

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.



Université A. MIRA – BEJAIA  
Faculté de Technologie  
Département de Génie électrique

Mémoire de fin d'études  
En vue de l'obtention du Diplôme de  
***MASTER en électromécanique***

Spécialité : Maintenance industrielle

**THEME**

**Synthèse Des Techniques De Diagnostic Des Défauts DE La  
Machine Asynchrone**

**Etudiants**

M<sup>r</sup> BENHACINE Habib

M<sup>r</sup> BELLILI Billal

**Encadreur**

M<sup>r</sup> ATROUNE Salah

Promotion 2019-2020



# Remerciements

*En tout premier lieu, on remercie le bon Dieu, tout puissant, de nous avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.*

*Nous tenons à remercier notre promoteur, Monsieur ATROUNE SALAH, pour la confiance qu'il nous a accordée en acceptant d'encadrer ce travail, et pour ses multiples conseils et pour toutes les heures qu'il a consacrées à diriger cette recherche.*

*Nous remercies également tous les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail.*

*Ces remerciements seraient incomplets si nous n'en adressais pas à l'ensemble des enseignants de l'université Abderrahmane-Mira (Bejaïa), pour leur soutien logistique et moral ainsi que pour la très bonne ambiance qu'on a toujours trouvée.*

*Enfin, notre reconnaissance va à ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*





# Dédiassse

*Jedédie ce mémoire*

*Ames chers parents. Ma mère, qui m'a encouragé à aller de l'avant et  
Qui m'a donné tout son amour pour reprendre mes études, et  
Mon très cher père est la plus belle perle du monde  
Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs  
Encouragements.*

*Atout ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé*

*Amon frères et mes sœurs*

*Je leur souhaite tout le succès... tout le bonheur*

*Ames amis et mes camarades et ma copine*

*Pour une sincérité si merveilleuse ...jamais oubliable, en leur souhaitant*

*Tout le succès ...tout le bonheur.*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du*

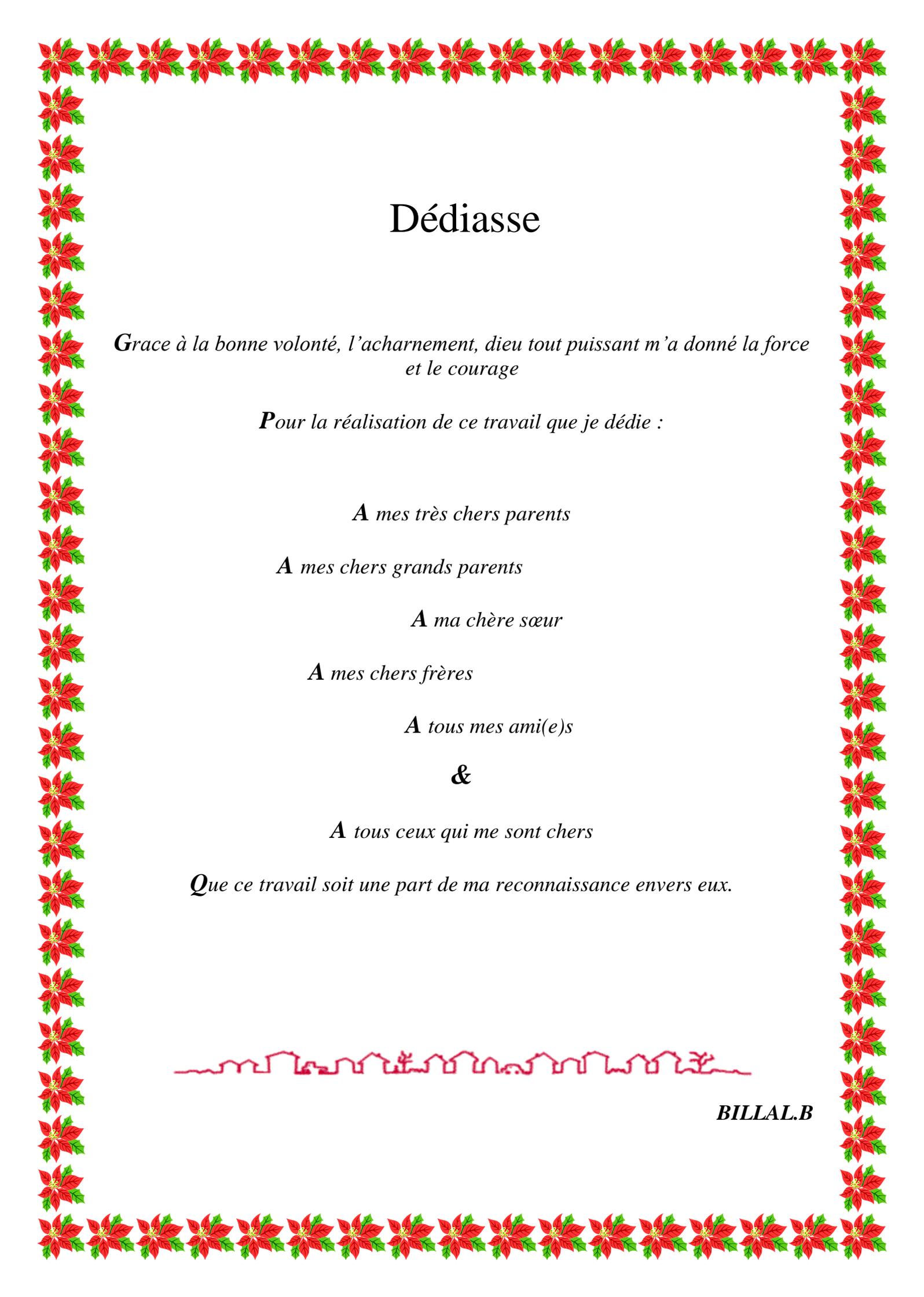
*Primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.*

*Atout personne*

*Qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie*



**BENHACINE.H**



# Dédiase

*Grace à la bonne volonté, l'acharnement, dieu tout puissant m'a donné la force  
et le courage*

*Pour la réalisation de ce travail que je dédie :*

*A mes très chers parents*

*A mes chers grands parents*

*A ma chère sœur*

*A mes chers frères*

*A tous mes ami(e)s*

**&**

*A tous ceux qui me sont chers*

*Que ce travail soit une part de ma reconnaissance envers eux.*



**BILLAL.B**

# Tables Des Matières

Table des matières

Liste Des Figures

Liste de tableaux

Introduction générale ..... 1

## Chapitre I

### Introduction Au Diagnostic Et à La Surveillance

I.1.	Introduction.....	2
I.2.	Objectif de la supervision .....	2
I.3.	Notion de sûreté de fonctionnement .....	3
I.3.1.	Maintenance, surveillance et diagnostic .....	3
I.3.2.	Fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité.....	7
I.3.3.	Défaillance et panne .....	7
I.4.	Mise en place d'un dispositif de sûreté de fonctionnement.....	9
I.4.1.	Les principales étapes de conception d'un dispositif de sûreté de fonctionnement.....	9
I.4.2.	La sûreté de fonctionnement des machines électriques.....	11
I.5.	Classification des défauts des machines électriques selon leurs origines..	12
I.6.	Transformation des mesures dans un système de diagnostic.....	12
I.7.	Conclusion .....	13

## Chapitre II

### Généralités Sur Les Défauts Affectant Les Machines Asynchrones

II.1.	Introduction.....	14
II.2.	La machine asynchrone.....	14
II.3.	Constitution de la machine.....	15

II.3.1.	Le stator .....	15
II.3.2.	Le rotor .....	17
II.3.3.	Les organes mécaniques .....	18
II.4.	Principe de fonctionnement.....	18
II.5.	Avantages du moteur asynchrone .....	20
II.6.	Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone .....	20
II.7.	Les différentes types des défauts d'un moteur asynchrone.....	21
II.7.1.	Défaillances au stator.....	23
II.7.2.	Défaillances au rotor.....	23
II.7.3.	Défaillances mécaniques.....	24
II.7.3.1.	Le Déséquilibre massique ou « Balourd ».....	24
II.7.3.2.	Désalignement .....	25
II.7.3.3.	Défauts des roulements.....	25
II.7.4.	Défaillances du ventilateur .....	27
II.7.5.	Défauts du Carter .....	27
II.8.	Recherche indispensable des symptômes.....	27
II.9.	Conclusion.....	31

## **Chapitre III :**

### **Les Méthodes Et Techniques De Diagnostic De La Machine Asynchrone**

III.1.	Introduction.....	32
III.2.	Caractéristiques souhaitables d'un système de diagnostic.....	32
III.3.	Classification des méthodes de diagnostic.....	35
III.3.1	Approche à base de modèle qualitatif.....	36
III.3.2	Approche à base de modèle quantitatif.....	37
III.3.3	Approche à base d'extraction de caractéristiques qualitatives .....	37
III.4.	Méthodes basées sur une approche système .....	38
III.4.1	Réseaux de neurones .....	39

III.4.2	Reconnaissance de forme (RdF).....	40
III.5.	Méthodes reposant sur une approche signal .....	41
III.6.	Autres méthodes de diagnostic .....	42
III.6.1	Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques .....	43
III.6.2	Diagnostic par mesure de flux magnétique .....	44
III.6.3	Diagnostic par mesure du couple électromagnétique .....	45
III.6.4	Diagnostic par mesure de la puissance instantanée .....	45
III.7.	Techniques d'analyse (surveillance).....	46
III.7.1	L'analyse vibratoire.....	47
III.7.2	L'analyse par thermographie infrarouge .....	52
III.7.3	Analyse par mesure ultrasonore .....	54
III.7.4	Analyse du bruit.....	55
III.8.	Conclusion .....	56
<b>Conclusion générale .....</b>		<b>57</b>

## **BIBLIOGRAPHIE**

# Liste Des Figures

## Chapitre I Introduction Au Diagnostic Et à La Surveillance

<b>Figure .I.1.</b> Classification des divers types de maintenance(AFNOR).....	4
<b>Figure .I.2.</b> présenter les opérations de maintenance suivant le tableau synoptique suivant .....	6
<b>Figure .I. 3.</b> Structure générale d'une procédure de surveillance et diagnostique.....	7
<b>Figure .I.4.</b> La difficulté de localiser des défauts.....	8
<b>Figure .I.5.</b> Principales étapes de conception d'un dispositif de sûreté de fonctionnement.....	11
<b>Figure .I.6.</b> Transformations de mesures dans un système de diagnostic.....	12

## Chapitre II Généralités Sur Les Défauts Affectant Les Machines Asynchrones

<b>Figure .II.1.</b> machine Asynchrone.....	14
<b>Figure .II.2.</b> Eléments de constitution d'une machine asynchrone.....	15
<b>Figure .II.3.</b> Photo du stator d'une machine asynchrone.....	16
<b>Figure .II.3.1.</b> Vue schématique en perspective du stator.....	16
<b>Figure .II.4.</b> Vue schématique du rotor (conducteurs d'encoches(Barres) et anneaux de court-circuit).....	17
<b>Figure .II.5.</b> Circuit magnétique constituant le rotor à cage d'écureuil.....	18
<b>Figure .II.6.</b> Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.....	19
<b>Figure .II.7.</b> Proportion du défaut.....	19

<b>Figure .II.8.</b> Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances.....	21
<b>Figure .II.9.</b> Causes internes des défauts de la machine asynchrone.....	21
<b>Figure .II.10.</b> Causes externes des défauts de la machine asynchrone.....	22
<b>Figure .II.11.</b> Image Vibratoire théorique d'un balourd.....	24
<b>Figure .II.12.</b> Balourd statique.....	24
<b>Figure .II.13.</b> Balourd dynamique.....	25
<b>Figure .II.14.</b> Roulement à billes.....	26

### **Chapitre III : Les Méthodes De Diagnostic Dans La Machine Asynchrone**

<b>Figure .III.1.</b> Les méthodes de diagnostic.....	36
<b>Figure .III.2.</b> La structure générale de réseau de neurones.....	39
<b>Figure .III.3.</b> Différentes étapes du diagnostic par RDF.....	41
<b>Figure .III.4.</b> Les différentes grandeurs de diagnostique dans une machine.....	43
<b>Figure .III.5.</b> Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.....	44
<b>Figure .III.6.</b> Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial.....	45
<b>Figure .III.7.</b> Différentes méthodes d'analyse.....	46
<b>Figure .III.8.</b> analyse vibratoire.....	46
<b>Figure .III.9.</b> Sources de vibration.....	49
<b>Figure .III.10.</b> prosimètres et leur driver.....	50
<b>Figure .III.11.</b> prosimètre monte sur un palie.....	50
<b>Figure .III.12.</b> capteur de vélocimétrie.....	51
<b>Figure .III.13.</b> Schéma de principe d'un accéléromètre.....	51
<b>Figure .III.14.</b> thermographie infrarouge.....	52

<b>Figure .III.15.</b> Thermogramme usure de palier.....	53
<b>Figure .III.16.</b> Thermographie d'un moteur asynchrone.....	53
<b>Figure .III.17.</b> Processus d'inspection par thermographie infrarouge.....	54
<b>Figure .III.18.</b> utilisation des ultrasonores.....	54
<b>Figure .III.19.</b> Analyse du bruit.....	56

## Liste de tableaux

<b>Tableau.1.</b> Les causes des défauts statoriques de la machine asynchrone.....	26
<b>Tableau.2.</b> Les causes des défauts rotoriques de la machine asynchrone.....	27
<b>Tableau.3.</b> Pannes types observées sur un moteur.....	28
<b>Tableau.4.</b> Synthèse des défaillances du rotor sur la machine asynchrone.....	29
<b>Tableau.5.</b> Synthèse des défaillances du stator sur la machine asynchrone.....	30

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

Dans le monde de l'industrie, nous sommes aujourd'hui de plus en plus confrontés à la sûreté de fonctionnement des dispositifs de production causés par des multiples défaillances de type mécaniques et électriques.

Cette demande en termes de sûreté est motivée par les impératifs de production et se retrouve actuellement au niveau des cahiers des charges imposés par les industriels et assureurs à leurs fournisseurs. Ce n'est plus seulement le produit qui est vendu mais l'assurance d'un taux de disponibilité garanti.

L'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise sans oublier la perte de production occasionnée.

En effet, malgré sa robustesse légendaire, la machine asynchrone subit, au cours de sa durée de vie, un certain nombre de défauts externes et internes qui la rendent, potentiellement, défaillante. Malgré, l'augmentation croissante des exigences industrielles en termes de fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité, il était important de disposer d'un certain nombre d'outils et de techniques permettant de diagnostiquer l'état de la machine. Notre travail s'intéresse à la surveillance et au diagnostic des défauts des moteurs asynchrones. Elle s'articule autour de trois chapitres.

Dans le premier chapitre nous présenterons tout d'abord les notions de base liées à la sûreté de fonctionnement et à ses enjeux. Un parcours du vocabulaire lié à cette approche sera proposé.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons un rappel sur la constitution de la machine asynchrone et les différentes défaillances pouvant l'affecter. Nous avons mis, surtout l'accent sur trois défauts les plus récurrents d'après les statistiques, à savoir : les défauts mécaniques, les défauts statoriques et les défauts rotoriques.

Le troisième chapitre est consacré aux différentes méthodes et techniques employées dans le domaine de surveillance et de diagnostic en citant les différentes approches. Une classification en deux grandes parties: méthodes à base de modèle analytique et méthode dites sans modèle.

Nous terminerons par une conclusion générale.

**Chapitre I :**  
**Introduction Au**  
**Diagnostic Et à La**  
**Surveillance**

# **Chapitre I : Introduction au diagnostic et à la surveillance**

---

## **I.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous aborderons tout d'abord les notions de base liées à la sûreté de fonctionnement et à ses enjeux.

Au cours de ce chapitre, nous avons rappelé quelques définitions relatives à la surveillance et au diagnostic. Un parcours du vocabulaire lié à cette approche sera proposé.

Nous verrons ensuite les principales étapes intervenant dans la mise en place d'un dispositif de sûreté de fonctionnement, car chacune d'elles fait appel à des connaissances et à des objectifs bien spécifiques.

Le diagnostic des machines électriques offre un panorama des techniques de détection, et de classification des défauts électriques, mécaniques, thermiques et électroniques pouvant affecter l'ensemble des organes d'un entraînement électrique. Il s'adresse autant aux concepteurs de ces entraînements qu'aux ingénieurs chargés de leur surveillance et de leur maintenance.

A partir de la littérature, nous rappelons quelques définitions relatives à la surveillance et au diagnostic des machines électriques.

La surveillance « Condition monitoring » des machines est devenue un art qui permet de diagnostiquer à temps et avec précision les défauts potentiels pour agir rapidement avant la «casse».

