

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## **Mémoire de Fin d'Études**

Présenté à

**L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued**

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

## **MASTER ACADEMIQUE**

En commande électrique

Présenté par

**Belloum Seif Eddine**

**Baghdadi Aymen**

## **Thème**

**Surveillance et diagnostic des défauts dans les moteurs  
asynchrones en utilisant des techniques de traitement du  
signal**

Soutenu le 07/06/2023. Devant le jury composé de :

Dr. Guediri Abdelkrim

Maitre de conférences A

Président

Dr. BESSOUS Noureddine

Maitre de conférences A

Rapporteur

Dr. Bougazal Mohamed asalh

Maitre de conférences A

Examineur

**Année Universitaire 2022/2023**

# *Remerciements*

Nous remercions tout d'abord « ALLAH » qui nous a donné la force et la patience nécessaire pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur du mémoire de Master, **Dr. Noureddine BESSOUS**, pour la confiance dont il nous a gratifié, pour sa gentillesse et ses conseils judicieux qu'il nous a prodigué à chacune de nos rencontres et nous avoir soutenu et dirigé tout au long de ce travail.

Nos vifs remerciements aux membres de jury pour nous avoir fait l'honneur d'examiner et de juger notre travail.

Enfin, nous adressons nos remerciements à tous nos enseignants de la Faculté de la Technologie et précisément les enseignants du Département de Génie Electrique de l'Université d'El-Oued et à toutes les personnes qui, de manière directe ou indirecte, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

# *Dédicace*

Nous dédions ce mémoire à :

Nos chers parents et à toutes nos familles que Dieu les protège et prenne soin d'eux .

A tous qui nous ont aidé à faire ce modeste travail surtout notre cher encadreur .

A toute personne qui a consacré sa vie au service de la science et l'humanité .

# ملخص

تلعب الآلات الدوارة الكهربائية دورًا مهمًا في الحياة اليومية ، خاصة في المجال الصناعي . اخترنا آلات كهربائية دوارة غير متزامنة على شكل قفص السنجاب لأنها الأكثر استعمالا في عديد المجالات .

هذا النوع من الماكينات ورغم متانته يمكن أن يتعرض لعديد العيوب. تقاديا لاحتمال حدوث خسائر كبيرة مع وجود الخلل، أصبحت عملية تشخيص الآلة غير المتزامنة ضرورة ملحة قبل أن تتوقف هذه الأخيرة عن العمل. بالإضافة إلى ذلك ، في مجال تشخيص الأخطاء ومراقبتها ، هناك العديد من الطرق لاكتشاف الأعطال في الآلات غير المتزامنة. من بين هذه التقنيات نذكر:

تحليل توقيع اهتزاز المحرك الكهربائي (MVSA) .

تحليل توقيع تيار المحرك (MCSA) .

تعتمد هاتين الأخيرتين على التحليل الطيفي للإشارات باستخدام تحويل فوريي السريع (TFR) ولقد خصصنا هذا العمل لتحليل النتائج التجريبية في ظل وجود عديد الشروط ( مثل عدم تمركز الجزء الدوار بنوعيه الاستاتيكي والديناميكي) معتمدين في ذلك على تقنية MCSA وتقنية MVSA .

**الكلمات المفتاحية:** آلات كهربائية دوارة غير متزامنة، عدم تمركز الجزء الدوار الاستاتيكي والديناميكي، تحويل فوريي السريع، تحليل تيار الجزء الساكن، تحليل الإشارة الاهتزازية

# *Abstract*

Les machines tournantes électriques jouent un important rôle dans la vie quotidienne, notamment dans le domaine industriel. Nous avons choisi des machines électriques tournantes asynchrones en forme de cage d'écureuil car elles sont les plus utilisées dans de nombreux domaines.

Cette machine, malgré sa durabilité, peut être sujette à de nombreux défauts. Afin d'éviter la possibilité de pertes importantes survenant avec le défaut, il est devenu impératif de diagnostiquer la machine asynchrone avant qu'elle ne cesse de fonctionner. Par tous les moyens, dans le domaine du diagnostic et de la surveillance des machines, il n'y a pas de méthodes de détection des défauts dans les machines asynchrones. Parmi ces technologies nous citons :

Analyse de signature vibratoire des moteurs électriques (MVSA).

Analyse de signature du courant moteur (MCSA).

Ces dernières dépendent de l'analyse spectrale des signaux par transformée de Fourier rapide (TFR) (types dynamiques), reposant sur la technique MCSA et la technique MVSA.

**Mots clés :** machines électriques tournantes asynchrones, décentrage statique et dynamique du rotor, transformée de Fourier rapide, analyse des courants statoriques, analyse du signal vibrationnel.

# *Résumé*

Les machines tournantes électriques jouent un rôle important dans la vie quotidienne, notamment dans le domaine industriel. Nous avons choisi des machines électriques tournantes asynchrones en forme de cage d'écureuil car elles sont les plus utilisées dans de nombreux domaines.

Ce type de machine, malgré sa durabilité, peut être sujet à de nombreux défauts. Afin d'éviter la possibilité de pertes importantes survenant avec le défaut, il est devenu impératif de diagnostiquer la machine asynchrone avant qu'elle ne cesse de fonctionner. Par ailleurs, dans le domaine du diagnostic et de la surveillance des pannes, il existe de nombreuses méthodes de détection des pannes dans les machines asynchrones. Parmi ces technologies nous citons :

Analyse de la signature vibratoire des moteurs électriques (MVSA).

Analyse de la signature du courant moteur (MCSA).

Ces deux derniers dépendent de l'analyse spectrale des signaux par transformée de Fourier rapide (TFR). Nous avons consacré ce travail à l'analyse des résultats expérimentaux en présence de nombreuses conditions (telles que le non-centrage du rotor des deux statiques et types dynamiques), reposant sur la technique MCSA et la technique MVSA.

**Mots clés :** machines électriques tournantes asynchrones, décentrage statique et dynamique du rotor, transformée de Fourier rapide, analyse des courants statoriques, analyse du signal vibrationnel.

## ***Table de matières***

# Table de matières

Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XV
Liste des symboles et abréviations	XVI
Introduction générale.....	2

## Chapitre I

---

### Etat de l'art de la machine asynchrone

I-1-Introduction.....	4
I-2- Constitution de la machine asynchrone.....	4
I-2-1- Stator .....	5
I-2-2- Rotor.....	5
I-2-3- Les organes mécaniques.....	6
I-3- Principe de fonctionnement.....	7
I-3-1- Le champ tournant.....	8
I-3-2- La vitesse de synchronisme.....	8
I-3-3- La vitesse de rotation.....	8
I-3-4- Le glissement.....	9
I-4- Défaut dans la machine asynchrone.....	9
I-4-1- Défauts statoriques.....	9
I-4-2- Défauts Rotorique.....	10
I-4-2-1- Rupture des barres.....	11
I-4-2-1-1- Rupture totale.....	11
I-4-2-1-2- Rupture partielle.....	11
I-4-2-2- Rupture d'anneaux de court-circuit.....	11
I-4-2-3- Excentricité rotorique .....	11
I-4-2-3-1- Excentricité statique.....	12
I-4-2-3-2- Excentricité dynamiques.....	12
I-4-3- Défaut d'un roulement.....	12
I-5- Techniques de diagnostic.....	15
I-5-1- Méthodes sans modèle.....	15
I-5-2- Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic.....	15
I-5-2-1- Transformée de Fourier rapide (FFT).....	15

# Table de matières

---

I-5-2-2- Transformée en Ondelette (TO).....	16
I-5-3- Méthodes du diagnostic à base du modèle.....	16
I-6 Conclusion.....	16
<b>Chapitre II</b> .....	
<b>Aperçu général sur la technique de la MCSA</b>	
II-1-Introduction.....	18
II-2- Etude sur l'excentricité.....	18
II-2-1- L'excentricité statique.....	18
II-2-2- Excentricité dynamique.....	19
II-3- Aperçu sur les Vibrations des moteurs tournants.....	19
II-3-1- Définition.....	20
II-3-2- Origine des vibrations.....	20
II-3-3- Caractéristiques d'une vibration.....	20
II-3-4- Les type de vibrations.....	21
II-3-4-1- Vibrations harmoniques.....	21
II-3-4-2- Vibrations périodiques.....	21
II-3-4-3- Vibrations aléatoires.....	22
II-4- Etude détaillée sur l'MCSA et l'MVSA.....	23
II-4-1- Technique de diagnostic (MCSA) .....	23
II-4-1-1- Analyse spectrale.....	24
II-4-1-1-1- Principe.....	24
II-4-1-1-2- Spectre d'un signal.....	24
II-4-1-1-2-1- Définition d'un signal.....	24
II-4-1-1-2-2- Définition de spectre d'un signal.....	24
II-4-1-2- Analyse spectrale de courant statorique(MCSA).....	24
II-4-1-2-1- Définitions.....	24
II-4-1-2-2- Technique de la FFT.....	25
II-4-1-2-3- Surveillance du moteur asynchrone basée sur la technique de la MCSA.....	29
II-4-2- Technique de analyse vibratoire (MVSA).....	29
II-4-2-1- Généralités.....	29
II-4-2-2- Principe de l'analyse vibratoire .....	30
II-4-2-3- Objectifs d'analyse vibratoire.....	30

# Table de matières

---

II-4-2-4- Avantages et inconvénient dans l'analyse vibratoire.....	30
II-4-2-4-1- Les avantage.....	30
II-4-2-4-2- Les inconvénients.....	31
II-5-Conclusion.....	31
<b>Chapitre III</b> .....	
<b>Analyse du défaut excentricité en utilisant les techniques MCSA et MVSA</b>	
III-1- INTRODUCTION.....	33
III-2- Rappel sur les techniques utilisées (MCSA et MVSA).....	33
III-2-1- MCSA.....	33
III-2-2- MVSA.....	33
III-3- Présentation et réalisation du banc d'essai.....	33
III-3-1- Schéma synoptique général de l'ensemble.....	34
III-3-2- Premier banc d'essais.....	35
III-3-3- Deuxième banc d'essais.....	35
III-4- Analyse du défaut d'excentricité rotorique.....	36
III-4-1- Résultats expérimentaux dédiés à l'excentricité statique.....	37
III-4-2- Analyse spectrale du courant statorique avec excentricité statique.....	38
III-4-3- Analyse spectrale du courant statorique avec excentricité dynamique.....	43
III-5- Détection du défaut d'excentricité statique et dynamique par la méthode de MVSA.....	48
III-5-1- MVSA pour un défaut d'excentricité statique.....	49
III-5-2- MVSA pour un défaut d'excentricité dynamique.....	52
III-6- Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	57
Annexe.....	59
Bibliographie.....	61

## *Liste des figures*

## Chapitre I : Etat de l'art de la machine asynchrone

<b>Fig I.1.</b> Eclaté d'un moteur asynchrone.....	5
<b>Fig I.2.</b> rotor et stator des machine asynchrone.....	6
<b>Fig I.3.</b> Photo simplifiant le principe de fonctionnement de MAS a cage.....	8
<b>Fig I.4.</b> Forme de la main droite.....	8
<b>Fig I.5.</b> Proportion des défauts.....	9
<b>Fig I.6.</b> Représentation des défauts statoriques.....	10
<b>Fig I.7.</b> Différents types d'excentricités.....	12
<b>Fig I.8.</b> Structure d'un roulement.....	13
<b>Fig I.9.</b> Dimension du roulement à bille.....	14
<b>Fig I.10.</b> Certains des défauts de roulement a billes.....	14

## Chapitre II: Aperçu général sur la technique de la MCSA et MVSA

<b>Fig II.1.</b> Excentricité statique.....	18
<b>Fig II.2.</b> Excentricité dynamique.....	19
<b>Fig II.3.</b> Réponse mécanique de la structure du stator.....	20
<b>Fig II.4.</b> Vibration harmonique.....	21
<b>Fig II.5.</b> <i>Vibrations périodiques</i> .....	22
<b>Fig II.6.</b> Vibration aléatoire.....	22
<b>Fig II.7.</b> Les différents points de mesure.....	23
<b>Fig II.8.</b> Principe de la Transformée de Fourier.....	25
<b>Fig II.9.</b> Représentation temporelle et fréquentielle somme de deux sinusoides.....	27
<b>Fig II.10.</b> Perte de localisation temporelle.....	28

## Chapitre III: Analyse des résultats du défaut d'excentricité rotorique

<b>Fig III.1.</b> Schéma de principe de l'acquisition des signaux.....	34
<b>Fig III.2.</b> Photo du banc d'essai dédié au diagnostic.....	35
<b>Fig III.3.</b> Photo du banc d'essai dédié à l'analyse vibratoire.....	36

## Liste des figures

---

<b>Fig III.4.</b> Stratégie et principe de préparation de l'ES et l'ED.....	38
<b>Fig III.5.</b> Spectres du courant statorique à l'étatsain et l'étatdéfectueux de 0 à 1000 Hz.....	41
<b>Fig III.6.</b> Spectre du courant statorique en charge avec un degré d'excentricité dynamique $\delta d=30\%$ ( $s=0.035$ ); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d') (d'')et (e') (e'') : Autour de 3 et 5.....	46
<b>Fig III.7.</b> Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES ( $s=0.032$ ), 0-200 Hz .....	49
<b>Fig III.8.</b> Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES ( $s=0.032$ ), 0-100 Hz.....	49
<b>Fig III.9.</b> Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES ( $s=0.032$ ), 20-80 Hz.....	50
<b>Fig III.10.</b> Spectre d'un signal de vibrations pour une ES alentour de 2fs pour $s=0.032$ .....	51
<b>Fig III.11.</b> Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES aux alentours la fréquence RBPF; « (a) et (b) : 550-800 Hz 'en charge'».....	52
<b>Fig III.12.</b> Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ED ( $s=0.032$ ), « (a) et (b) : 0 - 200 Hz ».....	53
<b>Fig III.13.</b> Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ED ( $s=0.032$ ), 0-100 Hz.....	53
<b>Fig III.14.</b> Bande latérale de kfr alentour de RBPF pour un défaut d'ED ( $s=0.032$ ).....	54

## *Liste des tableaux*

## Liste des tableaux

### Chapitre III : Analyse du défaut excentricité en utilisant les techniques: MCSA et MVSA

<b>Tableau III.1</b> Résultats défaut d'excentricité statistique des machine asynchrone en charge	41
<b>Tableau III.2</b> Les résultats des harmoniques les plus importants affichés sont dans les troisième et cinquième rangs	42
<b>Tableau III.3</b> Les valeurs des harmoniques et l'évolution de leurs amplitudes pour une excentricité statistique	42
<b>Tableau III.4</b> Résultats défaut d'excentricité dynamique des machine asynchrone en charge	46
<b>Tableau III.5</b> le résumé plusieurs caractéristiques de fréquence	47/48
<b>Tableau III.6</b> les Valeurs théoriques et pratiques de quelques harmoniques du signal vibratoire (ES)	50
<b>Tableau III.7</b> Résumé de quelques valeurs théoriques et pratiques des harmoniques causés par le défaut d'ES dans le spectre d'un signal vibratoire	51
<b>Tableau III.8</b> Bilan d'amplitudes caractéristiques du défaut d'ES autour de RBPF	52

## *Liste des symboles et abréviations*

### Liste des symboles et abréviations

$\Omega_R$  : Vitesse angulaire rotorique

$\Omega_S$  : Vitesse angulaire synchrone

$\Omega$  : Vitesse angulaire

$n_s$  : Vitesse de synchronisme

$n_r$  : Vitesse de rotation

$f_s$  : Fréquence de courant statorique

$f_r$  : Fréquence de courant rotorique

MAS : Machine asynchrone

$P$  : Puissance

MCSA : MotorCurrent Signature Analysis

MCSA : MotorCurrent Signal Analysis

$f_{exce}$  : Fréquence caractéristique du défaut d'excentricité

$s, g$  : Le glissement

FFT : Fast Fourier Transform

ES : Excentricité Statique

ED : Excentricité Dynamique

$f_{ES}$  : fréquence caractéristique du défaut d'excentricité statique

$f_{ED}$  : fréquence caractéristique du défaut d'excentricité statique

$N_b$  : Nombre de barres rotoriques

ASCS : Analyse de Signature du Courant Statorique.

FFT: Fast Fourier Transform

LGEB : Laboratoire du Génie Electrique à Biskra

IA : Intelligence Artificielle

## *Introduction générale*

## Introduction générale

La machine asynchrone est l'une des machines les plus utilisées dans l'industrie, grâce à sa durabilité, sa fiabilité et son faible coût. On la retrouve partout dans la plupart des applications, notamment dans les secteurs de haute technologie tels que l'aéronautique, le nucléaire, les industries chimiques, les transports (métro, trains, propulsion véhicules et bateaux, ascenseurs), l'industrie (machines-outils, grues, ...), et même l'électroménager. Malheureusement ces machines sont affectées par divers dysfonctionnements, qui peuvent entraîner des arrêts de production et des dommages matériels.

Ces pannes causent d'énormes pertes aux entreprises et conduisent parfois à la faillite.

Par conséquent, de nombreuses entreprises ont travaillé pour réduire les défauts et les entretenir le plus tôt possible, jusqu'à ce qu'une détection précoce soit la meilleure solution pour éviter les dangers et les entretenir rapidement. Tout cela a conduit à l'émergence d'une nouvelle science connue sous le nom de diagnostic et d'entretien des défauts, représentée par plusieurs techniques, Parmi eux, nous mentionnons :

- Diagnostic par mesure du courant statorique
- Diagnostic par mesure du flux magnétique de dispersion
- Diagnostic par mesure vibrations mécaniques
- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique ...etc .

Le travail de cette thèse s'inscrit dans le cadre de surveillance et diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones en utilisant des techniques de traitement du signal .

Ce travail est structuré dans trois chapitres qui sont agencés de la manière suivante :

Le premier chapitre se concentre fondamentalement à un état de l'art de la machine asynchrone .

Le deuxième chapitre présente les aperçu général sur la technique de la MCSA et MVSA.

Dans le troisième chapitre, nous allons exploiter les résultats expérimentaux pour analyser les défauts de l'excentricité statique et dynamique en se basant sur les méthodes indiquées dans le deuxième chapitre .

***Etat de l'art de la machine  
asynchrone***

## **I.1 - Introduction :**

Machine asynchrone appelée aussi machine à induction est une machine à courant alternatif sans liaison entre le stator et le rotor. Ces machines sont très populaires car elles sont simples, robustes et faciles d'entretien. C'est pourquoi, on les trouve dans de nombreuses applications surtout dans l'électroménager et dans le transport .

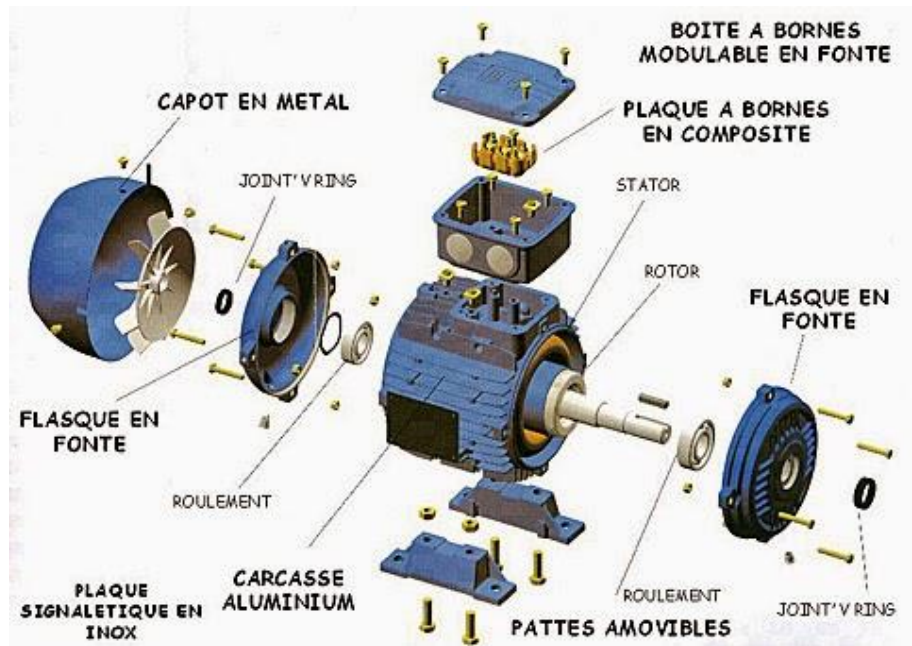
Reste que cette machine peut être affectée par des défauts qui doivent être détectés rapidement pour contribuer à leur diagnostic, leur traitement et à leur amélioration .

