

*République Algérienne démocratique et populaire*  
*Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique*  
*Université M'Hamed Bougara Boumerdes*  
*Faculté des sciences de l'ingénieur*  
*Département maintenance industrielle*



## *Mémoire de Master*

*FILIERE : GENIE MECANIQUE*  
*OPTION : MECATRONIQUE*

# Thème

*Analyse vibratoire des défauts courants*  
*dans le parc machine de la centrale thermique*  
**RAS-DJINET**

*Présenté par :*

*Mr : AKBI BRAHIM*

*Mr : HAMZAOUI Med ESSAID*

*Promoteur :*

*Dr : CHELLIL AHMED*

*Encadreur :*

*Mr : BOUHAROUNE MOHAMED*

2016/2017

## Remerciement

Avant tout et particulièrement, nous tenons à vouer notre infinie reconnaissance au tout puissant ALLAH qui nous a crée du néant, guidé au droit chemin, nous a donné la santé,... .Et notamment, la patience, le courage, et la volonté pour bien terminer ce modeste travail. Nos remerciements exclusifs et éternels vont également au messager MOHAMMED que la prière et la paix d'Allah soient sur lui ainsi que sur sa famille et ses compagnons. Ce prophète, qui enseigne toutes les valeurs morales et exhorte à la recherche du savoir, nous a encouragé à bien parachever notre mémoire.

Nous souhaitons aussi remercier notre promoteur **Mr : CHELLIL AHMED** qui n'a pas ménagé ses connaissances à notre égard et qui a toujours été présent à nos cotés,

Nous remercions le personnel de la centrale thermique en particulier **Mr : KOUROUGHLI MUSTAPHA**

Notre encadreur au niveau de la centrale thermique **Mr : BOUHAROUNE MOHAMED** qui a mis toute ses compétences techniques à notre disposition

Nous remercions chaleureusement nos familles et surtout nos parents pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur patience durant les étapes difficiles de ce travail.

*Brahim Et Mohamed Essaid*

# *Dédicaces*

*Chaleureusement je dédie ce modeste travail :*

*A la lumière de ma vie, mes chers parents  
en témoignage pour leur amour et leur sacrifice  
sans limites qui je souhaite la bonne santé et que  
Dieu me les garde.*

*A mes frères*

*A mes sœurs*

*A toute la famille*

*A tous mes amis sans exception*

*AKBI BRAHIM*

# *Dédicaces*

*Grace à dieu tout puissant, je dédie ce modeste travail :*

*A mon cher père et ma chère mère.*

*A mes frères et sœurs.*

*A mes cousins, en particulier a mon oncle*

***HAMZAOUI MOHAMED** Et ma tante*

***CASTELEYN LINDA***

*A mes amis et tous mes proches.*

*Je pris ALLAH de leurs accorder une longue vie et bonne santé.*

*HAMZAOUI Med ESSAID*

## ملخص

هذه الدراسة مخصصة للصيانة الشرطية باستخدام طريقة التحليل الاهتزازي، حيث أن ميدان العمل هذا احتل أهمية أكثر فأكثر في جعل معدات الإنتاج الصناعي أكثر ربحية، تقترح هذه الطريقة منهجية تجريبية للمساعدة على كشف ومتابعة اهتزازات وعيوب الأجهزة التناوبية (الدوارة).

في عملنا هذا قمنا بتطبيق منهجية تحليل تناوبي (اهتزازي) في الصيانة التنبؤية باستخدام وسائل المتابعة لتشخيص عيوب بعض الماكينات باستخدام تحليل الاهتزازات العام وتحليل الطيف وفقا لدراسة تطبيق تجريبي على مستوى شركة (سونلغاز) رأس جنات.

نتائج الدراسة أظهرت الأعطاب التالية على مستوى الماكينات المدروسة :

- عطب المسننات على مستوى المضخة NH
- عطب عدم التوازن على مستوى جهاز التهوية NK
- عطب عدم تطابق المحاور على مستوى المضخة VG
- عطب المدحرجات على مستوى المضخة WR

### كلمات مفتاحية:

صيانة شرطية، أعطال، تحليل اهتزازي، جهاز تهوية، مضخة

# Résumé

---

Cette étude est consacrée à la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire, domaine d'activité qui constitue une part de plus en plus importante des dispositions permettant de rentabiliser l'instrument de production industriel. Elle propose une méthodologie expérimentale d'aide à la détection et au suivi vibratoire des défauts des machines tournantes. L'augmentation des vibrations permet de détecter un défaut, l'analyse des caractéristiques des vibrations de la machine permet d'en identifier la cause.

Dans notre travail, nous appliquons une méthodologie de l'analyse fréquentielle en maintenance prédictive en utilisant les méthodes de suivi et de diagnostic des défauts de quelques machines par l'analyse au niveau global et l'analyse spectrale. D'après l'étude expérimentale appliquée au niveau de l'entreprise(SONELGAZ) RAS-DJINET.

Les résultats ont montré que les machines étudiées présentent les anomalies suivantes :

- Défaut d'engrenage au niveau de la pompe NH
- Défaut de balourd au niveau du ventilateur NK
- Défaut d'alignement au niveau de la pompe VG
- Défaut de roulement au niveau de la pompe WR

## **MOTS CLES :**

Maintenance conditionnelle, défauts, analyse vibratoire, ventilateur, pompe.

# ABSTRACT

---

This study is dedicated to the conditional maintenance by vibratory analysis, activity area which establishes a more and more important part of capacities allowing to make profitable the industrial instrument of production. She proposes an experimental methodology of help to the detection and to the vibratory follow-up of the defects of the rotating machines. The increase of the vibrations allows to detect a defect, the analysis of the characteristics of the vibrations of the machine allows to identify the cause.

In our work, we apply a methodology of the analysis fréquentielle in predictive maintenance by using the methods of follow-up and diagnosis of the defects of some machin by the analysis at the global level and the spectrum analysis. According to the experimental study applied at the level of the company (SONELGAZ) RAS-DJINET.

The results showed that the studied machins presents the following anomalies:

- Defect of gear at the level of the pump NH
- Defect of unbalance at the level of the ventilator NK
- Defect of misalignment at the level of the pump VG
- Defect of bearing at the level of the pump WR

## **KEY WORDS :**

Maintenance conditional, defects, vibratory analysis, ventilator, pump.

# Sommaire

<b>Remerciement.....</b>	<b>.....</b>
<b>Dédicaces.....</b>	<b>.....</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>.....</b>

<b>Introduction générale :</b> .....	<b>1</b>
--------------------------------------	----------

## Chapitre 1 : présentation de l'unité de RAS-DJINET

---

1. Introduction : .....	3
2. Position de site.....	3
3. Caractéristiques techniques de la centrale : .....	4
3.1. Générateur de vapeur : .....	4
3.2. Turbine : .....	4
3.3. Ventilateurs : .....	7
3.4. L'alternateur (SIEMENS AUTRICHE).....	7
3.5. Poste d'eau : .....	8
3.5.1. Condenseur : .....	8
3.5.2. Bâche alimentaire : .....	9
3.5.3. Les Pompes : .....	9
3.5.4. Réchauffeurs basses pression (BP) et haute pression (HP) :.....	10
3.6. Auxiliaires électrique : .....	11
3.7. Transformateur principal d'évacuation d'énergie: .....	11
3.8. Station de filtrage et de pompage d'eau de mer : .....	12
3.9. Station de dessalement et de déminéralisation d'eau de mer : .....	12
3.9.1. Dessalement d'eau de mer : .....	12
3.9.2. Déminéralisation : .....	13
3.9.3. Electro chloration : .....	13
4. Principe de fonctionnement de la centrale thermique de Ras-Djenet : .....	13
5. Conclusion : .....	15

## Chapitre 2 : Maintenance et analyse vibratoire

---

1. Introduction :	16
2. Maintenance :	16
2.1. But de la maintenance :	16
2.2. Types de la maintenance :	17
3. Techniques d'analyse :	18
3.1. L'analyse d'huile :	19
3.2. Thermographie infrarouge :	19
3.3. Analyse vibratoire :	20
4. Définition d'une vibration :	21
5. Caractéristiques d'une vibration :	21
5.1. Fréquence :	21
5.2. Les unités :	22
5.3. Amplitude :	22
6. Différentes formes de vibration :	22
6.1. Vibrations harmoniques :	22
6.2. Vibrations périodiques :	23
6.3. Vibrations apériodique :	24
7. Application des vibrations :	24
7.1. Analyse structurelle :	24
7.2. Test de vibration :	24
7.3. Surveillance de l'état des machines et diagnostic des défauts :	25
8. Les différentes représentations du signal :	25
8.1. Représentation temporelle :	25
8.2. Représentation spectrale (ou fréquentielle) :	25
8.3 Représentation d'un signal quelconque :	26
9. Origine des vibrations :	27
9.1. Vibration des machines voisines :	27
9.2. Vibration d'origine électrique :	27
9.3. Résonance de la structure ou du rotor :	27
10. Principale activité de l'analyse vibratoire :	27
10.1. La surveillance :	27
10.2. Le diagnostic :	27

11. Mesure pratique d'une vibration :.....	28
11.1. Chaîne de mesure vibratoire :.....	28
11.2. Les points de mesurages :.....	29
12. Conclusion :.....	31

### Chapitre 3 : principaux défauts des machines tournantes

---

Introduction : .....	32
1. Défaut de balourd : .....	32
1.1. Types des balourds : .....	33
1.1.1. Balourd d'origine mécanique:.....	33
1.1.2. Balourd d'origine thermique:.....	35
1.1.3. Balourd évolutif:.....	35
2. Défaut d'alignement : .....	37
2.1. Les types de désalignement : .....	37
2.1.1. Désalignement radial: .....	37
2.1.2. Désalignement angulaire: .....	37
3. Défauts de courroies :.....	38
3.1. Les fréquences caractéristiques des défauts de courroies : .....	39
3.2. Fonctionnement des courroies : .....	39
3.3. Avantages des transmissions par courroies : .....	40
4. Défauts des roulements : .....	40
4.1. Fréquences caractéristiques : .....	41
4.2. Cause des défauts de roulement : .....	42
5. Défauts sur les engrenages : .....	43
5.1. Principales sources des vibrations :.....	43
5.2. Types de défaut : .....	44
5.3. Fréquence d'engrènement : .....	46
5.4. Ambiguïtés de diagnostic :.....	46
6. Défaut de paliers lisses hydrodynamique :.....	47
6.1. Instabilités de paliers :.....	47
6.2. Types d'instabilités : .....	47
6.3. Origine des instabilités :.....	48

7. Défauts électriques :	48
7.1. Au niveau du rotor :	48
7.2. Au niveau du stator :	49
8. Défauts induits par desserrage :	50
9. Défaut de Cavitation :	51
9.1. Types de cavitation :	51
10. Défauts d'excentricité :	52

## Chapitre 4 : Etude Expérimentale

---

1. But de travail :	54
2. Matériel utilisé :	54
2.1. Le VIBROTEST 60 :	54
2.2. Logiciel d'analyse de diagnostic vibratoire « VIBROEXPERT CM-400 » :	55
3. Etude d'un cas :	56
Défaut d'engrenage au niveau de la pompe NH :	56
1. Donnée technique :	57
2. l'analyse du défaut avant l'intervention :	57
2.1. Représentation temporelle :	57
2.2. Analyse des résultats :	58
2.3. Représentation spectrale (fréquentielle) :	58
2.4. Interprétation :	58
2.5. Analyse de résultat :	59
3. Analyse de défaut après intervention :	59
3.1. Interprétation :	59
Défaut de balourd au niveau du ventilateur NK :	60
1. Donnée technique :	60
2. analyse du défaut avant intervention :	60
2.1. Représentation temporelle :	60
2.2. Analyse des résultats :	61
2.3. Représentation spectrale (fréquentielle) :	61
2.4. Interprétation :	62
2.5. Analyse de résultat :	62

3. Analyse du défaut après l'intervention : .....	63
3.1. Interprétation :.....	63
Défaut d'alignement au niveau de la pompe VG : .....	64
1. Donnée technique :.....	64
2. Analyse du défaut avant intervention : .....	64
2.1. Représentation temporelle: .....	64
2.2. Analyse des résultats :.....	65
2.3. Représentation spectrale(fréquentielle) : .....	65
2.4. Interprétation :.....	66
2.5. Analyse de résultat :.....	67
3. Analyse du défaut après l'intervention : .....	67
3.1. Interprétation :.....	67
Défaut de roulement au niveau de la pompe WR : .....	68
1. Donnée technique : .....	68
2. Analyse du défaut avant intervention : .....	68
2.1. Représentation temporelle : .....	68
2.2. Analyse des résultats :.....	69
2.3. Représentation spectrale(fréquentielle) : .....	69
2.4. Interprétation :.....	70
2.5. Analyse de résultat :.....	70
3. Analyse de défaut après l'intervention :.....	71
3.1. Interprétation :.....	71
<b>Conclusion générale : .....</b>	<b>72</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>.....</b>

# Liste des figures

Fig.1. 1. position de la centrale RAS DJINET .....	3
Fig.1. 2. Chaudière de la centrale de Cap Djinet.....	4
Fig.1. 3. Corps haute pression (HP) .....	5
Fig.1. 4. Corps moyenne pression (MP).....	6
Fig.1. 5. Corps basse pression (BP).....	7
Fig.1. 6. Ventilateur.....	7
Fig.1. 7. Alternateur .....	8
Fig.1. 8. Vue de bêche alimentaire de la centrale.....	9
Fig.1. 9. Vue de réchauffeur basse pression (BP) .....	10
Fig.1. 10. Transformateur principal.....	12
Fig.2. 1. Technique d'analyse .....	18
Fig.2. 2. Exemple de la thermographie infrarouge.....	20
Fig.2. 3. Vibration harmonique .....	23
Fig.2. 4. Vibration périodique .....	23
Fig.2. 5. Vibration apériodique .....	24
Fig.2. 6. Représentation temporelle.....	25
Fig.2. 7. Représentation spectrale .....	26
Fig.2. 8. Représentation d'un signal quelconque .....	27
Fig.2. 9. Proximètre .....	28
Fig.2. 10. Vélocimètre .....	28
Fig.2. 11. Accéléromètre .....	29
Fig.2. 12. Les points de mesurage .....	30
Fig.3. 1. défaut de balourd.....	32
Fig.3. 2. balourd statique .....	33
Fig.3. 3. balourd couple.....	34
Fig.3. 4. balourd dynamique.....	34
Fig.3. 5. défauts d'alignement d'arbres .....	37
Fig.3. 6. délignage parallèle .....	37
Fig.3. 7. délignage angulaire .....	38
Fig.3. 8. Transmission par courroie.....	39
Fig.3. 9. constitution d'un roulement .....	41
Fig.3. 10. Caractéristiques géométriques d'un roulement .....	41
Fig.3. 11. L'usure des engrenages a) usure par interférence b) usure abrasive.....	44
Fig.3. 12. Piqûre Engrenages.....	45
Fig.3. 13. Écaillage des dents .....	45

Fig.3. 14. Le grippage Engrenage .....	46
Fig.3. 15. Schéma du palier hydrodynamique.....	47
Fig.3. 16. Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit.....	48
Fig.3. 17. Différents défauts au niveau de stator.....	50
Fig.3. 18. Cavitation dans une pompe hydraulique.....	51
Fig.3. 19. Défauts d'excentricité statique et dynamique.....	52
Fig.4. 1. Appareil de mesure de vibration VIBROTEST 60 .....	54
Fig.4. 2. la pompe NH.....	56
Fig.4. 3. Analyse temporelle du palier N° 03 RH avant l'intervention .....	57
Fig.4. 4. Analyse spectrale du palier N° 03 RH avant l'intervention .....	58
Fig.4. 5. Analyse spectrale du palier N° 03 RH après l'intervention.....	59
Fig.4. 6. Le ventilateur NK.....	60
Fig.4. 7. Analyse temporelle du palier N° 02 AX avant l'intervention .....	61
Fig.4. 8. Analyse spectrale du palier N° 02 AX avant intervention.....	62
Fig.4. 9. Analyse spectrale du palier N° 02 après l'intervention .....	63
Fig.4. 10. La pompe VG.....	64
Fig.4. 11. Analyse temporelle du palier N° 02 AX avant l'intervention .....	65
Fig.4. 12. Analyse spectrale du palier N° 02 AX avant l'intervention.....	66
Fig.4. 13. Analyse spectrale du palier N° 02 AX après l'intervention .....	67
Fig.4. 14. la pompe WR .....	68
Fig.4. 15. Analyse temporelle du palier N° 02 AX avant l'intervention .....	69
Fig.4. 16. Analyse spectrale du palier N° 02 AX avant l'intervention.....	70
Fig.4. 17. Analyse spectrale du palier N° 02 AX après l'intervention .....	71

# Liste d'abréviations

BP :	Basse Pression
MP :	Moyenne Pression
HP :	Haute Pression
CPM :	nombre de cycles par minute
RPM :	nombre de rotation par minute
Ac :	amplitude crête
Acc :	amplitude crête a crête
RMS :	Root mean square
AFNOR :	association française de la normalisation
ISO :	international standaring organisation
NH :	la pompe de réchauffeur d'aire rotatif
NK :	ventilateur d'aire d'allumage
VG :	la pompe d'eau de refroidissement secondaire
WR :	la pompe de recirculation de saumure
RH :	direction horizontale
AX :	direction axiale

***Introduction***

**Générale**

## Introduction générale

Les vibrations sont presque omniprésentes dans les centrales électriques, turbogénérateurs, les pompes principales du circuit de calo portage et les pompes d'alimentation des chaudières.

Les machines tournantes vibrent en raison des défauts d'équilibrage et d'alignement et des imperfections des paliers : la tuyauterie et les échangeurs de chaleur vibrent sous l'effet des pulsations d'écoulement : les structures vibrent en raison des vibrations transmises par les diverses pièces d'équipement qu'elles abritent, même les lignes de transport d'électricité vibrent sous l'effet des rafales de vent.

De façon générale, les vibrations résident la durée de vie de l'équipement et dans les cas extrêmes peuvent endommager celui-ci ou même provoquer des défaillances catastrophiques.

Par ailleurs, les vibrations peuvent dénoter des problèmes d'équipement.

L'observation des phénomènes vibratoires peut donc permettre de déceler ces problèmes et d'éviter des dommages coûteux.

L'analyse vibratoire permet l'élaboration d'un bilan complet de la machine. Le contrôle des machines tournantes par l'analyse vibratoire est couramment utilisé notamment pour la surveillance des composants fragiles ou stratégiques d'un système, par exemple les roulements à billes, les engrenages ou les rotors. La procédure consiste à détecter l'apparition d'un défaut sans démontage de la machine en prélevant le signal vibratoire à l'aide d'un capteur vibratoire. On définit alors une procédure de contrôle par comparaison d'indicateurs avec des seuils d'alarme préalablement définis. On ne recherche souvent pas plus loin la nature et la cause du problème. Cependant, dans la plupart des cas, l'analyse du défaut est également possible. L'analyse vibratoire permet l'élaboration d'un « bilan mécanique » complet du système qui caractérise qualitativement et quantitativement son état à un instant donné, et ainsi d'y reconnaître d'éventuelles « maladies ».

L'analyse vibratoire est l'une des méthodes et des techniques qui permettent à l'ingénieur de mieux maîtriser le fonctionnement des machines, grâce à ses exceptionnelles capacités à traduire le comportement de tout ce qui bouge ou qui tourne, a introduit la notion de maintenance conditionnelle en remplacement de l'entretien curatif ou systématique d'hier.

Elle est devenue une discipline scientifique de pointe avec ses propres matériels, ses techniques, ses laboratoires et ses chercheurs.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres, suivis d'une conclusion générale.

**Chapitre 1 :**

Est consacré à la présentation de la centrale thermique RAS- DJINET.

**Chapitre 2 :**

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté une étude théorique sur la maintenance industrielle et leurs types. et on a proposé une vue complète sur les techniques et les moyens d'analyse vibratoire, pour cela on a approché les notions fondamentales de diagnostic vibratoire.

**Chapitre 3 :**

Le troisième chapitre présente les principaux défauts existant sur les machines tournantes en générale, dans le parc machine RAS-DJINET

**Chapitre 4 :**

Dans le quatrième on a recommandé des résultats expérimentaux basés sur l'application des techniques du diagnostic vibratoire, et présenté les résultats de l'analyse pour des signaux et étudié l'efficacité de ces techniques pour le système défaillant.

Nous avons terminé par une conclusion générale sur cette étude.

# CHAPITRE 1 :

*Présentation de*

*L'unité de*

**RAS-DJINET**

## 1. Introduction :

La centrale de Ras Djinet est une centrale thermique qui produit une puissance électrique avec une capacité de 704 MW répartie en 4 unités de production de type thermique à vapeur d'une puissance unitaire de 176 Mégawatts (MW) chacun. La puissance fournie au réseau National est de 672MW bornes usine, transportée au poste d'intersection ALGER/EST par l'intermédiaire de 04 lignes de transport de 220 KV. La consommation totale des auxiliaires des quatre tranches et des auxiliaires communs est d'environ 32 MW.

La centrale Thermique de RAS DJINET est une branche de la société nationale de l'électricité et de gaz, SONELGAZ par abréviation. La centrale a été construite par un consortium Austro-allemand : SEIMENS-KWU-SGP, et mise en service pour la première fois en 1986. Cette centrale est classée parmi les plus grandes du pays et revêt un caractère hautement stratégique (régulation de réseau électrique). Elle a été créée pour renforcer le parc de production d'énergie électrique qui atteignait à la fin de premier plan quinquennal : 3000 MW pour la production de 10 000 (G/H).

## 2. Position de site :

La centrale implantée sur une surface de 35 hectare spécialement sélectionnée sur le littoral de cap djinet (25 km à l'est de Boumerdes) pour sa conformité avec les critères nécessités par ce genre d'installation, dont la proximité avec les RN 24 et 12, ainsi que la voie ferrée.



**Fig.1.1.** position de la centrale RAS DJINET

### 3. Caractéristiques techniques de la centrale :

La centrale Thermique de Ras Djenet est composée de plusieurs organes important du type Thermique et pour chaque groupe de la centrale on trouve :

#### 3.1. Générateur de vapeur :

La chaudière est un appareil destiné à extraire l'énergie calorifique du combustible et la céder à l'eau, Alors elle a pour rôle de transformer l'eau d'alimentation en vapeur, à haute pression et à une température plus élevée en vue d'alimenter la turbine. La chaudière est de type pressurise (sous-pression) à circulation naturelle.



**Fig.1.2.** Chaudière de la centrale de Cap Djinet

Le générateur de vapeur (chaudière) a pour rôle d'extraire l'énergie calorifique du combustible et de la céder à la vapeur d'eau.

