

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 : Electrotechnique  
Option : commande Electrique

Réf: .....

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

**MASTER**

*Thème*

**Détection des défauts d'excentricité  
dans les MAS par traitement de  
signal du courant statorique**

Présenté par :  
TALHA mouhamed El-Amine  
Soutenu le : Juin 2018

Devant le jury composé de :

Mr. SRAIRI Kamel  
Mr. SAHRAOUI Mohamed  
Mme. BOUMARAF Rabia

Pr  
M.C.A  
M.C.A

Président  
Encadreur  
Examineur

**Année universitaire : 2017 / 2018**

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 : Electrotechnique  
Option : commande Electrique

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

**MASTER**

*Thème*

Détection des défauts d'excentricité dans les MAS par  
traitement de signal du courants statorique

**Présenté par :**

TALHA Mouhamed El Amine

**Avis favorable de l'encadreur :**

SAHRAOUI Mohamed Signature

**Avis favorable du Président du Jury**

Pr. SRAIRI Kamel

Signature

**Cachet et signature**



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : commande Electrique

## *Thème :*

Détection des défauts d'excentricité dans les MAS par traitement de signal du courants statorique

Proposé par : TALHA Mouhamed El Amine

Dirigé par : SAHRAOUI Mohamed

### RESUMES (Français et Arabe)

#### Résumé

L'analyse des signaux du courant statorique du moteur asynchrone 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 la chaîne de production. Ce travail traite la détection de défaut d'excentricité dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. La technique utilisée est celle basée sur l'analyse spectrale du courant statorique (MCSA) qui appartient à l'approche signal. La détection de ce type de défaut se fait généralement via la suivi des valeurs de certains indices définis en utilisant les amplitudes des harmonique caractérisant le défaut.

Dans ce sens, une étude analytique a été développer afin d'identifier les différents harmoniques constituant le contenu spectrale des courants statoriques à l'état sain et avec défaut. Ensuite, plusieurs indices ont été définis. Une étude comparative entre ces indice a été effectuée dont le but est de classer le ou les meilleurs indices qui peuvent donner une information sûr est claire sur l'état de santé de la machine.

#### ملخص

لقد أصبح تحليل إشارات التيار للعضو الساكن في المحرك غير متزامن بطريقة (MCSA) وهي تقنية تستخدم على نطاق واسع لتقييم الوضع الصحي للمحرك غير متزامن من أجل تجنب الأعطاب ، والتدخل فقط عند الضرورة وخلال توقف برنامج الإنتاج. في هذا السياق ، تم تطوير دراسة تحليلية لتحديد التوافقيات المختلفة التي تشكل المحتوى الطيفي للتيارات الساكنة في الحالة الصحية وفي حالة وجود عطب . ثم تم تحديد عدة مؤشرات, وقد أجريت دراسة مقارنة بين هذه المؤشرات والغرض منها هو تصنيف أفضل المؤشرات التي يمكن أن تعطي معلومة واضحة على حالة المحرك.

## *DEDICACE*

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

*A ma Chère Mère , source de tendresse*

*A mon Père , qui m'encourage*

*Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines  
m'ont permis de vivre ce jour.*

*A mon Frères et mes sœurs*

*A ma tante et ma grand-mère et mon grand-père et toute la  
famille TALHA*

*A tous mes chers amis (es)*

*A tous ceux qui ont une bonne impression dans mon cœur,  
Comme signes d'amour et respect.*

*Mouhamed El Amine*

## 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. SRAIRI Kamel**, d'avoir accepté la présidence de jury de soutenance.*

***Mr. BOUMARAF rabia**, 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.*

*Mes derniers mots s'adressent tous particulièrement à ma famille : mon père, ma mère, mes frères et ma sœur.*

***Liste des tableaux***

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

***Tableau I.1 les différents harmoniques du courant statorique***

***Tableau III.1 la fréquence des harmonique EFH1 et EFH2***

***Tableau III.2 :les amplitude de EFH1et EFH2 en utilisant tous les échantillons (100000)***

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

***Tableau III .4 sensibilités des Indicateur à la l'apparition de défaut***

***Tableau III.5 : Les indicateurs de défaut d'excentricité***

**Liste des figures**

**Figure I.1 :**Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....3

**Figure I.2 :**Stator d'une machine asynchrone.....3

**Figure I.3:**Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone.....4

**Figure I.4 :**Stator et Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone.....4

**Figures I.5 :**Évolution du pourcentage des défauts pendant une décennie.....6

**Figure I.6 :**Représentation des différents défauts statoriques possibles .....7

**Figure I.7 :**Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.....9

**Figure I.8 :**Les points de mesures.....10

**Figure II.1 :**Allure temporelle du courant pour : A) le moteur à vide , B) 20% de la charge, C) 60% de la charge, D) 100% de la charge.....14

**Figure II.2 :**Les harmoniques TH.....16

**Figure II. 3 :**Les harmoniques de RSH.....17

**Figure II.4 :**Les harmoniques EFH.....17

**Figure II.5 :**Les harmoniques RBFH.....18

**Figure III 1 :** L'excentricité statique et dynamique d'un moteur asynchrones.....20

**Figure. III 2 :** représente les différentes étapes constituant l'algorithme proposé pour la détection de défauts d'excentricité.....22

**Figure.III 3:**la position des harmonique EFH1 et EFH2.....23

**Figure .III4:**Spectre de courant statorique pour différentes charge mécanique..... 25

**Figure.III 5:**Définition des limites de l'intervalle de recherche de PSH.....25

**Figure.III 6:** Principe de la méthode basée sur une fenêtre glissante ..... 27

**Figure.III 7:**Allure temporelle du courant statorique dans le régime stationnaire .....28

**Figure.III 8 :**Allure des fréquences estimé pour 20% ES 10% ED.....28

<b>Figure.III 9 : a) amplitude de EFH 1, EFH 2 pour 20%ES 10%ED</b> .....	28
<b>Figure.III 10 :a) amplitude de EFH 3, EFH 4 pour 20%ES 10%ED</b> .....	28
<b>Figure.III 11 :Allure temporelle de courants sttorique pour 60%ES 10% ED</b> .....	29
<b>Figure.III 12: Allure des fréquences estimé pour 60% ES 10% ED</b> .....	29
<b>Figure.III 13 :a) amplitude de EFH 1, EFH 2 pour 60%ES 10%ED</b> .....	29
<b>Figure.III 14 :a) amplitude réelle et estimé de EFH 3, EFH 4 pour 60%ES 10%ED</b> .....	30
<b>Figure .III 15 :L'allure temporelle du courant statorique non stationnaire</b> .....	31
<b>Figure.III 16 :: évolution des Amplitude des EFH de l'état sain a l'état défauts</b> .....	31
<b>Figure. III 17: évolution des Amplitude des EFH pour déférente degré d'excentricité</b> .....	32
<b>Figure.III 18 : Spectre linéaire du courant statorique expérimentale à l'état sain</b> .....	33
<b>Figure. III 19 : spectre de signal de simulation avec 60% ES et 10% ED</b> .....	33
<b>Figure. III 20 :les indicateurs des défauts d'excentricité pour deux états différent</b> .....	36
<b>Figure. III 21 :les indicateurs des défauts d'excentricité pour une variation brusque de défauts</b> .....	36
<b>Figure.III 22 : Sensibilité des indicateurs à la sévérité de défauts</b> .....	37

## ***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.

$\Delta f$  : 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).

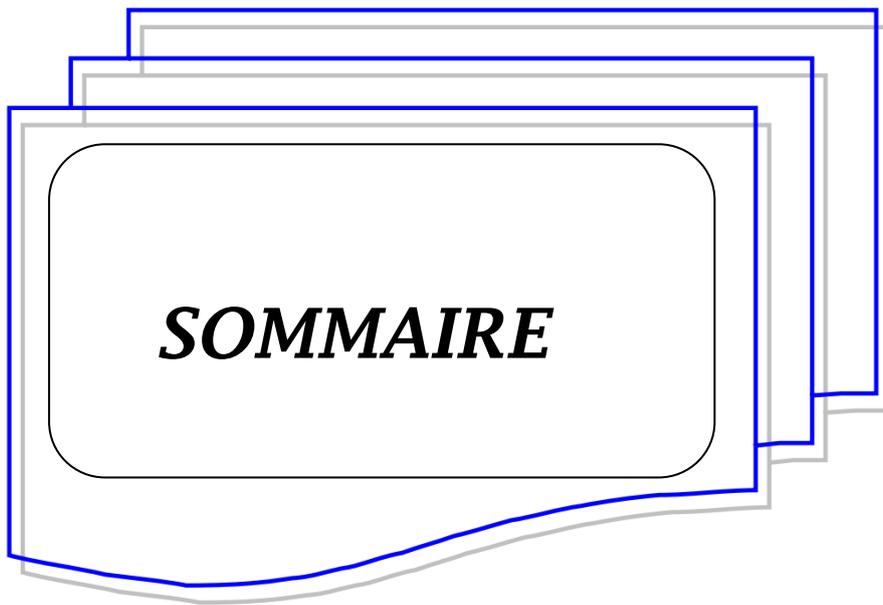
$\nu$  : L'ordre du temps harmonique.

$f_s$  : 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*

<b>Introduction générale</b> .....	I
<b>Chapitre I: Etats de L'art</b>	
I.1 INTRODUCTION.....	1
I.1. Définitions.....	1
I.1. 1 La Maintenance.....	1
I.2.1.1 Maintenance corrective .....	1
I.2.1.2 Maintenance préventive.....	1
I.2.1.3 Maintenance préventive systématique.....	2
I.2.1.4 Maintenance préventive conditionnelle .....	2
I.3 Constitution de la machine asynchrone .....	2
I.3.1 Définition .....	2
I.3.1.1 Stator.....	3
I.3.1.2 Rotor.. .....	4
I.3.1.3 Les paliers .....	4
I.4 Différents défauts dans la machine asynchrone.....	5
I.4.1 Défauts statorique .....	6
I.4.2 Défauts rotoriques.....	8
I.4.2.1 Défauts de roulements.....	8
I.4.2.2 Défauts Excentricité .....	8
I.5. Différents Méthodes de Diagnostic des machines asynchrones.....	9
I.5.1 Approche Modèle .....	10
I.5.2 Approche Signal.....	10
I.5.2.1. Méthodes basées sur le traitement de signal.....	10
I.5.2.2. Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques .....	11
I.5.2.3. Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite.....	11
I.5.2.4. Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique .....	11

I.5.2.5.Diagnostic par l'analyse du courant statorique.....11  
I.6 Conclusion .....12

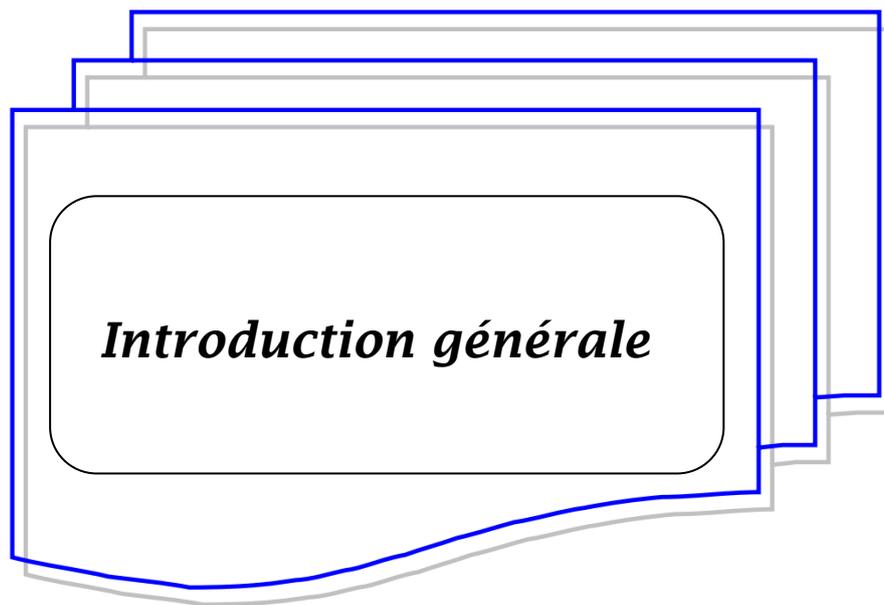
**Chapitre II: le contenu spectrale de courant statorique**

II.1. INTRODUCTION..... 13  
II.2. II.2 Les Allures temporelles des courants statoriques pour différentes charges..... 14  
II.4 Les différents harmoniques existant dans le courant statorique..... 15  
II.4.1 Harmoniques du temps TH ..... 16  
II.4.2 Harmoniques d’encoche rotoriques RSH ..... 17  
II.4.2.1.Définition PSH..... 17  
II.4.3Harmoniques de défaut d’excentricité (EFH) ..... 17  
II.4.4 Les harmoniques des défauts des cassures de barres RBFH .....18  
II.5 Conclusion .....18

**Chapitre III :détection de défauts d’excentricité par la méthode de la FFT glissante**

III.1 INTRODUCTION ..... 19  
III.2 Defaut d’excentricite .....19  
III.3. La methode de la fft ..... 20  
III.3.1 Méthodes d’analyses Temps – fréquence..... 21  
III.4 Algorithme de détection de défauts d’excentricité..... 22  
III.5 les différentes étapes constituant l’algorithme proposé pour la détection de défauts  
d’excentricité ..... 22  
III.5.1. Acquisition ..... 22  
III.5.2 Calcul de la FFT..... 23  
III.5.3 Estimation des signatures spectrales de défauts d’excentricité..... 23  
III.5.4. Estimation de l’harmonique PSH..... 24  
III.5.4.1. Effet de la charge sur les PSH..... 24  
III.6. Effet du nombre des échantillons sur l’estimation de la fréquence et d’amplitude ..... 25  
III.7. Estimation de la fréquence et l’amplitude en utilisant une fenêtre glissante..... 26

III.8. Applications et tests sur des signaux stationnaires. ....	27
III.8.1 estimation des Amplitudes et des fréquences pour 20%_ES et 10%_ED.....	28
III.8.2estimation des Amplitudes et des fréquences pour 60%_ES et 10%_ED .....	29
III.9. APPLICATIONS ET TESTS SUR DES SIGNAUX NON STATIONNAIRES.....	30
III.9.1 effet de l'augmentation de la sévérité de défauts d'excentricité.....	30
III.10 Choix des signatures à utiliser.....	32
III.11 Indices relatives de défaut d'excentricité.....	34
III.11.1 Influence de défaut d'excentricité sur les différents indicateurs.....	34
III.11.2 critère de classements des indicateurs .....	35
III.11.3 Les courbes des indices pour les deux critère de classements.....	36
III.12 conclusion.....	38
<b>Conclusion générale</b> .....	39
<b>Références bibliographiques</b> .....	40



***Introduction générale***

## INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa *simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique*. Des applications de la machine asynchrone à vitesse variable, ont vu le jour dans divers domaines en l'occurrence l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision. Toutefois, cette machine peut être affectée par des défauts potentiels qui se répercutent sur la sécurité de la production, la qualité du service et la rentabilité des installations. Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machines.[MED 12]

La surveillance d'un dispositif implique le diagnostic des défauts : il consiste en la détection d'un changement anormal dans le comportement ou l'état d'un système et dans la localisation de sa cause. Le but est de garantir la sécurité et la continuité de service et d'enregistrer les événements utiles pour la maintenance curative ou le retour d'expérience [MED 12]

Le travail proposé s'attarde sur la détection des défauts des machines asynchrone triphasé à cage d'écureuil, exactement sur le défaut d'excentricité avec les méthodes de traitement du signal [BEN 16]. car Les techniques de traitement du signal spectrales du courant s'avèrent efficaces pour la surveillance et détection des défauts. et notre travail basé sur l'analyse du courant statorique avec la méthode de **FFT glissante**. la transformée de Fourier Rapide (FFT) est certainement l'outil universel dans l'analyse spectrale du courant statorique et la plus utilisée.

