

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

Laboratoire de Matériaux,  
Technologie des Systèmes  
Énergétiques et Environnement

*Université de Ghardaïa*



Faculté des Sciences et Technologies  
Département d'automatique et électromécanique



**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

## **MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** *Electromécanique*

**Spécialité :** *Maintenance Industrielle*

Par : Mohammed BOUCHAREB & Aimane CHOUIHAT

## **Thème**

Maintenance des machines tournantes par diagnostic vibratoire

**Soutenu publiquement le 28/09/2020**

**Devant le jury :**

<b>Mr.Aissaoui Fares</b>	<b>MCB</b>	Univ. Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>Mr.Djemoui Lalmi</b>	<b>MAB</b>	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>Mr.Bellaouar Abderrahmane</b>	<b>MCA</b>	Univ. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>
<b>Mr.Fenniche abderrazak</b>	<b>MAB</b>	Univ. Ghardaïa	<b>Co.Encadreur</b>

N° d'ordre :  
N° de série :

**Année universitaire 2019/2020**

## Dédicaces

*En signe de respect et de reconnaissance nous dédions ce modeste travail :*

*A nos très chers parents qui ont toujours veillé à notre bien-être et qui ont fait de nous ce qu'on est aujourd'hui.*

*A nos très chers frères et nos très chères sœurs.*

*A nos proches et nos amis.*

*A toute la famille BOUCHAREB et CHOUIHAT.*

## *Remerciements*

*Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.*

Nous adressons en premier lieu notre reconnaissance à **ALLAH** tout puissant, de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous exprimons nos profonds remerciements à notre encadreur **Dr. Abderrahmane BELLAOUAR** pour son suivi, son aide et ses précieux conseils.

Nous tenons également à remercier les membres du jury, qui ont bien voulu accepter de porter leurs jugements sur ce modeste travail que nous souhaitons à la mesure de leur satisfaction.

Et en fin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

*Mohammed BOUCHAREB*

*Ayman CHOUIHAT*

---

**Titre :** Maintenance des machines tournantes par diagnostic vibratoire.

## **Résumé**

Les machines tournantes dans le monde industriel jouent un rôle indispensable, mais les mouvements et les rotations de ces machines produisent plusieurs pannes et défaillances, pour cela le diagnostic par l'analyse vibratoire en utilisant l'analyse spectrale et l'analyse des fréquences est très important pendant la durée de vie de ces machines. Dans ce travail nous avons mis en évidence le concept du diagnostic vibratoire par l'analyse des trois exemples d'une étude précédente qui consiste à étudier trois différents problèmes dont la machine tournante pouvait les rencontrer (Défaillance de la bague externe du roulement, défaillance de l'accouplement de l'arbre, déséquilibre de l'accouplement d'une turbine) et le quatrième cas est une étude sur la prévention de la durée de vie de la machine par les paramètres techniques d'information.

**Mots-clés :** Machines tournantes, Défaillances, Analyse vibratoire, Analyse spectrale, Accouplement, paramètres techniques d'information, Durée de vie.

**العنوان:** صيانة الآلات الدوارة عن طريق التشخيص الاهتزازي.

## **ملخص**

تلعب الآلات الدوارة في العالم الصناعي دورًا لا غنى عنه، ولكن حركات هذه الماكينات وتناوب دوراتها ينتج عنها العديد من الأعطال، ولهذا الغرض، فإن التشخيص من خلال التحليل الاهتزازي باستخدام التحليل الطيفي وتحليل التردد مهم جدًا أثناء فترة استخدام هذه الماكينات. في هذا العمل سلطنا الضوء على مفهوم التشخيص الاهتزازي من خلال تحليل ثلاثة أمثلة لدراسة سابقة تتكون من ثلاث مشاكل التي يمكن أن تواجهها الآلات الدوارة (فشل الحلقة الخارجية للمحمل، فشل توصيل عمود الإدارة، اختلال التوازن في التوربينات) والحالة الرابعة هي دراسة حول وقاية عمر الآلة بواسطة إعدادات المعلومات التقنية.

**كلمات البحث :** الآلات الدوارة، الأعطال، تحليل الاهتزاز، التحليل الطيفي، الاقتران، معلومات المعلمات الفنية، عمر الخدمة.

---



---

**Title:** Maintenance of rotating machines by vibratory diagnosis.

**Abstract**

Rotating machines in the industrial world play an indispensable role, but the movements and rotations of these machines produce several failures, for this purpose, diagnosis by vibratory analysis using spectral analysis and frequency analysis is very important during the lifetime of these machines. In this work we have highlighted the concept of vibratory diagnosis by analysing three examples of a previous study which include a study of three different problems that the turning machine can face (Bearing Outer Ring Failure, Shaft coupling failure, Turbine coupling imbalance) and the fourth example is a study on the Prevention of the machine life by technical parameters of information.

**Keywords:** Rotating machines, Failures, Vibration analysis, Spectral analysis, Coupling, technical parameters information, Service life.

---

# Sommaire

---

Liste des figures .....	i
Liste des tableaux .....	ii
Liste des symboles.....	iii
Liste des abréviations.....	iv
Résumé.....	v
Introduction Générale.....	01

## **Chapitre I : Description du champ de Hassi R'mel**

I.1 Introduction .....	03
I.2 Situation géographique .....	03
I.3 Développement .....	04
I.4 Activités du champ de Hassi R'mel.....	04
I.5 Description générale du service mécanique .....	05
I.6 Organisation de service maintenance .....	05
I.6.1 Section mécanique .....	05
I.6.2 Section électricité .....	07
I.6.2.1 Les travaux curatifs .....	07
I.6.2.2 Les travaux préventifs .....	07
I.6.3 Section instrumentation .....	08
I.6.4 Bureau des méthodes .....	08
I.7 L'historique de l'analyse vibratoire des machines tournantes au niveau de SH site HRM.....	09

## **Chapitre II : Les Machines Tournantes**

II.1 Introduction .....	10
II.2 Principaux types des machines tournantes .....	10
II.2.1 Les machines génératrices .....	10
II.2.2 Les moteurs électriques .....	11
II.2.2.1 La Machine Asynchrone .....	12
II.2.2.1.1 Constitution .....	13

## Sommaire

---

II.2.2.2 La Machine Synchrone .....	13
II.2.2.2.1 Constitution .....	13
II.2.2.3 La Machine à Courant Continu .....	15
II.2.2.3.1 Constitution .....	15
II.2.2.4 Intérêt des moteurs électriques.....	16
II.2.3 Les Turbomachines .....	17
II.2.3.1 Classifications des Turbomachines .....	18
II.2.3.2 Constitution des Turbomachines .....	18
II.3 Principaux du défaut des machines tournantes .....	19
II.3.1 Déséquilibre: défaut de balourd .....	20
II.3.1.1 Défaut de Balourd statique.....	21
II.3.1.2 Balourd dynamique.....	21
II.3.2 Défaut d'alignement .....	22
II.3.2.1 Désalignement d'arbres accouplés .....	22
II.3.2.1.1 Défaut de désalignement angulaire .....	22
II.3.2.1.2 Défaut de désalignement radial .....	23
II.3.3 Défauts de serrage .....	23
II.3.4 Défauts des engrenages .....	24
II. 3.5 Défauts de roulements .....	26
II.3.5.1 Constitution des roulements .....	26
II.3.5.2 Types de roulement .....	27
II.4 Conclusion .....	29

### **Chapitre III : La Maintenance Industrielle et Diagnostic**

III.1 Introduction .....	30
III.2 La Maintenance .....	31
III.2.1 Définition de la maintenance .....	31
III.2.2 Objectifs de la maintenance .....	31
III.2.3 Les fonctions du service maintenance .....	32
III.3 Les types de Maintenance .....	33
III.3.1 La maintenance préventive .....	33
III.3.1.1 La maintenance préventive systématique .....	34

# Sommaire

---

III.3.1.2 La maintenance préventive conditionnelle .....	36
III.3.2 La maintenance Corrective .....	37
III.3.2.1 Types de maintenance corrective .....	38
III.3.3 Les niveaux de maintenance .....	38
III.4 Etude de la fiabilité du processus maintenu .....	40
III.4.1 La loi exponentielle .....	41
III.4.2 La loi normale (Laplace-Gauss) .....	41
III.4.3 La loi Log-normale (ou de Galton) .....	42
III.4.4 La loi de Weibull.....	42
III.5 Définitions de quelques termes liés au diagnostic .....	43
III.6 Généralités sur diagnostic .....	45
III.7 Analyse de la procédure du diagnostic .....	47
III.8 Conclusion .....	48

## **Chapitre IV : L'analyse vibratoire des machines tournantes**

### **Partie 01 : Généralité sur l'analyse vibratoire**

IV.1 Introduction .....	49
IV. 2. L'analyse vibratoire .....	49
IV.3. Définition d'une vibration .....	49
IV.4. Objectifs d'analyse vibratoire .....	50
IV.5. Les avantages et les inconvénients .....	50
IV.6. Caractéristiques d'une vibration .....	50
IV.7. Vibrations des machines tournantes .....	52
IV.8. Les capteurs de vibration .....	52
IV.8.1. Les prosimètres .....	52
IV.8.1.1 Les avantages est les inconvénients .....	53
IV.8.1.2 Problèmes et défauts détectés .....	54
IV.8.2 Vélocimétrie .....	54
IV.8.3 Les accéléromètres .....	55
IV.8.3.1 Les avantages est les inconvénients .....	55
IV.8.3 Problèmes et défauts détectés .....	56

## Sommaire

---

IV.9 Les points de mesurage .....	56
IV.10 La surveillance vibratoire .....	58
IV.11 Les indicateurs des vibrations .....	59
IV.11.1 Surveillance par suivi d'indicateurs scalaires « larges bandes » .....	59
IV.11.2 Surveillance par suivi d'indicateurs scalaires « bandes étroites » .....	60
IV.11.3 Suivi d'évolution d'images spectrales par comparaison avec un gabarit.....	61
IV.11.4 Indicateurs dédiés à la surveillance des défauts induisant des forces impulsionnelles.....	61
IV.12 Image Vibratoire des principaux défauts .....	62
IV.12.1 Balourd .....	63
IV.12.2 Défauts de fixation .....	64
IV.12.3. Défaut d'alignement .....	65
IV.12.4. Défaut d'engrenage .....	66
IV.12.5. Détérioration des roulements .....	67

### **Partie 02 : Etude de cas**

IV.13.1 <sup>er</sup> Cas : Défaillance de la bague externe du roulement de palier .....	68
IV.14. 2 <sup>ème</sup> cas : Refroidisseur CT5- Défaillance de l'accouplement de l'arbre d'entraînement..	71
IV.15.3 <sup>ème</sup> cas : Déséquilibre de l'accouplement d'une turbine.....	74
IV.16. 4 <sup>ème</sup> cas : Prévention de la durée de vie par les paramètres techniques d'information .....	76
IV.17. Conclusion .....	82
Conclusion générale.....	83
Références bibliographiques.....	84

# Liste des figures

---

## Chapitre I

Figure I.1 : Situation géographique du site de Hassi R'Mel .....	03
--	----

## Chapitre II

Figure II.1 : la dynamo .....	11
Figure II.2 : L'alternateur .....	11
Figure II.3 : Moteur à courant alternatif (synchrone ou asynchrone) .....	11
Figure II.4 : Moteur à courant continu .....	12
Figure II.5 : Constitution d'une machine Asynchrone .....	13
Figure II.6 : Constitution d'une Machine Synchrone .....	14
Figure II.7 : Fonctionnement en génératrice .....	15
Figure II.8 : Fonctionnement en moteur .....	15
Figure II.9: Vue du Moteur à courant continu .....	16
Figure II.10 : Exemple de Turbomachine .....	17
Figure II.11 : Eléments constituant les turbomachines .....	19
Figure II.12 : Classification des défauts selon leurs origines .....	20
Figure II.13 Exemples de défauts induisant un balourd .....	21
Figure II.14 Balourd statique .....	21
Figure II.15 : balourd dynamique .....	21
Figure II.16 : Défauts d'alignement d'arbres .....	22
Figure II.17 : Désalignement angulaire .....	22
Figure II.18 Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire.....	22
Figure II.19 : Désalignement angulaire .....	23
Figure II.20: Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial .....	23
Figure II.21 : Défaut d'usure d'accouplement .....	23
Figure II.22 : Schéma simplifié d'un engrenage .....	24
Figure II.23 : Différents types d'engrenage .....	24
Figure II.24 : Efforts sur les dents d'engrenage selon le type de denture .....	25
Figure II.25: Image vibratoire d'un engrenage sain .....	25
Figure II.26 : Image vibratoire d'un engrenage sain .....	26
Figure II.27 : Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes à une rangée....	27
Figure II.28 : différents types de roulements .....	27
Figure II.29 : Dégradations de chemins de roulement dues à des surcharges mécaniques....	28
Figure II.30 : Dégradations de roulements dues à des défauts d'alignement et de montage..	28

# Liste des figures

---

## Chapitre III

Figure III.1 : Les Méthodes de maintenance selon la norme NF X 60-000).....	33
Figure III.2 : Les Méthodes de maintenance selon la norme NF X 60-000.....	35
Figure III.3: Evolution du niveau de performance en maintenance préventive conditionnelle.....	36
Figure III.4 : Evolution du niveau de performance en maintenance corrective .....	37

## Chapitre IV

Figure IV.1 : Nature d'une vibration .....	51
Figure IV.2 : prosimètres et leur driver .....	53
Figure IV.3 : prosimètre monte sur un palier .....	53
Figure IV.4 : schéma de principe d'une vélocimétrie .....	54
Figure IV.5 : capteur de vélocimétrie .....	54
Figure IV.6 : Schéma de principe d'un accéléromètre .....	55
Figure IV.7 : Points de mesure .....	57
Figure IV.8 : Mesure de vibration relative et absolue .....	58
Figure IV.9: Classification des indicateurs de surveillance .....	59
Figure IV.10 : Chaine de mesure du niveau global .....	60
Figure IV.11 : Surveillance par suivi d'évolution spectrale avec déclenchement d'alarme par dépassement de gabarit.....	61
Figure IV.12 : Evolution des amplitudes efficace et de crête .....	62
Figure IV.13 Signature d'un défaut de balourd temporel et spectral linéaire .....	63
Figure IV.14 Mise en évidence d'un défaut de balourd .....	63
Figure IV.15 : Signature d'un défaut de fixation .....	64
Figure IV.16 : Mise en évidence d'un défaut de fixation .....	65
Figure IV.17 : Spectre d'un défaut d'alignement affectant un compresseur tournant à 1 500 tr/mn .....	66
Figure IV.18 : Signature vibratoire d'un défaut d'engrènement .....	67
Figure IV.19 : Signal temporel et spectral d'un défaut de roulement .....	68
Figure IV.20: Analyse vibratoire avant réparation .....	69
Figure IV.21 : Analyse vibratoire après réparation .....	70
Figure IV.22 : Bague externe défaillante .....	70
Figure IV.23 : Niveau global acceptable .....	71
Figure IV.24 : Niveau global après défaillance .....	72

## Liste des figures

---

Figure IV.25: Analyse spectrale .....	72
Figure IV.26 : Accouplement défaillant .....	73
Figure IV.27 : Niveau global après intervention.....	73
Figure IV.28 : La tendance du déplacement .....	74
Figure IV.29 : Avant la correction du problème.....	75
Figure IV.30 : Après correction du problème .....	75
Figure IV.31 : Schéma du contrôle de l'état technique de GP.....	76
Figure IV.32 : Indication des paramètres de l'état technique de GPU.....	77
Figure IV.33 : Changement de l'état vibratoire du palier du compresseur (la composante horizontale de la vibration) .....	80
Figure IV.34 : Niveau des vibrations horizontales et verticales du palier d'appui du compresseur et l'équation de la régression décrivant leurs d'état.....	81



# Liste des tableaux

---

## Chapitre I

<b>Tableau I. 1</b> : l'historique de l'analyse vibratoire site Hassi R'mel .....	09
---	----

## Chapitre IV

<b>Tableau IV.1</b> : L'état technique de GPU chaque 2000 heures de fonctionnement.....	78
---	----

<b>Tableau IV.2</b> : Analyse de l'état technique de l'unité (toutes les 2000 heures de fonctionnement) .....	80
---	----

## Liste des abréviations

---

DNI : Direct Normal Irradiation.

CSTF : Centre de stockage et de transfert par facilité.

SRGA : Station récupérations des gaz associés.

CNDG : Le Centre National de Dispatching Gaz.

SPI : Société des Perfectionnements Industriels.

GMAO : Gestion de Maintenance assistée par Ordinateur

HRM: Hassi Rmel.

GMF: Gear Mesh Frequency.

TBF : Temps de Bonne Fonction.

MTBF : Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement.

REX: Retour d'expérience.

BPFO: Ball Pass Frequency Outer Race.

BPFI: Ball Pass Frequency Inner Race.

CS: Station de compression.

GPU: Gas pumping Units.

HMI: Human machine interface.

## Liste des Symboles

---

$f$  : La fréquence.

$Z$  : Amplitude

$f(t)$  : Densité de probabilité.

$R(t)$  : Fiabilité.

$\lambda$  : Paramètre de la loi ( $> 0$ ).

$F(t)$  : Fonction de répartition.

$\Phi$  : fonction de répartition de la loi normale réduite.

$\beta$  : Paramètre de forme. (Loi de Weibull).

$\eta$  : Paramètre d'échelle.

$\gamma$  : Paramètre de position.

$\lambda(t)$  : Taux de défaillance.

$N$ : vitesse du moteur divisée par 60.

$n$  : nombre de billes ou de rouleaux.

$d$  : Bille/rouleau diamètre.

$D$  : diamètre moyen.

$\beta$  : angle de contact bille-bague.

$C$  : La matrice dispersive.

$M$  : Matrice de Fisher.

$T$  : Le symbole de l'opération de l'acheminement des matrices.

$u$  : Le contenu du temps  $t=k\Delta t$  ( $\Delta t = TBF$  de GPU chaque 2000).

$y$  : un de neuf paramètres d'information des GPU.

---

## Introduction générale

Le monde industriel jusqu'à aujourd'hui a connu 4 révolutions industrielles, la première révolution a commencé vers 1780, c'était basée sur la production mécanique poussée par la machine hydraulique et à vapeur, la deuxième vers 1870, était la production de masse basée sur la division du travail est poussée par l'énergie électrique, la troisième vers les années 1969 est basée sur la production automatisée soutenue par l'électronique et les technologies informatiques et la quatrième d'aujourd'hui, basée sur la virtualisation et sur l'interconnexion d'objets industriels intelligents. Tous ces périodes ont connu plusieurs changements mais l'utilisation des machines tournantes est primordiale dans toutes ces révolutions mais à cause des mouvements permanents de ces machines, les pannes et les défaillances sont toujours présents dans les chaînes de production.

Donc il est nécessaire de surveiller et diagnostiquer périodiquement ces machines pour éviter les pannes et les dysfonctionnements pendant la production, et réduire les coûts directs et indirects dans l'entreprise.

Le diagnostic vibratoire est la méthode la plus utilisée pour maintenir la majorité des problèmes des machines tournantes, en utilisant l'analyse spectrale et l'analyse des fréquences.

L'importance de cette méthode a incité les entreprises à dépenser beaucoup d'argent pour la développer et pour inventer des capteurs plus fiables et plus efficaces.

Pour cela, dans ce mémoire on a essayé d'étudier la maintenance des machines tournantes par l'analyse vibratoire pour savoir si cette méthode est vraiment fiable et précise pour détecter les défauts. D'autre part, une bonne planification des travaux de maintenance, avec une bonne gestion du stock de pièces de rechange et l'utilisation des moyens de diagnostic technique, nous permet de réduire le temps d'arrêt des machines et minimiser les pertes de la production.

On a structuré ce mémoire de fin d'étude en quatre chapitres :

**-Chapitre I : Description du champ de Hassi R'mel :** On a donné une description générale sur le site de Hassi Rmel (Situation géographique, Développement, les différents services,...).

---

**-Chapitre II : Les Machines tournantes :** On a cité les différents types des machines tournantes et les principaux défauts rencontrés par ces machines.

**-Chapitre III : La Maintenance industrielle et le diagnostic :** Dans ce chapitre nous avons mis en évidence le concept de maintenance industrielle et de diagnostic ou on a mentionné les types de maintenance, les fonctions, les services...etc.

**-Chapitre IV : L'analyse vibratoire des machines tournantes :** Ce chapitre est divisé en deux parties :

- **Partie 01 :** Généralités sur l'analyse vibratoire -nous avons expliqué l'analyse des vibrations, et on a défini les capteurs utilisés pour diagnostiquer les vibrations des machines tournantes.
- **Partie 02 :** Etude de cas : - Nous avons analysé une étude précédente de trois exemples afin de confirmer la fiabilité et la précision du diagnostic vibratoire et le quatrième cas est une étude sur la Prévention de la durée de vie par les paramètres techniques d'information.

Nous avons conclu notre mémoire par une conclusion générale.

## I.1 Introduction

La région de Hassi R'mel est caractérisée par les conditions météorologiques suivantes :

- Une pression atmosphérique égale à 0.928 bar,
- Des vitesses du vent qui varient entre 2.14 et 4.15 m/s,
- Des températures extrêmes qui varient de -10°C en hiver, jusqu'à +50°C en été,
- Une insolation normale directe DNI (Direct Normal Irradiation) qui peut atteindre un maximum de 950 W/m<sup>2</sup> en été [1].

## I.2 Situation géographique et Localisation

Le gisement de Hassi R'mel est situé entre les wilayas de Ghardaïa et Laghouat, dans cette région relativement plate du Sahara l'altitude moyenne est d'environ de 750 m au-dessus du niveau de la mer. Le climat est caractérisé par une pluviométrie faible (140 mm/an) et une humidité moyenne de 19% en été et 34% en hiver. Le gisement de Hassi R'mel est l'un des plus grands gisements de gaz à l'échelle mondiale. Il a une forme d'ellipse s'étale sur plus de 3500 km<sup>2</sup>, 70 km du nord au sud et 50 km d'est en ouest, il se situe à une profondeur de 2200 m, la capacité du gisement est de l'ordre de 3000 milliards mètre cubes récupérables [2].

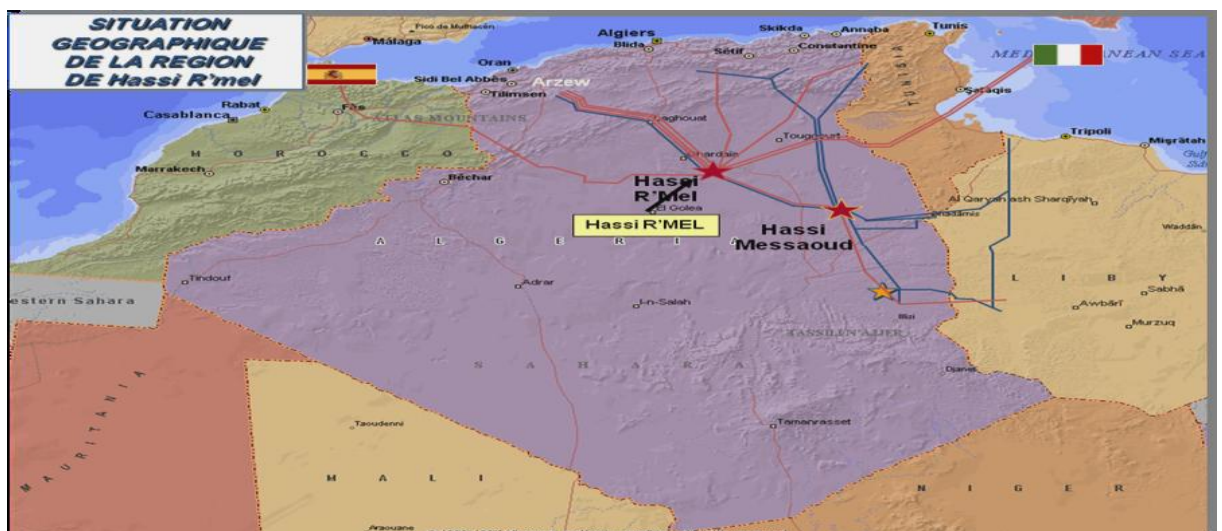


Figure I.1 : Situation géographique du site de Hassi R'mel [2].

### **I.3 Développement**

Le champ de Hassi R'mel est une vaste étendue où sont réparties d'importantes installations, alimenté à partir des puits forés.

Le premier puits HR1 à été foré en 1956, ce puits a mis en évidence la présence de gaz riche en condensât. Le développement de Hassi R'mel s'est trouvé étroitement lié au développement de l'industrie du gaz dans le monde et les importantes réserves estimées à 32000 milliards m<sup>3</sup> ont constitué un atout important pour lancer une politique d'industrie gazière de grande envergure pour le pays.

Ce développement se traduit par la construction et la mise en exploitation en 1961 de la première unité de traitement de gaz appelé (Module 0) d'une capacité de 4 milliards m<sup>3</sup>/an de gaz sec.

Après la nationalisation des hydrocarbures en 1971 la capacité de cette unité fut portée à 14 milliards m<sup>3</sup>/an par l'apport et la mise en service de nouvelles installations.

La période de 1975 à 1980 a permis de concrétiser un plan de développement qui concerne l'ensemble du champ de Hassi R'Mel en mesure de répondre aux besoins énergétiques du pays, à moyen et long terme ainsi qu'aux besoins de nos partenaires, ce plan a permis également de doter Hassi R'mel d'un modèle d'exploitation de différents produits.

La capacité de traitement a été portée à 94 milliards m<sup>3</sup>/an par :

- La réalisation de 4 complexes de traitements de gaz
- Le forage de 150 puits producteurs
- La réalisation de deux stations de réinjection de gaz
- Le forage de 52 puits injecteurs [3].

### **I.4 Activités du champ de Hassi R'mel**

Le champ de Hassi R'mel se compose de trois zones d'exploitation (nord, centre et sud) entre les quelles ont été intercalées deux zones de réinjection.

