

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث 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 : électrotechnique  
Option : Réseaux électriques

Réf:.....

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

**MASTER**

*Thème*

**Détection de défaut d'excentricité par  
la méthode de Prony**

Présenté par :  
**Bengrira M<sup>ed</sup> Houssef Eddine**  
Soutenu le : 30 Mai 2016

Devant le jury compose de :

Mr GHOGGAL Adel

MCA

President

Mr SAHRAOUI Mohamed

MCA

Encadreur

Mr YAHIA Khaled

MCA

Examineur

**Année universitaire: 2015 / 2016**

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 : électrotechnique  
Option : Réseaux électriques

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

**MASTER**

*Thème*

*Détection du défaut d'excentricité  
par la méthode de Prony*

Présenté par :

BENGRIRA M<sup>ed</sup> Houssef Eddine

Avis favorable de l'encadreur :

SAHRAOUI Mohamed

signature

**Avis favorable du Président du Jury**

GHOGGAL Adel

Signature

**Cachet et signature**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث 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 : électrotechnique  
Option : Réseaux électriques

*Thème :*

*Détection du défaut d'excentricité  
par la méthode de Prony*

Proposé et Dirigé par : SAHRAOUI Mohamed

**RESUMES (Français et Arabe)**

L'analyse des signaux du courant statorique du moteur asynchrone (MCSA) est devenue une technique très répandue pour apprécier l'état de santé du moteur asynchrone afin d'éviter la défaillance et n'intervenir qu'à bon escient et pendant des arrêts programmés de production. Les techniques classiques de traitement du signal et de détection de la défaillance dans les machines tournantes, basées sur l'analyse de Fourier ont prouvées leurs limitations en termes de résolution spectrale, ce qui nécessite l'utilisation des nouvelles techniques donnant une analyse plus performante.

Et dans ce travail, nous appliquons les techniques paramétriques exactement la méthode de Prony sur un signal statorique pour estimer l'harmonique EFH qu'est représentée le défaut d'excentricité.

Le diagnostic de défaut s'effectue à travers l'observation des variations de la fréquence dans le spectre de puissance du courant statorique du moteur asynchrone.

أصبح تحليل تيار الجزء الثابت للمحرك غير متزامن ( MCSA ) تقنية تستخدم على نطاق واسع لتقييم حالة المحرك غير متزامن من أجل معرفة حالة المحرك من أجل تجنب الفشل، والتدخل عند الضرورة فقط وأثناء العمل أي قبل انقطاع وتيرة العمل. إن أغلب التقنيات التقليدية في معالجة الإشارات والكشف عن الخطأ في الآلات الدوارة التي تعتمد على طريقة تحليل فورييه محدوديتها في تشخيص والكشف عن الخطأ، الأمر الذي يتطلب استخدام تقنيات جديدة تعطي تحليلاً أكثر كفاءة.

وفي هذا العمل طبقنا تقنية أخرى وبالضبط تقنية بروني على التيار من أجل معرفة مكان EFH والتي هي دليل

على وجود خطأ التموضع.

ويتم تشخيص خطأ التموضع من خلال مراقبة التغيرات من تردد في طيف تيار المحرك التعريفي

### **Mots clés :**

Défaut d'excentricité, analyse spectrale, diagnostic de défauts, méthode de PRONY

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents qui ont toujours veillé sur*

*Moi et ont mis à ma disposition tout ce qu'ils possèdent pour  
ma réussite.*

*A mes sœurs et mon frère SALAH*

*A tout ma famille*

*Ames amis spécialement KHIDER Housseem et BOUMARZOUG*

*Hamza*

*A tous ceux i m'ont nourri de leur savoir*

*Et à ceux avec qui je partage de bons souvenirs*

## **Remerciements**

*Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués  
au sein du département  
D'électrotechnique de l'Université de Biskra.*

*Il est de nous devoir de remercier avant tout Infiniment  
Allah (الله عز وجل), Je remercie mes parents, mes  
remerciements vont à mon encadreur **SAHRAOUI  
MOHAMED***

*Pour avoir dirigé ce travail, pour son aide, ses conseils  
précieux,  
Ses encouragements incessants durant la réalisation de  
ce travail.*

*Ami chemin **KHIDER HOUSSEM et AGRAIN  
LAHSAN***

*Et Finalement, je tiens à témoigner ma profonde  
gratitude à l'université de Biskra représentée par les  
enseignants du département d'électrotechnique ainsi  
que le personnel administratif, de m'avoir donné la  
possibilité de faire Pour être un étudiant à l'université*

*et*

*merci*

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I

### Etat de l'art

**Fig I.1 :** Eléments De Constitution D'une Machine Asynchrone à Cage D'écureuil.....page 3

**Fig I.2 :** Vue schématique en perspective du stator .....page 4  
(circuit magnétique, conducteurs D'encoches, tête de bobines).

**Fig I.3:** Rotor d'une machine asynchrone .....page 4

**Fig I.4 :** schéma représentant les défauts dans une machine asynchrone .....page 7

## CHAPITRE II

### Défauts d'excentricités

**Fig II.1 :** Schéma représentant Les Différents Types D'excentricités.....page 11

**Fig II.2 :** Allure du courant statique de 10% de ES et 10% DE.....page 14

**Fig II.3 :** Allure du courant statique de 20% de ES et 10% DE.....page 14

**Fig II.4 :** Allure du courant statique de 30% de ES et 10% DE ..... page 14

**Fig II.5 :** Allure du courant statique de 50% de ES et 10% DE .....page 15

**Fig II.6 :** Allure du courant statique de 60% de ES et 10% DE .....page 15

**Fig II.7 :** Spectre du courant statorique à 60% de défaut d'excentricité statique.....page 18  
(Harmonique d'encoches rotoriques)

**Fig II.8 :** Spectre du courant statorique à 60% de défaut d'excentricité statique .....page 18  
(Harmoniques d'excentricité)

## CHAPITRE III

### Test et application de la méthode de PRONY

**Fig. III. 1 :** schéma général pour le programme de l'estimation d'harmoniques .....page 23

**Fig. III.2 :** Signal généré .....page 24

**Fig. III.3 :** Spectre du signal génères .....page 24

**Fig. III.4 :** Méthode de Prony à fenêtre glissante.....page 25

**Fig. III.5 :** Fréquence estimée par la méthode de Prony avec fenêtre glissante... .....page 26

**Fig. III.6 :** L'Amplitude estimée par la méthode de Prony avec fenêtre glissante .....page 26

**Fig. III.7 :** signal multi-harmoniques .....page 27

**Fig III.8 :** Spectre du signal générique multi-harmonique.....page 27

**Fig III.9 :** Fréquence estimée d'un signal compliqué par la méthode de PFG .....page 27

**Fig. III .10 :** Amplitude estimée du signal multi-harmonique par PFG. ....page 28

**Fig. III.11 :** L'allure temporelle du signal génère compliqué .....page 28  
(non-stationnaire)

**Fig. III.12 :** Spectre du signal no-stationnaire.....page 28

<b>Fig III.13</b> : Fréquence estimée d'un signal compliqué (non-stationnaire) .....page 29 par la méthode de PFG.
<b>Fig III.14</b> : Les allures temporelles du signal sans bruit .....page 29 à trois composantes et trois degrés de SNR.
<b>Fig III.15</b> : Fréquence et Amplitude estimées d'un signal.....page 30 générique à trois composantes avec différents SNR.
<b>Fig III.16</b> : Spectre linéaire du courant statorique expérimentale à l'état sain.....page 32 moteur 3kW (visualisation d'EFH)
<b>Fig III .17</b> : Allure temporelle du courant statorique en.....page 33 pleine charge Avec 60% ES et 10% ED
<b>Fig III.18</b> : spectre de signal de simulation avec 60% ES et 10% ED.....page 33
<b>Fig III.19</b> : Amplitude estimée de l'harmonique EFH3 .....page 34 pour 60% ES et 10% ED
<b>Fig III.20</b> : Fréquence estimée de signal de simulation avec 60% ES et 10% ED.....page 34
<b>Fig III.21</b> : évolution temporelle de la fréquence <i>EFH3</i> .....page 35 <i>pour</i> différents degrés d'excentricité
<b>Fig III.22</b> : évolution temporelle de l'amplitude .....page 35 de différents degrés de défaut d'excentricité



# LISTE DES TABLEAUX

**TAB II.1** : les différents harmoniques du courant statorique.....Page 17

**TAB. III.1** : Amplitude et Fréquence estimées par PRONY et FFT.....Page 24

**TAB III.2** La caractéristique de la machine asynchrone dans notre travaille.....Page 31

**TAB III.4** : l'indicateur de défaut.....Page 36

# Résumés

L'analyse des signaux du courant statorique du moteur asynchrone (MCSA) est devenue une technique très répandue pour apprécier l'état de santé du moteur asynchrone afin d'éviter la défaillance et n'intervenir qu'à bon escient et pendant des arrêts programmés de production. Les techniques classiques de traitement du signal et de détection de la défaillance dans les machines tournantes, basées sur l'analyse de Fourier ont prouvées leurs limitations en termes de résolution spectrale, ce qui nécessite l'utilisation des nouvelles techniques donnant une analyse plus performante.

Et dans ce travail, nous appliquons les techniques paramétriques exactement la méthode de Prony sur un signal statorique pour estimer l'harmonique EFH qu'est représentée le défaut d'excentricité.

Le diagnostic de défaut s'effectue à travers l'observation des variations de la fréquence dans le spectre de puissance du courant statorique du moteur asynchrone.

أصبح تحليل تيار الجزء الثابت للمحرك غير متزامن (MCSA) تقنية تستخدم على نطاق واسع لتقييم حالة المحرك غير متزامن من أجل معرفة حالة المحرك من أجل تجنب الفشل، والتدخل عند الضرورة فقط وأثناء العمل أي قبل انقطاع وتيرة العمل. ان اغلب التقنيات التقليدية في معالجة الإشارات والكشف عن الخطأ في الآلات الدوارة التي تعتمد على طريقة تحليل فورييه محدوديتها في تشخيص والكشف عن الخطأ، الأمر الذي تطلب استخدام تقنيات جديدة تعطي تحليلاً أكثر كفاءة.

وفي هذا العمل طبقنا تقنية أخرى وبالضبط تقنية بروني على التيار من أجل معرفة مكان EFH والتي هي دليل على وجود خطأ التموضع.

ويتم تشخيص خطأ التموضع من خلال مراقبة التغيرات من تردد في طيف تيار المحرك التعريفي

## Mots clés :

Défaut d'excentricité, analyse spectrale, diagnostic de défauts, méthode de PRONY,

.

.

# Sommaire

## INTRODUCTION GENERALE

### CHAPITRE I

### Etat de l'art

I. INTRODUCTION.....page 1

II. DEFINITION.....page 1

II.1 La maintenance.....page 1

II.2 Le diagnostic.....page 2

III. CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE.....page 2

III.1 Le stator .....page 3

III.2 Le rotor.....page 4

III.3 Les paliers.....page 5

IV. DEFAILLANCES DANS UN MOTEUR ASYNCHRONE.....page 5

IV.1 Défaillances statoriques.....page 5

IV.2 Défaillances rotoriques .....page 6

IV.3 Défaillances des paliers .....page 6

V. LES METHODES DE DETECTION DES DEFAUTS DANS LES MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASES A CAGE .....page 8

V.1 Approche Signal .....page 8

V.2 Approche Modèle .....page 8

VI. CONCLUSION .....page 9

### CHAPITRE II

### Défauts d'excentricités

I. INTRODUCTION.....page 10

II. DEFAUT D'EXCENTRICITE .....page 10

II.1 Signatures spectrales de défaut d'excentricité .....page 11

III. MODELE MATHEMATIQUE DE SIMULATION .....page 12

III. 1 Les allures temporelles des courants statoriques pour différents états .....page 13

III. 2 Analyse spectrale du courant statorique .....page 15

III.3 Les différents harmoniques existant dans le courant statorique .....	page 17
III.3.1 Harmoniques d'encoches rotoriques RSH .....	page 17
III.3.2 Harmoniques d'excentricité EFH .....	page 18
<b>IV. CONCLUSION</b> .....	page 19
<b>CHAPITRE III Test et application de la méthode de PRONY</b>	
<b>I. INTRODUCTION</b> .....	page 20
<b>II. LES METHODES D'ESTIMATION D'HARMONIQUES</b> .....	page 20
II.1 La Méthode de Prony Classique.....	page 20
II.2 L'ALGORITHME DE PRONY ....	page 23
II.2.1 Test l'algorithme de PRONY sur un signal généré mono-harmonique ... ..	page 23
II.2.2 Méthode de Prony avec fenêtre glissante .....	page 25
II.2.3 Test la méthode sur un signal généré multi-harmoniques .....	page 26
II.2.4 Test la méthode sur un signal non-stationnaire.....	page 28
II.2.5 Test de la méthode Prony sur un signal bruité .....	page 29
<b>III. APLICATION DE LA METHODE DE PRONY</b> .....	page 31
III.1 Détection de défaut d'excentricité par prony .....	page 33
<b>IV. CONCLUSION</b> .....	page 31
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	

## INTRODUCTION GENERALE

Le diagnostic des machines électriques s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production doivent être dotée de certaines applications, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de système de protection fiables car une quelconque défaillance, même la plus anodine, peut mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système.

Le travail proposé s'attarde sur le diagnostic des machines asynchrone triphasé à cage a d'écureuil Exactement sur le défaut d'excentricité avec les méthodes de traitement du signal et notre travail basé sur l'analyse du courant statorique avec la méthode de PRONY .Cette méthode, remontant à 1795, connaît un regain d'intérêt d'une part grâce à l'évolution des moyens de calculs et d'autre part grâce à ses capacités à résoudre des problèmes dans les domaines où les méthodes classiques sont inefficaces. La méthode de Prony classique est une technique de traitement de signal qui permet d'extraire les caractéristiques d'harmoniques en résolvant un ensemble d'équations non linéaires

Et dans ce mémoire en va présenter une petite résumé sur ce champs alors en va vue dans chapitre I l'état de l'art que contient quelque définition du domaine et le chapitre II que parlé sur le défaut d'excentricité, la définition, signature spectrale et leur type. Finalement le chapitre III que le partie pratique il donné la définition de méthode de prony et le test plus l'application de se dernière



# Chapitre I

*Etat de l'art*

## **I. INTRODUCTION**

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 qui peuvent affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone.

