

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE



DOMAINE : Génie électrique  
FILIERE : Electromécanique  
OPTION : Electromécanique

**Mémoire pour l'obtention  
du diplôme de Master  
Académique**

**Présenté par :**

Hammachi Billal & Sellami Mehdi

*Intitulé*

---

**Surveillance et diagnostic des défauts du  
moteur asynchrone à bague – HTA -**

---

**Proposé et dirigé par :**

**P<sup>r</sup> KHODJA Djalal Eddine  
D<sup>r</sup> HAMMADOU Youcef**

**Université Mohamed Boudiaf de M'sila  
Cimenterie Lafarge Holcim, M'sila**



## Remerciements

*Tout d'abord nous remercions Allah le tout puissant qui nous a éclairé le bon chemin.*

*Nous voudrions exprimer notre profonde gratitude à Pr.Khodja Djlalaleddine qui a fait le maximum d'effort pour nous permettre d'accomplir ce travail dans des bonnes conditions.*

*Et tout le personnel du département de Génie Electrique et a tout ceux ont contribué de proche ou de loin à réaliser ce modeste travail.*

*A tous merci*

*Billal, Mehdi*



# إهداء

الحمد لله على البلاغ والتمام، أهدي مشروع تخرجي إلى:  
من حصد الأشواق عن دربي حتى يُمهّد لي طريق العلم، إلى والدي وروح امي رحمة الله  
عليها

والى من كان عوناً وزاداً وسندنا لي إلى زوجتي وقرة عيني  
وإلى أبنائي عبد القدوس وعبد الرحيم والمشاكس أنوووووس  
وإلى إخوتي وأخواتي كل بإسمه

ولا أنسى عائلتي العلمية والعملية، جميع الأصدقاء الذين دعموني في دفعة الـ  
لكتروميكانيك  
وخارج  
الإطار المهني دون استثناء.

بلال حماشي

# إهداء

الحمد لله الذي تتم بنعمته الأعمال الصالحات أهدي عمل تخرجي هذا إلى:  
والدي ووالدتي أطال الله في أعمارهما وكل من كان سندا لي في مشواري الدراسي وإلى إخوتي  
وأخواتي كل باسمه وإلى كل الأسرة العلمية.

سلامي مهدي

Titre	Page
Remerciement	
Dédicace	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	
Chapitre I L'état de l'art de la surveillance et du diagnostic de la Machine Asynchrone à bague HTA.	
Introduction	
Terminologie relative au diagnostic	
Notions sur la maintenance industrielle :	
Définition de diagnostic	
Constitution de la machine asynchrone	
Le stator	
Le rotor bobiné	
Les paliers	
Organes mécaniques	
Les roulements	
L'arbre :	
Le ventilateur :	
Principe de fonctionnement du moteur asynchrone	
Le glissement	
La vitesse du moteur :	
Variateur de vitesse	
Principaux défauts affectant le moteur asynchrone	
Principales causes des défauts :	
Etudes statistiques	
Définition des différents défauts de la machine asynchrone	
Les cause des défauts	
les générateurs de panes:	
Les amplificateurs de défauts	
Les vices de fabrication:	
Les étapes de la surveillance et de diagnostic de la machine asynchrone	
Courants	
Courant à la terre	
Courant moyen	
Déséquilibre de phases	

Niveau d'échauffement	
Température du moteur (par capteurs)	
Fréquence	
Tension entre phases	
Démarrage trop long	
Déséquilibre de tensions	
Puissance active	
Puissance réactive	
Facteur de puissance	
Energie active	
Energie réactive	
<i>Recensement des défauts d'une chaîne de conversion électromécanique d'énergie</i>	
Les Méthodes de diagnostic	
Méthodes externes	
Méthodes internes	
Méthodes inductives	
Méthodes déductives	
Différentes méthodes de diagnostic	
Techniques mécaniques	
Diagnostic par mesure des vibrations	
Techniques magnétiques et électriques	
Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite	
Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites	
Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique	
Diagnostic par l'analyse de la tension de neutre	
<i>Conclusion</i>	
<i>Chapitre II Système d'acquisition et de traitement des signaux des défauts</i>	
Introduction	
Notions de base sur la vibration	
Définition	
Origine des vibrations	
Types de vibrations	

Caractéristiques de la vibration	
Unités de mesure	
Critères de sélection des trois grandeurs	
Capteurs des grandeurs cinématiques	
Accéléromètres	
Types d'accéléromètres	
Critère de choix de l'accéléromètre	
Conseils pour une mesure fiable par accéléromètre	
Mode de fixation d'un accéléromètre	
Mesure du niveau global	
Niveaux vibratoire suivant la norme ISO 10816-1	
Seuils d'intervention	
Inconvénient du niveau global	
Analyse spectrale	
Intérêt pratique de l'analyse spectrale	
Signatures fréquentielles des principaux défauts affectant le moteur asynchrone	
Signatures fréquentielles des principaux défauts obtenues par la technique vibratoire	
Signatures fréquentielles des principaux défauts obtenues par la technique des courants de ligne	
Analyse par la technique vibratoire	
Analyse par la technique du courant	
Introduction à l'analyse électriques	
Présentation du système PDMA	
Les six zones de défaut	
La technologie MCETM	
Conclusion :	
<b>CHAPITRE III Diagnostic des défauts du la machine asynchrone à bague HTA</b>	
Introduction :	
Investigation Expérimentale	
Méthode par traitement de signal (Analyse des courants)	
Méthode par traitement de signal (Analyse vibratoires)	

Paramètre d'acquisition	
Mode opératoire pour un diagnostic fiable de la technique vibratoire	
Calcul des signatures fréquentielles théoriques	
Détermination du choix directionnels de l'axe d'analyse de l'accéléromètre:	
Analyse des résultats	
Fonctionnement du moteur sans défaut (cas sain)	
Analyse par la technique vibratoire	
Analyse par la technique du courant	
Diagnostic du moteur avec défaut de roulement	
<i>Procédure de création du défaut</i>	
Défaut de la bague externe, trou de 6 mm	
<i>Analyse du spectre du courant</i>	
Défaut de bague interne, trou de 3 mm	
Analyse du spectre du courant	
Les précautions à prendre pour corriger ces défauts :	
Analyse des courants (PDMA)	
DEMARCHE METHODOLOGIQUE	
Emplacement des capteurs	
Conclusion general	
References bibliographique	

## ملخص:

تعد الآلة غير المتزامنة هي الأكثر استخدامًا في الصناعة نظرًا لقوتها وانخفاض تكلفة الشراء أو الصيانة ، ولكنها يمكن أن تتعرض للعديد من الأعطال الكهربائية أو الميكانيكية أثناء تشغيلها ، الأمر الذي يتطلب الكشف المبكر. وقد أدى ذلك إلى استخدام العديد من طرق التشخيص التي تتيح لنا تحديد وتصنيف الأعطال التي تحدث في الماكينة، بناءً على تقنيات تحليل الاهتزازات وتحليل التيارات الكهربائية.

الهدف من هذا العمل هو تشخيص أعطال الآلات غير المتزامنة ذات الجهد المتوسط ، ولا سيما محركات الجرح الدوارة المستخدمة في مصانع الأسمنت لقيادة آلات الجر، وهي: المطاحن والكسارات. في الواقع، استخدمنا نظامًا تشخيصيًا عالي الأداء يسمى PDMA ، والذي يعتمد على تحليل التيارات الكهربائية ولديه القدرة على اكتشاف وتشخيص أنواع مختلفة من الأعطال الكهربائية والميكانيكية (ماس كهربائي بين المنعطفات، عدم توازن التيار الكهربائي، اختلال المحاذاة، الانحراف، عيوب التحمل، إلخ).

الكلمات المفتاحية: آلة غير متزامنة ذات جهد عالي، تشخيص الأعطال، تحليل التيارات الكهربائية.

## Abstract:

The asynchronous machine is the most widely used in industry due to its robustness and low purchase or maintenance cost, but it can be exposed to many electrical or mechanical faults during its operation, which requires early detection. . This has led to the use of numerous diagnostic methods that allow us to identify and classify the faults that occur on the machine, based on the techniques of vibration analysis and the analysis of electrical currents.

The objective of this work is to diagnose the malfunctions of MV medium voltage asynchronous machines, in particular wound rotor motors used in cement plants for driving traction machines, namely: grinders and crushers. In fact, we used a high-performance diagnostic system called PDMA, which is based on the analysis of electrical currents and which has the power to detect and diagnose the different types of electrical and mechanical faults (short-circuit between turns, imbalance supply voltage, misalignment, eccentricity, bearing defects, etc.).

Keywords: High voltage asynchronous machine, fault diagnosis, analysis of electrical currents.

## Résumé :

La machine asynchrone est la plus utilisée dans l'industrie en raison de sa robustesse et de son faible coût d'achat ou de maintenance, mais elle peut être exposée à de nombreux défauts électriques ou mécaniques pendant son fonctionnement, ce qui nécessite une détection précoce. Cela a conduit à l'utilisation de nombreuses méthodes de diagnostic qui nous permettent d'identifier et de classer les défauts qui se produisent sur la machine, en se basant sur les techniques de l'analyse vibratoire et l'analyse des courants

L'objectif de ce travail est de diagnostiquer les dysfonctionnements des machines à induction de moyenne tension HTA notamment les moteurs à rotor bobiné utilisés dans les cimenteries pour l'entraînement des machines de traction à savoir : les broyeurs et les concasseurs. En effet, on a utilisé un système de diagnostic de haute performance dit PDMA qui se base sur l'analyse des courants et des tensions et qui a le pouvoir de détecter et diagnostiquer différents défauts de types électriques et mécaniques (court-circuit entre spires, déséquilibre de tension, désalignement, excentricité, défauts de roulement, ...etc.).

**Mots clés :** Machine asynchrone ; diagnostic de défauts ; défaut de barres cassée ; réseau de neurones artificiels.



# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

La surveillance et le diagnostic des défauts de fonctionnement de tout système sont devenus incontournables en raison de contraintes croissantes imposées par les exploitants [1, 2, 3].

Ces défauts sont essentiellement dus aux échauffements excessifs, à une fatigue causée par les forces électromagnétiques et les contraintes de l'environnement que doit subir la machine asynchrone pendant son usage.

La caractérisation des défauts que peut rencontrer la machine a ouvert un très large champ d'étude. Il en est de même pour les méthodes de diagnostic qui doivent s'adapter ou être adapté dans le sens versatile, aux différents types de défauts devant être détectés [1,4,5,6,7,8].

Un effort important a été effectué sur la modélisation des machines asynchrones en présence des défauts comme la cassure d'une ou plusieurs barres consécutives et/ou d'une portion d'anneau de court-circuit, le court-circuit entre spires dans les bobinages et les différents types d'excentricités du rotor [1,7,9,10,11].

Toutefois, le travail de la communauté scientifique se poursuit actuellement afin d'affiner les modèles dédiés au diagnostic par l'introduction de l'effet de l'encoche, de la saturation, et de la variation non uniforme de l'entrefer, en vue d'obtenir un modèle le plus représentatif du moteur fonctionnant avec ou sans défaut [12,13,14].

Ce mémoire basé sur trois chapitres organisés comme suite :

Dans le chapitre 1, nous allons présenter une généralité sur les machines asynchrones et l'état de l'art de la surveillance et du diagnostic d'une MAS à bagues HTA.

Dans le chapitre 2, nous allons présenter un système d'acquisition et de traitement des signaux indicateurs des défauts.

Dans le dernier chapitre nous allons présenter le diagnostic des défauts de la MAS a bagues HTA basé sur l'analyse des courants et des tensions de la machine.

# **Chapitre I**

**L'état de l'art de la surveillance et du  
diagnostic de la Machine Asynchrone à  
bagues HTA.**

## I.1 Introduction

La machine asynchrone, est très répandue dans le milieu industriel en raison de sa robustesse et son faible coût de fabrication et de maintenance. Le processus de diagnostic et de détection des pannes dans leurs phases initiales est un objectif fondamental qui concerne les responsables de l'exploitation des machines électriques, car les arrêts soudains peuvent entraîner des résultats humains ou matériels catastrophiques et augmenter le temps de réparation. Par conséquent, de nombreuses techniques différentes de contrôle du travail ont été développées afin d'analyser les conditions anormales [1,3,4,5,6,7].

Dans ce chapitre, nous allons commencer par la définition de diagnostic puis présenter certaines notions de base concernant la constitution de la machine asynchrone et les différents types de défauts électriques et mécaniques. A la fin nous présentons les différentes étapes actuellement utilisées dans l'industrie et les critères d'évaluations d'un système de diagnostic. Enfin, les méthodes de diagnostic les plus fréquemment utilisées pour la détection des défauts [2,5].

## I.2 Terminologie relative au diagnostic

Un lexique sur les termes utilisés en diagnostic est utile pour la compréhension du présent mémoire. Ces définitions ont été extraites à partir de références bibliographiques. Le Tableau I.1 regroupe les terminologies les plus employées en surveillance industrielle.

Terminologie	Définition
<b>Systeme</b>	Un système est un ensemble physique structuré d'éléments interconnectés ou en interaction. Dans le cadre du diagnostic, les termes systèmes désignent tout particulièrement l'installation à surveiller. Dans notre cas c'est le moteur asynchrone . [2]
<b>Défaut</b>	On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence . [5]
<b>Défaillance</b>	Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques [4] .On peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité par : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Défaillance critique : nécessite une intervention d'urgence.</li> <li>• Défaillance significative : nécessite un processus de traitement.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Défaillance absorbable : pouvant être ignorée dans un premier temps.</li> </ul>
<b>Panne</b>	Une panne est l'inaptitude d'une entité (composant ou système) à assurer une fonction requise . [4]
<b>Diagnostic</b>	L'objectif de la fonction diagnostic est de rechercher les causes et de localiser les organes qui ont entraînés une observation particulière. Cette fonction se décompose en deux fonctions élémentaires: Localisation et identification . [2]
<b>Localisation</b>	La localisation permet de déterminer le sous-ensemble Fonctionnel défaillant
<b>Identification</b>	L'identification consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale. Ces causes peuvent être interne (sous ensemble défaillant faisant partie de l'équipement), ou externes à l'équipement .
<b>Surveillance</b>	Actions réalisées manuellement ou automatiquement, destinées à observer l'état d'un système et à détecter l'apparition d'une éventuelle défaillance. Les informations nécessaires à ces actions peuvent provenir de grandeurs physiques prélevées directement sur le système ou reconstituées à partir de mesures indirectes . [5]
<b>Fiabilité</b>	Caractérise l'aptitude d'un système ou d'un matériel à exécuter une fonction requise dans des conditions données pendant d'un intervalle donné . [3]

**Tableau.I.1 : Terminologies utilisées en diagnostic**

### **I.3 Notions sur la maintenance industrielle :**

La maintenance industrielle est d'une importance particulière dans le contexte de la sûreté de fonctionnement. En effet, elle englobe les concepts liés à la surveillance et au diagnostic. La Figure I.1 représente les différents concepts de la maintenance.

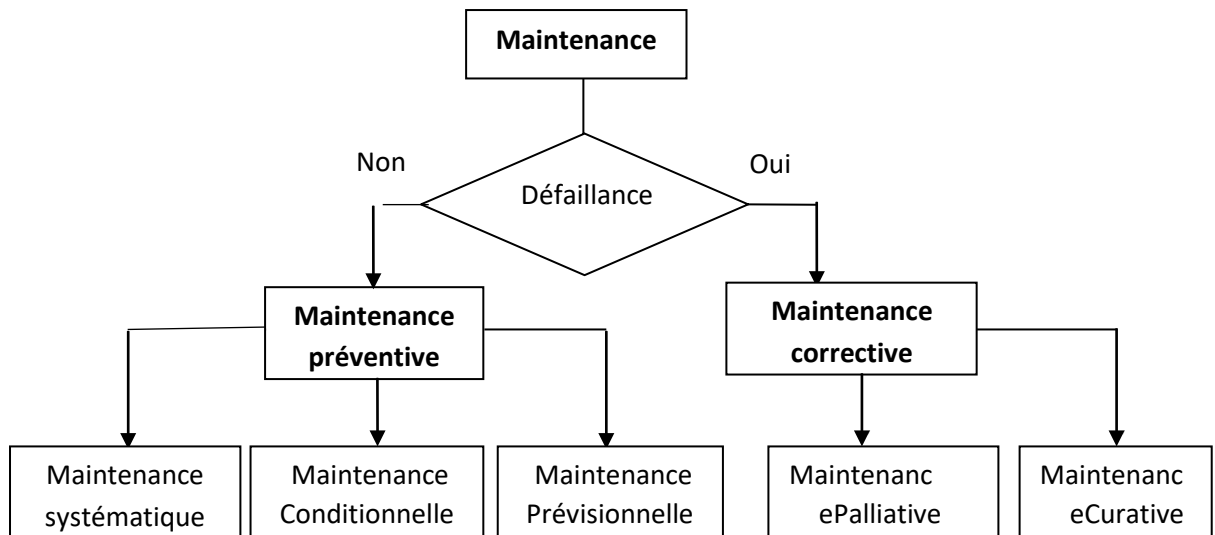


Figure.I.1 : Diagramme des différents concepts de maintenance

Nous donnons ci-après quelques définitions relatives à la maintenance industrielle :

- **Maintenance:** D'après la norme française " NF EN 13306 X 60-319 " , la définition de la maintenance est l'ensemble des actions techniques, administratives et de management destinées à maintenir un bien industriel en bon état de marche durant un cycle de vie ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [6] . La maintenance a pour objectif l'optimisation de la fiabilité du matériel, Le dépannage rapide des équipements et l'amélioration de la sécurité du travail.
- **Maintenance préventive :** la maintenance préventive peut être systématique, conditionnelle ou prévisionnelle [6]
- **Maintenance systématique :** lorsque la maintenance préventive est réalisée à des intervalles de temps prédéterminés, on parle de maintenance systématique. Ce type de maintenance permet d'éviter l'arrêt brutal de la production
- **Maintenance conditionnelle :** Cette surveillance, consiste à suivre périodiquement la valeur d'un certain nombre d'indicateurs de l'état de santé des machines relevés par des capteurs. Une évolution dans le temps de ces indicateurs permet de détecter une anomalie.
- **Maintenance prévisionnelle :** Lorsque la maintenance préventive est effectuée sur la base de l'estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste avant l'observation de l'évènement redouté, on parle de maintenance prévisionnelle.
- **Maintenance corrective :** la maintenance corrective est définie comme la maintenance effectuée après la défaillance. L'intervention s'effectue après l'apparition de la panne, ce type de maintenance peut parfois être suffisant dans le cas où la défaillance d'une machine ne

risque pas de perturber la production. La maintenance corrective peut être de nature :

- **Palliative** : C'est une maintenance dite de remise en état à caractère provisoire.
- **Curative** : C'est une maintenance dite de remise en état à caractère permanent.

