



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA 1  
FACULTE DE TECHNOLOGIE



DEPARTEMENT DE MECANIQUE  
Domaine : Génie Mécanique  
Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

**Mémoire de Master**  
**Thème :**

**Diagnostic vibratoire d'une pompe à huile  
Centrifuges  
(Buffalo pompes VCRE -30K)**

**Réalisé par :**

Benyoucef mohamed nadir

Souli abderraouf

**Encadré par :**

Promoteur : Dr. MAGRAOUI Rabah

Co-promoteur : Mr. Dahmani nouh

**Année universitaire : 2023/2024**

---

# Remerciement

---

*Nous remercions en premier lieu ALLAH le tout Puissant qui nous a inspiré le courage, la force et la santé pour réaliser ce cursus et au final ce modeste travail.*

*Nous remercions en deuxième lieu notre directeur de recherche Mr maghraoui rabah pour la confiance qu'il nous a accordé en proposant ce thème de recherche, mais surtout pour son accompagnement, soutien, écoute et disponibilité, et pour la façon dont la quelle il nous a guidé pendant la réalisation de notre travail.*

*Nous tenons à gratifier aussi les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre projet en acceptant d'examiner notre travail.*

*Ainsi nous tenons à remercier tout l'ensemble des enseignants pour ce qu'ils ont apporté à notre carrière d'étudiants universitaire pendant 5 ans.*

---

# Dédicace

---

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur  
Tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.*

*A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement,*

*A toute la famille BENYOUCEF et Souli pour leur soutien tout au long de mon parcours  
universitaire,*

*A Tout mes proches et mes chers amis et collègues*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien  
infaillible,*

*Merci d'être toujours là pour nous.*

---

## RESUME

---

Ce mémoire porte sur le diagnostic vibratoire d'une pompe à huile modèle VCRE-30k, en vue d'optimiser la détection et l'analyse des défaillances mécaniques potentielles. Les pompes à huile sont essentielles dans divers secteurs industriels et automobiles, où elles assurent la lubrification continue et efficace des composants

Mécaniques.

Cependant, leur fonctionnement peut être compromis par diverses défaillances, nécessitant des méthodes de diagnostic avancées pour maintenir leur performance et prolonger leur durée de vie.

---

## **ABSTRACT**

---

This thesis focuses on the vibrational diagnosis of an oil pump model VCRE-30k, aimed at optimizing the detection and analysis of potential mechanical failures. Oil pumps are essential in various industrial and automotive sectors, where they ensure continuous and efficient lubrication of mechanical components. However, their operation can be compromised by various failures, necessitating advanced diagnostic methods to maintain their performance and extend their lifespan.

---

## الملخص

---

تتناول هذه الرسالة دراسة التشخيص الاهتزازي لمضخة زيت من طراز VC30k-30 ، بهدف تحسين كشف وتحليل الأعطال الميكانيكية المحتملة. تعد مضخات الزيت أساسية في مختلف القطاعات الصناعية والسيارات، حيث تضمن التزييت المستمر والفعال للمكونات الميكانيكية. ومع ذلك، قد يتعرض تشغيلها للتهديد بسبب أعطال متعددة، مما يتطلب استخدام أساليب تشخيصية متقدمة للحفاظ على أدائها وتمديد عمرها الافتراضي.

---

# TABLE DES MATIERES

---

<b>1</b>	<b>Généralité sur les pompes</b>	<b>15</b>
1.1	Introduction .....	15
1.2	Généralité sur les pompes centrifuges .....	15
1.3	Définition de pompe et machines hydraulique .....	16
1.4	Les types des pompes.....	17
1.4.1	Pompe volumétrique.....	17
1.5	Avantages et inconvénients des pompes volumétriques .....	23
1.6	Les pompes centrifuges et leur principe de fonctionnement.....	25
1.6.1	L'aspiration .....	25
1.6.2	L'accélération.....	26
1.6.3	Le refoulement .....	26
1.7	Constitution d'une pompe centrifuge.....	26
1.7.1	La roue .....	26
1.7.2	Le distributeur.....	27
1.7.3	Le diffuseur.....	28
1.7.4	Volute .....	28
1.7.5	Le divergent.....	28
1.8	Classification des pompes centrifuges.....	28
1.8.1	Disposition de l'axe.....	28
1.8.2	le nombre de roue .....	28
1.8.3	La forme de la roue .....	30
1.8.4	la forme des aubes de la roue .....	30

---

1.8.5	La position de la pompe par rapport au niveau d'aspiration .....	31
1.8.6	La pression engendrée.....	31
1.8.7	Moyen d'accouplement.....	31
1.8.8	Moyen d'entraînement .....	31
1.8.9	Type du récupérateur .....	31
1.8.10	Usage .....	32
1.9	Principales caractéristiques d'une pompe.....	32
1.9.1	Débit volumique $Q_v$ .....	32
1.9.2	Pression .....	32
1.9.3	Puissance .....	33
1.9.4	Puissance absorbée (Pa).....	33
1.9.5	Rendement $\eta$ .....	33
1.9.6	Cylindrée.....	34
1.9.7	Le couple.....	34
1.9.8	Hauteur manométrique ou hauteur d'élévation d'une pompe (HMT)	34
1.10	Conclusion .....	35
<b>2</b>	<b>étude de faut mécanique et électrique qui peuvent surgir lors de fonctionnement de la pompe deuil</b>	<b>36</b>
2.1	Introduction .....	36
2.2	la Maintenance.....	37
2.2.1	Définition de la Maintenance.....	37
2.2.2	Les différents types de maintenance.....	37
2.2.3	La maintenance corrective .....	37
2.2.4	Maintenance palliative .....	37
2.2.5	Maintenance curative.....	38
2.2.6	Maintenance préventive.....	38
2.2.7	Maintenance Systématique.....	38
2.2.8	Maintenance conditionnelle.....	38
2.3	Définition des défaillances des machines tournantes NF X 06-501.....	39
2.4	les Sources d'informations pour détections des défauts .....	41

---

2.4.1	L'analyse vibratoire .....	41
2.4.2	L'analyse d'huile.....	41
2.4.3	La thermographie infrarouge .....	41
2.4.4	L'analyse acoustique.....	42
2.4.5	Le contrôle par ultrasons .....	42
2.5	Défauts des machines tournantes.....	43
2.5.1	Les roulements .....	45
2.6	Défauts des paliers à film d'huile (Paliers lisses).....	46
2.6.1	définitions .....	46
2.6.2	Caractéristiques.....	47
2.6.3	Avantages des paliers lisses.....	47
2.6.4	Inconvénients des paliers lisses .....	47
2.7	L'engrenage .....	48
2.7.1	Définition .....	48
2.7.2	Défauts des engrenages.....	48
2.7.3	Les Différents types de défauts des dentures d'engrenages.....	49
2.8	Les courroies .....	50
2.8.1	Définition .....	50
2.8.2	Fonctionnement des courroies .....	50
2.8.3	Défauts de courroies .....	51
2.9	Stator et Rotor .....	51
2.9.1	Stator.....	51
2.9.2	Le Rotor .....	52
2.10	Conclusion .....	54
<b>3</b>	<b>Analyse model théorique (system libre non amorti)</b>	<b>55</b>
3.1	INTRODUCTION .....	55
3.2	shema cinématique de pompe à huile.....	56
3.2.1	Caractéristiques du Moteur .....	56
3.2.2	Caractéristiques de l'Accouplement.....	56

---

3.2.3	Caractéristiques des Roulements .....	57
3.2.4	Caractéristiques de la Turbine .....	57
3.3	Etablie les équations de mouvement a 2.d.d.l ( libre non amorti ).....	57
3.3.1	l'énergie cinétique (T).....	57
3.3.2	l'énergie potentielle (U) .....	58
3.3.3	Le lagrangien du système (L).....	59
3.4	Etablie les équations différentielles du mouvement.....	59
3.5	Établir les fréquences propres $F_{01}$ et $F_{02}$ .....	60
3.6	CONCLUSION .....	65
<b>4</b>	<b>simulation numérique du modele pump d'huile</b>	<b>66</b>
4.1	Introduction .....	66
4.2	Propriétés de l'étude : .....	67
4.3	Propriétés du matériau .....	68
4.4	Définitions des connecteurs .....	68
4.5	Informations sur le maillage.....	69
4.6	Résultats de simulation.....	69
4.6.1	Amplitude minimale et maximale.....	69
4.6.2	Visualisation .....	70
4.6.3	Fréquence .....	70
4.6.4	Type d'analyse .....	70
4.6.5	Application.....	70
4.7	conclusion.....	81
<b>5</b>	<b>Etude de cas pratique par analyse de vibratoire</b>	<b>83</b>
5.1	Introduction .....	83
5.2	définitions de buffalo pumps .....	83
5.3	descriptions de la machine .....	84
5.4	historiques de la machine.....	86
5.4.1	Analyse d'usure.....	89

---

5.5 Conclusion ..... 90

---

## TABLE DES FIGURES

---

1.1	une pompe centrifuge .....	16
1.2	Montage d'une pompe en aspiration et en charge .....	17
1.3	Pompe à piston .....	18
1.4	Pompe à piston simple effet .....	18
1.5	Pompe à piston double effet.....	19
1.6	Pompe à membrane.....	19
1.7	Pompe à membrane.....	20
1.8	Pompe à engrenages.....	20
1.9	Pompes à engrenages extérieu.....	21
1.10	Pompes à engrenages intérieures .....	21
1.11	Pompes à vis.....	22
1.12	Pompes à palettes libre .....	22
1.13	Pompes à palettes flexibles.....	23
1.14	Vue en coupe d'une pompe centrifuge .....	25
1.15	Vue en coupe d'une pompe centrifuge .....	26
1.16	Types des roues.....	27
1.17	pompe centrifuge mono- étage. ....	29
1.18	pompe centrifuge multi-étage.....	30
1.19	Roue à simple aspiration .....	30
1.20	Roue à double aspiration.....	30
2.1	Les différents types de maintenance.....	37

---

2.2	Dégradation du bien et durée de vie.....	39
2.3	Le pourcentage des défauts.....	45
2.4	Structure d'un roulement à billes.....	46
2.5	Engrenages à axes parallèles (A et B), à axe concourant (C).....	48
2.6	Vibrations d'un engrenage.....	50
2.7	le stator.....	52
2.8	le rotor.....	53
3.1	shema cinématique de pompe à huile.....	56
4.1	system arbre turbine.....	67
5.1	shema cinématique de pompe à huile.....	84
5.2	shema cinématique de pompe à huile.....	84
5.3	POMPE À HUILE DE GRAISSAGE VERTICALE VCRE.....	85
5.4	courbe de tendance c.a (horizontal).....	87
5.5	courbe de tendance c.a.o (horizontal).....	88
5.6	courbe de tendance c.a. (vertical).....	88
5.7	courbe de tendance c.o.a. (vertical).....	89
5.8	courbe de tendance c.o.a (axial).....	89

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

1.1	illustre un résumé des avantages et inconvénients des pompes selon leurs types	24
2.1	Techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante.....	43
2.3	Classification des défauts de machine électrique selon leurs origines.....	44
2.5	Cause des défauts dans les roulements.....	46

---

## INTRODUCTION GENERALE

---

Les pompes à huile jouent un rôle essentiel dans de nombreux systèmes industriels et automobiles, assurant la circulation efficace des lubrifiants nécessaires au bon fonctionnement des machines et moteurs.

Parmi ces pompes, le modèle VCRE-30k se distingue par ses performances et son efficacité, mais comme tout équipement mécanique, il est sujet à des défaillances potentielles qui peuvent affecter sa fiabilité et sa durée de vie.

Le diagnostic vibratoire constitue une méthode efficace pour détecter, analyser et prévoir les anomalies mécaniques des pompes à huile. Cette approche repose sur l'étude des vibrations générées par le fonctionnement de la pompe, permettant d'identifier les signes précurseurs de défaillances mécaniques et d'anticiper les interventions de maintenance nécessaires.

Le présent mémoire se propose de fournir une analyse approfondie du diagnostic vibratoire appliqué au modèle de pompe à huile VCRE-30k. Il se structure en cinq chapitres principaux.

Le premier chapitre offre une vue d'ensemble des différents types de pompes, leurs principes de fonctionnement et leurs applications. Le second chapitre se concentre sur l'étude des défaillances mécaniques courantes pouvant survenir lors du fonctionnement des pompes à huile, notamment les problèmes de cavitation, d'usure des composants, et de désalignement.

Le troisième chapitre présente une analyse modale théorique, visant à comprendre les modes propres et les fréquences naturelles de vibration de la pompe, fournissant ainsi un cadre théorique pour l'interprétation des données vibratoires. Le quatrième chapitre ex-

---

plore une étude numérique du système, utilisant des outils de simulation pour modéliser et analyser le comportement dynamique de la pompe sous différentes conditions de fonctionnement. types de pompes, leurs principes de fonctionnement et leurs applications. Le second chapitre se concentre sur l'étude des défaillances mécaniques courantes pouvant survenir lors du fonctionnement des pompes à huile, notamment les problèmes de cavitation, d'usure des composants, et de désalignement.

Enfin, le cinquième chapitre se consacre à une étude de cas pratique par analyse de vibrations, illustrant l'application des concepts théoriques et numériques à un cas réel. Cette section mettra en évidence les résultats obtenus, les conclusions tirées, et proposera des recommandations pour l'amélioration de la fiabilité et de la maintenance des pompes à huile. Ainsi, ce mémoire vise à contribuer à une meilleure compréhension et gestion des défaillances des pompes à huile, en mettant en avant l'importance du diagnostic vibratoire comme outil de maintenance prédictive.

# Chapitre1

---

## GENERALITE SUR LES POMPES

---

### 1.1 INTRODUCTION

Les pompes centrifuges sont couramment employées à travers le monde en raison de leur facilité d'utilisation, de leur fiabilité et de leur nombreuses applications. Les eaux usées, le traitement des eaux usées, l'irrigation, la production d'électricité et le traitement chimique sont autant d'applications qu'elles sont employées.

Dans ce chapitre, nous présenterons une vue d'ensemble des pompes centrifuges, incluant leur définition, leurs différentes catégories, leurs bénéfices et leurs désavantages, leur mécanisme de fonctionnement, leur structure, leur classification, leurs principales caractéristiques, leurs utilisations et le phénomène de cavitation.

### 1.2 GENERALITE SUR LES POMPES CENTRIFUGES

On appelle pompe du nom italien « pompa » toutes machines hydrauliques qui servent à déplacer les liquides d'une région de basse pression vers une région à grande pression. Son fonctionnement consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration et la région de refoulement au moyen de l'organe actif (piston, roue,...etc.) de la pompe. Du point de vue physique, la pompe transforme l'énergie mécanique en énergie hydraulique. Les pompes autant que machines, sont les pièces maîtresses qui donnent la vie aux unités de pétrole et au gaz. Leur choix et leur installation doivent faire l'objet de

soins tout particulier de la part des services d'études, de même leur entretien requiert une des spécialistes très qualifiées, afin qu'elles puissent assurer dans les meilleurs conditions un service continu pendant une longue durée.

