



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique

Université Mohamed Khaidar Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Electrotechnique

MÉMOIRE DE MASTER

Machine Electrique

Réf. :

**L'exploitation de la méthode de Prony pour la
détection des défauts d'excentricité dans les MAS**

Présenté par :

**Boughougal Chakib
Saad Aymen**

Le : Sept 2020

Jury :

Mr. K. Yahia

Pr

Président

Mr. Mohamed Sahraoui

Pr

Encadreur

Mr. M. T. benchouia

Pr

Examineur

Année universitaire : 2019/ 2020



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique

Université Mohamed Khaider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Electrotechnique

MÉMOIRE DE MASTER

Machine Electrique

**L'exploitation de la méthode de Prony pour la
détection des défauts d'excentricité dans les MAS**

Présenté par :

Boughoual Chakib
Saad Aymen

Avis favorable de l'encadreur :

SAHRAOUI Mohamed Signature

Avis favorable du Président du Jury

Pr. K. Yahia

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machine Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :
MASTER
Thème

L'exploitation de la méthode de Prony pour la détection des défauts
d'excentricité dans les MAS

Proposé par : SAAD AYMEN et BOUGHOUGAL CHAKIB

Dirigé par : SAHRAOUI Mohamed

RESUMES (Français et Arabe)

Résumé :

En présenter dans ce travail l'estimation de la méthode de prony pour la détection des défauts d'excentricité, en utilisé l'approche signal pour l'analyse le signal de courant statorique car il est riche a des informations sur l'état santé de la machine, sa ce que ma donne une image claire sur notre machine.

ملخص:

لأن تيار لكهربائي الخاص بالجزء الثابت من الألة الغير متزامنة غني بالمعطيات الهامة حول الحالة الصحية للألة، فالمن الواجب تحليل هذه الإشارة للحصول على صورة واضحة والاكتشاف المبكر للأحطاب التي يمكن أن تحدث أثناء عمل الألة. في هذا العمل استخدمنا طريقة PRONY لرصد عطب لامركزية في الالة الغير متزامنة ذات قفص السنجاب.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à tout ceux qui ont contribué de près ou de loin a la réalisation de notre projet ainsi je le dédie à :

Ma Chère Mère, source de tendresse A mon Père, qui

m'encourage . A mes Frères et ma sœur A ma grand-mère et

toute la famille SAAD à mon chers ami Chakib A tous ceux qui

ont une bonne impression dans mon cœur, Comme signes

d'amour et respect.

SAA D AYMEN

REMERCIEMENTS

Je remercie, avant tout, Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé parmi Ses innombrables Grâces, santé et courage pour accomplir ce travail.

*Mes plus vifs remerciements vont à mon encadreur pour sa disponibilité et la qualité de son encadrement, **SAHRAOUI MOHAMED**, Maître de conférences à l'Université Mohamed Khider de BISKRA.*

Mes vifs remerciements vont également aux membres de jury de soutenance de ce mémoire :

***Pr. K.YAHIA**, d'avoir accepté la présidence de jury de soutenance.*

***Pr.M.T. Benchouia**, pour avoir accepté d'examiner mon travail et faire partie du jury.*

Je n'oublierai pas d'exprimer un profond respect à tous mes professeurs qui m'ont inculqué les fondements scientifiques tout au long des cursus de mon étude.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : classification des défauts dans les machines électriques selon leurs origins.....	7
Tableau II.1: les différents harmoniques du courant statorique.....	19
Tableau III.1 : la fréquence des harmonique EFH1 et EFH2.....	26
Tableau III.2: amplitude estimée pour différents nombre d échantillon(temps d'acquisition)..	29
Tableau III.3: L'amplitude et fréquence de signal $x(t)$ estimées par les méthodes de prony et FFT.....	38
Tableau III.4 : L'amplitude et fréquence de signal $x'(t)$ estimées par les méthodes de prony et FFT.....	40
Tableau III .5 sensibilités des Indicateur à la l'apparition de défaut.....	55
Tableau III .6 sensibilités des Indicateur à la sévérité de défaut.....	56

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	5
Figure I.2 : Stator d'une machine asynchrone.....	6
Figure I.3 : Rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	6
Figure 1.4. Proportion des défauts 1988	8
Figure 1.5. Pourcentage des défauts 1995.....	8
Figure 1.6. Pourcentage des défauts 2008.....	9
Figure 1.7. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique.....	11
Figure II.1 : Allure temporelle du courant pour : A) le moteur à l'état sain, B) avec défaut 20s_10d, C) avec défaut 30s_10d, D) avec défaut 50s_10d, E) avec défaut 60s_10d.....	16
Figure.II.2 Explicite de FFT1.....	17
Figure.II.3 Explicite de FFT2.....	18
Figure.II.4 Les harmoniques TH.....	20
Figure.II.5 Les harmoniques EFH.....	20
Figure.II.6. Les harmoniques de RSH.....	21
Figure. II.7 Les harmoniques RBFH.....	21
Figure III.1 : L'excentricité statique et dynamique d'un moteur asynchrone.....	25
Figure.III.2 : la position des harmonique EFH1 et EFH2.....	27
Figure.III.3 : la position des harmonique EFH3 et EFH4.....	28
Figure. III 4. Principe de la méthode basée sur une fenêtre glissante.....	29
Figure. III 5: Allure des Amplitudes estimées pour 30% ES 10% ED.....	30
Figure.III 6 : Allure des fréquences estimées pour 30% ES 10% ED.....	31
Figure III.7 : Allure temporelle de courant statorique non stationnaire.....	31
Figure.III.8 : évolution des Amplitude des EFH de l'état sain a l'état défauts de 30% ES 10%ED.....	32
Figure III.9 : Allure temporelle de courant statorique non stationnaire assemble le courant à l'état sain et les courants avec défaut d'excentricité 20ED_10ES, 30ED_10ES, 50ED_10ES, 60ED_10ES.....	32

Liste des figures

Figure.III.10 : évolution des Amplitude des EFH de l'état sain a l'état défauts de 20ED_10ES, 30ED_10ES, 50ED_10ES, 60ED_10ES.....	33
Figure. III.1 : schéma général représentant les étapes de la méthode de prony	38
Figure. III.2 : l'allure temporelle de signal généré mono composante.....	38
Figure. III.3 : specter de signal généré (fs = 50 Hz).....	38
Figure. III.4 : l'allure temporelle de Signal généré trio composante.....	39
Figure. III.5 : Spectre du signal génères trio harmonique (fs1=50 HZ, fs2=55 HZ, fs3=45 HZ.....	39
Figure. III.6 :méthode de prony a fenêter glissante.....	41
Figure. III.7 : Fréquence et l'amplitude estimées par la méthode STLSP d'un signal mono-harmonique stationnaire.....	42
Figure. III.8 : L'allure temporelle du signal mono-harmonique non-stationnaire.....	43
Figure. III.9 : Fréquence et l'amplitude estimées par la méthode STLSP d'un signal mono harmonique nonstationnaire.....	43
Figure. III.10 : Fréquence et l'amplitude estimées par la méthode STLSP d'un signal multi harmonique stationnaire.....	44
Figure. III.11 : L'allure temporelle du signal multi-harmonique non-stationnaire.....	45
Figure. III.12 : Fréquence et l'amplitude estimées par la méthode STLSP d'un signal multi-harmonique non-stationnaire.....	45
Figure. III.13 : L'allure temporelle du signal de courant avec défauts d'excentricité de degré 30%_ES et 10%_ED.....	46
Figure. III.14 : Amplitude et fréquence réelle de EFH1, EFH2, EFH3 et EFH4.....	47
Figure.III.15 amplitude et fréquence estimé par STLSP de EFH1, EFH2, EFH3 et EFH4 pour 30%ES 10%.....	47
Figure. III.16 : L'allure temporelle du signal non statorique [00%ES_ 00%ED 30%ES_10%ED].....	48
Figure .III .17 amplitude et fréquence estimé par STLSP de EFH1, EFH2, EFH3 et EFH4 pour [00%ES_00%ED 30%ES_10%ED].....	49

Liste des figures

Figure. III.18 : L'allure temporelle du signal non statorique pour tous les différents degrés d'excentricité.....	50
Figure.III.19: amplitude estimé par STLSP de EFH1, EFH2 pour tous les différents degrés d'excentricité.....	50
Figure.III.20 amplitude estimé par STLSP de EFH3, EFH4 pour tous les différents degrés d'excentricité.....	51
Figure III.21: les indicateurs EFH1 et EFH2 des défauts d'excentricité pour tous les variations des défauts.....	53
Figure III.22 les indicateurs (EFH1+EFH2) des défauts d'excentricité pour tous les variations des défauts.....	53
Figure III.23 les indicateurs EFH1 et EFH2 des défauts d'excentricité pour tous les variations des défauts.....	54
Figure III.24 les indicateurs (EFH3+EFH4) des défauts d'excentricité pour tous les variations des défauts.....	54

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES ABREVIATIONS

$s = g$: le glissement dû au fondamental.

N_b : Nombre de barres rotoriques de moteur asynchrone à cage.

f_e : La fréquence d'échantillonnage.

T_a : Le temps d'acquisition.

N_e : Le nombre des échantillons.

Δ_f : La résolution fréquentielle.

f_{TH} : Les harmoniques du temps.

f_{RSH} : Les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH).

f_{EFH} : Eccentricity Fault Harmonics (EFH).

f_{RBFH} : Rotor Bar Fault Harmonics (RBFH).

\square : L'ordre du temps harmonique.

f_S : La fréquence fondamentale.

f_R : La vitesse mécanique du rotor exprimée en Hertz.

P : Nombre de paires de pôles.

f_{PSH} : L'harmonique principal d'encoches rotoriques (PSH).

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I: Etats de L'art.....	2
I.1 INTRODUCTION.....	3
I.1. Définitions.....	3
I.1. 1 La Maintenance.....	3
I.2.1.1 Maintenance corrective	3
I.2.1.2 Maintenance préventive.....	3
I.2.1.3 Maintenance préventive systématique.....	4
I.2.1.4 Maintenance préventive conditionnelle	4
I.2.2 le diagnostic.....	4
I.3 Constitution de la machine asynchrone	4
I.3.1 Définition	4
I.3.1.1 Stator..	5
I.3.1.2 Rotor..	6
I.3.1.3 Les paliers.....	6
I.4 Différents défauts dans la machine asynchrone.....	7
I.4.1 Défauts statorique	9
I.4.2 Défauts rotoriques.....	10
I.4.2.1 Défauts de roulemens.....	10
I.4.2.2 Défauts Excentricité	10
I.5. Différents Méthodes de Diagnostic des machines asynchrones.....	11
I.5.1 Approche Modèle	12
I.5.2 Approche Signal.....	12
I.5.2.1. Méthodes basées sur le traitement de signal.....	12
I.5.2.2. Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques	12
I.5.2.3. Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite.....	13
I.5.2.4. Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique	13

Sommaire

I.5.2.5.Diagnostic par l'analyse du courant statorique.....	13
I.6 Conclusion	13
Chapitre II: le contenu spectrale de courant statorique.....	14
II. 1 INTRODUCTION.....	15
II.2 Les Allures temporelles des courants statoriques pour différentes défauts.....	15
II.3. Analyse spectrale du courant statorique.....	17
II.4 La Transformée de Fourier.....	17
II.5 Les différents harmoniques existant dans le courant statorique.....	19
II.4.1 Harmoniques du temps TH.....	19
II.4.2 Harmoniques de défaut d'excentricité (EFH).....	20
II.4.2 Harmoniques d'encoches rotoriques RSH.....	20
II.4. Les harmoniques des défauts des cassures de barres RBFH.....	21
II.5 Conclusion.....	22
Chapitre III :détection de défauts d'excentricité par la méthode de STLSP.....	23
III.1 INTRODUCTION.....	24
III.2 défaut d'excentricite.....	24
III.3 estimation des signature spectrales de défauts d'excentricité.....	26
III.3.1 Au borne de fondamentale.....	26
III.3.2 Aux alentours des PSH.....	27
III.4 Estimation de la fréquence et l'amplitude en utilisant une fenêtre glissante.....	28
III.5 Effet du nombre des échantillons sur l'estimation de la fréquence et d'amplitude.....	29
III.6 Application et test.....	30
III.6.1 sur les signaux stationnaires.....	30
III.6.2 sur les signaux non stationnaires.....	31
III.6.3 Notes générales.....	33

Sommaire

III.7 les inconvénients et les limites de FFTG (FFT glissante)	33
III.8 la méthode de prony.....	34
III.8.1 La méthode de prony modifier.....	36
III.9 Test de la méthode de prony.....	38
III.9.1 Signal généré mono-harmonique.....	38
III.9.2 Signal généré multi-harmonique.....	39
III.10 La méthode STLSP (Short Time Least Square Prony's Method)	40
III.10.1 Choix de l'ordre du modèle de Prony.....	41
III.10.1 Testes de la méthode STLSP.....	42
III.11 Applications et tests sur le signal de courant.....	46
III.11.1 signaux statoriques.....	46
III.11.2 signaux statoriques.....	48
III.12.1 Indices relatives de défaut d'excentricité.....	52
III.12.2 les critères de comparaison entre l'indicateur.....	55
III.12.2.1 Test de Sensibilité a l'apparition du défaut.....	55
III.12.2.2 Test de Sensibilité à la sévérité de défauts.....	56
III.13 CONCLUSION.....	57
Conclusion Générale.....	58
<i>Bibliographiques</i>	59

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement dans le domaine d'industrie la machine asynchrone prend la plus grande partie des machines électriques utiliser dans ce domaine, Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa robustesse mécanique, son faible coût d'achat et sa simplicité de construction. Par conséquent, il est très important d'assurer la continuité de service par développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type des machines.

Le travail présenté dans cette thèse rentre dans le cadre général du diagnostic des défauts dans les machines asynchrones et spécialement le défaut d'excentricité. le but de ce travail est **l'exploitation de la méthode de Prony pour la detection des défauts d'excentricité dans MAS**

Le mémoire est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons présentés des notions très importantes en diagnostic et nous avons présentés de manière générale les parties principales qui constituent la machine asynchrone, tels que les défauts peuvent affecter la machine asynchrone, leurs origines et leur classification ainsi que les méthodes utilisées en diagnostic.

Le deuxième chapitre est présenté les allures temporelles des courant statoriques issus des essais expérimentaux. On a remarqué qu'elles ne donnent pas beaucoup d'informations sur l'état de moteur, alors on a passé a la FFT qui nous a permet d'explorer les harmoniques qui existent dans le spectre du courant statorique. En contre partie, on a démontré que la FFT simple est incapable de suivre les amplitudes des harmoniques caractérisant le défaut par exemple d'excentricité mixte. Pour résoudre ce problème, on a proposé d'utiliser **la méthode de FFT glissante**. La définition et l'application de cette méthode sera l'objet du chapitre suivant.

Dans le dernier chapitre, nous avons identifié et comparé les méthodes FFTG et STLSP, ces dernières ayant prouvé leur efficacité. Nous avons donc appliqué la méthode STLSP pour détecter le défaut d'excentricité après la définition des harmoniques qui représentent le défaut étudié en estimer online tous les indicateurs définis. À la fin de cette étude comparative, nous avons conclu qu'il n'y avait pas d'indicateur qui satisfaisait à toutes les normes de façon idéale. Mais nous devons compromettre le choix du meilleur.

Chapitre I : ETAT DE L'ART

I. 1 INTRODUCTION

La machine asynchrone est la plus type des machines utilisé dans le domaine d'industrie, car elle présent plusieurs des avantages tels que sa puissance, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre et son faible coût etc....

Elle apparaît maintenant comme élément de base des actionneurs électriques performants.

Dans ce chapitre, nous présenterons les définitions et les concepts appartenant au domaine de l'entretien, et le diagnostic. Après cela, nous allons citer les différents défauts affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone.

I.2. DEFINITIONS

I.2.1 La Maintenance

La tâche principale d'un ingénieur est de garantir la disponibilité des systèmes industriels, c'est-à-dire, d'assurer que le système fonctionne lorsqu'on le sollicite. La responsabilité de cette tâche repose sur la maintenance. Selon l'association française de normalisation (AFNOR).

La maintenance est « ensembles des activités destinées à maintenir ou à établir un bien dans un état pour accomplir une fonction requise » [ABE 02]. Il y a deux grandes classes de la maintenance :

- Maintenance corrective.
- Maintenance préventive :
 - systématique
 - Conditionnelle

I.2.1.1 Maintenance corrective

C'est un ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien. Autrement dit, la maintenance corrective est effectuée après la détection d'une panne : Elle devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines. Ce type de maintenance sera réservé aux matériels peu coûteux, non stratégiques pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité.

I.2.1.2 Maintenance préventive

Ce type de maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des équipements au cours de l'utilisation. La mise en pratique de ce type de maintenance nécessite la décomposition des sous-systèmes en composants (roulement, circuit magnétique, etc..). Les buts de la maintenance préventive, sont :

- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Diminuer le budget de la maintenance.
- Supprimer les causes des accidents graves.

I.2.1.3 Maintenance préventive systématique

La maintenance systématique est un type de maintenance planifiée dans le temps (graissage, lubrification, nettoyage, dépoussiérage, calibrage...). Il s'agit là d'éviter les causes de défaillances et de vieillissement des composantes du système.

Généralement, la maintenance préventive systématique s'adresse aux éléments dont le coût des pannes est élevé, mais ne revenant pas trop cher en changement (les meilleurs exemples sont le changement systématique de l'huile, des filtres, changement de la courroie de synchronisation, des roulements, des paliers de rotation ...).

I.2.1.4 Maintenance préventive conditionnelle

C'est un type de maintenance déclenché suite à un symptôme observable (température, vibration, jeu excessif, ...) permettant de prédire une défaillance prochaine. Il s'agit là d'intervenir juste avant que la panne ne survienne. La maintenance préventive conditionnelle est réalisée dès lors qu'une mesure dépasse une valeur précise (seuil) d'une grandeur physique (température, pression...)

I.2.2 le diagnostic

Le diagnostic en génie électrique remet en cause les concepts et les outils traditionnels utilisés en conception et commande des machines électriques tournantes. La modélisation des machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil en vue de la surveillance et du diagnostic s'insère dans ce contexte. Le présent travail s'intéresse à la synthèse d'un modèle de connaissance riche et flexible permettant d'appréhender le comportement des machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil en absence et en présence de défaillances ainsi que l'estimation des paramètres et des états de la machine asynchrone [MER07].

I.3 Constitution de la machine asynchrone

I.3.1 Définition

La machine asynchrone à cage ou MAS est une machine électrique tournante assurant la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique (ou l'inverse) avec un niveau de performances donné.

Les parties constitutives de la machine asynchrone sont :

- Le stator : (partie fixe) où est fixée l'alimentation, est constitué de disques en tôles magnétiques empilés portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- Le rotor : (partie tournante), permet de mettre en rotation la charge mécanique, il est constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement qui peut être bobiné semblable à celui du stator ou injecté de type cage.
- Les organes mécaniques : permettent la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles [MEN17].

La (figure I.1) ci-dessous présenter de manière générale les parties principales qui constituent la machine asynchrone.

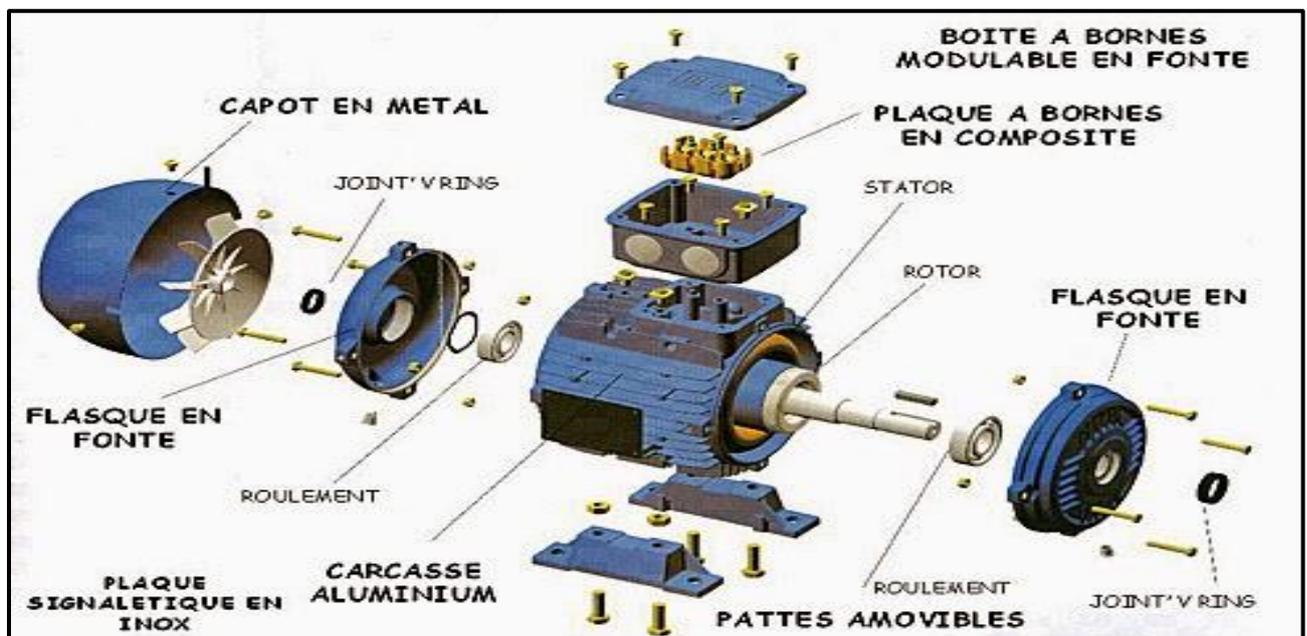


Figure I.1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

I.3.1.1 Stator :

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine. Les différents types des moteurs asynchrones est de même partie fixe (le stator) elles diffèrent dans la partie tournant (le type de rotor),

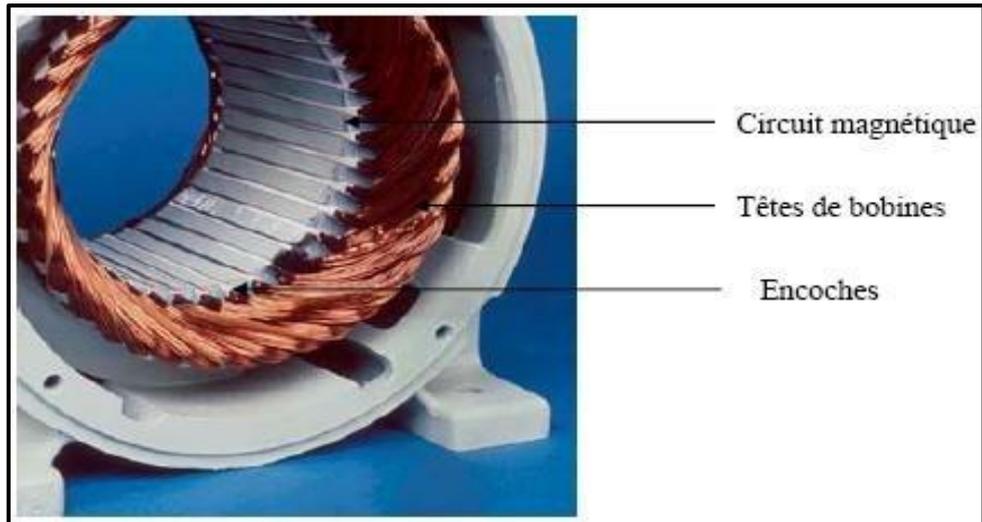


Figure I.2 : Stator d'une machine asynchrone.

I.3.1. 2 Rotor :

Est constitué de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits, ces barres sont reliées entre elles à chacune des extrémités du rotor par un anneau de court-circuit. Très souvent les barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et aussi diminuer fortement le bruit lors de l'accélération de la machine. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre.