Pour conclure, nous pouvons dire que le choix de la stratégie de la maintenance a pour but :

- ✓ Développer, adapter ou mettre en place des méthodes de maintenance.
- ✓ Elaborer et optimiser les gammes de maintenance.
- ✓ Organiser les équipes de maintenance.

#### I.4 Définition de diagnostic

Le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application. Et le diagnostic dans les procédés industriels est détermination du type, de la taille, de la localisation et de l'instant d'occurrence d'un défaut. Fonction qui suit la détection et inclut les fonctions de localisation et d'identification. [7]

Le diagnostic des défaillances, s'il est réalisé avec efficacité et s'il permet de détecter de façon précoce une dégradation, représente un des moyens pour contribuer à l'amélioration de productivité.

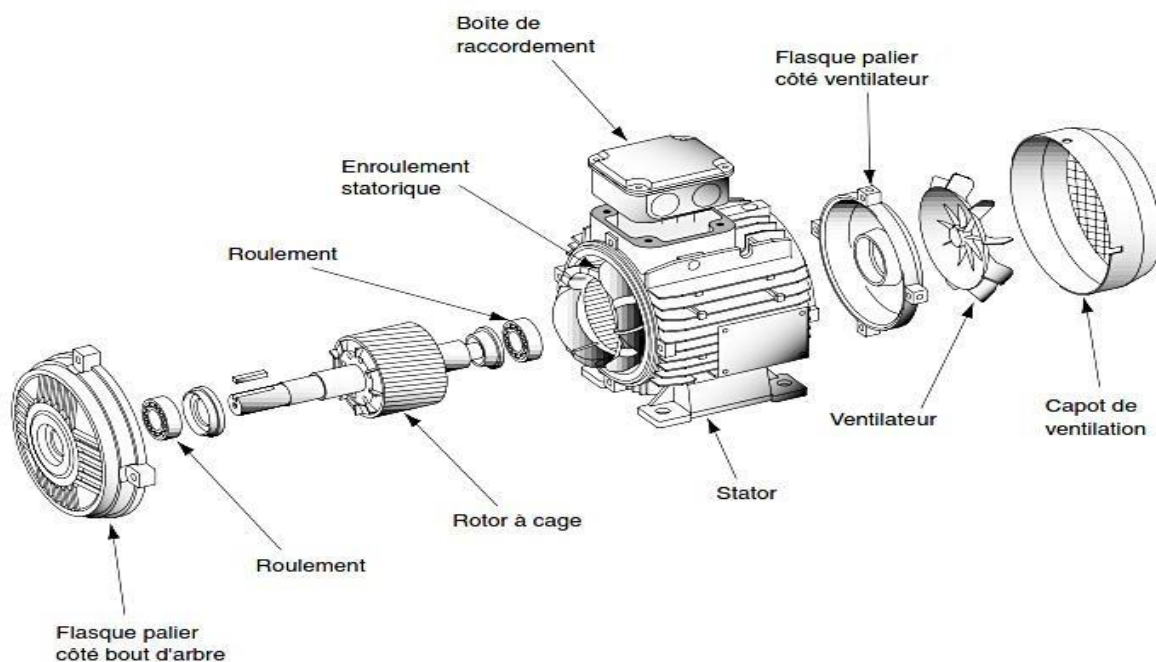
- **Défaut (panne, défaillance)** : événement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement sa fonction.
- **Disponibilité** : faculté d'un matériel ou d'un système à pouvoir fonctionner chaque fois que cela est nécessaire, chaque fois qu'on le sollicite, c'est-à-dire que l'on assure une fiabilité totale pendant les phases de fonctionnement. La disponibilité nécessite des opérations de maintenance préventive afin de prévenir tout vieillissement ou défaillance
- **Fiabilité** : capacité d'un système à fonctionner pendant un certain temps sans panne ; elle se caractérise par le temps moyen de bon fonctionnement.
- **Sécurité** : ce terme regroupe les notions de disponibilité, fiabilité, maintenabilité et sécurité du système. Elle caractérise la confiance que l'on peut apporter au fonctionnement.
- **Surveillance** : ensemble de fonctions s'exécutant en temps réel ayant pour but de reconstituer l'état réel du procédé au sein des modèles utilisés par le système de conduite du procédé. Elle consiste à l'enregistrement de l'information ainsi qu'à la reconnaissance et l'indication des comportements anormaux.
- **Supervision** : représente la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriées en vue de maintenir son opération face à des défaillances.
- **Perturbation** : signal d'entrée non contrôlé dont la présence est non souhaitable mais

considérée comme normale.

- **Symptôme** : changement d'une quantité observable par rapport à un comportement normal.
- **Dysfonctionnement** : exécution d'une fonction du système au cours de laquelle le service rendu n'est pas délivré ou il est délivré de manière incomplète.
- **Maintenance-maintenabilité** : la maintenance est définie comme étant « toutes les activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management ». Maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration...etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel, pour assurer la continuité et la qualité de la production. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations pour que le coût global soit optimum.

### I.5 Constitution de la machine asynchrone

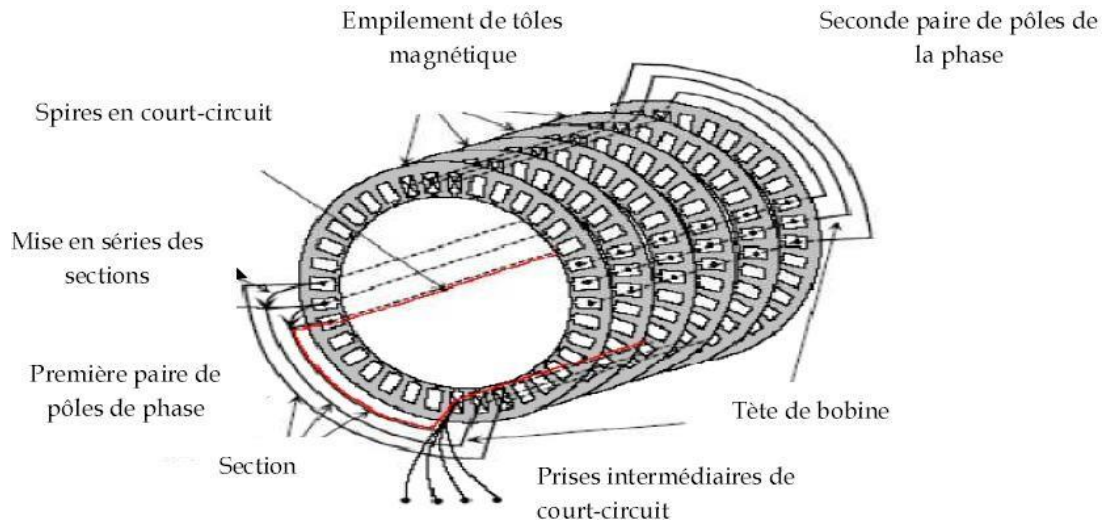
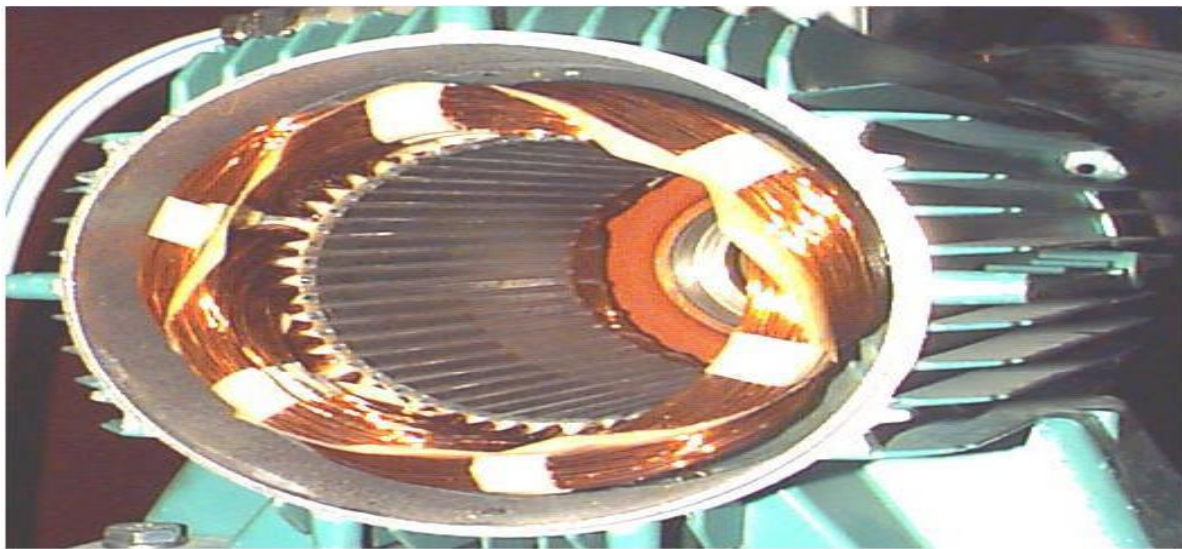
La machine asynchrone comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe, on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements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



**Figure.I.2** : Vue éclatée d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil

### . Le stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure I.1). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties [7]: 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 bobine permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre.

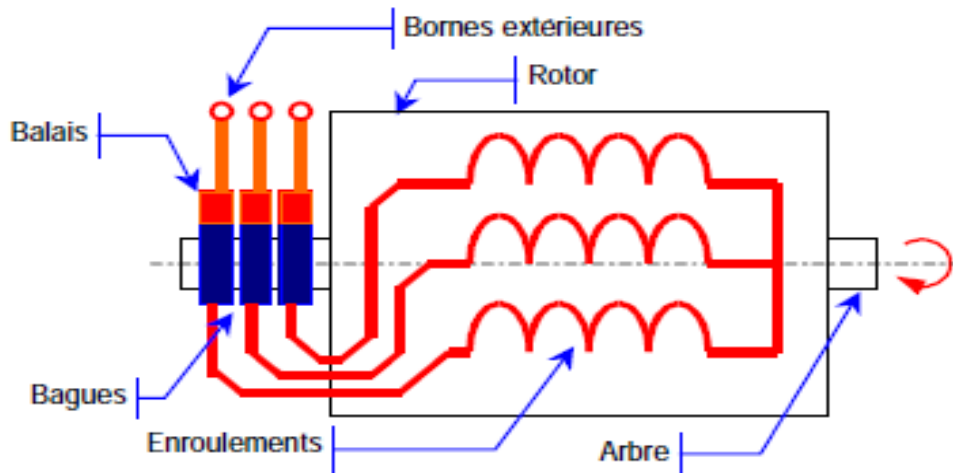


**Figure.I.3 : Vue schématique du stator**

### Le rotor bobiné

Le rotor d'une machine bobiné est constitué de trois bobines (on parle aussi de rotor à bague). Chaque bobine est reliée à une bague. Les bagues permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor.

Le rotor est mis en court-circuit par l'extérieur au travers de trois bornes liées électriquement par des contacts glissants appelés bagues réalisées en laiton sur lesquelles s'appliquent des balais de graphite. Les trois enroulements rotoriques sont couplés en étoile à l'intérieur de la machine.



**Figure.I.4 :** Constitution du rotor bobiné.

### Les paliers

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage.

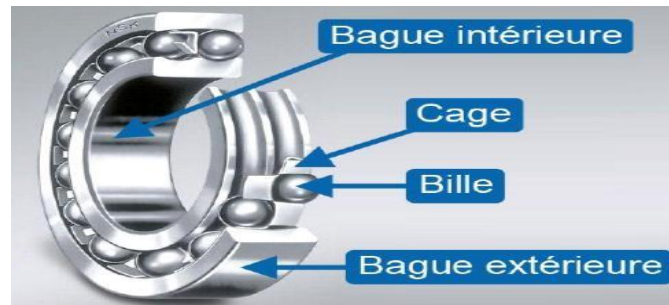
### Organes mécaniques

Parmi les principaux organes mécaniques du moteur asynchrone triphasé, on cite :

#### A. Les roulements

Le roulement est un organe mécanique, il permet la transmission des charges (efforts) entre deux pièces en rotation relative l'une par rapport à l'autre avec un frottement très réduit. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement est composé des éléments suivant:

- La bague extérieure.
- La bague intérieure.
- Les éléments roulants.
- La cage



**Figure.I.5:** *Eléments d'un roulement*

- ✓ **Choix des roulements :** Afin d'assurer un bon fonctionnement des moteurs et à des coûts minimiser, le choix du type et de la taille d'un roulement est primordiale. Ce choix est lié aux conditions de fonctionnement et aux caractéristiques de construction du moteur. Les facteurs qu'il faut prendre en considération pour réaliser un choix optimal du roulement sont : [8]
  - Connaissance de la nature, de la direction (axial, radiale) ainsi que de l'intensité de l'effort que doit supporter le roulement.
  - Connaissance de la nature et de la fonction de la machine pour choisir le type du roulement nécessaire et du lubrifiant à utiliser.
  - Connaissance des dimensions où doit être logé le roulement (espace réservé au roulement) pour déterminer ses dimensions.
  - La vitesse de rotation du roulement par rapport à la vitesse du rotor.
  - La durée de vie du roulement demandée.
- ✓ **Caractéristiques des roulements :** Les roulements sont produits sous diverses formes ayant chacune des caractéristiques distinctes. En comparaison avec les paliers lisses, les roulements ont les avantages suivants :
  - Le couple de frottement au démarrage est plus faible.
  - Ils sont fabriqués suivant des normes internationales, sont interchangeables et facilement disponibles.
  - En règle générale, ils acceptent à la fois des charges radiales et des charges axiales.
  - Leurs utilisations à basse et à haute température sont possibles.

### **Les paliers :**

Le palier est un organe mécanique dont le rôle est de supporter et de guider en rotation des arbres de transmission. Suivant l'usage utilisé, ces paliers peuvent être :

Lisses : Dans le cas où les arbres qui reposent sur les coussinets sont soumis au frottement de glissement entre les surfaces en contact.

A roulement : Dans le cas où le contact s'effectue par l'intermédiaire de billes ou de rouleaux dans de cage.

Le palier supporte l'arbre de la machine via la bague intérieure qui est fixée par une vis de blocage ou par un collier excentrique. Le diamètre extérieur du roulement est sphérique, tout comme le diamètre intérieur du palier. Il permet ainsi un auto-alignement entre les deux paliers supportant l'arbre [9].

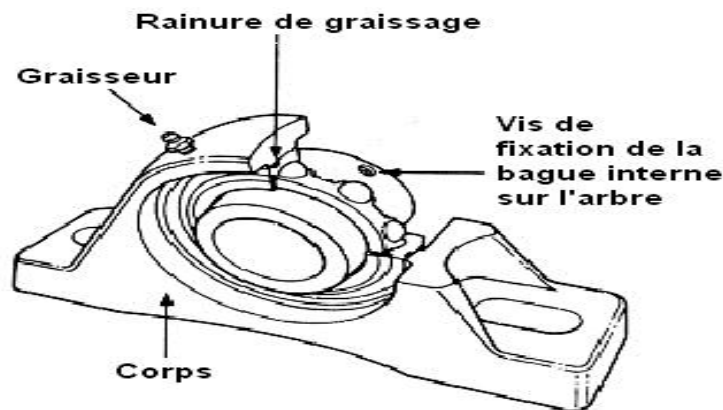


Figure.I.6 : Le palier

A noter enfin, qu'il existe une différence entre les paliers lisses et les roulements à rouleaux, qu'on peut résumer comme suit :

- Les roulements à éléments roulants sont généralement beaucoup plus coûteux que les paliers lisses
- Les roulements à éléments roulants conviennent mieux aux applications qui requièrent un positionnement précis de l'arbre où le coefficient de frottement est très faible.
- Les paliers lisses résistent mieux aux charges élevées et offrent une meilleure résistance aux chocs et aux charges d'angle.
- Les paliers lisses compensent mieux les défauts d'alignement que certains roulements à éléments roulants pour réduire l'effet de charge d'angle.
- Comparé aux roulements, les paliers lisses non métalliques offrent une meilleure résistance à la corrosion. [10]

### L'arbre :

C'est un organe de transmission. Il est généralement fabriqué en acier moulé ou forgé. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor. A une de son extrémité est monté le ventilateur et éventuellement le frein, à l'autre extrémité on trouve l'arbre de sortie

avec une rainure de clavetage pour le montage du pignon d'entraînement ou relié à la charge via un accouplement. L'arbre est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation

### ***La carcasse (ou Carter) :***

Elle est fabriquée en fonte grise pour les gros moteurs et en aluminium injecté pour les petits moteurs. Elle sert de support et joue le rôle d'enveloppe pour assurer une protection contre l'environnement extérieur. La boîte à bornes sur laquelle s'effectuent les branchements est fixée sur le dessus ou sur le côté de la carcasse.

### ***Les flasques (ou calottes) :***

Ils ferment le carter du moteur à ces deux extrémités et sont réalisés en fonte grise ou en aluminium injecté. Les flasques sont centrés sur le carter et réunis entre eux par des tirants ou tiges d'assemblage ils permettent aussi d'orienter le flux d'air vers les ailettes du carter.

### **Le ventilateur :**

Il est placé à l'extrémité du moteur, et permet le refroidissement de celui-ci

## **I.6 Principaux défauts affectant le moteur asynchrone**

### **I.6.1 Principaux défauts :**

La plupart des défauts dans les moteurs asynchrones sont dus à la coexistence de certaines contraintes nocives de types : électrique, magnétique, mécanique, thermique, ou dynamique. Leurs causes sont multiples et trouvent leurs origines :

- Dans la conception du moteur.
- Dans l'assemblage du moteur.
- Dans l'installation du moteur
- Dans l'environnement de travail du moteur
- Dans la nature de la charge du moteur.

Par ailleurs, les défauts affectant les moteurs peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : [13]

- Les défauts internes : sont provoqués par les constituants de la machine (bobinage du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotoriques, entrefer mécanique, etc...)
- Les défauts externes : Ils sont causés par le type d'alimentation utilisée, la charge mécanique ainsi que l'environnement d'utilisation de la machine

Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est montrée dans le tableau (I.3).