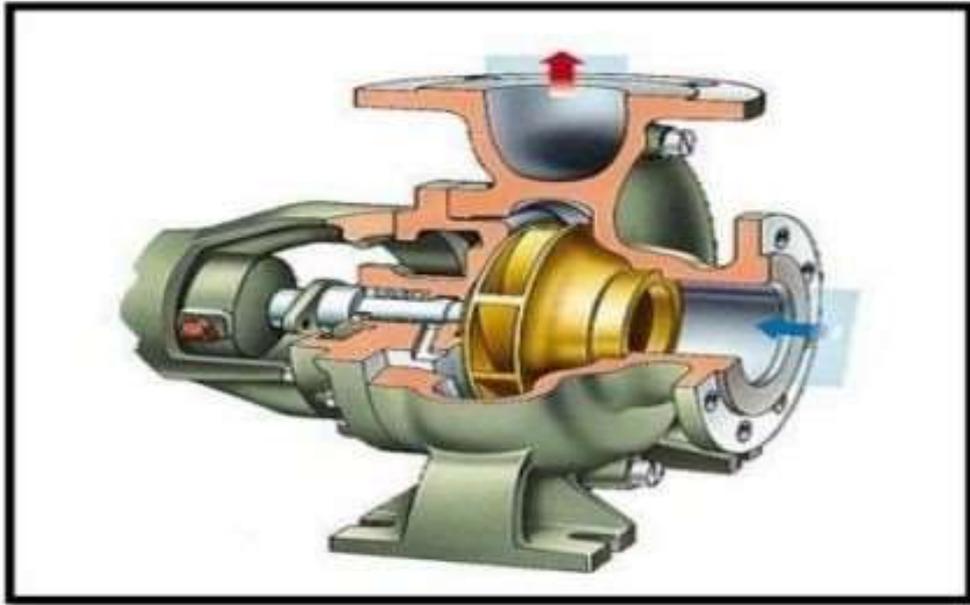


FIGURE 1.1 - une pompe centrifuge

### 1.3 DÉFINITION DE POMPE ET MACHINES HYDRAULIQUE

Une pompe est une machine hydraulique qui aspire et refoule un liquide (l'eau, l'huile, l'essence, les liquides alimentaires, etc.....) d'un point à un endroit voulu La pompe est destinée à élever la charge du liquide pompé.

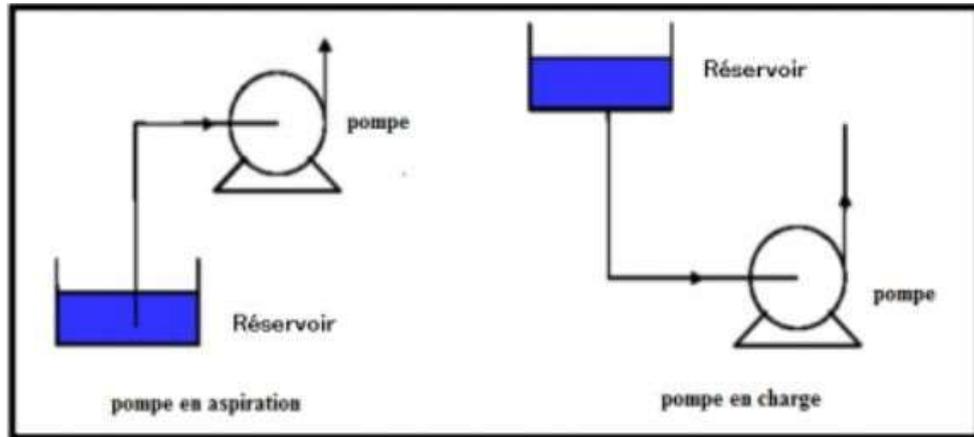


FIGURE 1.2 - Montage d'une pompe en aspiration et en charge

## 1.4 LES TYPES DES POMPES

- Il existe 2 types de pompes :

### 1.4.1 POMPE VOLUMETRIQUE

Le déplacement du fluide est dû aux transports d'un volume  $V_0$  à chaque rotation. Les pompes volumétriques ou à capacité variable sont des pompes dans lesquels l'écoulement du fluide résulte de la variation d'une capacité occupée par le fluide. On distingue deux grands types de pompes volumétriques :

- Les pompes alternatives
- Les pompes rotatives

1) **Les pompes alternatives** : Ces pompes sont caractérisées par le fait que la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif. Les principaux types des pompes alternatives sont :

- Pompe à piston
- Pompe à membrane piston plongeur
- Pompe à piston plongeur

a) **Pompe à piston** : Les pompes à piston constituent l'un des plus anciens types de pompes et demeurent parmi les plus répandues. Comme son nom l'indique

la pompe à piston utilise les variations de volumes occasionnées par le déplacement d'un piston dans un cylindre. Ces machines ont donc un fonctionnement alternatifs et nécessite un jeu de soupapes ou des clapets pour obtenir tantôt l'aspiration dans le cylindre tantôt son refoulement.

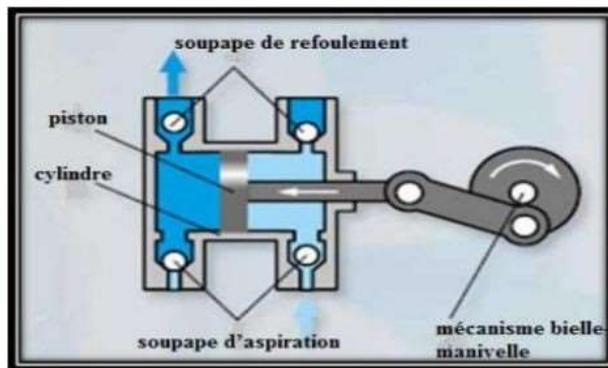


FIGURE 1.3 – Pompe à piston

Il existe différents types de pompes à piston :

- **Pompe simple effet** : Le refoulement et l'aspiration n'a lieu que pour un sens de déplacement du.

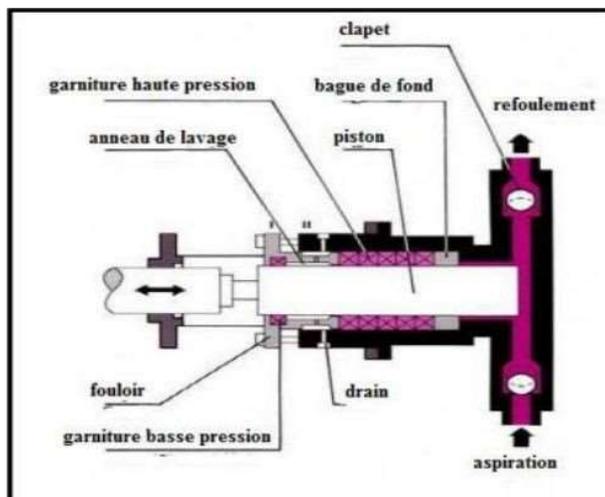


FIGURE 1.4 – Pompe à piston simple effet

- **Pompes double effet** : Le pompage s'effectue des deux côtés du piston : Le piston est actif dans les deux phases, celles-ci étant à la fois phase d'aspira-

tion et phase de refoulement. Cela permet un débit deux fois plus important et une régularité plus grande dans le débit.

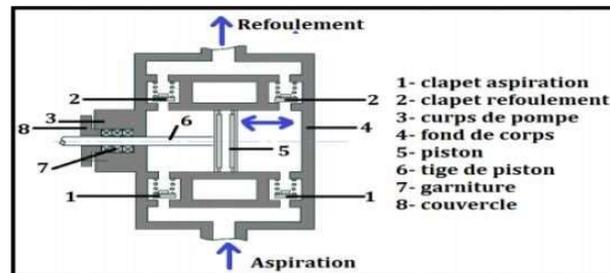


FIGURE 1.5 – Pompe à piston double effet

- b) **Pompe à membrane** : Le fluide n'entre pas en contact avec les éléments mobiles de la machine. Ces pompes sont donc bien adaptées au pompage des liquides corrosifs ou/et chargés de particules solides.

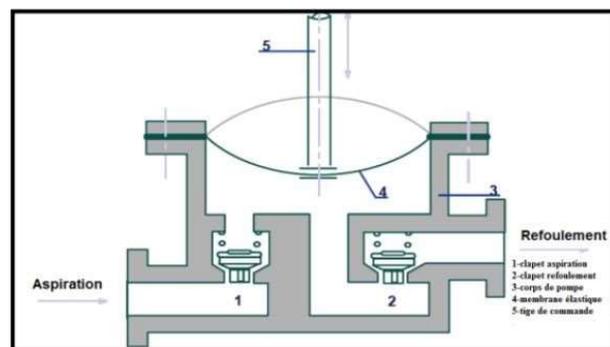


FIGURE 1.6 – Pompe à membrane

- c) **Pompes à piston plongeur** : Cette machine est un compromis entre la pompe à piston et la pompe à membrane. Le fluide n'est pas isolé du piston, mais les frottements de celui-ci sont faibles car limités au niveau du presse-étoupe qui assure l'étanchéité. Ces pompes sont adaptées à la production de hautes pressions.

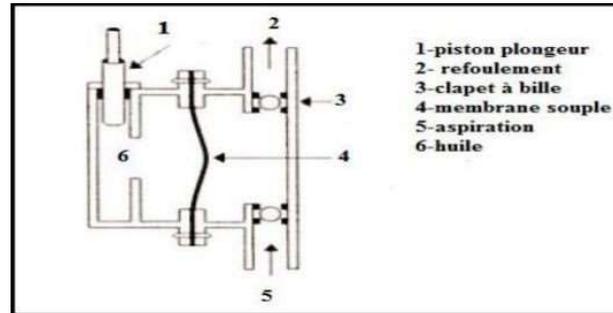


FIGURE 1.7 - Pompe à membrane

2) **Pompes rotatives** : La pièce mobile est animée d'un mouvement de rotation qui tourne dans le corps et crée le mouvement de liquide pompé par déplacement d'un volume. Les principaux types des pompes rotatives sont :

- Pompes à engrenage
- Pompes à vis
- Pompes à palettes

a) **Pompes à engrenages** : Deux pignons tournent en sens inverse dans un carter. Le fluide situé entre les dents et la paroi du carter est contraint d'avancer au cours de la rotation, tandis qu'au centre, le contact permanent entre les deux pignons empêche le retour du fluide vers l'amont malgré la différence de pression et le déplacement des dents qui se fait en direction de l'entrée.

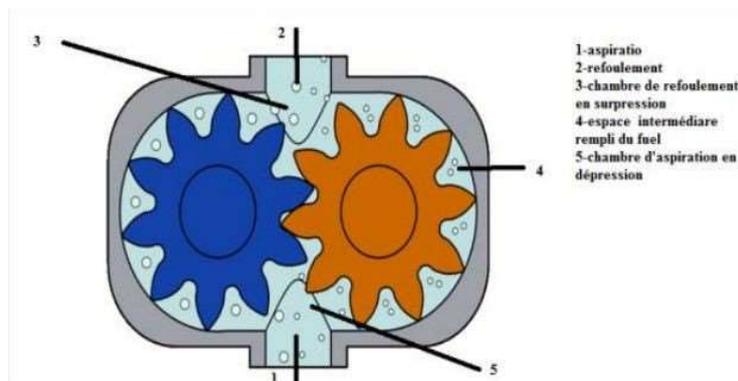


FIGURE 1.8 - Pompe à engrenages

Il existe deux types des pompes à engrenages :

- **Pompes à engrenages extérieu** Ce type de pompe comporte un grand nombre de variantes qui diffèrent entre elles soit par la disposition, soit par la forme des engrenages.

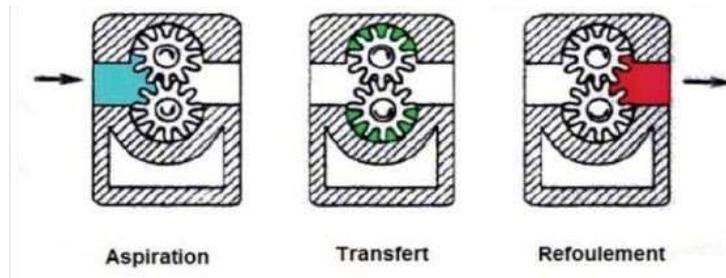


FIGURE 1.9 - Pompes à engrenages extérieu

- **Pompes à engrenages intérieures** Le principe général consiste à placer un des engrenages à l'intérieur de l'autre. Cette disposition nécessite l'utilisation d'une pièce supplémentaire en forme de croissant qui permet l'étanchéité entre les deux trains d'engrenages. Ce principe permet de n'avoir qu'un seul boîtier d'étanchéité, mais le porte-à-faux peut créer une surcharge sur l'arbre.

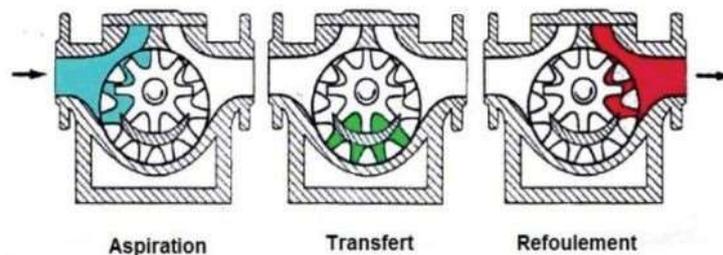


FIGURE 1.10 - Pompes à engrenages intérieures

- b) **Pompes à vis** :Elles sont formées de deux ou trois vis suivant les modèles. Dans le cas d'une pompe à trois vis, la vis centrale seule est motrice, les deux autres sont entraînées par la première. Dans le cas d'une pompe à deux vis, celles-ci sont souvent toutes deux entraînées par un jeu de pignons extérieurs. Ces pompes peuvent tourner vite (3 000 tr/min). Elles sont silencieuses et permettent d'atteindre des pressions assez élevées (100 bar).

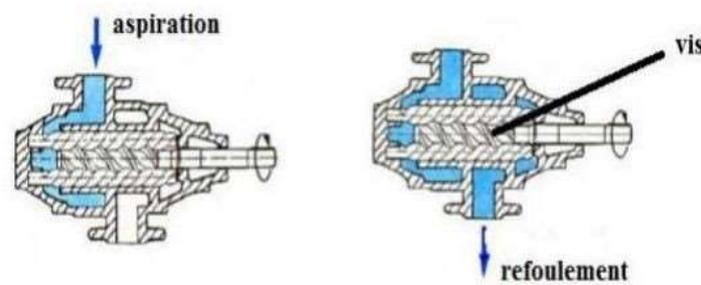


FIGURE 1.11 – Pompes à vis

c) **Pompes à palettes** : Il existe deux types de pompes à palette libre et flexible

- **Pompes à palettes libre** : Un corps cylindrique fixe communique avec les orifices d'aspiration et de refoulement. A l'intérieur se trouve un cylindre plein, le rotor, tangent intérieur au corps de la pompe et dont l'axe est excentré par rapport à celui du corps. Le rotor est muni de 2 à 8 fentes diamétralement opposées deux, dans lesquelles glissent des palettes que des ressorts appuient sur la paroi. Les capacités comprises entre les cylindres et les palettes créent ainsi une aspiration du liquide d'un côté et un refoulement.