Le but est d'intervenir avant l'arrêt définitif des équipements, ce qui les oblige de proposer des outils de surveillance et de diagnostic afin de garantir la continuité de la production et du service pendant le fonctionnement. Nous allons présenter une généralités sur cette machines en indiquant le principe de fonctionnement. En plus, on va montré clairement les défauts qui peuvent affecter les MAS et les différentes techniques de diagnostic utilisées récemment.

## **I.2 - Constitution de la machine asynchrone :**

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- ✓ le stator (partie fixe) constitué de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- ✓ le rotor (partie tournante) 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.



**Figure I.1:** Eclaté d'un moteur asynchrone [ web site 1].

### I.2.1 - Stator :

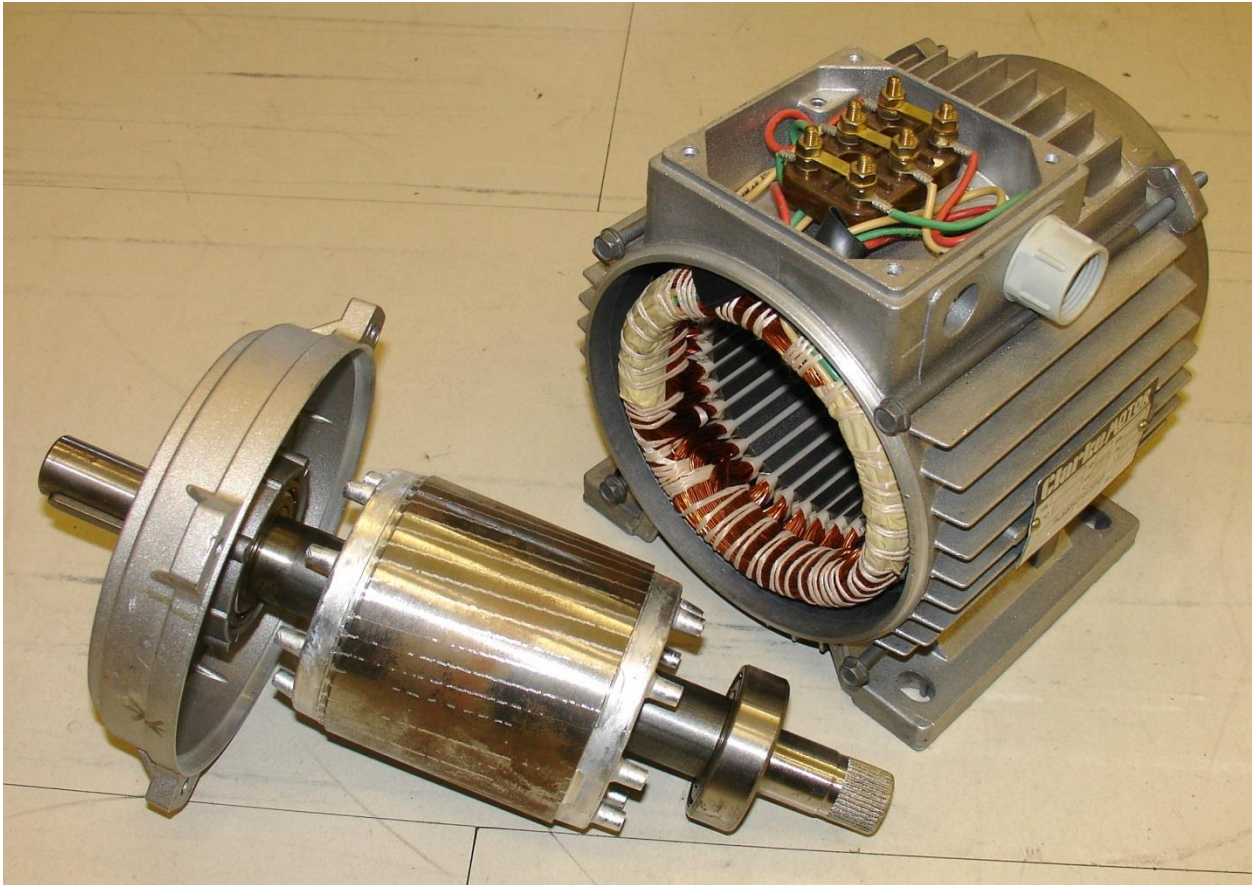
Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine . Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs 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 [OLI 06].

### I .2.2 – Rotor :

Le rotor est constitué comme le stator de toles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les toles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans de plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un moyeu.

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les encoches peuvent être semi-ouvertes ou fermées. Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées par un anneau terminal placé à chaque extrémité du rotor. Les conducteurs sont généralement réalisés par couplage

d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre ou, a l'occasion, en laiton preformees et frettees dans les toles du rotor. Il n'y a generalement pas, ou tres peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les toles magnetique. Leur resistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les toles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [ KHE17].



**Figure I.2 :** rotor et stator des machine asynchrone [web site 2].

### I.2.3 - Organes mécaniques :

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demiaccouplement.

Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire).

Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre

rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.

Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage,...). Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse [CHE12].

### I.3 - Principe de fonctionnement :

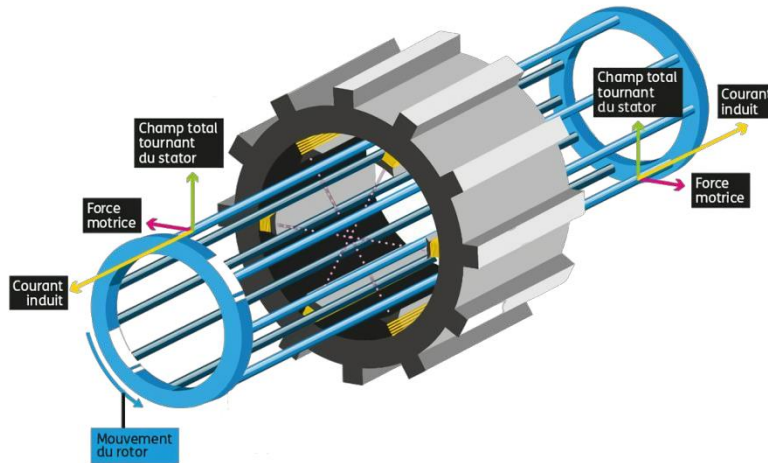
En alimentant les trois bobines statoriques déphasées de 120 degrés ou de  $2\pi/3$  par un système alternatif triphasé, ceci permet de créer un champ magnétique tournant dans l'espace et dans le temps, il peut être considéré comme un champ constant qui tourne à la pulsation de synchronisme .

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{P} \quad [rd/s] \quad (I.1)$$

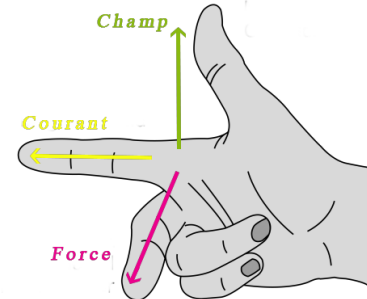
La vitesse à laquelle tourne ce champ magnétique dans l'entrefer est dite : vitesse de synchronisme, elle est directement proportionnelle à la fréquence,  $f$ , du réseau et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles,  $P$ .

$$N_s = 60 \frac{f}{P} \quad [tr/min] \quad (I.2)$$

Ce champ variable coupe les conducteurs rotorique ; et d'après la loi de Faraday:  $e = \frac{d\theta}{dt}$  (tout conducteur soumis à une variation du flux est un siège d'une f.e.m), et donc une force électromotrice induite apparaît, ce qui engendre des courants induits circulant dans les conducteurs rotoriques en court-circuit [LOU 12].



**Figure I.3 :** Photo simplifiant le principe de fonctionnement de MAS a cage [RAM22].



**Figure I.4 :** Forme de la main droite [RAM22].

### I.3.1 - Le champ tournant :

C'est la variation du flux magnétique créée par les courants statoriques, sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence des courants du stator. C'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence d'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme  $\Omega_s$  (rad/s) [RAM 22].

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{I.3})$$

Ou

$$\Omega_s = \frac{2\pi.n_s}{60} \quad (\text{I.4})$$

### I.3.2 - La vitesse de synchronisme :

Pour les moteurs asynchrones, la vitesse de synchronisme dépend de la fréquence d'alimentation et du nombre de paires de pôles  $p$  constituant le stator [RAM 22].

$$n_s = \frac{60.f}{p} \quad (\text{I.5})$$

### I.3.3 - La vitesse de rotation :

D'après la relation précédente (I.7), il est évident que la vitesse mécanique peut être donnée par la relation suivante [RAM 22]:

$$n_r = \frac{60.f_s}{p} (1 - g) \quad (\text{I.6})$$

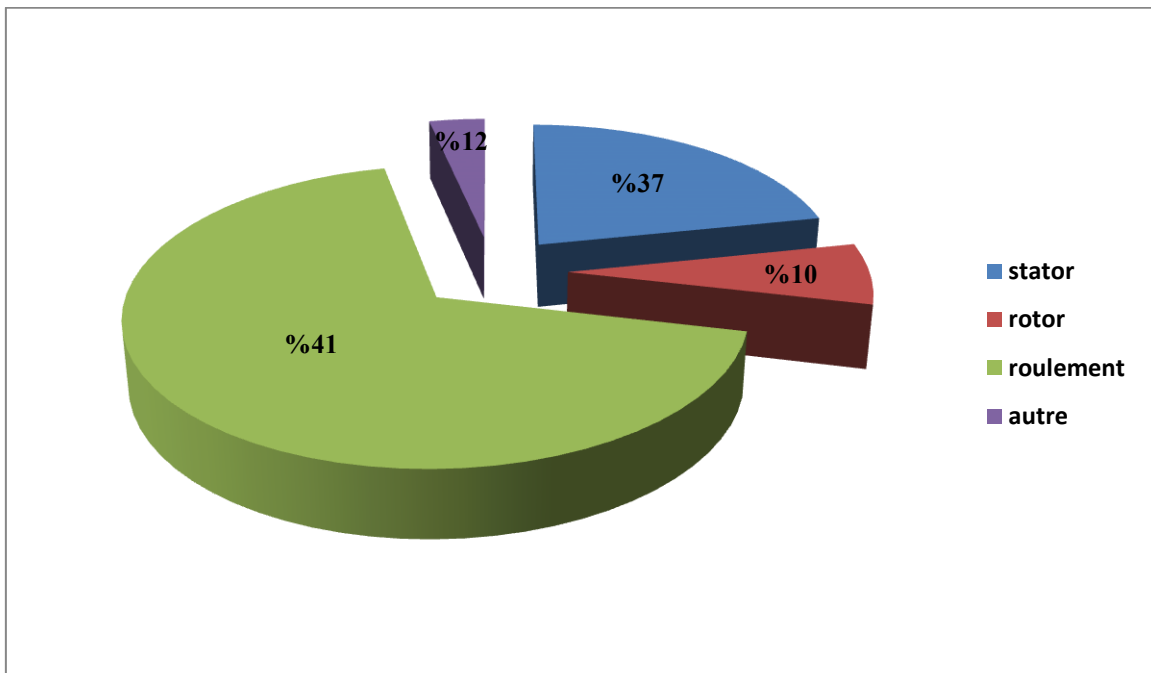
### I.3.4 - Le glissement :

En fonctionnement normal, le rotor d'un moteur asynchrone tourne à une vitesse de  $n_r$  (tours par minute) ou  $\Omega_r$  (radians par seconde). La force magnétomotrice générée par le courant statorique tourne à une vitesse synchronisme  $n_s$ . La vitesse  $\Omega_r$  est généralement inférieure à  $\Omega_s$ . Le glissement "g" est alors défini comme le rapport entre les vitesses par la formule suivante [RAM 22] :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (I.7)$$

### I.4 - Défaut dans la machine asynchrone :

Dans la littérature, des statistiques ont été émises concernant les défauts qui peuvent affecter la machine. La classification se fait selon des critères précis mais différents pour chaque auteur, comme par exemple le critère des variations dues à l'amélioration des isolants .



**Figure I.5 :** Proportion des défauts [ LAD 22].

L'étude précédente permet de classer les défauts suivant leur localisation [LAD 22].

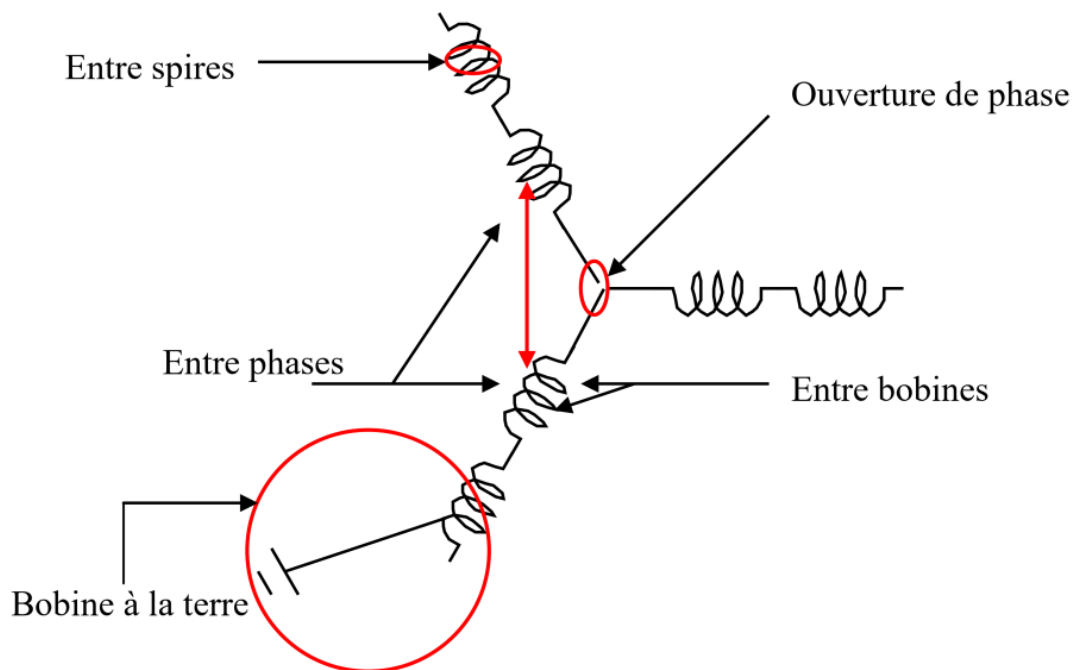
#### I.4.1 - Défauts statoriques :

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. On peut citer à titre d'exemple, les défauts de type courts-circuits inter-spines qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défauts peut être causé par une dégradation des isolants des spines du bobinage statorique. On

peut citer aussi les courts-circuits qui apparaissent entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques [HAK14].

Les défauts les plus récurrents, au niveau du stator peuvent être mentionnés comme suit :

- Court-circuit entre spires de la même bobine .
- Court-circuit entre bobines de la même phase .
- Court-circuit entre phases .
- Ouverture d'une phase .
- Défaut à la terre .



**Figure I.6 :** Représentation des défauts statoriques [BES17].

#### I.4.2 - Défaut de rotorique :

Les défauts qui infectent la partie rotor peuvent être comme suit :

- Rupture de barres.
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.
- Excentricité.

**I.4.2.1 - Rupture des barres :**

**I.4.2.1.1 - Rupture totale :** Barre cassée totalement signifie que le courant circulant dans celle-ci est nul et le courant qui circulait à travers cette barre se répartit sur les autres barres adjacentes. Ces derniers seront surchargés, ce qui provoquera leurs ruptures, et parfois un arrêt total de la machine [RAM22].

**I.4.2.1.2 - Rupture partielle :** Barre cassée partiellement le courant circulant dans la barre n'est pas égal nul mais avec le temps, ça va se briser complètement cassé, car la surface de barre cassée est petite et ne résistera pas au passage du courant, ce qui accélère sa rupture complètement [RAM22].

**I.4.2.2 - Rupture d'anneaux de court-circuit :**

La rupture d'une portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme, il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...etc.) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques. De ce fait, elle engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaires à celui provoqué par la cassure de barres [MED12].

**I.4.2.3 - Excentricité rotorique :**

Dans une machine électrique idéal, le centre du rotor est aligné sur le stator, donc l'axe de rotation du rotor est le même que l'axe du stator.

Cependant, suite à la flexion de l'arbre, à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à l'usure des roulements, à un défaut de charge, ou tout simplement à un défaut de fabrication (usinage) la machine peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple. Ce phénomène est appelé excentricité statique ou dynamique dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement, à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication [ISH 20].

**I.4.2.3.1 - Excentricité statique:**

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

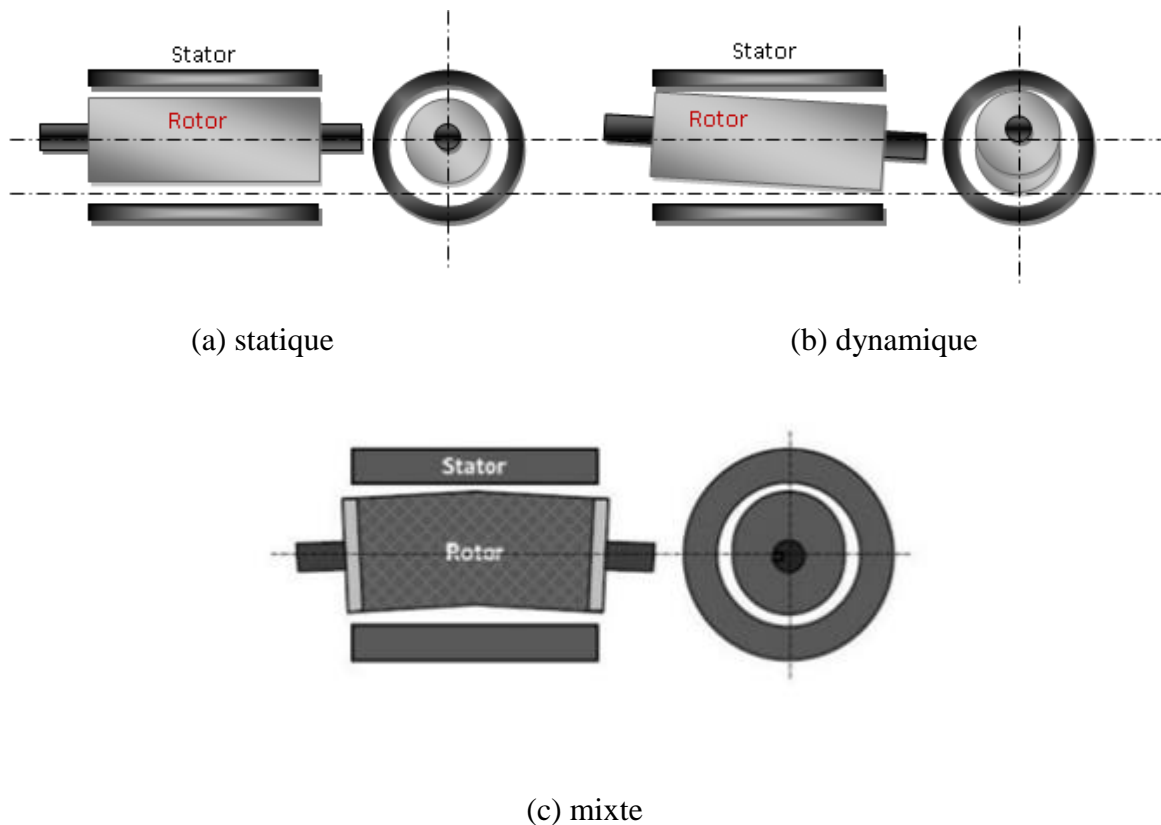
**I.4.2.3.2 - Excentricité dynamiques :**

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

L'apparition des deux types d'excentricité au même temps est généralement appelé :  
excentricité mixte.