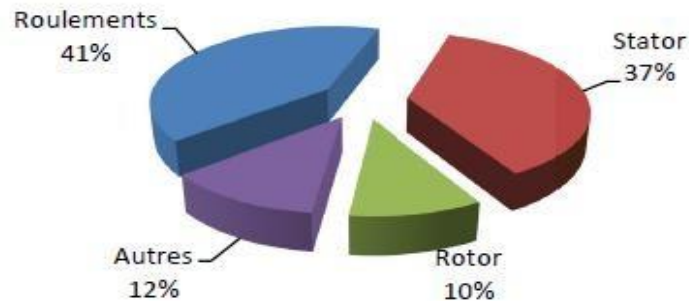
	<i>Origines</i>	<i>Classification de défauts</i>
<b>Interne</b>	Mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contact entre le stator et rotor</li> <li>• Défaut de roulements</li> <li>• Excentricité</li> <li>• Mouvement des enroulements et des tôles</li> </ul>
	Electrique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Défaillance au niveau de l'isolation</li> <li>• Rupture de barre</li> <li>• Défaillance au niveau du circuit magnétique</li> </ul>
<b>Externe</b>	Mécanique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Charge oscillante</li> <li>• Surcharge de la machine</li> <li>• Défaut de montage</li> </ul>
	Electrique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluctuation de la tension</li> <li>• Sources de tensions déséquilibrées</li> <li>• Réseau bruité</li> </ul>
	Environnementale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Humidité</li> <li>• Température</li> <li>• Propreté</li> </ul>

**Tableau.I.2 :** *Classification des défauts des machines électriques selon leurs origines*

### **I.6.2 Etudes statistiques des défauts de la machine asynchrone**

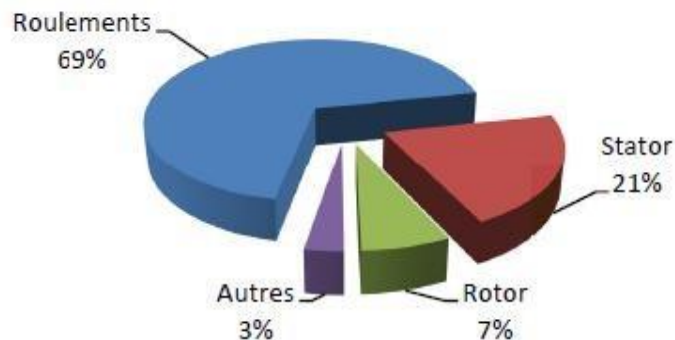
Les moteurs asynchrones à cage d'écurie bien que sont réputés robuste, ils peuvent subir certaines défaillances au niveau de leurs systèmes électriques ou mécaniques. En effet, un problème mineur à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut tout comme une utilisation non conforme de la machine.

Ensuite, des multiples études statistiques sur des machines ont été effectuées depuis les années 80. Toute cette statistique concerne les machines asynchrone de moyenne et grande puissance. Dans les années 90 les travaux élaborés par les chercheurs Thorsen et Thomson ont montré que les défauts le plus fréquent sont de types mécaniques, la majorité entre elle touche le roulement (41%) puis celles du stator (37 %). et les moins fréquent sont les défauts au niveau rotor (10 %), voir figure I.7.



**Figure.I.7 :** Répartition des défauts affectant le moteur asynchrone (1999) [14] [15]

Une étude statistique faite en 2008 par Bonnet sur les machines asynchrones de grande puissance dans l'industrie pétrochimique, montre que 69 % de pannes se situent au niveau des roulements, 21% au niveau du stator et 7% au niveau du rotor comme le montre la figure I.8. Comparativement à l'étude précédente, on constate que le pourcentage des défauts affectants le stator et le rotor a diminué. Cela est dû à l'amélioration de la technique de fabrication de machines électriques (par exemple, l'amélioration de la qualité des isolants) [].



**Figure.I.8 :** Répartition des défauts affectant le moteur asynchrone Bonnet 2008 [16]

On peut conclure que le roulement est l'élément le moins fiable du moteur et donc le plus susceptible d'être défectueux

### I.6.3 Définition des différents défauts de la machine asynchrone

- **Les causes des défauts**

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes :

- **Les générateurs de panes:** surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc. [17]

- **Les amplificateurs de défauts:** surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, etc.

- **Les vices de fabrication:** défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

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

- thermique (surcharge)
- électrique (diélectrique)
- mécanique (bobinage)
- environnemental (agression)

Et aussi pour le rotor les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- thermique (surcharge)
- électromagnétique
- résiduel (déformation)
- dynamique (arbre de transmission)
- mécanique (roulement)
- environnemental (agression).

### **I.7. Les étapes de la surveillance et de diagnostic de la machine asynchrone :**

L'objectif de la mise en œuvre des dispositifs de mesure est d'assurer une surveillance continue des conditions de fonctionnement des moteurs. Les données recueillies peuvent être utilisées avec une grande utilité pour l'amélioration de l'efficacité énergétique, l'extension de la durée de vie des moteurs, ou pour la programmation des opérations de maintenance. [18]

Trois niveaux de performance pour les programmes de surveillance sont proposés : "Classique", "Avancée", "Haute performance", qui peuvent être choisis, en fonction de la complexité et de la puissance de la machine.

Classification des fonctions de surveillance selon le niveau de performance

Niveaux de performance >> Mesures réalisées	Classique	Avancée	Advanced Plus	Haute performance
Courants				
Courant à la terre				
Courant moyen				
Déséquilibre de phases				
Niveau d'échauffement				
Température du moteur (par capteurs)				 
Fréquence				
Tension entre phases				
Démarrage trop long				
Déséquilibre de tensions				
Puissance active				
Puissance réactive				
Facteur de puissance				
Energie active				
Energie réactive				

**Tableau.I.3** : Classification des fonctions de surveillance selon le niveau de performance

Voici une liste des variables les plus utiles à surveiller, et l'avantage accordé par la mesure.

### **Courants :**

Ils sont directement responsables de l'échauffement des conducteurs et des bobinages des moteurs et donc d'une éventuelle réduction de leur durée de vie. Ce sont des variables les plus importantes à surveiller. Leurs valeurs donnent aussi une indication directe sur la charge du moteur et les contraintes subies par la machine.

### **Courant à la terre :**

Il peut être mesuré avec la somme des 3 phases si la précision requis n'est pas trop élevé (environ 30%). Si une précision est requise alors il est mesuré avec un contrôleur de terre (précision 0,01 A) [18]

### **Courant moyen :**

Il permet de connaître la charge moyenne du moteur et si le moteur est bien adapté, ou non, à la machine.

### **Déséquilibre de phases :**

Un tel déséquilibre provoque des pertes supplémentaires dans le moteur, c'est une variable importante à contrôler.

### **Niveau d'échauffement :**

Sa valeur permet d'apprécier la capacité de surcharge restante et la marge de sécurité.

### **Température du moteur (par des capteurs) :**

Cette valeur permet de connaître les réelles conditions thermiques de fonctionnement, en tenant compte de la charge du moteur, de la température ambiante et de l'efficacité de sa ventilation.

### **Fréquence :**

Mesure de courant à 47-53 Hz de la fréquence fondamental (sur la tension de ligne). Si la fréquence est instable ( $\pm 2$  Hz variations), la valeur affichée sera 0 jusqu'à l'obtention d'une valeur stable.

### **Tension entre phases :**

Ce contrôle de tension indique si le moteur fonctionne dans des conditions normales ou non. En effet, trop élevées ou trop basses, les tensions de phase sont responsables de l'augmentation de courant dans le moteur pour une charge donnée.

**Déséquilibre de tensions :**

Comme le déséquilibre de phases, il est responsable de pertes supplémentaires dans le moteur, c'est donc aussi une variable importante à contrôler.

**Puissance active :**

Indication de la charge appliquée au niveau du moteur.

**Puissance réactive :**

Indication de la puissance réactive qui peut être nécessaire de compenser par la mise en œuvre de condensateurs.

**Facteur de puissance :**

Indication du niveau de charge du moteur.

**Energie active :**

Permet de rapprocher la quantité d'énergie consommée au temps de fonctionnement ou à la quantité de marchandises produites par machine. [18]

**Énergie réactive :**

Permet de déterminer la nécessité de la mise en œuvre de condensateurs afin d'éviter le paiement de pénalités à l'utilitaire.

**I.7 Les Méthodes de diagnostic :**

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses mais on peut les classer suivant deux axes

- L'usage des outils mathématiques qui permettent de modéliser les systèmes, les causes et les symptômes de défaillance, pour faciliter les démarches inductives et déductives, qui relèvent du domaine des méthodes de diagnostic interne.
- L'usage des méthodes capables de reproduire sous forme informatique, les modes de raisonnement de l'homme. Ces derniers sont basés sur la discipline de l'intelligence artificielle et sont du domaine des méthodes de diagnostic externe.

On peut classer les méthodes de diagnostic en premier lieu dans les deux grandes familles

- les méthodes internes et externes.
- les méthodes inductives et déductives

**I.7.1 Méthodes externes :**

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine acquise

par apprentissage, ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux que fournit la machine lors de son fonctionnement, les signaux utilisables peuvent être :

Flux d'entrefer, puissance instantanée, courant statorique et vibration acoustique.

### I.7.2 Méthodes internes :

La connaissance du modèle permet de décrire les relations de cause à effet, ces méthodes requièrent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèle mathématique, ces méthodes utilisent un modèle pour reproduire le comportement du système.

On distingue ces méthodes suivant le modèle utilisé.

- **Modèle de simulation** : les modèles analytiques utilisés dans ce mode sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert.
- **Observateurs** : un module capable d'engendrer une approximation du vecteur d'état est appelé : estimateur d'état ou observateur d'état. Le modèle est décrit sous une représentation de variables d'état. L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic.
- **Estimation paramétrique** : c'est la détermination des vecteurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système.
- **Modélisation des signaux** : dans cette méthode, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts, l'analyse spectrale est très utilisée pour détecter des défaillances dans les machines électriques.

- **Méthodes inductives** :

Elles correspondent à une approche montante ou recherche en avant, il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système, ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leur combinaison afin de trouver le défaut

- **Méthodes déductives** :

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes, la méthode déductive doit trouver quels sont les effets dans le système. Une vérification des effets trouvés par rapport aux effets possibles permet de confirmer l'existence d'un défaut.

Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou arrière) soit une combinaison de raisonnement (avant et arrière) dans ce dernier cas le raisonnement appelé mixte ou avant arrière.

### ***Conclusion***

Dans ce premier chapitre, après avoir rappelé les terminologies utilisées en diagnostic, nous nous sommes intéressés à la constitution du moteur asynchrone ainsi qu'aux principaux défauts pouvant affecter les différentes parties du moteur. A noter, que nous nous sommes surtout intéressés aux défauts mécaniques, vu que statistiquement c'est les défauts les plus récurrents.

Aussi, nous avons rappelé les causes mais surtout l'impact de ces défauts sur les grandeurs mesurables issues du moteur. Ainsi, un suivi efficace de ces grandeurs permettra un diagnostic fiable du moteur. Pour cela, différentes techniques de diagnostic se sont développées dépendamment de ces grandeurs physiques. Une synthèse de ces techniques a été réalisée dans ce chapitre pour montrer la raison pour laquelle nous avons choisi les deux techniques, du courant et de la vibration, dans ce travail.

Le prochain chapitre sera donc consacré à l'étude de la technique d'analyse des courants et des signaux vibratoires ainsi qu'aux méthodes d'analyse permettant l'élaboration des signatures indicatrices des défauts.

# Chapitre II

Systeme d'acquisition et de  
traitement des signaux des  
défauts

## II.1 Introduction

De nos jours, l'industrie exige de plus en plus, une optimisation de la maintenance ce qui nécessite un choix judicieux et rigoureux de la technique à utiliser pour un diagnostic fiable. En effet, le choix de la technique de diagnostic a des incidences directes sur le coût et bien sûr sur la production. L'analyse vibratoire est l'une des méthodes utilisées pour le diagnostic des moteurs électriques. C'est une technique particulièrement adaptée à ce type de machine et la plus communément utilisée en industrie car elle permet de [54] :

- déterminer à tout moment l'état des moteurs et d'estimer la durée de vie potentielle de ses composants.
- détecter les anomalies ou défauts de montage, pour un équipement neuf.
- vérifier si les anomalies ont bien été corrigées après une remise en état de l'équipement
- évaluer avec précision le niveau de vibration des différentes zones pour d'éventuelles utilisations d'équipements, nécessitant de faibles niveaux vibratoires, à des emplacements adéquats.
- améliorer l'environnement de travail

Pour toutes ces raisons, cette technique est un outil de surveillance indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet une détection et un suivi fiable des défauts affectant les moteurs. A noter que ces dernières années, cette technique c'est beaucoup développée avec l'amélioration des procédés de traitement du signal.

Le but de ce deuxième chapitre est de rappeler certaines notions de base sur le signal vibratoire, nécessaires pour la compréhension et la maîtrise de cette technique. Ensuite, la technique des courants et de tensions de ligne pour la détection des défauts électriques et mécaniques.

L'analyse spectrale est retenue comme méthode d'investigation performante des défauts affectant un moteur.

Parmi les techniques de diagnostic utilisées, on cite la technique vibratoire. Cette technique est la plus utilisée en industrie pour réaliser une surveillance et un diagnostic efficace afin de détecter l'apparition et l'évolution de la plupart des défauts mécaniques. Seulement, son principal inconvénient reste l'emplacement du capteur qui doit être placé à des endroits ou positions spécifiques pour des mesures fiables.

A l'inverse, la technique du courant de ligne présente l'avantage de la possibilité de mettre le capteur de courant à n'importe quel emplacement entre l'alimentation et le moteur sans altérer la fiabilité de cette technique.

Cette approche basée sur le courant de ligne est très prometteuse car elle permet aussi un diagnostic des défauts électriques et mécaniques [PDMA].

## II.2 Notions de base sur la vibration

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va-et-vient autour d'une position moyenne appelée « position d'équilibre ». La forme la plus simple de ce mouvement est la forme sinusoïdale . [40].

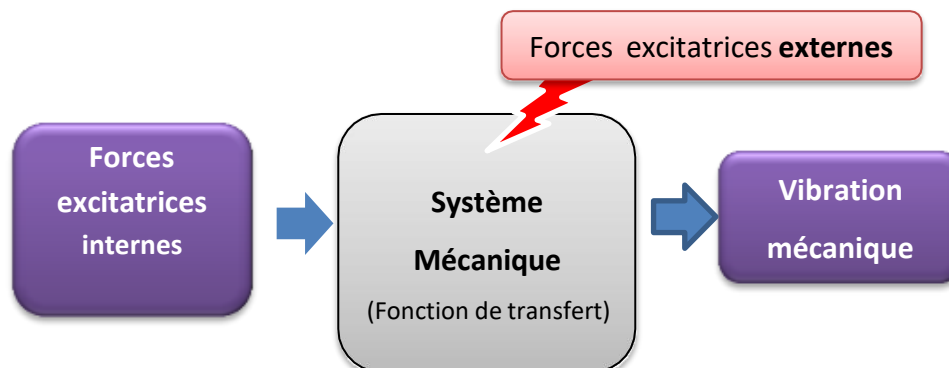
Selon la norme **ISO 2041** "Vibrations et chocs ", la vibration est définie comme étant une variation de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement, ou de la position d'un système mécanique, autour d'une valeur moyenne ou de référence en fonction du temps. Les vibrations mécaniques sont liées à l'existence d'efforts dynamiques internes ou externes au système :

- Les efforts internes, dans la plupart des cas, relèvent d'un mauvais fonctionnement lié à par exemple à un déséquilibre de rotor ou à un désalignement d'arbre.
- Les efforts externes sont associés à des excitations naturelles ou à l'environnement vibratoire des mécanismes.

A noter, que dans le cas d'un moteur électrique tournant à vitesse constante, les efforts dynamiques sont forcément périodiques et où la période des vibrations se cale sur celle de l'effort qui l'a produite.

### II.2.1 Origine des vibrations :

Sachant que tout corps doté d'une masse et d'une élasticité est susceptible d'être soumis à des vibrations. Alors, l'application de forces à une structure mécanique engendre, suivant la fonction de transfert de celle-ci, des vibrations spécifiques, comme le montre la Figure.II.1



**Figure.II.1** : Réponse mécanique d'un système

Les vibrations mesurées sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de

fonctionnement de certaines parties mécaniques constituant le système à analyser. C'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les parties défectueuses et éventuellement de les localiser [44,40]. Malheureusement, ces vibrations sont dues aux forces excitatrices internes, mais aussi à des forces excitatrices externes. Ce qui peut influencer la fiabilité de l'analyse.

Pour un système électromécanique 'moteur', les forces appliquées sont de type mécanique, électromagnétique et aérodynamique. A noter que ce système se compose d'un ensemble d'organes mécaniques assemblés entre eux pour transmettre un mouvement. Ces mécanismes, mobiles entre eux, ne peuvent fonctionner sans jeux, contraintes et chocs. Toutes ces interactions engendrent une charge dynamique supplémentaire aux paliers comme résultat de l'augmentation de l'énergie vibratoire, ce qui, enfin, se manifeste principalement sous forme de vibrations et de bruits. [44,40].

### II.2.2 Types de vibrations

Les vibrations mécaniques sont des mouvements oscillant autour d'une position moyenne d'équilibre. Ces mouvements oscillants caractéristiques de l'effort qui les génère, peuvent être classés généralement comme suite :

**A. Vibration périodique :** Une vibration périodique est une grandeur physique qui se reproduit exactement de la même manière après un certain temps appelé période. Une telle vibration est générée par une excitation elle-même périodique. Nous distinguons trois formes de vibration périodique : [41].

**1. Vibration périodique simple** (appelée aussi harmonique ou sinusoïdale): Une vibration harmonique est une vibration dont la variation temporelle est purement sinusoïdale (voir Figure). Ce mouvement peut être décrit par l'équation mathématique suivante :

$$x(t) = (X \sin \omega t + \varphi)$$

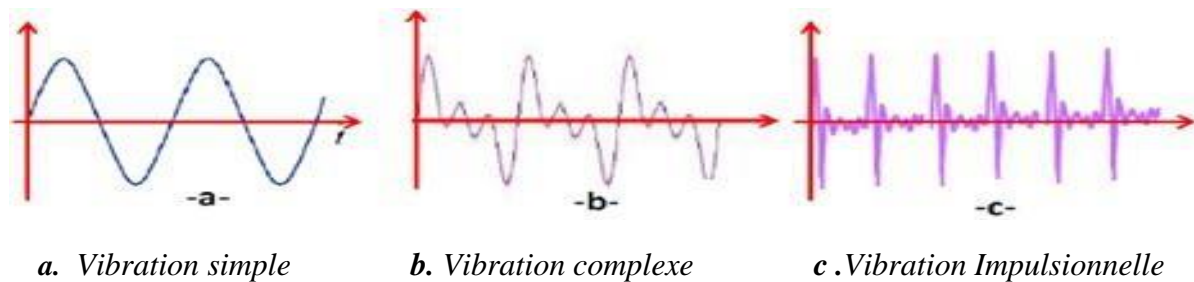
Ce type de vibration peut être généré par le balourd d'un rotor en mouvement.