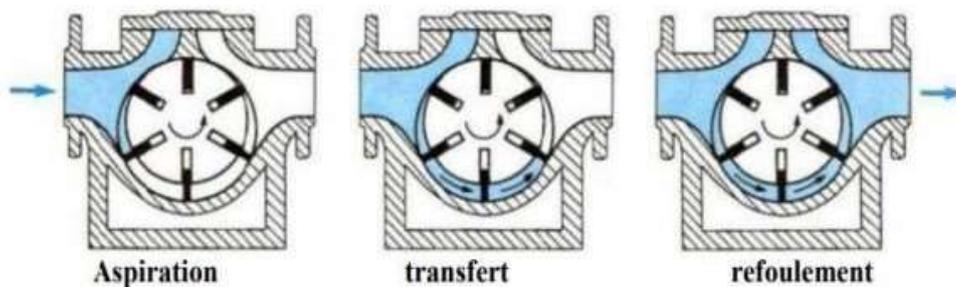


FIGURE 1.12 – Pompes à palettes libre

- **Pompes à palettes flexibles** L'ensemble rotor palettes est en élastomère. Il entraîne le liquide jusqu'au refoulement où les palettes sont fléchies par la plaque de compression et permettent l'expulsion du liquide. Comme toutes les pompes à palettes, ces pompes n'entraînent ni brassage, ni laminage, ni

émulsion du produit. Elles peuvent également pomper des particules solides (Fig. I.13). Les caractéristiques, débit, vitesse, pression sont sensiblement identiques aux précédent.



FIGURE 1.13 - Pompes à palettes flexibles

## 1.5 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES POMPES VOLUMÉTRIQUES

Le tableau I-1 illustre un résumé des avantages et inconvénients des pompes selon leurs types Tableau

TABLE 1.1 – illustre un résumé des avantages et inconvénients des pompes selon leurs types

Types des pompes	Avantages	Inconvénient
<b>Pompes à piston</b>	-Auto – amorçates (fort pouvoir d'aspiration) Bon rendement (> 90%) Pressions élevées au refoulement - débit réglable	-Très encombrantes Pour des liquides de viscosité faible – Pompage de molécules solides impossible – Débit pulsatoire (nécessité d'un dispositif anti-bélier)
<b>Pompes à membranes</b>	- Auto – amorçates (fort pouvoir d'aspiration) – Pompage de liquides-corrosifs, volatils – Propreté absolue du liquide pompé – Fonctionnement à sec sans dommage	Limitée en température Débit limité Pour des liquides de viscosité faible – Débit pulsatoire (nécessité d'un dispositif anti-bélier)
<b>Pompes à engrenages</b>	Débit régulier Pompe réversible – Pompage de liquides de viscosité élevée	Les pièces d'usure sont nombreuses Ne supportent pas les liquides abrasifs Pompage de particules solides impossible – Fonctionnement à sec à éviter
<b>Pompes à palette</b>	I n'y a ni brassage, ni laminage, ni émulsion nage du liquide pompé. Le débit est régulier - La pompe est réversible	Les palettes usent le corps par frottements. - Le pompage des fluides visqueux est difficile.
<b>Pompes à vis</b>	-Silencieuse.- Grande vitesse. - Bon rendement. -Pas de contact si les paliers sont entraînés par des pignons. -Étanchéité par joint torique, tresse ou garniture mécanique. Possibilité d'une enveloppe de réchauffage.	-Pas de particules solides. -Pas de produits abrasifs. -Si on utilise des pignons d'entraînement, il faut au moins deux boîtiers d'étanchéité. Nombreuses pièces d'usure

## 1.6 LES POMPES CENTRIFUGES ET LEUR PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Une pompe centrifuge dans sa forme la plus simple est constituée d'une roue munie d'ailettes radiales et tournantes à l'intérieur d'une enveloppe corps de pompe. Son principe de fonctionnement est d'utiliser la force centrifuge créée par la rotation de la roue pour transmettre au liquide pompé l'énergie. Le liquide à l'aspiration de la pompe se dirige vers le centre de l'impulseur (rotor) en rotation d'où il sera propulsé radicalement vers l'extérieur par la force centrifuge. Cette vitesse est ensuite convertie en pression au niveau de diffuseur.

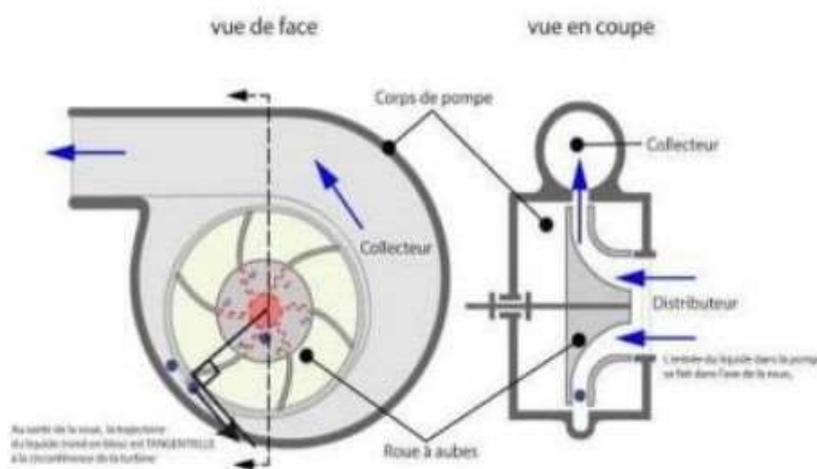


FIGURE 1.14 - Vue en coupe d'une pompe centrifuge

On peut décomposer le fonctionnement d'une pompe centrifuge en trois étapes :

### 1.6.1 L'ASPIRATION

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor. La pompe étant amorcée, c'est-à-dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage.

### 1.6.2 L'ACCELERATION

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie.

### 1.6.3 LE REFOULEMENT

Dans l'élargissement en sortie, qui se comporte comme un divergent, le liquide perd de la vitesse au profit de l'accroissement de pression : l'énergie cinétique est convertie en énergie de pression au niveau de diffuseur

## 1.7 CONSTITUTION D'UNE POMPE CENTRIFUGE

Les organes essentiels d'une pompe centrifuge sont les suivants

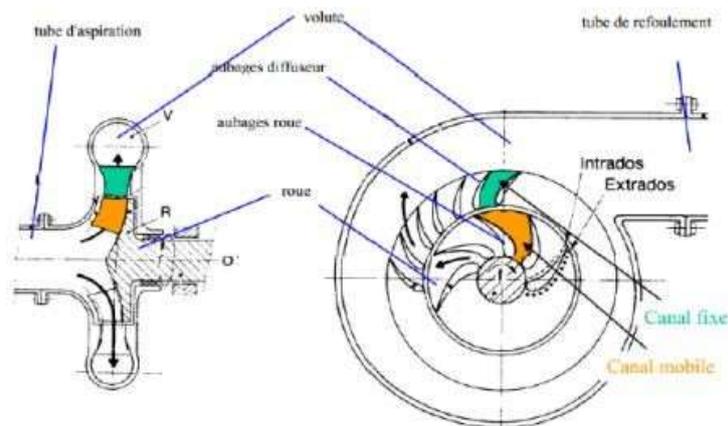


FIGURE 1.15 - Vue en coupe d'une pompe centrifuge

### 1.7.1 LA ROUE

C'est l'organe principal dans les pompes centrifuges. on l'appelle encore turbine, impulseur, rotor, cellule, mobil ou rouet. Elle communique au liquide à pomper une partie de l'énergie transmise à l'arbre dont elle est solidaire par le moteur d'entraînement. La transmission de l'énergie de la roue au liquide se fait par l'intermédiaire des aubes. Ces dernières sont de simples palettes incurvées, libres ou fixes sur des plaques métalliques.

Outre le transfert d'énergie, le rôle des aubes est aussi de guider l'eau dans la direction voulue.

Les roues des pompes centrifuges destinées à véhiculer de l'eau sont généralement en bronze. C'est un matériau facile à couler à travailler et à polir. La fonte, l'acier, l'acier inoxydable et des alliages des mêmes métaux sont aussi utilisées à cause de leur résistance à la corrosion, à l'érosion et à la décomposition électrolytique.

La roue est constituée par un moyeu porté par un arbre et muni d'aubes (ailettes) tournant à l'intérieur de deux coquilles formant le corps de la pompe. Les aubes peuvent être fixes sur un ou deux côtés à des disques ; On distingue :

- a) **Les roues ouvertes** : sont constituées de simples palettes incurvées semblables aux pales d'une hélice. Elles équipent les pompes pour liquides chargés, car elles laissent facilement passer les corps étrangers.
- b) **Les roues semi-ouvertes** : les pales sont accolées d'un côté sur une plaque pleine appelée flasque. Ce type de roue se rencontre fréquemment sur les pompes monocellulaires pour liquide chargé.
- c) **Les roues fermées** : Les roues fermées : ont leurs pales en séries entre deux flasques. Elles sont employées.

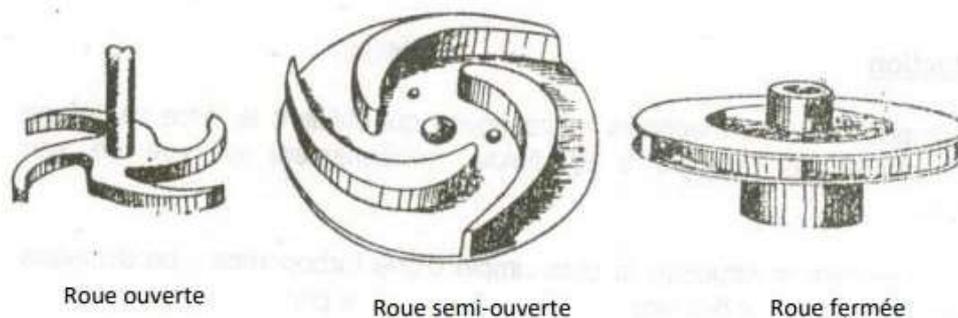


FIGURE 1.16 - Types des roues

### 1.7.2 LE DISTRIBUTEUR

Sorte de tubulure profilée qui, comme est nom l'indique, sert à conduire l'eau avec une vitesse et une direction convenable dans l'axe de la pompe ou « ouïe », « œillard » de la roue. Le distributeur est généralement constitué par un cône convergent qui permet de réaliser

Une meilleure disposition des files liquides en améliorant le parallélisme et l'égalité des vitesses. Il est précédé, à l'amant, par la canalisation de l'aspiration.

### 1.7.3 LE DIFFUSEUR

a 'est une roue fixe munie d'aubes directrices dont la courbure est inverse aux sens de rotation de la roue, cet élément non disponible donne à la pompe une pression supérieure, par ralentissement progressif de la vitesse du liquide.

### 1.7.4 VOLUTE

Appelée aussi colimaçon, elle forme le corps de la pompe. C'est une bêche en forme de spirale qui joue le rôle de diffuseur.

### 1.7.5 LE DIVERGENT

C'est le canal de sortie, il présente un élargissement progressif, et achève le travail du diffuseur.

## 1.8 CLASSIFICATION DES POMPES CENTRIFUGES

On peut les classer de plusieurs manières, en tenant compte notamment :

### 1.8.1 DISPOSITION DE L'AXE

On peut avoir plusieurs dispositions :

- a) **Pompes à axe horizontal** : conçues pour être disposée en surface, l'entretien et le démontage de ces pompes sont alors simplifiés.
- b) **Pompe à axe vertical** : ce sont des pompes immergées spécialement conçues pour l'équipement des puits profonds. Elles peuvent être commandées par un moteur placé en surface ou par un moteur immergé.

### 1.8.2 LE NOMBRE DE ROUE

On distingue des machines monocellulaires et des machines multicellulaires. Une turbomachine monocellulaire, comporte une seule cellule c'est à dire une seule roue dont

Certaines roues ont des aubages fixes comme mobile (cas d'une roue ouverte). Dans certains cas ; Il est nécessaire de disposer plusieurs cellules actives placées en série, les fluides parcourant successivement chacune d'elle, d'où l'appellation des machines multicellulaires e ou mon-étagé .

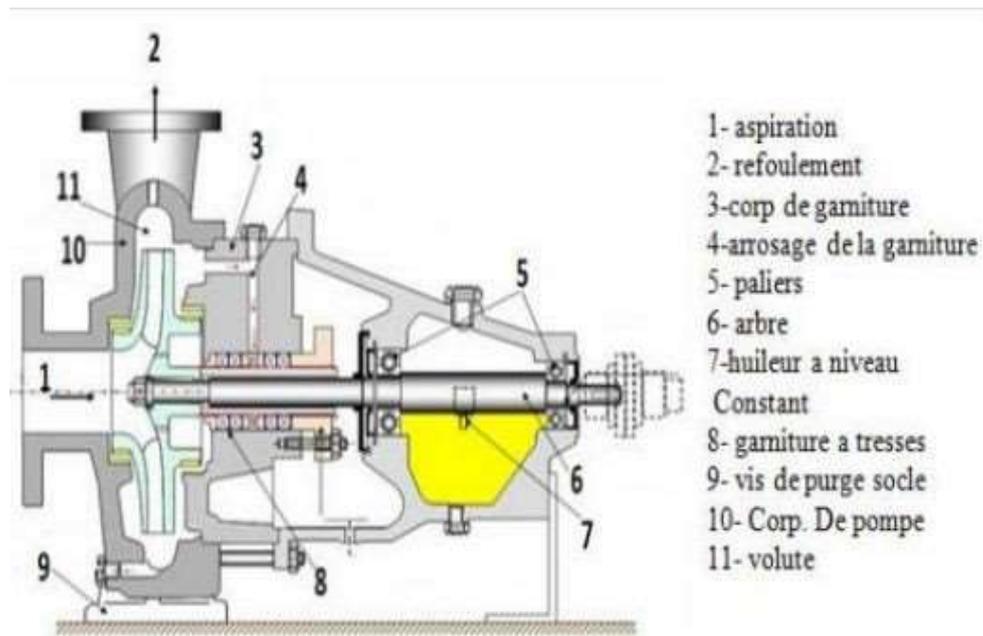


FIGURE 1.17 – pompe centrifuge mono- étage.