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

## **I.2. Objectif de la supervision**

La recherche croissante d'une meilleure compétitivité (productivité, qualité, . . .) pousse les entreprises à reproduire des machines et des instruments de mesures ayant une grande fiabilité et disponibilité. Cependant, un système quelle que soit sa modernité et sa robustesse, est affectée par des dysfonctionnements qui peuvent compromettre son bon fonctionnement. [1]

Les systèmes de supervision qui intègrent plusieurs activités (surveiller, visualiser, analyser, piloter, agir, . . .) Permettent de rapporter les fonctionnements normaux et anormaux des systèmes, afin de fournir à l'opérateur des critères suffisants pour la prise de décisions.

La supervision correspond à l'action de surveiller le fonctionnement du système afin de prendre des décisions adéquates lorsque le système est hors de l'objectif désiré.

# Chapitre I : Introduction au diagnostic et à la surveillance

---

Le système de surveillance observe en continu l'évolution de l'équipement à travers des données quantifiables et/ou qualifiables collectées à partir du système surveillé. Ces données permettent de signaler à l'opérateur les écarts détectés par rapport au comportement nominal prévu. [1]

Ceci permettra de mettre en œuvre les actions de maintenance préventives et correctives. D'une façon générale, le but de la surveillance est de détecter le mode de fonctionnement du système, tandis que le but du diagnostic est d'identifier le dysfonctionnement du système une fois le mode défaillant détecté.

## I.3. Notion de sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement, peut être définie par l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données.

Elle est scientifiquement caractérisable par l'étude statique et dynamique des systèmes du point de vue prévisionnel, opérationnel et expérimental, en tenant compte des aspects de probabilités et de conséquences liées aux défaillances.

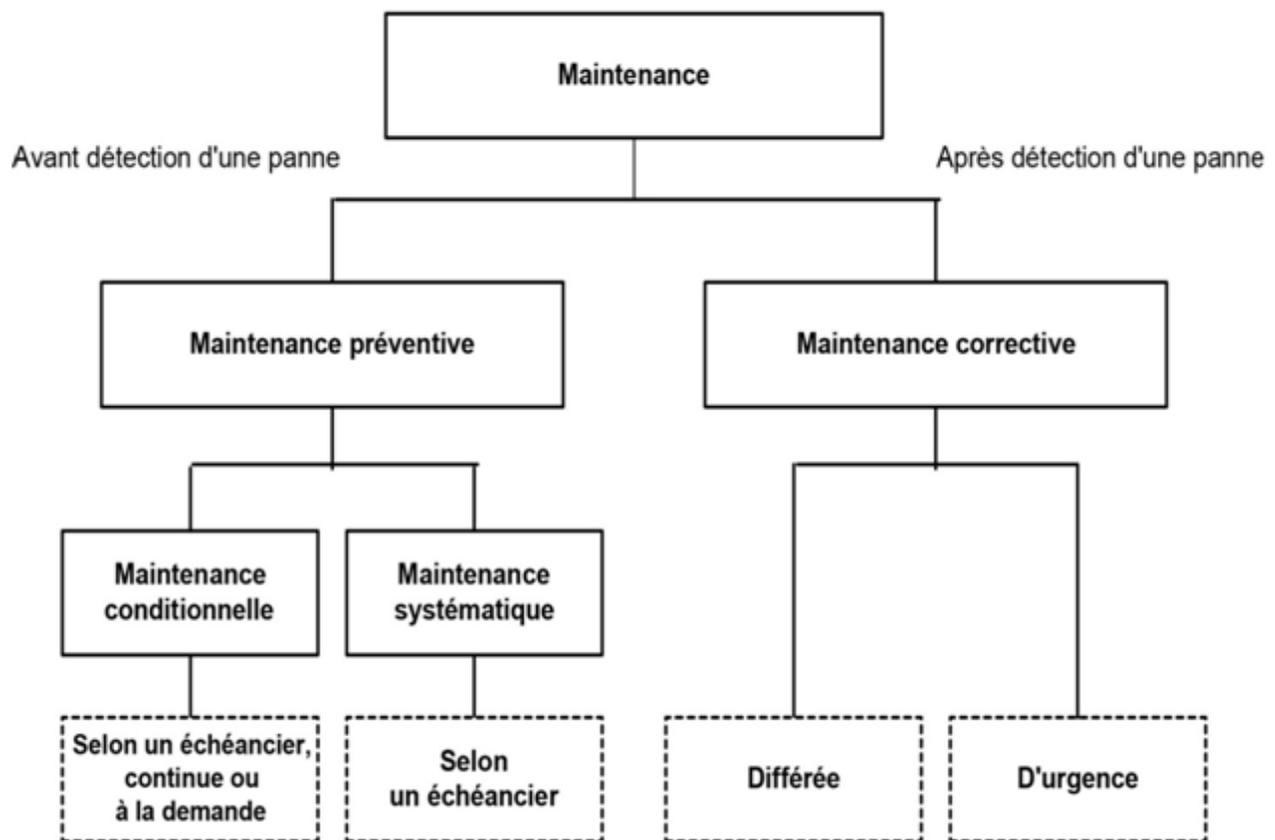
La démarche "sûreté de fonctionnement" s'appuie sur quelques notions de base, qui se sont précisées au cours de l'évolution de cette discipline, et qui continuent à s'affiner.

La sûreté de fonctionnement possède, comme toute science, ses propres concepts terminologiques. Parcourir ce vocabulaire de base est donc une introduction nécessaire à cette discipline. [2]

### I.3.1. Maintenance, surveillance et diagnostic

La notion de maintenance revêt une importance particulière dans le contexte de la sûreté de fonctionnement. Elle englobe en effet les concepts liés à la surveillance et au diagnostic auxquels nous nous intéressons plus particulièrement. Nous donnons ci-après quelques définitions relatives à ce terme. [2]

- **Maintenance** : ensemble des 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.



**Figure. I.1.** Classification des divers types de maintenance(AFNOR) [3]

- **Maintenance préventive** : est une "maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien". [3]
  - **Maintenance systématique** : La maintenance systématique est une "maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien". Elle est donc une maintenance programmée qui consiste à remplacer un certain nombre de composants préalablement défini même si aucun signe de défaillance n'est apparu. [3]
  - **Maintenance conditionnelle** : La maintenance conditionnelle est une "maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent". Cette forme de maintenance est aussi appelée maintenance prédictive, elle est conditionnée par l'apparition d'un type d'événement prédéterminé et révélateur de l'état de fonctionnement du

## Chapitre I : Introduction au diagnostic et à la surveillance

---

système (i.e. donnée d'un capteur, mesure d'usure, résultat de diagnostic,....,etc.). [3]

- **Maintenance corrective** :est une «maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise [11]. La maintenance corrective comporte deux types :
  - **Maintenance palliative** : La maintenance palliative est caractérisée par un caractère temporaire et provisoire. Elle vise à dépanner le système et le remettre provisoirement dans un état qui lui permet d'assurer une partie des fonctions requises. Ce type de maintenance est systématiquement suivi d'un autre type appelé maintenance curative
  - **Maintenance curative** : La maintenance curative est une action de maintenance corrective qui permet de remettre définitivement le système en un état lui permettant d'accomplir ses fonctions requises, l'intervention peut avoir lieu juste après l'apparition d'une défaillance ou après un dépannage. Contrairement à la maintenance palliative, la maintenance curative est une réparation durable.

Il apparaît donc que, si un composant d'une entité est jugé défaillant,. Si celui-ci est jugé non défaillant mais dégradé, sa réparation ou son remplacement doit être considéré comme de la maintenance préventive. En fonction des problèmes constatés sur une entité, il est nécessaire de choisir le mode de maintenance adéquat. Cette décision est intimement liée aux informations fournies par les étapes de surveillance/détection et de diagnostic que nous précisons ci-dessous. [4]

- **Surveillance / détection de comportement** : Actions réalisées manuellement ou automatiquement, destinées à observer l'état d'un bien ou d'un service et à détecter l'apparition d'une éventuelle défaillance. Les informations nécessaires à ces actions peuvent provenir de grandeurs physiques directement prélevées sur le système ou reconstituées à partir de mesures indirectes. [4]

# Chapitre I : Introduction au diagnostic et à la surveillance

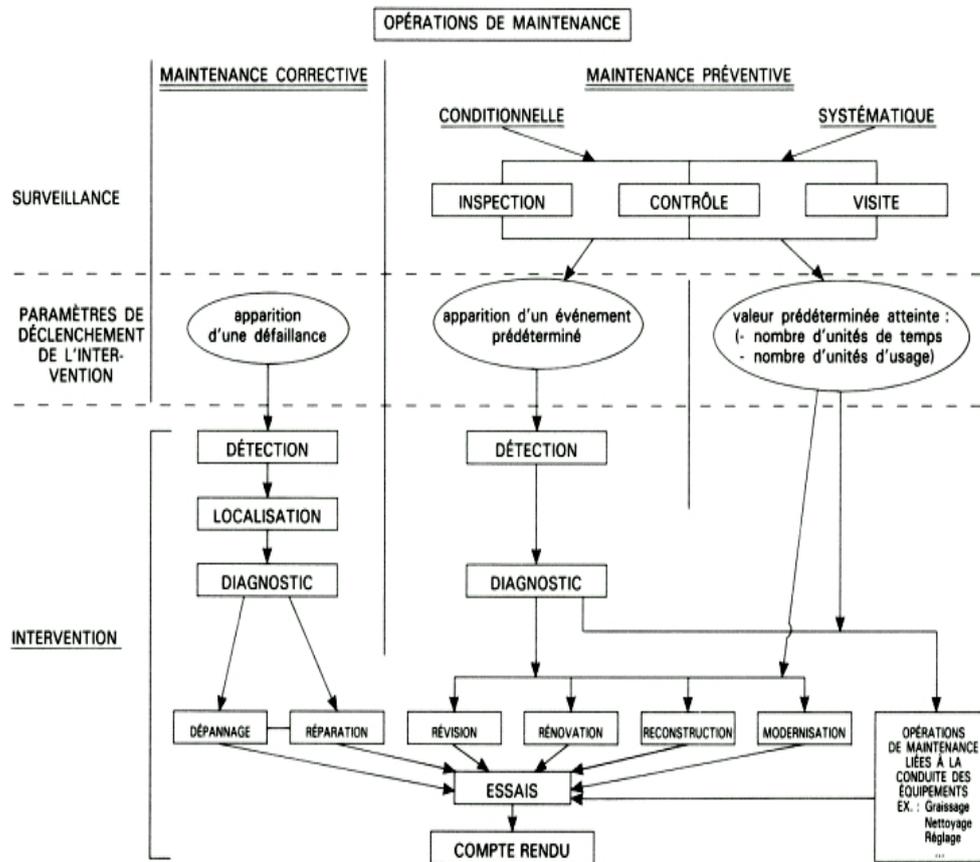


Figure I.2. Les opérations de maintenance suivant le tableau synoptique suivant [5]

- **Diagnostic** : action consistant à identifier la (ou les) cause(s) probable(s) de la (ou les) défaillance(s) ou de l'évolution d'un ou de plusieurs paramètres significatifs de dégradations à l'aide d'un raisonnement logique fondée sur un ensemble d'informations. Le diagnostic permet de confirmer, de compléter ou de modifier les hypothèses faites sur l'origine et la cause des défaillances, et de préciser les opérations de maintenance corrective nécessaires.

La surveillance / détection consiste en la mise en œuvre de techniques reposant sur l'analyse des variations de paramètres ou de grandeurs de fonctionnement de l'entité, visant à évaluer son état de dégradation, pour décider de la nécessité d'une inspection ou d'une réparation préventive afin d'éviter sa défaillance. Si la surveillance permet de détecter une défaillance, le diagnostic consiste d'une part à observer les effets de la défaillance et, d'autre part, à identifier si possible les causes et l'importance de cette défaillance. Un examen strict des définitions de la surveillance et du diagnostic montre que ce sont des outils de la maintenance qui visent à améliorer la sûreté de fonctionnement d'une entité à laquelle ils sont appliqués. [6]

## Chapitre III : Les méthodes de diagnostic dans la machine asynchrone

---

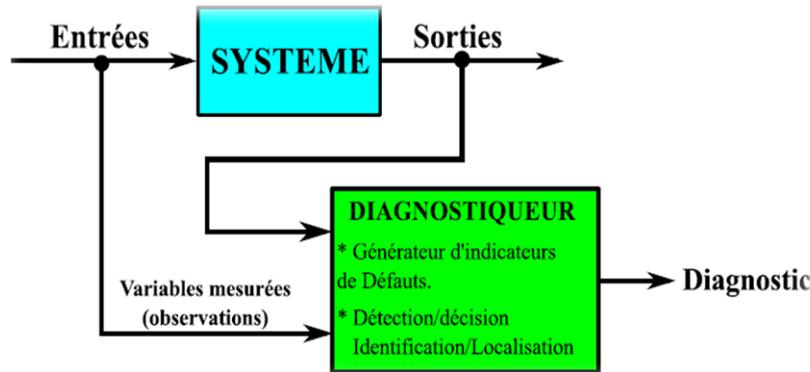


Figure .I.3. Structure générale d'une procédure de surveillance et diagnostique [6]

### I.3.2. Fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité

La surveillance et le diagnostic constituent des leviers majeurs pour améliorer la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité d'une entité. Définissons plus précisément ces différents concepts.

- **Fiabilité** : Aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée. Elle est caractérisée par la probabilité pour que l'entité accomplissant ces fonctions à l'instant '0' puisse les accomplisse à l'instant.
- **Maintenabilité** : Aptitude d'une entité à être remise en état par une maintenance adaptée afin d'accomplir des fonctions requises dans des conditions données. Elle se caractérise par la probabilité d'être en état, à l'instant 't', d'accomplir ces fonctions sachant qu'elle était en panne à l'instant 0. La maintenabilité ne se différencie de la fiabilité que sur ce dernier point : elle caractérise la promptitude de reprise du service attendu après interruption. La maintenabilité, c'est la brièveté des pannes.
- **Disponibilité** : Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir les fonctions requises dans des conditions données. Elle se caractérise par la probabilité d'être en état, à l'instant t, d'accomplir les fonctions requises.
- **Sécurité** : Aptitude d'une entité à ne pas causer de dommages ou à ne pas faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

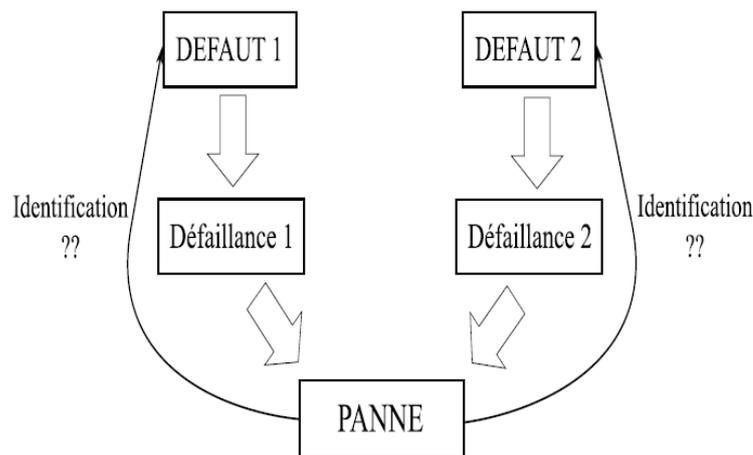
### I.3.3. Défaillance et panne

Enfin, pour finir ce parcours non exhaustif du vocabulaire lié à la sûreté de fonctionnement, nous proposons de définir avec précision les termes de défaillance et panne.

## Chapitre III : Les méthodes de diagnostic dans la machine asynchrone

---

- **Défaillance** : cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Après défaillance d'une entité, cette entité est en état de panne. Une défaillance est un passage d'un état à un autre par opposition à une panne qui est un état.
- **Défaillance partielle** : défaillance à la suite de laquelle le bien ne peut accomplir qu'une partie des fonctions requises ou ne peut les accomplir qu'avec des performances limitées.
- **Défaillance complète** : défaillance qui entraîne l'inaptitude totale de l'entité à accomplir toutes les fonctions requises.
- **Panne** : état d'une entité inapte à accomplir une fonction requise dans des conditions données d'utilisation.



**Figure. I.4.** La difficulté de localiser des défauts [7]

- **Perturbation** : Signal d'entrée non contrôlé dont la présence est non Souhaitable mais considérée comme normale.
- **Localisation de défauts** : Détermination du type, de la localisation et de la date d'un défaut détecté. Elle consiste à remonter d'un ensemble de symptômes à un ensemble de composants défaillants.
- **Identification** : L'identification ou l'estimation (Faulte valuation) vise à fournir des informations quantitatives sur les caractéristiques du défaut : instant d'apparition,

## Chapitre III : Les méthodes de diagnostic dans la machine asynchrone

---

valeur de l'écart d'un paramètre permettant de le quantifier. Dans le cas de défauts procédés, l'identification revient à connaître les valeurs de différents paramètres du système.

- **Supervision** : Représente la surveillance d'un système physique et la prise de décisions appropriées en vue de maintenir son opération face à des défaillances.
- **La réparation** : Intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance. L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.
- **Panne complète** : panne résultant d'une défaillance complète.