C'est donc la transformation de l'énergie chimique en énergie calorifique, qui sera transformé en énergie mécanique dans la turbine.

#### 3.2. Turbine :

##### 3.2.1. Rôle :

La turbine est une machine à une ligne d'arbre composé de corps HP (haute pression), MP (moyenne pression), BP (basse pression).

La turbine transforme l'énergie thermique contenue dans la vapeur provenant de la chaudière en un mouvement de rotation de l'arbre. Le travail mécanique obtenu sert à entraîner l'alternateur.

### 3.2.2. Description :

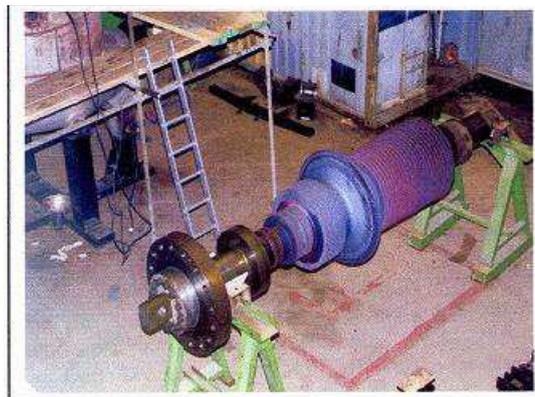
- Turbine à trois corps : HP, MP et BP (haute, moyenne et basse pression).
- Nombres de soutirages de vapeur : 06 alimentant trois réchauffeurs BP, la bêche alimentaire et deux réchauffeurs HP.

### 3.2.4. Constitution :

#### 3.2.4.1. Aubages :

Hormis l'étage de réglage, toute la turbine est du type à réaction. Les aubes mobiles des corps HP sont fraisées dans la masse avec un pied en forme de marteau et tenon. Les derniers étages de corps BP sont dotés d'aubes à profil gauche venues de matrice dont le pied en forme de sapin ou de marteau double est émanché dans les rainures correspondantes de l'arbre. Les aubes directrices des corps HP et MP soumises à de fortes sollicitations sont fraisées dans la masse avec un pied en forme de marteau et un tenon comme les aubes mobiles. Les autres aubes directrices ont un pied en forme de crochet et un tenon rivé. Les trois derniers étages du corps BP sont constitués par des couronnes d'aubes directrices en tôle.

#### 3.2.4.2. Corps HP :



**Fig.1.3.** Corps haute pression (HP)

Le corps HP (haute pression) de la turbine est une construction en tonneau, il est équipé d'un étage de réglage pour régularisation par groupe de tuyères. Quatre ensembles combinés vanes d'arrêt, soupapes régulatrices sont associés à autant de groupes de tuyère, ils sont disposés de chaque côté du corps. La vapeur conduite à la turbine par l'intermédiaire des tuyauteries parvient aux soupapes régulatrices après avoir traversé les vanes d'arrêt. A partir de ces soupapes la vapeur s'écoule dans l'enveloppe. Des clapets anti-retour sont montés sur les tuyauteries sur les tuyauteries de resurchauffe entre le corps HP et le resurchauffeur pour empêcher le reflux chaud du resurchauffeur vers le corps MP.

### 3.2.4.3. Corps MP :

Le corps MP est à double flux. L'enveloppe externe possède un plan de joint horizontal, elle porte l'enveloppe interne montée de façon à ne pas entraver les dilatations thermiques. Les aubes directrices sont logées dans l'enveloppe interne et la vapeur resurchauffée pénètre au milieu de l'enveloppe interne par le bas et le haut. La présence de l'enveloppe interne limite les caractéristiques élevées de la vapeur à la zone d'admission de cette enveloppe, alors le joint horizontal de l'enveloppe n'est exposé qu'aux faibles pressions et à la température réduite de la vapeur à la sortie de l'enveloppe interne.

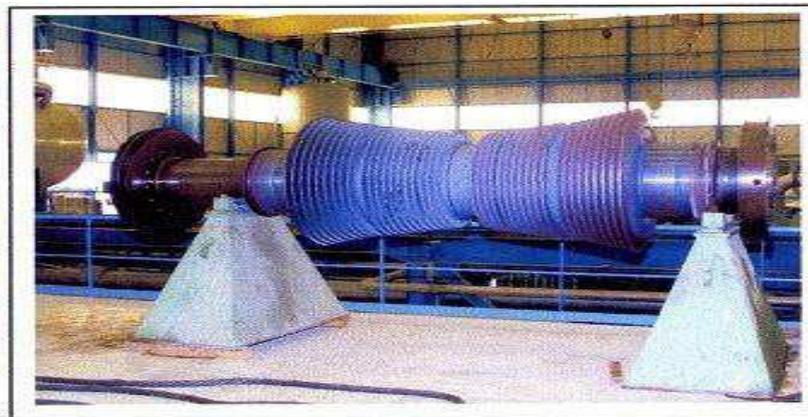


Fig.1.4. Corps moyenne pression (MP)

### 3.2.4.4. Corps BP :

Le corps BP (basse pression) est du type à double flux. Il s'agit d'une construction mécano-soudée comprenant une carcasse et une double enveloppe. La vapeur provenant du corps MP pénètre dans le corps interne de l'enveloppe double en amont des aubages BP par les pipes d'admission disposées de part et d'autre part du corps BP. Des compensateurs sont montés sur les gaines de vapeur pour éviter la déformation sous l'effet de dilatation thermique.



**Fig.1.5.** Corps basse pression (BP)

### 3.3. Ventilateurs :

- 02 ventilateurs de recyclage : ont pour rôle en recycler en fonction de la charge, une partie des fumées issues de la combustion afin de régler la température à la sortie du resurchauffeur.
- 02 ventilateurs de soufflage : ont pour rôle de fournir l'air de combustion nécessaire au générateur vapeur.



**Fig.1.6.** Ventilateur

### 3.4. L'alternateur (SIEMENS AUTRICHE) :

Est un générateur d'électricité lié directement avec l'arbre de la turbine, Il transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique. C'est un alternateur à pôles lisses. Parmi ces avantages la faible densité et une grande conductibilité Thermique ce qui permet de réduire les pertes de chaleur lors de la ventilation, ainsi que la chaleur dégagée par courant électrique crée est un courant alternative triphasé.



**Fig.1.7.** Alternateur

Les alternateurs sont à refroidissement à l'hydrogène sous pression de 03 bars en circuit fermé, l'hydrogène étant lui-même refroidi à l'eau d'extraction.

### **3.5. Poste d'eau :**

Le poste d'eau est l'ensemble des appareils qui transfère l'eau d'alimentation du cycle depuis le condenseur jusqu'à la chaudière et qui conditionne cette eau du point de vue de la température et de la teneur en oxygène. IL se compose des éléments suivants :

#### **3.5.1. Condenseur :**

Le condenseur utilisé dans l'installation est un échangeur à échange par surface. Il est placé sous la Turbine BP. La vapeur d'échappement de la turbine, se condense au contact extérieur des tubes du faisceau tubulaire parcourus intérieurement par l'eau de circulation, qui est prise à la mer, grâce' à une pompe de circulation qui aspire cette eau et la refoule à l'intérieur du faisceau tubulaire et de là elle retourne à la mer

#### **❖ Les principales fonctions de condenseur sont :**

- Assurer la condensation de la vapeur d'eau évacuer du corps BP de la turbine par la circulation de l'eau de mer de refroidissement (débit de  $2 \times 12000 \text{ m}^3/\text{h}$ ), dans les 14850 tubes en titane contenu dans le condensateur.
- Augmenter la chute d'enthalpie de la vapeur détendue en établissement une dépression atmosphérique afin d'améliorer le rendement.
- Dégazer le condensat et d'évacuer les incondensables en majorité l'air.
- Recevoir également le condensat des réchauffeurs BP.

### 3.5.2. Bâche alimentaire :

C'est un réservoir qui réserve l'eau en charge au cours de l'aspiration des pompes et assure le dégazage du condensat. Cette dernière joue le rôle d'un échangeur à mélange (Réchauffeur), l'eau est chauffée alors par le soutirage S4 du corps MP de la turbine. En condensant la vapeur qui est prélevée à la turbine.



**Fig.1.8.** Vue de bâche alimentaire de la centrale

### 3.5.3. Les Pompes :

➤ *Deux (02) pompes d'extraction :*

Ce sont des pompes centrifuges à 4 étages, leurs rôles est d'assurer le transfert d'eau du puits du condenseur jusqu'à la bâche alimentaire en passant par les trois réchauffeurs BP avec un débit nominale d'une pompe  $415\text{m}^3/\text{h}$ .

On trouve 2 pompes par groupe l'une en marche et l'autre en réserve en cas de panne, avec une tension de 6.3 KV et une puissance de 300KW

➤ *Trois (03) pompes alimentaires :*

L'eau d'alimentation est prise de la bâche alimentaire par des pompes d'alimentation, et refoulée vers la chaudière en passant par des réchauffeurs HP.

❖ **On distingue deux types de pompes :**

- **Pompes nourricières** : ce sont des pompes auxiliaires de type centrifuge à un étage, elles servent à augmenter la pression de l'eau d'alimentation de 4.9 bars à 11 bars avec un débit de  $261.6\text{ m}^3/\text{h}$ .

- **Pompes principales** : ce sont des pompes centrifuges radiales à 6 étages. Elles sont placées en aval des pompes nourricières, elles augmentent la pression de l'eau de 11 bars jusqu'à 177 bars.

Pour chaque groupe, on trouve trois pompes nourricières et trois pompes principales. Et chaque groupe de pompes d'eau d'alimentation est commandé par un moteur commun d'une tension de 6.3 KV et une puissance de 300KW [3].

➤ **Deux (02) pompes de circulation :**

Leur débit est 12000 m<sup>3</sup>/h chacune, est leur rôle sert à refouler l'eau de mer jusqu'au condenseur. Après traversée du condenseur, l'eau de réfrigération est rejetée vers le canal de rejet qui aboutit à la mer.

### 3.5.4. Réchauffeurs basses pression (BP) et haute pression (HP) :

❖ **Réchauffeurs basses pression (BP) :**

- Le rôle de ces trois (03) réchauffeurs est de réchauffer le condensât lors de son transfert vers la bache alimentaire. Ils sont alimentés par les trois (03) sous tirages (S1), (S2) et (S3) qui viennent du corps (BP) de la turbine.
- Les réchauffeurs utilisés sont des échangeurs de chaleurs à échange par surface. Ils sont positionnés horizontalement en tube (en forme U), et l'écoulement de condensât se fait en cascade, dans le côté tube circule le condensât principal et dans le côté enveloppe circule la vapeur, et la température dépasse les 100°C.



**Fig.1.9.** Vue de réchauffeur basse pression (BP).

**❖ Réchauffeurs haute pression (HP) :**

Ils sont de nombre de deux (02), leurs rôle est de réchauffer l'eau d'alimentation lors de son transfert dans la chaudière. Ils sont alimentés par les deux soutirages (S5) et (S6) provenant respectivement du corps Moyen pression (MP) et Haut pression (HP) de la turbine.

Les réchauffeurs utilisés sont des échangeurs de chaleurs à échange par surface. Ils sont positionnés verticalement avec tubes courbés en forme de serpent, dans le coté enveloppe circule la vapeur, et dans le coté tube circule l'eau d'alimentation (condensât) avec une pression de 160 bars et une température de 145 °C.

**3.6. Auxiliaires électrique :**

Les Auxiliaires électrique se situent à l'intérieur, deux bâtiments à 05 niveaux situés entre deux chaudières, on trouve :

- Niveaux 5,15 m : salle de câble.
- Niveaux 8,35 m : tableaux MT, BT.
- Niveaux 11,65 m : salle de câble.
- Niveaux 14,75 m : batteries, redresseurs et salle électrique.
- Niveaux 18,65 m : salle de commande.

**3.7. Transformateur principal d'évacuation d'énergie :**

Le courant électrique fournit par l'alternateur est une tension trop pour pouvoir être transporté par les lignes aériennes du transport haute tension.

Des transformateurs ont pour fonction d'élever cette tension jusqu'à 225 ou 338 KV ; C'est l'organe qui adapte la tension alternateur à la tension réseau pour pouvoir évacuer l'énergie produite vers le réseau national a travers des lignes aériennes [3].

Chaque alternateur est raccordé par des gaines à un transformateur élévateur de 15.5 KV a 220 KV d'une puissance de 220 MVA à traverse un disjoncteur coupleur.

Les transformateurs élévateurs ont un poids de 140 tonnes (sans les radiateurs) et leur réfrigération est assurée par une circulation forcée d'huile, la quelle est elle-même refroidie par l'air.



**Fig.1.10.** Transformateur principal

### **3.8. Station de filtrage et de pompage d'eau de mer :**

Trois conduites de 03 mètres de diamètres sont installées à une profondeur de 06 mètres de la surface de la terre avec une longueur de 900 mètres dans la mer, ce qui permet à l'eau de passer automatiquement vers le bassin par la différence de potentiel (de niveau).

Avant qu'elle soit aspirée, l'eau passe par deux niveaux de filtrage :

- Par des grilles à grappins pour empêcher le passage des grands corps.
- Par des tambours filtrants pour empêcher le passage des petits corps.

Le pompage s'effectue dans des puits situés après la station de filtrage, par trois groupes de pompes déferents pour les besoins de la centrale.

### **3.9. Station de dessalement et de déminéralisation d'eau de mer :**

#### **3.9.1. Dessalement d'eau de mer :**

La station de dessalement a pour rôle la production d'eau dessalée à partir de l'eau de mer.

Quatre unités de dessalement produisant 500 m<sup>3</sup>/jour chacune, assurent la production en eau dessalée, stockée dans deux bâches (2 x 2700 m<sup>3</sup>).

Type de l'installation : **Multi-flash** qui sert à vaporiser l'eau de mer pour lui enlever le sel puis la condensée pour obtenir de l'eau dessalée.

Trois produits chimiques sont injectés pour le traitement de l'eau qui est les suivants :

- **Le belgard EVN** : Inhibiteur d'incrustation utilisé pour éviter l'entartrage.
- **La belite (M33)**: Produit anti-mousse utilisé pour éviter la formation de la mousse au niveau des évaporateurs.
- **Le bissulfite de sodium (NA<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>)**: Produit permettant l'élimination du chlore dans l'eau pour diminuer la conductivité.

### 3.9.2. Déminéralisation :

Deux chaînes de déminéralisation de 40m<sup>3</sup>/h chacune parachèvent le traitement d'eau avant son utilisation dans le cycle. Le stockage d'eau déminéralisée se fait dans deux (02) réservoirs de 1500 m<sup>3</sup> Chacun. Pour être traité, des pompes de l'eau brute aspire l'eau dessalée de ces réservoirs et la refoule vers filtres à lits mélangé qui est constitué d'un mélange des échangeurs cationique fortement acides et les échangeurs anioniques fortement basiques

### 3.9.3. Electro chloration :

La chloration de l'eau de mer permet de préserver l'équipement traversé par l'eau de mer contre tout encrassement pouvant être causé par les micro-organismes marins.

Elle se fait par de l'hypochlorite de sodium, la production est assurée par une station d'électro chloration (par électrolyse de l'eau de mer d'une capacité de 150 kg/h de chlore actif).

- Pompes d'alimentation en eau de mer de refroidissement.
- Pompes d'alimentation en eau de mer pour les unités de dessalement.
- Pompes d'alimentation en eau de mer pour la station d'électro chloration.

## 4. Principe de fonctionnement de la centrale thermique de Ras-Djenet :

Avant d'écrire le fonctionnement de la central, il sera bon de rappeler les différentes transformations énergétique qui ont servi à la production de l'énergie électrique, dans une travaille suivant le **cycle de Rankine** (deux source énergétique l'une chaude (chaudière) et l'autre froide (condenseur) + un groupe turboalternateur).

### ❖ On gros on a trois transformations :

- Transformation de l'énergie contenue à l'état latent dans le combustible (énergie chimique) en énergie calorifique (vapeur) dans la chaudière.
- Transformation énergie calorifique (vapeur) en énergie mécanique (vitesse de rotation) la transformation se faite dans la turbine.
- Transformation énergie mécanique (vitesse de rotation) en énergie électrique la transformation se faite dans l'alternateur.

Le circuit eau vapeur est un circuit fermé dont le point de départ est le condenseur. On a deux pompes d'extraction qui est-on plein débit (chaque pompe assure 100% de la charge), ces pompes aspirent le condensât de condenseur a une pression de 0.04 bars et une température de 33° c, elle refoule l'eau vers les réchauffeurs de basse pression BPI, BP2 et BP3, ou l'augmentation de la température se fait comme la suit :

- 520 c à la sortie de réchauffeur BPI.
- 840 c à la sortie de réchauffeur BP2.
- 1130 c à la sortie de réchauffeur BP3.

L'eau arrivé a la bêche alimentaire a une température de 152° c et sa pression de 4.5 bars grâce au soutirage S6, au-dessous de la bêche se trouve trois pompes alimentaire qui assurent chacune d'elle un demi débit (50% de la charge). Ces pompes travaillent en paires, elles aspirent l'eau a 11 bars et le refoule un niveau de ballon chaudière à 177 bars a travers les réchauffeurs haute pression HP5 et HP6, et on constate que la température augmente comme suit :

- 2000 c à la sortie de réchauffeur HP5.
- 2460 c à la sortie de réchauffeur HP6.

L'eau chaude comprimé arrive au ballon chaudière, elle traverse les parois tubulaires qui tapissent la chambre de combustion ou elle se ramène jusqu'à la température d'ébullition et même jusqu'à la température de vaporisation, la moitié supérieure du ballon chaudière contient de la vapeur saturée celle-ci est dirigée sur les trois surchauffeurs, ou elle va augmenter en température jusqu'à 540°C, et la pression reste presque a 140 bars, la vapeur sur, arrive au corps haute pression HP de la turbine, ou elle détente jusqu'à 40 bars, et sa température diminue jusqu'à 357°C, puis elle renvoyer a la chaudière ou se trouvent les resurchauffeurs, ou elle réchauffe pour atteindre les 540°C, et par la suit envoyer a la turbine pour attaquer le cors moyenne (MP). Ces derniers sont en double flux, pour but de faire détendre le maximum possible la pression de vapeur.

Le passage de la vapeur dans ces trois favorise la formation du travail moteur, qui définit l'énergie mécanique produit par la turbine.

Dans le corps HP la vapeur se détente le maximum possible et sa s'écouler dans le condenseur qui se trouve à 0.04 bars de pression grâce aux quatre éjecteurs qui aspirent l'air pour créer le vide dans le condenseur.

**5. Conclusion :**

Dans ce chapitre, une présentation succincte de la centrale thermique de RAS-DJENET est donnée à sa structure en passant par les différents compartiments qui la compose ainsi que les machines indispensable au bon fonctionnement de cette centrale.

# CHAPITRE 2 :

*Maintenance et*

*Analyse vibratoire*

## 1. Introduction :

Le monde industriel et le monde des transports disposent de machine et d'installation de plus en plus performantes et complexes. Les exigences de haute sécurité, la réduction des couts d'exploitation et la maitrise de la disponibilité des équipements donnent à la maintenance des systèmes, un rôle prépondérant. Elle doit permettre de n'intervenir qu'en présence d'éléments défectueux, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements. Nous nous intéressons principalement aux transmissions des puissances mécaniques utilisées dans différents domaines tel que l'industrie : l'aéronautique, l'automobile et les transports ferroviaires. La maintenance de ces systèmes de transmission occupe un temps relativement important par rapport à leur temps d'utilisation, actuellement la recherche scientifique vise à développer les outils nécessaires à l'optimisation de la maintenance de tels systèmes.

Dans ce chapitre, nous introduisons l'approche de maintenance, nous donnons les différents types de maintenance et présentons les causes de défaillances. Un rappel sur l'analyse vibratoire des machines tournantes est également donné.

## 2. Maintenance :

La norme AFNOR NF X 60 010 [AFNOR, 2002] définit la maintenance par l'expression suivante : «La maintenance constitue 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 qui lui permet d'accomplir la fonction requise ». La maintenance vise la conservation de l'état préalablement défini (le bon état) mais permet aussi la reconstitution et l'amélioration. L'entretien peut être vu comme une condition nécessaire mais insuffisante de la maintenance. Les objectifs de la maintenance se résument comme suit :

- Réduire le nombre d'arrêts sur casse ;
- Fiabiliser l'outil de production ;
- Augmenter son taux de disponibilité ;
- Dépanner rapidement les équipements.
- Améliorer la sécurité du travail, etc.

### 2.1. But de la maintenance :

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

#### 2.1.1. Objectifs financiers :

- Réduire au minimum les dépenses de maintenance.
- Assurer le service de maintenance dans les limites d'un budget.

**2.1.2. 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.

**2.2. Types de la maintenance :**

Nous distinguons plusieurs types de maintenance :

**2.2.1. Maintenance préventive :**

«C'est une maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien» [AFNOR, 2002].

Cette maintenance vise la prédiction de la date à laquelle une action de maintenance doit s'effectuer en se référant à un modèle de dégradation théorique des composants mécaniques de la machine. La maintenance prévisionnelle part des informations recueillies à partir de la surveillance de l'état du matériel et de la conduite d'analyses périodiques dans le but de déterminer l'évolution de la dégradation du matériel et la période d'intervention.

La maintenance préventive peut être systématique, conditionnelle ou prévisionnelle.

**a. La maintenance préventive systématique :**

Définition d'après la Norme NF X 60010« Maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage ».

Généralement, la maintenance préventive s'adresse aux éléments dont le coût des pannes est élevé, mais ne revenant pas trop cher en changement (les meilleurs exemples sont le changement systématique de l'huile, changement de la courroie de synchronisation,...)

**b. La maintenance préventive conditionnelle :**

«C'est une maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent» [AFNOR, 2002].

**c. Maintenance prévisionnelle :**

Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien (EN 13306).

### 2.2.2. Maintenance Corrective :

La maintenance corrective est définie par la norme AFNOR comme [AFNOR, 2002]:

«C'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». L'intervention, étant curative, se fait après l'apparition de la défaillance.

Les opérations de maintenance corrective sont essentiellement : le dépannage, la réparation, et la réparation.

### 3. Techniques d'analyse :

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance, il existe différentes techniques d'analyse tels que l'analyse vibratoire, l'émission acoustique, la thermographie, l'analyse des huiles et des lubrifiants, la variation de résistance dans un circuit électrique, etc....

Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts, on établit une courbe d'évolution de l'indicateur au cours du temps. Sur cette courbe, on définit différents seuils correspondant à un niveau d'alerte, à une alarme, à un niveau de défaillance, ces niveaux sont établis soit par expérience soit en appliquant une norme pour les roulements, on utilise des abaques de sévérité vibratoire pour définir les différents seuils

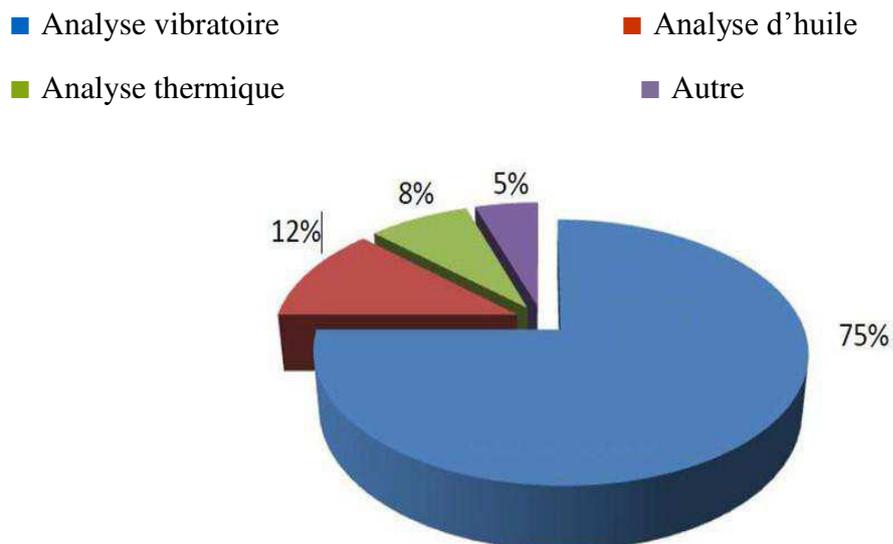


Fig.2. 1. Technique d'analyse

### 3.1. L'analyse d'huile :

Le lubrifiant (huile) est comparable au sang de la machine, il reflète le comportement et l'état du système dans lequel il circule.

Le suivi de ces caractéristiques physico-chimique permet d'apprécier l'état de dégradation de l'huile et de connaître son aptitude à remplir totalement ses fonctions initiales de lubrification. L'évolution de cette dégradation peut être un indicateur de condition d'exploitation de l'équipement. Elle va permettre d'optimiser les fréquences de vidanges dans le cas de quantité importante, le suivi de la contamination permet :

- De situer l'organe défectueux, d'apprécier l'évolution et le type d'usure dans le cas d'une pollution par des particules internes.
- D'apprécier la nature et l'origine des agents extérieurs.

On prend comme référence les caractéristiques de l'huile neuve et on compare les résultats obtenue a chaque analyse, si l'on constate une évolution brutale des caractéristiques ou si l'on atteint des valeurs très éloignées des valeurs initiales, il faut soit intervenir au niveau du matériel ou remplacer l'huile

### 3.2. Thermographie infrarouge :

Le contrôle par thermographie a pour objet de détecter et de localiser les variations de température en surface. Une caméra infrarouge associée à un logiciel de traitement d'image, permet d'obtenir une image en 2 dimensions, appelée thermo-gramme, de la zone contrôlée. La couleur de chaque pixel de l'image peut être reliée à la température en chaque point de l'objet, en faisant des hypothèses sur la valeur d'émissivité de la surface.

La thermographie est utilisée lors des opérations de maintenance sur site pétrochimique notamment pour le contrôle :

- de l'état des calorifuges et frigorifuges d'équipement fonctionnant hors température normale,
- de l'état des matériaux réfractaires utilisés sur les fours, cheminés et le gunitage de réacteurs,
- de niveaux dans les réservoirs.

La thermographie est bien adaptée à la détection des points chauds (surchauffe, température, anormale) sur les machines tournantes et les armoires électriques. Il est également envisageable de surveiller un processus comme le soudage, le remplissage d'un moule.



**Fig.2. 2.** Exemple de la thermographie infrarouge

### 3.3. Analyse vibratoire :

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

La mesure d'une vibration transmise par la structure d'une machine sous l'effet d'efforts dynamiques sera fonction de multiples paramètres

- Caractéristiques de fixation de la machine sur le sol qui oppose des réactions aux vibrations et modifie l'intensité
- Position et fixation du capteur sur la machine
- Caractéristiques du capteur.
- Pré-amplification et transmission du signal.
- Vitesse de rotation et puissance absorbée.
- Etat des liaisons de la chaîne cinématique (alignement, balourd, engrenages, roulements etc.).

### 3.3.1. 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.

#### 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

## 4. Définition d'une vibration :

La norme ISO 2041 « Vibrations et chocs - Vocabulaire (Août 1990) » définit la notion de vibration : Variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du Mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement Plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence. En fait, un corps Est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position D'équilibre ou de référence. Les textes de normalisation AFNOR relatifs aux vibrations sont : NF E 90-001, NF E 90 002.

## 5. Caractéristiques d'une vibration :

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

### 5.1. 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 = 1cycle/seconde.

### 5.2. Les unités

Si l'unité normalisée (unité SI) de la fréquence est le Hertz (Hz), beaucoup d'utilisateurs, notamment parmi les mécaniciens, préfèrent exprimer les valeurs en CPM (nombre de cycles par minute) ou encore en RPM (nombre de rotations ou révolutions par minute).

$$1\text{Hz} = 1 \text{ CPM} / 60 = 1 \text{ RPM} / 60$$

Notons que l'utilisation de RPM n'a pas de sens dans le cas de phénomènes de type aléatoire (cavitation d'une pompe ou défaut de lubrification d'un palier à roulement) et peut même être source de confusion (cas d'un défaut des courroies, où l'on ne sait plus s'il s'agit de la fréquence de rotation de la poulie menant, ou menée ou de la fréquence de passage des courroies). Il est intéressant parfois d'exprimer des phénomènes liés à la rotation en multiple ou ordre de cette fréquence. Cette formulation présente l'intérêt de lier le phénomène vibratoire à une fréquence de référence (souvent la fréquence de rotation de la ligne d'arbres qui l'induit) et de pouvoir suivre l'amplitude de ses harmoniques (harmonique = composante dont la fréquence est un multiple d'une fréquence donnée), ce qui est très intéressant dans le cas de la surveillance de comportement vibratoire d'installations à vitesse de rotation variable.

### 5.3. 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 (**A<sub>c</sub>**) ou niveau crête.
- L'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête (**A<sub>cc</sub>**) (*peak to peak*, en anglais) ou niveau crête-crête.
- L'amplitude efficace (**A<sub>eff</sub>**), aussi appelée **RMS** (*Root Mean Square*) ou niveau efficace

## 6. Différentes formes de vibration :

### 6.1. Vibrations harmoniques :

Une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme amplitude-temps est représenté par une sinusoïde.

Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle qui est générée par le balourd d'un rotor en mouvement.

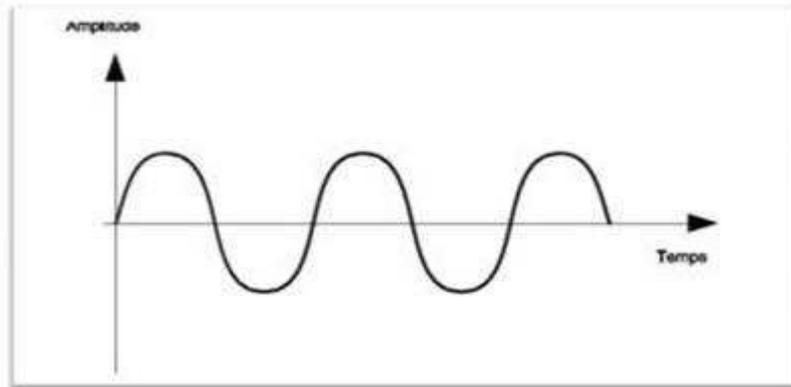


Fig.2. 3. Vibration harmonique

$$X(t) = X \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

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

$f$  = fréquence du mouvement

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

### 6.2. Vibrations périodiques :

Une vibration périodique est telle qu'elle se reproduit exactement après un certain temps appelé période. Une telle vibration est créée par une excitation elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines

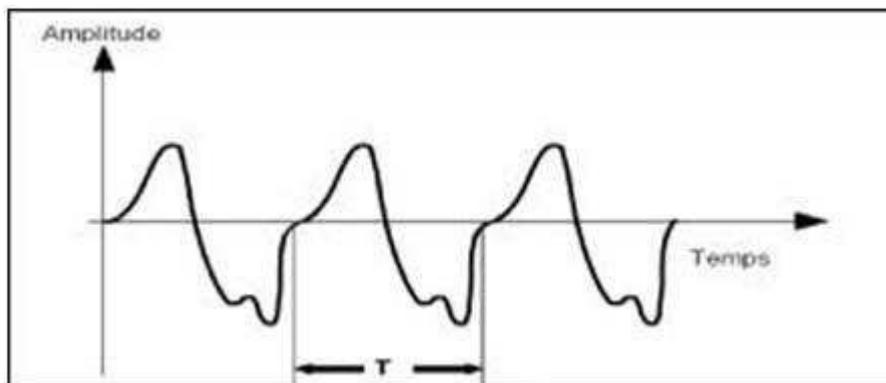


Fig.2. 4. Vibration périodique

$$X(t) = \sum_{i=1}^n [X_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)] \quad (2.2)$$

### 6.3. Vibrations apériodique :

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

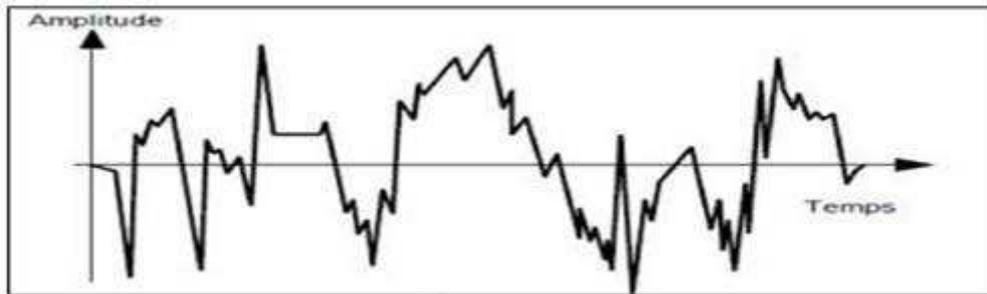


Fig.2. 5. Vibration apériodique

$$X(t) = \sum_{i=1}^{\infty} [X_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)] \quad (2.3)$$

En fonction série fourrier en peut décomposée signaux périodique et les signaux apériodique à sous signaux harmonique pour résoudre l'équation de mouvement.

## 7. Application des vibrations :

Les vibrations sont mesurées à des fins très diverses. En général, toute vibration non contrôlée est un phénomène indésirable qui augmente le bruit ou cause des défaillances mécaniques prématurées.

Quatre grands domaines de mesure vibratoire peuvent définis.

### 7.1. Analyse structurelle :

Il s'agit d'une méthode expérimentale performante se basant sur les mesures des vibrations pour déterminer le comportement dynamique d'une structure, allant des petites pales de turbine aux grands ponts. En utilisant un capteur de force et un accéléromètre, le signal d'excitation et la réponse vibratoire de la structure sont mesurés simultanément à l'aide d'un analyseur bi canal ou multivoie.

### 7.2. Test de vibration :

Pour valider la tenue réelle d'un produit à l'environnement et donc sa conception, le test de vibration est pratiqué en soumettant une structure (une caisse automobile par exemple) à de hauts niveaux vibratoires avec un exciteur vibratoire. Le niveau de vibrations est maintenu constant dans des gammes de fréquence définies. Les informations sur la réponse fréquentielle de la structure sont obtenues.

### 7.3. Surveillance de l'état des machines et diagnostic des défauts :

Dans sa forme la plus simple, une mesure du niveau global de vibration d'une machine est utilisée afin de signaler tout problème imminent. En effet, les forces internes d'une machine se caractérisent par des niveaux plus ou moins importants suivant son état (déséquilibre par exemple). Cependant, de plus amples informations sont souvent requises pour une détection fiable et précoce d'un grand nombre de défauts : Signatures fréquentielles de base et avancées. Cette technique (décrite plus loin) consiste en la mesure du spectre fréquentiel caractéristique des vibrations d'une machine en bon état, et de la Surveillance de tout changement concernant les composantes spectrales. De tels changements sont le reflet d'une modification tant des éléments tournants que de la structure, et permettent le diagnostic de défauts.

## 8. Les différentes représentations du signal :

Si on décrit mathématiquement un signal sinusoïdal, nous obtenons :

$$X(t) = X \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (2.4)$$

### 8.1. Représentation temporelle :

C'est une représentation en amplitude fonction temps

L'amplitude du signal vibratoire est représentée en fonction du temps. La figure montre un exemple de cette représentation pour un signal sinusoïdal.

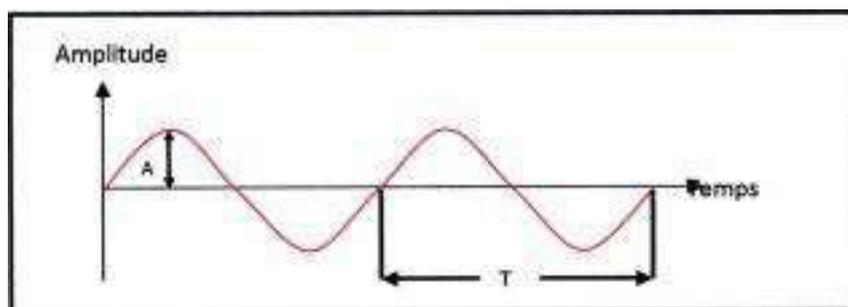


Fig.2. 6. Représentation temporelle

### 8.2. Représentation spectrale (ou fréquentielle) :

Le spectre est le concept fondamental de l'analyse en fréquence. C'est la représentation d'un signal dont l'amplitude ne serait plus donnée en fonction du temps mais en fonction de sa fréquence.

Si l'on décrit mathématiquement un signal sinusoïdal, nous obtenons :

$$a(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (2.5)$$

Où :

Variable  $a(t)$  : c'est la valeur instantanée de la grandeur considérée.

Module  $A$  : est l'amplitude maxi du signal

Période  $T$  : c'est l'intervalle de temps au bout duquel la variable  $x(t)$  reprend la même valeur dans la même direction.

Fréquence  $f$  : c'est le nombre de périodes par unité de temps

$$f = 1/T \quad (\text{Hz})$$

$\omega$  : la pulsation ( $\omega = 2\pi f$ ) (rd/s)

$\varphi$  : La phase à l'instant  $t = 0$ .

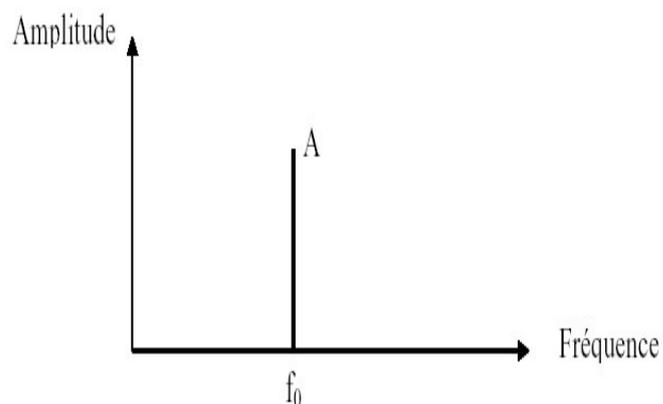
Pour décrire complètement ce signal, il suffit de connaître :

$A$  : Amplitude maxi du signal ;

$f$  : Fréquence du signal ;

$\varphi$  : Phase.

Phase  $\varphi$  : elle est représentative du temps qui s'écoule entre une référence que l'on se donne et l'instant que l'on considère. Elle est exprimée en unité d'angle.



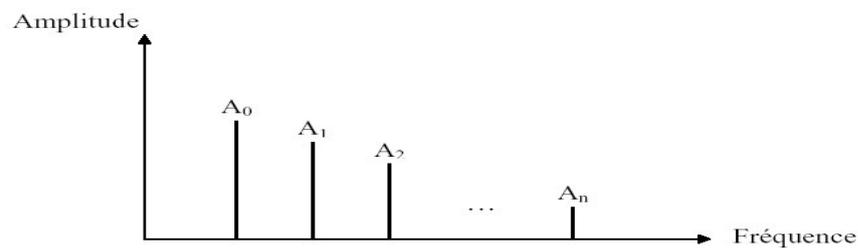
**Fig.2. 7.** Représentation spectrale

### 8.3 Représentation d'un signal quelconque :

Un signal quelconque  $A(t)$  peut toujours être considéré comme la somme de Signaux sinusoïdaux :

$$A(t) = A_0 \cos(\omega_0 + \varphi_0) + A_1 \cos(\omega_1 + \varphi_1) + \dots + A_n \cos(\omega_n + \varphi_n) \quad (2.6)$$

La représentation temporelle de ce signal est souvent complexe et devient vite Inextricable. Seule la représentation spectrale convient dans ce cas



**Fig.2. 8.** Représentation d'un signal quelconque

## 9. Origine des vibrations :

### 9.1. Vibration des machines voisines :

Le sol et les socles de fixation peuvent transmettre les vibrations d'une machine à l'autre. Si l'on arrête la machine voisine mise en cause, le pic spectral disparaît.

### 9.2. Vibration d'origine électrique :

Les vibrations des parties métalliques du stator et du rotor sous l'excitation de champs électromagnétiques produisent des pics à des fréquences égales à celle du secteur et à ses harmoniques, l'augmentation de ces pics peut être le signe de la dégradation du moteur.

### 9.3. Résonance de la structure ou du rotor :

Chaque sous ensemble de la machine possède une fréquence propre de résonance qui est fonction de paramètres multiples tels que la rigidité, la masse, la forme géométrique. Si une excitation quelconque possède une fréquence voisine de celle de la résonance, un pic apparaît dans le spectre.

## 10. Principale activité de l'analyse vibratoire :

### 10.1. La surveillance :

Le but est de suivre l'évolution d'une machine par comparaison des relevés successifs de ses vibrations. Une tendance à la hausse de certains indicateurs par rapport à des valeurs de référence constituant la signature alerte généralement le technicien sur un dysfonctionnement probable.

### 10.2. Le diagnostic :

Il met en œuvre des outils mathématiquement plus élaborés. Il permet de désigner l'élément de la machine défectueux suite à une évolution anormale des vibrations constatée lors de la surveillance.

Le diagnostic n'est réalisé que lorsque la surveillance a permis de détecter une anomalie ou une évolution dangereuse du signal vibratoire.

## 11. Mesure pratique d'une vibration :

### 11.1. Chaîne de mesure vibratoire :

Il existe deux type de surveillance vibratoire, online donc les capteurs sont installés à demeure sur la machine et off line dans ce cas le mesure se fait manuellement avec le capteur.

#### 11.1.1. Les capteurs de détection de vibration :

##### 11.1.1.1. Capteur de déplacement :

Aujourd'hui, le proximètre le plus utilisé pour la surveillance de machines est le capteur inductif à courants de Foucault. Ce capteur, représenté en figure 2.9, est relié à un émetteur-démodulateur-conditionneur.

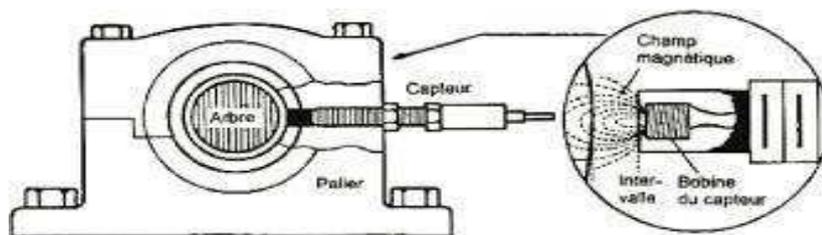


Fig.2. 9. Proximètre

##### 11.1.1.2. Capteur de vitesse :

Les capteurs de vitesse ou vélocimètres sont constitués d'une sonde à contact dite **sonde sismique** qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. Ce type de capteur présente l'avantage de ne nécessiter ni source d'alimentation ni préamplificateur.

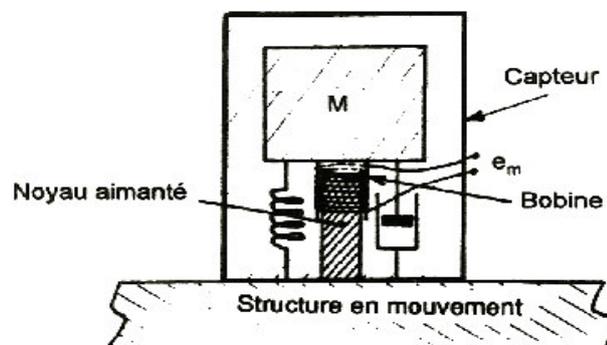


Fig.2. 10. Vélocimètre

### 11.1.1.3. Capteur d'accélération :

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibrations absolues les plus utilisés pour la surveillance des machines tournantes. Leur principe de fonctionnement repose sur la propriété des matériaux piézoélectriques de générer une charge électrique proportionnelle à la contrainte de compression ou de cisaillement subie.

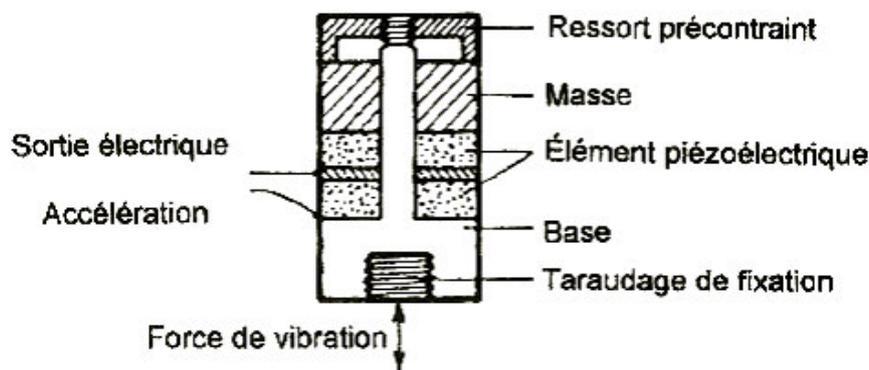


Fig.2. 11. Accéléromètre

### 11.1.2. Analyseur portatif de vibration :

L'analyseur portatif de vibration incorpore un microprocesseur qui lui permet de convertir le signal électrique mathématiquement en accélération par temps d'unité, d'exécuter un FFT, et de stocker les données. Il peut être programmé pour produire des alarmes et des affichages des données.