## **II. DEFINITIONS**

### **II.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.

- **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. [SAH 10]

- **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 : [SAH 10]

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

**- Maintenance préventive systématique**

La maintenance systématique est un type de maintenance planifiée dans le temps (graissage, lubrification, nettoyage, dépolluage, 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 ...).

**- 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...).

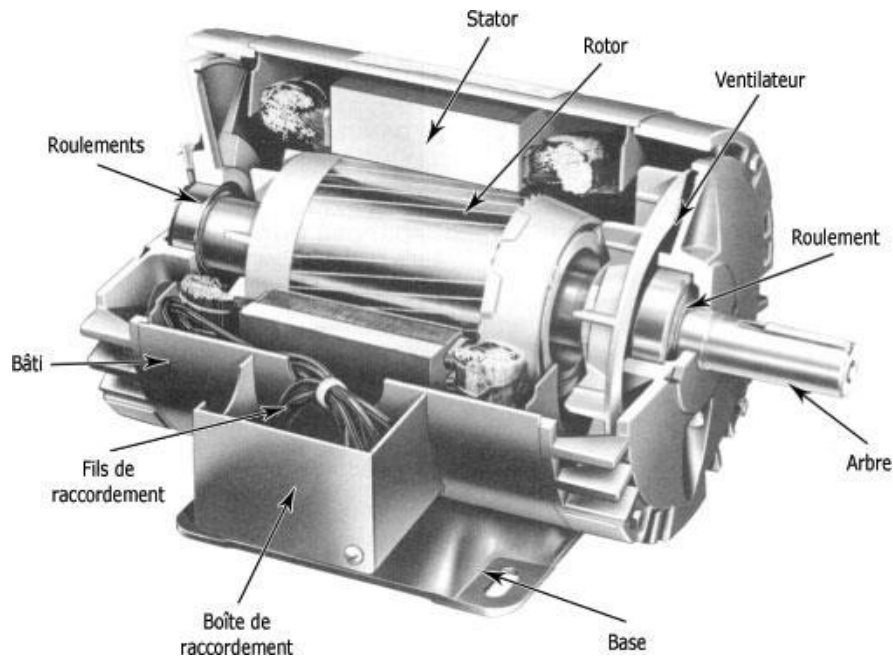
**II.2 Le Diagnostic**

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 [MER 07]

**III. CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE**

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous nous intéressons à la machine asynchrone à cage d'écureuil. Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la figure suivant (**Fig I.1**)



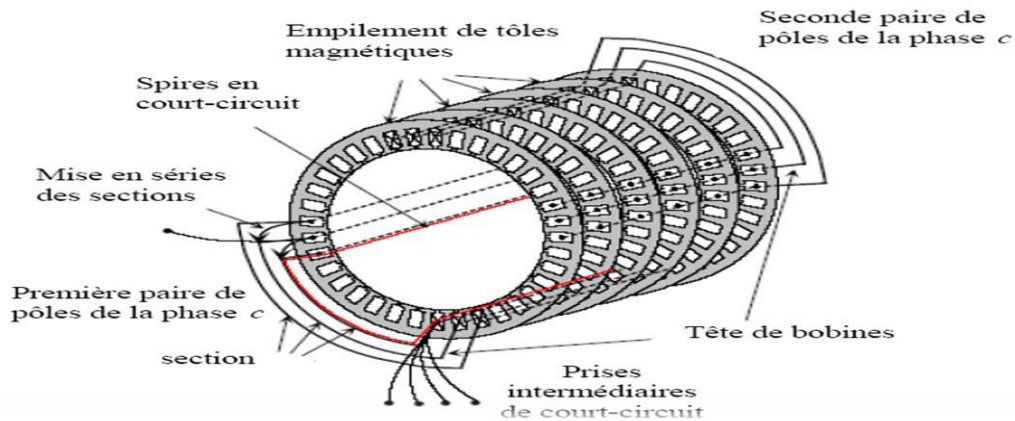


**Fig I .1 : Eléments De Constitution D'une Machine Asynchrone à Cage D'écureuil**

### **III.1 .Le stator**

C'est une partie fixe, où est connecté l'alimentation électrique. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (**Fig II.2**). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties: les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines.

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique. [BOU 09]



**Fig I.2 : vue schématique en perspective du stator (circuit magnétique, conducteurs D'encoches, tête de bobines). (Enroulement statorique d'une machine a 4 pôles) [BOU 09]**

### III.2 Le rotor

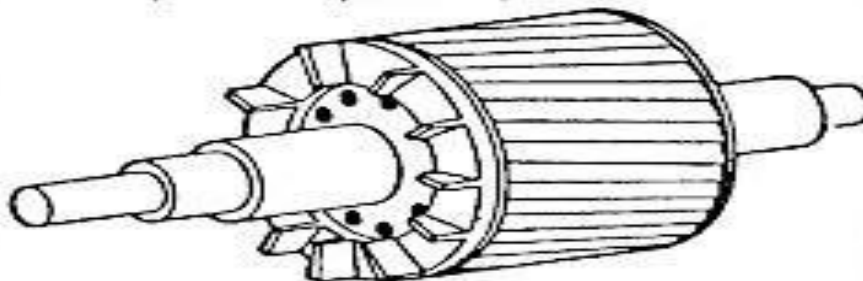
C'est une partie tournante, qui permet de mettre en rotation la charge mécanique

Il est composé de quatre éléments [SAH 10]

- ✓ Circuit magnétique
- ✓ Conducteurs
- ✓ Arbre
- ✓ Ventilateur

### Le rotor (induit)

- Il contient les conducteurs câblés en court-circuit (moteur asynchrone).



**Fig I.3: rotor d'une machine asynchrone**

### **III.3 Les paliers :**

Ce sont des organes mécaniques permettant la mise en rotation du rotor et assurant le maintien des différents sous-ensembles.

Ils sont constitués de deux composants [SAH 10] :

- ✓ Flasques.
- ✓ Roulement à billes.

## **IV. LES DEFAILLANCES DANS UN MOTEUR ASYNCHRONE :**

Une défaillance est définie par la cessation de l'aptitude d'un composant à accomplir une fonction requise. Partons de cette définition, on peut citer les défaillances pouvant affecter les machines asynchrones [SAH 10]

- ✓ Défaillances statoriques
- ✓ Défaillances rotoriques
- ✓ Défaillances des paliers

### **IV.1 Défaillances statoriques**

Les défauts statoriques regroupent principalement les défauts de court-circuit d'une phase à la terre, court-circuit entre phases, ou court-circuit entre spires. Ils commencent généralement par un court-circuit entre spires, avant d'évoluer vers des défauts plus graves.

Une des principales causes de ces défauts est la dégradation de l'isolation qui peut être une dégradation fonctionnelle (liée à la durée de vie de l'enroulement) ou bien due aux conditions d'exploitation et aux contraintes mécaniques, thermiques, électriques et environnementales [GHO 05].

Et en posé comme des points : [BIC 12]

- défaut d'isolant
- court-circuit entre spires
- court-circuit entre phases
- court-circuit phase/bâti
- déséquilibre d'alimentation
- défaut de circuit magnétique

## **IV.2 Défaillances rotoriques**

Les cassures de barres et de portion d'anneaux des cages sont très fréquentes, la détection de ces défaillances est rendue difficile par le fait que lors de leur apparitions, la machine continue de fonctionner. Ces défauts ont par ailleurs un effet cumulatif. Le courant que conduisait une barre cassée par exemple, se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui conduit à leurs ruptures, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. Elles provoquent aussi une dissymétrie de répartition de courants au rotor et conduisent à de fortes oscillations dans le couple et la vitesse. Ceci va générer des vibrations et l'application de défauts mécaniques.

Et en a situé plusieurs défauts leur localisés au niveau du rotor comme des points, et peuvent être définis comme suit: [BIC 12]

- Rupture de barres.
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.
- Excentricité statique et dynamique.
- Un défaut de contact balai - bague dans le cas d'un rotor bobiné.

## **IV.3 Défaillances des paliers**

Il se compose de c'est deux partie suivante : [SAH 10]

- **Défaillances des flasques**

Les défaillances des flasques sont généralement créées durant l'étape de fabrication. En effet, si les bords intérieurs ou extérieurs des flasques ne sont pas usinés correctement, les roulements à billes sont alors décentrés. Cela conduit à une excentricité du rotor par rapport au stator produisant des efforts supplémentaires sur l'arbre et sur les roulements à billes ce qui accélère leur détérioration.

- **Défaillances des roulements à billes**

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans tout type de machines électriques tournantes [BOG 03]. D'une manière générale, toutes insertions en force des roulements à billes sur l'arbre, est susceptible de créer des indentations sur les surfaces de contact, voire une fracture directe. Le champ axial peut induire des courants électriques qui vont circuler au niveau des roulements à billes, ce qui accélère leur détérioration. En plus, la graisse qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certains cas, se rigidifier et causer une résistance à la rotation.

La (Fig I.4) représente les différents défauts dans une machine asynchrone :

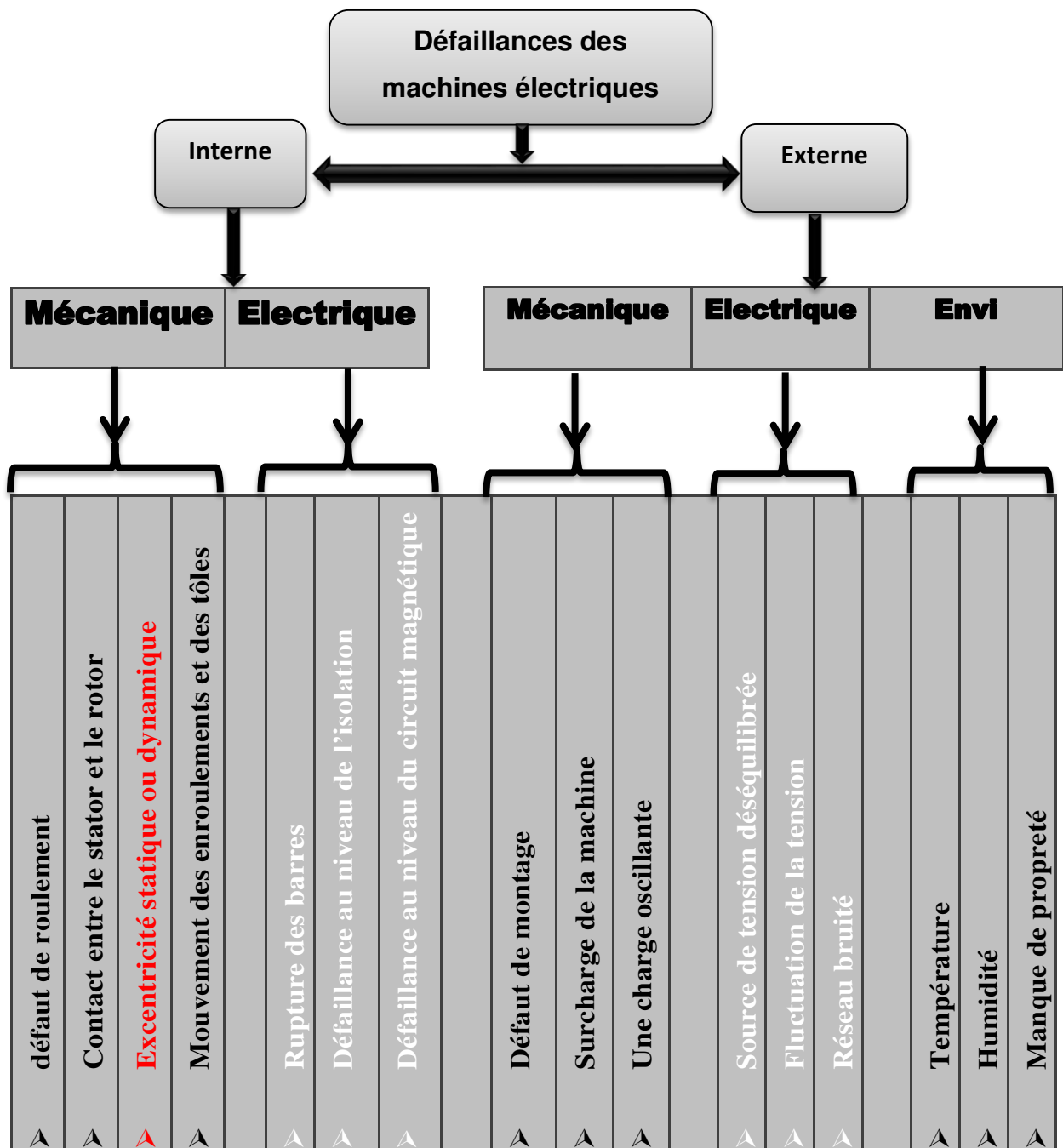


Fig I.4 : schéma représentant les différents défauts dans une machine asynchrone

## **V. LES METHODES DE DETECTION DES DEFAUTS DANS LES MOTEURS ASYNCHRONES TRIPHASES A CAGE**

Après avoir présenté dans la dernière étape les différents types de défaillance connus dans la machine asynchrone. Alors, il existe, par conséquent, plusieurs approches et techniques qui ont largement étudié la défaillance en citant deux approches les plus utilisées, approche Signal et approche Modèle.