- **Zone nord** : est constituée du module 3 et de la station de compression Nord
- **Zone centrale** : est constituée du module 0,1 et 4, le CSTF, est la station SRGA et le CNDG.
- **Zone sud** : est constituée du module 2, la station de compression sud [3].

### **I.5 Description générale du service mécanique**

Le service mécanique est composé de trois (03) sections :

- Section fabrication mécanique ;
- Section équilibrage et vibrations ;
- Section vannes.

#### **A / Section fabrication mécanique :**

Cette section a pour taches l'usinage et la confection des pièces d'usure de tous les équipements des unités de la région de Hassi-R'mel.

Elle est composée de plusieurs machines d'usinage (tours, fraiseuses, perceuses, rectifieuses, ...etc.

#### **B / Section équilibrage et vibration :**

Cette section a pour mission le suivi des machines tournantes des unités de Hassi-R'mel par la maintenance prédictive, d'autre part elle assure l'équilibrage de tout les rotors des machines tournantes à savoir les moteurs des pompes, compresseurs centrifuges, soufflantes,...etc.

#### **C / Section vannes :**

Elle est chargée de la réparation des vannes manuelles de toutes les unités de Hassi-R'Mel. [3].

### **I.6 Organisation de service maintenance**

Le service maintenance du module 3 se compose de trois sections (section mécanique, section électricité, section instrumentation), chaque section assure le maintien de bon fonctionnement des équipements qui sont sous sa responsabilité.

#### **I.6.1 Section mécanique**

Cette section est essentiellement responsable du bon fonctionnement des machines tournant. Cette section comporte le personnel suivant :

##### **A. Mécanicien :**

Il a comme tache :



- ❖ inspection
- ❖ démontage et remontage des équipements.
- ❖ le rodage et le montage de la garniture mécanique.
- ❖ alignement des motopompes.
- ❖ effectuer la maintenance de niveau 1.

**B. Technicien :**

Il est responsable de l'utilisation de l'outillage, ainsi que de suivre les différentes méthodes de sécurité lors des révisions.

**C. Chef d'équipe :**

Il est responsable de l'organisation de la révision d'une machine tournante, car lorsqu'une révision est déclenchée, le responsable de section mécanique désigne une équipe pour exécuter cette tâche en donnant l'autorisation de travail au chef d'équipe courant de toutes les consignes de sécurité mentionnées sur cette autorisation.

Pour préparer l'intervention de ce type on procède de la façon suivante :

- ❖ avant l'intervention : c'est préparation de tous les outils nécessaires.
- ❖ Au cours de l'intervention : c'est l'exécution des travaux de maintenance sur l'équipement.
- ❖ après l'intervention : c'est la vérification.

**D. Contre-maître :**

Il a comme tâche :

- ❖ préparation des travaux à l'équipe concernés.
- ❖ avoir l'autorité et la méthode pour diriger plusieurs équipes ayant des tâches différentes.
- ❖ savoir l'importance de chaque tâche (priorité des travaux) et l'assimiler à l'équipe correspondante.
- ❖ Intervention en premier sur les travaux difficiles.

**E. Chef de section :**

- ❖ Il a comme responsabilité de :
- ❖ Etre au courant de tous les problèmes concernant les équipements
- ❖ Savoir l'application de la maintenance prédictive sur les machines tournantes.

- ❖ Prévoir les entretiens programmés des équipements et améliorer les méthodes d'exécution des travaux.
- ❖ Porter un jugement et décision, ainsi que réfléchir sur les problèmes rencontrés et proposer des solutions.
- ❖ Assurer la coordination et l'interface avec le service exploitation et sécurité dans le cadre de réalisation.
- ❖ Avoir la qualification nécessaire pour mener une révision sur des machines tournantes et supervise les travaux des arrêts programmés des révision triennales et décennales.
- ❖ Réaliser les rapports des révisions et les transmettre au chef de service [3].

## **I.6.2 Section électricité**

Cette section est responsable de tous les opérations concernant l'électricité (moteurs électrique, éclairages, réseau Ets). Le personnel de cette section exécute les travaux essentiels :

### **I.6.2.1 Les travaux curatifs**

C'est à dire les travaux effectués après la panne (le dépannage et la réparation).

### **I.6.2.2 les travaux préventifs**

C'est les travaux effectués systématiquement.

#### **a) Inspection préventive :**

- Test d'isolation des moteurs et des installations électriques.
- l'état des installations.
- inspection d'éclairage (changement des laps grilles).

#### **b) test de vibration (moteur)**

- état du roulement.
- fixation du moteur (mal fixé).

### c) révision des moteurs

- changement des roulements.
- nettoyage des pièces.
- changement des joints, filtres, et joints SPI [3].

### I.6.3 section instrumentation

Cette section est concernée par la partie commande de toutes les installations (fermeture, ouverture) ou plus exactement de la maintenance des systèmes de commande de toutes les équipements (vannes automatique, capteurs et les indicateurs).

Le personnel de cette section a des tâches différentes :

- contrôle de toutes les vannes automatique.
- la révision de tous les instruments (capteurs, indicateur).
- l'étalonnage des vannes automatique ainsi les capteurs de vibration (installés dans les équipements statiques).
- l'intervention en cas de pannes accidentelle (curative) [3].

### I.6.4 bureau des méthodes

L'organisation du service de maintenance est basée essentiellement sur bureau de méthode. L'importance de cette dernière réside dans le fait qu'il comporte une base de données complétées de tous les équipements du module.

C'est les méthodes qui occupent de l'application de G.M.A.O leur rôle primordial étant l'organisation des travaux de maintenance.

Le personnel du bureau, les méthodes du service maintenance est généralement composé de trois techniciens, chacun ayant une formation de base dans l'une des spécialités mécanique d'électromécanique, ou instrumentation pour qu'ils puissent communiquer facilement avec le chef de section de la même spécialité, les tâches qui sont attribuées à chaque technicien préparateur sont :

- mise à jour d'état des machines.

- élaboration et déclenchement des O.t (ordre de travail).
- réduction des rapports mensuels.
- utilisation de la documentation. [3].

### I.7 L'historique de l'analyse vibratoire des machines tournantes au niveau de SH site HRM :

**Tableau I.1** : L'historique de l'analyse vibratoire de site Hassi R'mel [4].

	Logiciel de diagnostique	Appareil de mesure	Fournisseur	Observation
1988	VAS (sous DOS)	MICROMAX (analyseur)	VIBROMETER	Début de suivi vibratoire des machines tournantes
1989	—	VIBROPOR 30 (analyseur)	SCHENCK (allemande)	VIBROPOR 30 : petite appareil de mesure globale
1990	CM 120 (sous DOS)	VIBROSTOR41 (collecteur)	SCHENCK	—
1992	CM 120 (sous DOS)	VIBROPOR 41 (analyseur)	SCHENCK	—
1999	CM 400 (sous Win)	VIBROPOR 41	SCHENCK	—
2000	CM 400	VT 60 (collecteur-analyseur)	SCHENCK	VT 60 : compatible avec CM 400

Aujourd'hui le service l'analyse vibratoire des machine tournante joue un très important rôle tel que ils ont avoir plusieurs du développement et l'expérience dans ce domaine des mesures et diagnostics des défauts par fréquence .qui permet de démunir les panne catalectique [4].

## Chapitre II : Les Machines tournantes

### II.1 Introduction

Les machines tournantes, telles que les moteurs électriques, les ventilateurs industriels, les turbines, et les pompes centrifuges sont des composants essentiels des applications industrielles et de production d'énergie. La disponibilité et la fiabilité des machines sont cruciales pour garantir une alimentation électrique fiable.

Une défaillance prématurée peut entraîner des pertes économiques substantielles, en raison de coupures non planifiées et d'éventuels dommages sur l'installation elle-même [5].

L'apparition soudaine d'un défaut de roulement, de fixation ou de désalignement peut très vite baisser la production et conduire à des pertes pouvant s'avérer désastreuse, la détection et le diagnostic précoce des défaillances peuvent mettre en échec leurs progressions et éviter des pertes inutiles.

Pour le diagnostic de ces machines les signatures vibratoires peuvent fournir des indicateurs efficaces et fiables [6].

### II.2 Principaux types des machines tournantes :

Le but essentiel des machines tournantes est la transformation de l'énergie d'une forme dans une autre, l'une au moins de ces formes étant tournantes, l'autre pouvant être électrique ou mécanique.

On peut, a priori, classer les machines tournantes en trois catégories principales:

#### II.2.1 Les machines génératrices :

Les machines génératrices transforment l'énergie mécanique en énergie électrique. Leur fonctionnement est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur par déplacement relatif de celui-ci et d'un champ magnétique, à l'aide d'un engin d'entraînement mécanique. Selon que le courant électrique induit est continu ou alternatif, la machine génératrice sera appelée dynamo ou alternateur.

Les Figures II-1 et II-2 schématisent la constitution des machines génératrices. On remarquera qu'en pratique, le déplacement relatif du circuit électrique et du champ magnétique est obtenu :

- dans le cas de l'alternateur, par rotation du champ magnétique, le circuit étant fixe ;
- et dans le cas de la dynamo, par rotation du circuit électrique dans un champ magnétique fixe [7].

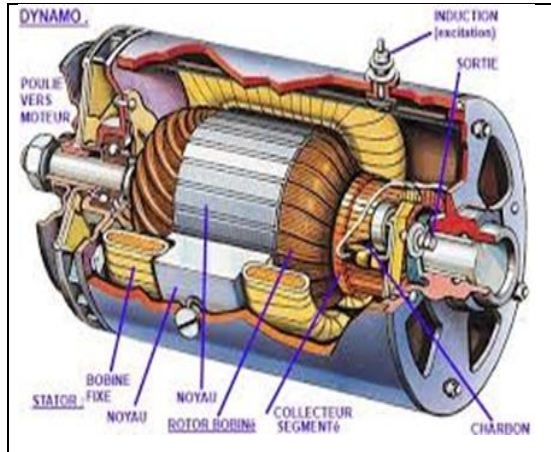


Figure II .1 : Dynamo [8]

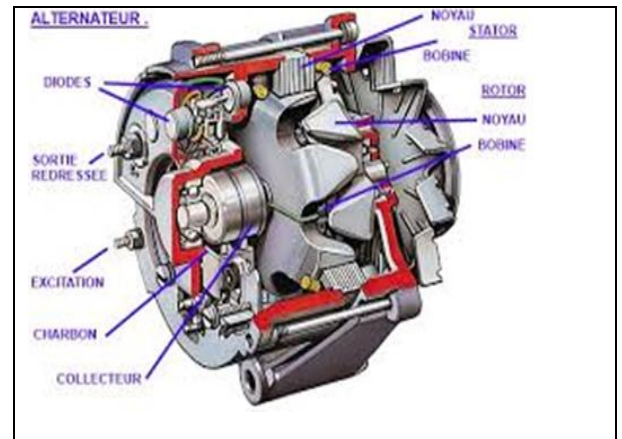


Figure II .2 : Alternateur [8]

### II.2.2 Les moteurs électriques :

Leur fonctionnement est basé sur l'obtention d'un effort mécanique par action d'un champ magnétique sur un circuit électrique traversé par un courant fourni par une source extérieure, laquelle peut aussi produire éventuellement le champ magnétique.

Selon que le courant électrique fourni par la source extérieure est continu ou alternatif, la machine sera appelée **moteur à courant continu** ou **moteur à courant alternatif (synchrone ou asynchrone)**.

Les Figures II-3, II-4 schématisent le fonctionnement de ces moteurs électriques [7].

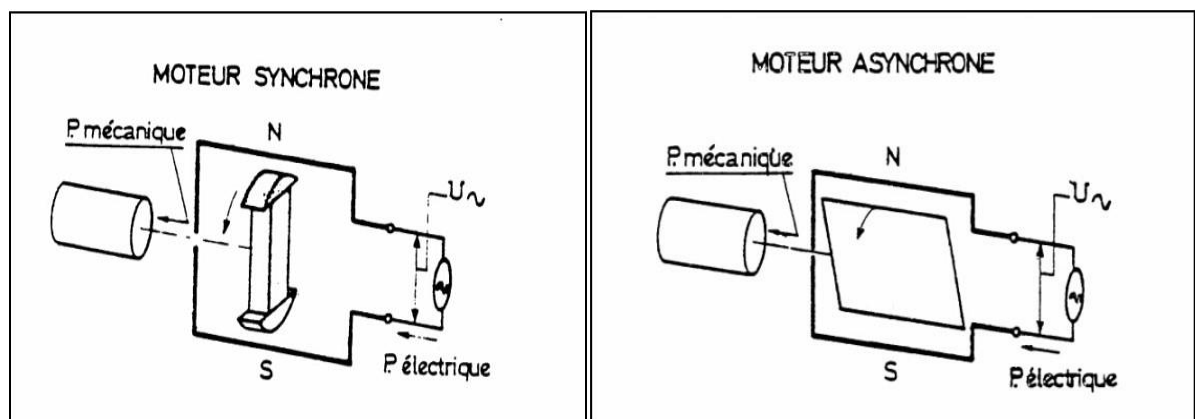


Figure II .3 : Moteur à courant alternatif (synchrone ou asynchrone) [7]

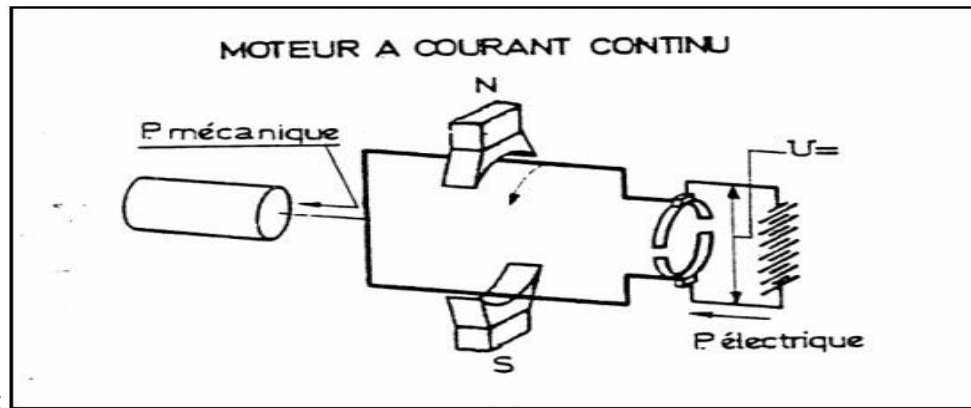


Figure II.4 : Moteur à courant continu [7]

### II.2.2.1 La Machine Asynchrone:

Le moteur asynchrone est, de beaucoup, le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles, du fait de son faible coût, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité.

Son seul point noir est l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer. Les machines triphasées, alimentées directement sur le réseau, représentent la grande majorité des applications; supplantant les machines monophasées aux performances bien moindres et au couple de démarrage nul sans artifice.

Autrefois, sa mise en œuvre (démarrage et variation de vitesse) se révélait compliqué mais tout cela s'est résolu grâce aux progrès de l'électronique de puissance. La conséquence de ce développement de l'électronique de commande fait que le moteur asynchrone est utilisé maintenant dans des domaines très variés [9] :

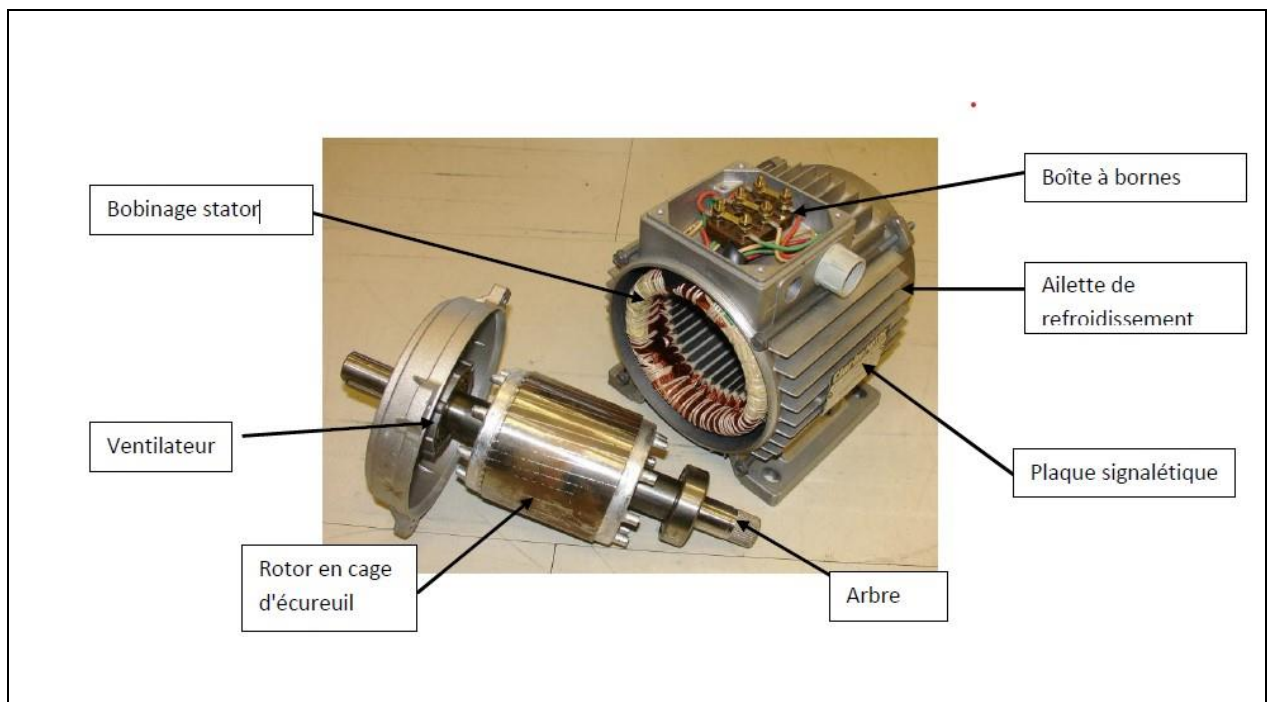
- Transport (TGV est, tramways)
- Industrie
- Production d'énergie (éolienne)

### II.2.2.1.1 Constitution :

La machine asynchrone est constituée de deux éléments principaux :

**Le stator** : constitué de trois enroulements (bobines) parcourus par des courants alternatifs triphasés et possède  $p$  paires de pôles ("nombre de bobinage triphasé au sein dans le stator")

**Le rotor** : Partie tournante du moteur. Le rotor peut être constitué par un bobinage triphasé, mais, le plus souvent, Il est constitué d'une masse métallique dont de l'aluminium pour l'alléger. On parle alors de rotor à cage d'écureuil.[9]



**Figure II .5** : Constitution d'une machine Asynchrone [9]

### II.2.2.2 La Machine Synchrone:

Autrefois utilisés quasi exclusivement en alternateur, le développement de l'électronique de puissance et la généralisation des aimants comme inducteur permettent aujourd'hui d'employer les machines synchrones en tant que moteurs dans une large gamme de puissance. La machine synchrone dans la très grande majorité des cas est utilisé en triphasé [10].

#### II.2.2.2.1 Constitution :

Comme tout moteur, la machine synchrone est constitué d'une partie mobile : le rotor et d'une partie fixe : le stator.



**Stator :**

Le stator est habituellement l'induit (siège de la transformation de puissance). Le stator est constitué d'un bobinage triphasé généralement couplé en étoile, découpé en  $p$  paire de pôles. Les bobinages sont insérés dans des encoches au sein de culasse en ferrite.

**Rotor :**

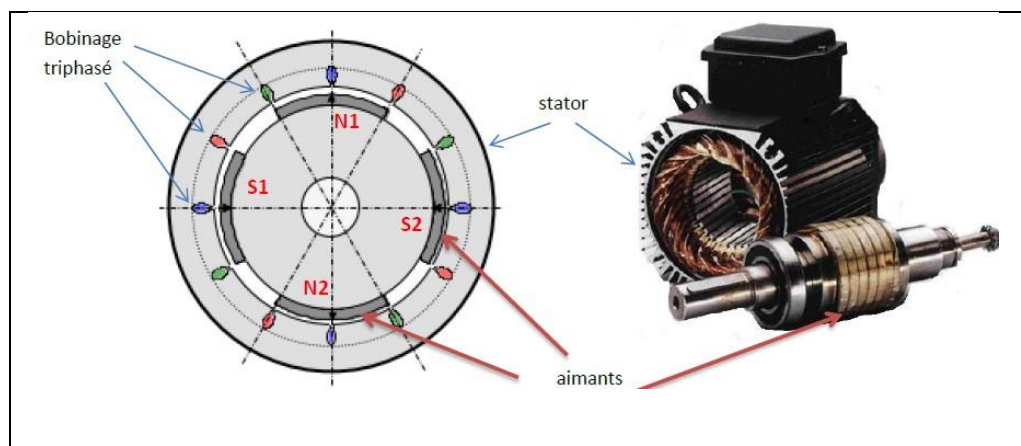
De la même manière, l'inducteur est généralement le rotor. Suivant la technologie utilisée, le champ magnétique est créé par des bobinages ou des aimants permanents. Lorsque que l'inducteur est bobiné, il est nécessaire de conserver des balais afin de l'alimenter (mais cette fois sans commutation).

La machine synchrone brushless veut dire : sans balai, donc à aimants permanents. Cette structure réserve plusieurs avantages :

- Pas de pertes au rotor
- Pas besoin de bobinage et de balais au rotor
- Un rotor plus léger (car aimants plus légers que les bobinages) -> servomoteurs à faible inertie donc très réactifs
- Pour les faibles dimensions, induction plus importante.

Autrefois, cette technologie ne permettait pas de réaliser des machines de très fortes dimensions (cout trop important) mais avec les progrès réalisés sur les aimants, on observe une montée en puissance de ces moteurs.

Les aimants utilisés sont généralement soit des ferrites (faible induction mais bon marché) ou du Samarium cobalt (forte induction mais couteux). [10]

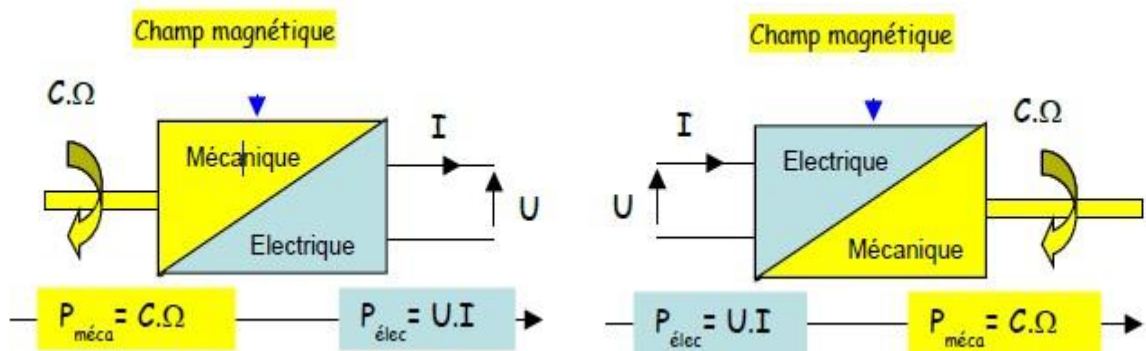


**Figure II .6 :** Constitution d'une Machine Synchrone [10]

### II.2.2.3 La Machine à Courant Continu :

La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Dans les deux cas un champ magnétique est nécessaire aux différentes conversions. Cette machine est donc un convertisseur électromécanique [11].



**Figure II .7:** Fonctionnement en génératrice [11] **Figure II .8 :** Fonctionnement en moteur

#### II.2.2.3.1 Constitution:

##### 1) Vue d'ensemble

La machine à courant continu comporte les parties principales suivantes :

- Une partie fixe appelée STATOR qui aura le rôle d'inducteur.
- Une partie mobile appelée ROTOR qui aura le rôle d'induit.
- Une liaison rotor - éléments extérieurs à la machine appelée COLLECTEUR.

##### 2) L'inducteur

Il est formé soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires.

Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu, elles créent un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer, espace

séparant la partie fixe et la partie mobile, où se situent les conducteurs. Ce flux et ce champ sont orientés du pôle Nord vers le pôle Sud.

### 3) L'induit

Le noyau d'induit est en fer pour canaliser les lignes de champ, les conducteurs sont logés dans des encoches sur le rotor, deux conducteurs forment une spire.

### 4) Collecteur et balais

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre isolées, disposées sur l'extrémité du rotor, les balais portés par le stator frottent sur le collecteur. [11]

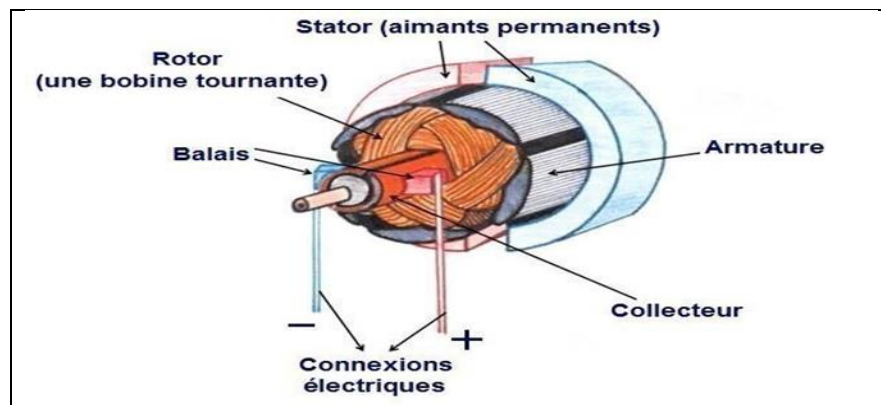


Figure II .9 : Vue du Moteur à courant continu [12]

#### II.2.2.4 Intérêt des moteurs électriques [7]:

Les moteurs électriques ont sur les moteurs thermiques (à essence, gasoil ou gaz) de nombreux avantages :

- ils sont moins polluants et moins bruyants.
- ils démarrent seuls et facilement.
- ils ont souvent un fort couple moteur à faible vitesse et même à l'arrêt.