Ces informations sont évidemment celles qui sont accessibles à la mesure : courant électrique, températures, pressions,... etc. La surveillance par l'acquisition du courant de la machine peut se révéler une méthode efficace pour parvenir aux résultats, et parfois à moindre frais, .cette technique représente l'aspect économique de la surveillance n'est pas négligeable pour un industriel.[ACH 14]

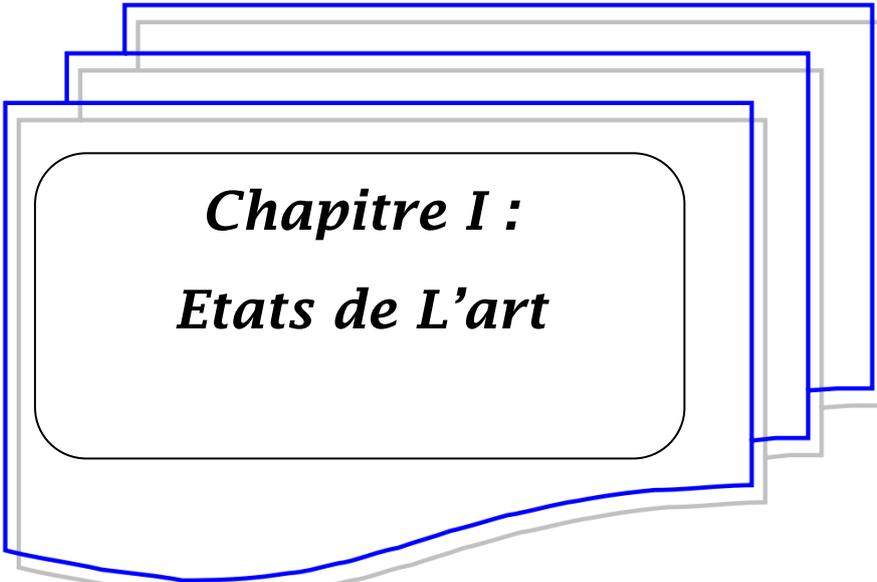
Le mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre en va vue l'état de l'art qui contient quelque définition sur la maintenance et le diagnostic des machines asynchrones et les défauts qui l'affectent. Ensuite, on va présenter quelques méthodes de diagnostic en insistant sur les techniques appartenant à l'approche signal.

Ceci va nous permettre de prendre connaissance sur ce qu'il a été présenté dans la littérature et par conséquent de classer notre travail.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du contenu spectral du courant statorique d'un moteur asynchrone à cage, ceci va nous permettre d'explorer les différentes familles d'harmoniques et de choisir celle qui permet détecté et suivi le défauts d'excentricité à partir leurs fréquences.

Le dernier chapitre présente une application de la méthode de la **FFT glissante** sur les signaux des courants de la machine asynchrone dans le but **de détecté et suivie l'harmonique de défauts d'excentricité**, Dans ce chapitre, plusieurs indicateurs de défaut d'excentricité, seront définis et une étude comparative entre eux sera effectuée dont le but est de sélectionner le ou les meilleurs indicateurs.



***Chapitre I :***  
***Etats de L'art***

## **I. 1 INTRODUCTION**

La machine asynchrone est la plus utilisée dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Son seul point noir est l'énergie réactive. La machine asynchrone est très appréciée dans les milieux industriels par sa robustesse, son couple massique important et son faible coût de revient. 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 affectant 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, dépolluage, calibrage,...). Il s'agit là d'éviter les causes de défaillances et de vieillissement des composants 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 diagnostique :**

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**

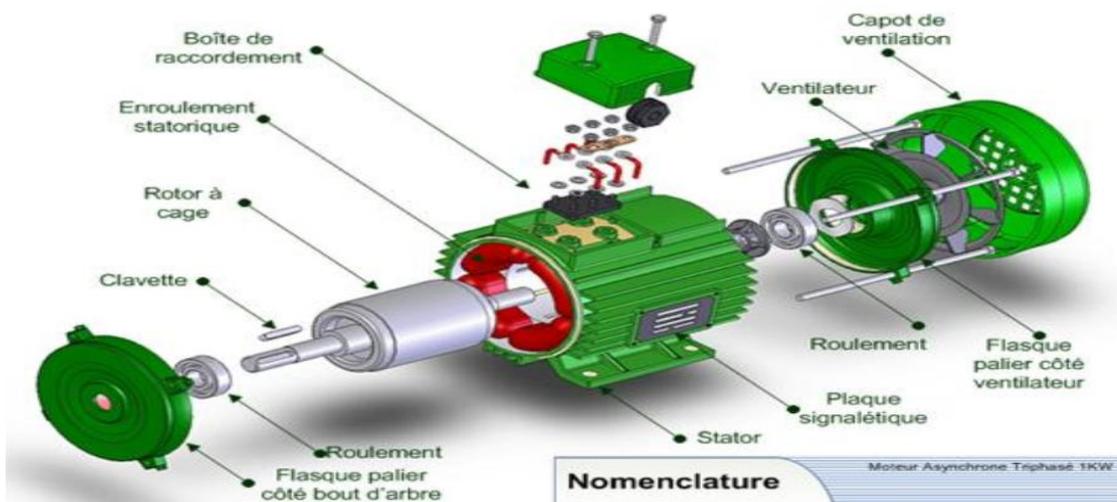
### **I.3.1 Définition**

La machine asynchrone à cage ou MAS est une machine électrique tournante assurant la tâche de la conversion d'énergie par induction électromagnétique.

Les parties constitutives de la machine asynchrone sont:

- **Le stator:** partie fixe de la machine, constituée de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- **le rotor:** c'est la partie tournante où est constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement injecté.
- **les organes mécaniques:** permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.[MEN17]

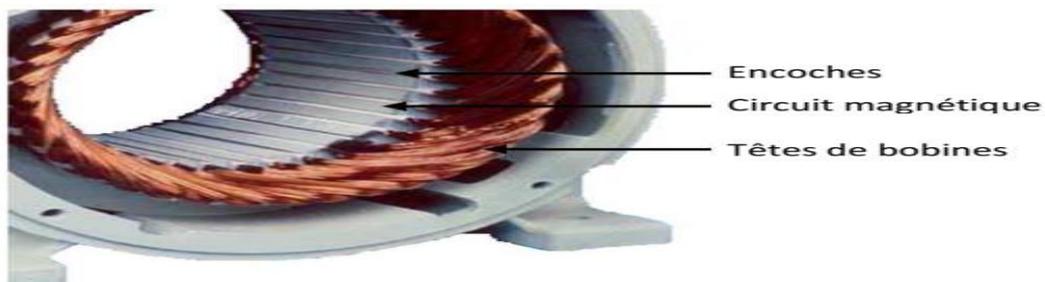
la (figure I.1) présenter de manière générale les parties principales qui constituent la machine asynchrone .



**Figure I.1 :**Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. [AZO17]

### I.3.1.1 Stator

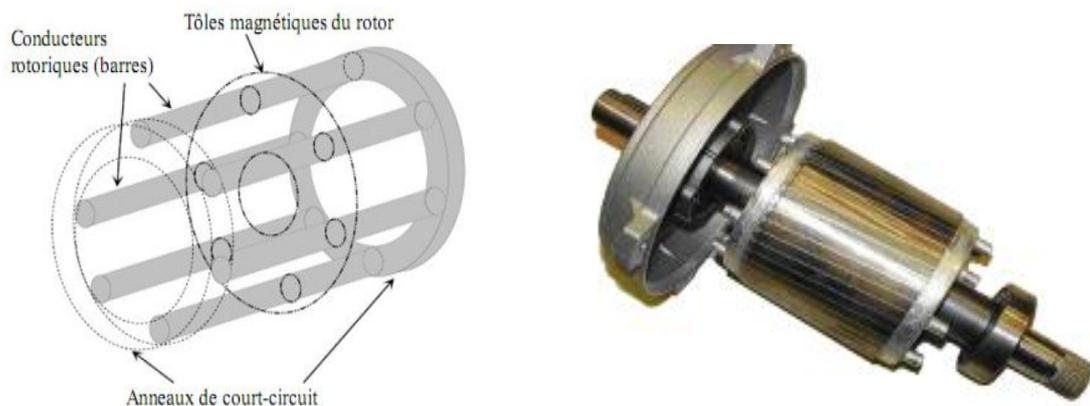
Les différents types des moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor dans tous les cas le stator reste dans son principe, le même. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure 2 ).



**Figure I.2 :** Stator d'une machine asynchrone .[MEN 17]

### I.3.1.2 Rotor

Le circuit rotorique est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui de la machine à rotor bobiné. Les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. La **(fig.3)** illustre un rotor à cage. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.



**Figure I.3:** Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone.[MEN 17]



**Figure I.4:** Stator et Rotor à cage d'écureuil d'une machine asynchrone.[MEN 17]

### 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 flasque et les roulement à billes.

#### I.4 Différents défauts dans la machine asynchrone

Dans ce paragraphe sont présentés différents défauts des machines électriques, leurs origines et leur classification. Une défaillance de machine électrique représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement. Les raisons de défaillances dans les machines tournantes électriques ont leur origine dans la conception ,la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, l'environnement de travail, nature de la charge et le calendrier de maintenance.

D'après [ALK 03], les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique ..etc.)Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines présentée dans le Tableau I.1

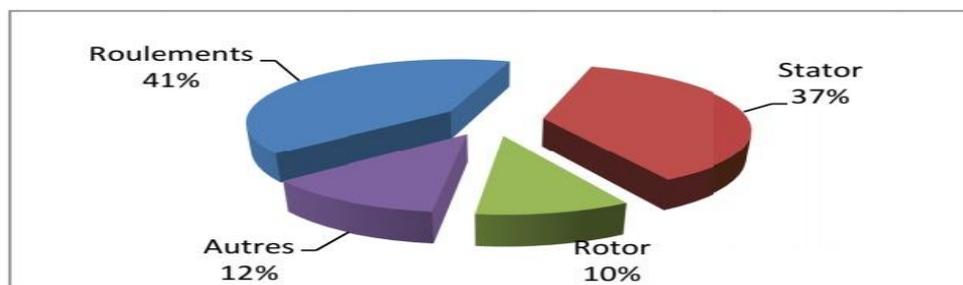
Défaillance des machine électrique	Interne	mécanique	Contact entre le stator et le rotor
			Défaut de roulement
			Excentricité
			Mouvement des enroulement et des tôles
		Electrique	Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
	Externe	mécanique	Défaillance au niveau de circuit magnétique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

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

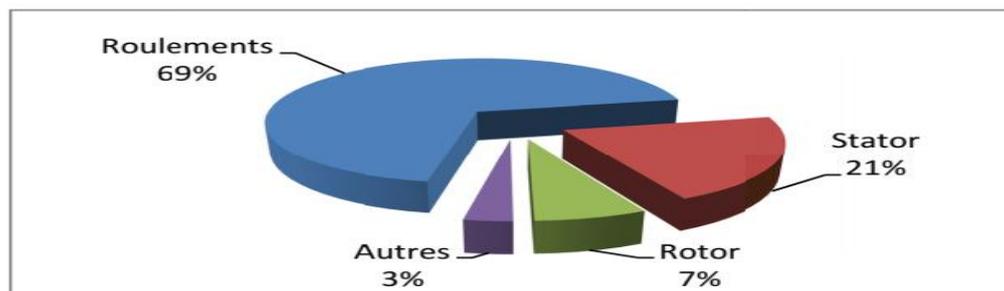
Statistiquement, il est difficile de donner une répartition exacte des défaillances de machines électriques puisque le recensement des pannes et défauts n'est pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance.

Des multiples études statistiques sur des machines ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'à présent. Toutes ces statistiques mentionnées dans [CBN12] concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie.