Il est clair que dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation d'une entité à accomplir sa fonction, celle-ci est déclarée en panne. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une défaillance.

### I.4. Mise en place d'un dispositif de sûreté de fonctionnement

#### I.4.1. Les principales étapes de conception d'un dispositif de sûreté de fonctionnement

La mise en place d'une démarche de sûreté de fonctionnement présente différentes étapes que nous nous proposons de synthétiser ci-après.

- **Etape 1 – Recherche de signatures des défaillances** :

Dans la mise en place d'un dispositif de sûreté de fonctionnement, l'une des premières étapes consiste à s'intéresser aux phénomènes et aux situations critiques pouvant mettre en péril la fonction, l'environnement et la mission d'un système. Ceci amène alors à s'interroger sur les phénomènes pouvant conduire à une situation critique et sur les conséquences des défauts à forte probabilité d'occurrence. Cette réflexion fait partie intégrante de la démarche de sûreté de fonctionnement. Il est donc important de bien connaître l'objet à surveiller afin d'appréhender au mieux son comportement, en l'absence et en présence de défauts. Dans ce contexte, la sûreté de fonctionnement est toujours totalement dépendante de la connaissance du système étudié et de l'état des sciences concernées. La difficulté pour le concepteur est alors d'être a priori capable de spécifier quels sont les éléments les plus sensibles d'une installation, à travers quelles grandeurs va-t-on être le plus à même d'observer les effets des

## **Chapitre III : Les méthodes de diagnostic dans la machine asynchrone**

---

défauts et comment vont se manifester les défauts sur ces grandeurs [8]. Ce dernier point, que l'on nomme recherche de signatures des défaillances, constitue une étape majeure dans la mise au point d'un dispositif de sûreté de fonctionnement. Cette recherche peut être menée par différents moyens. Elle peut se nourrir d'un retour d'expérience sur des produits défaillants, ou simplement des connaissances "théoriques" du processus. Il est également possible de faire appel à des outils de modélisation, de simulation ou encore à des essais expérimentaux.

- **Etape 2 – Mise au point de méthodes de Surveillance / détection :**

Les connaissances capitalisées au cours de l'étape 1 permettent de disposer d'informations sur le comportement du système en cas de défaut, sur ses défaillances les plus probables, les plus critiques et sur les signes de leur manifestation. L'étape de mise au point de méthodes de surveillance/détection se nourrit de ces éléments, les exploite, pour mettre au point des techniques permettant de mettre en évidence, au cours du fonctionnement du système, les prémices ou l'occurrence d'un défaut. Comme nous l'avons déjà évoqué, les méthodes de surveillance/détection s'appuient généralement sur des mesures directes ou indirectes de grandeurs liées au système en fonctionnement. (L'objectif est de chercher l'apparition de signatures des défauts surveillés et de générer automatiquement, c'est-à-dire sans recours à l'expertise humaine, des indicateurs informant de cette apparition).

- **Etape 3 - Diagnostic des défaillances :**

L'étape de diagnostic consiste à analyser les données issues de la surveillance pour tenter d'identifier et de localiser la ou les causes probables de la défaillance.

Les méthodes de diagnostic peuvent utiliser toutes les connaissances disponibles sur leur relation de cause à effet. Cette étape fournit des informations permettant de déterminer le degré de criticité du défaut et de cibler les moyens d'action possibles pour le contenir.

- **Etape 4 - Décision d'actions :**

Enfin, l'étape décisionnelle intervient pour appliquer les actions les plus appropriées afin de répondre aux exigences du cahier des charges de sûreté de fonctionnement (maintien de la fonction, sécurisation, maintenance,...).

La figure (5) synthétise ces différentes étapes. Pour résumer, la sûreté de fonctionnement consiste à connaître, détecter, analyser, et maîtriser

## Chapitre III : Les méthodes de diagnostic dans la machine asynchrone

---

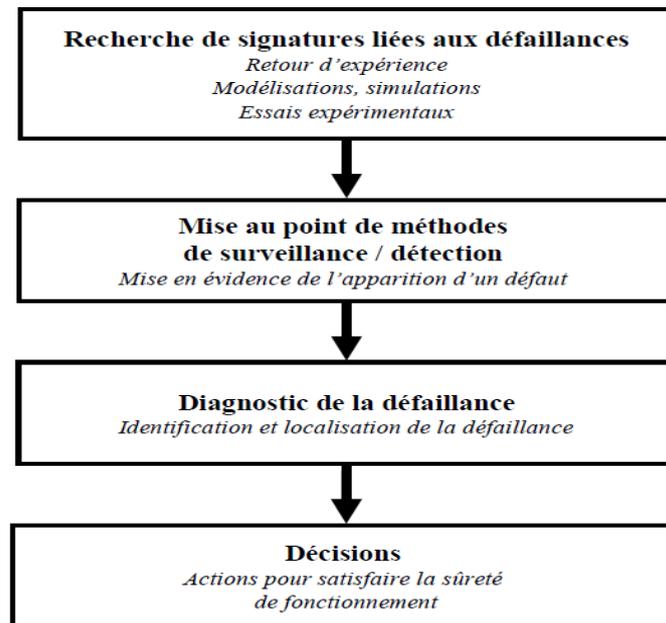


Figure .I.5. Principales étapes de conception d'un dispositif de sûreté de fonctionnement [8]

### I.4.2. La sûreté de fonctionnement des machines électriques

Les principes généraux liés à la sûreté de fonctionnement précédemment évoqués peuvent s'appliquer à n'importe quel dispositif. Dans le domaine du Génie Electrique, les systèmes modernes tendent de plus en plus à intégrer cette notion de sûreté de fonctionnement. Dans les domaines du ferroviaire, de l'aéronautique ou du spatial par exemple, mais également dans les domaines de la production ou du stockage d'énergie, la surveillance de l'état de santé des Systèmes, les dispositifs de détection de pannes et de sécurisation sont recherchés pour limiter les coûts de maintenance et augmenter la disponibilité ainsi que la fiabilité des installations.

Parmi les composants les plus couramment rencontrés dans ces systèmes, du fait de leur omniprésence dans une large variété de processus, les actionneurs électriques tiennent une place de premier ordre. Les questions liées à leur sûreté de fonctionnement sont donc d'un très grand intérêt pour les exploitants et les fabricants.

Les principaux défauts des actionneurs électriques peuvent être regroupés en deux catégories principales :

- les défauts mécaniques : excentricité du rotor, usure de roulements, désalignement de l'arbre de transmission, défauts de la charge (déséquilibre, défaut de réducteur mécaniques ou tout autre défaut pouvant survenir dans la charge entraînée).

## Chapitre III : Les méthodes de diagnostic dans la machine asynchrone

---

- les défauts électriques : défauts d'isolement des bobinages statoriques, défauts de cage dans les machines asynchrones, défauts d'alimentation,...

Dans notre travail, nous nous focaliserons plus particulièrement sur les défauts mécaniques et électriques des machines asynchrones. On peut trouver origine électrique ou mécanique ou thermiques ou environnement et leurs conséquences.

### I.5. Classification des défauts des machines électriques selon leurs origines

Les machines électriques et systèmes d'entraînement sont soumis à de nombreux types de défauts. Ces derniers peuvent être classés selon leurs causes en deux grandes familles : les défauts à causes internes et les défauts à causes externes. Les défauts externes sont provoqués par les tensions d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Les défauts internes sont causés par les constituants de la machine (circuit magnétique, bobinages du stator et du rotor, entrefer mécanique, cage rotorique , etc.).

### I.6. Transformation des mesures dans un système de diagnostic

Généralement, le processus de diagnostic peut être défini comme un processus décisionnel. La décision finale est constituée de l'ensemble des défauts possibles. La Figure (7), montre les diverses transformations que les données du procédé subissent pendant le processus de diagnostic. [5]

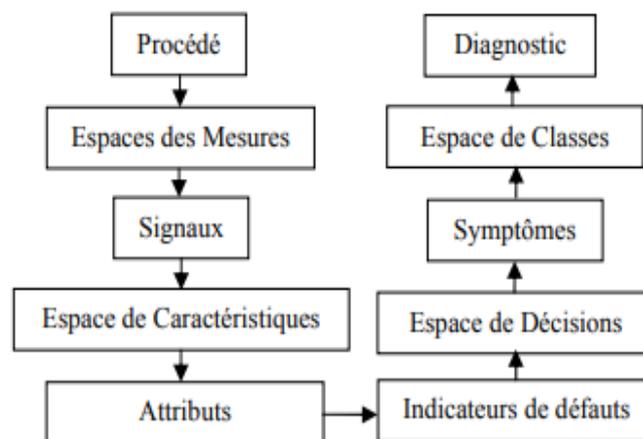


Figure .I.6. Transformations de mesures dans un système de diagnostic [5]

## Chapitre III : Les méthodes de diagnostic dans la machine asynchrone

---

- **L'espace des mesures** : est défini par les sorties du système, ces sorties peuvent avoir subi des prétraitements (élimination de données aberrantes, filtrage,...). Ce sont les entrées du système de diagnostic.
- **L'espace des caractéristiques** : est l'espace obtenu en fonction des mesures en utilisant une connaissance a priori du problème. Ici, les mesures sont analysées et combinées à l'aide d'une connaissance a priori du procédé pour extraire les caractéristiques utiles concernant le comportement du procédé, pour faciliter le diagnostic. Il y a deux manières de développer l'espace des caractéristiques à partir de l'espace des mesures.
- **L'extraction des caractéristiques** : L'extraction de caractéristiques est un procédé qui facilite, par l'utilisation de la connaissance antérieure du problème, une transformation de l'espace de mesure dans un espace de dimension inférieure.
- **Le passage de l'espace des caractéristiques à l'espace des décisions** : est habituellement fait pour satisfaire une certaine fonction objectif (telle que réduire au minimum la non détection). Cette transformation est réalisée en employant une fonction discriminante, dans certains cas en employant des fonctions simples de seuil.[5]
- **L'espace des décisions** : est l'espace correspondant au nombre de variables de décision obtenu par des transformations appropriées de l'espace des caractéristiques.
- **L'espace des classes** : correspond au nombre de classes de défaut. En classant les défauts, nous indiquons catégoriquement à quelle classe un défaut appartient. L'espace des classes est ainsi l'interprétation finale du système de diagnostic fourni à l'utilisateur.

### I.7. Conclusion

Nous avons, dans ce chapitre, présenté des éléments génériques relatifs à la sûreté de fonctionnement dans les systèmes du Génie Electrique.

Les machines électriques sont parmi les composants les plus répandus dans ces systèmes. Compte tenu, des différents types de défaillances dont elles peuvent être victimes, les dispositifs de surveillance de leur état de santé présentent un intérêt tout particulier pour les fabricants et les exploitant.

**Chapitre II :**  
**Généralités Sur Les**  
**Défauts Affectant Les**  
**Machines**  
**Asynchrones**

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

---

### II.1. Introduction

Actuellement, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique. [9]

Ce chapitre, nous permet de situer notre démarche dans le domaine du diagnostic des défauts dans les machines asynchrones.

Au début, il est essentiel de faire rappeler la structure constituant la machine asynchrone, sans oublier les principaux défauts électriques et mécaniques qui peuvent impacter cette machine.

### II.2. La machine asynchrone

La machine asynchrone (MAS), est par excellence, la machine la plus répandue dans l'industrie. Cet intérêt croissant est justifié par de nombreux avantages, tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en oeuvre, son faible coût ... etc. [9]

La machine asynchrone, connue également sous le terme anglo-saxon de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor.

Bien que la machine asynchrone soit robuste, elle peut présenter, comme toutes autres machines électriques, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique.

Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un intérêt grandissant depuis les deux dernières décennies.



**Figure .II.1.** machine Asynchrone

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

---

### II.3. Constitution de la machine

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction, comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'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 sa structure est, électriquement, équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. [10]

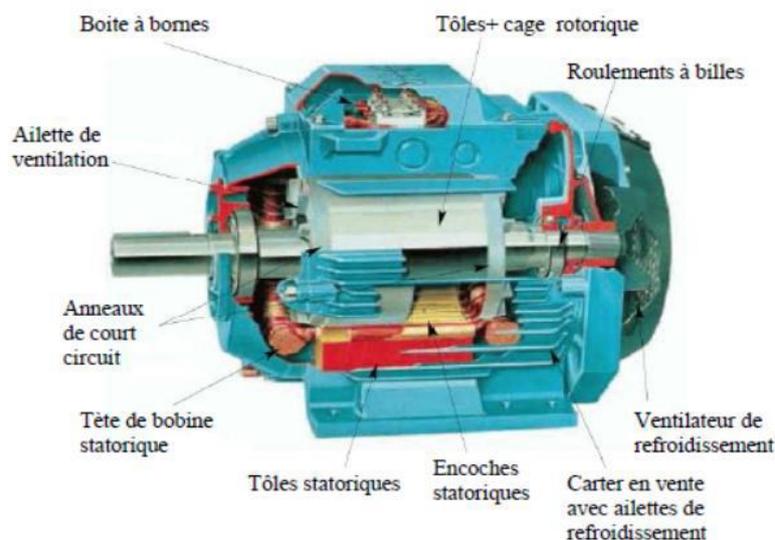


Figure .II.2. Eléments de constitution d'une machine asynchrone [13]

#### II.3.1. Le stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statorique. Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique. [11]

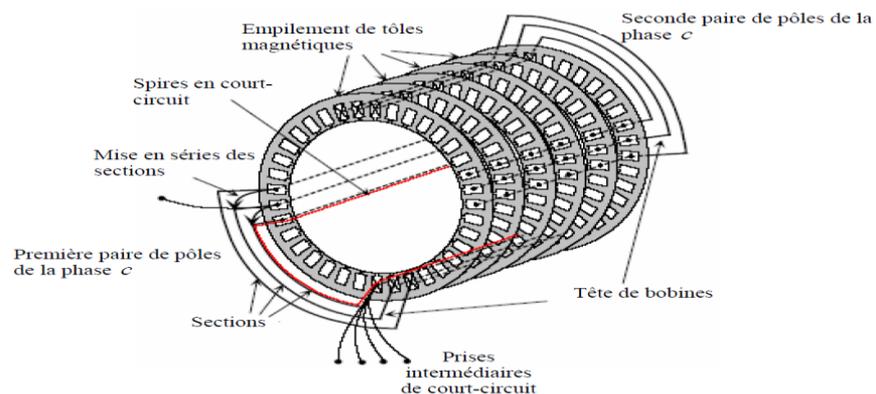
## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

Le bobinage statorique se décompose en deux parties :

- Les conducteurs permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique.
- Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.



Figure .II.3. Photo du stator d'une machine asynchrone [11]



## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

---

Figure .II.3.1.Vue schématique en perspective du stator [11]

### II.3.2. Le rotor

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotorique) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure.4 ). [12]

Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné (figure.5 ).

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor.

Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre.

Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. [12]

De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

---

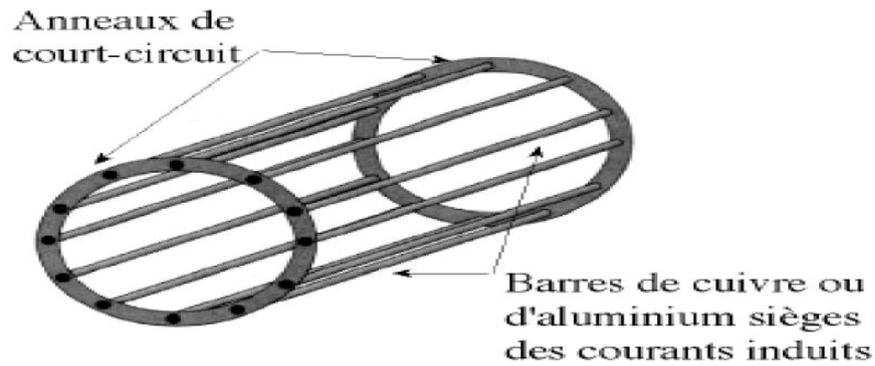


Figure.II.4. Vue schématique du rotor (conducteurs d'encoches(Barres) et anneaux de court-circuit)

[11]

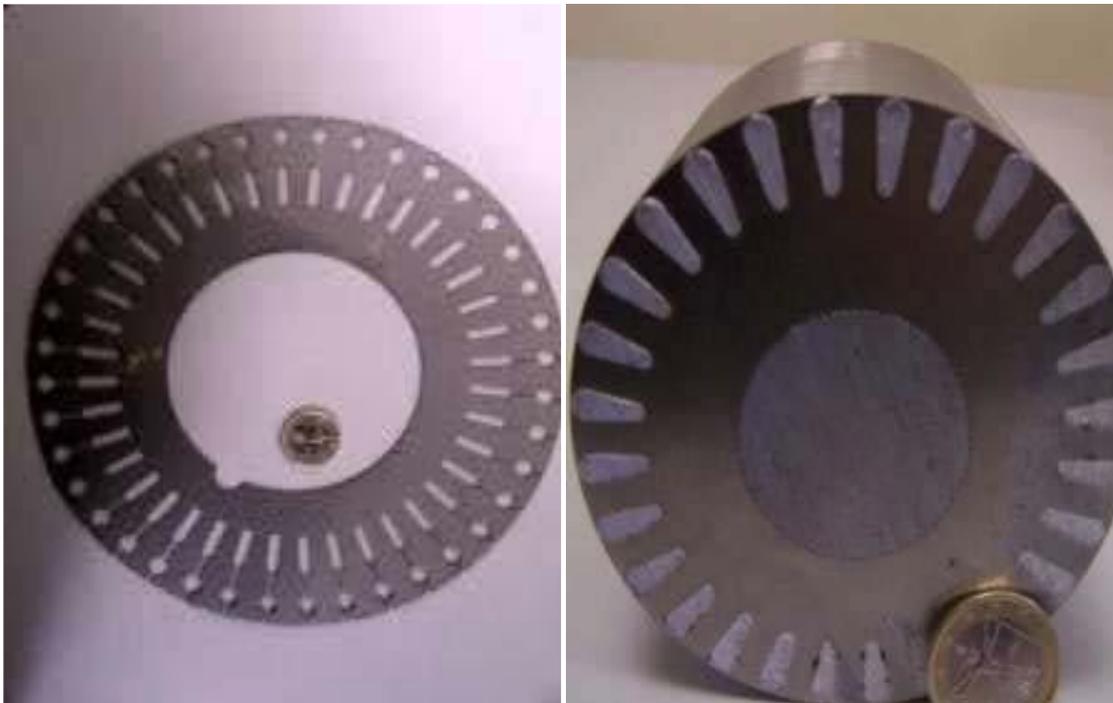


Figure .II.5.Circuit magnétique constituant le rotor à cage d'écureuil [11]

### II.3.3. Les organes mécaniques

- La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur.
- L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

---

dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...).

- Les paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique.

### II.4. Principe de fonctionnement

L'enroulement statorique reçoit de l'énergie électrique du réseau, ce qui crée un champ tournant à la vitesse angulaire ce champs en balayant les barres rotoriques y induit des FEM et donc des courants.

Ces courants induits produiront un champ qui sera de sens opposé au champ statorique, cela va produire un couple moteur qui entrainera la mise en mouvement du rotor dans les sens du champ tournant statorique.

Dans la machine asynchrone, l'onde du champ tournant se déplace dans l'entrefer de la machine avec une vitesse de rotation nommée vitesse de synchronisme ( $\Omega_s$ ). Elle est liée à la fréquence d'alimentation ( $f_s$ ) par l'expression suivante :

$$\Omega_s = (\omega_s / p) = 60 * (f_s / p) \quad (\text{tr/min}) \quad (\text{II.1})$$

Ou :

$f_s$ : fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation [HZ].

$p$  : le nombre de paires de pôles.

En effet, Il existe donc toujours une différence de vitesse entre le stator et le rotor. Cette différence s'appelle le glissement ( $g$ ) qui est une caractéristique particulière de la MAS.

Il est défini comme étant l'écart de vitesse entre la vitesse de synchronisme ( $\Omega_s$ ) et la vitesse de rotation du rotor ( $\Omega$ ). Le glissement ( $g$ ) est alors donné par :

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

$$g = (\Omega_s - \Omega) / \Omega_s \quad (\text{II.2})$$

Ou :

$g$  : le glissement.

$\Omega_s$  : la vitesse de synchronisme.

$\Omega$  : la vitesse de rotation du rotor.

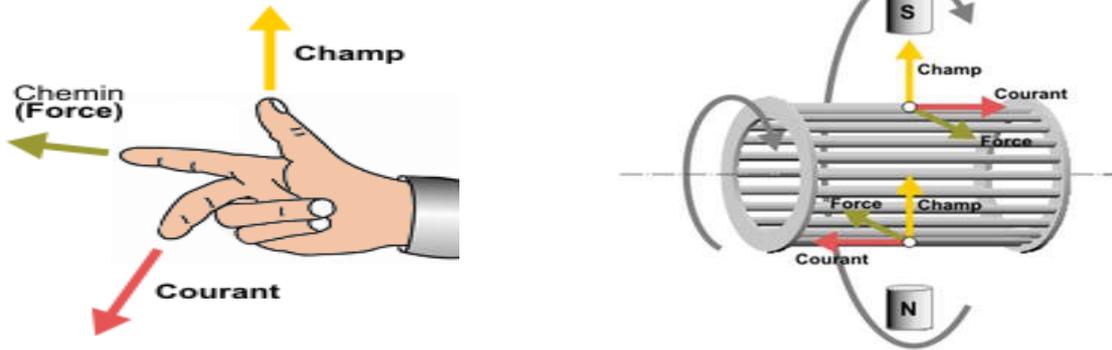


Figure .II.6. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone [13]

### II.5. Avantages du moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en oeuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité.

### II.6. Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

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

- **les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts** : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survolage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- **Les amplificateurs de défauts** : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.
- **les vices de fabrication et les erreurs humaines** : défauts de fabrication, composants Défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc. Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

---

asynchrones de moyenne puissance de 50kW à200kW) a donné les résultats suivants figure (7) :

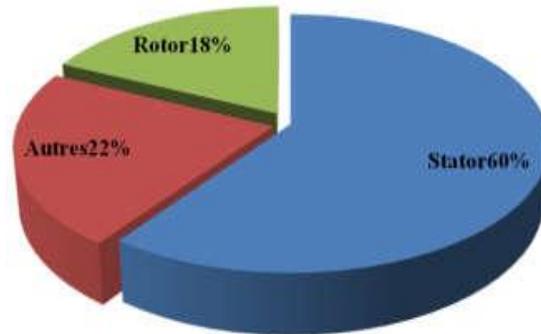


Figure .II.7.Proportion du défaut [9]

La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la figure (8).

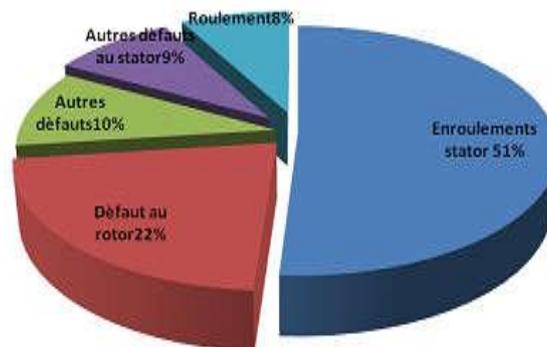


Figure .II.8. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances. [9]

### II.7. Les différentes types des défauts d'un moteur asynchrone

Quoi que robuste, il existe deux types de défauts principaux : Internes et externes.

- **Les défauts internes** : sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.).

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

- **Les défauts externes** : sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Ces défauts peuvent se classer en deux familles principales.

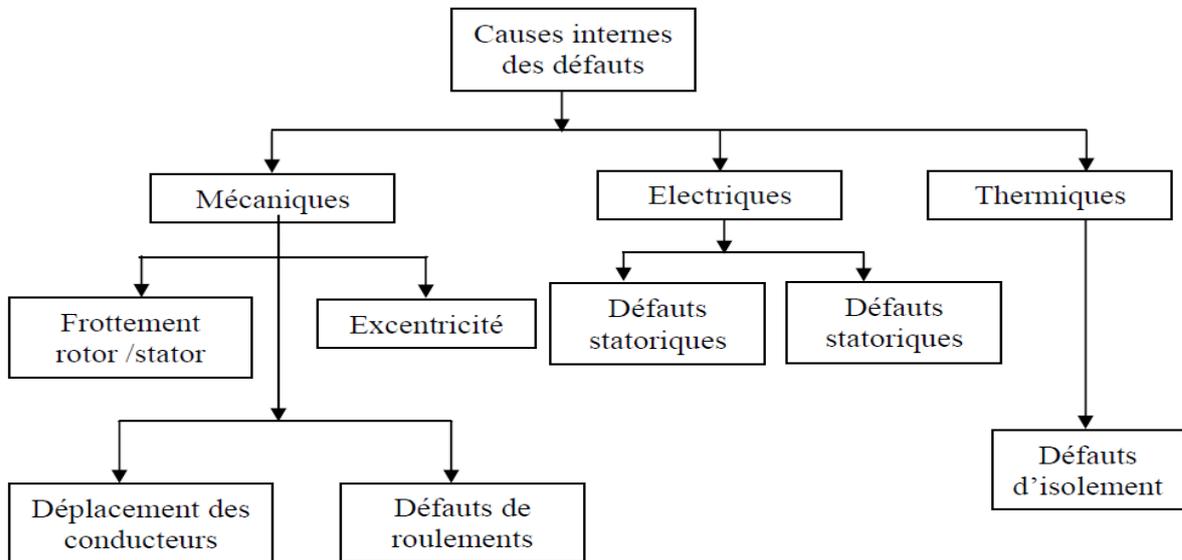


Figure .II.9. Causes internes des défauts de la machine asynchrone [9]

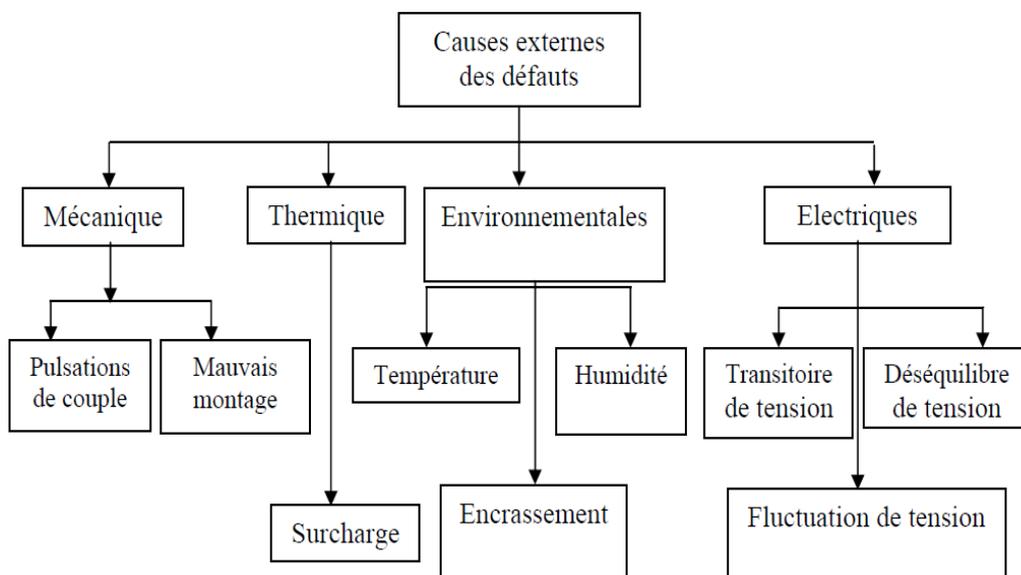


Figure .II.10. Causes externes des défauts de la machine asynchrone [9]

### • Divers origines des défauts

D'après les organigrammes, les origines des défauts externes sont diverses : Thermique, mécanique, électrique ou encore environnemental. [9]

On peut trouver :

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

---

- Mécaniques: mauvaise fabrication, vibrations de la machine, force
- électromagnétiques déséquilibrées, force centrifuge, fluctuations de la charge.
- Electriques: dégradations d'isolement, décharges partielles, étincelles.
- Thermiques: pertes dans le cuivre, manque de refroidissement général ou localisé.
- Environnementales: humidité, ozone, poussière. [9]

A titre indicatif, les démarrages fréquents provoquent des courants élevés dans les barres rotoriques.[9]

Ces courants dans les barres rotoriques engendrent, par conséquent, dessuréchauffements et des contraintes mécaniques conduisant à terme à des fissures puis à une cassure de barres. Par effet d'avalanche, la barre cassée accélère la rupture des barres adjacentes pouvant aboutir jusqu'à la destruction totale du rotor. [14]

Au niveau de l'entrefer, les défauts se manifestent par une excentricité statique, une excentricité dynamique ou une excentricité mixte. [15]

Le défaut d'excentricité statique est, généralement, dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator.

Le défaut d'excentricité dynamique peut être causé aussi bien par une déformation du cylindre rotorique que par une déformation du cylindre statorique. L'excentricité mixte est une combinaison des deux premiers.

Au niveau de la cage, les défauts se manifestent par la rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit. Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents,...etc.) à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures). [14]

Au niveau des paliers, nous pouvons citer le défaut de décentrage des flasques conduisant, généralement, à une excentricité statique alors qu'une détérioration de roulements à billes conduit, le plus souvent, à une excentricité dynamique.

Il est important de signaler que plusieurs études statistiques ont été menées dans le but de quantifier l'impact de chaque type de défaut sur la fiabilité de la machine et leurs pourcentages ont été cités dans plusieurs publications. Les résultats obtenus restent quand même assez différents d'une étude à l'autre. Cependant, toutes les études convergentes pour classer les défauts de paliers comme étant les plus fréquents, suivis par les défauts statoriques et, en dernier, les défauts de cage rotorique.

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

---

### II.7.1. Défaillances au stator

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

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

### II.7.2. Défaillances au rotor

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème :

- thermique (surcharge,...) pour moteur asynchrone à rotor bobiné.
- électromagnétique
- résiduel (déformation,...)
- dynamique (arbre de transmission,...)
- mécanique (roulement,...)
- environnemental (agression,...)

### II.7.3. Défaillances mécaniques

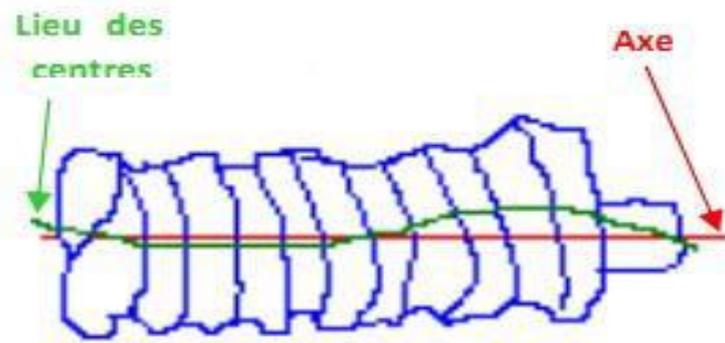
#### II.7.3.1. Le Déséquilibre massique ou « Balourd »

Le balourd est un défaut qui se rencontre en présence du déséquilibre de l'arbre d'une machine tournante. Ce phénomène se produit à la vitesse de rotation et est causé par une mauvaise répartition spatiale des masses dans la structure, entraînant un déplacement du centre de gravité en dehors de l'axe géométrique du rotor de la machine tournante. [16]

La force engendrée par le balourd est fonction de la masse, et du rayon du cercle sur lequel le rotor tourne. Ce balourd provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage, ou sont la conséquence du déséquilibre massique de la charge que le moteur est supposé entraîné. [16]

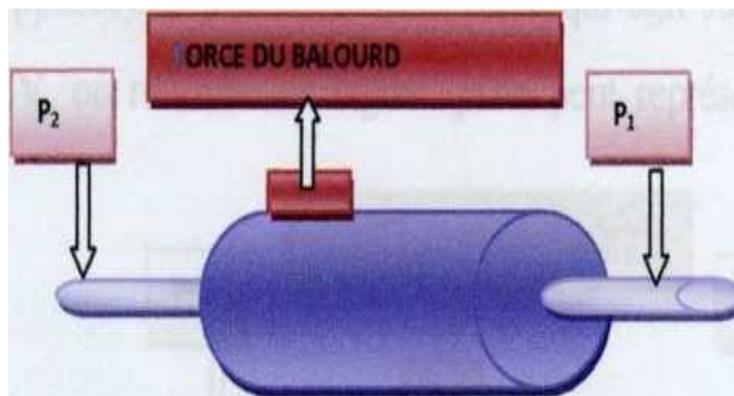
## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

---



**Figure .II.11.**Image Vibratoire théorique d'un balourd [22]

Soit un rotor parfaitement en équilibre. Mettons une masse à un endroit du rotor (Figure12). Le rotor présentera un déséquilibre même à l'arrêt. On parlera de balourd statique. Si le rotor est en rotation, la masse exercera une force radiale proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor. [16]



**Figure .II.12.**Balourd statique

Contrairement au cas du balourd statique, le rotor sera parfaitement en équilibre si le rotor ne tourne pas. Quand le rotor commence à tourner, les deux forces génèrent un couple « ces forces de même grandeur, tournent en effet à la même vitesse de rotation mais dans une direction opposée ».