Cette dernière propriété est très importante. Parce que leur couple est faible à vitesse réduite et nul au démarrage (à vitesse nulle), les moteurs thermiques (à explosion ou diesels) nécessitent un embrayage et un dispositif mécanique à engrenages : la boîte de vitesses.

Le moteur tournant déjà, c'est en faisant patiner l'embrayage que l'on peut communiquer le mouvement à la charge : cela entraîne une dissipation d'énergie thermique par frottements.

C'est aussi l'embrayage qui permet de découpler le moteur de la charge pour changer le rapport de la boîte de vitesses.

L'embrayage n'est pas un dispositif transposable dans le domaine des grandes puissances. C'est pour cela que sur les locomotives diesels électriques, le moteur diesel n'entraîne pas la locomotive : il fait tourner un générateur qui alimente un moteur électrique et c'est ce dernier qui assure l'effort de traction.

Les qualités qui font la supériorité du moteur électrique sur le moteur thermique sont :

- la facilité d'emploi dans le cas de démarrages fréquents ;
- la régularité du couple utile ;
- la possibilité d'inversion du sens de rotation sans intervention de dispositifs mécaniques annexes (comme les engrenages).

Ces qualités sont encore accentuées aujourd'hui, grâce à l'utilisation de l'électronique de puissance [7].

### II.2.3 Les Turbomachines :

On appelle turbomachine un ensemble mécanique de révolution comportant une ou plusieurs roues mobiles (rotor) munies d'aubes (ailettes) qui ménagent entre elles des canaux à travers lesquels le fluide s'écoule. L'échange d'énergie s'effectue dans le rotor et résulte du travail des forces aérodynamiques sur les aubes produites par l'écoulement de fluide autour de celle-ci, et qui résultent principalement de la différence de pression entre les deux faces des aubes [9].

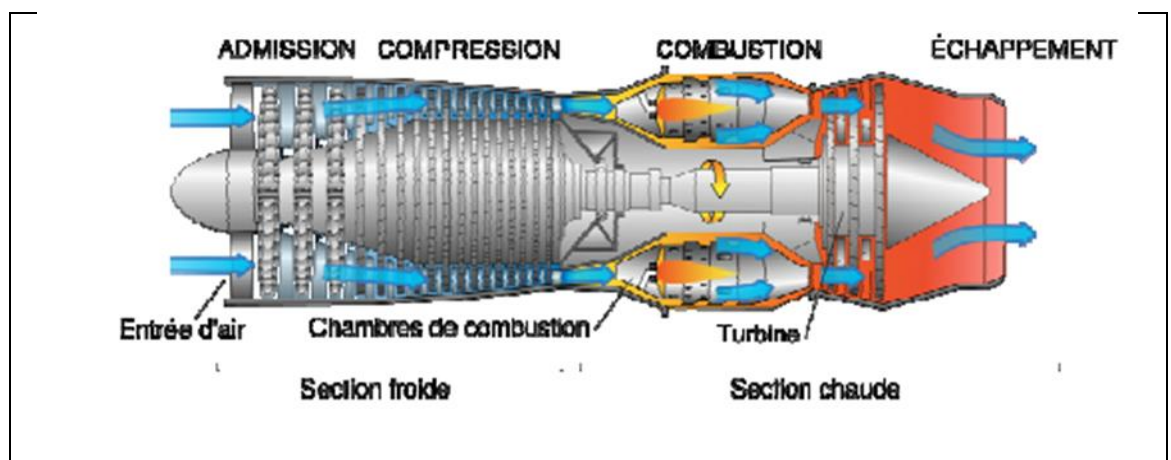


Figure II.10 : Exemple de Turbomachine [13]

### II.2.3.1 Classifications des Turbomachines :

Il existe une très grande variété de turbomachines. Aussi, avant d'en examiner plus avant le principe de fonctionnement, il est utile d'en faire une classification selon divers critères et de l'illustrer par des exemples concrets. De nombreux critères servent à classer les turbomachines. Les plus importants sont les suivants : Au Sens de l'échange d'énergie, on distingue [14]:

➤ Les machines réceptrices qui reçoivent du travail parmi les machines réceptrices, on trouve *les turbopompes, les ventilateurs, les turbosoufflantes, les turbocompresseurs et les hélices aériennes et marines.*

➤ Les machines motrices qui fournissent du travail Les principales machines motrices sont les turbines à vapeur, et à gaz, les turbines hydrauliques, ainsi que les éoliennes.

### II.2.3.2 Constitution des Turbomachines :

D'après leur constitution on distingue deux types de turbomachines :

**1. Turbomachines monocellulaires:** ce sont des machines complètes composées de trois organes distincts que le fluide traverse successivement:

- Distributeur: son rôle est de conduire le fluide depuis la section d'entrée de la machine à la section d'entrée du rotor.
- Le rotor: dans lequel s'effectue l'échange d'énergie par le travail des forces aérodynamiques sur les aubes en rotation.
- Le diffuseur: son rôle est de collecter le fluide à la sortie du rotor et de l'amener à la section de la sortie de la machine.

**2. Turbomachines multicellulaires:** ce sont des machines comportant un seul rotor composé de plusieurs étages, chaque étage ne comprend généralement que deux éléments, à savoir un distributeur et un rotor pour les turbines, un rotor et un diffuseur pour les pompes et les compresseurs [13].

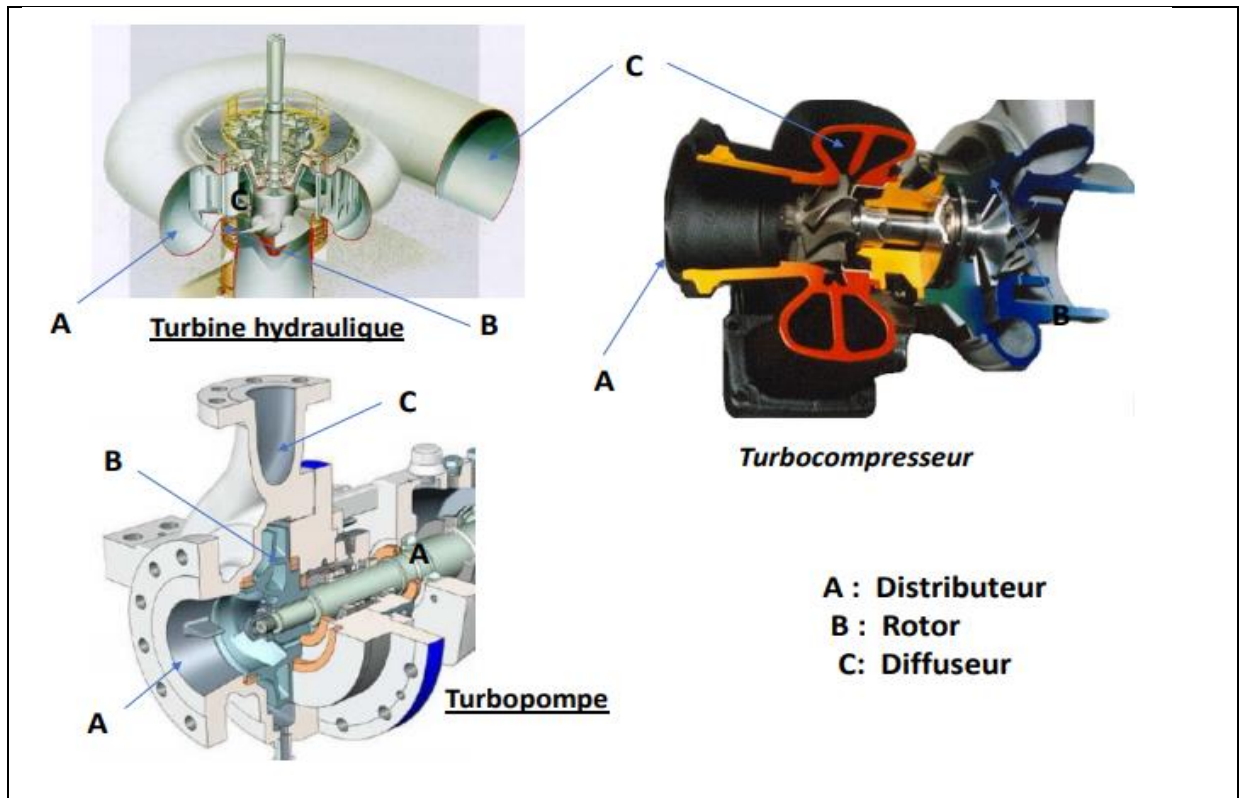


Figure II.11 : Eléments constituant les turbomachines [14]

### II.3 Principaux du défaut des machines tournantes :

Le diagnostic de l'état d'une machine n'est possible que si l'on connaît les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible d'affecter la machine considérée. En d'autres termes, c'est à dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts et la cinématique de la machine, il serait possible de formuler un diagnostic de l'état de cette dernière. Par ailleurs, les défauts qui caractérisent les machines électriques et les systèmes d'entraînement peuvent être classés, selon leurs origines, en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine [15].

La Figure II-12 présente la classification des défauts selon leurs origines.



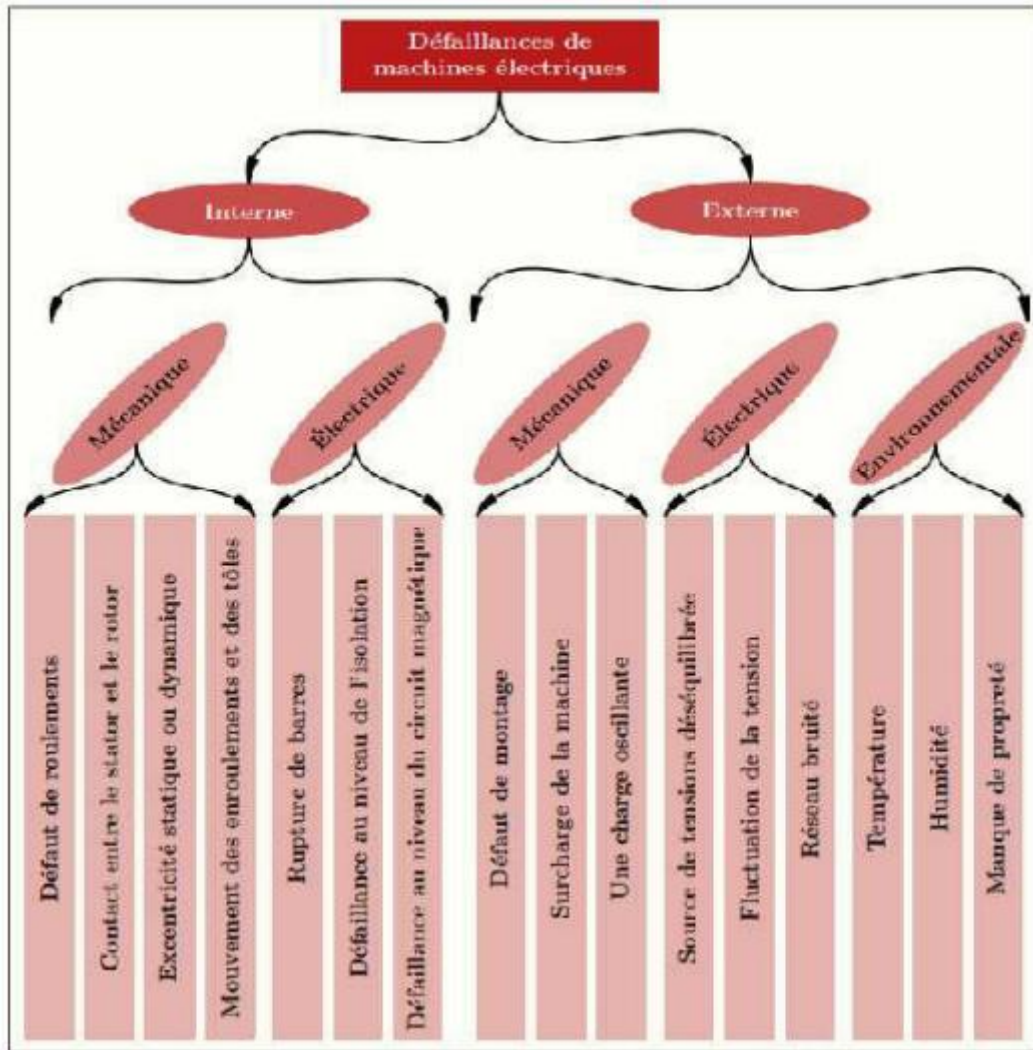


Figure II.12 : Classification des défauts selon leurs origines [16]

### II.3.1 Déséquilibre: défaut de balourd.

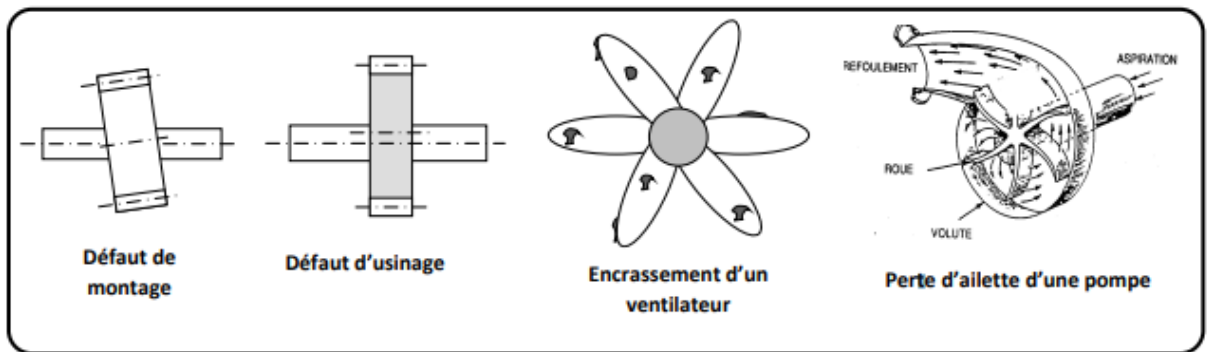
Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor.

De cette non- concentricité, résulte l'application de forces centrifuges proportionnelle à la vitesse de rotation selon la relation  $F = Mr \omega^2$ , qui déforment le rotor. On dit que le rotor présente un balourd.

Ce balourd provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage, ou sont la conséquence:

- d'une altération mécanique : perte d'ailette, érosion ou encrassement, ... [FigureII-13],

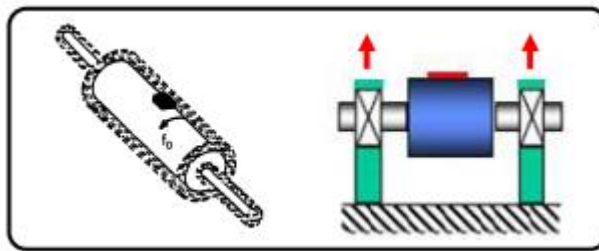
- d'une altération thermique : déformation suite à des dilatations différentes des matériaux constituant le rotor ou à des différences de température localisées [16].



**Figure II.13 :** Exemples de défauts induisant un balourd [16]

### II.3.1.1 Défaut de Balourd statique

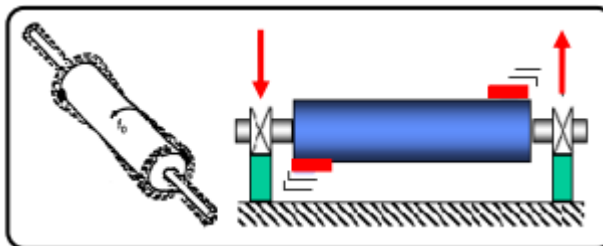
- Même phase sur chaque roulement.
- Principalement des vibrations radiales Balourd (équilibre) [4].



**Figure II.14 :** Balourd statique [16]

### II.3.1.2 Balourd dynamique

- Déphasage de  $180^\circ$  autour du roulement.
- Principalement des vibrations radiales [4].



**Figure II.15:** Balourd dynamique [16]



### II.3.2 Défaut d'alignement :

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe. Les axes des deux rotors peuvent présenter un désalignement angulaire au niveau de l'accouplement ou un désalignement radial (axial) ou défaut de concentricité ou la combinaison des deux ensembles [15].

#### II.3.2.1 Désalignement d'arbres accouplés :

Les axes des deux rotors peuvent présenter un désalignement angulaire au niveau de l'accouplement ou un désalignement radial (défaut de concentricité) ou la combinaison des deux (voir Figure II.16) [16].

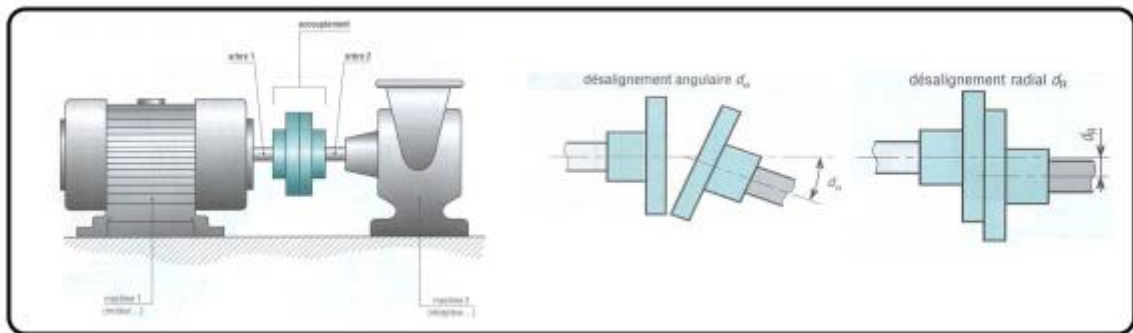


Figure II.16 : Défauts d'alignement d'arbres [16]

##### II.3.2.1.1 Défaut de désalignement angulaire :

Désalignement angulaire est observé lorsque les axes des arbres sont dans le même plan mais non parallèles [15].

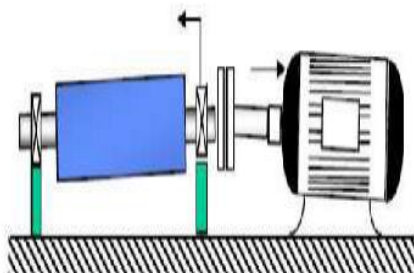


Figure II.17 : Désalignement angulaire [15]

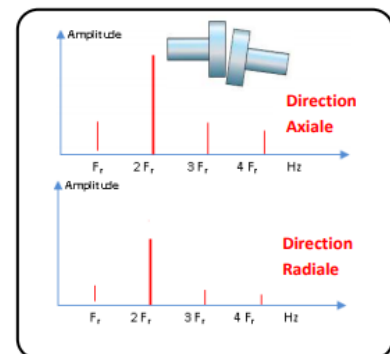


Figure II.18 : Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire [16]

### II.3.2.1.2 Défaut de désalignement radial :

Désalignement radial: il se produit lorsque les axes des arbres sont parallèles mais ne coïncident pas. [15]

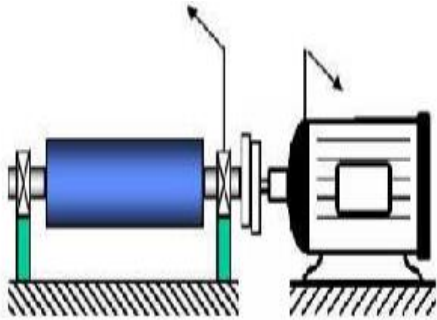


Figure II.19 : Désalignement angulaire [15]

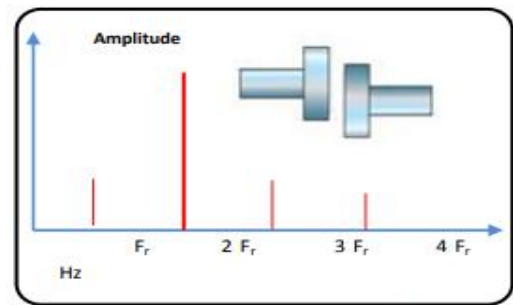


Figure II.20 : Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial [16]

### II.3.3 Défauts de serrage :

Le mauvais serrage de la structure de la machine génère des vibrations et un certain bruit. Le spectre typique mesuré sur une machine dans laquelle il existe un jeu contient un grand nombre de pic à des fréquences multiples de la fréquence de rotation. . Les causes d'un jeu sont principalement l'usure ou un mauvais montage. Il est également parfois possible de retrouver des pics à l'harmonique  $\frac{1}{2}$  (1/2 de la fréquence de rotation de l'arbre) et ses multiples. La figure II-21 montre un exemple de spectre d'une machine dont le joint de l'accouplement est usé. La fréquence de rotation est de 24,25 Hz [16].

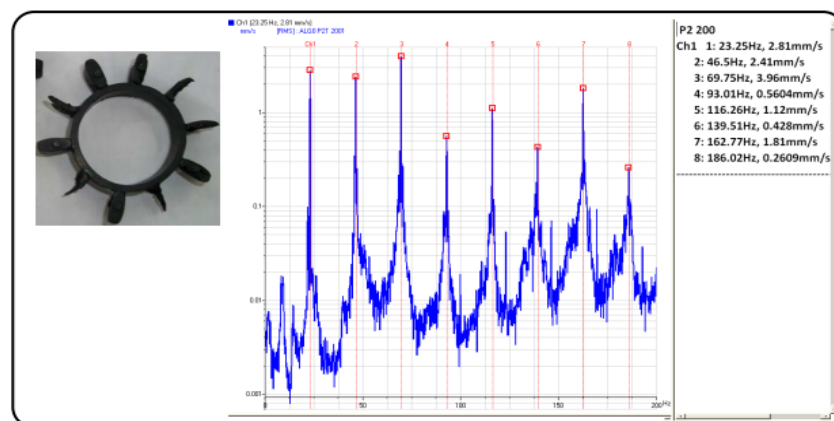
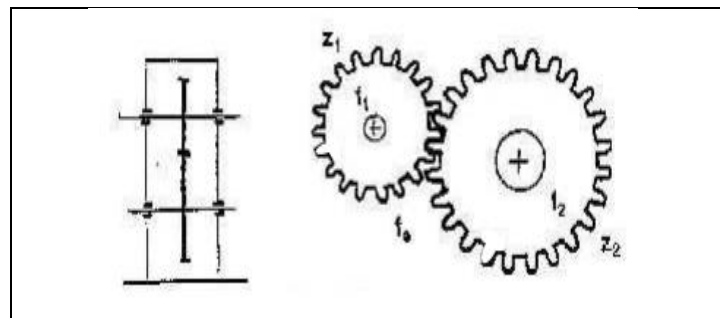


Figure II.21 : Défaut d'usure d'accouplement [16]

### II.3.4 Défauts des engrenages :

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues d'entrées  $Z_1$  et  $Z_2$  tournant avec des vitesses  $n_1$ ,  $n_2$  correspondant aux fréquences de rotation  $f_1$  et  $f_2$ . Les deux roues dentées s'engrènent à une fréquence dite la fréquence d'engrènement  $f_e$  (Gear Mesh Frequency GMF), elle est donnée par la formule suivante :  $GMF=Z_1*f_1=Z_2*f_2$  [14].



**Figure II.22:** Schéma simplifié d'un engrenage [15]

Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes d'engrenages :

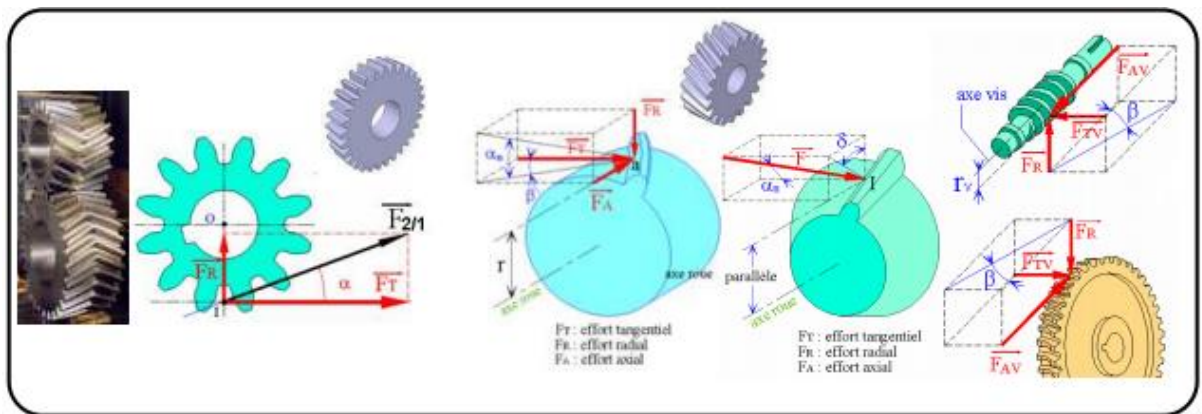
- Les engrenages parallèles (les 2 arbres sont parallèles).
- Les engrenages concourants (les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se coupent).
- Les engrenages gauches (les 2 arbres occupent une position relative quelconque).[16]



**Figure II.23:** Différents types d'engrenage [16]

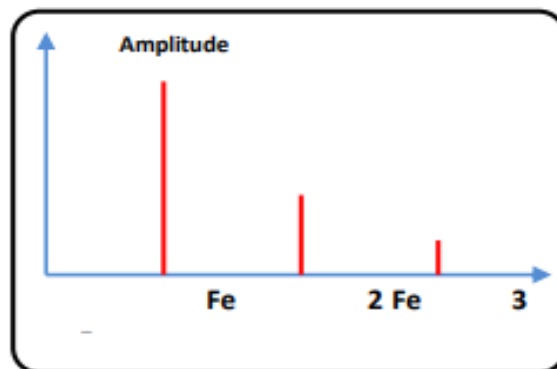
Les dentures d'engrenage peuvent être droites, hélicoïdales ou à chevrons les efforts, en conséquence, sont :

- 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 [16].