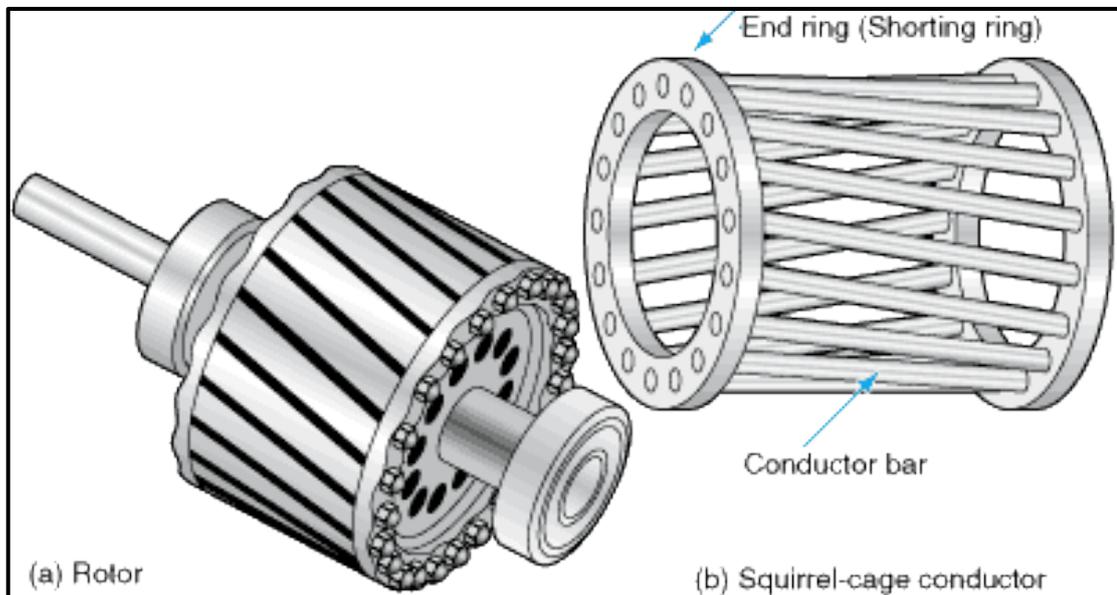


Figure I.3 : Rotor d'une machine asynchrone à cage d'écurieil.

I.3.1.3 Les paliers : sont des organes mécaniques qui permettent la rotation du rotor et assurent le maintien des différents sous-ensembles. Ils sont constitués de deux composants : les flasques et les roulements à billes.

I.4 Différents défauts dans la machine asynchrone

Comme tous les machines électriques la machine asynchrone souffrent à beaucoup des défailances, dans ce paragraphe ont présenté les différents défauts des machines électriques, leurs origines et leur classification.

Une défailance est définie par la cessation de l'aptitude d'un composant à accomplir une fonction requise. En peut classer les défailances selon leurs causes en deux grandes familles Internes et externes,

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

Le tableau si-dossier (Tableau 1.1) présenté la classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines.

Défaillance des machines électriques	Interne	mécanique	Contact entre le stator et le rotor
			Défaut de roulement
			Excentricité
		Mouvement des enroulements et des tôles	
		Electrique	Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
	Défaillance au niveau de circuit magnétique		
	Externe	mécanique	Charge oscillante
			Surcharge de la machine
			Défaut de montage
		Electrique	Fluctuation de la tension
			Source de tension déséquilibrées
			Réseau bruité
		Environnementale	Humidité
Température			
Propreté			

Tableau I.1 : classification des défauts dans les machines électriques selon leurs origines.

Chapitre I : Etats de L'art

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels [All 88] sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) [KER16] a donné les résultats suivants :

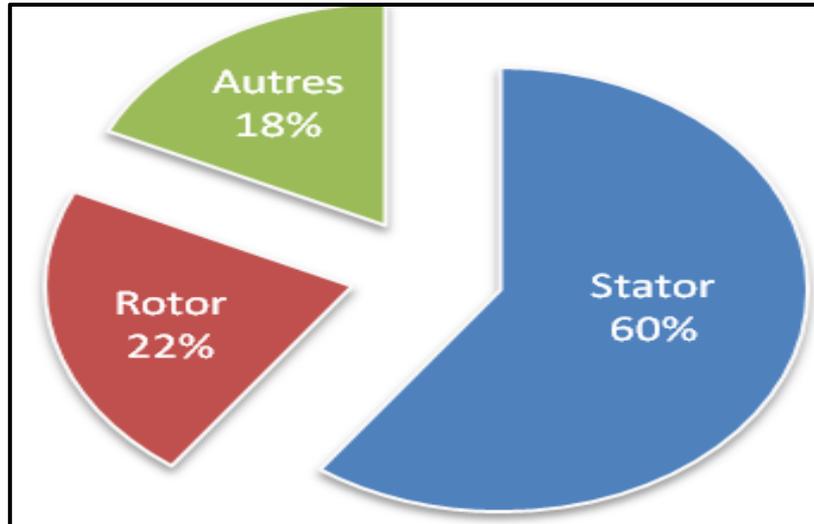


Figure 1.4. Proportion des défauts 1988 [KER16]

Une autre étude statistique faite en 1995 sur des machines de grande puissance (100 kW à 1 MW) [RAZ03] donne des résultats suivants :

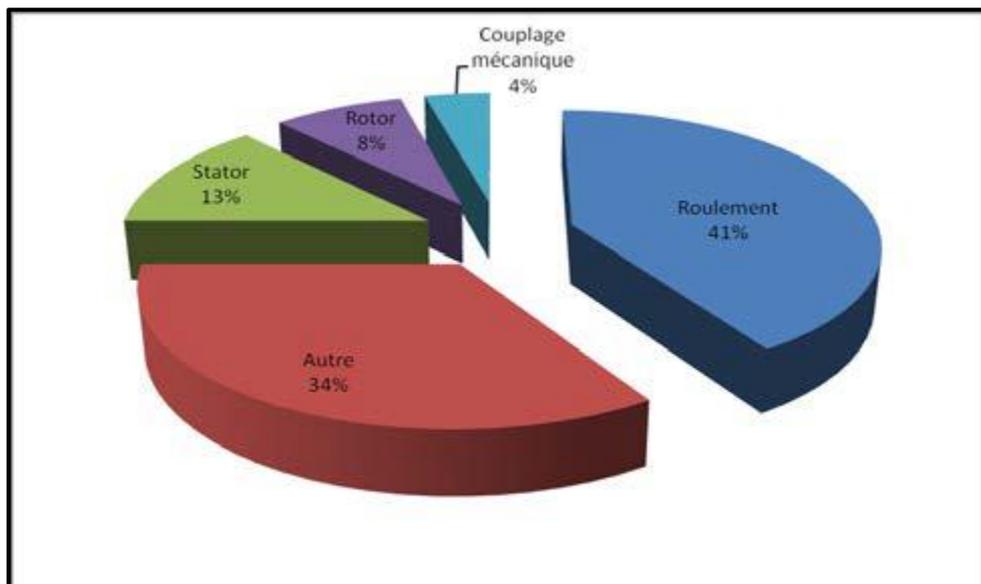


Figure 1.5. Pourcentage des défauts 1995 [RAZ03]

Et aussi une autre étude statistique, effectuée en 2008 par A. H. Bonnette sur les défauts de la machine asynchrone a donné les résultats sur la **Figure 1.6**.

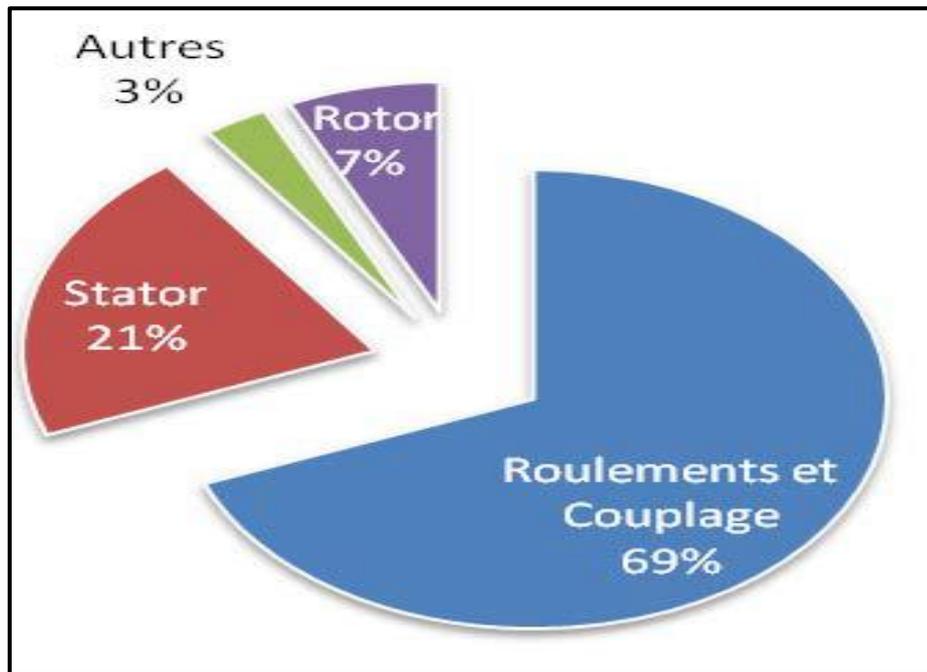


Figure 1.6. Pourcentage des défauts 2008.

D'après les études statistiques de 2008 ; 1995 et de 1988, il est clair que les défauts des machines de grande puissance proviennent principalement de roulements et du bobinage statorique, ceci est dû aux contraintes mécaniques plus importantes dans le cas de ces machines.

I.4.1 : Défauts statorique

Ces défauts sont généralement liés à la dégradation de l'isolation électrique. Ils sont généralement on nus comme des défauts de court-circuit d'une phase à la terre, court-circuit entre spires de la même phase ou de court-circuit entre phases. [MEN17].

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème :

- court-circuit entre spires : surtension, température excessive, vibration, humidité.
- court-circuit entre phases : haute température, alimentation déséquilibré, défaut d'installation.
- défaut d'isolation : démarrage fréquent, décharge partielle, condition, température et humidité extrême.
- défaut entre le stator et carcasse : cycle thermique, abrasion de l'isolant, encrassement des spires par la carcasse, présence des points anguleux dans les encoches, choc.
- déplacement des conducteurs : démarrage fréquent, vibration de tête de bobines.
- défaillance des connecteurs : vibration excessive.

- vibration de la carcasse : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, déséquilibre d'alimentation, surcharge, mouvement des enroulements, contact avec le rotor.

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement.

D'autre part, il entraîne aussi une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases et dans le cas des machines asynchrones, il amplifie les courants dans le circuit rotorique.

La contrainte thermique amenée par le courant de court-circuit risque d'entraîner la propagation du défaut à d'autres spires, ce qui peut conduire au déclenchement des protections électriques dans l'alimentation.

Un court-circuit entre phases peut arriver en tout point du bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs. L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones, provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage. [TAL18]

I.4.2 Défauts rotoriques

I.4.2.1 Défauts de roulements

Comme il est indiqué sur Figure 1.6 la majorité des défauts dans les machines électriques concernent les défauts de roulements. Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Ce type de défaut induit également des variations (oscillations) dans le couple de charge de la machine asynchrone. Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor. [CBN12]

I.4.2.2 Défauts Excentricité

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

phénomène est appelé excentricité (statique et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

- l'excentricité statique : le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique : le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte' : associant les deux cas précédemment cités.

[BOU 09]

On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante :

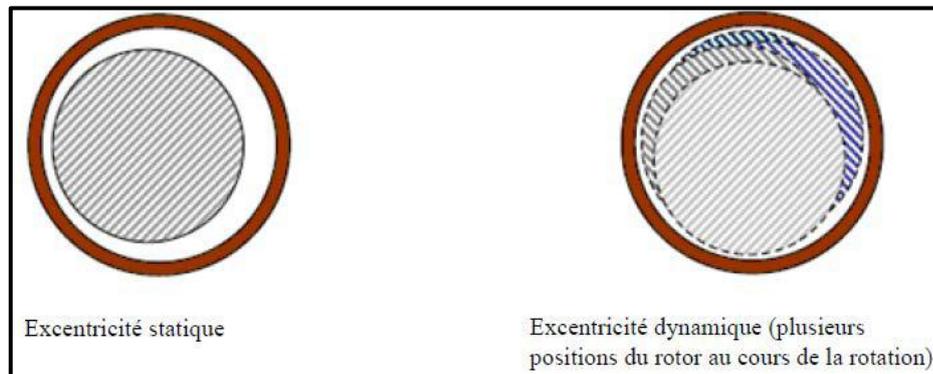


Figure 1.7. Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique [BOU 09]

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

I.5. Différents Méthodes de Diagnostic des machines asynchrones

Après la présentation des différents défauts dans la machine asynchrone dans les paragraphes précédents, il est très important de prendre une idée générale sur les différentes méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts dans les machines électriques. Il y a plusieurs techniques et des approches qui ont étudié les défaillances dans la MAS. Dans ce travail on prend les méthodes les plus connues, Il

important de savoir que les différentes méthodes du diagnostic sont classées selon les approches auxquelles elles appartiennent. En effet, il existe deux approches : Approche Signal et Approche modèle.

I.5.1 Approche Modèle

Cette approche repose sur l'utilisation d'un modèle du processus dont la sortie est comparée aux données accessibles de la machine pour former un résidu qui représente l'entrée d'un système dédié à la détection des anomalies. [SHR10]

I.5.2 Approche Signal

Ces méthodes ne nécessitent pas forcément de modèle analytique précis du système mais reposent plutôt sur une reconnaissance de signatures. Les signatures de défauts, obtenues par une modélisation ou par mesure sur maquette, sont généralement classées dans une base de données. Les principales techniques du diagnostic utilisées sont les suivantes: [MEN17].

I.5.2.1. Méthodes basées sur le traitement de signal

Il existe de nombreuses méthodes de traitement du signal (signaux de courant, de tension, flux...etc.) mais dans ce travail, nous concentrerons sur deux méthodes de base : La transformée rapide de Fourier (FFT) : c'est une méthode qui permet de transformer des données discrètes du domaine temporel dans le domaine fréquentiel (le spectre), ce qui permet d'extraire plusieurs des signatures des différents défauts.

La méthode de Prony : la méthode de Prony originale permet d'extraire le comportement sinusoïdal ou exponentiel d'un signal échantillonné en résolvant un ensemble d'équations linéaires issues d'un modèle mathématique du signal étudié. Donc, la méthode de Prony modélise la forme d'onde d'un signal échantillonné par une somme linéaire d'exponentielles complexes conjuguées. [KHL18]

I.5.2.2. Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques. Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode. [SHR10]

I.5.2.3. Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite

La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator et du rotor ce qui affecte la répartition des du champ magnétique dans et hors la machine. Plusieurs auteurs se sont penchés à l'exploitation du flux axial. En fait, si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de cette tension induite, peut être exploité pour détecter les différents défauts statoriques ou rotoriques. [SHR10]

I.5.2.4. Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient major de cette méthode. [SHR10]

I.5.2.5. Diagnostic par l'analyse du courant statorique

Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace). [KHL15].

I.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présentés des notions très importantes en diagnostic et nous avons présentés de manière générale les parties principales qui constituent la machine asynchrone, tels que les défauts peuvent affecter la machine asynchrone, leurs origines et leur classification ainsi que les méthodes utilisées en diagnostic. Notre travail est consacré à l'exploitation de la méthode de Prony pour la détection de défauts d'excentricité par l'analyse de courant.

Chapitre II : **Le contenu spectrale** **de courants**

II. 1 INTRODUCTION

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, il existe plusieurs méthodes de diagnostic des défauts dans les machines asynchrones. Cependant, dans ce travail, nous nous intéressons à la détection une erreur excentrique par l'approche signal. Plus précisément, nous allons utiliser l'analyse spectrale (via FFT) du signal de courant statorique. Pour cela et dans ce chapitre, nous allons étudier cette méthode et explorer le contenu spectral du courant statorique pendant l'état sain et avec défaut. Nous allons dévoiler aussi les inconvénients et les limites de cette méthode ainsi, nous allons proposer des issus pour résoudre les problèmes rencontrés afin d'arriver à un diagnostic fiable de ce type de défaut.

II.2 Les Allures temporelles des courants statoriques pour différentes défauts :

Il y'a plusieurs techniques des diagnostics existe pour détecter des défauts dans les MAS l'une les plus connue est la MCSA (Motor Current Signature Analysis). Cette technique a été largement utilisée dans les dernières années. Les recherches ont été particulièrement dirigées vers le spectre des courants statoriques pour deux raisons : les courants sont faciles à mesurer et ils fournissent des informations sur de nombreux défauts électriques et mécaniques.

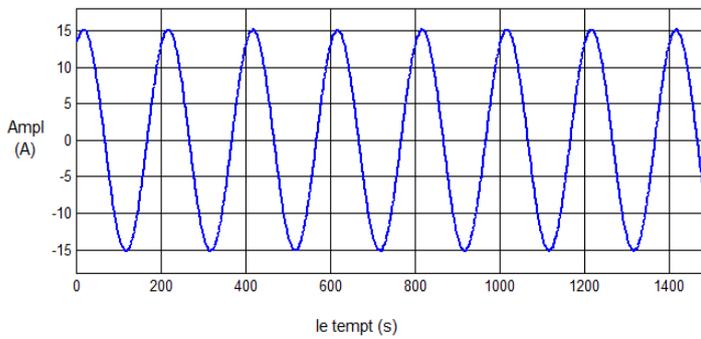
L'apparition ou la modification de l'amplitude des harmoniques du spectre donne des informations sur l'état de la machine. On a choisi cette technique parce que le signal du courant statorique peut être enregistré facilement à l'aide d'un simple capteur de courant et à partir l'armoire de commande. [BEN16]. Dans un premier temps, on a utilisé des signaux du courant statoriques issus de cinq essais expérimentaux :

- ▶ Le moteur fonctionnait à l'état sain (00s_00d)
- ▶ Le moteur fonctionnait avec défaut (20s_10d)
- ▶ Le moteur fonctionnait avec défaut (30s_10d)
- ▶ Le moteur fonctionnait avec défaut (50s_10d)
- ▶ Le moteur fonctionnait avec défaut (60s_10d).

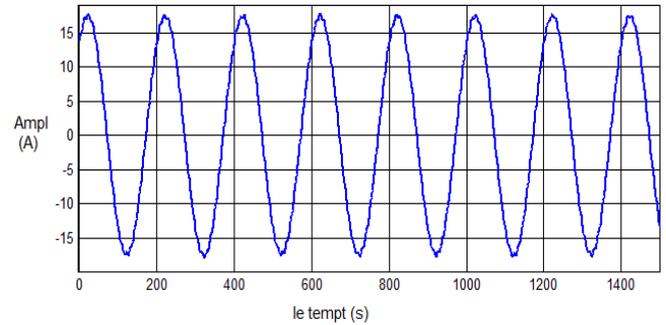
Chapitre II : le contenu spectrale de courants statorique

Remarque :

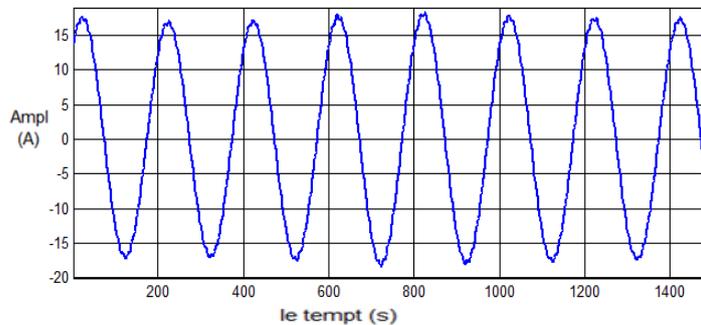
Dans tous les cas la charge est constante.



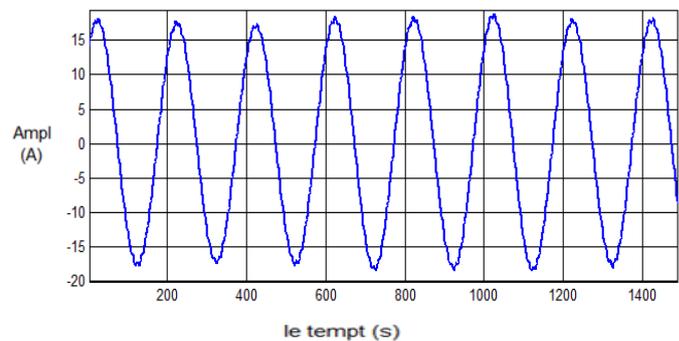
(A) Allure de courants statorique à l'état sain (00s_00d)



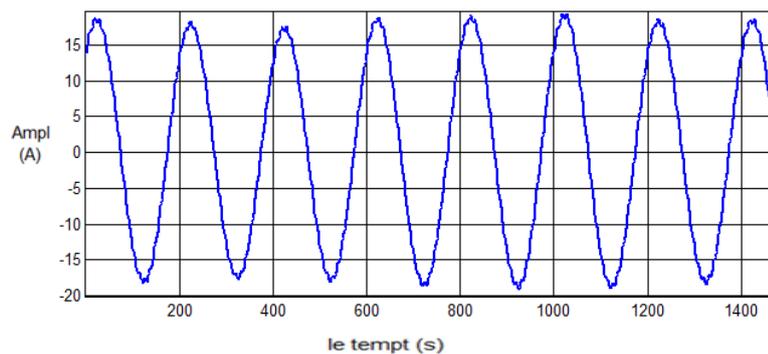
(B) Allure de courants statorique avec défaut (20s_10d)



(C) Allure de courants statorique avec défaut (30s_10d)



(D) Allure de courants statorique avec défaut (50s_10d)



(E) Allure de courants statorique avec défaut (60s_10d)

Fig II.1 : Allure temporelle du courant pour : A) le moteur à l'état sain, B) avec défaut 20s_10d, C) avec défaut 30s_10d, D) avec défaut 50s_10d, E) avec défaut 60s_10d

Chapitre II : le contenu spectrale de courants statorique

On remarque que :

Il y a une différence d'amplitude de courant entre l'état sain et l'état avec défaut (l'amplitude de courant avec défaut Supérieure à l'état sain). Mais malgré il y'a des changements du défaut, on ne remarque pas de changement d'amplitude

II.3. Analyse spectrale du courant statorique :

L'analyse spectrale des signaux (grandeurs mesurables : les courants statoriques, les flux de fuites, le couple, la vitesse, les vibrations, la puissance,...) est l'approche la plus utilisée pour détecter les défauts électriques ou mécaniques dans les machines asynchrones. Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, plusieurs phénomènes entrent en jeu pendant le fonctionnement du moteur asynchrone à cage et affectent essentiellement les courants d'alimentation en modifiant leurs formes. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations, on est obligé d'aller vers les méthodes de traitement de signal.

Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques. Parmi de méthode la plus utilisé, on trouve la « Transformée de Fourier rapide » (FFT). Cette technique permet de décrire les signaux temporels par leurs spectres fréquentiels.