Une étude statistique menée par [BON08] sur les machines asynchrones à cage d'écureuil, exploitées dans le domaine de l'industrie pétrochimique, nous révèle que certains défauts sont plus fréquentes que d'autres comme exposé par le diagramme de les (figures I.6) en présentant le pourcentage de défauts susceptibles d'affecter ces machines de grande puissance



(a) Thomson 1944 [14]



(b) Bonnett 2008 [12]

**Figures I.5.** Évolution du pourcentage *des défauts pendant une décennie.*

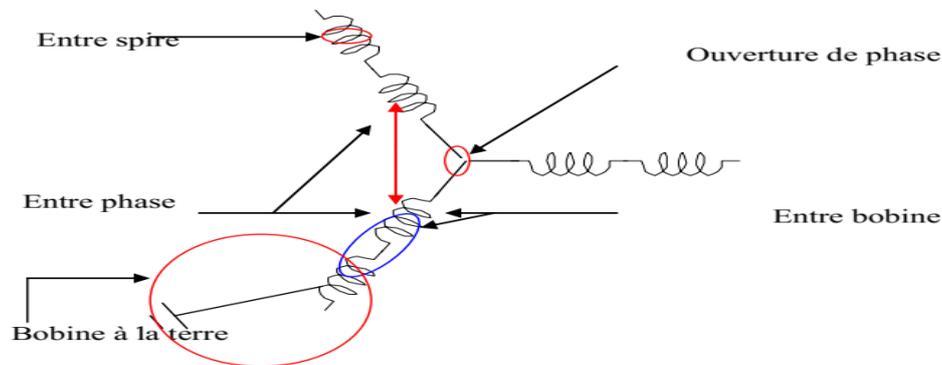
Cette répartition montre que les défauts des machines de grande puissance proviennent principalement de roulements et du bobinage statorique, ceci est dû aux contraintes mécaniques plus importantes dans le cas de ces machines.

#### **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 circuits entre spires de la même phase ou de court-circuit entre phases. [MEN17]

❖ *Défauts statorique :*

- 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.



**Figure I.6 :** Représentation des différents défauts statoriques possible. [BEL 14]

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 du 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.

### **I.4.2 Défauts rotoriques**

#### **I.4.2.1 Défauts de roulements**

Comme il est indiqué sur la Figure (I.5) la majorité des défauts dans les machines électriques concernent les défauts de roulements qui ont de nombreuses causes telles que l'écaillage de fatigue, la contamination du lubrifiant, une charge excessive, ou des causes électriques comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs.

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**

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator.[CBN12]

Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité :

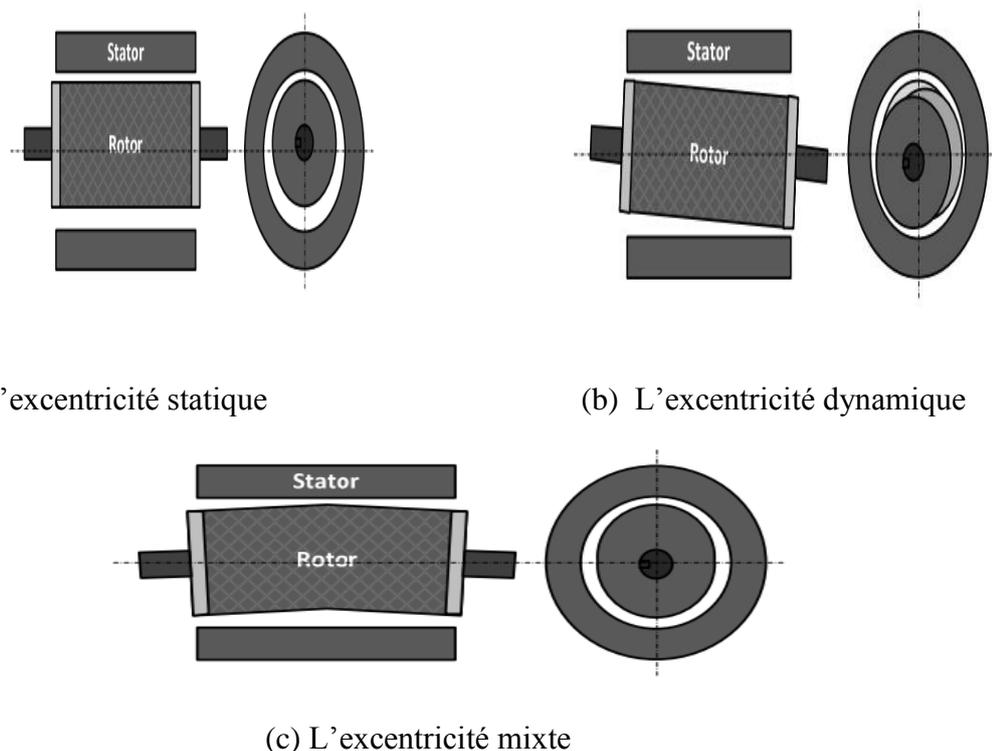
- La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine.
- Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine en effet, le décentrement génère 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 est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine.

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées :

- ❖ **L'excentricité statique** : généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.
- ❖ **L'excentricité dynamique** : correspond, elle à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.
- ❖ **L'excentricité mixte** : a somme des deux cas présentés ci-avant.



**Figure I.7** : Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.[CBN 12]

### I.5. Différents Méthodes de Diagnostic des machines asynchrones

Après avoir présenté dans les paragraphes précédents les différents défauts dans la machines asynchrone. Alors, il est très important de prendre une idée générale sur les différentes méthodes utilisées pour le diagnostic des anomalies dans les machines électriques. il existe, plusieurs approches et techniques qui ont largement étudié la défaillance Dans cette partie,

---

nous allons décrire seulement les méthodes les plus connues, Il important de savoir que les différentes méthodes du diagnostic sont classées selon l'approche qu'ils l'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]

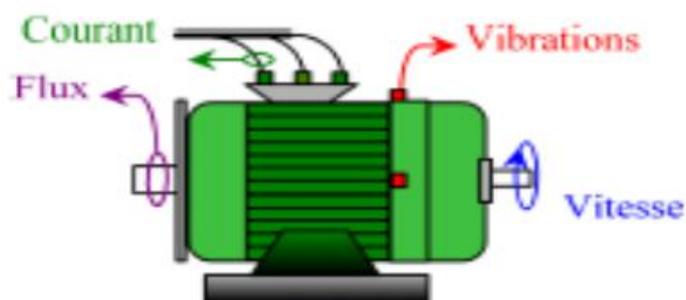
### I.5.2 Approche Signal

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

L'objectif des méthodes de diagnostic et de surveillance de la machine à induction à partir des informations données par des capteurs non invasifs. Les signaux utilisés sont les tensions (même la tension de neutre), les courants et le flux (ou de fuite) de la machine. Les informations données par les différents capteurs peuvent être utilisées séparément ou traitées dans l'ensemble pour détecter des défauts électriques tels que la rupture totale ou partielle de barres ou d'anneaux ou l'excentricité au rotor et des courts-circuits entre spires ou entre phases ou des déséquilibres dans l'alimentation au niveau du stator. La méthode de traitement numérique de base utilisée est la transformée de Fourier rapide (FFT) sous sa forme réelle et complexe ainsi que la transformée de Fourier discrète (DFT).

Les points de mesures des différents signaux (courant, flux, vibrations,..) à l'aide d'une variété des appareils sont illustrés par la figure(I.5)



**Figure(I.8) : Les points de mesures.[DID 04]**

### **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**

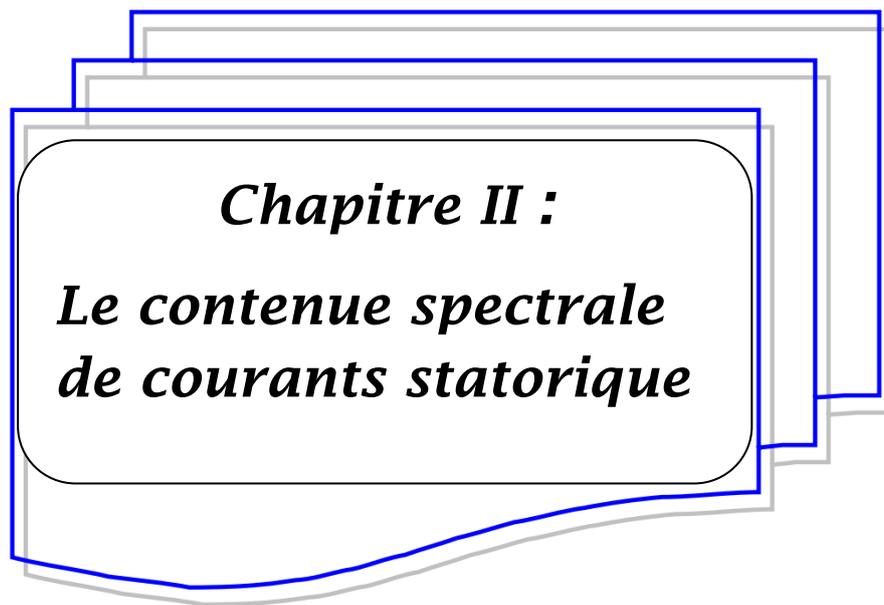
Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signale, donne des 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]. Cette méthode représente l'outil qu'on va utiliser dans ce mémoire.

## **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 pouvant affecter la machine asynchrone, leurs origines et leur classification ainsi que les méthodes utilisées en diagnostic. Notre travail est consacré à l'étude et à la détection de défauts d'excentricité par l'analyse de courant par la méthode de FFT glissante, Le chapitre suivant sera consacré à citer le défaut d'excentricité et les différentes des harmonique existent dans le signal du courant statorique. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.



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

## II. 1 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 comme une méthode de diagnostic. Cette approche est basé sur l'analyse spectrale du signal de courant statorique. D'abords, il est préférable d'explorer le contenu spectral du courant statorique.

## II.2 Les Allures temporelles des courants statoriques pour différentes charges

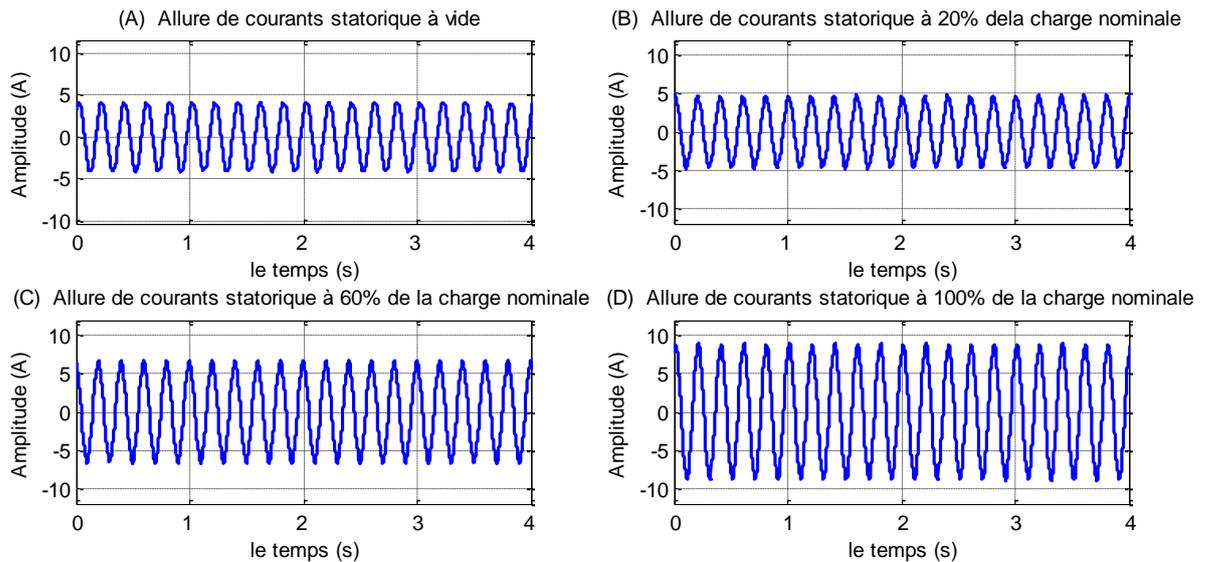
Il existe plusieurs techniques pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones l'une les plus connue est la MCSA (Motor Current Signature Analysis). Cette technique a été largement utilisée dans les dernières années. Les recherches ont été particulièrement dirigées vers le spectre des courants 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 quatre essais expérimentaux, où le moteur sain fonctionnait à vide, et **20%** de la charge nominale , **60%** de la charge nominale et **100%** de la charge nominale.

### Observation :

- Le premier cas correspond à l'état sain , **moteur à vide** .
- Le deuxième cas correspond à l'état sain , **fonctionnement à 20% de la charge** .
- Le troisième cas correspond à l'état sain , **fonctionnement à 60% de la charge** .
- Le quatrième cas correspond à l'état sain , **fonctionnement à 100% de la charge**



**Fig II.1** Allure temporelle du courant pour : A) le moteur à vide , B) 20% de la charge, C) 60% de la charge, D) 100% de la charge

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 fréquentiel de ce signal temporelle.

### II.3 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 :

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt \quad (II.1)$$

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 :  $f_e = 10000 \text{ Hz}$  .
- Le temps d'acquisition :  $T_a = 10 \text{ s}$ .
- Le nombre des échantillons :  $N_e = \frac{T_a}{T_e} = f_e * T_a = 100000 \text{ points}$ .
- 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  $f$ . 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  $x(n)$  d'un signal échantillonné est donnée par :

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

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. **[KHB15]**

#### **II.4 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)	$TH = \nu . f_s$	Ce type d'harmonique est imposé par le réseau électrique.
Les harmonique d'encoche rotorique.(RSH)	$RSH = (\nu . f_s . \pm k . N_b . f_r)$	Sont dus à la structure naturelle de la Machine asynchrone à cage (la distribution discrète des barres rotoriques dans les encoches rotorique.)
Harmonique de défauts d'excentricité (EFH)	$EFH = (\nu . f_s \pm k . f_r)$	Sont dus à un certain degré d'excentricité mixte risiduelle
Harmonique de défauts de cassure de barre (RBFH)	$RBFH = (\nu \pm 2 . k . s) f_s$	Sont dus à l'asymétrie résiduelle du moteur au niveau du rotor.