**Figure II.24:** Efforts sur les dents d'engrenage selon le type de denture [16]

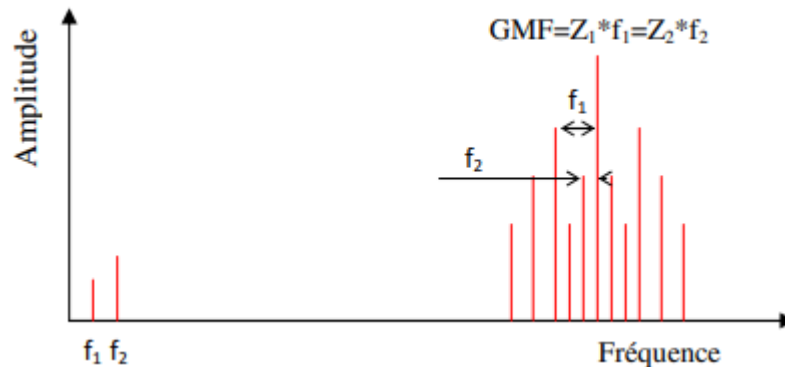
Si la denture est correcte, le spectre [Figure II-25], est constitué de composantes dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement ou à ses harmoniques [16].



**Figure II.25 :** Image vibratoire d'un engrenage sain [16]

Le défaut d'engrenage introduit une modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre, ce qui se traduit par l'apparition dans le spectre, de raies à la fréquence de rotation des arbres et des bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement et de ses harmoniques.

Ces bandes latérales se composent de plusieurs raies espacées de  $f_1$  et  $f_2$ . La figure II-26 montre le spectre théorique d'un défaut d'engrenage [14].



**Figure II.26 :** Représentation du spectre théorique d'un défaut d'engrenage [15]

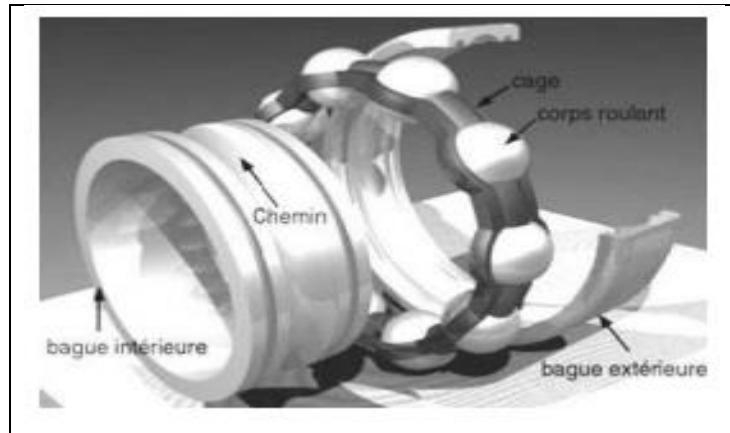
### II. 3.5 Défauts de roulements :

Le roulement est un organe de base qui assure une liaison mobile entre deux éléments d'un mécanisme en rotation l'un par rapport à l'autre. Sa fonction est de permettre la rotation relative de ces éléments, sous charge, avec précision et avec un frottement minimal. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Environ 40 % à 50 % des défauts rencontrés dans les machines asynchrones sont liés aux roulements [17].

#### II.3.5.1 Constitution des roulements :

La majorité des roulements sont composés d'une bague intérieure et d'une bague extérieure, d'éléments roulants (billes ou rouleaux), et d'une cage. Les éléments roulants situés entre les deux bagues du roulement sont maintenus à égale distance les uns des autres par la cage qui les guide et facilite leur rotation. La surface sur laquelle roulent les éléments roulants est appelée « chemin de roulement ». Elle supporte les charges appliquées aux roulements.

En général, la bague intérieure est montée sur l'arbre et la bague extérieure dans le logement [17].



**Figure II.27 :** Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes à une rangée [17]

### II.3.5.2 Types de roulement :

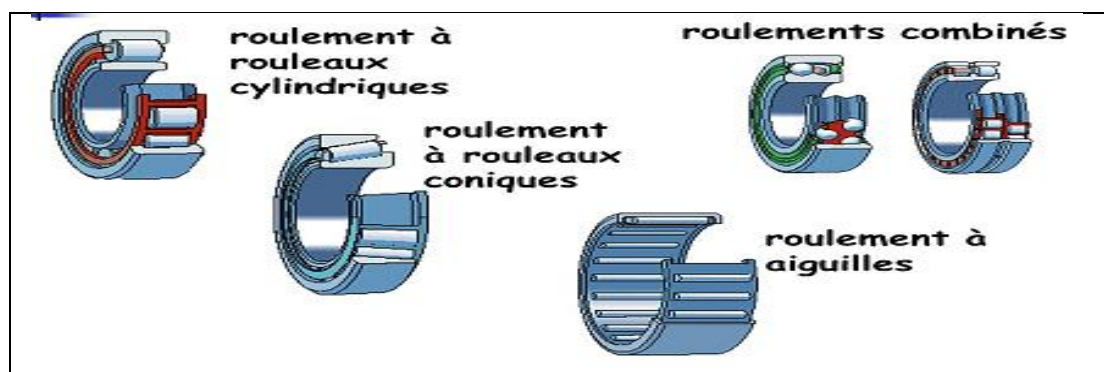
Il existe plusieurs type de roulement et sont classé selon le type d'éléments roulant (bille ou rouleau).

Les roulements à billes sont classés en différentes catégories suivant la forme de leur bague (roulements à billes à gorge profonde, à contact oblique).

Les roulements à rouleaux sont classés suivant la forme des rouleaux (roulements à rouleaux cylindriques, coniques, à rotule sur rouleaux, roulements à aiguilles).

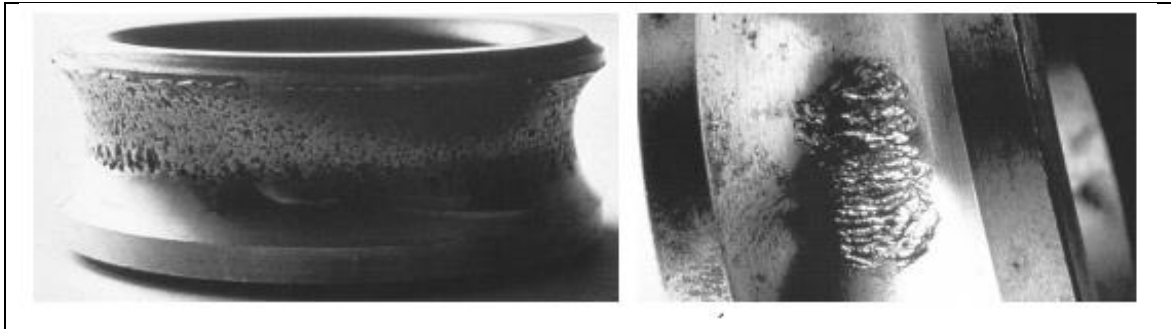
Les roulements sont également répartis en roulements radiaux qui encaissent principalement des charges radiales et les butées pour les charges axiales.

Les roulements se subdivisent encore en d'autres catégories : simple, double, ou à quatre rangées d'éléments roulants, roulements à bagues séparables ou non. Les types de roulements sont présentés en ci dessous [17]:

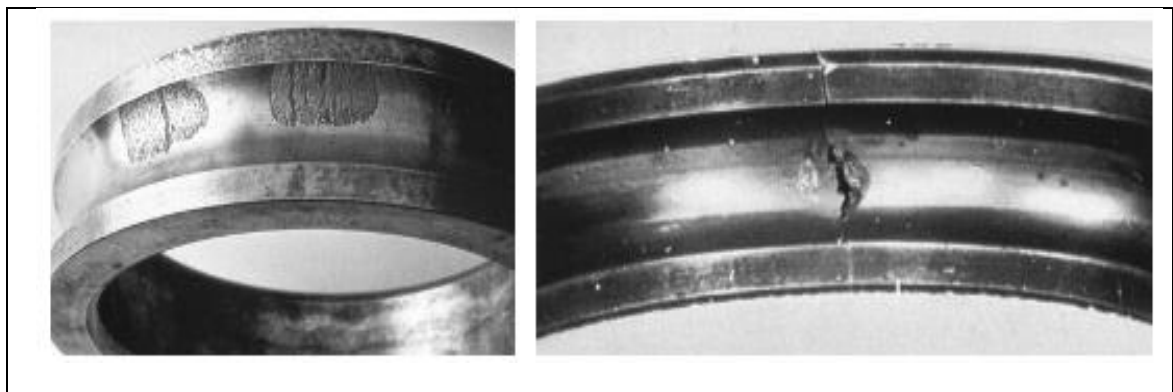


**Figure II.28 :** D'efférents types de roulements [18]

Les défauts de roulements est une incidence sur les vibrations du système, car les roulements sont des organes de liaisons et de rigidité. Les vibrations générées au sein d'un roulement sont de faible amplitude, ressemblant à un bruit aléatoire. Lors de l'apparition d'une avarie, une impulsion se produit chaque fois que le défaut participe à un contact. L'avarie a donc une fréquence caractéristique qui dépend de la géométrie du roulement et de l'emplacement de l'écaillage (sur la bague intérieure, sur la bague extérieure, ou sur un élément roulant) (fig.II.29-30). Cependant, les amplitudes des vibrations induites par les défauts ne sont pas d'un niveau très élevé. Elles sont noyées parmi les composantes plus énergétiques du système comme celles des engrenages ou celles liées à un déséquilibre ou un balourd [17].



**Figure II.29 :** Dégradations de chemins de roulement dues à des surcharges mécaniques [18]



**Figure II.30:** Dégradations de roulements dues à des défauts d'alignement et de montage [18]

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a cité les défauts fréquemment rencontrés dans le cas des machines tournantes, néanmoins, il peut y exister d'autres défauts qui influent considérablement sur les comportements vibratoire de la machine, on peut citer :

- Défauts spécifiques aux paliers fluides.
- Défauts de transmissions par courroies.
- Défauts induits par un frottement rotor/stator.
- Défauts dus à une anomalie électromagnétique.
- Les phénomènes de chocs.
- Les défauts spécifiques aux pompes, turbines, compresseurs....

Pour conclure, Une bonne planification des travaux de maintenance, avec une bonne gestion du stock de pièce de rechange et l'utilisation des moyens de diagnostic technique, nous permettons de réduire le temps d'arrêt des machines et minimiser les pertes de la production, ces paramètres peuvent influencer directement ou indirectement sur les couts de la maintenance [19].



### III.1 Introduction

A la fin des années 70, l'entretien était souvent le parent pauvre des services de l'entreprise. Les dirigeants le considéraient uniquement comme un poste de dépenses et ne pensaient qu'à réduire ses coûts.

L'entretien se contentait d'intervenir sur un système défaillant pour relancer la production et effectuait les opérations courantes préconisées par le constructeur. Il n'y avait donc pas de prise en compte des caractéristiques spécifiques et des conditions de fonctionnement (cadence, ancienneté, température ambiante, etc.) des matériels. On pouvait donc être conduit à effectuer (sans évaluation à priori ou à posteriori) trop ou pas assez d'entretien.

Les choses ont évolué : la part du coût machine dans le coût de production ne cesse d'augmenter aux dépens de celui de la main-d'œuvre. Ceci est dû à l'automatisation presque systématique des procédés, et à leurs coûts croissant.

Dans ces conditions, la fonction maintenance est devenue stratégique. Entretien, c'est subir alors que maintenir, c'est prévoir et anticiper.

Les coûts directs de maintenance sont devenus secondaires voire négligeables par rapport aux coûts indirects (non production, conséquences de la panne) [20].

Dans ce chapitre, on va définir la maintenance industrielle; donner l'objectif et les différents types de la maintenance; et présenter les méthodes de diagnostic et son rôle.

## III.2 La Maintenance

### III.2.1 Définition de la maintenance :

On définit la maintenance selon des normes telle que[20] :

- La norme AFNOR X60-010 qui définit la maintenance par l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé . Au sens strict du terme, la maintenance agit sur les biens et considère l'ensemble des opérations d'entretien destinées à accroître la fiabilité ou pallier des défaillances.

- La norme AFNOR NF EN 13306 offre une vision plus précise de la maintenance en indiquant que la maintenance intègre l'ensemble des activités techniques, administratives ou de management qui ont pour but de "maintenir ou de rétablir un équipement dans un état ou des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise

Généralement, elle fait partie d'un ensemble d'actions effectuées pour que l'entreprise Plus puisse prospérer. En effet, les installations industrielles sont perturbées, tout au long de leur exploitation, par des dysfonctionnements qui affectent les couts de production, la qualité des produits et des services, la disponibilité, la sureté, la sécurité des personnes

- Selon la norme française NF EN 13306 X 60-319, la maintenance peut-être définie par:" l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise".

### III.2.2 Objectifs de maintenance :

Les objectifs de la maintenance peuvent être classés en deux types [21]:

#### ❖ Objectifs opérationnels :

- Maintenir l'équipement dans les meilleures conditions possibles.
- Assurer la disponibilité maximale de l'équipement à un prix minimum.
- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Entretenir les installations avec le minimum d'économie et les remplacer à des périodes Prédéterminées.
- Assurer un fonctionnement sûr et efficace à tout moment.

❖ **Objectifs de coût :**

- Réduire au minimum les dépenses de maintenance et maximiser les bénéfices.
- Assurer le service de maintenance dans les limites du budget
- Avoir les dépenses de maintenance portant sur le service exigé par l'appareillage

En fonction du taux d'utilisation et de l'âge.

- Avoir à la discrétion du responsable de maintenance une certaine quantité de dépenses en Outillage et en menus traits.

**III.2.3 Les fonctions du service maintenance :** (norme FD X 60-000)

**a) Etude :** Sa mission principale est l'analyse du travail à réaliser en fonction de la politique de maintenance choisie. Elle implique la mise en œuvre d'un plan de maintenance avec des objectifs chiffrés et des indicateurs mesurables.

**b) Préparation :** La préparation des interventions de maintenance doit être considérée comme une fonction à part entière du processus maintenance. Toutes les conditions nécessaires à la bonne réalisation d'une intervention de maintenance seront ainsi prévues, définies et caractérisées. Une telle préparation devra bien sûr s'inscrire dans le respect des objectifs généraux tels qu'ils sont définis par la politique de maintenance : coût, délai, qualité, sécurité,... Quel que soit le type d'intervention à réaliser, la préparation sera toujours présente. Elle sera :

- **Implicite (non formalisée) :** dans le cas de tâches simples, l'intervenant assurera lui-même, par expérience et de façon souvent automatique la préparation de ses actions.
- **Explicite (formalisée) :** réalisée par un préparateur, elle donne lieu à l'établissement d'un dossier de préparation structuré qui, faisant partie intégrante de la documentation technique, sera utilisé chaque fois que l'intervention sera réalisée. Il sera donc répertorié et conservé sous réserve de mises à jour ultérieures.

**c) Ordonnancement :** L'ordonnancement représente la fonction "chef d'orchestre". Dans un service maintenance caractérisé par l'extrême variété des tâches en nature, en durée, en urgence et en criticité, l'absence de chef d'orchestre débouche vite sur la cacophonie quel que soit le brio des solistes.

**d) Réalisation** : La réalisation consiste à mettre en œuvre les moyens définis dans le dossier de préparation dans les règles de l'art, pour atteindre les résultats attendus dans les délais préconisés par l'ordonnancement.

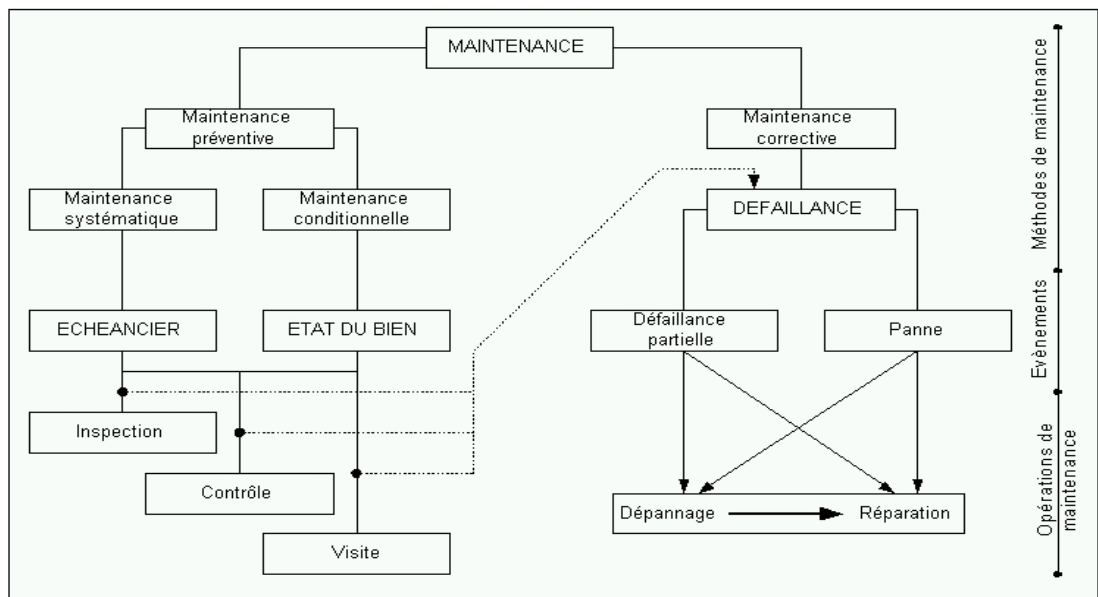
**e) Gestion** : La fonction gestion du service maintenance devra être capable d'assurer la gestion des équipements, la gestion des interventions, la gestion des stocks, la gestion des ressources humaines, et la gestion du budget[22].

### III.3 Les types de Maintenance :

On trouve deux principaux types :

-1. La Maintenance Préventive

-2. La Maintenance corrective



**Figure III.1 : Les Méthodes de maintenance selon la norme NF X 60-000[3]**

#### III.3.1 La maintenance préventive :

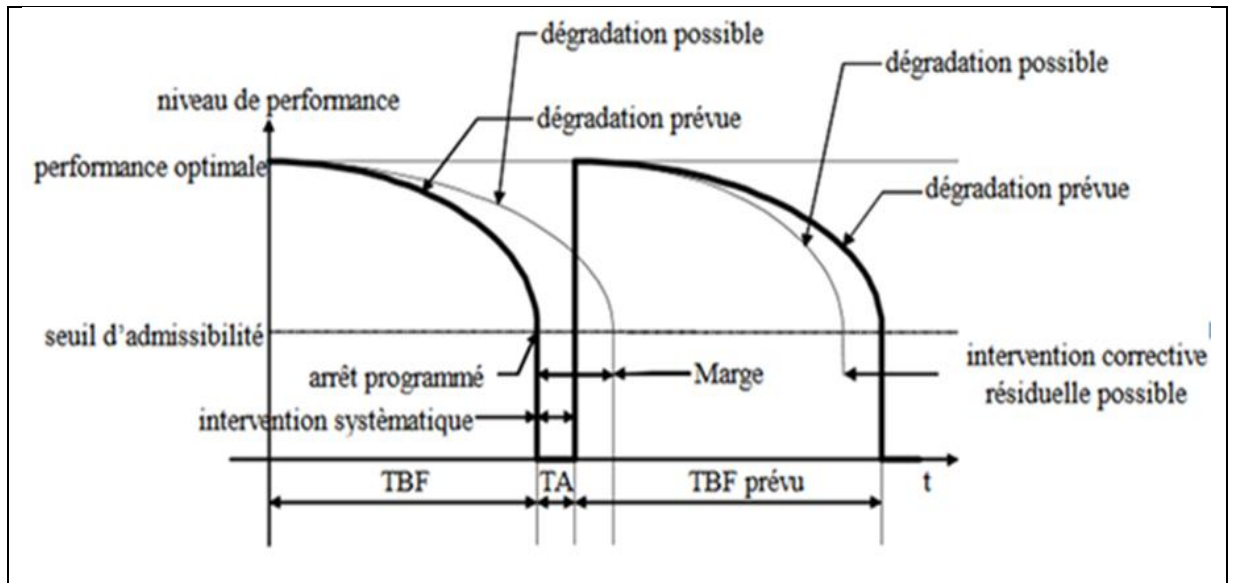
Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dont l'objectif est de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter.

**But de la maintenance préventive :**

- Augmenter la durée de vie des matériels
- Diminuer la probabilité des défaillances en service
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions
- Éviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, de pièces détachées, etc.
- Améliorer les conditions de travail du personnel de production
- Diminuer le budget de maintenance
- Supprimer les causes d'accidents graves [23].

**III.3.1.1 La maintenance préventive systématique :**

La maintenance préventive systématique inclut les actions de maintenance requises par les dispositions légales et/ou réglementaires. Elle inclut au minimum la planification formelle, la description claire et précise du travail à effectuer (lubrification, changement de filtres, remplacement des roulements, etc.) et l'enregistrement du travail accompli. La maintenance préventive systématique s'applique à des mécanismes de dégradation dont l'évolution est globalement connue. Ceci explique qu'elle n'inclut pas d'observation préalable de l'état du bien. La maintenance préventive systématique se fera suivant un échancier. Echancier : C'est l'échelonnement à priori de l'ensemble des actions de maintenance des matériels et équipements d'un site, à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre d'unités d'usage prévu [22].



**Figure III.2 : Evolution du niveau de performance en maintenance préventive systématique [22]**

**a) Détermination de la période d'intervention en maintenance préventive systématique :**

Les périodes d'intervention T se déterminent à partir.

- des préconisations du constructeur.
- de l'expérience acquise lors d'un fonctionnement en "correctif".
- de l'exploitation fiabiliste réalisée à partir d'un historique, d'essais, ou des résultats fournis par des visites préventives initiales.
- d'une analyse prévisionnelle de fiabilité.
- du "niveau de préventif" déterminé, à partir de critères techniques et économiques, par la politique de maintenance choisie pour l'ensemble concerné (choix de k pour  $T = k.MTBF$ ).

**b) Incidence économique du choix de k:** Le plus souvent  $0.5 < k < 1$ . Plus on choisit k petit, moins il y a de correctif résiduel, donc de coût de défaillance (arrêts fortuits). Par contre, on intervient plus souvent, donc on augmente les coûts directs (main d'œuvre, consommation de pièces en échange standard...) et le gaspillage de potentiel [22].

### III.3.1.2 La maintenance préventive conditionnelle ou (prévisionnelle) :

La maintenance conditionnelle ou prévisionnelle représente une démarche d'optimisation de la maintenance préventive systématique, basée sur la mesure objective de paramètres de la dégradation du bien. Elle repose sur l'extrapolation de mesures et courbes de tendance en fonction de l'usage du bien. Les courbes sont issues de mesures successives comparées à celle du retour d'expérience [22].

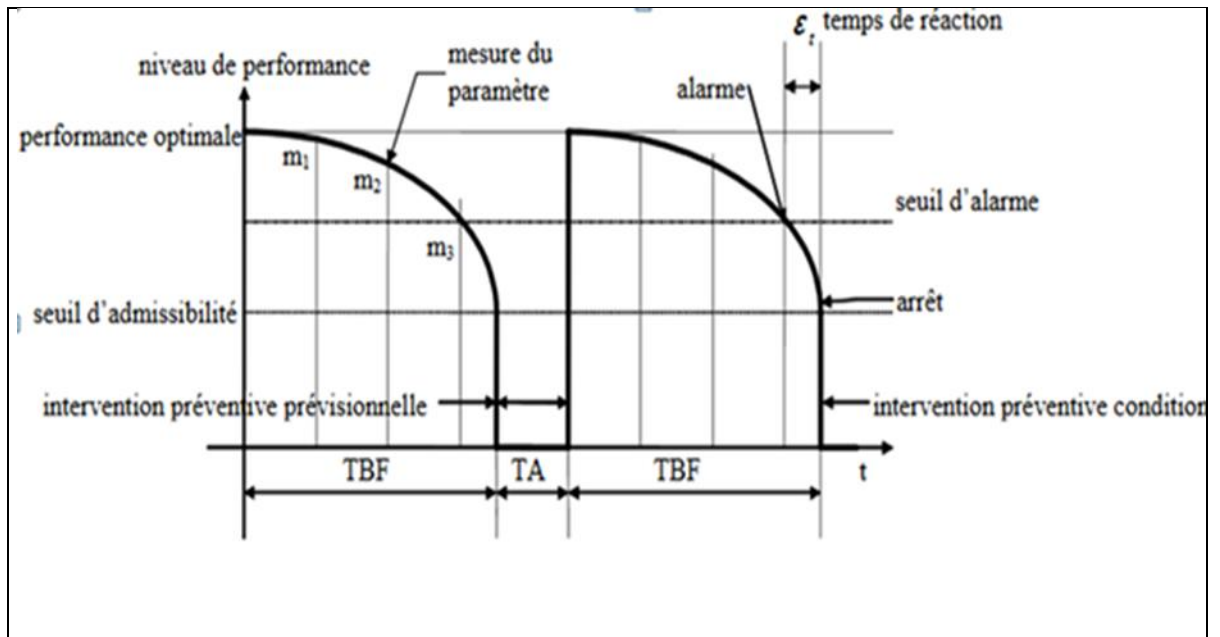


Figure III.3 : Evolution du niveau de performance en maintenance préventive conditionnelle ou prévisionnelle [22]

- ❖ **Méthodologie de mise en œuvre d'une maintenance préventive conditionnelle :**
  - Sélection des défaillances à prévenir (à partir des historiques ou d'une AMDEC) ;
  - Sélection d'un paramètre physique ;
  - Choix des capteurs ;
  - Choix du mode de collecte des informations (par ronde ou par télésurveillance) ;
  - Détermination des seuils (seuil d'admissibilité + seuil d'alarme) ;
  - Définition des procédures après alarme ;
  - Organisation de l'intervention conditionnelle.