Les causes peuvent être; le positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage  
l'usure des paliers ou la torsion de l'arbre.

L'excentricité dans les machines à induction augmente l'apparition des composantes  
additionnelles dans le spectre du courant [RAD07].



**Figure I.7 :** Défauts d'excentricités [BAZ 16].

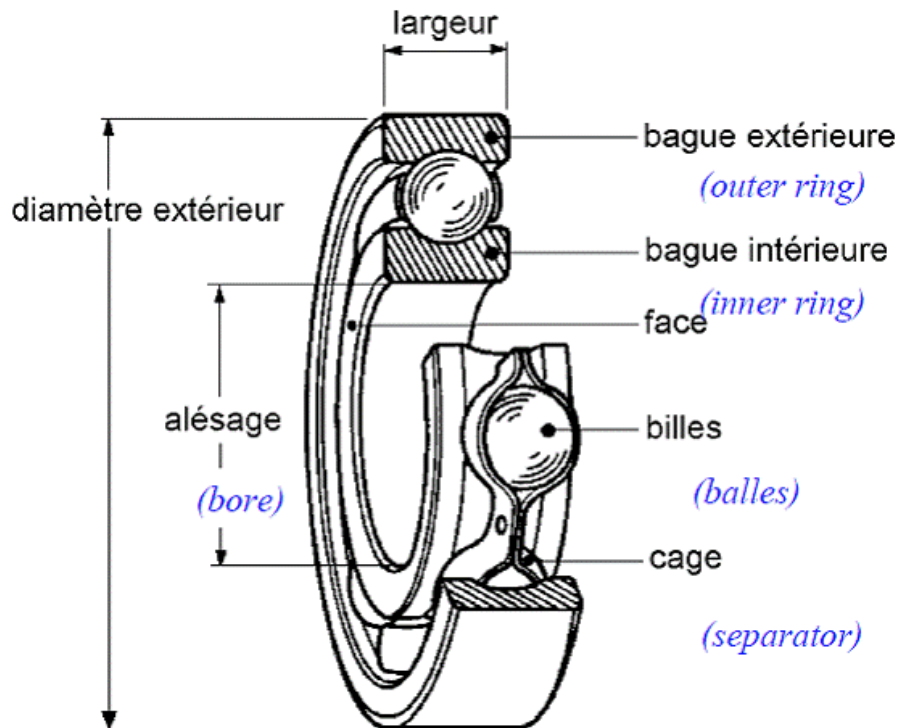
**I.4.3 - Défaut de roulement :**

Le roulement à billes est un organe de base dans la machine asynchrone qui joue le rôle  
d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En plus, il représente l'élément de maintien de  
l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor. La majorité des machines

électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance-prix [ HAL15].

Le roulement est composé par :

- ✓ Deux anneaux concentriques, l'un intérieur et l'autre extérieur .
- ✓ les Billes .
- ✓ Une cage de séparation entre objets roulants .



**Figure I.8 :** Structure d'un roulement [web site 3].

Sur la base de la structure des ( Figure 1.3) nous extrayons les défaut suivantes [RAM 22]:

- Défaut de bille :

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rot} \left[ 1 - \left( \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right)^2 \right] \quad (I.8)$$

- Défaut de bague extérieure :

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[ 1 - \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (I.9)$$

- Défaut de bague intérieure :

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} \left[ 1 + \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (I.10)$$

- Défaut de cage :

$$f_c = \frac{f_{rot}}{2} \left[ 1 - \frac{BD}{PD} \cos(\beta) \right] \quad (I.11)$$

Avec :

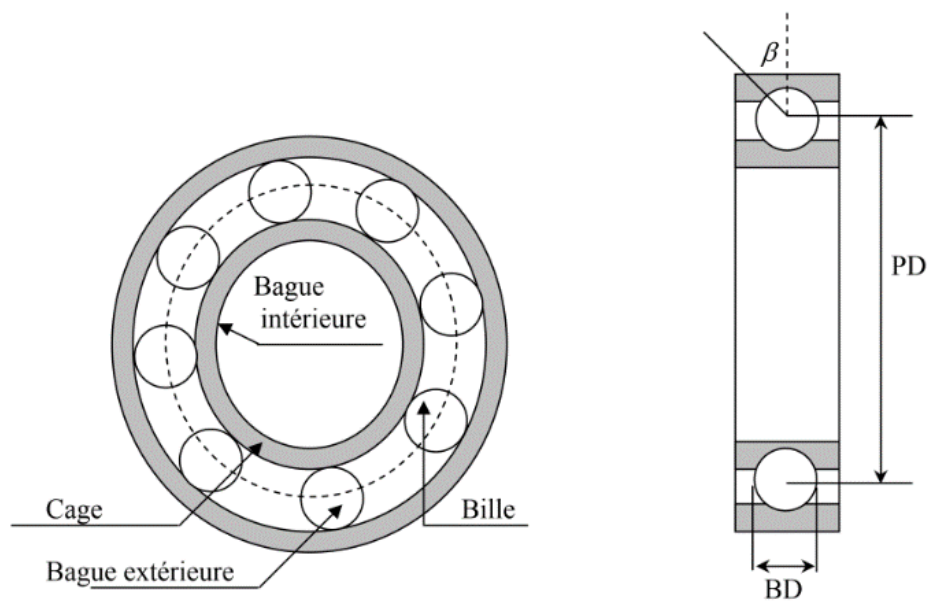
BD : le diamètre d'un élément roulant .

PD : la distance entre les centres des billes diamétralement opposés .

$n_b$  : le nombre d'éléments roulants .

$\beta$  : angle de contact des billes avec les bagues du roulement .

$f_{rot}$  : la fréquence de rotation du rotor.



**Figure I.9 :** Dimension du roulement à bille [RAD07].



**Figure I.10 :** Certains des défauts de roulement à billes [RAM22].

## **I.5 - Méthode de diagnostic et de détection des défauts dans la machine asynchrone :**

### **I.5.1 -Méthodes sans modèle :**

Ces méthodes sont basées soit sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs X physiques affectées par les défauts ou soit par des systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle. Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'information, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal. Les méthodes se basant sur l'analyse des signaux d'acquisition ont l'avantage d'être indépendante des fluctuations internes du système. Ainsi, l'information contenue dans les signaux n'est pas affectée par une éventuelle erreur de modélisation . 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: les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations....etc. Dans ce que suit, on présente brièvement les transformées de Fourier rapide (FFT) et la transformée en ondelettes [HAK 14].

- Diagnostic des machines tournantes par analyse vibratoire :
- Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite :
- Diagnostic par l'analyse des tensions statorique induites
- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique
- Diagnostic par mesure de la puissance instantanée
- Diagnostic par analyse du courant statorique
- Diagnostic par analyse du vecteur de Park
- Diagnostic par utilisation des techniques d' intelligence artificielle (IA)

### **I.5.2 - Techniques de traitement de signal utilisées dans le diagnostic :**

#### **I.5.2.1 - Transformée de Fourier rapide (FFT) :**

Considérons le signal X(t) à temps continu. Si X est à énergie finie, sa transformée de Fourier à la fréquence f est la suivante [ORA 88] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-2\pi f t} dt \quad (\text{I.12})$$

Son inverse est donnée par:

$$X(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{-2\pi f t} df \quad (\text{I.13})$$

### I.5.2.2 - Transformée en Ondelette (TO) :

Le principe est basé sur la décomposition du signal en une base de données avec certaines fonctions. Les ondes sont des fonctions oscillantes au sens large, qui s'atténuent rapidement, contrairement à aux fonctions sinusoïdales pour l'analyse de Fourier. De plus, ses ondelettes La propriété de pouvoir être bien localisée en temps ou en fréquence, ce qui la distingue Analyse temps-fréquence essentiellement classique [HAK14].

### I.5.3 Méthodes du diagnostic à base du modèle :

Deux approches peuvent être utilisées pour diagnostiquer les défauts à partir des modèles paramétriques :

- La première repose sur le suivi des paramètres électriques caractérisant les modèles. Il s'agit de détecter un écart entre l'évolution des paramètres au cours d'un fonctionnement sain et celle suivie par le système en présence de défauts. L'identification des paramètres peut se faire hors ligne [KAL61].
- La deuxième approche consiste à analyser les résidus générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller. Le modèle de processus est constitué de relations de contraintes dynamiques liant deux types de variables des variables inconnues et des variables connues . Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsqu'une défaillance survient. La difficulté majeure consiste à faire la liaison entre le résidu établi et un défaut particulier [GAO 12].

## I.6 - Conclusion :

Ce chapitre est principalement a été consacré aux informations générales sur la machine asynchrone. Nous avons présenté des informations de base sur la MAS, comme nous avons expliqué le principe de fonctionnement de celle-ci. En plus, on a présenté les différents défauts affectant cette machine. Dans le même contexte, nous avons bien montré les techniques récemment utilisées dans le domaine de diagnostic des défauts dans les MAS.

***Aperçu général sur la technique de la  
MCSA et MVSA***

## II.1. Introduction :

La machine asynchrone est l'une des machines les plus utilisées dans l'industrie, grâce à sa durabilité, sa fiabilité et son faible coût. Dans le chapitre précédent, nous avons traité des machines électriques asynchrones, de leurs domaines d'utilisation, de leurs composants et de leurs défauts, ces derniers entraînant de grandes pertes s'il n'y est pas remédié au plus tôt.

Il existe plusieurs techniques pour détecter ces défauts, mais nous aborderons deux techniques qui sont : MCSA et MVSA. Cette partie va traiter les techniques à exploiter attentivement.

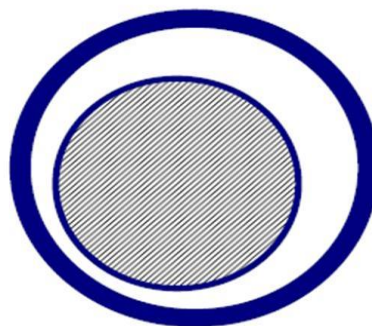
## II.2. Défaut d'excentricité :

L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe dès sa fabrication. La présence d'un certain niveau d'excentricité est normale dans les machines électriques. Des fabricants et utilisateurs spécifient un niveau admissible maximum de 5%, tandis que dans d'autres cas, un niveau maximum de 10% de la largeur d'entrefer est toléré.

L'excentricité se répartie en deux catégories. Excentricité statique et excentricité dynamique. L'excentricité statique se distingue par le fait que le centre du rotor n'est pas égal à celui du stator. L'excentricité dynamique fait que le centre du rotor tourne autour du centre du stator [BEL 14]. Ce défaut peut être la cause d'une flexion de l'arbre, d'un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, de l'usure du roulement ou encore d'un déplacement du noyau statorique [BAB 14].

### II.2.1. Excentricité statique :

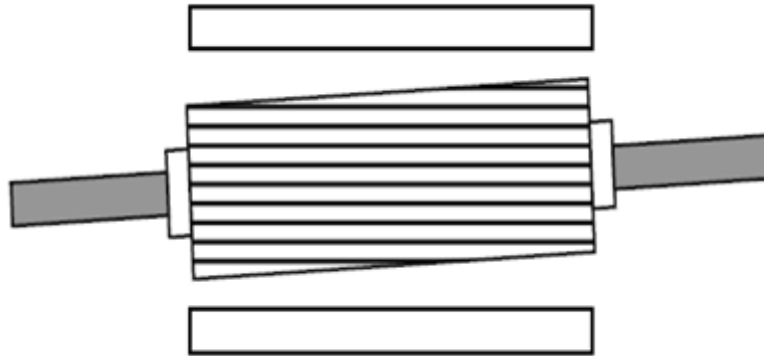
Dans ce type d'excentricité, la position de l'épaisseur minimale de l'entrefer est fixe dans l'espace. Elle peut être causée par l'ovalité de la partie intérieure du stator ou encore par le mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction. Si cependant l'assemblage entre le rotor et l'arbre est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique ne change pas [BAB 14].



**Figure.II.1.** Excentricité statique [HAL 15].

### II.2.2. Excentricité dynamique :

correspond à un centre de rotation du rotor diffère du centre géométrique du stator mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator. Dans ce type d'excentricité, le centre du rotor n'est pas en son centre de rotation et de ce fait la position d'épaisseur minimale d'entrefer tourne avec le rotor. Parmi les causes de ce type d'excentricité, on cite : la flexion de l'arbre du rotor, l'usure ou le défaut d'alignement du roulement [BES 17] .



**Figure.II.2.** Excentricité dynamique [BES 07].

### II.3. Aperçu sur les vibrations des moteurs électriques tournants :

En pratique, une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires dans une machine tournante. Cependant, la machine vieillissant, les fondations travaillent les pièces se déforment et s'usent, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent. Les arbres se désalignent, les paliers s'usent, les rotors se déséquilibrent, les courroies se détendent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux paliers.

Les vibrations relevées lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux paliers.

Les vibrations relevées lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée. C'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser. Lorsqu'un certain seuil (correspondant à un niveau de vibration limite) est atteint, il est possible d'estimer la durée de vie résiduelle

du composant dans les conditions de fonctionnement données à partir de la connaissance des lois d'endommagement [DJE13].

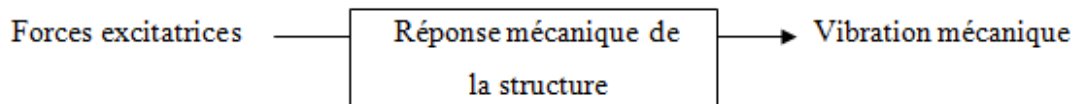
### II.3.1. Définition :

Les machines asynchrones sont constituées d'un ensemble d'éléments, raccordés entre eux. Un défaut se trouvant au niveau de l'un de ces éléments peut transmettre sa vibration aux autres éléments. La vibration est la variation dans le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité oscille autour d'une certaine valeur de référence. On peut dire qu'un corps est en vibration lorsqu'il y a un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence [BES17].

Les différents éléments de la MAS : bâti, roulements, bobinage, accouplements, arbre, paliers, etc. peuvent être caractérisés, en particulier sur le plan vibratoire, par des formes de signaux et des traitements particuliers [BES 17].

### II.3.2. Origine des vibrations :

D'après la définition de la vibration, seules les forces excitatrices appliquées à une structure sont à l'origine de ses vibrations [IMA15]. Le transfert entre ces forces et les vibrations qu'elles engendrent est la réponse mécanique de la structure illustrée dans la Figure (II.3).



**Figure II.3.** Réponse mécanique de la structure du stator [LAD 21].

### II.3.3. Caractéristiques d'une vibration :

Les principales caractéristiques d'une vibration sont :

- Fréquence.
- Amplitude.

#### 1- Fréquence :

La fréquence fait référence à l'occurrence d'un phénomène dans un laps de temps donné, souvent mesuré par le nombre de fois qu'il se répète. Si une seconde est l'unité de temps sélectionnée, la fréquence est indiquée en hertz [Hz]. Une mesure de fréquence, 1 hertz désigne une occurrence singulière par seconde, également appelée 1 cycle par seconde. Si une vibration se répète 20 fois en une seconde, sa fréquence, notée « f », est de 20 hertz [RED 17].

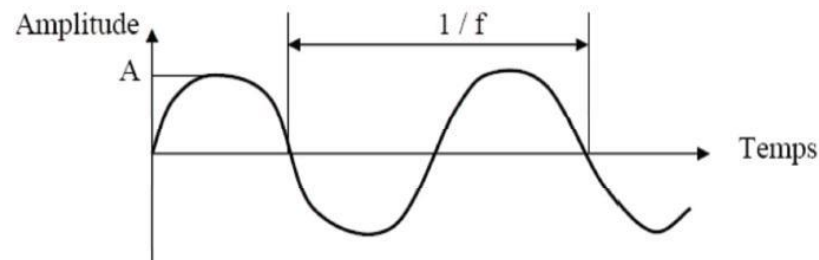
## 2- Amplitude :

Etendue d'une onde vibratoire se mesure en déterminant l'ampleur de ses fluctuations par rapport à un point de référence. Je suis désolé, mais le texte donné est incomplet et ne fournit pas suffisamment de contexte pour que je puisse créer un texte recréé. Veuillez me fournir plus d'informations ou le texte original complet. Le point d'amplitude le plus élevé à partir du point d'équilibre est appelé amplitude ou niveau de crête. Le point ou sommet le plus élevé, associé à la magnitude de l'excursion maximale de l'onde, est communément appelé double amplitude. Il est également appelé amplitude crête à crête ou niveau crête à crête [RED 17].

### II.3.4. Les types de vibrations :

#### II.3.4.1. Vibrations harmoniques :

Une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme amplitude-temps est représenté par une sinusoïde figure (II.4). Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle qui est générée par le balourd d'un rotor en mouvement [LAD 21].



**Figure II.4.** Vibration harmonique [LAD 21].

Elle est décrite par l'équation [LAD21]:

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

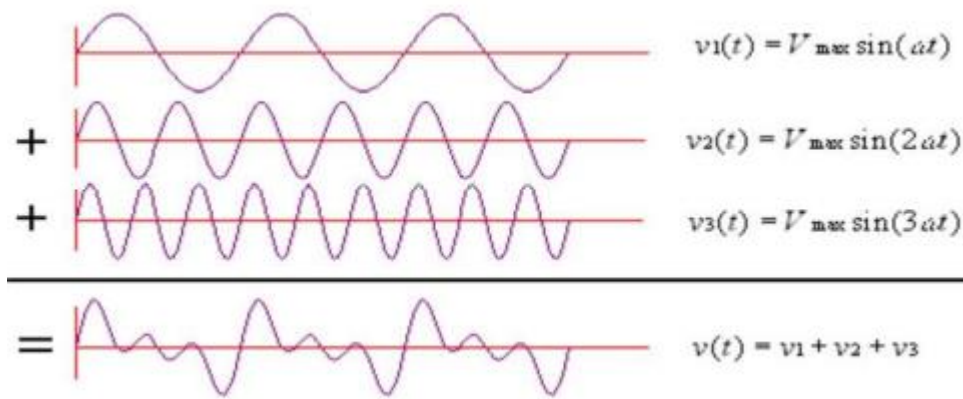
$\omega$  = vitesse angulaire ou pulsation du mouvement ( $2\pi f$ ).

$f$  = fréquence du mouvement.

$\varphi$  = phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps.

#### II.3.4.2. Vibrations périodiques :

Le motif d'une vibration périodique consiste en la superposition, c'est-à-dire l'addition algébrique d'une vibration pure fondamentale et de vibrations pures harmoniques. Les fréquences des harmoniques sont des multiples entiers de celle du fondamental. Par exemple, le mouvement d'un piston d'un moteur à combustion interne génère des oscillations harmoniques [MOK 19].



**Figure II.5.** Vibrations périodiques [MOK 19].

Elle est décrite par l'équation suivante [MOK 19].:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n [X_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \varphi_i)] \quad (\text{II.2})$$

### II.3.4.3. Vibrations aléatoires :

Une vibration aléatoire est telle que son comportement temporel est quelconque, c'est-à-dire que l'on n'observe jamais de reproductibilité dans le temps. C'est le cas des chocs que l'on enregistre sur un broyeur [BOU 18].



**Figure II.6.** Vibration aléatoire [BOU 18].

Elle est décrite par l'équation ci-dessous [BOU 18]:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{\infty} [X_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \varphi_i)] \quad (\text{II.3})$$

## II.4. Etude détaillée de la MCSA et la MVSA :

### II.4.1. Technique de diagnostic (MCSA) [BES 17] [LAD 21] [TAF 07] :

MCSA est l'abréviation des mots en Anglais Motor Current Signal Analysis qui a l'abréviation française ASCS qui signifie : Analyse des Signatures du Courant Statorique ou Analyse Spectrale du Courant Statorique.