### **V.1 Approche Signal**

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de la maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de cette installation. La surveillance via cette approche nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures. D'après la littérature, les principales techniques du diagnostic utilisées sont les suivantes : [SAH 10]

- Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques
- Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite
- Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites
- Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique
- Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée
- Diagnostic par l'analyse du Vecteur de Park
- Diagnostic par l'analyse de la tension de neutre
- Diagnostic par l'analyse du courant statorique

### **V.2 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. Parmi les méthodes les plus connues appartenant à cette approche, on cite : Diagnostic des Défauts par l'Estimation Paramétrique. La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique, consistent à déterminer les valeurs numériques des paramètres structuraux d'un modèle de connaissance qui gouverne le comportement dynamique du système [BAC 02.a, BAC 02.b, FAN 05]. La première étape est donc, l'élaboration d'un modèle mathématique de complexité raisonnable pour caractériser la machine en fonctionnement sain et dégradé. Le type de défaut que l'on puisse détecter dépend du choix du modèle. En effet, les défauts statoriques ou rotoriques

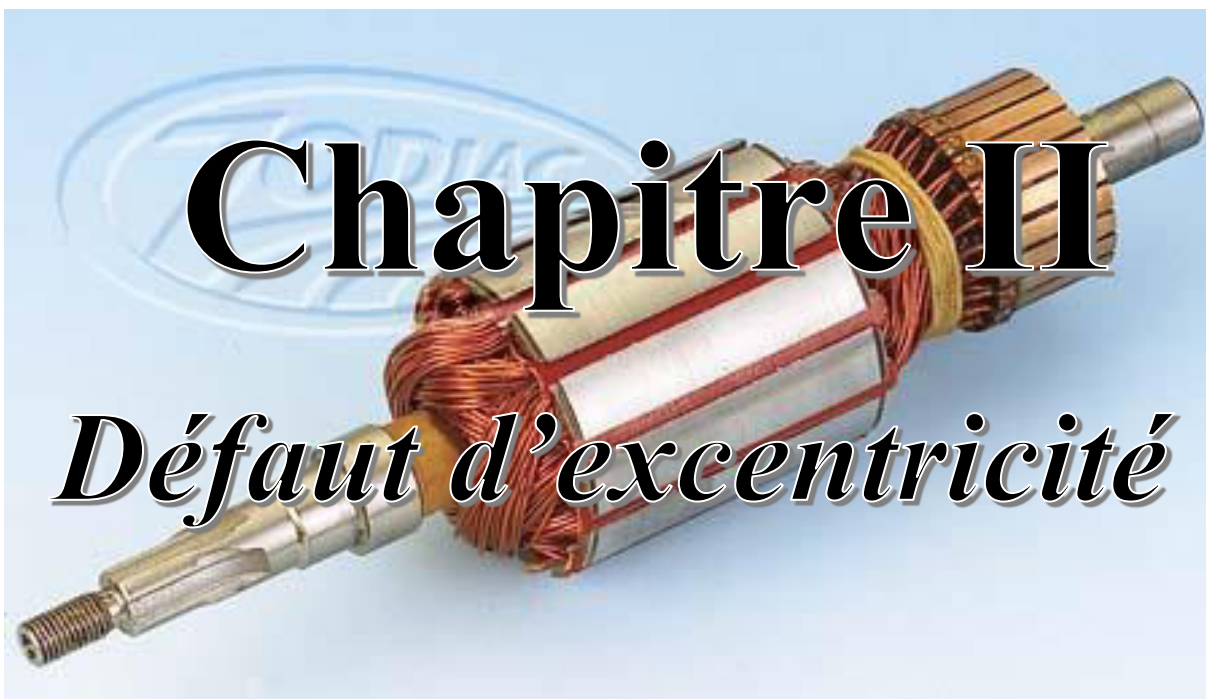
doivent être discriminés au niveau des paramètres physiques estimés, pour qu'on puisse les détecter et les localiser. [SAH 10]

## **VI. CONCLUSION**

Nous avons discuté dans ce chapitre quelques définitions de base de la machine asynchrone et sa composition. Après tout ça, nous avons abordé la défaillance qui infecte sur la machine choisie. Enfin, nous avons donné quelques approches utilisées dans le diagnostic (approche signal et approche modèle) ; mais n'oublions pas qu'il existe autres approches différentes à celles traitées.

# Chapitre II

*Défaut d'excentricité*





## **I. INTRODUCTION**

Notre objectif dans ce mémoire est la détection d'un défaut d'excentricité dans la machine asynchrone, pour cela, on a choisi l'approche signal exactement comme une méthode de diagnostic basé sur le signal du courant statorique. Il est préférable de faire une étude analytique détaillée sur la machine asynchrone et dans ce chapitre, on donne une petite définition sur cette méthode et pourquoi on la choisi. Après tout ça, nous allons définir le défaut d'excentricité et ses types, leurs causes et conséquences.

## **II. DEFAUT 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 cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement. Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine ; en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor. 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 [ARH 14]

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). 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). [VAS 09]

Il y a trois types d'excentricité qui sont :

- **L'excentricité statique :**

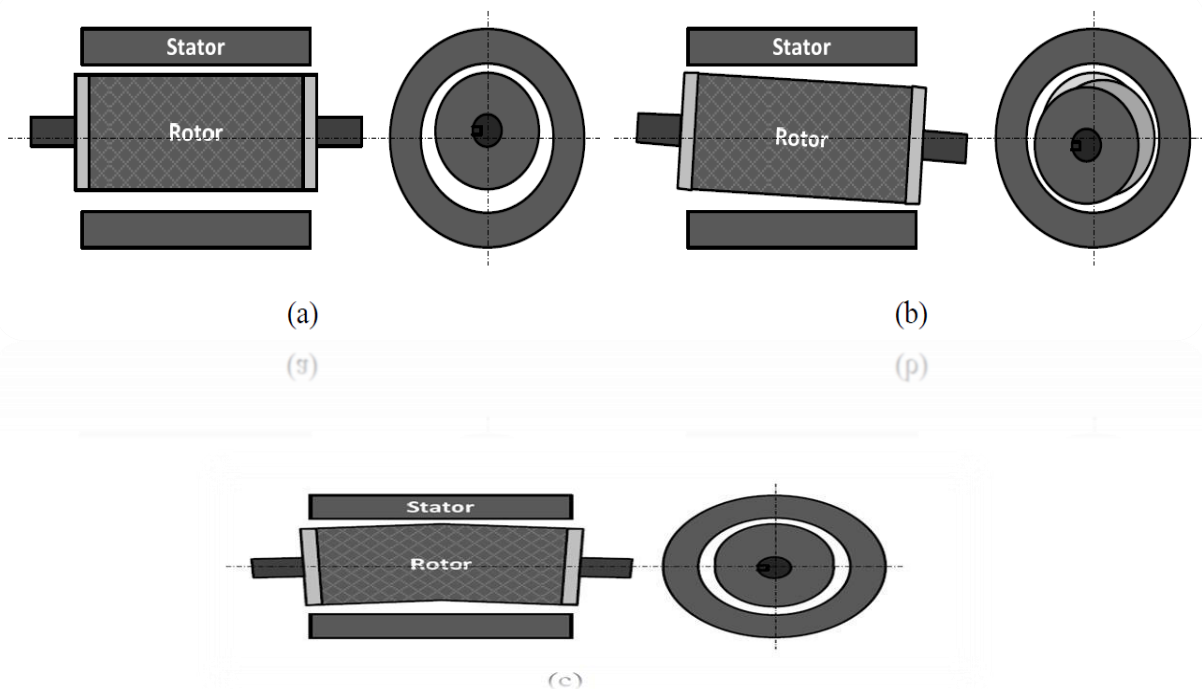
Le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.

- **L'excentricité dynamique :**

Le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.

- **L'excentricité mixte :**

Qu'on pourrait qualifier de 'mixte', associant les deux cas précédemment cités.



a-Statique ; b-Dynamique, c-Mixte

**Fig II.1 : Schéma représentant Les Différents Types D'excentricités**

### II.1 Signatures spectrales de défaut d'excentricité

D'une manière générale et en tenant compte des harmoniques de temps, on peut confirmer les résultats suivants [GHO 09, SAH 10] :

- ❖ L'excentricité statique n'a pas des signatures propres.

- ❖ L'excentricité dynamique est caractérisée par les signatures suivantes :

$$f_{ED} = V \cdot f_s \mp 2 \cdot k \cdot f_r \quad \text{Equ II.1}$$

$$f_{ED} = |V \cdot f_s \mp (kNr \mp 2 \cdot k) \cdot f_r| \quad \text{Equ II.2}$$

Avec  $k=1, 2, 3, \dots$  un entier

❖ L'excentricité mixte est caractérisée par les signatures suivantes :

$$f_{EM} = v \cdot f_s \mp k \cdot f_r \quad \text{Equ II.3}$$

$$f_{EM} = |v \cdot f_s \mp (kNr \mp k) \cdot f_r| \quad \text{Equ II.4}$$

Avec  $k=1, 2, 3, \dots$  un entier

Il est évident que tous les moteurs, même à l'état sain, présentent un petit niveau d'excentricité mixte. Pour cela, il est presque impossible de réaliser une excentricité purement statique ou purement dynamique. Cela signifie qu'on ne peut pas étudier expérimentalement l'excentricité statique séparément à celle dynamique ; seule la simulation, via un modèle fiable [GHO 05], qui peut confirmer ces résultats [SAH 08].

En pratique, on parle toujours de l'excentricité mixte car les deux types d'excentricité existent simultanément. Les harmoniques de fréquences  $v \cdot f_s \mp k \cdot f_r$  sont les signatures principales de ce défaut et on va les désigner par **EFH** (*Eccentricity Fault Harmonics*).

### III. MODELE MATHEMATIQUE DE SIMULATION

Afin de vérifier le comportement du moteur asynchrone en présence d'excentricité mixte, on a utilisé un modèle mathématique multi enroulements. Comme il a décrit précédemment, la cage du rotor peut être considérée comme un ensemble des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement. Ceci, conduit aux équations de tension suivantes :

$$[U_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\Psi_s]}{dt}$$

$$[0] = [R_r][I_r] + \frac{d[\Psi_r]}{dt}$$

Telle que

$$[\Psi_s] = [L_{ss}][I_s] + [L_{sr}][I_r]$$

$$[\Psi_r] = [L_{rs}][I_s] + [L_{rr}][I_r]$$

L'équation mécanique est donnée par :  $C_e - C_r = J_r \frac{d\omega_r}{dt}$

Avec

$$C_e = \left( \frac{dW_{co}}{dt} \right) \Big|_{(I_s; I_r = \text{constant})}$$

et

$$W_{co} = ([Is]^T [Lss][Is] + [Is]^T [Lsr][Ir] + [Ir]^T [Lrr][Ir] + [Ir]^T [Lrs][Is])$$

Telle que [Us]	vecteur des tensions de stator ;
[Is], [Ir]	vecteurs des courants de stator et rotor
[Rs], (3 _ 3)	la matrice de résistance du stator ;
[Lss], (3 _ 3)	matrice d'inductance du stator ;
[Lsr], 3 _ (Nr + 1)	matrice d'inductance mutuelle ;
[Rr], (Nb + 1) _ (Nb + 1)	matrice de résistance du rotor ;
[Lrr], (Nb + 1) _ (Nb + 1)	matrice rotor d'inductance.

Il est important de noter que les inductances de ce modèle sont calculées en utilisant la notion de la fonction d'enroulement ce qui permet de prendre en considération la distribution non sinusoïdale des enroulements statoriques ainsi que l'inclinaison des barres rotoriques. [GHO 10]

### III. 1 Les allures temporelles des courants statoriques pour différents états

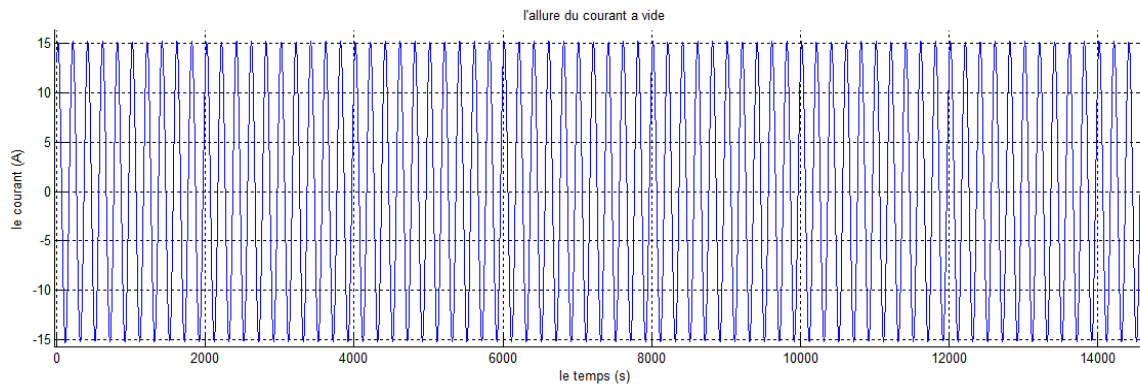
Il existe plusieurs techniques pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, l'une des plus connues la MCSA (Motor Current Signature Analysis). Cette technique a été largement utilisée dans les dernières années. Les recherches ont été particulièrement dirigées vers le spectre des courants statoriques pour deux raisons les courants sont faciles à mesurer, ils fournissent des informations sur de nombreux défauts. L'apparition ou la modification de l'amplitude des raies du spectre donne une information 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.

Dans un premier temps, on a effectué cinq essais de simulation où le moteur fonctionnait à vide, à **20%** de défaut d'excentricité statique, et à **30%** de défaut d'excentricité statique et à **50%** de défaut d'excentricité statique et à **60%** de défaut d'excentricité statique.

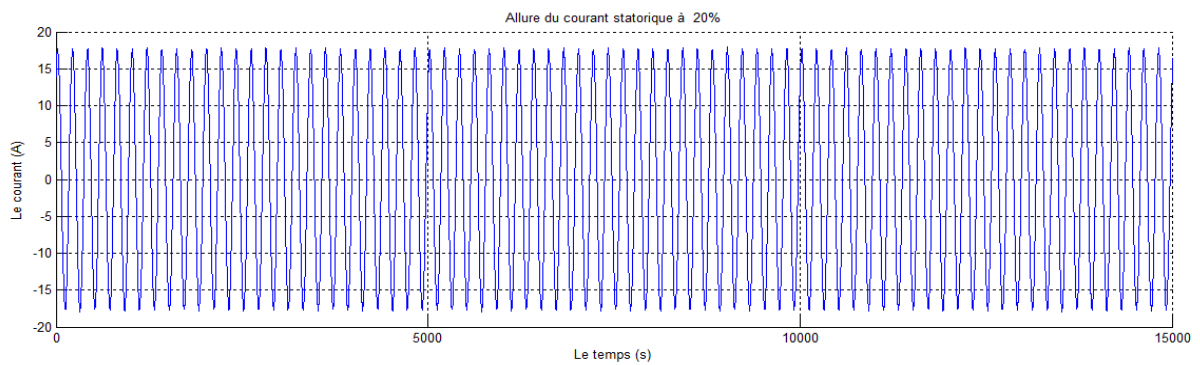
- **1<sup>ère</sup> Cas de 10% défaut statique et 10% défaut dynamique.**
- **2<sup>ème</sup> Cas de 20% défaut statique et 10% défaut dynamique.**
- **3<sup>ème</sup> Cas de 30% défaut statique et 10% défaut dynamique.**
- **4<sup>ème</sup> Cas de 50% défaut statique et 10% défaut dynamique.**
- **5<sup>ème</sup> Cas de 60% défaut statique et 10% défaut dynamique.**

➤ **Observation :**

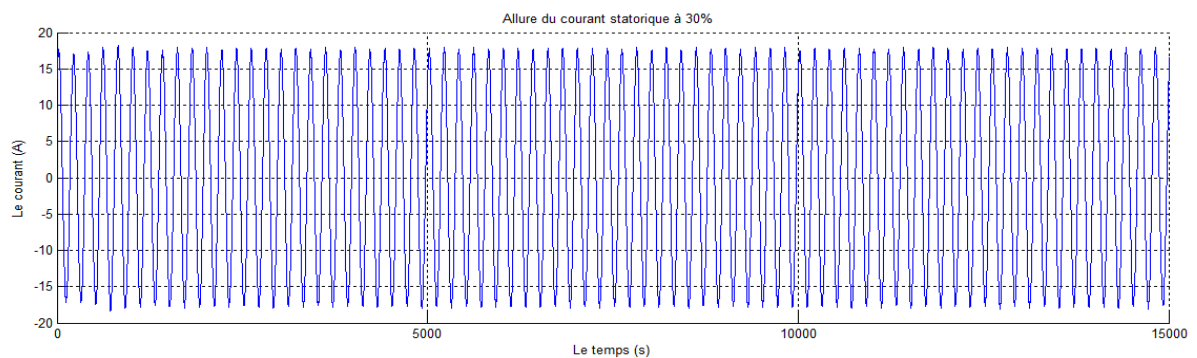
- Le premier cas correspond à l'état sain. Le 10% de ES et ED représente le défaut résiduel qui existe toujours dans les moteurs même à l'état sain.



