

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2023



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

**Domaine:** Sciences et Technologie

**Filière:** Electrotechnique

**Spécialité:** Réseaux électriques

**Par:** KALKOUL Aissa

### Thème

**L'amplification de mouvement en tant qu'outil de diagnostic**

Soutenu publiquement, le 18/06 /2023 , devant le jury composé de:

M. KACHI Miloud

Professeur

Univ. Guelma

Président/Encadreur

M. REMADNIA Mokdad

MCA

Univ. Guelma

Examinateur principal

M. BOUCHEKHA Abdelhafid

MAA

Univ. Guelma

Examinateur

**Année Universitaire: 2022/2023**

# Remerciements

*Ma gratitude va au Tout-Puissant pour m'avoir accordé cette opportunité.*

*J'ai besoin de force pour atteindre mes objectifs et mener à bien mes tâches.*

*Ma gratitude va au Professeur KACHI Miloud, qui ma a guidé tout au long de ce projet. Je tiens à lui exprimer mes sincères reconnaissances pour sa disponibilité sans faille, ses précieux conseils, son attitude patiente, son soutien constant et ses encouragements indéfectibles.*

*Sans sa direction dévouée, cette thèse n'aurait pas vu le jour.*

*Je veux exprimer ma gratitude aux professeurs de l'Université de Guelma, en particulier ceux du département de génie électrotechnique et automatique pour leur patience et leur soutien sans faille.*

*J'exprime ma profonde gratitude à mes parents pour leur amour indéfectible, leurs précieux conseils et leur soutien inconditionnel, qu'il soit émotionnel ou financier, qui m'a permis de poursuivre les études souhaitées et de terminer ce mémoire.*

*Enfin j'adresse tous mes remerciements les plus sincères à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.*

# Dédicace

*Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU de m'avoir donné la force et le  
Courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Je dédie cet humble travail, fruit des longues années de mes études à :  
Ma mère qui m'a donné la vie, l'espoir et la tendresse.*

*Mon très cher père pour lequel les mots ne suffiront jamais pour le  
Remercie.*

*A mes frères MAHDI, AMINA, TAKOUA, TAKI, CHAHD*

*Aussi, je dédie ce mémoire :*

*A tous mes amis, spécialement à HAITHEM, DAYAA, BORHAN, ATEF,  
KARIM, ZICOU, YASSIN*

*A tous mes collègues : YASSER, CHAMSOU, BOUTHEYNA, AZIZ*

*A tous mes amis passionnés dans les tribunes.*

*Et toutes mes connaissances et compagnons de parcours.*

*A tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et  
universitaire.*

*A tous mes enseignants.*

*Et à tous ceux qui j'estime et m'estiment.*

# Sommaire

Introduction générale	01
<b>CHAPITRE I – Etat de l’art sur les défauts dans les machines électriques</b>	
I.1. Introduction	03
I.2. La construction de la MAS	03
I.2.1. Le stator	04
I.2.2. Le rotor	05
I.2.3. Les paliers	05
I.3. Les défauts des machines électriques	06
I.3.1. Etudes statistiques	07
I.3.2. Défaillances d’ordre électrique	09
I.3.2.1. Défaillances des circuits électriques rotoriques	10
I.3.2.1.1. Ruptures de barres	10
I.3.2.1.2. Ruptures d’anneaux	11
I.3.2.1.3. Excentricité statique et dynamique	12
I.3.2.2. Défaillances des circuits électriques statoriques	14
I.3.2.2.1. Défauts d’isolant dans un enroulement	14
I.3.2.2.2. Court-circuit entre spires	15
I.3.2.2.3. Court-circuit entre phases	16
I.3.2.2.4. Défauts de circuit magnétique	16
I.3.3. Défaillances d’ordre mécanique	17
I.3.3.1. Défaillances des roulements	17
I.3.3.2. Défaillances des flasques	19
I.3.3.3. Défaillances de l’arbre mécanique	19
I.3.3.4. Défauts de déséquilibre massique ou « Balourd »	19
I.3.3.5. Défaut de désalignement	20
I.3.3.6. Défauts dans les engrenages	21
I.3.4. Les défauts dans les réseaux et lignes aériennes	23
I.4. Conclusion	24
<b>CHAPITRE II – Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques</b>	
II.1. Introduction	25
II.2. Principes et objectifs du diagnostic des machines	25
II.3. Différentes techniques de diagnostic	26
II.3.1. L’analyse vibratoire	26
II.3.1.1. Principe de l’analyse vibratoire	27
II.3.1.1.1. Définition et grandeur à mesurer	27
II.3.1.1.2. Caractéristiques d’une vibration	29
II.3.1.2. Les capteurs	30
II.3.1.2.1. Caractéristiques des capteurs	30
II.3.1.2.2. Types des capteurs	30
II.3.1.2.2.1. Le proximètre	30
II.3.1.2.2.2. Le vélocimètre	31
II.3.1.2.2.3. Accéléromètre piézoélectrique	32
II.3.2. L’analyse par thermographie infrarouge	33
II.3.3. Contrôles non-destructifs	35
II.3.3.1. Les méthodes du CND	35
II.3.3.1.1. Le ressuage	35
II.3.3.1.2. La magnétoscopie	36
II.3.3.1.3. La radiographie	37
II.3.3.1.4. Courants de Foucault	38
II.3.4. Analyse acoustique ultrasonore	39
II.3.4.1. Principe du contrôle par ultrasons	39
II.3.5. Analyse des huiles	40
II.3.5.1. Analyse par filtrage et préparation d’un échantillon	41

II.3.5.1.1. Echantillonnage	41
II.3.5.1.2. Les techniques de séparation	41
II.3.5.2. L'analyse par centrifugation (Analyse physico-chimique)	42
II.4. Conclusion	43
<b>CHAPITRE III – Amplification de mouvement</b>	
III.1. Introduction	44
III.2. Amplification de mouvement	44
III.2.1. Lagrangienne	45
III.2.2. Eulérien linéaire	45
III.2.3. Base de phase eulérienne	48
III.3. Les applications industrielles de l'amplification de mouvement	53
III.3.1. Amplification du mouvement dans les industries aérospatiales	53
III.3.2. L'amplification du mouvement dans l'industrie automobile	55
III.3.3. L'amplification du mouvement dans l'industrie manufacturière	56
III.3.4. L'amplification du mouvement dans l'industrie du pétrole et du gaz	57
III.3.5. L'amplification du mouvement dans l'industrie de la production d'énergie	59
III.4. Avantages de l'amplification du mouvement	60
III.5. Conclusion	61
<b>CHAPITRE VI – Application de l'amplification de mouvement à la détection de vibrations</b>	
IV.1. Introduction	62
IV.2. Outil utilisé pour l'amplification de mouvement : L'application VidMag	62
IV.3. Paramètres importants durant l'enregistrement des vidéos	64
IV.4. Application à la détection des parties en vibration d'une pompe à eau	64
IV.5. Application associée à la mesure du son	66
IV.6. Inconvénient de l'amplification de mouvement	69
IV.7. Conclusion	69
Conclusion générale	70
Bibliographie	71

# Introduction générale

Les machines électriques jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs industriels tels que l'énergie, les transports et l'automatisation. Cependant, ces machines sont soumises à divers défauts qui peuvent entraîner des pannes coûteuses et des interruptions de production. Par conséquent, la détection précoce et précise des défauts est cruciale pour assurer leur fonctionnement optimal et prolonger leur durée de vie. Dans ce contexte, les méthodes de diagnostic des machines électriques ont connu une évolution significative. De nombreuses approches ont été développées pour identifier et évaluer les défauts, allant des techniques traditionnelles basées sur l'analyse des signaux électriques aux méthodes avancées utilisant la vibration, la thermographie et d'autres paramètres physiques. Cependant, malgré les avancées réalisées, il existe encore des défis dans la détection et l'analyse précise des défauts dans les machines électriques. C'est là que l'amplification de mouvement entre en jeu. L'amplification de mouvement est une méthode innovante qui vise à améliorer la visualisation et l'analyse des mouvements subtils dans les vidéos, permettant ainsi une meilleure détection des défauts.

Le présent mémoire de master se tente à mettre en œuvre l'amplification de mouvement en tant qu'outil de diagnostic dans le domaine des machines électriques. Le mémoire est composé de quatre chapitres qui aborderont différents aspects de ce sujet.

Le chapitre 1, intitulé "État de l'art sur les défauts dans la machine électrique", vise à dresser un état des lieux des différents types de défauts susceptibles de survenir dans les machines électriques. Nous examinerons les principales caractéristiques de ces défauts, leurs causes potentielles et leur impact sur les performances et la durée de vie de la machine. Cette revue de littérature permettra de poser les bases nécessaires pour comprendre les enjeux liés au diagnostic des défauts dans les machines électriques.

Le chapitre 2, intitulé "Les méthodes de diagnostic d'une machine électrique", sera consacré à l'examen des méthodes de diagnostic traditionnelles utilisées pour évaluer l'état des machines électriques. Nous passerons en revue les techniques basées sur l'analyse des signaux électriques, ainsi que les approches plus avancées telles que l'analyse de vibration, la

thermographie et d'autres paramètres physiques. Cela nous permettra d'identifier les avantages et les limites de ces méthodes existantes.

Le chapitre 3, intitulé "L'amplification de mouvement en tant que méthode de diagnostic", présente les bases de la technique d'amplification de mouvement en tant qu'approche novatrice pour améliorer la détection des défauts dans les machines électriques. Nous explorerons les principes fondamentaux de l'amplification de mouvement et son application potentielle en tant qu'outil de diagnostic. Nous discuterons des avantages qu'elle offre, notamment en termes de visualisation améliorée des mouvements subtils, et des défis liés à son utilisation.

Le chapitre 4, intitulé "Application de l'amplification de mouvement à la détection de vibrations", présentera une étude de cas où nous appliquerons une méthode d'amplification de mouvement à deux vidéos de machines électriques présentant des défauts connus. Nous décrirons les étapes de l'analyse, les résultats obtenus et les conclusions tirées de cette expérience. Cela nous permettra de mettre en évidence l'efficacité de l'amplification de mouvement en tant qu'outil de diagnostic dans un contexte réel.

# **Chapitre I**

## **Etat de l'art sur les défauts dans les machines électriques**

## I.1. Introduction :

Il existe de nombreuses défaillances possibles au niveau des machines asynchrones, qu'elles soient électriques, mécaniques ou magnétiques, et leurs causes peuvent être diverses. Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil qui est le système étudié dans notre cas. Nous commençons par rappeler certaines études statistiques sur cette machine. Ensuite, après avoir analysé les différents types de défauts qui peuvent survenir, nous examinons leurs causes et évaluons les effets de ces défauts sur le comportement de la machine.

## I.2. La construction de la MAS : [1]

Dans cette section, nous rappelons brièvement la constitution de la machine asynchrone (Figure 1.2). Cette description va nous permettre de mieux appréhender les défauts de cette machine, dans leur dimension physique.

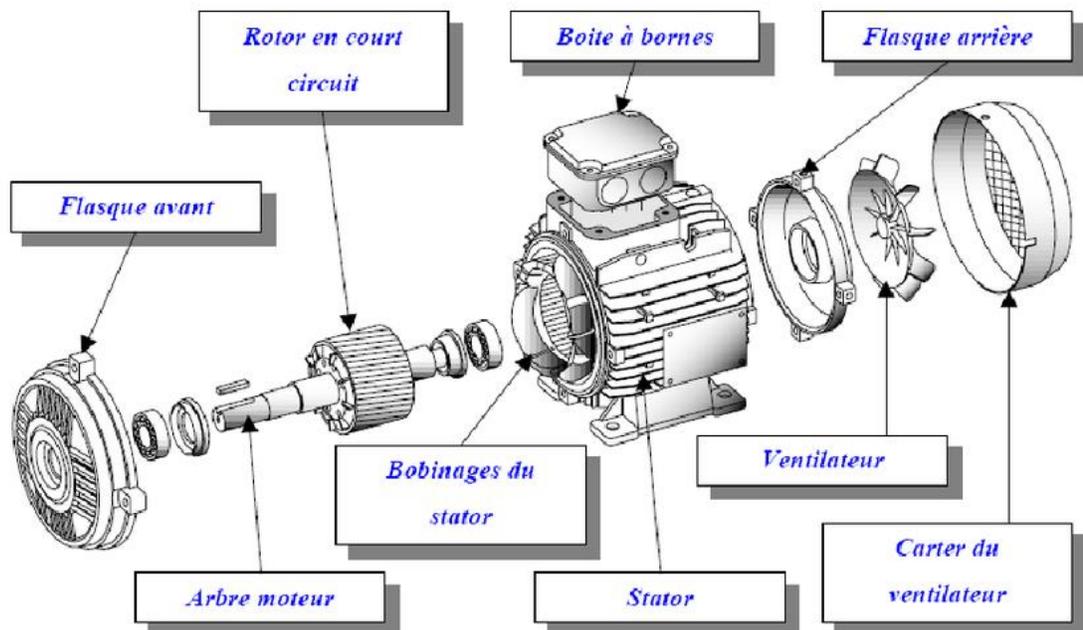


Figure.I.1 : La machine asynchrone triphasée à cage.

## CHAPITRE I: Etat de l'art sur les défauts dans les machines électriques

Les machines asynchrones peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

- Le stator : partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- Le rotor : partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- Les paliers : partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur.

### I.2.1. Le stator :

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

- Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine
- de la conversion électromagnétique.
- Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre.

L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus Sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.



Figure.I.2 : stator

### I.2.2. Le rotor :

Le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors de machines asynchrones peuvent être de deux types :

- Les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les moteurs de grande puissance ou d'aluminium pour les plus faibles puissances. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux de court-circuit, fabriqués en cuivre ou en aluminium.
- Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique. Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine.

Dans le cas des 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 frettées dans les tôles du rotor. Généralement il n'y a pas d'isolation entre les barres rotoriques et le circuit magnétique. Mais la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre.

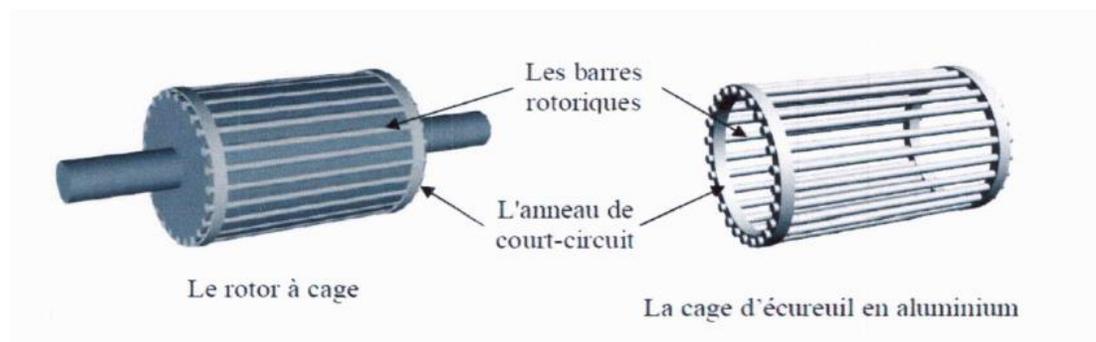


Figure.I.3 : Rotor à cage d'écureuil

### I.2.3. Les paliers :

Les paliers sont constitués de roulements à billes et de flasques.

- Les roulements à billes sont insérés à chaud sur l'arbre, permettant ainsi d'assurer le guidage en rotation de l'arbre.

## CHAPITRE I: Etat de l'art sur les défauts dans les machines électriques

- Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage.

### I.3. Les défauts des machines électriques :

Généralement les différents défauts des machines électriques sont de l'origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation et la nature la charge et le calendrier de maintenance. [2]

Des défauts peuvent être classés leurs origines en deux catégories internes et externes :

1 : défauts internes : sont provoqués par les constituants de la machine (bobinage du stator et rotor, circuit magnétique, cage rotoriques, entrefer mécanique, etc...). [3]

2 : défauts externes : sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique, ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine.

Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le Tableau I.1. [4]

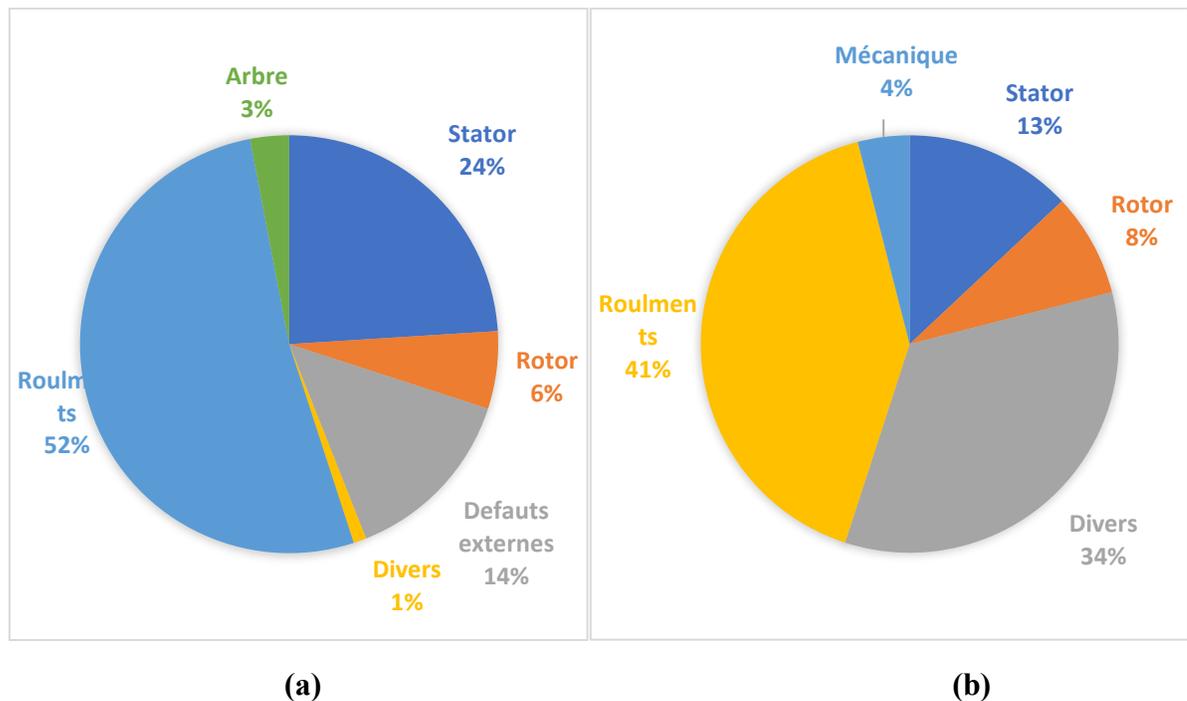
**Tableau I.1** : Défauts des machines électriques selon leurs origines

Defaults	Interne	MECANIQUE	Contact entre stator et rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
			Mouvement de l'enroulement et des tôles
		ELECTRIQUE	Défaillances au niveau de l'isolation
			Rupture des barres
	Externe	MECANIQUE	Défaillances au niveau de circuit magnétique
			Charge oscillante
			Surcharge de la machine
		ENVIRONNEMENTALE	Défaut de montage
			Humidité
		ELECTRIQUE	Température
			Propriété
		ELECTRIQUE	Fluctuation de la tension
			Sources de tension déséquilibré
			Réseau bruité

## I.3.1. Etudes statistiques

La figure I.4.a résumant le travail de Thorsen et Dalva, met en évidence la distribution de défauts parmi les composants défectueux dans 483 moteurs asynchrones de grande puissance fonctionnant dans un même domaine lié à l'industrie pétrochimique. [5]

Une autre étude statistique faite sur des moteurs asynchrones a donné les résultats suivants. [5]. Figure I.4.b.

