

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**



Faculté de Technologie

Département Génie Mécanique

**Mémoire de Master**

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

**Filière : Electromécanique**

**Spécialité : Electromécanique**

**THEME**

**Maintenance conditionnelle basée sur**  
**l'analyse vibratoire d'une pompe centrifuge**

Présenté par :

Mr. SLIMI Salim  
Mr. LAIB Mohamed Siradj

Promoteur : Mr. DJEDID Toufik

**Année universitaire 2023- 2024**

# Résumé

La détection et le diagnostic des défauts constituent les tâches les plus importantes et les plus coûteuses en termes de temps et de coûts dans la surveillance et la maintenance des machines tournantes. Cette étude est consacrée à la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire, un domaine d'activité de plus en plus crucial pour rentabiliser les instruments de production industriels.

Nous proposons une méthodologie expérimentale pour aider à la détection et au suivi vibratoire des défauts des machines tournantes. L'augmentation des vibrations permet de détecter un défaut, et l'analyse des caractéristiques vibratoires de la machine permet d'en identifier la cause.

Dans notre travail, nous appliquons une méthodologie de l'analyse fréquentielle en maintenance prédictive. Cette approche utilise des méthodes de suivi et de diagnostic des défauts de diverses machines, telles que les ventilateurs et les pompes, par l'analyse au niveau global et l'analyse spectrale. Le principe de cette méthode repose sur l'analyse spectrale par la transformée de Fourier.

À partir des caractéristiques techniques de la machine, nous calculons les fréquences caractéristiques des défauts potentiels. Ensuite, nous analysons le spectre des vibrations pour localiser le défaut responsable de l'augmentation du niveau des vibrations.

**Mots-clés :** Maintenance conditionnelle, Analyse vibratoire, Défauts, Surveillance, Diagnostic, Transformée de Fourier, Spectre, Pompe.

# Abstract

The detection and diagnosis of faults constitute the most important and costly tasks in terms of time and costs in the monitoring and maintenance of rotating machinery. This study is dedicated to condition-based maintenance through vibration analysis, an increasingly crucial field for making industrial production instruments more profitable.

We propose an experimental methodology to assist in the detection and vibration monitoring of faults in rotating machinery. The increase in vibrations allows for the detection of a fault, and analyzing the machine's vibrational characteristics helps identify its cause.

In our work, we apply a frequency analysis methodology in predictive maintenance. This approach uses tracking and fault diagnosis methods for various machines, such as fans and pumps, through global-level analysis and spectral analysis. The principle of this method is based on spectral analysis using the Fourier transform.

Based on the machine's technical characteristics, we calculate the characteristic frequencies of potential faults. Then, we analyze the vibration spectrum to locate the fault responsible for the increased vibration levels.

**Keywords** : Condition-based maintenance, Vibration analysis, Faults, Monitoring, Diagnosis, Fourier transform, Spectrum, Pump.

## ملخص

يعد الكشف عن العيوب وتشخيصها من أهم وأغلى المهام من حيث الوقت والتكاليف في مراقبة وصيانة الآلات الدوارة. تختص هذه الدراسة بالصيانة الوقائية الشرطية عن طريق التحليل الاهتزازي، وهو مجال نشاط أصبح ذات أهمية متزايدة لجعل الأدوات الإنتاجية الصناعية أكثر ربحية.

نقترح منهجية تجريبية للمساعدة في الكشف عن العيوب ومتابعة الاهتزاز للآلات الدوارة. يسمح زيادة الاهتزاز بالكشف عن العيب، ويتيح تحليل الخصائص الاهتزازية للألة تحديد سببه.

في عملنا، نطبق منهجية التحليل الترددي في الصيانة التنبؤية. تستخدم هذه المقاربة طرق المتابعة وتشخيص العيوب لمختلف الآلات، مثل المراوح والمضخات، من خلال التحليل على المستوى العام والتحليل الطيفي. يعتمد مبدأ هذه الطريقة على التحليل الطيفي بواسطة تحويل فورييه.

من خلال الخصائص التقنية للألة، نحسب الترددات المميزة للعيوب المحتملة. بعد ذلك، نقوم بتحليل طيف الاهتزازات لتحديد موقع العيب المسؤول عن زيادة مستوى الاهتزازات.

**الكلمات المفتاحية:** الصيانة الشرطية، التحليل الاهتزازي، العيوب، المراقبة، التشخيص، تحويل فورييه، الطيف، المروحة، المضخة

# REMERCIEMENT

*Nous tenons à remercier en premier lieu le Dieu, de nous avoir donné la force, la santé, la patience, le courage et la volonté afin ; accomplir Ce modeste travail qui présente le fruit de plusieurs années de Sacrifices.*

*Nous remercions nos parents qui sont à l'origine de ce que nous sommes aujourd'hui, grâce à leur amour patience et leurs innombrables sacrifices.*

*Nous remercions nos frères et Sœurs pour leurs encouragements Ainsi que toutes nos familles.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre Promoteur Mr. DJEDID Toufik qui a accepté de nous Encadrer et pour Son aide précieuse, ses conseils, sa confiance autour de l'élaboration de ce travail et surtout ses judicieux conseil du début à la fin qui ont contribué à alimenter nos réflexions et nos motivations, aussi à exprimer nos remerciements les plus respectueux à notre honorable jury de nous avoir fait l'honneur d'examiner notre travail.*

*Nous remercions aussi tout l'ensemble du personnel de complexe industriel de Hassi R'mel qui nous ont accueilli toute la durée de notre stage pratique.*

*Nous remercions chaleureusement nos camarades de promotion pour les moments agréables que nous avons partagés ensemble.*

*Et enfin nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste mémoire.*

*A tous : Merci.*

# DÉDICACE

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes très chers parents, qui en fait meilleure des parents pour leur encouragement leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leur sacrifice, durant mes études, je prie dieu le tout puissant de vous accorder une bonne santé, une longue vie, beaucoup de bonheur, et de vous récompenser de toutes les peines et sacrifices données auxquels je ne rendrai jamais assez.*

*À ma chère jumelle Bouchra, pour son encouragement et ton soutien durant mes études, je te souhaite beaucoup de succès, de prospérité et une vie pleine de joie et de bonheur.*

*À ma grand-mère bien-aimée. Je prie Dieu de lui accorder santé et bien-être, ainsi qu'à la mémoire de mon grand-père chéri, qui nous ont toujours encouragés et motivés dans nos études.*

*À toute la famille*

*À tous mes amis sans*

*Exception*

*À mon cher encadreur*

*À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

*À tous ceux qui m'ont Il m'a étudié et encouragé et aidé tout au long de mes études.*

*SLIMI SALIM*

# DÉDICACE

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes très chers parents, qui en fait meilleure des parents pour leur encouragement leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leur sacrifice, durant mes études, je prie dieu le tout puissant de vous accorder une bonne santé, une longue vie, beaucoup de bonheur, et de vous récompenser de toutes les peines et sacrifices données auxquels je ne rendrai jamais assez.*

*À mes chères sœurs et mon cher frère, pour leur encouragement et leur soutien durant mes études, je vous souhaite beaucoup de succès, de prospérité et une vie pleine de joie et de bonheur.*

*À ma grand-mère bien-aimée. Je prie Dieu de lui accorder santé et bien-être, ainsi qu'à la mémoire de mon grand-père chéri, qui nous ont toujours encouragés et motivés dans nos études.*

*À toute la famille*

*À tous mes amis sans exception*

*À mon cher encadreur*

*À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

*À tous ceux qui m'ont Il m'a étudié et encouragé et aidé tout au long de mes études.*

*Laib Mohamed Siradj*

# Sommaire

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## **Chapitre I : Représentation de Sonatrach Et Champ De Hassi R'mel**

I.1-Introduction .....	3
I.2-Définition de l'entreprise Sonatrach .....	3
I.3-Présentation de la région de HASSI R'MEL .....	4
I.4-Situation géographique du champ de Hassi R'mel .....	4
I.5-Historique et développement du champ de Hassi R'mel .....	6
I.6-Présentation des secteurs de HASSI R'mel.....	7
I.7-Organisation de la direction régionale de HR .....	9
I.8-Centre de Stockage et Transfert facilité (CSTF) .....	11
I.8.1-Section de stockage et transfert du GPL (gaz de pétrole liquéfié) .....	12
I.8.1.1-Définition du GPL .....	12
I.8.1.2-Les réservoirs du GPL.....	12
I.8.2-Section de stockage et de transfert du condensat .....	12
I.8.2.1-Définition du condensat.....	12
I.8.2.2-Les réservoirs du condensat situés dans le CSTF.....	12
I.9-conclusion.....	13

# Sommaire

## Chapitre II : Etude technologique de la pompe centrifuge

II.1-Introduction .....	14
II.2-Définition d'une pompe .....	14
II.3-Notion d'un Système de pompage .....	14
II.4-Les différents types de montages des pompes .....	15
II.4.1-Montage d'une pompe immergée.....	15
II.4.2-Montage d'une pompe en charge .....	15
II.4.3-Montage d'une pompe en dépression.....	15
II.5-Classification des pompes .....	16
II.5.1- Les pompes à déplacement cinétique .....	16
II.5.2- Les pompes à déplacement positif .....	16
II.6-La pompe centrifuge .....	17
II.6.1-Introduction .....	17
II.6.2-Définition des pompes centrifuges.....	17
II.6.3-Construction et principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge.....	18
II.6.4-Types des roues dans les pompes centrifuges .....	21
II.6.5-La fabrication des pompes centrifuges.....	22
II.6.6-Avantages et inconvénients de la pompe centrifuge .....	22
II.6.6.1-Avantages de la pompe centrifuge .....	22
II.6.6.2-Inconvénients de la pompe centrifuge.....	23
II.6.7-Secteurs d'application des pompes centrifuges.....	23
II.6.8-Classification des pompes centrifuges .....	23

# Sommaire

II.6.9-Caractéristiques générales des pompes centrifuges .....	25
II.6.9.1- Le débit.....	25
II.6.9.2-La hauteur manométrique .....	25
II.6.9.3-Le rendement.....	25
II.6.9.4-La puissance absorbée et puissance utile (W).....	26
II.6.9.5-le couplage des pompes.....	26
II.6.9.6-Le Diagrammes des vitesses « triangle des vitesses » .....	28
II.6.9.7-LE NPSH.....	29
II.6.9.8-Le Phénomène de cavitation .....	30
II.7-Conclusion.....	31

## **Chapitre III : Généralités sur la maintenance et l'analyse vibratoire**

III.1- Introduction .....	34
III.2-Définition de la maintenance .....	34
III.3-Les objectifs de la maintenance .....	34
III.3.1- Les objectifs de coût .....	34
III.3.2- Les objectifs opérationnels.....	35
III.4- Méthodes de la maintenance .....	35
III.4.1-Maintenance corrective.....	36
III.4.1.1-Maintenance curative .....	36
III.4.1.2-Maintenance palliative .....	36
III.4.2-Maintenance préventive .....	37
III.4.2.1-Maintenance systématique .....	37
III.4.2.2-Maintenance conditionnelle .....	37
III.5-Opérations de maintenance .....	37

# Sommaire

III.5.1-Dépannage.....	37
III.5.2-Réparation .....	38
III.5.3-Inspection.....	38
III.5.4-Les visites.....	38
III.5.5-Les contrôles .....	38
III.5.6-Les révisions .....	39
III.6-Les différents niveaux de maintenance.....	39
III.6.1-La maintenance de premier niveau .....	39
III.6.2-La maintenance de niveau 2.....	39
III.6.3-La maintenance de niveau 3.....	40
III.6.4-La maintenance de niveau 4.....	40
III.6.5-La maintenance de niveau 5.....	40
III.7-Maintenance conditionnelle en détails.....	40
III.7.1-Les étapes de la maintenance conditionnelle .....	40
III.7.1.1-La détection du défaut qui se développe.....	41
III.7.1.2-L'établissement d'un diagnostic .....	41
III.7.1.3-L'analyse de la tendance.....	41
III.8-Les technique de surveillance .....	42
III.8.1-Analyse vibratoire .....	42
III.8.2-La thermographie infrarouge .....	42
III.8.3-Analyse d'huile.....	43
III.8.4-Analyse acoustique .....	43
III.9-Analyse vibratoire.....	43
III.9.1-Introduction.....	43
III.9.2-Définition d'une vibration.....	44

# Sommaire

III.9.3-Objectifs d'analyse vibratoire.....	44
III.9.4-Caractéristiques d'une vibration .....	44
III.9.4.1-Fréquence .....	44
III.9.4.2-Amplitude.....	45
III.9.5-Les différentes formes de vibration .....	45
III.9.5.1-Vibrations harmoniques .....	45
III.9.5.2-Vibrations périodiques .....	46
III.9.5.3-Vibrations apériodique.....	46
III.9.6-Les capteurs de détection de vibration.....	46
III.9.6.1-Les proximètres.....	46
III.9.6.2-Les Vélocimétries .....	47
III.9.6.3-Les accéléromètres .....	47
III.9.7-Défauts des machines tournantes .....	48
III.9.7.1-Déséquilibre (défaut de balourd).....	48
III.9.7.2-Défaut d'alignement.....	49
III.9.7.3-Défaut de serrage .....	49
III.9.7.4-Défauts de transmission par courroies .....	50
III.9.7.5-Les défauts des engrenages .....	50
III.9.7.6-Les défauts de roulements.....	52
III.9.7.7-Les défauts hydrauliques.....	54
III.9.8-Reconnaissance des principales anomalies .....	55
III.10-Choix des seuils vibratoire.....	56
III.10.1-seuil de vitesse vibratoire.....	56
III.11-Conclusion .....	57

# Sommaire

## Chapitre IV : Etude expérimentale

IV.1-Le but de travail .....	58
IV.2-Description de la pompe P002.....	58
IV.2.1-Le rôle de la Pompe P002.....	58
IV.2.2-Les caractéristiques de la pompe 60-P002 .....	58
IV.3-Capteur de vibration .....	59
IV.3.1-Caractéristiques techniques de l'accéléromètre.....	59
IV.4-VIBROTEST 60F (marque Brüel & Kjør) .....	59
IV.4.1-Caractéristiques techniques .....	60
IV.5-Emplacement de point de mesure.....	60
IV.6-Représentation spectrale .....	61
IV.7-Niveaux vibratoires de Pompe 60-P002 (groupe III) .....	61
IV.8-Application de la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire sur la pompe 60-P002 .....	62
IV.8.1-Pompe 60-P002 (Pompe à pallier à roulement).....	62
IV.8.2-Défauts de roulement.....	63
IV.8.2.1-Historique des roulements sur la pompe 60-P002 .....	63
IV.8.2.2-Jeu, usure d'arbre.....	64
IV.8.3-Défaut Hydraulique .....	64
IV.8.4-Proposition des Solutions à ce problème.....	66
IV.9-Conclusion .....	66
Conclusion générale .....	67

# Liste des figures

## Chapitre I : Représentation de Sonatrach Et Champ De Hassi R'mel

Figure. I.1-Logo de Sonatrach .....	3
Figure. I.2-Une vue du complexe industriel de Hassi R'mel .....	4
Figure. I.3-Situation géographique de la région de Hassi R'Mel .....	5
Figure. I.4-Shema Du Processus Industriel A Hassi R'mel. ....	8
Figure. I.5-Le champ gazières de Hassi R'mel .....	9
Figure. I.6-Organigramme administratif.....	9
Figure. I.7-Localisation du CSTF .....	11
Figure. I.8-le réservoir du condensat (Bac).....	12

## Chapitre II : Etude technologique de la pompe centrifuge

Figure II.1-Installation de pompage .....	14
Figure II.2-Montage d'une pompe immergée .....	15
Figure II.3- Montage d'une pompe en charge.....	15
Figure II.4-Montage d'une pompe en dépression .....	15
Figure II.5- Types de pompes. ....	16
Figure II.6-Types de pompes (Déplacement cinétique) .....	16
Figure II.7-Types de pompes (Déplacement positif) .....	17
Figure II. 8-une pompe centrifuge .....	18
Figure II. 9- Construction d'une pompe centrifuge .....	18
Figure II. 10- Schéma d'une installation de pompe centrifuge.....	19
Figure II. 11- Types des roues dans les pompes centrifuges.....	21
Figure II. 12- Types d'aspiration des roues dans les pompes centrifuges.....	22
Figure II. 13-usine de fabrication des pompes centrifuges .....	22

# Liste des figures

Figure II. 14- Conception du carter en volute .....	24
Figure II. 15-Conception du carter de diffuseur.....	24
Figure II. 16-Couplage de deux pompes en série.....	26
Figure II. 17-Courbe caractéristique du couplage de deux pompes en série. ....	26
Figure II. 18-Couplage de deux pompes en parallèle.....	27
Figure II. 19-Courbe caractéristique du couplage de deux pompes en parallèle (cas de deux pompes identiques) .....	27
Figure II. 20- Diagrammes des vitesses sur une roue à entrer radiale .....	28
Figure II. 21- la Création le triangle des vitesses.....	29
Figure II. 22- Triangle des vitesses entrée et sortie d'une pompe radiale.....	29
Figure II. 23-Diagramme montrant l'intersection de la courbe de NPSH(disponible).....	30
Figure II. 24-Phénomène de cavitation de pompe centrifuge .....	30
Figure II. 25- Dégâts de la cavitation.....	31

## **Chapitre III : Généralités sur la maintenance et l'analyse vibratoire**

Figure III. 1-les types de maintenance .....	35
Figure III. 2-Maintenance corrective : Incidence sur la production.....	36
Figure III. 3-Insertion des opérations de maintenance systématique dans le programme de production. ....	37
Figure III. 4- Courbe caractéristique représentant la mise en marche de l'équipement...41	
Figure III. 5-Pourcentage d'utilisation des différentes techniques de surveillances.....	42
Figure III. 6-Images thermographiques .....	43
Figure III. 7-Vibration harmonique .....	45
Figure III. 8-Vibration périodique .....	46
Figure III. 9-Vibration apériodique.....	46
Figure III. 10-Proximètre .....	47
Figure III. 11- Vélocimétrie .....	47
Figure III. 12-Acceleromètre .....	48
Figure III. 13-balourd statique .....	49

# Liste des figures

Figure III. 14-balourd dynamique.....	49
Figure III. 15-défauts d'alignement d'arbres .....	49
Figure III. 16-transmission poulies courroies .....	50
Figure III. 17-Différents types d'engrenage.....	51
Figure III. 18-. L'usure des engrenages a) usure par interférence b) usure abrasive.....	51
Figure III. 19-piqûres (Pitting).....	51
Figure III. 20-Ecaillage des dents .....	51
Figure III. 21-. Grippage a) à froid, b) à chaud.....	51
Figure III. 22-Principaux éléments constitutifs d'un roulement.....	52
Figure III. 23-Principaux aspects de la détérioration des roulements .....	53
Figure III. 24 -Défaillance par cavitation dans les pompes .....	54
Figure III. 25-Normes AFNOR E90-300 ou ISO 2372.....	56
Figure III. 26-la norme concernant les 3 principaux groupes machines [14] .....	56

## Chapitre IV : Etude expérimentale

Figure IV.1-La pompe 60-P002 .....	58
Figure IV.2-ACCÉLÉROMÈTRE TYPE 4535-B [49] .....	59
Figure IV.3-VIBROTEST 60F (marque Brüel & Kjør) [49] .....	60
Figure IV.4-Direction des mesures. ....	61
Figure IV.5-niveaux vibratoires (la norme AFNOR 90-300) .....	62
Figure IV.6-Historique du palier d'accouplement .....	62
Figure IV.7-Historique du palier de butée .....	62
Figure IV 8-Suivi vibratoire de palier coté accouplement.....	63
Figure IV 9-Suivi vibratoire de palier coté butée.....	63
Figure IV 10-Spectre pris le : 30/12/2014.....	64
Figure IV 11-Spectre pris le : 28/03/2021.....	65
Figure IV 12-Spectre pris le : 26/01/2023.....	65
Figure IV 13-Spectre pris le : 10/12/2020.....	65