II.4 La Transformée de Fourier :

On rappelle que la transformée de Fourier Rapide (f) d'un signal continu dans le temps est donnée par :

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t).e^{-j\omega t} .dt$$

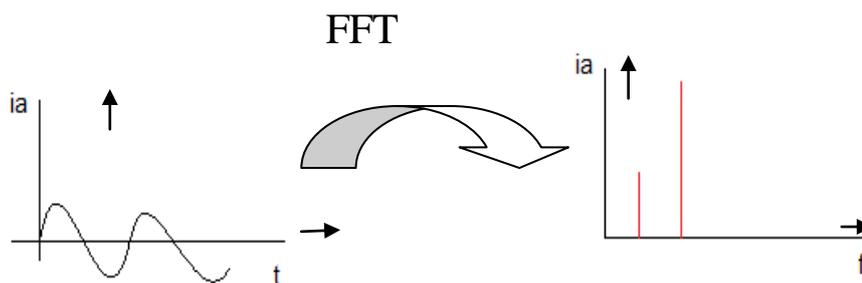


Fig.II.2Explication de FFT1

$$I_a = A_0 + A_n \sin n\omega t + \sum B_n \cos n\omega t$$

L'analyse par FFT est utilisée principalement pour décrire un signal temporel dans le domaine fréquentiel avec une résolution fréquentielle constante sur une échelle linéaire de

Chapitre II : le contenu spectrale de courants statorique

fréquence. Généralement, pour analyser un signal par la technique FFT, on doit prendre en compte les paramètres suivants :

- La fréquence d'échantillonnage : $f_e = 10000 \text{ Hz}$
- Le nombre des échantillons : $N_e = 100000 \text{ échantillons}$
- Le temps d'acquisition : $T_a = N_e * T_e = \frac{N_e}{f_e} = \frac{100000}{10000} = 10\text{s}$
- La résolution fréquentielle : $\Delta f = \frac{1}{T_a} = 0.1\text{Hz}$

Avec un ordinateur, il est impossible de calculer la FFT $x(f)$ pour une valeur quelconque de la fréquence. Donc, on ne calcule la FFT que pour des multiples Δf . C'est la notion de la Transformée de Fourier Discrète (DFT) $x(n)$. En conséquence, la DFT d'un signal échantillonné est donnée par :

$$x(n) = \sum_{k=1}^{N_e} x(k) e^{-j2\pi k \frac{n}{N_e}} \quad \text{avec } n=1,2,3 \dots N_e.$$

Il est important de noter que la résolution fréquentielle Δf joue un rôle primordial quant à la clarté du spectre, elle doit être de faible valeur pour qu'on puisse séparer les harmoniques proches. [KHB15]

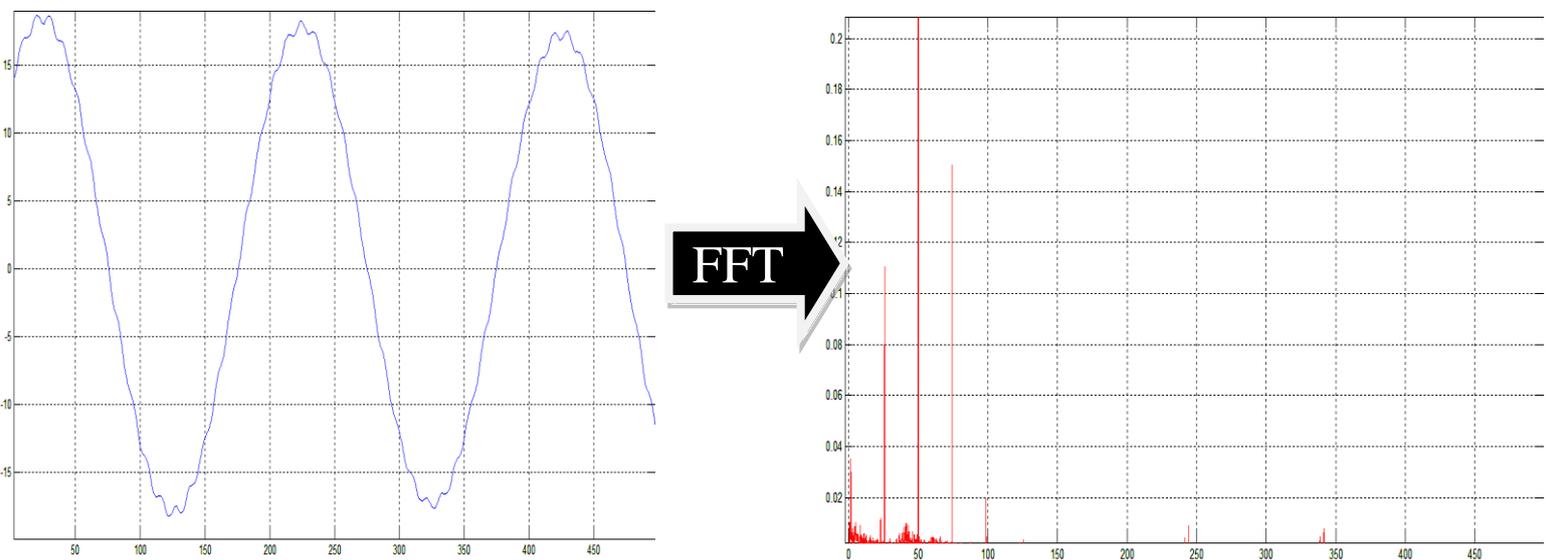


Fig.II.3 Explication de FFT2

Chapitre II : le contenu spectrale de courants statorique

II.5 Les différents harmoniques existant dans le courant statorique

Une étude analytique détaillée qui a été effectuée dans [SAH 10] a identifié quatre types d'harmoniques qui sont toujours présents dans le spectre du courant statorique même à l'état sain. Le tableau II.1 présente les expressions générales des fréquences gouvernant chaque famille d'harmonique ainsi que leurs causes d'apparition.

Les différents harmoniques	Les formules globales	Les causes principales
Les harmoniques du temps (TH)	$TH = v.fs$	Ce type d'harmonique est imposé par le réseau électrique.
Harmonique de défauts d'excentricité (EFH)	$EFH = (v.fs \pm k.fr)$	Sont dus à un certain degré d'excentricité mixte résiduelle
Les harmoniques d'encoche Rotorique (RSH)	$RSH = (v.fs \pm k.Nb.fr)$	Sont dus à la structure naturelle de la Machine asynchrone à cage (la distribution discrète des barres rotorique dans les encoches rotorique.)
Harmonique de défauts de cassure de barre (RBFH)	$RBFH = (v \pm 2 kg) fs$	Sont dus à l'asymétrie résiduelle du moteur au niveau du rotor.

TAB II.1 les différents harmoniques du courant statorique

Avec : $k = 1, 2, 3, \dots$; $fs = 50 \text{ Hz}$, $Nb =$ nombre de barres. $v = 1, 3, 5, \dots$

Nous exposons sur les figures (II.5 II.6 II.8 II.9) le spectre du courant statorique pour un fonctionnement à 100% de la charge nominale ($g = 0.036$) avec la représentation les quatre familles des harmoniques (TH, RSH, EFH et RBFH).

II.5.1 Harmoniques du temps TH

Ce type d'harmonique est imposé par la source. Il est gouverné par l'expression de fréquence suivante :

$$TH = v.fs \quad (II.3)$$

- Spectre des courants de la (moteur 3kw) a l'état sain à 100% de la charge nominale.

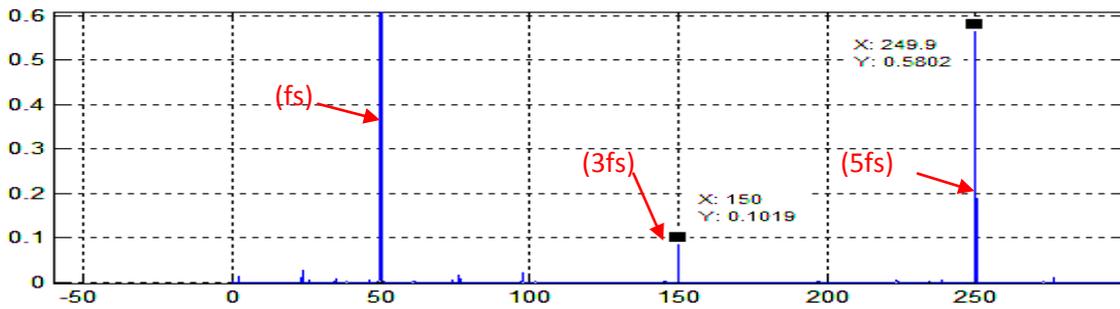


Fig.II.4 Les harmoniques TH

II.5.2 Harmoniques de défaut d'excentricité (EFH) :

L'excentricité du rotor, encore appelée excentricité de l'entrefer, non uniformité de l'entrefer ou bien désalignement. Les fréquences des bandes latérales autour de la fréquence d'alimentation sont donnée par:

$$EFH = (v.fs \pm k.fr) \quad (II.4)$$

Cette harmonique apparait dans le cas où il existe un défaut d'excentricité dans le moteur asynchrone

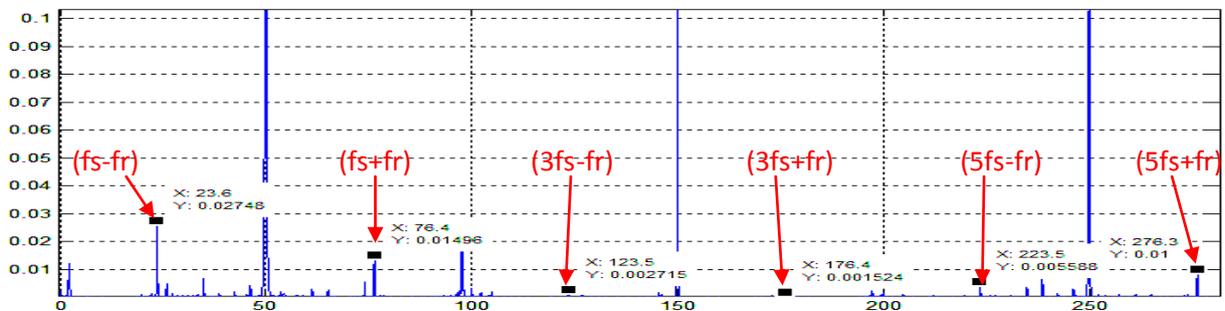


Fig.II.5 Les harmoniques EFH

II.5.3 Harmoniques d'encoches rotoriques RSH

En réalité, l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est fonction de différents paramètres, tel que la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage. A cause de cette structure (répartition décrite des barres rotoriques), Il a été démontré qu'en plus de l'harmonique fondamental, il apparaît dans le spectre du courant statorique des harmoniques dite d'encoches rotoriques ayant pour fréquences : [TH001]

$$RSH = |(v.fs \pm k.Nb.fr)| \quad (II.5)$$

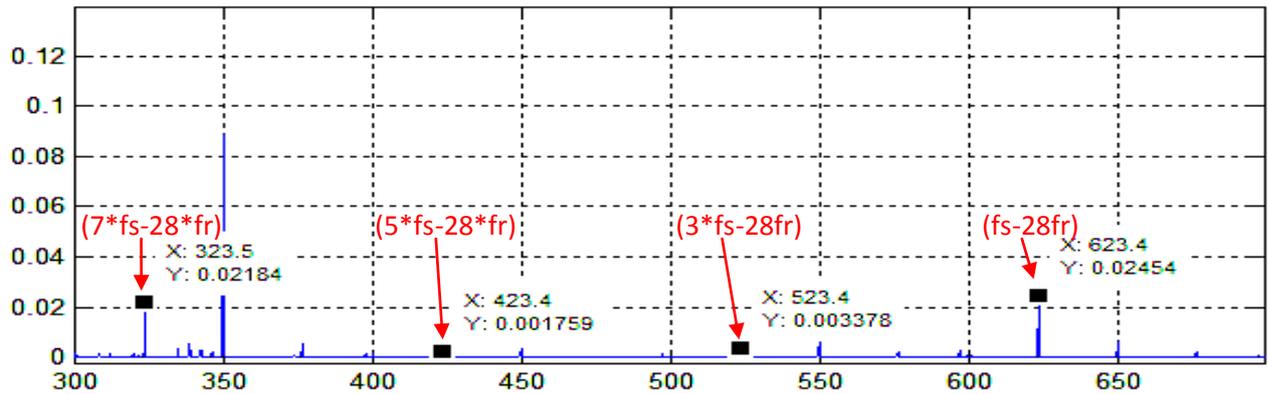


Fig.II.6. Les harmoniques de RSH

Remarque : Pour $k=1$ et $v=1$ on définit ce qui sont appelés ‘harmoniques d’encoches principales (PSH).

II.5.4. Les harmoniques des défauts des cassures de barres RBFH:

Un défaut dans le rotor va engendrer une sorte d’asymétrie qui, dans le cas d’une alimentation par un système de tensions triphasé symétrique, va être à l’origine d’un champ magnétique tournant inverse de fréquence ($-g f$) dans le circuit rotorique. Cela va engendrer des courants circulant dans le circuit statorique à une fréquence : $f_{1bc} = (1-2g) f_s$.

Cette fréquence provoque une modulation du courant, ce qui provoque des oscillations du couple donnant des fluctuations de la vitesse. Alors une autre composante apparaît aussi dans le spectre du courant statorique à une fréquence : $f_{2bc} = (1+2g) f_s$.

Cette série d’harmonique est la conséquence d’une asymétrie géométrique et magnétique créée par un défaut dans la cage rotorique. (Par exemple les cassures de barres)

$$f_{bc} = (1 \pm 2g) f_s \quad (\text{II.6})$$

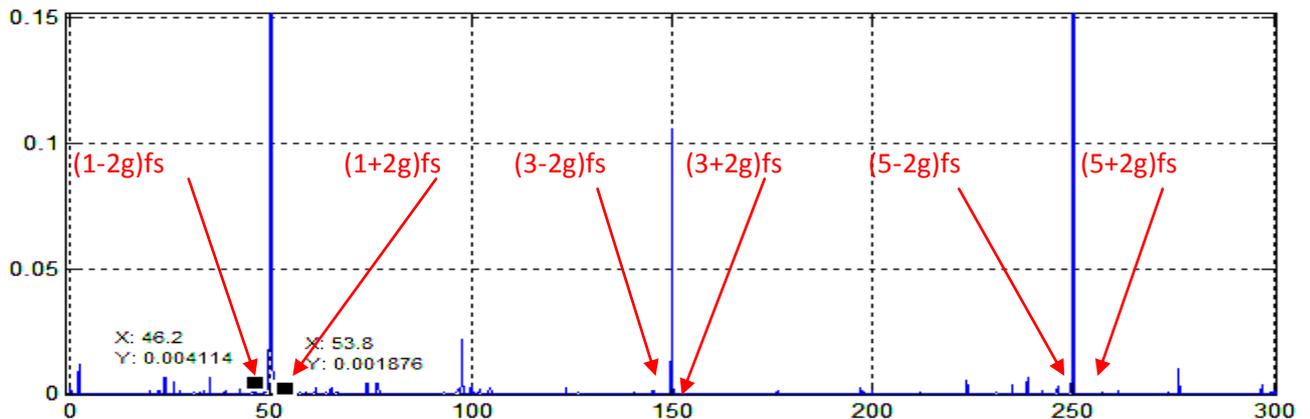


Fig. II.7 Les harmoniques RBFH

Chapitre II : le contenu spectrale de courants statorique

- f_s = Est la fréquence d'harmonique fondamentale.
- f_r = La fréquence de rotation rotorique.
- N_b : Nombre des barres rotorique.
- K : Un entier positif.
- g : C'est le glissement de la machine asynchrone.
- v : Est à l'ordre du temps harmonique.

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté les allures temporelles des courant statoriques issus des essais expérimentaux. On a remarqué qu'elles ne donnent pas beaucoup d'informations sur l'état de moteur, alors on a passé a la FFT qui nous a permet d'explorer les harmoniques qui existent dans le spectre du courant statorique. En contre partie, on a démontré que la FFT simple est incapable de suivre les amplitudes des harmoniques caractérisant le défaut par exemple d'excentricité mixte. Pour résoudre ce problème, on a proposé d'utiliser **la méthode de FFT glissante**. La définition et l'application de cette méthode sera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III: détection de défaut d'excentricité par

III.1 INTRODUCTION

Nous avons parlé dans le chapitre précédent sur les harmoniques les plus utilisées et les plus connus dans le courant statorique et on a utilisé la FFT comme une méthode d'estimation. Comme nous l'avons vu précédemment, plusieurs phénomènes entrent en jeu pendant le fonctionnement du moteur asynchrone à cage et affectent essentiellement les courants d'alimentation en modifiant leurs formes. On a démontré que la FFT simple est incapable de suivre les amplitudes des harmoniques caractérisant le défaut par exemple d'excentricité mixte. Pour résoudre ce problème, nous utiliserons la méthode de FFT glissante.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'utilisation de la méthode de Prony, mais avant cela, nous utiliserons FFT glissante qui permet d'estimer et de suivre les amplitudes et les fréquences de n'importe quel harmonique dans le signal du courant statorique. Nous verrons les inconvénients et les limites de FFTG (FFT glissante) Et nous le comparerons avec STLSP (Short Time Least Square Prony).

III.2 DEFAT D'EXCENTRICITE

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par une excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe dès 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 d'entraînement dans laquelle la charge intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de du moteur, 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. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point ultime de l'excentricité [CBN 12] Et pour détailler notre définition, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotor et le centre du stator).

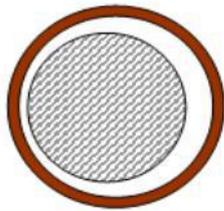
Ce phénomène est appelé excentricité (statiques et dynamique) dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrecte des paliers lors de l'assemblage, à un défaut roulement (usure), à un défaut de charge ou à un défaut de fabrication (usinage). [CBN 12]

Trois cas d'excentricité sont généralement distingués :

- l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- l'excentricité dynamique, le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.
- l'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités.

[CHE 12]

On peut représenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante :



Excentricité statique



Excentricité dynamique

(Plusieurs positions du rotor au cours de la rotation)

Fig III.1 : L'excentricité statique et dynamique d'un moteur asynchrones [ACH 14].

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

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements. [CHE 12]

III.3 ESTIMATION DES SIGNATURES SPECTRALES DE DEFAUTS D'EXCENTRICITE

On doit définir la fréquence d'échantillonnage et le temps d'acquisition. C'est deux paramètres doivent être choisis soigneusement afin d'avoir une bonne résolution fréquentielle et une large bande fréquentielle contenant le premier harmonique PSH. Pour ce travail, les paramètres d'acquisition sont définis par :

- La fréquence d'échantillonnage : $f_e = 10000 \text{ HZ}$
- Le nombre des échantillons : $N_e = 100000 \text{ échantillons}$
- Le temps d'acquisition : $T_a = N_e * T_e = \frac{N_e}{f_e} = \frac{100000}{10000} = 10\text{s}$
- La résolution fréquentielle : $\Delta f = \frac{1}{T_a} = 0.1\text{HZ}$
- $N_b = 40$ est le nombre de barres de rotor

III.3.1 Au borne de fondamentale

Nous avons défini au **chapitre II** du **tableau II.1** que les signatures pour le défaut d'excentricité sont liées à l'harmonique EFH qui est régi par la relation **(II.4)**.

Les deux signatures à côté de la fréquence fondamentale qui sont liés au défaut d'excentricité sont EFH1 et EFH2. Nous les évaluerons par la relation suivante :

$$EFH = (fs \pm fr) \tag{III-1}$$

Le tableau suivant représente les fréquences de ses deux harmoniques.

Signature	fréquence	[fonctionnement à vide... fonctionnement pleine Charge]
EFH 1	$EFH 1 = fs + fr$	[75 ... 73] Hz
EFH 2	$EFH 2 = fs - fr$	[25 27] Hz

Tab III.1 : la fréquence des harmonique EFH1 et EFH2

Lors de l'application de FFT, nous trouvons :

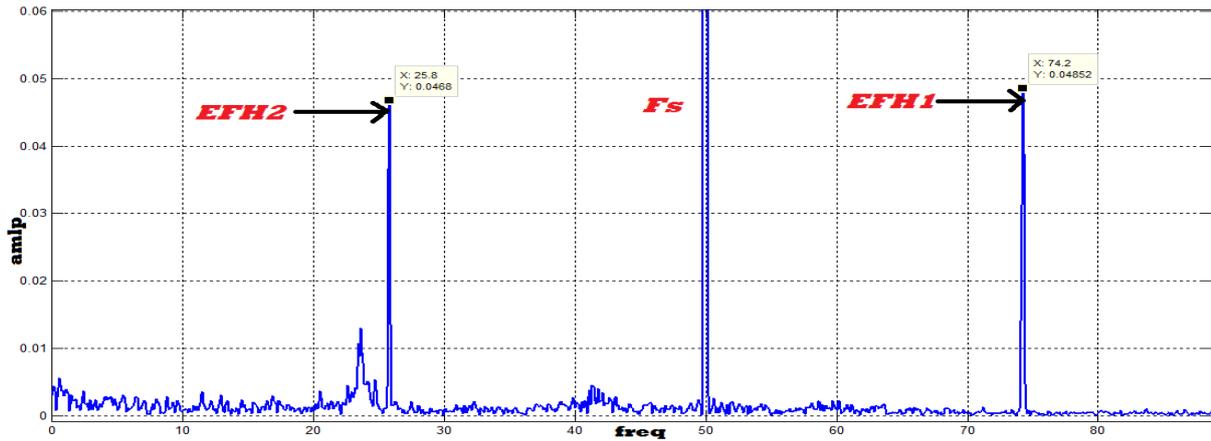


Fig.III.3 : la position des harmonique EFH1 et EFH2

III.3.2 Aux alentours des PSH

Après avoir connaître la fréquence du fondamental, on doit estimer la fréquence du premier PSH. Selon les études, deux signatures de défauts d'excentricité se trouvent des deux côtés du PSH (EFH3 et EFH4) à l'aide de l'expression suivante :

$$f_{PSH} = f_{RSH}(\gamma = 1, k = 1) \quad (III-2)$$

$$f_{PSH} = |f_s - Nb * f_r| \quad (III-3)$$

$$f_{EFH3} = f_{PSH} + f_r \quad (III-4)$$

$$f_{EFH4} = f_{PSH} - f_r \quad (III-5)$$

La position de PSH variée en fonction de la fréquence d'alimentation et le régime de fonctionnement (le glissement).

Si le nombre de barre $Nb = 40$ barres , Il est clair que le PSH se situe au voisinage du 19ième harmonique du temps ($19.f_s = 950$ Hz). On remarque bien qu'en fonctionnement à vide, le PSH devient très proche au ($19.f_s$). Si on augmente la charge, le PSH s'éloigne du $19.f_s$, Pour notre moteur et par expérience, le PSH se déplace dans l'intervalle [915 Hz.... 947Hz], qui correspond respectivement au régime pleine charge et au fonctionnement à vide. Il est évident que lorsqu'on varie la fréquence d'alimentation, la position du PSH et son intervalle de déplacement se changent complètement. [TAL18]

Afin de prendre en considération toutes ces contraintes, les limites de l'intervalle de recherche pour le PSH doivent être définies en fonction de la fréquence f_s et le glissement s . Ceci va permettre à notre algorithme, d'ajustées automatiquement les limites de l'intervalle de recherche, chaque fois qu'il y'a une variation sur la fréquence et/ou le glissement. [TAL18]

Lors de l'application de FFT, nous trouvons :

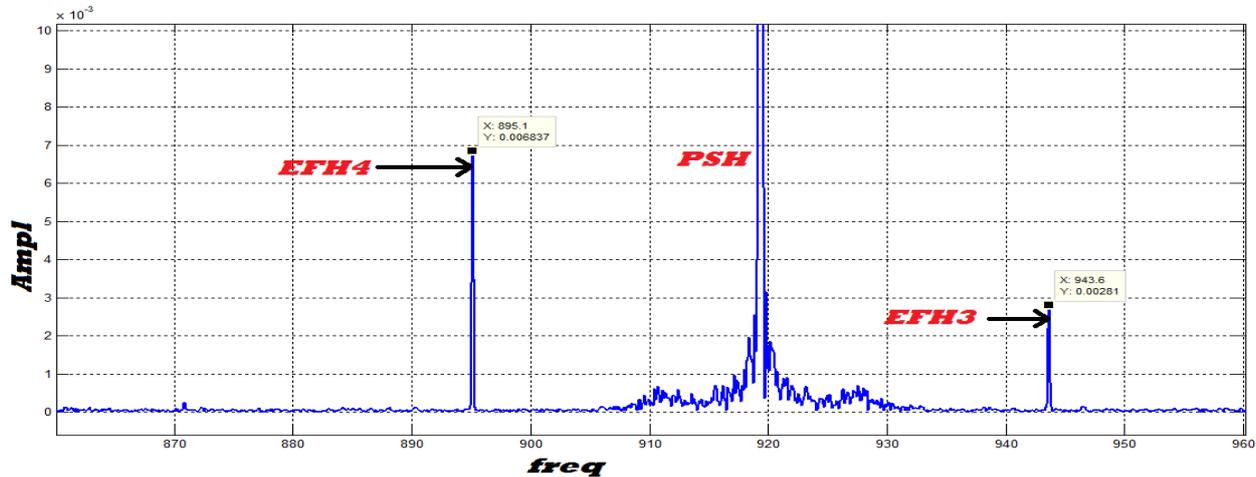


Fig.III.3 : la position des harmonique EFH3 et EFH4

III.4 Estimation de la fréquence et l'amplitude en utilisant une fenêtre glissante

Dans le chapitre précédent, nous avons constaté que l'algorithme FFT simple ne répond pas à nos besoins car il ne donne qu'une seule information sur l'amplitude de défauts d'excentricité dans les machines asynchrone, ce qui rend l'algorithme non utile. À cette partie, nous avons utilisé un nouvel algorithme pour appliquer FFT à une fenêtre coulissante, étape par étape (Fig. III 4).