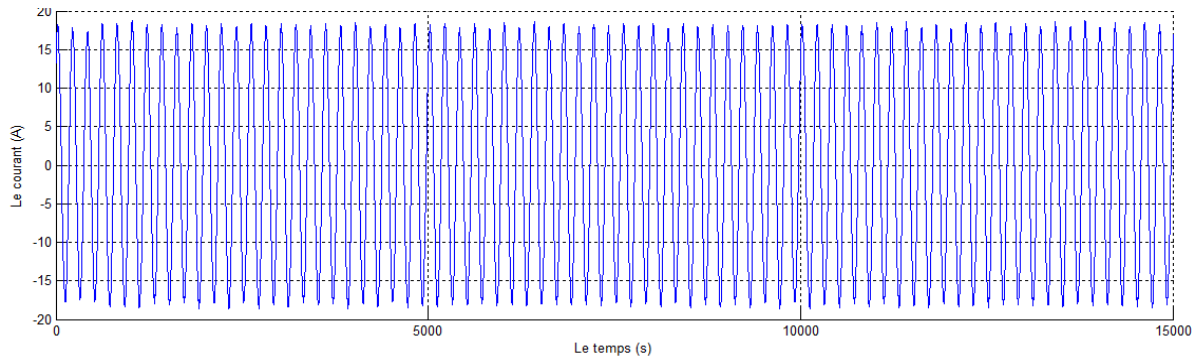
**Fig II.2 : Allure du courant statique de 10% de ES et 10 % ED**



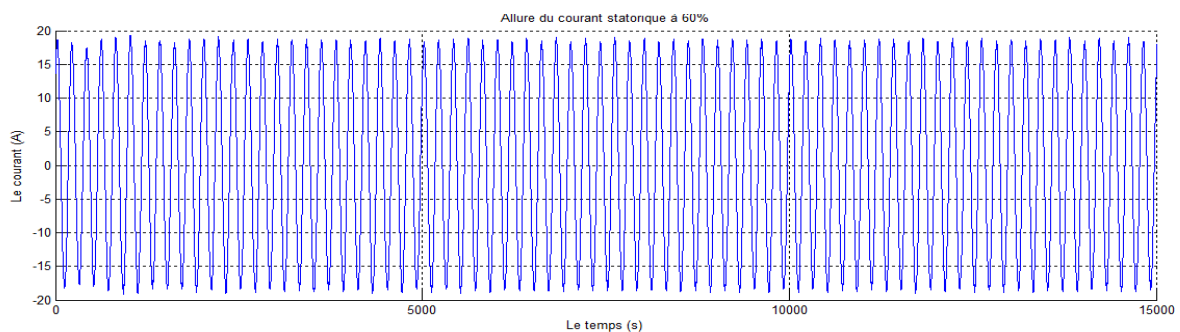
**Fig II.3 : Allure du courant statique pour 10% ED et 20% ES**



**Fig II.4 : Allure du courant statique pour 10% ED et 30% ES**



**Fig II.5: Allure du courant statique pour 10% ED et 50% ES**



**Fig II.6 : Allure du courant statorique pour 10% ED et 60% ES**

Comme on le voit, les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations sur l'état de la machine, alors il faut choisir une autre technique pour analyser ce signal. Il y a plusieurs méthodes pour effectuer l'analyse des courants, la plus utilisée est la Transformée de Fourier Rapide (FFT) qui permet une analyse fréquentielle de ce signal temporel.

### III. 2 Analyse spectrale du courant statorique

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 tels que : le couple, la vitesse, les courants, le flux, les vibrations,...

Dans ce travail, on s'intéresse à l'utilisation d'une méthode basée sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT) (outil mathématique très utilisé) ; qui permet de décrire les signaux temporels par leurs spectre de fréquence pour faire une comparaison et détecter notre harmonique et simplifier le travail ; ceci s'adapte parfaitement à notre application dans la mesure où de nombreux phénomènes associés aux défauts se traduisent par l'apparition de nouvelles fréquences liées directement au glissement ou à la modification des amplitudes des harmoniques qui existaient dans le spectre.

### ➤ La Transformée de Fourier

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

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

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

- La fréquence d'échantillonnage :  $f_e = 10000$ .
- Le temps d'acquisition :  $T_a = 10$  sec
- Le nombre des échantillons :  $N_e = T_a / t_e = f_e * T_a = 100000$  échantillons
- La résolution fréquentielle :  $\Delta f = 1/T = 1/10 = 0.1$  Hz.

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

$$X(n) = \sum_{k=1}^{N_e} X(k) e^{-j2\pi k \frac{n}{N_e}}$$

Avec  $n=1, 2, 3, \dots, N_e$ .

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

### III.3 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.3 présente les expressions générales des fréquences gouvernant chaque famille d'harmonique ainsi que leurs causes d'apparition

TAB II.1 les différents harmoniques du courant statorique

Les différents harmoniques	Les formules globales	Les causes principales
Les harmoniques du temps (TH)	$TH = \nu \cdot fs$	Ce type d'harmonique est imposé par la source.
Les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH)	$RSH = (\nu \cdot fs \pm k \cdot Nr \cdot fr)$	De la structure naturelle de la machine asynchrone à cage (la distribution discrète des encoches rotoriques).
Excentricité Faut Harmonique (EFH)	$EFH = (\nu \cdot fs \pm k \cdot fr)$	Excentricité mixte.
Rotor Bar Fault Harmonics (RBFH)	$RBFH = (\nu \pm 2 \cdot k \cdot g) \cdot fs$	L'asymétrie résiduelle du moteur au niveau du rotor.

Dans ce travail, on ne s'intéresse que par les EFH et RSH

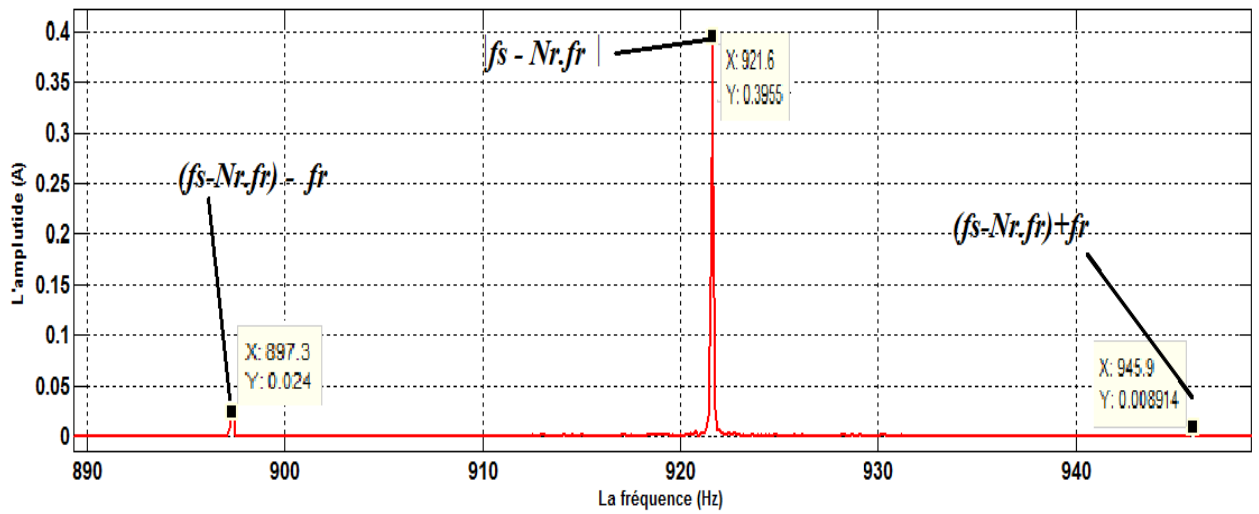
#### III.3.1 Harmoniques d'encoches rotoriques RSH :

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 discrète des barres rotoriques), Il a été démontré qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique des harmoniques dite d'encoches rotoriques ayant pour fréquences

$$RSH = (\nu \cdot fs \pm k \cdot Nr \cdot fr)$$



Et pour  $k=1$  et  $\nu =1$  on définit ce qui sont appelés 'harmoniques d'encoches principales (PSH).

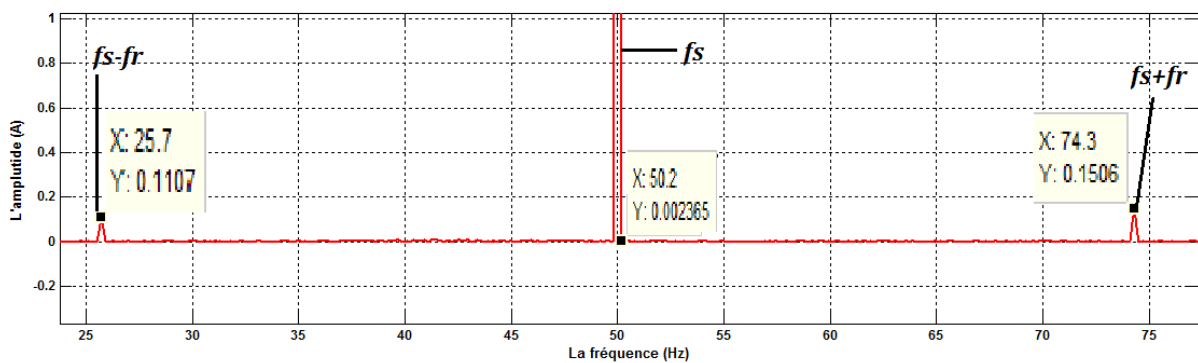


**Fig II.7 : Spectre du courant statorique à 60% de défaut d'excentricité statique (Harmonique d'encoches rotoriques)**

### III.3.2 Harmoniques d'excentricité EFH :

Cette harmonique apparaît dans le cas où l'existence d'un défaut d'excentricité dans le moteur asynchrone.

$$EFH = (\nu \cdot f_s \pm k \cdot f_r)$$



**Fig II.8 : Spectre du courant statorique à 60% de défaut d'excentricité statique (Harmoniques d'excentricité)**

#### **IV. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons vu la définition de défaut d'excentricité, ainsi que leurs types, Sa causes et la signature spectrale dans le courant statorique, en suite on a vu les allures temporelles des signaux de simulation. On a remarqué qu'elles ne donnent pas beaucoup d'informations sur l'état de moteur, alors on a passé a la FFT qui a donné de bons résultats mais, elle ne permet pas de suivre les amplitudes des harmoniques caractérisant le défaut.. Pour résoudre ce problème, on a proposé l'utilisation de la méthode de Prony, qui est une méthode de traitement de signal de haute résolution. La définition et l'application de cette méthode sera l'objet du chapitre suivant.



# Chapitre III

*Test et application de  
la méthode de PRONY*

## I. INTRODUCTION

Nous avons parlé dans le chapitre précédent sur le défaut d'excentricité, les harmoniques les plus connus dans le courant statorique et on a utilisé la FFT comme une méthode d'estimation, mais cette méthode présente des limites quant à la résolution fréquentielle qui nécessite un temps d'acquisition large. De plus, nous avons trouvé que la FFT donne seulement une seule information sur les amplitudes et les fréquences des harmoniques en utilisant un grand nombre des échantillons. Pour éviter ce problème, on a proposé d'utiliser la méthode de Prony et sa version modifiée.

## II. LES METHODES D'ESTIMATION D'HARMONIQUES

Nous avons identifié le défaut à étudier, maintenant on va voir la méthode utilisée pour analyser et estimer les harmoniques dans le courant statoriques, il existe plusieurs techniques de traitement de signal qui peuvent répondre à ces besoins. Ces techniques se divisent en deux classes :

1) Les méthodes non paramétriques : elles estiment les harmoniques directement du signal à travers des transformations spécifiques telles que : la transformé de Fourier rapide (on applique dans l'analyse spectrale du courant statorique), la transformé d'Hilbert, la méthode des ondelettes,...

2) Les méthodes paramétriques : elles utilisent un modèle mathématique pour représenter le signal puis, elles estiment les paramètres de ce modèle à partir des échantillons disponibles. On peut citer : la méthode de Pesarenko, l'algorithme M.U.S.I.C (Multiple Signal Classification), la méthode ESPRIT (Estimation of Signal Paramètres via Rotation Invariance Technique), la méthode de Prony...

### II.1 La Méthode de Prony Classique

Cette méthode, remontant à 1795, connaît un regain d'intérêt d'une part grâce à l'évolution des moyens de calculs et d'autre part grâce à ses capacités à résoudre des problèmes dans les domaines où les méthodes classiques sont inefficaces. La méthode de Prony classique est une technique de traitement de signal qui permet d'extraire les caractéristiques d'harmoniques en résolvant un ensemble d'équations non linéaires.