La méthode est basée sur l'examen du courant statorique et parce qu'il est facilement accessible, et vu sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA .

La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain. Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique par:

- L'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux paramètres physiques de la machine (nombre de barres rotoriques et nombre des paires de pôles).
- La modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présents dans le spectre du courant. La surveillance via le courant statorique, nécessite une bonne connaissance des défauts et de leurs signatures. Elles sont utilisées pour le moment dans le contexte de machines alimentées par le réseau et pour la recherche de fréquences caractéristiques de défauts , une analyse spectrale du courant statorique (à l'aide de la transformée de Fourier rapide 'FFT') a permis de mettre en évidence, la présence d'harmoniques caractérisant les défauts de la MAS .

Les points de mesures des différents signaux (courant, flux, vibrations,...) à l'aide d'une variété des appareils sont illustrés par la figure (II-7)

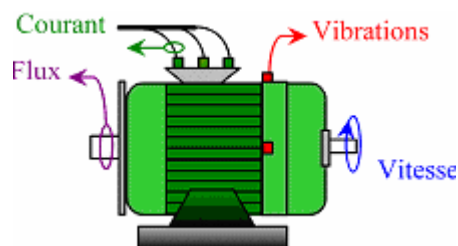


Figure II.7. Les différents points de mesure.

**II.4.1.1. Analyse spectrale :****II.4.1.1.1. Principe:**

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones à cage, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans le bobinage. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquence directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation .

La surveillance par analyse spectrale de la MAS consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont les grandeurs mécanique [HAM 18].

**II.4.1.1.2. Spectre d'un signal:****II.4.1.1.2.1. Définition d'un signal :**

Le signal correspond à la mesure d'une grandeur physique. Mesures de grandeur physique : signal sismique, mesure du pouls, déplacement, voltage, intensité, etc... La plupart des grandeurs physiques sont aujourd'hui converties en signaux électriques puis codées en signal numérique binaires. Il existe très peu de mesures totalement analogiques [BOU 20].

**II.4.1.1.2.2. Définition de spectre d'un signal :**

C'est la représentation en fonction de la fréquence des amplitudes des différentes composantes présentes dans le signal [BOU 20].

**II.4.1.2. Analyse spectrale de courant statorique(MCSA) :****II.4.1.2.1. Définitions:**

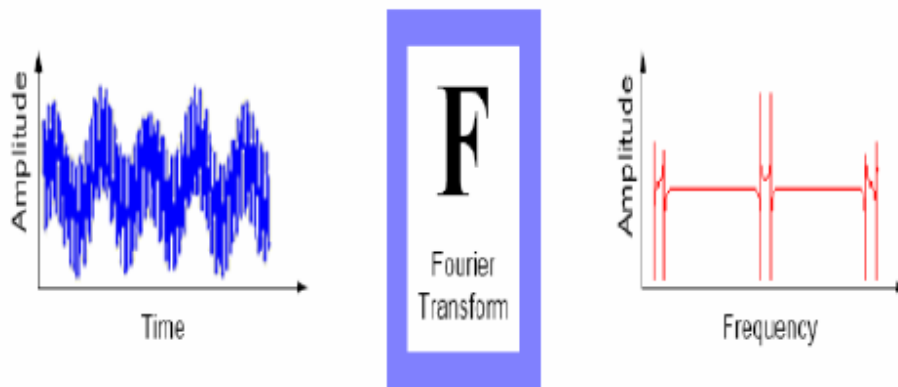
Est une méthode de contrôle qui consiste à analyser le spectre du courant statorique sachant que dans un spectre d'un moteur sans défaut, apparaît la composante du fondamental à la fréquence du réseau d'alimentation en régime permanent, accompagnée des composantes à faibles et hautes fréquences qui sont dues à la géométrie de la machine considérée. Un bon équipement d'analyse de spectre (grande sensibilité) et la comparaison entre les spectres du courant d'un moteur avec défaut et celui de la référence (le spectre du courant d'un moteur sans défaut), permet d'avoir une bonne analyse et obtenir la maximum d'information sur l'état de moteur [ELG 22].

Cette méthode est utilisée lors de fonctionnement normale du moteur (moteur en marche) ce qui facilite beaucoup la surveillance de la machine et indique à chaque instant l'état de leur fonctionnement [ELG 22].

#### II.4.1.2.2. Technique de la FFT :

En 1807, la transformation de Fourier a vu le jour, 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. 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 [BAZ16].

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

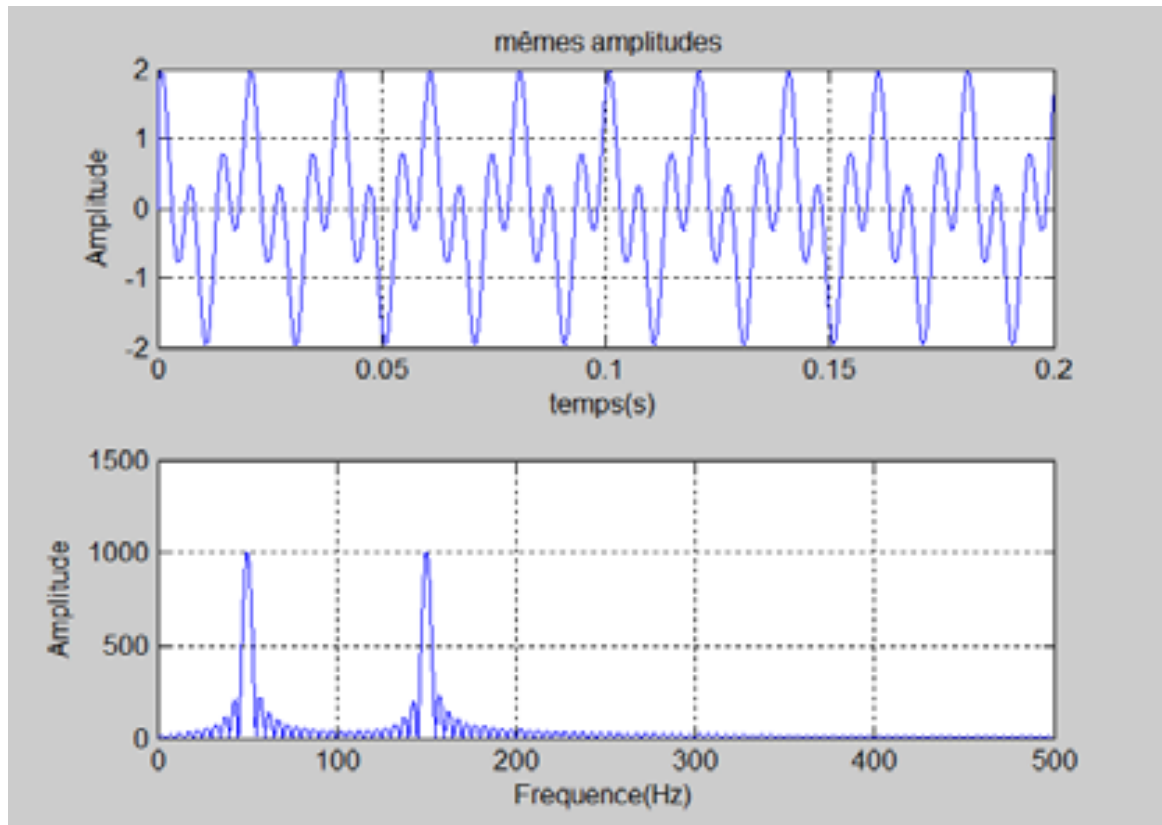


**Figure II.8.** Principe de la Transformée de Fourier [LAD 21].

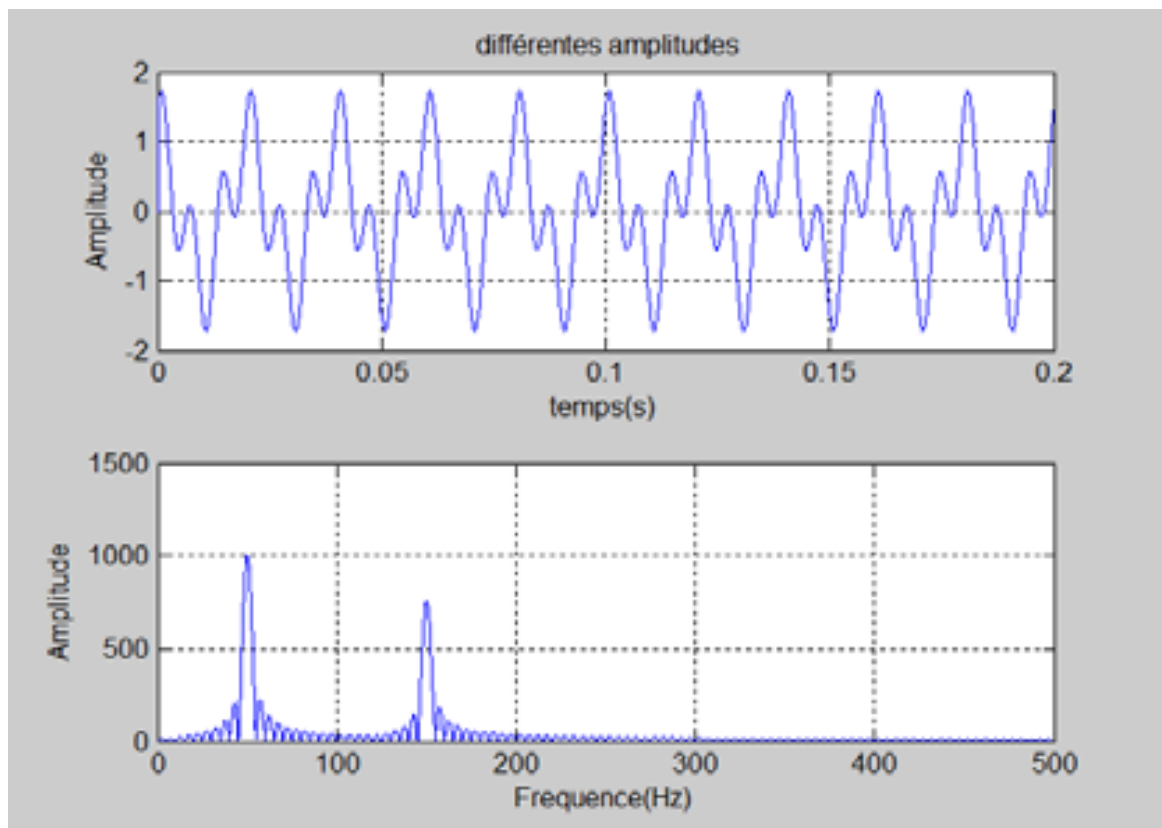
#### - Transformée de Fourier rapide (FFT) :

La transformée de Fourier rapide, est une technique mathématique de calcul rapide élaborée en 1965 par J. W. Cooley et J. W. Tuckey. La FFT permet de ramener le calcul de la transformée de Fourier discrète de  $N^2$  à  $N \cdot \log(N)$  opérations. Cette réduction de la complexité de calcul a suffi à faire passer facilement résolubles de nombreux problèmes liés à l'analyse spectrale. Pour une meilleure visualisation d'une analyse fréquentielle, la FFT est utilisée au travers d'une fenêtre glissante d'observation. 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 . Le première exemple sur un signal stationnaire est composé d'une somme de deux sinusoides de fréquences (50 et 150 Hertz) de même amplitude, dont FFT voir figure (II.9.a), et d'amplitude différente, dont FFT voir figure (II.9.b). On constate qu'avec l'analyse de Fourier, les deux signaux sont identiques en raies spectrales et bien sûr les amplitudes different [LAD21].



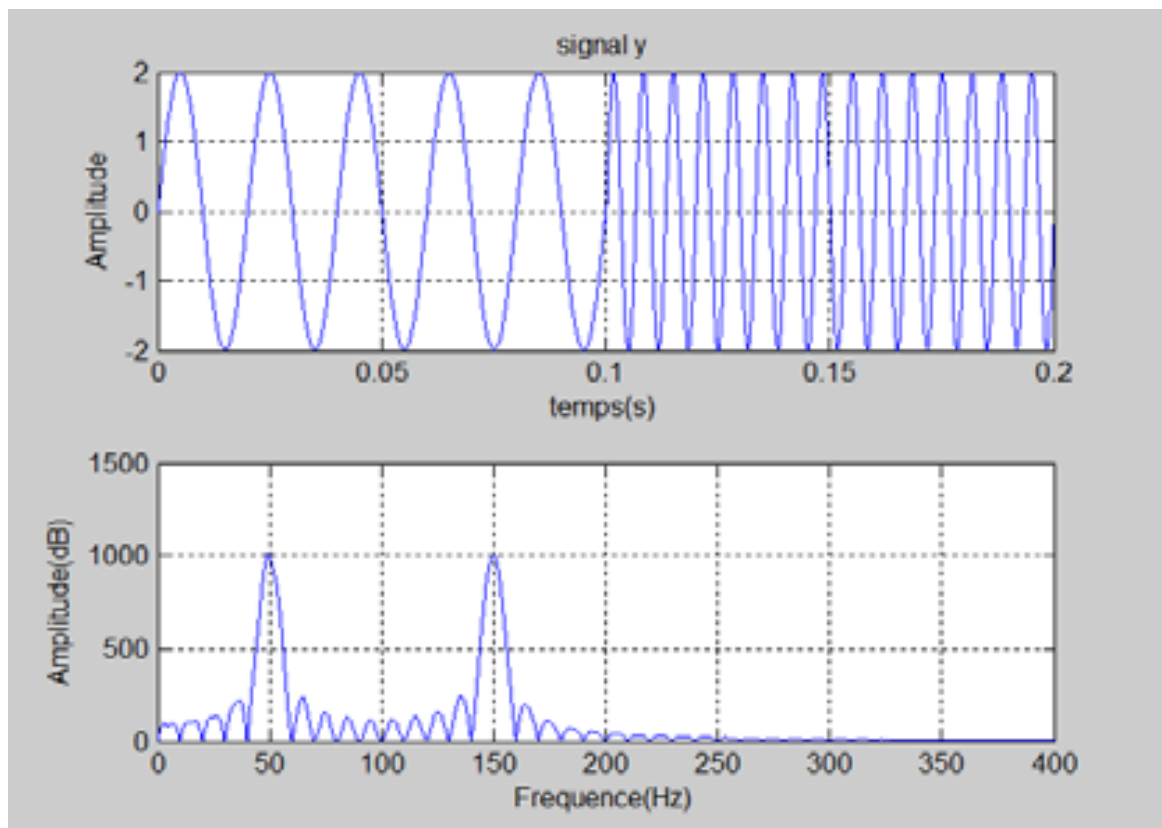
(a) : mêmes amplitudes.



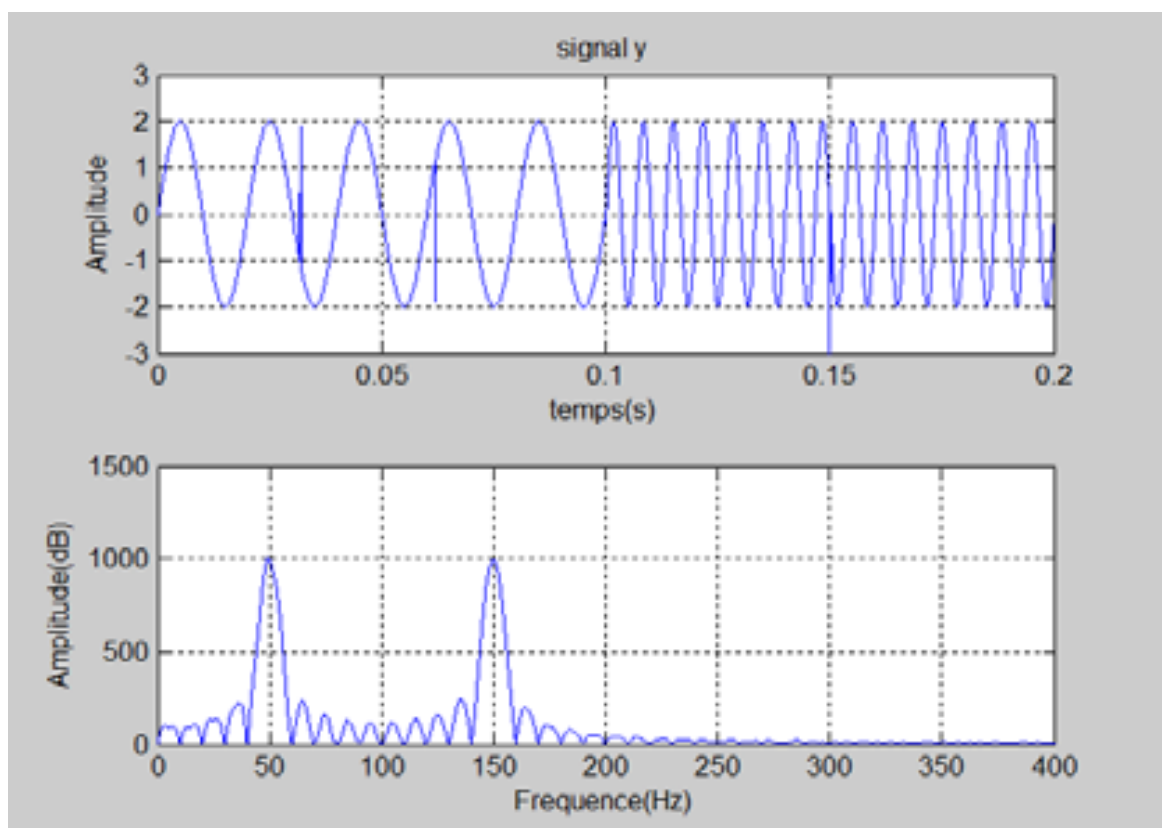
(b) : amplitudes différents

**Figure II.9.** Représentation temporelle et fréquentielle somme de deux sinusoids [BAZ 16].

Le deuxième exemple sur un signal non stationnaire, l'allure fréquentielle se change dans le temps, en passant d'une sinusoïde de 50Hz à une autre de 150hz avec le même amplitude. On remarque que l'analyse en fréquence est incapable de donner l'information sur la localisation temporelle du changement de régime dans le signal de la figure (II.10). On le constate aussi que dans la figure (II.10.b) une impulsion est ajoutée par rapport à la figure (II.10.a), mais sans aucun impact sur la FFT .



(a) : succession de deux sinusoïdes.



(b) : succession de deux sinusoïdes +impulsions

**Figure II.10.** Perte de localisation temporelle [BAZ 16].

**II.4.1.2.3. Surveillance du moteur asynchrone basée sur la technique de la MCSA :**

D'après la littérature, les principaux signaux du moteur utilisés et utilisables pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine sont les suivants :

- Couple électromagnétique
- Puissance instantanée statorique
- Vibration mécanique
- Courant statorique

Parmi tous ces signaux utilisable, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants et ce pour deux raisons :

1. La surveillance du courant statorique permet de détecter voire de diagnostiquer aussi bien des défauts électromagnétiques (déséquilibre de phase, court-circuit entre spire, excentricités d'entrefer, rupture de barres....) que des défauts purement mécaniques (dégradation des roulements à bille, désalignement ....) .
2. Le courant statorique est très facile d'accès puisqu'il est utilisé pour la commande de la machine et qu'il peut être mesuré directement au poste d'alimentation [BAZ16].