Multicellulaire ou multi-étages

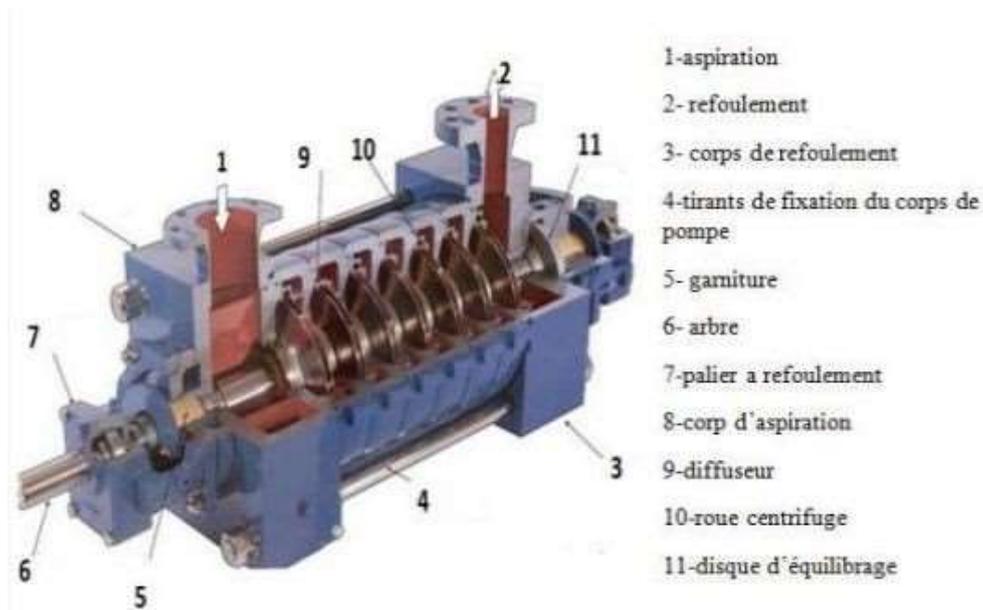


FIGURE 1.18 – pompe centrifuge multi-étage

1.8.3 LA FORME DE LA ROUE

Il existe deux types d'aspiration -simple aspiration

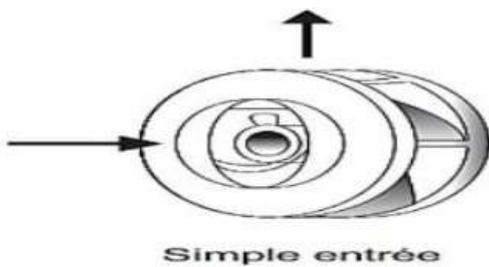


FIGURE 1.19 – Roue à simple aspiration

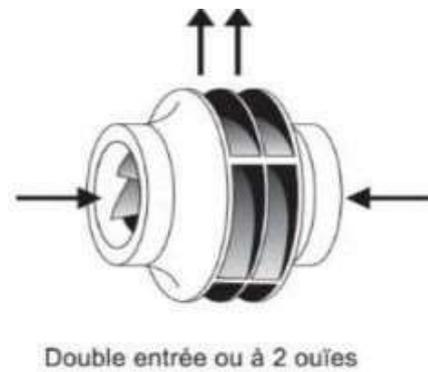


FIGURE 1.20 – Roue à double aspiration

1.8.4 LA FORME DES AUBES DE LA ROUE

- a) Pompes centrifuges radiales : pour lesquelles les filets de courant d'eau sont contenus dans des plans perpendiculaires à l'axe de la pompe.
- b) Pompes centrifuges axiale : pour les quelle les filets de courant sont axiaux.

- c) Pompes semi axiales :(hélico-centrifuges) : Dont les filets sont situés sur des surfaces dont la méridienne est inclinée par rapport à l'axe de la pompe. C'est à dire semihélicoïdale (ni axiale, ni radiale).

#### **1.8.5 LA POSITION DE LA POMPE PAR RAPPORT AU NIVEAU D'ASPIRATION**

Selon la position de l'axe de la pompe par rapport au plan d'aspiration ,on distingue :

- Des installations des pompes à dépression (en aspiration).
- Des installations des pompes en charge.
- Des installations des pompes type siphon

#### **1.8.6 LA PRESSION ENGENDRÉE**

- Faible pression
- Forte pression

#### **1.8.7 MOYEN D'ACCOUPLLEMENT**

- Par chaine
- Par engrenage
- Par bride
- Par courroie

#### **1.8.8 MOYEN D'ENTRAINEMENT**

- Par moteur électrique
- Par moteur diesel ou essence
- Par turbine à vapeur ou à gaz

#### **1.8.9 TYPE DU RÉCUPÉRATEUR**

- Volute
- Diffuseur

### 1.8.10 USAGE

- Pompe à usage normale
- Pompe à boue
- Pompe à acide
- Pompe à mazout et essence

## 1.9 PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES D'UNE POMPE

### 1.9.1 DÉBIT VOLUMIQUE $Q_v$

Le débit volumique «  $Q_v$  » caractérise la quantité de liquide qui passe à travers une section donnée (section de refoulement) «  $S$  » par unité de temps «  $t$  ». Cette quantité de liquide est aussi caractérisée par la vitesse de passage à travers cette section.

$$Q_v = V \cdot S \quad (1.1)$$

- $Q_v$  : débit volumétrique [ $m^3/s$ ]
- $V$  : volume de l'écoulement [ $m^3$ ]
- $S$  : la section de l'aire [ $m^2$ ]

### 1.9.2 PRESSION

L'unité légale de pression est le Pascal (Pa). Le Pascal est la pression exercée par une force de 1 N agissant sur une surface de 1  $m^2$ . Dans la pratique on utilise le bar 1 bar = 10<sup>5</sup> Pa :

$$P = \frac{F}{S} \quad (1.2)$$

- $P$  : pression en bar ou en  $kg/cm^2$
- $F$  : force en daN (déca newton) ou kg (kilogramme-force)
- $S$  : surface en  $cm^2$

En hydraulique, la pression c'est la force.

### 1.9.3 PUISSANCE

Puissance utile ( $P_u$ ) : travail réalisé par la pompe :

$$P_u = \rho \cdot g \cdot Q \cdot HMT \quad [\text{W}] \quad (1.3)$$

- $P_u$  : puissance utile [W]
- $\rho$  : la masse volumique de fluide [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $g$  : la gravité [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]
- $Q$  : débit volumique [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $HMT$  : hauteur manométrique d'une pompe [m]

### 1.9.4 PUISSANCE ABSORBÉE (PA)

fournie sur l'axe de la pompe (moteur asynchrone, par exemple)

$$P_a = C \cdot \omega = C \cdot \frac{n \cdot 2\pi}{60} \quad [\text{W}] \quad (1.4)$$

- $P_a$  : puissance absorbée [W]
- $C$  : couple moteur [N.m]
- $\omega$  : vitesse de rotation [rad/s]
- $n$  : vitesse de rotation [tr/min]

### 1.9.5 RENDEMENT $\eta$

Rendement globale de la pompe  $\eta_g$  :

$$\eta_g = \frac{P_u}{P_a} \quad (1.5)$$

- $\eta_g$  : efficacité globale (rendement)
- $P_a$  : puissance absorbée [W]
- $P_u$  : puissance utile (puissance hydraulique) [W]

### 1.9.6 CYLINDREE

C'est le volume engendré pour une rotation d'un tour. Elle est exprimée en cm<sup>3</sup>/tr.

$$Cyl = V \cdot ne \cdot n_c \quad (1.6)$$

- $Cyl$  : cylindrée
- $V$  : volume d'un élément
- $ne$  : nombre d'éléments
- $n_c$  : nombre de courses par tour

### 1.9.7 LE COUPLE

Le couple nécessaire à l'entraînement d'une pompe est défini par

$$C = \frac{Cyl \cdot \Delta p}{2\pi} \quad (1.7)$$

- $C$  : couple [daN · cm]
- $Cyl$  : cylindrée [cm<sup>3</sup>/tr]
- $\Delta p$  : différence de pression [bars]

### 1.9.8 HAUTEUR MANOMÉTRIQUE OU HAUTEUR D'ÉLÉVATION D'UNE POMPE (HMT)

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 HTA est la charge totale du liquide à l'aspiration et HTR la charge totale du fluide à l'orifice du refoulement, la Hauteur manométrique de la pompe est :

La hauteur varie avec le débit et est représentée par la courbe caractéristique

$$H = f(Qv) \quad (1.8)$$

Cette différence de pression entre la pression amont et la pression en aval en fonction du débit constitue la caractéristique de la pompe. La hauteur manométrique est généralement exprimée en hauteur de colonne d'eau (mètre de colonne d'eau : mCE). Pour déterminer la

hauteur manométrique il faudra bien faire attention de considérer les pressions totale  $P_a$  (avant la pompe) et  $P_r$  (après la pompe).  $H_m$  est calculé à partir de la formule suivante :

$$HMT = \frac{P_r - P_a}{\rho g} \quad (1.9)$$

- $P_a$  : pression d'aspiration [Pa]
- $P_r$  : pression de refoulement [Pa]
- $\rho$  : la masse volumique de fluide [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $g$  : la gravité [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

### 1.10 CONCLUSION

Ce chapitre offre une introduction aux pompes centrifuges, en explorant leurs caractéristiques essentielles, leur principe de fonctionnement et leurs diverses applications. Nous avons mis en lumière les éléments clés de ces pompes, permettant une meilleure compréhension de leur rôle dans le domaine hydraulique.

## **CHAPTER 2**

---

# **ÉTUDE DE FAUT MÉCANIQUE ET ÉLECTRIQUE QUI PEUVENT SURGIR LORI DE FONCTIONNEMENT DE LE POMPE DEUIL**

---

### **2.1 INTRODUCTION**

A l'époque moderne, la tâche principes de l'entretien des machines électriques tournantes est de Diagnostic les vitres et précision, ce qui est L'effort de maintenance indispensable et ses implications. Économies importantes sur les véhicules et maintenance du système à une Surveillance plus efficacité d'état. Le Principe de l'analyse Vibration Analyse est que tous les machines tournantes (moteur, pompe, compresseur, turbine...) sont bases sur l'ide que les Compagnons sont générations pendant le fonctionnement et que les Vibrations sont causées par défaut. Dans ce chapitre, nous présentera des directives de maintenance. Nous avons différents types Techniques de maintenance et de présentation Conditions de maintenance

## 2.2 LA MAINTENANCE

### 2.2.1 DÉFINITION DE LA MAINTENANCE

Il s'agit d'un ensemble d'opérations permettant de préserver ou de récupérer des actifs (machines, équipements, processus, état spécifié) ou d'assurer certains services. [9]

### 2.2.2 LES DIFFERENTS TYPES DE MAINTENANCE

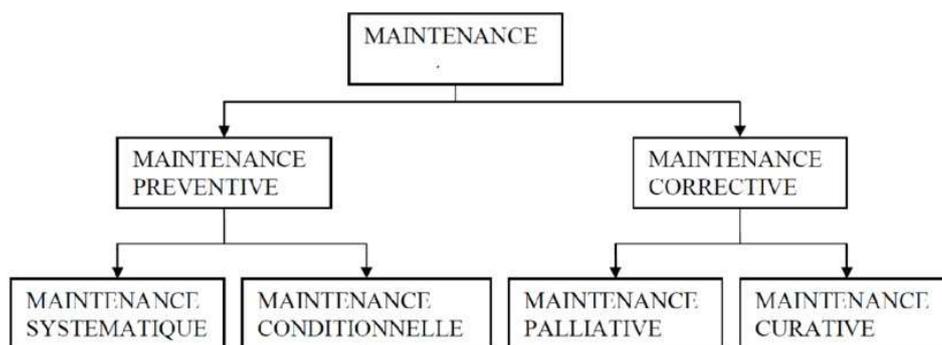


FIGURE 2.1 - Les différents types de maintenance.

### 2.2.3 LA MAINTENANCE CORRECTIVE

Appelé aussi urgence, accident, médical ou maintenance. Effectuer une maintenance après une panne. C'est une attitude d'attente de la panne pour intervenir. On peut le diviser en 2 branches : les soins palliatifs et les soins médicaux [10]

### 2.2.4 MAINTENANCE PALLIATIVE

Activités de maintenance corrective destinées à permettre temporairement à un bien d'effectuer tout ou partie de ses opérations requises. Généralement appelés « solution », les soins palliatifs consistent principalement en des actions temporaires qui doivent être suivies d'une thérapie [11]

### **2.2.5 MAINTENANCE CURATIVE**

Activités de maintenance corrective dont le but est de remettre un bien dans un état spécifié ou de fournir la fonctionnalité requise. Ces activités peuvent :

- Réparer.
- Effectuer des changements ou des modifications visant à corriger des défauts.

la ou les défaillances [12]

### **2.2.6 MAINTENANCE PREVENTIVE**

Le but de la maintenance préventive est d'identifier toutes les opérations qui doivent être effectuées dans un processus. Afin de ne pas être affecté par une panne, deux approches possibles peuvent être distinguées : la maintenance préventive du système. Et maintenance préventive conditionnelle [13]

### **2.2.7 MAINTENANCE SYSTEMATIQUE**

Selon la norme NF X 60010, il s'agit d'une « maintenance préventive qui s'effectue selon un calendrier prédéterminé en fonction du temps ou du nombre d'unités d'utilisation ». La réalisation de cette maintenance nécessite de diviser une machine en composants maintenables. Ces éléments doivent être tournés ou changés de temps en temps. [14]

### **2.2.8 MAINTENANCE CONDITIONNELLE**

Définition selon NF X 60010 "Maintenance préventive sous types d'événements prédéfinis (autodiagnostic Notifications des capteurs Mesure d'usure Identification de l'état de détérioration de l'actif)" Le franchissement du seuil peut être mis en évidence par des informations fournies par des capteurs ou par d'autres moyens. Maintenance préventive subordonnée au franchissement d'un seuil prédéterminé significatif de l'état de dégradation du bien. Le franchissement du seuil peut être mis en évidence par l'information donnée par un capteur ou par tout autre moyen

a) Les avantages :

- Défaillance par décomposition : Défaillance progressive et partielle À la longue, une telle défaillance peut devenir une défaillance totale Cela dépend de la raison.

- Défaillance due à des faiblesses inhérentes : Défaillance causée par des faiblesses inhérentes à une machine lorsque ses limitations ne dépassent pas les possibilités nominales de la machine. (Points faibles dus à la conception ou à la structure de la machine)
- Défaillance due à une utilisation inappropriée : Défaillance due à l'utilisation de limitations qui dépassent les possibilités nominales de l'appareil.

b) Les inconvénients :

- Cout d'investissement.
- Astreindre à un programme suivi. [15]

### 2.3 DÉFINITION DES DÉFAILLANCES DES MACHINES TOURNANTES NF X 06-501

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

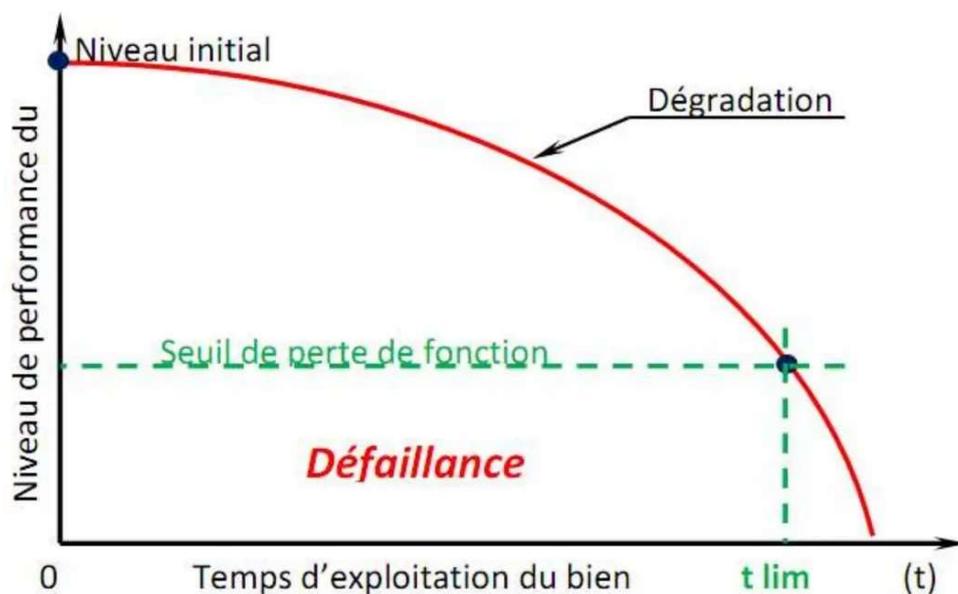


FIGURE 2.2 – Dégradation du bien et durée de vie

**En fonction de la rapidité de la manifestation**

- Défaillance progressive : défaillance qui aurait pu être prévue par un examen ou une surveillance.
- Défaillance soudaine : défaillance qui n'aurait pas pu être prévue par un examen ou une surveillance.