# Liste des tableaux

## **Chapitre II : Etude technologique de la pompe centrifuge**

Tableau II.1-Pièces d'une installation de pompe centrifuge et leurs fonctions. ....	20
Tableau II. 2-Classification des pompes centrifuges .....	24

## **Chapitre III : Généralités sur la maintenance et l'analyse vibratoire**

Tableau III.1-causes de dégradation des roulements .....	52
Tableau III. 2-Table de Reconnaissance des principales anomalies .....	55

## **Chapitre IV : Etude expérimentale**

Tableau IV.1-les relevés de vibration avec des débits différents.....	66
---	----

## Liste des abréviations

<b>OPEP</b>	Organisation des pays exportateurs de pétrole
<b>PIB</b>	Produit Intérieur Brut
<b>CSTF</b>	Centre de Stockage et de Transfert Facilité
<b>GNL</b>	Gaz naturel liquéfié
<b>GPL</b>	Gaz de pétrole liquéfié
<b>MPP</b>	Module traitement gaz
<b>SCN</b>	Station de Compression Nord
<b>SBC</b>	Station BOOSTING Centre
<b>SRGA</b>	Station de récupération des gaz associés
<b>SBS</b>	Station Boosting sud
<b>SCS</b>	Station de Compression Sud
<b>CTH</b>	Centre de Traitement des Huiles
<b>NC</b>	Commande Numérique
<b>AFNOR</b>	Association française de la normalisation
<b>ISO</b>	International Organisation for Standardization
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure
<b>SP4</b>	Service Point 4
<b>BCU</b>	bearing condition unit

# Nomenclature

<b>P</b>	La pression	Bar
<b>qv</b>	Débit	Mètres cubes par heure [ $m^3/h$ ]
<b>Ha</b>	Hauteur d'aspiration	Mètres [m]
<b>Hr</b>	Hauteur de refoulement	Mètres [m]
<b>Hm</b>	Hauteur manométrique	Mètres [m]
<b>H<sub>G</sub></b>	La hauteur géométrique	Mètres [m]
<b>ΔH</b>	Les pertes de charge dans la tuyauterie	Mètres [m]
<b>H<sub>TA</sub></b>	Hauteur Totale d'Aspiration	Mètres [m]
<b>HTR</b>	Hauteur Totale de refoulement	Mètres [m]
<b>H<sub>asp</sub></b>	Hauteur d'Aspiration	Mètres [m]
<b>H<sub>ref</sub></b>	Hauteur de refoulement	Mètres [m]
<b>η</b>	Rendement global	Pourcentage [%]
<b>P</b>	Puissance	Watt [W]
<b>p<sub>a</sub></b>	Puissance absorbée	Watt [W]
<b>P<sub>u</sub></b>	Puissance utile	Watt [W]
<b>G</b>	L'intensité de la pesanteur	Newton [N]× kilogramme $Kg^{-1}$
<b>ρ</b>	Masse volumique	Kilogramme par mètre cube [ $Kg/m^3$ ]
<b>U</b>	La vitesse tangentielle	Mètre par seconde [ $m/s$ ]
<b>N</b>	Nombres des tours par minute	Nombres des tours par minute [ $tr/min$ ]
<b>d</b>	Diamètre.	Mètres [m]
<b>W</b>	La vitesse relative	Mètre par seconde [ $m/s$ ]
<b>C</b>	La vitesse absolue	Mètre par seconde [ $m/s$ ]
<b>ω</b>	Vitesse angulaire	Radian par seconde [ $rad/s$ ]
<b>r</b>	Rayon	Mètres [m]
<b>π</b>	Le nombre π est une constante arrondie à 3,14	
<b>B</b>	L'angle relatif	Radians [ $rad$ ]
<b>A</b>	L'angle absolu	Radians [ $rad$ ]
<b>C<sub>u</sub></b>	La vitesse giratoire	Mètre par seconde [ $m/s$ ]
<b>C<sub>r</sub></b>	La vitesse méridienne	Mètre par seconde [ $m/s$ ]
<b>NPSH</b>	Net Positive Suction Head	Mètres [m]
<b>F</b>	La fréquence	Hz
<b>Φ</b>	Phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps	Radians [ $rad$ ]
<b>Fp</b>	Fréquence de passage	Hz
<b>Fe</b>	Fréquence d'engrènement	Hz

# Nomenclature

<b>Fr</b>	Fréquence de rotation	Hz
<b>N</b>	Nombres des dents	
<b>Cos</b>	Rapport du côté adjacent à l'hypoténuse	
<b>Sin</b>	Rapport du côté opposé à l'hypoténuse	

La vie est liée au transport de liquides, tout comme des segments vitaux de l'économie. Les pompes centrifuges sont des appareils essentiels dans de nombreux systèmes industriels et économiques, leur défaillance pouvant avoir de graves conséquences. Leur conception et leur fonctionnement peuvent être simples ou extrêmement complexes selon l'application. L'accent est mis sur les aspects haute technologie de l'ingénierie des pompes centrifuges, bien que la majorité des applications soient moins exigeantes.

La technologie des pompes centrifuges implique de nombreux phénomènes d'écoulement complexes qui impactent fortement leur efficacité, leur stabilité, leurs vibrations, leur bruit et la durabilité des composants. Une compréhension approfondie de ces phénomènes et de l'interaction de la pompe avec le système est essentielle pour assurer un fonctionnement fiable et optimiser les coûts du cycle de vie.

Dans ce contexte, une approche de maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire apparaît particulièrement adaptée pour la surveillance et le diagnostic des pompes centrifuges. En effet, les vibrations mécaniques générées par la machine reflètent son état de santé et permettent de détecter précocement l'apparition de défauts. L'analyse de ces signaux vibratoires, par des techniques de traitement du signal avancées, offre ainsi la possibilité d'optimiser la planification des opérations de maintenance et de réduire les coûts d'exploitation.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier en détail les potentialités de l'analyse vibratoire pour la maintenance conditionnelle d'une pompe centrifuge. Dans un premier temps, nous présenterons les principes théoriques et les méthodes de traitement du signal associées à cette approche. Nous caractériserons ensuite expérimentalement le comportement vibratoire de la pompe dans différentes configurations de fonctionnement et en présence de défauts représentatifs. Cela nous permettra de développer des méthodologies d'analyse avancées, intégrant notamment des approches prédictives, afin de fiabiliser le diagnostic et la prévision des défaillances.

Notre mémoire se compose de quatre chapitres suivants :

- Un premier chapitre : **Présentation de Sonatrach et champ de Hassi R'mel.**
- Un deuxième chapitre : **Étude technologique de la pompe centrifuge.**
- Un troisième chapitre : **Généralités sur la maintenance et l'analyse vibratoire.**
- Pour le quatrième chapitre : **Etude expérimentale.**

**Chapitre I : Présentation de Sonatrach  
Et Champ De Hassi R'mel**

## I.1-Introduction

Le secteur des hydrocarbures et du gaz est l'un des piliers de l'économie mondiale. C'est une industrie stratégique qui joue un rôle essentiel dans l'approvisionnement énergétique de la planète. À l'échelle mondiale, ce secteur représente une part importante du commerce international, des investissements et de l'emploi. Parmi les plus grands pays producteurs on peut citer l'Algérie, l'Arabie Saoudite, les États-Unis, la Russie, le Canada et l'Iran. [45]

En Algérie, les hydrocarbures constituent la principale source de revenus du pays. L'Algérie est l'un des premiers producteurs de gaz naturel en Afrique et fait partie des membres fondateurs de l'OPEP. [45] Le secteur pétrolier et gazier représente environ 20% du PIB algérien et 95% des exportations. Les principales régions productrices sont le Sahara et les bassins sédimentaires du Sud et de l'Est du pays. Parmi ces régions, on retrouve la région de Hassi R'Mel, qui est gérée par de Sonatrach. [46]

## I.2-Définition de l'entreprise Sonatrach



*Figure. I.1-Logo de Sonatrach [3]*

Sonatrach (« Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures) est une entreprise publique algérienne et un acteur majeur de l'industrie pétrolière. Créée le 31 décembre 1963, Sonatrach est une compagnie nationale algérienne d'envergure internationale ; c'est la clé de voûte de l'économie algérienne. Elle est la plus importante compagnie d'hydrocarbures en Algérie et en Afrique. L'entreprise emploie 41 204 salariés, 120 000 avec ses filiales, la production, le transport par canalisation, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés. Elle opère en Algérie et dans plusieurs régions du monde : en Afrique (Mali, Niger, Libye,

Egypte), en Europe (Espagne, Italie, Portugal, Grande Bretagne) en Amérique Latine (Pérou) et aux USA. Sonatrach est la première entreprise du continent africain. Elle est classée 12<sup>ème</sup> parmi les compagnies pétrolières mondiales. Elle est également 4<sup>ème</sup> exportateur mondial de gaz naturel liquéfié (GNL), 3<sup>ème</sup> exportateur mondial de gaz de pétrole liquéfié (GPL).

En 2009, son chiffre d'affaires s'élevait à 77 milliards de dollar. Par ce chiffre d'affaire, elle avait devancé la filiale sud-africaine de l'assureur Old Mutuel et maintenait son rang mondial de 12<sup>ème</sup> groupe pétrolier, de 2<sup>ème</sup> exportateur de GNL-GPL et 3<sup>ème</sup> exportateur de gaz naturel. En adoptant une stratégie de diversification, la Sonatrach se développe aussi dans les activités de (génération d'électricité, d'énergies nouvelles et renouvelables, de dessalement de l'eau de mer, de recherche et d'exploitation minière...). [1]

### **I.3-Présentation de la région de HASSI R'MEL**



*Figure. I.2- Une vue du complexe industriel de Hassi R'mel [3]*

Le champ gazier de Hassi R'Mel est le pôle économique le plus important au niveau national et international. Il est l'un des plus grands gisements de gaz à l'échelle mondiale, on le considère comme le poumon de l'Algérie, il est réparti en trois secteurs : Nord, Centre et Sud. [2]

### **I.4-Situation géographique du champ de Hassi R'mel**

Hassi R'Mel, port du désert, se trouve à 550 Km au sud d'Alger, entre les wilayas de Ghardaïa et Laghouat. Dans cette région relativement plate du Sahara, Le paysage est constitué

D'un vaste plateau rocailleux, avec un climat sec et une faible pluviométrie (180 *mm* par an) et une humidité moyenne de 19% en été et 34% hiver. Les amplitudes thermiques sont importantes et les températures varient entre  $-5^{\circ}\text{C}$  en hiver et  $+45^{\circ}\text{C}$  en été [2]. La région est dominée par des vents violents qui soulèvent le sable jusqu'à 110 *Km* d'altitude et réduisent la visibilité à 15 *m* [27]

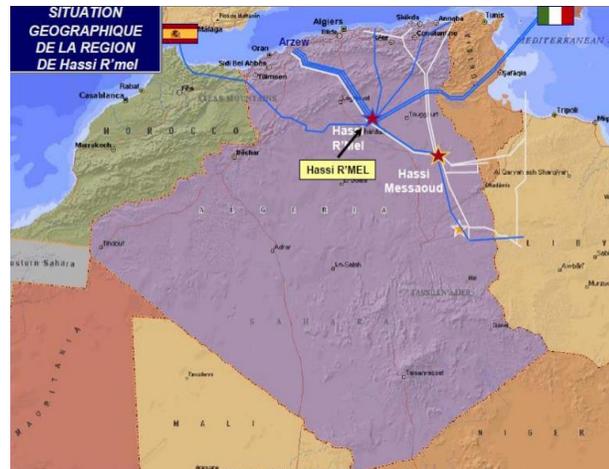


Figure. I.3-Situation géographique de la région de Hassi R'Mel [27]

Le gisement de Hassi R'Mel est l'un des plus grands gisements de gaz à l'échelle mondiale. Il a une forme d'ellipse qui s'étale sur plus de 3500 *Km*<sup>2</sup>, 70 *Km* du Nord au Sud et 50 *Km* d'Est en Ouest, il se situe à une profondeur de 2200 *m*, sa capacité est de l'ordre de 3000 milliards mètres cubes récupérables.

Le gisement de Hassi R'mel contient les éléments suivants :

- Gaz naturel
- Gaz de pétrole liquéfié GPL (c'est un gaz sous forme liquide)
- Condensat – Gazoline – Liquide

Cette richesse naturelle est convoitée par plusieurs entreprises nationales et étrangères pour tirer profit de son exploitation et faire des plans d'investissement tel que SONATRACH, SONELGAZ, ENGTP, GENERAL ELECTRIC, NOUVO PIGNONE, JGC ... etc. [28]

## I.5-Historique et développement du champ de Hassi R'mel

Les réserves importantes révélées par le gisement découvert, constituent le socle de l'économie nationale et placent le pays parmi les 4 plus importants producteurs gaziers dans le monde. Notons également que le gisement de Hassi R'mel est cerné par un anneau d'huile plaçant le champ parmi les plus importants producteurs du sud du pays.

Le développement du champ de Hassi R'mel est marqué par des étapes importantes :

- **Première étape :**

La Réalisation d'une petite unité de traitement de gaz de 1,3 milliards de  $m^3$  par an, a eu lieu en 1961. Celle-ci a coïncidé avec la construction de la première usine de liquéfaction de gaz. En 1969 cette capacité a été portée à 4 milliards de  $m^3$  par an.

- **Deuxième étape :**

La capacité de traitement du champ de Hassi R'mel, après la nationalisation des hydrocarbures en 1971, a atteint 14 milliards de  $m^3$  par an

- **Troisième étape :**

Cette période a permis de concrétiser un plan de développement important qui a permis au champ d'être en mesure de répondre aux besoins énergétiques du pays ainsi qu'aux besoins de nos clients. Ce plan a permis également de doter Hassi R'Mel d'un modèle d'exploitation et de pouvoir optimiser la récupération de différents produits.

- **1975-1980 :** Mise en œuvre et réalisation du Plan Directeur de Développement qui visait les objectifs suivants :
  - Quatre usines de traitement de gaz dont la capacité nominale unitaire est de 20 milliards de  $m^3$  par an de gaz sec (module 1, 2, 3 et 4).
  - Deux stations de réinjection de gaz dont la capacité nominale unitaires est de 30 milliards de  $m^3$  par an de gaz sec (station nord et sud).
  - D'un centre de stockage et de transfert de condensât et de GPL (CSTF).
- **1981- 1993 :** Réalisation et mise en service de cinq (05) centres de traitement d'huile.
- **1995 -1999 :** Mise en service des unités de déshydratation de gaz de SBAA (ADRAR) et IN SALAH.
- **1999 :** Réalisation et mise en service de l'usine de récupération des gaz associés.
- **2001 :** mise en œuvre de projet « Boosting Station 1 ».

- **2005** : Mise en service du « Boosting Station 1 ».
- **2009** : l'entrée en production du projet « Boosting Station 2 ».
- **2020** : mise en œuvre de projet « Boosting Station 3 ».

Actuellement la capacité totale de traitement est de 98 milliards  $m^3$  par an. La réalisation de ces objectifs a nécessité la mise en œuvre de :

- ✓ Quatre usines de traitement de gaz de capacité nominale unitaire de 20.109  $m^3$  /an de gaz sec nommées modules (I-II -III –IV).
- ✓ Deux stations de réinjections de gaz de capacité nominale unitaire de 30 milliards de  $m^3$ /an de gaz sec (station nord et sud).
- ✓ Un centre de stockage et de transfert du condensât et du GPL (CSTF) avec une capacité de 80 000  $m^3$  de GPL et 285 000  $m^3$  de condensât.
- ✓ Pose d'un réseau de collecte de plus de 2 000 Km.
- ✓ Construction d'un réseau routier de plus de 400 Km pour desservir les puits et les installations de surface.

Parallèlement à ce mode de transport, l'Algérie a pu transporter son gaz par des gazoducs reliant directement Hassi R'mel à l'Europe, c'est ainsi qu'elle exploite actuellement le fameux gazoduc transméditerranéen qui relie l'Algérie à l'Italie et la Slovénie via la Tunisie. [3,28]

## **I.6-Présentation des secteurs de HASSI R'mel**

Le plan d'ensemble des installations gazières implantées sur le champ de Hassi R'mel est élaboré de façon à avoir une exploitation rationnelle du gisement et pouvoir récupérer le maximum de liquide. Les installations mises en œuvre sont comme suit :

### **a) Secteur Nord**

Il comprend :

- 01 module traitement gaz MPP 2 .
- 01 L'unité de dépropanisations.
- 01 SCN (Station de Compression Nord). [3]

### **b) Secteur Centre**

Il comprend :

- 03 modules traitement gaz 0, 1 et, 4.
- 01 Unité Commune au module 0 et 1.

- 01CSTF (Centre de Stockage et de Transfert par facilité).
- 01 Unité de phase B.
- 01 SBC (Station BOOSTING Centre).
- 01 (SRGA) (Station de récupération des gaz associés). [3]

c) **Secteur Sud**

Il comprend :

- 01 Module traitement gaz MPP 2 .
- 01 Station Boosting sud SBS.
- 01 SCS (Station de Compression Sud).
- 02 Unité de traitement de gaz CTG de Djebel-Bissa.et de HR Sud. [3]

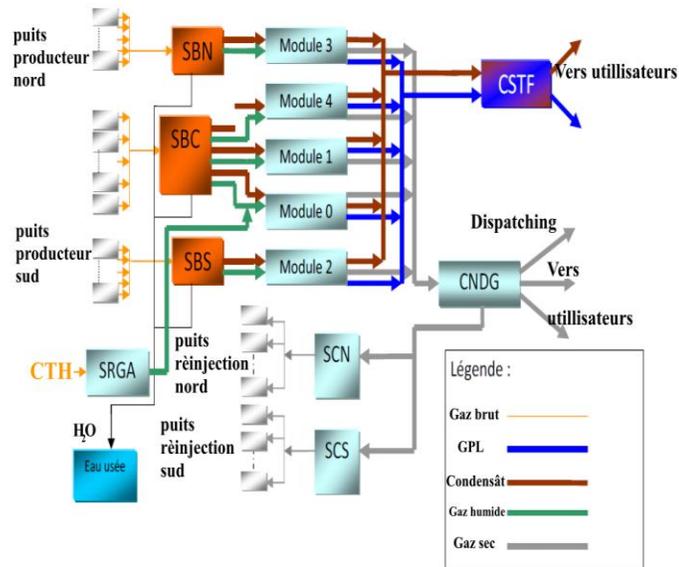


Figure. I.4-Schema Du Processus Industriel A Hassi R'mel. [3]

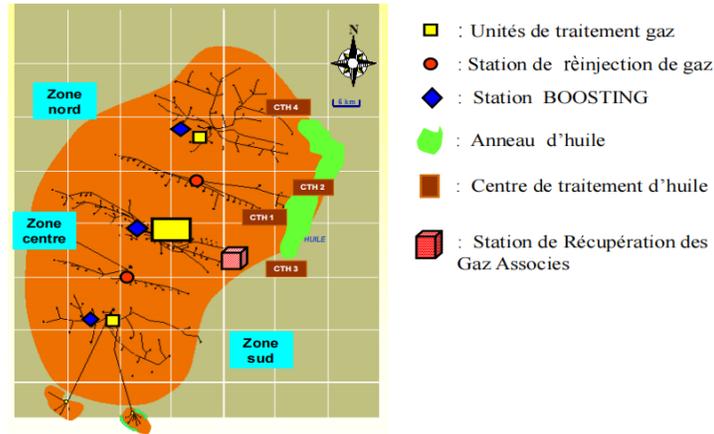


Figure. I.5-Le champ gazières de Hassi R'mel [1]

### I.7-Organisation de la direction régionale de HR

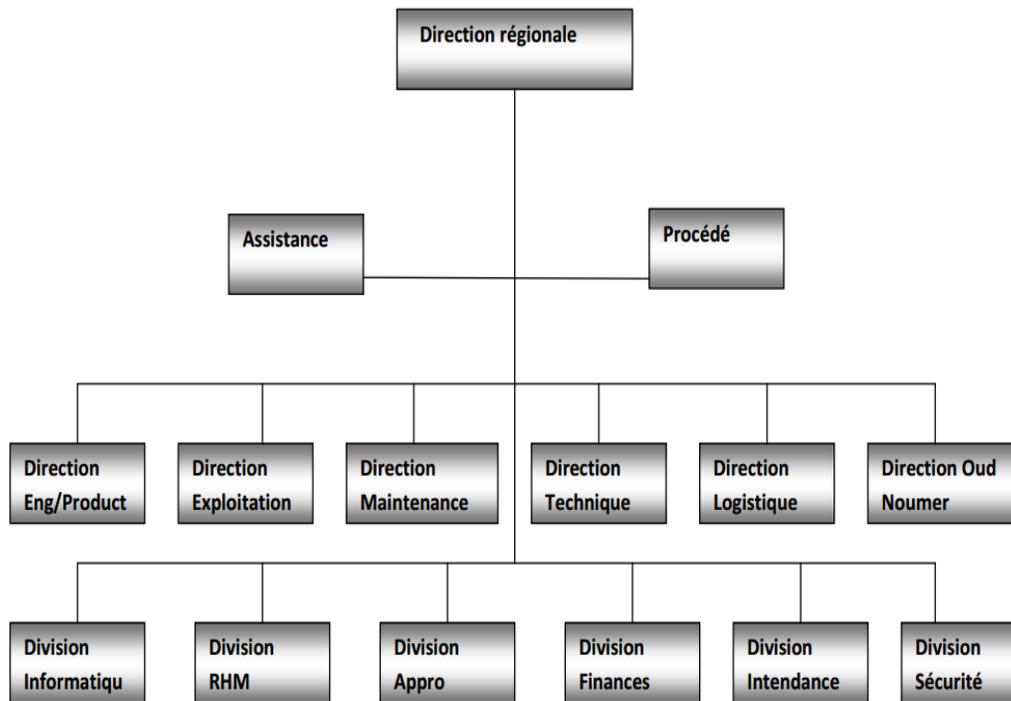


Figure. I.6-Organigramme administratif. [3]

- **Direction régionale**

Le développement et l'exploitation des hydrocarbures sont les objectifs principaux visés par la direction régionale afin de répondre à son plan de change convenablement.