### III.3.2 La maintenance Corrective :

La maintenance corrective est la maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

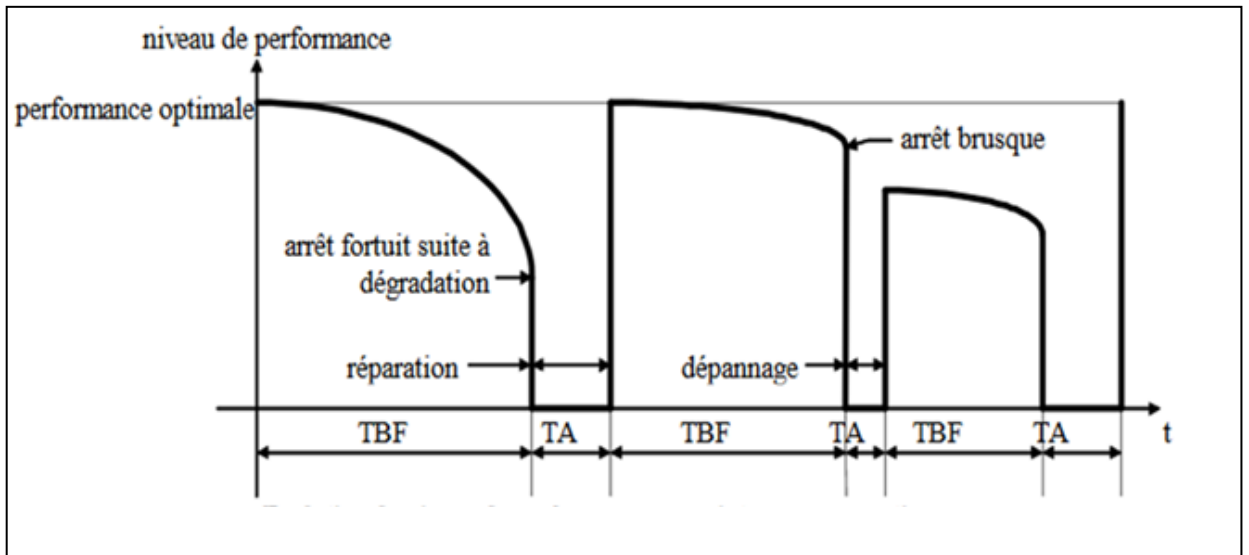


Figure III.4 : Evolution du niveau de performance en maintenance corrective [22]

**La défaillance :** Cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise

**La panne :** État d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures.

Remarque : Après une défaillance, le bien est en panne, totale ou partielle. Une défaillance est un événement à distinguer d'une panne qui est un état.

**Les causes de défaillance :** Ce sont les raisons de la défaillance. Les raisons peuvent résulter d'au moins un des facteurs suivants : défaillance due à la conception, à la fabrication, à l'installation, à un mauvais emploi, par fausse manœuvre, à la maintenance

**Les modes de pannes :** Un mode de panne est la façon par laquelle est constatée l'incapacité d'un bien à remplir une fonction requise [22].



### III.3.2.1 Les types de maintenance corrective :(norme FD X 60-000)

La maintenance corrective n'est pas forcément celle qui est la moins coûteuse, d'abord parce que, pour une même intervention elle peut forcer à engager des moyens exceptionnels justifiés par la criticité de la défaillance, d'autre part parce que l'interruption non programmée du service ou de la production, peut avoir des conséquences préjudiciables pour l'entreprise.

-La maintenance corrective est, par définition, imprévisible mais pas forcément imprévue.

- **Maintenance corrective «acceptée»** La recherche permanente du meilleur rapport, usage/coût, peut conduire à accepter la défaillance d'un équipement avant d'envisager des actions de maintenance.
- **Maintenance corrective «palliative»** Action de maintenance corrective destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelée couramment «dépannage», la maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui doivent être suivies d'actions curatives.
- **Maintenance corrective «curative»** Action de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié pour lui permettre d'accomplir une fonction requise.

### III.3.3 Les niveaux de maintenance:

Les niveaux de maintenance Dans le milieu industriel la maintenance préventive destinée à réduire la probabilité de défaillance mais il subsiste une part de maintenance corrective incompressible .il est donc nécessaire de considéré des stratégies combinent les deux .mais la réalisation de cette dernière il est besoin de compétence ou bien la calcification des agents pendent chaque déclaration. Donc il fout choisisse le millier permet la graviter de panne. Donc cette dernier a un niveau d'intervention [24].

Un niveau de maintenance se définir par :

**1er niveau :** Il s'agit de réglages simples prévus par le constructeur ou le service de maintenance, au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement.

Exemples:

- Echange en toute sécurité d'éléments consommables tels que les fusibles.
- Dégagement d'un produit défectueux sur une machine automatisée après la mise en sécurité de la machine.
- Graissage.

Ces interventions de premier niveau peuvent être réalisées par l'exploitant du bien, sans outillage particulier à partir instruction d'utilisation [24].

**2<sup>ème</sup> niveau :** Il s'agit de dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et d'opérations mineures de maintenance préventive .

Exemples :

- Contrôle du bon fonctionnement d'un four de traitements thermiques.
- Remplacement d'une électrovanne sur un système de serrage pièce.

Ces interventions de deuxième niveau peuvent être réalisées par un technicien ou l'exploitant du bien dans la mesure où ils ont reçus une formation pour les exécuter en toute sécurité.[24]

**3<sup>ème</sup> niveau :** Il s'agit d'identification et de diagnostic de pannes suivis éventuellement tel que d'échanges de constituants, de réparations mécaniques mineures, et de réglage et d'étalonnage général des mesureurs.

Voici des exemples d'activités liées à ce niveau:

- Remplacement d'une bobine de contacteur défectueuse à la suite d'une surtension.
- Démontage d'un manomètre donnant des indications erronées, ré étalonnage sur un banc de contrôle, remontage sur la machine
- Remplacement d'une clavette cisailée nécessitant l'ajustage de la nouvelle clavette.

Les interventions de troisième niveau peuvent être réalisées par un technicien spécialisé directement sur le site ou dans atelier de maintenance [24].

**4<sup>ème</sup> niveau :** Il s'agit de tous de travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction.

Exemples d'activités liées à ce niveau sont les suivants :

- Révision générale d'un compresseur
- Démontage, réparation, remontage, réglage d'un treuil de lavage
- Remplacement du coffret d'équipement électrique de démarrage d'une machine-outil.

Ces interventions de quatrième niveau peuvent être réalisées par une équipe disposant d'un encadrement technique très spécialisé et de moyens importants bien adaptés à la nature de l'intervention [24].

**5<sup>ème</sup> niveau :** Il s'agit de tous les travaux de rénovations, de reconstruction ou de réparations importantes, confiés à un atelier central de maintenance ou à une entreprise extérieure prestataire des services.

On trouve au titre exemple le suivant :

- Conception d'une machine neuve à partir d'une ancienne
- Remplacement d'un matériel ancien par un matériel nouveau commerce.

Le personnel de maintenance en charge de ces travaux doit posséder des compétences technologiques multiples (électricité, mécanique, pneumatique,...) et doit connaître les règles de gestion d'un projet technique [24].

### **III.4 Etude de la fiabilité du processus maintenu :**

Cette étude de la fiabilité est très souvent utilisée par l'expert. Nous présentons, dans cette section, quelques distributions de vie qui interviennent le plus fréquemment dans l'analyse des données de vie et qui sont communes à plusieurs champs disciplinaires. Nous parlerons en particulier des lois continues. Nous énoncerons les principales propriétés de ces lois (densité de probabilité, fonctions fiabilité et taux de défaillance) ainsi que leur application en fiabilité (Villemeur, 1988), (Birolini, 1997). Les modèles de survie historiquement utilisés sont des modèles paramétriques et des modèles non-paramétriques à risques proportionnels (Bertholon, 2001). Une maintenance optimale est reliée à une prévision de la durée de vie des composants de ces systèmes, prévision qui se fonde en premier lieu sur une analyse fine des données de retour d'expérience (ou REX).

Plus précisément, l'étude de la durée de vie de tout système se scinde en deux alternatives distinctes, qu'il est important de ne pas confondre et qui nécessitent un travail important de validation de ce REX :

- La fiabilité est l'aptitude d'un système à accomplir la fonction à laquelle il est dévolu, dans des conditions d'utilisation données et pendant un intervalle de temps donné (NF X 60-500, 1988), (NF X, 60-510,1986) et (NF X, 60-520, 1988). L'ingénieur fiabiliste cherche à déduire de l'évolution temporelle de cette fiabilité une future stratégie de maintenance. Le type de REX utilisé est fonctionnel,

- La durabilité est l'aptitude d'un système à accomplir cette fonction, dans des conditions d'utilisation et de maintenance données, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint (NF EN 13-306, 2001). On peut grossièrement résumer la démarche de l'ingénieur durabiliste à l'estimation de la durée de vie restante, lorsque le système est en cours de fonctionnement. Une telle étude cherche à prendre en compte la modification des conditions d'exploitation, le renouvellement des matériaux, ... pour en déduire le temps de bon fonctionnement du système [25].

#### **III.4.1 La loi exponentielle :**

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. C'est une loi simple, très utilisée en fiabilité dont le taux de défaillance  $\lambda$  est constant. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales. La densité de probabilité d'une loi exponentielle de paramètre  $\lambda$  s'écrit [25] :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

La fonction fiabilité s'écrit:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

#### **III.4.2 La loi normale (Laplace-Gauss) :**

Cette loi est très répandue parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes. En fiabilité, la distribution normale est utilisée pour représenter la distribution des durées de vie de dispositifs enfin de vie (usure) car le taux de défaillance est toujours croissant. La densité de probabilité d'une loi normale de moyenne  $\mu$  et d'écart-type  $\sigma$  s'écrit :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

La fonction de répartition s'écrit :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

La fiabilité est donnée par :  $R(t) = 1 - \Phi((t-\mu)/\sigma)$  où  $\Phi$  est la fonction de répartition de la loi normale centrée ( $\mu = 0$ ) réduite ( $\sigma = 1$ ) : [25]

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{v^2}{2}} dv$$

### III.4.3 La loi Log-normale (ou de Galton) :

Une variable aléatoire continue et positive  $T$  est distribuée selon une loi log-normale si son logarithme népérien est distribué suivant une loi normale. Cette distribution est largement utilisée pour modéliser des données de vie, en particulier les défaillances par fatigue en mécanique. La densité de probabilité d'une loi log-normale de paramètres positifs  $\mu$  et  $\sigma$  s'écrit :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad t \geq 0$$

La fonction fiabilité s'écrit:

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)$$

$\Phi$  : fonction de répartition de la loi normale réduite [25].

### III.4.4 La loi de Weibull :

Pour des composants mécaniques ou électroniques, on utilise classiquement des lois dont le taux de défaillance est une fonction « puissance » du temps : elles représentent très bien la réalité. On obtient alors une classe de lois de défaillance : les lois de Weibull (Antoni et al. 2008). La loi de Weibull caractérise le comportement du système dans les trois phases de vie : période de jeunesse, période de vie utile et période d'usure ou vieillissement. Dans sa forme la plus générale, la distribution de Weibull dépend des trois paramètres suivants :  $\beta$ ,  $\eta$  et  $\gamma$ .

La densité de probabilité d'une loi de Weibull a pour expression

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad t \geq \gamma$$

Où :  $\beta$  est le paramètre de forme ( $\beta > 0$ ) ;  $\eta$  est le paramètre d'échelle ( $\eta > 0$ ) ;  $\gamma$  est le paramètre de position ( $\gamma \geq 0$ ).

La fonction fiabilité s'écrit :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Revue Sciences & Maintenance - Volume X – n° x/année :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

Suivant les valeurs de  $\beta$ , le taux de défaillance est soit décroissant ( $\beta < 1$ ) soit constant ( $\beta = 1$ ), soit croissant ( $\beta > 1$ ). La distribution de Weibull permet donc de représenter les trois périodes de la vie d'un dispositif décrites par la courbe en baignoire [25].

### III.5. Définitions de quelques termes liés au diagnostic :

#### ❖ Maintenance et maintenabilité:

La Maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Une fonction requise est une fonction, ou un ensemble de fonctions d'un bien considérées comme nécessaires pour fournir un service donné [22].

La maintenabilité caractérise la facilité de maintenance du procédé, elle peut être largement augmentée par la mise en œuvre d'un système de diagnostic.

#### ❖ Sécurité :

Ce terme regroupe les caractéristiques concernant l'utilisation du procédé et ses dangers potentiels pour l'utilisateur ou pour le matériel.

❖ **Sûreté:**

La sûreté regroupe les notions de disponibilité, fiabilité, maintenabilité et sécurité du système, elle caractérise la confiance que l'on peut apporter au fonctionnement.

❖ **Dégradation :**

Une dégradation représente une perte de performances d'une des fonctions assurées par un équipement. Si les performances sont au-dessous du seuil d'arrêt défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, il n'y a plus dégradation mais défaillance.

❖ **Défaillance :**

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.

On peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité par :

- Défaillance critique est nécessitée une intervention d'urgence,
- Défaillance significative est nécessitée un processus de traitement,
- Défaillance absorbable pouvant être ignorée dans un premier temps.

❖ **Panne :**

Une panne est l'inaptitude d'une entité (composant ou système) à assurer une fonction requise. Si nous écartons la possibilité d'erreurs de conception, la définition précédente implique que toute défaillance entraîne une panne. La défaillance correspond à un événement et la panne à un état. Sur le plan temporel, la défaillance correspond à une date et la panne à une durée comprise entre la date d'occurrence de la défaillance et la date de fin de réparation.

[26]

❖ **Surveillance :**

La surveillance est un dispositif passif, informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières. la surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont la détection et le diagnostic [26].

❖ **Détection :**

Pour détecter les défaillances du système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales.

Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale [26].

❖ **Localisation :**

La localisation permet de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant.

❖ **Identification de la cause :**

Cette dernière étape consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale.

Ces causes peuvent être internes (sous-ensembles défaillants faisant partie de l'équipement), ou bien externes à l'équipement [26].

❖ **Fiabilité**

La fiabilité est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminée [26].

❖ **Disponibilité :**

Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée [26].

### **III.6 Généralités sur le diagnostic :**

La surveillance systématique a pour objectif de révéler l'existence d'une anomalie le plus tôt possible et de suivre son évolution. Le diagnostic doit permettre d'identifier avec précision la nature de cette dernière et si possible d'en préciser la gravité. La philosophie du diagnostic est donc fondamentalement différente de celle de la surveillance traditionnelle reposant sur le simple suivi d'évolution de l'énergie vibratoire à partir d'un nombre restreint d'indicateurs scalaires.



Un diagnostic est une démarche déductive qui s'appuie sur la recherche, dans des signaux liés au fonctionnement d'une machine, des manifestations dynamiques des différents défauts susceptibles d'affecter cette dernière. Cependant, comme en médecine, la relation symptôme/pathologie est rarement une relation bijective ce qui signifie qu'à un symptôme plusieurs pathologies peuvent être associées et que, de ce fait, il faut rechercher plusieurs symptômes pour identifier formellement une pathologie. D'autre part, le fait que la machine, contrairement à l'être humain, ne puisse exprimer directement ce qu'elle ressent, conduit pour identifier un éventuel défaut à une recherche et à une analyse systématique de toutes les informations contenues dans les signaux délivrés par les différents capteurs assurant la surveillance de la machine et la régulation du procédé (vibration, vitesse de rotation instantanée et image du couple instantané, température des paliers, capteurs procédés), sans oublier les informations contenues dans les lubrifiants et à les corrélérer entre elles. Cette approche systématique s'effectue selon une méthodologie rigoureuse et fait appel à des techniques de traitement du signal beaucoup plus complexes que celles généralement mises en œuvre dans le cadre d'une surveillance « traditionnelle ». Elle utilise une large palette d'outils dans laquelle le diagnosticien pourra puiser en fonction, d'une part de l'aspect critique de la panne redoutée, et d'autre part de la complexité de la machine et de la fiabilité du diagnostic recherché.[26]

On notera autres outils classiques [27]:

- Le spectre et le cepstre permettent d'identifier les différentes familles (harmoniques et sous harmoniques) des composantes cinématiques présentes dans le signal.
- Le zoom permet d'identifier les familles de bandes latérales éventuellement associées à la composante de base de chaque famille cinématique précédemment identifiée (fréquence de rotation, d'engrènement, fréquence hydraulique ou aéraulique, fréquence d'encoches...) et de ce fait, les fréquences de modulation correspondantes.
- La démodulation d'amplitude et de fréquence permet d'extraire les fonctions de modulation associées à chaque composante cinématique de base modulée, et de quantifier l'importance des phénomènes de modulation.
- L'analyse des réponses des résonances HF (HFRT) permet d'identifier la nature des excitations (aléatoires ou périodiques) et leurs origines. Ainsi que des outils complémentaires liés à des applications particulières :

- L'analyse de l'intensité du courant permet d'identifier les défauts induisant des fluctuations de couple.
- Le « moyennage » temporel synchrone permet de visualiser et de quantifier le signal temporel associé à un phénomène particulier (engrènement d'un pignon ou d'une roue d'un train d'engrenages, l'intensité absorbée par un cycle de compression d'un piston...).
- La phase, par le biais des orbites et des tracés des déformées en fonctionnement pour différentes fréquences cinématiques ainsi que des déformées modales pour avoir une approche bi ou tridimensionnelle du comportement vibratoire de la machine et de son environnement passif, permet souvent de conforter de nombreux diagnostics difficiles à formaliser à partir de l'approche traditionnelle.
- L'analyse en régime transitoire (phase de démarrage ou d'arrêt, variation de vitesse) permet de déterminer les fréquences propres des modes réellement excités par le fonctionnement de la machine et l'origine de ces excitations, et de définir les plages de vitesses critiques d'exploitation de la machine.
- L'analyse en variation de charge permet de déterminer l'impact de la charge sur le comportement vibratoire ou torsionnel de la machine

### **III.7 Analyse de la procédure du diagnostic :**

Lorsqu'un défaut apparaît dans un équipement industriel, le système de diagnostic lié à ce dernier doit d'abord détecter l'anomalie du fonctionnement puis y identifier la (ou les) cause (s) de défaillance à l'aide d'un raisonnement logique pour qu'il puisse être isolé. En effet, l'organisation générale de la procédure de diagnostic s'articule autour de l'étape suivante :

- ❖ A partir des moyens de mesure ou d'observation appropriés, nous effectuons l'extraction des informations nécessaires à la mise en forme des caractéristiques associées aux fonctionnements normaux et anormaux.
- ❖ l'élaboration des signatures associées à des symptômes de défaillance en vue de la détection d'un dysfonctionnement.
- ❖ la détection d'un dysfonctionnement par comparaison avec des signatures associées à des états de fonctionnements normaux.
- ❖ la mise en œuvre d'une méthode de diagnostic de défaillance à partir de l'utilisation des connaissances sur les relations de causalité (catalogue cause - effets).

- ❖ une phase d'interprétation des données de diagnostic.
- ❖ la prise de décision en fonction des conséquences et de l'importance des défauts [28].

### **III.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons discuté du rôle de la maintenance dans la société et de ses différents types, et de son importance pour l'équipement, et comment cherché à déduire de l'évolution temporelle de cette fiabilité une future stratégie de maintenance.

À partir de là, nous avons réalisé que pour le bon fonctionnement du processus de production, une politique de maintenance stricte et sérieuse devait être appliquée - diagnostic rapide et traitement des défauts.

## **Partie 01 : Généralités sur l'analyse vibratoire**

### **IV.1 Introduction**

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations, images des efforts dynamiques engendrent par les pièces en mouvement, ainsi, une machine neuve en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibrations.

La détérioration du fonctionnement conduit le plus souvent à un accroissement du niveau des vibrations, en observant l'évolution de ce niveau, il est par conséquent possible d'obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine.

Ces vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour effectuer un diagnostic, la modification de la vibration d'une machine constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradations, voire de pannes.

Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse des vibrations, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet, par un dépistage ou un diagnostic approprié des défauts, d'éviter la casse et de n'intervenir sur une machine qu'au bon moment et pendant des arrêts programmés de production [15].

### **IV. 2. L'analyse vibratoire :**

Celui est la plus connue et la plus largement utilisée car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes [29].

### **IV.3. Définition d'une vibration :**

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

- Un déplacement : la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre.
- Une vitesse de déplacement : variation du déplacement par rapport au temps.
- Une accélération : variation de la vitesse par rapport au temps [16].

#### **IV.4. Objectifs d'analyse vibratoire :**

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

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

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- soit dans le domaine temporel,
- soit dans le domaine fréquentiel,
- soit dans les deux à la fois [30].

#### **IV.5. les avantages et les inconvénients :**

##### **a. Les avantages**

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

##### **b. Les inconvénients**

- Spectres parfois difficile interpréter,
- Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses [16].

#### **IV.6. Caractéristiques d'une vibration:**

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

##### **a. Fréquence**

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné.

Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz [Hz].

1 hertz = 1 cycle/seconde.

Une vibration qui se produira 20 fois par seconde aura donc une fréquence  $f$  de 20 hertz.

##### **b. Amplitude**

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre et on peut définir. L'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête ou niveau crête, l'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête ou niveau crête-crête [16].

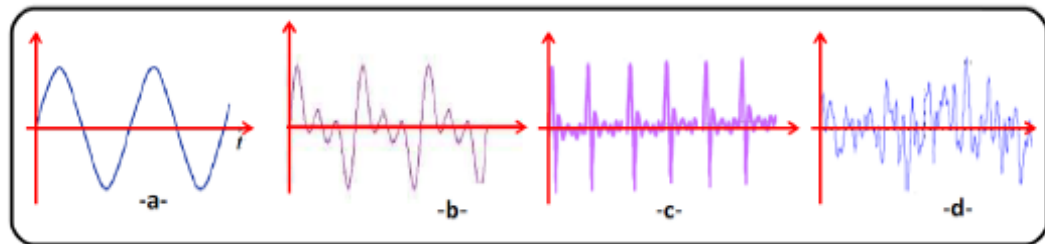
### c. Nature d'une vibration

Une machine tournante quelconque en fonctionnement génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante:

Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple [Figure IV.1:a] ou sinusoïdal complexe [Figure IV.1:b] représentatives du fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques (rotation de lignes d'arbres, engrènements,...) ou d'un certain nombre d'anomalies (déséquilibre, désalignement, déformations, instabilité de paliers fluides, déversement de bagues sur roulements, ...).

Les vibrations périodiques de type impulsionnel [Figure IV.1:c] sont appelées ainsi par référence aux forces qui les génèrent et à leur caractère brutal, bref et périodique. Ces chocs peuvent être produits par des évènements normaux (presses automatiques, broyeurs à marteaux, compresseurs à pistons, ...) ou par des évènements anormaux comme l'écaillage de roulements ou un défaut sur des engrenages, un jeu excessif, ...

Les vibrations aléatoires de type impulsionnel [Figure IV.1:d] peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe [16].



**Figure IV.1:** Nature d'une vibration [16]

## IV.7. Vibrations des machines tournantes :

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

Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée, c'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser, lorsqu'un certain seuil (correspondant à un niveau de vibration limite) fixé est atteint, il est possible d'estimer la durée de vie résiduelle du composant dans les conditions de fonctionnement données à partir de la connaissance des lois d'endommagement [16].

#### **IV.8. Les capteurs de vibration :**

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

Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations, on retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés le proximètre (mesure de déplacement), la vélocimétrie (mesure de vitesse) et l'accéléromètre (mesure d'accélération) [16].

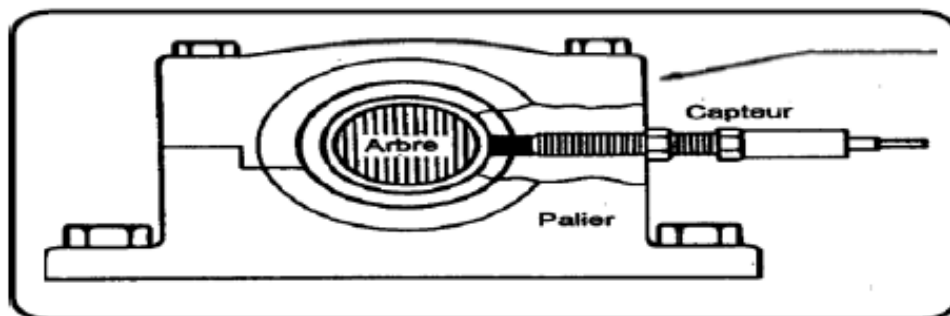
##### **IV.8.1. Les proximètres:**

Le proximètre, ou sonde capteur de déplacement sans contact directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor, il est monté en permanence à l'intérieur du palier [Figure IV.2], les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence, ces mesures seront limitées aux basses fréquences (< 100 Hz) [16].



**Figure IV.2 :** Prosimètres et leur driver [16]

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



**Figure IV.3 :** Prosimètre monté sur un palier [16]

#### **IV.8.1.1 Les avantages et les inconvénients :**

##### **a. Avantages**

- Mesure directement les mouvements d'arbre
- Même capteur pour les butées axiales, les vibrations radiales et la vitesse
- Mesure directement le déplacement
- Pas de pièce mobile

##### **b. Inconvénients**

- Sensible au matériau de l'arbre
- Installation
- Gamme de fréquence limitée. Pas de détection des défauts de roulements
- Restriction de températures [31].