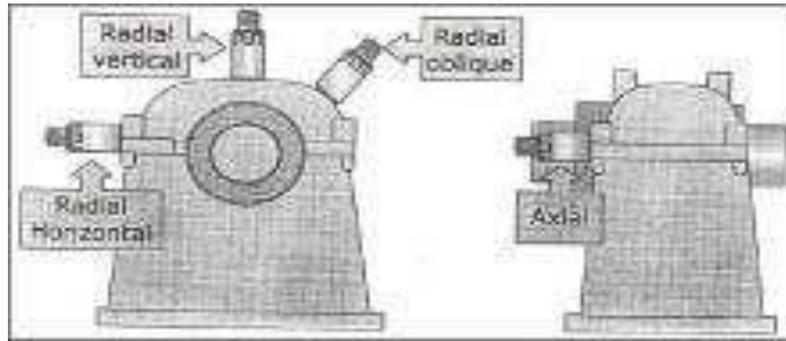
Les données stockées par l'analyseur peuvent être téléchargées à un ordinateur personnel ou plus puissant pour exécuter des analyses, un stockage et une récupération de données, et une production d'états plus sophistiqués.

## 11.2. Les points de mesurages :

La plupart des vibrations de machine 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 fixations, 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.



**Fig.2. 12.** Les points de mesurage

Les mesures peuvent se faire :

- Dans un plan radial (vertical : V, horizontal : H, oblique : O)
- Dans un plan axial (axial : A)

La transmission de ces vibrations dépendra de plusieurs paramètres aux quels il faudra adapter la mode de mesurage.

- Paliers a 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 a film fluide : la transmission des vibrations aux paliers est mauvaise.

Cette technique est plus délicate car l'implantation des capteurs ainsi que la préparation de leur piste de mesure doivent être prévues le constructeur de la machine.

- Le mesurage sur les fixations présente en maintenance un intérêt moindre mais trouve son application lorsque la machine perturbe son environnement.

**12. Conclusion :**

Les vibrations sont le résultat de forces dynamiques à l'intérieur des machines qui comprennent des éléments roulants et à l'intérieur des structures qui sont connectées à la machine.

Toutes ces théories ont une importance capitale dans le domaine de l'analyse vibratoire et le diagnostic des défauts :

- Etablir une analyse de maintenance conditionnelle.
- Soir les modes de vibration.
- Surveillance et diagnostiqué le défaut à l'aide des moyennes de détection de défaut.
- Voir les seuils d'alarme d'après les normes de vibration, et les différents défauts de vibration des machines tournantes.

# CHAPITRE 3 :

*Principaux défauts*

*des machines*

*Tournantes*

## Introduction :

Les défauts vibratoires des machines tournantes sont tellement complexes, qu'il est très difficile de faire un diagnostic sans connaître les symptômes vibratoires associés à chaque défaut (images vibratoires induites par ces défauts). Ainsi, pour maîtriser les pannes, il faut savoir les identifier et mesurer leur incidence. Il convient ensuite de les analyser et rechercher sur un effet constaté, la cause initiale d'une défaillance.

### 1. Défaut de balourd :

Un rotor est parfaitement équilibré si son axe principal d'inertie se confond avec son axe de rotation. Dans les autres cas, l'équilibre du rotor est affecté d'un balourd, il est donc impossible qu'il soit parfaitement équilibré et il existe donc toujours une vibration à la fréquence de rotation dont l'amplitude est directement proportionnelle à l'importance du balourd et au carré de la vitesse de rotation.

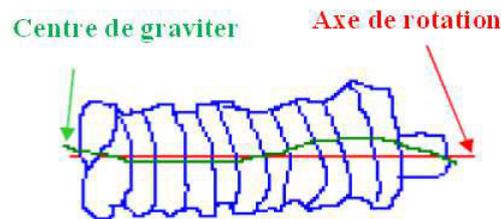


Fig.3.1. défaut de balourd

Une modification brusque de l'amplitude correspond systématiquement à une modification du balourd dont l'origine peut-être une rupture ou la déformation d'une partie de rotor, si cette modification d'amplitude est plus lente, il peut s'agir d'une usure ou d'un encrassement de la partie tournante. Le phénomène se caractérise par une vibration radiale importante à la fréquence de rotation. Le meilleur outil pour la détection de défaut est l'utilisation de l'analyse vibratoire (analyse spectral), l'utilisation d'un capteur de proximité (capteur à courant de Foucault) ou un accéléromètre avec intégrateur de signal, on prend deux mesures radiales déphasées de 90°. L'apparition de défaut sera caractérisée par une vibration du rotor due à la création d'une force centrifuge.

$$F = m_b \omega^2 r_b \quad [\text{N}] \quad (3.1)$$

Avec :

$m_b$ : Masse théorique du balourd [KG]

$r_b$  : Rayon théorique du balourd [m]

$\omega$  : Pulsation ou vitesse angulaire [rad/s]

$F$  : Force centrifuge [N]

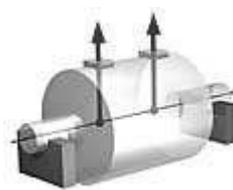
Suivant la répartition du balourd sur le long du rotor, on distingue trois types de balourd.

### 1.1. Types des balourds :

#### 1.1.1. Balourd d'origine mécanique :

##### 1.1.1.1. Balourd statique

Deux balourds (représentés ici par des flèches) peuvent avoir même importance, même position angulaire et même distance du centre de gravité. On obtiendrait la même situation avec un seul balourd deux fois plus grand agissant dans le centre de gravité situé, dans l'exemple, au milieu du rotor.

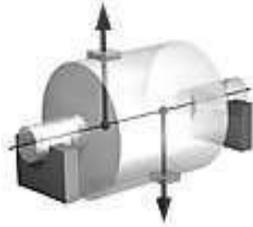


**Fig.3.2.** balourd statique

Si l'on pose un tel rotor sur deux couteaux, il oscillerait jusqu'à ce que le « point lourd » se situe en bas. C'est pourquoi on appelle ce balourd agissant aussi sans rotation, « balourd statique ». Cela provoque un déplacement du point central des masses par rapport au milieu géométrique et fait vibrer le rotor en fonctionnement parallèlement à son axe de rotation. Un balourd statique est compensé de préférence dans le plan du centre de gravité. Pour cela, on enlève de la matière au « point lourd » ou on en ajoute à l'opposé. La correction du balourd statique en un seul plan concerne principalement les rotors en forme de disque. Pour de tels équilibrages, les machines à équilibrer verticales sont les mieux adaptées.

### 1.1.1.2. Balourd couple :

Deux balourds (représentés ici par des flèches) peuvent certes avoir la même valeur, mais être décalés exactement de  $180^\circ$  l'un par rapport à l'autre dans leur position angulaire.



**Fig.3.3.** balourd couple

Cette répartition du balourd ne peut plus être détectée par oscillation, le rotor au repos n'ayant plus de position préférentielle. Le rotor en rotation entraîne un mouvement de « culbute » autour de son axe giratoire (perpendiculaire à l'axe de rotation), car les deux balourds exercent un couple. Ce type de répartition de balourd est appelé couple de balourd. Pour corriger le couple de balourd, il est nécessaire d'avoir un couple contraire, c'est-à-dire deux balourds correcteurs de même valeur décalés de  $180^\circ$  correspondant au balourd d'origine, et placés dans les deux plans de correction. Il faut prendre en considération les couples de balourd surtout dans le cas de rotors en forme de cylindre allongé. Les machines à équilibrer horizontales conviennent particulièrement bien dans ces cas de figure.

### 1.1.1.3. Balourd dynamique :

Dans la réalité, le rotor ne possède pas qu'un seul balourd, mais en théorie une multitude répartie arbitrairement le long de l'axe de rotation.



**Fig.3.4.** balourd dynamique

On y remédie par deux balourds résultants (représentés ici par des flèches) placés dans deux plans quelconques et ayant en général des valeurs et des positions angulaires différentes. L'état de ce balourd ne pouvant être constaté vraiment qu'en rotation, on parle de balourd dynamique.

Il se décompose en un balourd statique et un couple de balourd, l'une ou l'autre composante pouvant prédominer. Deux plans de compensation sont nécessaires pour corriger complètement un balourd dynamique. Presque tous les rotors ont un balourd dynamique. Les machines à équilibrer horizontales et verticales conviennent pour de tels cas.

### **1.1.2. Balourd d'origine thermique :**

#### **1.1.2.1. Déformation des rotors de turbine :**

Lorsque les rotors ne sont pas homogènes, ou lorsque la température n'est pas répartie de façon uniforme, les rotors se déforment sous l'effet de contraintes thermiques. S'ils se déforment de façon dissymétrique, les centres de gravité se déplacent et les efforts varient. Le critère de diagnostic repose alors sur la corrélation entre les variations de température et l'évolution des vibrations. La rapidité de l'évolution renseignera sur l'origine du défaut.

#### **1.1.2.2. Déformation des rotors d'alternateurs ou de moteurs électriques :**

Comme précédemment, une non-homogénéité du rotor peut induire des déformations. En raison de l'énergie importante dissipée par effet Joule ou par hystérésis, il est nécessaire de refroidir les rotors. Toute dissymétrie de débit (canaux de ventilation bouchés ou pertes de charge différentes) se traduira lors d'une variation de puissance par une variation des vibrations. Les vibrations sont alors fonction de l'échauffement qui dépend de l'intensité du courant dans le rotor, mais aussi de la température du fluide de refroidissement, ou de sa pression. Un effet similaire peut être obtenu en cas de court-circuit entre spires, provoquant une dissymétrie d'échauffement. Il faut, pour trouver l'origine de cette déformation, compléter les informations précédentes par des mesures électriques (isolement, résistance interne ou courants).

#### **1.1.2.3. Glissement et dilatation contrariée des bobinages de machines électriques :**

Si un obstacle s'oppose à la dilatation d'une barre, ou si les forces de frottement deviennent élevées, la dilatation du bobinage ne peut plus se faire librement et le rotor se tord. On observe alors dans ce cas une évolution du niveau vibratoire.

### **1.1.3. Balourd évolutif :**

Si au passage par un orifice (palier, joint d'étanchéité par exemple) l'arbre s'échauffe de manière dissymétrique, soit parce qu'il frotte, soit parce que le brassage d'huile provoque un échauffement plus intense d'un côté de l'arbre que de l'autre si de plus.

La déformation de l'arbre qui résulte de cet échauffement déplace à son tour le point chaud (vibration maximum décalée par rapport au point chaud qui lui donne naissance), alors, toutes les conditions sont réunies pour amorcer un phénomène de variations cycliques du déséquilibre.

La mise en équation du mouvement montre que la trajectoire du vecteur représentant la vibration à la fréquence de rotation  $F_r$  est une spirale amortie ou divergente selon la position des vitesses critiques, ou plus exactement selon la valeur de l'angle que fait la vibration (déplacement) avec la force qui lui donne naissance (balourd créé par l'échauffement).

Le décalage du point d'échauffement s'explique parce qu'il y a déphasage entre la déformation et la force qui la crée. Ce déphasage est celui qui existe par exemple entre un balourd et la vibration qu'il induit :

- il est nul à basse vitesse ;
- il est égal à  $\pi/2$  à la vitesse critique
- il est égal à  $\pi$  aux vitesses élevées

#### **1.4. Ambiguïtés de diagnostic :**

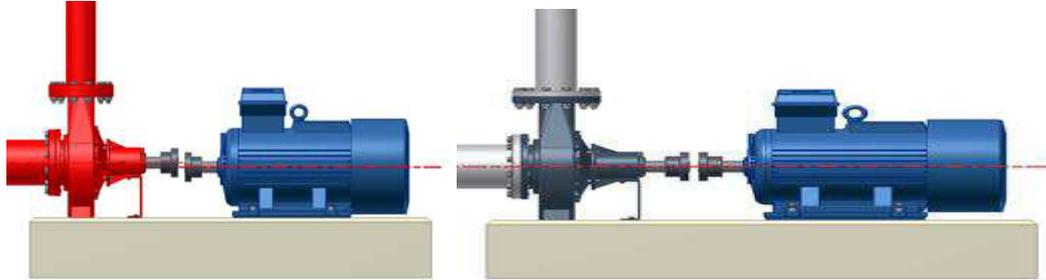
D'autres phénomènes sont susceptibles de générer de l'énergie à la fréquence de rotation  $F_0$  sans pour autant être liés à un déséquilibre de masse :

- Jeux de paliers trop importants
- Chocs périodiques à la rotation (problème de fixation)
- Défaut rotorique sur un moteur asynchrone (barres, anneau)
- Déformation d'un rotor (effet thermique)
- Résonance de structure

Les problèmes vibratoires engendrés par ce type de défaut ne seront donc pas corrigés par l'équilibrage de la machine.

## 2. Défaut d'alignement :

Le défaut d'alignement est l'écart de position relative de l'arbre par rapport à l'axe colinéaire de rotation lorsque la machine tourne dans des conditions normales de fonctionnement.

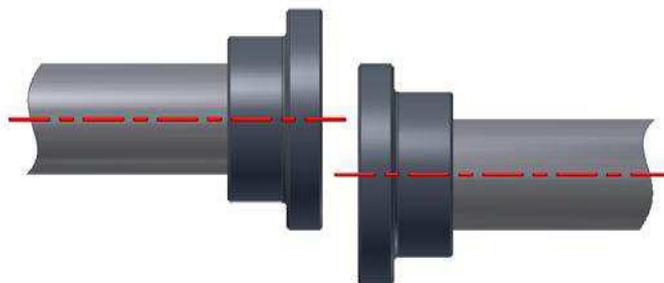


**Fig.3.5.** défauts d'alignement d'arbres

### 2.1. Les types de désalignement :

#### 2.1.1. Désalignement radial :

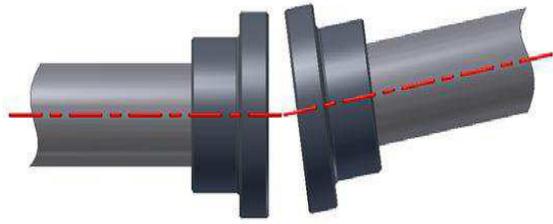
Un défaut d'alignement est révélé par un pic d'amplitude prépondérante généralement 2 fois la fréquence de rotation (parfois 3 ou 4 fois). Il apparaît une vibration dans la direction radiale de composante d'ordre 2 de la fréquence de rotation (rarement d'ordre 3, voire exceptionnellement d'ordre 4), avec des amplitudes supérieures aux composantes d'ordre 1.



**Fig.3.6.** déalignement parallèle

#### 2.1.2. Désalignement angulaire :

Il apparaît une vibration axiale de composante d'ordres 1, 2, 3 ou 4 de la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles des composantes radiales correspondantes



**Fig.3.7.** déalignement angulaire

### 2.3. Ambiguïtés de diagnostic :

Le défaut de lignage peut n'apparaître qu'en fonctionnement, sous l'effet de la charge. Les causes peuvent être :

- Déformation du stator
- Efforts dissymétriques sur le rotor
- Calage du rotor (machine à paliers lisses)
- Déformation de la structure porteuse
- Blocage d'accouplement

D'autres phénomènes peuvent donner lieu à des manifestations vibratoires similaires :

- Balourd important
- Chocs périodiques à la fréquence de rotation

### 3. Défauts de courroies :

Les courroies sont utilisées pour transmettre la puissance entre deux arbres dont la distance n'est pas trop importante. Une courroie, constituée par une bande sans fin passant sur deux poulies, transmet l'énergie grâce à son adhérence sur les poulies.

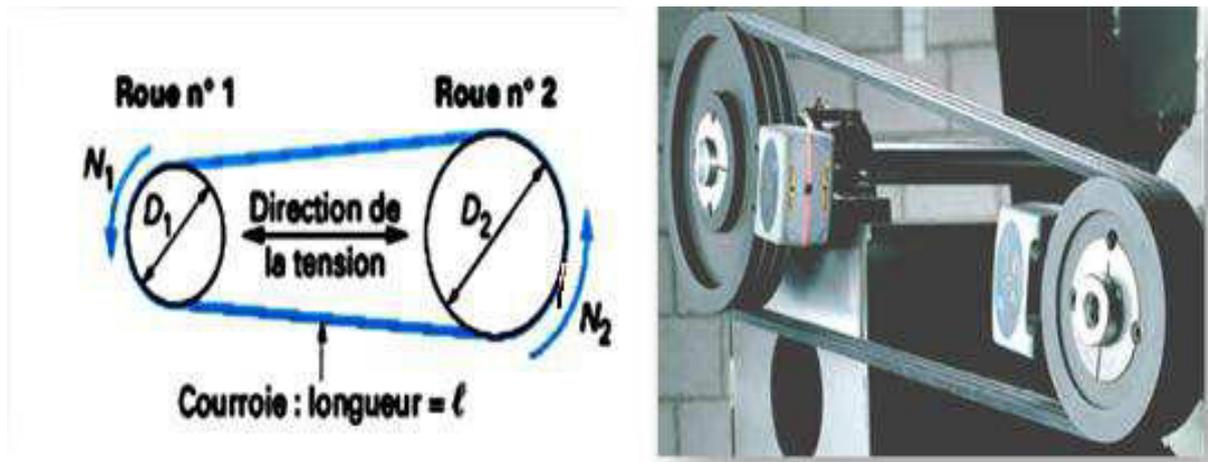


Fig.3.8. Transmission par courroie

### 3.1. Les fréquences caractéristiques des défauts de courroies :

Le principal défaut rencontré sur ce type de transmission est lié à une détérioration localisée d'une courroie : partie arrachée, défaut de jointure, la fréquence de passage

$F_c$  De ce défaut définie par :

$$F_c = \frac{\pi D_1}{L} f_1 = \frac{\pi D_2}{L} f_2 \quad (3.2)$$

$F_c$ : Fréquence de passage de la courroie.

$D_1$  Et  $D_2$ : diamètres des poulies 1 et 2.

$f_1$  Et  $f_2$ : fréquences de rotation des poulies 1 et 2.

$L$  : la longueur de la courroie.

### 3.2. Fonctionnement des courroies :

Les courroies sont des organes de transmission, au même titre que les engrenages ou les chaînes à rouleaux. Leur rôle est de transmettre la puissance d'un organe tournant à un autre, c'est-à-dire le produit d'un effort par une vitesse ou un couple. Le principe de fonctionnement des courroies repose sur deux éléments principaux :

- une surface de contact, dont l'importance est fonction de son coefficient de frottement, permettant de prélever le couple de la poulie motrice, de le transmettre à l'armature de traction et, ensuite, de le restituer aux poulies réceptrices de la transmission,

- une armature, capable de transformer l'effort tangentiel prélevé sur la poulie motrice en un effort longitudinal de traction entre les poulies.

La combinaison de ces deux éléments caractérise l'effort transmissible, celui-ci étant directement lié à l'absence de glissement du premier et à la résistance à la traction du second. C'est pourquoi, actuellement, ces éléments sont le plus souvent constitués, d'une part, d'un élastomère et d'autre part, de fibres synthétiques.

### **3.3. Avantages des transmissions par courroies :**

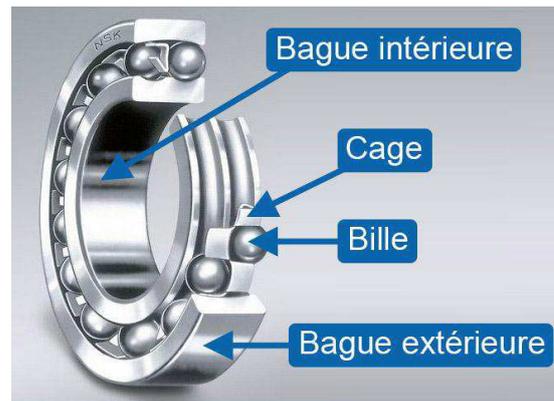
Bien qu'organe mécanique, la courroie permet, en raison de sa souplesse, une certaine imprécision de réalisation qui évite d'avoir recours à des solutions très sophistiquées, donc beaucoup plus coûteuses. Mais si la courroie est la solution la moins chère pour une transmission (absence de lubrification), elle est aussi d'une application quasi universelle grâce à la combinaison de ses différentes possibilités :

- multiplication ou réduction du mouvement selon le diamètre des poulies,
- variation de vitesse avec des poulies à flasques mobiles,
- inversion du sens de rotation par croisement des brins,
- transmission à axes non parallèles avec des galets de renvoi,
- débrayage avec un galet tendeur escamotable.

Par ailleurs, le principe de fonctionnement autorisant un glissement en cas de surcharge, la courroie amortit les vibrations et absorbe les à-coups, tout en servant de fusible en cas de blocage d'un élément de la transmission.

### **4. Défauts des roulements :**

Un roulement est l'organe le plus sensible dans une machine tournante. Sa durée de vie est une donnée statistique caractérisant le nombre de cycles. Le nombre de cycles est le nombre de tours qu'il peut effectuer en étant soumis à une contrainte spécifique avant de présenter des défauts d'écailage des surfaces de contact. De manière générale, l'usure d'un roulement peut difficilement être décrite théoriquement du fait de la complexité des mécanismes mis en jeu et de l'interdépendance de ceux-ci. En effet, un mécanisme d'usure n'intervient jamais seul, mais un ensemble de mécanismes conduit à la dégradation d'un roulement et à la diminution de sa durée de vie.



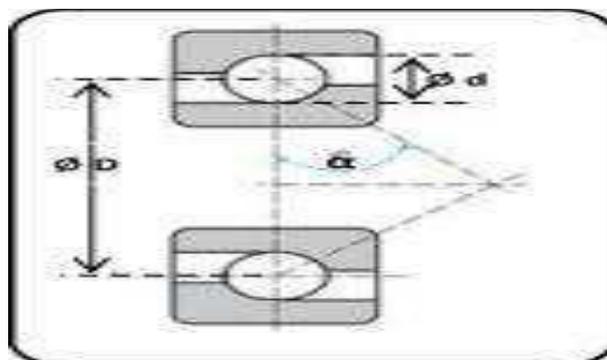
**Fig.3.9.** constitution d'un roulement

#### 4.1. Fréquences caractéristiques :

Les roulements sont parmi les composants les plus sollicités des machines et représentent une source de panne fréquente. Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage), etc. Dans la plupart des cas, la dégradation se traduit par un écaillage d'une des pistes ou d'un élément roulant du roulement, produisant un choc à chaque passage. Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues.

Pour chaque type de roulement et en fonction de ses cotes de fabrication , on peut considérer les fréquences caractéristiques données par les formules ci-dessous.