**II.4.2. Technique de analyse vibratoire (MVSA) :****II.4.2.1. Généralités :**

Toutes les machines vibrent et le spectre des fréquences de leurs vibrations a un profil particulier lorsqu'elles sont en état de "bon fonctionnement". Mais dès que les phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement apparaissent, le profil de ce spectre se modifie. L'analyse des vibrations ouvre de réelles perspectives de diagnostic et devient par là un élément important de la maintenance conditionnelle. Une machine idéale ne vibrerait pas car toute l'énergie serait employée pour effectuer le travail. Des vibrations apparaissent, provoquées par des excitations provenant des organes en mouvement. Une partie de l'énergie est dissipée dans la structure sous forme de vibrations. La machine vieillissant, les pièces se déforment et de légers changements dans leurs propriétés dynamiques apparaissent. Les arbres se désalignent, les paliers et les roulements s'usent, les rotors se déséquilibrent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire donc une baisse de l'énergie efficace. L'intérêt des signaux de vibrations est de pouvoir accéder, par l'intermédiaire de

traitements adaptés, à la caractérisation des efforts dynamiques, et particulièrement ceux résultant d'excitations anormales.

#### **II.4.2.2. Principe de l'analyse vibratoire:**

Le principe de l'analyse vibratoire est basé sur l'idée que les structures des machines, excitées par des efforts dynamiques, donnent des signaux vibratoires dont la fréquence est identique à celle des efforts qui les ont provoqués. La mesure globale prise en un point est la somme des réponses vibratoires de la structure aux différents efforts excitateurs. On peut donc, grâce à des capteurs placés en des points particuliers, enregistrer les vibrations transmises par la structure de la machine, et par leur analyse, identifier l'origine des efforts auxquels elle est soumise. De plus, si l'on possède de la signature vibratoire de la machine en état de bon fonctionnement, on pourra, par comparaison, apprécier l'évolution de son état ou déceler l'apparition d'efforts dynamiques nouveaux consécutifs à une dégradation en cours de développement [LAD21].

#### **II.4.2.3. Objectifs d'analyse vibratoire [DJE13] :**

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

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

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- ✓ soit dans le domaine temporel.
- ✓ soit dans le domaine fréquentiel.
- ✓ soit dans les deux à la fois.

#### **II.4.2.4. Avantages et inconvénients dans l'analyse vibratoire [BAC17] :**

##### **II.4.2.4.1. Les avantages :**

- ❖ Détection de défauts à un stade précoce.
- ❖ Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi.
- ❖ Autorise une surveillance continue.
- ❖ Permet de surveiller.
- ❖ L'équipement à distance.

**II.4.2.4. 2. Les inconvénients :**

- ❖ Spectres parfois difficile interpréter.
- ❖ Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses.

**II.5. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes de diagnostic suivantes: analyse du courant MCSA et analyse des vibrations MVSA. Tout d'abord, nous avons discuté la méthode d'analyse de la Signature du moteur Current MCSA-FTT. Ensuite, nous avons donné un aperçu sur l'analyse des vibrations, telles que : Définition des vibrations, objectifs d'analyse le principe des vibrations, l'analyse des vibrations, etc .

***Analyse du défaut excentricité en utilisant  
les techniques: MCSA et MVSA***

### **III.1 INTRODUCTION :**

La déviation excentrique du rotor d'une MAS conduit à un entrefer irrégulier. On constate que ce défaut est la cause principale de la courbure de l'arbre, ce qui conduit à la mauvaise position du rotor par rapport au stator du système électrique. Cela se traduit par un défaut dans le les MAS .

Nous constatons que la méthode de libération de courant dépend principalement de l'analyse spectrale du stator afin de détecter les défauts et de diagnostiquer l'état de la MAS. Quant à la method MVSA, elle fonctionne sur la mesure de la vibration, elle est causée par l'accélération du mouvement de la membrane, et d'utiliser des capteurs de haute précision afin d'obtenir de bons résultats pour certains défauts qui infectent la machine.

### **III.2 Rappel sur les techniques utilisées (MCSA et MVSA) :**

#### **III.2.1 MCSA :**

La technique MCSA est basée sur l'analyse du signal de courant statorique de la machine dans l'état sain et sa comparaison avec le signal de courant dans l'état du défauts à cause de l'impossibilité de voir la différence entre les deux signaux. Donc de ne pas atteindre les défauts, on convertit ces deux signaux en un signal qui vaut amplitude par rapport à HZ en utilisant la technique FFT.comme il est possible de comparer et d'étudier les défauts qui apparaissent dans la machine .

#### **III.2.2 MVSA :**

La technique MVSA est basée sur l'analyse du signal de vibration statorique de la machine dans l'état sain et sa comparaison avec le signal de courant dans l'état du défaut à cause de l'impossibilité de voir la différence entre les deux signaux. Donc de ne pas atteindre les défauts. On convertit ces deux signaux en un signal qui vaut amplitude par rapport à HZ en utilisant la technique FFT. comme il est possible de comparer et d'étudier les défauts qui apparaissent dans la machine .

### **III.3 Presentation et realisation du banc d'essai :**

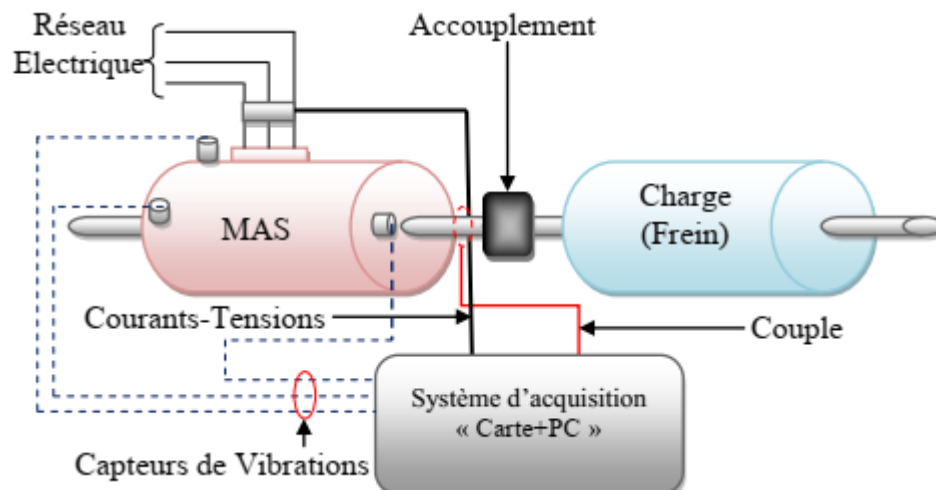
Afin de surveiller un système, nous devons suivre les étapes des opérations étape par étape afin de pouvoir mesurer et détecter les grandeurs physiques dépendant dans de nombreuses circonstances directement de l'appareil afin de montrer les résultats afin de mesurer les quantités qui sont dans une plage reconnue gamme de valeurs pour obtenir la continuité de la maîtrise de tous les systèmes. Nous avons fait cela avec quelques méthodes de diagnostic telles que la

technique d'analyse du courant électrique ainsi que l'analyse des vibrations et pour cela nous présenterons dans cette partie la conception de deux bancs d'essai pour moteurs asynchrones dont les paramètres sont présentés en annexe donc on retrouve parmi les grandeurs mesurées les courants et les signaux vibratoires et ces deux derniers sont obtenus L'un des capteurs qui est considéré comme le moyen le plus important pour mener à bien les tests, donc si ces capteurs ne sont pas adaptés , vous ne pourrez pas suivre la suite du traitement pour donner une bonne mesure ou avancer vers la bonne décision . Ces essais pilotes nous ont permis d'effectuer des analyses sur les défauts électriques afin de contribuer à leur validation, à l'aide d'algorithmes de diagnostic spécifiques.

### III.3.1 Schéma synoptique général de l'ensemble :

La figure (III-1) montre la structure globale du montage expérimental. Le diagnostic s'effectue par l'intermédiaire de la carte d'acquisition reliée au micro-ordinateur du PC. La carte de développement comprend tous les environnements proches d'un processeur PC, ainsi que les outils logiciels (Matlab et LabView) nécessaires à l'application cible .

Il est nécessaire d'écrire des algorithmes précis dans le langage correspondant, afin d'obtenir une meilleure lisibilité et compréhension, et de faciliter les développements ultérieurs. Un autre point important est l'échantillonnage ; en principe, pour éviter toute perte d'information, la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  doit satisfaire la condition de Nyquist :  $f_e > 2f_{max}$ .



**Figure III.1.** Schéma de principe de l'acquisition des signaux [BES 17].

Un bon choix de résolution en fréquence isole les composants les plus proches du fondamental. La collecte des données est effectuée avec une fréquence d'échantillonnage de 10Khz ou 12,8Khz et un temps de collecte de 10 secondes. Cela donne une très bonne résolution en fréquence de  $\Delta f = \pm 0.1\text{Hz}$  [BES 17].

### III.3.2 Premier banc d'essais :

Les plateformes de test sont aujourd'hui principalement utilisées pour la détection, l'analyse et la validation expérimentale de résultats théoriques. Le premier banc de test est dédié à l'analyse du courant, de la tension ou du couple. De plus, certaines cartes d'acquisition d'images peuvent ne pas être en mesure de détecter le signal de vibration. Les principaux composants de la plateforme sont :

- carte temps réel DSPACE DS1104 ;
- MAS avec rotor à cage d'écurieuil : AZAZGA 3 kW, couplage delta,  $p=2$  ;
- Les charges utilisées pour le freinage sont des moteurs à courant continu ou des freins à poudre magnétique.

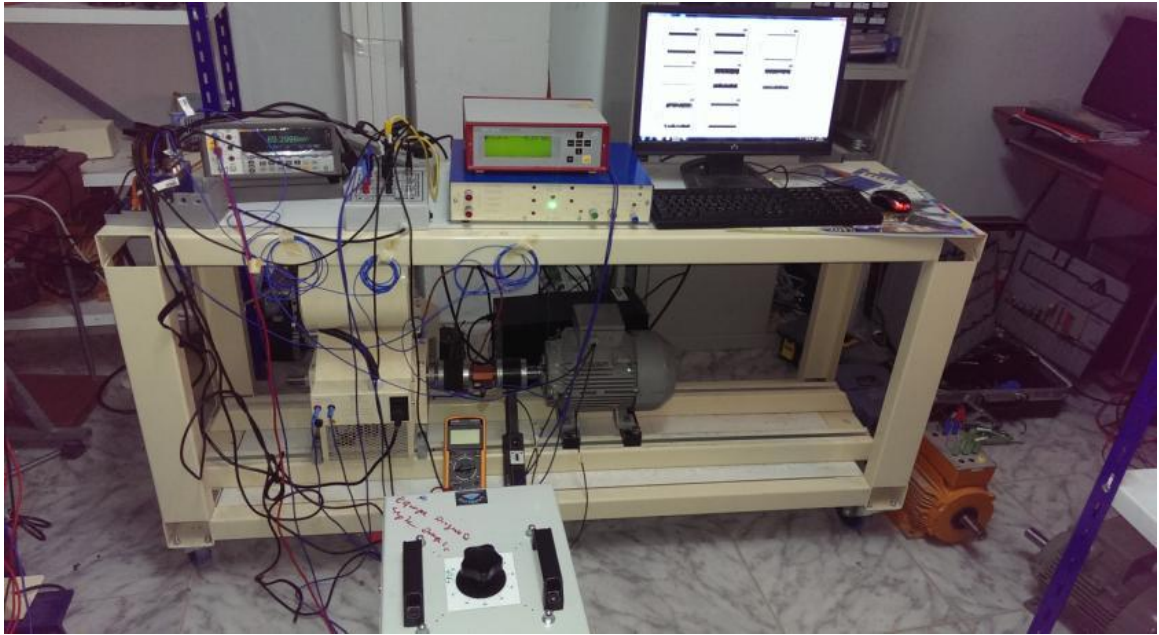
La figure (III-2) montre une photo du système expérimental connecté à la carte Dspace, qui est convertie en Matlab/Simulink [BES 17].



**Figure III.2.** Photo du banc d'essai dédié au diagnostic [BES 17].

### III.3.3 Deuxième banc d'essais :

Le deuxième banc permet de mesurer les signaux suivants : vibrations, courants, tensions et couples. Il est associé à une carte d'acquisition NI (National Instruments) pilotée par un LabView. L'image de ce banc d'essai est représentée sur la figure (III-3)



**Figure III.3.** Photo du banc d'essai dédié à l'analyse vibratoire [BES 17].

Nous allons présenter une analyse complète de défaut : excentricité en se basant sur les résultats expérimentaux obtenus à partir des bancs d'essais [BES 17].

### **III.4 Analyse du défaut d'excentricité rotorique :**

Une déviation du rotor est une possibilité pour les machines électriques. Les environnements de machines électriques contiennent souvent un certain degré d'excentricité. Les fabricants et les utilisateurs spécifient un degré naturel maximal de 5 %, alors que dans certaines situations, un pourcentage maximal de 10 % est autorisé . Cependant, un très faible degré d'excentricité réduit les vibrations et le bruit et minimise les contraintes radiales pouvant entraîner un frottement entre le stator et le rotor pouvant endommager la machine. Les ordinateurs asynchrones ont généralement des points d'entrée plus petits que d'autres types de machines avec des tailles et des performances comparables . En effet, ils sont plus sensibles aux excentricités.

L'accélération du rotor se traduit par des oscillations de paires. L'excentricité est une condition qui peut être statique ou dynamique, et la cause première peut être attribuée à un positionnement défectueux de la palette, à un défaut d'enroulement, à un problème de charge ou à un défaut de fabrication. Il existe trois formes différentes d'excentricités : l'excentricité statique, l'excentricité dynamique et l'excentricité mixte, qui combine les deux premiers cas , . Le comportement des systèmes mécaniques et magnétiques de la machine est altéré par ce défaut. En effet, l'augmentation de l'excentricité se traduit par une augmentation des forces

électromagnétiques qui affectent directement l'induit du stator et l'enroulement associé, dégradant l'isolement du système. Cela donne lieu à des niveaux vibratoires importants .

Dans cette section, le but de notre étude est d'identifier le défaut d'excentricité de rotor à l'aide de la méthode MCSA-FFT. Comme nous l'avons déjà vu, l'analyse spectrale du courant joue un rôle important dans l'identification de la cassure des ruptures de barres. Nous examinerons attentivement l'excentricité déficiente statiquement et dynamiquement (ES et ED). Les tests expérimentaux du laboratoire (LGEB) nous ont permis d'examiner, d'analyser et de traiter les données afin de fournir un bon diagnostic.

### III.4.1 Résultats expérimentaux dédiés à l'excentricité statique :

Notre sélection de MAS n'inclut pas une disposition de banque de test inoffensive ou complète. La décision est influencée par un certain nombre de facteurs, mais le facteur le plus important est que cet outil est si omniprésent. Le siège pilote équipé comprend le MAS étudié couplé à un frein piloté. Ce banc est conçu pour analyser divers défauts de machines électriques. En raison de la valeur de l'entrée, la génération de l'erreur d'inclinaison nécessite une grande précision. Il existe de nombreuses façons de se préparer à un défaut ES ou à un défaut ED.

Notre tendance à la décentralisation dépend du réglage de la bague de roulement comme il est requis. Nous savons que tout problème dans l'anneau intérieur provoque une déviation dynamique, et que tout problème dans l'anneau extérieur provoque une déviation statique, le but est d'ajouter des boucles supplémentaires qui ont la forme ovale aux dimensions suffisamment précises pour éviter tout problème de frottement entre le stator et le rotor. Sur cette base, et à déflexion constante, on a une boucle entre la bague extérieure du roulement et le flasque en conservant les mêmes dimensions bague intérieure. Cette version est assez pratique pour créer un ES ou un fichier inclinaisons de déviation fixes. De la même façon, et pour DE, sinon, on maintenir les dimensions de l'anneau extérieur et placer un anneau de forme ovale entre eux l'arbre rotatif et la bague intérieure du roulement.

Il est important de noter qu'en réalité, ce niveau d'écart ne peut être garanti à 100 %. Il y a toujours un certain degré d'excentricité qui conduit à un mélange d'excentricité. Cette réalisation a pour but d'augmenter une anomalie par rapport à l'autre. La figure III-4 représente une photographie de roulement avec les bagues supplémentaires pour clarifier l'opération de création de l'ES et de l'ED [BES 17].



**Figure III.4.** Stratégie et principe de préparation de l'ES et l'ED [BES 17].

### III.4.2 Analyse spectrale du courant statorique avec excentricité statique :

Le principal défaut dans ce cas est l'excentricité statique, qui est détectée par l'analyse spectrale du MSA. Au niveau du courant, ce cas se prête bien à l'approche, ce qui peut se traduire par l'apparition de fréquences supplémentaires. Afin de surveiller le courant de la machine à l'aide d'une analyse spectrale, il est nécessaire de faire une transformée de Fourier sur les grandeurs affectées par le défaut et de regarder les fréquences supplémentaires qui constituent la signature du défaut. Pour cette configuration particulière de la panne ES, nous avons la possibilité d'analyser le spectre du courant statorique pour les deux fonctionnements de la machine à soixante quinze pour cent de la charge (g3,2%) .

Remarque Relie le nombre de barres au nombre de paires de colonnes. La formule suggérée ne signifie pas non seulement l'apparition des SHR, mais aussi l'obligation de comparaître ou de ne pas comparaître erreur de déviation statique et dynamique. Le principe de ce dernier est organisé comme Il suit:

*a/* On trouve les *PSHs*, si et seulement si cette formule est vérifiée :

$$N_{br} = 2 \cdot p[3(m \pm n) \pm r] \quad (III.1)$$

avec,  $m \pm n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;  $r = 0$  ou  $1$

En effet, cette proposition est vérifiée pour notre machine, c'est-à-dire :

$$N_{br} = 2 \cdot p[3(m \pm n) \pm r] = 28 = 2(2) \cdot [3 \cdot (2) + 1] = 28$$

*b/* On trouve les fréquences caractéristiques de l'excentricité statique ou l'excentricité dynamique seulement, si la formule suivante est vérifiée :

$$N_{br} = 2.p[3(m \pm n) \pm r] \pm d \quad (III.2)$$

avec,  $m \pm n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ,  $r = 0$  ou  $1$  ;  $d = 1$  ou  $2$ .

Dans ce cas et selon Nandi et al. , les PSHs sont apparaissent seules.

Cette étude aide au diagnostic des défauts d'excentricité statique et dynamique purs.

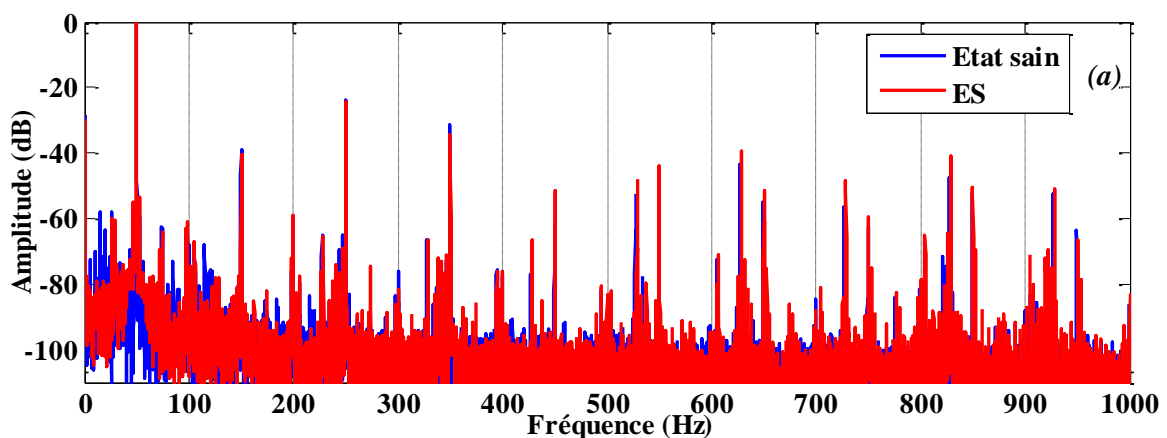
La figure (III-5) montre le spectre du courant statorique pour 75% de la charge. Cela peut s'expliquer, en effet, par l'existence d'un faible déséquilibre, dû à la fabrication du rotor.