- **Missions et taches des structures :**

- secrétariat régional

- assistante au directeur régional.

- **Division approvisionnement**

Elle a pour but l'approvisionnement ; le développement et la mise en disposition des mariales, de l'équipement, outillage de construction et de gros engins.

- **Direction technique**

Elle a comme mission la planification, le développement, l'organisation et la mise en œuvre d'une capacité de construction pétrolière répondant aux besoins de développement du champ de HR

- **Direction engineering et production**

Elle a pour but la planification du développement, l'organisation et la mise œuvre des services techniques opérationnels et d'intervention sur toutes les installations des puits et le centre de traitement d'huile (CTH).

- **Direction d'exploitation**

Sa tâche principale est la réalisation des programmes de production, de traitement et d'injection des hydrocarbures établies par la région.

- **Direction maintenance**

Elle a pour but la planification de développement, l'organisation et la mise en œuvre des réserves de maintenance pétrolière liée aux besoins actuels et futurs de la région dans différentes activités : mécanique, électromécanique, électricité et instrumentation.

- **Direction logistique**

Elle a pour objectif la réalisation des travaux non pétroliers et de génie civil, l'entretien de tous les locaux et logement, électricité bâtiment, plomberie et menuisier.

- **Division de sécurité**

Le contrôle, l'organisation, et le maintien d'un niveau de sécurité sont les Principales taches de la division.

- **Division informatique**

Elle a pour objectif la gestion, le développement et la maintenance de l'outil Informatique dans toutes les régions.

- **Division intendance**

Elle est responsable de la prestation de services de restauration, l'hébergement et la gestion du patrimoine.

- **Division finances**

Elle s'occupe de la prestation de service de trésorerie et comptabilité générale.

- **Division Ressources Humaines et Moyens**

L'organisation et le contrôle de l'activité des régions au niveau du recrutement, formation et gestion de personnels, prestations sociales, activité culturelle et administration générale.

### **I.8-Centre de Stockage et Transfert facilité (CSTF)**

C'est un centre de stockage des liquides le GPL et le condensât provenant des modules de traitement de gaz MPP 0, I, II, III, IV et le centre de traitement de gaz Djebel -Bissa, et de transfert de ces deux produits vers le terminal d'Arzew. [3]



*Figure. I.7-Localisation du CSTF [3]*

Il est composé de trois sections à savoir :

- Section utilités.
- Section de stockage et transfert du GPL.
- Section de stockage et transfert du condensât.

## **I.8.1-Section de stockage et transfert du GPL (gaz de pétrole liquéfié)**

### **I.8.1.1-Définition du GPL**

Le gaz du pétrole liquéfié est un mélange gazeux, composé essentiellement de propane (C3) et de butane (C 4) à température ambiante et pression atmosphérique, mais il peut demeurer à l'état liquide sous des pressions relativement basses (4 -18 bars). [3]

### **I.8.1.2-Les réservoirs du GPL**

Le site de stockage et de transfert de GPL est composé des installations suivantes :

- 12 sphères d'une capacité nominal de  $6500 \text{ m}^3$  chacune avec une capacité totale de stockage de l'ordre de  $78000 \text{ m}^3$  .
- 12 pompes boosters (P001 A/B/C/D/E/F) : centrifuges à un seul étage, installées en parallèle, débit  $165 \text{ m}^3/h$  à  $P = 15$  à 18 bars chacune dont 3 pompes (A/B/C) ont une deuxième fonction de transfert de GPL entre les sphères.
- 6 pompes d'expédition (P002 A/B/C) : centrifuges à un seul étage, débit  $350 \text{ m}^3/h$  à  $P = 25$  à 34 bars chacune.
- 5 groupes turbocompresseurs avec 12 aéroréfrigérants de GPL. [3]

## **I.8.2-Section de stockage et de transfert du condensat**

### **I.8.2.1-Définition du condensat**

C'est un mélange d'hydrocarbures lourds (C5 et plus).

### **I.8.2.2-Les réservoirs du condensat situés dans le CSTF**

Il existe 7 Bacs qui ont une forme cylindrique dont on distingue 3 Bacs américains et 4 Bacs japonais. [3]



*Figure. I.8-le réservoir du condensat (Bac) [3]*

Côté américain :

- 3 Bacs : avec une capacité de stockage de 35000  $m^3$  chacun.
- 3 pompes d'expéditions P102 (A /B/C) : centrifuge à trois étages, installées en parallèle, débit :1135  $m^3/h$  à P= 20 bars.
- 2 pompes P104 (A/B) : volumétrique à quatre étages, débit :283  $m^3/h$ , pour transfert des condensats entre les réservoirs

Côté japonais :

- 4 Bacs : avec une capacité de stockage de 45000  $m^3$  chacun
- 3 pompes boosters P003 (A/B/C) : centrifuge à un seul étage, débit :1150  $m^3/h$  à P = 5.4 bars, pour suralimenter les pompes P004 et assurer le transfert entre les réservoirs.
- 3 pompes d'expédition P004 (A/B/C) : centrifuge radial à un seul étage,  
Débit :1150  $m^3/h$  à 18,9→20 bars

## **I.9-Conclusion**

Ce chapitre a fourni une présentation de l'entreprise Sonatrach et de son exploitation du champ gazier de Hassi R'mel, l'un des plus importants gisements d'Algérie. Et la situation géographique et son historique de développement, ainsi que l'organisation et la structure des différents secteurs qui le composent. Nous avons mis en lumière l'importance stratégique du Centre de Stockage et de Transfert Facilité (CSTF).

## **Chapitre II : Etude technologique de la pompe centrifuge**

## II.1-Introduction

La vie est liée au transport des liquides, de même que des segments vitaux de l'économie. Les dispositifs de pompage, qu'il s'agisse du cœur humain, d'un alimentateur de chaudière ou de la pompe d'eau de refroidissement d'une voiture, font toujours partie d'un système plus ou moins complexe où une défaillance de la pompe peut entraîner de graves conséquences. Pour sélectionner, faire fonctionner ou même concevoir une pompe, il est utile, voire essentiel, de comprendre le système. Selon l'application, une pompe centrifuge peut être un dispositif simple qui pourrait être construit dans un garage avec un minimum de connaissances. [4]

## II.2-Définition d'une pompe

En termes simples, une pompe est une machine utilisée pour déplacer un liquide à travers un système de tuyauterie et pour augmenter la pression du liquide. Une pompe peut être davantage définie comme une machine qui utilise plusieurs transformations énergétiques pour augmenter la pression d'un liquide. La pompe centrifuge illustrée à la Figure II.1 illustre cette définition

## II.3-Notion d'un Système de pompage

Une installation de pompage (figure II.1) est constituée des principaux éléments suivants :

- Une pompe (ou plusieurs)
- Une conduite d'aspiration
- Une conduite de refoulement
- Un réservoir d'aspiration
- Un réservoir de refoulement
- Appareils de mesure (capteurs)
- Appareil de réglage de débit (Vanne)

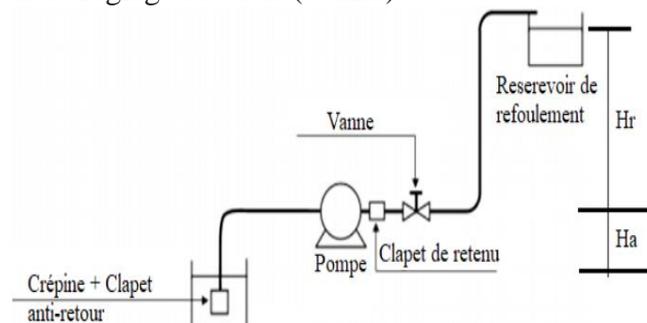


Figure II.1-Installation de pompage [34]

Dans une installation de pompage ; la longueur de la conduite de refoulement est plus grande que celle de la conduite d'aspiration et le diamètre de la conduite d'aspiration est plus grand que celui de la conduite de refoulement. [34]

## II.4-Les différents types de montages des pompes

### II.4.1-Montage d'une pompe immergée

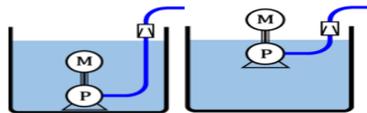


Figure II.2-Montage d'une pompe immergée

### II.4.2-Montage d'une pompe en charge

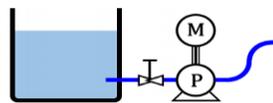


Figure II.3- Montage d'une pompe en charge

### II.4.3-Montage d'une pompe en dépression

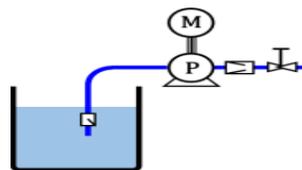


Figure II.4-Montage d'une pompe en dépression

## II.5-Classification des pompes

Les pompes sont divisées en deux types fondamentaux en fonction de la manière dont elles transmettent de l'énergie au fluide pompé : cinétique ou à déplacement positif. [6]

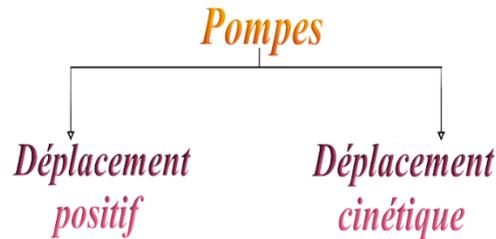


Figure II.5- Types de pompes.

### II.5.1- Les pompes à déplacement cinétique

Dans les pompes à déplacement cinétique, une force centrifuge exercée par l'élément rotatif, appelé impulseur, "propulse" l'énergie cinétique au fluide, déplaçant ainsi le fluide de l'aspiration de la pompe vers le refoulement. [6]

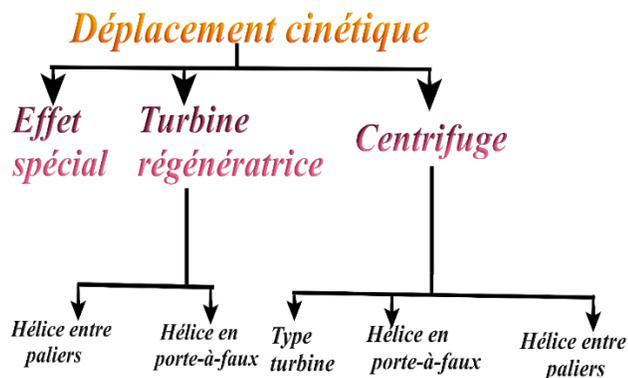


Figure II.6-Types de pompes (Déplacement cinétique) [6]

### II.5.2- Les pompes à déplacement positif

Dans les pompes à déplacement positif utilisent l'action de va-et-vient d'un ou de plusieurs pistons, ou une action de compression de pignons enchevêtrés, de lobes ou d'autres corps mobiles. [6]

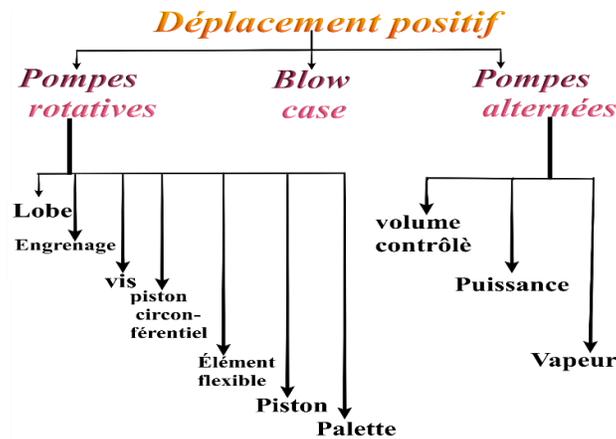


Figure II.7-Types de pompes (Déplacement positif) [6]

## II.6-La pompe centrifuge

### II.6.1-Introduction

En 1689, le physicien Denis Papin inventait la pompe Centrifuge, la pompe la plus utilisée de nos jours à travers le monde [26]. Une pompe centrifuge est l'un des exemples les plus polyvalents de turbomachines. Peut-être que la plus petite pompe centrifuge est celle utilisée pour soulever de l'eau sur une hauteur d'environ 20 m dans une cascade d'eau décorative d'un salon domestique, en faisant circuler à peine quelques millilitres d'eau par seconde. La puissance requise pour une telle pompe peut être de l'ordre de quelques milliwatts. À l'autre extrémité du spectre, il existe des pompes centrifuges pour des applications telles que l'approvisionnement en eau potable des villes, la manipulation de la pâte dans l'industrie papetière, la manipulation du pétrole brut dans les puits de pétrole, etc. La consommation d'énergie de telles pompes peut être de l'ordre de 1 à 1,5 MW par étage. [7]

### II.6.2-Définition des pompes centrifuges

Les pompes centrifuges, dans sa forme la plus simple est constituée d'une roue d'ailettes radiales et tournant à l'intérieur d'une enveloppe appelée corps de pompe. Elles fonctionnent en utilisant une roue rotative pour créer une force centrifuge pour transmettre au liquide de l'énergie cinétique, qui est ensuite transformée en pression qui déplace à tuyau de refoulement. [30]

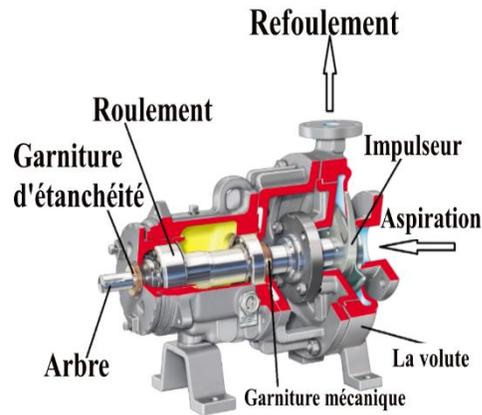


Figure II.8-une pompe centrifuge

### II.6.3-Construction et principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge

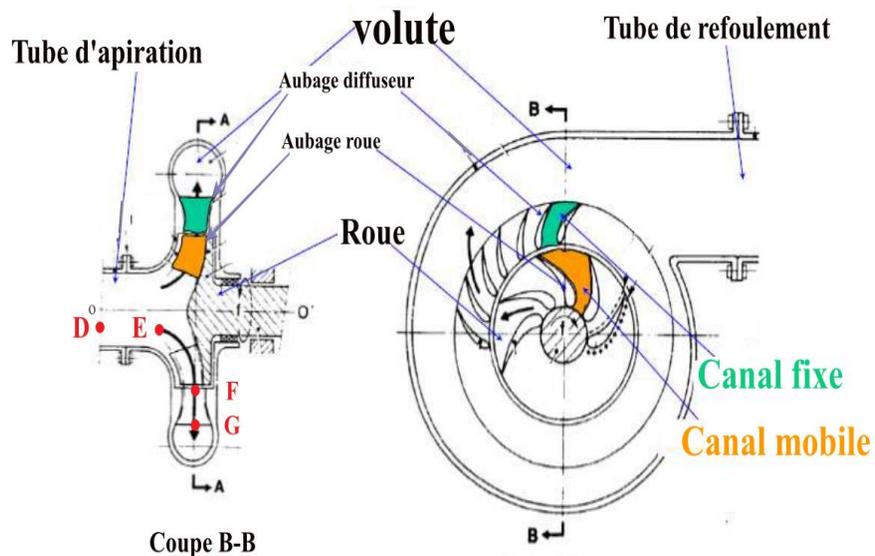


Figure II. 9- Construction d'une pompe centrifuge

**Le distributeur :** Il est le premier organe que le fluide rencontre sur sa trajectoire. Son rôle est de conduire le fluide depuis la section d'entrée de la machine « point D » jusqu'à l'entrée du rotor « point E », en lui assurant une vitesse et une direction convenables pour Minimisation des pertes de charge Uniformisation de l'écoulement Réduction des vibrations et de l'usure Optimisation du rendement global.

**Rotor (Roue) :** Dans une pompe, la roue est l'élément le plus important dans lequel s'effectue l'échange des énergies utilisé pour augmenter l'énergie cinétique du flux. Les indices « E » et « F » caractériseront respectivement les grandeurs relatives à l'entrée du rotor et à sa sortie, celle-ci constituant aussi l'entrée du diffuseur.

**Diffuseur :** Le diffuseur ou l'amortisseur a le rôle de collecter le fluide à la sortie du rotor et de l'amener dans la section de sortie de la machine à la vitesse désirée. C'est aussi l'organe qui est destiné à transformer l'énergie cinétique en pression. Les indices « F » et « G » caractérisent respectivement les sections d'entrée et de sortie du diffuseur, cette dernière pouvant être aussi la section de sortie de la machine. [33,34,35]. Le canal fixe joue un rôle essentiel dans la performance et le rendement d'une pompe centrifuge en participant à la décélération et à la redirection contrôlée de l'écoulement du fluide. Sa conception est donc un élément clé dans l'optimisation du fonctionnement de la pompe.