### **En fonction du degré d'importance**

- Défaillance partielle : défaillance résultant de déviations d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées, mais telle qu'elle n'entraîne pas une disparition complète de la fonction requise.
- Défaillance complète : défaillance résultant de déviations d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées, telle qu'elle entraîne une disparition complète de la fonction requise.
- Défaillance intermittente : défaillance d'un dispositif pour une période de temps limitée, après laquelle le dispositif retrouve son aptitude à accomplir la fonction requise sans avoir été soumis à une action corrective extérieure. De telles défaillances sont souvent répétitives.

### **Par combinaison des concepts précédents**

- Défaillance catalectique : défaillance à la fois soudaine et complète.
- Défaillance par dégradation : défaillance à la fois progressive et partielle. A la longue, de telles défaillances peuvent devenir de défaillances complètes.

### **En fonction des causes**

- Défaillance due à une faiblesse inhérente : défaillance attribuable à une faiblesse inhérente au dispositif lui-même lorsque les contraintes ne sont pas au-delà des possibilités données du dispositif (faiblesse due à la conception ou à la réalisation du dispositif).
- Défaillance due à un mauvais emploi : défaillance attribuable à l'application de contraintes au-delà des possibilités données du dispositif.
- Défaillance première : défaillance d'un dispositif dont la cause directe ou indirecte n'est pas la défaillance d'un autre dispositif.
- Défaillance seconde : défaillance d'un dispositif dont la cause directe ou indirecte est la défaillance d'un autre dispositif.

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations, images des efforts dynamiques engendrent par les pièces en mouvement. Ainsi, une machine neuve en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibration. La détérioration du fonctionnement conduit le plus souvent à un accroissement du niveau des vibrations

## **2.4 LES SOURCES D'INFORMATIONS POUR DETECTIONS DES DEFAUTS**

### **2.4.1 L'ANALYSE VIBRATOIRE**

C'est le plus connu et le plus utilisé car il est adapté aux composants mécaniques et aux machines industrielles en service. La plupart des erreurs trouvées dans les machines rotatives peuvent être reconnues. [16]

### **2.4.2 L'ANALYSE D'HUILE**

Peut être utilisé sur toutes les machines avec de l'huile de lubrification. (Réducteur de vitesse, refroidissement moteur, motoréducteur, etc.), ce qui implique de prélever des échantillons d'huile et de les analyser (usure des particules) pour résumer l'état de l'équipement Caractéristiques des différentes différences de résultats telles que :

- Dans les moteurs thermiques : Problèmes d'étanchéité du filtre à air. Infiltration de liquide de refroidissement
- Dans les multiplicateurs, réducteurs et engrenages : Mauvais roulement ou mouvement du roulement. Erreur de transmission (engrenage endommagé)
- Dans les systèmes hydrauliques : contamination interne telle que cavitation, défauts d'étanchéité. Défauts de filtration [17]

### **2.4.3 LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE**

Qui conduit aux connexions de courant dans la zone de maintenance utilisée pour contrôler les installations électriques. Il est également utilisé pour inspecter les équipements en fonctionnement afin de détecter les défauts dus à l'usure normale de l'équipement. Les thermographes permettent de surveiller les zones à distance. Et la réflexion du thermomètre dans la zone peut être vérifiée immédiatement. [18]

#### **2.4.4 L'ANALYSE ACOUSTIQUE**

Cette mangeoire était facile à utiliser comme microphone placé à l'écart de votre paiement.

#### **2.4.5 LE CONTROLE PAR ULTRASONS**

C'étaient les données des malts abner lumbaltés à haute fréquence, sousse comme apportant la fusion.

TABLE 2.1 – Techniques d’analyse de l’état d’une machine tournante

	<b>Principaux avantages</b>	<b>Principales limitations</b>	<b>Champ d’applications</b>
<b>Analyse vibratoire</b>	- Détection précoce des défauts - Surveillance continue - Télémaintenance	- Spectres difficiles à interpréter - Installations coûteuses	Défauts des organes cinématiques et de la structure
<b>Analyse d’huile</b>	- Détection de pollution anormale avant usure - Identification de l’origine de l’anomalie	- Localisation imprécise du défaut - Précautions nécessaires pour l’échantillonnage	Contrôle des propriétés physico-chimiques, détection de manque de lubrification
<b>Thermographie IR</b>	- Contrôle rapide - Résultats immédiats	- Détection moins précoce que l’analyse vibratoire - Limité à ce que voit la caméra	Défauts causant un échauffement
<b>Analyse acoustique</b>	- Détection des défauts audibles - Surveillance continue	- Sensibilité au bruit ambiant - Diagnostic difficile - Problèmes de mesure	Détection de bruit inhabituel analysé par analyse vibratoire

## 2.5 DÉFAUTS DES MACHINES TOURNANTES

panne d’un équipement électrique fait référence à tout événement qui n’est pas conforme à l’ajustement normal de l’appareil. Et cela pourrait entraîner une action en justice devant le tribunal ou une provocation à long terme de votre fils. Valeurs par défaut dans les équipements électriques en fonction de leurs origines de conception Technologie de production, assemblage, installation, environnement défectueux nature des dépenses et calendrier de

maintenace Il existe des valeurs par défaut pour différentes origines de différentes catégories : internes et externes. Les pénuries internes sont causées par les composants de la machine (bobine de rotor de stockage, circuit magnétique, châssis de rotor, transformateur électromécanique, etc.) Les pénuries externes sont causées par le type d'installation.et les charges mécaniques peuvent être causées par les machines utilisées. [19]

**TABLE 2.3** – Classification des défauts de machine électrique selon leurs origines.

<b>Défaillances des machines électriques</b>		<b>Contact entre le stator et rotor</b>
	<b>Mécanique</b>	- Défaut de roulements - Excentricité - Mouvement des enroulements et des tôles
<b>Externe</b>	<b>Mécanique</b>	- Charge oscillante - Surcharge de la machine - Défaut de montage
	<b>Environnementale</b>	- Humidité - Température - Propreté

Statistiquement, les études récentes faites par Bonnet sur les machines asynchrones de grande puissance, exploitées dans l'industrie pétrochimique, montrent que 69% de pannes se situent sur les roulements, 21% au stator, 7% au rotor et 3% dans les autres régions de la machine.

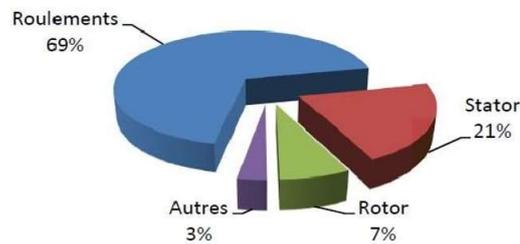


FIGURE 2.3 - Le pourcentage des défauts [8]

### 2.5.1 LES ROULEMENTS

roulements sont des composants de base qui assurent une liaison mobile entre deux éléments d'un système qui tournent l'un par rapport à l'autre. Sa fonction est d'assurer la rotation relative de ces éléments sous charge. Il est précis et présente un frottement minimal. La plupart des appareils électriques utilisent des roulements à billes ou à rouleaux. Environ 60 à 70% des pannes de machines impliquent des roulements à billes. Les roulements à billes sont constitués des composants suivants.

- Deux anneaux concentriques en fer. Ils sont appelés bague intérieure et bague extérieure. Il y a un canal d'eau. (la surface sur laquelle le corps roulant « roule »)
- objets roulants bille ou rouleau Généralement en acier. où les deux anneaux se déplacent avec un frottement minimal.
- Une cage (en polyamide, en tôle d'acier, en laiton ou en résine) pour séparer et contrôler le corps roulant.

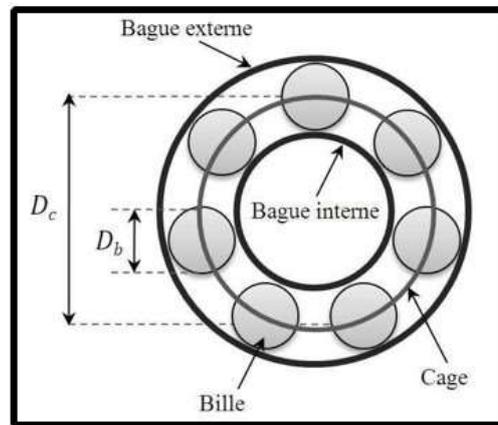


FIGURE 2.4 – Structure d'un roulement à billes

En effet, le composant le plus important de toute machine tournante est le roulement. Ils contiennent souvent des stimuli qui, dans de nombreux cas, entraînent des erreurs dues à une défaillance partielle ou totale de l'appareil. Cela se traduit par une catastrophe. Selon les statistiques, dans 90% des cas, la cause se trouve dans des éléments externes, qui peuvent être résumés dans le tableau...

TABLE 2.5 – Cause des défauts dans les roulements

Cause du défaut	%
Lubrification inadaptée (choix des lubrifiants, quantité, fréquence de lubrification, ...etc.)	70%
Pollution (poussière, détergents, liquides, ...etc.)	18%
Montage incorrect (brutal, jeu, désalignement, échauffement excessif, ...etc.)	10%
Fatigue (charge, contraintes)	2%

## 2.6 DÉFAUTS DES PALIERS À FILM D'HUILE (PALIERS LISSES)

### 2.6.1 DÉFINITIONS

Dans ces paliers Les surfaces en regard des pièces en mouvement relatif sont séparées par un film d'huile. Dans ce type d'effet

- Paliers hydrodynamiques : Un film d'huile est créé par le mouvement de l'arbre.
- Paliers hydrostatiques : Un film d'huile est créé par la pompe.

### **2.6.2 CARACTERISTIQUES**

- Résistant à l'érosion même sous un poids important. à billes adaptés aux faibles vitesses et aux charges lourdes..
- Compact avec une construction simple et un faible coût.
- La capacité de charge est inversement proportionnelle à la vitesse.
- La capacité de charge est inversement proportionnelle à la vitesse.
- Fonctionne silencieusement et convient aux couples de transmission élevés.
- Coefficient de frottement réduit et fonctionnement sans lubrification

### **2.6.3 AVANTAGES DES PALIERS LISSES**

- La dernière partie de la pièce est augmentée
- Silencieux (séparer les deux parties avec un film d'huile)
- Insensible à la poussière (pas besoin d'accouplement)
- Vitesse de rotation élevée
- La surface de la voiture est très bonne. Par conséquent, elle n'est pas sensible aux chocs et aux vibrations.
- Amortisseur lubrifié (moins d'amortisseurs et moins d'amortisseurs de vibrations)

### **2.6.4 INCONVÉNIENTS DES PALIERS LISSES**

- Surveillance plus détaillée et contrôle efficace de la lubrification
- Utiliser plus d'huile pour la lubrification.
- Grand moment résistant au démarrage (contact métal -métal) - Rendement faible (perte par frottement).

## 2.7 L'ENGRENAGE

### 2.7.1 DÉFINITION

engrenage est un mécanisme constitué de deux disques dentés qui se déplacent autour d'un axe dans une position fixe. Une plaque touche et entraîne l'autre plaque selon l'action des dents. Et on dit que les deux plaques sont reliées... Les petites roues sont appelées engrenages. La grande roue extérieure est appelée roue. La grande roue intérieure est appelée couronne. Un disque peut avoir un rayon infini. Et il est appelé crémaillère. Trois principaux types d'engrenages peuvent être classés selon la position relative des arbres. [20]

- engrenages à axes parallèles
- engrenages à axes simultanés
- engrenage à axe arbitraire

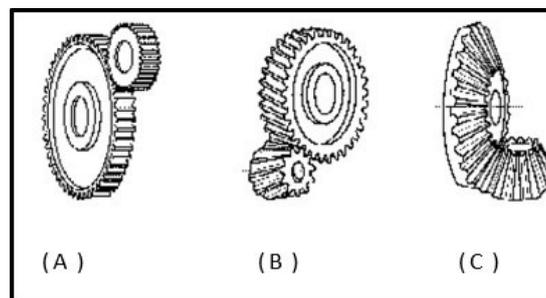


FIGURE 2.5 – Engrenages à axes parallèles (A et B), à axe concourant (C)

### 2.7.2 DÉFAUTS DES ENGRENAGES

pouvons utiliser des engrenages pour transmettre la vitesse et la puissance mécanique entre des arbres parallèles ou non parallèles, synchrones ou non parallèles. verticaux ou horizontaux Les engrenages peuvent être utilisés à diverses fins, comme réduire (ou modifier) la vitesse de rotation entre deux arbres en réduisant (ou en augmentant) le couple du moteur. Mais dans une boîte de vitesses en bonne santé, les engrenages sont la principale source de vibrations. La source d'irritation la plus courante provient de la force d'impact entre

l'engrènement des deux dents de la plaque. Le mouvement du point de contact entre les deux profils de dents et les changements de dureté des dents.

### 2.7.3 LES DIFFERENTS TYPES DE DEFAUTS DES DENTURES D'ENGRENAGES

#### 0. Défauts de fabrication

##### a) Erreur de coupe

- Conception de la machine
- Etat de la machine.
- Précision géométrique de l'outil de forme • Conception du stabilisateur.

b) **Erreur de pas (p)** L'erreur de pas est caractérisée par l'erreur de position angulaire par rapport à la position théorique des dents dans le plan apparent de l'engrenage. Deux quantités représentant la qualité de sortie de l'engrenage sont liées à cette erreur. Ces quantités sont les erreurs de volume individuelles et les erreurs de volume cumulées.

##### c) Erreurs de profil de denture

- Erreur totale de profil.
- Erreur d'inclinaison de profil.
- Erreur d'excentricité du diamètre primitif ou erreur de faux-rond.

#### 0. Défauts de traitement thermique

- **Défauts de rectification** : Une opération de rectification conduite avec une avance ou une profondeur de passe excessive peut entraîner des criques par suite d'échauffement localisé important. Ces criques peuvent constituer des amorces de rupture, surtout si elles sont localisées vers le pied des dents et dans le sens longitudinal.

#### 0. Défauts de montage

- Défaut d'alignement ou de parallélisme
- Mauvais centrage : On peut observer une modulation de cet effort si les roues ne sont pas bien centrées, Cette modulation se traduit par l'apparition dans le spectre vibratoire de raies parallèles autour de la fréquence de denture. Les vibrations d'un réducteur ou d'un multiplicateur sont une fonction du couple et des efforts radiaux.