Supposant un signal  $x(t)$  de  $N$  échantillons, la méthode de Prony exprime les données d'échantillonnage en une combinaison linéaire de  $P$  fonctions exponentielles complexes :

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^P h_k z_k^{n-1} \quad \text{Equ III.1}$$

$$\text{Avec : } h_k = A_k e^{j\varphi_k} \quad \text{et} \quad z_k = e^{(\alpha_k + j2\pi f_k)T_s}$$

Où  $T_s$  est la période d'échantillonnage. Les paramètres du modèle  $A_k$ ,  $f_k$ ,  $\varphi_k$   $\alpha_k$  et représentent respectivement l'amplitude inconnue, la fréquence, l'angle de phase et de facteur d'amortissement de la  $k^{\text{th}}$  composante. L'équation ci-dessus est une équation non linéaire qui peut être résolue en utilisant la méthode de Prony.

En fait, la méthode de Prony consiste à construire une équation de différence homogène et linéaire à coefficients constants (avec  $a_0 = 1$ ) :

$$\sum_{k=0}^p a_k x[n - k] = 0 \tag{Equ III.2}$$

Dans la méthode de Prony classique, le nombre d'échantillons de données disponibles est supposé être égal aux paramètres inconnus du modèle, par conséquent, l'équation de différence linéaire Equ III.2 peut être exprimée sous forme matricielle de la façon suivante :

$$X.A = -Y \tag{Equ III.3}$$

$$x = \begin{bmatrix} x[p] & \cdots & x[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[2p - 1] & \cdots & x[p] \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x[p + 1] \\ \vdots \\ x[2P] \end{bmatrix}$$

Les paramètres  $a_k$  sont déterminés en résolvant Equ.III.3. Ensuite, un polynôme caractéristique avec des racines  $z_k$  peut être formé en utilisant les paramètres de prédiction  $a_k$  comme suit :

$$F(z) = \sum_{k=0}^p a_k z^{p-k} \tag{Equ III.4}$$

Par conséquent, le facteur d'amortissement et la fréquence peuvent être déduits directement partir des racines de polynôme Equ III.4

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

Enfin, les racines  $z_k$  sont utilisées pour écrire les P équations d'Equ III.1 sous une forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{p-1} & z_2^{p-1} & \cdots & z_p^{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(1) \\ \vdots \\ x(P) \end{bmatrix} \tag{Equ III.5}$$

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

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

Il est à noter que la performance de la méthode de Prony classique devient instable en présence de bruit. Cela est dû au fait qu'il n'y a aucune erreur considérée dans le modèle. Cependant, le signal réel est toujours noyé dans le bruit. Pour prendre en considération cette situation, l'équation Equ III.1 devrait être modifiée pour la forme suivante :

$$x[n] = \hat{x}[n] + \varepsilon \qquad x[n] = \sum_{k=1}^P h_k z_k^{n-1} + \varepsilon[n] \qquad \text{Equ III.6}$$

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

$$E = \sum_{n=1}^N |\varepsilon[n]|^2 = \sum_{n=1}^N |x[n] - \sum_{k=1}^P h_k z_k^{n-1}|^2 \qquad \text{Equ III.7}$$

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 Equ III.2 doit être modifiée comme suit :

$$\sum_{k=0}^P a_k x[n-k] = \varepsilon[n] \qquad \text{Equ III.8}$$

Les  $N$  échantillons de données disponibles sont utilisés pour réécrire Equ III.8 sous une forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} x[P] & \cdots & x[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[N-1] & \cdots & x[N-P] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_P \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x(P+1) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} \qquad \text{Equ III.9}$$

Le vecteur des paramètres inconnu  $a_k$  est choisi pour minimiser l'erreur quadratique totale de prédiction linéaire. La minimisation peut être résolue 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 d'équations linéaires Equ III. 5 devrait être modifiées sous la forme compacte suivante :

$$Z.H=C$$

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ z_1 & \dots & z_p \\ \vdots & \dots & \vdots \\ z_1^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_p \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} x(1) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} \quad \text{Equ III.10}$$

## II.2 L'ALGORITHME DE PRONY

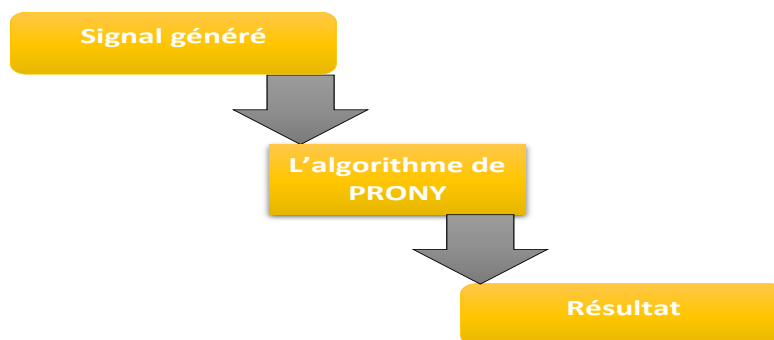
L'algorithme de Prony a été implémenté sur Matlab et pour vérifier son fonctionnement, on a utilisé des signaux générés de différents degrés de complexité.

### II.2.1 Test l'algorithme de PRONY sur un signal généré mono-harmonique

Le signal de test est généré avec une fréquence d'échantillonnage égale à 10 kHz. Ce signal est défini comme suit :

$$Is(t) = 10. \sin(2\pi. 50. t)$$

L'objectif de ce paragraphe est d'estimer l'amplitude et la fréquence de ce signal, c'est-à-dire, le 10A et la 50Hz tout en comparant avec les résultats obtenus par la FFT.



**Fig. III. 1 : schéma général pour le programme de l'estimation d'harmoniques**

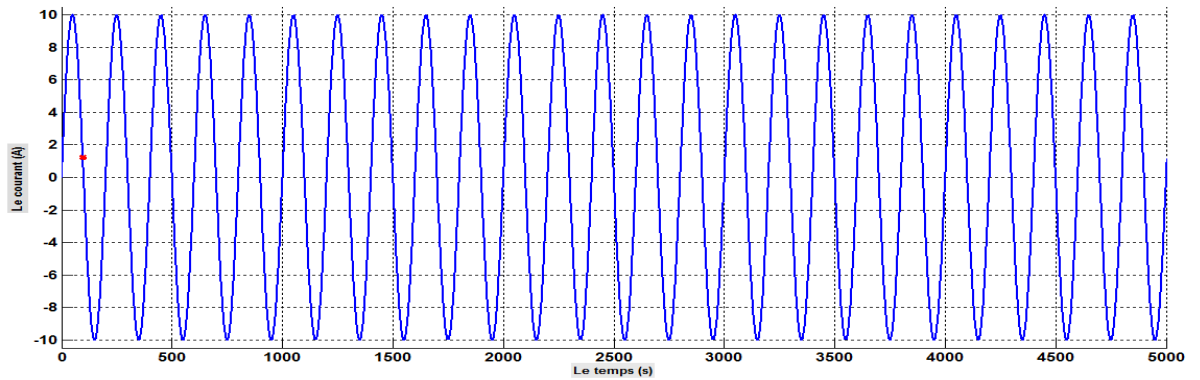


Fig. III.2 : Signal généré

On à estimer la fréquence fondamentale  $f_s=50$  Hz avec FFT

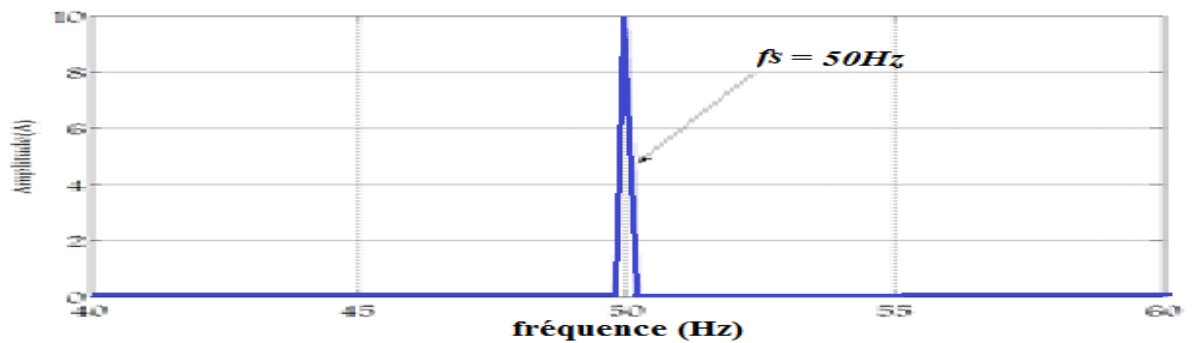


Fig. III.3 : Spectre du signal génères ( $f_s = 50$  Hz)

TAB. III.1 : Amplitude et Fréquence estimées par PRONY et FFT

		Valeur réelle	Valeur estimée	Erreur $E=V.r-V.e$	Nombre de points utilisés
<i>Méthode de Prony</i>	<b>Amplitude</b>	10	10.000	0	10 Echantillons
	<b>Fréquence</b>	50	50.000	0	
<i>Méthode de la FFT</i>	<b>Amplitude</b>	10	10.000	0	8000 Echantillons
	<b>Fréquence</b>	50	50.000	0	

D'après le tableau, on remarque que l'algorithme de Prony nécessite seulement 10 échantillons pour donner des résultats exacts par contre, la FFT demande au minimum 8000 échantillons pour donner le même résultat.



### II.2.2 Méthode de Prony avec fenêtre glissante

Jusqu'à maintenant, on remarque que la méthode de Prony donne une seule information sur l'amplitude et la fréquence des harmoniques quel que soit le nombre des échantillons. Afin de suivre l'évolution temporelle de ces deux grandeurs, on a proposé la méthode de Prony à fenêtre glissante. Cette méthode consiste à subdiviser le signal en plusieurs fenêtres de petites tailles ; et chaque fenêtre sera analysée par la méthode de prony. Le principe de cette méthode est présenté dans la figure III.10. 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. 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.

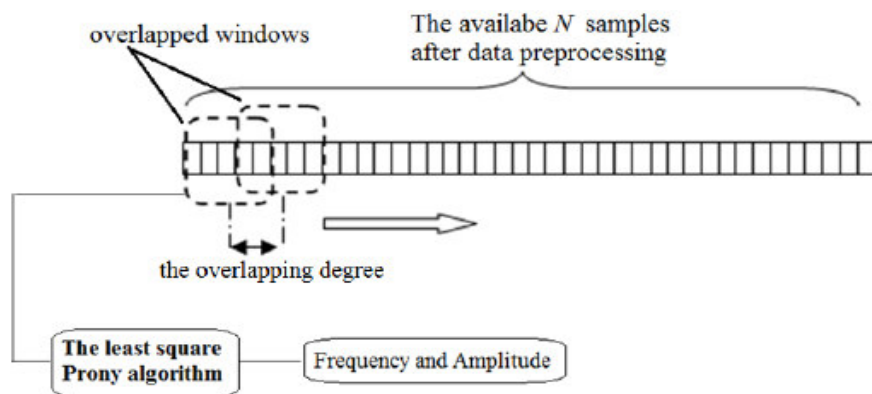
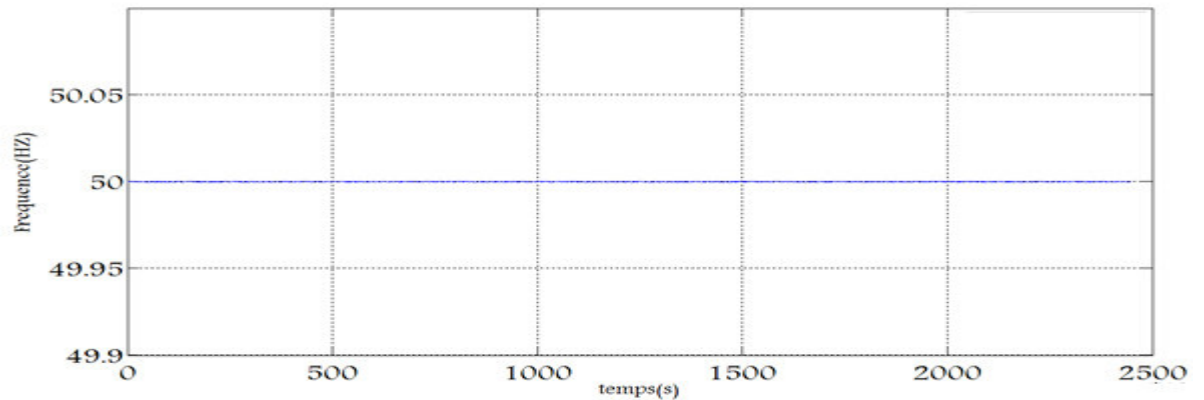
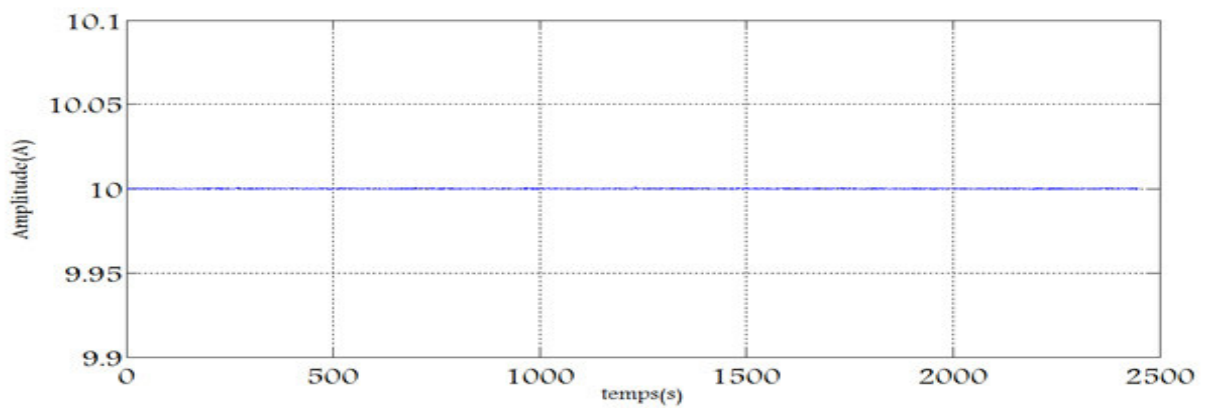


Fig. III.4 : Méthode de Prony à fenêtre glissante.