**TAB II.1** les différents harmoniques du courant statorique

Avec :  $k = 1, 2, 3, \dots$  ;  $f_s = 50 \text{ Hz}$  ;  $N_b =$  nombre de barres.  $\nu = 1, 3, 5 \dots$

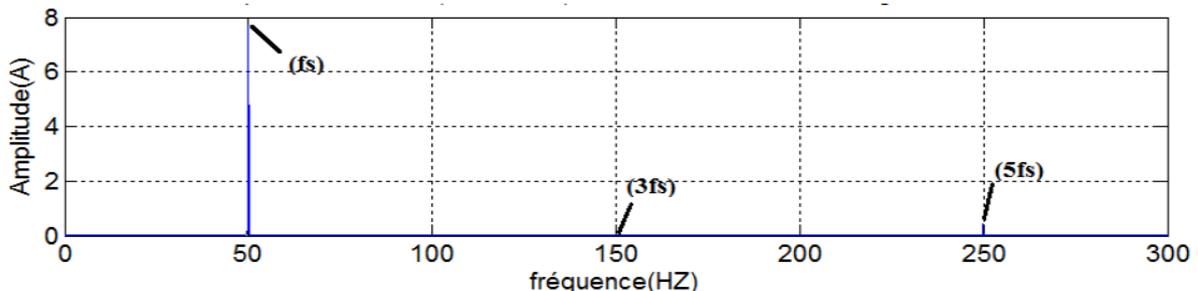
Nous exposons sur les figures (II.5 II.6 II.8 II.9 ) le spectre du courant statorique pour un fonctionnement à 100% de la charge nominale ( $g = 0.036$ ) avec la représentation les quatre familles des harmoniques (TH, RSH, EFH et RBFH).

### II.4.1 Harmoniques du temps TH

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

$$TH = \nu . f_s \quad (II.3)$$

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



**Fig.II.2** Les harmoniques TH

### II.4.2 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 : *[THO01]*

$$f_{RSH} = (\nu \cdot f_s \pm k \cdot N_b \cdot f_r) \quad (II.4)$$

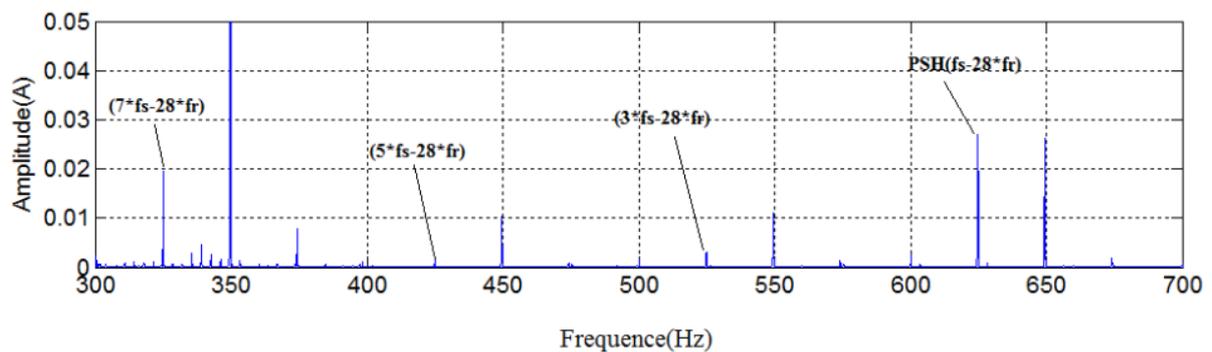


Fig.II.3. Les harmoniques de RSH

#### II.4.2.1. Définition PSH :

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

$$f_{PSH} = (f_s \pm N_b \cdot f_r) \quad (II.5)$$

#### II.4.3 Harmoniques de défaut d'excentricité (EFH) :

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

$$f_{EFH} = (\nu \cdot f_s \pm k \cdot f_r) \quad (II.6)$$

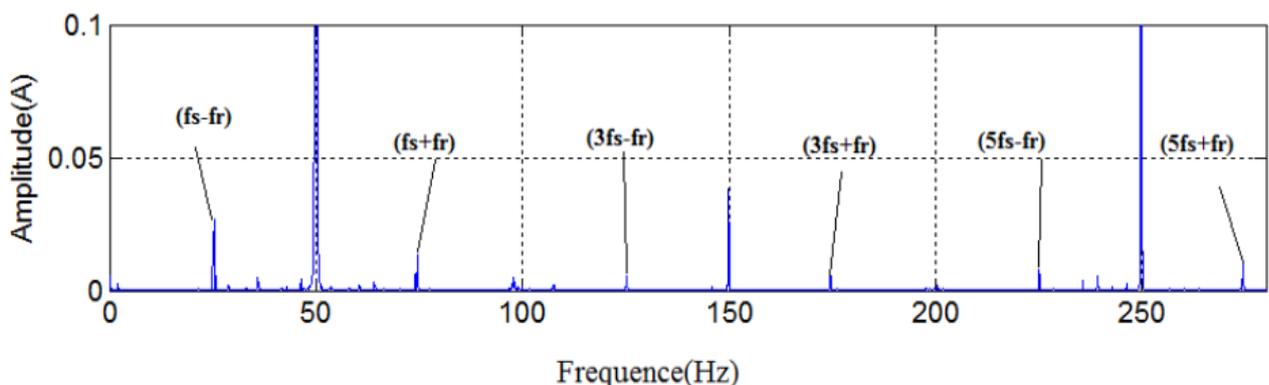


Fig.II.4 Les harmoniques EFH

#### II.4.4 Les harmoniques des défauts des cassures de barres RBFH:

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)

$$f_{\text{RBFH}} = (\nu \pm 2.k.s)f_s \quad (\text{II.7})$$

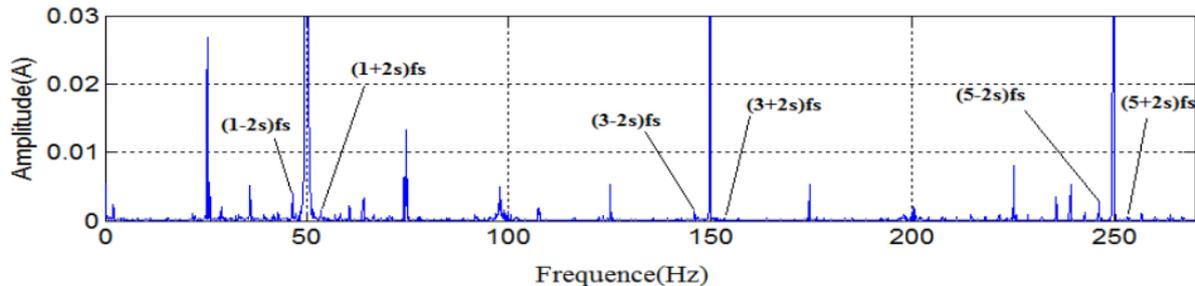


Fig. II.5 Les harmoniques RBFH

Avec :

$\nu$  : Est à l'ordre du temps harmonique

$f_s$  :Est la fréquence d'harmonique fondamentale.

$f_r$  :La fréquence du rotation rotorique.

$N_b$  :Nombre des barres rotorique.

$k$  :Un entier positif.

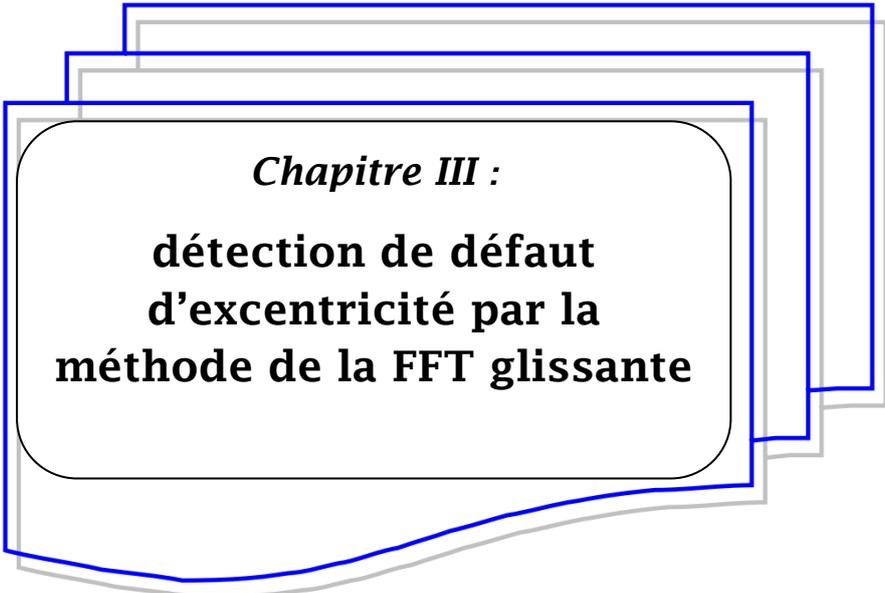
$s$  : C'est le glissement de la machine asynchrone.

#### Remarque :

Il est clairement visible que ces spectres est très riche en harmoniques. Pour ne pas se perdre dans l'interprétation du spectre, **rappelons ici que notre objectif principal est d'estimer et de suivre les amplitudes des harmoniques caractérisant la présence d'une excentricité mixte.**

#### II.5 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 à 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 la  
méthode de la FFT glissante**

### III.1 INTRODUCTION

Nous avons parlé dans le chapitre précédent sur les harmoniques 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.

Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations, on était 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...etc.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'utilisation de la méthode de **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. Ceci s'adapte parfaitement à notre application qui vise la détection et le suivi de défaut d'excentricité du moteur asynchrone.

### III.2 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 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 :



**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. LA METHODE DE LA FFT

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

communes comme le filtrage linéaire en les traduisant de manière particulièrement simple[BEL14]

Le principe de la transformée de Fourier repose sur le fait que toute fonction périodique peut être représentée comme la somme d'une série de sinus et de cosinus dont on fait varier d'une part les amplitudes en les multipliant par des coefficients, et d'autre part les phases en les décalant de manière à ce qu'elles s'additionnent ou se compensent.

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t).e^{-2j\pi ft} . dt \quad (\text{III.1})$$

Cependant, l'analyse de Fourier, de par sa nature, montre assez vite ses limitations: Son calcul nécessite la connaissance de toute l'histoire temporelle du signal (équ III.1) transformation de Fourier, équ(III.2) transformation de Fourier inverse), de plus, dans une transformée de Fourier l'information sur le temps est présente (la transformée inverse est donc possible), mais elle est cachée dans les phases: elle est en pratique impossible à extraire. On en est donc réduit à étudier un signal soit en fonction du temps soit en fonction des fréquences qu'il contient sans possibilité de conjuguer les deux analyses.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f).e^{-2j\pi ft} . dt \quad (\text{III.2})$$

Malgré l'introduction et les succès de la transformée de Fourier rapide (FFT) , est donc par définition peu adaptée à l'étude des signaux non-stationnaires. Hors ,ces signaux se rencontrent beaucoup plus souvent que les signaux stationnaires.

### III.3.1 Méthodes d'analyses Temps – fréquence

Les méthodes d'analyse temps – fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non stationnaires [ABE 02]. Plus généralement, elles s'appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel où les propriétés statistiques évoluent au cours du temps. Pour décrire cette évolution temporelle, il faut réaliser une analyse spectrale évolutive, d'où les méthodes temps -fréquence. Parmi les techniques de l'analyse temps fréquence, la transformation de Wigner –Ville permet des diagnostics précis. Cette transformation est une fonction réelle qui définit une distribution d'énergie dans le plan temps- fréquence. Elle peut être interprétée comme une densité spectrale instantanée [BEL14].

### III.4 Algorithme de détection de défauts d'excentricité

L'algorithme proposé pour la détection et le suivi de l'amplitude de l'harmonique caractérisant le défaut d'excentricité mixte, est basé sur la méthode FFT qui est une technique de traitement de signal simple et rapide. Dans un premier temps, nous allons présenter les détails de cet algorithme ; puis, nous allons étudier les performances de cet algorithme face aux signaux expérimentaux non-stationnaires.

L'algorithme proposé pour détecter et le suivi la signature de défauts d'excentricité a été implanté sous Matlab et testée à l'aide des signaux expérimentaux. Le moteur utilisé est de 3kW, connexion en étoile, avec quatre pôles et 28 barres de rotor. Le signal de courant a été échantillonné à la fréquence de 10 kHz pendant 10 s.

### III.5 les différentes étapes constituant l'algorithme proposé pour la détection de défauts d'excentricité



**Fig. III.2** représente les différentes étapes constituant l'algorithme proposé pour la détection de défauts d'excentricité.

#### III.5.1. Acquisition

C'est la première étape durant laquelle, 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 temps d'acquisition :  $T_a = 10 \text{ s}$ .
- Le nombre des échantillons :  $N_e = \frac{T_a}{T_e} = f_e * T_a = 100000 \text{ points}$ .
- La résolution fréquentielle :  $\Delta f = \frac{1}{T_a} = 0,1 \text{ Hz}$

### III.5.2 Calcul de la FFT

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. Dans cette étape, on utilise les échantillons disponibles pour calculer la transformé de Fourier rapide. Ceci permet d'obtenir un vecteur contenant les amplitudes de tous les et un autre vecteur contenant les fréquences de ces harmoniques.[ KHB15]

### III.5.3 Estimation des signatures spectrales de défauts d'excentricité

Après avoir connaître la fréquence du fondamental, on doit estimer la fréquence du premier et deuxième harmonique concernant le défaut d'excentricité (EFH1 et EFH2), a l'aide de l'expression suivante :

$$EFH = (v \cdot f_s \pm k \cdot f_r) \quad (III. 1)$$

On peut détecter le défaut d'excentricité à partir des quatre signatures, les deux premiers sont les fréquences de EFH1 et EFH2.

Le tableau suivant représente les fréquences de ses deux harmoniques.