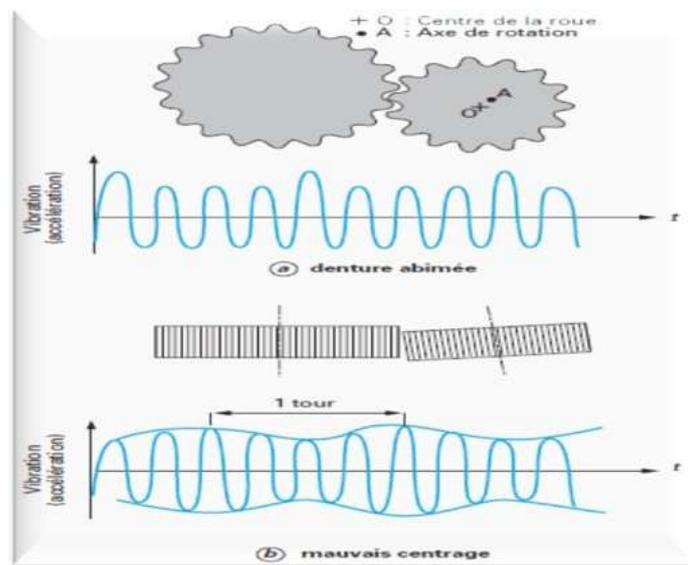


FIGURE 2.6 - Vibrations d'un engrenage

## 2.8 LES COURROIES

### 2.8.1 DÉFINITION

Une courroie est un dispositif permettant de transmettre la puissance de l'arbre à l'arbre récepteur. Nous savons que la transmission peut être réalisée à l'aide d'engrenages à chaîne. La transmission par courroie est choisie lorsque la vitesse linéaire est élevée. Érosion et bruit

### 2.8.2 FONCTIONNEMENT DES COURROIES

Les courroies sont des composants d'un système de transmission de puissance, comme les engrenages ou les chaînes à rouleaux. Leur rôle est de transmettre la force multipliée par la vitesse ou le couple d'un composant rotatif à un autre. Le principe de fonctionnement de la courroie dépend de deux éléments principaux.

- une surface de contact dont la taille dépend du coefficient de frottement, qui permet de prélever le couple de la poulie motrice, de le transmettre au châssis de traction puis de le restituer à la poulie de transmission.

- un châssis capable de convertir la force tangentielle appliquée par la poulie motrice en force de traînée longitudinale entre les poulies.

La combinaison de ces deux éléments est caractérisée par une résistance transitive qui est directement liée à l'absence de glissement du premier élément et à la résistance au cisaillement du second. C'est pourquoi ces composants sont souvent constitués d'un côté d'élastomère et de l'autre de fibre synthétique.

### **2.8.3 DEFATS DE COURROIES**

Les courroies sont utilisées pour transmettre la puissance entre deux barres qui ne sont pas très éloignées l'une de l'autre. Une courroie avec des bandes sans fin sur deux poulies transmet la puissance grâce à sa traction sur les poulies.

- Les principaux défauts rencontrés sur ce type de transmission sont :
  - courroie lâche et vieille courroie
  - mauvais alignement des poulies et poulie étrange
  - dysfonctionnement de la transmission par courroie avec des poulies dentées.
- Les causes des vibrations :
  - par une distribution de puissance insuffisamment serrée
  - avec des poulies déséquilibrées
- Lors de l'installation, les vibrations des courroies indiquent :
  - La taille de la transmission de puissance est petite. Et le rapport de réduction doit être noté.
  - L'entraxe est trop large : cela peut être corrigé en plaçant un galet tendeur du côté du filetage entraîné.

## **2.9 STATOR ET ROTOR**

### **2.9.1 STATOR**

Le stator est constitué d'un cadre en acier rempli de tôles fines. Uniforme, qui a la forme d'une couronne, qui forme un cylindre vide. Ces tôles sont déchirées. Elles présentent

des trous sur le bord intérieur. L'alignement de ces fosses donne lieu à une délimitation de mine à trois niveaux. La couronne est enfermée dans un cadre en fonte.

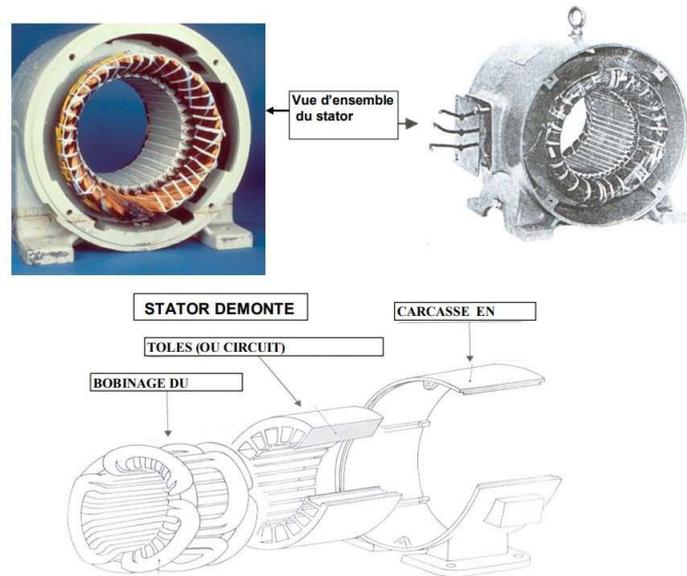


FIGURE 2.7 - le stator

### 2.9.1.1 CAUSES DES DEFAUTS DU STATOR

Les enroulements du stator des appareils électriques sont soumis à des contraintes causées par divers facteurs. Le plus important est la surcharge thermique. Vibrations mécaniques Tension maximale générée par le réglage de la fréquence Les causes les plus courantes de dysfonctionnement des enroulements du stator

du noyau du stator et du boîtier. Fissures dans la tôle, les adhésifs et les joints. Faible connexion de la tête courbée. Contamination par de la saleté huileuse humide. Court-circuit, Surcharge lors de la mise sous tension Décharge électrique Fuites dans le système de refroidissement

### 2.9.2 LE ROTOR

Le rotor ressemble à une cage d'écureuil. Il est constitué d'une même tige métallique qu'elle soit parallèle ou non à l'axe du rotor. Ces tiges sont reliées par deux anneaux métalliques. Il est donc court-circuité. L'intérieur est tapissé d'une fine feuille de métal. Séparée par du vernis pour limiter l'étendue du tourbillon. Le rotor ne peut pas tourner

à la même vitesse que le champ magnétique. Sinon, la cage ne sera pas repoussée par le champ tournant et le courant induit. Par conséquent, la force de Laplace et le couple moteur disparaissent. Par conséquent, les deux fréquences de rotation ne peuvent pas être synchronisées. D'où l'origine du nom de moteur asynchrone. [21]



FIGURE 2.8 – le rotor

### 2.9.2.1 DEFANTS DU ROTOR

Les défauts du rotor sont considérés comme plus complexes et plus divers que les défauts du stator. Les dysfonctionnements du rotor rencontrés dans les machines asynchrones peuvent être classés comme suit.

- défaillance de la barre du rotor,
- bague défectueuse
- court-circuit dans les enroulements du rotor

Ceci est différent de la conception du stator. La conception et la construction du rotor à cage ont peu changé au fil des ans. Les cas de défaillance du rotor représentent environ 10 % des... Défaillances de tous les moteurs asynchrones Cependant, la plupart des recherches présentées dans la littérature dans le domaine du diagnostic des défauts et de l'inspection des machines électriques concernent les défaillances du rotor. En revanche, les défauts des roulements, qui représentent environ 40 à 50 % des défaillances des moteurs, n'ont pas été largement étudiés.

### **2.9.2.2 CAUSES DES DEFAUTS DU ROTOR**

- Défauts de construction
- Conditions de fonctionnement
- Mécanismes et symptômes de défaillance
- Court-circuit dans les enroulements du rotor
- Indicateurs permettant de détecter les défauts liés au rotor.
- Barre cassée

## **2.10 CONCLUSION**

La maintenance moderne des appareils rotatifs met l'accent sur un diagnostic précis des pannes. Favoriser la fiabilité et l'efficacité du système Cette approche permet de passer d'une maintenance systématique à une surveillance de l'état plus rentable et plus efficace. L'analyse des vibrations qui détecte les vibrations anormales joue un rôle important dans cette stratégie. Ce chapitre explore diverses approches de maintenance.et recommande des techniques de maintenance en fonction des conditions. Il donne un aperçu des stratégies modernes pour assurer la fiabilité et la longévité des machines électriques tournantes.

## CHAPTER 3

---

### ANALYSE MODEL THEORIQUE (SYSTEM LIBRE NON AMORTI)

---

#### 3.1 INTRODUCTION

L'analyse du modèle théorique d'un système libre non amorti est une étape cruciale dans la compréhension de son comportement dynamique. Ce type de système oscille librement sans aucune force de dissipation d'énergie, ce qui le rend idéal pour étudier les principes fondamentaux des vibrations.

Dans ce chapitre, nous introduisons schéma cinématique de pompe à huile et établis les équations de mouvement à 2.d.d.l ( libre non amorti ) et établis les équations différentielles du mouvement et établis les fréquences propre  $F01$  et  $F02$

### 3.2 SCHEMA CINEMATIQUE DE POMPE À HUILE

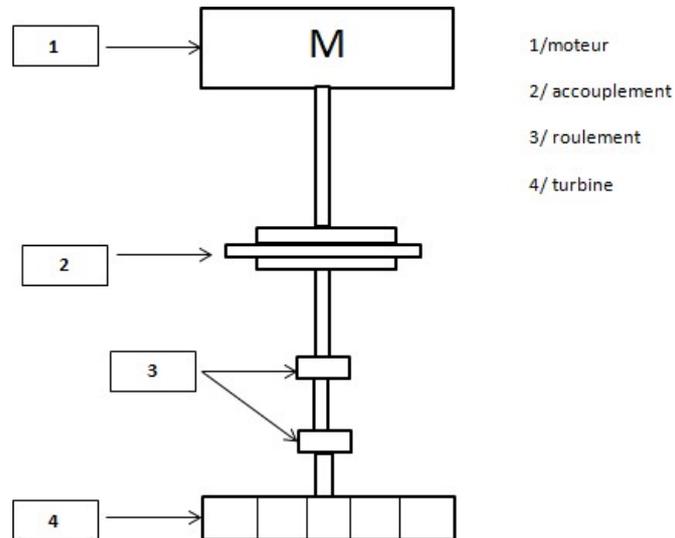


FIGURE 3.1 - schéma cinématique de pompe à huile

#### 3.2.1 CARACTÉRISTIQUES DU MOTEUR

- Type : 5KFS292XAA1014
- Puissance : 95 W
- Tension : 415 V
- Fréquence : 50 Hz
- Vitesse : 2980 tr/min
- Phases : 3
- $\cos \phi$  : 0.9

#### 3.2.2 CARACTÉRISTIQUES DE L'ACCOUPEMENT

Les caractéristiques typiques incluent :

- Type : rigide

- Capacité de couple : Basée sur la puissance et la vitesse du moteur
- Accommodation du désalignement : Angulaire, parallèle, axial
- Matériau : acier

### 3.2.3 CARACTÉRISTIQUES DES ROULEMENTS

- Type : rigide
- Capacité de couple : Basée sur la puissance et la vitesse du moteur
- Accommodation du désalignement : Angulaire, parallèle, axial
- Matériau : acier
- Diamètre intérieur : 70 mm
- Diamètre extérieur : 150 mm
- Masse : 2.54 kg

### 3.2.4 CARACTÉRISTIQUES DE LA TURBINE

Typiquement incluent :

- Puissance de sortie : Doit correspondre aux exigences du système
- Efficacité : Dépend du design spécifique
- Vitesse : Doit être compatible avec le moteur et la pompe

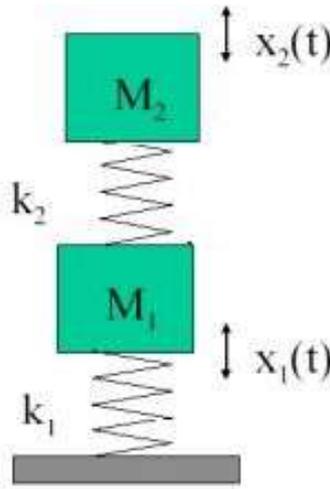
## 3.3 ETABLIE LES ÉQUATIONS DE MOUVEMENT A 2.D.D.L (LIBRE NON AMORTI )

### 3.3.1 L'ÉNERGIE CINÉTIQUE (T)

L'énergie cinétique totale du système est la somme des énergies cinétiques des deux masses  $M_1$  et  $M_2$  :

$$T = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 \quad (3.1)$$

$$T = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + m_2 \dot{x}_2^2 \quad (3.2)$$



**3.3.2 L'ÉNERGIE POTENTIELLE (U)**

L'énergie potentielle totale du système est la somme des énergies potentielles des deux ressorts  $K_1$  et  $K_2$  :

$$U = \frac{1}{2}k_1x_1^2 + \frac{1}{2}k_2(x_2 - x_1)^2 \tag{3.3}$$

Développons l'énergie potentielle associée au ressort  $K_2$  :

$$(x_2 - x_1)^2 = x_2^2 - 2x_1x_2 + x_1^2 \tag{3.4}$$

Donc l'expression pour  $U$  devient :

$$U = \frac{1}{2}k_1x_1^2 + \frac{1}{2}k_2(x_2^2 - 2x_1x_2 + x_1^2) \tag{3.5}$$

$$U = \frac{1}{2}k_1x_1^2 + \frac{1}{2}k_2x_2^2 - k_2x_1x_2 + \frac{1}{2}k_2x_1^2 \tag{3.6}$$

$$U = \frac{1}{2}(k_1 + k_2)x_1^2 + \frac{1}{2}k_2x_2^2 - k_2x_1x_2 \tag{3.7}$$

3.3.3 LE LAGRANGIEN DU SYSTEME (L)

$$L = T - U \tag{3.8}$$

En substituant les expressions de  $T$  et  $U$  :

$$L = \frac{1}{2}m_1\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{x}_2^2 - \frac{1}{2}k_1x_1^2 + \frac{1}{2}k_2(x_2 - x_1)^2 \tag{3.9}$$

Nous simplifions cette expression :

$$L = \frac{1}{2}m_1\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{x}_2^2 - \frac{1}{2}k_1x_1^2 - \frac{1}{2}k_2(x_2 - x_1)^2 \tag{3.10}$$

Maintenant substituons cette expression de  $U$  dans le lagrangien  $L$  :

$$L = \frac{1}{2}m_1\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{x}_2^2 - \frac{1}{2}(k_1 + k_2)x_1^2 + \frac{1}{2}k_2x_2^2 - k_2x_1x_2 \tag{3.11}$$

Finalement :

$$L = \frac{1}{2}m_1\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{x}_2^2 - \frac{1}{2}(k_1 + k_2)x_1^2 - \frac{1}{2}k_2x_2^2 + k_2x_1x_2 \tag{3.12}$$

Nous allons utiliser les équations de Lagrangien :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} - \frac{\partial L}{\partial x_i} = 0 \tag{3.13}$$

3.4 ETABLIE LES ÉQUATIONS DIFFÉRENTIELLES DU MOUVEMENT

Nous avons le Lagrangien  $L$  :

$$L = \frac{1}{2}m_1\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{x}_2^2 - \frac{1}{2}(k_1 + k_2)x_1^2 - \frac{1}{2}k_2x_2^2 + k_2x_1x_2 \tag{3.14}$$

Pour  $x_1$  :

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} = m_1\dot{x}_1 \tag{3.15}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} = m_1\ddot{x}_1 \tag{3.16}$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = -(k_1 + k_2)x_1 + k_2x_2 \quad (3.17)$$

En substituant dans l'équation de Lagrangien pour  $x_1$  :

$$m_1\ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2x_2 = 0 \quad (3.18)$$