Le même signal générique utilisé précédemment a été utilisé pour tester la méthode de Prony à fenêtre glissante. Nous avons choisi une fenêtre de 50 échantillons qui déplace d'un pas égal à 1 échantillon. L'ordre du modèle est choisi toujours à  $P=3$  car on a seulement un harmonique à estimer.



**Fig. III.5 : Fréquence estimée par la méthode de Prony avec fenêtre glissante**



**Fig. III.6 : L'Amplitude estimée par la méthode de Prony avec fenêtre glissante**

On remarque dans les deux figures que représentent l'évolution de l'amplitude et la fréquence estimées par la méthode PFG la grande précision des résultats obtenus. A partir de ce résultat le problème d'estimation d'un seul harmonique est simplifié

Et pour confirmer la précision et la bonne estimation de l'algorithme de PRONY on a testé avec un signal très compliqué c'est un signal multi-harmonique

### II.2.3 Test la méthode sur un signal généré multi-harmoniques

Ce signal comporte trois harmoniques généré avec une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz. Il est défini comme suit :

$$Is = 10 \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t) + 1.5 \cdot \sin(2\pi \cdot 26 \cdot t) + 1 \cdot \sin(2\pi \cdot 74 \cdot t)$$

L'objectif est d'estimer la fréquence et l'amplitude du fondamental.

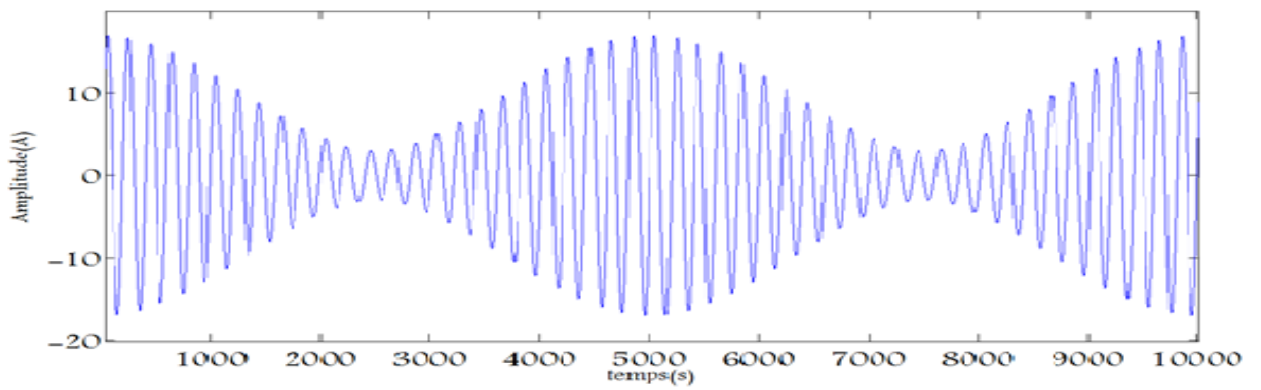


Fig. III.7 : signal multi-harmoniques

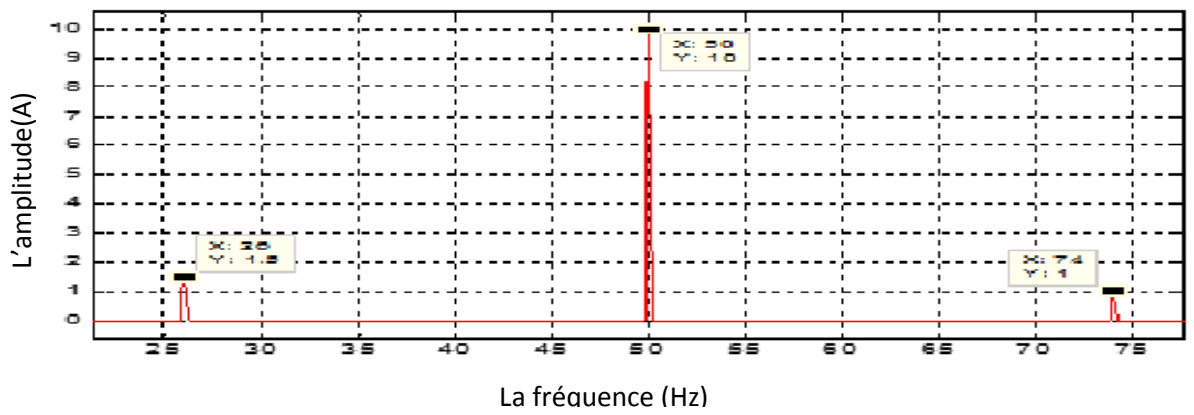


Fig III.8 : Spectre du signal générique multi-harmonique

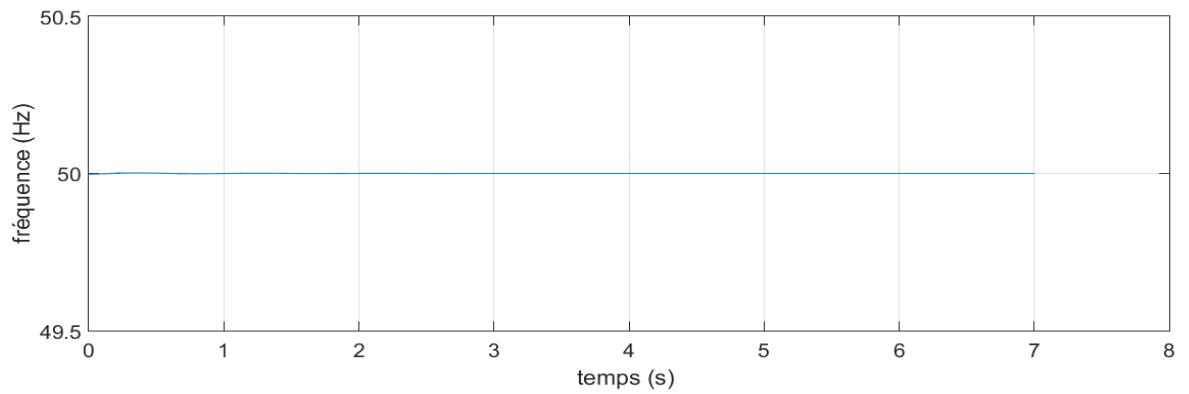
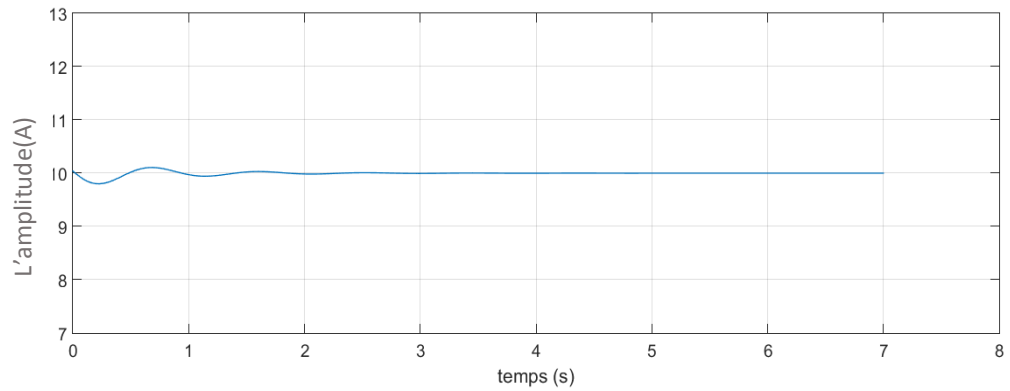


Fig. III.9 : Fréquence estimée d'un signal compliqué par la méthode de PFG



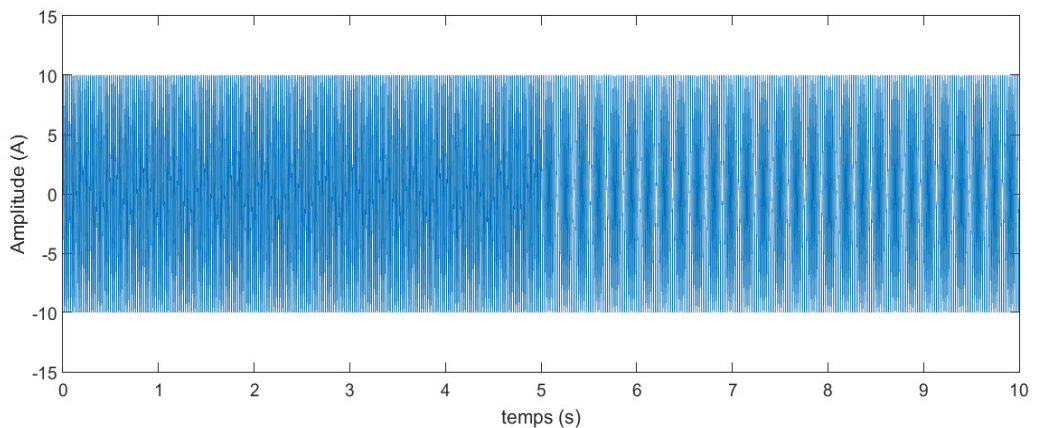
**Fig. III .10 : Amplitude estimée du signal multi-harmonique par PFG.**

**II.2.4 Test la méthode sur un signal non-stationnaire**

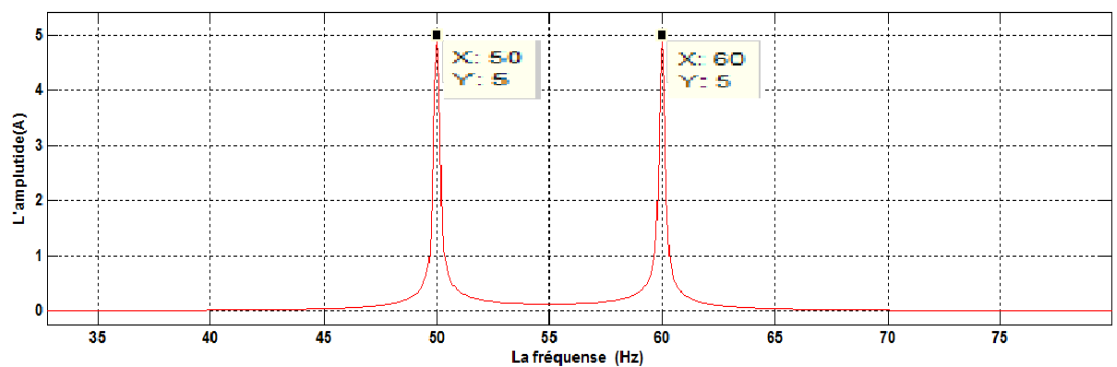
Pour confirmer l'efficacité de la méthode de PFG on a utilisé un signal généré non-stationnaire par deux fréquences successives défini comme suit :

$$I_s(t) = 10. \sin(2\pi. f. t)$$

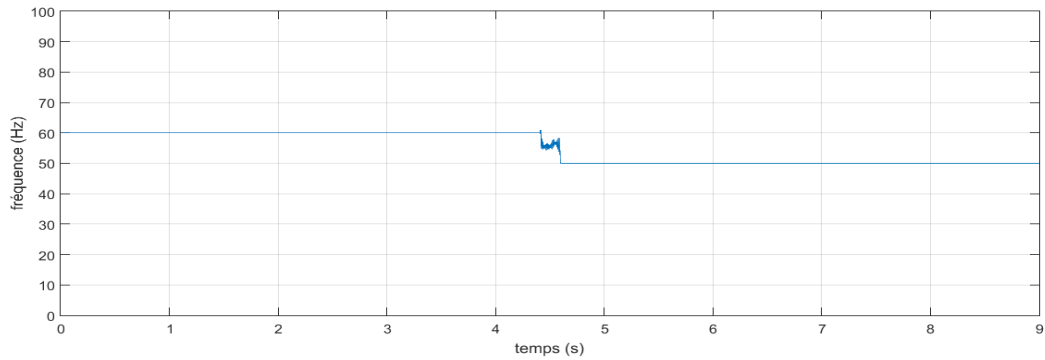
Où la fréquence f prend la valeur 60 puis 50 Hz dans l'intervalle d'acquisition.



**Fig. III.11 : L'allure temporelle du signal génère compliqué (non-stationnaire)**



**Fig. III.12 : Spectre du signal no-stationnaire**



**FigIII.13 : Fréquence estimée d'un signal compliqué (non-stationnaire) par la méthode de PFG.**

**II.2.5 Test de la méthode Prony sur un signal bruité**

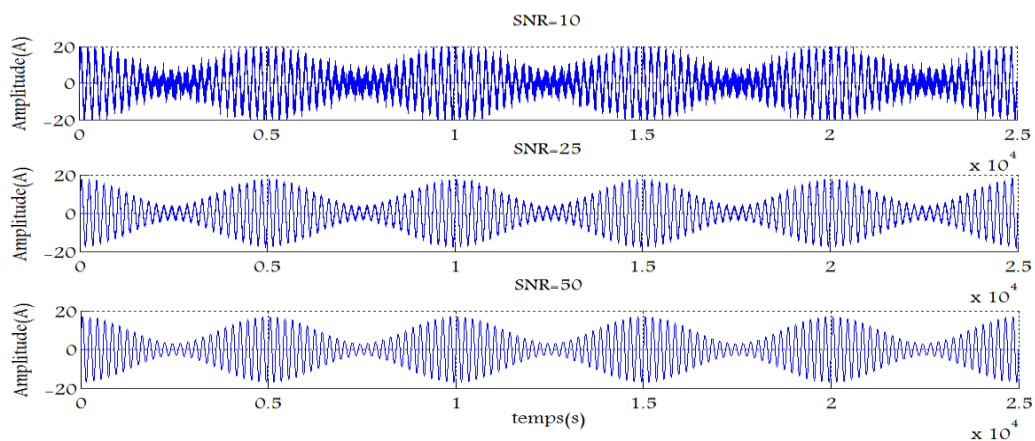
Et maintenant, nous allons tester la méthode de Prony sur un signal avec différent degrés de bruit. L'objectif est d'étudier l'effet du bruit sur les performances de la méthode PFG.

Pour étudier la réaction de la méthode de Prony pour un signal bruité, nous avons utilisé le même signal à trois composantes mais cette fois, on a ajouté un signal de bruit  $b(t)$ .