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

---

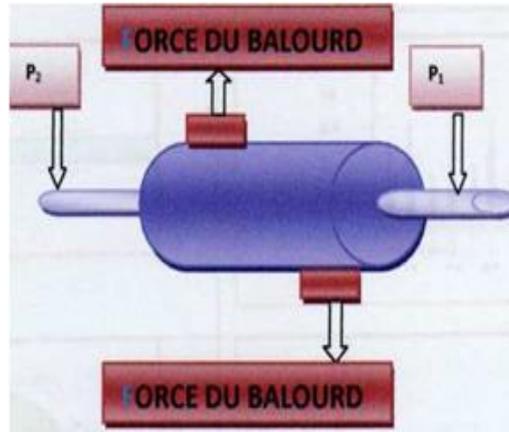


Figure .II.13. Balourd dynamique

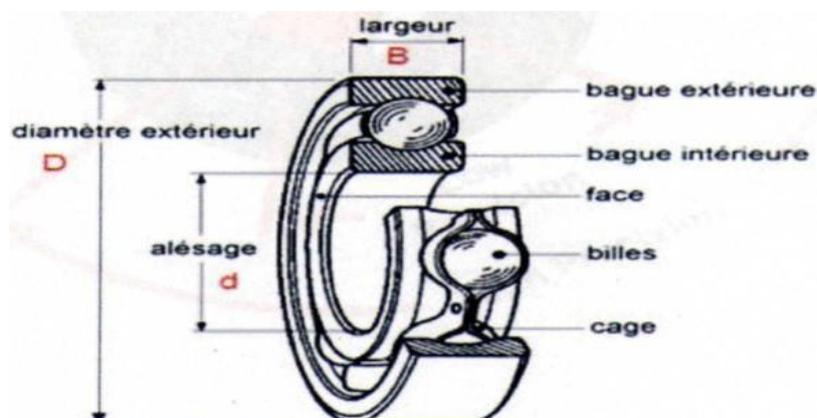
### II.7.3.2. Désalignement

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe.

### II.7.3.3. Défauts des roulements

Souvent pour le guidage en rotation, de nombreuses machines sont équipées de paliers de roulements car ils présentent une meilleure solution pour lutter contre le frottement pour les organes de machines en mouvement de rotation. Les roulements en général se constituent par :

- Bague extérieure.
- Bague intérieure.
- Cage, Bille.



## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

---

**Figure .II.14.** Roulement à billes

Dans la plupart des cas, la dégradation se traduit par un écaillage d'une des pistes ou d'un élément roulant du roulement, produisant un choc à chaque passage.

Nous pouvons trouver dans la littérature des ouvrages très complets qui traitent ces divers problèmes. Les tableaux ( 1 et 2 ) présente un peu plus explicitement les causes provocantes les défauts statoriques et rotoriques.

	<b>Défauts</b>	<b>Causes</b>
<b>Défauts statoriques</b>	Vibration du support	Un déséquilibre magnétique, mouvement des enroulements, un déséquilibre de l'alimentation, surcharge, mauvais installations, un contact avec le rotor.
	Un défaut entre le stator et la carcasse	Ecrasements des spires par la carcasse, le cycle thermique, une abrasion de l'isolant, présence des points anguleux dans les encoches, un choc.
	Défaut d'isolation	Endommagement de l'isolant lors de l'insertion des enroulements, démarrage fréquent, condition de température ou d'humidité extrême.
	Court-circuit inter spires	Température excessive, humidité, vibration, surtension.
	Court-circuit inter phases	Défaut d'installation, haute température, alimentation déséquilibrée, contrainte dérasement au niveau des enroulements.
	Déplacement des conducteurs	Choc du à un défaut, démarrage fréquent, vibration des têtes de bobines.
	Défaillance des connecteurs	Ecrasement des conducteurs, vibration excessive.

**Tableau .II.1.**Les causes des défauts statoriques de la machine asynchrone[17]

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

	Défauts	Causes
Défauts rotoriques	Défaut des roulements	Mauvais installation, déséquilibre magnétique, perte de lubrifiant, haute température ; manque de propreté, charge déséquilibrée.
	Rupture de barres	Déséquilibre magnétique, régime transitoire à longue durée, fatigue thermique.
	Défaut de circuit magnétique	Défaut de fabrication, fatigue thermique, surcharge.
	Désalignement des roulements	Défaut de couplage, surcharge, mauvais installation, jeu au niveau des paliers.
	Désalignement du rotor	Mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défauts des roulements.
	Roulement mal lubrifiés	Température excessive, mauvais qualité de lubrifiant.
	Déséquilibre mécanique	Mouvement des anneaux de court-circuit, problème d'alignement.

**Tableau .II.2.** Les causes des défauts rotoriques de la machine asynchrone [17]

### II.7.4. Défaillances du ventilateur

Si le ventilateur n'est pas correctement fixé sur l'arbre ou s'il comporte un nombre de pales cassées, on aboutit à une augmentation anormale de la température de la machine.

### II.7.5. Défauts du Carter

Elles sont généralement dues à :

- Positionnement avec un décentrage du carter sur le bâti.
- Mauvaise fabrication (si les bords du carter ne sont pas usinés correctement, les flasques sont alors décentrés par rapport à l'axe de symétrie).

En plus, si les ailettes de refroidissement (sur la surface du carter) sont sous dimensionnées, à cause d'une conception erronée, la machine risque une élévation anormale de sa température au cours du fonctionnement.

### II.8. Recherche indispensable des symptômes

Lorsque plusieurs défauts présentent les mêmes symptômes, il devient indispensable, pour l'opérateur, de rechercher systématiquement l'existence des symptômes en plus. Il faut insister d'emblée sur le fait que certains de ces symptômes ne sont pas spécifiques à un défaut en particulier et c'est l'analyse minutieuse qui doit faire montrer cela. [4]

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

---

Le diagnostic est facile lorsqu'il est fait en temps réel et lorsque les symptômes sont clairs. Le tableau ( 3 ) indique quelques modes de pannes typiques observées sur le moteur.

Symptômes	Causes probables
-Intensité réduite, Vitesse élevée et Température réduite.	- Diminution de la charge.
-Température exagérée.	- Ventilation incorrecte.
-Intensité élevée, Vitesse réduite et Température élevée.	- Surcharge.
-Intensité exagérée, Vitesse très réduite et Température exagérée.	- Blocage de rotor ; - Mauvais branchement ; - Moteur chauffé.
- Vitesse réduite.	- Moteur faible.
- Intensité de l'une des phases est exagérée et Température exagérée ; ou - Intensité de deux phases est exagérée et Température exagérée ; ou - Intensité de l'une des phases est exagérée, Température exagérée et Vitesse réduite ; ou - Intensités de deux phases sont exagérées, Température exagérée et Vitesse réduite.	-Court circuit entre spires.
- Intensité d'une phase est nulle.	- Rupture d'une phase du stator ; - Phase non alimentée.
- Intensités de deux phases sont nulles.	- les deux phases non alimentées.

**Tableau .II.3.** Pannes types observées sur un moteur [4]

Les tableaux (4) et (5) répertorient une liste non exhaustive des défaillances pouvant se produire sur une machine asynchrone en définissant son lieu d'apparition, ses causes possibles et ses effets sur le système ainsi que les différents observables possibles.

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

Composants		Défaillances	Causes possible	effets sur le système
Machine asynchrone à cage d'écureuil	Rotor	Ruptures de barres	Surcharge	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduction de la valeur moyenne de couple électromagnétique</li> <li>- Oscillations de la vitesse</li> <li>- Vibrations mécaniques</li> </ul>
		Ruptures d'anneaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dilatations différentielles</li> <li>- Surcharge du couple</li> <li>- Détérioration des conditions de fonctionnement</li> </ul>	- Déséquilibre la répartition des courants
		Excentricité	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage</li> <li>- Usure des roulements</li> <li>- Défaut de charge</li> <li>- Défaut de fabrication</li> </ul>	oscillations de couple
	Axe	Roulements	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usure</li> <li>- Température élevée</li> <li>- Perte de lubrification</li> <li>- Défaut de montage</li> </ul>	oscillations du couple de charge ↑ pertes ↑ vibrations

Tableau .II.4. Synthèse des défaillances du rotor sur la machine asynchrone

## Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.

Composants		Défaillances	Causes possibles	Effets sur le système
Machine asynchrone	Stator	Isolant dans un enroulement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dégradations de l'isolant à la fabrication</li> <li>- Tension élevée</li> <li>- Courant élevé</li> <li>- Température élevée</li> <li>- Vieillessement naturel</li> </ul>	Court-circuit dans l'enroulement
		Court-circuit entre spires	Défaut d'isolants	↑ courants statoriques, -- variation d'amplitude sur les autres phases, modification de facteur de puissance, ↑ courants rotoriques
		Court-circuit entre phases	Décharge partielle	<u>Proche de l'alimentation</u> Fusion des conducteurs Disjonction par les protections <u>Proche du neutre :</u> ↑ courants des barres et les anneaux déséquilibre des courants statoriques
		Court-circuit phase/bâti	Dégradation des isolants	↑ courant dans la phase ↑ de la température défauts d'isolants - couple pulsatoire
		Déséquilibre d'alimentation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problème sur le réseau d'alimentation</li> <li>- Défaillance du convertisseur</li> </ul>	↑ des courants dans les autres phases ↑ vibrations ↑ de l'échauffement

**Tableau .II.5.** Synthèse des défaillances du stator sur la machine asynchrone

## **Chapitre II : généralités sur les défauts affectant les machines asynchrones.**

---

### **II.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté les principaux éléments qui constituent le moteur asynchrone, ce moteur qui s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction.

Pour chaque type de défaut électrique ou mécanique, nous avons cité les causes principales, les mécanismes et les symptômes produits.

Ce chapitre donne des informations sur les statistiques récentes des défauts affectant les machines asynchrones.

Les défauts mécaniques dans la partie rotative de la machine asynchrone occupent une partie importante dans le domaine du diagnostic.

**Chapitre III :**  
**Les Méthodes De**  
**Diagnostic Dans La**  
**Machine Asynchrone**

## **Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.**

---

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

La maintenance nécessite de connaître les régimes de fonctionnement des systèmes, alors que la surveillance, donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance dans le but de garantir le bon fonctionnement des systèmes.

Le diagnostic s'intègre à la surveillance en ayant pour objectif de déterminer les causes de dysfonctionnement. la surveillance et le diagnostic des défauts, nécessitent d'obtenir des symptômes caractéristiques du fonctionnement de l'entraînement surveillé et de les analyser pour en déduire l'état du système.

L'établissement des symptômes se fait souvent en référence à la connaissance du comportement sain dont on dispose.

La forme et la méthode de génération des symptômes, sont tributaires de la forme, prise par cette connaissance.

Par exemple si le fonctionnement défaillant est mis en évidence par l'apparition des nouvelles raies spectrales dans une grandeur électrique, une analyse en traitement de signal permettra une acquisition des symptômes. Le mode de traitement des symptômes dépend de leur type mais aussi de la forme prise de la connaissance.

Traditionnellement, les symptômes du défaut sont recherchés dans les signaux mesurés: ce sont les méthodes reposant sur une approche signal.

Elles traitent en grande partie des informations issues de l'expérience. Les méthodes de surveillance et de diagnostic mises en œuvre s'orientent donc naturellement sur l'analyse du signal (sans ajout de capteur).

Une autre approche, appelée « système » basée sur des méthodes heuristiques, issues de l'expérience et de l'expertise. Des techniques d'aide à la génération et la formalisation des symptômes (mesures), ont permis de fournir une aide à l'expertise en quantifiant les symptômes (analyse de signaux électrique, vibratoire, thermique), mais l'analyse reste une affaire de règles et de classification (reconnaissance de forme, système expert..).

Ces méthodes de surveillance nécessitent une bonne connaissance du système et de ces composants.

### **III.2. Caractéristiques souhaitables d'un système de diagnostic**

Afin de pouvoir comparer diverses approches de diagnostic, il est utile d'identifier un ensemble de caractéristiques souhaitables qu'un système de diagnostic devrait posséder. Bien que ces caractéristiques ne soient habituellement possédées par aucune méthode de diagnostic

## **Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.**

---

particulière, elles sont utiles pour évaluer diverses méthodes en termes d'information à priori qui doit être fournie, de rapidité, de robustesse, d'adaptabilité, etc.

Chaque fois qu'une anomalie se produit dans un procédé, un système de diagnostic fournit un ensemble d'hypothèses de défauts qui explique les observations. L'efficacité d'un système de diagnostic demande que le défaut réel soit un sous-ensemble de l'ensemble des défauts suspectés.

La résolution d'un système de diagnostic demande que l'ensemble des défauts fournis soit aussi minimal que possible. Les paragraphes suivants présentent un ensemble de caractéristiques souhaitables qu'un système de diagnostic doit posséder. [4]

### ➤ **Rapidité et sensibilité de détection**

Un système de diagnostic devrait répondre rapidement en détectant et en diagnostiquant les mauvais fonctionnements du procédé. Cependant, les réponses rapides du diagnostic et les performances tolérables durant un fonctionnement normal sont deux buts différents.

Un système qui est conçu pour détecter un défaut rapidement sera sensible aux influences de toutes les erreurs (bruit, incertitudes...). Ceci rend le système sensible au bruit et peut déclencher fréquemment des fausses alarmes pendant un fonctionnement normal.

### ➤ **Robustesse**

On voudrait que le système de diagnostic soit robuste aux divers bruits et incertitudes. On voudrait que ses performances se dégradent lentement au lieu d'échouer totalement et abruptement. La robustesse est incompatible avec les systèmes très sensibles aux seuils. En présence du bruit, ces seuils doivent être choisis raisonnablement. Ainsi, les besoins de robustesse doivent être équilibrés avec ceux de sensibilité.

### ➤ **Identification de nouveaux défauts**

Une des fonctionnalités minimales qu'un système de diagnostic doit posséder, est de pouvoir décider, étant donné des conditions courantes de fonctionnement, si le procédé fonctionne normalement ou anormalement, s'il est anormal, et si la cause est un défaut de fonctionnement connu ou un inconnu.

## **Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.**

---

Ce critère est connu comme identification de nouveauté (nouveaux événements). En général, on dispose de données suffisantes pour décrire le comportement normal du procédé. Cependant, typiquement on n'a pas de tels historiques de données disponibles pour modéliser les modes de fonctionnement anormaux d'une manière satisfaisante.

Seuls quelques gabarits de données peuvent être disponibles pour couvrir une partie du fonctionnement anormal. Ainsi, il est possible qu'une grande partie de la région de dysfonctionnement ne puisse avoir été modélisée.

Ceci posera des défis sérieux pour l'identification de nouvelles situations. Même dans ces conditions difficiles, on voudrait que le système de diagnostic puisse identifier l'occurrence des nouveaux défauts et ne les classifie pas comme d'autres défauts de fonctionnement connus ou comme fonctionnement normal.

### ➤ **Adaptabilité**

En général les procédés évoluent en raison des changements des entrées externes ou des changements structurels. Les conditions de fonctionnement du procédé peuvent changer non seulement en raison des perturbations mais également en raison des changements des conditions environnementales telles que les changements des quantités de production avec des demandes variantes, des changements de qualité de matière première, etc.

Ainsi le système de diagnostic devrait être adaptable aux changements. Il devrait être possible de développer graduellement la portée du système pendant que les nouvelles situations émergent grâce à la disponibilité d'informations supplémentaires.

### ➤ **Identification des défauts multiple**

La capacité d'identifier les défauts multiples est un objectif important, mais difficile, à cause de l'influence simultanée de la plupart des défauts. Dans un système non linéaire général, des interactions se manifestent, et par conséquent un système de diagnostic ne peut pas employer les différents modèles de chaque défaut pour modéliser l'effet combiné des défauts. Par ailleurs, l'énumération des différentes combinaisons de défauts multiples et l'analyse de leurs effets deviennent combinatoires pour des procédés de grande échelle.

### ➤ **Estimation d'erreur de classification**

## **Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.**

---

Une condition pratique importante pour un système de diagnostic, est l'établissement des niveaux de confiance. Ceci pourrait être considérablement facilité si le système de diagnostic pouvait fournir une évaluation a priori sur l'erreur de classification qui peut se produire.

De telles mesures d'erreur seraient utiles pour projeter des niveaux de confiance sur les décisions produites par le système donnant à l'utilisateur une meilleure sensation à propos de la fiabilité des recommandations proposées par le système de diagnostic.

### ➤ **Facilité d'explication**

En dehors de la capacité d'identifier la source d'un défaut de fonctionnement, un système de diagnostic devrait également fournir des explications sur la façon dont le défaut a commencé et a évolué vers la situation actuelle. C'est un facteur très important lorsque l'on conçoit des systèmes interactifs d'aide à la décision en ligne.

Ceci exige la capacité de raisonner au sujet de la cause et des effets dans un procédé. Un système de diagnostic doit justifier ses recommandations de sorte que l'opérateur puisse en conséquence évaluer et agir en utilisant son expérience.

On voudrait que le système de diagnostic justifie non seulement pourquoi certaines hypothèses ont été proposées, mais expliquer également pourquoi certaines autres hypothèses n'ont pas été proposées.