**2. Vibration périodique complexe :** C'est le cas le plus fréquent relevé sur les machines électriques. Cette vibration est le résultat de la somme de plusieurs vibrations périodiques simples (voir Figure).

Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple ou complexe peuvent représenter un certain nombre d'anomalies comme par exemple : le déséquilibre, le désalignement, les

déformations, instabilité de paliers fluides, déversement de bagues sur roulement. [46].

**1. *Vibration périodique impulsionnelle*** : Les vibrations périodiques de type impulsionnel (voir Figure.II.2) sont appelées ainsi par référence aux forces qui les génèrent et à leur caractère brutal, bref et périodique. Ces chocs peuvent être produits par des événements anormaux comme l'écaillage de roulements ou à un défaut d'engrenages.



**Figure.II.2 : Vibrations périodiques**

**B. Vibration apériodique** : Une vibration apériodique est une grandeur physique dont le comportement temporel est quelconque. C'est-à-dire qu'il n'existe pas de reproductibilité dans le temps. C'est le cas des chocs que l'on enregistre sur un broyeur.

**C. Vibration aléatoire** : C'est une vibration continue pour laquelle il est impossible de déterminer sa période de répétition ou de prédire son amplitude. On la qualifie de phénomène non déterministe (Voir Fig.). Ce type de vibration peut être généré par exemple par un défaut de lubrification sur un roulement ou la cavitation d'une pompe.

**D. Vibration transitoire** : C'est une vibration non continue observable pendant un bref instant, résultant des forces d'excitations de durée limitée. Ce type de vibration apparaît lors d'un choc (Voir Figure).

### II.2.3 Caractéristiques de la vibration

Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude, et la nature des forces qui l'animent [47].

**La fréquence** : Représente la cadence de répétition d'un phénomène ou le nombre de fois qu'il se reproduit par seconde. Elle s'exprime en Hertz (Hz).

**L'amplitude** : On appelle amplitude d'un mouvement vibratoire la valeur des écarts par rapport à sa position d'équilibre. Mais vu la complexité du signal vibratoire réel, il est nécessaire de définir plusieurs autres grandeurs pour caractériser son amplitude

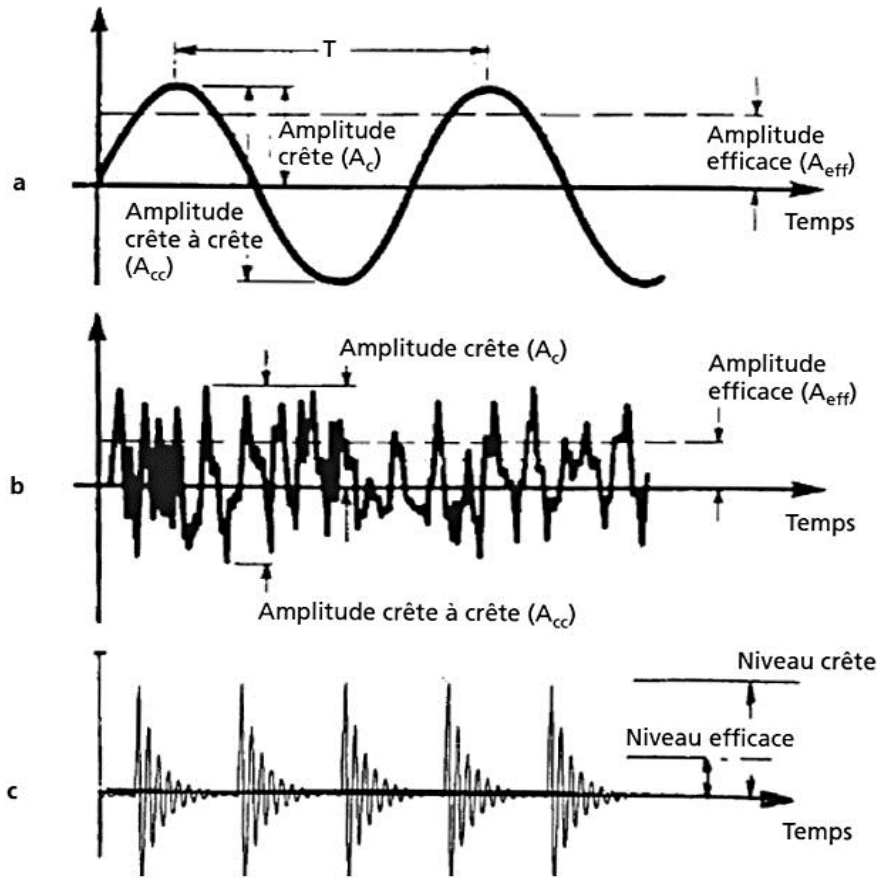


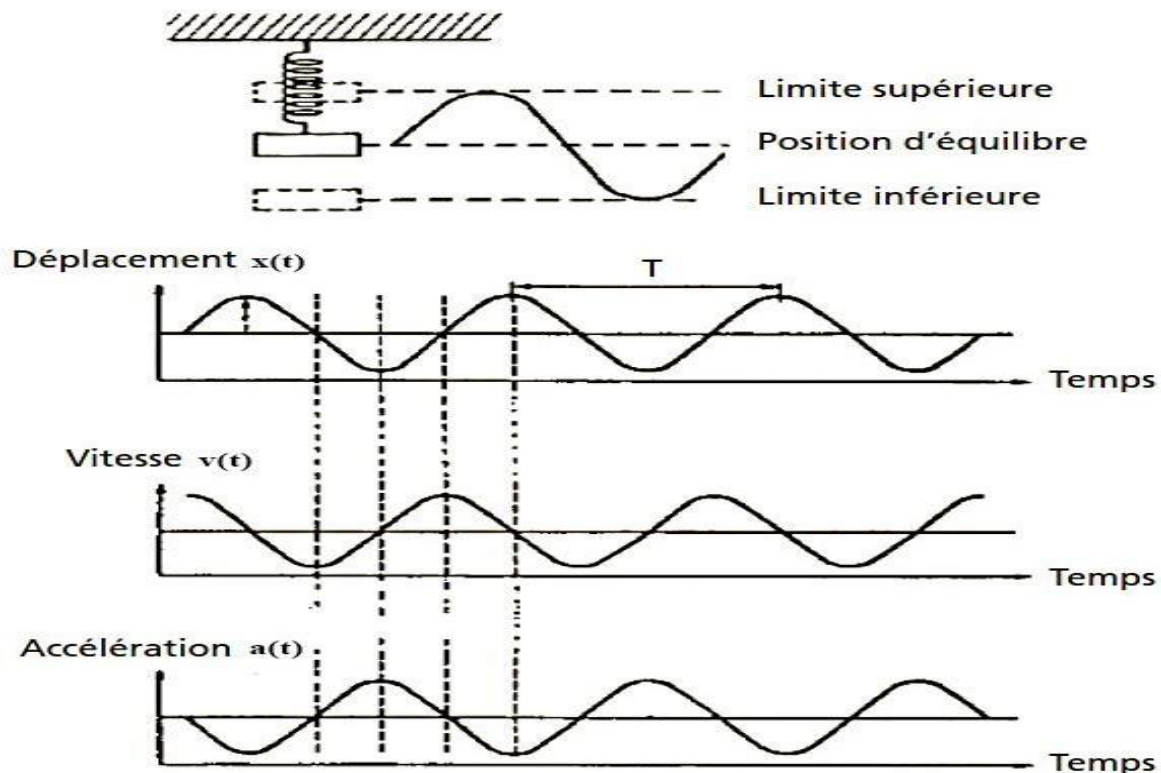
Figure.II.3 : Représentation des différentes amplitudes

- **L'amplitude crête ( $A_c$ )** : C'est l'Amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.
- **L'amplitude crête à crête ( $A_{cc}$ )** : C'est l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné.
- **L'amplitude efficace ( $A_{eff}$ )** (Root Mean Square en anglais RMS) : Elle représente l'amplitude corrigée « statique » du signal redressé, indiquant ainsi l'énergie donnée par le mouvement vibratoire.

Dans le cas d'une vibration sinusoïdale (voir figure II.3.a), induite par exemple par un balourd, les amplitudes crête et efficace sont liées par la relation suivante :

$$A_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_c \quad (II.2)$$

Dans le cas d'un signal vibratoire complexe (Figure II.3.b), il n'existe pas de relations simples liant les valeurs crête et efficace. Les trois grandeurs sont définies par les relations mathématiques suivantes :



**Figure.II.4 :** Grandeurs cinématique du mouvement d'un système masse-ressort

De cette figure, on peut dénombrer trois grandeurs représentant le mouvement de la masse :

**a. Le déplacement ( $x$ ) :** La position de la masselotte varie de part et d'autre de la position d'équilibre, allant de la limite supérieure à la limite inférieure du mouvement. L'équation de ce mouvement est donnée par l'expression suivante :

$$x(t) = A \sin(2\pi ft)$$

**b. La vitesse ( $v$ ) :** Cette vitesse sera nulle au point haut et au point bas du mouvement de la masselotte et sera maximale autour du point d'équilibre. En dérivant l'équation, on obtient la vitesse  $v$  du mouvement vibratoire :

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (\text{II.7})$$

**c. L'accélération ( $a$ ) :** Celle-ci permet à la masselotte de passer de sa vitesse minimale en début de course à sa vitesse maximale au point d'équilibre avant de décélérer en fin de course

Les expressions montrent que la vitesse ' $v$ ' et l'accélération ' $a$ ' d'un mouvement sont

représentées par des fonctions sinusoïdales de même fréquence décalées dans le temps, au même titre que le déplacement  $x$ . Cependant, si les fréquences restent identiques, les amplitudes sont différentes.

### II.2.4 Unités de mesure

Les unités usuelles sont le micromètre ( $\mu m$ ) pour le déplacement, le ( $mm/s$ ) pour la vitesse et le ( $g$ )  $9,81 m/s^2$  ou le  $m/s^2$  pour l'accélération, ce qui donne les relations suivantes :

Paramètres	Unités S.I.	Unités vibratoires usuelles	Conversion
$x$	m	$\mu m$	$\mu m = 10^{-6}m$
$v$	m/s	mm/s	$1mm/s = 10^{-3}m/s$
$a$	$m/s^2$	$g$	$1g = 9,81m/s^2$

**Tableau.II.1** : Unités vibratoires usuelles et leurs conversions

### II.2.5 Critères de sélection des trois grandeurs :

En reconsidérant les expressions pour une vibration périodique simple (ou sinusoïdale), on peut établir la relation suivante entre les trois grandeurs:

Cette relation mathématique montre l'importance du choix de la grandeur physique à mesurer pour la surveillance vibratoire d'une machine tournante. En effet,

Un défaut dans un moteur donne naissance à une vibration qui se manifeste par un déplacement matériel. Ce déplacement ne peut être significatif que si la fréquence du mouvement est faible. Ainsi, la mesure du déplacement, dans un moteur, peut être utilisée pour étudier des phénomènes basse fréquence ou dont les composantes dominantes se situent en dessous de la fréquence de rotation (déséquilibre, déformation, désalignement, desserrage...) [40].

L'énergie cinétique, produite par la vibration, est proportionnelle à la vitesse du déplacement d'un élément du moteur. La mesure de cette vitesse facilite la détection des anomalies à fréquence moyenne, généralement entre 100 Hz et 1000 Hz (fréquence de passage des pales d'un ventilateur ou des aubes d'une pompe, engrènement sur un réducteur ...) . [40].

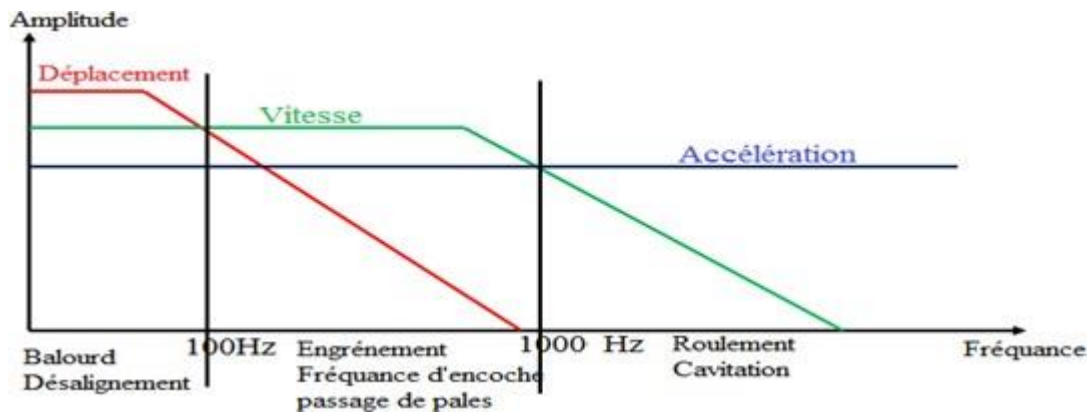
Les mouvements de vibration sont causés par des forces dynamiques, naissant d'un défaut. Ces forces sont directement liées à l'accélération par la deuxième loi de Newton.

La mesure de cette accélération permet de déceler des composantes se situant à des fréquences encore plus élevées (signature d'engrènement sur un multiplicateur ou passage d'encoches sur un moteur par exemple). Les signaux impulsifs, riches en composantes

hautes fréquences, sont des témoins de défauts spécifiques (écaillage de roulements, jeu entre les pièces, cavitation). [40]

Ainsi, la fiabilité de la technique vibratoire dépend de la grandeur cinématique choisie selon la plage fréquentielle où la signature du défaut recherché est susceptible de d'apparaître. La figure suivante montre l'intérêt des trois grandeurs cinématiques selon la variation de la fréquence.

. La figure suivante montre l'intérêt des trois grandeurs cinématiques selon la variation de la fréquence.



**Figure.II.5 :** *Grandeurs cinématiques selon la plage fréquentielle d'analyse*

Pour la surveillance d'un moteur asynchrone, le choix d'une des trois grandeurs à mesurer, dépend du défaut recherché et de sa signature fréquentielle. La grandeur utilisée est appelée « indicateur de surveillance ».

Le tableau II.2 donne le domaine de surveillance pour chaque indicateur.

Indicateur (Niveau global)	Domaine de surveillance
<span style="color: red;">■</span> Déplacement ( $\mu\text{m}$ )	Phénomènes lents basses fréquences [2-100 Hz] : balourd, désalignement, instabilités de paliers etc.
<span style="color: green;">■</span> Vitesse ( $\text{mm/s}$ )	Moyennes fréquences [1000 Hz] : balourd, lignage, instabilités de paliers, cavitation, passages d'aubes, engrènement etc.
<span style="color: blue;">■</span> Accélération ( $\text{g}$ )	Phénomènes très rapides Hautes fréquences [20000 Hz] : engrenages, roulements, passages d'ailettes, cavitation...)

**Tableau.II.2 :** *Domaine de surveillance des indicateurs vibratoires*

### • Capteurs des grandeurs cinématiques

Pour convertir les trois grandeurs cinématiques de la vibration mécanique produite par une machine tournante en un signal électrique équivalent, nous avons : [56]

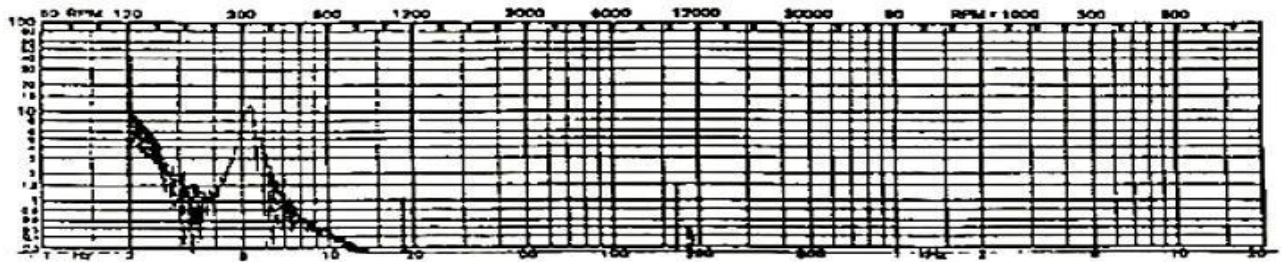
- le proximètre pour mesurer le déplacement.
- La vélocimètre pour mesurer la vitesse.
- L'accéléromètre pour mesurer l'accélération.

Le tableau suivant représente les avantages et l'inconvénient de ces trois capteurs.

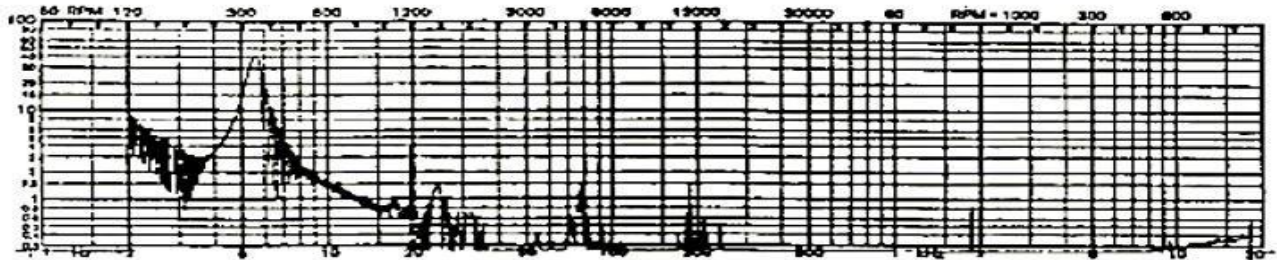
<i>Capteurs</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Capteur de déplacement (proximètre)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Basses fréquences [2-100Hz] ‘Phénomène lents’</li> <li>▪ Mesure directement les mouvements d’arbre</li> <li>▪ Pas de pièce mobile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Installation limitée.</li> <li>▪ Gamme de fréquence limitée.</li> <li>▪ Défaits de roulements indétectables.</li> <li>▪ Fonction de la variation de la température</li> </ul>
Capteur de vitesse (vélocimétrie)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Moyenne fréquences [1000 Hz].</li> <li>▪ Il est facile à installer.</li> <li>▪ Il délivre un signal important</li> <li>▪ Ne nécessite pas une alimentation extérieure.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dimensions relativement larges et un poids important.</li> <li>▪ Très sensible aux fréquences d’entrée.</li> <li>▪ Réponse fréquentielle est très étroite.</li> </ul>
Capteur d’accélération (accéléromètre)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hautes fréquences [20000 Hz]. ‘Phénomène très rapide’</li> <li>▪ Installation facile</li> <li>▪ Poids léger et dimensions réduites.</li> <li>▪ Supporte les hautes températures.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nécessite une double intégration par rapport au déplacement</li> <li>▪ Nécessite une source d’alimentation extérieure</li> <li>▪ Médiocre pour les faibles vitesses.</li> </ul>

**Tableau.II.3 :** *Avantages et inconvénient des trois types de capteurs.*

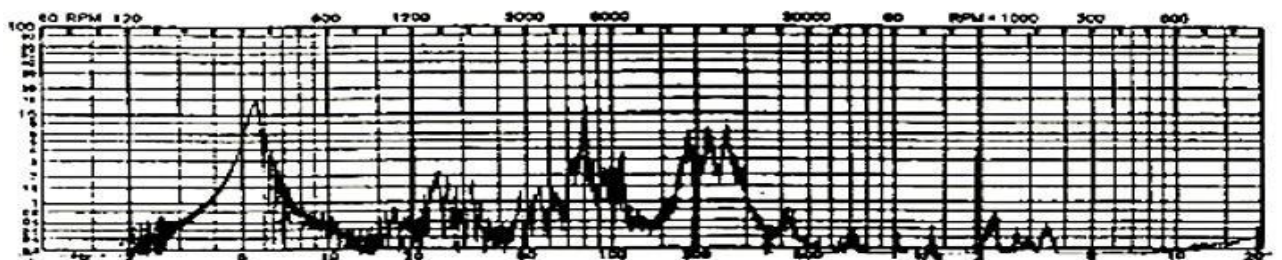
Les tracés suivants sont obtenus à partir des mesures prises dans les mêmes conditions (au même moment, au même endroit sur un même signal vibratoire), par les trois capteurs vus précédemment. On constate qu’en mode accélération le signal est bien consistant, une nette émergence des composantes fréquentielles, jusqu’alors non visible en mode vitesse et déplacement, s’accroît au fur et à mesure de l’accroissement des fréquences. [40]



**Mesure en mode déplacement**  
(Plage de fréquences : 2 Hz à 100 Hz)



**Mesure en mode vitesse**  
(Plage de fréquences : 2 Hz à 3 000 Hz)



**Mesure en mode accélération**  
(Plage de fréquences : 2 Hz à 20 000 Hz)

**Figure.II.6** : Spectres du mouvement vibratoire sur une moto ventilateur

“ Déplacement, vitesse et accélération ” [40]

- **Accéléromètres**
- **Types d'accéléromètres**

Les accéléromètres transforment le mouvement mécanique en un signal analogique proportionnel à l'accélération vibratoire. Actuellement, il existe différents types d'accéléromètres.