- $n$  : le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles),
- $D$  : le diamètre primitif,
- $d$  : le diamètre des éléments roulants,
- $\alpha$ : angle de contact,
- $F_r$ : la fréquence de rotation de la bague interne (la bague externe étant supposée fixe)



**Fig.3.10.** Caractéristiques géométriques d'un roulement

Ainsi nous avons :

- La fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague extérieure,  $F_{b\ ext}$ . Est donnée par l'équation suivante:

$$F_{b\ ext} = 0.5 F_r n \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos\alpha \right) \right] \quad (3.3)$$

- La fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague intérieure, supposée montée sur l'arbre tournant,  $F_{b\ int}$  . est donnée par l'équation suivante:

$$F_{b\ int} = 0.5 F_r n \left[ 1 + \left( \frac{d}{D} \cos\alpha \right) \right] \quad (3.4)$$

- La fréquence de passage d'un défaut de cage "  $F_{cage}$  " est donnée par l'équation suivante :

$$F_{cage} = 0.5 F_r \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos\alpha \right) \right] \text{ donc } F_{cage} = F_{b\ int} / n \quad (3.5)$$

- La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau) sur la bague externe ou sur la bague interne  $F_{bille}$  est donnée par l'équation suivante:

$$F_{bille} = 0.5 F_r \frac{D}{d} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos\alpha \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

- Un défaut situé sur une bille entre en contact avec la bague intérieure ainsi qu'avec la bague extérieure à chaque révolution de la bille. La fréquence du défaut sera donc :

$$2 F_{bille} = F_r \frac{D}{d} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos\alpha \right)^2 \right] \quad (3.7)$$

#### 4.2. Cause des défauts de roulement :

- Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme: Contamination du roulement par des particules extérieures: poussière, grains de sable,...
- Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides,
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement
- Courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques.
- Installations inexacte du roulement: en forçant incorrectement le roulement sur l'arbre du rotor ou dans les flasques.

Suivant l'emplacement géométrique des défauts dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts suivants:

- Défauts de bague extérieure
- Défauts de bague intérieure
- Défaut de billes
- Défaut de cage

## **5. Défauts sur les engrenages :**

L'engrenage est un des mécanismes élémentaires les plus utilisés pour transmettre du mouvement, et adapter les vitesses de rotation entre organes moteurs et récepteurs.

Il est constitué de deux roues dentées mobiles autour d'axes de rotation, et dont l'une entraîne l'autre par l'action de dents successivement en contact.

Les engrenages sont parmi les organes les plus sensibles de la chaîne cinématique peuvent être soumis à un grand nombre d'avaries apparaissant lors du fonctionnement, et dont les causes sont multiples

### **5.1. Principales sources des vibrations :**

Parmi les sources essentielles d'excitation d'un engrenage en mouvement on peut noter :

- L'erreur de concentration dans les roues à engrenage qui provoque des vibrations (balourd).
- La modification du profil due à l'erreur de fabrication et à la déformation des dents.
- L'influence des arbres et grandeurs des masses (accouplement, moteur,...) sur la charge dynamique
- Les chocs entre les dents à l'amorce de l'engrènement lorsque la dent non déformée supporte une fraction de la charge tandis que les autres dents se déchargent.
- La déformation variable des dents produit la variation de la charge le long des profils des dents et une variation de la charge à travers la ligne d'engrènement pour une paire de dents en contact.
- Les forces de frottement variables en sens
- L'expulsion de l'huile et de l'air de l'entre dent.

- Les fluctuations de la charge des dents surviennent durant l'engrènement des dents même dans les conditions de la charge constante.

## 5.2. Types de défaut :

Plusieurs types de défauts peuvent affecter les dentures d'engrenage, on peut citer les défauts répartis sur toutes les dents :

### 5.2.1. L'usure :

Est un phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière dû au glissement de deux surfaces l'une contre l'autre. Le développement de l'usure est lié à la charge et à la vitesse de glissement en chaque point des surfaces de contact, ainsi qu'à la présence plus ou moins grande d'éléments abrasifs dans le lubrifiant. L'usure normale, progresse lentement, elle est inversement proportionnelle à la dureté superficielle de la denture. L'usure anormale se produit lorsque le lubrifiant est souillé de particules abrasives ou lorsque le lubrifiant est corrosif, elle conduit à un mauvais fonctionnement de l'engrenage, voire à sa mise hors service.

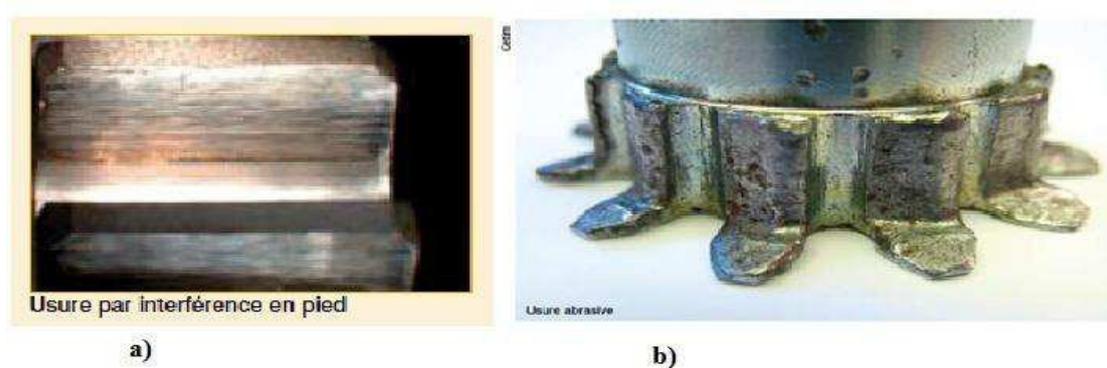
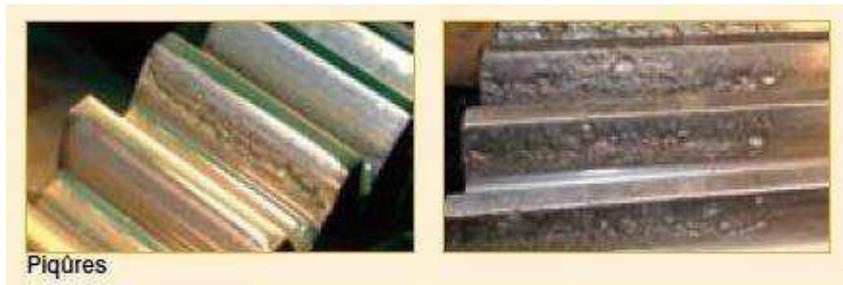


Fig.3.11. L'usure des engrenages a) usure par interférence b) usure abrasive

### 5.2.2. La piqûre :

il s'agit de trous peu profonds, qui affectent toutes les dents. La piqûre est une avarie qui se produit surtout sur des engrenages en acier de construction relativement peu dur. Il est moins à craindre si la viscosité du lubrifiant est élevée. L'apparition des piqûres est associée aussi à un rapport épaisseur de film lubrifiant sur rugosité composite insuffisant pour éviter des contacts entre aspérités.



**Fig.3.12.** Piqûre Engrenages

### 5.2.3. L'écaillage :

Il se manifeste aussi sous forme de trous, mais ceux-ci sont beaucoup moins nombreux, plus profonds et plus étendus que ceux des piqûres. L'écaillage se trouve dans les engrenages cémentés, qui sont les plus répandus à l'heure actuelle car ils permettent de passer des couples importants avec des dimensions faibles.



**Fig.3.13.** Écaillage des dents

### 5.2.4. Grippage :

Conséquence directe d'une destruction brutale du film d'huile, ou d'un frottement sous charge provoquant des hausses de températures, le grippage est favorisé essentiellement par des vitesses élevées, de gros modules, un faible nombre de dents en contact.



Fig.3.14. Le grippage Engrenage.

### 5.3. Fréquence d'engrènement :

Observons un engrenage, composé de deux roues dentées 1 et 2, présentant  $Z_1$  et  $Z_2$  dents et tournant aux fréquences  $F_1$  et  $F_2$ . Chaque fois qu'une dent de la roue menante 1 s'engage dans la roue menée 2, il se produit une prise de charge périodique au rythme d'engagement des dents selon une fréquence d'engrènement  $F_e$  égale à la fréquence de rotation de la roue multipliée par son nombre de dents.

$$F_e = F_1 \cdot Z_1 = F_2 \cdot Z_2 \quad (3.8)$$

$F_1, F_2$  : Fréquences de rotations des roues 1 et 2

$Z_1, Z_2$  : Nombre des dents des roues 1 et 2.

$F_e$  : Fréquence d'engrènement

### 5.4. Ambiguïtés de diagnostic :

- La présence de résonances locales de structures peut moduler les amplitudes relatives des différentes composantes et par suite modifier l'allure du spectre correspondant, faussant le diagnostic. Il est donc préférable de s'intéresser aux évolutions au cours du temps des amplitudes des raies du spectre.
- La confusion entre des bandes latérales dues à une modulation et un peigne de raies dû à un choc peut également entraîner des erreurs de diagnostic quant à l'origine du phénomène. L'observation du signal temporel permet dans ce cas de lever l'indétermination.

## 6. Défaut de paliers lisses hydrodynamique :

Dans un tel palier, l'arbre est en équilibre sur le film d'huile entretenu par la rotation. La position d'équilibre est définie par l'angle de calage qui est l'angle formé par la droite des centres et la direction de la charge de l'arbre dans le palier. L'angle de calage dépend de la technologie du palier et a une forte incidence sur la stabilité de la machine.

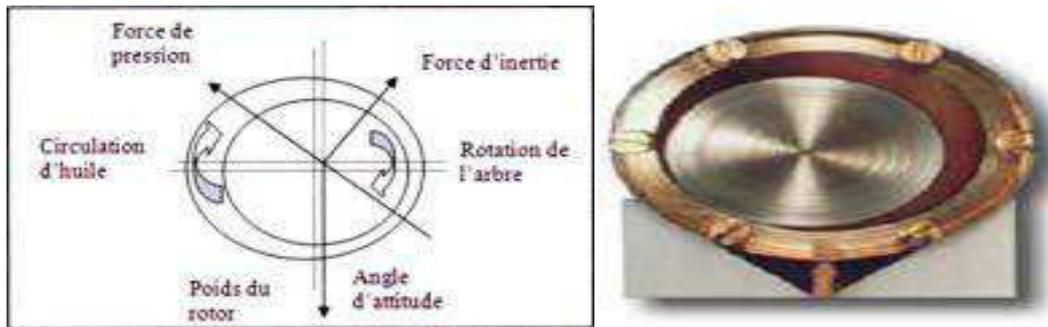


Fig.3.15. Schéma du palier hydrodynamique.

### 6.1. Instabilités de paliers :

Des instabilités de l'arbre dans le palier peuvent apparaître sous l'effet de variations de certains paramètres tels que :

- le poids du rotor.
- la force liée à la pression et des caractéristiques de l'huile.
- la charge de la machine.
- la vitesse de rotation.

L'instabilité se manifeste par une vibration auto-entretenu qui entraîne une précession du rotor, avec une période différente de la période de rotation, dont la fréquence est :

$$0.23F_0 < F_{instabilité} < 0.63F_0 \quad (3.9)$$

Selon la technologie du palier.

### 6.2. Types d'instabilités :

Il existe deux types d'instabilités :

**Le tournoiement d'huile (Oil Whirl) :** Instabilité dont la fréquence varie avec la fréquence de rotation du rotor.

**Le fouettement d'huile (Oil Whip) :** Instabilité dont la fréquence coïncide avec la vitesse critique correspondant à la première pulsation propre du rotor (rotor en état flexible).

### 6.3. Origine des instabilités :

Les instabilités de paliers peuvent apparaître au cours des phases transitoires des machines tournant à vitesse élevée (turbine). Elles peuvent être observées sur des acquisitions spectrales en cascade.

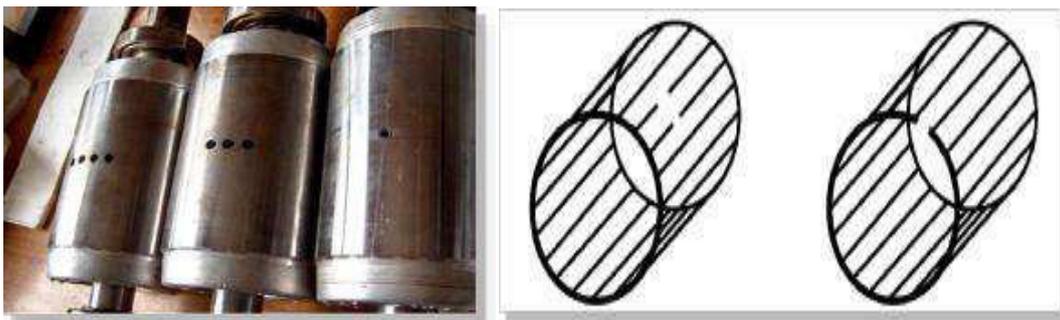
### 7. Défauts électriques :

Les défaillances électriques, au niveau du stator ou au niveau du rotor, peuvent avoir plusieurs formes et plusieurs causes. A titre d'exemple : le déséquilibre des tensions d'alimentation de la machine ou encore les démarrages fréquents provoquent un échauffement excessif des bobinages statorique conduisant à terme à une destruction locale de l'isolant.

De même, les efforts électrodynamiques que subissent les conducteurs des phases, se traduisent par des vibrations mécaniques ayant pour effet de détériorer l'isolant. Sur le plan électrique, les fronts de tension générés par les convertisseurs statiques accentuent le phénomène et réduisent, par conséquent, la durée de vie de l'isolant des conducteurs. Quant aux origines environnementales, nous pouvons citer l'humidité, les produits corrosifs ou abrasifs,

#### 7.1. Au niveau du rotor :

Un rotor bobiné peut être affecté par les mêmes défauts que le stator. Pour un rotor à cage les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit (figure 3.16).



**Fig.3.16.** Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, . . .), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures).

Ce défaut fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante).

Lorsque l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statorique. La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. En fait les cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotorique. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et donc des courants peuvent entraîner leur cassure.

Un défaut de rupture de barres n'induit pas à un arrêt de la machine, du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées, ce qui peut conduire à leur rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine.

Devant la multitude des défauts envisageables et les conséquences de leurs apparitions, les techniques de surveillance se sont rapidement imposées auprès des utilisateurs des machines électriques. Elles commencent également à intéresser les concepteurs.

### **7.2. Au niveau du stator :**

Les défauts statorique se manifestent sous la forme d'un court-circuit inter-spires, d'un court circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse (figures 3.17). Il est schématisé par la connexion franche entre deux points du bobinage. Le court-circuit entre phases apparaît préférentiellement dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. Le court-circuit entre spires de la même phase peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement.

Un court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Cependant, un court circuit entre une phase et le neutre (via la carcasse) ou entre spires d'une même phase. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui a une répercussion directe sur le couple. Ce type de défaut perturbe aussi sensiblement les commandes développées sur la base du modèle de Park (hypothèse d'un modèle équilibré).

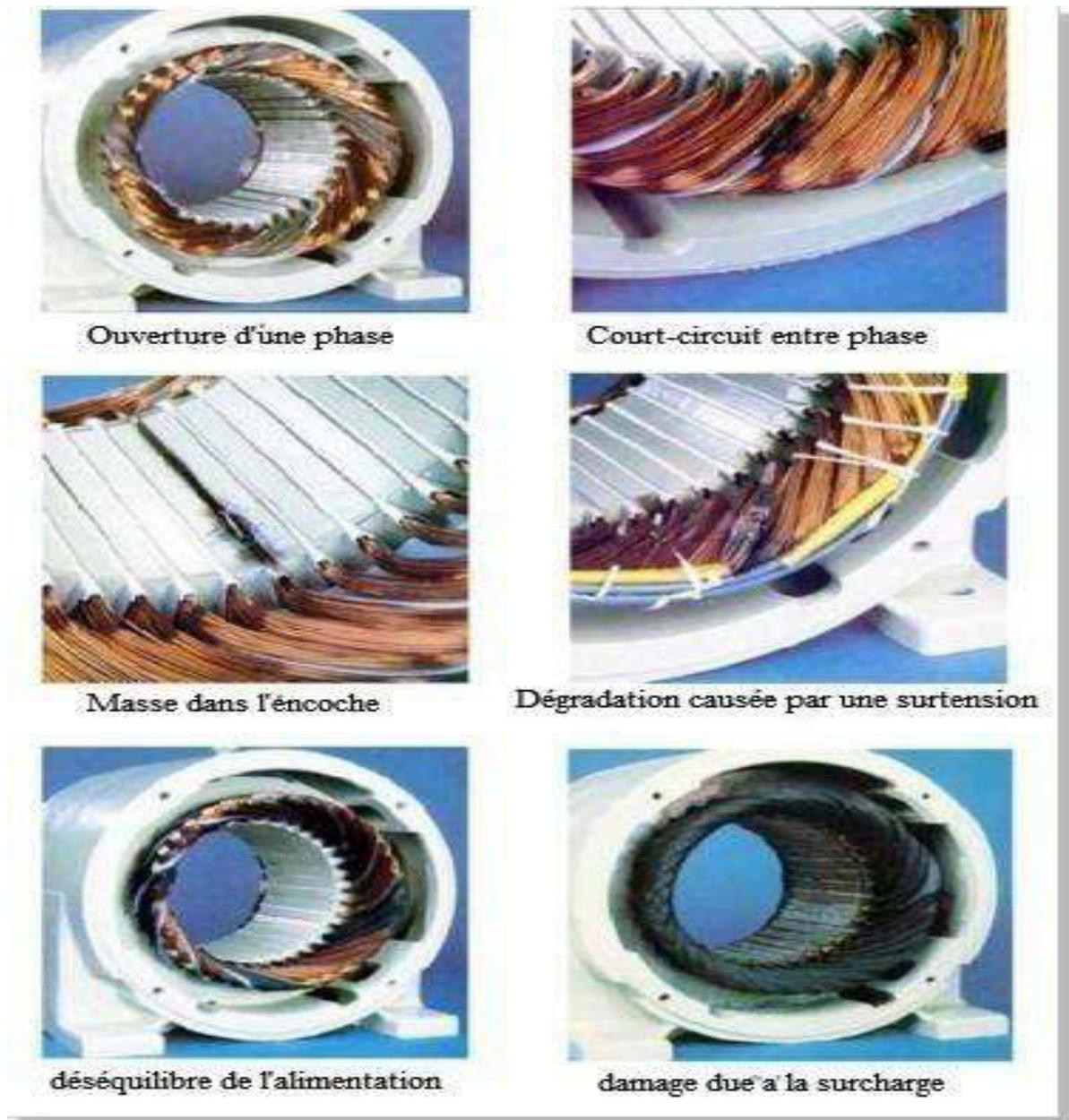


Fig.3.17. Différents défauts au niveau de stator

### 8. Défauts induits par desserrage :

Comme pour l'application de contrainte, l'image vibratoire induite par un desserrage ou une fissuration d'encrage ou de bâti est également caractérisée par la présence d'une composante d'amplitude prépondérante dont la fréquence correspond également à l'ordre 1 de la fréquence de rotation. Le déphasage relatif pour deux composantes radiales orthogonales est voisin de zéro ou de  $180^\circ$ , selon la position des capteurs par rapport au plan de desserrage ou de fissuration.

Ce phénomène générant une vibration de type choc, présente un spectre composé de nombreuses harmoniques de la fréquence de rotation (peigne de raies étendu en fréquences), il peut souvent être détecté en mode globale par le facteur de crête, le Kurtosis ou par d'autres indicateurs de défauts de types choc.

## 9. Défaut de Cavitation :

Il s'agit d'un défaut d'écoulement d'un fluide qui se produit quand la pression, à l'intérieur de la pompe, s'abaisse à un niveau égal à celle de la vapeur saturante du fluide véhiculé. Il y a formation de bulles de gaz qui, en implosant, excitent un grand nombre de modes de structure. La cavitation est causée par un débit d'aspiration insuffisant et se manifeste par un bruit caractéristique identique à celui que provoquerait le passage de graviers dans le corps de la pompe. Ces phénomènes sont souvent intermittents et s'ils persistent, ils peuvent dégrader des éléments internes de la pompe et notamment éroder les aubes des impulseurs.

On pourra distinguer un phénomène de cavitation des autres phénomènes ayant des manifestations vibratoires voisines (usure de bagues de roulement, défaut de lubrification) en prenant une mesure sur le corps de pompe. Pour un défaut lié à un palier, l'énergie vibratoire sera beaucoup plus élevée sur le palier que sur la volute, alors que pour la cavitation, elle sera généralement supérieure sur la volute.

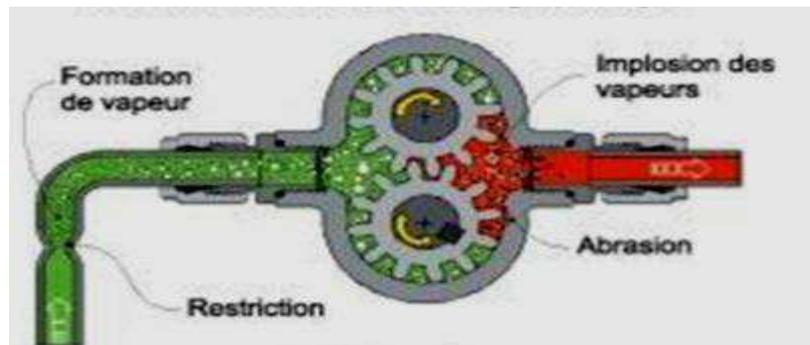


Fig.3.18. Cavitation dans une pompe hydraulique.

### 9.1. Types de cavitation :

On rencontre donc une quantité de type de cavitation, dont certains particulièrement importants, ont fait l'objet de classification plus ou moins admises par la communauté spécialisée. Parmi les sous-classifications pouvant présenter un certain intérêt, consiste à considérer qui se produisent au sein du liquide et celles qui sont provoqués près des parois. Toutes les cavitations obtenues au sein d'un liquide impliquent la présence de tourbillons permanents ou non. Elles sont particulièrement sensibles au nombre de Reynolds:

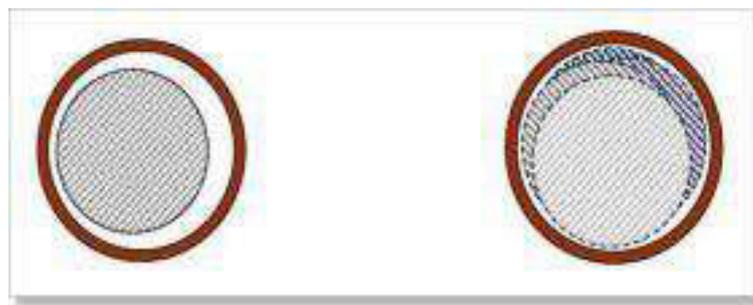
- cavitation à haut nombre de Reynolds: l'inertie du liquide (sa mise en mouvement) ralentit l'expansion de la partie vapeur.
- cavitation à faible nombre de Reynolds: la viscosité du liquide limite la vitesse d'expansion.
- cavitation élastique : la résistance élastique du milieu et la tension de surface limitent la dilatation de la phase gazeuse.