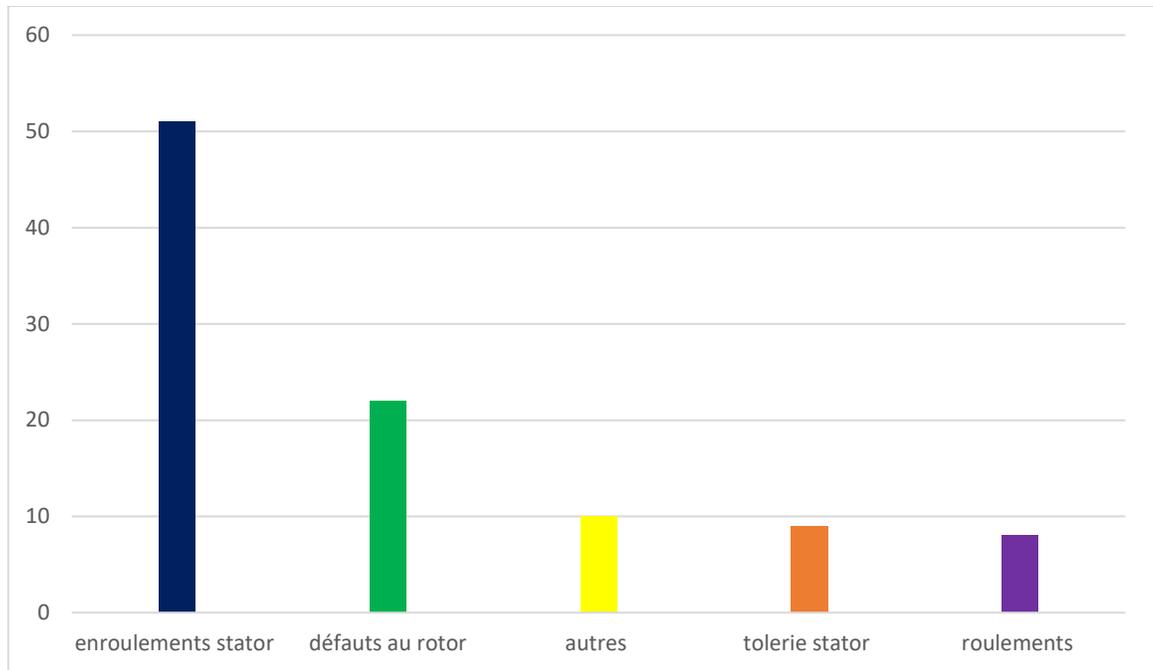


**Figure.I.4** Répartition des différents défauts dans les MAS de grande puissance.

Ces études statistiques ont montré que les défauts des moteurs asynchrones de grande puissance sont liés aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance préventive pour éviter ces pannes.

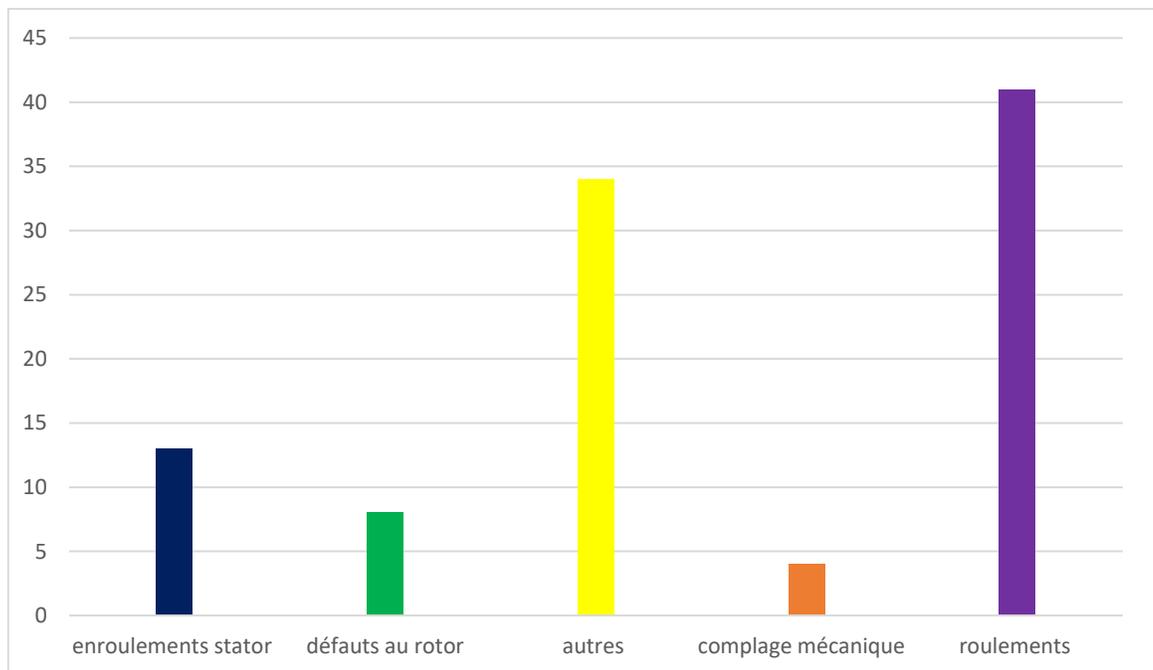
Pour des machines asynchrones de faible et moyenne puissance, une étude statistique faite en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes a donné les résultats suivants. [6] (Figure.I.5)

## CHAPITRE I: Etat de l'art sur les défauts dans les machines électriques

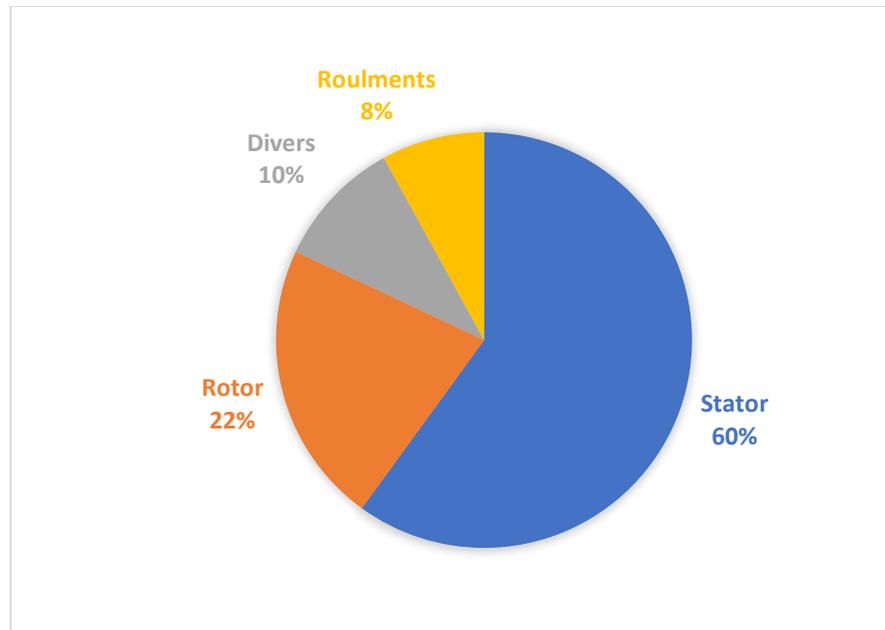


**Figure.I.5.** Répartition des pannes sur les moteurs de faibles et moyennes puissances

Une autre étude faite sur des moteurs de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) a donné les résultats suivants [4] :



**Figure.I.6** Répartition des pannes sur les moteurs de fortes puissances



**Figure I.7** Répartition des différents défauts dans les MAS de faible et moyenne puissance

D'autre part les mêmes études montrent qu'entre 1973 et 1988 les pannes au stator sont passées de 78% à 60% et au rotor entre 12% à 22%.

Les variations sont dues à l'amélioration des isolants sur cette période

Enroulements stator 13%

Tôlerie stator 9%

Défaut au rotor 8%

Roulements 8%

Autre 34%

### I.3.2. Défaillances d'ordre électrique

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine au même titre que celles d'ordre mécanique. Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques.

### I.3.2.1. Défaillances des circuits électriques rotoriques

Pour le circuit rotorique, Les défaillances sont essentiellement dues à un problème [7] [8]:

- Thermique (surcharge,)
- Dynamique (arbre de transmission,)
- Mécanique (roulement)
- Environnemental (agression, ...)

Les défauts les plus récurrents qui sont localisés au niveau du rotor peuvent être définis comme suit :

- Rupture de barres
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit
- Excentricité statique et dynamique

#### I.3.2.1.1. Ruptures de barres

Au cours des vingt dernières années, il y a eu poursuite des efforts à l'étude et le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones et, en particulier, de nombreux travaux ont été consacrés au problème de la rupture des barres rotoriques ainsi que le développement de techniques de diagnostic non intrusives [9-10-11]. Certains travaux de recherches ont été basés sur la technique des éléments finis (EF) [12-13-14-15-16-05], où de plus amples informations peuvent être récupérées à des fins de diagnostic. Il est bien établi d'utiliser des courants de ligne comme un paramètre indicatif [17] qui peut donner un aperçu de la base d'un système de surveillance de l'état non-invasive pour la détection précoce des dégradations. Un autre effort de recherche a été axé sur l'analyse de la signature du courant statorique [18-19-20-21] afin de détecter les défauts électriques et mécaniques affectant les moteurs à induction. Un autre problème constamment signalé dans la littérature et qui a également reçu beaucoup d'attention de la part des chercheurs, est l'échec lié à l'échauffement. Pour par exemple, des recherches ont été menées sur les ventilateurs de refroidissement des moteurs à induction par une analyse de la sensibilité thermique [22-23-24]. Dans cette référence, les problèmes de conception thermique ont été examinés et des algorithmes d'optimisation de conception ont également été développés. Une analyse thermique magnétique couplée d'un moteur à induction ayant pour objectif principal de parvenir à une prédiction rapide et précise de la performance IM a été proposé dans [25].

## CHAPITRE I: Etat de l'art sur les défauts dans les machines électriques

Le problème de d'échauffement d'un moteur lorsque l'une des barres du rotor est totalement cassée a été simulé dans certains journaux [26]; certains documents ont étudié les caractéristiques de l'échauffement et la distribution de la chaleur du moteur avec les rotors sains et défectueux [27-28-29].

Bien que de nombreux journaux aient couvert ce domaine de recherche, des problèmes techniques persistent encore lors de l'analyse des champs thermiques des moteurs électriques en présence des défauts de rupture des barres de la cage rotorique.

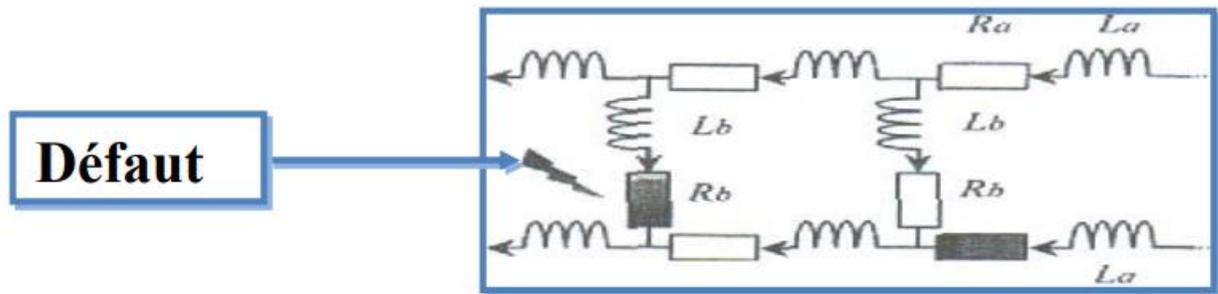


Figure.I.8 Rupture de barre

L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées. Le modèle diffère pour la simulation car le rang de la matrice afférent au rotor n'est plus constant. Néanmoins, les fréquences engendrées, autour de la fréquence fondamentale de l'alimentation, par un défaut de barre ou de portion d'anneau, sont :

$$f_b = (1 \pm 2.k.g) f_s \quad (I.1)$$

Avec :  $k = 1, 2, 3, \dots, K \in \mathbb{N}$

Par contre, les harmoniques d'espaces génèrent eux aussi des fréquences dont la relation est

$$f_b = \left\{ \left( \frac{k}{p} \right) (1-g) \pm g \right\} f_s \quad (I.2)$$

Avec :  $k = 1, 2, 3, \dots, K \in \mathbb{N}$ ,  $p$  étant le nombre de paires de pôles. [30]

### I.3.2.1.2. Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneaux est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que celui de la cassure de barres. Les fissures sont dues aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de détecter ce défaut car il est généralement groupé, voir

## CHAPITRE I: Etat de l'art sur les défauts dans les machines électriques

confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques.

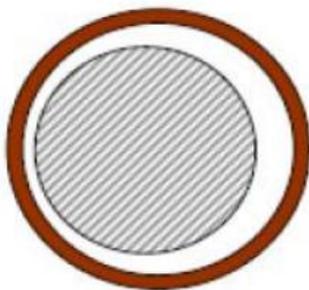
De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité, ...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courantes dans les barres rotoriques et de ce fait, elle engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques, tout à fait similaire à celui provoqué par la cassure de barres. [31-6]

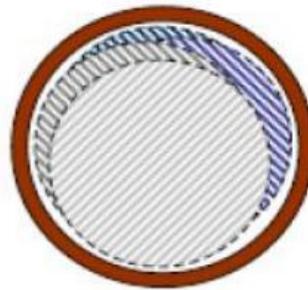
### I.3.2.1.3. Excentricité statique et dynamique

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple suite au décalage entre la rotation de l'arbre et le centre du rotor (Figure.I.9). Ce phénomène, dont l'origine peut être liée à un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulement (usure), à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication (usinage). On distingue généralement trois cas d'excentricité [31-32-33-34] :

- L'excentricité statique, c'est lorsque le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
- L'excentricité dynamique, c'est lorsque le rotor est positionné au centre de l'alésage mais, ne tourne plus autour de son axe.
- L'excentricité qu'on pourrait qualifier de 'mixte', cette dernière associe les deux cas précédemment cités.



Excentricité statique



Excentricité dynamique

**Figure.I.9** modélisations schématiques de l'excentricité statique et dynamique [30]

## CHAPITRE I: Etat de l'art sur les défauts dans les machines électriques

Ce défaut modifie aussi bien le comportement magnétique que celui mécanique de la machine.

En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

Les fréquences proches du fondamental sont données par la relation :

$$f_{exe} = \left\{ 1 \pm n \left( \frac{1-g}{p} \right) \right\} \quad (I.3)$$

Où :

$f_{exc}$  : fréquence "d'excentricité",

$n$  : 1,2,3, . . . ,  $n \in \mathbb{N}$ ,

$g$  : le glissement,

$p$  : nombre de paires de pôles,

$f_s$  : fréquence d'alimentation.

Cette relation a l'avantage de ne pas nécessiter de connaissance précise de la machine asynchrone car elle ne fait pas apparaître de terme lié à sa conception [30]

Une seconde approche consiste à utiliser une expression liant le défaut de barre cassée à celle de l'excentricité et des encoches au rotor.

C'est ainsi qu'une équation, sous forme compacte, fait apparaître les harmoniques de fréquences relatives à ces défauts, et qui dépendent pour beaucoup du nombre de paires de pôles...

$$f_{exc} = \left\{ (k \cdot Nr \pm nd) \left( \frac{1-g}{p} \right) \pm n \omega_s \right\} \quad (I.4)$$

Où :

$f_{exc}$  : fréquence " d'excentricité "

## CHAPITRE I: Etat de l'art sur les défauts dans les machines électriques

---

$k : 1,2,3, \dots, n \in \mathbb{N}$ ,

$N_r$  : nombre d'encoches au rotor,

$n_d \in \mathbb{N}$ ,

$g$  : le glissement,

$p$  : nombre de paires de pôles,

$n_{\omega s} : 1,3,5, \dots$ ,

$n_{\omega s} \in \mathbb{N}$ ,

$f_s$  : fréquence d'alimentation [30]

### I.3.2.2. Défaillances des circuits électriques statorique

Pour le circuit statorique, les défaillances sont principalement dues à un problème [6] :

- Thermique (surcharge...)
- Électrique (diélectrique...)
- Mécanique (bobinage...)
- Environnemental (agression...)

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

- Défaut d'isolant
- Court-circuit entre spires
- Court-circuit entre phases
- Défaut de circuit magnétique

#### I.3.2.2.1. Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique, ...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents organes du moteur. Cependant, les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et de mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau va se

## CHAPITRE I: Etat de l'art sur les défauts dans les machines électriques

dégrader de manière prématurée ou accélérée et finira par ne plus assurer sa fonction. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

Les différentes Causes pour ce type de défaut sont :

- La dégradation de l'isolant à la fabrication.
- La tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation,
- Le courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- Les vibrations mécaniques.
- Le vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée ; même pendant une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader
- Fonctionnement dans un environnement sévère [6]

### I.3.2.2.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires d'une même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné [8][30]. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau des enroulements et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique en dehors d'une augmentation des oscillations proportionnelles au défaut.

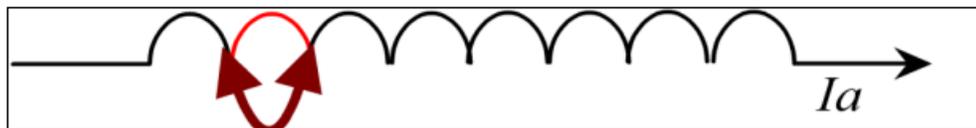


Figure.I.10 Court-circuit entre spires

Il a été montré que le courant statorique avait un spectre enrichi suite à la création d'un court-circuit entre plusieurs spires au stator. Les fréquences sont données par la relation :

$$f_{cc} = \left\{ \frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right\} f_s \quad (I.5)$$

Où :

$f_{cc}$  : fréquence " de court-circuit ",

$f$  : fréquence d'alimentation,

$n$  : 1,2,3, . . . ,  $n \in \mathbb{N}$ ,

$p$  : nombre de paires de pôles,

$g$  : le glissement,

$k$  : 1,3,5, . . . ,  $k \in \mathbb{N}$ .