Pour  $x_2$  :

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} = m_2\dot{x}_2 \quad (3.19)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} = m_2\ddot{x}_2 \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2} = -k_2x_2 + k_2x_1 \quad (3.21)$$

En substituant dans l'équation de Lagrangien pour  $x_2$  :

$$m_2\ddot{x}_2 + k_2x_2 - k_2x_1 = 0 \quad (3.22)$$

Donc, les équations différentielles du mouvement sont :

$$m_1\ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2x_2 = 0 \quad (3.23)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + k_2x_2 - k_2x_1 = 0 \quad (3.24)$$

### 3.5 ÉTABLIR LES FREQUENCES PROPRES $F_{01}$ ET $F_{02}$

Pour déterminer les fréquences propres  $F_{01}$  et  $F_{02}$  du système, nous devons résoudre les équations différentielles du mouvement en trouvant les solutions sous la forme de modes propres, ce qui implique de chercher des solutions harmoniques du type :

$$x_1(t) = X_1e^{it} \quad (3.25)$$

$$x_2(t) = X_2 e^{it} \tag{3.26}$$

Où  $\omega$  est la fréquence angulaire propre. En substituant ces solutions dans les équations différentielles du mouvement, nous obtenons le système d'équations algébriques suivant :

$$-m_1 \omega^2 x_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = 0 \tag{3.27}$$

$$-m_2 \omega^2 x_2 + k_2 x_2 - k_2 x_1 = 0 \tag{3.28}$$

Ce système peut être écrit sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} k_1 + k_2 - m_1 \omega^2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - m_2 \omega^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = 0 \tag{3.29}$$

Pour que ce système ait une solution non triviale (c'est-à-dire une solution autre que  $x_1 = x_2 = 0$ ), le déterminant de la matrice doit être nul :

$$\begin{vmatrix} k_1 + k_2 - m_1 \omega^2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - m_2 \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \tag{3.30}$$

Calculons ce déterminant :

$$(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - (-k_2)(-k_2) = 0 \tag{3.31}$$

$$(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) + k_2^2 = 0 \tag{3.32}$$

Développons cette équation :

$$k_1 k_2 + k_2^2 - m_1 k_2 \omega^2 - m_2 k_1 \omega^2 - m_2 k_2 \omega^2 + m_1 m_2 \omega^4 = 0 \tag{3.33}$$

Cette équation quadratique en  $\omega^2$  peut être résolue en utilisant la formule quadratique :

Posons  $\omega^2 = \lambda$  :

$$k_1 k_2 - \lambda(m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2) + \lambda^2 m_1 m_2 = 0 \tag{3.34}$$

Utilisons la formule quadratique pour résoudre pour  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{(m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2) \pm \sqrt{(m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2)^2 - 4 k_1 k_2 m_1 m_2}}{2 m_1 m_2} \quad (3.35)$$

Les fréquences angulaires propres  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont les racines carrées des valeurs de  $\lambda$ . Les fréquences  $F_{01}$  et  $F_{02}$  sont alors :

$$\lambda_1 = \sqrt{\lambda_1} \quad (3.36)$$

$$\lambda_2 = \sqrt{\lambda_2} \quad (3.37)$$

Les fréquences propres en Hz sont :

$$F_{01} = \frac{1}{2\pi} \approx \frac{3.25}{2\pi} \approx 0.52 \text{ Hz} \quad (3.38)$$

$$F_{02} = \frac{2}{2\pi} \approx \frac{3.09}{2\pi} \approx 0.49 \text{ Hz} \quad (3.39)$$

Pour calculer les fréquences propres  $F_{01}$  et  $F_{02}$  en utilisant  $k_1 = k_2 = 8878.15 \text{ N/m}$ , nous suivons les étapes précédentes avec les valeurs numériques données : les masses  $m_1 = 917 \text{ kg}$  et  $m_2 = 850 \text{ kg}$ .

#### EQUATION CARACTERISTIQUE :

Nous avons établi que l'équation caractéristique est :

$$k_1 k_2 -^2 (m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2) +^4 m_1 m_2 = 0 \quad (3.40)$$

Substituons les valeurs de  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $m_1$  et  $m_2$  :

$$(8878.15)^2 -^2 [(917)(8878.15) + (850)(8878.15)] +^4 (917)(850) = 0 \quad (3.41)$$

Divisons par 780450 pour simplifier :

Forme quadratique :

$$x^2 - 20.11x + 100.86 = 0 \quad (3.42)$$

Posons  $\lambda = s^2$  :

$$\lambda^2 - 20.11\lambda + 100.86 = 0 \quad (3.43)$$

Réolvons cette équation quadratique pour  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{20.11 \pm \sqrt{20.11^2 - 4 \cdot 100.86}}{2} \quad (3.44)$$

Calculons d'abord le discriminant :

$$\Delta = (20.11)^2 - 4 \cdot 100.86 = 0.97 \quad (3.45)$$

Ensuite, résolvons pour  $\lambda$  :

$$\lambda_1 = \frac{20.11 + \sqrt{0.97}}{2} \approx 10.55 \quad (3.46)$$

$$\lambda_2 = \frac{20.11 - \sqrt{0.97}}{2} \approx 9.56 \quad (3.47)$$

Fréquences angulaires propres :

Les fréquences angulaires propres  $\omega_1$  et  $\omega_2$  sont les racines carrées des valeurs de  $\lambda$  :

$$\omega_1 = \sqrt{\lambda_1} = \sqrt{10.55} \approx 3.25 \text{ rad/s} \quad (3.48)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\lambda_2} = \sqrt{9.56} \approx 3.09 \text{ rad/s} \quad (3.49)$$

Les fréquences propres en Hz sont :

$$f_{01} = \frac{\omega_1}{2\pi} \approx \frac{3.25}{2\pi} \approx 0.52 \text{ Hz} \quad (3.50)$$

$$f_{02} = \frac{\omega_2}{2\pi} \approx \frac{3.09}{2\pi} \approx 0.49 \text{ Hz} \quad (3.51)$$

Pour calculer les fréquences propres  $f_{01}$  et  $f_{02}$  en utilisant  $k_1 = k_2 = 8878.15 \text{ N/m}$ , nous suivons les étapes précédentes avec les valeurs numériques données pour les masses  $m_1 = 917 \text{ kg}$  et  $m_2 = 850 \text{ kg}$ .

**EQUATION CHARACTERISTIQUE :**

Nous avons établi que l'équation caractéristique est :

$$k_1 k_2 -^2 (m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2) +^4 m_1 m_2 = 0 \quad (3.52)$$

Pour calculer les fréquences propres  $f_{01}$  et  $f_{02}$  en utilisant  $k_1 = k_2 = 8878.15$  N/m et les masses  $m_1 = 917$  kg et  $m_2 = 850$  kg, nous suivons les étapes précédentes :

**EQUATION CHARACTERISTIQUE :**

Nous avons établi que l'équation caractéristique est :

$$(8878.15)^2 -^2 [(917)(8878.15) + (850)(8878.15)] +^4 (917)(850) = 0 \quad (3.53)$$

Divisons par 780450 pour simplifier :

$$\lambda^4 - 20.11\lambda^2 + 100.86 = 0 \quad (3.54)$$

Posons  $\lambda = \lambda^2$  :

$$\lambda^2 - 20.11\lambda + 100.86 = 0 \quad (3.55)$$

Résolvons cette équation quadratique pour  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{20.11 \pm \sqrt{20.11^2 - 4 \cdot 100.86}}{2} \quad (3.56)$$

Calculons d'abord le discriminant :

$$\Delta = (20.11)^2 - 4 \cdot 100.86 = 0.97 \quad (3.57)$$

Ensuite, résolvons pour  $\lambda$  :

$$\lambda_1 = \frac{20.11 + \sqrt{0.97}}{2} = 10.55 \quad (3.58)$$

$$\lambda_2 = \frac{20.11 - \sqrt{0.97}}{2} = 9.56 \quad (3.59)$$

Les fréquences angulaires propres  $\omega_1$  et  $\omega_2$  sont les racines carrées des valeurs de  $\lambda$  :

$$\omega_1 = \sqrt{\lambda_1} = \sqrt{10.55} \approx 3.25 \text{ rad/s} \quad (3.60)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\lambda_2} = \sqrt{9.56} \approx 3.09 \text{ rad/s} \quad (3.61)$$

Les fréquences propres en Hz sont :

$$f_{01} = \frac{\omega_1}{2\pi} \approx \frac{3.25}{2\pi} \approx 0.52 \text{ Hz} \quad (3.62)$$

$$f_{02} = \frac{\omega_2}{2\pi} \approx \frac{3.09}{2\pi} \approx 0.49 \text{ Hz} \quad (3.63)$$

### 3.6 CONCLUSION

L'analyse d'un système libre non amorti, modèle théorique idéal pour étudier les vibrations, est cruciale pour comprendre son comportement dynamique. Ce chapitre introduit le schéma cinématique d'une pompe à huile et établit les équations de mouvement à deux degrés de liberté (libre non amorti) ainsi que les équations différentielles du mouvement. En déterminant les fréquences propres  $F_{01}$  et  $F_{02}$ , on identifie les modes de vibration dominants. Cette analyse permet de comprendre les mouvements des composants, les forces en jeu et les fréquences naturelles, constituant une base solide pour la conception et le contrôle de systèmes mécaniques vibrants.

# CHAPTER 4

---

## SIMULATION NUMÉRIQUE DU MODELE PUMP D'HUILE

---

### 4.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats d'une analyse modale réalisée sur l'assemblage d'huile d'un système. L'objectif principal de cette analyse est d'identifier les modes propres de vibration de la structure, ainsi que les amplitudes de déformation correspondantes. Ces résultats sont essentiels pour comprendre comment la structure réagit sous des conditions vibratoires spécifiques et pour prévenir les phénomènes de résonance qui pourraient compromettre l'intégrité structurelle.

L'analyse modale est une étape cruciale dans le processus de conception et de validation des structures mécaniques, car elle permet de prévoir les comportements vibratoires potentiels et de mettre en place des mesures correctives si nécessaire.



FIGURE 4.1 – system arbre turbine.

## 4.2 PROPRIÉTÉS DE L'ÉTUDE :

Nom d'étude	Fréquence 3
Type d'analyse	Fréquence
Type de maillage	Maillage volumique
Nombre de frequencis	20
Type de solveur	FFEPlus
Faible raideur:	Désactivé(e)
Options de contact solidaire incompatible	Automatique
Option thermique	Inclure des chargements thermiques
Température de déformation nulle	298 Kelvin
Inclure la pression du fluide calculée par SOLIDWORKS Flow Simulation	Désactivé(e)
Dossier de résultats	Document SOLIDWORKS (C:\Users\HP\Documents)

### 4.3 PROPRIETES DU MATERIAU

Référence du modèle	Propriétés	Composants
	<p><b>Nom:</b> <u>Acier inoxydable chromé</u></p> <p><b>Type de modèle:</b> <u>Linéaire élastique isotropique</u></p> <p><b>Critère de ruine par défaut:</b> Inconnu</p> <p><b>Limite d'élasticité:</b> 1,72339e+08 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Limite de traction:</b> 4,13613e+08 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Masse volumique:</b> 7 800 kg/m<sup>3</sup></p> <p><b>Module d'élasticité:</b> 2e+11 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Coefficient de Poisson:</b> 0,28</p> <p><b>Coefficient de dilatation thermique:</b> 1,1e-05 /Kelvin</p>	<p>Corps volumique 1(Boss.-Extru.9)(Arbre d'huile-1),</p> <p>Corps volumique 1(Boss.-Extru.1)(Palier d'huile-1),</p> <p>Corps volumique 1(Boss.-Extru.1)(Palier d'huile-2),</p> <p>Corps volumique 1(Boss.-Extru.8)(pompe d'huile-1)</p>
Données de la <u>courbe</u> :N/A		

### 4.4 DÉFINITIONS DES CONNECTEURS

Référence du modèle	Détails du connecteur	Détails de résistance
 <p><u>Connecteur</u> de type palier-1</p>	<p><b>Entités:</b> 2 face(s)</p> <p><b>Type:</b> <u>Palier</u></p>	<p><u>Aucune donnée</u></p>

Connecteur axe/boulon/palier

## 4.5 INFORMATIONS SUR LE MAILLAGE

Forces dans les connecteursAucune donnée		
	<b>Entités:</b> 2 face(s) <b>Type:</b> Palier	Aucune donnée
Connecteur de type palier-2		
Forces dans les connecteursAucune donnée		

## 4.6 RÉSULTATS DE SIMULATION

Type de maillage	Maillage volumique
Mailleur utilisé:	Maillage standard
Transition automatique:	Désactivé(e)
Boucles automatiques de maillage:	Désactivé(e)
Points de Jacobien pour un maillage de qualité élevée	16 Points
Taille d'élément	17,7828 mm
Tolérance	0,88914 mm
Qualité de maillage	Haute
Remailler les pièces en échec indépendamment	Désactivé(e)

Cette simulation montre les résultats d'une analyse modale, plus précisément l'amplitude de la déformation résultante pour le mode propre numéro 1, dont la fréquence est de 0,0592815 Hz. Voici quelques points à ce résultat :

### 4.6.1 AMPLITUDE MINIMALE ET MAXIMALE

- L'amplitude minimale est de 0,000e+00, ce qui signifie qu'il y a un point dans la structure (nœud 10325) où il n'y a pas de déformation.
- L'amplitude maximale est de 5,736e-01, correspondant au nœud 11214. Cela indique le point de la structure où la déformation est la plus grande sous l'effet du mode propre numéro 1.

#### 4.6.2 VISUALISATION

- Le graphique en couleurs représente la déformation modale sur la structure analysée. Les couleurs vont du bleu (déformation minimale) au rouge (déformation maximale).
- Cette représentation visuelle aide à identifier les zones de la structure qui sont les plus sensibles aux vibrations à cette fréquence spécifique.