Un autre sous classification possible, il convient de considérer deux grandes familles d'écoulements cavitants, la cavitation à structures séparées, qui nécessite la présence de germes pour se développer, et la cavitation quasi permanent, la cavitation à poches, par exemple, qui après avoir été initiée, s'auto-entretient par vaporisation du liquide environnant au travers d'une interface assez bien définie.

### 10. Défauts d'excentricité :

On parle d'excentricité dans une machine lorsqu'on est en face d'une uniformité de l'entrefer. Ce défaut peut survenir suite à la flexion de l'arbre, un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, l'usure des roulements, un déplacement du noyau statorique...etc.

Lorsque cette excentricité s'accroît, la résultante des forces magnétiques radiales déséquilibrées (connue aussi sous le nom de traction magnétique déséquilibrée) peut causer un frottement entre le stator et le rotor, celui-ci a des conséquences néfastes sur le circuit magnétique et l'enroulement du stator et du rotor. On distingue deux principaux types d'excentricité qui peuvent apparaître dans les machines tournantes ; l'excentricité statique et l'excentricité dynamique.



**Fig.3.19:** Défauts d'excentricité statique et dynamique

On cite aussi dans la littérature l'excentricité axiale, ou plus généralement, à une non uniformité axiale de l'entrefer l'excentricité statique peut être causée par l'ovalité de la partie intérieure du stator, ou par un mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction.

Si l'assemblage arbre-rotor est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique ne change pas. Une excentricité dynamique est due à une déformation ou un désalignement du rotor ou à un desserrage de barres rotoriques. Dans le cas de l'excentricité dynamique, le centre du rotor n'est pas confondu avec son centre de rotation. Et par conséquent, la position de l'entrefer minimale change avec la position du rotor. Ce qui fait que l'excentricité dynamique dépend du temps et de l'espace, alors que l'excentricité statique dépend seulement de l'espace. L'excentricité dynamique peut être provoquée par la flexion de l'arbre, l'usure des roulements, les défauts d'alignement entre le rotor et la charge, la résonance mécanique à la vitesse critique,.....etc. En réalité les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à coexister. Même à l'état sain, la machine présente toujours un certain degré d'excentricité statique résiduelle dû aux inévitables erreurs de fabrication.

La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant à des fréquences  $f_{ecc}$  données par :

$$f_{ecc} = \left[ \left( \frac{kN_b \pm n_d}{p} \right) (1 - g) \pm n_{\omega_s} \right] \cdot f_s \quad (3.10)$$

Avec  $k$  un entier et  $n_{\omega_s} = 1, 2, 3, \dots$  l'ordre de l'excentricité  $n_d$  est égal à 0 pour l'excentricité statique, et 1, 2, 3, ... pour l'excentricité dynamique.

Une autre série d'harmoniques liés à la coexistence des deux types d'excentricité en même temps, apparaît de part et d'autre de la fondamentale à des fréquences données par :

$$f_{mix} = |f_s \pm kf_r| \quad (3.11)$$

Tel que  $k$  est un entier positif. Il n'est pas besoin avec cette expression de connaître les paramètres de la machine tel que  $N_b$ , et c'est ce qui la rend parfois avantageuse.

Les défauts d'excentricité peuvent également être décelés par une analyse vibratoire, sachant que des composantes de hautes fréquences de vibration générées par l'excentricité sont données par une formule similaire à  $f_{ecc}$ .

# CHAPITRE 4 :

Etude

Expérimentale

## 1. But de travail :

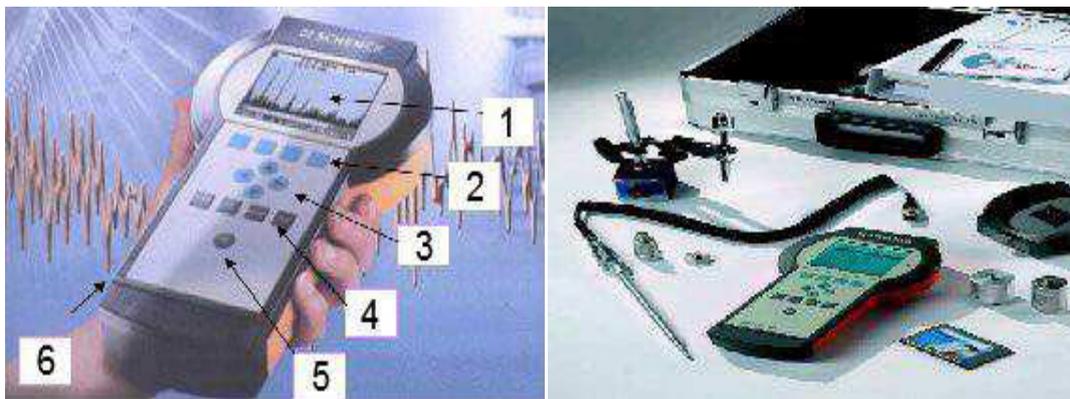
Le but de notre travail est d'étudier les comportements vibrations des machines tournantes et diagnostiquer leurs états mécaniques. Dans notre pratique, nous disposons de méthode d'acquisition non permanente « off line » des indicateurs d'états les plus importants avec un collecteur de données portable ou un analyseur.

## 2. Matériel utilisé :

Le service **DIAGNOSTIC MACHINES** de la centrale thermique de Cap Djinet utilise un système appelé **SHENCK** pour la maintenance conditionnelle (détections des défauts des machines tournantes à traverses les vibrations). Ce système est composé d'un collecteur de données appelé **VIBROTEST 60**, qui permet de faire l'acquisition du signal vibratoire généré par les vibrations d'une machine. Les données acquises stockées dans la carte **PCMCIA** seront transmises, ver le logiciel **VIBROEXPERT CM-400** qui fait le traitement du signal et l'analyse des tendances.

### 2.1. Le VIBROTEST 60 :

Le VIBROTEST 60 est un appareil pratique de mesure des vibrations, permettant d'apprécier l'état des machines, d'établir les diagnostics des défauts dans le cadre de la maintenance conditionnelle. Il peut être utilisé comme collecteur de données. Cet appareil réunit à la fois les fonctions d'analyse 'FFT', d'équilibrage et de collecte de données.



**Fig.4. 1.** Appareil de mesure de vibration VIBROTEST 60

1 : Ecran

3: Touche de contrôle du curseur

5: Touche marche/arrêt

2: Touches dialogue

4: Touche fonction

6: Batterie et carte PC

**Caractéristique de l'appareil:**

- Appareil bi voie avec mesure de la vitesse de rotation.
- Appareil portable (900 g).
- Nouvelle technologie de collecte de données.
  - traitement rapide et simultané des données (jusqu'à 5 données à la fois).
  - Des routes de mesure multiples.
  - Possibilité de basculer entre les fonctions analyseur, équilibreur et collecteur de données.
- Technologie de points de traitement numérique grâce à un processeur numérique (DSP).
- Précision élevée grâce au convertisseur 'CAN' 16 bits.
- Bonne résolution pour les spectres en fréquence (jusqu'à 12800 lignes).
- Possibilité d'utilisation d'une variété de capteurs d'accélération, de vitesse et de déplacement vibratoire.

**2.2. Logiciel d'analyse de diagnostic vibratoire « VIBROEXPERT CM-400 » :**

VIBROEXPERT CM-400 est un élément du système VIBROCAM 4000. Ce système est un logiciel tournant sur Plateforme **WINDOWS** conçu pour traiter les données de vibration recueillies sur les machines tournantes ou les structures. Il permet la comparaison des spectres ainsi qu'une meilleure visualisation des signaux dynamiques. Plusieurs analyseurs mono et multivoies sont supportés par **VIBROEXPERT**.

Parmi les caractéristiques intéressantes du logiciel figurent l'archivage des fonctions multivoies (réponse en fréquence, cohérence, spectre croisé), le post-traitement des données (**cepstre**, profils de rouleaux et d'engrenages) et la possibilité d'écouter les signaux sur le haut-parleur du PC

**Caractéristique :**

- Accepte les données de plusieurs analyseurs (mono et multi-voies) et collecteurs de données
- Fonctions de visualisation avancées incluant plusieurs types de curseurs, conversion des unités, Kurtosis et facteur de crête, représentation 3D et matricielle des spectres, profil.

- calcul de plusieurs fonctions et grandeurs reliées au signal vibratoire (filtrage, démodulation, cepstre).
- Permet aussi d'archiver les fonctions multi-voies (réponse en fréquence, orbites, cohérence et autres).

**Avantage :**

- Flexible à l'utilisation.
- Un seul logiciel est requis pour traiter l'information de plusieurs instruments différents.
- Facilite, accélère et améliore l'interprétation des données de vibration
- Augmente les capacités d'analyse.
- Pratique pour les études de cas difficiles ou les applications en analyse structurelle.
- Compatible avec d'autres logiciels d'analyse ou d'animation structurelle.

**3. Etude d'un cas :**

Dans notre travail nous avons étudié les défauts vibratoires des machines suivantes :

- ⇒ La pompe de réchauffeur d'air rotatif (NH).
- ⇒ Le ventilateur d'air d'allumage (NK).
- ⇒ La pompe d'eau de refroidissement secondaire (VG ou NORIA).
- ⇒ La pompe de recirculation de saumure (WR).

**Défaut d'engrenage au niveau de la pompe NH :**

**Fig.4. 2.** La pompe NH

1. Donnée technique :

Type	GXIZL
Vitesse	1460 t/min
Disposition de l'arbre	verticale
Puissance	11,7 Kw
Tension	380 V
Poids	86 Kg

2. l'analyse du défaut avant l'intervention :

2.1. Représentation temporelle :

Le graphe représente les mesures des vibrations dans la direction horizontale sur le palier N°3 de la machine pendant 41 mois jusqu'à les dernières mesures que nous avons effectuées.

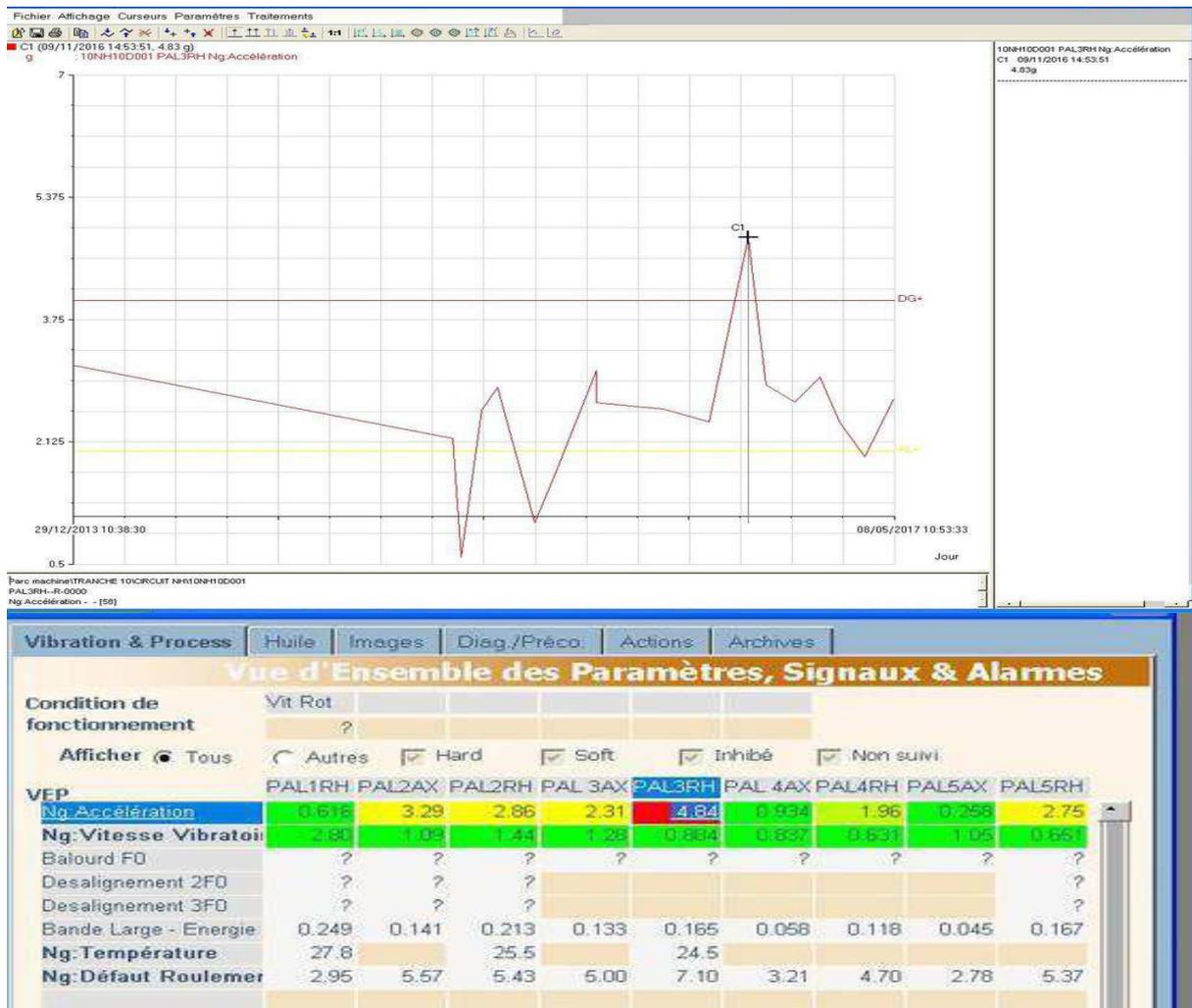


Fig.4. 3. Analyse temporelle du palier N°03 RH avant l'intervention

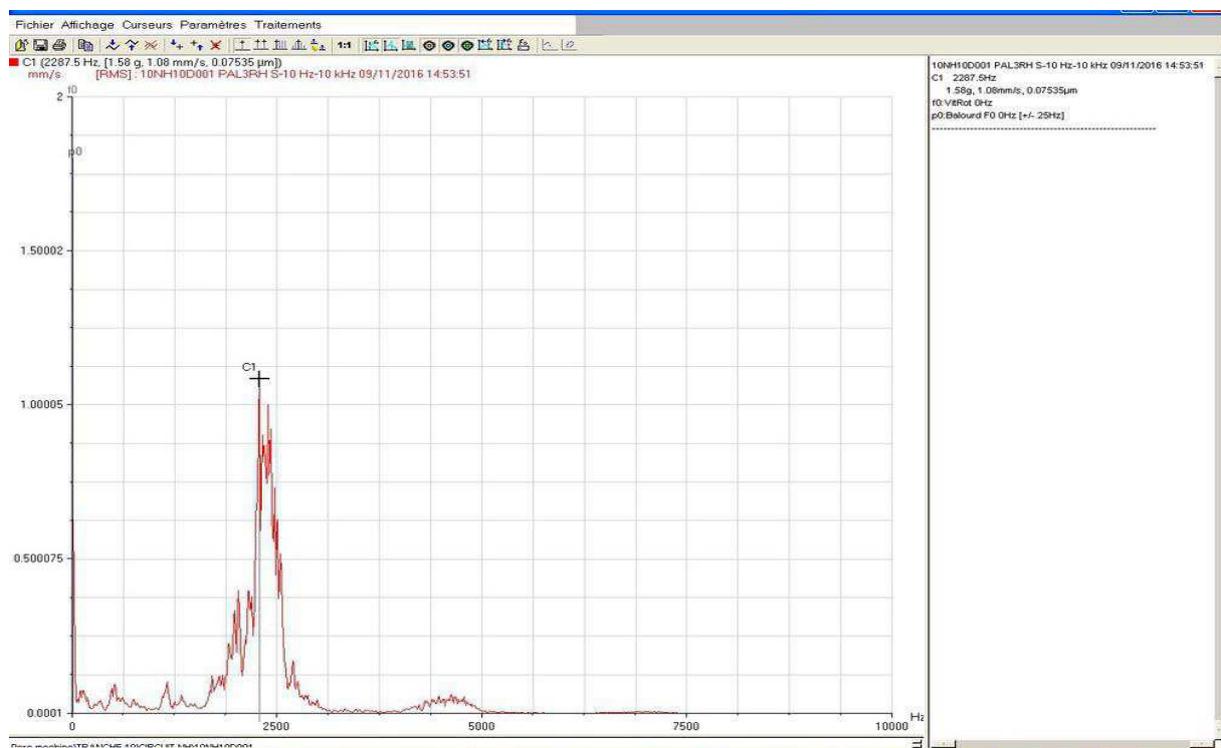
## 2.2. Analyse des résultats :

On remarque une augmentation de l'amplitude des vibrations au niveau de palier N°3 en direction horizontal.

Pour déterminer l'origine de ce défaut qui a cause le dépassement, on passe à l'analyse fréquentielle.

## 2.3. Représentation spectrale (fréquentielle) :

Le graphe représente l'état vibratoire du ventilateur NH au niveau de palier N°3 en direction horizontal. On a un défaut d'engrenage.



**Fig.4. 4.** Analyse spectrale du palier N° 03 RH avant l'intervention

Le spectre présente un pic important (**1,08 mm/s**) à la fréquence de rotation **2287,5 Hz**

## 2.4. Interprétation :

**Calcul de la fréquence de rotation du rotor :**

$$\omega = 2\pi f_0 \quad / \quad f_0 = \frac{\omega}{2\pi}$$

On a aussi :

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad / \quad f_0 = \frac{N}{60}$$

Donnée :

$N = 1460$  tr/min

Application :

$$f_0 = \frac{1460}{60} = 24,33 \text{ Hz}$$

La fréquence au niveau du palier N° 3 du ventilateur NH :

$$f_{\text{pal h}} = 2287,5 \text{ Hz}$$

### 2.5. Analyse de résultat :

D'après le spectre illustré ci-dessus, on remarque que la fréquence de rotation de la machine égale 94 fois la vitesse de rotation du rotor /  $f_{\text{pal h}} \approx 94f_0$ .

### 3. Analyse de défaut après intervention :

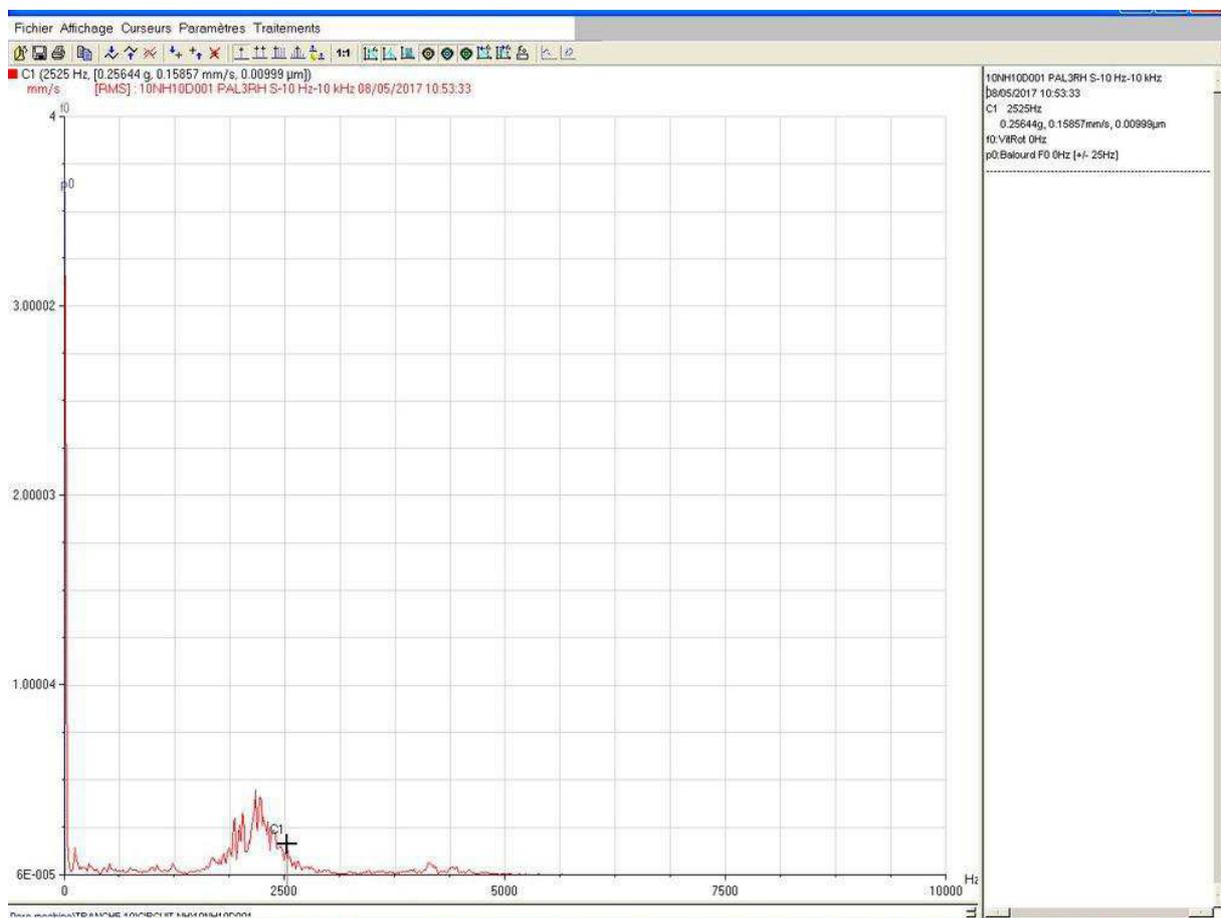


Fig.4. 5. Analyse spectrale du palier N° 03 RH après l'intervention

### 3.1. Interprétation :

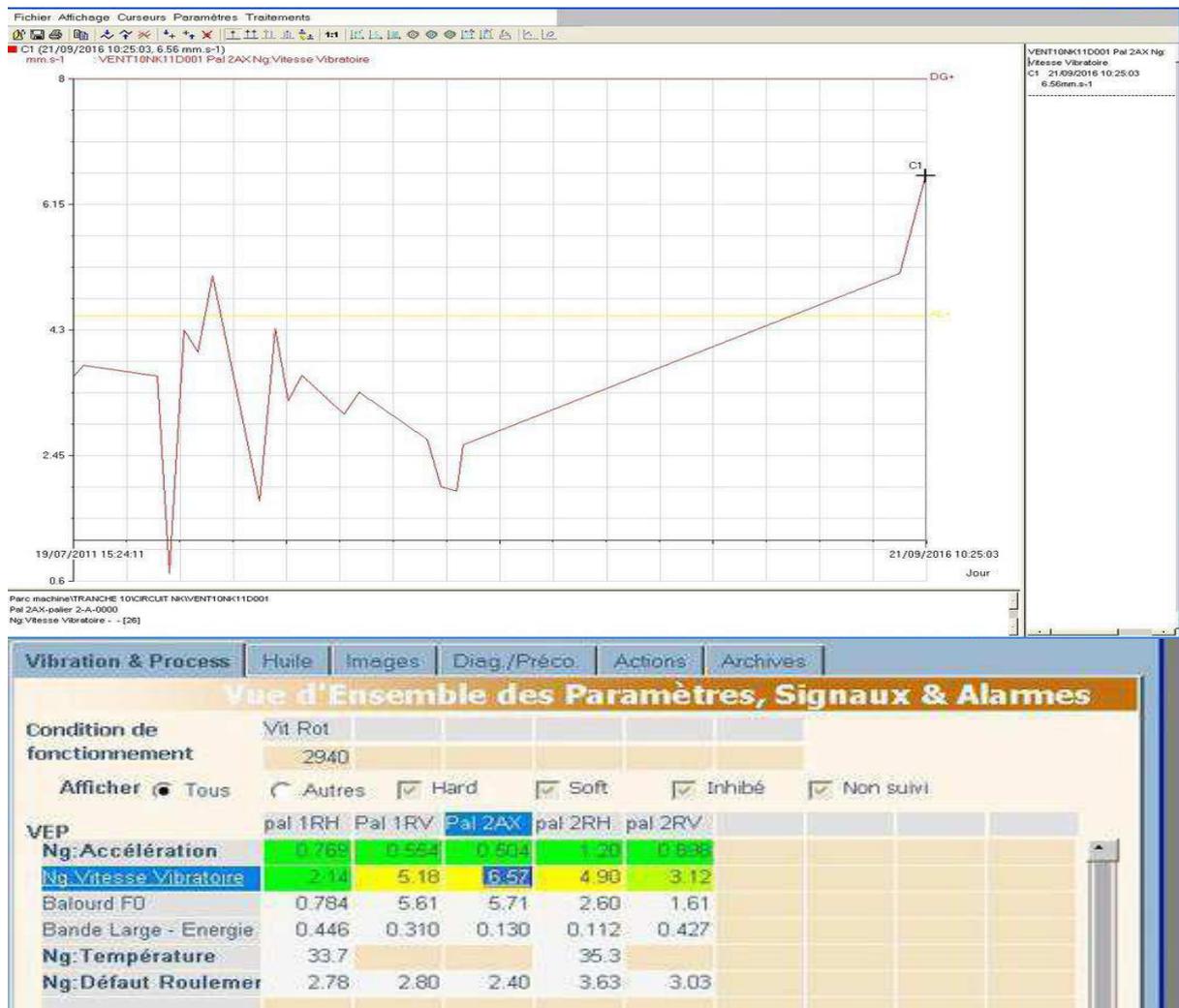
Nous notons que la courbe a été réduite à **2500 Hz** jusqu'à **(0,15 mm/s)** après il était **(1,08mm/s)**. Ce qui certifié que l'intervention et efficace, car tous les pics sont dans les normes.