Le tableau suivant illustre cela.

<i>Les types d'accéléromètre</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<b>Accéléromètres Piézorésistifs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Large bande passante.</li> <li>▪ Facile à conditionner (pont de jauges).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Faible tolérance à la surchargemécanique (fragile).</li> <li>▪ Faible sensibilité.</li> </ul>
<b>Accéléromètres capacitifs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Facile à conditionner et peu sensible aux parasites externes</li> <li>▪ Grande sensibilité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bande passante limité.</li> <li>▪ Fragile.</li> </ul>
<b>Accéléromètres Piézoélectriques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Large bande passante.</li> <li>▪ Très utilisés pour la mesure de chocs moyens.</li> <li>▪ Efficace pour une large gamme de température</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ne permettent pas d'observerdes fréquences très basses.</li> <li>▪ Non recommandés pour les mesures de chocs de haute amplitude.</li> </ul>
<b>L'accéléromètre à électronique intégrée (IEPE : Integrated Electronic Pizo-Electric)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sortie à basse impédance ce qui autorise une plus grande longueur de câble.</li> <li>▪ Résiste à conditions difficiles comme l'humidité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nécessite une alimentation à courant constant.</li> <li>▪ Température de fonctionnement supérieure limitée à &lt;125 ° C.</li> </ul>

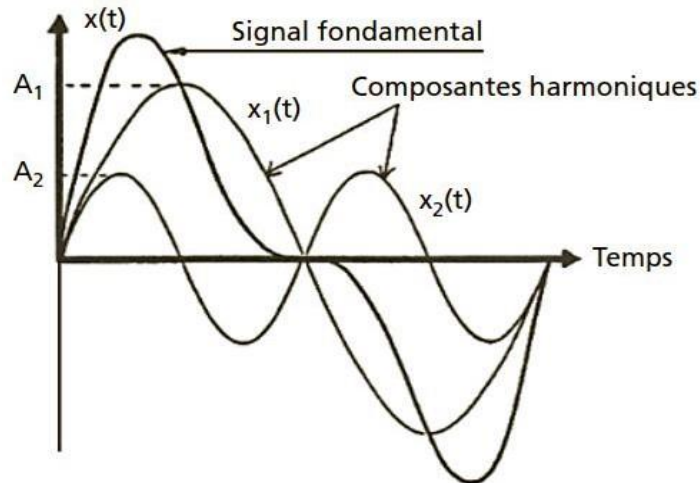
**Tableau.II.3 :** Comparaison entre les différents types d'accéléromètre

## II.2 Analyse spectrale

Toute anomalie affectant une machine tournante se traduit par des vibrations de type complexe, dont les fréquences représentent les forces qui les induisent (présence de défauts par exemple). Pour cette raison, il est intéressant de décomposer le signalvibratoire mesuré en ses sinusoïdes élémentaires (ou harmoniques) afin de déterminer les signatures fréquentielles de ces forces. La méthode la plus utilisée pour ces cas-là estl'analyse spectrale ou fréquentielle. Cette méthode est caractérisée par sa simplicité et son pouvoir de discrimination entre les différents types de défauts.

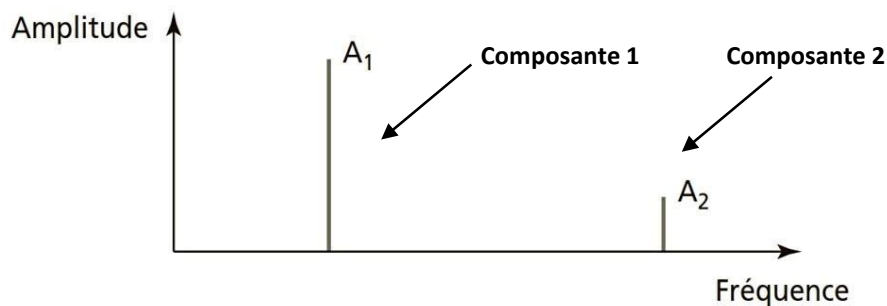
### Principe

Pour qu'un signal soit facilement interprété, il est nécessaire de le décomposer en ses différentes composantes sinusoïdales élémentaires. Si cette décomposition est théoriquement possible par un filtrage successif, sa représentation dans le domaine temporel deviendrait vite trop complexe donc inexploitable, comme le montre la figure suivante :



**Figure.II.7 :** Exemple de décomposition d'un signal en ses deux composantes sinusoïdales élémentaires [40]

Pour cette raison la représentation dans un repère amplitudes/fréquences appelé spectre a été développée. Avec ce type de représentation, chaque composante sinusoïdale élémentaire constituant le signal, est parfaitement définie par son amplitude, sa fréquence et sa phase. Le tracé de la représentation amplitude/fréquence du signal  $x(t)$  comme la montre, permet d'identifier les caractéristiques (Fréquence et amplitude) de chaque composante. C'est l'analyse spectrale



**Figure.II.8 :** Représentation spectrale des composantes élémentaires du signal donné

L'analyse spectrale consiste à calculer la quantité de puissance contenue dans les différentes composantes fréquentielles du signal, autrement dit, la Densité Spectrale de Puissance (DSP) du signal vibratoire. La technique généralement utilisée pour le calcul de cette DSP est le Periodigramme. Cette analyse s'appuie sur la transformée de Fourier comme outil mathématique pour passer du domaine temporel au domaine fréquentiel.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

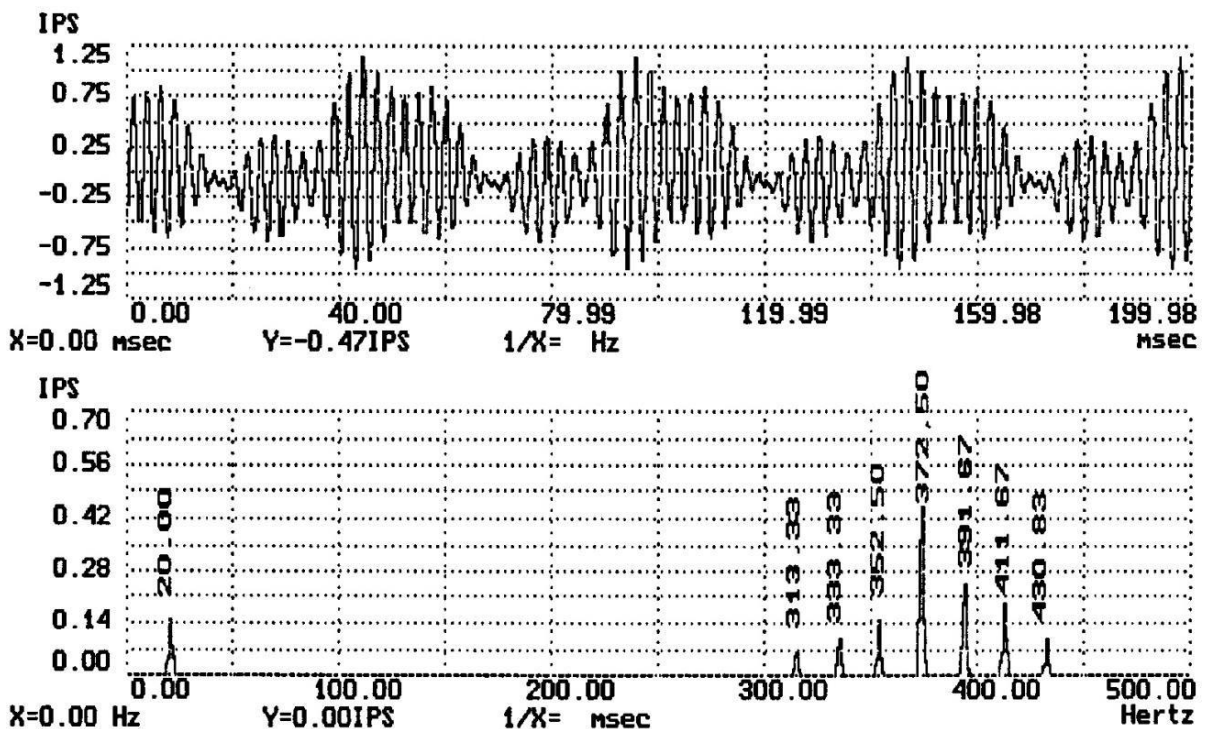
Le spectre obtenue à partir de  $X(f)$ , permet de déterminer non seulement l'importance de l'anomalie et sa nature (balourd, désalignement, défaut de roulement, etc...), mais aussi il permet de suivre son évolution dans le temps.

A noter que c'est grâce à l'algorithme développé en 1965 que Cooley et Tukey que l'analyse spectrale a trouvé toute sa puissance d'utilisation en pratique. Cet algorithme appelé la Transformée de Fourier Rapide (TFR), ou Fast Fourier Transform (FFT) en anglais a permis de réduire considérablement le temps de calcul de la Transformée de Fourier Discrète (TFD) [49].

### II.3.1 Intérêt pratique de l'analyse spectrale

Pour montrer l'intérêt pratique de l'analyse spectrale, considérant les deux exemples illustratifs suivants :

La figure.II.9 montre l'aspect temporel et fréquentiel d'un signal vibratoire réel représentant un défaut de frottement de la surface du rotor sur un autre objet. Nous remarquons que ce phénomène est bien visible et lisible sur le spectre par des raies ou pics d'amplitudes aux fréquences se rapportant à chaque sinusoïde [34].

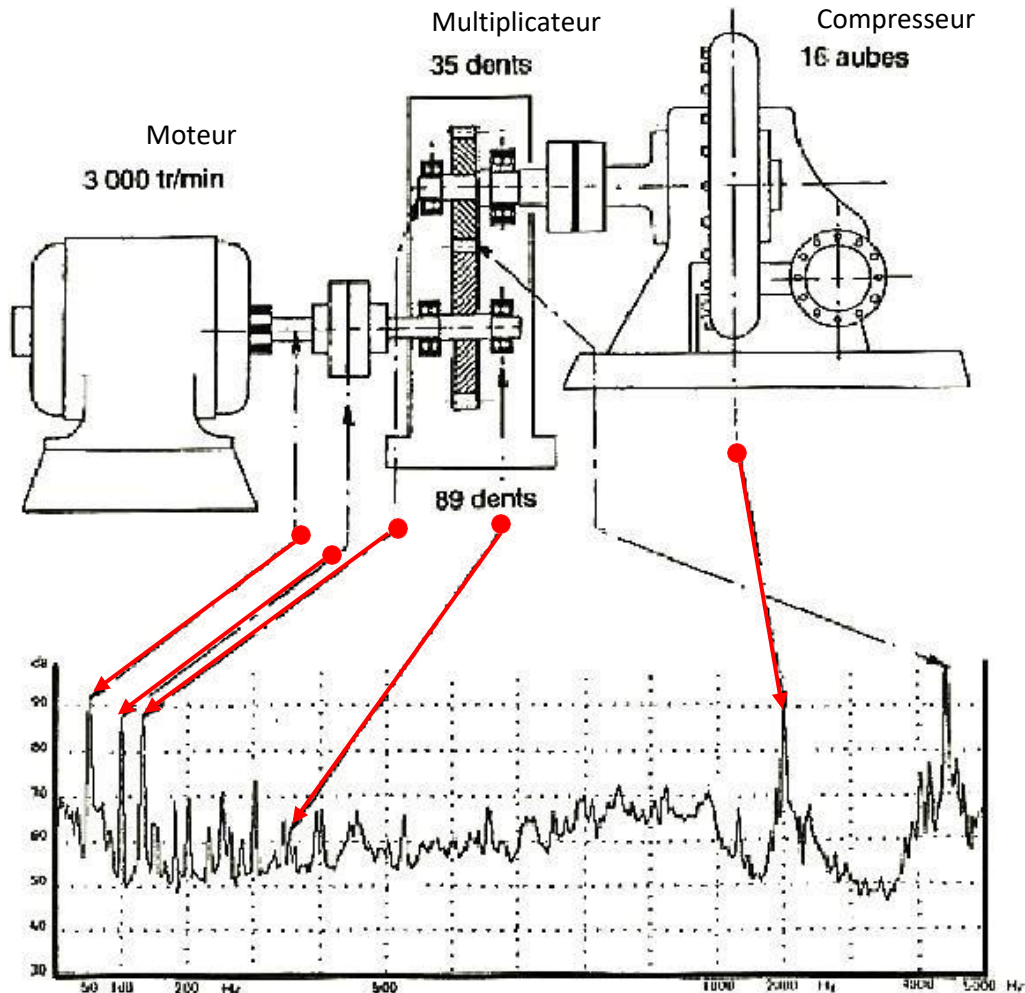


**Figure.II.9 :** Analyse d'un signal vibratoire réel avec défaut de frottement Signal temporel, (b) Spectre fréquentiel

Nous pouvons donc conclure sur la base de l'analyse de ce spectre, que ce frottement génère une fréquence à un multiple spécifique de la fréquence de rotation.

Dans cet exemple, cette fréquence est égale à 372,50 Hz. On note aussi que cette fréquence est accompagnée de bandes latérales. La différence de fréquence entre les raies est égale à la fréquence de rotation de l'arbre du moteur. [34]

La Figure II.10 représente le spectre fréquentiel d'un signal vibratoire issu d'un moto compresseur [40].



**Figure.II.10 :** Spectre de vibration d'un motocompresseur [40]

L'analyse de ce spectre montre :

- ❖ Un harmonique d'amplitude élevée à la fréquence 50 Hz. Cet harmonique correspond à la fréquence de rotation du moteur (3 000 tours par minute). Toute augmentation de l'amplitude de cette composante indiquera vraisemblablement un déséquilibre du rotor.
- ❖ Un harmonique à la fréquence 100 Hz (deux fois la fréquence de rotation). Cet harmonique est représentatif de l'état d'alignement de l'arbre du moteur ou d'un défaut électromagnétique.
- ❖ Un harmonique à la fréquence 4 450 Hz. Cet harmonique correspond à la fréquence

d'engrènement du multiplicateur. L'analyse de cette composante et des bandes latérales qui lui sont associées et l'étude de leurs évolutions permettront de conclure sur l'état de ces engrenages

## II.4 Signatures fréquentielles des principaux défauts affectant le moteur asynchrone

Cette dernière section de ce deuxième chapitre a pour but de donner sous forme de deux tableaux les signatures fréquentielles des principaux défauts affectant les moteurs asynchrones selon la grandeur physique analysée : vibration ou courant de ligne.

Ces deux tableaux vont nous permettre de faire une étude comparative basée sur des signaux réels entre les deux techniques choisies dans le dernier chapitre.

### II.4.1 Signatures fréquentielles des principaux défauts obtenues par la technique vibratoire

L'apparition de défauts dans un moteur asynchrone génère des efforts qui se traduisent par des vibrations se répétant à des fréquences bien particulières, relatives à la fréquence de rotation. Suivre les amplitudes des vibrations à ces fréquences, permet de suivre les conditions de fonctionnement des différents organes de la machine tournante.

Le tableau.II.4 résume les signatures fréquentielles des défauts mécaniques et électriques obtenues par la technique vibratoire

Type d'anomalie	Signature fréquentielle
1 <b>Rupture de barres, Rupture de deportions d'anneaux.</b>	$f_{cb} = f_r \pm 2 \cdot k \cdot s \cdot f_s, k=1,2,3\dots$ $f_{cb} = k \cdot f_r \pm f_p$ $f_p = 2 \cdot p \cdot f_g, f_g = \frac{f_s}{p} - f_r$ <p>Autres fréquences dans le spectre :</p> $f_{cb} = N_{br} \cdot f_r \pm 2f_s$ $RBPF = N_{br} \cdot f_r$
2 <b>Excentricité</b>	$f_{exc} = k(2 \cdot f_s \pm f_p), k=1,2,4\dots$
3 <b>Désalignement</b>	$f_{dsl} = 2 \cdot f_r, \text{ Parfois : } 1 \cdot f_r \text{ et } 3 \cdot f_r$
4 <b>Déséquilibre mécanique(Balourd)</b>	$f_{Bl} = f_r$
5 <b>Fissure de l'arbre du moteur</b>	$f_{jss} = 2 \cdot f_r$ <p>3. <math>f_r</math>, 4. <math>f_r</math> et plus</p> <p>Parfois <math>1/2 \cdot f_r</math> et ses harmoniques</p>

6	<b>Problème de phase</b>	$f_{ph} = 2. f_s \pm \frac{1}{3} f_s$
7	<b>Court - circuit entre spires austator</b>	$f_{cc} = 2. f_s$
8	<b>Défaut de roulements :</b>	
	défaut de bague intérieure	$f_i = -f_r. [1 + \frac{DB}{2} \cos\beta]$ DC
	défaut de bague externe duroulement	$f_e = -f_r. [1 - \frac{DB}{2} \cos\beta]$ DC
	défaut de cage	
	défaut de l'élément roulant (bille)	$f_{cage} = \frac{f_r}{2} [1 - \frac{DB}{2} \cos\beta]$ DC
9	Pour un nombre faible de billes dans les roulements (6 à 12)	$f_{bi} = \frac{1}{2} \frac{DC}{DB} f_r. [1 - (\frac{DB}{2} \cos\beta)^2]$ DC
		$f_e = 0.4. n_b. f_r, f_i = 0.6. n_b. f_r$ $f_{cage} = 0.4. f_r$
	<b>Jeu de la poulie, poulie Excentrique</b>	Harmoniques biaisant la $f_r$ , Vibration maximale à $1. f_r$ ,

**Tableau.II.4 :** Signatures fréquentielles des défauts obtenues par l'analyse vibratoire

#### II.4.2 Signatures fréquentielles des principaux défauts obtenues par la technique des courants de ligne

Comme il vient d'être mentionné précédemment, l'apparition de défauts dans un moteur asynchrone génère des efforts qui se traduisent par des vibrations se répétant à des fréquences bien particulières, relatives à la fréquence de rotation.