### I.3.2.2.3. Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système [6][8].

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparait. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.

### I.3.2.2.4. Défauts de circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant [6][8], etc...

### I.3.3. Défaillances d'ordre mécanique

Les défaillances d'ordre mécaniques sont en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que rencontre la machine asynchrone [6][8].

Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur tels que le défaut de balourd et de désalignement.

#### I.3.3.1. Défaillances des roulements

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau dès l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques peuvent circuler au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se solidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce genre de défaillances [6][8].

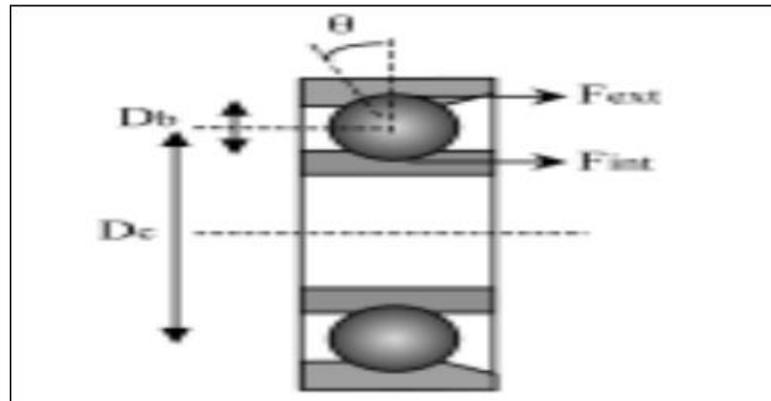


Figure.I.11 les roulements à billes [35]

La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre du courant statorique est basée sur le fait que toutes les excentricités interfèrent sur le champ dans l'entrefer de la machine asynchrone.

## CHAPITRE I: Etat de l'art sur les défauts dans les machines électriques

Un défaut de roulement à billes se manifeste par la répétition continue du contact défectueux avec la cage de roulement extérieur comme intérieur. [35]

La fréquence de répétition sera pour la cage intérieure et extérieure :

$$\{f_{int} = \frac{nb}{2} f_r \{1 + \frac{Db}{D_c} \cos \theta\}\} \quad (I.6)$$

$$\{f_{ext} = \frac{nb}{2} f_r \{1 - \frac{Db}{D_c} \cos \theta\}\} \quad (I.7)$$

Le spectre en courant est alors décrit par :

$$\{f_{int, ext} = f_s \pm n \frac{nb}{2} f_r \{1 + \frac{Db}{D_c} \cos \theta\}\} \quad (I.8)$$

g : le glissement,

f<sub>s</sub> : fréquence d'alimentation,

f<sub>r</sub> : fréquence de rotation mécanique,

n : 1, 2, 3, . . . , n ∈ N,

nb : nombre de billes,

Db : diamètre des billes,

D<sub>c</sub> : distance du centre des billes,

θ : L'angle de contact de la bille avec la cage.

En considérant que le nombre de billes est compris entre 6 et 12 habituellement, deux relations couramment rencontrées sont :

$$\{f_{ext} = 0.4.nb. f_r\} \quad (I.9)$$

$$\{f_{int} = 0.6.nb. f_r\} \quad (I.10)$$

Donc le spectre en courant sera enrichi de :

$$\{f_{int, ext} = f_s \pm n f_{\{int, ext\}}\} \quad (I.11)$$

### I.3.3.2. Défaillances des flasques

Les défauts créés au niveau des flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine.

Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [6][8]

### I.3.3.3. Défaillances de l'arbre mécanique

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone.

Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine.

Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine [6][8].

Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance.

### I.3.3.4. Défauts de déséquilibre massique ou « Balourd »

La grande sensibilité du courant aux variations de couples, captées par le moteur asynchrone et par voie de conséquences, aux défauts mécaniques (balourd) induisant ces dernières, fait de l'analyse spectrale du courant (MCSA) un outil d'investigation extrêmement puissant [36][37]. Les défauts de déséquilibre massique ou "balourd" sont détectés par la surveillance des fréquences appropriées de la phase du courant statorique.

$$f_d = [k f_1 \pm m f_r] \quad (I.12)$$

Où

$f_1$  : la fréquence du réseau d'alimentation du moteur à induction

$f_r$  : la fréquence de rotation de l'arbre rotorique.

Le balourd entraîne l'émergence de raies aux fréquences définies par (I.12) pour  $m=k=1$  et avec des amplitudes de moindre importance aux fréquences du courant pour  $m=1$  et  $k=2$ .

### I.3.3.5. Défaut de désalignement

Le désalignement est un problème plus fréquent que le balourd, et la raison en est bien simple. Malgré l'emploi de paliers auto-alignant, et d'accouplements flexibles, il est difficile d'aligner deux arbres, ainsi que leurs paliers afin d'assurer qu'il n'y existe aucune force qui puisse causer la vibration [38].

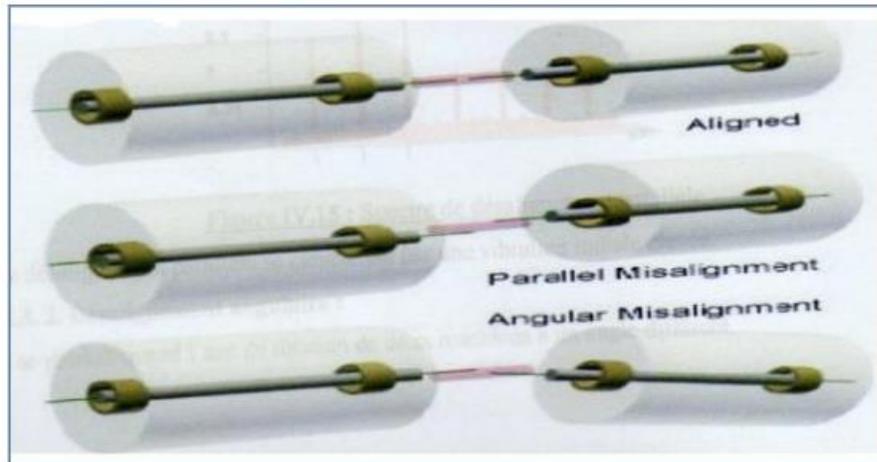


Figure.I.12 Désalignement des arbres [38]

On distingue deux types de désalignement « parallèle et angulaire ».

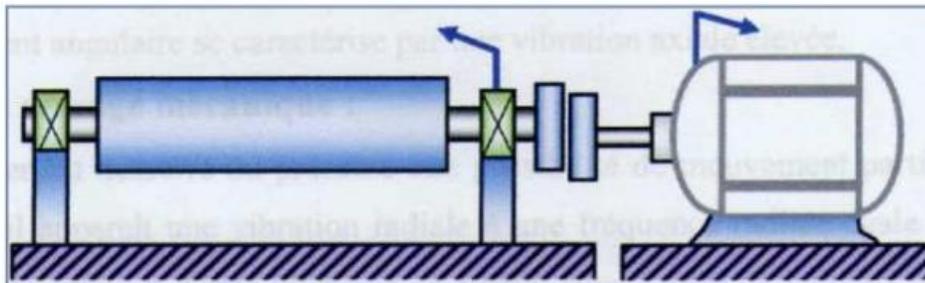
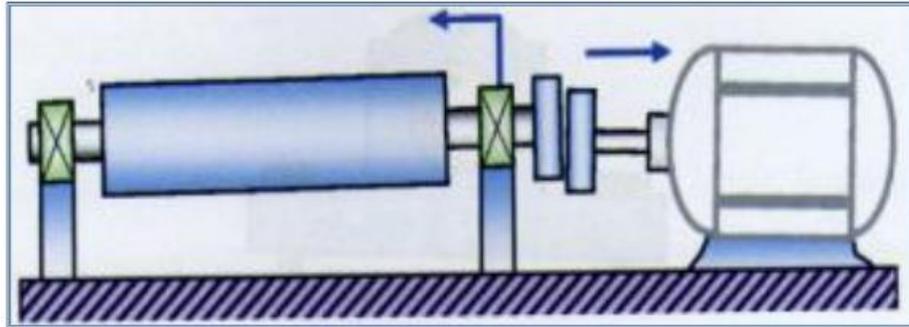


Figure.I.13 Image de désalignement parallèle [38]

Désalignement parallèle : Il se produit quand les axes de rotation des deux machines ont le même angle d'orientation, mais ils sont séparés verticalement, chacun de l'autre [38]



**Figure.I.14** Image de désalignement angulaire [38]

Désalignement angulaire : Il se produit quand l'axe de rotation de deux machines à un angle différent [38]

### I.3.3.6. Défauts dans les engrenages

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues dentées engrenant lune avec l'autre, permettant de transmettre de la puissance entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse constant. Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes d'engrenages (Figure.I.15) [38] :

- Les engrenages parallèles « les 2 arbres sont parallèles ».
- Les engrenages concourants « les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se coupent ».
- Les engrenages gauches « les 2 arbres occupent une position relative quelconque ».

Les dentures d'engrenage peuvent être droites, hélicoïdales ou à chevrons. Les efforts, en conséquence, sont :

- Uniquement radiaux sur les engrenages parallèles, à denture droite ou à chevrons,
- Mixtes « radiaux et axiaux » sur les engrenages à denture hélicoïdales, les engrenages coniques et les engrenages à roue et vis sans fin [38]



**Figure.I.15** Différents types d'engrenage [38]

Les engrenages sont des éléments de transmissions de mouvement qui peuvent être touchés par des défauts tel que :

- Des piqûres pour les dents taillées.
- Des écaillages de la denture.
- Des fissures.
- Des ruptures au terme de fissures.
- Des grippages qui conduisent à d'importantes détériorations.

Les principaux défauts survenant sur un couple d'engrenages d'un réducteur simple sont les défauts répartis sur toute la denture et les défauts localisés sur une partie de la denture.



**Figure.I.16** Défaits réels d'engrenage localisé [38]

Plus généralement, les détériorations superficielles d'engrenages sont le résultat de différents phénomènes pouvant intervenir au cours du fonctionnement du système [38].

### **I.3.4. Les défauts dans les réseaux et lignes aériennes :**

- ✓ Coups de foudre (origine atmosphérique): c'est le cas de la foudre qui frappe les conducteurs d'une ligne ou d'un poste ou tombe dans leur voisinage immédiat.
- ✓ Origine mécanique : c'est le cas de la rupture d'un support, d'un conducteur ou d'un isolateur sur une ligne aérienne, on peut aussi inclure dans cette catégorie les amorçages dus aux contacts de branches d'arbre mal élagués, des grues et engins de grande hauteur travaillant au voisinage.
- ✓ Le vent (origine atmosphérique)
- ✓ La pollution
- ✓ Défauts d'origine interne qui prennent naissance dans les réseaux eux-mêmes, par exemple, le cas des surtensions dues à des phénomènes de résonance.



**Figure.I.17** Les lignes aériennes

### **I.4. Conclusion :**

Après avoir exposé les éléments clés de composition d'un moteur asynchrone triphasé à cage, ce chapitre se concentre sur les diverses défaillances susceptibles d'engendrer un mauvais fonctionnement ou l'arrêt soudain du moteur. Nous étudions également les causes et les conséquences de l'apparition de ces défauts.

## **Chapitre II**

# **Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques**

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

---

### II.1. Introduction :

La machine électrique est siège de défauts multiples, qui sont susceptible de la mettre en état d'arrêt. Dans ce chapitre, nous aborderons les techniques de diagnostic d'une machine asynchrone, considérée parmi les machines les plus utilisées dans l'industrie. Afin d'éviter un arrêt total intempestif de la machine, le diagnostic permet d'anticiper l'apparition des anomalies et d'envisager un entretien opportun. Les méthodes de diagnostic sont alors très importantes à l'électrotechnicien.

### II.2. Principe et objectifs du diagnostic des machines

Le diagnostic est la procédure permettant de traduire les informations résultant de la mesure des paramètres relatifs à une machine en informations concernant les défauts réels ou naissants de la machine elle-même. En d'autres termes, le diagnostic est l'ensemble des activités d'analyse et de synthèse qui, grâce à l'acquisition de certaines grandeurs physiques, caractéristiques de la machine surveillée, permet de collecter des informations significatives sur l'état de la machine et sur son évolution dans le temps, pour évaluer sa fiabilité à court et à long terme.

Les cibles du diagnostic sont : (i) la détection (que le défaut soit présent ou non) ; ii) isolement (dans quelle partie de la machine); iii) identification (quel type de défaut). Le problème général du diagnostic est de détecter si un défaut spécifique est présent ou non sur la base des informations disponibles, de préférence sans inspection intrusive de la machine. Ce problème peut être décrit avec une approche statistique comme un problème de test d'hypothèse : l'hypothèse nulle  $H_0$  affirme que le défaut est présente et l'hypothèse alternative  $H_1$  affirme que le défaut n'est pas présente. La vérification d'hypothèses est sujette à deux types d'erreurs. Une erreur de type I se produit lorsque l'hypothèse nulle  $H_0$  est vraie et qu'elle est rejetée, c'est-à-dire lorsque, sur la base des informations disponibles, il est décidé que le défaut n'est pas présente, mais qu'elle l'est réellement. Par conséquent, la machine n'est pas arrêtée et réparée avant la manifestation réelle de la défaillance, avec des conséquences catastrophiques possibles. Une erreur de type II se produit lorsque l'hypothèse nulle est fausse et que l'on ne parvient pas à la

## **CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques**

---

rejeter, c'est-à-dire lorsqu'il est décidé que le défaut est présente, mais en réalité elle ne l'est pas. Ensuite, la machine est arrêtée et réparée en vain, avec des coûts économiques inutiles.

Un programme de diagnostic est développé selon les étapes suivantes : (i) acquisition de données ; (ii) le traitement des données ; (iii) la prise de décisions. Les méthodes employées pour l'acquisition et le traitement des données et pour choisir le seuil qui sépare l'état défectueux de l'état sain d'un composant peuvent fortement influencer la probabilité de commettre une erreur pendant la phase de prise de décision. Le terme « détection de défaut » désigne généralement une décision prise par un individu, tandis que le terme « diagnostic » ou « diagnostic » désigne généralement une décision prise par un algorithme automatique.

Si l'objet du diagnostic est une machine électrique tournante, son fonctionnement ne peut être considéré séparément de : le fonctionnement de la machine mécanique connectée le long de sa ligne d'axe (pompe, ventilateur ou autre charge pour un moteur électrique ; turbine ou autre moteur principal pour un générateur électrique); le type d'accouplement mécanique (joint, engrenages, courroies, etc.); le système de contrôle possible (onduleur, etc.). Tous ces systèmes mécaniques et électroniques peuvent : induire des défauts dans la machine électrique ; susciter des variations dans les paramètres de la machine électrique, même en l'absence de défaut ; souffrir de défauts induits par la machine électrique.

Pour ces raisons, il est important de séparer les situations suivantes : (i) une machine électrique tournante directement connectée au réseau ; (ii) une machine électrique tournante connectée à l'entraînement en boucle ouverte; (iii) une machine électrique tournante à commande en boucle fermée [ energy MDPI].

### **II.3. Différentes techniques de diagnostic :**

#### **II.3.1. L'analyse vibratoire :**

Les vibrations externes de la machine, une fois celle-ci en marche dépendent directement des forces générées par les différents éléments internes en mouvements. Ces forces s'appliquent à la structure de la machine qui répond (vibre) suivant ses caractéristiques propres. Ainsi, on peut considérer les vibrations comme une image des forces internes. L'intensité et la variation de ces

## **CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques**

---

forces dépendant de l'état mécanique de la machine, une surveillance des vibrations en sera un écho. Donc nous pouvons définir la vibration comme un déplacement d'un corps par rapport à une position de référence, provoqué par une force mécanique non désirable. Ainsi une vibration est un mouvement décrit autour d'une position d'équilibre.

Comme tout mouvement, une vibration peut être étudiée en termes de déplacement, vitesse (variation du déplacement par unité de temps) et accélération (variation de la vitesse par unité de temps). L'analyse vibratoire est une des technologies les plus développées dans le domaine de détections des défaillances elle se compose de :

- La vibration générée par la machine
- Les capteurs et la mesure du signal
- Le traitement du signal
- La détection des dégradations
- Le diagnostic des défauts

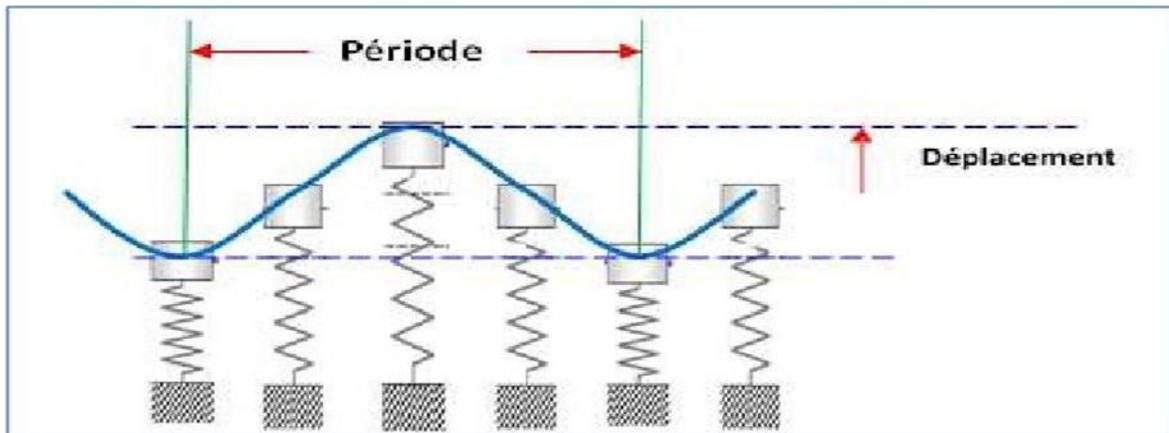
La surveillance de l'état comprend pour l'essentiel la mesure et l'enregistrement des valeurs caractéristiques des vibrations et des paramètres de fonctionnement. Elle permet de faire des conclusions et des pronostics sur l'état général ou sur des 'maladies' tout à fait spécifiques d'une machine. [43] Selon leur priorité dans le processus de production, les machines peuvent être surveillées en permanence ou contrôlées périodiquement à intervalles réguliers.

### **II.3.1.1. Principe de l'analyse vibratoire :**

#### **II.3.1.1.1. Définition et grandeur à mesurer :**

La vibration est un phénomène dynamique, un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre. On observe le mouvement d'une masse suspendue à un ressort (figure II.1.).

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques



**Figure II.1** 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.

Le choix de la grandeur à mesurer (déplacement, vitesse ou accélération) pour la surveillance d'une machine tournante dépend essentiellement du défaut recherché et la plage de fréquences dans laquelle il est susceptible de s'exprimer. La grandeur retenue est appelée paramètre ou indicateur de surveillance. Le tableau II.1 donne le domaine de surveillance pour chaque indicateur.