### **III.3. Classification des méthodes de diagnostic**

Compte tenu de l'importance des enjeux en termes de productivité (arrêt inutile des installations), de sécurité (anomalie non détectée) ou de qualité de production (mesure incorrecte d'une grandeur à contrôler), de nombreuses approches ont été utilisées pour apporter une contribution à la solution du problème de diagnostic.

On distingue cependant, parmi les différentes méthodes, deux familles principales ; celles qui utilisent un modèle du système à surveiller, et utilisent généralement les techniques de l'automatique ; et celles pour qui seules les données acquises sur le procédé considéré, qui se limitent à son observation passée et présente, permettent de caractériser son mode de fonctionnement. Parmi les méthodes basées sur l'utilisation d'un modèle du procédé, deux sous-familles importantes peuvent également être dégagées ; celles utilisant un modèle qualitatif et celles recourant à un modèle quantitatif (dit aussi modèle numérique).

## Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

Pour certaines méthodes, cette distinction est cependant sans fondement, car elles utilisent de manière mixte les deux types de modèles en essayant de tirer profit des avantages et s'affranchir des limitations de chacun d'entre eux. Toutes les méthodes nécessitent une phase d'apprentissage qui permet de connaître une référence de fonctionnement normal ou dégradé. Cette référence permet de générer en temps réel les symptômes lors de la phase de diagnostic. Les sections suivantes présentent les grandes familles de méthodes de diagnostic représentées par la Figure (1). [4]

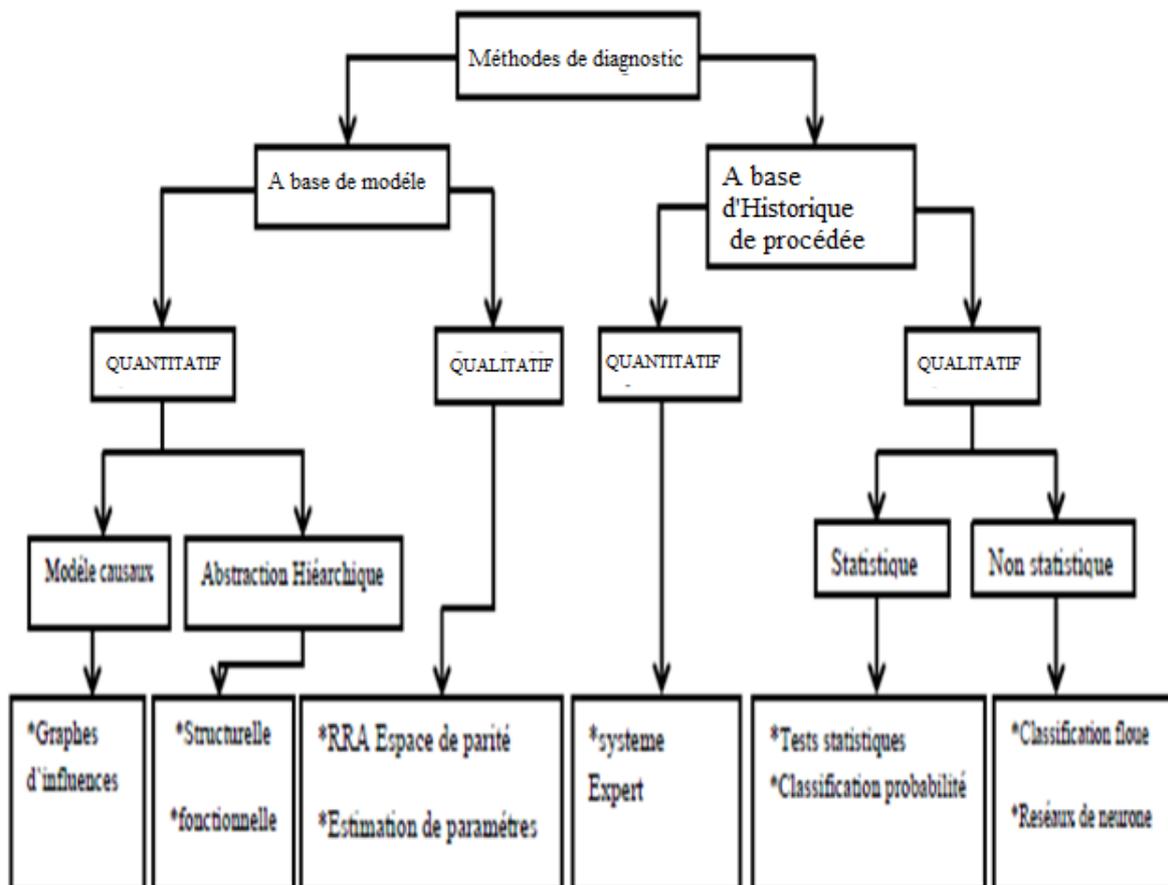


Figure .III.1. Les méthodes de diagnostic [4]

### III.3.1 Approche à base de modèle qualitatif

C'est une connaissance qui s'exprime avec des symboles et peut être traitée, en simulant la façon dont un humain raisonne logiquement, par des techniques informatiques relevant de l'intelligence artificielle. Pour construire des représentations qui permettent une meilleure compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans un procédé, l'intelligence artificielle s'intéresse au milieu des années 1980 au raisonnement qualitatif. Le

## Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

---

développement de techniques de représentation qualitative du monde pour en comprendre schématiquement le fonctionnement est une idée très naturelle et par conséquent très ancienne. On trouve dans la proche qualitative (Modèles causaux, Abstractions hiérarchiques).

### III.3.2 Approche à base de modèle quantitatif

L'utilisation de modèle mathématique pour le diagnostic est très largement répandue. Les méthodes de surveillance à base de modèle (Model-based-FDI: Fault Detection and Isolation) utilisent un modèle et reposent sur la génération et l'étude d'un signal particulier appelé indicateur de défaut ou résidu.

**Un résidu** : est un signal qui reflète la cohérence des données mesurées vis-à-vis d'un modèle comportemental du système. Les modèles utilisés peuvent être de nature et de complexité différente. Ils peuvent être : à temps continu ou à temps discret, linéaires ou non linéaires, représentant le bon fonctionnement ou tenant compte des défaillances. Les sorties du modèle se représentent classiquement sous la forme de valeurs numériques.

**La localisation** : qui suit la détection peut être effectuée à l'aide d'une table de signature ou matrice d'incidence. Les colonnes de cette table sont représentatives des différents défauts et les lignes des différents résidus. Un 1 représente le symptôme qui indique que le résidu est sensible au défaut, un 0 le contraire. La signature d'un défaut (colonne de la matrice) définit l'état des symptômes lorsque ce défaut affecte le système (l'état est une grandeur logique ou symbolique).

**En surveillance** : par contre, il est parfois nécessaire de compléter le modèle afin de caractériser le comportement défaillant du système. Suivant la classe de modèle considérée, les techniques de génération de résidus seront différentes. Suivant le niveau de connaissance sur les défaillances, les résultats de la procédure de surveillance seront plus ou moins précis et complets.

### III.3.3 Approche à base d'extraction de caractéristiques qualitatives

Ces méthodes ont l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance d'un modèle mathématique ou structurel du procédé, contrairement aux méthodes à base de modèles. Seulement, la disponibilité de grandes quantités de données historiques du procédé est nécessaire. Il y a diverses façons de traiter ces données et de les présenter en tant que

## **Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.**

---

connaissance a priori pour le diagnostic. Ceci est connu comme l'extraction de caractéristiques. Parmi les méthodes d'extraction de caractéristiques qualitatives, se trouvent les méthodes à base de règles (systèmes experts), et les méthodes de représentation et analyse qualitative des tendances.

Dans la section précédente, on a vu la méthode basée sur l'extraction de caractéristiques qualitatives. Dans cette section, on va évoquer la méthode qui extrait les caractéristiques quantitatives. On peut analyser les signaux issus de l'instrumentation et proposer pour chacun de ces signaux un modèle.

### ➤ **La méthode statistique**

Comme test d'hypothèses, classification probabilistes, analyse en composante principales moindres carrés partiels, cette méthode est, en fait, une référence du comportement d'un signal, qui peut être représentative de l'état normal de l'installation ou d'un défaut particulier.

### ➤ **Les méthodes non statistiques**

On peut citer la classification floue, réseaux de neurones, méthodes de signature, méthodes fréquentielles, temps-fréquence et temps-échelle. La méthode non statistique est une autre méthode de représentation pour un signal qui peut très bien être utilisée comme référence pour le diagnostic, est sa représentation par un spectre de fréquences, une signature graphique, ou encore l'extraction d'attributs (ou caractéristiques), à partir des données suivie de leur classification, qui permettent, pour des procédés dont on veut analyser plusieurs signaux liés entre eux, de discriminer divers modes de fonctionnement, dont le mode normal et certains modes de défaillance.

### **III.4. Méthodes basées sur une approche système**

Plusieurs méthodes ont été développées dans la littérature basée sur les réseaux de neurones, la reconnaissance de formes (RDF), le neuro-floue, les algorithmes génétiques, les représentations temps fréquence (RTF). Toutes ces méthodes tendent à automatiser le processus de diagnostic depuis l'acquisition des données sur la machine jusqu'à la prise de décision sans l'intervention d'un expert. Dans cette partie, nous allons présenter quelques-unes de ces techniques ainsi que leur application dans le domaine du diagnostic de la machine électrique. [17]

## Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

---

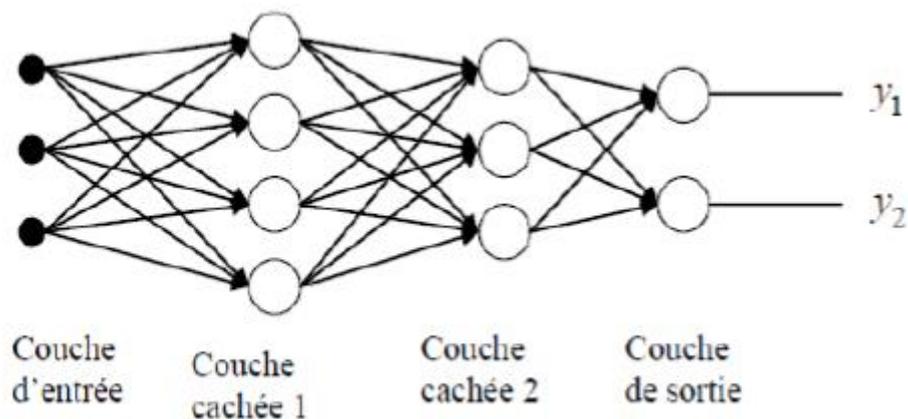
### III.4.1 Réseaux de neurones

Le principe des réseaux de neurones s'inspire des neurones biologiques. Le modèle du neurone formel se comporte comme un opérateur effectuant une somme pondérée de ses entrées, suivie d'une non linéarité, appelée fonction d'activation, responsable du comportement du neurone.

Un réseau de neurones comprend un certain nombre de couches de neurones interconnectés. Couches d'entrées, couches cachées et couches de sortie. L'entrée représentée par les nœuds de sources fournit des poids d'accès physiques pour l'application des signaux d'entrées.

Les neurones dans la couche cachée, se comportent en détecteurs de caractéristique, tandis que, les neurones dans la couche de sortie présentent à l'utilisateur les conclusions obtenues par le réseau, ou la réponse aux signaux d'entrées (figure 3). Une loi d'apprentissage permet d'ajuster les poids des connexions afin d'avoir les performances désirées. [24]

L'initialisation du réseau de neurones est un processus itératif d'ajustement des poids et des biais de manière à minimiser un critère d'erreur. Elle constitue la phase d'apprentissage.



**Figure .III.2.** La structure générale de réseau de neurones [4]

Les avantages des réseaux de neurones :

- La rapidité, très utile lorsque le diagnostic doit être conduit en ligne.
- Un réseau de neurones est robuste surtout vis-à-vis du bruit.

## **Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.**

---

Toutefois un réseau de neurone présente des inconvénients :

- L'apprentissage peut être lent et difficile.
- L'apprentissage est gourmand en temps de calcul. Par ailleurs, il doit être réalisé sur toutes les données à la fois, avec le risque que le réseau oublie les résultats précédents.
- Il est nécessaire de posséder des jeux de données sur toutes les conditions de fonctionnement et en particulier pour les fonctionnements défectueux.
- Un réseau de neurones ne fonctionnera pas forcément correctement hors de sa plage d'apprentissage.
- Une fois entraîné, un réseau de neurones n'est pas flexible. Si de nouvelles données interviennent, il faudra recourir à un nouvel apprentissage. Cependant celui-ci peut être effectué en ligne.

L'intérêt des réseaux de neurones dans le domaine de diagnostic se résume en deux points :

- Le premier point est la faculté de réseau de neurones d'être utilisé en tant que règle de décision dans un processus d'automatisation de l'opération du diagnostic
- Le second point est la faculté d'apprentissage et de mémorisation d'un grand volume d'information.

### **III.4.2 Reconnaissance de forme (RdF)**

La Reconnaissance des formes (RdF) repose sur le classement des objets ou formes en les comparant à des formes-types. De manière générale, deux types de RdF se distinguent :

- La RdF structurelle qui se base sur une représentation des formes à l'aide de grammaires[23]. Cette approche ne sera pas développée par la suite.
- La RdF statistique qui s'appuie sur une représentation numérique des formes [17].

L'auteur [18] a appliqué la RdF, pour le diagnostic des défauts de la machine asynchrone. Un vecteur de paramètres, appelé vecteur forme, a été extrait de chacune des mesures effectuées sur la machine. Les règles de décisions utilisées ont permis de classer les observations décrites par le vecteur forme, par rapport aux différents modes de fonctionnement connus avec ou sans défaut. Cette approche permet une classification avec un taux d'erreur presque nul. Toutefois les performances de cette méthode sont liées au choix du vecteur forme. [19] propose une méthode de sélection des paramètres basée sur un

## Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

---

l'algorithme génétique. Il permet une réduction notable de la dimension de ce vecteur sans perte sensible d'information.

L'approche RdF est une méthode bien adaptée au domaine du diagnostic des défauts. Elle requiert une phase d'apprentissage qui peut être non supervisée. Mais ces méthodes requièrent des volumes de calcul important, parfois incompatible avec une exploitation temps réel.

Nous avons fait évoluer ces méthodes de classification dans un souci de réduction du temps de calcul et d'efficacité. Nous avons contribué au développement d'une nouvelle approche, système, exploitant une représentation Temps-fréquence et un critère de décision.

Cette méthode est souple, facile à mettre en œuvre. Elle se base uniquement sur le traitement du courant de phase statorique. Par conséquent, cette méthode se prête bien pour un diagnostic en ligne.

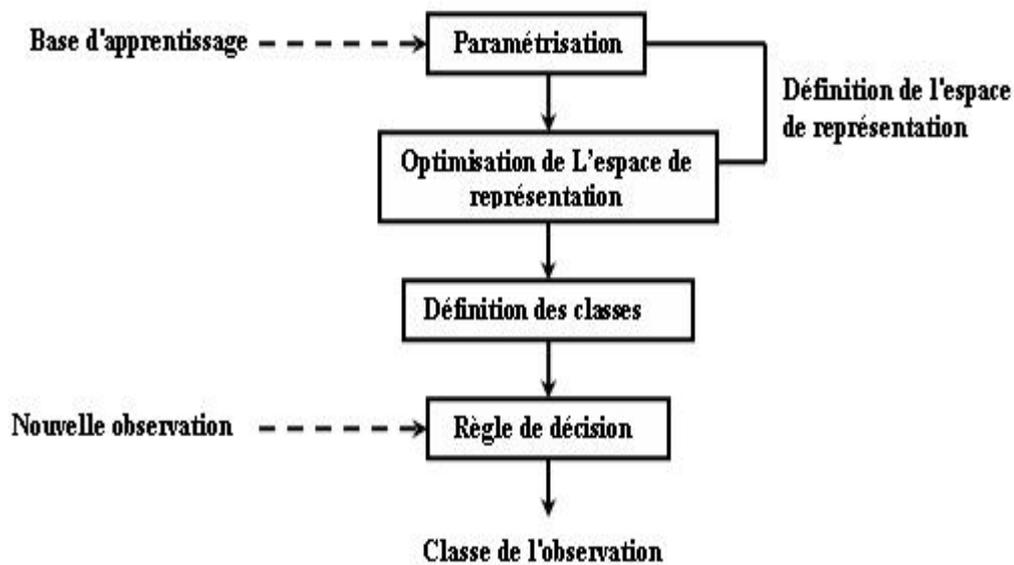


Figure .III.3. Différentes étapes du diagnostic par RDF [4]

### III.5. Méthodes reposant sur une approche signal

Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que : les courants, les puissances, le couple, la vitesse, le flux, les vibrations, ...etc. Dans ce que suit, on

## **Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.**

---

présente brièvement les transformées de Hilbert (TH), Fourier rapide (TFR), Fourier à fenêtre glissante (TFFG) et la transformée en ondelettes (TO).