Ces vibrations et efforts affectent aussi les courants de lignes alimentant le moteur par une modulation de leurs amplitudes ou par une création de nouveaux harmoniques.

Le tableau.II.5 : résume les signatures fréquentielles des défauts mécaniques et électriques obtenues par la technique des courants de ligne :

Type d'anomalie	Signature fréquentielle
1 Rupture de barres, Rupture de portions d'anneaux.	$f_{cb} = f_s \cdot (1 \pm 2 \cdot k \cdot s)$
2 Excentricité : Statique	$f_{exs} = f_s \cdot [1 \pm k \cdot N_{br} \cdot \frac{1-s}{p}]$
2 Dynamique	$f_{exd} = f_s \cdot [1 \pm 2 \cdot k \cdot (1 - s)]$
2 Globale	$f_{exg} = f_s \cdot [1 \pm k \cdot \frac{(1-s)}{p}]$
3 Désalignement	$f_{ds} = f_s \pm k \cdot f_r$
4 Déséquilibre mécanique (Balourd)	Non déterminé
5 Fissure de l'arbre du moteur	Non déterminé
6 Roulement	$f_{rle} =  f_s \pm k f_v $ Avec $f_v = f_i, f_e$ ou $f_c$ (voir Tableau II.9, ligne 8)
7 Problème de phase	Non déterminé
8 Court - circuit entre spires austator	$f_{cc} = k \cdot f_s \pm n \cdot f_r$ $f_{cc} = [n (1 - s) \pm k] \cdot f_s$ $p$
9 Jeu de la poulie, poulie excentrique	Non déterminé
10 Défaut de fixation	Non déterminé
11 Tourbillons d'huile	Non déterminé
12 Engrenages Denture est correcte Défaut de dents	Non déterminé
13 Faux rond d'un pignon	Non déterminé
14 Courroie	Non déterminé

**Tableau.II.5 :** Signatures fréquentielles des défauts obtenues par l'analyse des courants de Ligne [27, 57]

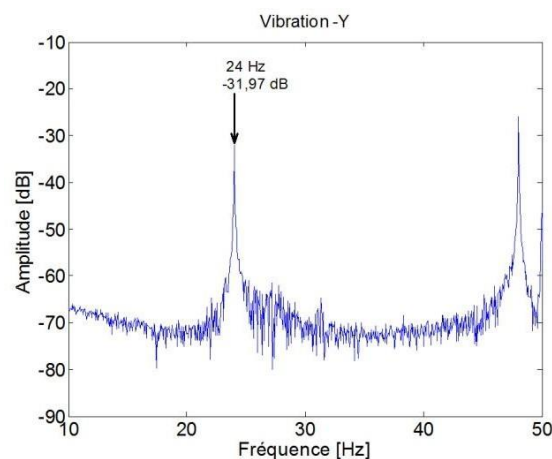
Le tableau.II.6 regroupe les principales signatures fréquentielles obtenues :

Fréquences mesurées [Hz]	Amplitudes [dB]	Fréquences théoriques [Hz]	Causes possibles
25,95	-38,12	26	<i>Excentricité mixte</i>
74	-48,5	74	<i>Excentricité mixte</i>
98,05	-54,65	98	<i>Excentricité mixte</i>
122,8	-62,27	122	<i>Excentricité mixte</i>
242,2	-65,52	242	<i>Excentricité dynamique</i>
46,1	-30,86	46	<i>Cassure de barre</i>
53,9	-33,05	54	<i>Cassure de barre</i>
22,8	-46,36	22	<i>Désalignement</i>

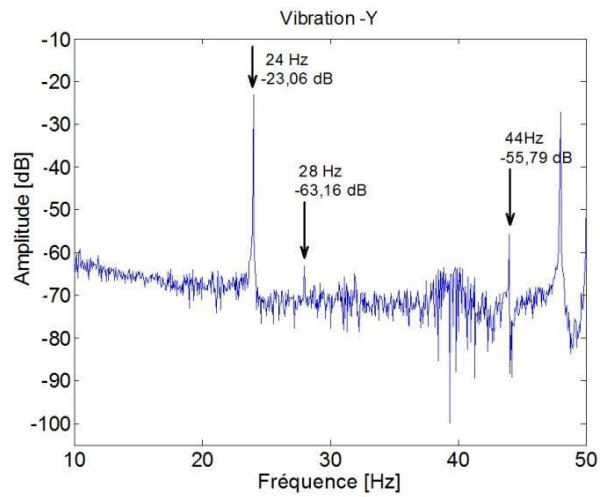
**Tableau.II.6 :** Tableau des mesures du courant, moteur sans défauts

On constate, d'après le tableau, que pour les deux techniques d'analyse, le moteur présente des signes d'avaries prématurés même avant l'application de défauts.

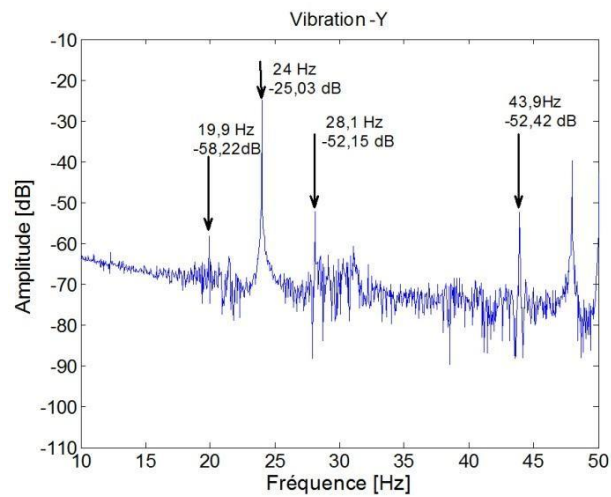
### II.4.3 Analyse par la technique vibratoire



(a) moteur sain



(b) défaut de 2 barres

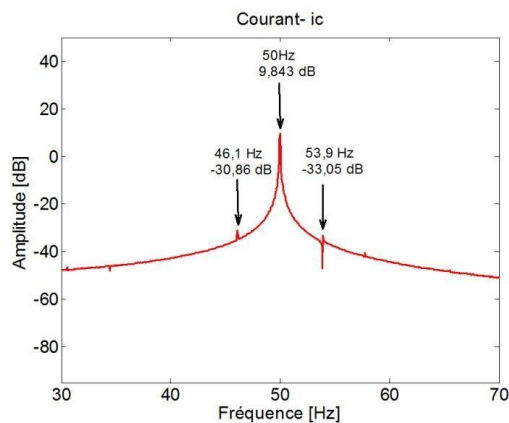


(c) défaut de 4 barres

**Figure.II.18** : Spectre de vibration

L'analyse du spectre du cas sain ne montre aucune signature de défaut autour de 24 Hz ( $f_r$ ). Par, contre en présence d'un défaut de 02 barres, une harmonique apparaît à 28,1 Hz (sa symétrie par rapport à  $f_r$ , soit 20 Hz est difficile à localiser) et à 43,9 Hz [57].

#### II.4.4 Analyse par la technique du courant



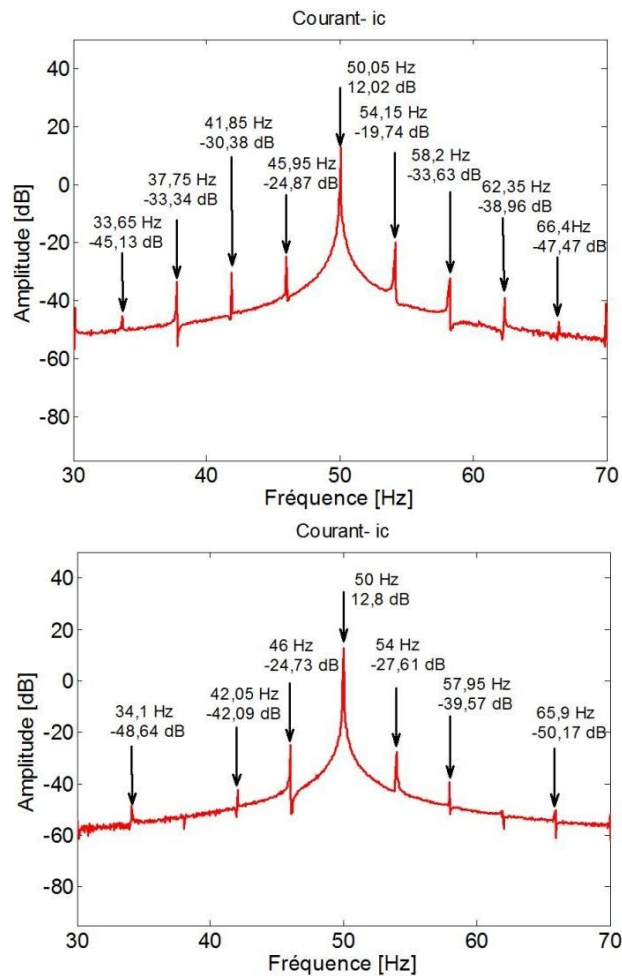
(a) *moteur sain*

Figure.II.19 : Spectre du courant [35-70Hz]

## II.5 Analyse électrique des moteurs –PDMA Corporation [61]

### II.5.1 Introduction à l'analyse électriques

Le personnel de maintenance électrique a été depuis des années limité à faire uniquement du dépannage, avec pour seule aide un voltmètre et un ohmmètre. Ces équipements ne fournissent pas suffisamment d'informations pour permettre aux électriciens d'être absolument certains de l'existence ou non d'un problème électrique.

Alors que les analyses vibratoires se sont fortement développées ces dernières années, les analyses électriques restent ponctuelles, ce qui est étonnant quand on sait que plus de 50% des pannes de moteurs électriques sont liées à une défaillance électrique et non mécanique ! [61]

### II.5.2 Présentation du système PDMA

L'objectif du système de mesure PDMA est d'améliorer la fiabilité des moteurs électriques grâce à des tests statiques (moteur à l'arrêt) et dynamiques (Moteur en fonctionnement). [61]

La combinaison de tests statique et dynamiques permet à une entreprise de pratiquer ces contrôles quel que soit le type de fonctionnement des équipements.

L'évaluation dynamique va permettre de collecter des données sans arrêt de machines [61]

L'évaluation statique sera quant à elle privilégiée pour diagnostiquer des moteurs lorsqu'ils sont à l'arrêt.

Enfin, la corrélation des données obtenues grâce aux deux types d'évaluations statiques et dynamiques permet de valider le diagnostic électrique avant une prise de décision rapide et précise sur les actions préventives ou correctives à mettre en place. [61]

L'analyseur électrique PDMA MCE MAXTM existe dans 3 configurations:

- MCETM

(Motor Circuit Evaluation)

Analyse statique des moteurs électriques

- EMAXTM

Analyse dynamique des moteurs électriques (en fonctionnement)

- MCE MAXTM

Analyse statique et dynamique des moteurs électriques il existe six zones d'intérêt appelées zones de défauts, devant être obligatoirement analysées lors d'un contrôle ou un dépannage. Faillir à l'étude d'une seule de ces zones pourrait empêcher de détecter correctement un défaut et par conséquent perdre tous les avantages liés à une politique de maintenance prédictive.

### II.5.3 Les six zones de défaut :

1-La qualité de l'alimentation.

2-Le circuit d'alimentation.

3-L'isolation.

4-Le stator.

5-Le rotor.

6-L'excentricité.



Figure.II.20 : analyseur électrique.

Zones de défaut	MCE-TM Tests à l'arrêt	Emax-TM Test Tests en fonctionnement
Qualité d'alimentation	N/A	Power tests -Tension entre phase -Facteur harmonique -Taux de distorsion
Isolation	<b>AC standard</b> -résistance d'isolement(ohm) -Capacitance par rapport à la masse(pf) <b>Index de Polarisation</b> -pl ratio > 2.0 <b>Tests de tension pas à pas</b>	N/A
Circuit d'alimentation	<b>AC Standard</b> -Résistance entre phases(ohm) -Equilibre des résistances	<b>Power tests</b> -Déséquilibre en tension - Déséquilibre en intensité
Stator	<b>AC Standard</b> -Equilibre des inductances <b>Rotor Influence Check (RIC)</b>	<b>Power tests</b> -Equilibre des impédances -Facteur de puissance des phases <b>In-Rush/Start-up</b>
Rotor	<b>AC Standard</b> -Equilibre des inductances -Inductance moyenne <b>Rotor Influence Check (RIC)</b>	<b>Rotor Evaluation</b> -Amplitude des bandes latérales de la fréquence d'alimentation -Swirl Effect à la 5 <sup>ème</sup> harmonique <b>Démodulation</b> <b>In-Rush/Start-up</b>
Excentricité	<b>AC Standard</b> -Equilibre des inductances <b>Rotor Influence Check (RIC)</b>	<b>Excentricité</b> -Amplitude de la 1 <sup>ère</sup> et de la 3 <sup>ème</sup> bande latérale de la fréquence d'alimentation ,à la fréquence d'excentricité

Tableau.II.7 : Les 6 zones de défaut

### II.5.3.1 La qualité de l'alimentation

La qualité de l'alimentation correspond à la qualité des courants et tensions dans le circuit d'alimentation du moteur.

Une mauvaise qualité de l'alimentation (distorsion harmonique de tension et de courant, pics de tension, déséquilibre entre phases, mauvais facteur de puissance, ...) peut affecter gravement le fonctionnement du moteur et entraîner un échauffement anormal.

Pendant la rotation du moteur, différentes contraintes s'affectent les composants du moteur.

Des variations ou des distorsions dans la tension d'alimentation d'un moteur génèrent une augmentation des contraintes et de la température dans les enroulements du stator et sur tous les composants du moteur. [59 ,54]

MCEMAX<sup>TM</sup> et MCE Gold <sup>TM</sup> fournissent différentes façons d'analyser et d'évaluer la qualité de l'alimentation. Non seulement MCEGold<sup>TM</sup> vous permet d'avoir la qualité d'alimentation instantanément mais il peut aussi évaluer les tensions et courants harmoniques jusqu' à la 50ème harmonique.

### II.5.3.2 Le circuit d'alimentation

Le circuit d'alimentation fait référence à tous les conducteurs et connexions qui existent entre le point de mesure et le moteur.

Il inclut les fusibles, les sectionneurs, les contacteurs, les relais thermiques et les connexions. [60]

Des études ont montré que les conducteurs et les connexions sont la source de 48% des problèmes entraînant une réduction d'efficacité du moteur.

MCEMAX<sup>TM</sup> offre l'unique avantage de tester le circuit d'alimentation et tous ses composants associés.

Il peut arriver qu'un moteur en bonne santé soit raccordé sur un circuit défectueux. Cela génère un déséquilibre de courant et de tension et une chute de puissance, et aura pour conséquence une augmentation de température ,qui est généralement la cause de défauts d'isolation.

Il est donc important d'évaluer la résistance et l'inductance d'un circuit d'alimentation lors de son installation sur site. Un important déséquilibre d'impédance, d'inductance, de courant ou de tension indique généralement un problème du circuit d'alimentation ou un défaut de connexion.

L'identification précoce de ces problèmes de déséquilibre permet d'éviter toute situation catastrophique. Tendances de l'impédance entre phases.

En cas d'alarme, MCEGoldTM vous informe du problème.

Le courant des 3 phases est affiché.

Vous êtes immédiatement alerté d'un déséquilibre de courant.

Chacune des harmoniques devrait être inférieure à 3% du fondamental d'après IEEE 519-1992.

[59]

Les 5<sup>èmes</sup> et 7<sup>èmes</sup> harmoniques élevées indiquent l'effet du variateur sur le système de distribution.

### II.5.3.3 L'isolation

Le défaut d'isolation fait référence à l'isolant entre les enroulements (phases) et la terre (mise à la masse du moteur).

Pour qu'un moteur électrique fonctionne correctement et en toute sécurité, il est important que la circulation des courants se fasse aux endroits prévus à cet effet (dans les conducteurs) et non entre conducteurs. Un défaut d'isolation peut conduire à une situation dangereuse pour le personnel qui serait exposé au court-circuit franc.

**La technologie MCETM**, nous permet d'identifier un problème d'isolation en identifiant les tendances en alarmes pour les résistances à la terre défavorables. Après avoir enregistré la mesure de référence, toutes les mesures ultérieures seront comparées à cette mesure initiale, afin d'observer les changements significatifs dans les tendances.

Une couleur verte apparaîtra si les mesures sont bonnes.

Une couleur jaune apparaîtra s'il faut surveiller le défaut et

Une couleur rouge si les données sont en alarmes.

### II.5.3.4 Le stator

Le défaut de stator est souvent considéré comme le défaut le plus controversé dû au challenge que représente la détection précoce des ruptures d'isolation des enroulements du stator.

Les enroulements du stator représentent «le cœur» d'un moteur.

Ils induisent le champ magnétique tournant, le courant induit, le couple et la rotation du rotor.

Ce challenge est plus sévère pour les moteurs à haute tension pour lesquels le temps de réaction doit être plus rapide face à un défaut de ce type.

Le défaut de stator est identifié comme étant l'état et la qualité de l'isolant des enroulements d'une phase, entre phases, entre phase et terre, dans les encoches du stator et au droit des connexions du bornier du moteur.

Un court-circuit d'une phase ou entre phases peut être catastrophique pour un moteur et n'est pas toujours détectable par un mégohmmètre. Un déséquilibre excessif d'inductance ou d'impédance, une vibration excessive, des décharges capacitives ou une piètre isolation peuvent conduire à une destruction du bobinage par échauffement. EMAXTM est utilisé pour mesurer et évaluer la relation de phase entre les courants et tensions pour les 3 phases d'un moteur.