**Tableau II.1** Domaine de surveillance des indicateurs vibratoires.

Indicateur	Domaine de surveillance
Déplacement	Phénomènes lents basses fréquences [2–100 Hz] : balourd, désalignement, instabilités de paliers etc.
Vitesse	Moyennes fréquences [1 000 Hz] : balourd, lignage, instabilités de paliers, Cavitation, passage d'aubes, engrenement etc.
Accélération	Phénomènes très rapides Hautes fréquences [20 000 Hz] : engrenages, roulements, passages d'ailettes, cavitation...

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

### II.3.1.1.2. Caractéristiques d'une vibration :

Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature.

- **Fréquence** : La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné si la fréquence  $f$  d'un phénomène est de 50 hertz, c'est-à-dire 50 cycles par seconde, la durée d'un cycle (ou période  $T$ ) est de  $1/50^{\text{ème}}$  de seconde. La fréquence  $f$  est l'inverse de la période  $T$  :  $f = 1/T$ .
- **Amplitude** : On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre et on peut définir :
  - 1) L'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête (AC)
  - 2) L'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête (ACC).
  - 3) L'Amplitude efficace ( $A_{\text{eff}}$ ), aussi appelée RMS (Root Mean Square) ou niveau efficace.
- **Nature d'une vibration** : Une machine tournante quelconque en fonctionnement génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante :
  - 1) Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple (figure II.2.a) ou sinusoïdal complexe figure II.2. b) représentatives du fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques.
  - 2) Les vibrations périodiques de type impulsionnel (figure II.2. c).
  - 3) Les vibrations aléatoires de type impulsionnel (figure II.2.d) provoqué par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe. [43]

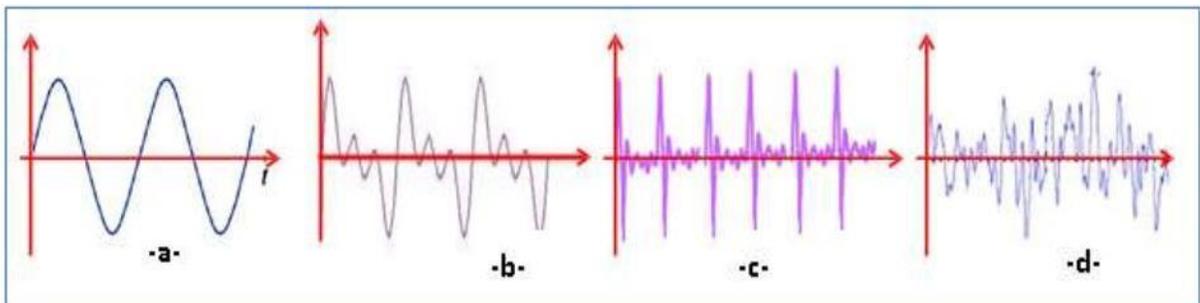


Figure II.2 Nature d'une vibration.

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

---

### II.3.1.2. Les capteurs :

#### II.3.1.2.1. Caractéristiques des capteurs :

Un capteur de vibration est caractérisé principalement par :

- Sa bande passante (plage d'utilisation) : plage de fréquences à l'intérieur de laquelle l'amplitude mesurée par le capteur ne dépasse pas une marge d'erreur fixée par le constructeur (par exemple + 3 % ou + 3 dB de [3–8000] Hz).
- Sa gamme dynamique (gamme de mesure d'amplitude) : gamme comprise entre la plus petite et la plus grande amplitude acceptée par le capteur.
- Sa sensibilité : relation entre la grandeur électrique délivrée à la sortie du capteur et l'amplitude du mouvement mécanique qui lui donne naissance. [43]

#### II.3.1.2.2. Types des capteurs :

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 :

##### II.3.1.2.2.1. Le proximètre :

Le proximètre, ou sonde de proximité [figure II.3], est un capteur de déplacement sans contact qui produit un signal électrique 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. Ces mesures seront limitées aux basses fréquences (< 100 Hz)

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

---



Figure II.3 Les proximètres.

### II.3.1.2.2.2. Le vélocimètre :

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

Les vélocimètres les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté (figure II.4.). La vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse de mouvement de la bobine. La fréquence de résonance de ce type de capteurs se situe généralement entre 8 et 15 Hz.

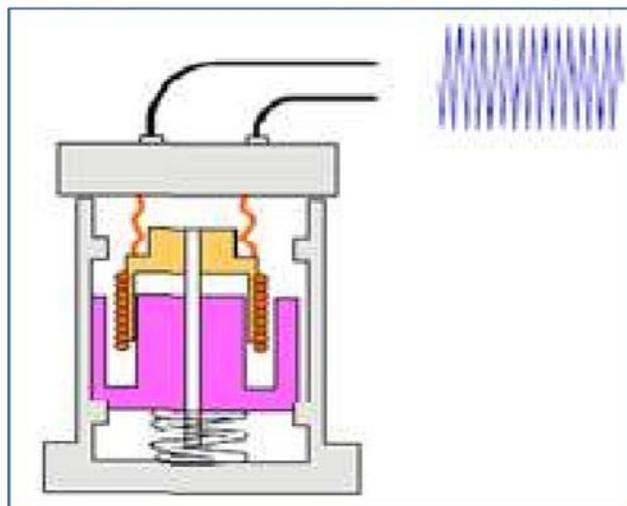
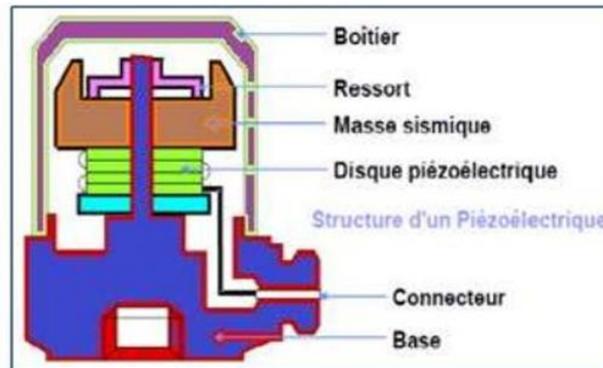


Figure II.4. Principe d'un vélocimètre

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

### II.3.1.2.2.3. Accéléromètre piézoélectrique :

Un accéléromètre piézoélectrique est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte. Quand la masse se déplace sous l'effet d'une accélération elle exerce sur le disque des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération (figure II.5).



**Figure II.5.** Principe d'un accéléromètre.

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

- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse.
- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB).
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.

Les accéléromètres à électronique intégrée sont semblables aux accéléromètres piézoélectriques à la différence qu'ils possèdent de manière intégrée un conditionnement de charge pour délivrer une tension proportionnelle à l'accélération.

1. Il est plus limité en température (125°C).
2. Il nécessite une alimentation à courant constant.
3. Il a une sortie à basse impédance qui autorise de Nécessite une plus grande longueur de câble.

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

---

4. Dynamique de l'électronique intégrée un peu plus faible. [42]

### II.3.2. L'analyse par thermographie infrarouge :

La thermographie infrarouge « TIR » est la science de l'acquisition et de l'analyse d'informations thermiques à l'aide de dispositifs d'imagerie thermique à distance. La norme française A 09-400 définit la thermographie infrarouge comme « Technique permettant d'obtenir au moyen d'un appareillage approprié l'image thermique d'une scène thermique dans un domaine spectral de l'infrarouge ».

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 la sidérurgie, l'énergie électrique, l'industrie pétrolière, l'automatisation, l'exploitation du gaz naturel, l'industrie des transports, et à d'autres professions engagées tel que dans la lutte contre le feu et la surveillance des frontières.

A toutes ces activités caractérisées par des procédures de fonctionnement en flux tendu, des équipements de production sous haute-tension, des courants électriques puissants ou des vitesses d'opération élevées, l'imagerie thermique infrarouge offre une méthode d'inspection sans-contact et en temps réel. 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.

Une caméra thermique ne mesure pas des températures mais des flux de rayonnement. Après le réglage certains paramètres par l'opérateur en thermographie, la caméra calcule alors les températures de la cible. [44]

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

Elle fournit ensuite à l'utilisateur une appelée thermo gramme (figure II.6). Cartographie des températures,

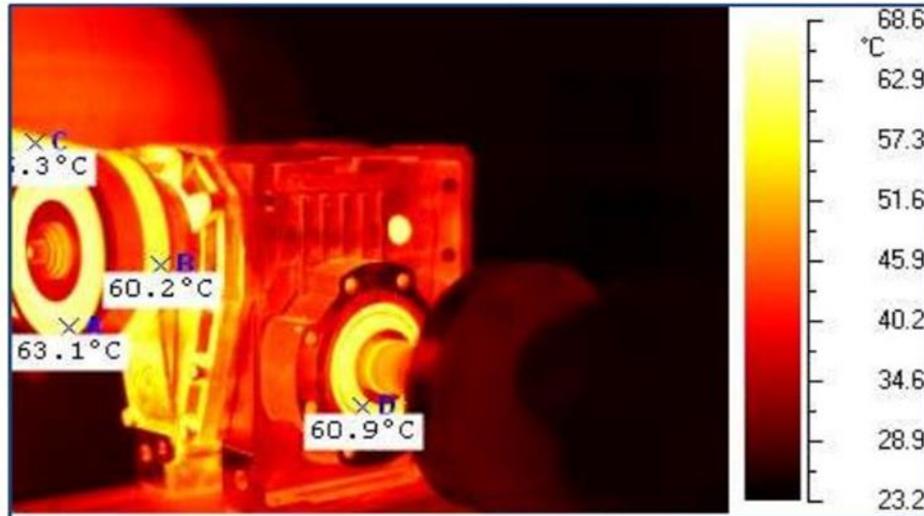


Figure II.6 Thermogramme : usure de palier



Figure II.7 Principe de fonctionnement de la caméra infrarouge. [44]

Domaines d'application :

- Médecine humaine et vétérinaire.
- Agriculture.
- Bâtiment
- Industrie. [45]

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

---

### II.3.3. Contrôles non-destructifs :

Le Contrôle Non Destructif consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation permettant de juger « sans destruction » l'état de santé des installations et des pièces et de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction pour laquelle elles sont destinées. [25]

#### II.3.3.1. Les méthodes du CND :

L'opération de contrôle non destructif ne se borne généralement pas à la détection d'éventuels défauts. En effet, même si le choix du procédé, de la méthode et du matériel a été effectué au préalable, il faut envisager toute une procédure ayant les objectifs suivants : fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, identification, caractérisation de ceux-ci, en particulier par leur taille, classement, présentation visuelle, décision concernant l'affectation de l'objet, et enfin l'archivage des résultats et des conditions d'examen. [42]

##### II.3.3.1.1. Le ressuage :

Cette méthode consiste à appliquer sur la surface de la pièce à contrôler, préalablement nettoyée et séchée, un liquide d'imprégnation coloré ou fluorescent. Le liquide pénètre, par capillarité dans les ouvertures des défauts. Après un certain temps correspondant à la pénétration du liquide d'imprégnation dans les défauts, l'excès de liquide présent à la surface de la pièce est éliminé par lavage. La surface est ensuite recouverte d'un révélateur qui en attirant le liquide d'imprégnation retenu dans les défauts donne une indication renforcée de ceux-ci. L'observation est généralement réalisée visuellement. Cette méthode est applicable sur tous matériaux (non poreux) et ne permet de mettre en évidence que des défauts débouchant.

La figure II.8. nous explique le principe de la méthode de ressuage par liquide pénétrant

- A. Application et pénétration du liquide du pénétrant dans les fissures.
- B. Nettoyage de l'excès de pénétrant.
- C. Application du révélateur.
- D. Le révélateur extrait le pénétrant retenu par les fissures.

L'efficacité contrôle repose sur la possibilité de détecter les d'améliorer cette détectabilité. Le pénétrant contient en général un produit coloré visible à fluorescent visible à la lumière noire

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

---

(ultra- violet). De cette méthode de indications de discontinuité afin la lumière blanche ou un produit. [46]

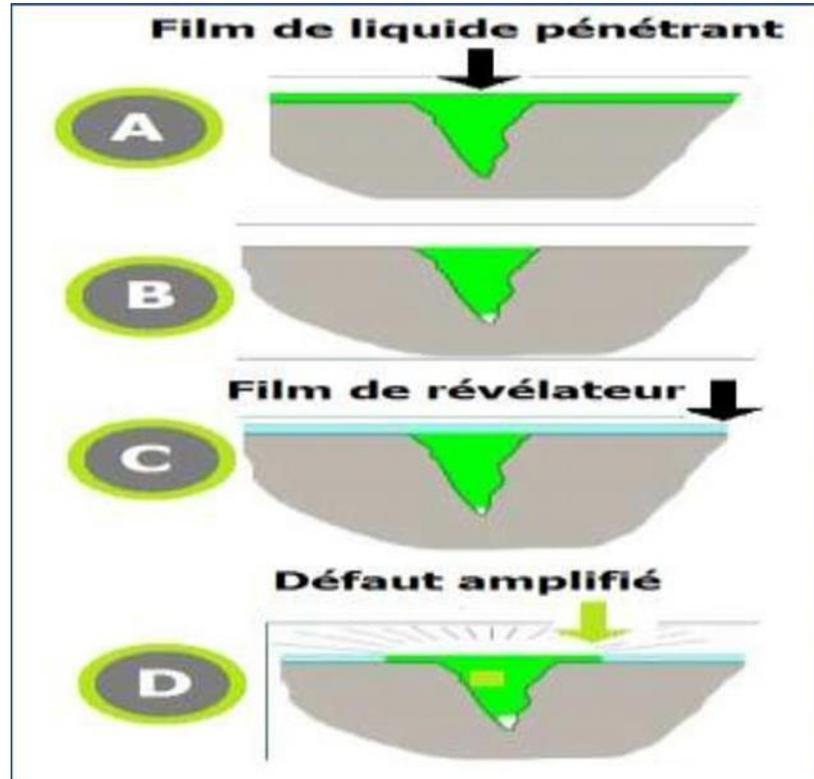


Figure II.8 Les étapes du ressuage. [29]

### II.3.3.1.2. La magnétoscopie :

C'est une méthode applicable seulement pour la détection des défauts débouchant en surface ou proche à la surface. À l'instant du ressuage, la magnétoscopie aux matériaux magnétiques complète l'examen visuel. On a recours à la magnétoscopie lorsque le ressuage est insuffisant elle consiste à créer un flux magnétique intense à la surface d'un matériau ferromagnétique. [42]



**Figure II.9.** Contrôle par magnétoscopie.

### **II.3.3.1.3. La radiographie :**

La radiographie industrielle est un contrôle non destructif qui consiste à traverser le composant à contrôler avec un faisceau de rayonnement électromagnétique ionisant (rayons gamma ou X). [42]

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques



Figure II.10. Détection des défauts par radiographie.

### II.3.3.1.4. Courants de foucault :

Principe du contrôle par courants de Foucault Le principe du CND par les courants de Foucault consiste à placer la zone à examiner dans un champ électromagnétique et à recueillir en surface une perturbation de celui-ci liée à la présence d'un objet ou d'un défaut. Le système est donc constitué d'une source électromagnétique, d'un capteur et d'un organe de traitement de l'information recueillie dont le rôle est de caractériser l'intrus.

En présence d'une anomalie dans la pièce contrôlée, leurs déplacements sont perturbés, entraînant ainsi une variation de l'impédance apparente du capteur qui dépend de la nature de l'anomalie et de sa dimension en volume (figure II.11.). [42]

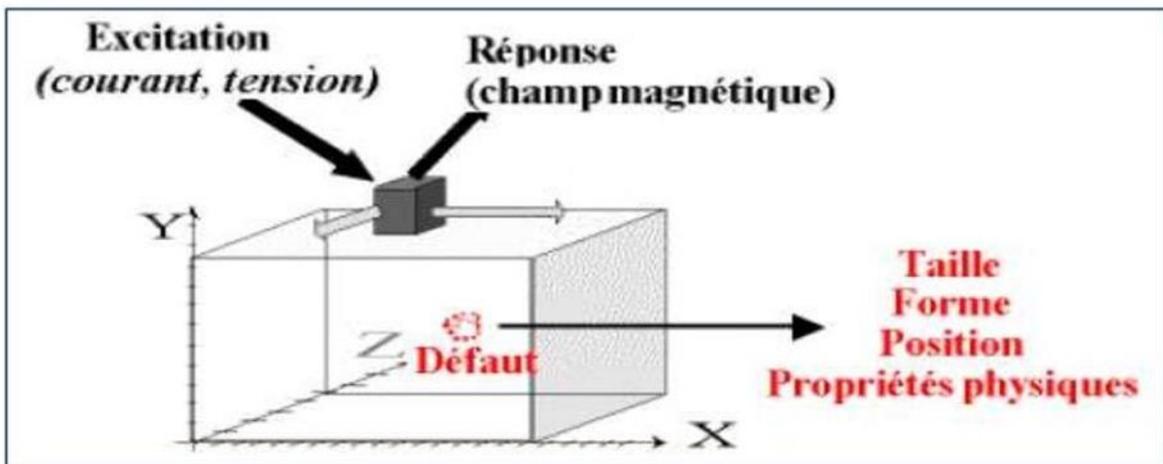


Figure II.11 Principe du CND par les courants de Foucault.

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

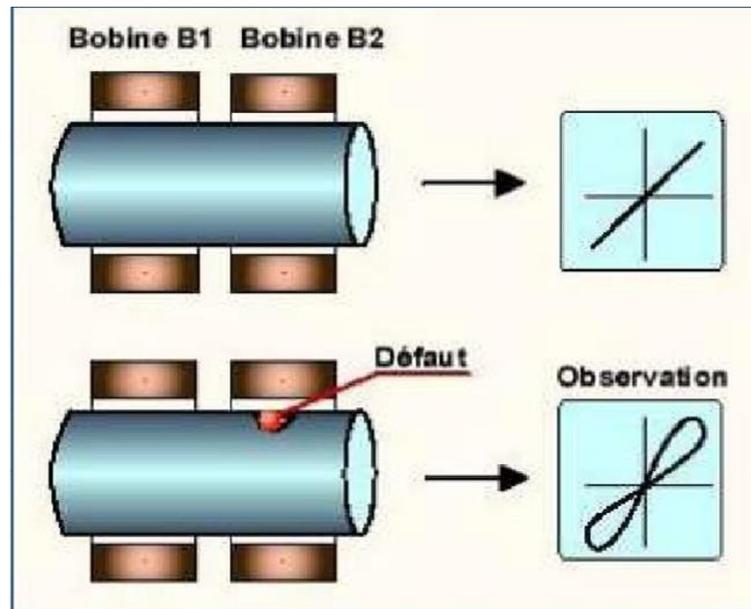


Figure II.12 Visualisation sur l'écran des courants de Foucault.