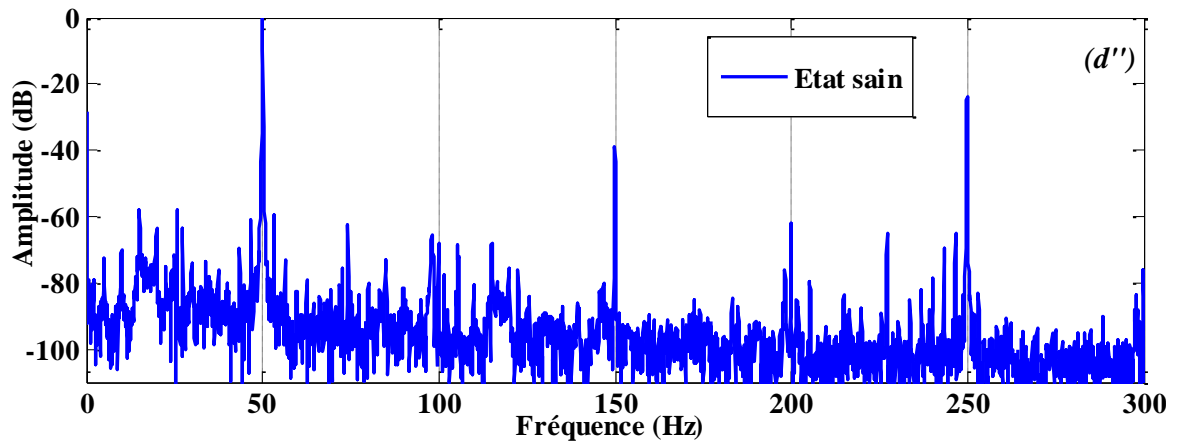
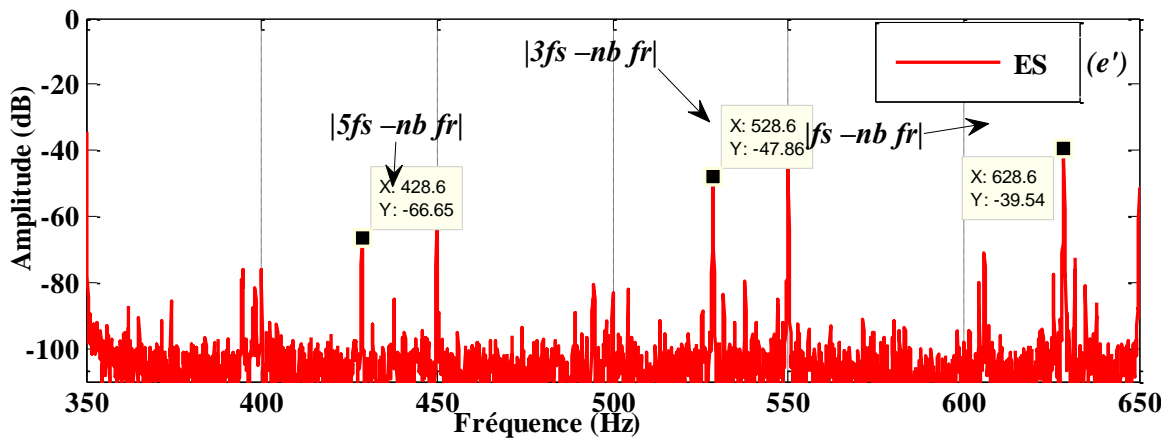
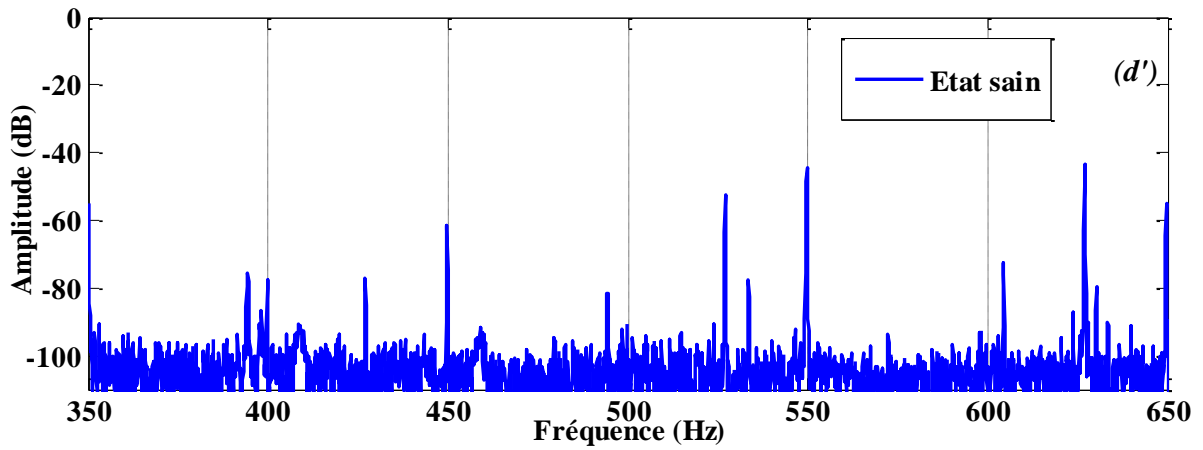
Les PSHs ont les valeurs 628.6 Hz et 728.6 Hz, avec des amplitudes un peu supérieures comparant avec l'état sain de la machine.

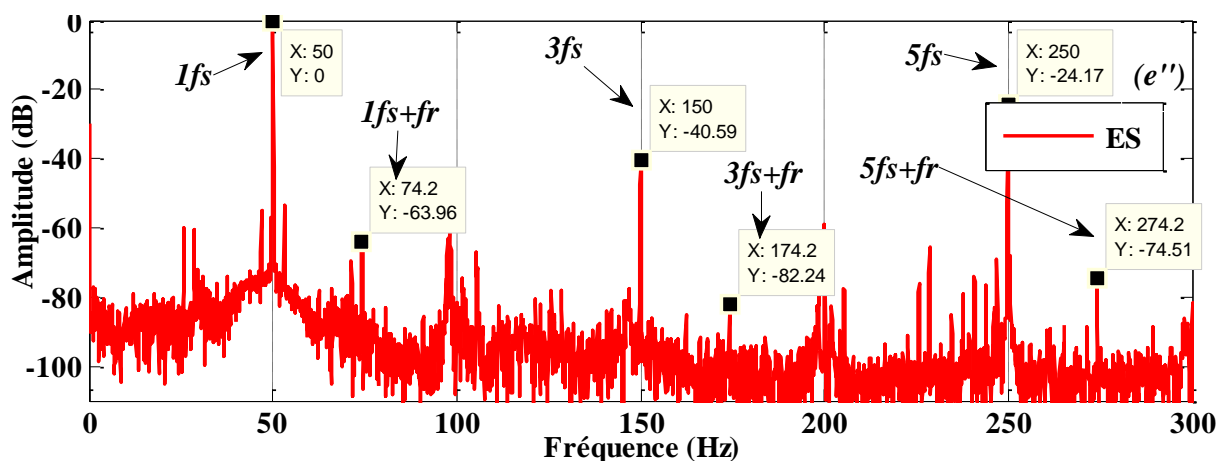
Le suivi d'amplitude des raies d'harmoniques est considéré comme un indicateur du défaut. En effet, et pour un spectre du courant qui contient les deux PSHs, dans ce cas, on parle d'une autre série d'ordres  $3k'$  et  $(6k \pm 1)$  qui ont une amplitude importante ( $k'$  est impair).

Le spectre de la figure (III-5-d") montre que les harmoniques d'ordres 1, 3 et 5, possèdent les amplitudes 0 dB, -43.44 dB et -35.3 dB respectivement pour un état sain. En revanche, ils ont les valeurs 0 dB, -40.59 dB et -24.17 dB pour un état défectueux (figure III-5-e").

En outre, les amplitudes des premiers harmoniques d'encoches rotoriques LPSH=628.6 Hz et U-PSH=728.6 Hz ont augmentées lorsqu'on les compare avec -43.55 dB et -56.4 dB pour un état normal. Par conséquent, ils portent les valeurs -39.54 dB et -48.44 dB pour le moteur avec un défaut d'ES .







**Figure III.5.** Spectre du courant statorique avec un degré d'excentricité statique  $\delta_s=45\%$  ( $s=0.032$ ); (a) : 0-1000 Hz, (d') (d'') et (e') (e'') : Autour de 3 et 5

En cas d'excentricité du rotor, on voit apparaître de nouvelles composantes harmoniques au niveau du contenu spectral du courant statique qui caractérisent ce défaut. Ces fréquences (harmoniques) dépendent de la quantité de barres rotatives et de paires de pôles.

Les figures , (III-5) présentent le spectre de courant variant statoriquement pour différentes bandes de fréquence. La réalisation d'un zoom dans chaque zone (autour de la fréquence fondamentale, des RSH, etc.) a conduit à un diagnostic fiable.

Sur la base de la formule  $f_{mix} = f_s \pm K f_r$  , le calcul de fréquence caractéristique pour le défaut d'excentricité statistique est effectué.

On a calculé le défaut d'excentricité statistique pour les fréquences supplémentaires dans le scénario où la machine asynchrone fonctionne à 75% de la charge ; ces fréquences ont les caractéristiques suivantes (tableaux III.1) :

$$f_{ex.sta} = \left[ \frac{K.N_{br}}{p} (1 - g) \pm v \right] \cdot f_s \quad \text{III.3}$$

Pour	$f_{ex.sta}$	
	(+)	(-)
<b>K=1 et v=1</b>	727.6 Hz	627.6 Hz
<b>K=1 et v=3</b>	827.6 Hz	527.6 Hz

Nous avons observé dans cette étude une bonne correspondance entre les résultats expérimentaux et la vérification théorique. Cependant, une autre formule pour les harmoniques résultant de la rotation des engrenages ( $f_{her} = f_{RSHs}$ ) assure l'égalité avec la formule de fréquence de définition en cas d'excentricité statistique.

Cette similitude (égalité) nous incite à discuter de la possibilité d'une ambiguïté fréquentielles (inconvenient) par conséquent, si la machine asynchrone possède les deux PSH (comme dans notre cas), cela conduit à l'émergence de composants plus fréquents avec des numéros d'ordre plus élevés tels que 1, 3, 5 , etc. Ces fréquences ont généralement des amplitudes importantes. Les harmoniques les plus importantes sont classées troisième et cinquième et comprennent les tableaux suivants (III.2) :

Pour	$f_{RSHs}$	
	(+)	(-)
<b>K=1 et v=5</b>	927.6 Hz	427.6 Hz
<b>K=1 et v=3</b>	827.6 Hz	527.6 Hz

Les figures (III-5) montrent clairement qu'en raison de l'absence d'excentricité statistique, aucune fréquence supplémentaire ne peut survenir. Malgré cela, il y a eu un changement dans l'amplitude des harmoniques de l'arbre du rotor (RSHs).

Les valeurs des harmoniques et l'évolution de leurs amplitudes pour une excentricité statistique sont résumées dans le tableau (III.3)

Formules des harmoniques (g=0.032)	Valeurs théoriques (Hz)	Valeurs expérimentales (Hz)	Amplitude (dB) ( $\delta s=45\%$ )
<b>fs – fr</b>	25.8	25.8	-59.97
<b>fs+fr</b>	74.2	74.1	-63.96
<b>L-PSH</b>	627.6	628.6	-39.54
<b>U-PSH</b>	727.6	728.6	-48.44
<b> 5fs –nb fr </b>	427.6	428.6	-66.65
<b> 3fs –nb fr </b>	527.6	528.6	-47.86
<b>3fs</b>	150	150	-40.59
<b>3fs + fr</b>	174.2	174.2	-82.24
<b>5fs</b>	250	250	-24.17
<b>5fs + fr</b>	274.2	274.2	-74.51

### III.4.3 Analyse spectrale du courant statorique avec excentricité dynamique :

Dans cette section, l'analyse de la machine asynchrone triphasique est effectuée en présence d'un défaut d'excentricité dynamique pure.

Le but de ce paragraphe est d'identifier les signatures indicatives du défaut d'excentricité dynamique à l'aide de la formule du Tableau I.1. L'objectif de la technique MCSA-FFT est d'éliminer les signatures qui pointent vers une panne unique ES ou ED pour notre moteur asynchrone.

Ces harmoniques ont l'avantage de ne pas nécessiter une compréhension détaillée de l'équipement. Comme ils manquent de termes liés à sa genèse, ils sont asynchrones.

Le fonctionnement de la machine en cours d'utilisation crée la possibilité d'apparition de fréquences cachées. Pour cette raison, et comme le montre la Figure (III.6), le spectre du courant statorique est présenté avec un creux de 0,035.

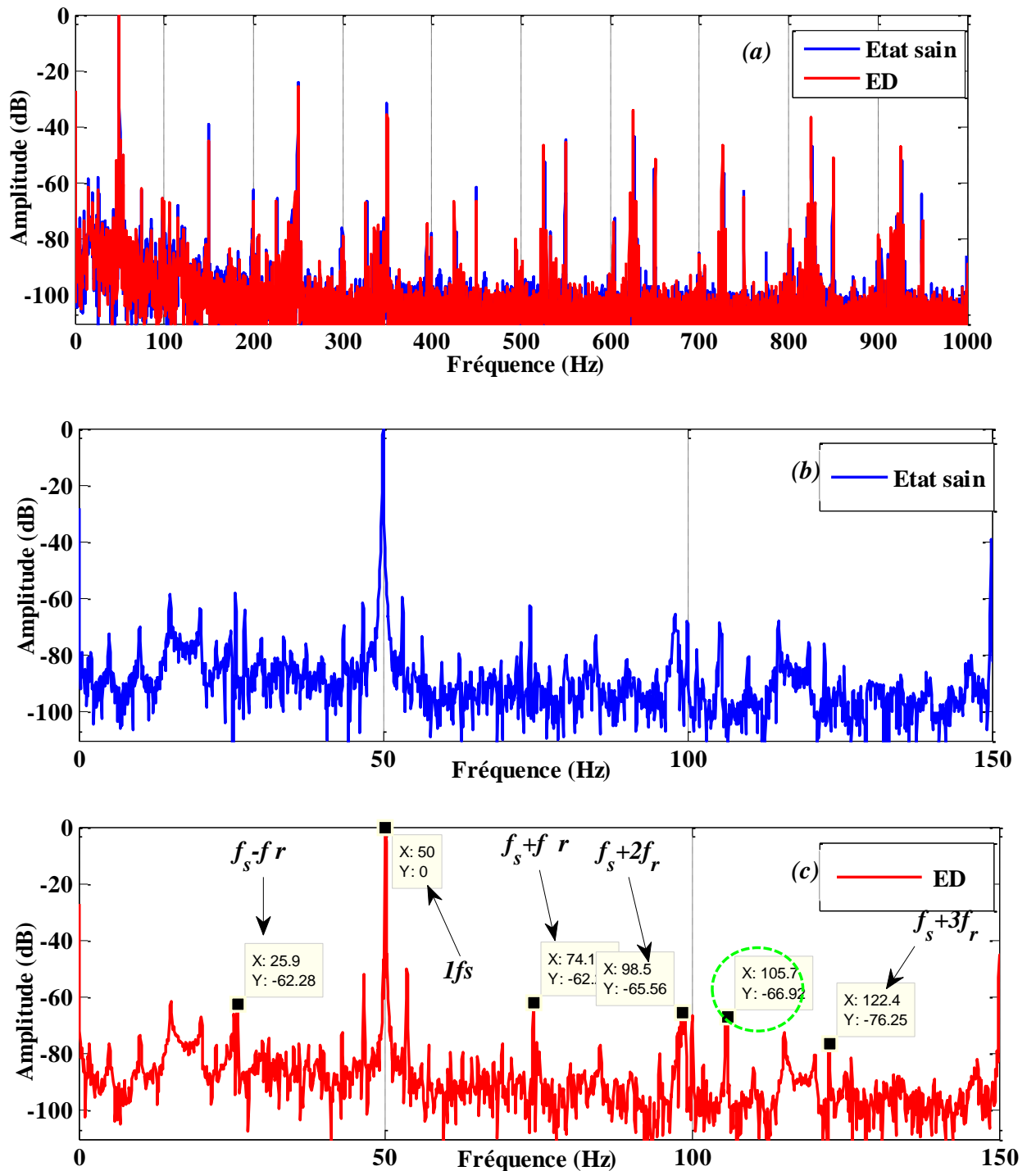
Les harmoniques abondent dans le spectre du courant statorique. Afin de garder une trace de tout et sans perdre aucune information, les spectres ont été affichés sous forme de bandes séparées avec un zoom qui nous a donné une vue Claire .

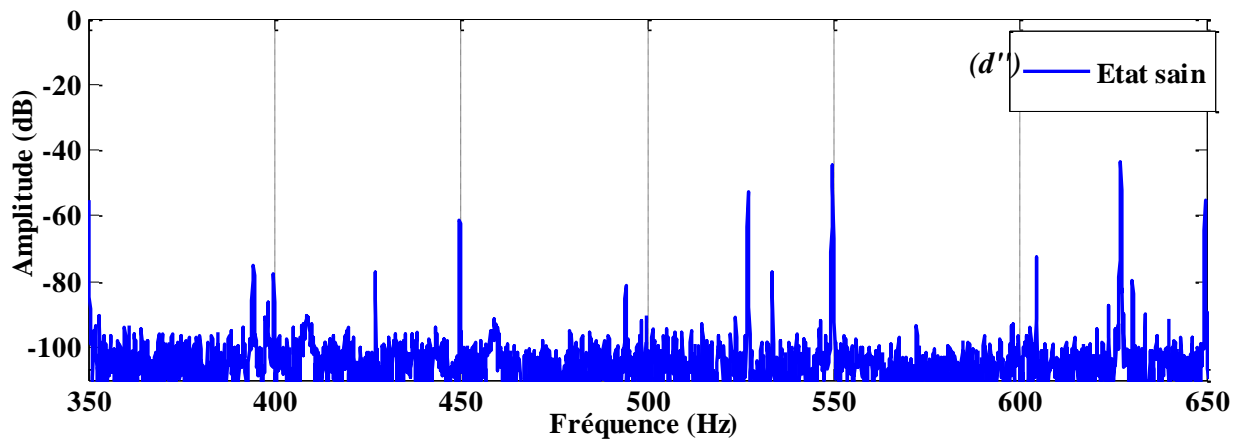
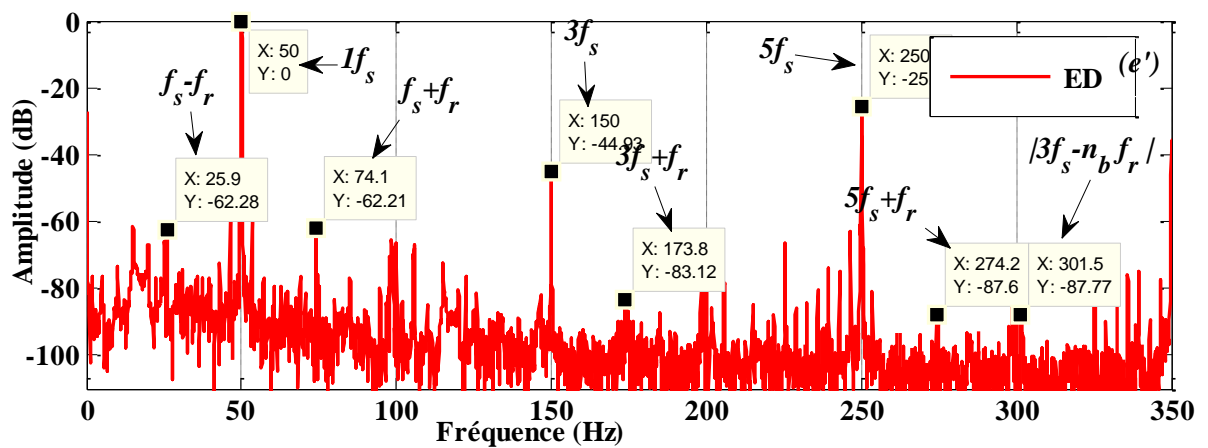
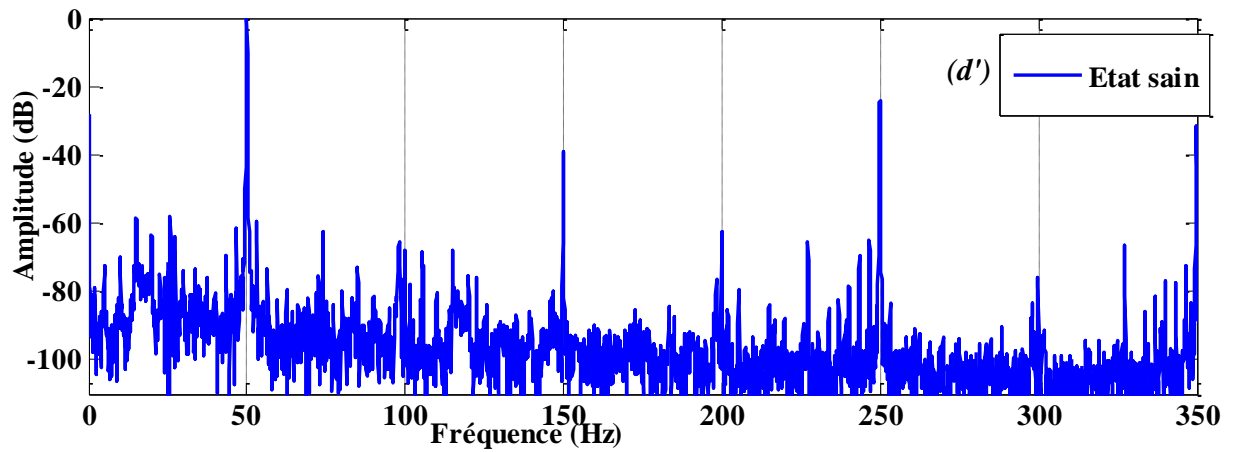
Comme nous l'avons déjà vu, la différence de charge fait bouger plusieurs harmoniques. La charge affecte les RSH et les positions des deux premiers sont représentées par les fréquences suivantes : 725,4 Hz et 625,4 Hz. Lors de l'interprétation des spectres fournis (avec différentes bandes communes séparées de 0 à 1000 Hz), il convient de prendre en compte les amplitudes supérieures à -80 dB ; la figure (III-6- c) met bien en évidence l'émergence d'harmoniques à la suite d'une excentricité mixte. Les valeurs de 25,9 Hz, 74,1 Hz, 98,5 Hz et 122,4 Hz sont en accord avec la formule  $f_{mix} = f_s \pm Kf_r$ . Ces harmoniques se retrouvent à la fois dans les états sains et défectueux, confirmant l'existence d'une excentricité à l'état mixte même en présence d'un moteur sain.