#### **II.5.3.5 Le rotor**

La bonne santé d'un rotor fait référence à l'état de ses barres rotoriques, à la bonne isolation du paquet de tôles et à un des anneaux de court-circuit (moteur à cage) qui doivent être parfaitement fixés aux barres. Une étude réalisée par EPRI et GE a montré que 10% des problèmes rencontrés sur les moteurs proviennent du rotor.

L'analyse du circuit moteur avec MCETM est basée sur la mesure d'inductance prise sur chaque phase des enroulements du stator et les comparent à différentes positions angulaires du rotor afin de définir l'état du rotor.

L'emploi des mesures d'inductance, des analyses de courant et d'autres technologies de test des rotors permet à l'utilisateur de voir des changements précoces dans la signature magnétique du rotor.

#### **II.5.3.6 L'excentricité**

L'entrefer est l'espace entre le rotor et le stator.

Cette espace doit-être équidistant sur toute la circonférence du moteur.

S'il y a une variation de cette distance, il y a alors un défaut d'excentricité.

Cette excentricité génère une variation du flux magnétique dans l'entrefer qui à son tour induit des variations de courant visibles dans le spectre de courant.

L'analyse de l'excentricité utilisant le RIC (Rotor Influence Check) de MCETM, est plus souvent utilisé pour des expertises approfondies lors d'un défaut d'excentricité présumé.

Cela suppose l'existence de données et de suivis préalables (tendance EMAXTM).

Dans EMAXTM, le suivi et l'analyse du défaut d'excentricité se situe dans le spectre haute fréquence du courant.

Si le nombre de barres rotoriques et la vitesse sont connues, le logiciel MCEGold pointe automatiquement les 4 raies du spectre typologique d'un défaut d'excentricité.

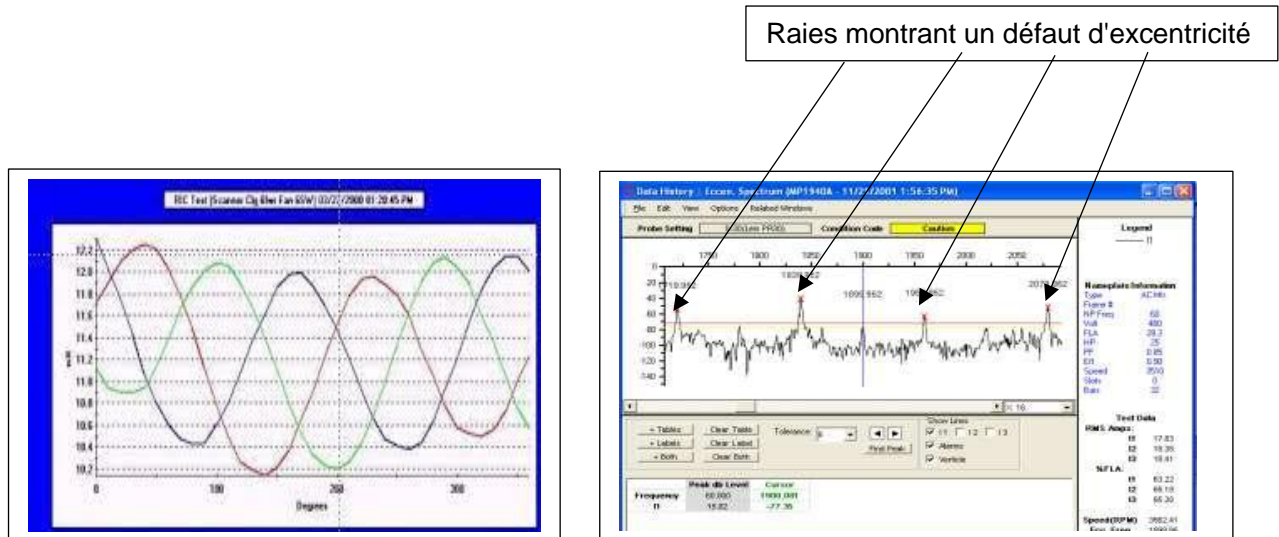


Figure.II.21 : Spectre des courants de la machine asynchrone généré par le PDMA (Défauts d'excentricité)

**Conclusion :**

Dans ce deuxième chapitre, nous avons montré l'intérêt qui se rapporte à l'usage de la technique vibratoire dans le diagnostic des moteurs asynchrones. En effet, l'analyse de cette grandeur physique qu'est la vibration, permet de déceler l'image des forces témoignant des avaries qui peuvent exister dans ces moteurs.

A la fin de ce chapitre, nous avons étudié certaines méthodes d'analyse permettant d'exploiter ces mesures une fois faites. Le niveau global et l'analyse spectrale ont été abordés à cet effet. Nous avons montré que l'analyse spectrale peut détecter les différents défauts dans un moteur à travers les signatures fréquentielles spécifiques de ces anomalies.

Enfin, nous avons terminé notre chapitre par deux tableaux regroupant Les différentes signatures des différents défauts selon la grandeur analysée : la vibration ou le courant. Ces deux tableaux vont être très précieux lors du dernier chapitre, celui de la validation expérimentale

# CHAPITRE III

Diagnostic des défauts de la machine  
asynchrone à bague HTA

### **III.1 Introduction :**

Dans ce chapitre on va baser sur des défauts bien précis qui affectent la machine asynchrone à bague HTA, pour cela on fera un diagnostic de ces défaillances par : analyse des signaux des courants et des tensions de ligne du moteur à bague HTA. Les résultats obtenus sont décrits en dessous.

### **III.2 Investigation Expérimentale :**

Dans cette section nous allons cibler les défauts qui sont les plus courants dans les entraînements électromécaniques à base de machines électriques tournantes à savoir les défauts de court-circuit entre spires, mesalignement, excentricité et défauts de roulements. Ces derniers sont la cause de la majorité des pannes au niveau des installations industrielles. En outre, notre choix pour l'expérimentation de la machine s'est porté sur la machine asynchrone à bague qui est la plus utilisée pour le niveau de tension HTA pour 'entraînement des machines de traction à savoir : les broyeurs, les concasseurs... à travers le monde et elle le sera encore beaucoup plus dans le futur avec l'association des convertisseurs électroniques. Les problèmes électriques tels que les courts circuits entre spires au niveau du bobinage statorique et les ruptures de barres au niveau de la cage rotorique sont relativement réduits. Ils sont maîtrisés d'une part grâce à l'amélioration des techniques de fabrication des machines et d'autre part aux protections électriques très puissantes au niveau des réseaux d'alimentation des moteurs (coffret ou cellules électriques pour départs moteurs). Ce sont les défaillances mécaniques qui sont très fréquents dans les entraînements électromécaniques à base de moteur à induction [22].

Aujourd'hui les dégradations des roulements occupent le premier rang parmi les causes des pannes des moteurs. Bien que la fabrication des roulements a été très développés ces dernières décennies, mais les problèmes d'usure à leur niveau persistent (usure des bagues et même des billes). En dehors de l'étanchéité, les causes les plus probables de leur dégradation ce sont les problèmes de balourd et de désalignement. Pour cela, la détection et le diagnostic des défauts est très important.

### **III.3 Méthode par traitement de signal (Analyse des courants) :**

Pour des raisons de simplicité et d'efficacité, l'approche signal est très utilisée actuellement en diagnostic. Cette approche repose sur la connaissance du comportement du système sain, elle est ensuite comparée avec les signaux mesurés pendant le fonctionnement du système. Les méthodes courantes d'analyse des signaux de diagnostic en régime transitoire et en régime permanent sont l'analyse spectrale, le spectrogramme, l'analyse temporelle et la distribution de Wigner-Ville [24].

Les approches basées sur l'analyse de la signature spectrale sont les plus couramment rencontrées pour détecter la présence d'une anomalie. Le principal défaut de l'analyse spectrale est qu'elle est très sensible à la qualité de la mesure, ainsi qu'à la fréquence d'échantillonnage et au nombre d'échantillons.

L'approche du signal courant ou **MCSA** (Moters Curent Signature Analysis), est très utilisée actuellement en diagnostic. Cette technique comme pour comportement du système sain, auxquels seront comparés les signaux mesurés pendant les situations en défaillance [24].

Les méthodes courantes d'analyse des signaux de diagnostic en régime transitoire et en régime permanent sont l'analyse spectrale, les spectrogrammes de la STFT, l'analyse temporelle, la distribution de Wigner-Ville, etc. ...

Il s'avère que le diagnostic par l'analyse du signal capté expérimentalement et puis l'application des approches ou techniques ou méthodes de traitement du signal classique (FFT) ou avancées (MCSA, Park, Hilbert, STFT« Short Time Fourier Transform », ondelettes, etc...) sont très efficaces pour une validation expérimentale [25].


**En fait, une analyse spectrale a été effectuée sur un moteur triphasé en présence de défauts de court-circuit entre spires, présentée en Annexe A.**

### III.4 Analyse des courants (PDMA) :

Ce rapport présente les résultats de contrôle par analyse électrique sur la machine à diagnostic (moteurs à rotor bobiné du site LAFARGE HOLCIM)

L'objet de cette intervention consiste à vérifier le bon fonctionnement de ces moteurs à bagues. On a présenté les résultats des mesures réalisées avec le testeur MCE Max, lors de cette seconde campagne de mesures [37].

#### III.4.1 MATERIEL UTILISE

<p><b>Analyseur électrique PdMA MCE MAX™</b></p> 	<p><b>Analyseur électrique</b></p> <p>Marque : PdMA Appareil : M-Series 5kV Type : MCE MAX™</p> <p>Numéro de série de l'appareil : 05653</p>
--	--

**Figure.III.1 : Analyseur électrique PDMA adaptable à n'importe quelle machine**

### III.4.2 DEMARCHE METHODOLOGIQUE

Ces analyses sont réalisées en statique (moteur à l'arrêt) et en dynamique (moteur en fonctionnement), l'objectif étant de permettre la réalisation de ces contrôles quel que soit le type de fonctionnement des équipements, et de corréler les données obtenues grâce aux deux types d'évaluations statiques et dynamiques afin de valider le diagnostic électrique.

#### A. La machine à diagnostiquer :

C'est un moteur asynchrone à bagues de 11kV entraînant un broyeur horizontale dont les caractéristiques sont montrées en figure.III.2

Type moteur	AML 710 L 06 ABAC
Marque	ABB
N° de série	356749
Puissance utile	4 000 KW
Tension	11 000 V
Intensité nominale	252,7 A
Vitesse de rotation	994 RPM
Facteur de puissance	0,86
Tension Rotor	1 460 V
Intensité Rotor	1 615 A




Figure.III.2 : Moteur à bague HTA

#### B. Surveillance, Relais numérique de protection :

Le relais numérique de protection REF 542 type ABB est utilisé pour la commande et la surveillance du moteur voir figureIII.. Il peut assurer plusieurs protections à savoir : les courts-circuits, les sursensions, les surcharges, la terre, déséquilibre, blocage rotor...etc. Ce relais est placé dans la cellule d'alimentation dit cellule de départ moteur.



Figure.III.3 : Relais numérique de Protection REF542 ABB

### C. Cellule de départ moteur :

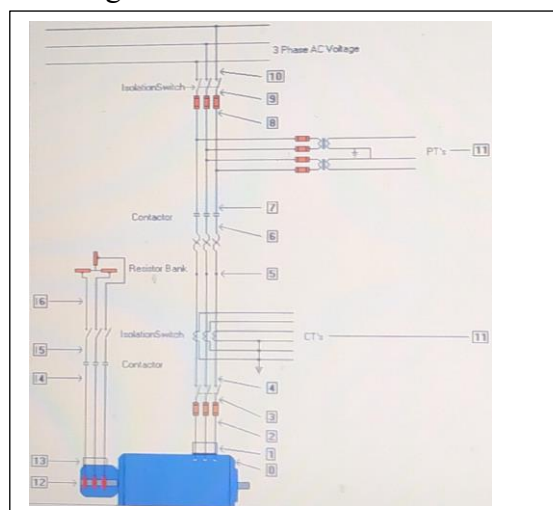
Elle est constituée de deux parties : un compartiment HT qui contient le disjoncteur principal du moteur et le sectionneur de mise à la terre, ainsi que les primaires des TC, TP et le Tore ; un compartiment BT qui contient le relais numérique et les secondaires des TC, TP et le Tore voir figureIII.3.



**Figure.III.3** : Cellule départ moteur avec emplacement des capteurs des courants « 3 » et des tensions « 3 »

### D. Emplacement des capteurs pour le diagnostic

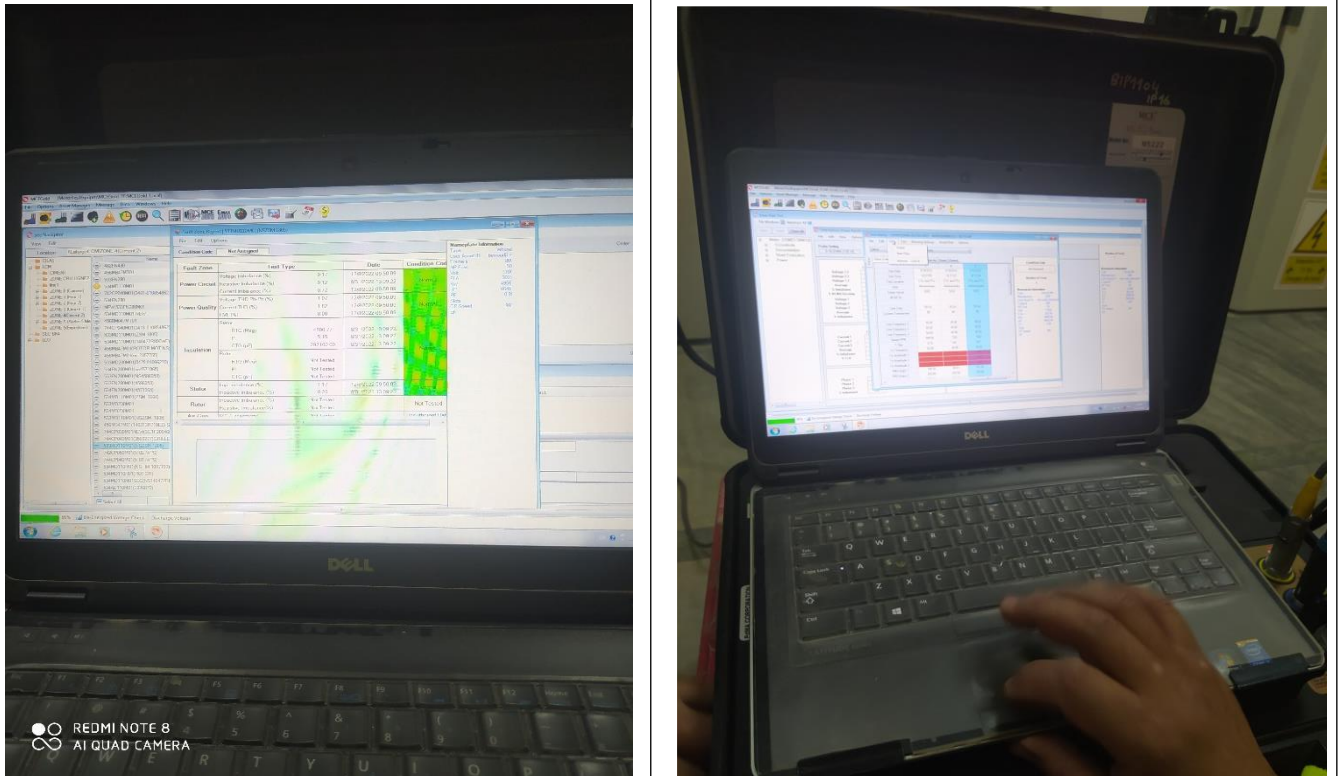
Sur l'analyseur PDMA on doit montrer l'emplacement des trois capteurs de courant et les trois capteurs de tension. Dans notre cas d'étude l'emplacement des capteurs c'est au niveau des TP et des TC (emplacement 11) montrés sur le schéma synoptique fourni par l'analyseur PDMA voir figureIII.4.



**Figure.III.4** : Schéma synoptique de PDMA pour l'emplacement des capteurs

## E. Introduction des données et les caractéristiques de la machine

Dans cette phase on introduit les données nécessaires comme la plaque signalétique et les caractéristiques de la machine à diagnostiquer, voir figure.III.5.



**Figure.III.5 :** Introduction des données de la machine sur PDMA

## F. Résultats d'analyse des courants par PDMA

Après l'introduction des paramètres et l'acquisition et le traitement des signaux le PDMA nous fournit les résultats de diagnostic sous plusieurs formes à savoir : numériques, graphiques et spectraux voir figure.III.6. Le résultat obtenu montre que la machine ne présente aucune excentricité du rotor, même pour les défauts de désalignement. Un rapport détaillé du diagnostic fournit par l'analyseur PDMA est présenté en annexe B.



**Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons identifié la signature de chaque défaut. Parallèlement nous avons essayé d'identifier l'image de la signature du courant d'une phase de courant électrique d'alimentation pour le même défaut.

L'analyse de la signature du courant est une technologie la plus développée dans le domaine de détections des défaillances, elle permet de détecter la nature du défaut et le traiter suivant un bon diagnostic en passant par des étapes successives qui sont : La vibration générée par la machine, les capteurs et la mesure du signal, le traitement du signal, la détection des dégradations et le diagnostic des défauts.

Une bonne maintenance nous évite de tels défauts par conséquent nous aurons un bon rendement.

## CONCLUSION GENERALE

Ce travail fait partie des systèmes de surveillance et du diagnostic des machines d'entraînement électrique dans le domaine de la haute tension HTA. Le moteur considéré est un moteur asynchrone à rotor bobiné de 11kV et 4000 kW entraînant un broyeur du ciment. Ce travail est considéré dans la position du problème, pour but de surveiller la machine pendant son fonctionnement continu dans le système et aussi d'élaborer un système de détection et localisation de certains défauts qui peuvent passer fréquemment dans cette partie afin de réaliser les exigences de la continuité de fonctionnement des systèmes d'entraînement électrique. Ce travail est constitué de 3 chapitres :

- Etat de l'art des moteurs HTA leurs diagnostics.
- Système d'acquisition et de traitement pour élaboration des signatures.
- Application d'un diagnostic automatique par un analyseur des courants PDMA.

Dans la première partie, nous avons commencé par la définition de diagnostic puis présenter certaines notions de base concernant la constitution de la machine asynchrone et les différents types de défauts électriques et mécaniques. A la fin nous avons présenté les différentes étapes actuellement utilisées dans l'industrie et les critères d'évaluations d'un système de diagnostic. Enfin, les méthodes de diagnostic les plus fréquemment utilisées pour la détection des défauts.