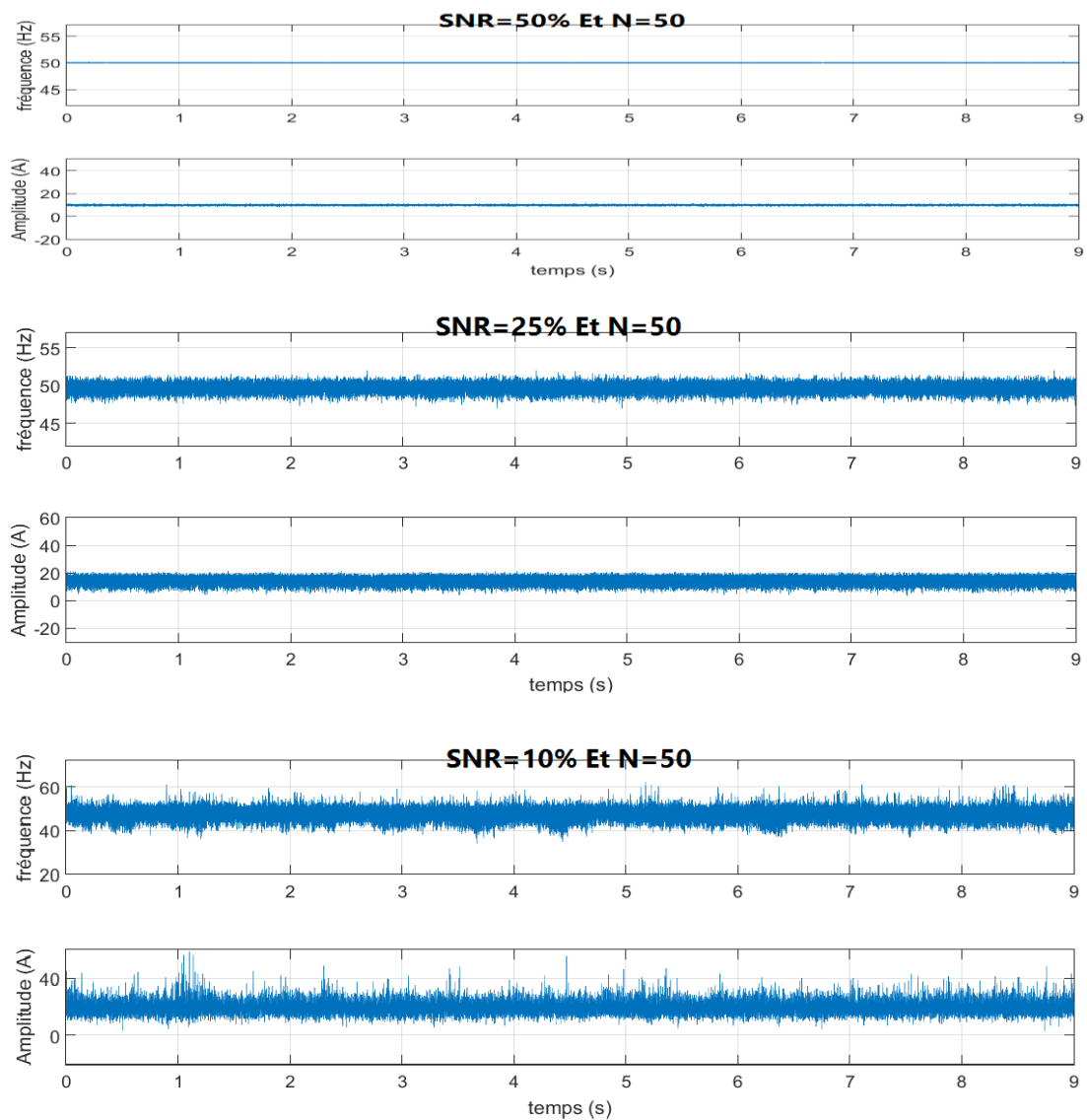
$$Is(t) = 10. \sin(2\pi. 50. t) + 5. \sin(2\pi. 48. t) + 2. \sin(2\pi. 52. t) + b(t)$$

Le degré de bruit est mesuré par son SNR (signal-to-noise ratio) qui est défini par :

$$SNR = 10\log_{10} \left[ \frac{\text{Puissance de Signal}}{\text{Puissance de Bruit}} \right] \quad \text{Equ III.12}$$



**Fig III.14 : Les allures temporelles du signal sans bruit à trois composantes et trois degrés de SNR.**



**FigIII.15 : Fréquence et Amplitude estimées d'un signal générique à trois composants avec différents SNR.**

On observe que notre méthode estime bien l'amplitude et la fréquence même pour des signaux bruités. On remarque aussi que l'erreur augmente avec l'augmentation du niveau de bruit.

Après tous les tests et selon les résultats obtenus, nous avons conclu que la méthode de Prony répond bien aux objectifs définis et elle permet d'estimer toutes les caractéristiques des harmoniques à partir d'un petit nombre des échantillons.

Dans tous les tests la méthode de Prony proposée présente une grande précision. Mais ce n'est pas des résultats réels il y a une erreur entre la fréquence réelle et la fréquence estimée

Ces erreurs de précision de l'estimation est évaluées par l'erreur relative définie par :

$$E_{\text{fréq}} (\%) = 100 \left( \frac{f_{\text{réel}} - f_{\text{estimé}}}{f_{\text{réelle}}} \right) \quad \text{Equ III.13}$$

$$E_{\text{ampli}} (\%) = 100 \left( \frac{A_{\text{réel}} - A_{\text{estimé}}}{A_{\text{réelle}}} \right) \quad \text{Equ III.14}$$

Nous avons défini l'erreur relative moyenne (MRE) comme paramètre d'évaluation. Le MRE est définie comme suit :

$$MRE_{\text{Freq/Ampl}} = \frac{\sum E_{\text{Freq/Ampl}}}{Ne} \quad \text{Equ III.15}$$

### III. APPLICATION DE LA METHODE DE PRONY

Maintenant on va passer à l'application de ce programme sur un signal du courant statorique pour détecter le défaut d'excentricité. Le but est la détection de la présence d'un défaut d'excentricité par la méthode de prony. L'idée consiste à estimer l'amplitude des signatures spectrales de ce défaut. Les signaux de simulation utilisés sont obtenus à partir d'un modèle mathématique multi-enroulement (chapitre II).

Le moteur est connecté en étoile, Le signal de courant est échantillonné à la fréquence de 10 kHz pendant 10 s en plein charge

**TAB III.2 La caractéristique de la machine asynchrone dans notre travail**

Les caractéristiques	La valeur
La puissance	11 Kw
Nombre des pôles	4 pôles
Nombre des barres	40 barres
Alimentation 3~	400 V/50 Hz

Il est connu que la fréquence des EFH de basses fréquences existe dans un intervalle dont les limites dépendent du glissement (g), le nombre de paires de pôles (P) et la fréquence d'alimentation. La fréquence des EFH est donnée par la formule suivante :

$$F_{EFH} = |v.fs - k.fr| \quad \text{tel que : } fr = fs \cdot \frac{(1-g)}{P}$$

Pour bien expliquer, on prend le cas du notre moteur de 3KW, 28 barres et 4 pôles où la vitesse en pleine charge est :  $N_n=1430$  tr/min tandis qu'à vide  $N_0=1497$  tr/min. Par conséquent, le glissement  $g_{min}$  et  $g_{max}$  seront :

$$g_{max} = \frac{1500-1430}{1500} = 0.0466 \quad g_{min} = \frac{1500-1497}{1500} = 0.002$$

En se basant sur ces deux valeurs du glissement, on peut définir les limites des intervalles de recherches correspondant aux EFH1 et EFH2 :

$$EFH1 = fs + fr \in [fs + \frac{(1-g_{max}).fs}{P} \longrightarrow fs + \frac{(1-g_{min}).fs}{P}]$$

$$EFH2 = fs - fr \in [fs - \frac{(1-g_{max}).fs}{P} \longrightarrow fs - \frac{(1-g_{min}).fs}{P}]$$

Par conséquent :

$$EFH1 \in [73.83 \text{ Hz} \text{ < > } 74.95 \text{ Hz}]$$

$$EFH2 \in [26.17 \text{ Hz} \text{ < > } 25.05 \text{ Hz}]$$

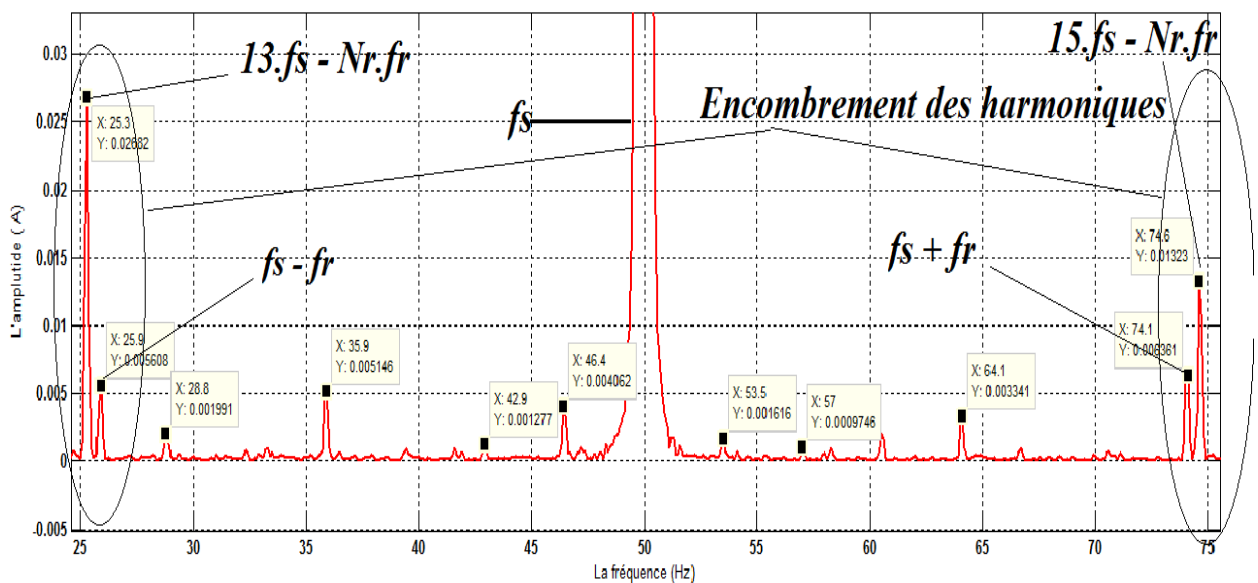


Fig III.16 : Spectre linéaire du courant statorique expérimentale à l'état sain, moteur 3kW (visualisation d'EFH)



Selon la figure III.16, on remarque que la zone autour de l'harmonique fondamental est très riche en harmoniques ce qui représente un problème pour la localisation fine des EFH1 et EFH2. En effet, cette figure montre clairement que les deux harmoniques EFH sont très proches des harmoniques RSH ( $13fs - Nr.fr$  et  $15fs + Nr.fr$ ) ce qui rend très difficile de différencier entre ces deux composantes spectrales. Afin d'éviter ce problème, on a proposé d'aller vers les signatures de défauts d'excentricité de haute fréquence

$$EFH3 = PSH - fr$$

$$EFH4 = PSH + fr$$

### III.1 Détection de défaut d'excentricité par prony

On a appliqué l'algorithme de Prony sur les signaux de simulation pour détecter le défaut d'excentricité à partir de l'harmonique EFH3

- Cas de 60% ES et 10% ED

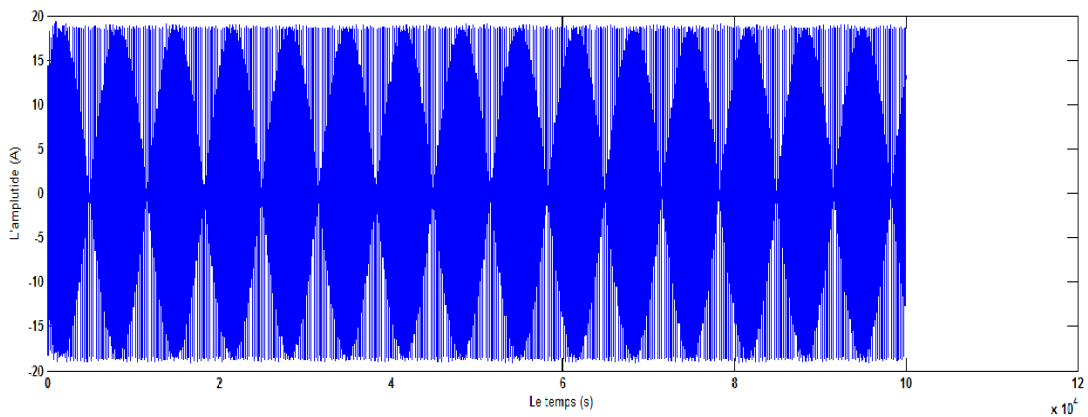


Fig III.17 : allure temporelle du courant statorique en pleine charge Avec 60% ES et 10% ED