Dans notre travail, nous avons utilisé une fenêtre de 10 000 échantillons. Chaque étape de la fenêtre est effectuée en appliquant l'algorithme FFT. Le choix de la taille de cette fenêtre est important car il faut trouver un compromis entre la vitesse de l'algorithme et la précision des résultats obtenus :

- ✓ À mesure que les échantillons augmentent, le temps d'acquisition augmente et l'algorithme est plus précis.
- ✓ Lorsque les échantillons diminuent, le temps d'acquisition est réduit, mais l'algorithme est moins précis.

Le principe de cette méthode est d'appliquer l'algorithme FFT sur une fenêtre de faible taille qui glisse d'un pas égal à 1 échantillon. À chaque étape, nous obtenons des informations qu'on peut estimer et suivre l'évolution d'amplitude des harmoniques caractérisant le défaut

d'excentricité tout le long du signal ce qui permet de tenir en compte les non-stationnarités.

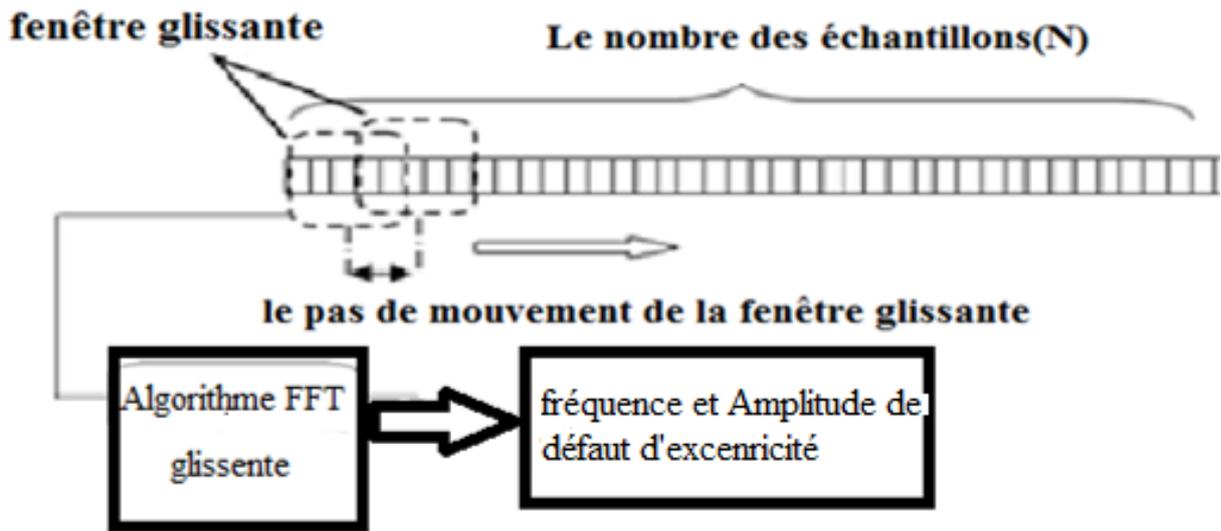


Fig. III 4. Principe de la méthode basée sur une fenêtre glissante.

III.5 Effet du nombre des échantillons sur l'estimation de la fréquence et d'amplitude

Pour souligner ce que nous avons dit sur la précision différente lorsque la taille de la fenêtre coulissante varie, nous avons fait ce test, qui consiste à appliquer l'algorithme FFT à 3 fenêtres de taille (nombre d'échantillons) différente (100 000, 20 000, 10 000).

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Le nombre des échantillons : N_e	Fréquence $f_{FH2} = f_s - f_r$ (Hz)	Amplitude	Erreur d'amplitude
100 000 (10s)	25.8 (valeur de référence)	0.0468 (valeur de référence)	0%
20 000 (2s)	26	0.05067	8%
10 000 (1s)	26	0.05763	23%

Tab III.3 : amplitude estimée pour différents nombre d'échantillon (temps d'acquisition).

Commentaire :

On remarque que plus on réduit le nombre d'échantillons (Le temps d'acquisition Δ), plus le taux d'erreur est élevé. Il trouve donc une relation inverse entre Le temps d'acquisition (T_a) et Erreur d'amplitude

Une durée d'acquisition très courte rend l'algorithme très rapide mais avec une mauvaise résolution fréquentielle. Par contre, une longue durée d'acquisition offre une bonne résolution fréquentielle mais avec un algorithme très lourd.

III.6 APPLICATIONS ET TESTS

III.6.1 sur les signaux stationnaires

Nous avons appliqué l'algorithme à fenêtre glissante sur un signal stationnaire, avec défauts d'excentricité de degré 30%_ES et 10%_ED et fréquence fixe $f_s=50$ Hz.

Estimation des Amplitudes de chaque EFH

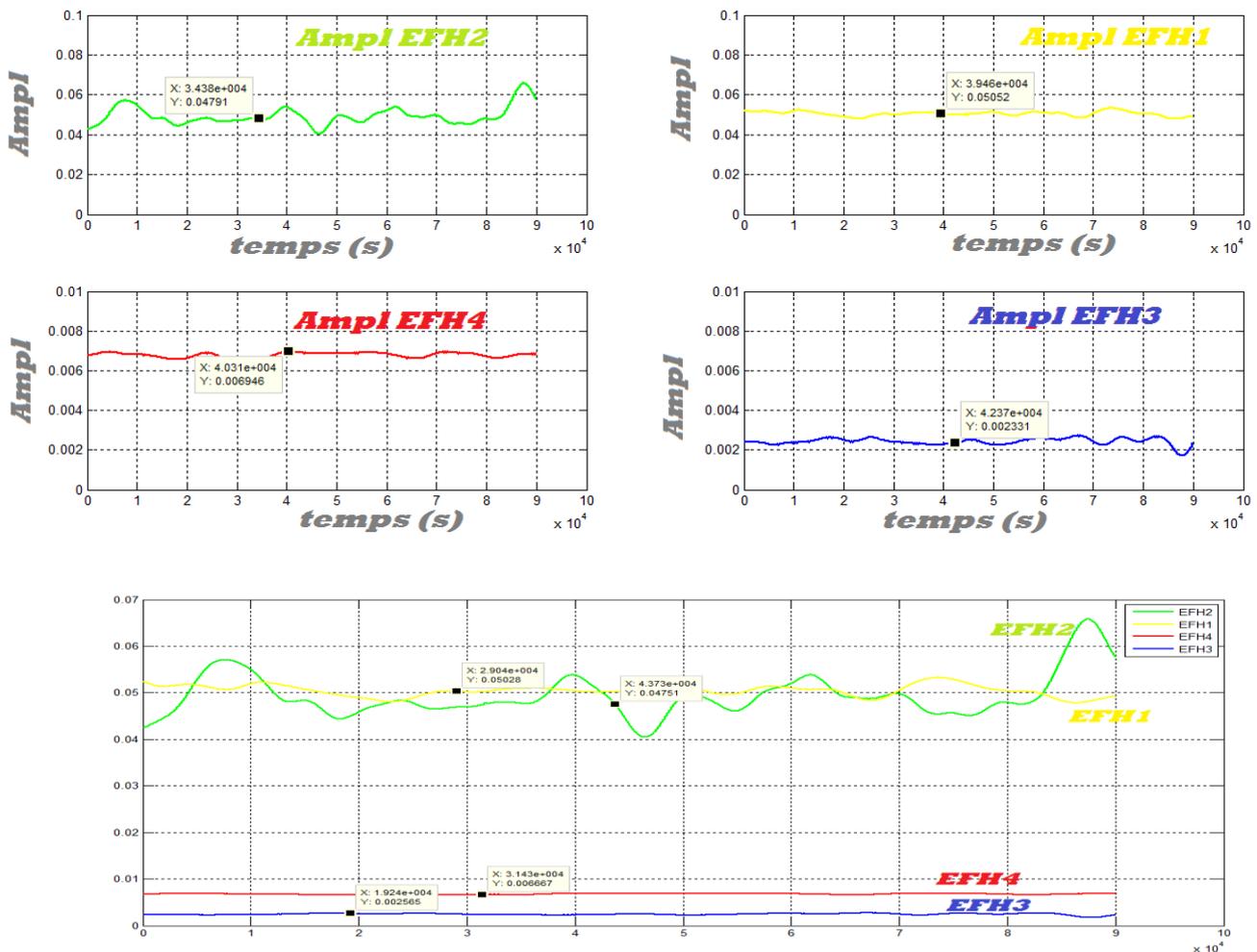


Fig.III 5 : Allure des Amplitudes estimées pour 30% ES 10% ED

Estimation des fréquences de chaque EFH

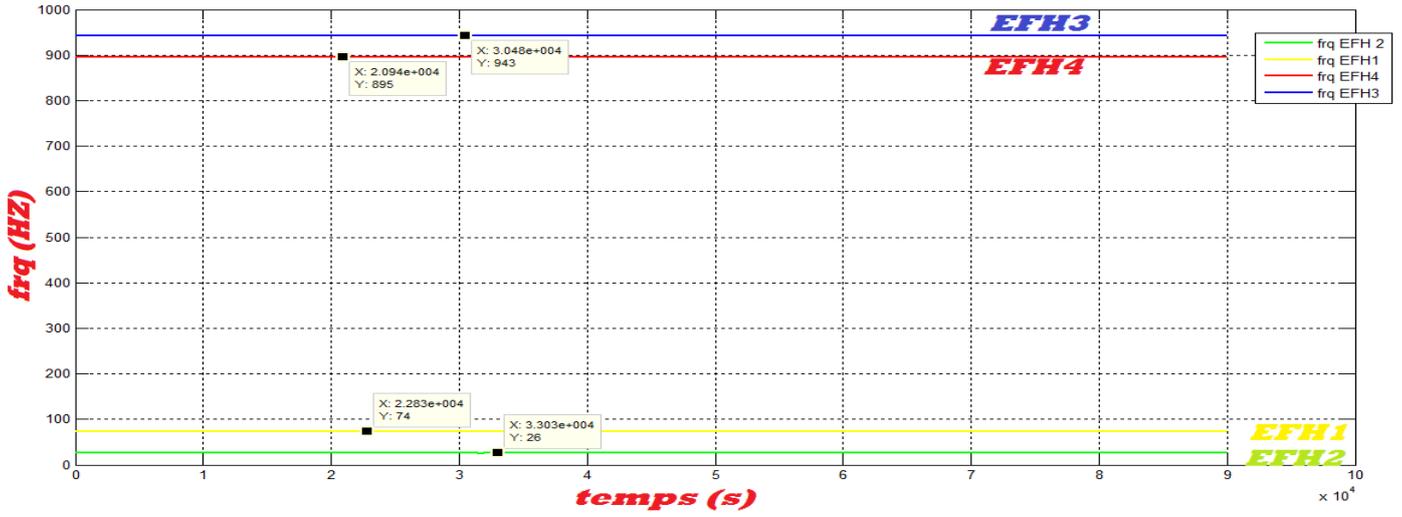


Fig.III 6 : Allure des fréquences estimées pour 30% ES 10% ED

III.6.2 sur les signaux non stationnaires

✚ Le premier signal :

Nous avons construit un signal de simulations du courant statorique (Fig. III.7). Ce signal représente le fonctionnement du moteur asynchrone sous une charge constante et pour deux degré d'excentricité.

On a assemblé le courant à l'état sain et le courant avec défaut d'excentricité 30ED_10ES

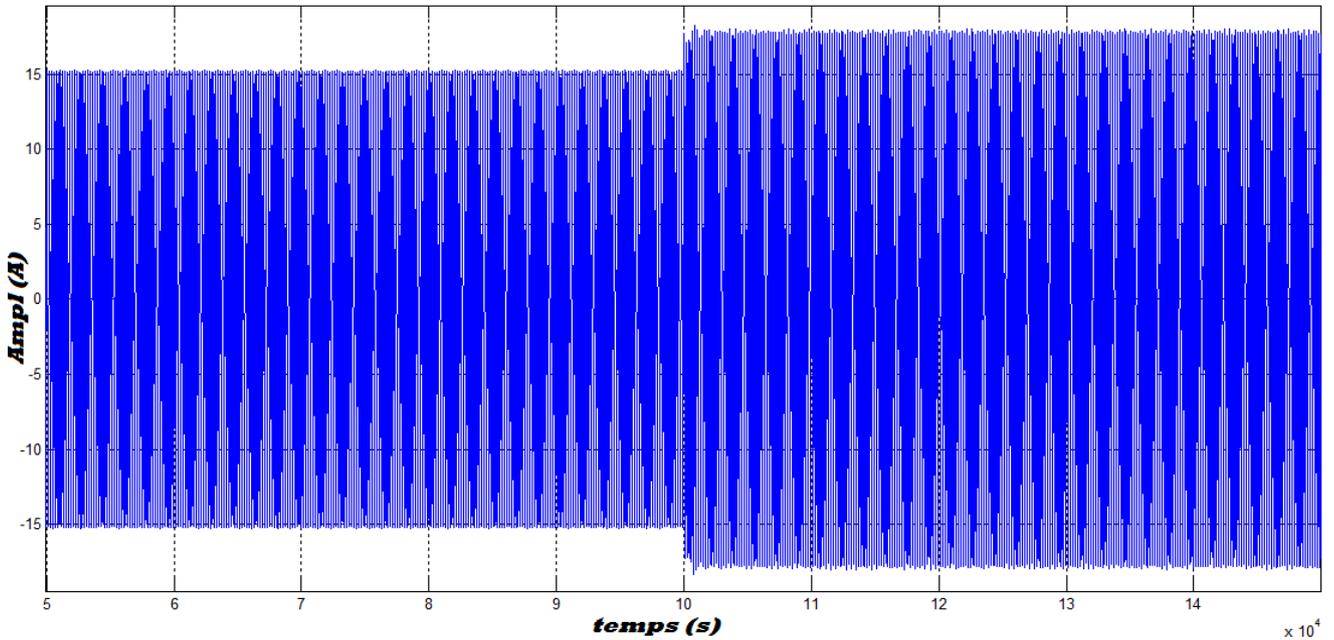


Fig III.7 : Allure temporelle de courant statorique non stationnaire

On applique l'algorithme FFT glissante sur ce signal

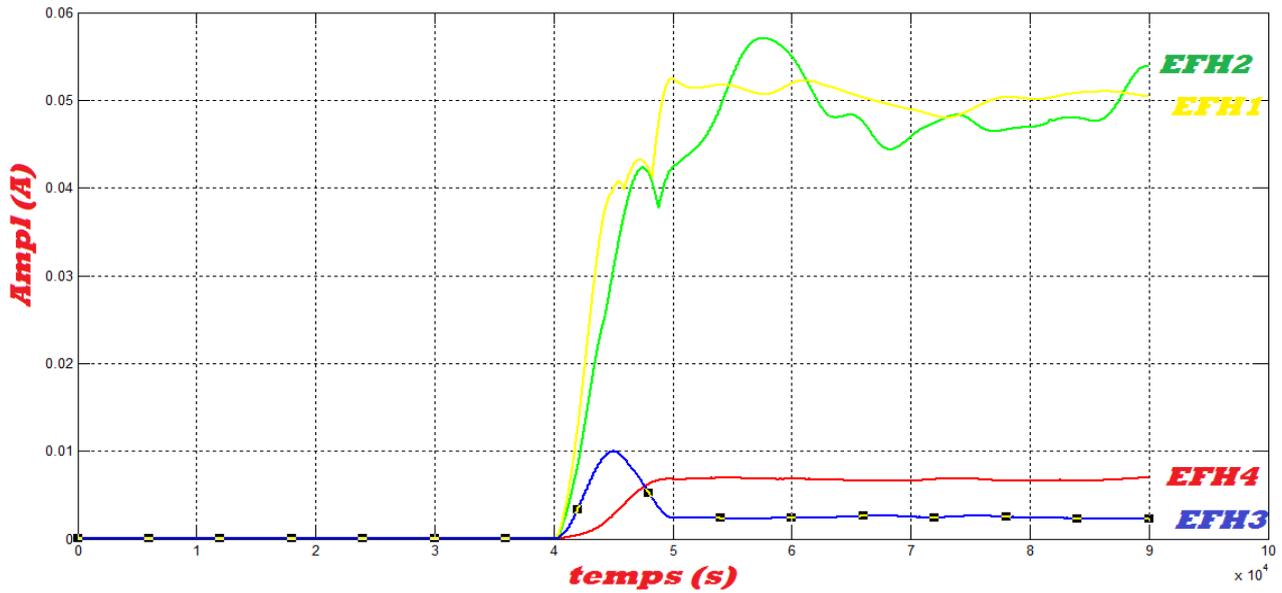


Fig.III.8 : évolution des Amplitude des EFH de l'état sain a l'état défauts de 30%ES10%ED

Le 2eme signal :

Nous assemble le courant à l'état sain et les courants avec défaut d'excentricité 20ED_10ES, 30ED_10ES, 50ED_10ES, 60ED_10ES

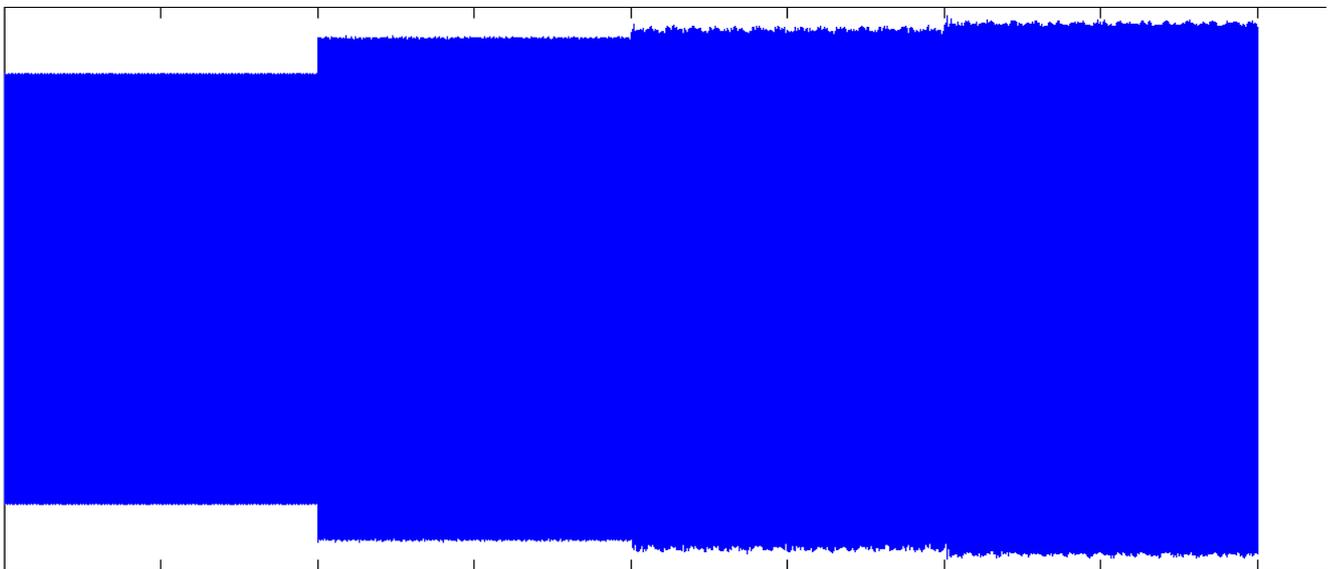


Fig III.9 : Allure temporelle de courant statorique non stationnaire assemble le courant à l'état sain et les courants avec défaut d'excentricité 20ED_10ES, 30ED_10ES, 50ED_10ES, 60ED_10ES

On applique l'algorithme FFT glissante sur ce signal

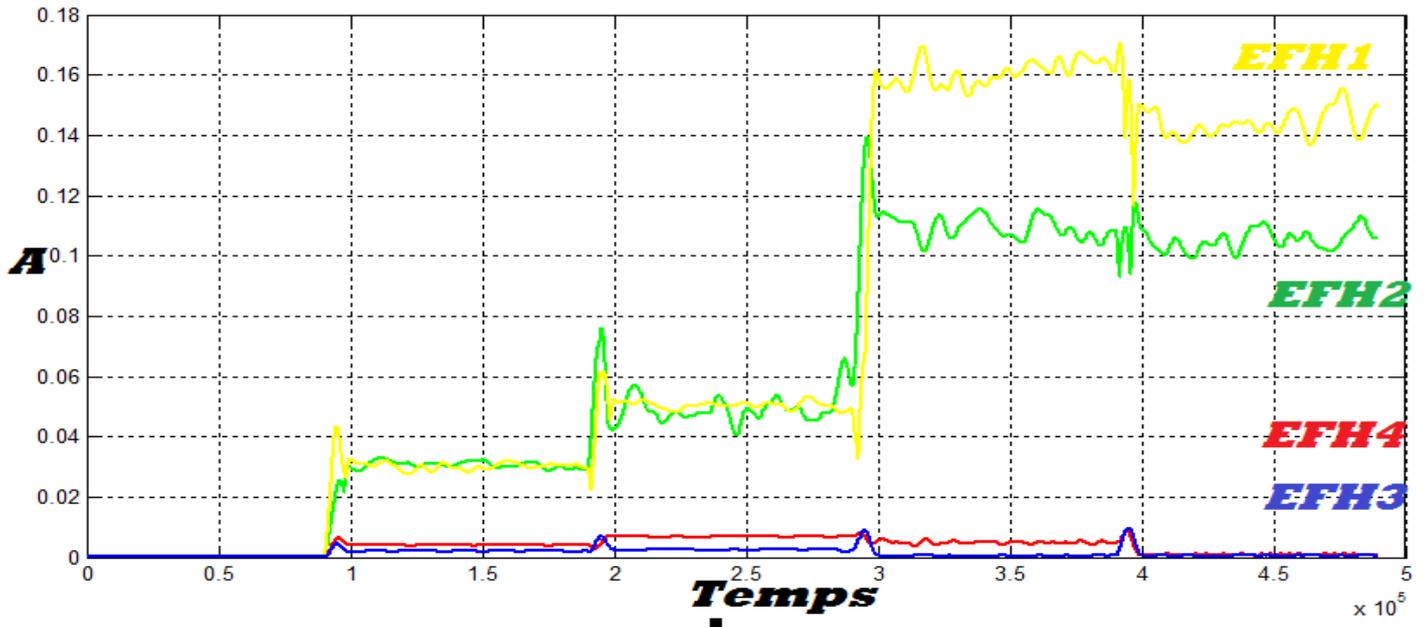


Fig.III.10 : évolution des Amplitude des EFH de l'état sain a l'état défauts de 20ED_10ES, 30ED_10ES, 50ED_10ES, 60ED_10ES

III.6.3 Notes générales

- Les figures (III.5 III.6) montrent que la méthode FFT glissante est capable de suivre l'évolution des amplitudes et les fréquences des différentes signatures, mais les résultats ne sont pas exacts
- Les figures (III.8 III.10) montrent l'évolution des amplitudes estimées par la méthode de FFT glissante. On remarque que l'augmentation de la sévérité du défaut amplifie les amplitudes des signatures de défaut d'excentricité.