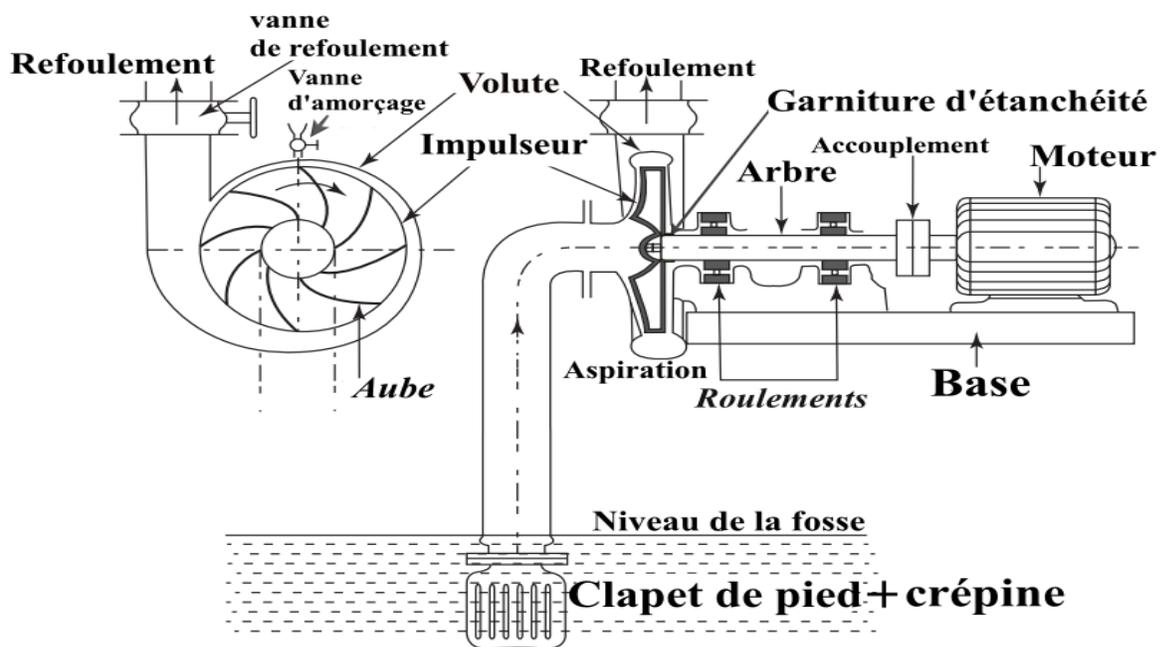


Figure II.10- Schéma d'une installation de pompe centrifuge. [7]

Un schéma d'installation d'une pompe centrifuge est présenté à la figure II.10. La principale partie de la pompe centrifuge est son impulseur (avec les pales) enfermé dans un carter et monté sur l'arbre. L'impulseur et l'arbre sont entraînés par le moteur. Le schéma comprend un tuyau d'aspiration, dont l'extrémité inférieure se trouve en dessous du niveau d'eau dans la fosse et dont l'extrémité supérieure est reliée à l'œil de l'impulseur. Un clapet anti-retour est connecté à

l'extrémité inférieure du tuyau d'aspiration. Le moteur d'entraînement est le moteur principal nécessaire, comme indiqué dans le schéma. [7]

Lorsque le moteur entraîne l'arbre et l'impulseur de la pompe, l'impulseur exerce une force centrifuge sur l'eau présente entre ses pales. En conséquence, l'eau est forcée de se déplacer radialement vers l'extérieur. Ainsi, un vide, une aspiration ou une "traction" est créé au centre ou à l'œil de l'impulseur. En raison de cela, l'eau dans le tuyau d'aspiration est aspirée dans l'impulseur et le pompage se poursuit. [7]

Au fur et à mesure que le pompage se poursuit, l'eau pénètre dans le carter spiralé tout autour de la périphérie de l'impulseur. Le carter spiralé a une section transversale qui augmente continuellement. Cette augmentation de la surface peut servir simplement à accueillir la quantité incrémentielle d'eau provenant de la périphérie de l'impulseur, ou en plus, elle peut servir à diffuser davantage la vitesse de l'eau et augmenter sa pression (si l'augmentation de la surface est conçue à cet effet). [7]

*Tableau II.1-Pièces d'une installation de pompe centrifuge et leurs fonctions. [7]*

N°d'ordre	Pièce	Fonctions
1	<b>Moteur</b>	Fournir de l'énergie à la pompe centrifuge.
2	<b>Arbre</b>	Transférer la puissance du moteur à l'impulseur.
3	<b>Roulements</b>	Les roulements limitent le mouvement relatif de l'arbre (rotor) et réduisent le frottement entre l'arbre rotatif et le stator.
4	<b>Impulseur</b>	Transmettre de l'énergie de l'eau.
5	<b>Volute</b>	La volute est un entonnoir incurvé qui augmente de surface à l'approche de l'orifice de décharge. La <b>volute</b> d'une pompe centrifuge est l'enveloppe qui reçoit le fluide pompé par la roue, ralentissant le débit du fluide.
6	<b>Tuyau de refoulement</b>	Livrer l'eau de la pompe à un réservoir.
7	<b>Tuyau d'aspiration</b>	Aspirer l'eau depuis la fosse jusqu'à l'impulseur
8	<b>Clapet de pied + crépine</b>	1. Clapet de pied : Agir comme une soupape. 2. crépine : Empêcher toute particule solide
9	<b>Vanne d'amorçage</b>	Faciliter le processus d'amorçage (c'est-à-dire remplir l'impulseur et le carter avec de l'eau).

10	<b>Vanne de refoulement</b>	1. Isoler la pompe du reste du système pour la maintenance, la réparation ou même lors de la fermeture. 2. Contrôler le débit.
11	<b>Base</b>	Fournir un support pour l'ensemble de l'unité.
12	<b>Garniture d'étanchéité et garniture mécanique</b>	Les pompes centrifuges sont fournies avec des bagues de garniture ou une garniture mécanique qui aident à empêcher la fuite du liquide pompé.

#### II.6.4-Types des roues dans les pompes centrifuges



Figure II. 11- Types des roues dans les pompes centrifuges [33]

➤ La roue d'une pompe centrifuge peut être de trois types de base :

- a) **Roue ouverte** : Les roues ouvertes ont les aubes libres des deux côtés. Les roues ouvertes sont structurellement faibles. Ils sont généralement utilisés dans des pompes de petit diamètre et peu coûteuses et des pompes manipulant des matières en suspension. [33]
- b) **Roue semi-ouverte**. Les aubes sont libres d'un côté et fermées de l'autre. Le carénage ajoute une résistance mécanique. Ils offrent également des rendements plus élevés que les roues ouvertes. Ils peuvent être utilisés dans des pompes de diamètre moyen et avec des liquides contenant de petites quantités de solides en suspension. [33]
- c) **Roue fermée**. Les aubes sont situées entre les deux disques, le tout dans une seule pièce moulée. Ils sont utilisés dans les grandes pompes à haut rendement et à faible hauteur d'aspiration nette requise. Les pompes centrifuges à roue fermée sont les pompes les plus utilisées pour traiter les liquides clairs. [33]

Les roues peuvent être soit :

- **Aspiration simple**. Une turbine à aspiration unique permet au liquide de pénétrer au centre des pales dans une seule direction. [33]

- **Double aspiration.** Une roue à double aspiration permet au liquide de pénétrer au centre des pales de la roue des deux côtés simultanément. Cela réduit les forces exercées sur l'arbre. [33]

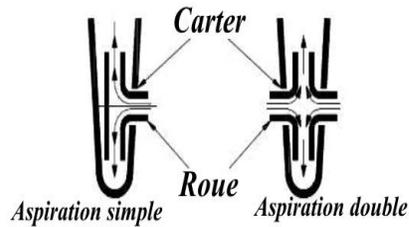


Figure II. 12- Types d'aspiration des roues dans les pompes centrifuges [33]

### II.6.5-La fabrication des pompes centrifuges

En raison de leurs surfaces courbées en trois dimensions complexes, les roues, les boîtiers à volute et les diffuseurs sont généralement fabriqués par moulage. Dans certaines applications, les roues et les diffuseurs sont fabriqués par fraisage NC. Les petites pompes sont souvent fabriquées en plastique. Il existe même des roues et des diffuseurs entièrement réalisés en tôle métallique. [4]



Figure II. 13-usine de fabrication des pompes centrifuges [32]

### II.6.6-Avantages et inconvénients de la pompe centrifuge

#### II.6.6.1-Avantages de la pompe centrifuge

- Une pompe centrifuge a un faible coût d'entretien [36]
- Construction simple, longue durée de service
- Débit de refoulement facile à ajuster
- Vitesse de rotation élevée

- Fonctionnement très silencieux grâce à un bon équilibrage des masses
- Refoulement continu sans pulsations
- Convient à des puissances élevées
- Ils sont résistants à l'usure grâce à la configuration de construction [37]

#### **II.6.6.2-Inconvénients de la pompe centrifuge**

- Risque de cavitation avec de l'eau chaude ou des pressions d'aspiration faibles
- Le débit volumétrique dépend de la pression de refoulement [39]
- A faible débit on a une grande hauteur de refoulement et le rendement diminue.

#### **II.6.7-Secteurs d'application des pompes centrifuges**

Grâce aux avantages énumérés ci-dessus, les pompes centrifuges peuvent être utilisées dans divers contextes d'application :

- ✓ **Secteur agricole** : les pompes centrifuges peuvent être utilisées pour tous les besoins de traitement de l'eau.
- ✓ **Secteur maritime** : pour soutenir les besoins de traitement des eaux de ballast pour assurer la sécurité et l'efficacité des manœuvres de navigation.
- ✓ **Secteur du traitement de l'eau** : utilisation cruciale dans toutes les phases du traitement des eaux usées et dans les processus de purification de l'eau dans les installations civiles et industrielles.
- ✓ **Industrie électronique et automobile** : les pompes peuvent être utilisées dans des procédés industriels complexes : c'est-à-dire dans la réalisation de circuits imprimés, dans le traitement de surface et dans les bains galvaniques.
- ✓ **Secteur pétrochimique** : la grande disponibilité des matériaux rend les pompes centrifuges adaptées au pompage de liquides caractérisés par des températures très élevées.
- ✓ **Secteur chimique** : les pompes centrifuges sont utilisées dans le cas du pompage de fluides hautement corrosifs. [38]

#### **II.6.8-Classification des pompes centrifuges**

Il existe de nombreux types et modèles de pompes qui sont utilisés dans différents environnements. Les méthodes de classification courantes sont les suivantes :

**1-Vitesse :** L'un des critères importants pour la classification est la vitesse spécifique de la pompe. Vitesse spécifique basse, (b) vitesse spécifique moyenne et (c) haute vitesse spécifique.

**2- Hauteur de refoulement :** Les pompes sont classées en pompes à faible hauteur (jusqu'à 15 m), à hauteur moyenne (15-40 m) et à grande hauteur (au-dessus de 40 m).

**3-Type de carter :** Le carter peut-être de type volute simple ou de type volute avec diffuseur.

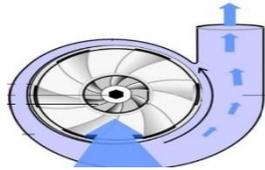


Figure II. 14- Conception du carter en volute [7].

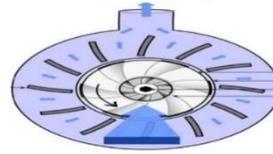


Figure II. 15-Conception du carter de diffuseur [7].

**4-Type d'impulseur :** l'impulseur peut être de type à une seule entrée ou de type à double entrée. En plus de cela, il existe d'autres types d'impulseurs tels que les impulseurs fermés, semi-ouverts ou ouverts.

**5-Nombre d'impulseurs :** Il peut y avoir deux ou plusieurs impulseurs sur le même arbre. Ceux-ci sont appelés pompes multi-étages, chaque étage ayant un impulseur.

**6-Sens d'écoulement :** Les pompes peuvent être de type à écoulement radial, à écoulement mixte ou à écoulement axial, selon le sens d'écoulement de l'eau dans l'impulseur.

**7-Type de matériau de construction :** Cette classification dépend du matériau de construction tel que la fonte, l'acier allié ou l'acier inoxydable. [7]

Tableau II. 2-Classification des pompes centrifuges [7]

N°d'ordre	Base de classification	Différents types
1	Vitesse spécifique	Pompes à vitesse spécifique faible, moyenne et élevée.
2	Hauteur	Pompes à faible, moyenne et haute hauteur.
3	Type de carter	Pompes à volute, à volute avec diffuseur
4	Type d'impulseurs	1. Impulseur à entrée unique, impulseur à double entrée. 2. Impulseurs de type fermé, semi-ouvert et ouvert.
5	Nombre d'impulseurs	Pompes mono-étagées, pompes multi-étages (2, 3, 4, étages).
6	Sens d'écoulement	Pompes à écoulement radial, à écoulement mixte, à écoulement axial.
7	Type de matériau	Pompes en fonte, pompes en acier allié, pompes en acier inoxydable.

## II.6.9-Caractéristiques générales des pompes centrifuges

### II.6.9.1- Le débit

Le débit  $Q_v$  fourni par une pompe centrifuge est le volume refoulé pendant l'unité de temps. Il s'exprime en mètres cubes par seconde ( $m^3/s$ ) ou plus pratiquement en mètres cubes par heure ( $m^3/h$ )

### II.6.9.2-La hauteur manométrique

On appelle Hauteur manométrique  $H$  d'une pompe, l'énergie fournie par la pompe à l'unité de poids du liquide qui la traverse. Si  $H_{TA}$  est la charge totale du fluide à l'orifice d'aspiration et  $H_{TR}$  la charge totale du fluide à l'orifice de refoulement, la hauteur manométrique de la pompe est :

$$H_m = H_G + \Delta H \quad (\text{II.1})$$

$H_G$  : La hauteur géométrique : est la différence verticale entre le niveau d'aspiration et le niveau supérieur où l'on propose de refouler le fluide.

$$H_G = H_{asp} + H_{ref} \quad (\text{II.2})$$

$\Delta H$  : Les pertes de charge dans la tuyauterie

### II.6.9.3-Le rendement

Le rendement  $\eta$  d'une pompe est le rapport de la puissance utile  $P$  (puissance hydraulique) Communiquée au liquide pompé à la puissance absorbée  $P_a$  par la pompe (en bout d'arbre) ou par le groupe (aux bornes du moteur). Si  $Q_v$  est le débit volume du fluide,  $\rho$  sa masse volumique et  $H$  la hauteur manométrique de la pompe, la puissance  $P$  et le rendement  $\eta$  sont donnés par :

$$P = Q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H \quad (\text{II.3})$$

$$\eta = \frac{Q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H}{P_a} \quad (\text{II.4})$$

#### ➤ Remarque

La courbe de rendement a une forme de cloche : au point de rendement maximal, le fonctionnement de la pompe est optimal. [41]

### II.6.9.4-La puissance absorbée et puissance utile (W)

La puissance absorbée ou la puissance consommée est la puissance disponible au niveau de l'arbre d'entraînement de la roue de la pompe. La puissance utile est la puissance transmise au fluide. Elle est définie par :

$$P_u = q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H_m \quad (\text{II.5})$$

Avec  $H_m$  est la hauteur manométrique de la pompe. [33]

### II.6.9.5-Le couplage des pompes

Il arrive parfois que la pression ou le débit d'une seule pompe ne répond pas aux exigences d'un client. Pour cela, il est judicieux de coupler plusieurs pompes pour créer des paramètres ( $P, q_v$ ) qui sont supérieurs qu'une seule pompe fonctionnant seule. Le couplage des pompes peut se faire en série ou en parallèle. [35]

- **Couplage de deux pompes en série**

Pour réaliser un couplage de deux pompes en série il faut lier l'orifice de refoulement de la première pompe à l'orifice d'aspiration de la deuxième pompe. [35]

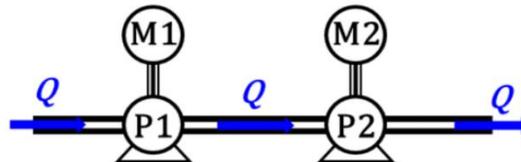


Figure II.16-Couplage de deux pompes en série.

Dans le couplage des pompes en série, on a :

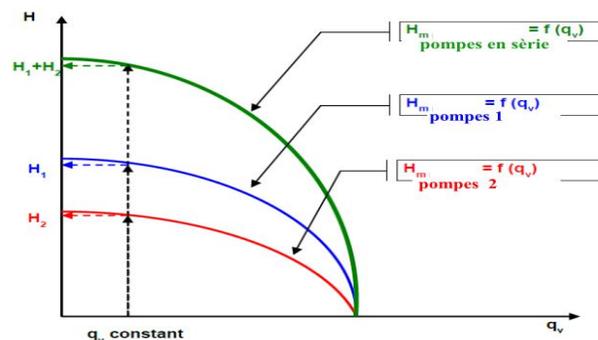


Figure II.17-Courbe caractéristique du couplage de deux pompes en série. [35]

$$Q_{vt \text{ série}} = Q_1 = Q_2 \quad (\text{II.6})$$

$$H_{mt \text{ série}} = H_1 + H_2 \quad (\text{II.7})$$

- **Couplage de deux pompes en parallèle**

Ce type de couplage est utilisé pour augmenter le débit refoulé en gardant la même hauteur initiale. Dans ce type de couplage, deux cas peuvent se présenter :

- Cas de deux pompes identiques (ayants les mêmes caractéristiques) :

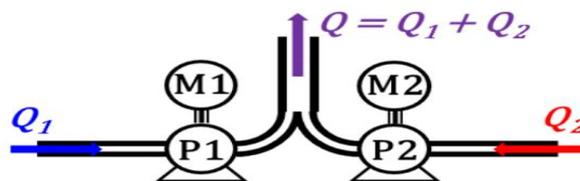


Figure II.18-Couplage de deux pompes en parallèle.

- Cas de deux pompes non identiques (n'ont pas les mêmes caractéristiques).

Dans le couplage des pompes en parallèle, on a :

$$Q_{vt \text{ parallèle}} = Q_1 + Q_2 \quad (\text{II.8})$$

$$H_{mt \text{ parallèle}} = H_1 = H_2 \quad (\text{II.9})$$

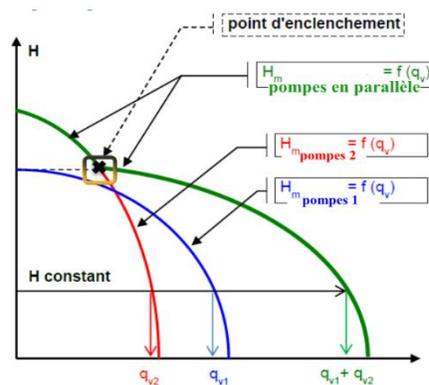


Figure II. 19-Courbe caractéristique du couplage de deux pompes en parallèle (cas de deux pompes identiques) [35]

### II.6.9.6-Le Diagrammes des vitesses « triangle des vitesses »

Soit une particule fluide **M** animée par la vitesse absolue du fluide **C**. Cette vitesse absolue est la résultante de la vitesse relative du fluide dans la roue **W** et la vitesse d'entraînement **U** (rotor) le mouvement du fluide à l'intérieur des canaux d'une roue à aubes est le résultat de deux mouvements :

- La rotation de la roue : représentée par la vitesse tangentielle à la roue **U** (appelée aussi vitesse périphérique, vitesse circonférentielle et vitesse d'entraînement). Elle est donnée par :

$$U = \omega \cdot r \text{ Avec } r = \frac{d}{2} \text{ et } \omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} = \frac{\pi \cdot N}{30} \quad (\text{II.10})$$

**N**: Nombre des tours par minute.

**d** : Diamètre.

- Le déplacement par rapport à l'aube : représenté par la vitesse relative **W**.