### ➤ **Transformée de Hilbert (TH)**

C'est une technique parmi les plus connues dans le domaine du traitement de signal. Elle peut être utilisée pour analyser les signaux dans les différents secteurs techniques même en diagnostic [23]. Contrairement à la transformée de Fourier, qui transforme un signal issu du domaine temporel en un signal exprimé dans le domaine fréquentiel, la transformée de Hilbert (TH), ne change pas le domaine du signal. En effet, la transformée de Hilbert d'un signal dépendant du temps.

### ➤ **Transformée de Fourier Rapide (TFR)**

La transformée de Fourier rapide (TFR) est une technique largement utilisée pour la détection des défauts dans les machines asynchrones. Elle donne de bons résultats pour des fonctionnements à forte puissance ou à couple constant mais des difficultés apparaissent pour les fonctionnements à couple de charge, vitesse de rotation et tensions d'alimentation variables. La nécessité de trouver d'autres techniques de traitement de signal pour les signaux non stationnaires devient donc nécessaire.

### ➤ **Transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFFG)**

Pour pallier le manque d'information sur le temps dans la transformée de Fourier, la TFFG est donc introduite. Cette méthode, pouvant être adaptée aux signaux non stationnaires, est très proche de l'analyse de Fourier classique. Son principe est de définir une fenêtre qui sera utilisée comme masque sur le signal, dans laquelle on considère que le signal est localement stationnaire, puis on décale cette fenêtre le long du signal afin de l'analyser entièrement[19].

## **III.6. Autres méthodes de diagnostic**

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur.

Pour remédier au problème de détection des défauts, il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et

## Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

---

la mesure (mesure de champ magnétique, mesure de bruit) d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut (courant statorique, couple et vitesse) (Figure 4). [20]

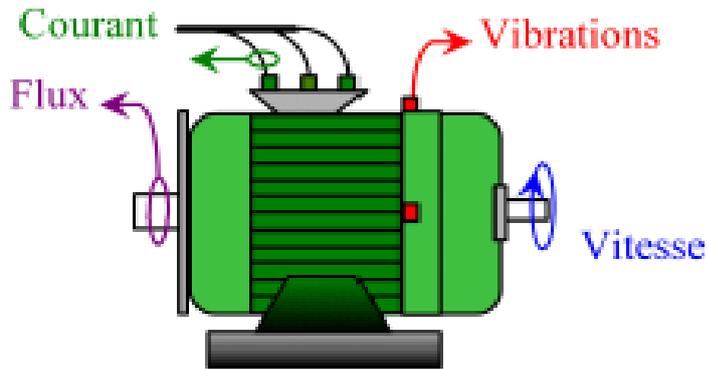


Figure .III.4. Les différentes grandeurs de diagnostic dans une machine [20]

Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : les techniques mécaniques, les techniques chimiques et les techniques magnétiques et électriques.

### III.6.1 Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer, est le produit de la F.m.m ( $F_m$ ) et de la perméance ( $P$ ).

$$B_s = F_m \times p_m \quad (\text{III.1})$$

**$B_s$**  : l'induction magnétique.

**$F_m$**  : La force magnétomotrice.

**$P_m$**  : la perméance magnétique.

## Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

---

La force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor, en plus la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques et rotoriques, l'excentricité).

Pour la surveillance de vibrations on utilise des capteurs tels que les accéléromètres. Des balourds magnétiques, mécaniques et/ou des forces produisent des vibrations. Ces dernières sont mesurées suivant la direction radiale ou la direction axiale. Les mesures ainsi effectuées sont analysées du point de vue spectrale.

Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque le moteur est en bon état. Ceci permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques (défauts d'enroulements statoriques, irrégularité d'entrefer et asymétrie de l'alimentation).

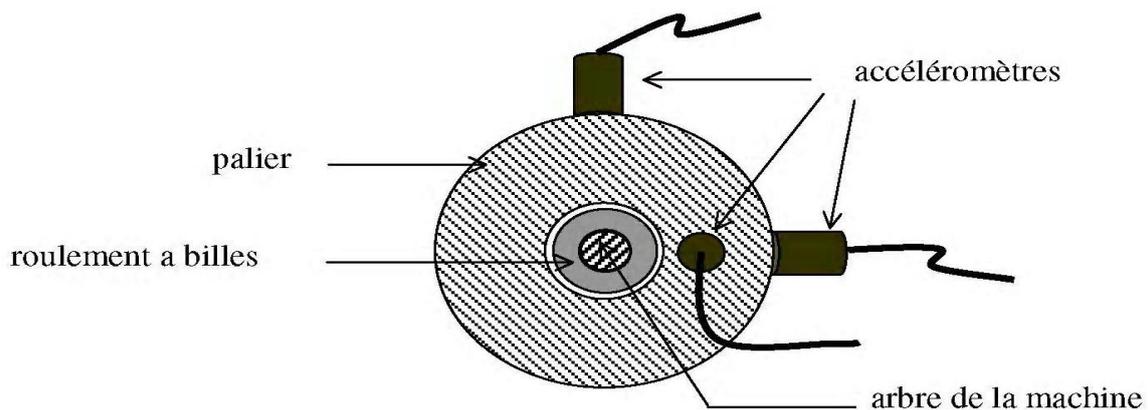


Figure .III.5.Mesures vibratoires sur la machine asynchrone [4]

### III.6.2 Diagnostic par mesure de flux magnétique

Dans une machine idéale sans défaut, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator, ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut.

Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. L'analyse spectrale de la tension induite dans cette bobine, peut être exploitée pour détecter les différents défauts comme la rupture de la barre rotorique.

## Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

---

La conséquence directe d'un défaut est l'augmentation du flux de fuite axial. Cette augmentation du flux est la condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite axial comme une technique de diagnostic, c'est-à-dire ce dernier doit avoir une valeur importante.

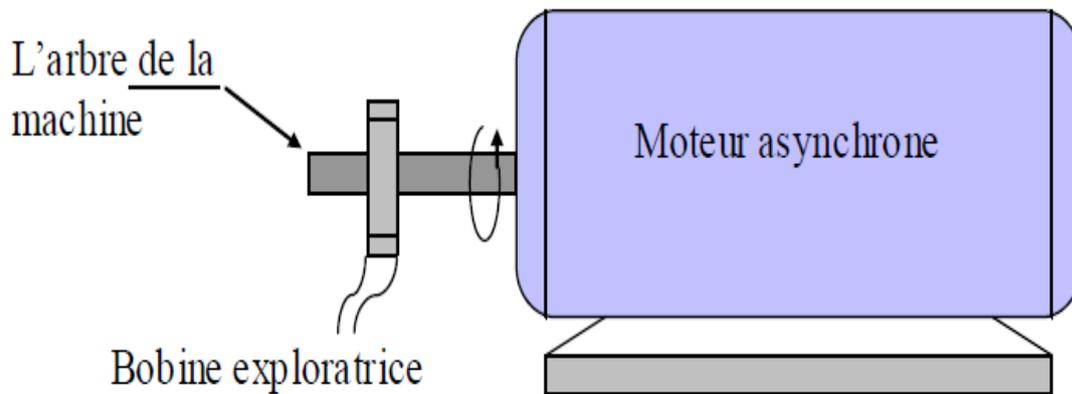


Figure III..6. Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial [21]

### III.6.3 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur.

### III.6.4 Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet des nombreux travaux [4]. Car la puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques.

## Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

---

Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase (oscillations plus importantes et plus visibles). Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres.

### III.7. Techniques d'analyse (surveillance)

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance, il existe différentes techniques d'analyse (figure 7) tels que :

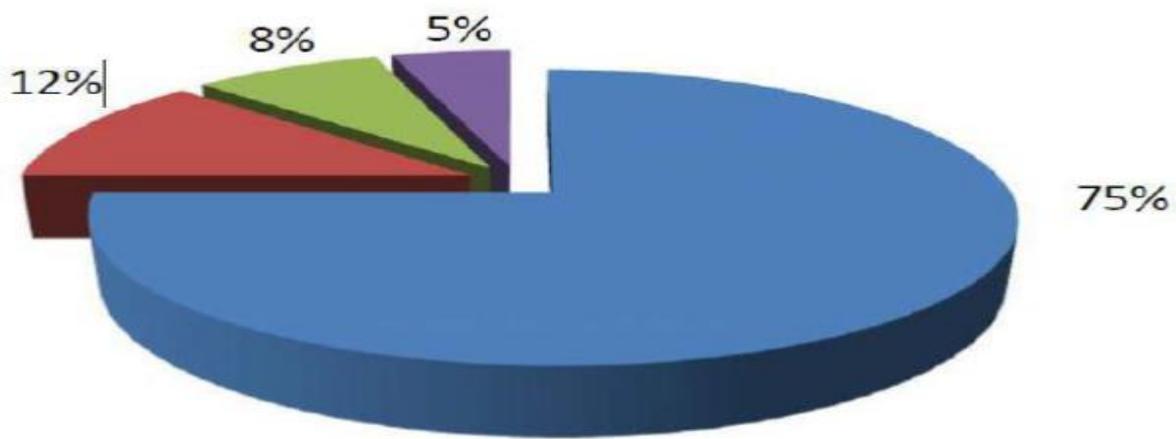
- la mesure de vibrations.
- la thermographie infrarouge.
- l'analyse des mesures ultrasonores.
- l'analyse du bruit.

Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts, on établit une courbe d'évolution de l'indicateur au cours du temps.

Sur cette figure, on définit différents seuils correspondant à un niveau d'alerte, à une alarme, à un niveau de défaillance, ces niveaux sont établis soit par expérience soit en appliquant une norme pour les roulements, on utilise des abaques de sévérité vibratoire pour définir les différents seuils. [17]

#### Pourcentage d'utilisation de différentes méthodes dans le monde.





**Figure .III.7.**Différentes méthodes d'analyse [21]

### **III.7.1 L'analyse vibratoire**



**Figure .III.8.** analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus utilisée car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines asynchrones. [17]

#### **A. Objectifs d'analyse vibratoire**

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- la détection des défauts.
- l'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

## Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

---

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

### B. Les avantages

- détection de défauts à un stade précoce,
- Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi,
- autorise une surveillance continue,
- permet de surveiller,
- l'équipement à distance.

### C. Les inconvénients

- spectres parfois difficile interpréter.
- dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses.

### D. Champs d'application privilégiée

Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc...) Et de sa structure.

#### ❖ Définition d'une vibration

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va-et-vient autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre, si l'on observe le mouvement d'une masse suspendue à un ressort on constate qu'il se traduit par :

- **Un déplacement** : la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre.
- **Une vitesse de déplacement** : variation du déplacement par rapport au temps.
- **Une accélération** : variation de la vitesse par rapport au temps.

Caractéristiques d'une vibration : Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature.

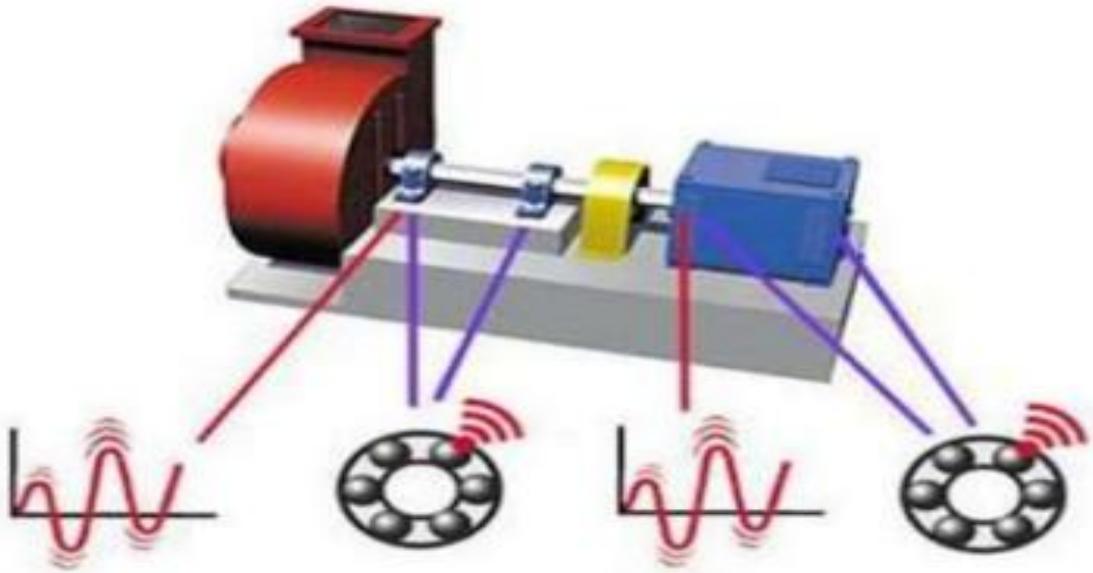


Figure .III. 9. Sources de vibration [22]

### ❖ Les capteurs de vibration

La première étape conduisant à l'obtention d'une lecture de vibration consiste à convertir la vibration mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent.

Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations, on retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés le proximètre (mesure de déplacement), la vélocimétrie (mesure de vitesse) et l'accéléromètre (mesure d'accélération).

#### • Les proximètres

Le proximètre, ou sonde capteur de déplacement sans contact directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor, il est monté en permanence à l'intérieur du palier (figure 10), les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence, ces mesures seront limitées aux basses fréquences (< 100 Hz).



Figure .III.10.prosimètres et leur driver [17]

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications où la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers s'avèrent essentielle.

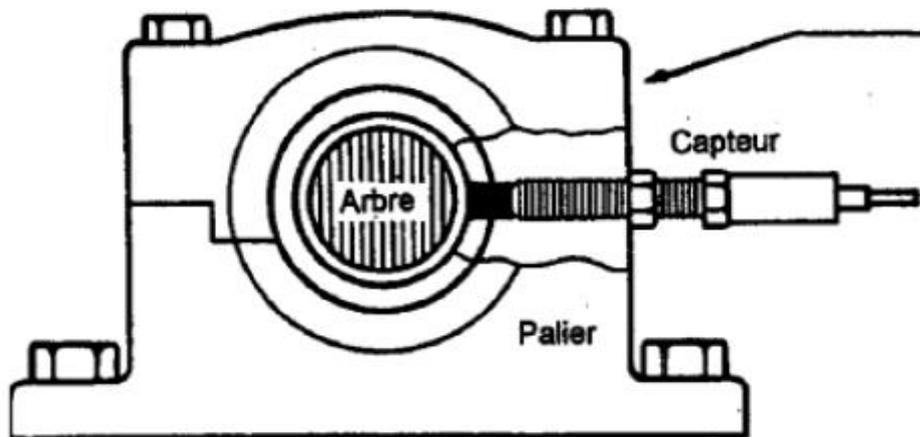


Figure .III.11. prosimètre monte sur un palier [17]

- **Vélocimétrie**

Les capteurs de vitesse, ou vélocimétrie, sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée.



Figure .III.12. capteur de vélocimétrie [17]

- **Les accéléromètres**

Un accéléromètre piézoélectrique (figure 13) est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte.

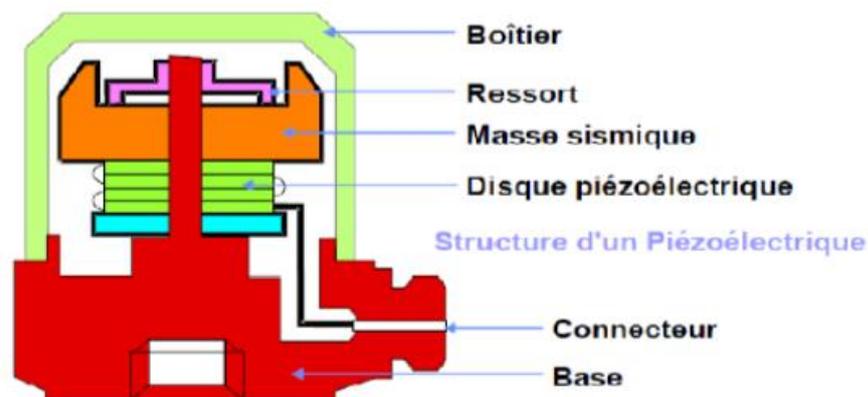


Figure .III.13. Schéma de principe d'un accéléromètre [17]

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB).

## Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

---

- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.

### III.7.2 L'analyse par thermographie infrarouge



Figure .III.14.thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est la science de l'acquisition et de l'analyse d'informations thermiques à l'aide de dispositifs d'imagerie thermique à distance.

La thermographie infrarouge est utilisée dans le domaine de la surveillance conditionnelle de fonctionnement pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le flux de production et réduire au maximum les coûts d'entretien.