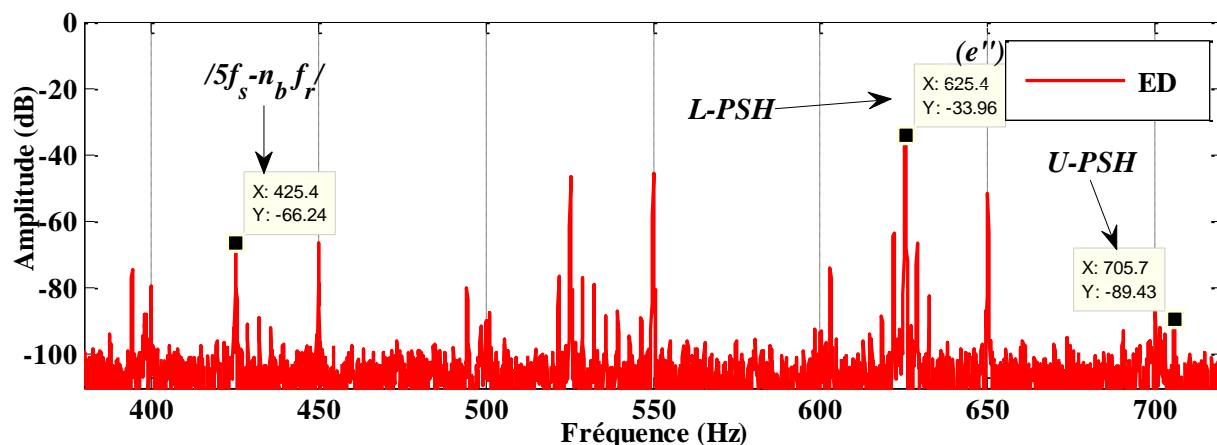
En revanche, le contenu spectral du courant statique est typiquement sensible à toute fluctuation interne ou externe. Notre observation porte sur le comportement des RSH et des harmoniques d'ordre  $6k-1$ . Ses effets prennent diverses formes, notamment :

amplitudes, apparition de nouveaux BL, mouvement, etc. Le suivi des composants complémentaires nécessite des recherches attentives et précises, notamment au vu des résultats expérimentaux. De nombreux phénomènes entrent réellement en jeu, dont plusieurs groupes de

séries harmoniques. Avec l'augmentation de ceux-ci, les amplitudes des ordres harmoniques avancés ont très peu de valeur, mais il est difficile de dire combien et à quel point les fréquences supplémentaires sont différentes.







**Figure III.6.** Spectre du courant statorique en charge avec un degré d'excentricité dynamique  $\delta d=30\%$  ( $s=0.035$ ); (a) : 0-1000 Hz, (b) et (c) : Autour du fondamental, (d') (d'') et (e') (e'') : Autour de 3 et 5

Cette deuxième tâche consiste à utiliser une expression liant l'excentricité dynamique à celle de l'équation

$$f_{ex.dyn} = \left[ \left( \frac{kn_b \pm n_d}{p} \right) (1 - g) \pm n_{ws} \right] \cdot f_s \quad (III.4)$$

$$n_{ws} = 0.1.2.3.....$$

Pour	$f_{ex.dyn}$	
	(+)	(-)
$v$		
$K=1$ et $v=1$ et $n_d=(+)$	749.62 Hz	649.62 Hz
$K=1$ et $v=3$ et $n_d=(-)$	701.37 Hz	601.37 Hz

La vérification ou la détection des informations sur les défauts pour les deux cas de la machine (défectueuse et non défectueuse) doit être extraite du spectre.

Le spectre de courant du stator lors d'un fonctionnement avec une charge de 75 % ( $g = 0,035$ )

Les figures (III-6) montrent clairement des fréquences supplémentaires causées par ce défaut comme des FBL autour des RSH ou autres sans explication physique.

Les résultats expérimentaux obtenus présentés dans le tableau 04 (ci-dessous) sont en accord avec la théorie. On peut dire que ces résultats sont des indicateurs de défauts dynamiques de biais. On constate même une augmentation de l'amplitude de certains pics dû au déséquilibre..

De plus, une excentricité dynamique pure ne peut exister isolément, et une excentricité statique résiduelle existe toujours, nous conduisant à la troisième forme d'excentricité. Dans le cas d'une excentricité dynamique pure, les composantes trouvées pour les fréquences au voisinage des encoches harmoniques principales se reproduisent. Nous avons constaté l'émergence de nouvelles fréquences définissant l'excentricité dynamique. Plusieurs valeurs sont ici prises en considération pour le calcul des fréquences caractéristiques d'un défaut d'excentricité dynamique ou mixte. Dans ce cas, nous parlons d'une incompréhension intrigante des valeurs harmoniques.

Le deuxième problème est causé par un ensemble différent d'harmoniques qui relient toutes les fréquences qui définissent l'excentricité dynamique et les fréquences causées par les harmoniques de l'arbre en rotation (RSH

La distinction entre les valeurs harmoniques qui définissent chaque défaut est maintenant plus évidente. Est également mentionnée la difficulté de détecter un défaut d'excentricité dynamique lorsqu'un autre niveau d'excentricité statique est présent. En conséquence, les deux excentricités se combinent pour produire un troisième ensemble de fréquences. De plus, la présence de PSH dans le spectre de courant statique dépend principalement de la quantité de barres rotorisées et de paires de pôles. Dans ce cas, et si l'on suit la logique de l'argument, on ne retrouve jamais les caractéristiques harmoniques de l'ED pour ce MSA, qui a un  $nb=28$ .

Le tableau ( III.5 ) ci-dessous résume plusieurs caractéristiques de fréquence:

<b>Formules des harmoniques (g=0.035)</b>	<b>Valeurs théoriques (Hz)</b>	<b>Valeurs expérimentales (Hz)</b>	<b>Amplitude (dB) (<math>\delta s=30\%</math>)</b>
<b>fs – fr</b>	25.87	25.9	-62.28
<b>fs+fr</b>	74.12	74.1	-62.21
<b>L-PSH</b>	601.37	625.5	-33.36
<b>U-PSH</b>	701.37	705.7	-89.43
<b> 5fs –nb fr </b>	401.37	425.4	-66.24
<b> 3fs –nb fr </b>	301.37	301.5	-87.77
<b>3f</b>	150	150	-44.93
<b>3fs + fr</b>	174.12	173.8	-83.12

<b>5fs</b>	250	250	-25.60
<b>5fs + fr</b>	274.12	274.15	-87.60

Les résultats expérimentaux présentés dans cette section ont été obtenus en utilisant l'approche MCSA-FFT pour l'analyse statistique du courant. Rappelons que le traitement des données permet de détecter les défauts d'excentricité à la fois statiques et dynamiques .

L'utilisation de formules théoriques a été vérifiée avec succès. Selon le contenu spectral du courant, cette méthode de détection applique son efficacité à une variété de défauts (par exemple, un boîtier stérile). Cependant, dans notre cas, une concordance logique a été découverte, même s'il y avait une ambiguïté notable par rapport aux autres fréquences. Cela nous empêche d'identifier le type spécifique de défaut .

Afin d'identifier le défaut d'excentricité statique ou dynamique, une nouvelle technique de surveillance ou un système MCSA bien ciblé est nécessaire. Un plan d'action suggéré est basé sur l'analyse du courant pour l'amplitude harmonique RSH ou même pour les fréquences d'ordre 1, 3, 5, etc .

Les résultats ont montré que la comptabilisation du courant statistique présente une riche source de plusieurs informations importantes .

### **III.5 Détection du défaut d'excentricité statique et dynamique par la méthode de MVSA :**

L'utilisation des signaux vibratoires a un sens mécanique, car on peut appréhender les phénomènes dynamiques que l'on rencontre dans les systèmes en fonctionnement.

Lorsque ces défauts sont liés avec l'excentricité du stator, ils peuvent être observés de manières différentes :

- aux basses fréquences, autour de deux fois la fréquence du courant d'alimentation;
- aux moyennes fréquences, autour de la fréquence de passage des encoches et de ses harmoniques.

Il est ainsi possible de caractériser la plupart des défauts et mauvais fonctionnements, à partir de la connaissance ou de la modélisation physique de ces phénomènes. Nous proposons dans cette partie une présentation de l'excentricité rotorique traitée par la FFT.

III.5.1 MVSA pour un défaut d'excentricité statique :

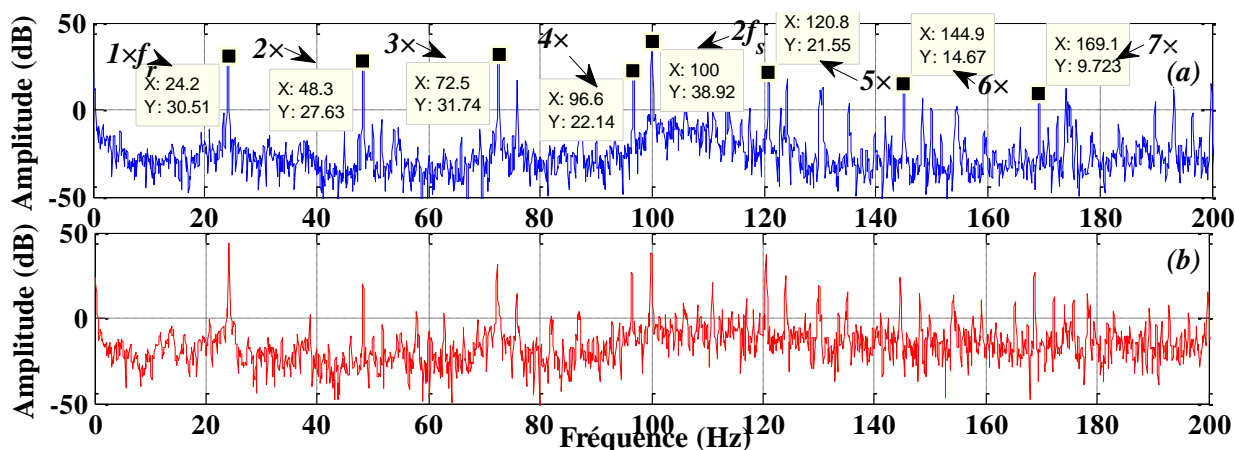


Figure III.7. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES ( $s=0.032$ ), 0-200 Hz.

Afin d'identifier les harmoniques supplémentaires dans la figure ci-dessous, on fait un zoom aux alentours la plage fréquentielle de 0 à 100 Hz. La figure (III-8) représente ces harmoniques en valeurs .

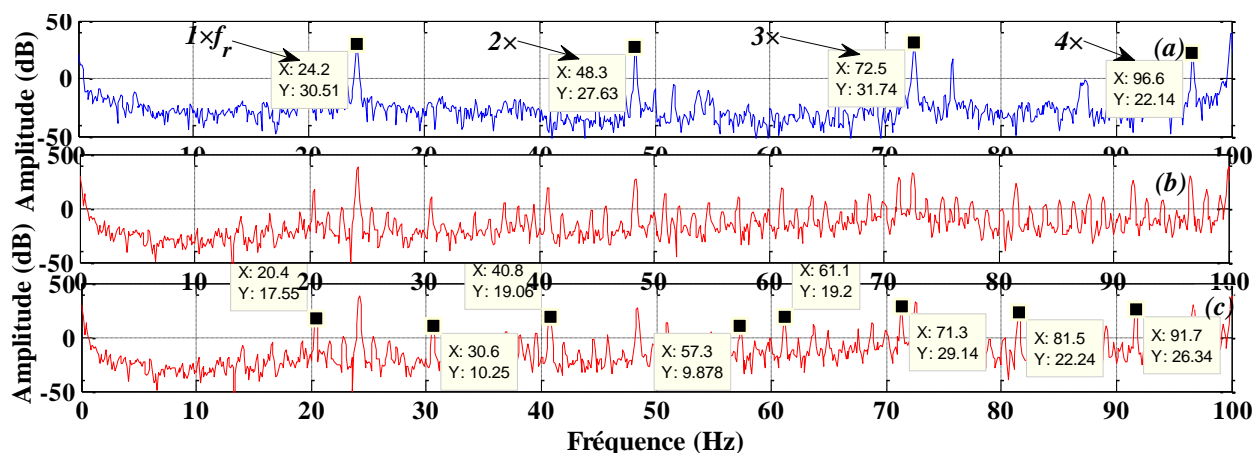


Figure III.8. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES ( $s=0.032$ ), 0-100 Hz.

D'après l'équation (III.5) on peut résumer quelques valeurs avec leurs amplitudes dans le tableau suivant :

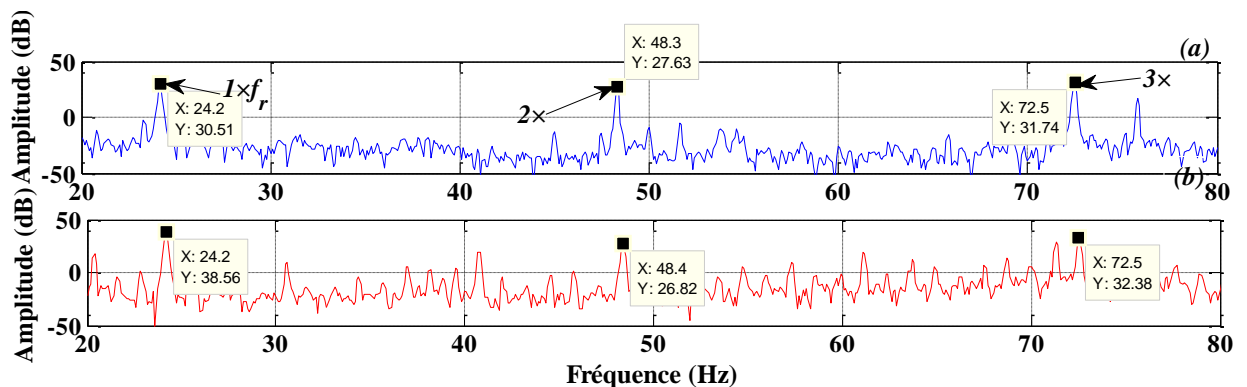
Tableau III.6. Valeurs théoriques et pratiques de quelques harmoniques du signal vibratoire (ES,  $s=0.032$ ).

$f_i = [KN_{br} \cdot f_r \pm v \cdot f_s]$ $f_i$ pour ( k,v )	Valeur-Amplitude (HZ) → (dB)
$f_1$ pour ( 4,35 )	39.6 → 19.06
$f_2$ pour ( 13,175 )	58.8 → 9.87
$f_3$ pour ( 5,69 )	62 → 19.2
$f_4$ pour ( 8,107 )	70.8 → 29.14
$f_5$ pour ( 12,161 )	81.2 → 22.24

Il est intéressant de démontrer pour le cas actif de cette étude ( $s=0,032$ ) sous un mode de défaillance statistique pur (ES) . Le conflit entre les fréquences d'état sain et défectueux, telles que la double fréquence fondamentale  $2f_s$ , continue d'être le problème. Une méthode pour trouver le défaut ES qui repose sur la comparaison des amplitudes de 2 et 3 fr est la surveillance de plusieurs amplitudes fr. Typiquement, l'amplitude 2FR doit être réduite, et l'amplitude 3FR sera augmentée en raison du défaut (figure III.9) .

Nous avons également remarqué que les ondes supplémentaires on une amplitude significative pour indiquer pour signaler l'existence du défaut d'excentricité.

Le tableau (III.7) présente certaines valeurs caractéristiques, théoriques et autres pratiques ainsi que leurs amplitudes.



**Figure III.9.** Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES ( $s=0.032$ ), 20-80 Hz.

Par ailleurs, et conformément à la littérature, la prépondérance d'un rayon dont la fréquence correspond à l'inverse de la fréquence du courant d'alimentation ( $2f_s=100\text{Hz}$ ) caractérise les tableaux de signaux vibratoires de défauts de type variation de courant statorique ou variation de alimentation. De plus, l'amplitude de la fréquence de double alimentation ne fournit pas d'information utile (voir figure III.10). Deux valeurs d'amplitude plus proches l'une de l'autre comprennent l'amplitude de  $2f_s$  pour un état sain égal à 38,92 dB et l'amplitude de  $2f_s$  pour un ES égal à 38,53 dB .

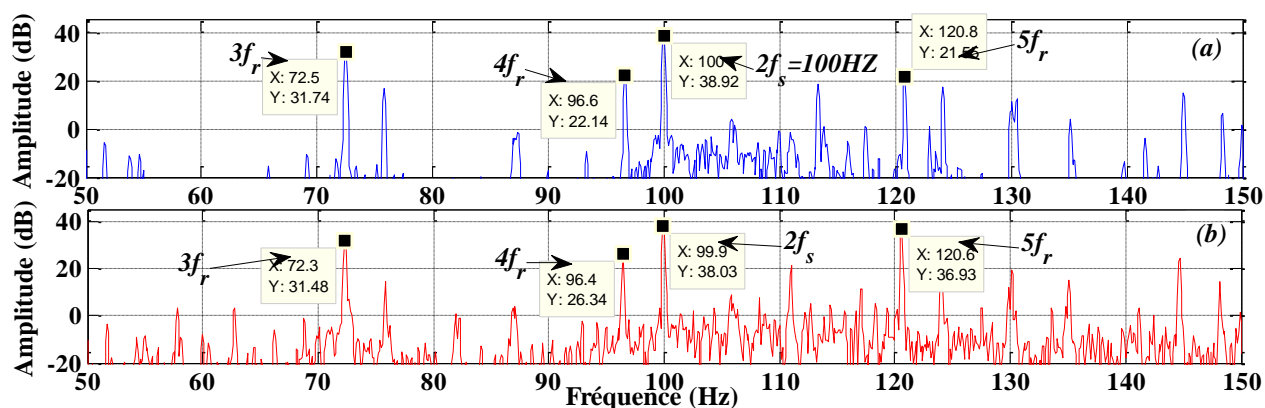


Figure III.10. Spectre d'un signal de vibrations pour une ES alentour de  $2f_s$  pour  $s=0.032$ .