(La figure II.22) représente une roue d'une turbomachine sur laquelle sont tracés les vecteurs des vitesses (à l'entrée « indice 1 » et à la sortie « indice 2 »). La vitesse **C** est appelée la vitesse absolue, peut être déterminer par :

$$\vec{C} = \vec{U} + \vec{W} \quad (\text{II.11})$$

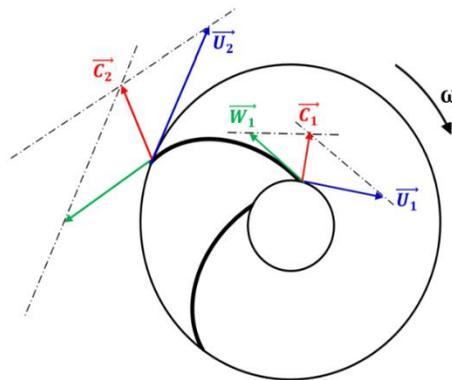


Figure II. 20- Diagrammes des vitesses sur une roue à entrer radiale [35]

On peut définir de plus :

- L'angle relatif de l'écoulement  $\beta$  (entre **U** et **W**)
- L'angle absolu de l'écoulement  $\alpha$  (entre **U** et **C**)
- La vitesse giratoire de l'écoulement :

$$C_u = C \cos \alpha \quad (\text{II.12})$$

- La vitesse méridienne (débitante) :

$$C_r = C \sin \alpha \quad (\text{II.13})$$

$U$  est tangente au cercle

$W$  est tangente à la paroi

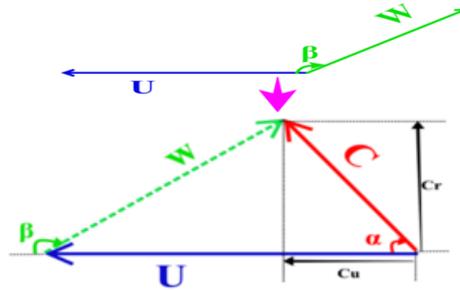


Figure II. 21- la Création le triangle des vitesses [35]

Ce qui permet de dessiner le triangle des vitesses à l'entrée et à la sortie :

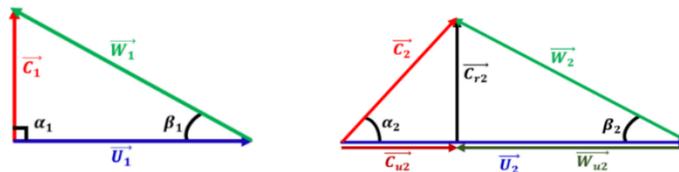


Figure II. 22- Triangle des vitesses entrée et sortie d'une pompe radiale. [35]

Pour une turbomachine à entrer radiale, la vitesse absolue  $C$  est perpendiculaire à la vitesse d'entraînement  $U$  et égale à sa composante radiale vu que la composante tangentielle est nulle. Donc :  $(C_1 = C_{r1}, \alpha_1 = 90^\circ)$ . [35,42]

### II.6.9.7-LE NPSH

Le critère qui sert à définir la pression nécessaire à l'aspiration pour obtenir un bon fonctionnement de la Pompe, c'est à dire pour maintenir en tout point du fluide une pression supérieure à la pression de vapeur saturante, est le « **NPSH** » (sigle de l'abréviation anglo-saxonne de « Net Positive Suction Head »).

Cette caractéristique, donnée par le constructeur est qualifiée de « **NPSH requis** ». Elle tient compte en particulier de la chute de pression que subit le fluide lors de son accélération à l'entrée de la roue. La pompe ne fonctionnera correctement que si la pression totale à l'entrée P entrée est supérieure à la somme  $P_{\text{vapeur}} + \text{NPSH}_{\text{requis}}$ . On appelle « **NPSH disponible** » la différence entre la pression totale à l'entrée et la pression de vapeur saturante :

$$NPSH_{\text{disponible}} = P_{\text{entrée}} - P_{\text{vapeur}} \quad (\text{II.14})$$

Pour qu'une pompe fonctionne normalement (sans cavitation), il faut que le **NPSH** disponible (calculé) soit supérieur au **NPSH** requis (indiqué par le constructeur).

$$NPSH_{\text{disponible}} > NPSH_{\text{requis}}$$

Les conditions d'aspiration sont d'autant meilleures que la différence entre les deux est grande. [40]

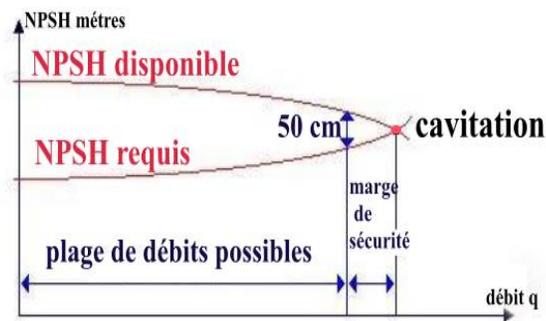


Figure II. 23-Diagramme montrant l'intersection de la courbe de NPSH (disponible) [40]

#### II.6.9.8-Le Phénomène de cavitation



Figure II. 24-Phénomène de cavitation de pompe centrifuge [40]

La cavitation est la vaporisation du liquide contenu dans la pompe quand il est soumis à une pression inférieure à la tension de vapeur correspondant à sa température.

Ce phénomène se produit à l'orifice d'aspiration de la pompe ; des bulles apparaissent dans les zones où la pression est la plus faible (entrée des aubes de roue des pompes centrifuges) : elles sont transportées dans les zones de pressions plus fortes où se produit leur recondensations. Des

implosions se produisent alors à des fréquences élevées et créent des surpressions locales très élevées (jusqu'à des centaines de bars). [40]

➤ **Les conséquences de cavitation**

La cavitation est un phénomène à éviter absolument, car il entraîne de graves conséquences :

- Érosion du matériau pouvant aller jusqu'au perçage des aubes de turbine des pompes centrifuges.
- Augmentation du bruit et des vibrations générées par la pompe.
- Chute des performances des pompes avec diminution importante de la hauteur manométrique totale, du débit et du rendement. [43]



Figure II. 25- Dégâts de la cavitation [43]

➤ **Conseils pour éviter la cavitation**

On peut dresser une liste de conseils à respecter, si le procédé le permet, pour éviter la cavitation :

- Préférer si possible les montages de pompes en charge.
- Éviter de transporter des liquides à des températures trop élevées.
- Éviter une alimentation à partir d'un réservoir sous pression réduite.
- Diminuer les pertes de charge du circuit d'aspiration.

Si ces conseils ne peuvent être appliqués en raison des exigences du procédé, il ne reste plus qu'à trouver une pompe dont les caractéristiques montrent des valeurs de  $NPSH_{requis}$  suffisamment faibles. [43]

## II.7-Conclusion

Ce chapitre, nous avons découvert la pompe, ses types et les différents types de montages en général, puis nous nous sommes spécialisés dans les pompes centrifuges, nous a fourni une

compréhension approfondie pour cette pompe, de leur fonctionnement et de leurs utilisations dans l'industrie. Nous avons examiné les composants clés, les classifications et les processus de fabrication, ainsi que les avantages et les inconvénients associés. Nous sommes également conscients des caractéristiques importantes des pompes centrifuges, telles que le débit, la hauteur manométrique et le rendement, ainsi que des problèmes liés à la cavitation et nous avons donné des conseils à prendre pour les éviter.

# **Chapitre III : Généralités sur la maintenance et l'analyse vibratoire**

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

La dégradation progressive des installations et des équipements au fil du temps est inévitable en raison de divers facteurs tels que l'usure, les contraintes opérationnelles et l'exposition à des agents corrosifs tels que les produits chimiques et les conditions atmosphériques. Ces détériorations peuvent entraîner des pannes, une réduction de la capacité de production, des risques pour la sécurité des personnes, des problèmes de qualité, des augmentations des coûts d'exploitation, ainsi qu'une dépréciation de la valeur marchande de ces équipements.

C'est pourquoi la maintenance joue un rôle important. Elle consiste à effectuer des opérations telles que le dépannage, la lubrification, l'inspection, la réparation, l'amélioration, etc., dans le but de préserver les performances et le potentiel des équipements. Son objectif principal est d'assurer la continuité et la qualité de la production. Une bonne stratégie de maintenance implique également la réalisation de ces opérations de manière optimale sur le plan financier, en recherchant un équilibre entre les coûts directs et indirects. [8]

### **III.2-Définition de la maintenance**

D'après l'Afnor (FD X 60-000), « la maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». Dans une entreprise, maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, réparation, graissage, contrôle, etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la production avec efficacité et qualité. [9]

### **III.3-Les objectifs de la maintenance**

#### **III.3.1- Les objectifs de coût**

- ✓ Minimiser les dépenses de maintenance.
- ✓ Assurer la maintenance dans les limites d'un budget.
- ✓ Avoir des dépenses de maintenance portant sur le service exigé par l'installation en fonction de leur âge et de leur taux d'utilisation.
- ✓ Tolérer à la discrétion du responsable de la maintenance une certaine quantité de dépense imprévue

### III.3.2- Les objectifs opérationnels

- ✓ Maintenir le bien durable :
  - Dans un état acceptable
  - Dans des meilleures conditions
- ✓ Assurer la disponibilité maximale à un coût raisonnable.
- ✓ Eliminer les pannes à tout moment et au meilleur coût.
- ✓ Maximiser la durée de vie de bien.
- ✓ Remplacer le bien à des périodes prédéterminées.
- ✓ Assurer au bien des performances de haute qualité.
- ✓ Assurer au bien un fonctionnement sûr et efficace.
- ✓ Obtenir de l'investissement un rendement maximum.
- ✓ Garder au bien une présentation suffisamment satisfaisante.
- ✓ Maintenir le bien dans un état de propreté absolue. [11]

### III.4- Méthodes de la maintenance

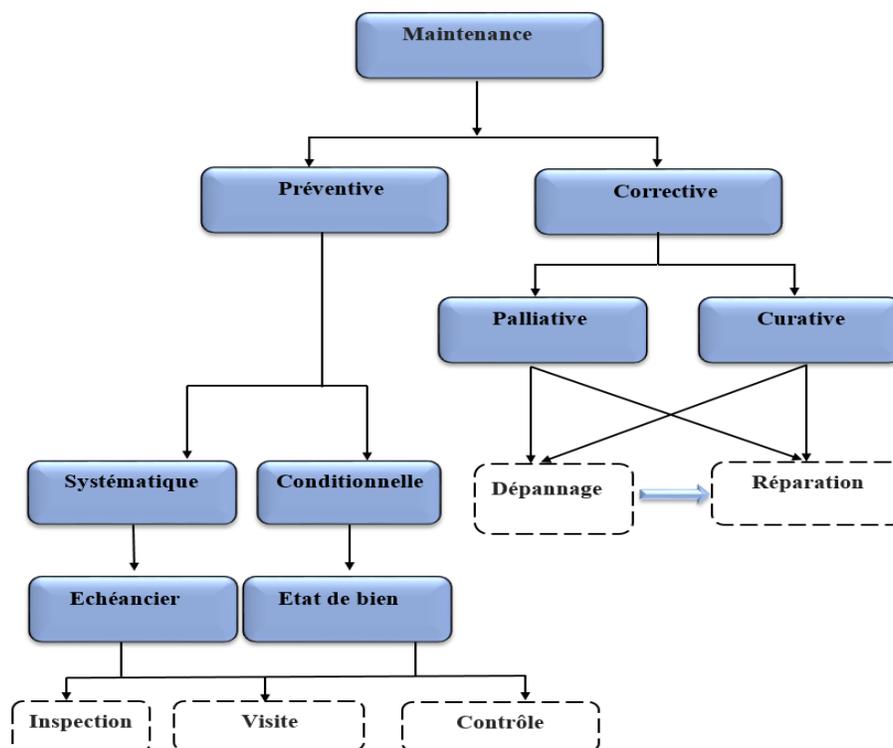


Figure III 1-les types de maintenance [12]

Afin d'assurer la disponibilité maximale des équipements de production dans une entreprise, tout en minimisant les coûts et en améliorant la qualité des produits, il est important d'opter la stratégie de maintenance la plus appropriée. On distingue deux méthodes : la maintenance préventive et la maintenance corrective.

Pour déterminer la méthode la plus adaptée, il est essentiel d'évaluer plusieurs critères et paramètres spécifiques à chaque équipement. L'objectif est de maintenir ces équipements dans un état optimal pour assurer un fonctionnement fiable. Une analyse approfondie est donc nécessaire pour choisir la stratégie de maintenance optimale sans reproduire la même formulation. [12]

#### III.4.1-Maintenance corrective

Il s'agit d'une << maintenance effectuée après défaillance >> Norme AFNOR X 60-010. C'est une politique de maintenance (dépannage et réparation) qui correspond à une attitude de réaction à des événements aléatoires et qui s'applique après la panne, donc qu'elle n'a pas été "pensée" puisque effectuée après défaillance. [8,9]

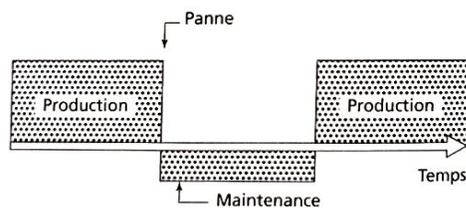


Figure III 2-Maintenance corrective : Incidence sur la production [14]

##### III.4.1.1-Maintenance curative

C'est un ensemble d'activités qui suit la défaillance et permet le rétablissement du niveau de performance optimal du matériel et de le remettre en état de fonctionnement par une réparation parfaite. Les activités pouvant être des réparations, des modifications ou d'aménagement ayant pour objet de supprimer la ou les défaillances. [11,15]

##### III.4.1.2-Maintenance palliative

Elle est destinée à remettre en état de fonctionnement provisoire un équipement en panne, mais avec une performance inférieure à son niveau optimal. Elle doit toutefois être suivie d'une action curative dans les plus brefs délais (réparation). Appelée couramment dépannage. [12,16]

### III.4.2-Maintenance préventive

(Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien). Norme AFNOR X 60-010. [13]

La maintenance préventive est effectuée selon des critères prédéterminés dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien, augmenter le temps de fonctionnement, régulariser la charge de travail et améliorer la disponibilité. [8]

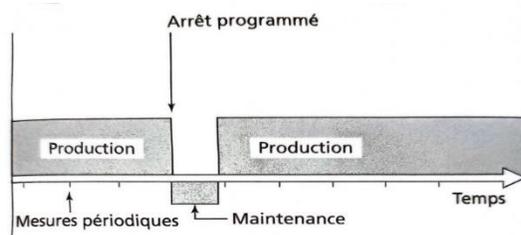


Figure III 3-Insertion des opérations de maintenance systématique dans le programme de production. [14]

On distingue deux cas de maintenance préventive, celle systématique et celle conditionnelle

#### III.4.2.1-Maintenance systématique

Maintenance systématique : " Maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi en fonction du temps ou du nombre d'unités d'usage ". Norme AFNOR X 60-010.

#### III.4.2.2-Maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle est une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto-diagnostique, information donnée par un capteur, mesure d'une usure, etc.) révélateur de l'état de dégradation d'un bien. Norme AFNOR X 60-010.

### III.5-Opérations de maintenance

#### III.5.1-Dépannage

C'est une action ou opération de maintenance corrective sur un équipement en panne en vue de la remettre en état de fonctionnement.

Cette action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation.

Souvent les interventions de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses et n'exigent pas la connaissance du comportement des équipements et des modes de dégradation.

Le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute inspection ou intervention à l'arrêt. [8]

### **III.5.2-Réparation**

C'est une intervention définitive et limitée de maintenance corrective. L'équipement réparé doit assurer les performances pour lesquelles il a été conçu. [8]

### **III.5.3-Inspection**

Il s'agit d'une action visant à vérifier la conformité d'un bien en mesurant, en observant, en testant ou en calibrant ses caractéristiques significatives. Ces activités de surveillance sont réalisées de manière périodique afin de détecter les anomalies et d'effectuer des réglages simples, sans nécessiter l'utilisation d'outils spécifiques ni l'arrêt de la production ou des équipements (pas de démontage). [17,18]

### **III.5.4-Les visites**

Ce sont des opérations de surveillance qui dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité prédéterminée.

Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies au préalable qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel. [8]

### **III.5.5-Les contrôles**

Ils correspondent à des vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement.

Le contrôle peut, comporter une activité d'information, inclure une décision, acceptation, rejet, ajournement, déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

Les opérations de surveillance (inspection, visite, contrôle) sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien, effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage. [8]

### III.5.6-Les révisions

Ensemble des actions d'examens, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné. L'est d'usage de distinguer suivant l'étendue de cette opération les révisions partielles des révisions générales. Dans les deux cas, cette opération implique la dépose de différents sous-ensembles. [8]

### III.6-Les différents niveaux de maintenance

Il existe 5 niveaux de maintenance, du plus simple au plus complexe. Chaque niveau possède ses propres actions de maintenance corrective et préventive.

#### III.6.1-La maintenance de premier niveau

La maintenance de 1er niveau correspond aux interventions simples, nécessaires et réalisées sur des éléments facilement accessibles. Il s'agit donc d'opérations qui ne nécessitent pas un démontage ou l'ouverture de l'équipement, et qui peuvent être effectuées par l'exploitant lui-même ou par un opérateur non spécialisé.

- **Exemples de maintenance préventive de 1er niveau**

Graissages, Relevés de compteurs, Contrôle pour vérifier l'encrassement d'un filtre.

- **Exemples de maintenance corrective de 1er niveau**

Remplacement de plusieurs ampoules.

#### III.6.2-La maintenance de niveau 2

La maintenance de 2 -ème niveau correspondant aux interventions peu complexes, dont les procédures sont simples à suivre. De plus, le remplacement de pièces lors de ces opérations ne nécessite pas le démontage global de l'équipement concerné.

- **Exemples de maintenance préventive de 2ème niveau**

Vérification de paramètres sur une machine en fonctionnement à l'aide d'outils de mesure intégrés à l'équipement, Réglages simples (alignement de poulies, alignement de moteur, etc.)

- **Exemples de maintenance corrective de 2ème niveau**

Remplacement de composants : fusibles, courroies, filtres à air, etc.

Remplacement de tresses

### **III.6.3-La maintenance de niveau 3**

La niveau 3 de maintenance correspond à des interventions considérées comme complexes. Elles doivent donc être précédées d'un diagnostic et d'une identification. Elles peuvent être réalisées sur place ou dans un atelier de maintenance, et doivent prendre en compte l'équipement dans sa globalité, car la modification d'un élément peut avoir des conséquences sur son fonctionnement général.

- **Exemples de maintenance préventive de niveau 3**

Contrôle d'allumage d'une chaudière et vérification de la combustion.

- **Exemples de maintenance corrective de niveau 3**

Dépannage d'une fuite sur un groupe froid, Changement de pièces de rechange standard (carte automate, vérin, pompe, moteur, engrenage, roulement, etc).

### **III.6.4-La maintenance de niveau 4**

Les interventions de maintenance de niveau 4 sont des opérations complexes et de grande importance, qui nécessitent une expertise technique particulière.

- **Exemples de maintenance préventive de niveau 4**

Analyse vibratoire, Analyse des huiles

- **Exemples de maintenance corrective de niveau 4**

Changement de clapets sur un Compresseur, Changement d'une tête de câble en basse tension.

### **III.6.5-La maintenance de niveau 5**

La maintenance de niveau 5 regroupe des actions complexes réalisées par le constructeur de l'équipement ou par une société agréée par celui-ci. Les actions à réaliser sont semblables à des actions de fabrication. [45]

## **III.7-Maintenance conditionnelle en détails**

### **III.7.1-Les étapes de la maintenance conditionnelle**

La pratique de la maintenance conditionnelle consiste à ne changer l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure mettant en cause à brève échéance ses performances et comporte trois phases :

1. la détection du défaut qui se développe

2. l'établissement d'un diagnostic
3. l'analyse de la tendance [8]

### III.7.1.1-La détection du défaut qui se développe

A la mise en route de chaque équipement, les principales caractéristiques de base des appareils sont enregistrées notamment la signature vibratoire (si le paramètre vibratoire s'avère être un paramètre intéressant de surveillance comme par exemple pour les machines tournantes) et les divers paramètres de fonctionnement (température, usure, performances, ...).