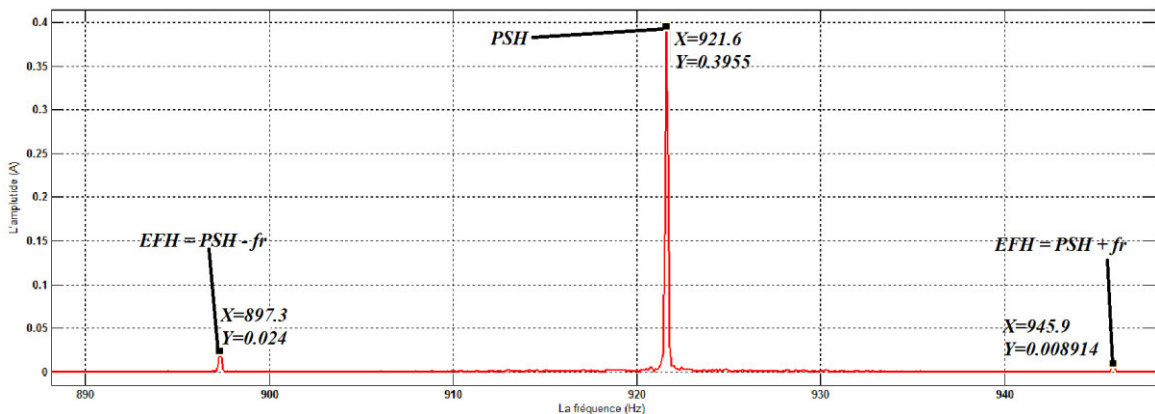
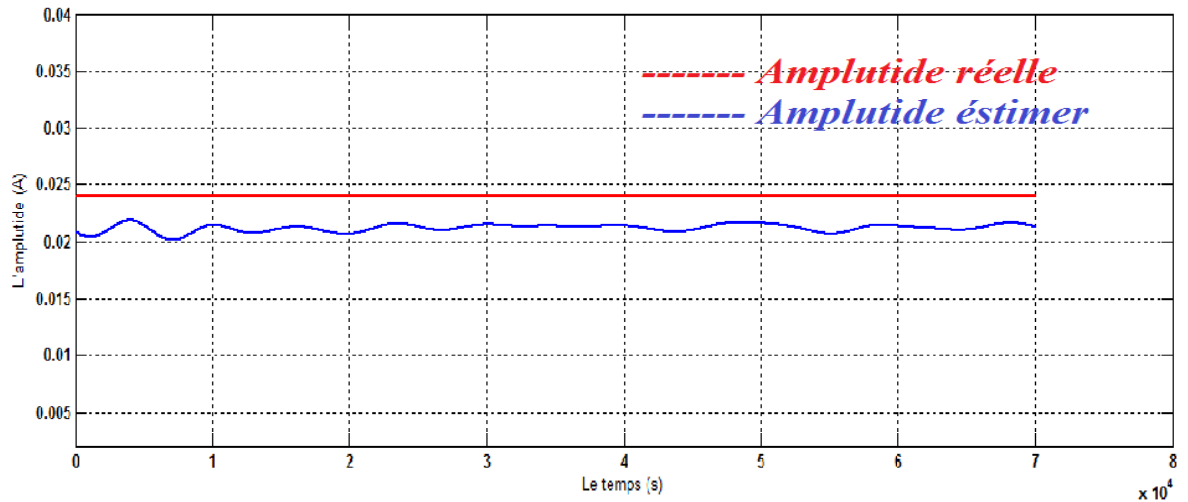
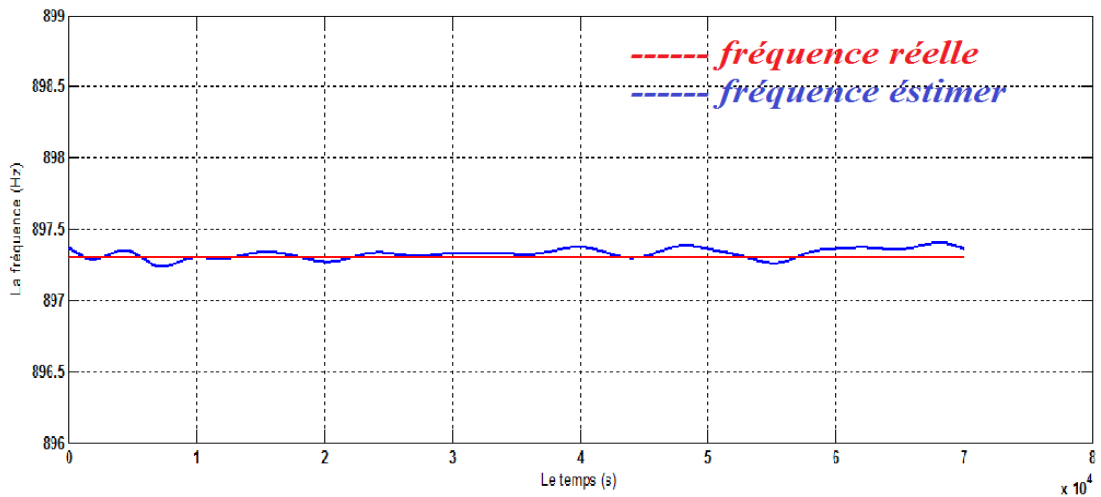


Fig III.18 : spectre de signal de simulation avec 60% ES et 10% ED

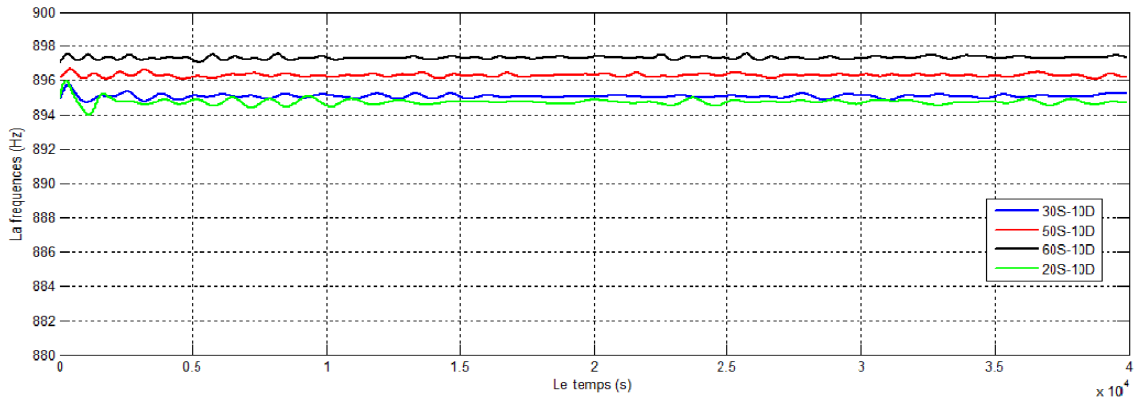


**Fig III.19 : Amplitude estimée de l'harmonique EFH3 pour 60% ES et 10% ED**



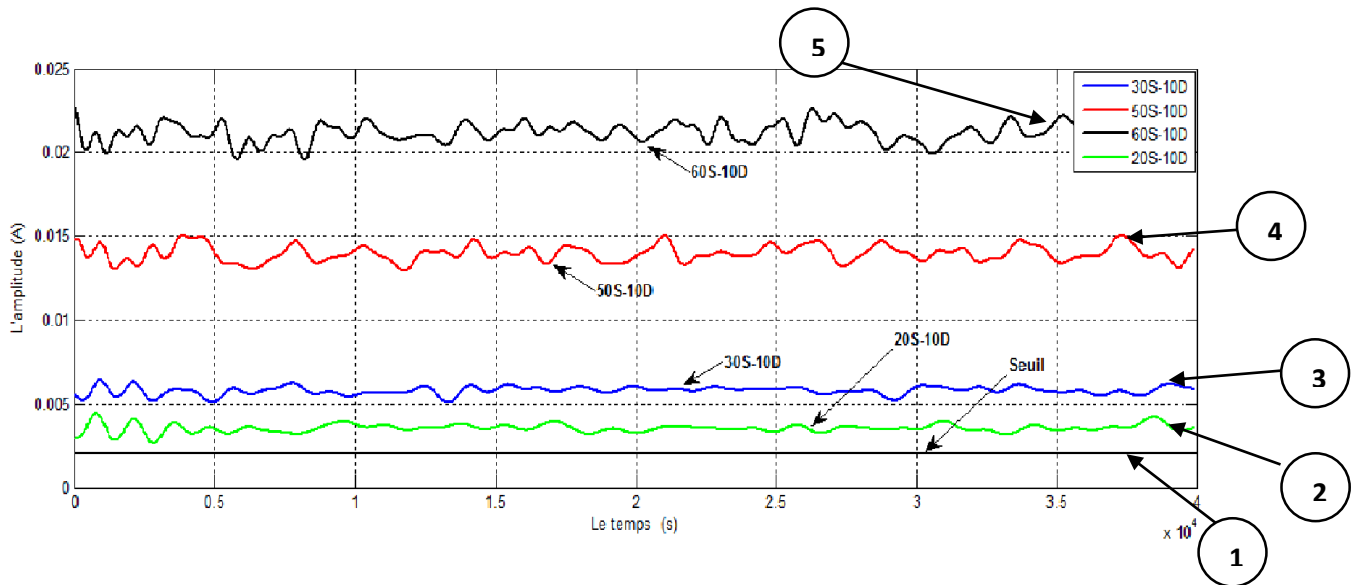
**Fig III.20 : Fréquence estimée de signal de simulation avec 60% ES et 10% ED**

Et après tous les essais de tous les degrés de défaut d'excentricité l'en résume dans la Fig III.21 et Fig III.22



**Fig III.21 : évolution temporelle de la fréquence EFH3 pour différents degrés d'excentricité**

La Fig III.21 représente l'évolution temporelle des fréquences de l'harmonique EFH3 estimée par la méthode de Prony pour différents degré d'excentricité. On remarque que les résultats obtenus sont en bonnes concordance avec les valeurs théoriques.



**Fig III.22 : évolution temporelle de l'amplitude de différents degrés de défaut d'excentricité**

Notre figure (Fig III.22) représente l'évolution temporelle de l'amplitude de l'harmonique EFH3. Nous avons considéré l'allure n° 1 comme un référence (10% ES et 10 % ED l'amplitude du seuil), en remarque que il y a une augmentation dans l'amplitude dans le cas n 2 et Ceci est une indicateur d'existence de défaut d'excentricité ; et la même chose pour les restes des allures.

Il est clair que l'amplitude de l'harmonique EFH3 augmente significativement avec l'augmentation de la sévérité du défaut d'excentricité ce qui représente un bon indicateur de ce défaut.

➤ **Indice relative de défaut d'excentricité**

On a choisi un indice pour faire une comparaison entre les différents signaux en le définissant le rapport entre la valeur de l'amplitude réelle et l'amplitude du seuil :

$$I_{DE} = \frac{A_{réelle}}{A_{seuil}}$$

Le principe de cette idée c'est comparé par 1 et telle que :

- $I_{DE} > 1$  .... La présence de défaut d'excentricité
- $I_{DE} \leq 1$  ... Il n'existe pas de défaut d'excentricité

**TAB III.3 : l'indicateur de défaut**

	Amp seuil	Amp estimé	Indicateur de déf d'excentricité $I_{DE}$
<b>10% ED 60% ES</b>	<b>0.002</b>	<b>0.022</b>	<b>11</b>
<b>10% ED 50% ES</b>	<b>0.002</b>	<b>0.014</b>	<b>7</b>
<b>10% ED 30% ES</b>	<b>0.002</b>	<b>0.0057</b>	<b>2.85</b>
<b>10% ED 20% ES</b>	<b>0.002</b>	<b>0.00348</b>	<b>1.14</b>
<b>00% ED 00% ES</b>	<b>0.002</b>	<b>0.000</b>	<b>0</b> <b>Il n'existe pas de défaut</b>

Ce dernier tableau montre et confirme l'existence de défaut d'excentricité en remarquant que les valeurs de l'amplitude sont supérieures de 1. Alors en confirmant qu'il y a un défaut d'excentricité.

### III. CONCLUSION

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté ce que la méthode de PRONY et comment la utiliser et en a développé cette méthode pour détecter le défaut d'excentricité après nous savons l'harmonique qui représente notre défaut mais avons tout ça en appliquant plusieurs contraintes sur cet algorithme pour tester leur efficacité et nous avons vu que les résultats sont bien et très précis.

## CONCLUSION GENERAL

Le travail qui a été présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil. Nous avons vu les principaux éléments de la machine asynchrone et après tout ça on a situé les défaillances qui infectent ce type de machines. Nous avons montré que les principaux éléments de la machine asynchrone peuvent présenter des défaillances totales ou partielles provoquant un arrêt inattendu, qui conduit à des pertes économiques considérables. Pour éviter ces problèmes, il est impératif de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats.

Nous avons vu la détection des défauts par l'approche signal s'effectue généralement par le contrôle des composantes spécifiques dans le spectre fréquentiel du signal mesuré. Et après tout ça nous avons vu les techniques classiques de traitement du signal et de détection de la défaillance dans les machines tournantes, basées sur l'analyse de Fourier ont prouvées leurs limitations en termes de résolution spectrale, ce qui nécessite l'utilisation des nouvelles techniques donnant une analyse plus précise. Alors ce problème imposé sur nous pour utiliser la méthode de Prony qui permet de suivre l'état de la machine point par point dans l'entraînement de travail et à partir des résultats nous avons conclu que cette méthode est plus répandue et plus précise.

À mon avis, je pense que cette méthode a causé une révolution dans le domaine de diagnostic. Enfin, je souhaite que je fasse le travail bénéfique aspirant à ce domaine et de ses retours avantages.

## Bibliographie

- [ABE 02] A. Abed, "*Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone*", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002.
- [SAH 10] S. Mohamed, "*Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones* ", Thèse de Doctorat, UNV Mohamed KHIDER Biskra ,2010.
- [BAC 02.a] S. Bachir S. Tnani, J. C. Trigeassou, G. Champenois, J. S. Michel, "*Diagnostic de la Machine asynchrone par Identification Paramétriques. Modélisation et Détection des Défauts Stator et Rotor*", *Revue Internationale de Génie Electrique*, Vol. 5, No. 3-4, 2002, pp. 401-430.
- [BAC 02.b] S. Bachir,» *Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique*", Thèse de Doctorat l'Université de Poitiers 2002. France
- [BOG 03] D. Bogh, J.R. Crowell and D. Stark, "*Bearings for IEEE 841 Motors*"  
IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 39, no. 6, Nov. /Dec. 2003, pp. 1578-1583.
- [FAN 05] C. H. Fang, S. K. Lin and S.-J. Wang, "*On-line Parameter Estimator of an Induction Motor at Standstill*", *ELSEVIER Control Engineering Practice* 13 (2005), pp. 535–540.
- [VAS 09] B. Vaseghi, " *contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spire* " Thèse de Doctorat de l'institut National polytechniques de Lorraine
- [MER 07] S.MERADI, " *Estimation des paramètres et des états de la machine asynchrone en vue de diagnostic des défauts rotoriques*", Mémoire de Magister en Electrotechnique université de biskra
- [BOU 09] A .Bouguerne , " *Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones*" Mémoire de Magister en Electrotechnique université mentouri – Constantine

**[GHO 05] A .GHOGGAL, "Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée :  
Modèle Dédié à la Détection des Défauts ", Mémoire de Magister en Electrotechnique  
université de Batna**

**[BIC 12] M.BICHARI," système de diagnostic des défaillances des machines  
Electriques" Mémoire de magister en génie industriel en département de Batna**

**[BIC 12] M.ARHOJDAM. "Détection des défauts électriques et mécaniques dans la  
machine asynchrone par l'analyse du courant statorique" mmoire de licence  
Professionnelle, Ecole Normale Supérieur de l'enseignement Technique - RABAT - Licence  
Professionnelle**