III.7 les inconvénients et les limites de FFTG (FFT glissante)

Après avoir utilisé et testé la méthode FFTG sur les signaux de courant pour estimer et suivre les défauts d'excentricité dans les machines asynchrone, nous avons observé qu'il y avait des inconvénients et des limites dans cette méthode :

- Nous avons montré que la méthode FFTG nécessite une grande fenêtre (au moins 10000 échantillons).
- Plus la fenêtre est petite (nombre d'échantillons), plus l'erreur est grande.

- D'après notre expérience, nous avons utilisé 10 000 échantillons et constaté une erreur de 23 %.

Dans cette partie, nous allons proposer l'utilisation de **STLSP** (Short Time Least Square Prony) comme une nouvelle méthode pour l'estimation et le suivi des harmonique **EFH1**, **EFH2**, **EFH3** et **EFH4**. Elle est basée sur la méthode de **Prony** qui est une technique paramétriques de haute résolution pour le traitement des signaux qui permet d'identifier les caractéristiques des harmoniques de n'importe qu'elle signale en utilisant un petit nombre des échantillons. L'efficacité de la méthode proposé sera étudiée par simulation et expérimentalement.

III.8 LA METHODE DE PRONY

La méthode de Prony est une technique paramétrique de traitement de signal qui a été développé par **Gaspard de Prony** en 1795. Cependant, elle a connu un essor important seulement depuis 20 ans à cause de développement énorme des moyens de calcul. Elle fait donc l'objet de nombreuses publications présentant différentes variantes modernes de son algorithme primitif. La méthode de Prony originale permet d'extraire le comportement sinusoïdal ou exponentiel d'un signal échantillonné en résolvant un ensemble d'équations linéaires issues d'un modèle mathématique du signal étudié. Donc, la méthode de Prony modélise la forme d'onde d'un signal échantillonné par une somme linéaire d'exponentielles complexes conjuguées.



Par exemple, supposons un signal $x[n]$ de N échantillons, la méthode de Prony classique rapproche l'ensemble des échantillons à une combinaison linéaire des fonctions exponentielles complexes. Cette combinaison représente l'expression du signal estimé $\hat{x}[n]$ [SAH 14] :

$$\text{Telque} \quad \hat{x}[n] = \sum_{k=1}^p h_k \cdot z_k^{n-1} \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Avec :} \quad h_k = A_k \cdot e^{j \cdot \varphi_k}$$

$$z_k = e^{(\alpha_k + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_k) T_s}$$

Où P est l'ordre du modèle et T_s est la période d'échantillonnage.

Les paramètres du modèle : A_k , f_k , φ_k et α_k sont les inconnus à estimer. Ils représentent respectivement : l'amplitude, la fréquence, l'angle de phase et le coefficient d'amortissement caractérisant le $K^{\text{ième}}$ harmonique.

L'équation III.1 est un problème non linéaire très difficile à résoudre. En utilisant l'analyse de Prony, ce problème non linéaire se transforme à la solution d'un système d'équations linéaires. Dans cette direction, on doit construire un ensemble des équations de différence linéaires homogènes avec des coefficients α_k constants (où : $a_0 = 1$) :

$$\sum_{k=0}^P \alpha_k x[n - k] = 0 \quad (\text{III.2})$$

L'équation de différence linéaire (III.4) peut être exprimée sous la forme matricielle suivante:

$$X.A = -Y \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Avec : } X = \begin{bmatrix} x[p] & \dots & x[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[2p-1] & \dots & x[p] \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_p \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x[p+1] \\ \vdots \\ x[2p] \end{bmatrix}$$

Les paramètres a_k sont déterminés en résolvant l'équation (III.3). Ensuite, un polynôme caractéristique avec des racines z_k peut être formé en utilisant les paramètres a_k comme suit :

$$F(z) = \sum_{k=0}^p \alpha_k \cdot z^{p-k} \quad (\text{III.4})$$

Par conséquent, le coefficient d'amortissement et la fréquence peuvent être déduits directement à partir des racines z_k de polynôme (III.4) :

$$\alpha_k = \frac{\ln|z_k|}{T_s} \quad \text{And } f_k = \frac{1}{2\pi T_s} \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(z_k)}{\text{Re}(z_k)} \right]$$

Enfin, les racines z_k sont utilisées pour écrire les P équations de (III.1) sous une forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{p-1} & z_2^{p-1} & \dots & z_p^{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(1) \\ \vdots \\ x(p) \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Les paramètres complexes h_k peuvent être déterminés en résolvant l'équation (III.5) et par conséquent, l'amplitude (A_k) et l'angle de phase (φ_k) peuvent être obtenus en utilisant les relations suivantes:

$$A_k = |h_k| \text{ et } \varphi_k = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(h_k)}{\text{Re}(h_k)} \right]$$

III.8.1 La Méthode de prony Modifier

Il est important de noter que les performances de la méthode de Prony classique deviennent instables en présence de bruit. Cela est dû au fait qu'il n'y a aucune erreur considérée dans le modèle primitif. Cependant le signal réel est toujours noyé dans le bruit et pour prendre en considération cette situation, l'équation (III.1) devrait être modifiée comme suit [SAH 15] :

$$x[n] = \hat{x}[n] + \varepsilon[n] = \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1} + \varepsilon[n] \quad (\text{III. 6})$$

Où $\varepsilon[n]$ représente l'erreur d'approximation entre le signal réel $x[n]$ et son approximation linéaire $\hat{x}[n]$. Le problème d'estimation de paramètre est basé donc sur la minimisation de l'erreur quadratique sur les N échantillons disponibles :

$$E = \sum_{n=1}^N |\varepsilon[n]|^2 = \sum_{n=1}^N \left| x[n] - \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1} \right|^2 \quad (\text{III. 7})$$

Dans la pratique, le nombre des échantillons disponibles est supérieur au nombre des paramètres inconnus ($N > 2P$). Dans ce cas, l'équation aux différences linéaire (III.2) doit être modifiée comme suit :

$$\sum_{k=0}^p a_k x[n-k] = \varepsilon[n] \quad (\text{III. 8})$$

Les N échantillons disponibles seront utilisés pour réécrire (III.8) sous une forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} x[p] & \cdots & x[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[N-1] & \cdots & x[N-p] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x(p+1) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

Le vecteur des paramètres inconnus a_k est choisi pour minimiser l'erreur quadratique totale de prédiction linéaire. La minimisation peut être effectuée en utilisant la méthode des moindres carrés. En outre, l'estimation des paramètres complexes h_k est effectuée aussi par la méthode des moindres carrés. Dans ce cas, l'ensemble des équations linéaires (III.5) devrait être modifié sous la forme compacte suivante [SAH15, SAH 16]

$$Z.H=C \tag{III.10}$$

Avec : $Z = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \dots & \mathbf{1} \\ z_1 & \dots & z_p \\ \vdots & \dots & \vdots \\ z_1^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_p \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} x(1) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix}$

Par conséquent, la méthode de prony modifiée comporte les trois étapes suivantes :

Etape 1:

La détermination des paramètres de prédiction linéaire a_k . Cette étape est réalisée par la résolution de l'équation (III.9).

Etape 2:

Trouver les racines z_k du polynôme caractéristique à partir de l'équation (III.4). Les racines z_k permettent la détermination de paramètres a_k et f_k .

Etape 3:

Résoudre l'équation (III.10) par la méthode des moindres carrés ce qui permet la détermination des A_k et φ_k .

Il est très important de noter que l'efficacité et la précision de la méthode de Prony dépendent de plusieurs facteurs. En fait, le nombre d'harmoniques à estimer, le niveau de bruit, la fréquence d'échantillonnage, l'ordre du modèle, le nombre d'échantillons utilisés et la nature du signal (stationnaire ou non) tous affectent la qualité et la précision des résultats. Pour réduire l'impact des ces facteurs, une étape de prétraitement du signal acquis est extrêmement nécessaire. Les principales tâches de cette étape sont :

- l'acquisition des échantillons où, on définit la fréquence d'échantillonnage et la taille de la fenêtre glissante. Parfois, on doit modifier la fréquence d'échantillonnage (*Downsampling*) surtout lorsqu'il s'agit des harmoniques de faibles fréquences ;
- le filtrage qui est une tâche très importante et affecte directement la qualité des résultats. Il a deux objectifs principaux : l'atténuation du bruit et la suppression des composantes spectrales indésirables.

III.9 TEST DE LA METHODE DE PRONY

Nous utiliser l'algorithme de **prony** avec plusieurs signaux et comparer avec la technique de **FFT**



Fig. III.1 : schéma général représentant les étapes de la méthode de Prony

III.9.1 Signal généré mono-harmonique

Ce signal est défini comme suit :

$$x(t) = 10 \times \sin (2\pi \times 50 \times t) \quad fs=50\text{HZ}$$

Avec : La fréquence d'échantillonnage : $fe = 10000 \text{ Hz}$

Le nombre des échantillons : $Ne= 5 \text{ échantillons}$

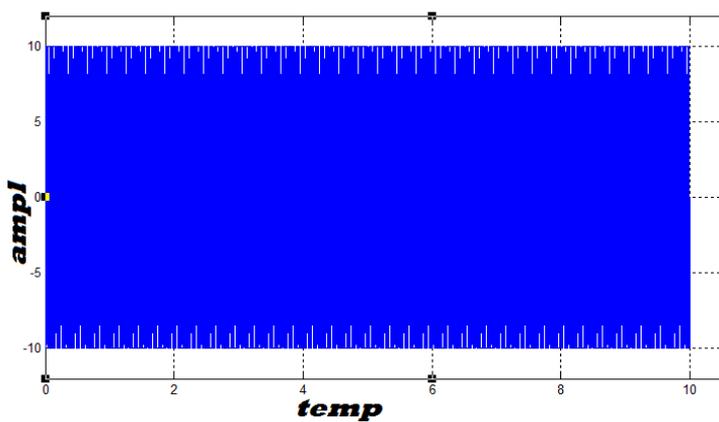


Fig. III.2 : l'allure temporelle de Signal

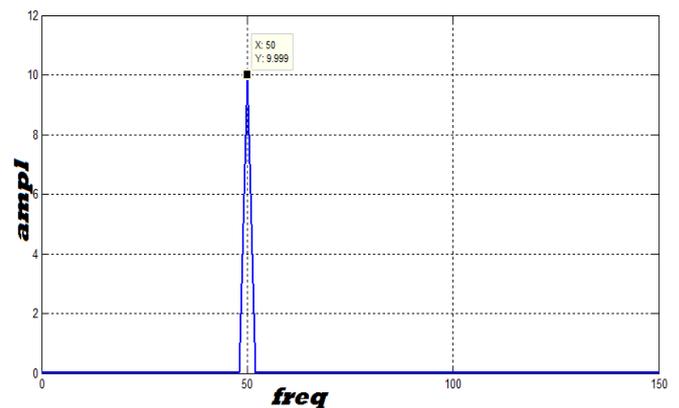


Fig. III.3 : Spectre du signal génères

($fs = 50 \text{ Hz}$)

généré mono composante.

		Valeur réelle	Valeur estimée	Erreur	Le nombre des échantillons
La méthode de PRONY	Fréquence	50	50	0	5
	Amplitude	10	10	0	
La méthode de FFT	Fréquence	50	50	0	10000
	Amplitude	10	10	0	

Tableau III.1 :L'amplitude et fréquence de signal x(t) estimées par les méthodes de prony et FFT.

III.9.2 Signal généré multi-harmonique

Ce signal est défini comme suit :

$$X'(t) = 10 \times \sin(2\pi \times 50 \times t) + 2 \times \sin(1\pi \times 55 \times t) + 1 \times \sin(2\pi \times 45 \times t)$$

fs1=50HZ, fs2=55HZ, fs3=45HZ

Avec : La fréquence d'échantillonnage : $f_e = 10000 \text{ Hz}$

Le nombre des échantillons : Ne= 5 échantillons

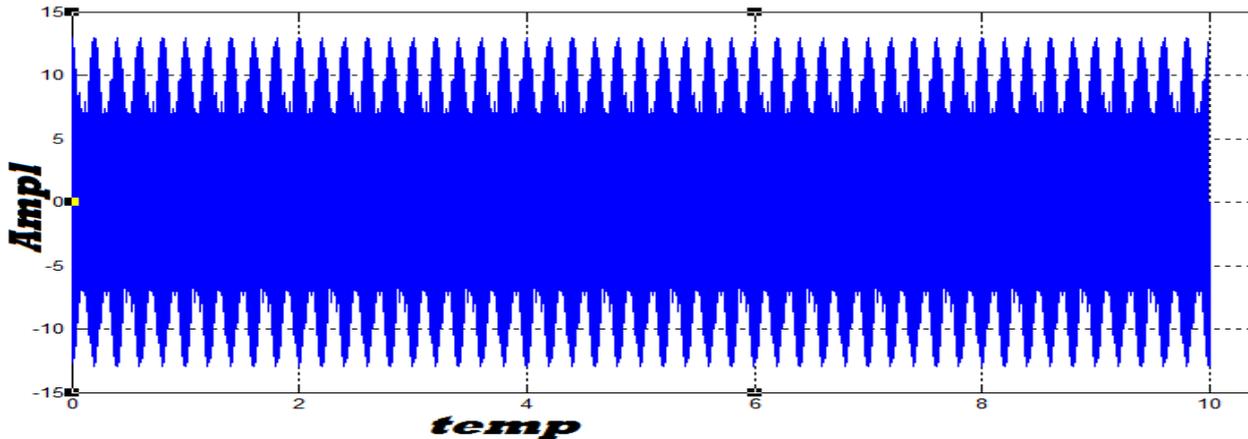


Fig. III.4 : l'allure temporelle de Signal généré trio composante.

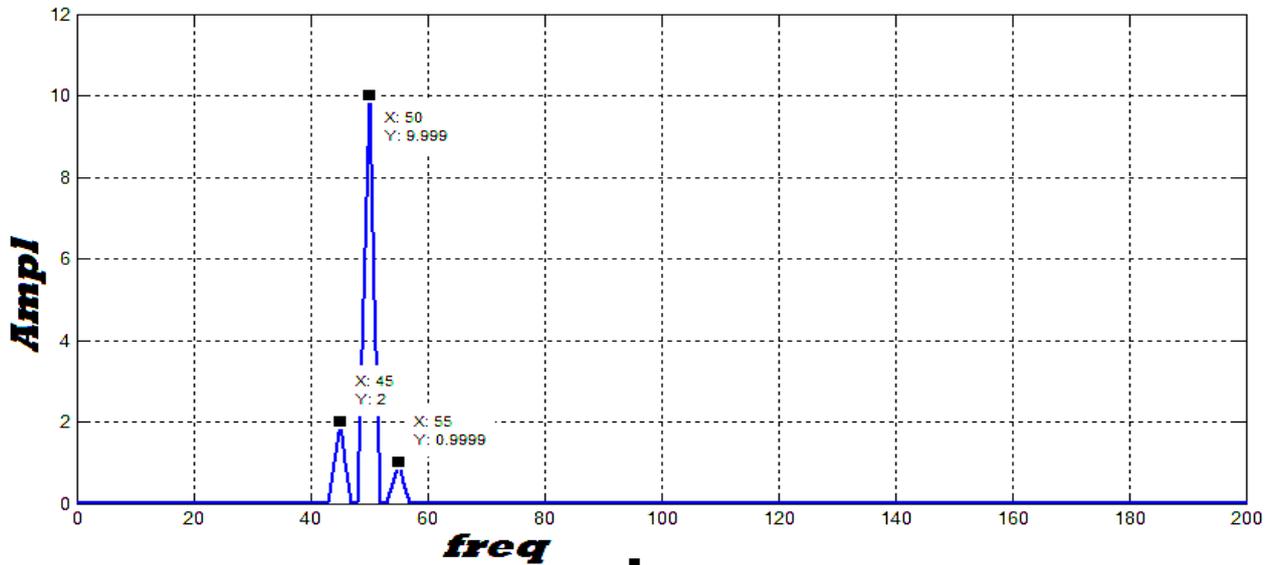


Fig. III.5 : Spectre du signal génères trio harmonique (fs1=50 HZ, fs2=55 HZ, fs3=45 HZ)

		Valeur réelle			Valeur estimée			Erreur	Le nombre des échantillons
La méthode de PRONY	Fréquence	45	50	55	45	50	55	0	5
	Amplitude	2	10	1	2	10	1	0	
La méthode de FFT	Fréquence	45	50	55	45	50	55	0	10000
	Amplitude	2	10	1	2	10	1	0	

Tableau III.1 :L'amplitude et fréquence de signal $x'(t)$ estimées par les méthodes de prony et FFT.

Commentaire

- Le tableau III.1et III.2 montre les résultats obtenus par l'application de la méthode de Prony et celle de la FFT.
- Nous avons remarqué que les deux méthodes donnent les mêmes résultats dans des signaux simples.
- La méthode FFT nécessite au moins 10 000 échantillons pour produire des résultats identiques à ceux obtenus par Prony qui ne nécessitent que 5 échantillons.

Bien que la méthode prony utilise un petit nombre d'échantillons, L'application de l'algorithme de Prony, donne une seule information sur l'amplitude et la fréquence des harmoniques quel que soit le nombre des échantillons.

Pour résoudre ce problème et pour suivre l'évolution des amplitudes et les fréquences des différentes signatures, nous avons proposé l'application de l'algorithme de la méthode STLSP

III.10 La méthode STLSP (*Short Time Least Square Prony's Method*)

Le principe de la méthode SLTSP est similaire à la méthode FFTG. Le principe de STLSP est d'appliquer l'algorithme prony à une fenêtre glissant en une étape. Chaque étape, nous obtenons des informations qu'on peut estimer et suivre l'évolution d'amplitude des harmoniques caractérisant le défaut d'excentricité tout le long du signal.

De plus, le pas de déplacement de la fenêtre a une grande influence sur la résolution temporelle. En fait, un pas très petit, permet de suivre les variations brusques qui peuvent se manifester lors de l'acquisition du signal.

Dans cette méthode, nous utilisons une fenêtre de très petite taille (quelques échantillons) parce que l'algorithme prony nécessite quelques échantillons. Le choix de la taille de la fenêtre est une tâche critique. En effet, l'augmentation de la taille de la fenêtre améliore la précision des résultats d'une part mais d'une autre part, elle augmente le temps de calcul. On doit donc trouver un compromis entre la rapidité et la précision.

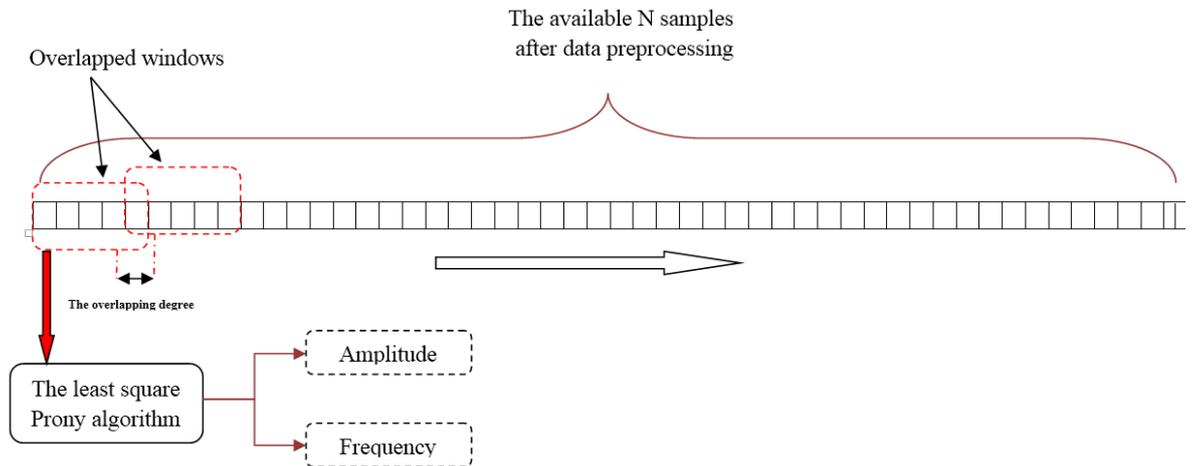


Fig. III.6 : Méthode de prony à fenêtre glissante

III.10.1 Choix de l'ordre du modèle de Prony

La méthode de Prony présente malheureusement un algorithme de calcul très lourd, car elle nécessite l'inversion des matrices de grande taille et traite de polynômes d'ordre élevé. Ces complexités dépendent fortement de l'ordre du modèle (P) et du nombre d'échantillons de traités (N). La choix correcte de P peut être considéré comme une tâche critique ; en fait, un ordre de modèle plus petit que le nombre d'harmoniques recherchées entraîne de grandes erreurs sur l'estimation des harmoniques. Cependant, l'augmentation de l'ordre du modèle peut améliorer la précision de l'estimation, mais elle entraîne un long temps de calcul et produit de nombreuses faux harmoniques. Certaines approches ont été proposées dans [SAH 15] pour choisir P mais, elles ne peuvent pas fonctionner dans toutes les situations en raison de leurs complexités.

Les efforts effectués pour sélectionner correctement l'ordre du modèle peut être réduit considérablement si on connaît préalablement le nombre d'harmoniques à estimer. Heureusement, dans notre application, il n'y a qu'un seul harmonique aux basses fréquences (f_m) et un autre aux hautes fréquences (f_{sw}) pour le signal de tension et la même chose pour le signal de courant du condensateur électrolytique.

Pour définir l'ordre du modèle (P), on a proposé le critère suivant : P doit être aussi petit que possible mais supérieur au double du nombre d'harmoniques à estimer (n_h). Donc, l'ordre du modèle est défini comme suit [SAH 16, YAH 16 et LAA 18] :

$$P = n_h + 1 \quad (\text{III.11})$$

Par conséquent, on a trouvé que $P = 3$ est largement suffisant pour obtenir de bons résultats.

III.10.2 Testes de la méthode STLSP

a) avec un signal mono-harmonique stationnaire

À cette partie, nous allons expérimenter le l'algorithme STLSP sur le signal mono harmonique $x(t) = 10 \times \sin(2\pi \times 50 \times t)$ avec :

- choisi une fenêtre de 7 échantillons qui déplace d'un pas égal à 1 échantillon.
- L'ordre du modèle est choisi $P=3$.