Signature	fréquence	Intervalle d'existence de fréquence pendant le fonctionnement à vide jusqu'à le fonctionnement en pleine charge.
<b>EFH 1</b>	$EFH 1 = f_s + f_r$	[75 ... 73] Hz
<b>EFH 2</b>	$EFH 2 = f_s - f_r$	[25 .... 27] Hz

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

La figure suivante représente la position de ses deux harmoniques

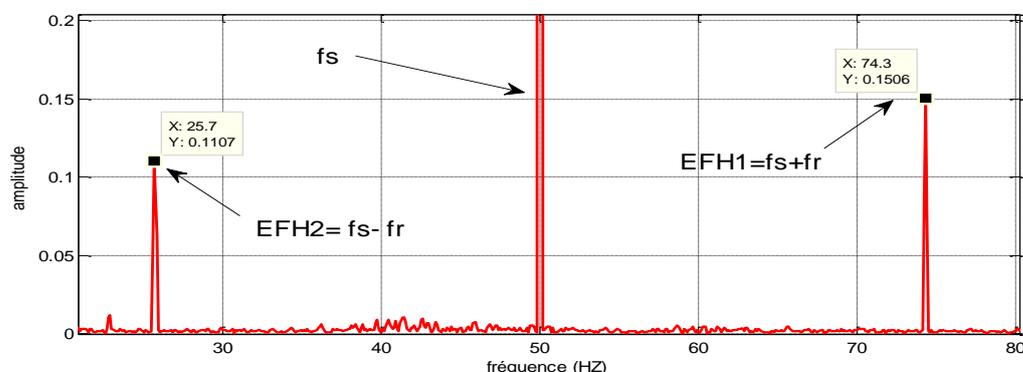


Fig.III.3 : la position des harmonique EFH1 et EFH2

### III.5.4. Estimation de l'harmonique PSH :

Après avoir connaître la fréquence du fondamental, on doit estimer la fréquence du premier PSH et par la suite, on en déduit les fréquences des signatures d'excentricité (EFH3 et EFH4) a l'aide de l'expression suivante :

$$(f_{PSH} = f_s \pm N_b \cdot f_r) \quad (III. 2)$$

$$(f_{EFH3} = f_{PSH} + f_r) \quad (III. 3)$$

$$(f_{EFH4} = f_{PSH} - f_r) \quad (III. 4)$$

L'estimation du PSH n'est pas une tâche simple, puisque la position de cet harmonique variée en fonction de la fréquence d'alimentation et le régime de fonctionnement (le glissement). En effet, la Fig. III.3 montre la position du premier PSH pour différentes charges. Si le nombre de barre  $N_b = 28 \text{ barres}$ . Il est clair que le PSH se situe au voisinage du treizième harmonique du temps ( $13.f_s = 650 \text{ Hz}$ ). On remarque bien qu'en fonctionnement à vide, le PSH devient très proche au ( $13.f_s$ ). Si on augmente la charge, le PSH s'éloigne du  $13.f_s$ , Pour notre moteur (3 kW) et par expérience, le PSH se déplace dans l'intervalle **[615 Hz... à ...647 Hz]**, qui correspond respectivement au régime pleine charge et au fonctionnement à vide.

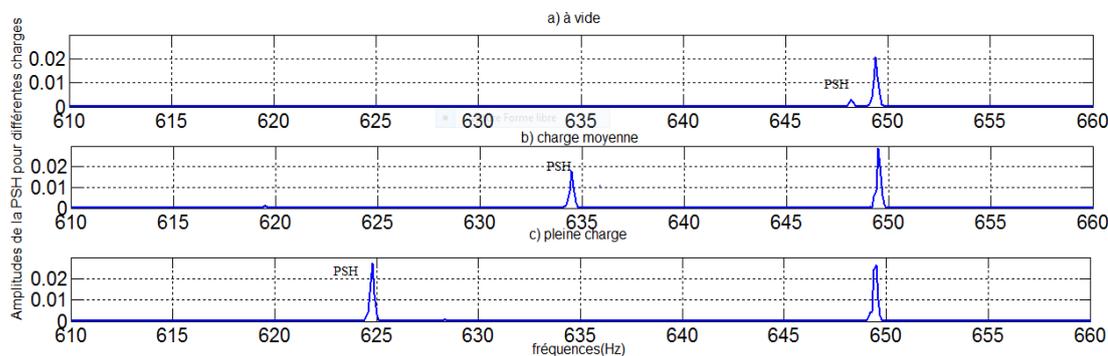
Pour le de moteur 11 kW, le nombre de barres est  $N_b = 40 \text{ barres}$  le PSH se situe au voisinage du 19<sup>ième</sup> harmonique du temps ( $19.f_s = 950 \text{ hz}$ ). En fonctionnement à vide le PSH devient très proche au  $19.f_s$ . Si on augmente la charge, le PSH s'éloigne du  $19.f_s$ . Pour ce moteur le PSH se déplace dans l'intervalle **[ 915 Hz.... 947Hz ]**. Il est évident que lorsqu'on varie la fréquence d'alimentation, la position du PSH et son intervalle de déplacement se changent complètement.

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.

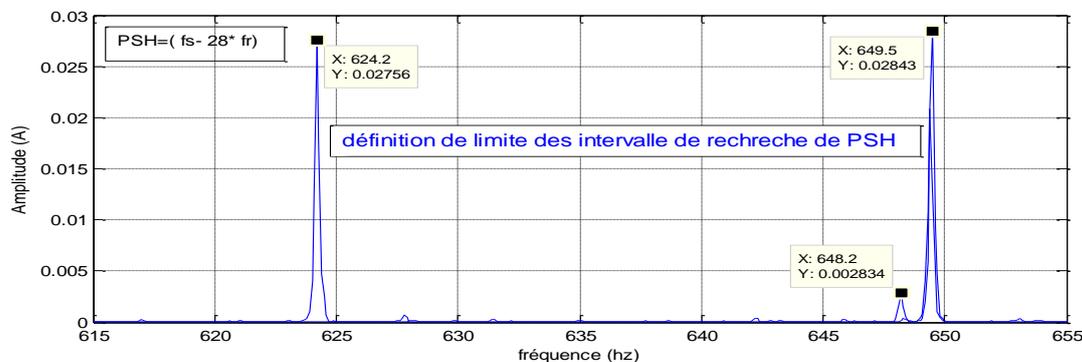
#### III.5.4.1. Effet de la charge sur les PSH

La Figure III.3 montre les spectres de courant statorique pour différentes conditions de charge mécanique. Comme on peut l'observer, la charge du moteur a une influence significative sur les fréquences PSH. En fait, la fréquence PSH se déplace dans une bande

de fréquence limitée par le minimum et le glissement du moteur maximale, comme nous allons montrer sur la figure III.4



**Fig.III.4** : Spectre de courant statorique pour différentes conditions de charge mécanique.



**Fig. III.5.** Définition des limites de l'intervalle de recherche de PSH.

### III.6. Effet du nombre des échantillons sur l'estimation de la fréquence et d'amplitude

Nous avons appliqué l'algorithme proposé sur des signaux expérimentaux des courants statoriques, Les essais sont effectués pour trois régimes de fonctionnement et pour fréquences d'alimentation fixe ( $f_s=50\text{hz.}$ )

	Fonctionnement	amplitude EFH1	amplitude EFH2
<b>N=100000</b>	à vide	0.003562 (valeur de référence)	0.004657 (valeur de référence)
	Moyenne charge 60% ch	0.00598 (valeur de référence)	0.002893 (valeur de référence)
	Plein charge 100% ch	0.006812 (valeur de référence)	0.002666 (valeur de référence)

**Tab III.2** :les amplitude de EFH1et EFH2 en utilisant tous les échantillons( 100000)

Les résultats cités dans le tableau **III.2**, prouvent l'efficacité et le bon fonctionnement de l'algorithme proposé. Cependant, il est important de noter que ces résultats sont obtenus en utilisant tous les échantillons disponibles, c'est-à-dire, les 100000 points. Cela signifie que l'utilisateur doit attendre 10s pour avoir une information sur les amplitudes de EFH1 et EFH2 .

Pour éviter cet inconvénient, nous avons pensé à réduire le nombre des échantillons utilisés. Le tableau **III.3** montre l'amplitude estimée pour différents nombres des échantillons (10s, 5s, ,2 s, 1s) sous différentes charges.

➤ Fonctionnement à pleine charge 100ch

<b>Le nombre des échantillons :Ne</b>	<b>Fréquence EFH2=fs- fr (Hz)</b>	<b>Amplitude</b>	<b>Erreur d'amplitude</b>
100 000 (10s)	24.7 (valeur de référence)	0.02666 (valeur de référence)	<b>0%</b>
20 000 (2s)	24.5	0.02402	9%
10 000 (1s)	25	0.02106	21%

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

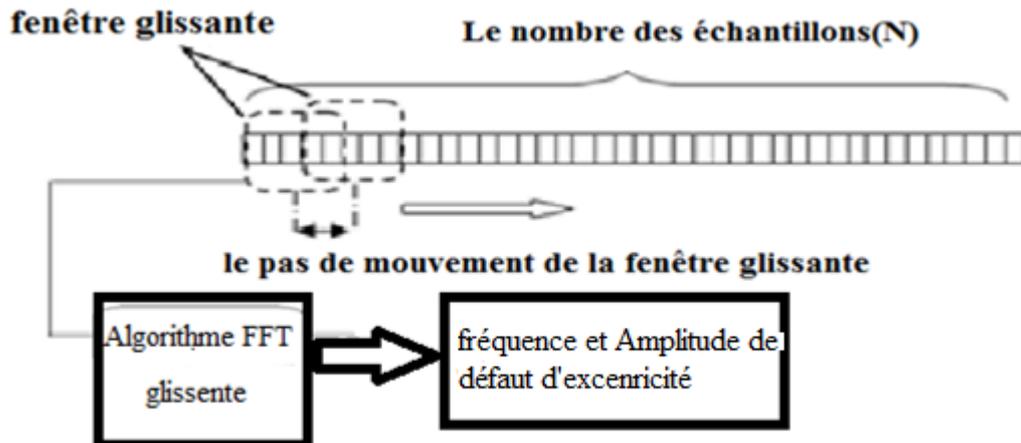
Il important de noter que la réduction de la durée d'acquisition influe négativement sur la résolution fréquentielle. Donc, deux contraintes doivent être considérées : la rapidité et la résolution fréquentielle. Malheureusement, ces deux contraintes sont contradictoires. En fait, une durée d'acquisition 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.7. Estimation de la fréquence et l'amplitude en utilisant une fenêtre glissante**

Nous avons vu précédemment que l'application de l'algorithme proposé, donne une seule information sur l'amplitude de défauts d'excentricité quelque soit le nombre des échantillons. De plus, si le signal du courant statorique comporte souvent des non-stationnarités dues aux variations de la charge ou changement de la fréquence d'alimentation. Par conséquent, l'algorithme dans sa version initiale, ne peut plus fonctionner.

Pour résoudre ce problème, nous avons proposé d'appliquer l'algorithme sur une fenêtre glissante (Fig. III.6). Le choix de la taille de cette fenêtre est une tâche critique, on doit trouver un compromis entre la rapidité et la précision. Pour cela nous avons fait, dans le

paragraphe précédent, une étude sur l'impact du nombre des échantillons sur les performances des résultats obtenus. Nous avons trouvé qu'une fenêtre de 20000 échantillons est suffisante. En effet, c'est le minimum des échantillons que nous avons utilisé pour avoir de bons résultats. Si on part au-dessous de ce nombre, l'algorithme devient plus rapide mais on perdra la précision des résultats parce que la résolution fréquentielle se dégrade dramatiquement. [KAH15]



**Fig. III 6.** Principe de la méthode basée sur une fenêtre glissante.

Le principe de cette méthode est simple, on doit appliquer l'algorithme proposé précédemment, non pas sur tous les échantillons mais sur une fenêtre de faible taille qui glisse d'un pas égal à 1 échantillon. A l'aide de cette technique, 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.

### III.8. Applications et tests sur des signaux stationnaires

Dans un premier temps, nous avons appliqué l'algorithme à fenêtre glissante sur deux signaux stationnaires enregistrés en pleine charge, avec défauts d'excentricité de degré déférente et fréquence fixe  $f_s=50$  Hz .