### II.3.4. Analyse acoustique ultrasonore :

Tout mouvement relatif entre pièces produit des ultrasons de friction. La mesure et l'enregistrement des signaux ultrasonores effectués à cadence régulière, et leur suivi dans le temps permettent de détecter beaucoup de problèmes de façon simple efficace et peu onéreuse. [47]

Voici un Tableau II.2 qui nous montre La plage de fréquences :

Infrasons	Zone audible	Ultrasons	Hyper sons
0 à 16 Hz	16 Hz à $20 \cdot 10^3$ Hz	$20 \cdot 10^3$ Hz à $150 \cdot 10^6$ Hz	$150 \cdot 10^6$ Hz

#### II.3.4.1. Principe du contrôle par ultrasons :

Le contrôle par ultrasons comprend 3 étapes (Figure II.13) :

- La vibration mécanique engendrée par le palpeur émetteur se propage dans la pièce en se réfléchissant aux interfaces.
- Une partie du faisceau est interceptée par le défaut et renvoyée vers le palpeur récepteur (Eventuellement le même que l'émetteur) qui convertit la vibration en signal électrique.

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

- On observe sur l'écran de visualisation un écho caractéristique apparaissant à une distance donnée sur la base de temps. [47]

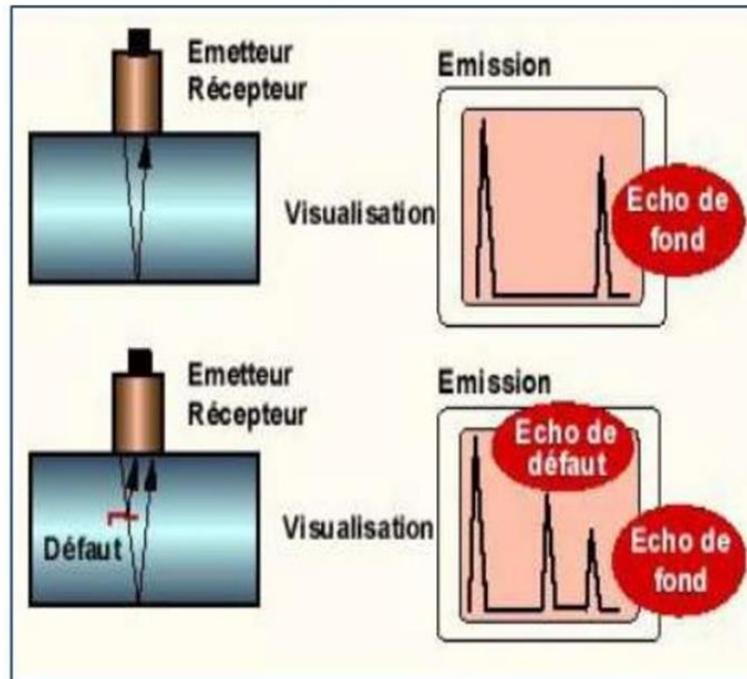


Figure II.13 Principe du contrôle par ultrasons.

### II.3.5. L'analyse des huiles :

Tous les systèmes mécaniques dépendent fortement de la lubrification pour fonctionner correctement. L'analyse d'huile est l'une des techniques les plus intrigantes pour assurer la santé et la longévité des machines, avec la thermographie infrarouge et l'analyse des vibrations. Les informations fournies permettent des diagnostics précis et leur mise en œuvre est simple. De plus, l'investissement est modeste compte tenu des informations reçues et de l'argent dépensé pour des arrêts imprévus. [42]

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

---



**Figure II.14** Analyse des huiles.

### II.3.5.1. Analyse par filtrage et préparation d'un échantillon

#### II.3.5.1.1. Echantillonnage :

- Échantillonnage depuis un robinet de drainage fixé au réservoir
- Échantillonnage par tube et pompe à vide
- Échantillonnage avec seringue et mini connexion

#### II.3.5.1.2. Les techniques de séparation :

- La décantation
- Le filtrage

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

### II.3.5.2. L'analyse par centrifugation (Analyses physico-chimiques) :

**Tableau II.3** L'analyse par centrifugation (Analyses physico-chimiques). [42]

	Principaux avantages	Principales limitations	Champ d'applications privilégié
Analyse vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection de défauts à un stade précoce.</li> <li>- Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi.</li> <li>- Autorise une surveillance continue.</li> <li>- Permet de surveiller l'équipement à distance. (télémaintenance)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Spectres parfois difficiles à interpréter.</li> <li>- Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure.</li> </ul>
Analyse d'huile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une mesure ou un échauffement.</li> <li>- Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ne permet pas de localiser précisément le défaut</li> <li>- Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse de contamination par le process (étanchéité), etc.</li> </ul>

## CHAPITRE II: Les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques

Thermographie IR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet de réaliser uncontrôle rapide de l'installation.</li> <li>- Interprétation souvent immédiate des résultats.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire</li> <li>- Contrôle limité à ce que " voit" la caméra (échauffements de surface).</li> <li>- Ne permet pas de réaliser un diagnostic Approfondi.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque delubrification en particulier).</li> </ul>
Analyse acoustique –	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet de détecter l'apparition de défauts audibles</li> <li>- Autorise une surveillance continue.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilité au bruit ambiant.</li> <li>- Diagnostic souvent difficile à réaliser</li> <li>- Problèmes de répétabilité des mesures.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire.</li> </ul>

### II.4. Conclusion :

Nous avons étudié ces techniques dans le but d'avoir un bon diagnostic d'une machine asynchrone, et nous nous sommes efforcés de les expliquer de manière globale et synthétique pour permettre de comprendre leur fonctionnement. En utilisant ces techniques, nous pouvons nous attendre à un bon retour sur investissement, moins de temps d'arrêt et des économies de coûts.

## **Chapitre III**

### **Amplification de mouvement**

### III.1. Introduction

L'amplification de mouvement est une technique puissante qui permet de renforcer et d'améliorer les mouvements dans des séquences d'images ou de vidéos. Que ce soit pour créer des effets visuels époustouflants, améliorer la perception humaine du mouvement ou enrichir l'expérience utilisateur dans des domaines tels que la réalité virtuelle et les jeux vidéo, l'amplification de mouvement ouvre un éventail infini de possibilités créatives.

Dans ce chapitre, nous explorerons les principes fondamentaux de l'amplification de mouvement, les méthodes couramment utilisées et les avantages qu'elle offre. Nous découvrirons comment cette technique permet de donner vie à des mouvements subtils, d'accroître l'intensité d'une action ou même de révéler des détails imperceptibles à l'œil nu. Nous aborderons également les défis auxquels les professionnels de l'image sont confrontés lorsqu'ils utilisent l'amplification de mouvement, tels que la préservation de la cohérence et de la fluidité.

### III.2. Amplification de mouvement

L'amplification du mouvement est une technique qui utilise un traitement exclusif de l'image et de la vidéo pour détecter des mouvements subtils et les rendre visibles à l'œil nu afin de comprendre les interrelations et les causes à l'origine du mouvement.

Les équipements industriels, les machines et les autres composants qui fonctionnent produisent souvent de très petites vibrations et de très petits mouvements. Ces vibrations sont si faibles qu'elles ne peuvent être détectées par l'œil humain. Cependant, lorsque les machines vibrent, les composants peuvent se désaligner, se déséquilibrer, se détacher, se fissurer ou pire encore. Ces mouvements réduisent l'efficacité, endommagent l'équipement et peuvent provoquer des dégâts catastrophiques.

Mais en utilisant une caméra et un logiciel Motion Amplification, il est possible de détecter ces mouvements infimes et d'en comprendre les effets. La technologie Motion Amplification utilise la vidéo numérique et les techniques de traitement de l'image pour mesurer les vibrations et les mouvements pixel par pixel, en extrayant et en mettant à l'échelle les données pour produire une représentation visuelle du mouvement.

## CHAPITRE III: Amplification de mouvement

---

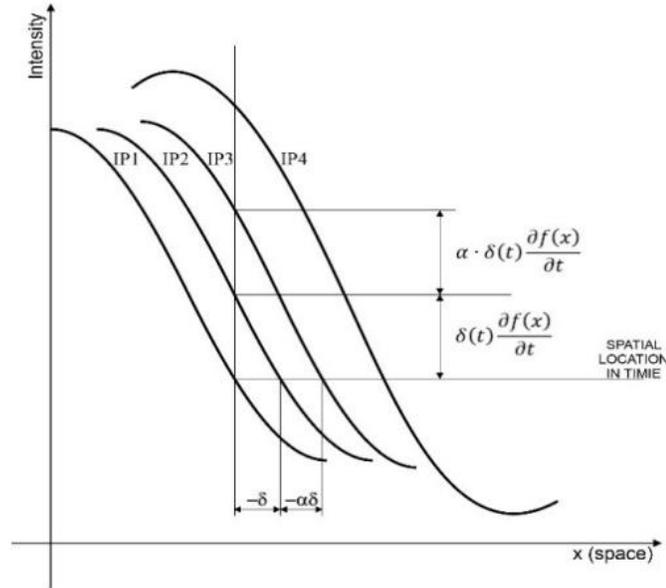
Le flux vidéo en direct traite les pixels en temps réel pour montrer comment les vibrations et les mouvements affectent l'ensemble du système et les structures de soutien. Il peut être enregistré et post-traité en vue d'une analyse avancée. Alors que les techniques conventionnelles d'analyse des vibrations peuvent produire des données numériques et des graphiques indiquant l'ampleur des vibrations et des dommages, il faut voir pour croire. La Vidéo Motion Amplification offre une représentation visuelle puissante et non invasive des mouvements subtils et constitue un moyen d'analyse riche et rentable.[48]

### III.2.1. Lagrangienne

L'approche lagrangienne regroupe des points avec des trajectoires affines. À cette fin, les points d'image caractéristiques sont suivis dans la séquence temporelle. Leurs trajectoires sont regroupées en ensembles de mouvements corrélés. Après interpolation, un champ de mouvement dense pour chaque faisceau de mouvement, chaque pixel est affecté à une couche de mouvement appropriée [49]. De cette façon, un groupe de pixels est segmenté. L'agrandissement de mouvement est réalisé en indiquant le calque approprié, en multipliant tous les déplacements par le facteur constant, et en rendant les pixels de chaque calque de mouvement d'arrière en avant. Suite à la traduction des groupes de points segmentés, des trous sont formés à la limite de cette zone. Dans le cas considéré, ils sont remplis par la méthode de synthèse de texture. Du point de vue de l'approche lagrangienne, les caractéristiques de la méthode présentée sont l'extraction d'un objet spécifique (un groupe de points) de l'image, et de baser un traitement ultérieur sur ses paramètres. Un inconvénient majeur de la méthode présentée est la complexité de calcul importante qui l'exclut des applications nécessitant des régimes de temps plus élevés. [50,51,52].

### III.2.2. Eulérien linéaire

Le groupe alternatif de techniques basé sur la description eulérienne du flux optique utilise actuellement principalement les méthodes différentielles et de fréquence. L'amplification des petits mouvements repose sur l'expansion de Taylor de premier ordre. L'agrandissement vidéo linéaire (LVM) [53] utilise la variation de l'intensité en pixels sur une coordonnée spatiale spécifique en raison du déplacement de l'image objet dans le champ de vision de la caméra. Dans la figure 1, basée sur l'exemple du cas 1D, les relations sont présentées entre le déplacement du profil d'intensité dans l'espace et dans le temps, basé sur l'hypothèse de linéarité.



**Figure.III.1** : Amplification vidéo linéaire

L'intensité du signal d'entrée aux moments ultérieurs  $t$  et  $t+1$  correspondant aux images successives a été indiquée dans la figure 1 comme les lignes IP1 et IP2. Avec l'hypothèse de linéarité, le déplacement de l'objet mis en évidence le long de l'axe des  $x$  (horizontalement) est proportionnel à son déplacement (translation) le long de l'axe d'intensité (verticalement). Son effet perceptif est le déplacement de l'image objet. L'amplification dans la méthode LVM discutée est donnée par la multiplication de la variation de luminosité dans le temps par le facteur  $\alpha$ , qui se traduit par l'obtention de la ligne IP3. Cette relation peut être exprimée comme suit :

$$I(x, 0) = f(x) \quad (\text{III.1})$$

Formule (III.1) exprime l'intensité à la position  $x$  dans le temps = 0

$$I(x, t) = f(x + \delta t) \quad (\text{III.2})$$

Formule (III.2) exprime l'intensité à la position  $x$  dans le temps =  $t$

Sur la base de l'expansion de la série Taylor de premier ordre sur  $x$

$$\hat{I}(x, t) \approx f(x) + \delta(t) \frac{f \partial(x)}{\partial(x)} \quad (\text{III.3})$$

## CHAPITRE III: Amplification de mouvement

$$\hat{I}(x,t) = I(x,t) + \alpha\delta(t) \frac{f\partial(x)}{\partial(x)} \quad (\text{III.4})$$

$$\hat{I}(x,t) = f(x) + \delta(t) \frac{f\partial(x)}{\partial(x)} + \alpha\delta(t) \frac{f\partial(x)}{\partial(x)} \quad (\text{III.5})$$

L'intensité résultante après agrandissement par facteur  $\alpha$  est :

$$\hat{I}(x,t) = f(x + (1 + \alpha)\delta(t)) \quad (\text{III.6})$$

La méthode LVM est caractérisée par la limitation résultant du fait que le renforcement excessif de  $\alpha$  peut entraîner l'effet de sur coupage – ligne IP4 visible dans l'image finale sous forme d'artefacts. Un autre inconvénient important de l'approche linéaire est l'amplification du bruit avec l'amplification du signal correct. Pour la décomposition de l'image, LVM applique la technique de la pyramide laplacienne pour considérer l'effet d'échelle. Pour réduire le bruit spatial, le filtrage initial avec le filtre Gauss est également appliqué en option, ce qui donne par conséquent la combinaison laplacien de gaussien (LOG). Le processus de conversion LVM, présenté dans la figure 2, comprend la décomposition spatiale de chaque image d'entrée par la pyramide laplacienne, ou le laplacien de Gauss (LOG), le filtrage temporel dans chaque couche des images décomposées, l'amplification, l'ajout d'un signal amplifié au signal original, et la reconstruction des images de séquence à la vidéo de sortie. [54,55].

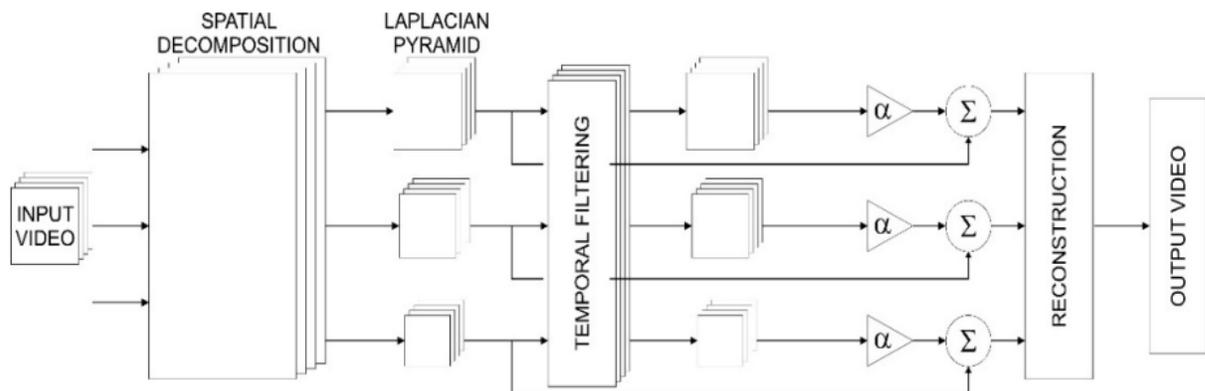


Figure.III.2 : Schéma du traitement LVM

### III.2.3. Base de phase eulérienne

Une approche différente qui réduit sensiblement la limitation susmentionnée du LVM est dirigée vers le signal d'intensité dans le domaine spatial du point de vue de Fourier. La distribution de l'intensité de luminosité, décrite aux points avec les coordonnées  $x$ ,  $y$ , est remplacée par une description de la fréquence spatiale comme un ensemble de signaux sinusoïdaux dont l'image est constituée. Le décalage de la distribution de luminosité correspond, selon le théorème du décalage de Fourier, au décalage de la phase des signaux qui la décrivent.

Dans l'approche visuelle du diagnostic, il est généralement important de distinguer des composants spécifiques d'objets qui présentent un mouvement relatif par rapport aux autres, tels que des pièces individuelles d'une machine ou un fragment d'une installation industrielle entourée d'un arrière-plan stable. En supposant que les résultats attendus de l'observation prennent en compte la distinction entre le mouvement des différents composants de l'image, les techniques basées sur la phase se réfèrent au signal d'intensité local sous la forme de sa phase locale. Les principales orientations concernant l'approche de la détermination et de la modification de la phase locale sont basées sur la pyramide orientable complexe, la transformée de Riesz et le signal monogénique [56], qui est l'extension du terme "signal analytique" à la 2D. Le terme "pyramide orientable" a été introduit dans [57], sur la base du terme "filtres orientables" [58], c'est-à-dire une classe de filtres d'orientation arbitraire synthétisés comme une combinaison linéaire de l'ensemble des filtres de base. Le terme "orientable" a été utilisé pour indiquer la possibilité de changement d'orientation [59]. La banque de filtres décompose chaque image de la vidéo en sous-bandes à valeurs complexes correspondant à différentes échelles et orientations. La fonction de base est la paire de sinusoides complexes en quadrature. Compte tenu de la localité dans l'espace, elle est fenêtrée par l'enveloppe gaussienne.

Dans l'espace 1D, elle peut être exprimée par une fonction de base modélisée [60] comme suit (III.7) :

$$e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} e^{-i\omega x} \quad (\text{III.7})$$

Où la première partie de l'expression (III.7) est une fonction gaussienne et la seconde une sinusoides complexe.