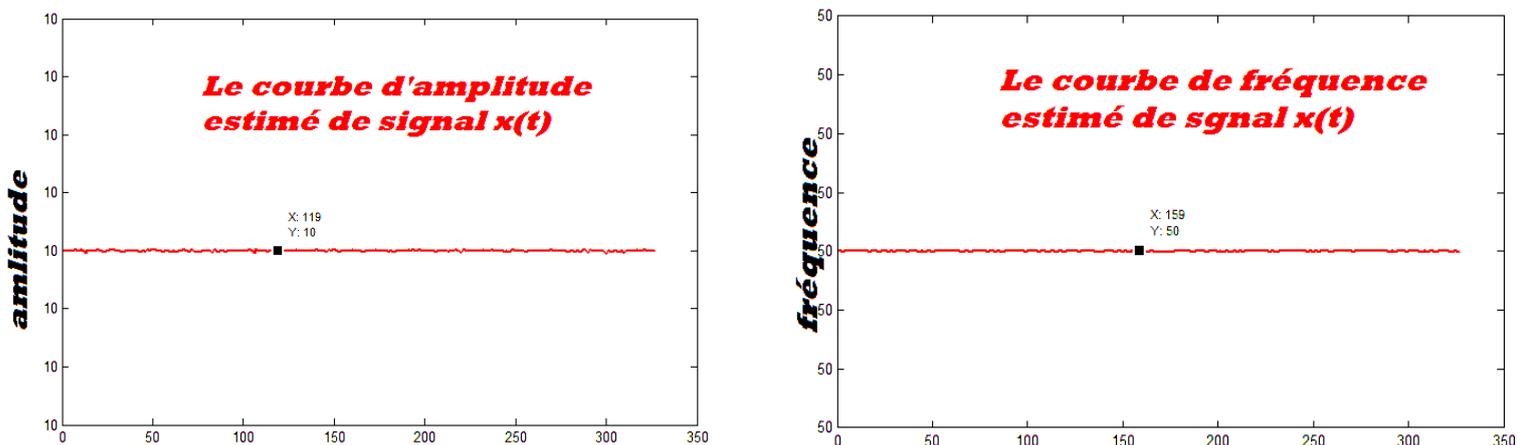


Fig. III.7 : Fréquence et l'amplitude estimées par la méthode STLSP d'un signal mono-harmonique stationnaire.

Commentaire :

Dans la figure III.7, nous notons que la méthode STLSP donne des résultats précis pour l'amplitude et la fréquence de l'harmonique recherché. De plus, elle permet de suivre l'évolution de la fréquence et l'amplitude avec une fenêtre glissante de seulement 7 échantillons.

b) avec un signal mono-harmonique non stationnaire

Ce signal est défini comme suit :

$$X1(t) = A \times \sin(2\pi \times f \times t)$$

Avec :

- pour $t = 0 \rightarrow 0.5$
 $A=10, f=60\text{HZ}$
- pour $t = 0.5 \rightarrow 1$
 $A=5, f=50\text{HZ}$

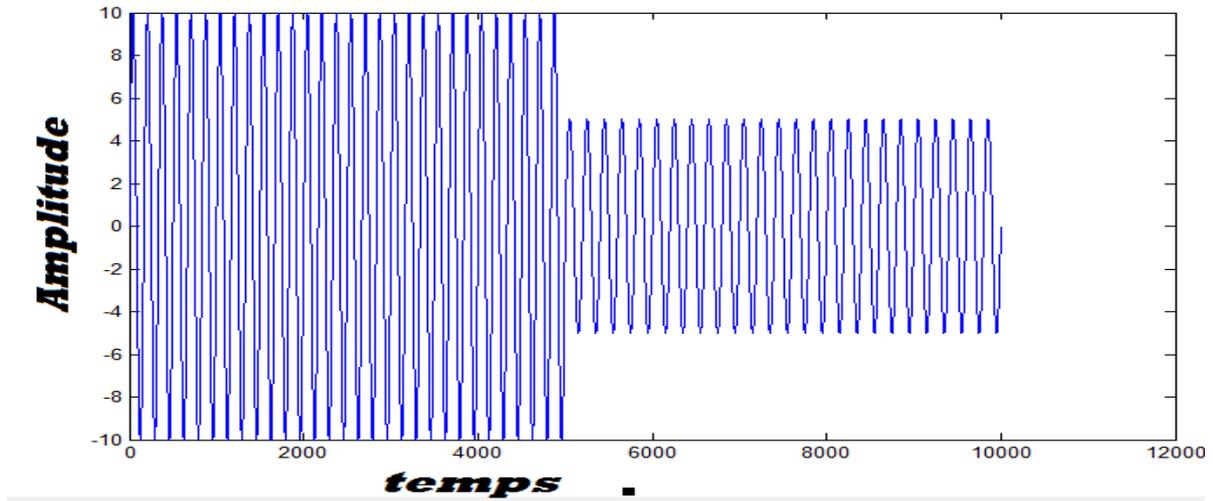


Fig. III.8 : L'allure temporelle du signal mono-harmonique non-stationnaire.

Nous allons tester l'efficacité de la méthode STLSP face aux signaux non stationnaires (X1).

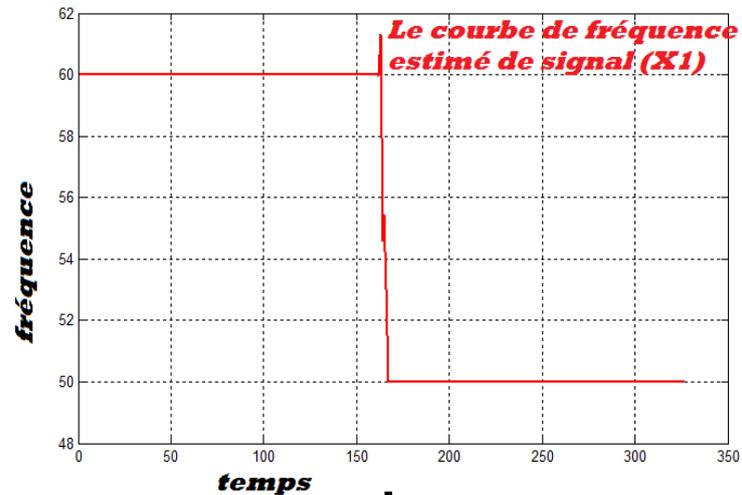
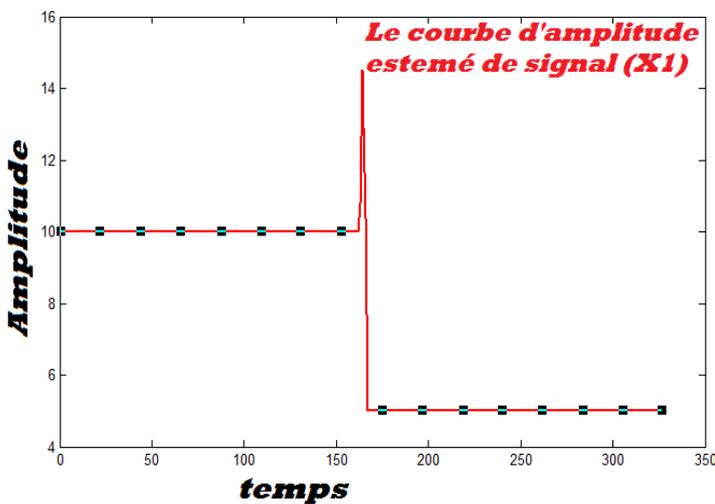


Fig. III.9 : Fréquence et l'amplitude estimées par la méthode STLSP d'un signal mono-harmonique non-stationnaire.

Commentaire :

Le résultat obtenu dans la FIG.III.9 confirme que la STLSP a l'aptitude d'estimer et de suivre les fréquences et les amplitudes des harmoniques même pour les signaux non stationnaires. Cela s'explique par l'estimation et le suivi de la fréquence et de l'amplitude de l'harmonique cible.

c) avec un signal multi-harmonique stationnaire

À cette partie, nous allons expérimenter le l'algorithme STLSP sur le signal multi harmonique $X'(t) = 10 \times \sin(2\pi \times 50 \times t) + 2 \times \sin(1\pi \times 55 \times t) + 1 \times \sin(2\pi \times 45 \times t)$

Avec :

- choisi une fenêtre de 30 échantillons qui déplace d'un pas égal à 1 échantillon.
- L'ordre du modèle est choisi $P = n_h + 1 = 7$, $n_h = 2 \times 3$.

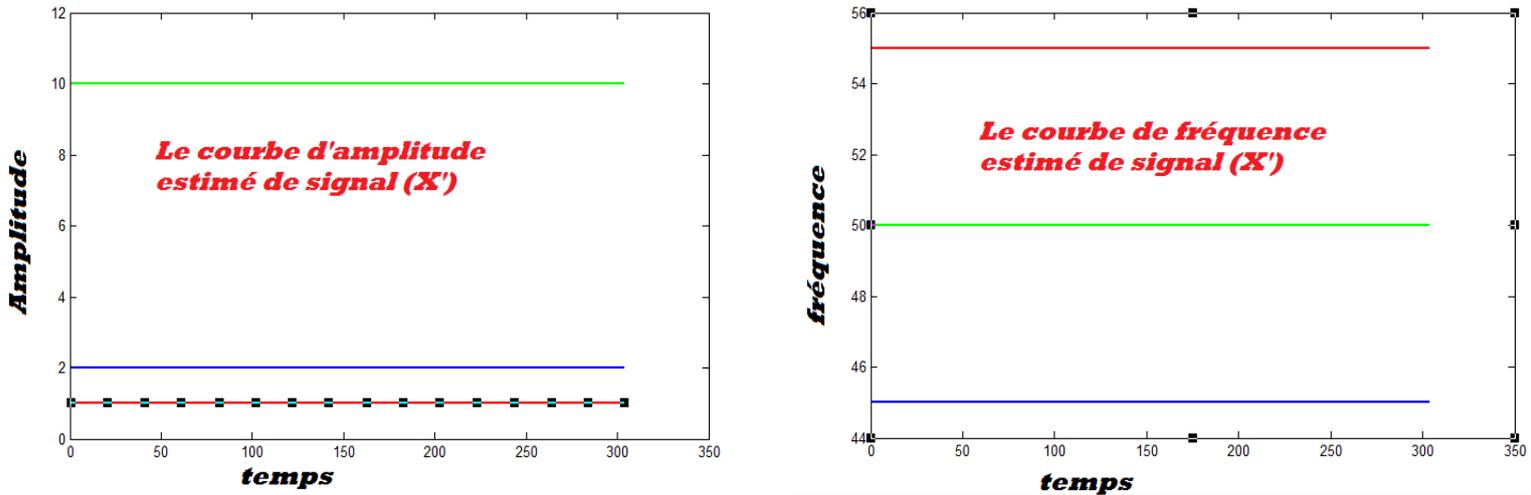


Fig. III.10 : Fréquence et l'amplitude estimées par la méthode STLSP d'un signal multi-harmonique stationnaire.

Commentaire :

D'après les résultats présentés sur la Fig. III.10 nous notons que la méthode STLSP donne des résultats précis pour l'amplitude et la fréquence des trois harmoniques, Ce qui confirme que la méthode STLSP ne trouve aucun problème pour estimer l'amplitude et la fréquence des trois harmoniques au même temps.

d)avec un signal multi-harmonique non stationnaire

Ce signal est défini comme suit :

$$X'1(t) = A1 \times \sin(2\pi \times f1 \times t) + A2 \times \sin(1\pi \times f2 \times t) + A3 \times \sin(2\pi \times f3 \times t)$$

Avec :

- pour $t = 0 \rightarrow 0.5$

$$A1=10, A2=2, A3=1, f1=50\text{HZ}, f2=55\text{HZ}, f3=45\text{HZ}$$

- pour $t = 0.5 \rightarrow 1$

$A1=5, A2=1, A3=0.5, f1=60\text{HZ}, f2=65\text{HZ}, f3=55\text{HZ}$

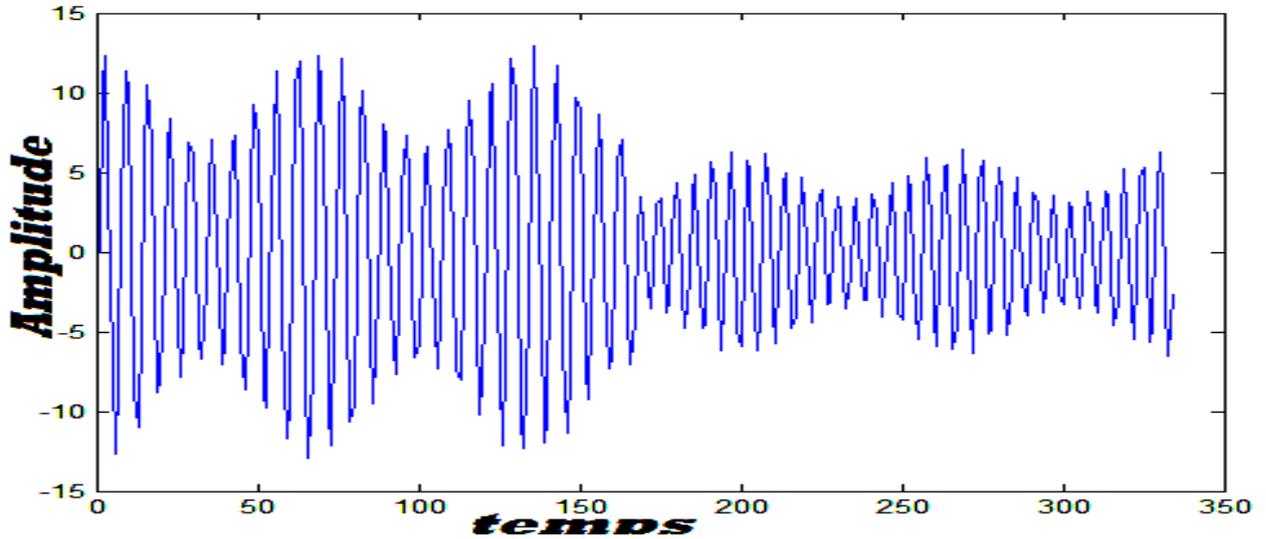


Fig. III.11 : L'allure temporelle du signal multi-harmonique non-stationnaire.

Nous allons tester l'efficacité de la méthode STLSP face aux signaux non stationnaires (X'1).

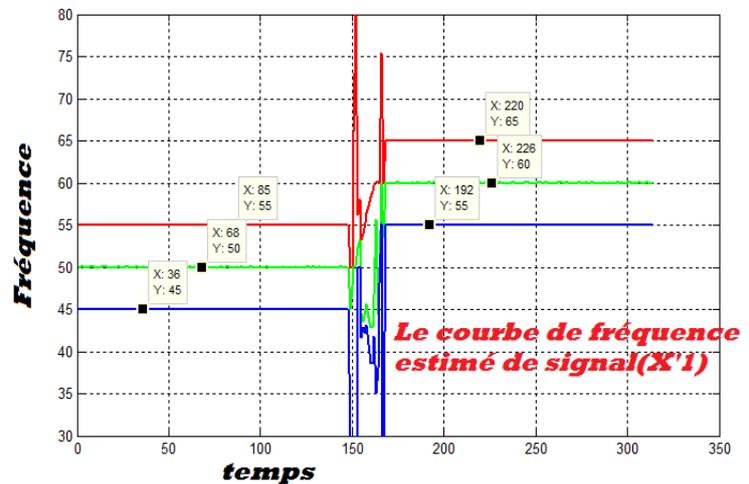
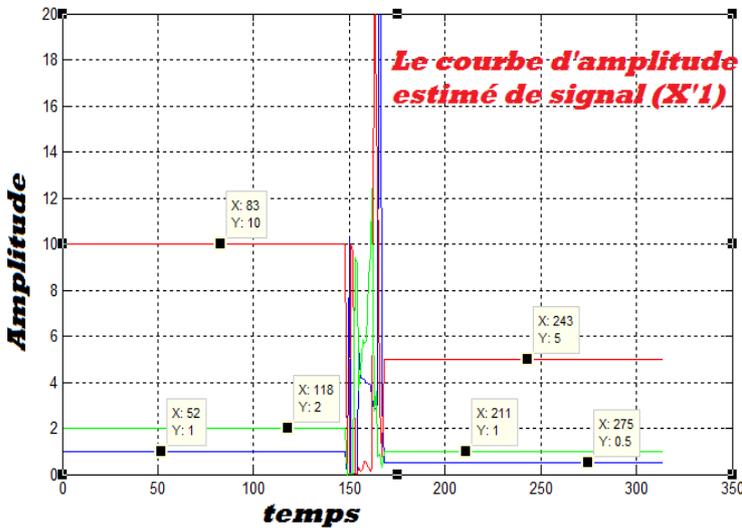


Fig. III.12 : Fréquence et l'amplitude estimées par la méthode STLSP d'un signal multi-harmonique non-stationnaire.

Commentaire :

Les résultats présentés sur la Fig. III.12 confirment que la méthode STLSP ne trouve aucun problème pour estimer l'amplitude et la fréquence des multi-harmoniques non-stationnaire au même temps. Donc, la STLSP peut fonctionner parfaitement même s'il s'agit des signaux riches en harmoniques.

III.11 Applications et tests sur le signal de courant

Après l'application et tests sur les signaux simple (X, X', X1, X1'), nous passons au signal de courant et l'appliquons au STLSP

III.11.1 signaux statoriques

Dans un premier temps, Nous avons appliqué l'algorithme STLSP sur un signal statorique, avec défauts d'excentricité de degré 30%_ES et 10%_ED et fréquence fixe $f_s=50$ Hz.

Le signal de courant est plein d'informations donc nous avons ajouté le filtre à l'algorithme pour trouver l'harmonique que nous recherchons (EFH1, EFH2, EFH3, EFH4).

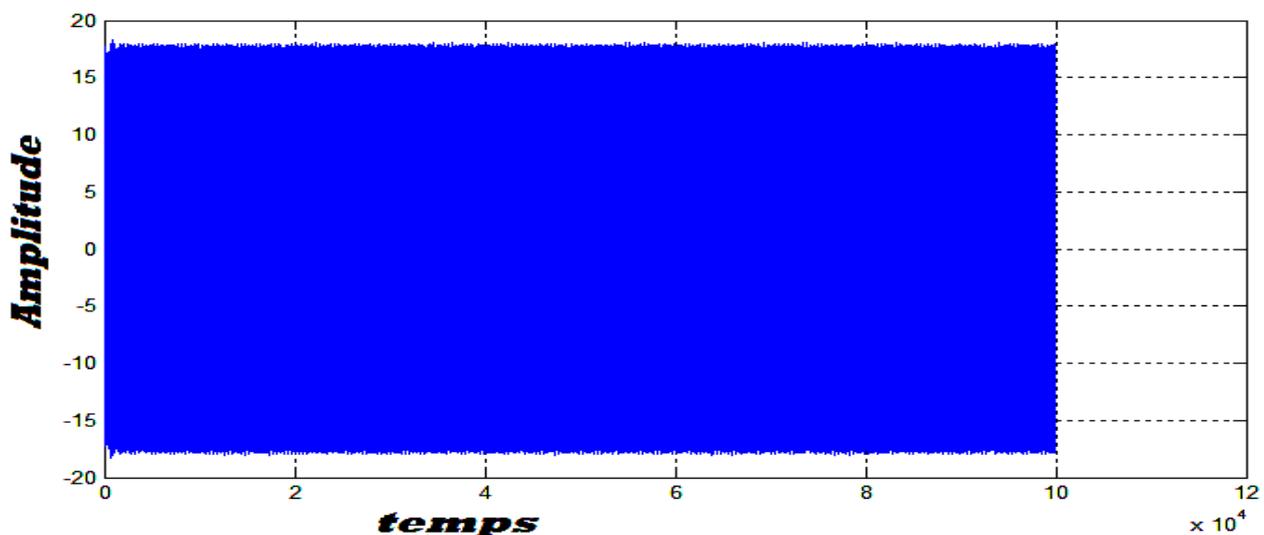


Fig. III.13 : L'allure temporelle du signal de courant avec défauts d'excentricité de degré 30%_ES et 10%_ED

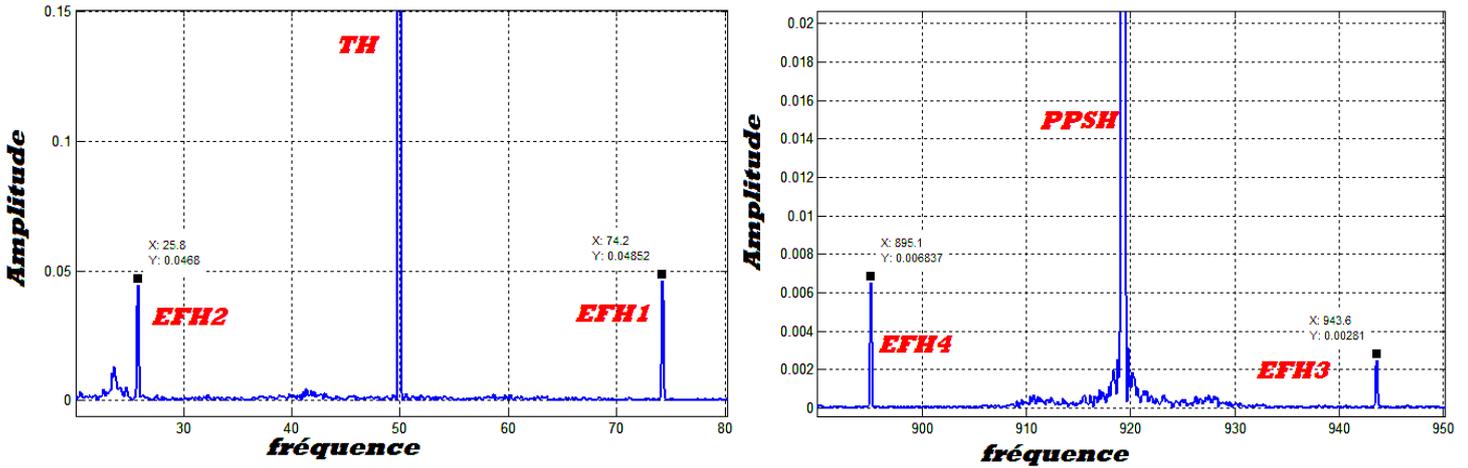
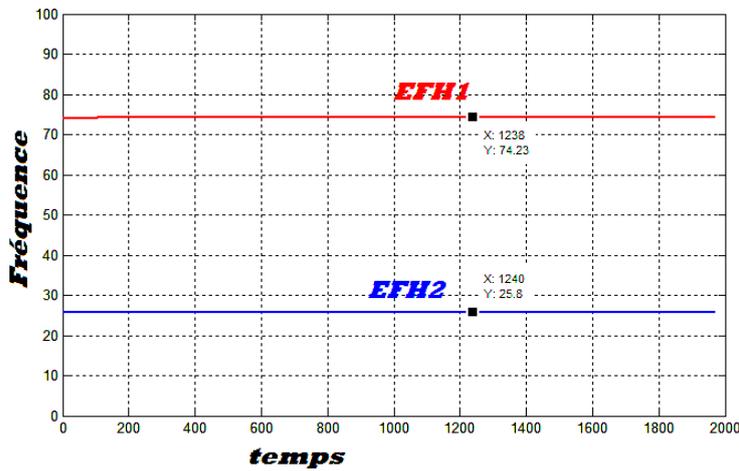
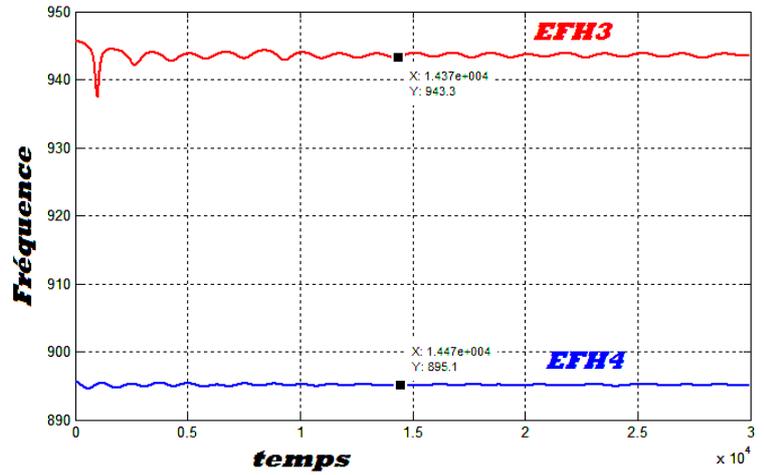


Fig. III.14 : Amplitude et fréquence réelle de EFH1, EFH2, EFH3 et EFH4

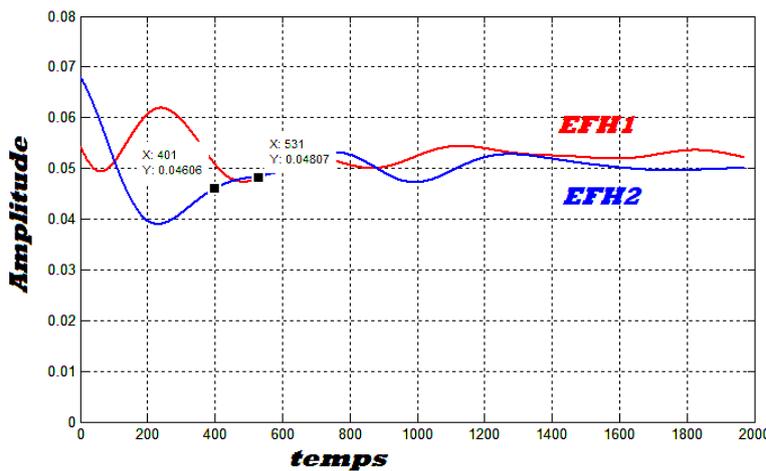
Dans Fig. III.14 nous avons estimé les valeurs réelles pour comparer avec les valeurs d'algorithme STLSP.