- Le premier degré : on applique l'algorithme sur degré de 20%\_ES et 10%\_ED
- Le deuxième degré : on applique l'algorithme sur degré de 60%\_ES et 10%\_ED

### III.8.1 estimation des Amplitudes et des fréquences pour 20%\_ES et 10%\_ED

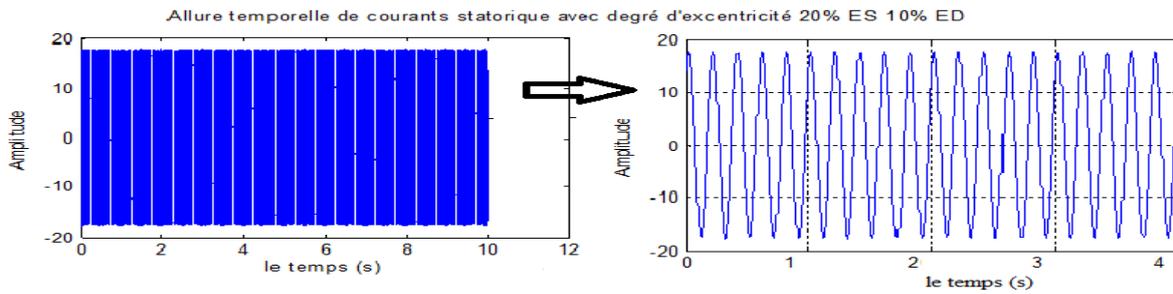


Fig.III 7 :Allure temporelle du courant statorique dans le régime stationnaire

✓ estimation des fréquences de chauqe EFH

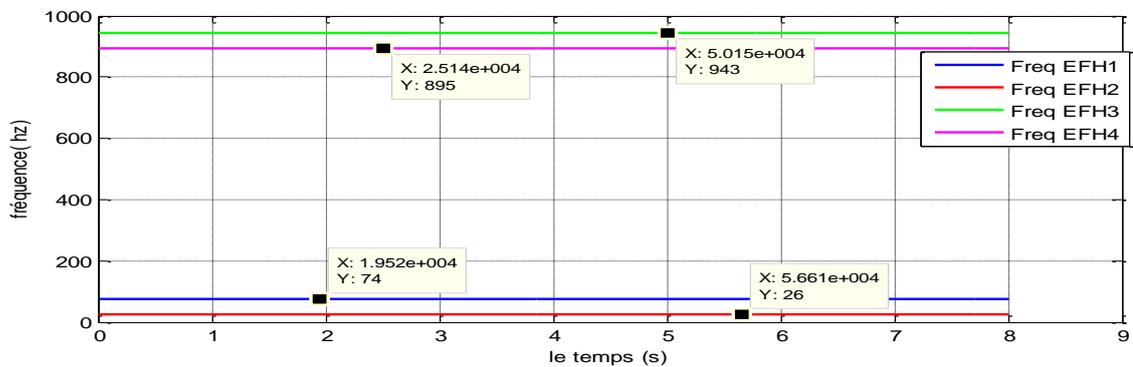


Fig.III 8 : Allure des fréquences estimé pour 20% ES 10% ED

✓ estimation des Amplitudes de chauqe EFH

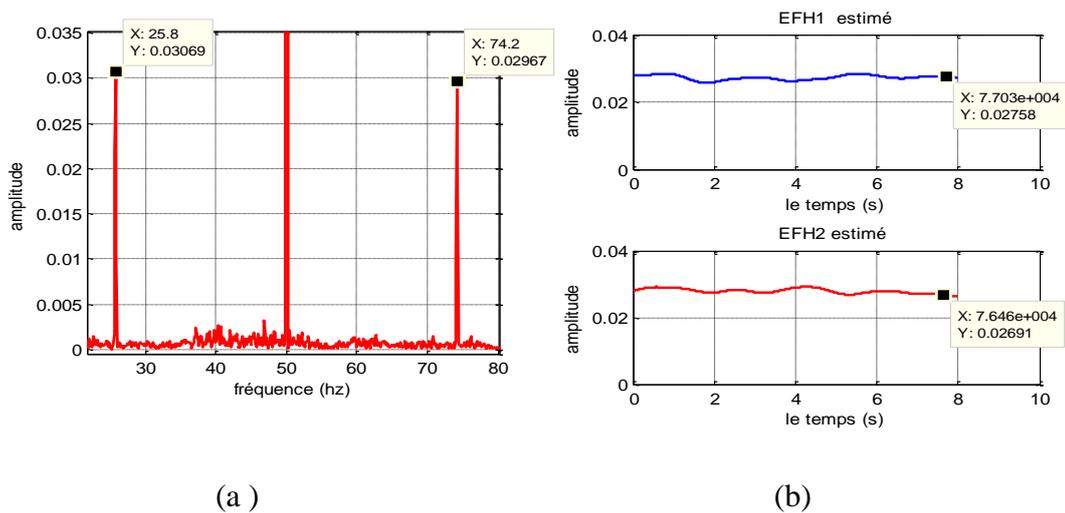
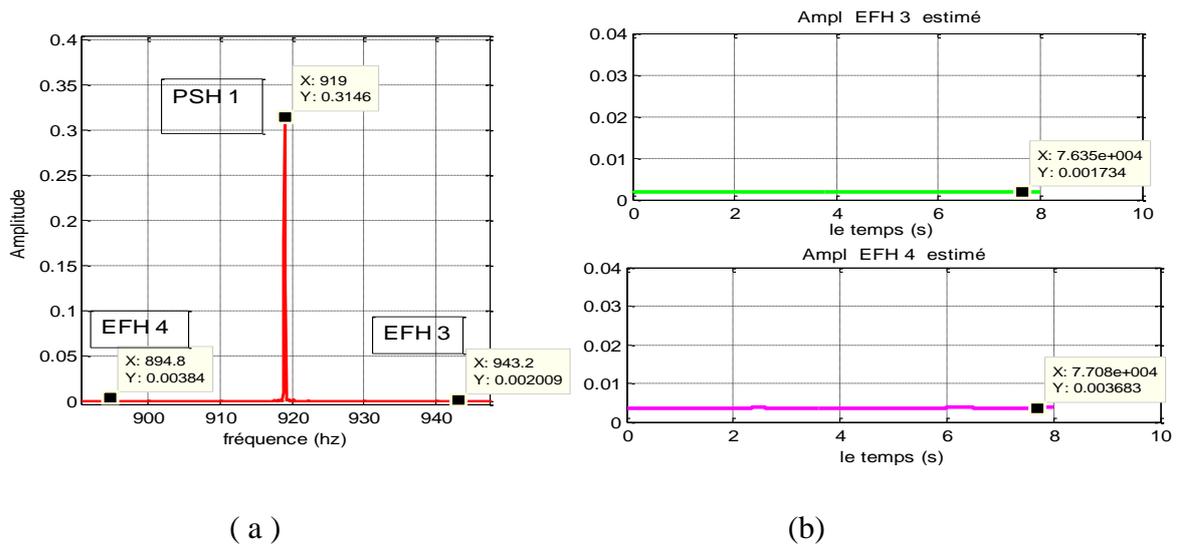


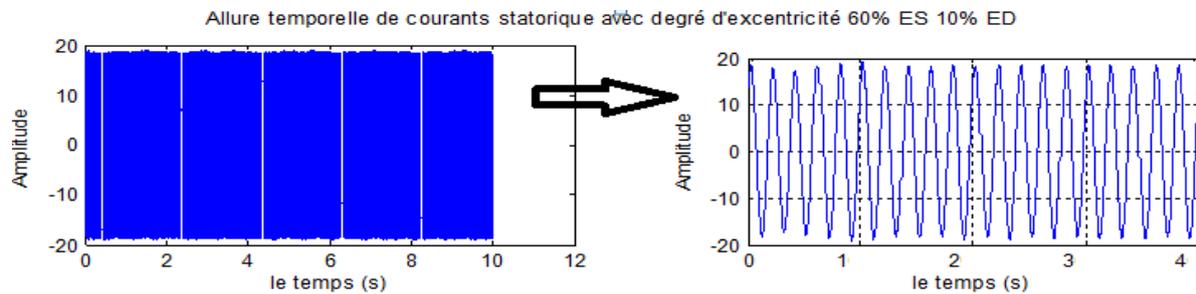
Fig.III 9: a) amplitude de EFH 1, EFH 2 pour 20%ES 10%ED, (a) Amplitude et fréquence réelle, (b) Amplitude estimé



**FigIII.10** : amplitude de EFH 3, EFH 4 pour 20%ES 10%ED ,(a) Amplitude et fréquence réelle, (b) Amplitude estimée.

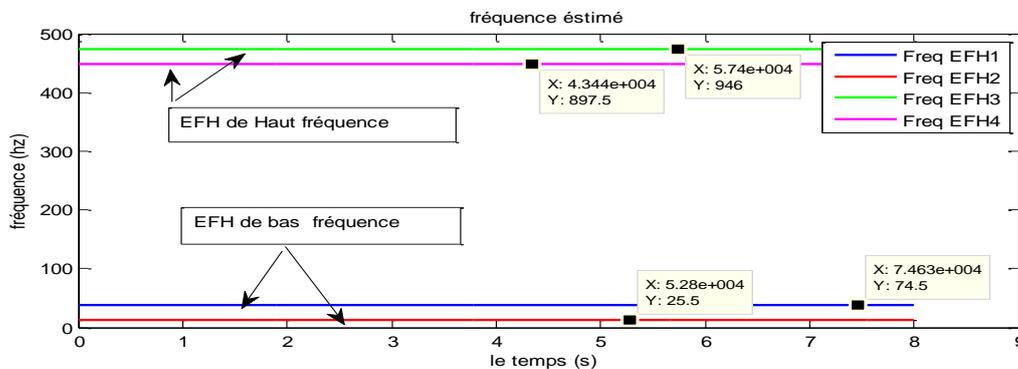
Les figures (III.7 III.8 III.9) montrent clairement que la méthode FFT glissante est capable de suivre l'évolution des amplitudes et les fréquences des différentes signatures.

### III.8.2 estimation des Amplitudes et des fréquences pour 60%\_ES et 10%\_ED

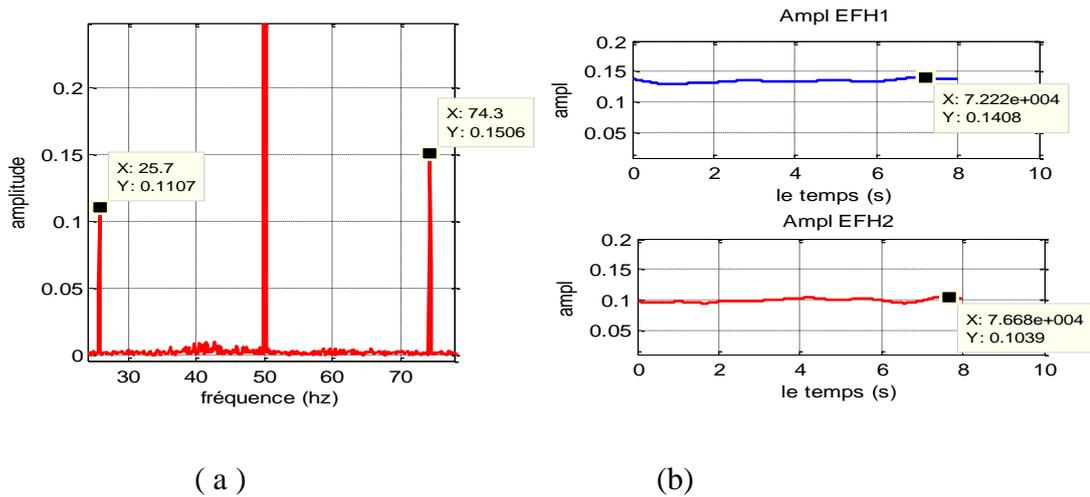


**Fig.III 11** Allure temporelle de courants statorique pour 60%ES 10% ED

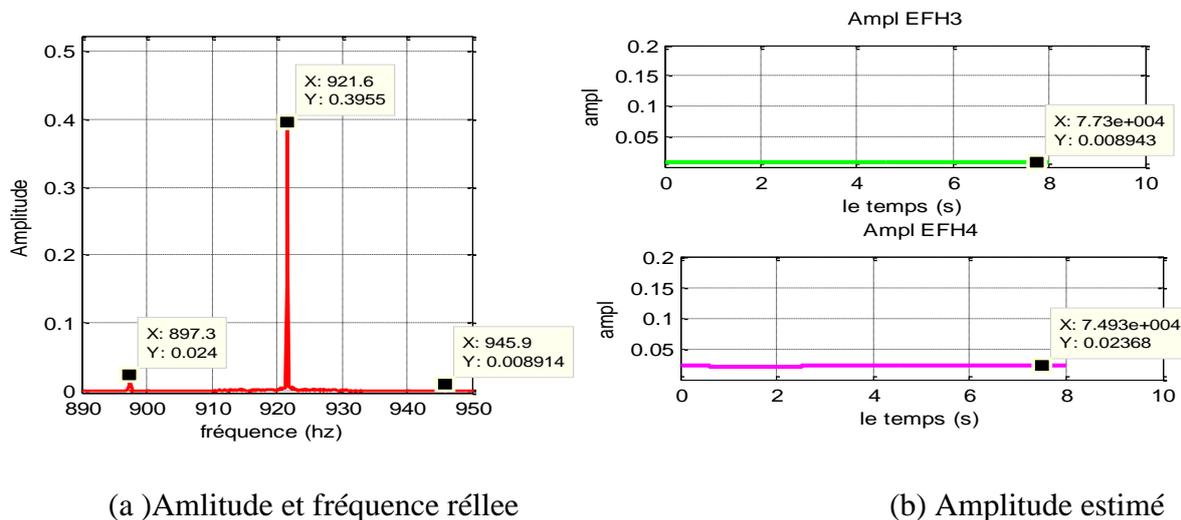
#### ✓ estimation des fréquences de chaque EFH



**Fig.III 12** : Allure des fréquences estimée pour 60% ES 10% ED



**FigIII.13** amplitude de EFH 1, EFH 2 pour 60%ES 10%ED , : (a) Amplitude et fréquence réelle, (b) Amplitude estimé



**FigIII.14** : amplitude réelle et estimé de EFH 3, EFH 4 pour 60%ES 10%ED

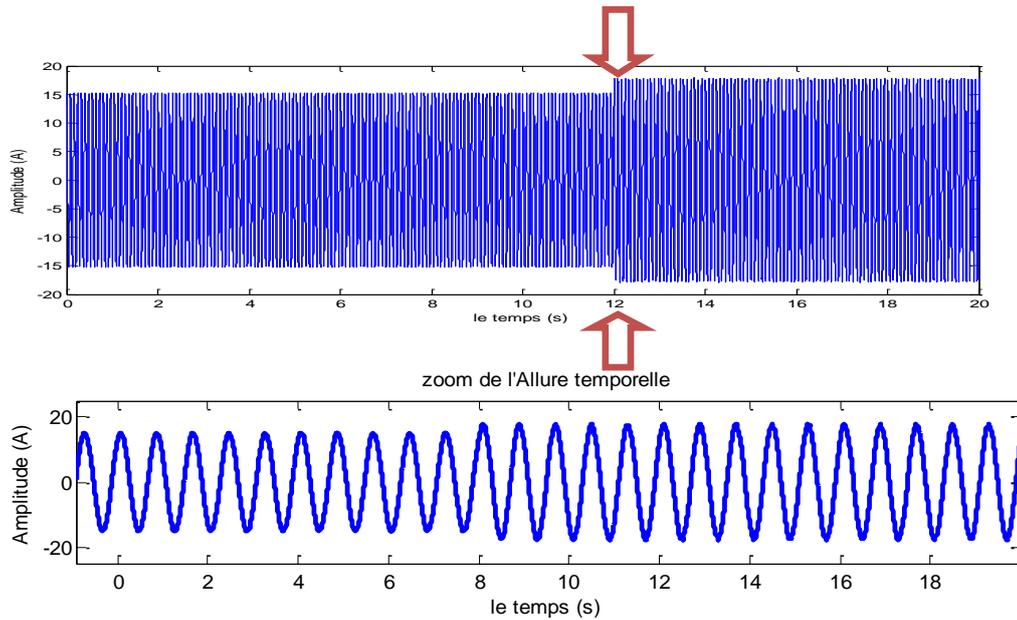
Les figures (III.12 III.13 III.14) montrent l'évolution des fréquences et les amplitudes estimées par la méthode de FFT glissante. On remarque que l'augmentation de la sévérité du défaut amplifie les amplitudes des signatures de défaut d'excentricité, ce qui fait diminuer les erreurs d'estimation.