Tableau III.7. Résumé de quelques valeurs théoriques et pratiques des harmoniques causés par le défaut d'ES dans le spectre d'un signal vibratoire ( $s=0.032$ )

Fréquences caractéristiques des l'ES	Valeurs théoriques (HZ) ( $g=0.032$ )	Valeurs pratiques (HZ) ( $g=0.032$ )	Amplitude (dB)
$2f_s$	100	100	38.53
$7f_r + f_s$	219.4	219.1	27.26
$8f_r + f_s$	243.6	243.1	20.78
$13f_r - f_s$	264.6	264.8	33.07
$12f_r - 5f_s$	40.4	40.8	19.06

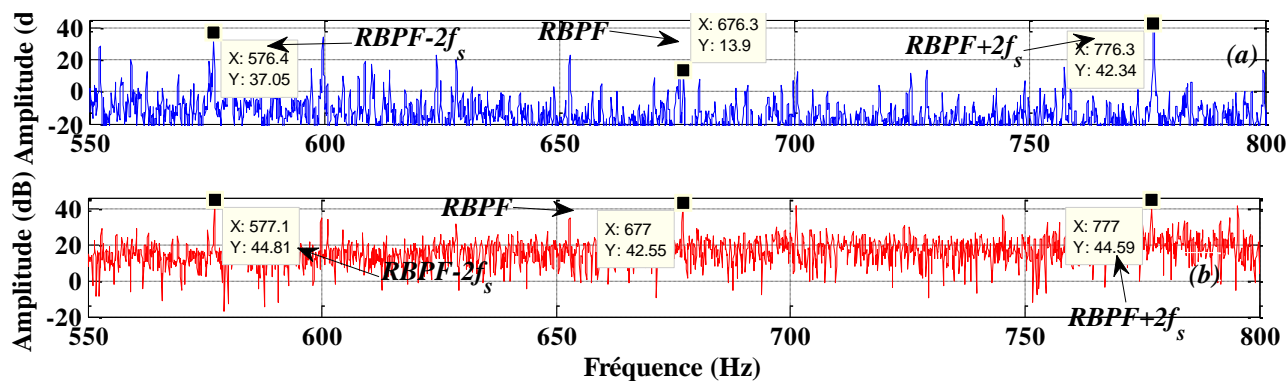
Selon la littérature, la fréquence moyenne des phénomènes vibratoires est étudiée en relation avec la fréquence de passage des encoches (RBPF).

En cas de fluctuation d'entrefer, une famille de bandes latérales de fréquence de passage double de la fréquence du courant d'alimentation et de valeurs d'amplitude sensiblement dissymétriques sont reliées à la raie dont la fréquence correspond à la fréquence des encoches. Cette excentricité statistique, et selon , se traduit par deux amplitudes distinctes autour de RBPF. De plus, ce défaut se traduit généralement par une augmentation de l'amplitude de RBPF.

Les deux faits mentionnés précédemment ont été vérifiés par notre étude. Les figures (III.11) et le tableau (III.8) illustrent comment l'absence d'ES se traduit par une augmentation significative de la fréquence d'amplitude de l'encoche RBPF par une augmentation importante .

Les deux possibilités suivantes sont imposées par l'absence de vérification de l'égalité d'amplitude pour un état sain :

- Soit le stator à l'état sain est excentrique ;
- Soit le défaut n'est pas détecté



**figure III.11.** Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ES aux alentours la fréquence RBPF; « (a) et (b) : 550-800 Hz 'en charge' ».

**Tableau III.8.** Bilan d'amplitudes caractéristiques du défaut d'ES autour de RBPF.

Fonct. En charge (s=0.032)	$RBPF-2f_s$	RBPF	$RBPF+2f_s$
Fréquence (Hz)	576.4	676.3	777.3
Amplitude (dB) : MAS sain	37.05	13.9	42.34
Amplitude (dB) : MAS avec ES	44.81	42.55	44.59

### III.5.2. MVSA pour un défaut d'excentricité dynamique :

L'objectif de cette partie est de rechercher les indices liés à la déficience ED. L'étude sera fondée sur des mesures vibratoires effectuées sur la base de données d'expérimentation mentionnée dans le deuxième chapitre.

Une contribution est apportée au diagnostic MAS par les mesures qui ont été prises. Ils ont été réalisés à l'aide d'accéléromètres, qui mesurent l'amplitude des vibrations à plusieurs positions définies avec précision.

La même approche est utilisée pour alimenter le moteur qui assure un glissement de  $s=0.032$  ( $f_r=24.2\text{Hz}$ ). Cette opération provoque un changement de vitesse, ce qui se traduit par une modification du signal vibratoire. Le spectre du chiffre (III.12) symbolise les nouvelles signatures pour un fonctionnement à 75% de charge .

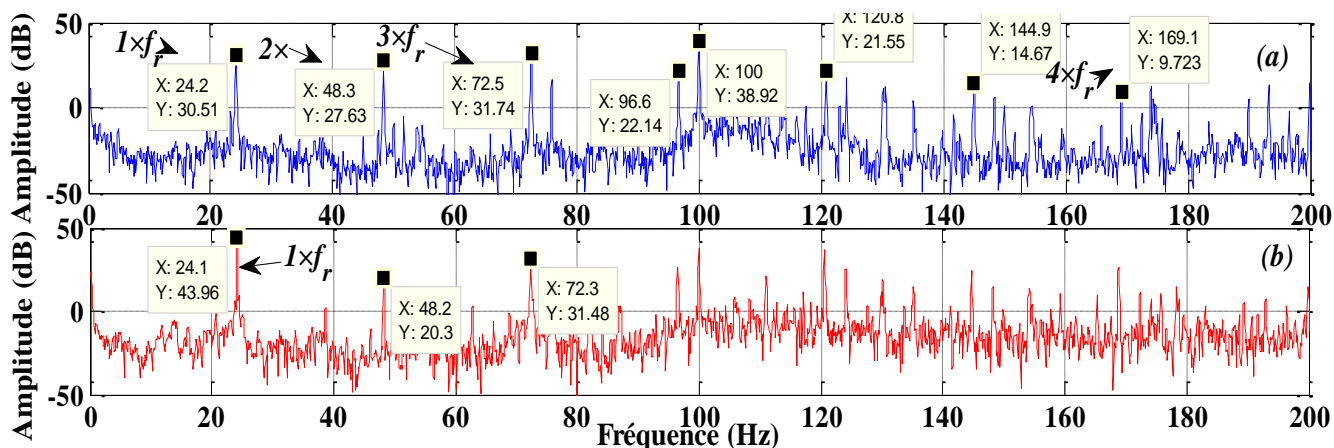


Figure III.12. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ED ( $s=0.032$ ), « (a) et (b) : 0- 200 Hz ».

Pour clarifier les fréquences additionnelles, on fait un zoom de 0 à 100 Hz. La figure III.13. cidessous illustre les harmoniques dues à l'excentricité dynamique.

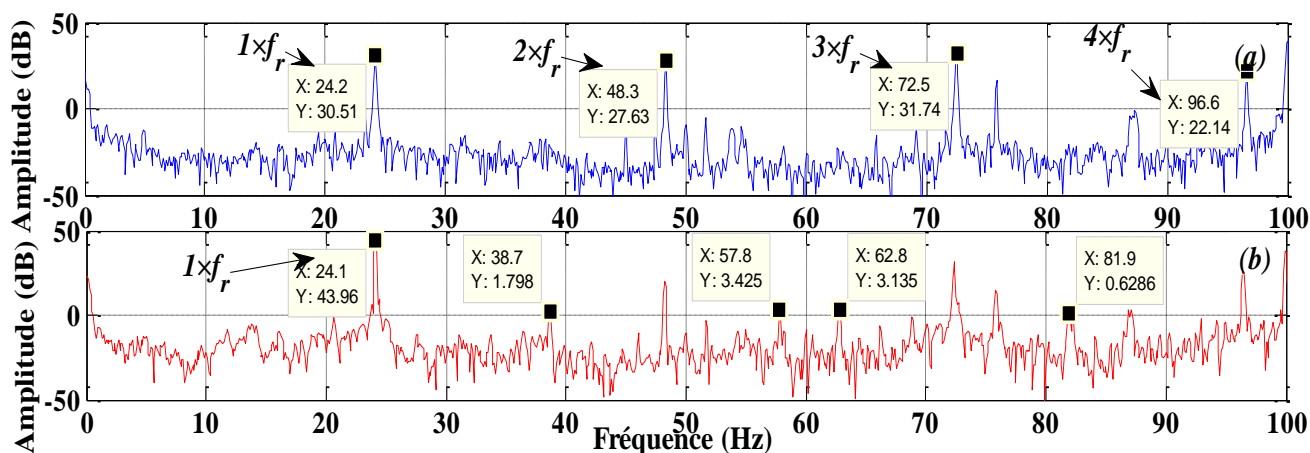
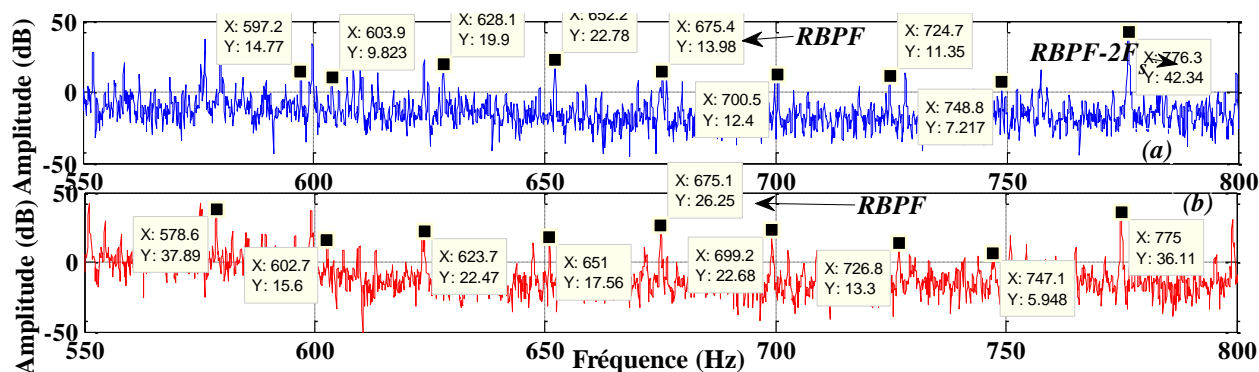


Figure III.13. Spectre d'un signal vibratoire pour un défaut d'ED ( $s=0.032$ ), 0-100 Hz.

Lors de l'utilisation de l'indicateur de défaillance d'excentricité dynamique indiqué par les bandes latérales autour de la fréquence RBPF. On zoome sur la gamme de fréquences 550 Hz– 800 Hz qui se produit régulièrement, comme le montre la figure (III.14) .



**Figure III14.** Bande latérale de kfr alentour de RBPF pour un défaut d'ED ( $s=0.032$ ).

Sur le spectre, on voit différentes valeurs de  $f_r$  qui se traduisent par un chevauchement précieux. De plus, des fréquences supplémentaires ont été découvertes dans les gammes de fréquences inférieures et supérieures, ce qui explique clairement l'impact du défaut d'excentricité dynamique sur le signal vibratoire. Nous avons essayé de convertir ces indices significatifs en valeurs précises en utilisant les formules mentionnées dans la littérature. La correspondance avec les multiples de  $f_r$  ne fournit cependant pas de décision définitive et spécifique sur le type de défaut ED. De plus, cet indicateur (multiple de  $f_r$ ) est souvent partagé pour un certain nombre de défauts des machines tournantes.

Les valeurs des fréquences dans chacune de ces formules sont proches les unes des autres, nécessitant une compréhension approfondie de l'harmonie et une manipulation très prudente.

Comme le montrent les fréquences 57,8, 62,8, 81,9, et d'autres que l'on retrouve pour l'ES et l'ED, il est possible de passer d'une forme d'excentricité à une autre. Cette section nous invite à nous demander s'il est nécessaire de profiter de cette modification du spectre des signaux vibratoires.

Cette analyse du défaut ED conduit à la proposition d'une méthodologie expérimentale et analytique pour aider à la détection des défauts et utiliser les données dans le spectre du signal vibratoire. De plus, le traitement des données relatives au défaut d'excentricité statique et dynamique est significativement impacté par le module de fréquence vibratoire.

### **III.6 Conclusion :**

D'après les résultats qui se basent sur les méthodes MCSA et MVSA, on peut donc comparer entre elles concernat la detection d'excentricité statique et dynamique du rotor. Nous concluons que la méthode MVSA est meilleure que la method MCSA. Cela à cause des indicateurs trouvés dans les spectres.

L'excentricité dynamique peut être détectée facilement en utilisant la méthode MVSA qui a un avantage pour les signaux mécaniques par rapport aux signaux électriques.

## *Conclusion générale*

## Conclusion générale

La machine asynchrone occupe aujourd'hui une place importante dans le monde de l'industrie grâce à son intérêt et la simplicité de sa structure du fait de ses nombreuses utilisations dans différentes applications, les machines asynchrones nécessitent une détection et rapide des défauts.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts des moteurs asynchrones à cage d'écureuil. Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur le défaut d'excentricité statique et dynamique .

Au début de ce travail, nous avons mené une étude généralisée sur le diagnostic des machines asynchrones et évoqué toutes les erreurs pouvant survenir lors de leur fonctionnement et les raisons qui conduisent à ces dysfonctionnements et leurs conséquences. Puis, nous avons évoqué les différentes méthodes de détection actuellement utilisées, et parmi ces méthodes nous avons mentionné la méthode d'analyse du signal. L'analyse de vibration et la méthode d'analyse du courant électrique par la transformée de Fourier rapide. Comme nous avons parlé en général sur les méthodes exploitées dans ce travail.

Ensuite, nous avons analysé le défaut d'excentricité statique et dynamique par les deux méthodes d'analyse (MVSA et MCSA). Ce travail a l'objectif de comparer entre les deux méthodes afin d'avoir une décision finale sur la meilleur méthode.

Nous concluons que la méthode MVSA est meilleure que la méthode MCSA et cela est dû aux indices dans les spectres. Selon les résultats basés sur les méthodes MCSA et MVSA, nous pouvons les comparer en ce qui concerne la détection de la déviation statique et dynamique du rotor. .

L'utilisation de la méthode MVSA présente un avantage pour les signaux mécaniques par rapport aux signaux électriques. La déviation dynamique peut être détectée facilement.

*Annexe*

### Paramètres du moteur utilisé

Puissance	3kw
Nombre de paire de pôle	2
Nombre de barres rotoriques	28

## *Bibliographie*

- [BABA14] Babaa Fatima, Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : "Application au diagnostic des défauts statoriques", Thèse de Doctorat, Université Constantine 1, 2014.
- [BAC17] Bachouche Hassina, Azzi Ouahiba, " Analyse des signaux vibratoires par la transformée en ondelette", Mémoire de Master, Université Akli M'hand Oulhadj – Bouira, 2017.
- [BAZ16] BAZI Smail, " Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur", Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, 2016.
- [BEL14] Belhamdi Saad, " Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [BES07] Bessous Nouredine, "Contribution au diagnostic des machines asynchrones", Magister en électrotechnique, option: machines électriques, Université de Mentouri Constantine, Algérie, 2007.
- [BES17] Bessous Nouredine, " Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2017.
- [BOU18] Boumaila Ahmed Dhia Eddine, " Diagnostic des défauts d'un ventilateur M14A par analyse vibratoire au niveau de l'unité SIDER TSS", Diplôme de Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018.
- [BOU20] Bouaoun Oudai, " Contribution au Diagnostic des défauts de la cassure des barres rotoriques dans les systèmes électromécaniques : Application aux Moteurs à Induction ", Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2020 .
- [CHE12] Chermat Badreddine, "Diagnostic des défauts de MAS par les méthodes paramétriques de traitement du signal", Diplôme de Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [DJE13] Djebili Omar, " Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à

- la fatigue de contact de roulement", Thèse de Doctorat, Université De Reims Champagne Ardenne, 2013.
- [ELG22] ELGHOUL Walid, " Détection et diagnostic des défauts d'excentricité du moteur asynchrone ", Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2022 .
- [GAO 12] M. Gaouaoui Diagnostic par reconnaissance des formes : Application à la machine asynchrone . Thèse de Magister. Université mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou. Algérie, 2012 .
- [HAK14] Hakima CHERIF Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes Université Mohamed Khider – Biskra 2014
- [HAL15] Halem Noura, " Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
- [HAM18] HAMMI Sami, " Contribution au diagnostic des défauts rotoriques dans les machines asynchrones à cage d'écureuil par la méthode de la (MCSA) ", Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2018 .
- [IMA15] Imaouchen Yacine, " Mesure et analyse des vibrations des machines électriques tournantes", Thèse de Doctorat, Université A.mira-Bejaia, 2015.
- [ISH 20] ISHAK zine " Contribution au diagnostic des défauts de roulement dans les machines asynchrones en utilisant l'Analyse du flux Magnétique " Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued 2020.
- [KAL 61] R. E. Kalman and R. S. Bucy, " New results in linear filtering and prediction theory", Transactions of ASME Journal of Basic Engineering, Vol.83D, pp.35-45, March 1961.
- [KHE17] KHEMCHANE Nour et TIZZAOUI Arezki " TECHNIQUE DE DIAGNOSTIC DES DFAUTS STATORIQUE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE ", Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2017.
- [LAD21 ] LADGHEM Anis, " Contribution au diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones à cage d'écureuil: Détection du défaut mécanique ", Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2021.

- [LOU12] LOUNI Amar et ALLOUCHENE Madjid " Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrones : Comparaison entre l'Analyse Vibratoire et l'Analyse du Courant d'Alimentation", Université Mohamed Khider – Biskra 2017.
- [MED12] MEDOUED AMMAR " SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES MACHINES ELECTRIQUES APPLICATIONS AUX MOTEURS ASYNCHRONES " ,Université du 20 Août 1955-Skikda 2012.
- [MOK19] MOKHTARI Yaakoub," Diagnostic des défauts mécaniques du moteur asynchrone par l'analyse vibratoire ",Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019 .
- [OLI06] Olivier ONDEL" DIAGNOSTIC PAR RECONNAISSANCE DES FORMES APPLICATION A UN ENSEMBLE CONVERTISSEUR – MACHINE ASYNCHRONE ", 2006.
- [ORA 88] E.Oran Brigham, " Fast Fourier transform and its applications ",Prentice Hall 1988.
- [RAD07] Radouane BOUSSEKSOU "Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic", Magister, Université Mentouri Constantine 2007.
- [RAM22] BACHI Ramzi " Détection des défauts du roulement dans les moteurs asynchrones en utilisant les vecteurs de Park " Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued 2022.
- [RED17] REDJIL KHAOULA, " Etude des défauts du roulement par analyse spectrale et cepstrale ", Mémoire de master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2017
- [TAF 07] F. Tafnine, K. Mokrani, J. Antoni, A. Kabla, and Z. Asradj, « Introduction des SVM en MCSA », 4th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications March, TUNISIA 25-29, 2007.
- [site web 1] <https://www.automation-sense.com/blog/automatisme/moteur-asynchrone.html>
- [web site 2 ] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine\\_asynchrone#/media/Fichier:Stator\\_and\\_rotor\\_by\\_Zureks.JPG](https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone#/media/Fichier:Stator_and_rotor_by_Zureks.JPG)
- [web site 3] <https://www.cours-et-exercices.com/2016/06/cours-de-roulements-elements-de-machines.html>