La technologie de détection par thermographie infrarouge est devenue un moyen irremplaçable de garantir la sécurité des conditions de production industrielle. Son utilisation est commune à des secteurs de l'industrie aussi divers que la métallurgie et l'énergie électrique. [23]

Cette méthode de détection ne nécessite aucune coupure de courant, n'exige ni arrêt des machines, ni interruption de la production. Elle permet de diagnostiquer à l'avance les dysfonctionnements latents, et ainsi de prévenir l'occurrence des pannes, d'éviter les incidents de production. L'imagerie thermique est une technique innovante d'évaluation «sans-contact», à la fois sûre, fiable, et rapide. [23]

### Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

---

Une caméra thermique ne mesure pas des températures mais des flux de rayonnement. Après le réglage de certains paramètres par l'opérateur en thermographie, la caméra calcule alors les températures de la cible. [23]

Elle fournit ensuite à l'utilisateur une cartographie des températures, appelée thermogramme ( figure 15).

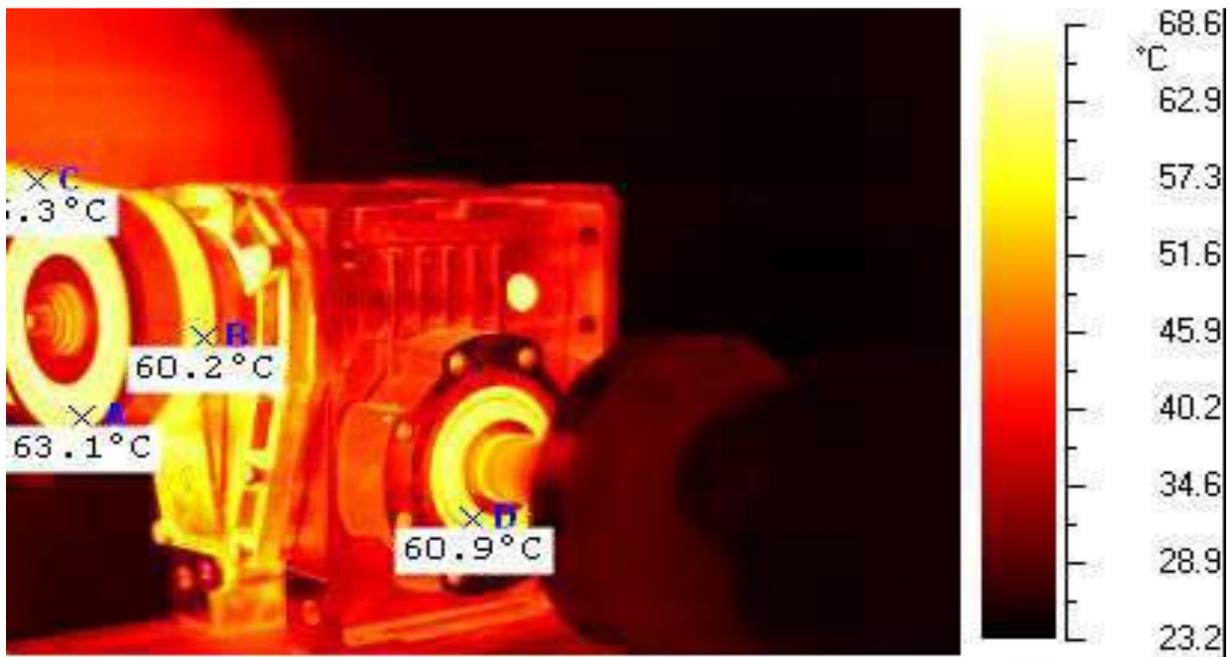


Figure .III.15. Thermogramme usure de palier [23]

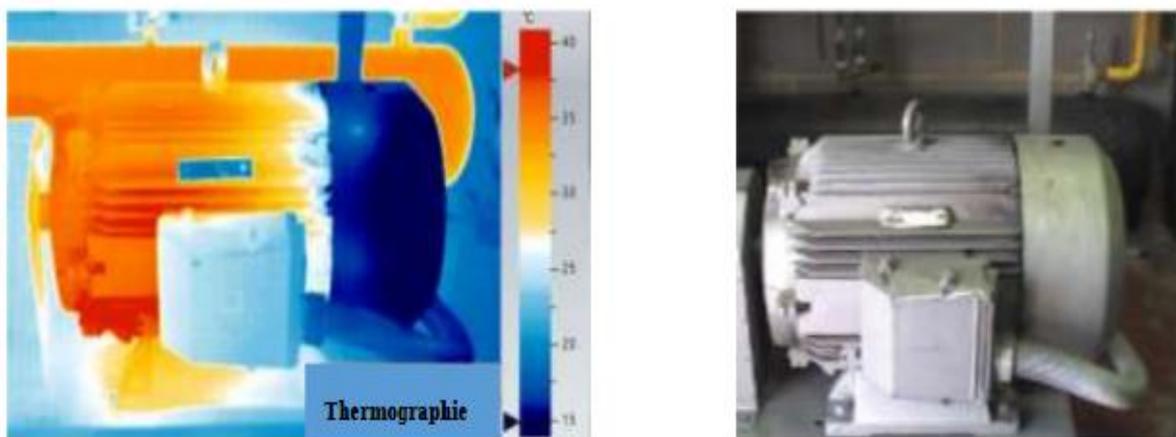


Figure .III.16. Thermographie d'un moteur asynchrone [22]

La thermographie infrarouge est utilisée tant qu'outil de diagnostic permettant l'estimation de la qualité d'un équipement ou une installation en exploitation normale. Elle permet aussi de prévenir les irrégularités de fonctionnement bien avant les pannes effectives.

## Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

Le processus d'inspection par thermographie infrarouge est illustré sur le diagramme de la (figure 17). [29]

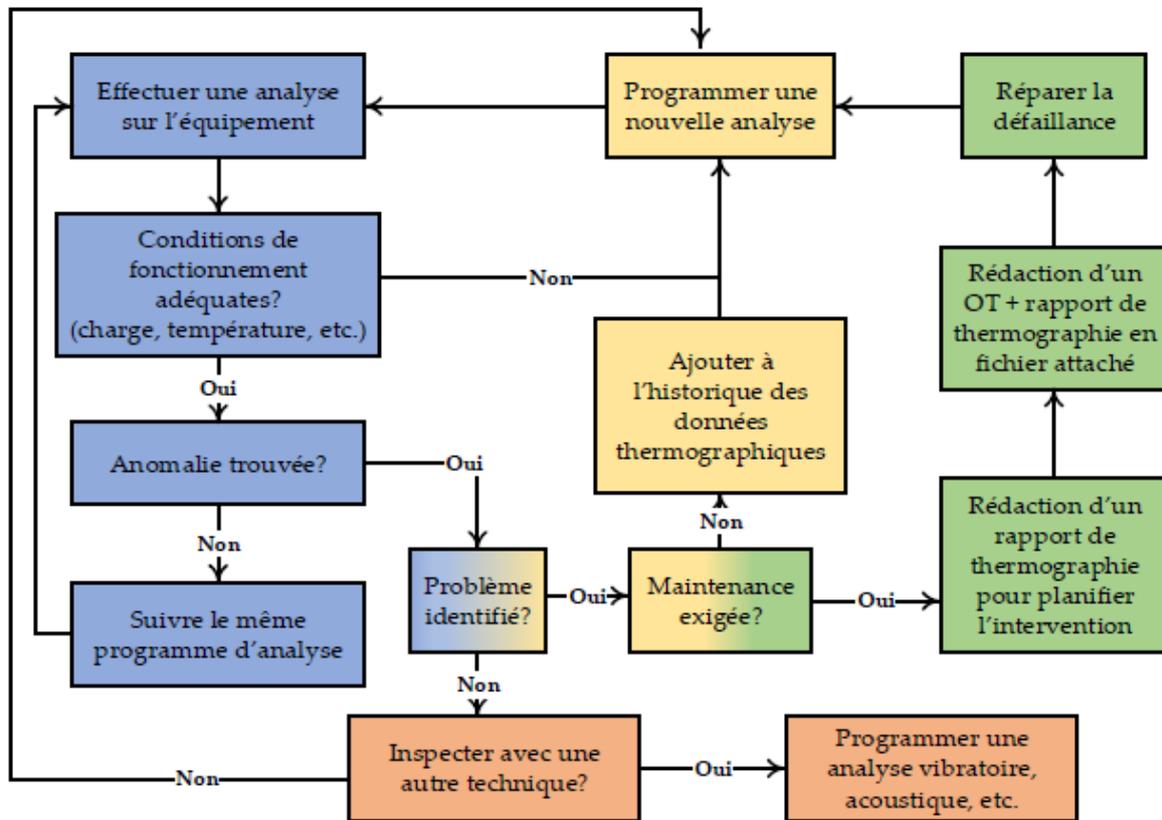


Figure .III.17. Processus d'inspection par thermographie infrarouge [23]

### III.7.3 Analyse par mesure ultrasonore



Figure .III.18. Utilisation des ultrasonores

## **Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.**

---

Certains instruments ultrasonores sont sensibles à la détection d'émissions sonores de très hautes fréquences comprises entre 20 kHz et 100 kHz. Cette large bande de détection accroît la pertinence du diagnostic. Les signaux sont alors transformés par hétérodynage en fréquences audibles. La technique consiste à émettre une onde ultrasonore et à mesurer le temps de réception des échos de l'onde à l'aide d'un capteur piézoélectrique. [22]

Les Ultrasons dit "classiques" permettant de déceler des indications au cœur de la matière en utilisant des transducteurs de type Ondes longitudinales ou à Ondes transversales. Les mesures d'épaisseurs permettent de vérifier l'usure et l'épaisseur restante d'un matériel. (En établissant si besoin, une cartographie des zones examinées et d'étudier son évolution dans le temps).[30]

L'investissement à prévoir pour ce type de mesure va de 1500 DT, pour un simple contrôleur, à 15 000 DT pour un détecteur enregistreur collecteur de données qui peut également enregistrer des mesures de température, de bruit, de vitesse de rotation et de débit de fuite.

### **III.7.4 Analyse du bruit**

Le changement de bruit est souvent un phénomène créé par une défaillance et la mesure du bruit des machines par mesure des vibrations [ISO 7849 (1987)] peut être un indice de défektivité. Le stéthoscope, qui comprend un casque et une sonde, est un instrument qui permet par contact de détecter les composants défectueux par l'écoute des bruits de la machine, pour des fréquences variant entre 30 et 15 000 Hz. [22]

La technique consiste à comparer subjectivement les bruits avec des bruits de référence déjà préenregistrés.

## Chapitre III : les méthodes Et Techniques de diagnostic de la machine asynchrone.

---



Figure .III.19.Analyse du bruit [22]

### III.8. Conclusion

La maintenance nécessite de connaître les régimes de fonctionnement des systèmes, alors que la surveillance, donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance dans le but de garantir le bon fonctionnement des systèmes.

Le diagnostic s'intègre à la surveillance en ayant pour objectif de déterminer les causes de dysfonctionnement. la surveillance et le diagnostic des défauts, a pour objet d'obtenir des symptômes caractéristiques du fonctionnement de l'entraînement surveillé et de les analyser pour en déduire l'état du système.

Ce chapitre est consacré à l'analyse de deux approches l'approche signal et l'approche système, un ensemble de techniques et de méthodes a été exposée ( traiter ).

L'approche signal traitent en grande partie des informations issues de l'expérience. Les méthodes de surveillance et de diagnostic mises en œuvre s'orientent donc naturellement sur l'analyse du signal. Les outils de traitement du signal font appel à des méthodes statistiques (changement de moyenne, rupture de modèle, analyse spectrale, analyse temps-fréquence).Une autre approche, appelée « système » basée sur des méthodes réseaux de neurones et reconnaissance de forme, issues de l'expérience et de l'expertise.

Ces méthodes de surveillance nécessitent une bonne connaissance du système et de ces composants.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

---

Au cours de ce travail, nous avons présenté une étude sur la surveillance et diagnostic des défauts des machines asynchrone. L'assurance de la continuité de fonctionnement des moteurs asynchrones nécessite la mise en place des programmes de maintenance.

Pour cela nous avons présenté une étude générale sur les moteurs asynchrone, leur constitution, leurs rôles, les principes de fonctionnements, et les différents défauts et nous avons présenté une étude statistique des défaillances de la machine asynchrone.

Ce travail a porté sur le diagnostic des défauts de la machine asynchrone. Trois types de défauts ont été traités à savoir le défaut statorique, le défaut rotorique et les défauts mécaniques.

Nous avons dressé une liste non exhaustive de nombreuses défaillances à travers le descriptif de l'état de la machine.

Pour chaque type de défaut électrique ou mécanique, nous avons cité les causes principales, les mécanismes et les symptômes produits. En constate que les défauts mécaniques dans la partie rotorique de la machine asynchrone occupent une partie importante dans le domaine du diagnostic.

Nous avons ensuite présenté les différentes approches à base de modèle qualitatif et à base quantitatif, les méthodes et autres outils de diagnostic étant très nombreuses, nous les avons classées en deux approches:

- une approche signal basée sur le traitement de signal des grandeurs mesurables, à savoir le courant et la tension.
- Une approche système, en l'occurrence la classification par les représentations temps-fréquence.

Le chapitre trois a traité les différentes techniques de détection des défauts, nous avons présentés plusieurs techniques qui peuvent être utilisé seul ou d'une façon multiples, cela consiste dans tous les cas à estimer et suivre l'état de marche du matériel en fonctionnement, de manière à détecter des anomalies et programmer à l'avance les interventions de maintenance.

L'art de détection des défaillances et du diagnostic consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à un état de défaillance et donc de panne.

Le diagnostic d'un système matériel désigne toute méthode permettant de déterminer si une machine est défaillante ou non et de déterminer l'origine de la panne à partir des informations relevées par observation, contrôles et tests.

Cette méthode peut se présenter sous diverses natures et divers supports. Il peut s'agir :

- d'un algorithme de détection électronique ou informatique.
- d'un arbre de défaillance.
- d'un simple test visuel.

# **BIBLIOGRAPHIE**

## **BIBLIOGRAPHIE**

[1] Chakour C., Harkat M-F., and Djeghaba M. (2013). Adaptive kernel principal component analysis for nonlinear dynamic process monitoring. In Control Conference (ASCC), 2013

[2] A. Villemeur, 'Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels – Fiabilité – Facteurs humains – Informatisation', *vol 67 de collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France*, Eyrolles, 1988.

[3] Cours introduction à la GMAO, de AIT MOKHTAR, université de bejaia.2019.

[4] V. Devanneaux, 'Modélisation des machines asynchrones triphasés à cage d'écureuil en vue de la surveillance et du diagnostic', *Thèse de doctorat*, INPT, France, 2002.

[5] Abdelghani.Chahmi , Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée audiagnostic

[6] Lebaroud A.`` Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables``.Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Alegria, 2006

[7] Chakour-Chouaib ; these Diagnostic et surveillance des procédés industriels et de leur environnement sur la base de l'analyse de données (2016).

[8] Makara KHOV ;these doctorat Surveillance et diagnostic des machines asynchrones à aimants permanents :Détection des courts-circuits par suivi paramétrique.le 19 decembre 2009.

[9] These \_medoud, SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES MACHINES ELECTRIQUES. Par MEDOUED AMMAR en 2012.

[10] Bachir S, « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2002.

[11] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outil paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.

[12] Kerszenbaum L. and Landy C. F., "The existence of large interbar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and end-ring faults" IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. 103(7), pp.1854-1862, 1984.

[13] Y. Laamari, "Diagnostic des défaillances dans les systèmes électromécaniques" Thèse de doctorat, Université badji mokhtar annaba, 2016.

[14] Lebaroud A., «Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables», Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Alegria, 2006.

[15] Metatla A., Bahi T., Hadjadj I. and Medoued A, "Failure detection of eccentricity in asynchronous machine". International Conference of System and Computer, 25-27 November 2008, Cairo. Egypt, 2008.

[16] ABA. A, « Diagnostic vibratoire sur des pompes rotatives EP2 & P112 ». Rapport de Fin de Mise en Situation Professionnelle du Technicien Supérieur en Mécanique Industrielle, DIRECTION REGIONALE HAOUD BERKAOUI (2015).

[17] Diagnostic et détection des défauts mécaniques affectant les systèmes électromécaniques. B Fouzi - 2019 - biblio.univ-annaba.dz

[18] Casimir R. Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2003

[19] Ondel O. Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone. Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006

[20] Hubert Razik et Gaëtan Didier, "Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone", Notes de cours, I.U.F.M. de Lorraine, Maxeville, 7 janvier 2003.

[21] Etude des Défaits dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée. Mr HARIR Miloud 2008/2009.

[22] [https://www.researchgate.net/publication/340563444\\_Diagnostic\\_des\\_defauts\\_Cours\\_et\\_Travaux\\_diriges](https://www.researchgate.net/publication/340563444_Diagnostic_des_defauts_Cours_et_Travaux_diriges)

[23] Cours M2 maintenance industrielle Technique de détection des défaillances Analyse par thermographie infrarouge. Prof AIT MOKHTAR. université de bejaia 2019/2020.