Ces caractéristiques ou signatures, serviront de référence pour suivre, par comparaison, l'évolution d'éventuels défauts ultérieurs. [8]

### III.7.1.2-L'établissement d'un diagnostic

Dès qu'une anomalie est détectée par les outils caractéristiques, au sens d'analyse de paramètres, un diagnostic concernant l'origine et la gravité du défaut constaté sera établi. [8]

### III.7.1.3-L'analyse de la tendance

L'établissement du diagnostic permet de préjuger du temps dont on dispose avant la panne pour laisser l'appareil fonctionner mais sous surveillance renforcée et prévoir d'ores et déjà la réparation. [8]

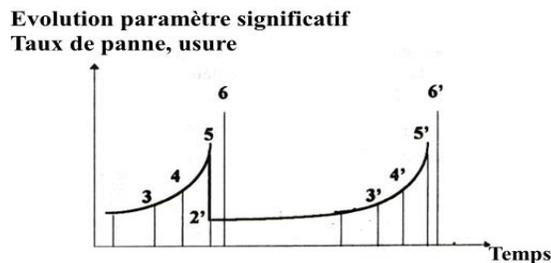


Figure III. 4- Courbe caractéristique représente la mise en marche de l'équipement [8]

- Mise en marche de l'équipement, machine neuve ou réparée

**1 à 2 :** Période de jeunesse ou rodage

**2 à 3 :** Niveau normal de bon fonctionnement, partie linéaire avec mesures périodiques normales

3. Le défaut s'annonce ou la détection du défaut donne le seuil minimum d'alarme

**3 à 4 :** La durée entre les mesures diminue et le défaut se développe selon une courbe non linéaire

4. Diagnostic du défaut, l'avertissement est donné, il y a lieu de programmer la réparation

**4 à 5 :** Surveillance accrue et décision de procéder à la réparation 5. Maintenance effectuée pour rétablir le niveau de tendance normal de la courbe de fonctionnement similaire à la partie 2 à 3 et un nouveau cycle reprend

**5 à 6 :** Tendance extrapolée à éviter 6. Panne inévitable qui représente le seuil maximum. [8]

### III.8-Les technique de surveillance

#### III.8.1-Analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est l'une des techniques de surveillance la plus utilisée et la plus importante dans la maintenance préventive conditionnelle, et la plus efficace.

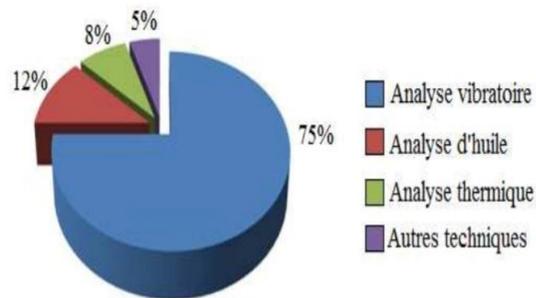


Figure III.5-Pourcentage d'utilisation des différentes techniques de surveillance [12]

Toutes les machines, et particulièrement les machines tournantes, vibrent et l'image vibratoire de leurs vibrations à un profil très particulier lorsqu'elles sont en état de bon fonctionnement. Dès que des phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement, de désalignement, de balourd, etc. apparaissent, l'allure de cette image change, ce qui permet, de quantifier l'intervention. La plupart des défauts mécaniques peuvent être détectés par cette technique. [45]

#### III.8.2-La thermographie infrarouge

La thermographie est une des techniques utilisées pour contrôler l'état des structures et des systèmes industriels. Elle mesure l'intensité des émissions de rayons infrarouges par une caméra infrarouge, afin de déterminer les conditions opératoires de l'équipement. Grâce à la détection des anomalies thermiques certaines zones sont plus chaudes ou plus froides qu'elles ne devraient l'être, un inspecteur expérimenté peut localiser et identifier les incidents dès leur naissance. Le champ d'application de cette technique est très vaste et on peut citer :

- la détection des points chauds dans les équipements électriques (conducteurs sous-dimensionnés, cosses mal vissées, etc..) ou mécaniques (dégradation d'un palier).
- la détection des fuites thermiques dans les fours, canalisations etc.... [45]

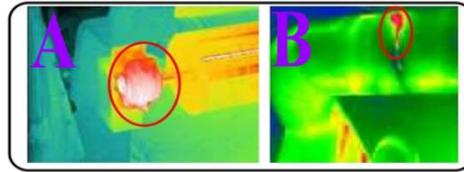


Figure III. 6-Images thermographiques [45]

**A** : défaut sur un palier

**B** : fuite sur une canalisation

### III.8.3-Analyse d'huile

L'analyse de lubrifiant peut être appliquée sur tous les équipements contenant des fluides de lubrification où le lubrifiant est en contact permanent avec les pièces en mouvement. A partir d'un prélèvement d'un échantillon d'huile et de l'analyser. Cette technique permet de contrôler les propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détecter un manque de lubrification, et aussi contrôler les taux de contamination par le processus (étanchéité) et déterminer dans un stade précoce une usure des éléments mécanique en contact. Aussi, cette technique de l'analyse de lubrifiants permet de découvrir l'origine de l'anomalie par analyse des particules. [12]

### III.8.4-Analyse acoustique

L'analyse acoustique repose sur la détection de tout bruit anormal en moyen de microphones placés à une certaine distance de l'équipement surveillé. Cette technique permet de détecter l'apparition de défauts audibles dont la fréquence ne dépasse pas 20 kHz et autorise une surveillance continue. L'analyse acoustique présente certaines limitations comme sensibilité au bruit ambiant, diagnostic souvent difficile à réaliser et problèmes de répétitivité des mesures. [12]

## III.9-Analyse vibratoire

### III.9.1-Introduction

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations, images des efforts Dynamiques engendrés par les pièces en mouvement. Ainsi, une machine neuve en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibrations. La détérioration du fonctionnement conduit le

plus souvent à un accroissement du niveau des vibrations. En observant l'évolution de ce niveau, il est par conséquent possible d'obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine. Ces vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour effectuer un diagnostic. La modification de la vibration d'une machine constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradations, voire de pannes.

Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse des vibrations, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet, par un dépistage ou un diagnostic approprié des défauts, d'éviter la casse et de n'intervenir sur une machine qu'au bon moment et pendant des arrêts programmés de production. [45]

### **III.9.2-Définition d'une vibration**

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

- Un déplacement : la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre.
- Une vitesse de déplacement : variation du déplacement par rapport au temps.
- une accélération : variation de la vitesse par rapport au temps. [45]

### **III.9.3-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. [11]

### **III.9.4-Caractéristiques d'une vibration**

#### **III.9.4.1-Fréquence**

Un objet vibrant effectue un va-et-vient de part et d'autre de sa position fixe normale. Un cycle complet de vibration est produit lorsque l'objet se déplace d'une position extrême à l'autre

position extrême, puis revient au point de départ. Le nombre de cycles effectués par un objet vibrant pendant une seconde est appelé sa fréquence. L'unité de fréquence est le hertz (Hz). Un hertz correspond à un cycle par seconde. [46]

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz [Hz]. 1 hertz=1 Cycle/seconde. Une vibration qui se produira 20 fois par seconde aura donc une fréquence  $f$  de 20 hertz. [45]

### III.9.4.2-Amplitude

Un objet vibrant se déplace sur une distance maximale de part et d'autre de sa position fixe. L'amplitude est la distance comprise entre la position fixe et la position extrême, d'un côté ou de l'autre, et elle est mesurée en mètres (m). L'intensité de la vibration dépend de l'amplitude. [46]

## III.9.5-Les différentes formes de vibration

### III.9.5.1-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. [11]

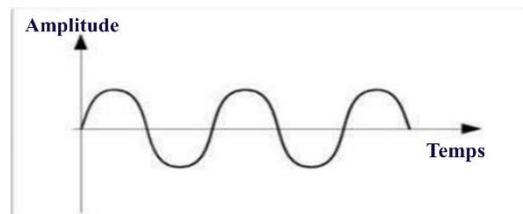


Figure III.7-Vibration harmonique [11]

$$X(t) = X \sin (\omega.t + \varphi) \quad (\text{III.1})$$

$\omega$  = 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

### III.9.5.2-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. [11]

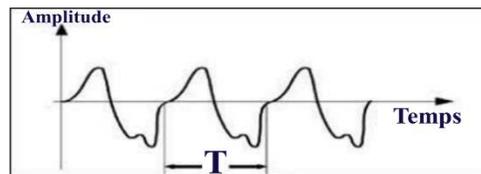


Figure III. 8-Vibration périodique [11]

$$X(t) = \sum_{i=1}^n (X_i \sin(\omega_i t + \phi_i)) \quad (\text{III.2})$$

### III.9.5.3-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. [11]

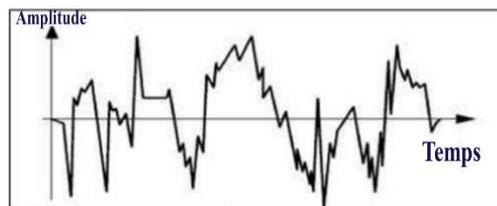


Figure III .9-Vibration apériodique [11]

$$X(t) = \sum_{i=1}^{\infty} (X_i \sin(\omega_i t + \phi_i)) \quad (\text{III.3})$$

## III.9.6-Les capteurs de détection de vibration

### III.9.6.1-Les proximètres

Le proximètre, ou sonde de proximité, est un capteur de déplacement sans contact qui produit un signal électrique directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor. Il est monté en permanence à l'intérieur du palier. Les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence. Ces mesures seront limitées aux basses fréquences ( $< 100 \text{ Hz}$ ). [45]

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

déplacement installés sur la plupart des turbines hydroélectriques et des turbomachines. A partir des connaissances des jeux radiaux réels d'un palier ou des jeux axiaux rotor-stator, il est beaucoup plus facile de déterminer des seuils d'alerte et de danger en termes de déplacement qu'en terme de vitesse ou d'accélération. [45]

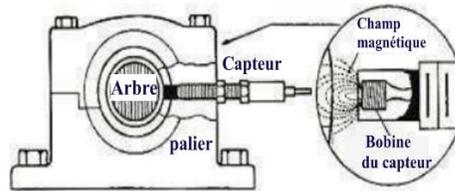


Figure III.10-Proximètre [11]

### III.9.6.2-Les Vélocimétries

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

Les vélocimétries les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté. La vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse de mouvement de la bobine. [45]

La fréquence de résonance de ce type de capteurs se situe généralement entre 8 et 15  $H_z$  et la gamme dynamique s'étend de 10-20  $H_z$  à 2000  $H_z$  environ. [45]

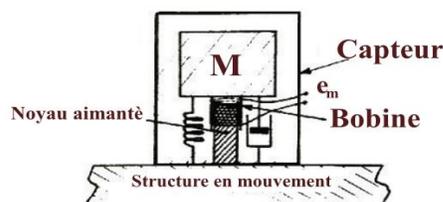


Figure III.11- Vélocimétrie [11]

### III.9.6.3-Les accéléromètres

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

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

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

la vitesse

- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.

Les accéléromètres à électronique intégrée sont semblables aux accéléromètres piézoélectriques à la différence qu'ils possèdent de manière intégrée un conditionnement de charge pour délivrer une tension proportionnelle à l'accélération. [45]

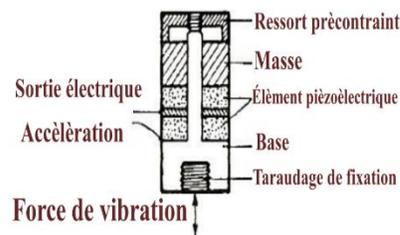


Figure III.12-Accelerometer [11]

### III.9.7-Défauts des machines tournantes

#### III.9.7.1-Déséquilibre (défaut de balourd)

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

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

- D'une altération mécanique : perte d'ailette, érosion ou encrassement,
- D'une altération thermique : déformation suite à des dilatations différentes des matériaux constituant le rotor ou à des différences de température localisées. [45]

Il existe deux types de balourd :

Balourd statique et dynamique

Le balourd statique :

- Même phase sur chaque roulement
- Principalement des vibrations radiales balourd

Le balourd dynamique :

- Déphasage de  $180^\circ$  autour de roulement
- Principalement des vibrations radiales [20]

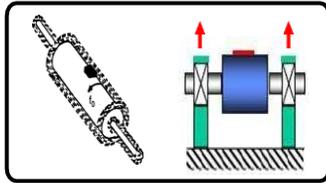


Figure III.13-balourd statique [45]

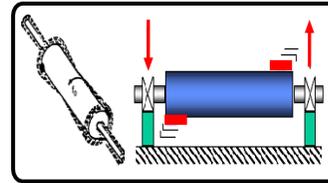


Figure III.14-balourd dynamique [45]

### III.9.7.2-Défaut d'alignement

#### III.9.7.1.1-Définition

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe [45]

#### III.9.7.1.2-Désalignement d'arbres accouplés

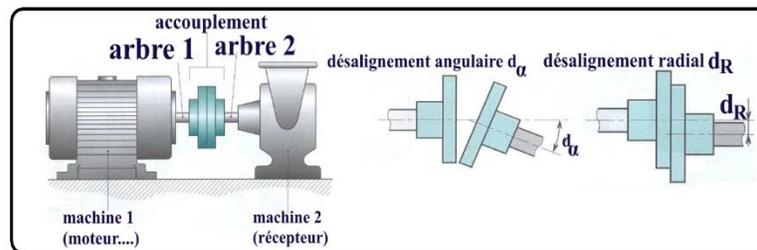


Figure III.15-défauts d'alignement d'arbres [45]

Les axes des deux rotors peuvent présenter un désalignement angulaire au niveau de l'accouplement ou un désalignement radial (défaut de concentricité) ou la combinaison des deux. [45]

#### III.9.7.3-Défaut de serrage

Le mauvais serrage de la structure de la machine génère des vibrations et un certain bruit. Le spectre typique mesuré sur une machine dans laquelle il existe un jeu contient un grand nombre de pic à des fréquences multiples de la fréquence de rotation. [45]

### III.9.7.4-Défauts de transmission par courroies

Les principaux défauts rencontrés sur ce type de transmission sont :

- Une détérioration localisée d'une courroie (partie arrachée, défaut de joint- ture...),
- Des courroies détendues,
- Des courroies usées,
- Un mauvais alignement des poulies, une poulie excentrée,
- Un défaut de transmission courroie poulies crantées. [21]

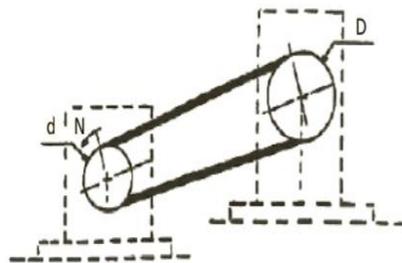


Figure III.16-transmission poulies courroies [21]

### III.9.7.5-Les défauts des engrenages

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues dentées engrenant l'une avec l'autre, permettant de transmettre de la puissance entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse constant. La position relative des deux arbres, on distingue trois classes d'engrenages :

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

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

- Uniquement radiaux sur les engrenages parallèles, à denture droite ou à chevrons,
- Mixtes (radiaux et axiaux) sur les engrenages à denture hélicoïdales, les engrenages coniques et les engrenages à roue et vis sans fin. [45]



Figure III.17-Différents types d'engrenage [45]



Figure III.18-. L'usure des engrenages a) usure par interférence. b) usure abrasive [26]

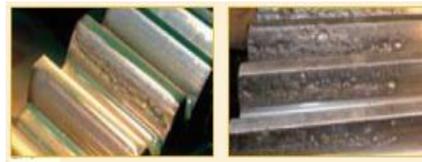


Figure III.19-piqûres (Pitting) [26]



Figure III .20-Ecaillage des dents [26]



Figure III .21-. Grippage a) à froid, b) à chaud [26]

### III.9.7.6-Les défauts de roulements

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. [44]



Figure III. 22-Principaux éléments constitutifs d'un roulement. [25]

#### ➤ Dégradation des roulements

Tableau III.1-causes de dégradation des roulements [23]

Causes	Conséquences
Défaut de lubrification	Usure adhésive grippage
Chocs et sur charges	Déformation rupture
Phénomènes de corrosion	Corrosion de contact
Pénétrations des particules dures	Abrasion

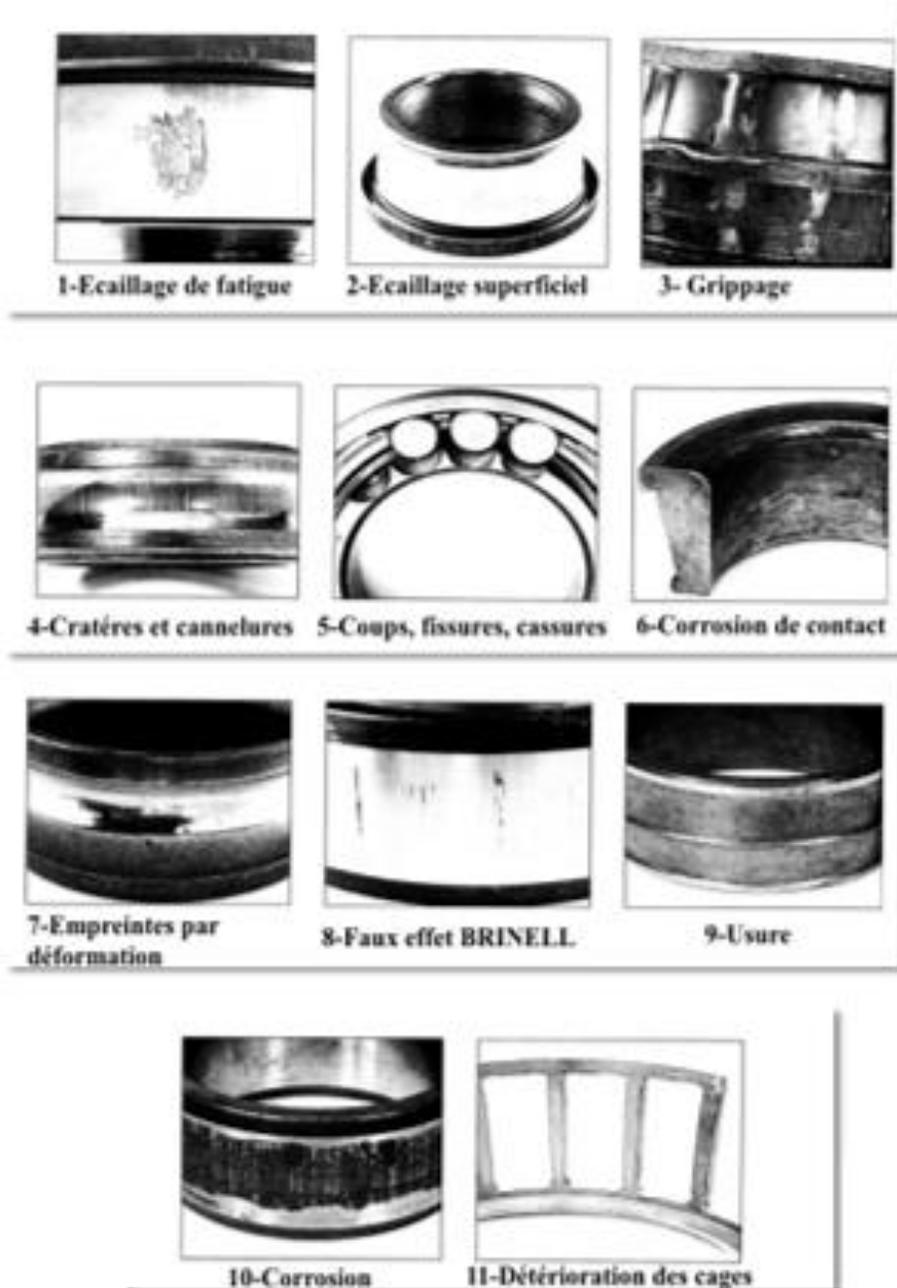


Figure III.23-Principaux aspects de la détérioration des roulements [26]

### III.9.7.7-Les défauts hydrauliques

**Cavitation** : La cavitation est, dans de nombreux cas, un événement indésirable. Dans les pompes centrifuges, la cavitation provoque des dommages aux composants (érosion du matériau), des vibrations, du bruit et une chute des performances. [24]



Figure III.24 -Défaillance par cavitation dans les pompes [24]

**Pulsation de pression** : Les pulsations de pression sont des fluctuations de la pression de base. Pour les pompes à haute pression, les pulsations de pression d'aspiration et de refoulement peuvent provoquer une instabilité des commandes de la pompe, des vibrations des tuyaux d'aspiration et de refoulement et des niveaux de bruit de pompe élevés. [24]

**Recirculation de la pompe** : Une pompe fonctionnant à une capacité inférieure aux limites de conception peut être affectée par la recirculation interne des pompes. La recirculation des pompes peut provoquer des surtensions et de la cavitation, même lorsque le NPSHa disponible dépasse le NPSHr du fournisseur par une marge considérable. Le NPSH est un sigle pour net positive suction Head. En un point d'un circuit hydraulique, la valeur NPSH mesure la différence entre la pression absolue totale du liquide en ce point et sa pression de vapeur saturante.