**Défaut de balourd au niveau du ventilateur NK :****1. Donnée technique :**

Débit	1556 Bm <sup>3</sup> /n
Pression totale	63mbar
Puissance	5,5 KW
Moteur	5,5 Kw, 2940 t/min, 380 V
Poids	250 Kg
Température ambiante	55°C

**Fig.4. 6.** Le ventilateur NK**2. analyse du défaut avant intervention :****2.1. Représentation temporelle :**

Le graphe représente les mesures des vibrations dans la direction axiale sur le palier du ventilateur NK pendant 3 ans jusqu'à les dernières mesures que nous avons effectuées.



**Fig.4. 7.** Analyse temporelle du palier N° 02 AX avant l'intervention

## 2.2. Analyse des résultats :

Le suivi de la courbe de tendance du palier 02 de la vitesse efficace selon un période de temps avants l'intervention sur la ventilateur NK montre clairement que les valeurs globaux des vibrations sont dans la norme jusqu'à la date du **21/09/2016** ou il ya un dépassement du niveau d'alarme.

Pour déterminer l'origine de ce défaut qui a cause le dépassement, on passe à l'analyse fréquentielle.

## 2.3. Représentation spectrale (fréquentielle) :

Le spectre du palier 02 : fréquence (**49,5Hz**), vitesse de rotation (**2940 t/min**) à la direction axial avant l'intervention sur la machine (ventilateur NK) présente un pic très important (**5,71mm/s**), ce qui signifie la présence d'un défaut de balourd.

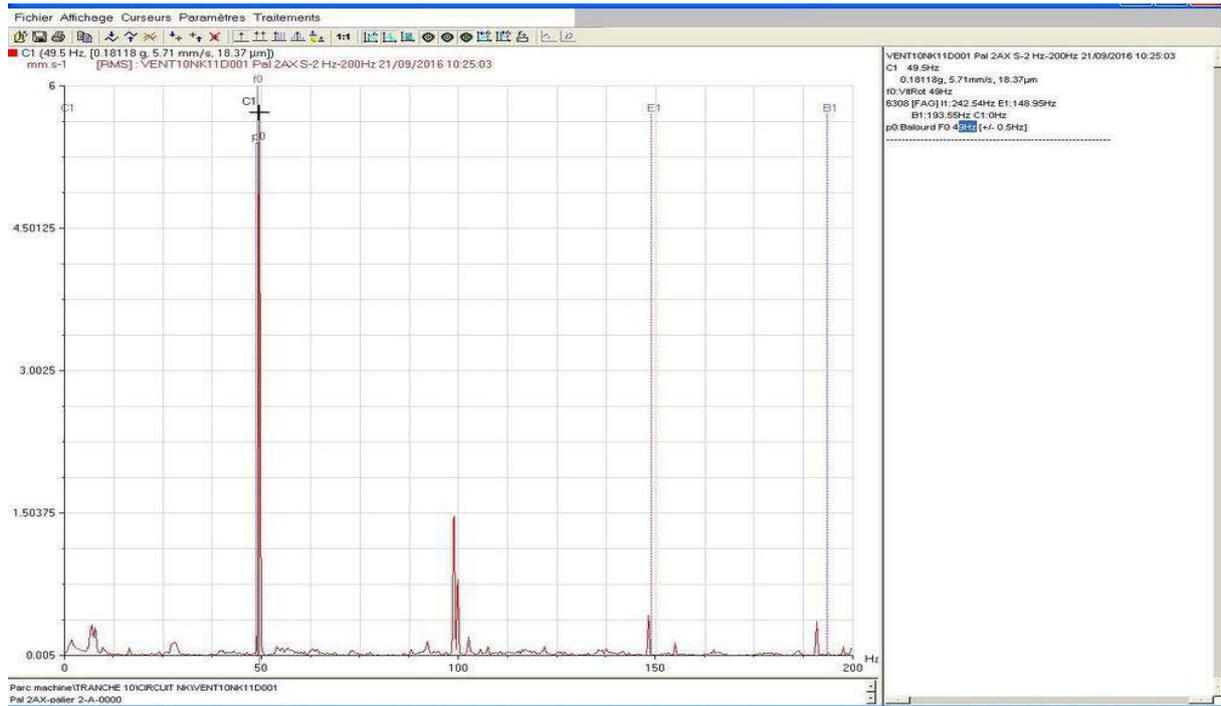


Fig.4. 8. Analyse spectrale du palier N° 02 AX avant intervention

## 2.4. Interprétation :

### Calcul de la fréquence de rotation du rotor :

$$\omega = 2\pi f_0 \quad / \quad f_0 = \frac{\omega}{2\pi}$$

On a aussi :

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad / \quad f_0 = \frac{N}{60}$$

Donnée :

$N = 2930$  tr/min

Application :

$$f_0 = \frac{2930}{60} = 48,83 \text{ Hz}$$

### La fréquence au niveau du palier N° 2 du ventilateur NK :

$$f_{\text{pal ax}} = 49,5 \text{ Hz}$$

## 2.5. Analyse de résultat :

D'après le spectre illustré ci-dessus, on remarque que la fréquence de rotation de la machine égale à la vitesse de rotation du rotor /  $f_{\text{pal ax}} \approx f_0$ .

### 3. Analyse du défaut après l'intervention :

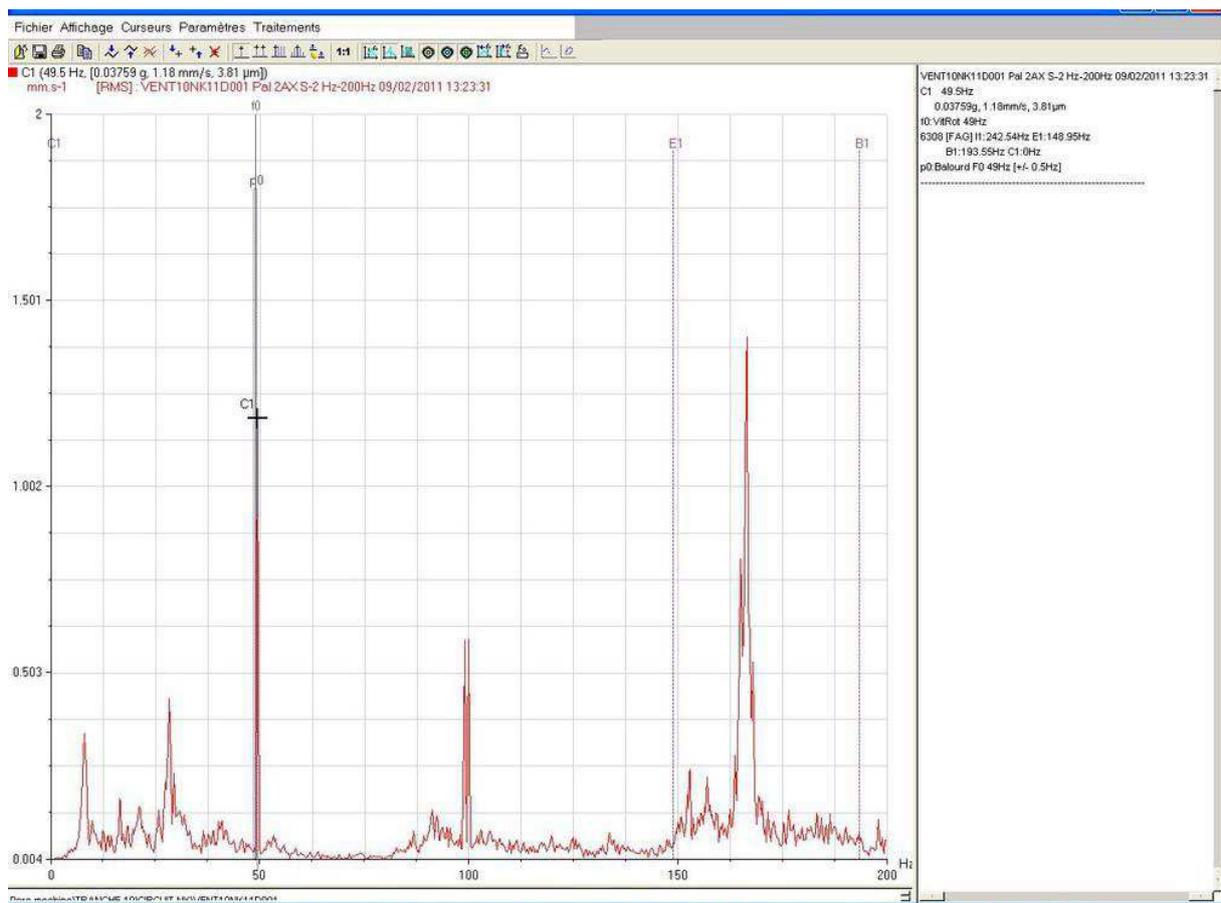


Fig.4. 9. Analyse spectrale du palier N° 02 après l'intervention

#### 3.1. Interprétation :

Le spectre du palier 02 Fréquence (50Hz), Amplitude (1,18mm/s) a la direction axial après l'intervention sur la machine présente un signal acceptable car tous les pics sont dans les normes ce qui certifié que l'intervention est efficace. La courbe a été réduite jusqu'à (1,18mm/s) après il était (5,71mm/s).

**Défaut d'alignement au niveau de la pompe VG :****1. Donnée technique :**

Type	MKG 928
Vitesse	1480 t/min
Puissance	65,6 Kw
Fréquence	50 Hz
Tension	380 V
Température ambiante	45 °C

**Fig.4. 10.** La pompe VG**2. Analyse du défaut avant intervention :****2.1. Représentation temporelle:**

Le graphe représente les mesures des vibrations dans la direction axiale sur le palier N°2 du ventilateur VG pendant 8 ans jusqu'à les dernières mesures que nous avons effectuées.

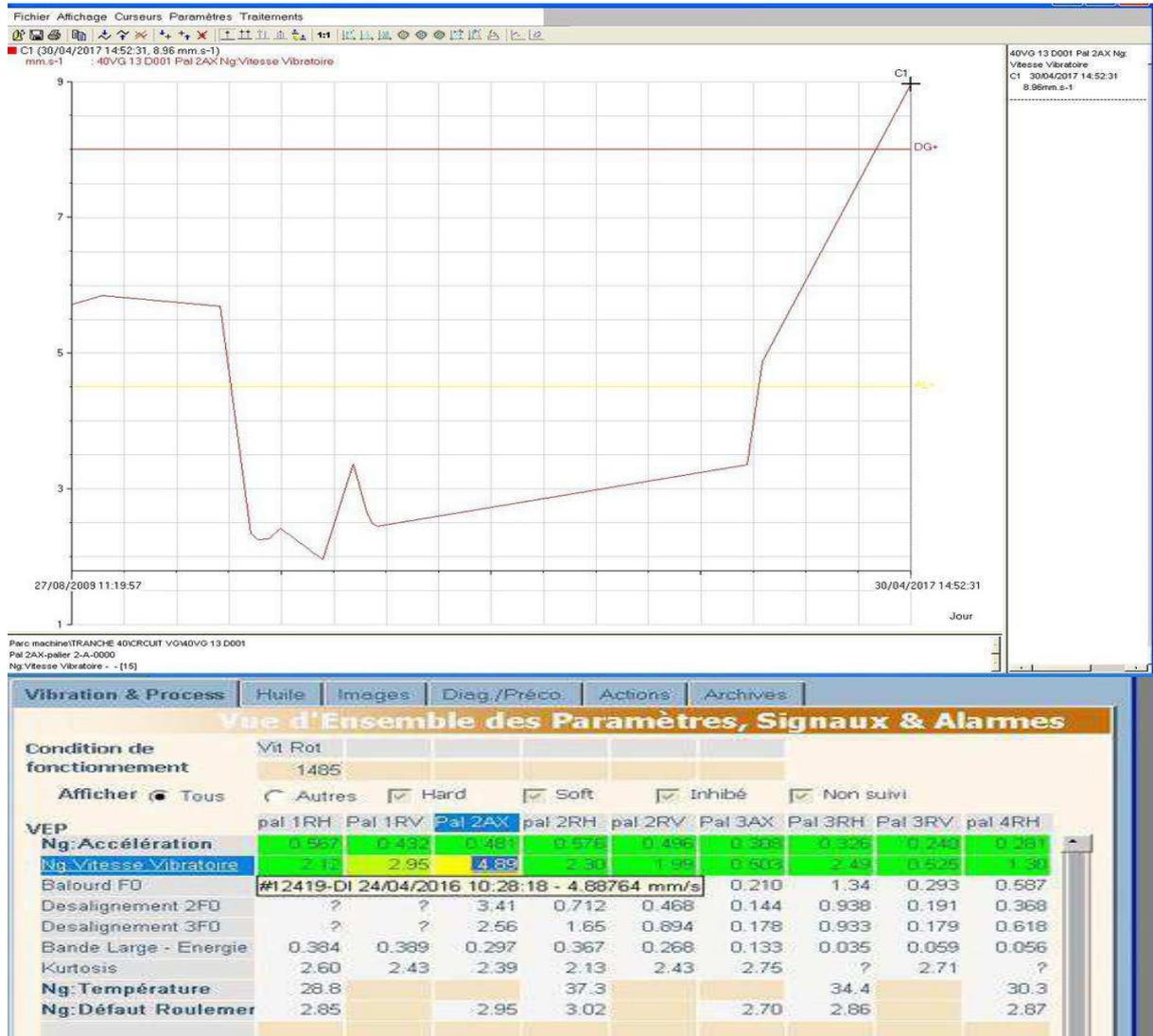


Fig.4. 11. Analyse temporelle du palier N° 02 AX avant l'intervention

**2.2. Analyse des résultats :**

Le suivi de la courbe de tendance du palier N°2 de la vitesse efficace selon un période de temps avants l'intervention sur le ventilateur VG montre clairement que les valeurs globaux des vibrations sont dans la norme jusqu'à la date du **30/04/2017** ou il ya un dépassement du niveau d'alarme.

Pour déterminer l'origine de ce défaut qui a cause le dépassement, on passe à l'analyse fréquentielle.

**2.3. Représentation spectrale (fréquentielle) :**

Le spectre du palier N°2 : fréquence (**49,5Hz**), vitesse de rotation (**1480 mm/s**) à la direction axial avants l'intervention sur la machine (pompe VG) présente un pic très important (**3,41mm/s**), ce qui signifie la présence d'un défaut d'alignement.

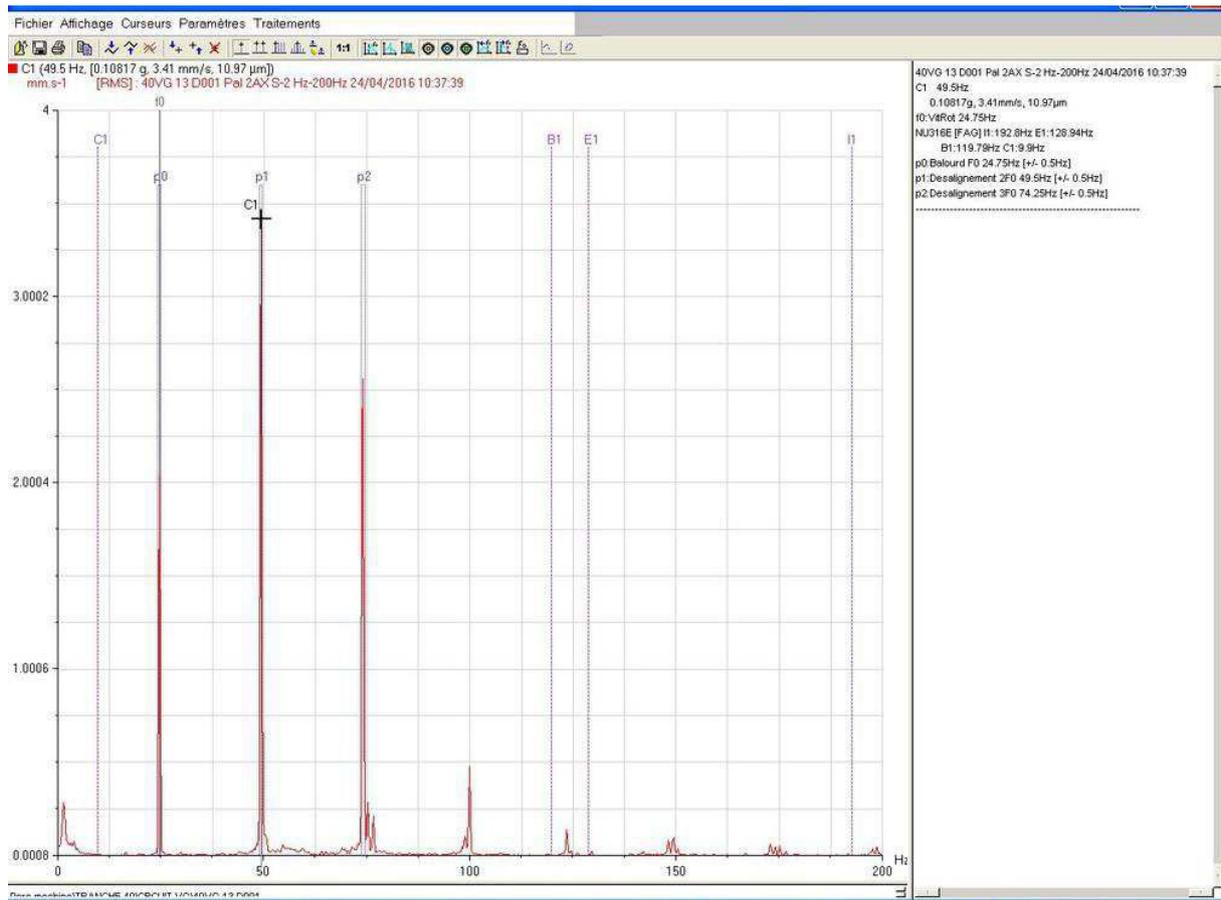


Fig.4. 12. Analyse spectrale du palier N° 02 AX avant l'intervention

## 2.4. Interprétation :

Calcul de la fréquence de rotation du rotor :

$$\omega = 2\pi f_0 \quad / \quad f_0 = \frac{\omega}{2\pi}$$

On a aussi :

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad / \quad f_0 = \frac{N}{60}$$

Donnée :

N= 1480 tr/min

Application :

$$f_0 = \frac{1480}{60} = 24,66 \text{ Hz}$$

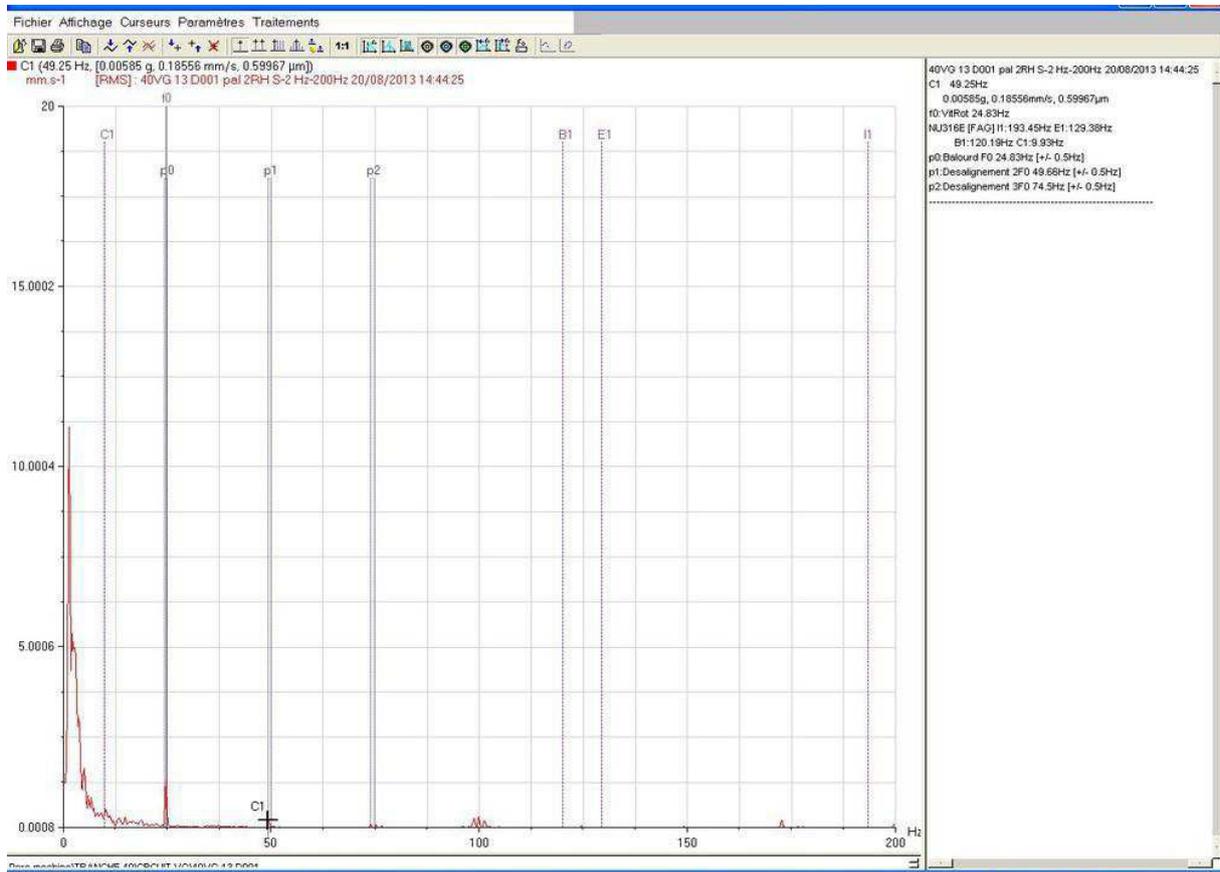
La fréquence au niveau du palier N° 2 du ventilateur VG :

$$f_{\text{pal ax}} = 49,5 \text{ Hz}$$

### 2.5. Analyse de résultat :

D'après le spectre illustré ci-dessus, on remarque que la fréquence de rotation du ventilateur VG égale 2 fois la vitesse de rotation du rotor /  $f_{\text{pal ax}} \approx 2 f_0$ .