### III.9. APPLICATIONS ET TESTS SUR DES SIGNAUX NON STATIONNAIRES

#### III.9.1 effet de l'augmentation de la sévérité de défauts d'excentricité

Pour tester la robustesse de l'algorithme à fenêtre glissante, nous avons construit un signal de simulations du courant statorique non stationnaire (Fig. III.15). Ce signal représente le

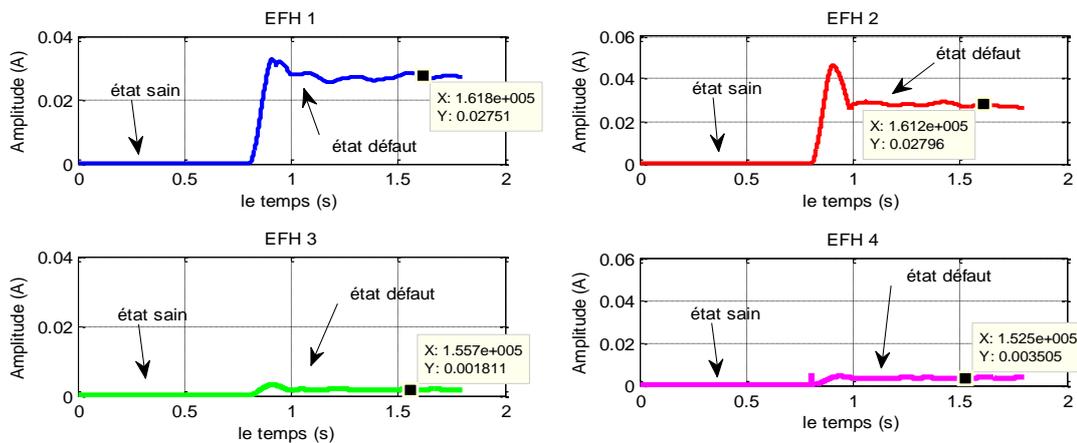
fonctionnement du moteur asynchrone sous une charge constante et pour déférente degré d'excentricité.



**Fig III.15** : L'allure temporelle du courant statorique non stationnaire obtenu pour deux degré d'excentricité déférente

- **Test 1** : On applique l'algorithme sur deux signaux de simulation : le premier signal représente le moteur à l'états sain et le deuxième à l'états défauts **d'excentricité de 20%ES 10%ED**.

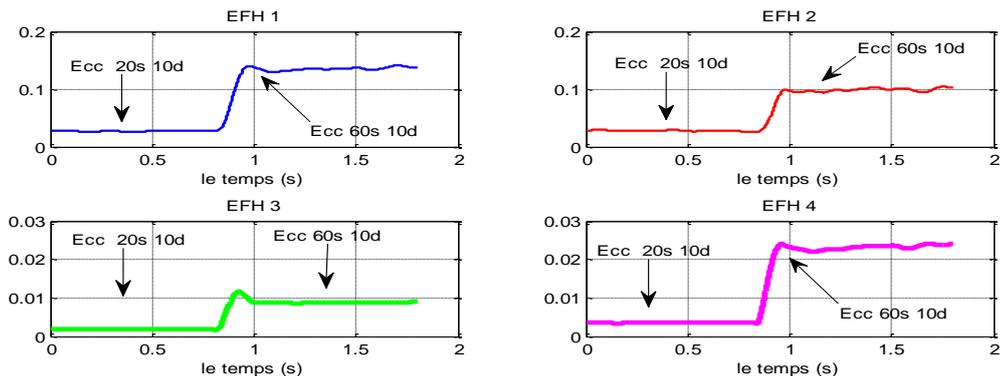
La figure (III.16) représente l'évolution des amplitudes de chaque signature de défauts d'excentricité.



**Fig.III.16** : évolution des Amplitude des EFH de l'état sain a l'état défauts de 20%ES10%ED

La figure (III.16) montre l'évolution des amplitude des EFH1, EFH2 , EFH3, EFH4. On remarque que les amplitudes sont nulles dans le premier partie (états sain de la machine), et après presque 0.8 s, on détecte une variation signifiante sur les amplitudes des différents EFH ce qui confirmé la présence d'un défaut d'excentricité (de 20%ES 10%ED). Alors, on peut dire que l'algorithme proposé peut fonctionner avec succès même s'il y a des variations brusques dues à la présence d'un défaut.

- **Test 2** :deuxième variation de la sévérité du défaut de 20%ES 10 ED à 60% ES 10 ED



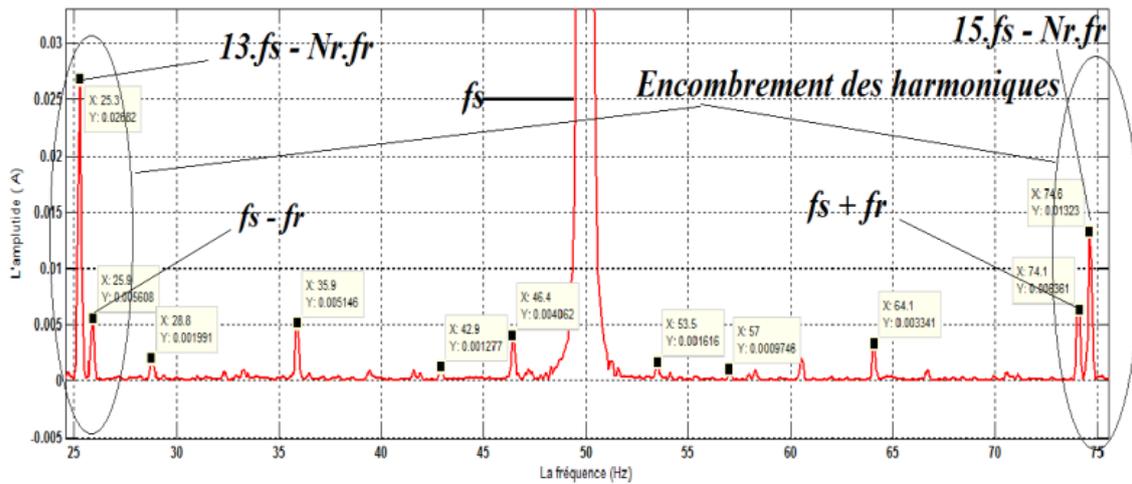
**Fig III.17:** évolution des Amplitude des EFH pour déférente degré d'excentricité

La figure (III.17) représentent l'évolution des amplitude de chaque EFH pour une variation brusque de la sévérité du défaut excentricité, de 20% ES 10%ED jusqu'à 60%ES10%ED (régime non stationnaire).On remarque que l'algorithme suit parfaitement l'évolution et les variations des amplitudes.

On observe que notre méthode estime et suivie l'amplitude même pour des signaux non stationnaire. Après tous les tests et selon les résultats obtenus, nous avons conclure que la méthode de FFT glissante répond aux objectifs définis et elle permet de détecter et suivre toutes les caractéristiques des harmoniques à partir d'un nombre des échantillons.

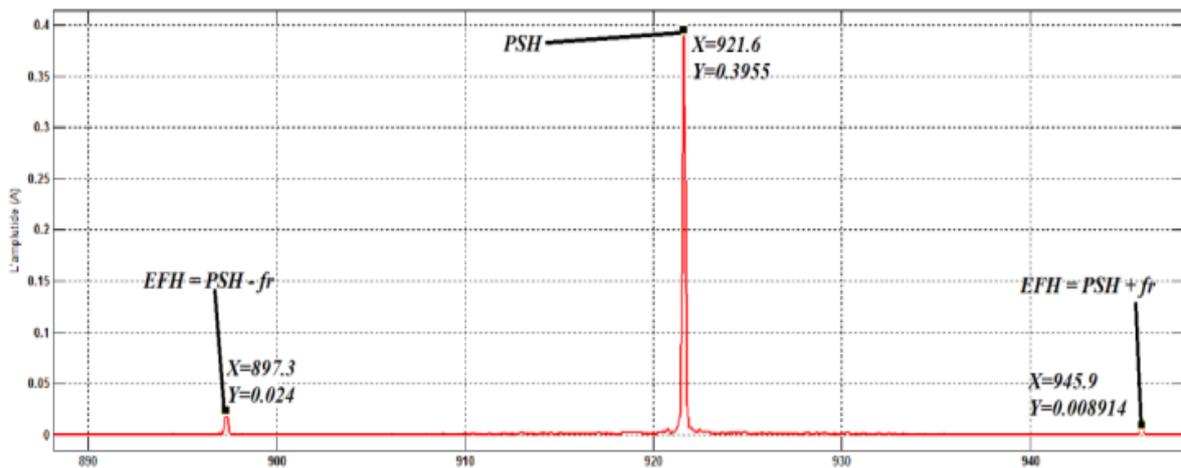
### III.10 Choix des signatures à utiliser

Il est connu que la fréquence des EFH de basses fréquences (EFH1et EFH2) existe dans une intervalle dont les limites dépendent du glissement (s), le nombre de paires de pôles (P) et la fréquence d'alimentation (fs).



**Fig.III 18** Spectre linéaire du courant statorique expérimentale à l'état sain, moteur 3kW (visualisation d'EFH)

Selon la figure **III.18**, 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 EFH1 et 2 sont très proches des harmoniques RSH ( $13fs - Nr.fr$  et  $15fs + Nr.fr$ ) ce qui rend très difficile de distinguer entre ces deux composantes spectrales. Afin d'éviter ce problème, on a préféré d'aller vers les signatures de défauts d'excentricité de haute fréquence (EFH3 et EFH 4).



**Fig.III 19** : spectre de signal de simulation avec 60% ES et 10% ED

### III.11 Indices relatives de défaut d'excentricité

#### III.11.1 Influence de défaut d'excentricité sur les différents indicateurs

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]

Dans notre cas, on a étudié le défaut d'excentricité dans les moteurs asynchrones. Notre étude analytique a montrée clairement que ce type de défaut est caractérisé par une famille des signatures spectrales appelée **EFH**, gouvernée par la relation (II.6). Comme il existe quatre signatures pour ce défaut, il est possible également de définir quatre indicateurs permettront la détection et le suivie de la sévérité de ce type de défaut.

L'indicateur relatif d'excentricité est défini comme le rapport entre la l'amplitude de signature spectrale estimée et l'amplitude du seuil :

$$Ind = \frac{\text{Amplitude estimée}}{\text{Amplitude seuil}}$$

Pour calculer les différents indicateurs, on doit définir les valeurs des seuils. Pour cela, on a choisi les valeurs suivantes :

Le Seuil pour EFH1 et EFH2 est définie par la valeur de 0.01 (A)

Le Seuil pour EFH3 et EFH4 est définie par la valeur de 0.001(A)

L'évaluation de l'indicateur se fait comme suit :

- Si  $Ind > 1$  ,Alors on a une présence de défaut d'excentricité
- Si  $Ind \leq 1$  , Alors Absence de défaut d'excentricité

Le nombre des indicateurs et la différence entre chacun d'eux nous amène à poser la question suivante :

***Quel est le (ou les) meilleur indicateur qui peut donner une information exacte sur l'état de la machine ?***

Pour répondre à cette question, on est obligé de faire une étude comparative entre les indicateurs définis précédemment. Une bonne étude comparative nécessite de définir plusieurs critères de comparaison; pour cela, on a défini deux critères :

- Sensibilité à l'apparition du défaut.
- Sensibilité à la sévérité du défaut.

On a réalisé deux tests de simulation, l'objectif étant d'identifier le bon indicateur qui permet de détecter et le suivi de défaut d'excentricité.

### III.11.2 critère de classements des indicateurs

- Sensibilité à l'apparition du défaut

Les indicateurs	Etats sain	Ecc_20s_10d
<b>Ind_EFH1</b>	≈0	2.76
<b>Ind_EFH2</b>	≈0	2.72
<b>Ind_EFH3</b>	≈0	1.8
<b>Ind_EFH4</b>	≈0	3.6

**Tab III .4** sensibilités des Indicateur à la l'apparition de défaut

Le tableau (III.4) montre que la présence d'un défaut d'excentricité dans les machines asynchrones influe d'une manière différente sur tous les indices définis précédemment. On remarque que les indicateurs : **Ind\_EFH1 et Ind\_EFH4** sont les plus sensibles à l'apparition de défauts, par rapport aux indices : **Ind\_EFH2 et Ind\_EFH3**.

- **Sensibilité à la sévérité de défauts :**

Le tableau (III.5) montre la variation des quatre indicateurs en fonction de la sévérité de défauts. Il est clair que les variations dans les amplitudes de ces indices dépendent de la sévérité du défaut.