NPSHa : net positive suction head disponible

NPSHr : net positive suction head .[24]

**Poussée radiale et axiale** : Une poussée radiale élevée entraînant des déformations excessives de l'arbre peut entraîner des problèmes persistants de garniture ou de garniture mécanique, voire une défaillance de l'arbre. La poussée axiale est imposée le long de l'axe de l'arbre. Une poussée axiale élevée peut imposer une charge excessive au roulement. [24]

## III.9.8-Reconnaissance des principales anomalies

Tableau III. 2-Table de Reconnaissance des principales anomalies [25]

Type d'anomalie	Vibration		Remarque
	Fréquence	Direction	
Tourbillon d'huile	de 0,42 à 0,48 fr	Radiale	Uniquement sur paliers lisses hydro dynamique à grande vitesse
Balourd	1×fr	Radiale	Amplitude proportionnelle à la vitesse de rotation. Déphasage de 90° sur 2 mesures orthogonales
Défaut de fixation	1,2,3,4×fr	Radiale	Aucun déphasage sr 2 mesures orthogonales
Défaut d'alignement	2×fr	Axiale et radiale	Vibration axiale est en général plus important sile défaut d'alignement comporte un écart angulaire
Excitation électrique	1,2,3,4×50 Hz	Axiale et radiale	Vibration disparaît dés coupure de l'alimentation
Vitesse critique de rotation	Fréquence critique du rotor	Radiale	Vibration apparaît en régime transitoire et s'atténue en suite
Courroie en mauvais état	1,2,3,4 ×fp	Radiale	
Engrenage endommagé	Fréquence d'engrènement : fe= N dents × fr arbre	Axiale et radiale	Bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement
Faux-rond d'un pignon	f ± fr pignon	Axiale et radiale	Bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement dues au faux-rond
Excitation hydrodynamique	Fréquence de passage des aubes	Axiale et radiale	
Détérioration de roulements	Hautes fréquences	Axiale et radiale	Ondes de choc dues aux écaillages.

### III.10-Choix des seuils vibratoire

#### III.10.1-Seuil de vitesse vibratoire

Selon la norme française **AFNOR E90-300** l'intensité vibratoire est la plus grande des mesures en vitesse vibratoire efficace dans la gamme de fréquences (**10-1000 Hz**) sur chaque palier, support et bride dans les trois directions perpendiculaires entre elles (horizontales, verticales et axiales).

Cette norme, qui présente une large concordance avec la norme internationale **ISO 2372** (International Organisation for Standardisation) et la norme allemande **VDI 2056** (Verein Deutscher Ingenieure), distingue six groupes de machines. Ces critères de distinction sont la puissance et les fondations...

La norme propose pour chacun des quatre premiers groupes des seuils de jugement qui déterminent les domaines suivants : bon, admissible, encore admissible, inadmissible. [25]

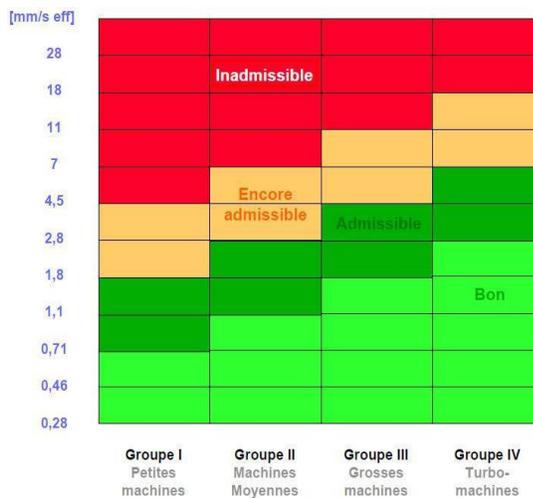


Figure III .25-Normes AFNOR E90-300 ou ISO 2372 [25]

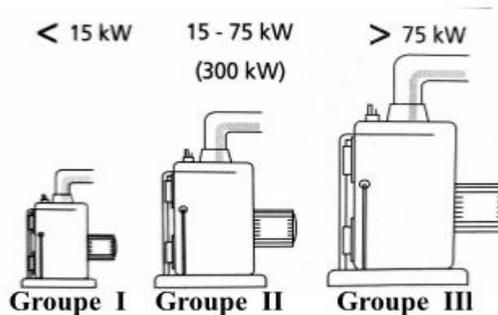


Figure III .26-la norme concernant les 3 principaux groupes machines [14]

**III.10-Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté et expliqué le concept de maintenance. D'une part, nous avons effectué une classification des différentes méthodes de maintenance et exposé leurs objectifs dans le domaine industriel. D'autre part, nous avons présenté les opérations de maintenance et identifié les cinq niveaux de maintenance, et nous avons souligné l'importance de l'analyse des vibrations et ses utilisations variées en tant qu'outil puissant et polyvalent pour détecter les défaillances des machines rotatives. En l'utilisant de manière proactive, les entreprises peuvent améliorer la maintenance conditionnelle, prolonger la durée de vie de leurs équipements et améliorer leur performance globale.

# **Chapitre IV : Etude expérimentale**

### IV.1-Le but de travail

Le but de cette partie est le diagnostic de la pompe 60-P002 par l'analyse vibratoire qui nous permettrons d'apprécier l'état de marche et la détection des défauts. Afin d'intervenir sur elle au bon moment et ainsi réduire les durées des arrêts de la machine.

### IV.2-Description de la pompe P002

La **60-P002** est une pompe centrifuge de type horizontale. Elle est stratégique pour l'expédition de GPL du CSTF vers la ligne de transport (SP4). Est aussi une pompe qui a soulevé beaucoup d'interrogations depuis leur mise en service ; ce qui justifie le grand intérêt qu'on leur porte.



*Figure IV.1-La pompe 60-P002*

#### IV.2.1-Le rôle de la Pompe P002

C'est une pompe d'expédition du **GPL**. Elle aspire du **GPL** à partir des pompes Booster **P 001** et elle le refoule vers :

- Collecteur de ligne 24'' Boil Off.

#### IV.2.2-Les caractéristiques de la pompe 60-P002

- Marque : PACIFIC-HYDRO (Japonaise).
- N° de série : 0313.60-G1-001-F
- Modèle de fabrication : 6RVC-VOH.
- Masse : 3300 KG
- Type : horizontale centrifuge
- Vitesse de rotation : 2970[tr/min].
- Puissance du moteur : 257 [kW].
- Pression d'aspiration : 15 bars.
- Pression de refoulement : 34 bars.
- Capacité nominale : 353 [m<sup>3</sup>/h].

- Hauteur différentielle : 381 m.
- Hauteur max (nominale) due à la roue : 480m.
- Nombre d'étages : 02.
- Produit traité : GPL.
- Masse volumique de GPL : 536 [Kg/m<sup>3</sup>].
- Rendement : 0,73.
- NPSH<sub>disponible</sub> : 15 m.
- NPSH<sub>requis</sub> : 8 m.
- Type de garniture mécanique : BSAGL.
- Type d'accouplement : Caoutchouc Flex.
- Type de roue : fermée.
- Graissage : Bague d'huile.
- Palier de butée : à roulement à bille 7310 DB.

### IV.3-Capteur de vibration

Le capteur de vibration qu'on a utilisé pour la mesure est le capteur d'accélération.



*Figure IV.2-ACCÉLÉROMÈTRE TYPE 4535-B [49]*

#### IV.3.1-Caractéristiques techniques de l'accéléromètre

- Type : 4535-B
- Plage de fréquence : 0.3 – 10000 Hz
- Plage de température : -60 ... +125 °C

L'accéléromètre **TYPE 4535-B** à raccordé au collecteur VIBROTEST 60F (marque Brüel & Kjær)

### IV.4-VIBROTEST 60F (marque Brüel & Kjær)

Le VIBROTEST 60F offre, grâce à son concept modulaire, un grand choix de fonctions :

- Analyse de vibrations.
- Equilibrage dans les conditions de service.

- Collecteur de données



Figure IV.3-VIBROTEST 60F (marque Brüel & Kjær) [49]

#### IV.4.1-Caractéristiques techniques

- Marque : Brüel & Kjær.
- Type : VIBROTEST 60F.
- Modes de fonctionnement :
  - Mode Analyseur de spectre.
  - Fonction enregistreur (Temps).
  - Mode collecteur de données.

#### IV.5-Emplacement de point de mesure

- **Localisation des points de mesure :**

Les mesures de vibrations sont réalisées au droit (horizontal et axial) des paliers de la pompe 60-p002. Le capteur doit être placé de façon à assurer un trajet direct (rotor-structure) aux vibrations.

- **Direction des mesures :**

Les mesures peuvent se faire :

- dans un plan radial (vertical : V, horizontal : H, oblique : O).
- et/ou dans un plan axial (axial : A).

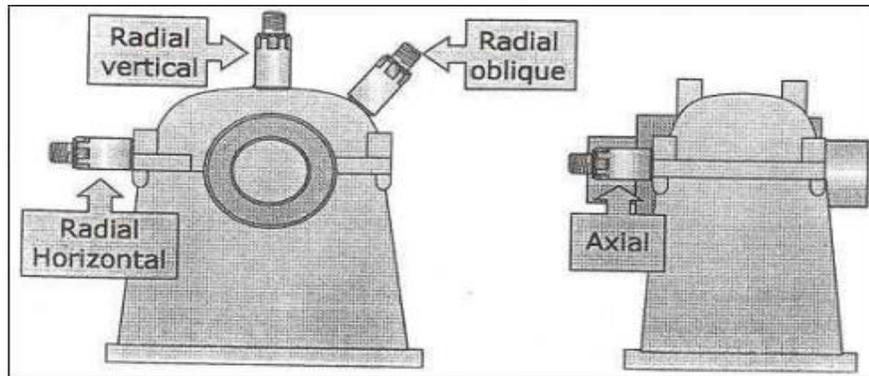


Figure IV.4-Direction des mesures.

#### IV.6-Représentation spectrale

$$\omega = 2\pi f_0 \Rightarrow f_0 = \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{IV.1})$$

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \Rightarrow f_0 = \frac{N}{60} \quad (\text{IV.2})$$

Donnée :  $N = 2970$  tr/min.

Application :

$$f_0 = \frac{2970}{60} = 49,5 \text{ Hz} \quad (\text{IV.3})$$

#### IV.7-Niveaux vibratoires de Pompe 60-P002 (groupe III)

Classification de la pompe 60-P002 :

La puissance de la pompe est : 257 [kW] supérieur à 75 [kW], donc elle classée dans le troisième groupe (Grosses machines).

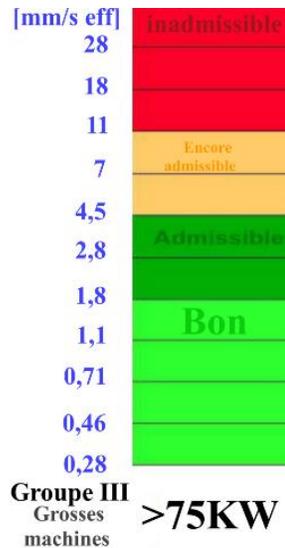
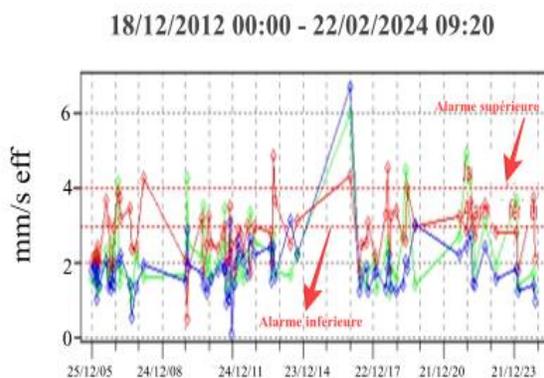


Figure IV.5-niveaux vibratoires (la norme AFNOR 90-300)

### IV.8-Application de la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire sur la pompe 60-P002

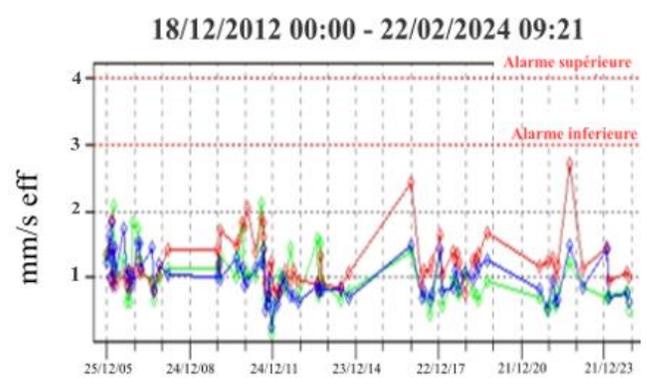
Sur notre champ de Hassi R'mel, on utilise le logiciel **CM-400** qui permet de surveiller les paramètres vibratoires sur les équipements (Pompe Centrifuge, Moteur électrique, compresseur, etc...) pour prévenir les défauts et anticiper l'entretien.

#### IV.8.1-Pompe 60-P002 (Pompe à pallier à roulement)



CSTF 50,60,700 60-PM002 A P1-A(POMPE)  
 CSTF 50,60,700 60-PM002 A P1-H(POMPE)  
 CSTF 50,60,700 60-PM002 A P1-V(POMPE)

Figure IV.7-Historique du palier de butée



CSTF 50,60,700 60-PM002 A P1-A(POMPE)  
 CSTF 50,60,700 60-PM002 A P1-H(POMPE)  
 CSTF 50,60,700 60-PM002 A P1-V(POMPE)

Figure IV.6-Historique du palier d'accouplement

Ces deux graphes représentent l'historique des vibrations de la pompe 60-P002 A, l'un pour le palier de butée et l'autre pour le palier d'accouplement, elles interprètent la variation de l'amplitude de vibration durant la période de mesure.

L'intervalle de l'amplitude de la pompe 60-P002 A varié entre 1 et 4 mm/s durant la période de mesure, ce qui implique que l'équipement est plus stable, de l'autre côté il y a aussi des amplitudes qui dépassent l'alarme inférieure et par fois supérieure, ce qui nécessite des diagnostics pour détecter des défauts et faire le nécessaire pour diminuer la vibration.

L'analyse continue de la pompe 60-P002 A au fil du temps nous a permis de détecter les problèmes suivants :

#### IV.8.2-Défauts de roulement

Les défauts principaux des roulements produisent 4 Fréquences de répétition d'impulsions qui peuvent être cinématiquement calculées. Soit-elle sont repérées et marquées par le logiciel (base de données de roulement, soit les données cinématiques peuvent être obtenues du fabricant ( $\emptyset$ , nombre d'éléments roulants..., souvent même les calculs fréquentiels).

##### IV.8.2.1-Historique des roulements sur la pompe 60-P002

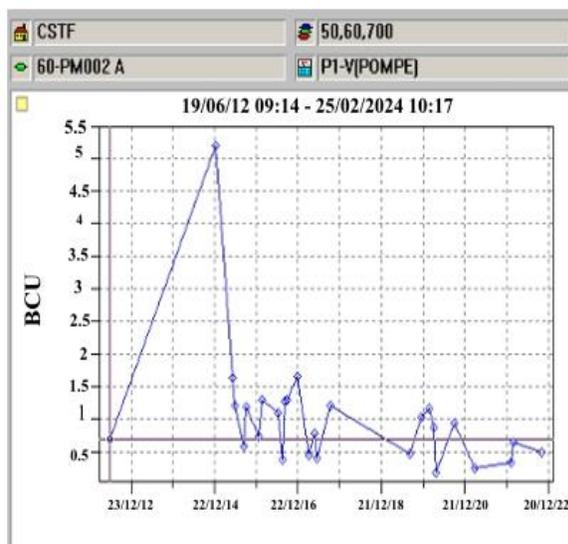


Figure IV. 9-Suivi vibratoire de palier coté butée

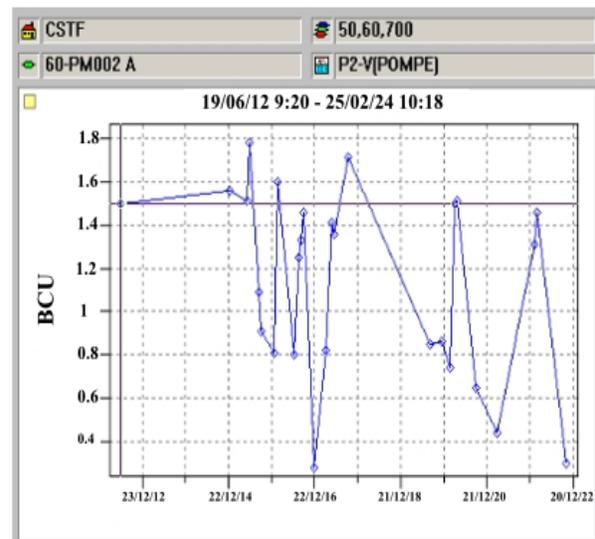


Figure IV. 8-Suivi vibratoire de palier coté accouplement

Ces deux graphes représentent l'historique de BCU (bearing condition unit) dans les paliers cotés de butée et coté accouplement de la pompe 60-P002. En mesurant l'accélération globale efficace à hautes fréquences, on détectera ces chocs brefs qui excitent l'ensemble. Le BCU est une

valeur en fonction de l'amplitude crête et l'amplitude efficace du signal obtenu par le filtre (13-64) kHz (Bruel kjær vibro).

L'intervalle de l'évolution du BCU état de roulement de la pompe 60-P002 A varié entre 0.1 et 1.8 durant une large durée de fonctionnement, ce qui implique la stabilité de l'état de roulement aux conditions actuelles de service (Défaut hydraulique pratiquement permanent). A part quelque mesure qui est légèrement élevée.

#### IV.8.2.2-Jeu, usure d'arbre

Cet équipement a présenté une vibration élevée :

Le : 30/12/14 : 1.88 mm/s

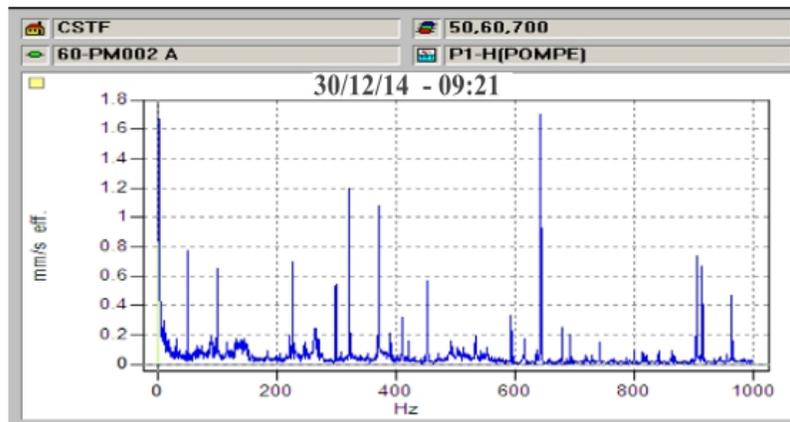


Figure IV .10-Spectre pris le : 30/12/2014

#### Interprétation

Les jeux mécaniques (mauvaise fixation structurelle, Montage, Fondations, usure composant), entraînent des mouvements et chocs tournants, souvent à dominante d'un ou deux cycles par tour d'arbre. Ils produisent une distorsion forte du signal.