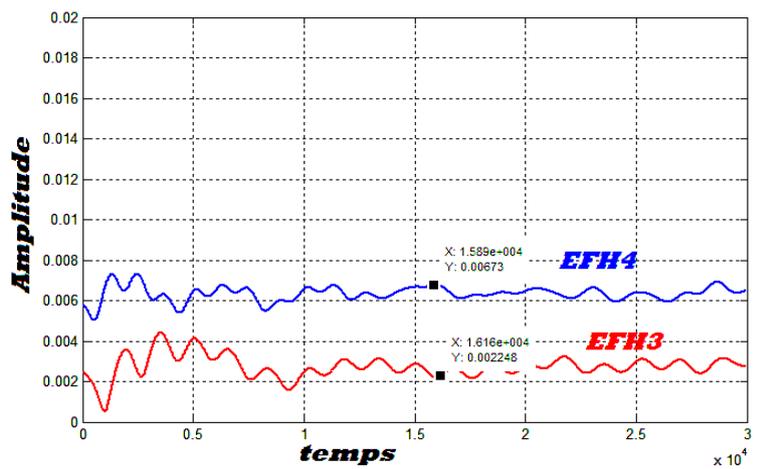
a) fréquence EFH1 et EFH2



b) fréquence EFH3 et EFH4



c) amplitude EFH1 et EFH2



d) amplitude EFH3 et EFH4

Fig.III.15 amplitude et fréquence estimé par STLSP de EFH1, EFH2, EFH3 et EFH4 pour 30%ES 10%

Commentaire :

La Fig.III.15 montre clairement que la méthode STLSP est capable de suivre avec précision l'évolution de l'amplitude et de la fréquence des différentes signatures dans le signal statorique.

III.11.2 signaux statoriques

Dans ce partie, nous avons teste la robustesse de l'algorithme STLSP, nous avons construit deux signal de simulations du courant non stationnaire

- Le premier signal représente le fonctionnement du moteur asynchrone sous une charge constante et pour déferente degré d'excentricité (00ES_00ED et 30ES_10ED)

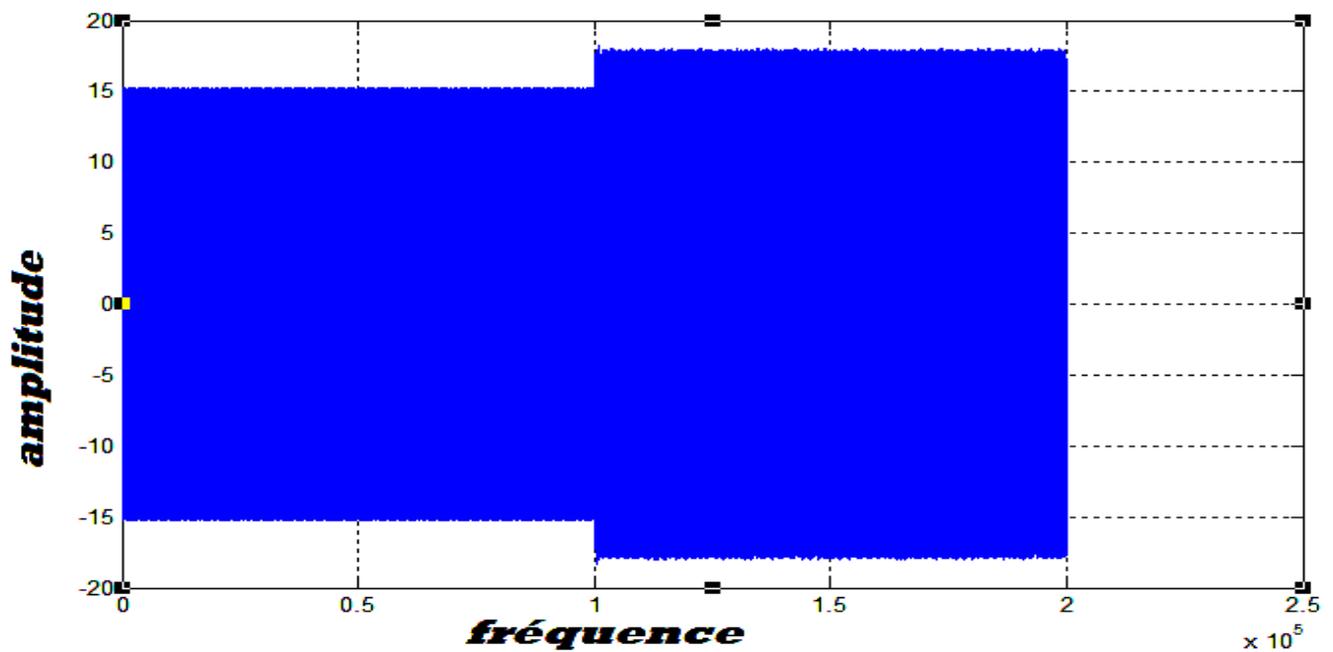
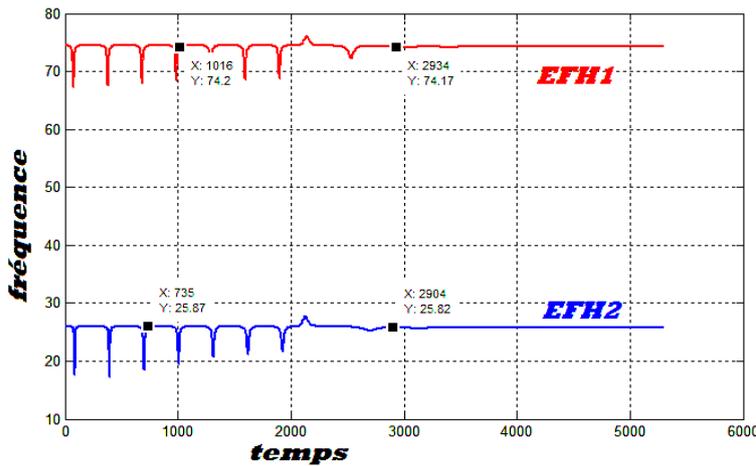
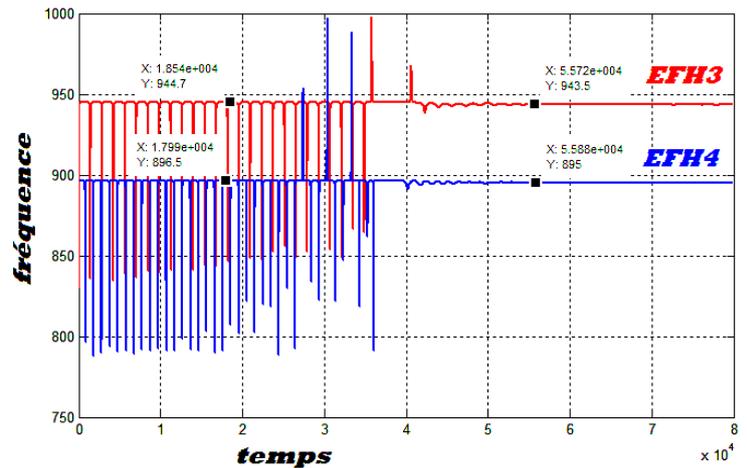


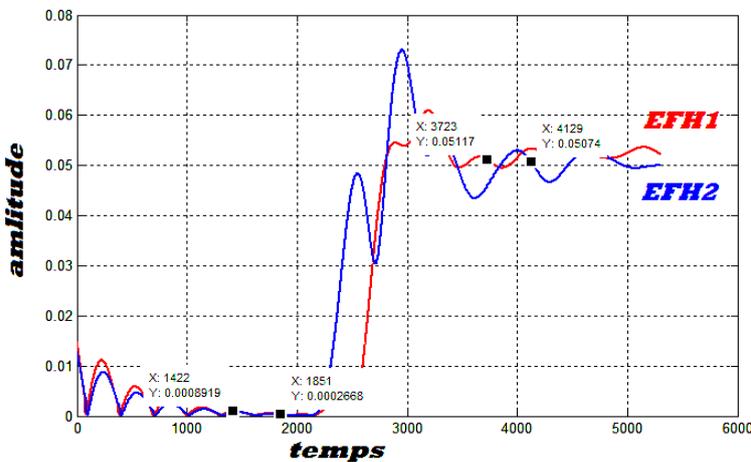
Fig. III.16 : L'allure temporelle du signal non statorique [00%ES_00%ED 30%ES_10%ED]



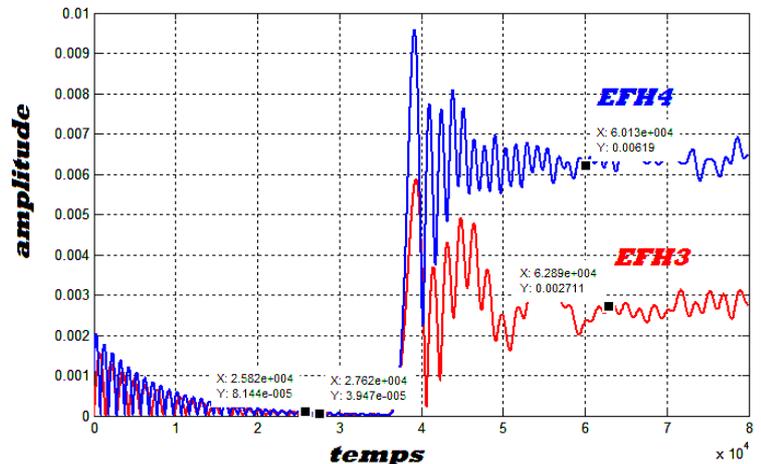
a) fréquence EFH1 et EFH2



b) fréquence EFH3 et EFH4



c) amplitude EFH1 et EFH2



d) amplitude EFH3 et EFH4

Fig.III.17 amplitude et fréquence estimé par STLSP de EFH1, EFH2, EFH3 et EFH4 pour [00%ES_00%ED 30%ES_10%ED]

Commentaire :

- La figure (III.17) montre l'évolution des amplitudes et fréquences des EFH1, EFH2, EFH3, EFH4
- Nous avons remarqué que les amplitudes étaient d'abord presque nulles, puis leurs amplitudes ont augmenté, ce qui a confirmé la présence d'un défaut excentrique (30%ES_10%ED)
- Alors, on peut dire que l'algorithme proposant peut fonctionner avec succès même s'il y a des variations brusques cotisations à la présence d'un défaut.

- b) le deuxième signal représente le fonctionnement du moteur asynchrone sous une charge constante et pour tous les différents degrés d'excentricité (00ES_00ED, 20ES_10ED, 30ES_10ED, 50ES_10ED, 60ES_10ED)

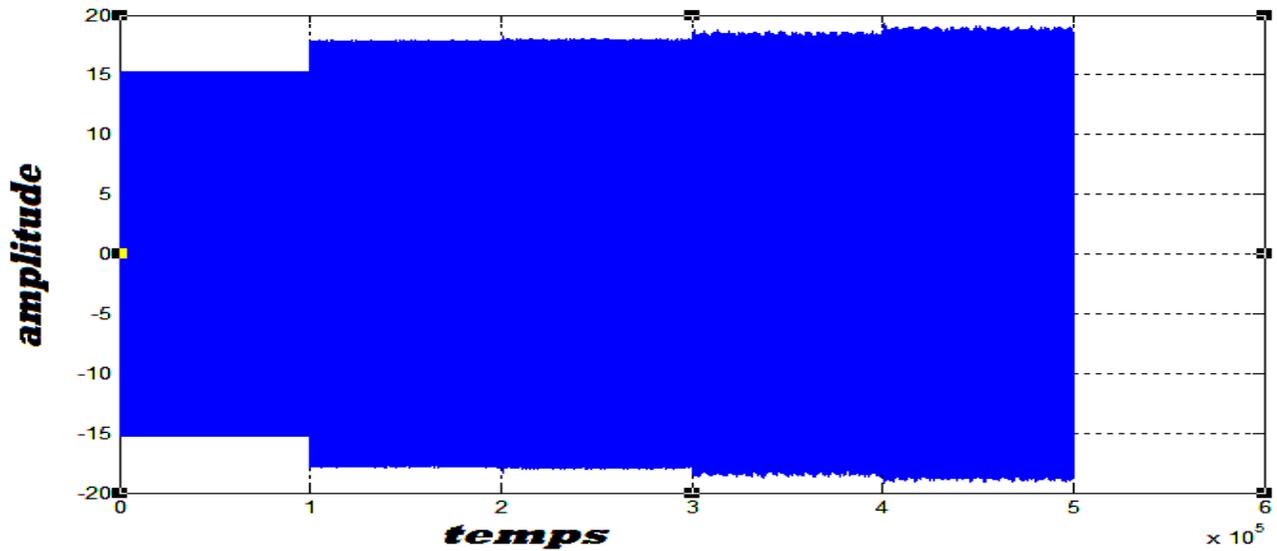


Fig. III.18 : L'allure temporelle du signal non statorique pour tous les différents degrés d'excentricité

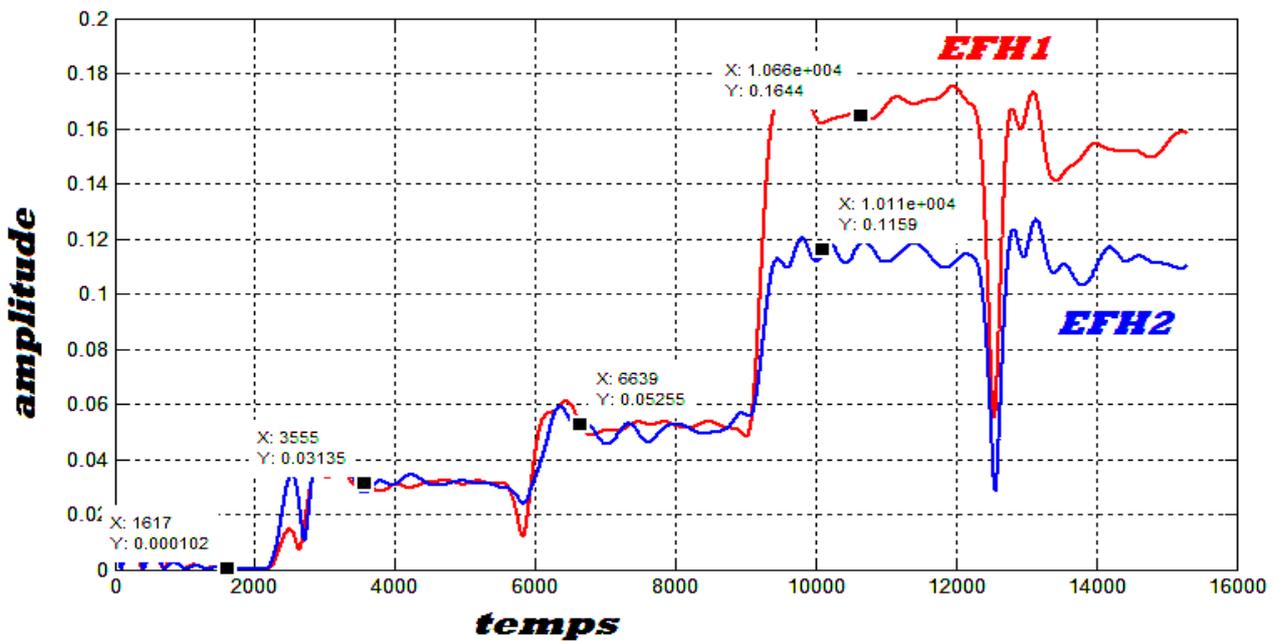


Fig.III.19 amplitude estimé par STLSP de EFH1, EFH2 pour tous les différents degrés d'excentricité

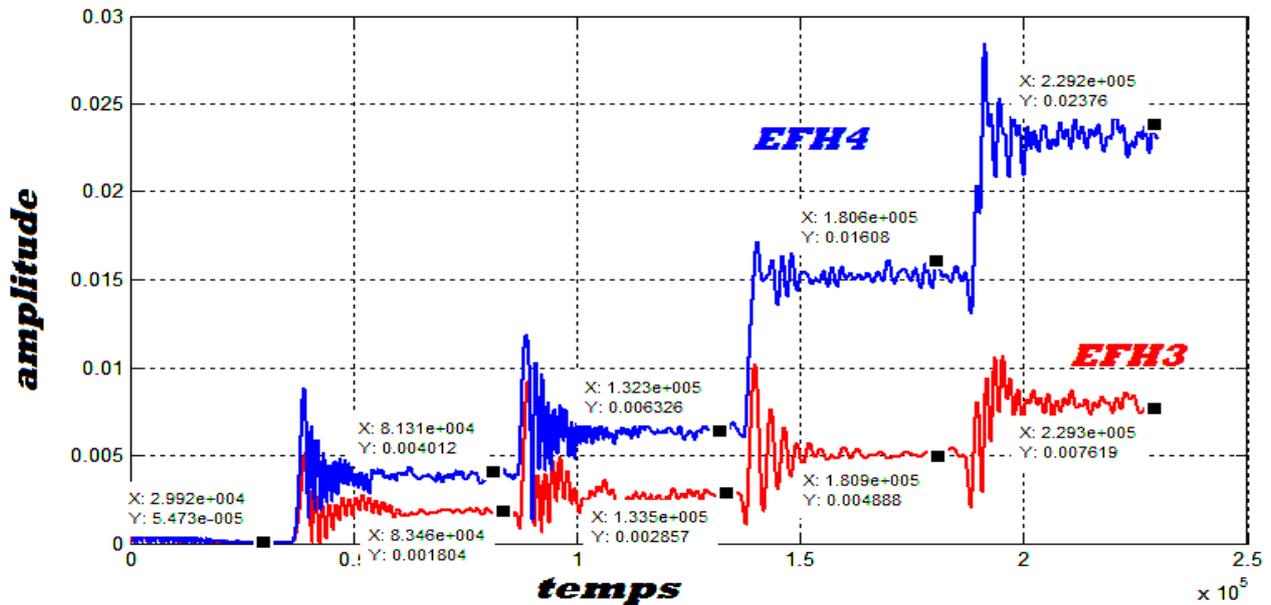


Fig.III.20 amplitude estimé par STLSP de EFH3, EFH4 pour tous les différents degrés d'excentricité

Commentaire :

- Les figures (III.19 - III.20) montrent l'évolution temporelle des amplitudes et fréquences des EFH1, EFH2, EFH3, EFH4 pendant le fonctionnement sain puis sous différents degrés d'excentricité introduites brusquement.

- On peut dire que l'algorithme proposant peut fonctionner avec succès même s'il y a des variations brusques cotisations à la présence d'un défaut.

- On remarque que les valeurs des signatures EFH 1 et EFH 2 est supérieur à les valeurs des signatures EFH 3 et EFH 4

III.12 Indices relatives

Dans cette partie, nous identifierons les indicateurs chargés de détecter les défauts, Ce sont des indicateurs d'amplitude sans unité (**Indices relatifs**).

$$IND_{RELATIVE} (sans\ unité) = \frac{Amlitude\ estimé\ (unité)}{Amlitude\ seuil\ (unité)}$$

III.12.1 Indices relatives de défaut d'excentricité

Pour prendre une décision sur l'état d'une machine asynchrone à cage, l'opérateur de diagnostic doit suivre l'évolution de certains indicateurs de défauts. Un indicateur est un quantificateur issu d'un signal dont l'acquisition est possible lors du fonctionnement. Il doit caractériser l'état et les performances de la machine surveillée. Généralement les indicateurs des défauts ont une relation directe avec les signatures du défaut concerné. [ACH 14]

D'après ce que nous avons vu au début de ce chapitre, nous avons constaté que le défaut d'excentricité dans les moteurs asynchrones est caractérisé par une famille des signatures spectrales appelée EFH, et nous avons utilisé quatre signatures gouvernée par les relations (III.1 _ III.4 _ III.5).

À partir des quatre signatures, nous identifions 6 indicateurs qui permettent de détecter et le suivie de la sévérité les défauts d'excentricité.