#### IV.8.1.2 Problèmes et défauts détectés [34]:

- Arbre
- Palier lisse
- Butée
- Généraux : balourd, désalignement, usure, etc

#### IV.8.2 Vélométrie:

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

1. Aimant permanent
2. Entrefeer
3. Boitier
4. Bobine
- 5&6. Membranes
7. Tiger

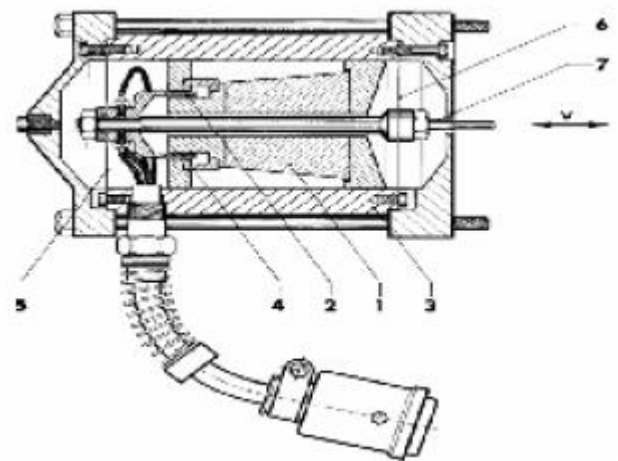


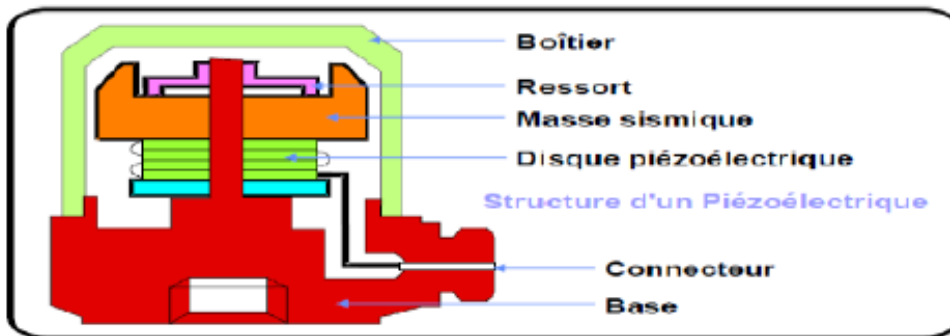
Figure IV.4 : Schéma de principe d'une vélocimétrie [32]



Figure IV.5 Capteur de vélocimétrie [32]

### IV.8.3 Les accéléromètres :

Un accéléromètre piézoélectrique [Figure IV.6] est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte.



**Figure IV.6** : Schéma de principe d'un accéléromètre [16]

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

- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB) [16].
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse.
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.

#### IV.8.3.1 Avantages et inconvénients :

##### a. Les avantages :

- Facile à installer
- Petit, léger
- Supporte les hautes températures
- Pas de pièce mobile

**b. Les inconvénients :**

- Nécessite une double intégration pour le déplacement
- Nécessite une source extérieure
- Fournit des informations limitées sur la dynamique d'arbre
- Médiocre pour les faibles vitesses [31].

**IV.8.3.2 Problèmes et défauts détectés :**

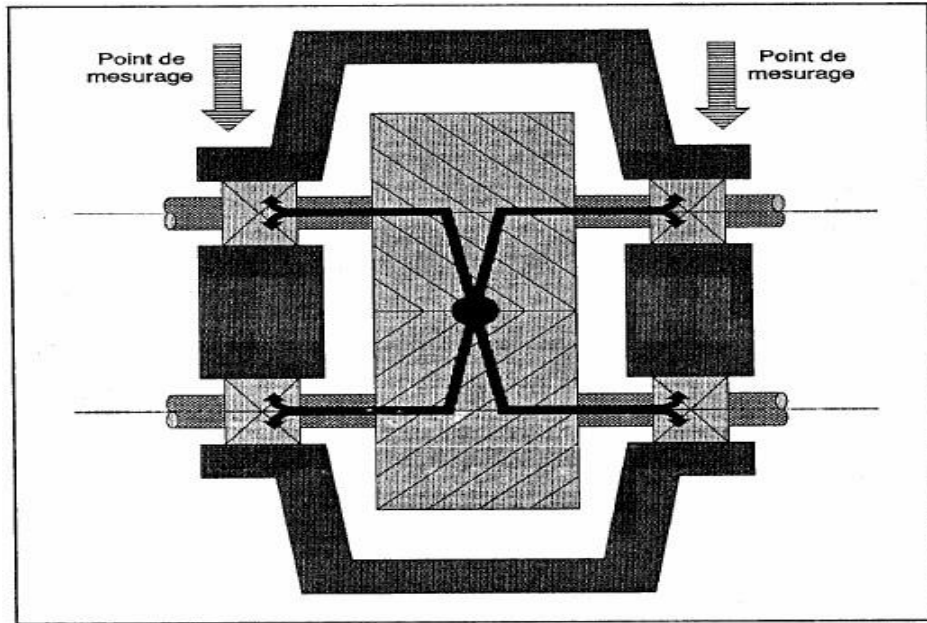
- Roulements
- Engrenages
- Machine à pâles
- Machine électrique
- Généraux : balourd, désalignement, usure, etc [34].

**IV.9 Les points de mesurage :**

La plupart des vibrations de machines sont issues des parties tournantes ou oscillantes. Elles peuvent être d'origine mécanique, électromagnétique, hydraulique, etc.

Elles sont transmises à la structure par l'intermédiaire des paliers, et aux fondations par l'intermédiaire des paliers, et aux fondations par l'intermédiaire des fixations.

On conçoit aisément que les meilleurs points de mesurage dans le cadre de la maintenance des machines sont les paliers et qu'il serait déraisonnable de prendre des mesures sur le cadre (Fig IV.7) [35].



**FigureIV.7** : Points de mesure [35]

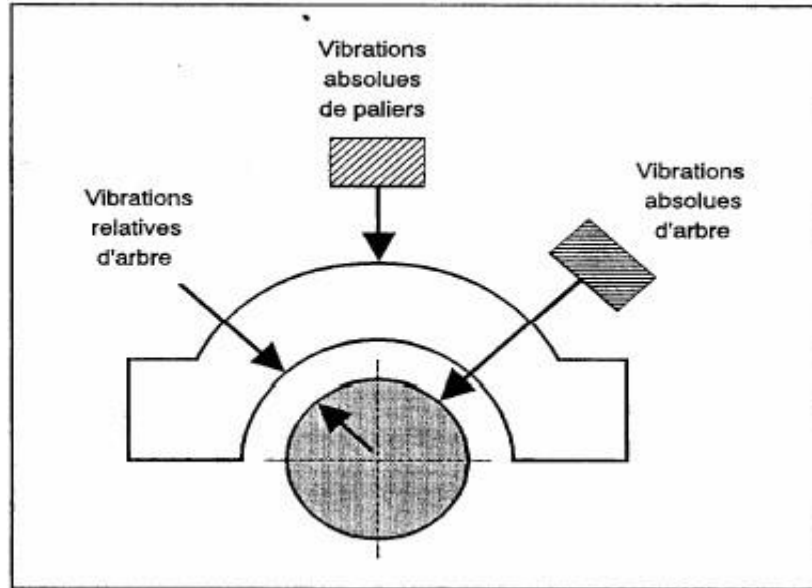
La transmission de ces vibrations dépendra de plusieurs paramètres auxquels il faudra adapter le mode de mesurage (Fig. IV.7).

- Paliers à roulements : la transmission des vibrations aux paliers est bonne. Aussi suffira-t-il de mesurer les vibrations absolues de paliers à l'aide d'un vélocimètre ou d'un accéléromètre.

- Paliers à film fluide : La transmission des vibrations aux paliers est mauvaise.

Aussi devra-t-on mesurer de préférence les vibrations relatives d'arbre. Cette technique est plus délicate car l'implantation des capteurs ainsi que la préparation de leur piste de mesure doivent être prévues par le constructeur de la machine si ces conditions ne sont pas remplies, on préférera alors la mesure des vibrations absolues de paliers.

- Le mesurage sur les fixations présente en maintenance un intérêt moindre mais trouve son application lorsque la machine perturbe son environnement : bâtiment, salle de métrologie à proximité [35].



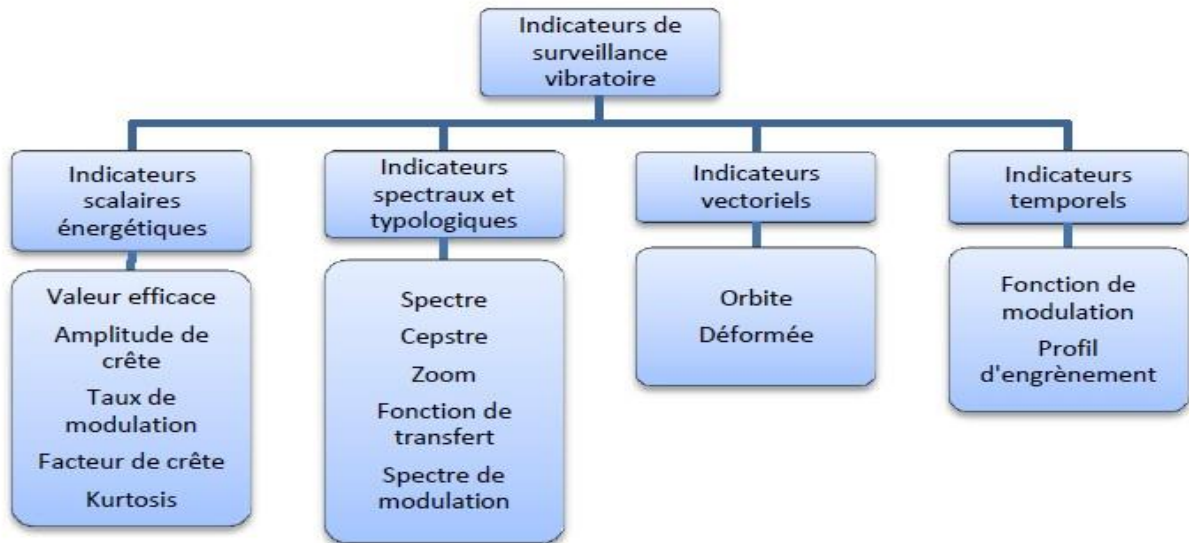
**Fig. IV.8** : Mesure de vibration relative et absolue [35]

#### **IV.10 La surveillance vibratoire :**

Turbines, pompes, moteurs, compresseurs, alternateurs, centrifugeuses, ventilateurs... Toutes ces machines, que l'on dit : tournantes, ont un point commun : elles comprennent des organes en rotation, suivant les cas, il peut s'agir de structures relativement simples, Constituées d'un seul arbre en rotation à travers un ou plusieurs roulements, ou de machines plus complexes composées de plusieurs arbres tournant à des vitesses de rotation différentes... Mais ce qui caractérise avant tout ces machines, c'est qu'elles sont composées d'organes fragiles (roulements et engrenages, notamment) soumis à des contraintes mécaniques importantes et à des environnements industriels difficiles. Les sources de défaillance sont donc multiples : l'écaillage d'un roulement, la rupture d'une dent d'un engrenage, le désalignement d'un des axes, etc., lorsque la machine joue un rôle vital dans la production (c'est le cas par exemple d'une presse dans le domaine de l'imprimerie, d'un broyeur de cimenterie ou encore d'une centrifugeuse dans un réacteur chimique...), ces défauts peuvent s'avérer lourds de conséquences. Pour éviter des arrêts de production imprévus et les pertes économiques qui en découlent, il faut surveiller en permanence ces équipements et traquer tous les signes précurseurs de défauts avant qu'il ne soit trop tard [33].

### IV.11 Les indicateurs des vibrations :

L'indicateur de vibration est le paramètre le plus significatif de l'état d'une machine tournante. L'augmentation de celui-ci est révélatrice de la dégradation de l'état mécanique de cette machine. Les méthodes les plus appliquées pour le suivi vibratoire des machines tournantes sont résumées dans le diagramme suivant (Figure. IV.9) [36].



**Figure IV.9:** Classification des indicateurs de surveillance [36]

#### IV.11.1 Surveillance par suivi d'indicateurs scalaires« larges bandes » dite en « niveau global » :

Le mouvement vibratoire global induit par le fonctionnement normal ou anormal de la machine est caractérisé ici par un ou plusieurs indicateurs dont l'évolution sera suivie de manière périodique ou continue.

Ce type de suivi permet ainsi de connaître l'état vibratoire de la machine et d'en surveiller l'évolution, sans pouvoir bien souvent déterminer avec précision la cause de la vibration (par exemple un balourd ou un désalignement).

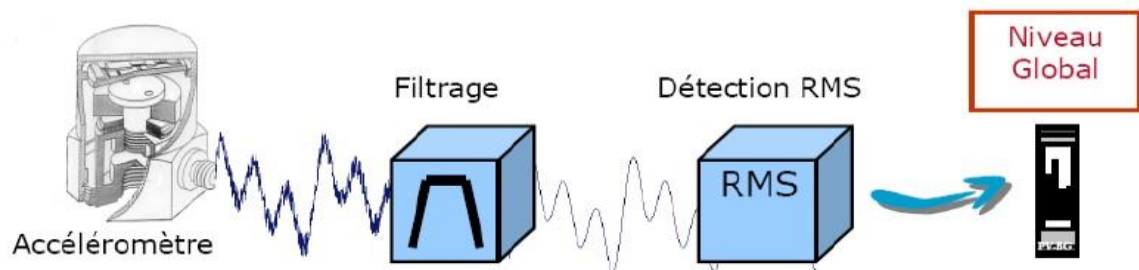
Ces indicateurs représentent le plus souvent l'amplitude efficace (et parfois l'amplitude crête) du signal vibratoire (accélération, vitesse ou déplacement), mesurée **toutes fréquences confondues**, dans une plage très étendue, souvent dans la bande passante de l'appareil de mesure ou dans une bande fréquentielle normalisée l'indicateur vibratoire NGV [10-1 000 Hz] (Amplitude efficace de

la vitesse vibratoire mesurée dans la bande fréquentielle [10-1 000 Hz]) est un des indicateurs de surveillance le plus utilisé.

En **surveillance périodique systématique**, ce suivi parfois sommaire et destiné au dépistage des défauts les plus évidents ne nécessite généralement qu'un appareillage simple et bon marché. Il est utilisé principalement pour identifier les machines d'un parc qu'il va falloir surveiller plus étroitement par des mesures rapprochées ou pour lesquelles un diagnostic plus précis s'avérera nécessaire.

Ce suivi est également souvent utilisé en **surveillance continue** des machines tournant très rapidement afin de les stopper avant avarie grave ou accident.

On utilise alors généralement des appareils simples installés à poste fixe à proximité de chaque machine [37].



**Figure IV.10:** Chaîne de mesure du niveau global [36]

#### IV.11.2 Surveillance par suivi d'indicateurs scalaires « bandes étroites » dite par « bandes de fréquences »

Pour minimiser les dangers que présentent les effets de masque inhérents à la surveillance par indicateurs scalaires « larges bandes », de nombreux produits offrent la possibilité de mesurer ou de calculer ces indicateurs scalaires dans plusieurs bandes de fréquences définies par l'utilisateur, d'en suivre l'évolution et d'associer à chacun d'eux des seuils.

Ces possibilités permettent à l'utilisateur :

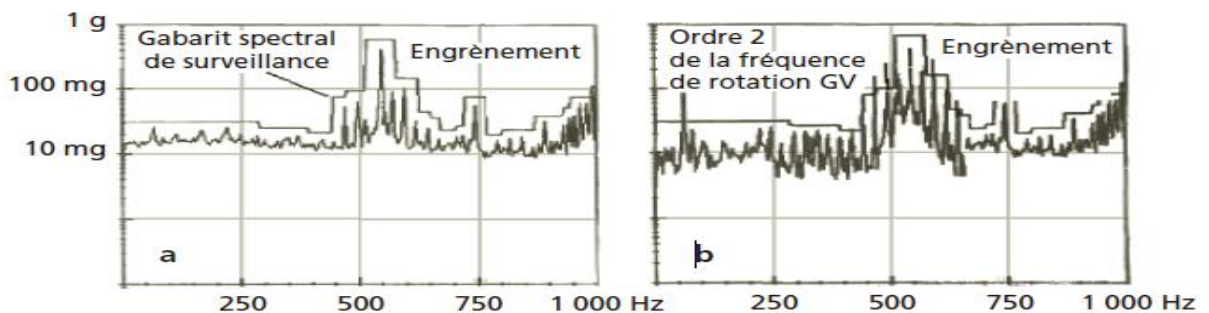
- de définir des indicateurs et des seuils dont les sensibilités sont beaucoup mieux adaptées à la nature de chaque défaut qu'il souhaite surveiller.
- de réduire, voire d'éliminer, les effets de masque induits par le fonctionnement « normal » de l'installation à surveiller [37].



### IV.11.3 Suivi d'évolution d'images spectrales par comparaison avec un gabarit :

Cette technique de dépistage consiste à comparer le spectre vibratoire issu de chaque mesure avec le spectre de référence de la machine surveillée, obtenu dans des conditions identiques, à un moment où l'état de l'installation a pu être considéré comme satisfaisant. Bien souvent, ce spectre de référence ou signature est remplacé par un gabarit ou un masque de référence fixant les limites acceptables dans la dérive des fréquences (dus généralement à une légère variation de la vitesse de rotation) et dans l'accroissement des amplitudes.

Tout changement significatif du nouveau spectre se traduit par un débordement du gabarit, qui déclenche l'alarme comme nous le montre la figure IV.11 [37].



**Figure IV.11** : Surveillance par suivi d'évolution spectrale avec déclenchement d'alarme par dépassement de gabarit [37]

### IV.11.4 Indicateurs dédiés à la surveillance des défauts induisant des forces impulsionnelles « indicateurs de défauts de roulements » :

Nous avons vu au deuxième chapitre que les défauts, induisant des forces impulsionnelles, engendraient des vibrations de même type. La plupart des défauts affectant notamment les roulements (écaillage, indentation, manque de graisse, jeux internes trop importants...) sont de cette nature. Comme il s'agit généralement de chocs périodiques ou aléatoires de très courte durée, l'étendue spectrale peut atteindre plusieurs centaines de kilohertz. Cependant, l'énergie vibratoire induite, au lieu d'être uniformément répartie comme celle de la force excitatrice, se trouve au contraire concentrée dans des bandes fréquentielles étroites centrées autour des fréquences propres des différents organes constituant la machine.

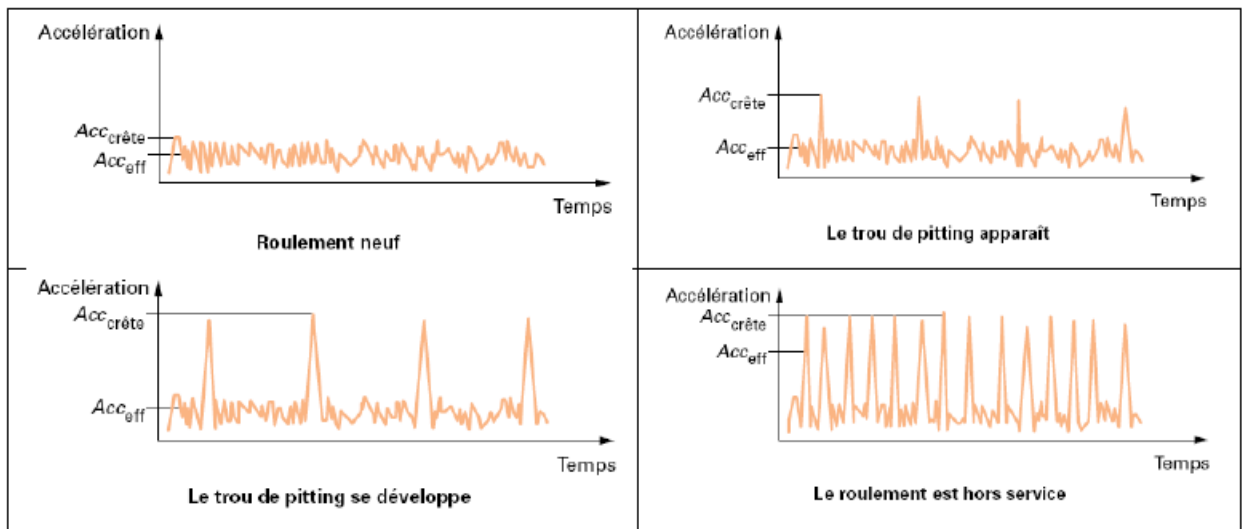


Comme ces fréquences se situent en hautes fréquences, l'accélération sera la grandeur physique à privilégier pour représenter les réponses de ces modes.

Afin d'isoler ces phénomènes *vibratoires* (généralement induits par des défauts de roulements, mais aussi par des écaillages de dentures sur engrenages, des jeux de paliers ou de clavettes, des défauts de serrage...) de l'ensemble des autres phénomènes plus ou moins sinusoïdaux générés par le fonctionnement d'une machine, on pourra aussi utiliser des indicateurs de surveillance larges bandes plus sensibles à la forme du signal qu'à son énergie

tels que :

- le facteur de crête,
- le kurtosis,
- les indicateurs mesurés la plage de résonance du capteur,
- les indicateurs définis à partir de l'enveloppe du signal [37].

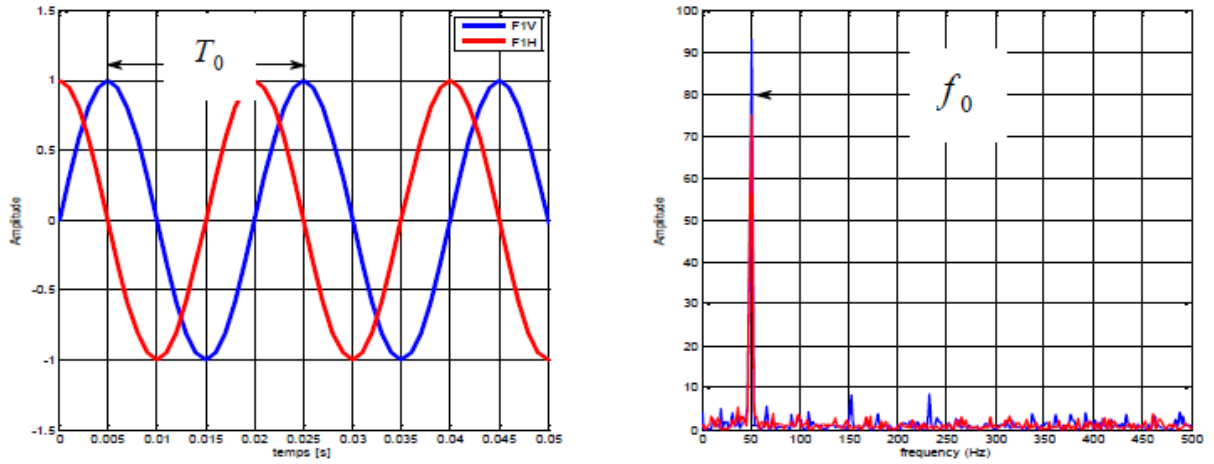


**Figure IV.12:** Evolution des amplitudes efficace et de crête [36]

#### IV.12 Image Vibratoire des principaux défauts :

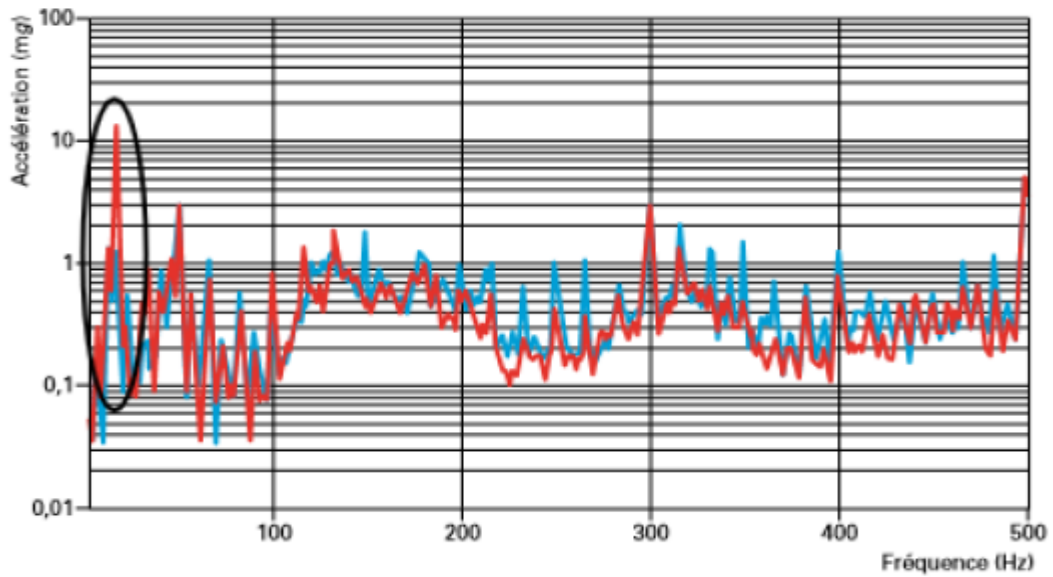
Dans le deuxième chapitre on a vu les principaux défauts des machines tournantes et dans ce chapitre on va voir les images vibratoires de ces défauts.