En cas de jeux, on aura une augmentation importante de beaucoup d'harmoniques. Les inter-harmoniques (1/2, 1/3, etc.) proviennent des parties branlantes qui font en quelque sorte des bandes, et sont excitées toutes les 2<sup>ème</sup> ou 3<sup>ème</sup> révolution de l'arbre.

#### IV.8.3-Défaut Hydraulique

La pompe **60-P002** a présenté des vibrations élevées :

➤ Le 26/01/23 : 3.68 mm/s

- Le 28/03/21 : 2.51 mm/s
- Le 10/12/20: 4.95 mm/s

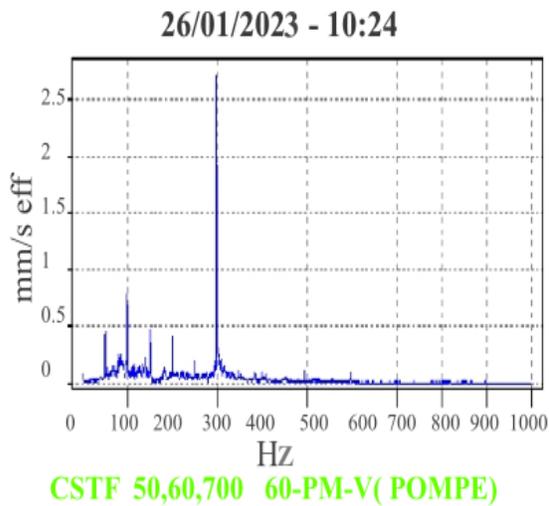


Figure IV .12-Spectre pris le : 26/01/2023

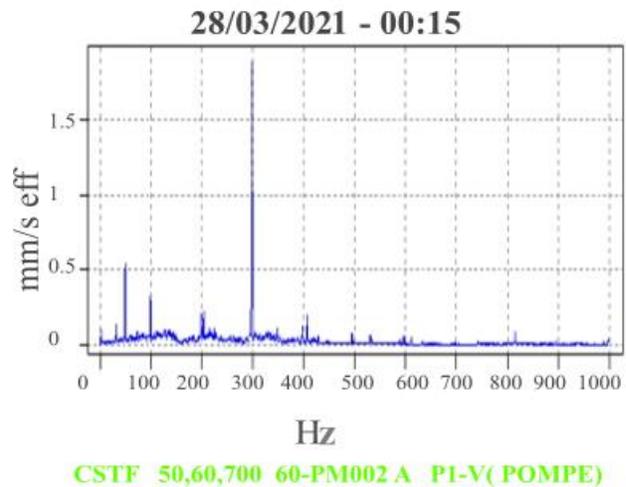


Figure IV.11-Spectre pris le : 28/03/2021

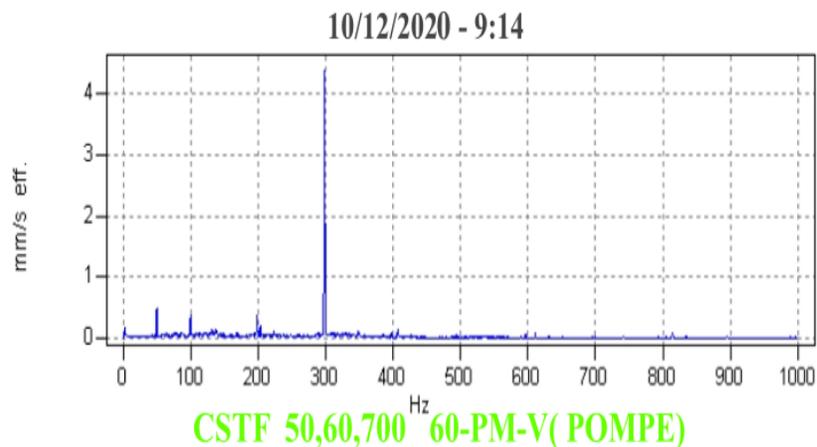


Figure IV. 13-Spectre pris le : 10/12/2020

- 26/01/23, 28/03/21 et 10/12/20 nous indiquent un pic à 300 Hz et d'amplitude de : 3.68 mm/s, 2.51 mm/s et 4.95 mm/s respectivement
- Cette pompe est équipée aussi par un impulseur de 06 aubes.

### Interprétation

Il s'agit d'un problème hydraulique qui se manifeste à  $6 * F$  rotation (correspond au nombre des aubes de l'impulseur de la pompe).

Le débit de la pompe **60-P002** a diminué avec la diminution du débit de GPL produit à Hassi R'mel qui a provoqué cette perturbation de l'écoulement du liquide dans la pompe.

Il faut savoir que la pompe **60-P002** fonctionne en pleine charge avec un débit de  $353 \text{ m}^3/\text{h}$ , mais ce débit n'est pas toujours atteint, et des perturbations vibratoires apparaissent lorsque celui-ci est minimum.

Pour mettre en évidence ce phénomène, nous avons décidé de refaire le test qui consiste à prendre les relevés de vibrations avec des débits différents, les résultats sont comme suit :

*Tableau IV.1-les relevés de vibrations avec des débits différents*

Point de mesure		Equipement	Débit $\text{m}^3/\text{h}$		
			200	240	300
Vibrations $\text{mm/s}$	P1A	60-P002 A	2.8	1.5	1.4
	P1H		3.3	2.18	1.22
	P1V		5.95	3.25	1.94

### Constations

- Le comportement vibratoire de la pompe dépend au débit.
- Il est préférable de faire fonctionner ces pompes avec un débit supérieur à  **$285 \text{ m}^3/\text{h}$** .

### IV.8.4-Proposition des Solutions à ce problème

Abaisser les vibrations dues à un problème hydraulique dans une pompe est possible en faisant un rognage de la roue (impulseur). Un rognage d'un impulseur d'une pompe est une réduction de diamètre (par usinage) et qui va engendrer une réduction de la hauteur manométrique  $H_{mt}$ , à rendement supposé constant et la puissance délivrée.

### IV.9-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié des défauts rencontrés sur les paliers de la pompe 60-P002 avec l'application d'une des techniques les plus utilisées (l'analyse vibratoire) de la maintenance conditionnelle pour diagnostiquer l'origine de défauts par analyse spectrale.

Ce projet de fin d'études, soutenu par un stage pratique au complexe industriel de Hassi R'mel, nous a permis de découvrir la réalité du fonctionnement d'un complexe industriel.

Les pompes centrifuges jouent un rôle crucial dans les systèmes de production et peuvent occuper des positions stratégiques. Il est donc essentiel de surveiller leur état de fonctionnement pour atteindre les objectifs de l'entreprise. L'analyse vibratoire est une méthode efficace pour détecter les défauts des pompes sans les démonter. En utilisant des capteurs de vibration, nous pouvons prélever le signal vibratoire, et le contenu fréquentiel de ces vibrations est une information clé pour diagnostiquer les défauts et comprendre la dynamique des structures.

Les résultats expérimentaux obtenus sont clairs et efficaces. Ils nous ont permis de réaliser un bilan complet de l'état de santé des machines, ce qui se traduit également par des économies de pièces de rechange et une augmentation de la production. Les mesures montrent que l'utilisation de l'analyse vibratoire permet de détecter les défauts avec précision grâce à l'analyse spectrale. Cette méthode assure un diagnostic précis, la localisation rapide des éléments défectueux, l'identification des causes de défaillances, et réduit le temps d'arrêt des machines. Elle est donc très importante pour la maintenance conditionnelle.

## Références bibliographiques

---

- [1] Billal BALOUL / Houria LAMRI ZEGGAR « Optimisation des débits d'injection du Glycol dans le gaz d'alimentation en vue d'éviter la formation d'hydrates. » Mémoire de master, génie chimique, Ecole Nationale Polytechnique-Alger, juin 2018.
- [2] DIB Amar / TAIBAOUI Abdelkader « Impact environnementale du gaz torchés au niveau de la zone industrielle HASSI R'MEL » mémoire de master, Génie des Procédés, Université Amar Thelidji- Laghouat, Septembre 2020.
- [3] Documentation interne de SONATRACH, annuaire statique.
- [4] Johann Friedrich Gülich .2008,2010. Centrifugal Pumps. Verlag Berlin Heidelberg- Springer
- [5] ZEMMIT Abderrahim. « Cours Turbomachines». Université de msila
- [6] Lev Nelik. 1999. Centrifugal and Rotary Pumps: Fundamentals with Applications. USA. CRC Press LLC
- [7] Pai, B. U. 2013. \*TURBOMACHINES\*. New Delhi: Wiley India Pvt.
- [8] Bensaada, S., and D. Feliachi. 2002. La Maintenance Industrielle. Alger : Office des Publications Universitaires.
- [9] AFNOR. FD X 60-000 : Title of the Standard. Paris : Association Française de Normalisation, 2002.
- [10] Héng, Jean. Pratique de la maintenance préventive : Mécanique, pneumatique, hydraulique, électricité, froid. 4th ed. Paris : Dunod, 2002.
- [11] Benchabane, Lamine, and Toufik Boualouache. "\*Étude et maintenance conditionnelle d'une pompe alimentaire par analyse vibratoire\*."mémoire de master, Université M'hamed Bougarah - Boumerdes n.d. Faculté de Technologie, Département Génie Mécanique,2020.
- [12] Bouhali, Rima. 2019. \*Contribution au diagnostic des défauts mécaniques des roues aubagées des turbomachines\*. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, Faculté des sciences de l'ingénierat, Département de génie mécanique.
- [13] AFNOR. \*Norme X 60-010\*. Association Française de Normalisation.
- [14] Boulenger, Alain. \*Maintenance conditionnelle : Aide-mémoire\*. Paris : Dunod, 2008. Impression, brochage : Chirat. Dépôt légal 2008 N 2404. Imprimé en France.
- [15] Yahiaoui, Slimane, et Fares Barkat. "Application de l'analyse vibratoire à la maintenance préventive conditionnelle de turbine à gaz type 9001." Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'Sila, Département de Génie électrique, 21 juillet 2023.

## Références bibliographiques

---

- [16] Cherifi, Farouk, et Yassine Smaili. "Application de l'analyse vibratoire à la maintenance préventive conditionnelle." Projet de fin de cycle, Université A. MIRA de Bejaia, Département d'Électrotechnique, 2014.
- [17] Haouche, Anis. "Étude des causes de l'usure anormale des chemises d'arbre d'une pompe centrifuge verticale d'eau de mer de la centrale TV." Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara, Faculté de Technologie, Département Génie Mécanique, 2022.
- [18] Haddad, Saddam, et Yanis Hanouti. "Maintenance préventive conditionnelle pour les systèmes soumis à des dégradations par corrosion : Cas du pipeline GG1." Mémoire de fin de cycle, Université A-MIRA de Bejaia, Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, 2019.
- [19] Djebili, Omar. "Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants : Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement." Thèse de Doctorat, Université M'Hamed Bougara, Faculté des Sciences, Spécialité Physique, Option Physique Énergétique, 2013.
- [20] Boumalia, Ahmed Dhia Eddine. 2018. \*Diagnostic des défauts d'un ventilateur M14A par analyse vibratoire au niveau de l'unité SIDER TSS\*. Mémoire de master, Université Badji Mokhtar - Annaba, Faculté des Sciences de l'Ingénierat, Département de Génie Mécanique. Directeur de mémoire : M. Laissaoui R.
- [21] Boulenger, Alain, et Christian Pachaud. 2009. \*Aide-mémoire : Surveillance des machines par analyse des vibrations\*. Paris : Dunod.
- [22] Mendas, Massinissa. 2023. \*Maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire d'un ventilateur de soufflage\*. Mémoire de Master, Université Mhamed Bougara de Boumerdès, Faculté de Technologie, Département Génie Mécanique, Filière Electromécanique, Spécialité Maintenance Industrielle.
- [23] Keslani, Abdelkrim, et Abdeldjouad Chellil. 2020. \*Analyse vibratoire de la pompe d'eau de mer VC40 dans la centrale thermique RAS-DJINET\*. Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara Boumerdès, Faculté de la Technologie, Département Génie Mécanique, Filière Génie industriel, Spécialité Génie industriel.

## Références bibliographiques

---

- [24] Djellali, Badis, et Basma Djebabla. 2021. \*Analyse des causes de défaillance des pompes centrifuges\*. Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar - Annaba, Faculté des Sciences de l'Ingénierat, Département Électromécanique, Filière Electromécanique, Spécialité Maintenance Industrielle.
- [25] Agroum, Mohamed Lamine, et Hamid Moussaoui. 2019. \*Maintenance conditionnelle par analyse vibratoire d'un groupe turboalternateur\*. Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara - Boumerdès, Faculté des Sciences de l'ingénieur, Département Maintenance Industrielle, Filière Génie Electromécanique, Option Electromécanique.
- [26] OUADAH, Sofiane, et Koceila MENZOU. 2017. "Détection des défaillances par analyse vibratoire sur un groupe électro pompe". Mémoire de Master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, Faculté de technologie, Département de génie mécanique, option Maintenance Industrielle.
- [27] Amhis, Ferhat. \*Étude et simulation de DCS I/A Séries de FOXBORO sur le four rebouilleur\*. 2011. Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.
- [28] BELGHARBI, Akram, et Aymen BOUCCEREDJ. 2022. \*Instrumentation et Automatisation du four H101 sous YOKOGAWA CS30\*. Mémoire de master, Université de Guelma, 2021/2022. Encadré par Dr. LOUCIF Fatiha.
  
- [29] Grundfos. \*Types de pompe centrifuge\*. Module 5. Accessed June 1, 2024. <https://www.grundfos.com/content/dam/global/page-assets/learn/ecademy/pdfs/fr-36-module-5-types-de-pompe-centrifuge.pdf>.
- [30] Rotech Pumps & Systems. "What is a Centrifugal Pump?" Rotech Pumps & Systems. Accessed [31/05/2024]. <https://www.rotechpumps.com/what-is-a-centrifugal-pump/>.
- [31] Genium360. 2018. "Pompes centrifuges : comprendre l'énergie cinétique et la pression dynamique." Genium360, August 28, 2018. <https://blogue.genium360.ca/article/professionnel/pompes-centrifuges -comprendre-l'energie-cinétique-et -la-pression-dynamique>.

## Références bibliographiques

---

- [32] LEO GROUP PUMP (HUNAN) CO., LTD. 2024. "Haute efficacité de la pompe à eau centrifuge en ligne verticale de l'usine - Chine En ligne verticale de la pompe, pompe centrifuge." Made-in-China. [https://fr.made-in-china.com/co\\_leohnpump/product\\_High-Efficiency-Vertical-Inline-Centrifugal-Water-Pump-Factory\\_uorgohieng.html](https://fr.made-in-china.com/co_leohnpump/product_High-Efficiency-Vertical-Inline-Centrifugal-Water-Pump-Factory_uorgohieng.html) (accessed May 31, 2024).
- [33] Connor, Nick. "Qu'est-ce qu'une pompe centrifuge? Definition." \*Thermal Engineering\*, 2 Mar. 2020, [www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-quune-pompe-centrifuge-definition/](http://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-quune-pompe-centrifuge-definition/).
- [34] Centre des Réseaux et Systèmes d'Informations et de Communication (CRSIC). "Plate forme d'enseignement à distance." \*Université M'Hamed Bougara de Boumerdès\*, <https://elearning.univ-boumerdes.dz/>.
- [35] Zemmit, Abderrahim. "Turbomachines à fluide incompressible." University of M'sila, accessed[31/05/2024],[https://elearning.univmsila.dz/moodle/pluginfile.php/39657/mod\\_resource/content/1/Chapitre%202\\_Turbomachines%20C3%A0%20fluide%20incompressible.pdf](https://elearning.univmsila.dz/moodle/pluginfile.php/39657/mod_resource/content/1/Chapitre%202_Turbomachines%20C3%A0%20fluide%20incompressible.pdf).
- [36] Hydraulic Institute. "The Global Authority on Pumps and Pumping Systems." \*[www.pumps.org](http://www.pumps.org)\*. Accessed March 1, 2024.
- [37] GUNT Gerätebau GmbH. "Home - GUNT Gerätebau." \*[www.gunt.de](http://www.gunt.de)\*. Accessed March 1, 2024.
- [38] Debem. "À la découverte des pompes centrifuges DEBEM." Debem, accessed August 17, 2021, <https://www.debem.com/fr/a-la-decouverte-des-pompes-centrifuges-debem/>.
- [39] GUNT. \*Connaissances de base en pompes centrifuges\*. Accessed [31/05/2024]. [https://www.gunt.de/images/download/Connaissances-de-base-en-pompes-centrifuges\\_french.pdf](https://www.gunt.de/images/download/Connaissances-de-base-en-pompes-centrifuges_french.pdf).
- [40] Mathieu, Richard. \*Cours de Richard MATHIEU: G.I. D4.13/Chapitre 1c – Pompes\*. Génie industriel. Accessed [31/05/2024]. <http://genie.industriel.iaa.free.fr>.
- [41] Debem. "La courbe caractéristique d'une pompe centrifuge." Dernière modification avril 20, 2023. <https://www.debem.com/fr/courbe-caracteristique-dune-pompe-centrifuge/#:~:text=Le%20d%C3%A9bit%20d'une%20pompe%20centrifuge%20est%20la%20quantit%C3%A9%20de,en%20m%C3%A8tres%20cubes%20par%20heure>.

## Références bibliographiques

---

- [42] Jenny, Mathieu. "Turbomachines: Hydraulic and Wind Energies." Département of Energy, Fluide Pathway, Second Year, École Nationale Supérieure des Mines de Nancy, Université de Lorraine, 2018-2019. PDF. <https://energie.mines-nancy.univ-lorraine.fr/fluides/turbo2a.pdf>
- [43] Simon. "ZOOM sur le phénomène de cavitation." ST SOLUTIONS. Dernière modification 18 avril 2023. <https://stsolutions.ch/zoom-sur-le-phenomene-de-cavitation/> (consulté le 1 juin 2024).
- [42] Mobility Work. "Niveaux de maintenance selon l'AFNOR." Mobility Work. Accès juin 1, 2024. <https://mobility-work.com/fr/blog/niveaux-maintenance-afnor/>.
- [45] Landolsi, Foued. \*Techniques de surveillance\*. Academia.edu. Accédé [date de récupération].[https://www.academia.edu/28866057/TECHNIQUES\\_DE\\_SURVEILLANCE\\_Elabor%C3%A9\\_par\\_Mr\\_LANDOLSI\\_FOUED\\_](https://www.academia.edu/28866057/TECHNIQUES_DE_SURVEILLANCE_Elabor%C3%A9_par_Mr_LANDOLSI_FOUED_)
- [46] CCHST, s.d. \*Vibrations - Introduction\*. [en ligne] Disponible à l'adresse : <[https://www.cchst.ca/oshanswers/phys\\_agents/vibration/vibration\\_intro.html](https://www.cchst.ca/oshanswers/phys_agents/vibration/vibration_intro.html)> [Consulté le 1 juin 2024].
- [47] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/ojep-organisation-des-pays-exportateurs-de-petrole>
- [48] <https://sonatrach.com/presentation>
- [49] Brüel & Kjær. "TYPE 4535-B: Accéléromètre CCLD triaxial à usage général, TEDS, 9,8 mV/g, sans câble." Brüel & Kjær Sound & Vibration. Accessed June 3, 2024. <https://www.bksv.com/fr/transducers/vibration/accelerometers/ccl-d-iepe/4535-b>.