- Le Seuil pour EFH1 et EFH2 est définie par L'amplitude de FS (A)

$$1. \text{IND}_{EFH1} = \frac{\text{Amp}_{EFH1}}{\text{Amp}_{FS}} \quad (\text{III.12})$$

$$2. \text{IND}_{EFH2} = \frac{\text{Amp}_{EFH2}}{\text{Amp}_{FS}} \quad (\text{III.13})$$

$$3. \text{IND}_{EFH1+EFH2} = \frac{\text{Amp}_{EFH1} + \text{Amp}_{EFH2}}{\text{Amp}_{FS}} \quad (\text{III.14})$$

- Le Seuil pour EFH3 et EFH4 est définie par L'amplitude de PSH (A)

$$4. \text{IND}_{EFH3} = \frac{\text{Amp}_{EFH3}}{\text{Amp}_{PSH}} \quad (\text{III.15})$$

$$5. \text{IND}_{EFH4} = \frac{\text{Amp}_{EFH4}}{\text{Amp}_{PSH}} \quad (\text{III.16})$$

$$6. \text{IND}_{EFH3+EFH4} = \frac{\text{Amp}_{EFH3} + \text{Amp}_{EFH4}}{\text{Amp}_{PSH}} \quad (\text{III.14})$$

✓ estimation les indicateurs

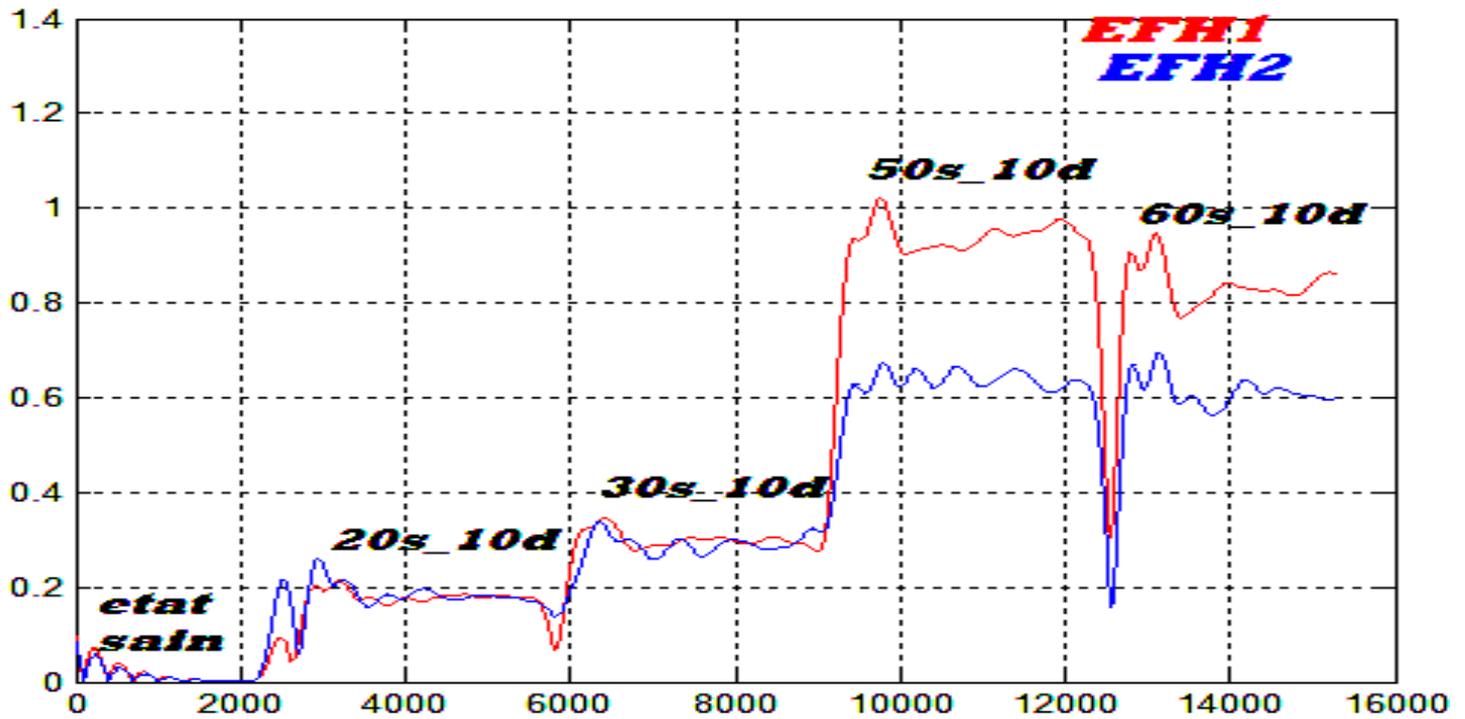


Fig III.21 les indicateurs EFH1 et EFH2 des défauts d'excentricité pour tous les variations des défauts

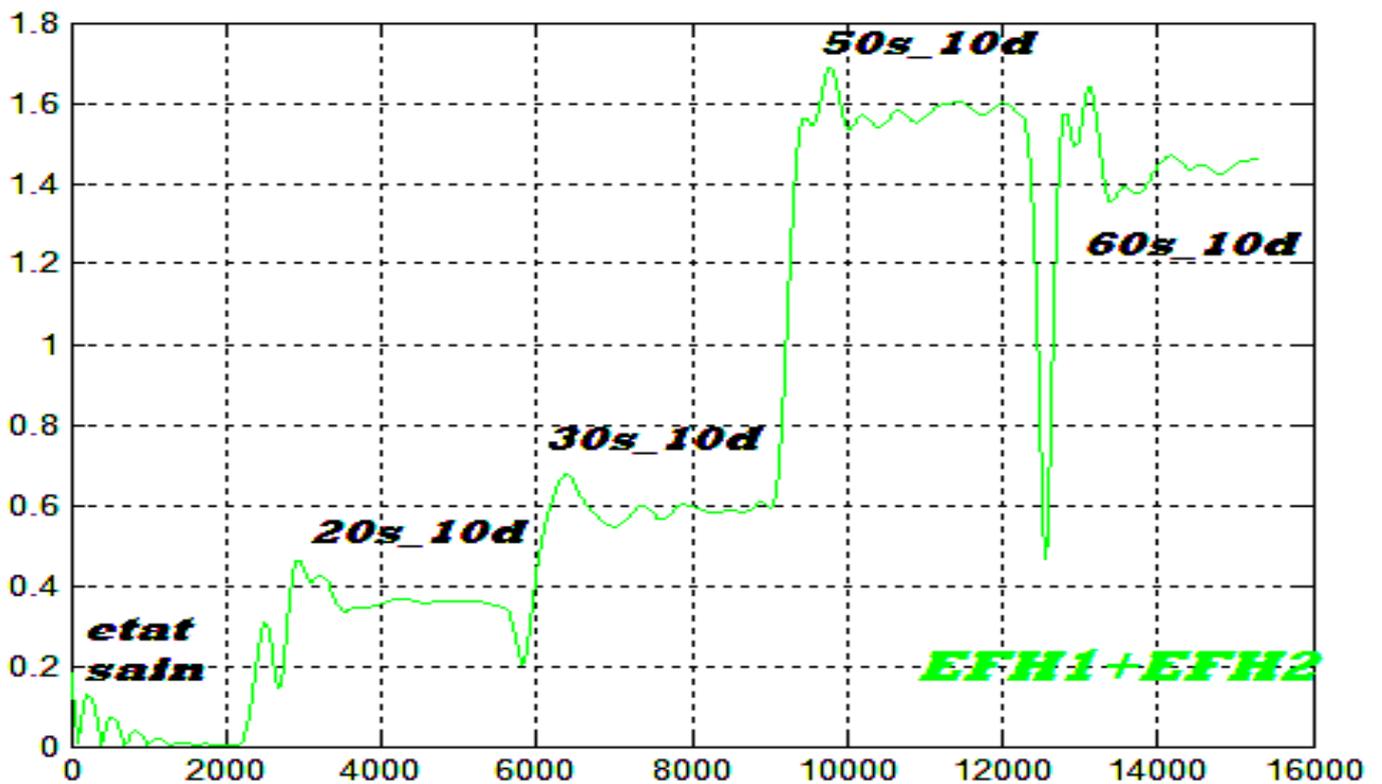


Fig III.22 les indicateurs (EFH1+EFH2) des défauts d'excentricité pour tous les variations des défauts

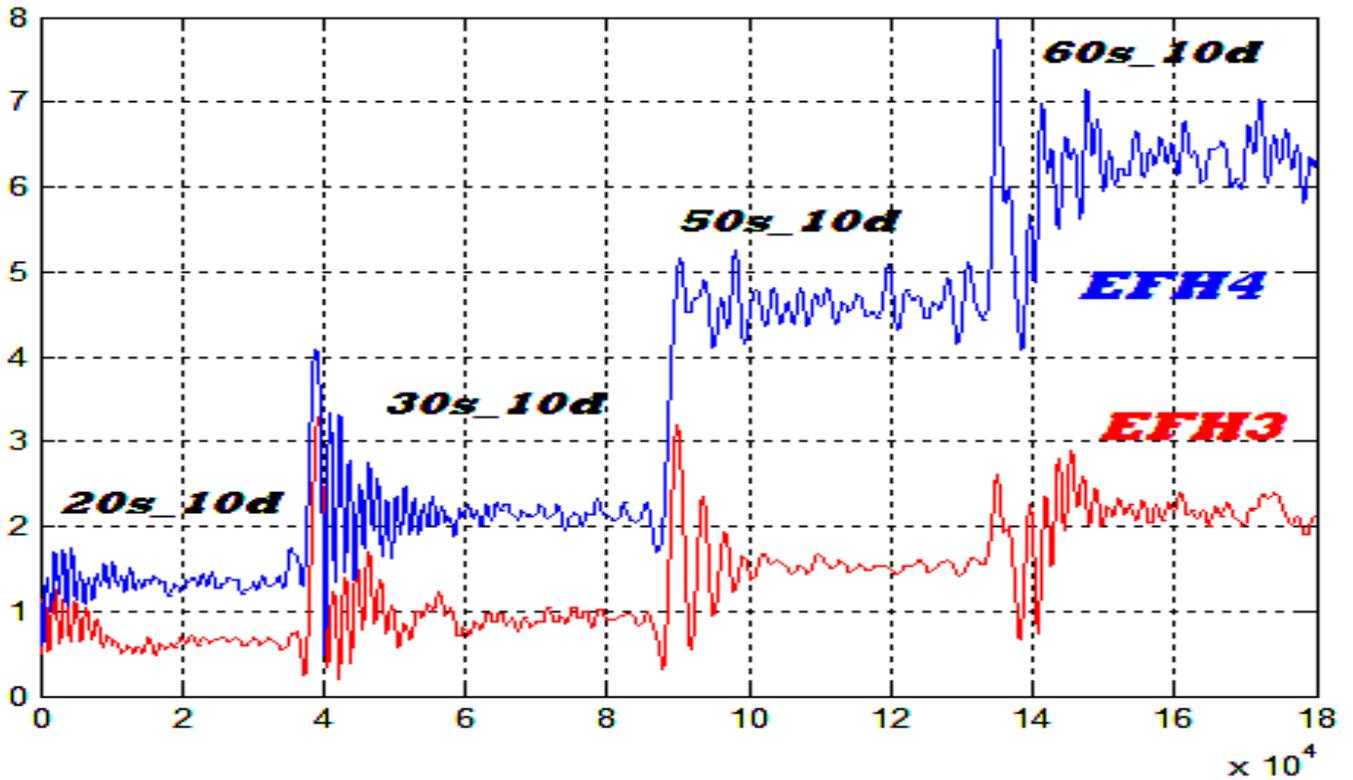


Fig III.23 les indicateurs EFH1 et EFH2 des défauts d'excentricité pour tous les variations des défauts

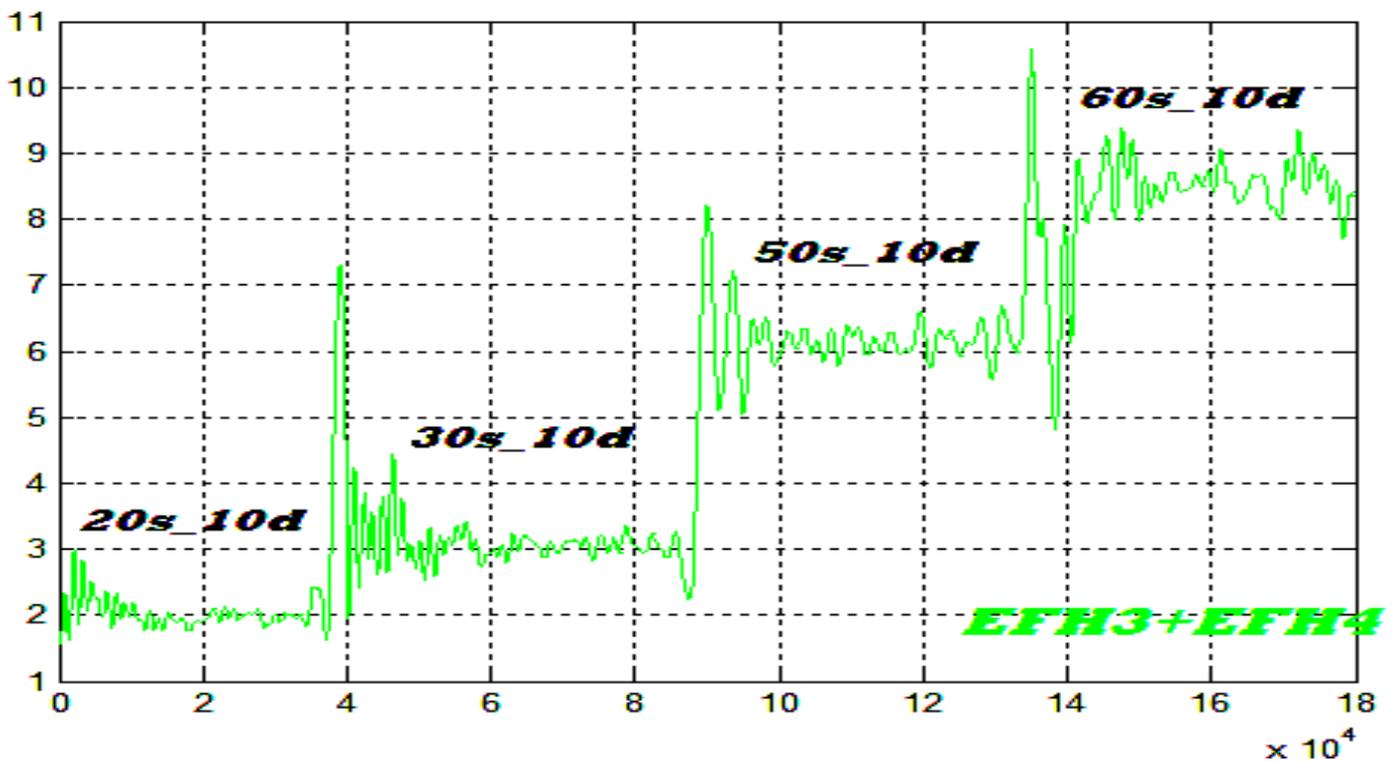


Fig III.24 les indicateurs (EFH3+EFH4) des défauts d'excentricité pour tous les variations des défauts

Commentaire :

Les figures (III.21, III.22, III.23 et III.24) confirment l'aptitude de l'algorithme proposé quant à l'estimation et le suivi des différents indicateurs.

Pour trouver le (ou les) meilleur indicateur, nous utilisons plusieurs critères pour comparer les six indicateurs

III.12.2 les critères de comparaison entre l'indicateur

On a défini deux critères :

- Sensibilité a l'apparition du défaut : le bon indice c'est celui qui augmente rapidement et sensiblement juste à l'apparition d'un défaut, ce critère a une importance puisque il répond aux besoins des opérateurs du diagnostic que veulent toujours détecter n'importe quelle anomalie dès sa naissance.
- Sensibilité a la sévérité du défaut : Le deuxième critère permet de quantifier la sévérité des défauts. Un bon indicateur est celui qui augmente sensiblement lorsque le défaut devient plus grave.

Nous effectuons deux tests pour déterminer le (ou les) bon indicateur qui permet de détecter et de suivre les erreurs de déviation.

III.12.2.1 Test de Sensibilité a l'apparition du défaut

Nous mesurons la valeur de l'indicateur en deux états (à l'état sain et à l'état avec défaut d'excentricité [20ES_10ED]). Nous remplissons le tableau avec les valeurs dans les figures (III.21, III.22, III.23 et III.24).

Les indicateurs	Etats sain	Ecc_20s_10d
Ind_EFH1	≈0	0.1698
Ind_EFH2	≈0	0.1965
Ind_EFH1+EFH2	≈0	0.3626
Ind_EFH3	≈0	0.6266
Ind_EFH4	≈0	1.373
Ind_EFH3+EFH4	≈0	2.004

Tab III .2 sensibilités des Indicateur à la l'apparition de défaut

Commentaire :

- Tous les indicateurs ci-dessus répondent avec des valeurs différentes lorsqu'il y a un défaut d'excentricité dans les machines asynchrones
- À partir de la différence dans la valeur de réponse, les indicateurs **Ind_EFH3+EFH4**, **Ind_EFH3**, **Ind_EFH4** et **Ind_EFH1+EFH2** sont les plus sensibles à l'apparition de défauts, par rapport aux indices : **Ind_EFH1** et **Ind_EFH2**.

III.12.2.2 Test de Sensibilité à la sévérité de défauts :

Nous mesurer la valeur de l'indicateur dans tous les différents degrés d'excentricités (à l'état sain et en tous les différents degrés d'excentricités introduites brusquement).

Les indicateurs	Etats sain	Ecc_20s_10d	Ecc_30s_10d	Ecc_50s_10d	Ecc_60s_10d
Ind_EFH1	≈0	0.1698	0.3016	0.906	0.8424
Ind_EFH2	≈0	0.1965	0.2763	0.6423	0.6216
Ind_EFH1+EFH2	≈0	0.3626	0.6066	1.565	1.456
Ind_EFH3	≈0	0.6266	0.8591	1.537	2.227
Ind_EFH4	≈0	1.373	2.21	4.693	6.512
Ind_EFH3+EFH4	≈0	2.004	3.106	6.206	8.875

Tab III .3 sensibilités des Indicateur à la sévérité de défauts

Commentaire :

- Lorsque la gravité de défaut d'excentricité augmente, les indicateurs augmentent de différentes valeurs.
- D'après les figures (**III.21**, **III.22**, **III.23** et **III.24**) et le tableau **III.3**, les indicateurs **Ind_EFH3+EFH4**, **Ind_EFH4**, **Ind_EFH1+EFH2** et **Ind_EFH1** sont les plus sensibles à la gravité accrue des défauts d'excentricité, parce qu'ils augmentent sensiblement lorsque le défaut devient plus grave.

En fonction des critères précédents et en comparant les résultats des tests, nous constatons que :

- L'indicateur **Ind_EFH2** est le moins sensible parce qu'il ne correspond pas aux deux critères, parce qu'il a une réaction très faible à l'apparition du défaut et à la sévérité du défaut.
- On peut dire que les indicateurs **Ind_EFH1** et **Ind_EFH3** sont un peu sensibles parce qu'ils ne correspondent pas à l'un des deux critères, parce que :
 - ✓ **Ind_EFH1** a une réaction très faible à l'apparition du défaut.
 - ✓ **Ind_EFH3** a une réaction très faible à la sévérité du défaut.
- Donc, il est déconseillé d'utiliser les indicateurs **Ind_EFH2**, **Ind_EFH1** et **Ind_EFH3**.
- Notez que les normes **Ind_EFH3+EFH4**, **Ind_EFH4** et **Ind_EFH1+EFH2** sont les plus compatibles avec les deux standards utilisés, ce qui les rend les plus sensibles aux défauts d'excentricité dans le moteur asynchrone et peuvent être classés selon l'ordre suivant :



III.13 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons identifié et comparé les méthodes FFTG et STLSP, ces dernières ayant prouvé leur efficacité. Nous avons donc appliqué la méthode STLSP pour détecter le défaut d'excentricité après la définition des harmoniques qui représentent le défaut étudié en estimant en ligne tous les indicateurs définis. À la fin de cette étude comparative, nous avons conclu qu'il n'y avait pas d'indicateur qui satisfaisait à toutes les normes de façon idéale. Mais nous devons compromettre le choix du meilleur. Par conséquent, les trois meilleurs indicateurs d'erreurs d'aberration dans un moteur asynchrone

Conclusion générale

Nous avons mentionné dans le premier chapitre les types de maintenance et les différents défauts que pouvant survenir à la machine asynchrone, et nous avons sectionné les méthodes de diagnostic de ce défaut, compte tenu de l'approche signal la détection des défauts selon le courant statorique présente un avantage pratique très intéressant.

Comme nous l'avons trouvé dans deuxième chapitre, l'analyse des signaux temporelle ne donne pas beaucoup des informations sur l'état de la machine, donc nous avons étudié le contenu spectral du courant statorique qu'est richesse des harmoniques, tel qu'on a identifié seulement quatre types d'harmoniques : les TH, les RSH, les EFH et RBFH. A partir de cette étude nous avons choisi le type d'harmonique d'excentricité EFH en surveillons sa fréquence et son amplitude.

Dans le troisième chapitre nous avons utilisé pour la première fois la méthode de FFT lissante pour suivre l'évolution dans l'amplitude d'harmonique EFH, que donné des résultats mais avec un grand nombre des points (au moins 10000 points) et avec une erreur de 23%, Cela nous a fait passer à la deuxième méthode.

Lorsqu'en applique la deuxième méthode la méthode de de STLSP (Short Time Least Square Prony) pour suivre l'évolution d'harmonique EFH on a définie quatre indicateurs de défauts, sur lesquels on a effectué une étude comparative dont le but est de sélectionner les meilleurs indicateurs donnant la bonne information sur l'état de la machine.

Nous avons constaté qu'il n'existe pas un indicateur qui satisfait tous les critères d'une façon parfaite, mais on doit faire un compromis pour sélectionner les meilleurs. Donc, les trois meilleurs indicateurs des défauts d'excentricité dans les machines asynchrones peuvent être classés selon l'ordre suivant :



Bibliographiques

[ABE 02] : **Abed. A**, *Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone*, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy, 2002.

[MER07]: **MERADI, Samir**, *Estimation des paramètres et des états de la machine asynchrone en vue de diagnostic des défauts rotoriques*, Mémoire de Magister, Université de Mohamed Khaider Biskra, Faculté des sciences de technologie département d'électrotechnique, 2007.

[MEN 17] : **Menacer Arezki**, *Cours diagnostic de la machine asynchrone master 2 électrotechnique*, Université de Mohamed Khaider-Biskra, Faculté des sciences de technologie département d'électrotechnique 2017.

[KER16]

[RAZ03]

[CBN12]: **ANDRIAN, CEBAN**, *Méthode globale de diagnostic des machines électriques*, Mémoire de doctorat, Université Lille de Nord de France – École doctorale SPI Université d'Artois– Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement, 2012.

[BOU 09]

[KHL18]

[SAH10] : **SAHRAOUI, Mohamed**. *Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones*. 2010. Thèse de doctorat. Université de Mohamed Khaider-Biskra, Faculté des sciences de technologie département d'électrotechnique, 2010

[BEN16] : **Bengrira Med houssem Eddine**, *Détection de défaut d'excentricité par la méthode de Prony*. de Master, Université de Mohamed Khaider-Biskra, Faculté des sciences de technologie département d'électrotechnique, 2016.

[KHB15] : **Khabouri, houssam**, *Estimation de la vitesse d'un moteur asynchrone par la méthode de FFT*. Mémoire de Master, Université de Mohamed Khaider-Biskra, Faculté des sciences de technologie département d'électrotechnique, 2015.

[THO01]: **W.T. Thomson, M. Fenger**, "Current signature analysis to detect induction motor faults," *IEEE Industry Applications Magazine*, july/August 2001.

[CHE 12] : **CHERMAT Badreddine**, *Diagnostic des défauts de MAS par les méthode paramétrique du traitement de signale*, Mémoire de Master, Université de Mohamed Khaider- Biskra, Faculté des sciences de technologie département d'électrotechnique, 2012

[ACH 14]: **ACHOUR Houssam**, *Etude comparative des indicateurs des défauts rotoriques dans les MAS à cage*, Mémoire de Master, Université de Mohamed Khaider-Biskra, Faculté des sciences de technologie département d'électrotechnique, 2014

[TAL18] : TALHA Mouhamed El-Amine « Détection des défauts d' excentricité dans les MAS par traitement de signal du courant statorique » Mémoire MASTER Département de Génie Electrique Université de Biskra, 2018.

[SAH 14] : M Sahraoui, AJM Cardoso, A Ghoggal "àma" IEEE Transactions on Industry Applications , Vol. 51, No. 3, pp. 2136–2147, 2014/12/2.

[SAH 15] Sahraoui, M., Cardoso, A. J. M., and Ghoggal, A., "The use of a modified Prony's method to track the broken rotor bars characteristic frequencies and amplitudes, in three-phase induction motors," IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 51, No. 3, pp. 2136– 2147, May/Jun. 2015.

[SAH 16] Sahraoui, M., Cardoso, A. J. M., Yahia, K., Ghoggal, A., "The Use of the Modified Prony's Method for Rotor Speed Estimation in Squirrel-Cage Induction Motors," IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 52, No. 3, pp. 2194 - 2202, 26 January 2016.

[LAA18]: LAADJAL, Khaled, «Contribution au diagnostic des défauts dans les condensateurs électrolytiques: Applications aux convertisseurs DC-DC», Thèse de doctorat, département Electrotechnique Biskra, 2018.

[YAH 16] Yahia, K., Sahraoui, M., Cardoso, A. J. M., Ghoggal, A., "The Use of a Modified Prony's Method to Detect the Airgap-Eccentricity Occurrence in Induction Motors," IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 52, No. 5, pp. 3869 - 3877, 16 June 2016 .