**IV.12.1. Balourd :**



**Figure IV.13:** Signature d'un défaut de balourd temporel et spectral linéaire [36]

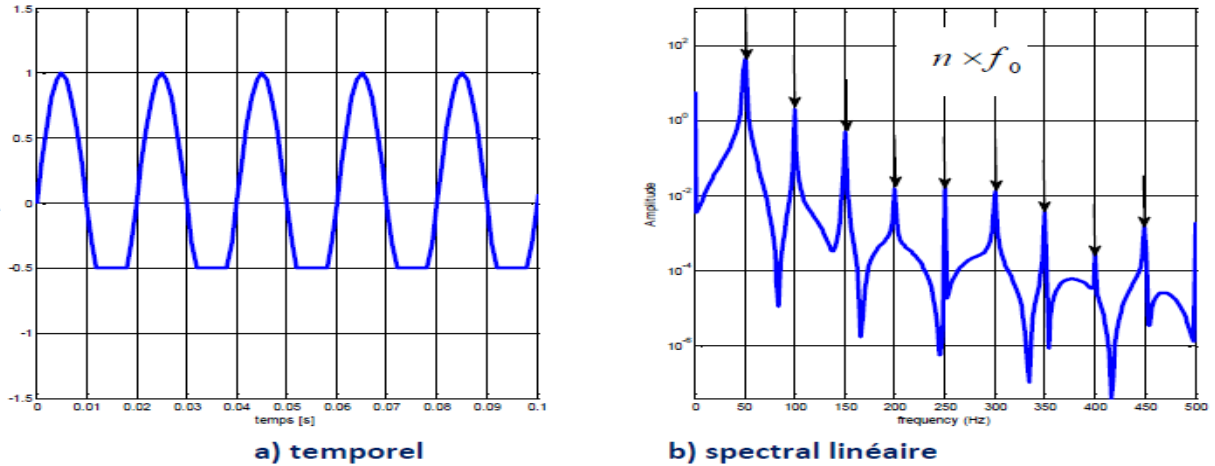
L'analyse spectrale de ce type de balourd présentera le spectre caractérisé par la présence d'un pic à la fréquence de rotation du rotor.



**Figure IV.14:** Mise en évidence d'un défaut de balourd [36]

### IV.12.2. Défauts de fixation :

En général, le desserrage se traduit par un signal temporel irrégulier. La force excitante qui cause la vibration peut être un balourd sur la partie tournante, mais la réponse non linéaire de la structure donne un signal temporel irrégulier et synchrone.



**Figure IV.15:**Signature d'un défaut de fixation [36]

La réponse temporelle du signal est donnée par la Figure IV.15.a) qui est un signal sinusoïdal échantillonné dû à l'impact du système sur son support.

La transformée de Fourier de ce signal fait introduire plusieurs harmoniques de la fréquence du signal de base qui est en général la fréquence de rotation de l'arbre.

Par conséquent le spectre présente des pics multiples de la fréquence de rotation et au-delà de 5x (voir Figure IV.15.b) [36].

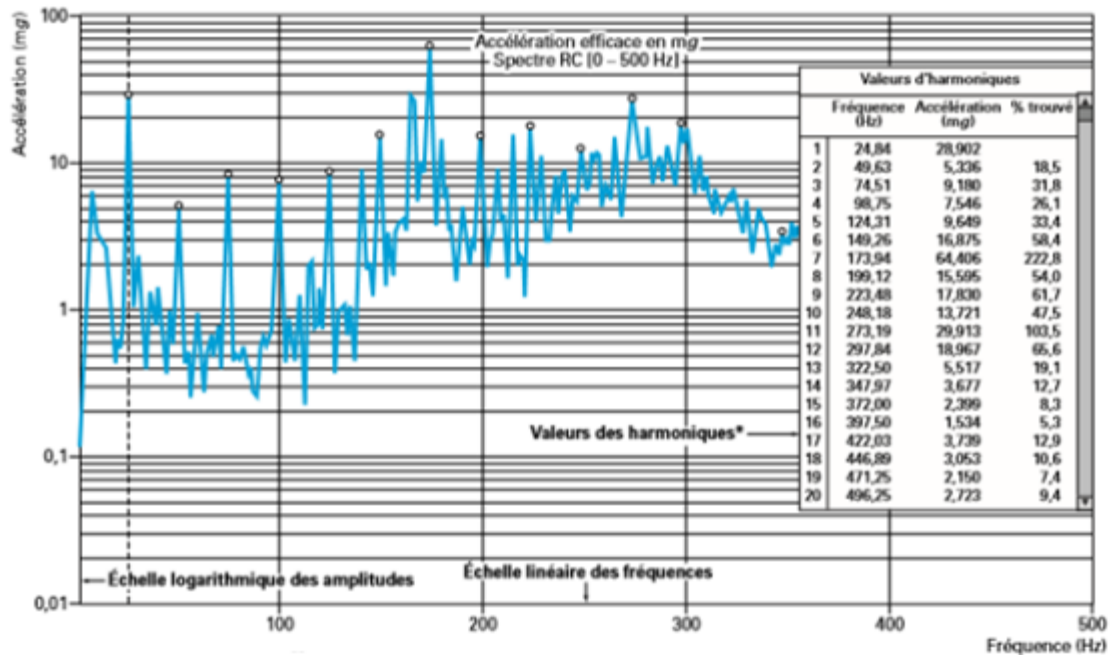
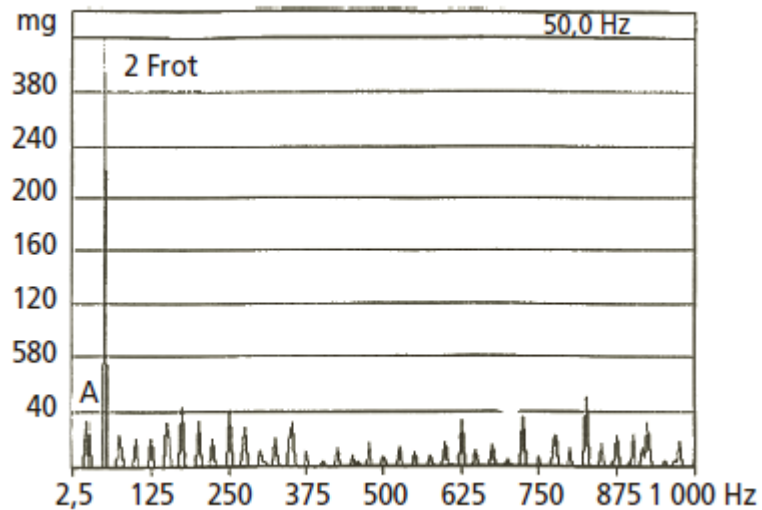


Figure IV.16 : Mise en évidence d'un défaut de fixation [36]

### IV.12.3 Défaut d'alignement :

Un défaut d'alignement est révélé par la présence d'une raie d'amplitude prépondérante (principalement lorsqu'elle est exprimée en accélération) dont la fréquence correspond généralement à l'ordre 2 de la fréquence de rotation (parfois trois ou quatre fois).

La Figure IV.17 représente le spectre réel d'un désalignement entre multiplicateur et compresseur, exprimé par le fait que l'ordre 2 de la fréquence de rotation est nettement prépondérant [37].

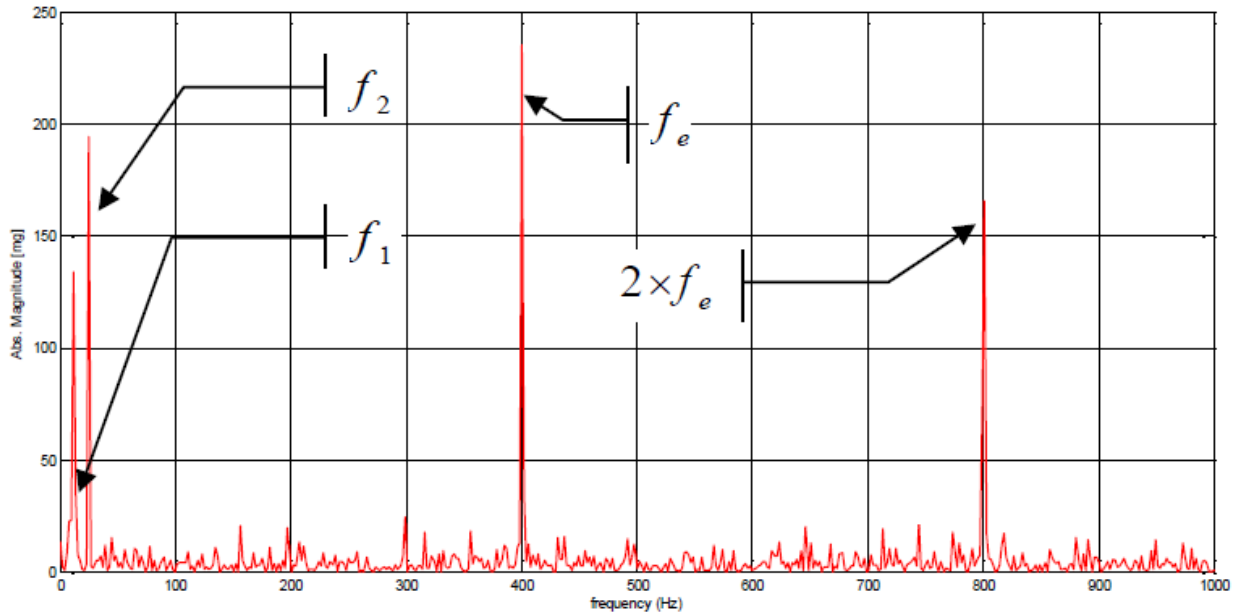


**Figure IV.17** : Spectre d'un défaut d'alignement affectant un compresseur tournant à 1 500 tr/mn [37]

#### IV.12.4. Défaut d'engrenage :

En présence d'un tel défaut l'amplitude de vibration à la fréquence d'engrènement devient très importante. Mais l'augmentation de cette amplitude n'est pas suffisante pour caractériser un défaut d'engrenage. Pour qu'un défaut soit significatif il faut une augmentation de l'amplitude à la fréquence d'engrènement avec une génération d'autres fréquences ( $\times f_e$ ).

Si on détecte de nombreux harmoniques de la fréquence d'engrènement ( $3f_e$  et plus), on peut déduire qu'il y a un choc à chaque denture indiquant ainsi une détérioration de l'ensemble des dentures [36].



**Figure IV.18:** Signature vibratoire d'un défaut d'engrènement [36]

#### IV.12.5 Détérioration des roulements :

En termes de fréquence les défauts dans la bague intérieure et extérieure se manifeste par des multiples de :

- BPFO : Ball Pass Frequency Outer Race
- BPFI : Ball Pass Frequency Inner Race

La figure suivante illustre une réponse temporelle et spectrale pris dans une pompe qui tourne à 1458 RPM, dont les paliers sont guidés des roulements SKF 6305. Le spectre montre des pics multiple de BPFO marqué par ces harmoniques H [36].

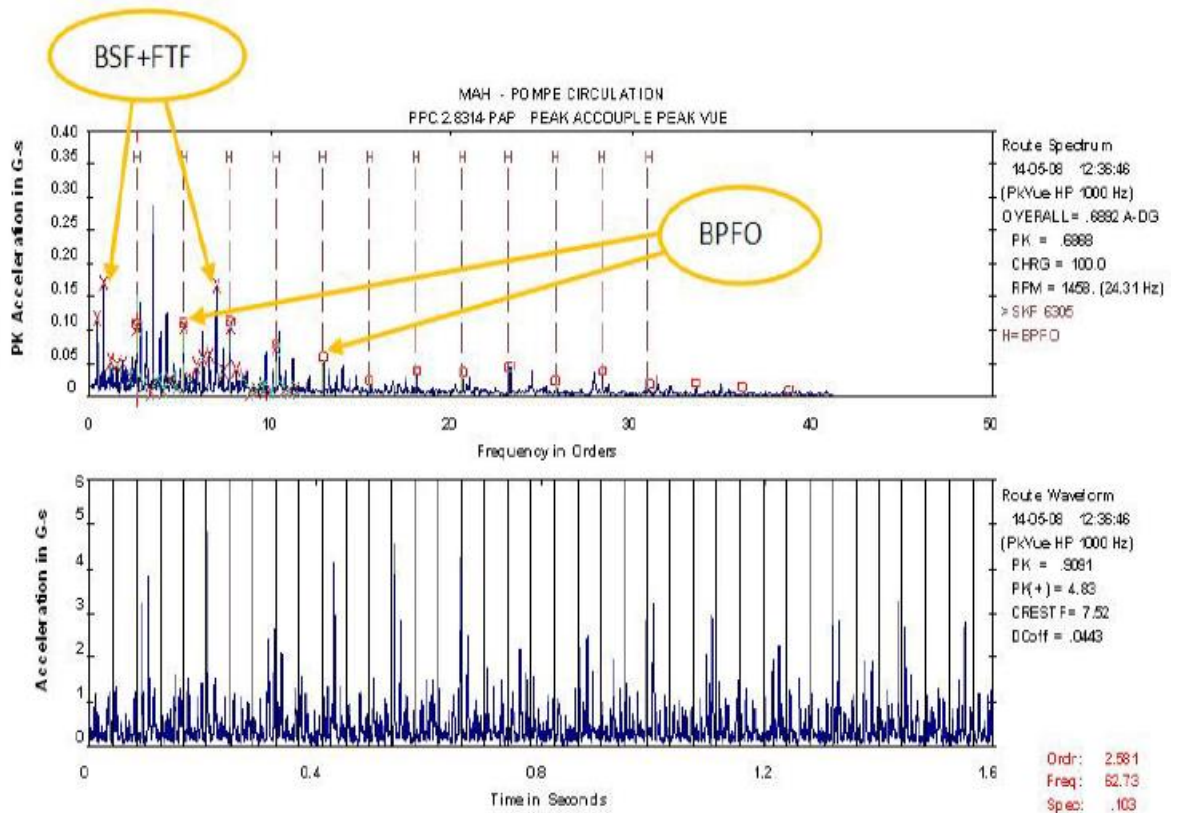


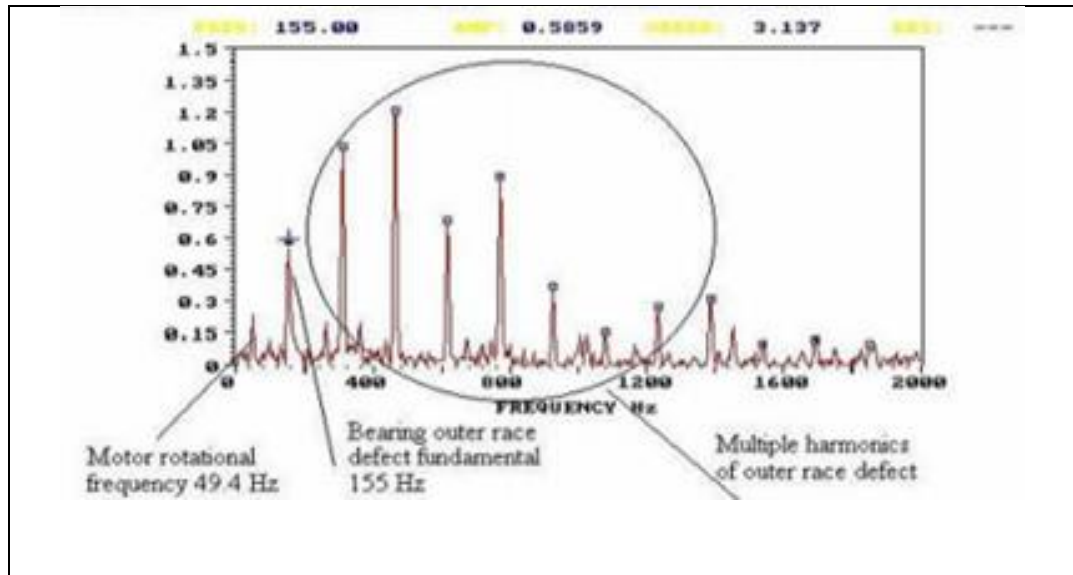
Figure IV.19: Signal temporel et spectral d'un défaut de roulement [36]

## Partie 02 :Etude des cas

### IV.13. 1<sup>er</sup> Cas : Défaillance de la bague externe du roulement de palier [35]

Une requête a été déposée pour la surveillance d'une pompe dont on suspecte un défaut au niveau du moteur d'entraînement électrique. Cette machine n'était pas régulièrement sous surveillance vibratoire, par conséquent le niveau global n'était pas disponible. Une fois la vitesse et le type de roulement ont été définis, cinq points ont été choisis sur le moteur, afin de collecter les mesures conjointement dans le plan horizontal et le plan vertical, le long des positions axiales. Avec une largeur de la bande de fréquence de 2000 Hz, un balayage vers les hautes fréquences a permis la détection éventuelle de défections des roulements. L'examen spectral des vibrations a indiqué des composants fréquentiels qui ont été attribués à la défaillance du roulement, avec le

maximum sur l'ensemble enregistré au niveau du palier du moteur dans la direction horizontale ; cependant, les indications spectrales les plus significatives ont été enregistrées dans la direction axiale. Évidemment, le signal indique l'existence d'un pic à 155 Hz, avec une multitude d'harmoniques, voir Figure IV.20.



**Figure IV.20:** Analyse vibratoire avant réparation [35]

Cette fréquence est attribuée à la défaillance de la bague externe du palier du moteur, (Réf SKF 6314-c3) et déterminée par les calculs suivants:

$$\text{BPFO} = 0.5 Nn (1-(d/D) \cos \beta)$$

Où:

N: vitesse du moteur divisée par 60 = 49.4 (Hz)

n : nombre de billes ou de rouleaux = 8

d : Bille/rouleau diamètre (mm) = 24 mm

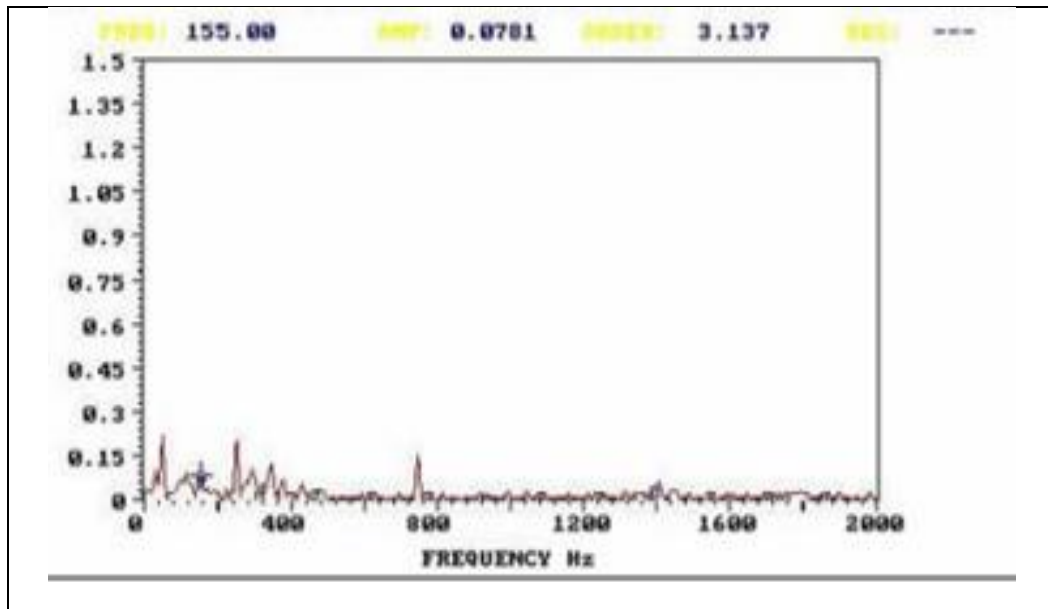
D : diamètre moyen (mm) = 110 mm

$\beta$  : angle de contact bille-bague = 0

Donc:  $0.5 \times ((49.4 \times 8) \times (1 - (24/110))) \times \cos \beta = 154.5 \text{ Hz}$



La Figure IV.21: ci-dessous montre le même relevé vibratoire après avoir procédé au changement du roulement incriminé



**Figure IV.21:** Analyse vibratoire après réparation [35]



**Figure IV.22:** Bague externe défailante [35]

### Conclusion

En examinant le palier du moteur, une surface de 6 mm de diamètre approximativement a été endommagée (écaillée) sur la piste de roulement de la bague externe, voir figure IV.22.

#### IV.14. 2ème cas : Refroidisseur CT5- Défaillance de l'accouplement de l'arbre d'entraînement [35]

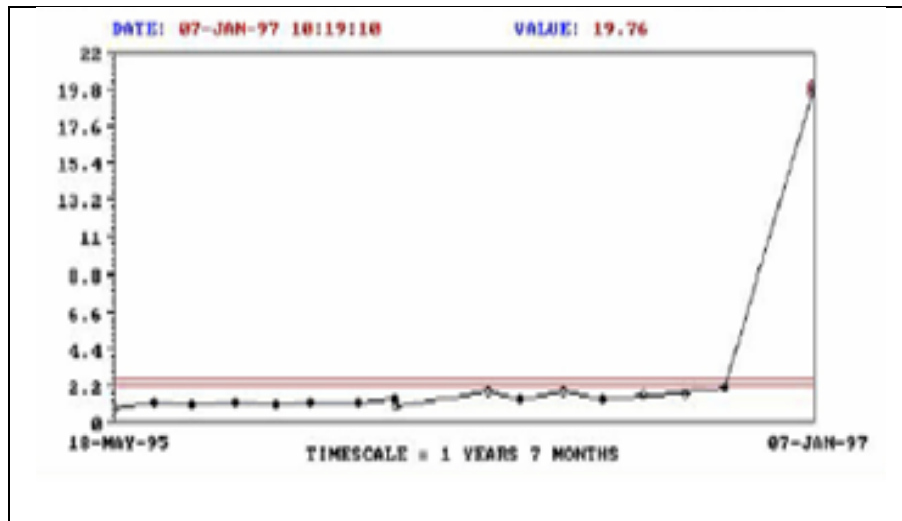
Une étude de vibrations a été demandée sur la cellule n°1 d'un refroidisseur à 6 cellules. Cette demande était due à une vibration excessive du moteur signalée par le personnel de Production.

Historiquement tous les niveaux enregistrés précédemment sur le même moteur ont été entre 0.8mm/s RMS et 2mm/s RMS, voir (Figure IV.23).



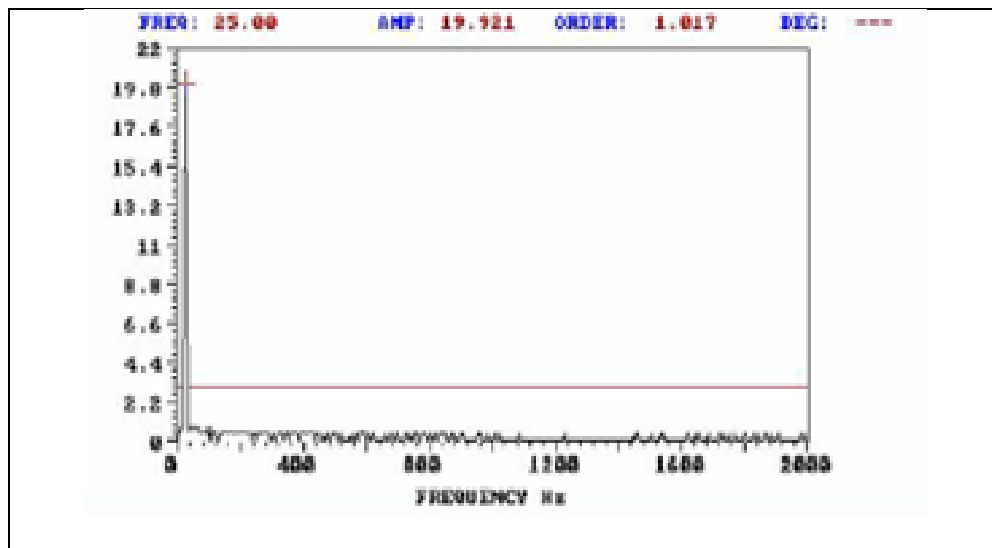
**Figure IV.23** : Niveau global acceptable [35]

Les données de vibration collectées le 7/01 /1997 indiquaient un important changement en amplitude. Pour tous les niveaux enregistrés dans le moteur, le plus significatif est localisé au bout d'arbre du moteur dans le sens vertical avec une valeur globale enregistrée de 19.8mm/s RMS, voir (Figure IV.24)



**Figure IV.24 :** Niveau global après défaillance [35]

Le spectre de vibrations enregistrées à partir de cette position indiquait une composante dominante de 25 Hz (fréquence de rotation du moteur 1500 tr/min), voir (Figure IV.25).



**Figure IV.25 :** Analyse spectrale [35]

Une recommandation pour examiner les conditions d'accouplement entre l'arbre d'entraînement et le réducteur du ventilateur a été faite.

Après examen du système, il était évident qu'une moitié du caoutchouc de l'accouplement s'est détachée, voir (Figure IV.26).

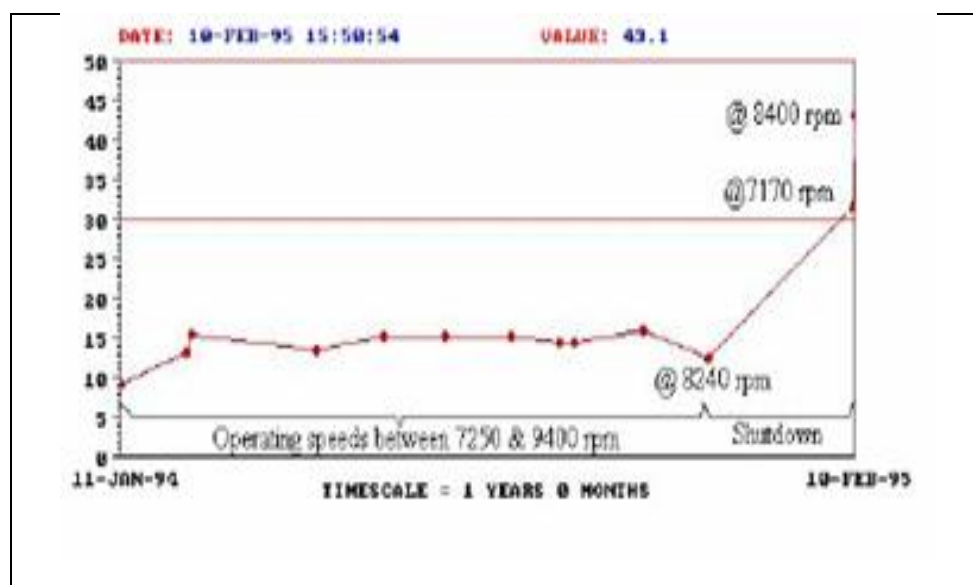


### IV.15. 3<sup>ème</sup> cas : Déséquilibre de l'accouplement d'une turbine [35]

L'historique des données enregistrées montre un niveau vibratoire, jusqu'à l'arrêt de la machine, dans des proportions tout à fait normales pour tous les paliers lisses, que ce soit les relevés ou les déplacements relatifs.