## CHAPITRE III: Amplification de mouvement

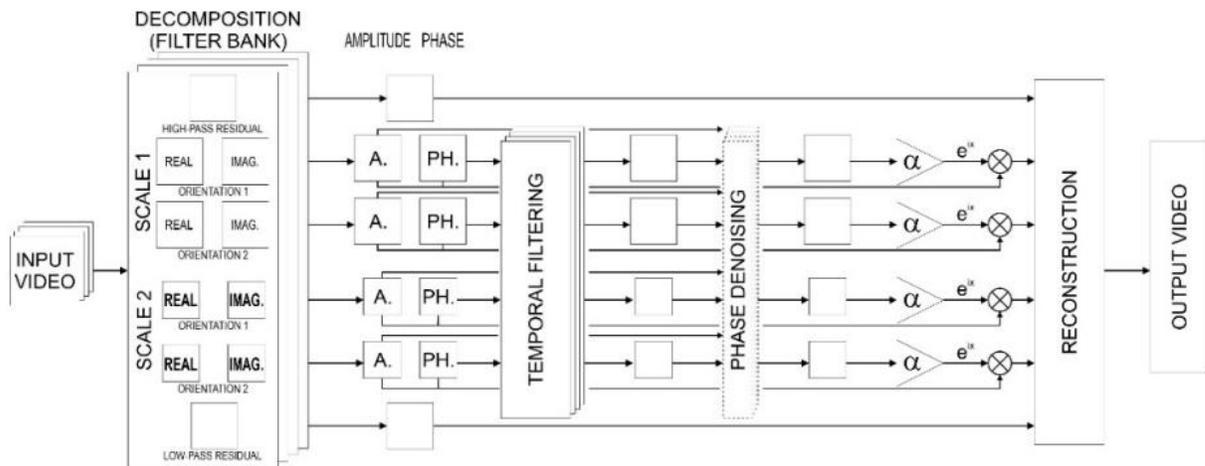
La traduction du signal avec  $\delta$  prend l'expression (III.8) :

$$e^{\frac{-(x-\delta)^2}{2\sigma^2}} e^{-i\omega(x-\delta)} \quad (III.8)$$

La relation entre l'écart-type  $\sigma$  de l'enveloppe gaussienne et la fréquence de la sinusoïde complexe  $\omega$  est constante dans la pyramide orientable. L'effet d'amplification du mouvement est obtenu en décalant la phase à amplitude inchangée, ce qui signifie la multiplication de la différence de phase par le coefficient  $\alpha$ . Une illustration de ce phénomène dans l'espace 1D peut être exprimée par l'équation (III.9) :

$$\sum_{\omega} A_{\omega} e^{i\phi_{\omega} + (1+\alpha)\omega\delta(t)} e^{-i\omega x} = f(x - (1 + \alpha)\delta(t)) \quad (III.9)$$

Le processus d'agrandissement du mouvement vidéo basé sur la phase, présenté dans la figure 3, comprend la décomposition et le filtrage des images suivantes sous la forme d'une pyramide, et la séparation de la phase et de l'amplitude, le filtrage temporel de la phase à l'emplacement, l'orientation et la vente, le lissage spatial de la phase pour augmenter le rapport signal/bruit, l'amplification et la reconstruction de la séquence vidéo. Reconstruire la séquence vidéo.



**Figure.III.3** : Schéma de traitement par phases.

Contrairement au LVM, le maintien d'une amplitude qui reste inchangée en le traitement permet l'application d'amplifications considérablement plus importantes sans phénomènes indésirables apparents comme le sur bruit, ainsi que d'éviter l'amplification du bruit car, de ce point de vue, ils sont traduits et non amplifiés. L'amélioration de la gamme réelle d'amplification

## CHAPITRE III: Amplification de mouvement

---

et de réduction du bruit par rapport au LVM a toutefois été compensée par une augmentation significative de la complexité de calcul. Cela limite les possibilités d'utilisation en temps réel. Cela prédispose le MM phase-basé à une évaluation de l'état technique à l'étape de post-traitement. En ce qui concerne les objets techniques complexes, où leurs composants sont caractérisés par la nature variable des vibrations, l'application du filtrage à bande étroite temporelle permet de les distinguer clairement de toute partie de l'image enregistrée.

Les avantages associés à l'utilisation des propriétés de la phase locale dans la modification de l'enregistrement visuel sont une source d'études ultérieures dans le domaine des MM.. L'alternative la plus populaire aux méthodes basées sur la phase (PBM) utilisant la pyramide dirigeable est actuellement le traitement du mouvement avec la transformée de Riesz. Les fondements mathématiques de ce groupe de méthodes découlent du terme "transformée de Hilbert" dans l'espace 1D, décrite par la formule III.6. La formation d'un signal analytique sous la forme d'une somme composite du signal et de sa transformée de Hilbert permet d'obtenir des informations sur la phase momentanée  $I$  de l'amplitude du signal. De ce point de vue, un équivalent d'une transformation de Hilbert est la transformation de Riesz. Dans l'espace 1D, la transformation caractérisée par la fonction de transfert est (III.10) :

$$H(\omega) = \frac{-j\omega}{|\omega|} \quad (\text{III.10})$$

Dans l'espace 2D, la transformation est caractérisée par la formule (III.11) [61,62] :

$$H_x(\omega) = \frac{-j\omega(x)}{\|\omega\|} \text{ et } H_y(\omega) = \frac{-j\omega(y)}{\|\omega\|} \quad (\text{III.11})$$

où  $\omega$  est la fréquence spatiale.

L'utilisation de la transformée de Riesz en 2D est similaire au cas du signal analytique pour les résultats 1D en obtenant des informations sur la phase du signal dans la vision spatiale [63]. L'approche présentée décompose l'image d'entrée en sous-bandes non orientées correspondant à différentes échelles et soumet chaque sous-bande à la transformation de Riesz. Afin de minimiser la durée du traitement, la transformée de Riesz a été approximée à l'aide du filtre à différence infinie à trois trous.

Les méthodes présentées, telles que l'agrandissement visuel eulérien linéaire (EVM), PBM, Riesz, qui se réfèrent à des changements locaux dans l'image, sont basées sur l'hypothèse de la présence de petits mouvements uniques. De petits mouvements uniques. Dans des

### CHAPITRE III: Amplification de mouvement

---

conditions réelles, sur des objets techniques complexes, les petites intéressantes du point de vue du diagnostic se produisent en présence de grands décalages qui de grands déplacements qui, par conséquent, entraînent l'apparition de nombreux artefacts et d'ombres. Dans la première étape de (DVMAG), le mouvement d'agrandissement de l'escompte est mis en œuvre par déformation, en utilisant soit le suivi Kanade-Lucas-Tomasi (KLT), soit le flux optique. En ce qui concerne le mouvement d'agrandissement, la deuxième étape utilise l'agrandissement eulérien basé sur la phase dans les couches d'avant-plan et d'opacité de chaque image vidéo, obtenues par l'alpha-matte. Les trous révélés par la reconstruction sont remplis à l'aide de la synthèse de texture. L'inconvénient de la méthode présentée est la nécessité d'une sélection manuelle de la région d'intérêt (ROI). Manuelle de la région d'intérêt (ROI) [64]. La technique d'alpha-matte modifiée réduit les interactions de l'utilisateur dans le DVMAG. La technique d'amplification de l'accélération vidéo élimine la nécessité d'une estimation explicite du mouvement en obtenant l'amplification de l'accélération spatiale par l'application d'un filtrage dérivé temporel de second ordre, avec déviation des changements dans la vidéo (uniquement en cas de mouvement linéaire important).

L'étude citée prévoit l'augmentation des petits mouvements, tout en maintenant les grands inchangés. Dans l'EVM linéaire modifiée après la décomposition de chaque image de séquence vidéo en une pyramide spatiale dans chaque couche spatiale, les séries chronologiques de différences d'intensité entre les points suivants sur l'axe temporel aux positions spatiales correspondantes ont été déterminées. Les signaux discrets obtenus ont été transférés au domaine de fréquence et considérés comme une somme de deux composantes avec l'amplitude spectrale au-dessus et en dessous du seuil adopté. Afin d'éliminer les grands mouvements, un filtrage basé sur l'amplitude avec une fonction de pondération à deux valeurs a été effectué. L'amplitude spectrale dépassant le seuil adopté détermine la valeur de la fonction de pondération à 0, alors que dans les autres cas, elle s'élève à 1. L'étude citée a adopté un seuil égal au plus petit des deux : moyenne ou médiane de l'amplitude. Après la filtration, les petits signaux dans les couches spatiales sont agrandis et, finalement, les pyramides sont effondrées. Dans l'approche eulérienne basée sur la phase, le filtrage basé sur l'amplitude est utilisé pour la phase de variation au lieu de la variation de la différence d'intensité. Une approche alternative pour le grossissement des petits mouvements en présence de grands mouvements utilisant le réseau neuronal convolutif est présentée dans [65].

### CHAPITRE III: Amplification de mouvement

---

La technique élargit le domaine des applications de l'agrandissement de mouvement vidéo pour inclure des observations de petits mouvements en présence de mouvements rapides et importants. Le sujet principal de l'étude citée est l'élimination de l'effet des motions rapides et volumineuses exprimées avec des changements significatifs dans l'accélération. Ce phénomène, appelé « secousse » et décrit comme le troisième dérivé du mouvement en fonction du temps, peut-être une mesure de l'évaluation des données des séries chronologiques en termes de fluidité. La solution présentée dans l'article implique la conception et l'application d'un filtre sensible aux secousses (JAF), qui coupe les grands mouvements rapides. Le grossissement des petits mouvements est effectué en utilisant la technique d'accélération par phase et la pyramide orientable pour décomposer les images vidéo d'entrée.

Le problème potentiel affectant la qualité de l'effet final du MM n'est pas limité à la présence de mouvements décrits ci-dessus aussi grands dans une image. Les phénomènes naturels qui accompagnent l'enregistrement d'une image provenant d'une source lumineuse ou le fonctionnement d'un capteur peuvent provoquer un effet de l'apparition de changements, qui sont similaires aux changements significatifs en ce qui concerne leurs informations réelles concernant l'état ou le comportement de l'objet sous observation. Le mélange de changements subtils significatifs et non significatifs entraîne l'émergence de bruit significatif dans l'image agrandie. Outre les techniques reconnues pour minimiser cet effet, liées à l'intervention manuelle dans le processus de traitement. L'AF, utilisée en neurosciences, a été utilisée dans l'étude citée pour concevoir un filtre éliminant les changements non structuraux. L'idée d'utiliser l'AF est basée sur l'observation de la distribution temporelle des changements, qui, pour les changements significatifs, démontrent une nature clairement anisotropique de la diffusion en contraste avec les changements non significatif. Le processus MM présenté dans l'étude, qui a adopté le filtre FA par phase, a été réalisé avec la méthode de phase jerk-aware [66].

### III.3. Les applications industrielles de l'amplification de mouvement :

La technique de l'amplification de mouvement aide les gens de nombreuses industries à visualiser les mouvements des machines et des structures, à mesurer avec précision les données de déplacement générées par des millions de pixels de caméra et à résoudre des problèmes fondamentaux.



**Figure III.4** Application industrielle de l'amplification de mouvement

Voici quelques-unes des principales industries qui utilisent cette technique :

#### III.3.1. Amplification du mouvement dans les industries aérospatiales

Les avions, les hélicoptères, les engins spatiaux et les autres véhicules produits par les industries de l'aérospatiale et de la défense exigent les mesures d'essai et d'évaluation les plus rigoureuses pour garantir non seulement leur sécurité, mais aussi leur supériorité opérationnelle. L'avionique, les systèmes mécaniques et les structures peuvent être soumis à la même usure et aux mêmes défauts mécaniques associés aux vibrations, ce qui peut affecter le confort, les performances et la fiabilité de l'opérateur et des passagers.

Parmi les applications aérospatiales de haute performance, l'évaluation du bruit, des vibrations et du faisceau de câbles (NVH) sur les cellules, les composants mécaniques, les moteurs, les rotors et les structures entièrement intégrées sont des étapes nécessaires pour maintenir la sécurité aérienne et prévenir l'usure excessive. Comprendre les caractéristiques

## CHAPITRE III: Amplification de mouvement

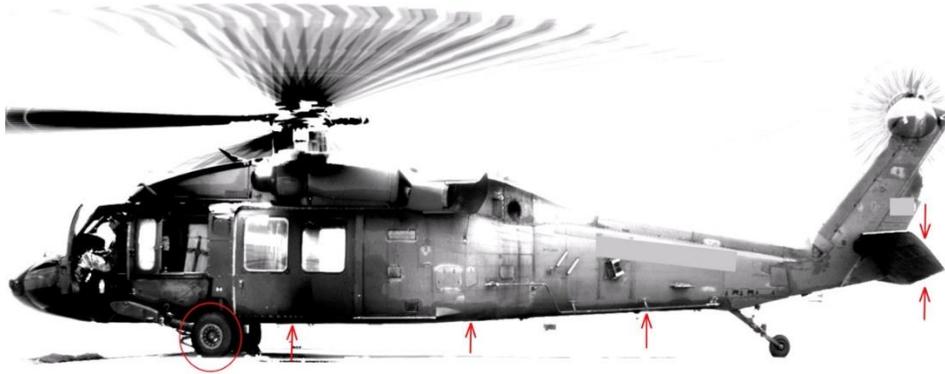
---

modales et la cause fondamentale des vibrations pendant les phases de conception, de prototypage, d'essai et d'évaluation aide à résoudre les problèmes et à prolonger la durée de vie de l'équipement.

Dans la plupart des méthodes standard d'essais de vibration par contact, il est difficile et coûteux d'obtenir une couverture à 100 % du capteur. Les capteurs traditionnels basés sur le contact ajoutent également du poids, ce qui peut avoir un impact sur la masse, la rigidité et les caractéristiques d'amortissement de l'ensemble du composant ou de la structure. En appliquant le Motion Amplification, une technique sans contact, vous pouvez mesurer des millions d'échantillons pour détecter des mouvements subtils de l'ordre de 250 nanomètres.

La technologie de traitement vidéo transforme chaque pixel en un capteur de déplacement virtuel sans contact. Des millions de mesures sont enregistrées en une fraction de seconde, sans connexion physique avec vos applications. Les utilisateurs de Motion Amplification ont la possibilité d'effectuer des acquisitions de vibrations sur tout le champ avec plus de 2,3 millions de points d'échantillonnage, visualisant et quantifiant des mouvements qui ne sont pas visibles à l'œil humain.

En outre, la technologie permet à l'utilisateur de mesurer le déplacement absolu calibré sur l'ensemble du champ de vision, en fournissant une forme d'onde temporelle et un spectre FFT pour chaque emplacement mesuré. Les vidéos de Motion Amplification peuvent être rapidement analysées en appliquant un filtrage de fréquence, des cartes de couleurs de mouvement et de phase et des vecteurs. Cette technologie permet d'accélérer le dépannage des vibrations ou les essais de produits sur de nouvelles conceptions et de nouveaux prototypes. La possibilité de visualiser les données améliore la communication lors de l'examen et du partage des résultats des tests avec le personnel technique et non technique.



**Figure III.5** Amplification du mouvement dans les industries aérospatiales

### III.3.2. L'amplification du mouvement dans L'industrie automobile

Les voitures et les camions, comme les autres machines, vibrent lorsqu'ils fonctionnent. Le mouvement causé par le fonctionnement du moteur d'un véhicule crée des caractéristiques de bruit et de vibration qui se propagent dans tout le véhicule. Les bruits et les vibrations qui se propagent dans l'ensemble du véhicule, de ses composants ou de ses sous-ensembles peuvent avoir un impact sur le confort des passagers et provoquer une usure prématurée.

L'industrie automobile travaille en permanence sur de nouvelles conceptions, de nouveaux composants, de nouvelles technologies et de nouveaux processus qui rendent les automobiles plus sûres, plus rapides et plus efficaces. La conception et l'ingénierie des véhicules automobiles, des carrosseries aux moteurs en passant par la myriade de pièces et d'éléments qui les composent, impliquent de nombreux essais et évaluations.

Dans le cadre de ces essais et évaluations, La technique de l'amplification de mouvement peut jouer un rôle essentiel. La capacité de détecter les vibrations dans l'ensemble de la carrosserie d'un véhicule ou dans un composant ou une partie spécifique d'un véhicule peut donner une idée de sa performance, de sa santé et même de son confort pour le conducteur. Il est également essentiel de comprendre comment les composants et les relations entre les composants du système fonctionnent ensemble.

## CHAPITRE III: Amplification de mouvement

L'accent mis par l'industrie automobile sur une performance supérieure est facilement et instantanément reconnaissable. Nous voyons des voitures de sport et des voitures de course qui se disputent constamment la place de concurrents. De même importance, les mesures de sécurité ainsi que leur mise à niveau et leur évaluation constantes préoccupent toujours l'industrie. Dans ces domaines, la vidéo Motion Amplification a de nombreuses utilisations et applications.

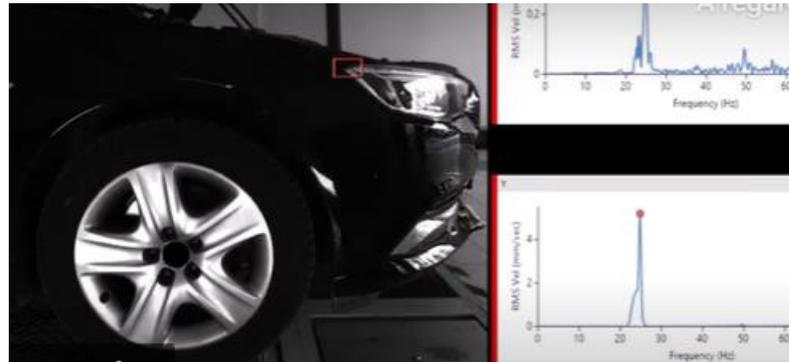


Figure III.6 L'amplification du mouvement dans l'industrie automobile

### III.3.3. L'amplification du mouvement dans l'industrie manufacturière

L'efficacité est le maître mot de l'industrie manufacturière. Les temps d'arrêt de l'équipement, en raison de réparations, d'entretien et de mauvais fonctionnement, signifient une diminution de la production et de la productivité. Au bout du compte, les temps d'arrêt ne sont bons pour personne, qu'il s'agisse de consommateurs, de travailleurs ou de propriétaires d'entreprise. Nous n'avons pas besoin de vous dire que les machines et le matériel de fabrication ont tendance à être volumineux et complexes, et qu'ils comportent un certain nombre de pièces, de supports et de systèmes interreliés.

Lorsque l'entretien et les réparations sont nécessaires, surtout s'il s'agit d'un gros travail qui a surgi à l'improviste, tout peut s'arrêter. Bien que nous ne puissions pas empêcher les machines de vieillir et de s'user, Motion Amplification comme outil pour améliorer la surveillance des vibrations et la maintenance prédictive et pour s'assurer que votre machinerie fonctionne efficacement et en toute sécurité.