### 3. Analyse du défaut après l'intervention :



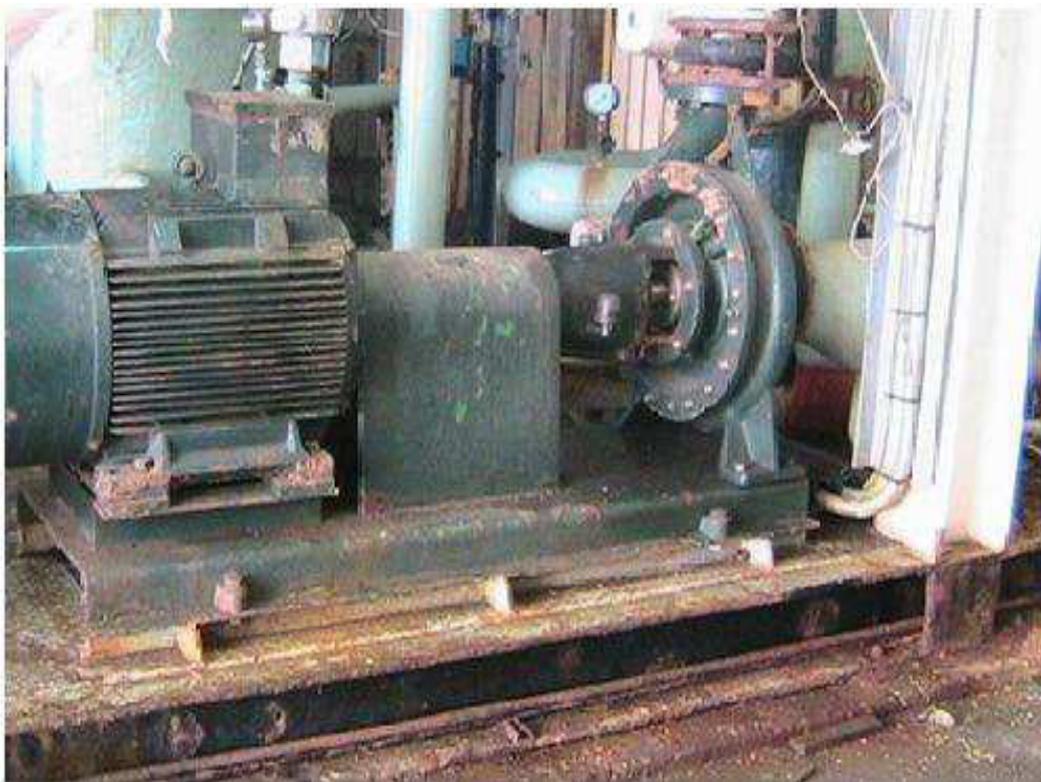
**Fig.4. 13.** Analyse spectrale du palier N° 02 AX après l'intervention

#### 3.1. Interprétation :

Le spectre du palier N° 2 Fréquence (**49,5Hz**), Amplitude (**0,185mm/s**) a la direction axial après l'intervention sur la machine présente un signale acceptable car tous les pics sont dans les normes ce qui certifié que l'intervention et efficace. Nous notons que la courbe a été réduite jusqu'à (**0,185 mm/s**) après il était (**3,41mm/s**).

**Défaut de roulement au niveau de la pompe WR :****1. Donnée technique :**

Type de moteur	1LA4 280- 4AA
Puissance	75 Kw
Tension	380 v
Vitesse	1480 t/min
Poids	610 Kg
Température ambiante	50 °C

**Fig.4. 14.** La pompe WR**2. Analyse du défaut avant intervention :****2.1. Représentation temporelle :**

Le graphe représente les mesures des vibrations dans la direction axiale sur le palier N°2 de la pompe WR pendant 3 ans jusqu'à les dernières mesures que nous avons effectuées.

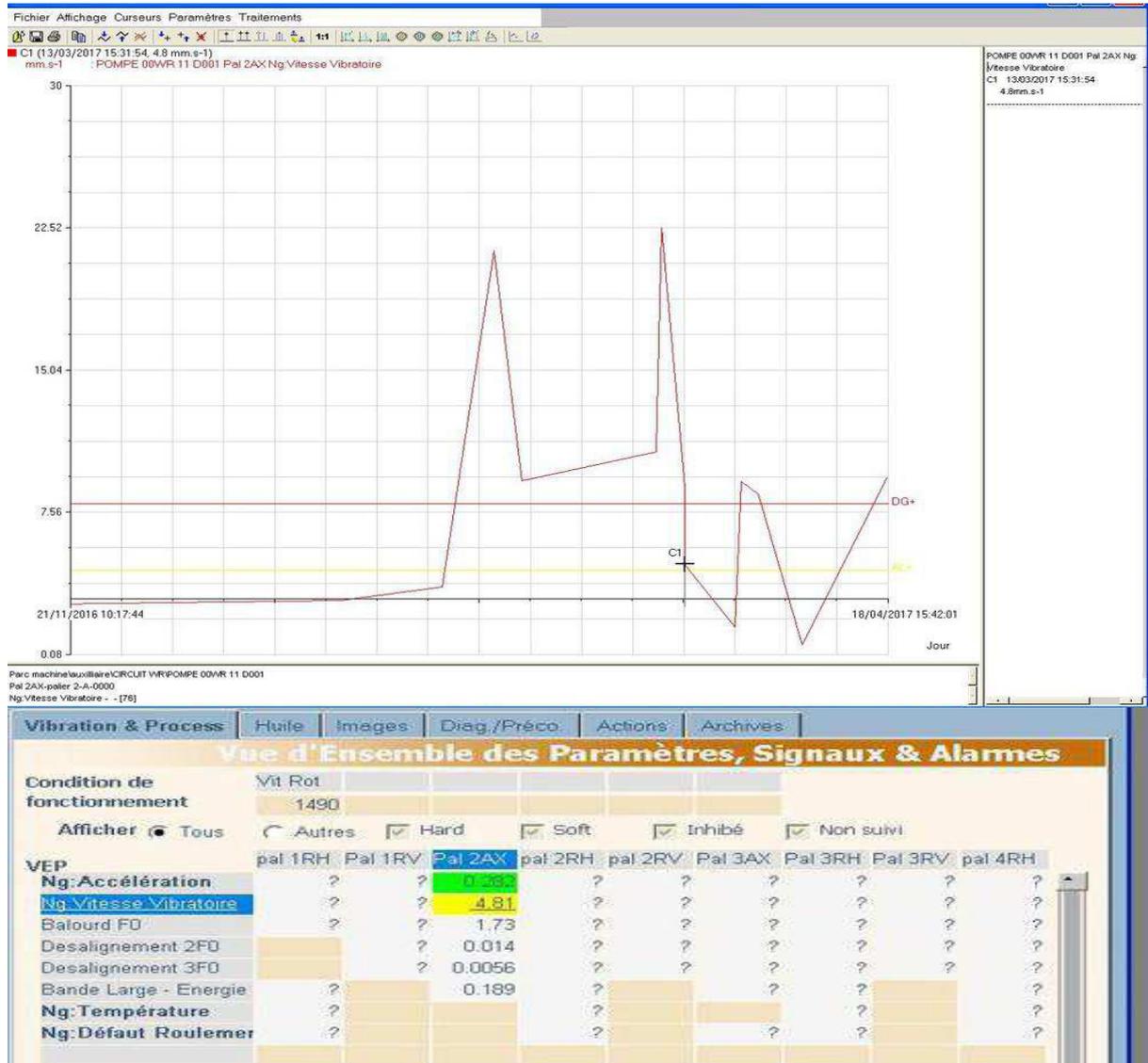


Fig.4. 15. Analyse temporelle du palier N° 02 AX avant l'intervention

**2.2. Analyse des résultats :**

On remarque une augmentation de l'amplitude des vibrations au niveau de paliers N°2 en direction axiale.

Pour déterminer l'origine de ce défaut qui a cause le dépassement, on passe à l'analyse fréquentielle.

**2.3. Représentation spectrale (fréquentielle) :**

Le graphe représente l'état vibratoire de la pompe WR au niveau de palier N°2 en direction axiale. Le spectre présente un pic important (3,7 mm/s) à la fréquence de rotation 66 Hz. ce qui signifie la présence d'un défaut de roulement ( bague externe ).

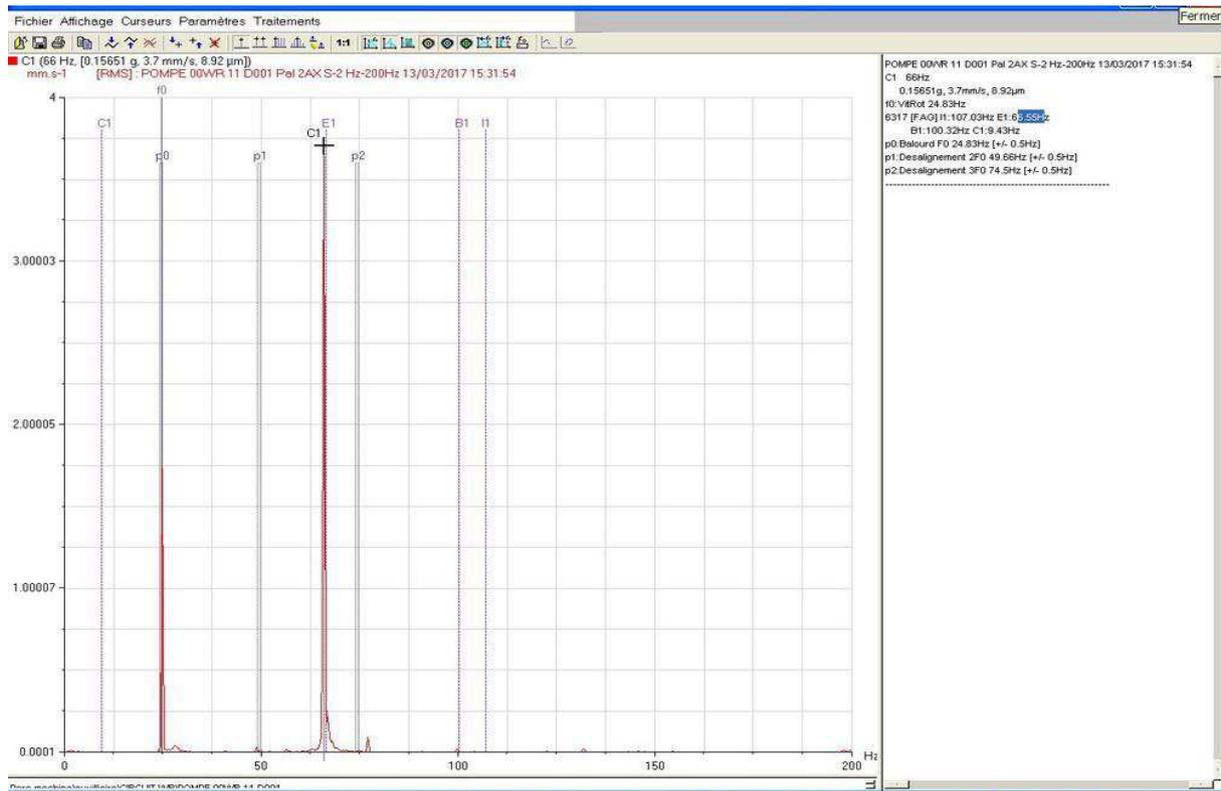


Fig.4. 16. Analyse spectrale du palier N° 02 AX avant l'intervention

## 2.4. Interprétation :

### Calcul de la fréquence de rotation du rotor :

$$\omega = 2\pi f_0 \quad / \quad f_0 = \frac{\omega}{2\pi}$$

On a aussi :

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad / \quad f_0 = \frac{N}{60}$$

Donnée :

$N = 1480$  tr/min

Application :

$$f_0 = \frac{1480}{60} = 24,66 \text{ Hz}$$

### La fréquence au niveau du palier N° 2 du ventilateur WR :

$$f_{\text{pal ax}} = 66 \text{ Hz}$$

## 2.5. Analyse de résultat :

D'après le spectre illustré ci-dessus, on remarque que la fréquence de rotation de la pompe WR égale 2,6 fois la vitesse de rotation du rotor /  $f_{\text{pal ax}} = 2,6 f_0$ .

### 3. Analyse de défaut après l'intervention :

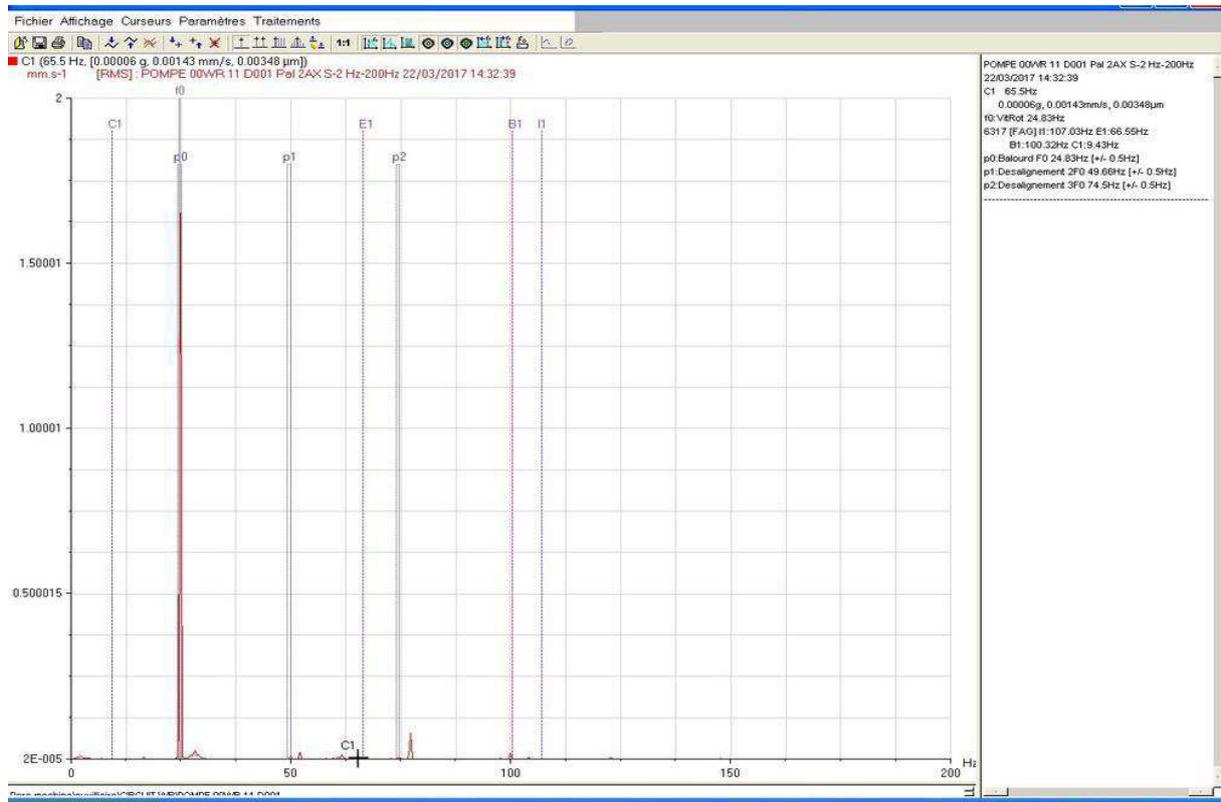


Fig.4. 17. Analyse spectrale du palier N° 02 AX après l'intervention

#### 3.1. Interprétation :

Le spectre du palier 02 Fréquence (**66Hz**), Amplitude (**0,00143mm/s**) a la direction axial après l'intervention sur la machine présente un signal acceptable car tous les pics sont dans les normes ce qui certifié que l'intervention et efficace. Nous notons que la courbe a été réduite jusqu'à (**0,00143 mm/s**) après il était (**3,7mm/s**).

**Conclusion**

**Générale**

## Conclusion générale

Dans un monde où une concurrence accrue existe entre les compagnies industrielles afin de satisfaire les demandes de leurs clients en termes de service, qualité du produit et performance, la maintenance garde une position primordiale dans la réussite des objectifs, tout en conservant une viabilité et une sûreté de fonctionnement, les machines tournantes représentent une classe dominante, dans les systèmes de production, et peuvent y occuper 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.

Les travaux de cette thèse, se sont attaqués à la surveillance des conditions de fonctionnement des machines tournantes, tirant avantage des possibilités offertes par les techniques de l'intelligence artificielle, pour l'exploitation des avancées réalisées en matière de traitement du signal et la construction d'outils de diagnostic.

Les résultats expérimentaux obtenus sont clairs et efficaces, nous a permis de mettre en œuvre un bilan complet sur l'état de santé de la machine et permettes au futur d'améliorer les compétences pratiques, de gagner du temps et de rentabiliser l'unité de production.

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire pourraient donner lieu à des études supplémentaires sur plusieurs points sur les avantages d'analyse vibratoire y compris :

- Détecter les défaillances à un stade précoce
- Réduire les coûts de maintenance
- Augmenter la disponibilité des équipements
- Fiabiliser l'outil de production
- Planifier les interventions et organiser le stock

Dans cette étude nous résultats des essais montre que l'application de la méthode d'analyse vibratoire nous permettre une précision de détection des défauts avec l'utilisation des signaux (spectre de fréquence),

L'application de cette méthode (analyse vibratoire) nous permettre un bon diagnostic technique et de localiser rapidement le ou les éléments défaillants et la ou les causes de défaillances, et de réduire le temps d'arrêt des machines.

# Références bibliographiques

[1] **R. Bigret et J. L. Féron :**

«Diagnostic - maintenance disponibilité des machines tournantes». (MASSON 1995).

[2] **Boulenger, A. & Pachaud, C.** «Surveillance des machines par analyse des vibrations».

AFNOR, (1995).

[3] **A. BOULENGER, C.PACHAUD :**

« Diagnostic vibratoire en maintenance préventive » (Dunod, Paris, octobre 1999).

[4] **Alain Boulenger :**

Vers le zéro panne avec la maintenance conditionnelle, Collection "Guides de l'utilisateur"

Edition AFNOR (1989).

[5] **François MONCHY :**

« Maintenance : Méthodes et organisation ». 2eme édition,Édition DUNOD, 2003.

[6] **AFNOR.** Norme AFNOR X 60 - 010. Paris Afnor. (1990).

[7] **Augeix D.** «Analyse vibratoire des machines tournantes». Les techniques de L'ingénieur, BM5145 (2001)

[8] **C.CAPDESSUS,** «Aide au diagnostic des machines tournantes par Traitement du signal», Thèse INP Grenoble, (1992)

[9] **Bogard F.** « Développement d'une approche numérique visant à optimiser le suivi vibratoire des constituants d'une machine tournante ». Thèse de doctorat de l'Université de Reims (2000).

[10] **J. FRENE.** «Technique de l'ingénieur : paliers hydrodynamiques». Vol B ; art. 671 ; Édition technique de l'ingénieur, année 1982

[11] **Augeix D.** «Analyse vibratoire des machines tournantes». Les techniques de l'ingénieur, BM5145 (2001)

**[12] Nedjar Farouk et Arous Mohand :**

«Etude et maintenance d'une pompe alimentaire». Mémoire de MASTER Université M'hammed Bougurra Boumerdes (2011).

**[13] HACHEMI Mohammed :**

« Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration des machines tournantes».

Mémoire de MASTER Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen (2012).

**[14] Hamzaoui bilal :**

« Etude et surveillance de la pompe alimentaire par l'analyse vibratoire». Mémoire de MASTER Université M'hammed Bougurra Boumerdes (2015).

**[15] Shunk** (1999) Manuel D'exploitation du VIBROTEST 60.

**[16] Document technique**, groupe motopompe.

**[17] [http://www.VIBRACO .com/](http://www.VIBRACO.com/)**

**[18] <http://www.Machinery Diagnostic System.com/>**

**[19] [http://www. dbVib.fr/](http://www.dbVib.fr/)**

**[20] <http://www.diagnostiqueauto.com/>**

**[21] <http://www.dsf-tech.c>**