La lecture des relevés vibratoires au niveau des paliers jusqu'au jour de l'arrêt étaient en dessous de 2mm/s.

Toutefois, durant le démarrage de la machine et à une vitesse de 7170 RPM, les relevés vibratoires relatifs dans le palier ont donné un niveau haut autour de 32 microns. Et quand on a augmenté la vitesse à 8500 RPM, on a constaté aussi une augmentation du déplacement à 43 microns, voir (Figure IV.28)



**Figure IV.28** : La tendance du déplacement [35]

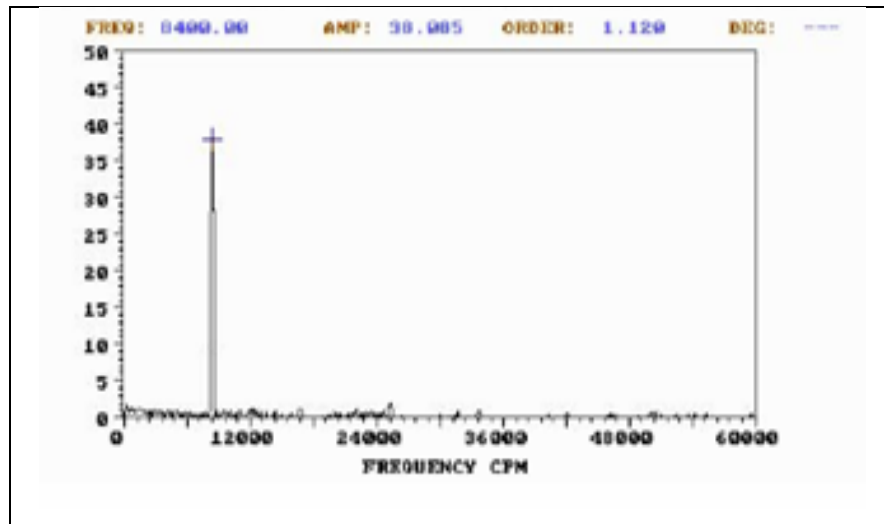
L'examen du spectre vibratoire montre clairement une dominance de la fréquence de rotation avec une amplitude de 38 microns pic à pic indiquant les conditions d'un déséquilibre d'un élément tournant de la turbine.

Une investigation de l'historique de la turbine a révélé le montage d'un nouvel arbre pendant l'arrêt de janvier 1995.

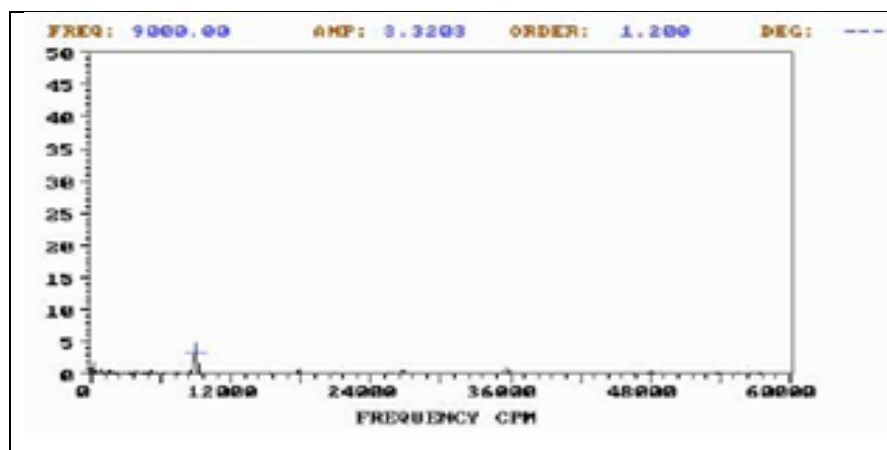
Du coté compresseur, le niveau vibratoire est resté pratiquement inchangé par rapport aux valeurs des tests prévus.

La turbine est désaccouplée du compresseur, toujours avec le système d'accouplement en place. Actionné à 7250 RPM, on a obtenu une amplitude de moins de 10 microns. Clairement ça démontre que l'arbre de la turbine n'était pas en cause.

Notre attention a été attiré par le système d'accouplement, mais c'est toujours le même avant et après l'arrêt de la machine, d'autant plus, il a présenté un niveau vibratoire en dessous de 15 microns juste avant l'arrêt. Donc on a procédé à son démontage et à son remontage en prenant le soin de le faire dans une autre disposition.



**Figure IV.29** : Avant la correction du problème [35]



**Figure IV.30** : Après correction du problème [35]

Cette fois-ci la remise en marche de la machine à une vitesse de 9000 RPM a permis d'avoir un niveau vibratoire autour de 10 microns. Clairement, un mauvais montage du système d'accouplement été à l'origine du problème, voir (Figure IV.29) et (Figure IV.30).

#### IV.16. 4<sup>eme</sup> cas: Prévention de la durée de vie par les paramètres techniques d'information

S'est dessinée ces dernières années la tendance au passage de la maintenance planifiée des GPU vers le service selon leur état technique. Pour cela il faut révéler les paramètres d'information, selon lesquels on peut définir l'état technique des GPU et construire un modèle mathématique pour la définition de ses tels états, comme "la prévention" et "l'arrêt".

Pour mettre en œuvre les objectifs du service de surveillance sur les stations de compression on utilisait les systèmes automatisé vibromonitoring et les gestions des GPU l'ensemble GE Speedtronic<sup>TM</sup> Mark V pour le contrôle d'GPU «human machine interface» (HMI).

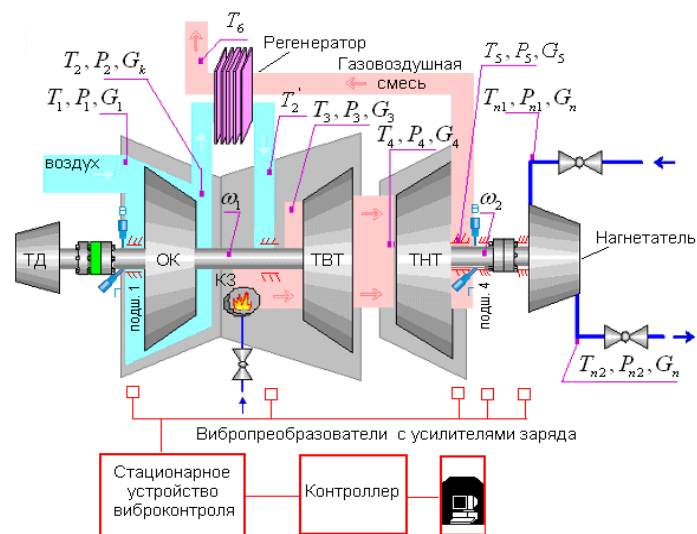


Figure IV.31: Schéma du contrôle de l'état technique de GPU

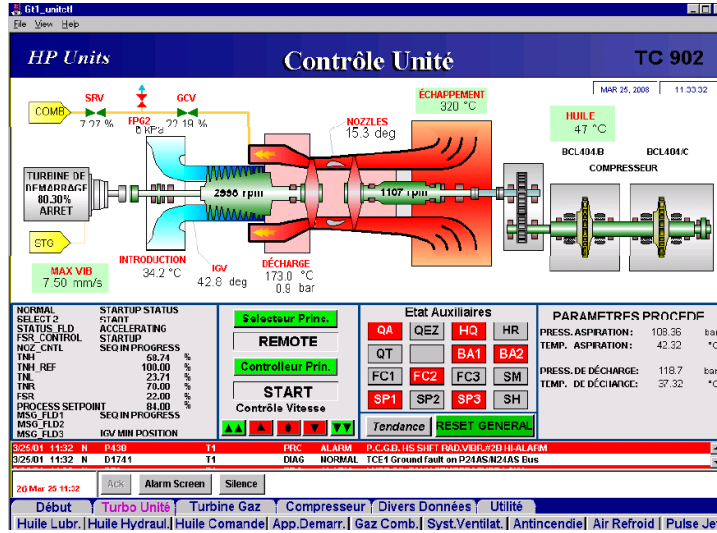


Figure IV.32: Indication des paramètres de l'état technique de GPU

Sur le premier dessin on présente le schéma du contrôle de l'état technique de GPU la turbine GE MS3002 avec l'indication des situations des détecteurs pour le contrôle de la vibration.

Les études expérimentales des spectres de la vibration pour les turbines et le compresseur et d'autres paramètres de l'état de GPU indiqué sur cela au tableau, était passé au panneau spécial de GPU comme MS3002, établi sur CS Hassi-R'mel. Leurs significations se reflètent sur le schéma «HMI» avec simple «Software» pour l'ensemble «Mark V»(fig. IV.32).

Selon les données expérimentales reçues (tab.1) on construisait les graphiques du changement des paramètres d'information en fonction du temps de fonctionnement, l'analyse qui a montré la présence chez eux une tendance définie.



**Le tableau IV.1 :** L'état technique de GPU chaque 2000 heures de fonctionnement

K	D'échappement; C° La température	La vibration de la turbine, mm/s		La vibration du compresseur, micron				La poussée axiale, mm	L'augmentation des pressions	Le degré de
		palier № 1	palier № 4	Palier d'appui		Paliers a butée				
				Horizontal	Vertical	horizontal	vertical			
1	510	4,4	2,3	17	10	12	11	0,22	1,25	
2	520	5,6	3,0	19	16	11	10	0,28	1,41	
3	520	5,0	3,8	26	28	11	10	0,25	1,36	
4	512	5,4	1,7	25	14	15	16	0,27	1,36	
5	485	5,4	3,4	32	18	16	14	0,20	1,41	
6	515	4,7	1,9	33	17	17	14	0,18	1,50	
7	519	4,8	1,9	27	27	13	12	0,22	1,38	
8	520	3,9	1,8	30	23	13	13	0,18	1,32	
9	515	3,8	2,1	34	21	11	15	0,24	1,42	
10	518	3,8	2,0	36	25	12	14	0,22	1,35	

La méthode la plus courante d'identifier une tendance est une approximation polynomiale de données d'ordre inférieur ( $n \leq 3$ ) par la méthode des moindres carrés.

$$y = a_0 + a_1u + a_2u^2 + \dots + a_nu^n \tag{1}$$

La minimisation celui-ci amène l'expression 1 à la fonction 2

$$\bar{a} = CF^T\tilde{Y}, \tag{2}$$

Où –  $\bar{a}^T = (a_0, a_1, \dots, a_n)$  vecteur des estimations des paramètres du polynôme (1);

$C = M^{-1}$  – La matrice dispersive, où –  $M = F^T F$  matrice de Fisher.

$$F = \begin{bmatrix} 1 & u^{(1)} & u^{(1)2} & \dots & u^{(1)n} \\ 1 & u^{(2)} & u^{(2)2} & \dots & u^{(2)n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & u^{(N)} & u^{(N)2} & \dots & u^{(N)n} \end{bmatrix} - \text{La matrice du montant } N \times (n+1);$$

$\tilde{Y}^T = (\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_N)$  – Le vecteur des données;

$T$  – Le symbole de l'opération de l'acheminement des matrices.

Dans notre cas on choisissait le polynôme du premier ordre:

$$y = a_0 + a_1 u \quad (3)$$

Où  $u$  – le contenu du temps  $t = k\Delta t$  ( $\Delta t$  – TBF de GPU chaque 2000);

$y$  – un de neuf paramètres d'information des GPU.

À la suite des calculs selon la formule (2) sont définis les paramètres  $a_0$  et  $a_1$  de la modèles régressive (3). L'analyse montre que la variété des significations du coefficient  $a_1$  s'approche du zéro, de sorte que la question se pose: est-ce vraiment  $a_1 = 0$  et sa différence du zéro est aléatoire? En fait, les données de sortie ont une tendance?

Nous avancerons l'hypothèse  $H_0: a_1 = 0$  et l'hypothèse alternative  $H_1: a_1 \neq 0$ .

Nous introduirons la valeur extensible  $-t_{st}$  statistique de St'judent

$$t_{st} = \frac{a_1 - \mu_0}{S_{a_1}}, \quad (4)$$

Où  $\mu_0 = M[a_1]$  – l'attente mathématique de la variable aléatoire  $a_1$ ;

$S_{a_1}^2$  – L'estimation de la dispersion de la variable aléatoire  $a_1$ .

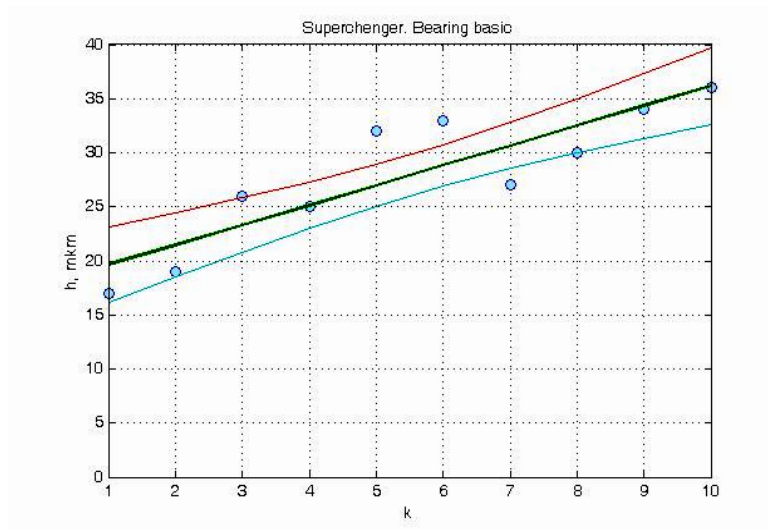
Si on satisfait la condition  $|a_1| < t_{1-\alpha/2} S_{a_1}$ , (la Multiplication des degrés de la liberté de la statistique de St'judent par l'estimation de la dispersion), l'hypothèse  $H_0$  est acceptée.

Les résultats des calculs amenés à tab. N° 2, montrent qu'il a lieu l'hypothèse  $H_0$ , ainsi que l'hypothèse alternative  $H_1$ .

**Tableau IV.2 :** Analyse de l'état technique de l'unité (toutes les 2000 heures de fonctionnement)

Les paramètres de l'état technique des GPU			Les paramètres de la régression		L'hypothèse $H_0 (a_1 = 0)$	
			$a_0$	$a_1$		
La température d'échappement			510,4667	0,5333	Est accepté	
La vibration	La turbine	Le palier № 1	5,5467	-0,1576	N'est pas accepté	
		Le palier № 4	3,0533	-0,1206	Est accepté	
	Le compresseur	Palier d'appui	L'horizontale	17,8	1,8364	N'est pas accepté
			La verticale	13,8	1,1091	N'est pas accepté
		P.àbutée	L'horizontale	12,9333	0,0303	Est accepté
			La verticale	10,7333	0,3939	N'est pas accepté
La poussée axiale			0,2527	-0,0048	Est accepté	
Le degré de l'augmentation de la pression			1,348	0,0054	Est accepté	

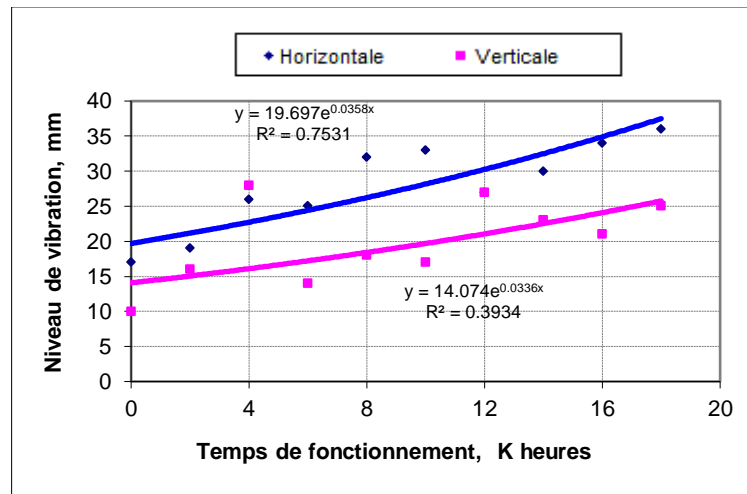
Comme un exemple de l'analyse d'un des paramètres d'information, nous examinerons la composante horizontale de la vibration du palier d'appui du compresseur



**Figure IV.33 :** Changement de l'état vibratoire du palier du compresseur (la composante horizontale de la vibration)

Conformément à la formule (2) étaient trouvés les coefficients de modèle (3)  $a_0 = 17,8$ ,  $a_1 = 1,8364$  (Dans le milieu de MatLab est créé l'algorithme du calcul). Puisque l'on contrôle l'hypothèse  $a_1 = 0$ , cela  $\mu_0 = M[a_1] = 0$ , nous trouvons  $S_{a_1}^2 = 0,35396$ , mais pour le niveau de la confiance  $\alpha = 0,1$  et  $N - 2$  les degrés de la liberté de la statistique de St'judent  $t_{1-\alpha/2} = 1,8595$ . Puisque  $a_1 = 1,8364$  et  $t_{1-\alpha/2} S_{a_1} = 0,6582$ , alors il a  $|a_1| > t_{1-\alpha/2} S_{a_1}$  et l'hypothèse alternative  $H_1$  est acceptée ( $a_1 \neq 0$ ). Les résultats détaillés de l'analyse sont montrés sur fig. IV.33.

Selon les résultats de l'analyse des données statiques on faisait par nous l'étude des spectres de la vibration du palier d'appui du compresseur.



**Figure IV.34 :** Niveau des vibrations horizontales et verticales du palier d'appui du compresseur et l'équation de la régression décrivant leurs d'état

Les données reçues permettent d'estimer l'état limite du palier du compresseur d'GPU et pronostiquer sa ressource (fig. IV.34). Alors la ressource d'GPU selon le niveau des vibrations atteint : pour 30 mille heures d'ouverture de  $- 57,65$  microns, pour 36 mille heures  $- 71,5$  microns, mais à l'obtention plus de 37 mille heures sont nécessaires d'arrêter le groupe de machines.

#### **IV.17. Conclusion :**

L'utilisation de l'analyse des signaux vibratoires comme méthode de diagnostic remonte aux années 1960. Depuis, on y fait largement appel dans la plupart des installations industrielles, particulièrement dans la prévention des pannes mécaniques [36].

Nous avons présenté dans ce chapitre les méthodes de surveillance et diagnostic les plus utilisés pour les organes des machines.

Les systèmes de capture et de transmission des vibrations influent sur la qualité de la méthode de diagnostic vibratoire [36].

Au stade de diagnostic, l'analyse vibratoire constitue une des meilleures méthodes en particulier pour l'étude des pannes mécaniques sur les machines tournantes [36].

Selon les facteurs identifiés qui caractérisent l'état technique de GPU, on élabore la méthode des modèles d'auto-organisation, ce qui permet selon les paramètres de la vibration prédire la valeur du temps de fonctionnement et de déterminer l'état technique de GPU comme un «avertissement» ou «arrêt», qui ouvre des possibilités pour le passage de la maintenance planifié de ces unités vers le service en fonction de leur état technique réel.

---

## Conclusion générale

Sous l'actualité de la concurrence accrue entre les compagnies industrielles afin de satisfaire les demandes en termes de service, qualité du produit et performance, la maintenance a un rôle primordial dans la réussite. Ce dernier est basé sur la viabilité de fonctionnement. Les machines tournantes représentent la clé des systèmes de fonctionnement et de production, ou elles occupent des positions stratégiques.

La surveillance de leurs états de fonctionnement présente donc un intérêt indéniable, afin d'atteindre les objectifs visés.

A l'image de la médecine, l'analyse vibratoire permet l'élaboration d'un bilan complet de la machine. La procédure consiste à détecter l'apparition d'un défaut sans démontage de la machine en prélevant le signal vibratoire à l'aide des capteurs de vibration.

Le contenu fréquentiel des vibrations est une information clé pour le diagnostic des défauts sur les machines tournantes et pour la caractérisation de la dynamique des structures.

Notre travail a traité les machines tournantes, aussi l'analyse vibratoire inclue une étude de cas des défauts sur les machines tournantes ou on a conclu que l'analyse vibratoire est très fiable et précise grâce à la clarté de l'image vibratoire obtenu, et la différence entre l'image prise lors de la panne et après la réparation de cette panne peut être observée par toute personne qui ne connaît pas la signification d'un diagnostic vibratoire.

En perspective, on recommande d'élargir l'étude sur d'autres plans tels que l'analyse thermique des machines tournantes.

Aussi de développer la technique d'analyse vibro-acoustique, cette technique est utilisée pour étudier les structures immergées, mais nous pouvons la développer pour l'utiliser pour diagnostiquer les défauts des machines tournantes.

## Références bibliographiques

---

- [01] El gharbi Najla, «La centrale hybride de Hassi R'mel», Attachée de Recherche, Division Énergie Solaire Thermique et Géothermie, (2011).
- [02] Hadjadj Aoul Amine, Messaoudi Mohamed « Chapitre I Description du champ de Hassi R'mel », mémoire fin d'études, (2010).
- [03] Documentation pour : Description du champ de Hassi R'mel.
- [04] Hachemi Mohammed, « Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration des machines tournantes », Mémoire master, (2012).
- [05] Site web : <https://www.omicronenergy.com/fr/applications/diagnostics-et-surveillance-des-machines-tournantes>.
- [06] Boulenger A, Pachaud C, « Diagnostic vibratoire en maintenance préventive », Livre, Dunod, (2003).
- [07] Site web: <https://www.cours-gratuit.com/cours-electricite/les-machines-electriques-cours-complet>.
- [08] Site web: <http://bigtoys.free.fr/ALTERNATEUR%20-%20DYNAMO.htm>
- [09] Support de cours « Cours Machine Asynchrone », Lycée P. Mendès France Epinal, spé : génie électrique
- [10] Support de cours «Cours Machine Synchrone», Lycée P. Mendès France Epinal, spé : génie électrique.
- [11] Site web: <https://studylibfr.com/doc/1865540/la-machine-a-courant-continu>
- [12] Site web: <https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/le-moteur-a-courant-continu-principe>.
- [13] DJABRI MALEKEDDINE, « Etude numérique des caractéristiques géométriques des aubes à action des turbines à vapeur », Mémoire master, encadré par : DAGHBOUDJ SAMIR, (2015).
- [14] Site web: [https://www.academia.edu/32988205/COURS\\_TURBOMACHINES](https://www.academia.edu/32988205/COURS_TURBOMACHINES).
- [15] BOUDIAF Adel, « Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Tournantes par Analyse Multirésolution », Thèse de Doctorat, (2016).
- [16] Landolsi Foued, Support De Cours, « Techniques De Surveillance », Institut Supérieur des études technologiques de NABEUL.

## Références bibliographiques

---

- [17] MERAH Karima, « Diagnostic des défauts de roulement d'un moteur par analyse vibratoire (Etude comparative avec l'analyse du courant statorique) », Mémoire de Magistère, (2016).
- [18] Baptiste TRAJIN, « Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones (Application à la surveillance des roulements à bille) », Thèse de Doctorat, (2009).
- [19] Fenniche abd errazak, « Diagnostic par analyse vibratoire », Support de cours (2019/2020). Université de Ghardaïa
- [20] Belouadah Abdenaceur, « Amélioration de la fiabilité d'un système électromécanique par l'utilisation des opérations de la maintenance préventive », Mémoire master, (2016).
- [21] Guemar Oussama, ELFAR Youssouf « Importance de l'expérience dans l'organisation de la maintenance », Mémoire master, Université Badji Mokhtaa-Annaba, (2017)
- [22] A. BELHOMME, Support de cours, « Cours de Stratégie de Maintenance », BTS Maintenance Industrielle, (2011).
- [23] Site web: <http://tpmattitude.fr/methodes.html>.
- [24] BOUHANIA Aissa KINED Rabeh, « La Gestion des équipements : Etude et implantation dans un logiciel de GMAO ».
- [25] Pascal Vrignat, « Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne. » Thèse de doctorat, Automatique, Université d'Orléans, 2010.
- [26] ELFAR Youssouf, « Diagnostic des défauts d'une machine tournante par l'analyse vibratoire », Mémoire master, Université de M'sila. (2011)
- [27] Site web: <https://archive.org/details/SurveillanceDesMachinesParAnalyseDesVibrations>.
- [28] KHATIR Abdelfatah, « Etude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts », Magister, Université De Sétif, 2009
- [29] Chevalier R, « Etat de l'art de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes à EDF », RFM, (2001).
- [30] Omar DJEBILI ; « Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement ». Thèse de doctorat, Université De Reims Champagne Ardenne (2013).
- [31] ABA. A, « Diagnostic vibratoire sur des pompes rotatives EP2 & P112 ». Rapport de Fin de Mise en Situation Professionnelle du Technicien Supérieur en Mécanique Industrielle, DIRECTION REGIONALE HAOUD BERKAOUI (2015).
- [32] Bensana Toufik, « Diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une turbine à vapeur ». Mémoire de Magister Université Badji Mokhtar – Annaba (2008).



## Références bibliographiques

---

- [33] M .T. Nabti, « Etude de l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques ».Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas Setif (2011)
- [34] Tahar BELKHIR ; Med Mohcen BEN SACI, « La maintenance des équipements par l'analyse vibratoire », Mémoire master, encadré par :Mr. R. KAREK,(2016).
- [35] D.MEDJADI ; F. TACHI, «Diagnostic par Analyse Vibratoire Pour Machines Tournantes», séminaire,Centre des Techniques Appliquées de SKIKDA,( 2006).
- [36] Mme Mehdià Ghozlane, « Techniques de Surveillance des Machines Tournantes », Première Edition,(2013).
- [37] Alain Boulenger ; Christian Pachaud, « Surveillance des machines par analyse des vibrations », Aide-mémoire, Dunod, (2009).