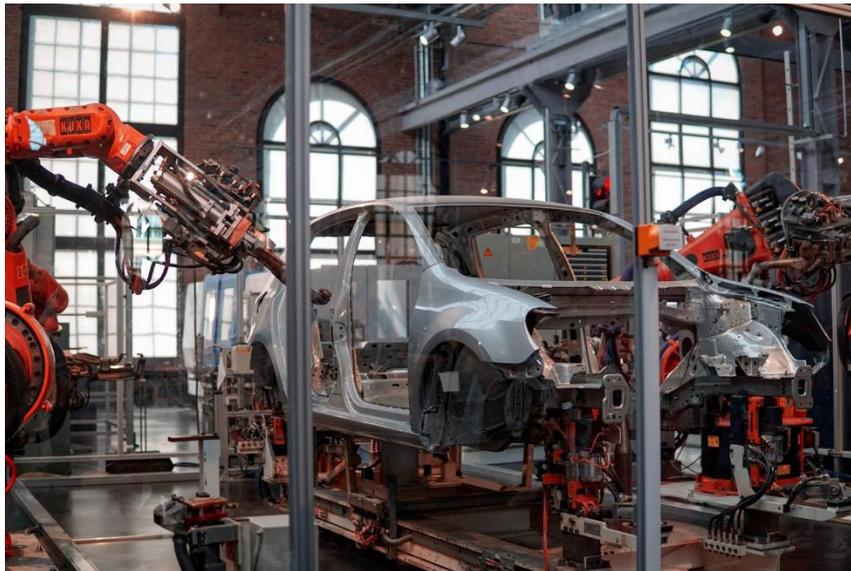
Par rapport aux techniques et technologies traditionnelles d'analyse des vibrations, la technologie Motion Amplification prend littéralement toute la mesure, en analysant les vibrations et les mouvements dans le champ de vision de la caméra. L'analyse sans contact élimine à la fois

## CHAPITRE III: Amplification de mouvement

---

le temps nécessaire pour placer les capteurs de vibrations et les erreurs de placement qui peuvent affecter les mesures.

Comme nous le disons, il faut le voir pour le croire. L'efficacité, après tout, va au-delà de la synchronisation des systèmes et des processus de fabrication ; la communication entre le personnel technique et non technique est également essentielle. L'Amplification du mouvement permet à tout le monde de voir littéralement le problème et de s'attaquer rapidement à la cause première.



**Figure III.7** L'amplification du mouvement dans l'industrie manufacturière

### III.3.4. L'amplification du mouvement dans l'industrie du pétrole et du gaz

L'industrie pétrolière et gazière s'appuie sur un vaste réseau de kilomètres de canalisations. Mais comme tout composant mécanique et pièce maîtresse d'un équipement industriel, les tuyaux, leurs raccords et les supports et équipements environnants sont soumis à l'usure.

Les fluides, les solides et les gaz qui se déplacent dans les pipelines peuvent provoquer des déplacements vibratoires. Avec le temps, les forces vibratoires peuvent entraîner le desserrement et la dégradation des fixations, des raccords et des points d'ancrage. Les problèmes de vibration sont à la fois fréquents et persistants dans l'industrie pétrolière et gazière, et la fatigue induite par les vibrations est l'une des causes les plus courantes de défaillance des

## CHAPITRE III: Amplification de mouvement

---

systèmes de tuyauterie de traitement. La technique de l'amplification de mouvement est conçue pour révéler ces vibrations.

Les tuyaux sont peut-être l'infrastructure la plus reconnaissable de l'industrie pétrolière et gazière, mais ils sont loin d'être les seules pièces affectées par les vibrations et la dégradation. Par exemple, les tours structurelles qui supportent la tuyauterie et le poids des lignes d'exploitation sont sujettes à des dégradations dues aux vibrations.

Comme les caméras de l'amplification de mouvement peuvent fournir une vue étendue d'une section entière d'équipement - ou une vue plus précise d'un composant spécifique - il est possible d'obtenir une image plus claire du déplacement, du balancement ou de la torsion d'une structure entière. De même, un examen plus approfondi des fondations et des points d'ancrage soumis à des vibrations excessives peut révéler des fissures, des torsions et d'autres défauts préjudiciables aux opérations.

Les industries de transformation sont également confrontées à des défis uniques en raison des problèmes liés à l'écoulement qui peuvent inclure la dégradation de la structure des conduites, la mauvaise utilisation des pompes et d'autres problèmes. La configuration des tuyaux, des pompes et d'autres composants peut influencer sur les vibrations induites par l'écoulement et affecter les applications hydrauliques. Il est donc important de garder un œil sur votre infrastructure et vos matériaux, afin de permettre à la maintenance proactive et prédictive de prendre les devants.



**Figure III.8** L'amplification du mouvement dans l'industrie du pétrole et du gaz

### III.3.5. L'amplification du mouvement dans l'industrie de la production d'énergie

L'industrie de la production d'énergie implique de nombreux types d'industries, de produits et de ressources, car les combustibles fossiles traditionnels sont associés à l'énergie nucléaire, à l'énergie éolienne, à l'énergie hydraulique et à d'autres sources d'énergie pour alimenter notre monde en électricité. Cependant, presque tous ces secteurs impliquent de grandes machines contenant des pompes, des turbines et d'autres composants rotatifs soumis à des forces vibratoires.

Le suivi des vibrations et de leurs effets est essentiel, car toute centrale électrique doit être fiable et capable de fonctionner en continu. Les temps d'arrêt peuvent avoir des effets considérables sur les consommateurs en aval, qui comprennent essentiellement toutes les autres industries et toutes les personnes connectées au réseau électrique.

Les centrales électriques de tous types ne sont pas étrangères à La technique de l'amplification de mouvement. La caméra de cette technique a été déployée dans de nombreuses centrales électriques pour aider à déterminer les causes fondamentales des problèmes vibratoires. L'examen de divers types de centrales électriques et de l'étendue de leurs problèmes liés aux forces vibratoires confirme l'importance de l'analyse et de la surveillance des vibrations par l'amplification de mouvement pour cette industrie cruciale.



**Figure III.9** L'amplification du mouvement dans l'industrie de la production d'énergie

### III.4. Avantages de l'amplification du mouvement

Les accéléromètres, les jauges de contrainte et les logiciels de modélisation restent des outils précieux pour diagnostiquer les problèmes des machines et/ou des structures. L'amplification du mouvement est une autre ressource pour trouver la cause profonde d'un problème - et elle a ses avantages :

- **C'est rapide et efficace** - La configuration est minimale par rapport à d'autres technologies plus standard et le processus de capture peut prendre quelques secondes seulement dans certains cas.
- **C'est sûr** - Comme l'analyste qui prend les mesures n'a pas à toucher la machine, le risque de blessure, voire de mort, est beaucoup plus faible.
- **Réduction des temps d'arrêt non planifiés** - L'amplification du mouvement permet de voir très facilement les défauts d'une machine, ce qui permet de planifier et d'exécuter les actions correctives avec plus de précision.
- **Fournit des informations exploitables** - Les résultats de l'amplification du mouvement sont produits au format vidéo standard. Cela simplifie la communication de l'état des machines à un public beaucoup plus large au sein d'une installation, car ceux qui ne sont pas aussi bien informés sur l'analyse vibratoire et les technologies prédictives similaires peuvent désormais voir comment la machine ou la structure se déplace pendant le fonctionnement.
- **Application diversifiée** - L'amplification du mouvement peut être utilisée sur une grande variété d'équipements, notamment les machines tournantes, les pompes, les structures, les lignes de traitement, les canalisations, etc.
- **Complète les activités d'analyse des causes profondes** - La cause profonde d'un problème de machine est souvent apparente.

Bien qu'il faille tenir compte de certaines limites inhérentes à l'amplification du mouvement, comme la "ligne de visée" et les interférences optiques, les avantages de cette technologie l'emportent largement sur les inconvénients. Ce système d'acquisition de données sans contact permet à nos analystes de voir ce qui se passe sur l'ensemble de l'actif pendant son fonctionnement et de développer une approche plus ciblée et plus rentable de l'analyse des

défauts, en particulier lorsqu'il est utilisé en complément des technologies prédictives traditionnelles.[67]

### III.5. Conclusion :

L'amplification de mouvement est une technique fascinante qui a le pouvoir de transformer et d'enrichir nos expériences visuelles. À travers ce chapitre, nous avons exploré les principes et les méthodes de l'amplification de mouvement, ainsi que ses nombreuses applications dans divers domaines tels que l'industrie du divertissement, la médecine et la recherche scientifique.

Nous avons découvert comment cette technique nous permet d'améliorer la perception humaine du mouvement, de créer des effets visuels saisissants et de repousser les limites de notre imagination. Cependant, nous avons également pris conscience des défis auxquels sont confrontés les professionnels lorsqu'ils utilisent l'amplification de mouvement, notamment la préservation de la cohérence et de la fluidité.

## **Chapitre VI**

### **Application de l'amplification de mouvement à la détection de vibrations**

## CHAPITRE IV: Application de l'amplification de mouvement à la détection de vibrations

---

### IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'application de l'amplification de mouvement pour la détection de petites vibrations sur des machines électriques. L'objectif étant le teste de la technique d'amplification sur des cas réels et étudier la possibilité de diagnostic. Deux cas ont été traité à savoir : *i*) Le cas d'une pompe à eau et *ii*) le cas d'un compresseur d'air. L'outil employé à cette fin consiste en une application logiciel basée sur l'algorithme d'amplification. L'outil utilisé est décrit dans la section suivante.

### IV.2. Outil utilisé pour l'amplification de mouvement : L'application VidMag

VidMag [67] est une implémentation par Wu et al. de l'article "Eulerian Video Magnification for Revealing Subtle Changes in the World, ACM Transactions on Graphics, Vol 31, Issue 4, 2012" . Il permet aux utilisateurs de visualiser et d'analyser les changements subtils de couleur et/ou de mouvement dans les vidéos en l'amplifiant. Contrairement à l'implémentation d'échantillons en ligne de commande dans Matlab par les auteurs de l'article, ils sont décidés d'implémenter l'amplification vidéo eulérien en utilisant C++ avec OpenCV et ajouté une interface utilisateur intuitive avec Qt pour faciliter l'utilisation. Le traitement d'une vidéo donnée peut prendre quelques secondes en raison de la nature de l'algorithme, mais comme nous utilisons C++ et OpenCV, le traitement est beaucoup plus rapide qu'avec Matlab. La figure IV.1 montre l'interface graphique du logiciel VidMag. Elle consiste principalement à des boutons de chargement et traitement de la vidéo et des paramètres de l'algorithme de l'amplification.

## CHAPITRE IV: Application de l'amplification de mouvement à la détection de vibrations



**Figure IV.1.** Interface du logiciel VIDMAG

L'interface graphique offre les interactions de base habituelles pour la manipulation et l'analyse des vidéos, telles que le chargement d'une vidéo à partir du système de fichiers ("Load" dans le coin inférieur gauche), la lecture d'une vidéo ("Play"), le chargement des paramètres prédéfinis ("Load" dans le coin supérieur droit), et le choix de différents paramètres de traitement ainsi que le type d'amplification vidéo eulérien. En outre, il est possible de créer un masque pour analyser seulement certaines zones d'intérêt.

Pour utiliser cette implémentation, il faut d'abord charger un fichier vidéo via le bouton "Load" dans le coin inférieur gauche. Après cela, un paramètre préréglé peut être chargé ou les paramètres de traitement sont sélectionnés manuellement. Pour les débutants, ils conseillent de commencer avec un paramètre présent et de varier les paramètres comme désiré. Une fois que les paramètres sont tous définis, un masque peut être appliqué. La vidéo peut être traitée via le bouton "Process" dans le coin inférieur droit. La vidéo traitée est automatiquement enregistrée dans /Data et peut être lu via le bouton "Play". Différentes caractéristiques de la vidéo peuvent être explorées en changeant les paramètres et en traitant la vidéo à nouveau.

## **CHAPITRE IV: Application de l'amplification de mouvement à la détection de vibrations**

---

### **IV.3. Paramètres importants durant l'enregistrement des vidéos :**

Au moment d'enregistrement :

- Minimiser les mouvements étrangers en fixant la caméra.
- Enregistrer dans la résolution spatiale la plus élevée possible et faire occuper la majeure partie du cadre par le sujet. Le plus de pixels couvrant l'objet d'intérêt - le meilleur signal que vous seriez en mesure d'extraire.
- Enregistrer la vidéo en mode ralenti « slow motion » ou une caméra rapide.
- Si possible, enregistrez/stockez votre vidéo non compressée. Les codecs qui compressent les trames indépendamment (par ex. Motion JPEG) sont habituellement préférables aux codecs qui exploitent la redondance entre les trames (par ex. H.264) qui, dans certains paramètres, peuvent introduire des signaux temporels liés à la compression dans la vidéo.
- Choisissez l'échelle de temps à amplifier. Par exemple, les battements de cœur ont tendance à se produire environ une fois par seconde pour les adultes, correspondant à 1 Hz, et vous pouvez amplifier le contenu entre 0.5Hz et 3Hz pour être sûr. Plus l'intervalle est étroit, plus l'amplification est concentrée et moins le bruit est amplifié, mais au risque de manquer des phénomènes physiques.

### **IV.4. Application à la détection des parties en vibration d'une pompe à eau**

Dans cette partie on va essayer de présenter quelques résultats d'amplification de mouvements à partir d'application de logiciel VIDMAG sur une pompe à eau domestique. Il est bien connu que les pompes à eau peuvent être une source de bruit audible gênant si des erreurs de fixation sont commises durant leur montage. La figure IV. 2 montre l'exemple traité d'une pompe avant et après amplification. Après amplification, il a été possible de détecter la vibration du bras droit du support mal fixé et constitue un point d'intervention. Le point détecté n'était pas visible à l'œil nu chose qui prouve l'efficacité de la technique.

## CHAPITRE IV: Application de l'amplification de mouvement à la détection de vibrations



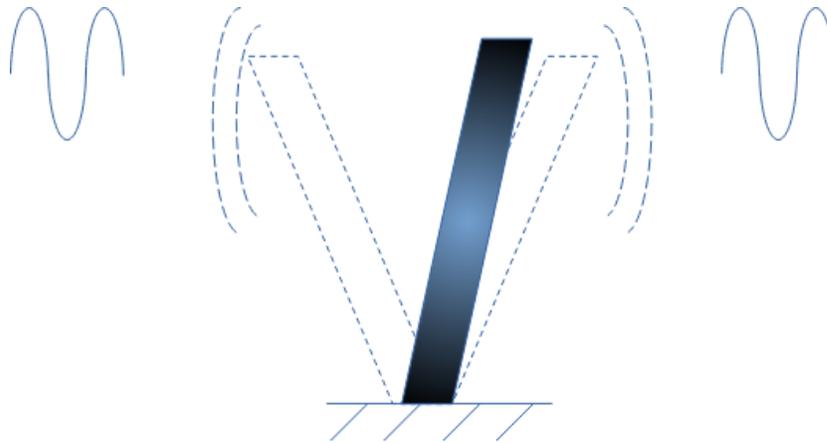
**Figure IV.2.** Détection des parties vibrants sur une pompe à eau : Vidéo originale et résultat après traitement. Le bras à droite de l'image est détecté comme la source de vibrations

## CHAPITRE IV: Application de l'amplification de mouvement à la détection de vibrations

---

### IV.5. Application associée à la mesure du son

Parmi les paramètres à fournir à l'algorithme d'amplification, on trouve la fréquence spatiale. Ce paramètre peut faire l'objet d'estimation à travers la mesure du son. En effet, les vibrations génèrent une onde sonore au voisinage qui correspond à la même fréquence de vibration (figure IV.3). Par ailleurs, l'association de la mesure du son au mouvement permettra de remédier efficacement aux défaillances observées et de s'assurer de la qualité d'intervention.



**Figure IV.3.** Le signal son correspond à la fréquence du mouvement

Dans cette partie d'application, nous avons opté pour l'amplification de mouvement associée à la mesure du son d'un compresseur d'air. Dans ce cas, l'enregistrement simultané du son et de la vidéo a été réalisé sur un compresseur de petite taille montré sur la figure IV.4. L'analyse audio est réalisée à l'aide d'une application mobile (PHYPHOX) dont les résultats correspondant à la vidéo enregistrée sont donnés par la figure IV.5. Le signal enregistré est en réalité n'est pas uniforme et présente une succession de valeurs qui sont loin d'être périodique. Cependant, on estime que la fréquence du bruit est assez élevée. Comme valeur fixée pour l'amplification de la vidéo, on a considéré une valeur de 20 Hz.

## CHAPITRE IV: Application de l'amplification de mouvement à la détection de vibrations

---



Figure IV. 4. Compresseur d'air sous teste

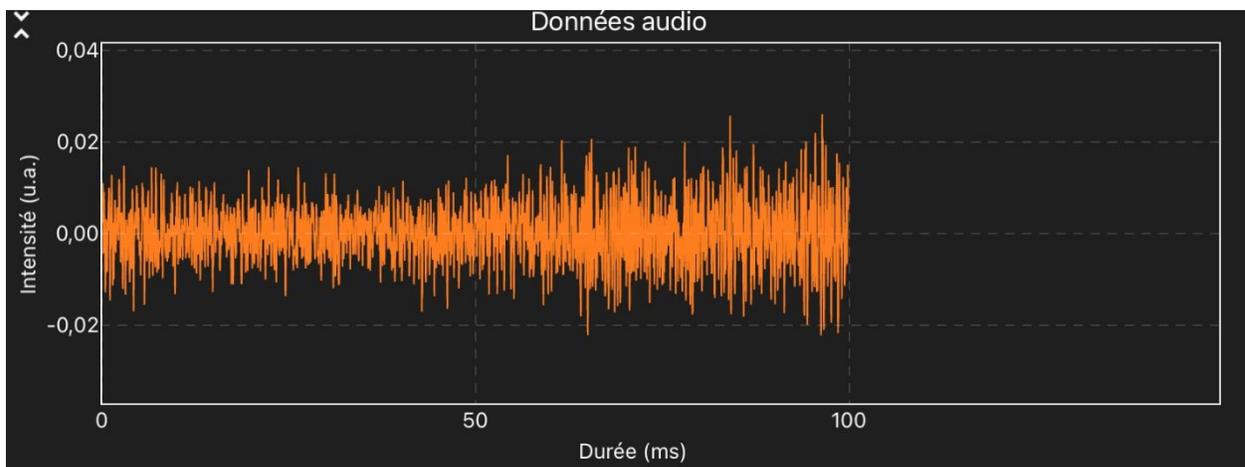
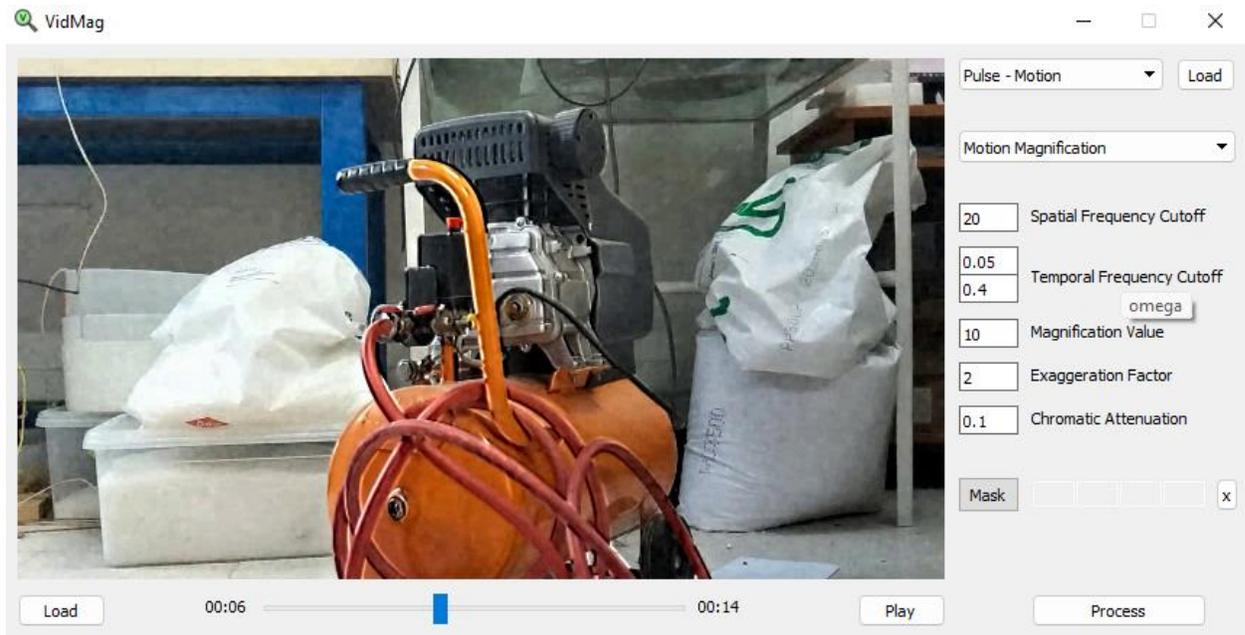


Figure IV. 5. Enregistrement audio au voisinage du compresseur

## CHAPITRE IV: Application de l'amplification de mouvement à la détection de vibrations



**Figure IV. 6.** Vidéo compresseur après amplification (x10). Les parties signalées en rouge ont été identifiées comme représentant une vibration importante

La figure IV.6 montre la vidéo du compresseur amplifiée 10 fois et les parties identifiées comme source de vibration. En effet, l'amplification a permis de visualiser les parties en vibrations qui n'étaient clairement visibles dans la vidéo originale.

