

This work concerns the fault diagnosis of an electrical rotor imbalance (DER) in a doubly fed induction generator widely-used for wind turbine. The study focused on monitoring the development of this defect by analyzing the electrical (stator currents and power) and mechanical (electromagnetic torque and speed) signals measured on the generator. After having described the different constituent elements of an induction machine and the main faults that can occur on them, we propose two diagnostic methods. The first is based on the calculation of statistical indicators and the second is based on spectral analysis. Indeed, the calculation of the indicators (RMS, energy, kurtosis, entropy and complexity) for these quantities made it possible to follow the evolution of the fault less, since some of these indicators are not reliable during the analysis of all measurements. To overcome this, the spectral analysis by Fourier transform and the demodulation of these signals by the Hilbert transform, two easy and fast methods, allow a more appropriate monitoring of the state of the machine. This is explained by the influence of the defect on the spectral content of the measured quantities which, in fact, acts directly on the rotating field of the machine.

الملخص:

يتعلق عمل هذه الرسالة بتشخيص خطأ عدم توازن الدوار الكهربائي في آلة غير متزامنة مزودة بمصدر طاقة مزدوج يُقصد به أن يتم تشغيله بواسطة توربين الرياح. ركزت الدراسة على مراقبة تطور هذا الخلل من خلال تحليل الكميات الكهربائية (التيارات الثابتة والتيار الثابت) والميكانيكية (عزم الدوران والسرعة الكهرومغناطيسية) المقاسة على المولد. بعد وصف العناصر المكونة المختلفة لآلة غير متزامنة والأعطال الرئيسية التي يمكن أن تحدث عليها، نقترح طريقتين للتشخيص. الأولى تعتمد على حساب المؤشرات الإحصائية والثاني يعتمد على التحليل الطيفي. في الواقع، فإن حساب قيم المؤشرات الإحصائية (RMS، والطاقة، والتفرطح، والنتروبي والتعقيد) لهذه الكميات جعل من الممكن متابعة تطور الخطأ بشكل أقل، لأن بعض هذه المؤشرات لا يمكن الاعتماد عليها أثناء تحليل كل القياسات. لعلاج هذا، يسمح التحليل الطيفي بواسطة تحويل فورييه واستخلاص هذه الإشارات بواسطة تحويل هيلبرت، وهما طريقتان سهلتان وسريعتان، بمراقبة أكثر ملائمة لحالة الآلة. يفسر ذلك من خلال تأثير الخلل على المحتوى الطيفي للكميات المقاسة، والتي في الواقع تعمل مباشرة على المجال الدوار للآلة.