Les indicateurs	Etats sain	Ecc_20s_10d	Ecc_30s_10d	Ecc_50s_10d	Ecc_60s_10d
<b>Ind_EFH1</b>	≈ 0	2.76	4.54	14.8	13.71
<b>Ind_EFH2</b>	≈ 0	2.72	4.47	4.82	9.98
<b>Ind_EFH3</b>	≈ 0	1.8	3.05	5.26	8.80
<b>Ind_EFH4</b>	≈ 0	3.6	6.65	14.89	23.56

**Tab III.5** : effet de la sévérité de défaut sur les indicateurs

### III.11.3 Les courbes des indices pour les deux critères de classements

➤ Sensibilité à l'apparition du défaut

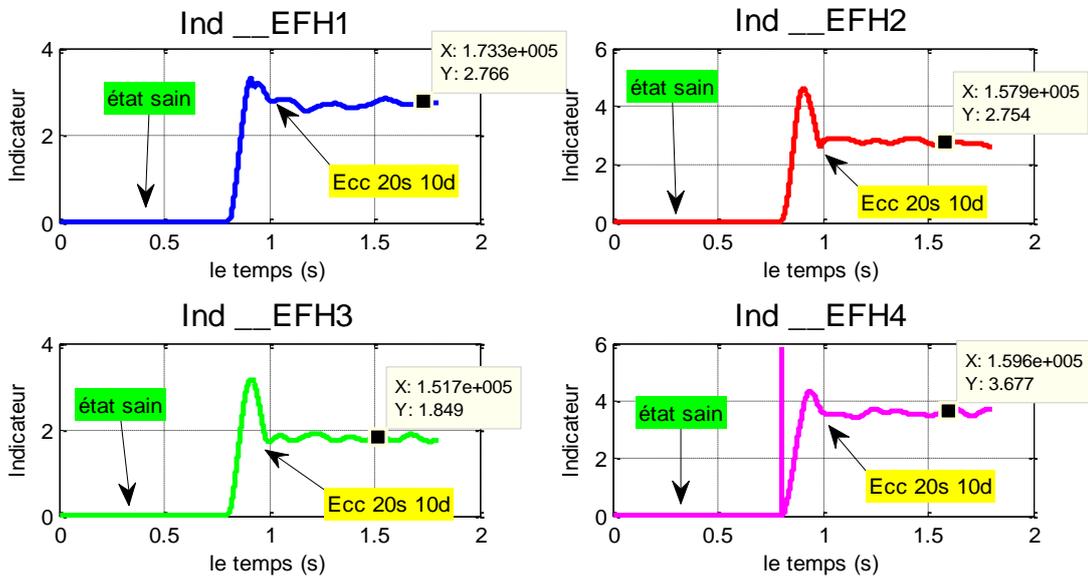


Fig. III 20 les indicateurs des défauts d'excentricité pour deux états différent (états sain puis état défauts de 20% ES 10%ED)

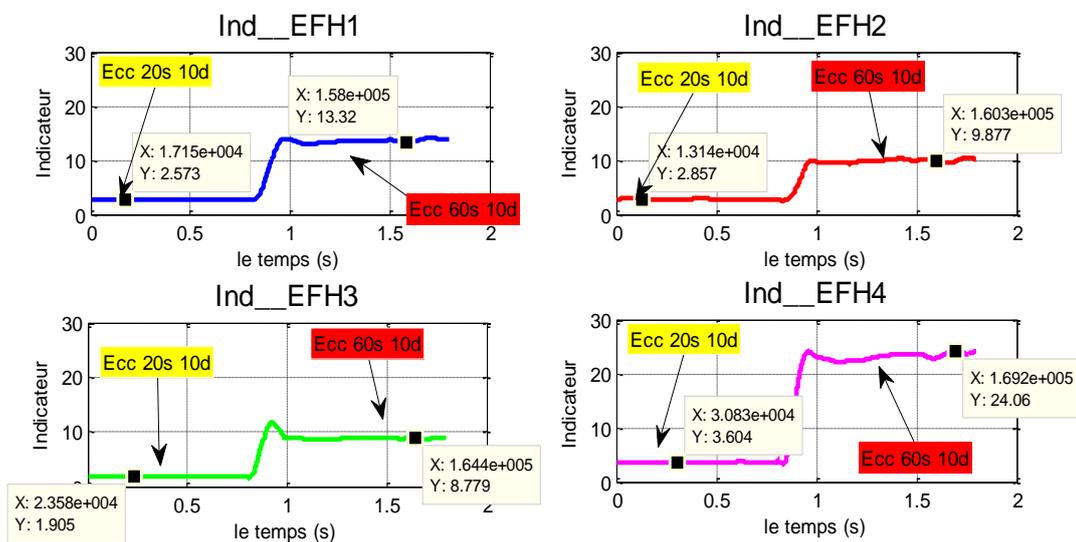
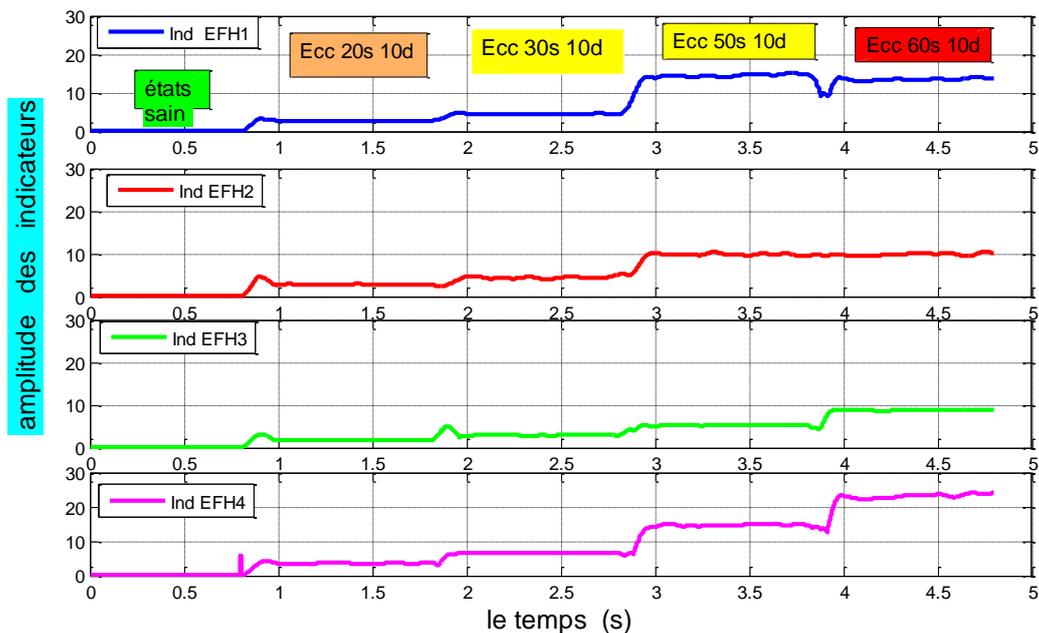


Fig III.21 les indicateurs des défauts d'excentricité pour une variation brusque de défauts (20% ES 10%ED à 60%ES 10%ED )

➤ **Sensibilité à la Sévérité du défaut**



**Fig III.22 :** Sensibilité des indicateurs à la sévérité de défauts

Les figures III.20-21-22 montrent l'évolution temporelle des différents indicateurs pendant le fonctionnement sain puis sous différents degrés d'excentricité introduites brusquement. Ces figures confirment l'aptitude de l'algorithme proposé quant à l'estimation et le suivi des différents indicateurs. De plus, les résultats obtenus présentent une comparaison entre les indicateurs définis précédemment du point de vue sensibilité à l'apparition et la sévérité du défaut.

Le premier critère de comparaison a une importance cruciale puisque il répond aux besoins des opérateurs du diagnostic que veulent toujours détecter n'importe quelle anomalie dès sa naissance. Un bon indice c'est celui qui augmente rapidement et sensiblement juste à l'apparition d'un défaut.

Le deuxième critère de comparaison permet de quantifier la sévérité des défauts. Un bon indicateur est celui qui augmente sensiblement lorsque le défaut devient plus grave. Ceci permet aux opérateurs du diagnostic de prendre des décisions rapides quant à la planification des arrêts pour les systèmes surveillés.

Par conséquent, ces deux critères nous permettrons de faire une présélection et d'éliminer ainsi certains indices qui ne satisfassent pas ces critères.

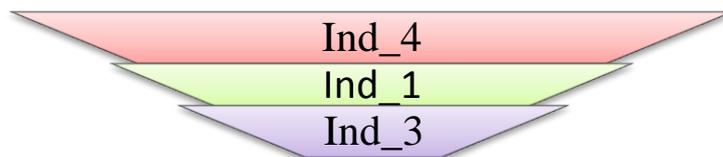
D'une manière globale, on peut remarquer que la plupart des indicateurs réagissent sensiblement dès la présence de défauts d'excentricité dans la machine.

Cependant, une vérification fine de ces courbes permet de confirmer que les indices **Ind\_EFH2** et **Ind\_EFH3** sont les moins sensibles à la présence du défaut. De plus, ils ont une réaction très faibles en fonction de la sévérité du défaut. Donc, il est déconseillé d'utiliser ces indicateurs.

Les figures III.19-20-21 montrent aussi que les indices **Ind\_EFH1**, **Ind\_EFH2**, **Ind\_EFH3** et **Ind\_EFH4** augmentent sensiblement est d'une manière régulière en fonction de la sévérité de défaut. On remarque que les valeurs des **Ind\_EFH1** et **Ind\_EFH4** sont les plus grandes par apport aux autres ce qui confirme leur supériorité. On remarque aussi que les valeurs des indices **Ind\_EFH2** et **Ind\_EFH3** varient d'une façon faible pour les défauts sévère ; par exemple **Ind\_EFH2** reste dans la même valeur pour le degré de sévérité (Ecc\_50s 10d et Ecc\_60s 10d), et **Ind\_EFH3** varié mais par des faible valeurs. Donc on ne peut pas les considérés comme des bons indicateurs de défauts.

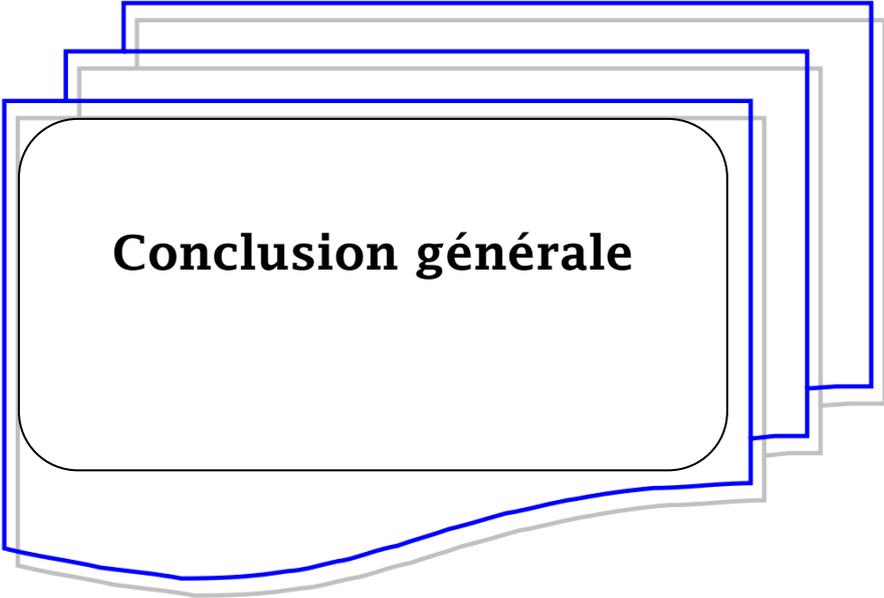
A la fin de cette étude comparative on peut constater qu'il n'existe pas un indicateur qui satisfait tous les critères d'une façon parfaite, mais on doit faire un compromis pour sélectionner les meilleurs. Donc, les trois meilleurs indicateurs de défauts d'excentricité

dans la moteur asynchrones peuvent être classés selon l'ordre suivant :



### III.12 conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons définie la méthode de FFT glissante et en a appliqué cette méthode pour détecter le défaut d'excentricité après la définition des harmoniques qui représentent le défaut étudié. La richesse du spectre du courant statorique en harmoniques à la présence de défaut et même à l'état sain nous a conduit à définir quatre indicateurs de défaut 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.



**Conclusion générale**

## ***Conclusion générale***

Après avoir dressé un état de l'art sur les défauts, causes, effets et statistiques, nous avons sectionné les différentes méthodes de diagnostic de ces défauts, Concernant l'approche signal, la détection des défauts à partir du courant statorique présente un avantage pratique très intéressant.

Nous avons, dans un premier chapitre, rappelé les éléments de constitution de la machine et de préciser les différents défauts pouvant survenir sur ceux-ci, afin de préciser les différents méthodes de diagnostic des défauts.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié le contenu spectral du courant statorique du moteur asynchrone triphasé à cage et on a montré la richesse de ce dernier en 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.

Nous avons présenté dans le troisième chapitre les résultats d'application de l'algorithme proposé (**FFT glissante**) qui permet de détecter et de suivre l'évolution de l'amplitude d'harmonique de défauts définie .

Ensuite, 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 la machine asynchrones peuvent être classés selon l'ordre suivant :

**1/**  $I_{n_4}$

**2/**  $I_{n_1}$

**3/**  $I_{n_3}$

## **Références 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.

**[ALK 03]: S. A. S. Al Kazzaz and G. K. Singh**, "Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques, *Electric Power Systems Research*, vol. 65, pp. 197-221, 2003.

**[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**.

**[BON 08] : BONNETT A.H, YUNG .C**, "Increased efficiency versus increased reliability", *IEEE industry Applications Magazine*, p.1077-2618, January-February 2008.

**[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**

**[KHL15]: LAADJAL, Khaled**. *Modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts par flux 2d*. Mémoire de Master, Université de Mohamed Khaider-Biskra, Faculté des sciences de technologie département d'électrotechnique, **2015**.

**[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*

**[BEL14]**: **BELHAMDI Saad**, *diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différentes techniques de commande, thèse doctorat en sciences, Université de Mohamed Khaider-Biskra, Faculté des sciences de technologie département d'électrotechnique, 2014*

**[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*

**[DID 04]**: **Didier.G**, *Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence de Défaillances ,Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre2004.*

**[AZO 17]** : **AZOUZE Taki Eddine**, *Détection des défauts de court-circuit entre spires statoriques par l'analyse du courant, Mémoire de Master, Université de Mohamed Khaider-Biskra, Faculté des sciences de technologie département d'électrotechnique, 2017*

**[MED12]** : **MEDOUED Ammar**, *surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques applications aux moteurs asynchrones, THESE ,Docteur en Sciences, Université de , 20 Août 1955-Skikda, Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique,2012*