## **CHAPITRE IV: Application de l'amplification de mouvement à la détection de vibrations**

---

### **IV. 6. Inconvénient de l'amplification de mouvement**

Au cours de l'application de la technique par les outils auxquels on a pu accéder nous a montré quelques inconvénients :

- Le choix des paramètres n'est assez simple. Il faut a priori avoir une idée sur le mouvement, tel que l'ordre de grandeur de la fréquence.
- Plus on augmente le taux d'amplification (magnification value) plus la vidéo sera de mauvaise qualité et peu exploitable. Cela limite le taux d'amplification à des valeurs généralement faibles (moins de 15 pour une résolution acceptable) et donc de ne pas visualiser assez les petits mouvements.

### **IV.7. Conclusion**

Les résultats d'amplification du mouvement appliquée sur deux cas réels ont été présentés. La technique a permis de mettre en évidence les parties en vibrations pour éventuellement intervenir pour y remédier. La technique s'est montrée donc assez intéressante pour l'identification de la source de petite vibrations et forme ainsi un outil de diagnostic assez important.

## **Conclusion générale**

Au cours de ce mémoire de master, nous avons exploré l'utilisation de l'amplification de mouvement en tant qu'outil novateur de diagnostic dans le domaine des machines électriques. À travers nos quatre chapitres, nous avons examiné l'état de l'art sur les défauts dans les machines électriques, les méthodes de diagnostic existantes, l'application de l'amplification de mouvement en tant que méthode de diagnostic, et enfin, nous avons réalisé une étude de cas en utilisant un logiciel d'amplification de mouvement sur deux vidéos.

En conclusion, ce mémoire de master a démontré le potentiel prometteur de l'amplification de mouvement en tant qu'outil de diagnostic dans le domaine des machines électriques. Cette approche permet d'améliorer la détection précoce des défauts, d'optimiser la maintenance préventive et de réduire les coûts de réparation. Toutefois, il est important de noter que l'amplification de mouvement ne doit pas être considérée comme une méthode de diagnostic isolée, mais plutôt comme un complément aux techniques de diagnostic existantes.

Des perspectives de recherche futures s'ouvrent devant nous, telles que l'exploration de nouvelles techniques d'amplification de mouvement, l'intégration de l'intelligence artificielle pour une détection automatisée des défauts, et l'élargissement de l'application de l'amplification de mouvement à d'autres domaines de l'industrie. Ces développements peuvent contribuer à améliorer encore davantage l'efficacité du diagnostic des machines électriques.

## Bibliographique

- [1] Didier, G. (2004). Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances. Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I.
- [2] Aïcha ABED, Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I en Génie Electrique Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone.
- [3] Sofien HAJJI ; Modélisation, observation et commande de la machine asynchrone ;Cotutelle de thèse entre l'Université de Caen Basse-Normandie (France)et l'Université de Sfax (Tunisie) ;2009
- [4] ANDRIAN CEBAN ; méthode globale de diagnostic des machines électriques.
- [5] Xie Ying. (2010). Performance Evaluation and Thermal Fields Analysis of Induction Motor with Broken Rotor Bars Located at Different Relative Positions. IEEE Trans. Magnetics, Vol.46, No.5, (May 2010), pp. 1243–1250, ISSN 0018-9464
- [6] Didier G., « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances », Thèse de doctorat, Université Nancy 1, France, 2004.
- [7] : Allianz, 1988"Présentation des avaries. Machines électriques tournantes" Cahier des Préventions.CP2.
- [8] : Roland casimir ,92 « diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes »
- [9] Elkasabgy, N.M. ; Eastham, A.R., Dawson, G.E. (1992). Detection of Broken Bars in the Cage Rotor on an Induction Machine. IEEE Trans on Industry Applications, Vol.28, No.1, (1992), pp. 165 –171, ISSN 0093-9994
- [10] Bellini, A. ; Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C., Kliman, G.B. (2001). Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Bars by Means of Electrical Signature Analysis. IEEE Trans on Industry Applications, Vol.37, No.5, (2001), pp. 1248-1255, ISSN 0093-9994
- [11] Said, M.S.N.; Benbouzid, M.E.H., Benchaib,A. (2000). Detection of Broken Bars in Induction Motors Using an Extended Kalman Filter for Rotor Resistance Sensorless Estimation. IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.15, No.1, (March 2000), pp. 66-70, ISSN 0885-8969

- [12] Mohammed, O.A.; Abed, N.Y., Ganu, S. (2006). Modeling and Characterization of Induction Motor Internal Faults Using Finite-Element and Discrete Wavelet Transforms. IEEE Trans. Magnetics, Vol.42, No.10, (October 2006), pp. 3434–3436, ISSN 0018-9464
- [13] Mirafzal, B. & Demerdash, N.A.O. (2004). Induction Machine Broken-bar Fault Diagnosis Using the Rotor Magnetic Field Space-vector Orientation. IEEE Trans. Industry Applications, Vol.40, No.2, (February 2004), pp. 534–542, ISSN 0093-9994
- [14] Xie Ying. (2009). Characteristic Performance Analysis of Squirrel Cage Induction Motor with Broken Bars. IEEE Trans. Magnetics, Vol.45, No.2, (February 2004), Part:1, pp. 759–766, ISSN 0018-9464
- [15] Sprooten, J. & Maun, J.-C.(2009). Influence of Saturation Level on the Effect of Broken Bars in Induction Motors Using Fundamental Electromagnetic Laws and Finite Element Simulations. IEEE Trans. Energy Conversion, Vol.24, No.3, (September 2009), pp. 557–564, ISSN 0885-8969
- [16] Bentounsi, A. & Nicolas, A. (1988). on Line Diagnosis of Defaults on Squirrel Cage Motor Using FEM. IEEE Trans. Magnetics, Vol.34, No.5, (September 1998),Part:1, pp. 3511–3514, ISSN 0018-9464
- [17] Kliman, G.B.; Koegl, R.A., Stein, J., Endicott, R.D., Madden, M.W. (1988). Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors. IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.3, No.4, December 1988), pp. 873-879, ISSN 0885- 8969
- [18] Costa, F.F.; de Almeida, L.A.L., Naidu, S.R., Braga-Filho, E.R., Alves, R.N.C. (2004). Improving the Signal Data Acquisition in Condition Monitoring of Electrical Machines. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, Vol. 53, (August 2004), pp.1015-1019, ISSN 0018-9456
- [19] Walliser, R.F. & Landy, C.F. (1994). Determination of Interbar Current Effects in the Detection of Broken Rotor Bars in Squirrel Cage Induction Motor. IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.9, No.1, (March 1994), pp. 152-158, ISSN 0885-8969

- [20] Bacha, K.; Gossa, M., Capolino, G.-A. (2004). Diagnosis of Induction Motor Rotor Broken Bars. 2004 IEEE International Conference on Industrial Technology, pp.979-984, ISBN 0-7803-8662-0, Hammamet, Tunisia, December 8-10,200
- [21] W.Thomson. & M.Fenger. (2001). Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults. IEEE Industry Applications Magazine, Vol.7, No.4, (July/August 2001), pp. 26-34, ISSN 0093-9994
- [22] Mueller, M.A.; Williamson, S., Flack, T.J., Atallah, K., Baholo, B., Howe, D., Mellor, P.H. (1995).Calculation of Iron Losses from Time-stepped Finite-element Model of Cage Induction Machines. IEEE Conference Publication, No.412, (September 1995), pp. 88-92, ISSN 0537-9989
- [23] Boglietti, A.; Cavagnino, A., Staton, D.A. (2005). TEFC Induction Motors Thermal Models: A Parameter Sensitivity Analysis. IEEE Trans on Industry Applications, Vol.41, No.3, (May/June 2005), pp. 756-763, ISSN 0093-9994
- [24] Staton, D.; Boglietti, A., Cavagnino, A. (2005). Solving the More Difficult Aspects of Electric Motor Thermal Analysis in Small and Medium Size Industrial Induction Motors. IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.20, No.3, (September 2005), pp.620-628, ISSN 0885-8969
- [25] Alberti, L. & Bianchi, N. (2008). a Coupled Thermal-Electromagnetic Analysisfor a Rapid and Accurate Prediction of IM Performance. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 10, (October 2008), pp. 3575–3582, ISSN 0278-0046
- [26] R. Casimir, E. Bouteleux, H. Yahoui, G. Clerc, H. Henao, C. Delmotte, G. A. Capolino, G. Rostaing, J. P. Rognon, E. Foulon, L. Loron, H. Razik, G. Didier, G. Houdouin, G. Barakat, B. Dakyo, S. Bachir, S. Tnani, G.Champenois, J. C. Trigeassou, V. Devanneaux, B. Dagues, and J. Faucher, "Comparison of modelling methods and of diagnostic of asynchronousmotor in case of defects," in 9th IEEE International Power Electronics Congress CIEP 2004, 2004, pp. 101-108.
- [27] Cho, K.R.; Lang, J.H., Umans, S.D. (1992). Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using State and Parameter Estimation. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28,No.3, (May/Jun 1992), pp. 702-709, ISSN 0093-9994

- [28] Lopez-Fdez, X.M.; Donsion, M.P., Cabanas, M.F., Melero, M.G., Rojas, C.H. (1999). Thermal performance of a 3-phase induction motor with a broken bar, SDEMPED'99 Record, pp. 529-533, ISBN 978-0-7803-9124-6, Gijón, Spain, September 1999
- [29] Antal, M. & Zawilak, J. (2005). Coupling Magneto-thermal Field of Induction Motor with Broken Rotor Bars. *Maszyny Elektryczne*, Vol.72, (2005), pp. 267-272, ISBN 83-204-0335-9
- [30] Razik H., « Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone », Groupe de Recherches en Electrotechnique et Electronique, Université de Henri Poincaré Nancy, France, 2003
- [31] Tarek BOUMEGOURA. « Recherche de Signatures Electromagnétiques des défauts dans une machine asynchrone et Synthèse d'observateurs en vue du diagnostic » Thèse de Doctorat ; E.C.L. 2001-08.
- [32] Babak Vaseghi « Contribution a l'étude des machines électrique en présences de défaut entre spires Modélisation –Réduction du courant de défaut », Thèse de doctorat l'institut national polytechnique de Lorraine, Université de Nancy, 2009.
- [33] Hamid A, Toliyat, Mohammed S, Arefeen, et Alenxender G,Parlos «A method for dynamic Simulation of Air-Gap Eccentricity in Induction Machines », *IEEE Transaction on Industry Applications*,32(4) ;910-917, July –August1996.
- [34] BELHAMDI Saad « Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande » Thèse doctora Faculté des Sciences et de la technologie Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.
- [35] Ayman Hussain « Contribution a la commande adaptative robuste par modes glissants » thèse doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, 2009[41]Abed. A « Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy, 2002.
- [36] Intesar Ahmed, Manzar Ahmed, Kashif Imran,M. Shuja Khan, S. Junaid Akhtar,," Detection of eccentricity Faults in Machine using Frequency Spectrum Technique,". *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol.3, no.1 , February, 2011 pp.111-119.

- [37] Sahraoui M., Ghoggal A., Zouzou S., Benbouzid M., "Dynamic eccentricity in squirrel cage induction motor-Simulation and analytical study of its spectral signature on stator currents", Elsevier Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 16, p.1503-1513, 2008.
- [38] Abdelkarim Bourase « Détection Prédictive des Anomalies des Moteurs de Moyenne Tension lors des Défauts Combinés » thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba 2015
- [39] Bui Viet Phuong « Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite application à l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide », Thèse de doctorat, l'institut National polytechnique, Université de Gre.
- [40] Saliou Diouf « Contribution au diagnostic industriel de défauts de roulement et de Balourd par techniques Neuronales Application à la machine asynchrone », thèse de doctorat, Université Paris XII Val De MARNE –CRETEIL ,2007.
- [41] Smail Bachir, Jean Claude Trigeassau, Slim Tnani « Diagnostic des défauts statorique et rotoriques par identification paramétrique sans capteur de vitesse » , Conférence internationale francophone d'automatique Nantes 8-10 juil 2002.
- [42] Ould Eyoub Mohamed Cheikh, Modification d'une machine tournante « cas d'une machine de filtrage de blé », mémoire de master, université Saad Dahled Blida, 2015.
- [43] A. Boulenger, C. Pachaud, Analyse vibratoire en maintenance. Surveillance et diagnostic des machines, 3e édition 432 pages, Dunod 1998, 2003 et 2007.
- [44] La thermographie infrarouge en maintenance prédictive, energie.wallonie.be. Édition.
- [45] S. Boularand, Thermographie en maintenance, TSMI, Jean Dupuy- Tarbes, 2014.
- [46] R. Mouldi, cours de contrôle non destructif CND, Construction et Fabrication Mécanique, 125 pages, 2017.
- [47] François Berthelot, Benoit Dupont, Guide ultrasons multiéléments, Principes et applications pour le contrôle non destructif, 2013
- [48] (Motion Amplification by RDI) <https://rditechnologies.com/motion-amplification/>

- [49] Liu, C.; Torralba, A.; Freeman, W.T.; Durand, F.; Adelson, E.H. Motion magnification. *ACM Trans. Graph.* 2005, 24, 519–526.
- [50] Wang, J.Y.A.; Adelson, E.H. Representing moving images with layers. *IEEE Trans. Image Process.* 1994, 3, 625–638.
- [51] Efros, A.A.; Leung, T.K. Texture synthesis by non-parametric sampling. In *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece, 20–27 September 1999.*
- [52] Boda, J.; Pandya, D. A Survey on Image Matting Techniques. In *Proceedings of the International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), Chennai, India, 3–5 April 2018.*
- [53] Wu, H.Y.; Rubinstein, M.; Shih, E.; Gutttag, J.V.; Durand, F.; Freeman, W. Eulerian video magnification for revealing subtle changes in the world. *ACM Trans. Graph.* 2012, 31, 65.
- [54] Adelson, E.H.; Anderson, C.H.; Bergen, J.R.; Burt, P.J.; Ogden, J.M. Pyramid methods in image processing. *RCA Engineer* 1984, 29, 33–41.
- [55] Burt, P.J.; Adelson, E.H. The Laplacian Pyramid as a Compact Image Code. In *Readings in Computer Vision: Issues, Problems, Principles, and Paradigms*; Morgan Kaufmann: Burlington, MA, USA, 1987; pp. 671–679.
- [56] Felsberg, M.; Sommer, G. The monogenic signal. *IEEE Trans. Signal. Process.* 2001, 49, 3136–3144.
- [57] Simoncelli, E.P.; Freeman, W.T.; Adelson, E.H.; Heeger, D.J. Shiftable multiscale transforms. *IEEE Trans. Inf. Theory* 1992, 38, 587–607.
- [58] Freeman, W.T.; Adelson, E.H. The design and use of steerable filters. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 1991, 13, 891–906.
- [59] Simoncelli, E.P.; Freeman, W.T. The steerable pyramid: A flexible architecture for multi-scale derivative computation, *Proceedings. Int. Conf. Image Process.* 1995, 3, 444–447.

- [60] Wadhwa, N.; Chen, J.G.; Sellon, J.B.; Wei, D.; Rubinstein, M.; Ghaffari, R.; Freeman, D.M.; Büyüköztürk, O.; Wang, P.; Sun, S.; et al. Motion microscopy for visualizing and quantifying small motions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2017, 114, 11639–11644.
- [61] Unser, M.; Sage, S.; Van De Ville, D. Multiresolution Monogenic Signal Analysis Using the Riesz–Laplace Wavelet Transform. *IEEE Trans. Image Process.* 2009, 18, 2402–2418.
- [62] Arango, C.; Alata, O.; Emonet, R.; Legrand, A.C.; Konik, H. Subtle Motion Analysis and Spotting using the Riesz Pyramid. In *Proceedings of the 13th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2018)*, Setubal, Portugal, 27–28 January 2018.
- [63] Langley, K.; Anderson, S.J. The Riesz transform and simultaneous representations of phase, energy and orientation in spatial vision. *Vis. Res.* 2010, 50, 1748–1765.
- [64] Kumar, M.; Choudhary, T.; Bhuyan, M.K. Small Motion Magnification Using Automated RoI Selection and Spatial Co-ordinate Approach. In *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, India, 22–24 March 2018.
- [65] Chen, W.; McDuff, D. DeepMag: Source Specific Motion Magnification Using Gradient Ascent. *Computer Vision and Pattern Recognition*. arXiv 2018, arXiv:1808.03338.
- [66] Takeda, S.; Akagi, Y.; Okami, K.; Isogai, M.; Kimata, H. Video Magnification in the Wild Using Fractional Anisotropy in Temporal Distribution. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Long Beach, CA, USA, 15–20 June 2019.
- [66] (Motion Amplification by IVC Technologies) <https://ivctechnologies.com/fr/motion-amplification-2/>
- [67] (LogicielVidMag) <https://www.cg.tuwien.ac.at/courses/Visualisierung2/HallOfFame/2016/VidMag/Homepage/index.html>