Dans le deuxième chapitre, on a fait un rappel sur certaines notions de base sur le signal vibratoire, nécessaires pour la compréhension et la maîtrise de cette technique. Ensuite, la technique des courants et de tensions de ligne pour la détection des défauts électriques et mécaniques.

L'analyse des courants de ligne est retenue comme méthode d'investigation performante des défauts affectant un moteur.

A la fin, dans le troisième chapitre, nous avons élaboré et appliqué un diagnostic automatique pour la surveillance de la machine asynchrone au moment de fonctionnement à l'aide analyseur PDMA de courant. Ce système de diagnostic est bi-décisionnel concernant l'état de la machine ainsi il aide à localiser la phase dont l'enroulement est en état défaillant. Le concept de ce système est adaptable à n'importe quelle machine électrique en effectuant le test statique ou dynamique.

La technologie que possède le PDMA à base de l'analyse de la signature du courant est la plus développée dans le domaine de détections des défaillances. Elle permet de détecter la nature du défaut et le traiter suivant un bon diagnostic en passant par des étapes successives qui sont : La vibration générée par la machine, les capteurs et la mesure du signal, le traitement du signal, la détection des dégradations et le diagnostic des défauts.

Une bonne maintenance nous évite de tels défauts par conséquent nous aurons un bon rendement.



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Khodja, D. E. (2007). *Élaboration d'un système intelligent de surveillance et de diagnostic automatique en temps réel des défaillances des moteurs à induction* (Doctoral dissertation, Boumerdes, Université M'hamed Bougara. Faculté des hydrocarbures et de la chimie).
- [2] KHODJA Djalal-Eddine, "Entraînements Electriques des Convertisseurs Electromécanique", synthèse du cours pour master I Ingénierie des systems électromécaniques, 2019.
- [3] Choudira, I., Khodja, D., & Chakroune, S. (2019). Induction Machine Faults Detection and Localization by Neural Networks Methods. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 33(6), 427-434.
- [4] D.E.Khodja, S. Simard, R. Beguenan : «Implementation of Optimized Approximate Sigmoid Function on FPGA Circuit to use in ANN for Control and Monitoring », *Control Engineering and Applied Informatics Journal*, Vol.17, No.2, pp.64-72,2015.
- [5] A.E.Aib, "Implémentation des techniques d'intelligence artificielles FPGA en vue de contrôle des systèmes d'entraînements électriques", thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf d'M'sila, 2022.
- [6] Abdelghani Aib, Djalal Eddine Khodja, Salim Chakroune, "Field programmable gate array hardware in the loop validation of fuzzy direct torque control for induction machine drive", *Journal of Electrical Engineering & Electromechanics*, 28-35, 2023.
- [7] Dash, R. N., Sahu, S., Panigrahi, C. K., & Subudhi, B. (2016, October). Condition monitoring of induction motors: —A review. In *2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPES)* (pp. 2006-2011). IEEE.
- [8] Abdelghani Aib, Djalal Eddine Khodja, Salim Chakroune., "FPGA Hardware in the Loop Validation of Torque and Flux Estimators for Direct Torque Control (DTC) of an Induction Motor (IM)", *Advances in Modelling and Analysis B* 64 (1-4), 9-16, 2021.
- [9] Edomwandekhoe, K. I. (2018). *Modeling and fault diagnosis of broken rotor bar faults in induction motors* (Doctoral dissertation, Memorial University of Newfoundland).
- [10] Abdelghani Aib, Djalal Eddine Khodja, Salim Chakroune., "On-Line FPGA Hardware in the Loop Validation of Based Fuzzy-STPWM Induction Motor Control", *Advances in Modelling and Analysis B* 64 (1-4), 17-26, 2021.
- [11] Choudira, I., Khodja, D., & Chakroune, S, "Fuzzy Logic Based Broken Bar Fault Diagnosis and Behavior Study of Induction Machine", *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 53 (2), 233-242, 2020.
- [12] Saidji Rebiha, Abdellouad Samia, « L'Impact des Défaits de l'Onduleur Triphasé sur le Diagnostic du Moteur Asynchrone », mémoire de master, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie, Juin 2017.
- [13] Andrian Ceban, « Méthode Globale de Diagnostic des Machines Electriques », thèse de doctorat, Université d'Artois, France, Février 2012.

- [14] O. V. Thorsen and M. Dalva, « A survey of Faults on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals, And Oil Refineries » Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 31, pp. 1186-1196, 1995.
- [15] W. T. Thomson, « A Review of On-Line Condition Monitoring Techniques For Three-Phase Squirrel Cage Induction Motors–Past, Present and Future », in 2nd IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives - SDEMPED '99, pp. 3-17, Gijon, Spain, 1999.
- [16] A. H. Bonnett and C. Yung, « Increased Efficiency Versus Increased Reliability» Industry Applications Magazine, IEEE, vol. 14, pp. 29-36, 2008.
- [17] Didier G, « Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence de Défaillance », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, 2004.
- [18] Isri Imen, Seddik Asmaa Khadidja, « Diagnostic des Défaits de Roulements d'un Moteur Asynchrone par la Technique Vibratoire et la Technique du Courant Statorique », mémoire de master, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Juin 2017.
- [19] Belhamdi Saad, « Diagnostic des Défaits de la Machine Asynchrone Contrôlé par Différentes Techniques de Commande », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, Mai 2014.
- [20] J. Morel, « Surveillance Vibratoire et Maintenance Prédictive », Technique de l'ingénieur, R6100.
- [21] Djaballah Saïd, « Etude et Optimisation de la Transformée en Ondelettes pour la Détection des Défaits dans les Roulements », thèse de magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia, Souk-Ahras, Algérie.
- [22] Touafek Ishak, « Extraction d'Indicateurs Robustes pour le Diagnostic des Défaits Mécaniques : Comparaison de L'EMD et des Ondelettes (WT) », thèse de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie.
- [23] D. AUGÉIX, « Analyse vibratoire des machines tournantes », Technique de l'Ingénieur, BM 5 145.
- [24] O. Ondel, « Diagnostic par Reconnaissance des Formes : Application à un Ensemble Convertisseur-Machine Asynchrone », thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, Octobre 2006.
- [25] M. Benbouzid, « A review of Induction Motors Signature Analysis As A Medium For Faults Detections », IEEE, Pp.1950-1955,1998, University Of Picardie Jules Verne, France.

- [26] Harir Miloud, « Etude des Défauts dans la Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée », thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie, 2009.
- [27] Roland Casimir, « Diagnostic des défauts des machines asynchrones par Reconnaissance des Formes », thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, Décembre 2003.
- [28] M.K. Oumaamar, « Surveillance et Diagnostic des Défauts Rotoriques et Mécaniques de la Machine Asynchrone avec Alimentation Equilibrée ou Déséquilibrée », thèse de doctorat, Université de Lorraine, France, Mars 2012.
- [29] Robert A. Shannon, « Vibration Measurement Systems And Guidelines For Centrifugal Fans- A Field Perspective », AMCA, International Engineering Conference, Las Vegas, Nevada, USA, 2- 4 March 2008.
- [30] Ali Ibrahim, « Contribution au Diagnostic de machine Electromécaniques: Exploitation des Signaux Electriques et de la Vitesse Instantanée », thèse de doctorat, Université de St-Etienne, France, Mars 2009.
- [31] R.A. Collacott, « Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring », Livre, Edition Chapman and Hall, London, 1977.
- [32] Arthur R. Crawford, « The Simplified Handbook of Vibration Analysis », Livre Vol.1: Introduction To Vibration Analysis Fundamentals, 1992.
- [33] A. Thakur, S. Wadhvani, A. K. Wadhvani, « Motor Current Signature Analysis as a Tool for Induction Machine Fault Diagnosis », Article, International Journal of Computer Science and Information Technology Research, 2015.
- [34] James I. Taylor, « The Vibration Analysis Handbook », Livre, Edition Vibration Consultants, 1<sup>ere</sup> édition, 2003.
- [35] Jean-Claude Trigeassou, « Electrical Machines Diagnosis », Livre, Edition ISTE & WILEY, 2011.
- [36] P. Guirdhar & C. Scheffer, « Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance », Edition Elsevier, 2004.
- [37] P. Antonio, « Methodology For Fault Detection in Induction Motors Via Sound and Vibration Signals », Article, Science Direct, Elsevier, 2017.
- [38] H. Bloch, Fred K. Geitner, « Machinery Failure Analysis and Troubleshooting », Livre, Volume 2, 3<sup>ème</sup> edition, Houston, USA, 1999.
- [39] M. Luft, « Comprendre la vibration de moteur par l'analyse FFT », Prüftechnik AG, Mars 1998.

- [40] Alain Boulenger & Christian Pachaud, « Surveillance des Machines par Analyse des Vibrations », Livre, Edition L'UsineNouvelle Dunod, édition 3, 2009.
- [41] Djaballah Saïd, « Etude et Optimisation de la Transformée en Ondelettes pour la Détection des Défauts dans les Roulements », Thèse de Magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia, Souk-Ahras, Algérie,
- [42] J. Morel, « Vibration des machines et diagnostic de leur état mécanique », Livre, 1992.
- [43] M. Thomas & F. Laville, « Simulation des Vibrations mécaniques par Matlab, Simulink et Ansys », Livre, Québec, 2007.
- [44] Omar DJEBILI, « 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, France, Septembre 2013.
- [45] J. Dumas & B. Bennevault, « Débuter la mesure vibratoire », MVI Technologie Group, Février 2001.
- [46] Boukhobza Mohamed EL Habib, « Application du traitement du signal pour le suivi des défauts de composants mécaniques soumis à des vibrations », thèse de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie, 2010.
- [47] Landolsi Foued, « surveillance des machines par analyse vibratoire », support de cours, [www.coursehero.com](http://www.coursehero.com)
- [48] Claire Breneur, « Eléments de Maintenance Préventive de Machines Tournantes dans le Cas de Défauts Combines d'Engrenages et de Roulements », thèse de doctorat, Ecole Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur de Lyon, France, 2012.
- [49] Yacine Imaouchen, « Mesure et Analyse des Vibrations des Machines Electriques Tournantes », thèse de doctorat, Universite Abderrahmane Mira, Bejaia, Algérie, 2015.
- [50] Kawthar Alameh, « Contribution au Diagnostic et à l'Analyse de Défauts d'une Machine Synchrones à Aimants Permanents », thèse de doctorat, Université de Rouen Normandie, France, Décembre 2017.
- [51] I. Atoui, « Contribution au Diagnostic de Défaut dans une Chaîne de Production d'Energie, thèse de magister », Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2009.
- [52] Vibra-Conseil, [www.vibraconseil.fr](http://www.vibraconseil.fr)
- [53] Mahgoun Hafida, « Analyse Non Stationnaire Des Signaux Vibratoires Dans La Surveillance Des Machines Et La Prévention Des Défaillances », thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Setif 1, Algérie, 2013.

- [54] NSK, Roulements à billes et à rouleaux, catalogue F 9001, France.
- [55] Brüel & Kjaer, « Application Notes vibration Diagnostics for industrial Electric Motor Drives ».
- [56] A. Bouzaouit, « Influence de la vibration sur la durée de vie des roulements », thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie, 2008.
- [57] A. H. Boudinar, N. Benouzza, A. Bendiabdellah, « Diagnostic des Défauts de Roulements d'un Moteur Asynchrone », Article, revue Roumaine des Sciences Techniques – Electrotechnique et Energétique, Bucarest, 2015.
- [58] M. Sahraoui, S. E. Zouzou, A. Menacer, A. Aboubou, A. Derghal, « Diagnostic des Défauts dans les Moteurs Asynchrones Triphasés à Cage », Article, Courrier du Savoir N°05, Juin 2004.
- [59] M. Messaoudi, L. Sbita, « Multiple Faults Diagnosis in Induction Motor Using the MCSA Method », Article, International Journal of Signal and Image Processing - Vol.1, 2010.
- [60] A. Medoued, M. Mordjaoui, Y. Soufi, D. Sayad, « Induction Machine Bearing Fault Diagnosis Based on the Axial Vibration Analytic Signa », Article, ELSEVIER, Science Direct, International Journal of Hydrogen Energy, 2016.
- [61] M. Noureddine GUETANI et M. Mohamed BENARMAS, Contrôle par analyse électriques de moteurs Broyeurs à boulets LAFARGE HOLCIM (LCO) CiBA 29350, Oggaz, Mascara, ALGERIE, 2016.

**ANNEXE A : Analyse spectrale du moteur asynchrone en présence des défauts de court-circuit entre spires.**

# ANNEXE B : Rapport de diagnostic détaillé fournit par PDMA

**Report Title** Test dynamique PDMA  
**Submitted By** BERROUDJI MOHAMED  
**Create Date** 3/23/2023 13:07:56  
**Asset Name** 533MD110M01(NSZSM 1805)  
**Description** Test dynamique PDMA en fonctionnement



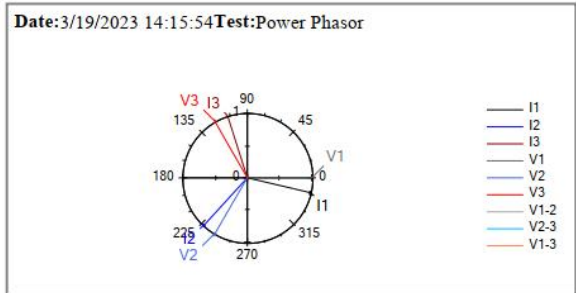
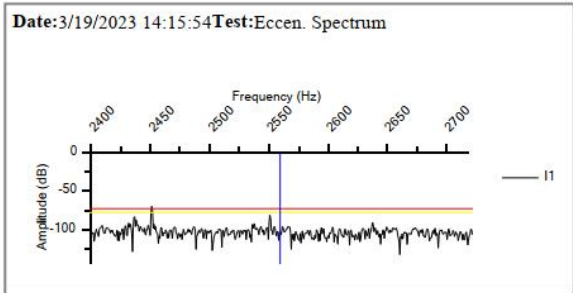
**Comment:** C:rsTest Equipment.PNG

Condition Code	Not Scripted	Test Type	Date	Condition Code
Power Circuit	Voltage Imbalance (%)	0.12	3/19/2023 14:15:54	Pass
	Positive Imbalance (%)	0.12	3/19/2023 14:15:54	Pass
	Negative Imbalance (%)	0.12	3/19/2023 14:15:54	Pass
	Voltage Tot. Ph. Pk (%)	1.28	3/19/2023 14:15:54	Pass
Power Quality	Current THD (%)	2.23	3/19/2023 14:15:54	Pass
	THD (%)	0.95	3/19/2023 14:15:54	Pass
Insulation	WFI (Meg Ohm)	4800.77	3/19/2023 13:39:22	Pass
	PI	6.18	3/19/2023 13:39:22	Pass
	CTD (µF)	20730.85	3/19/2023 13:39:22	Pass
Stator	WFI (Meg Ohm)	0.41	3/19/2023 14:15:54	Pass
	PI	0.20	3/19/2023 13:39:22	Pass
	CTD (µF)	Not Tested	Not Tested	Not Tested
Rotor	WFI (Meg Ohm)	Not Tested	Not Tested	Not Tested
	PI	Not Tested	Not Tested	Not Tested
	CTD (µF)	Not Tested	Not Tested	Not Tested

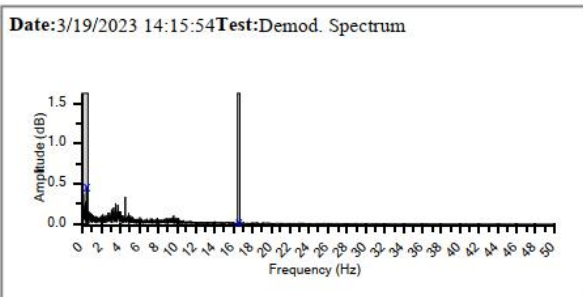
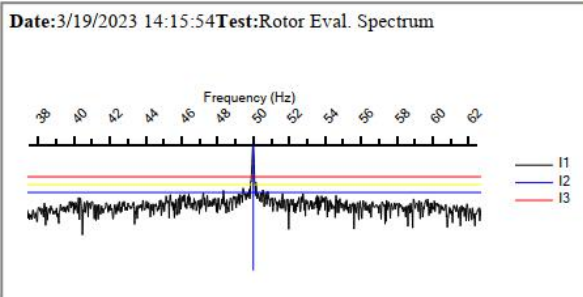
**Asset Name:** 533MD110M01(NSZSM 1805)

**Nameplate Information**

Type: Wound Rotor Motor  
 Frame Number: 800  
 Nameplate Frequency: 50 Hz  
 Voltage: 11000 V  
 Full Load Amps: 302.00 A  
 Kilowatts: 4956.00 KW  
 Horsepower: 6645.90 HP  
 Power Factor: 0.89  
 Num. Slots: Not Tested  
 Operating Speed: 995 RPM  
 Efficiency: Not Tested



**Report Title** Test dynamique PDMA  
**Submitted By** BERROUDJI MOHAMED  
**Create Date** 3/23/2023 13:07:56  
**Asset Name** 533MD110M01(NSZSM 1805)  
**Description** Test dynamique PDMA en fonctionnement



**Date:** 3/19/2023 14:15:54 **Test:** Power Results

VOLTAGE				EFFICIENCY		
	Fund RMS	Tot RMS	C.F.	THD	kW	
Voltage 1-2	11174.14	11175.79	1.43	1.24	Efficiency	
Voltage 2-3	11153.83	11155.52	1.43	1.20	HP Output	
Voltage 1-3	11152.78	11154.42	1.43	1.23	kW Output	
Average	11160.28	11161.91			Torque Output (ft.-lb.)	
% Imbalance	0.12	0.12	HVF	0.00		
% NEMA Derating	100.00	100.00				
Voltage 1	6448.99	6449.94	1.41	1.23	IMPEDENCE	
Voltage 2	6442.59	6443.55	1.41	1.27		Real
Voltage 3	6438.62	6439.59	1.41	1.26		% Imbalance
Average	6443.40	6444.36			0.41	
% Imbalance	0.09	0.09				
CURRENT						
	Fund RMS	Tot RMS	C.F.	THD		
Current 1	243.48	243.57	1.43	2.13		
Current 2	242.89	242.98	1.45	2.23		
Current 3	244.44	244.52	1.44	1.98		
Average	243.60	243.69				
% Imbalance	0.34	0.34				
% FLA	80.66	80.69				
POWER						
	kW	kVAR	kVA	Pf		
Phase 1	1528.48	362.97	1570.99	0.97		
Phase 2	1529.15	336.06	1565.64	0.98		
Phase 3	1538.10	337.22	1574.63	0.98		
Total	4595.73	1036.25	4711.26	0.98		