#### 4.6.3 FRÉQUENCE

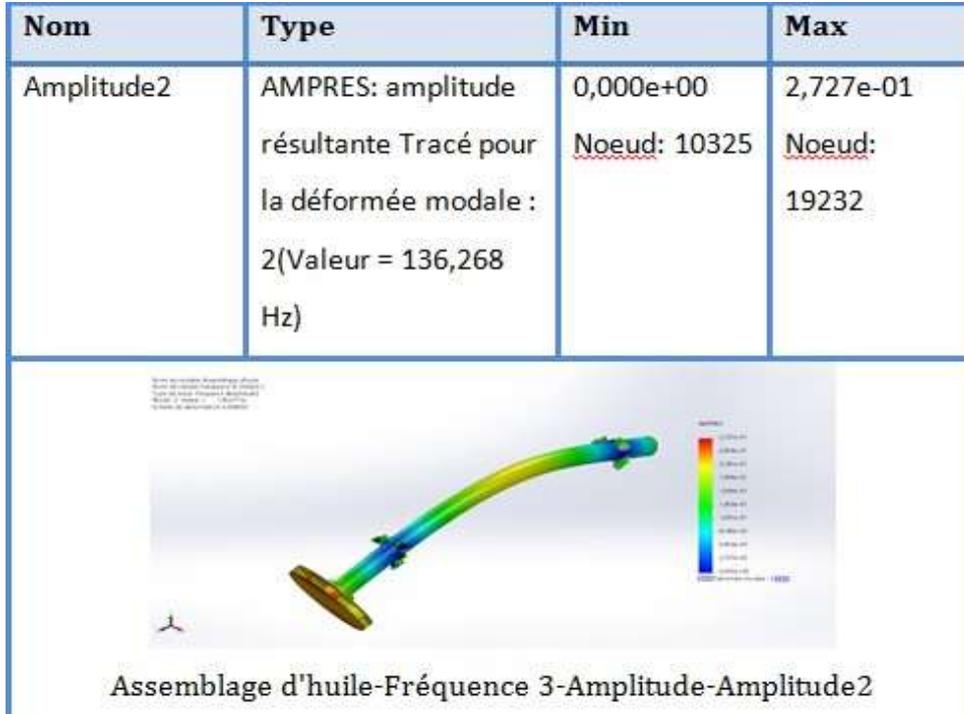
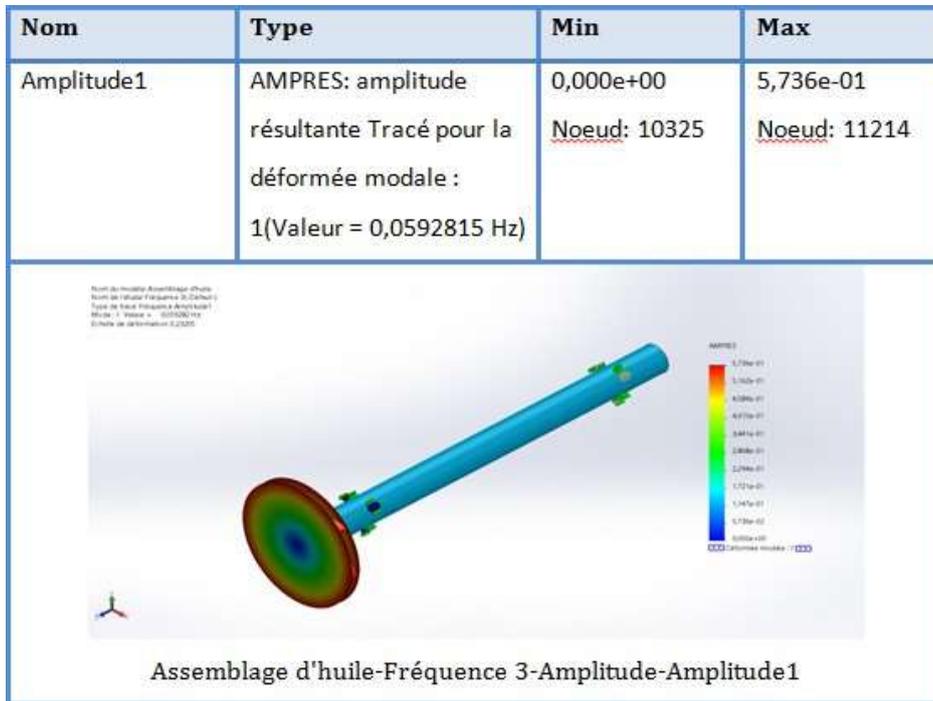
- La fréquence du mode propre numéro 1 est très basse, 0,0592815 Hz, ce qui indique une oscillation lente. Cela pourrait correspondre à un mode de flexion ou de torsion important de la structure.

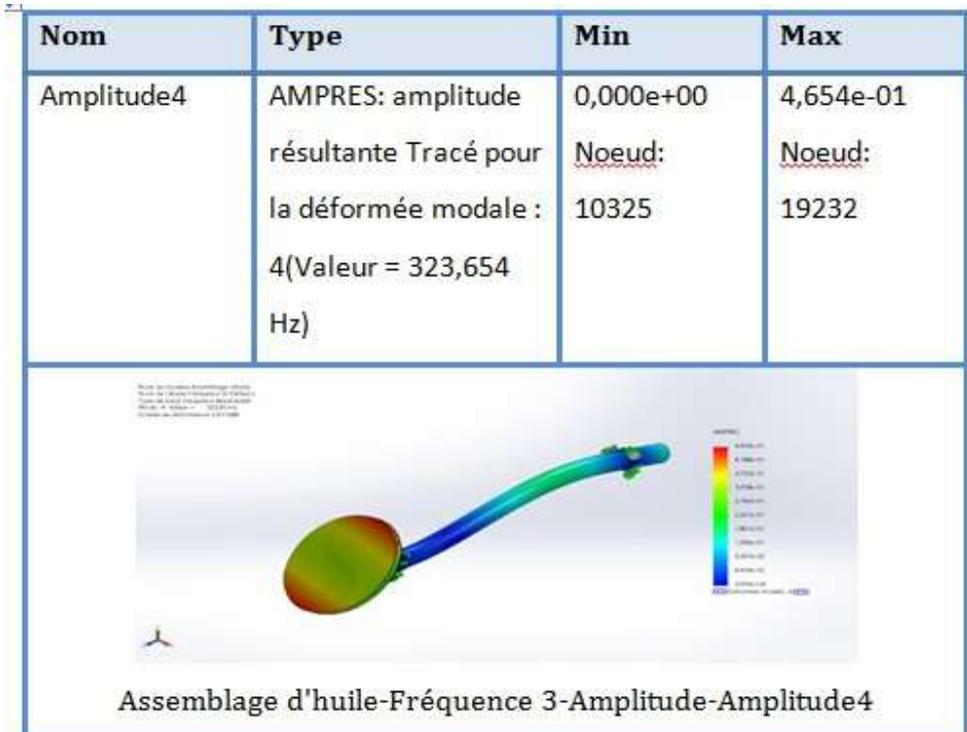
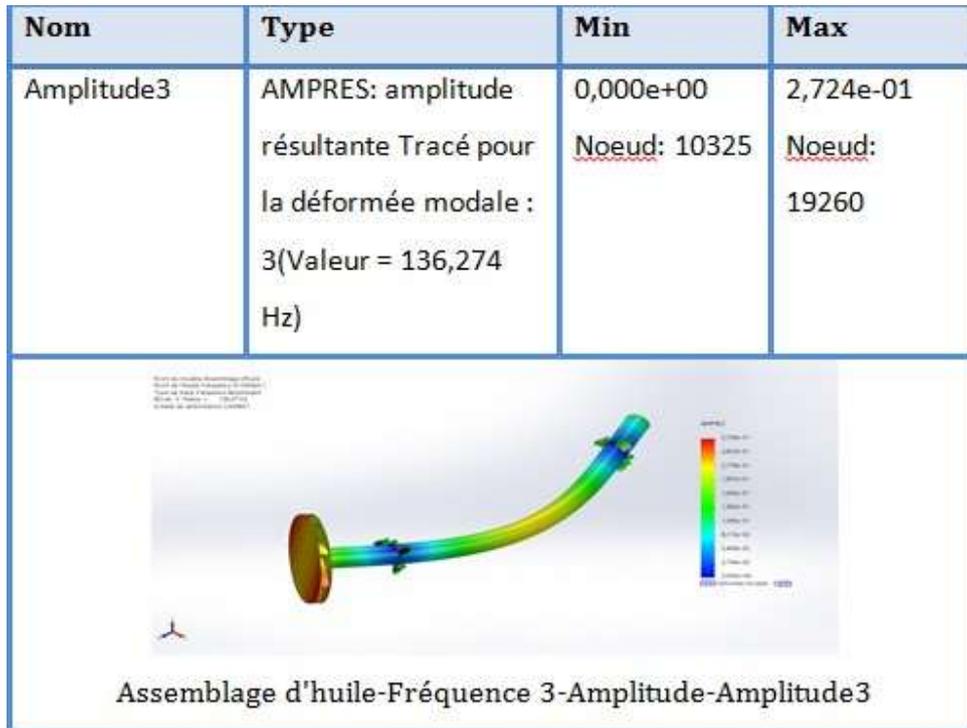
#### 4.6.4 TYPE D'ANALYSE

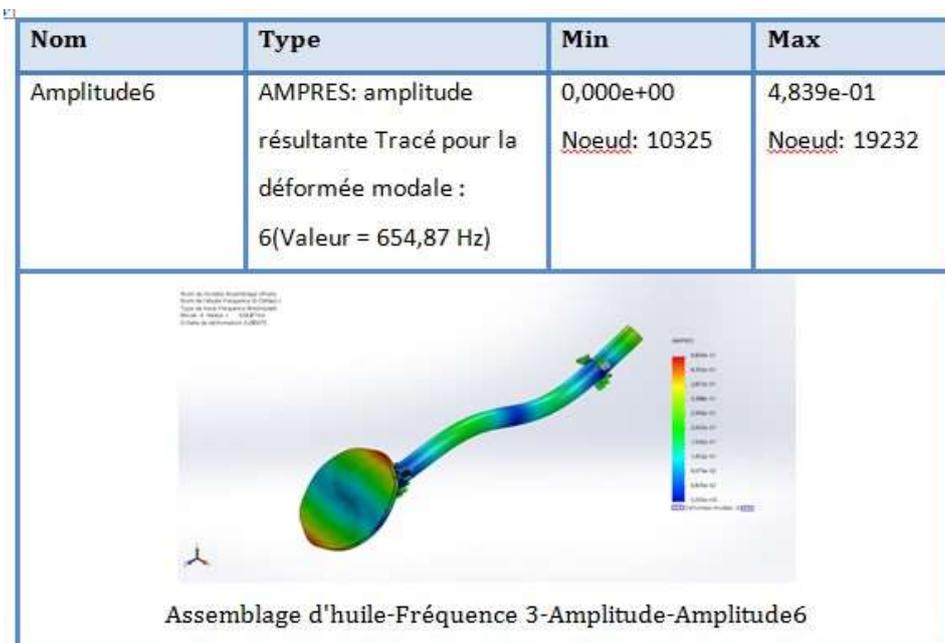
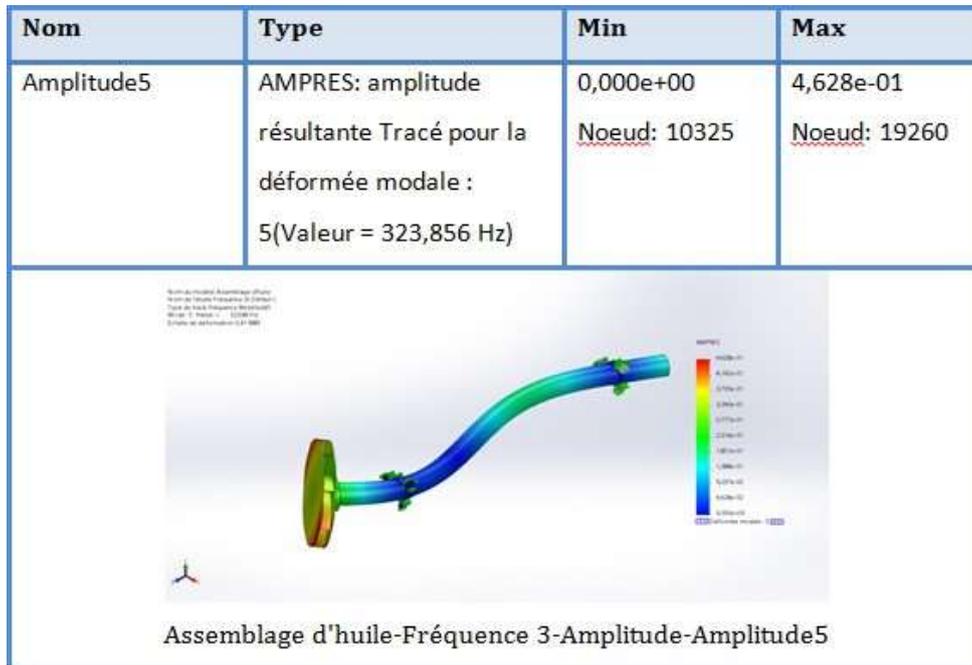
- L'analyse est une simulation modale, qui est couramment utilisée pour identifier les modes naturels de vibration d'une structure et pour prévoir comment elle réagira à différentes fréquences de charge vibratoire.

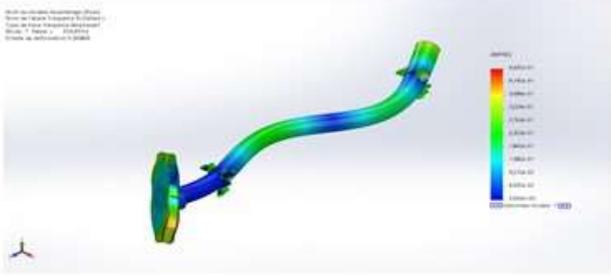
#### 4.6.5 APPLICATION

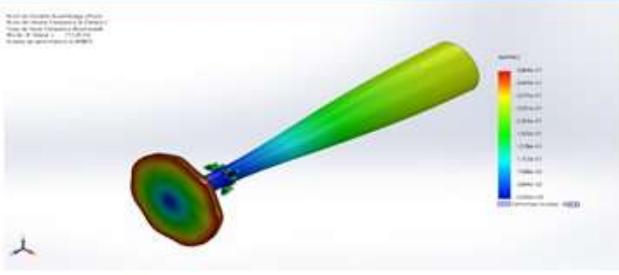
- Les résultats de cette simulation sont cruciaux pour le design et la vérification de la structure, notamment pour éviter les résonances dangereuses qui pourraient conduire à des défaillances structurelles.
- dans ce résultat de simulation montre l'amplitude de déformation pour le premier mode propre d'une structure, avec une amplitude maximale de 0,5736 à une fréquence de 0,0592815 Hz. La visualisation des déformations aide à comprendre comment la structure pourrait se comporter sous des charges vibratoires à cette fréquence.

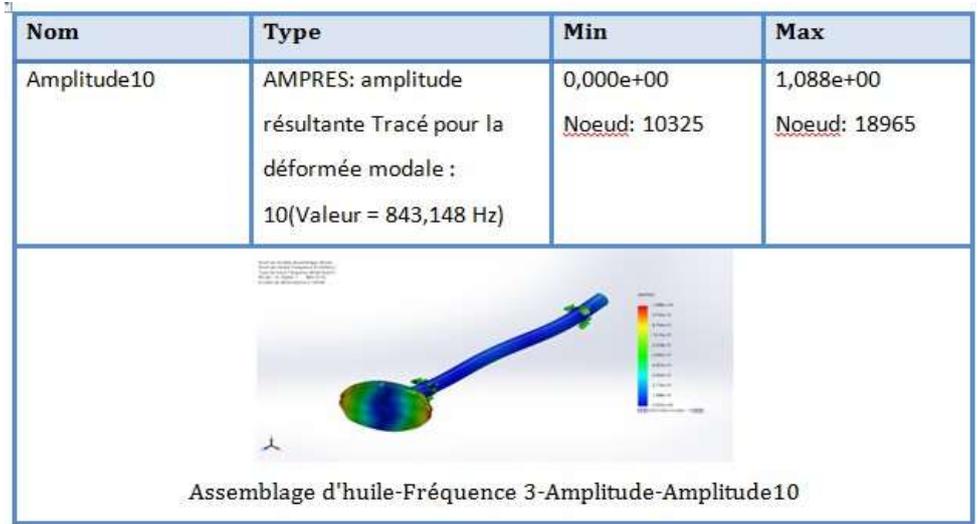
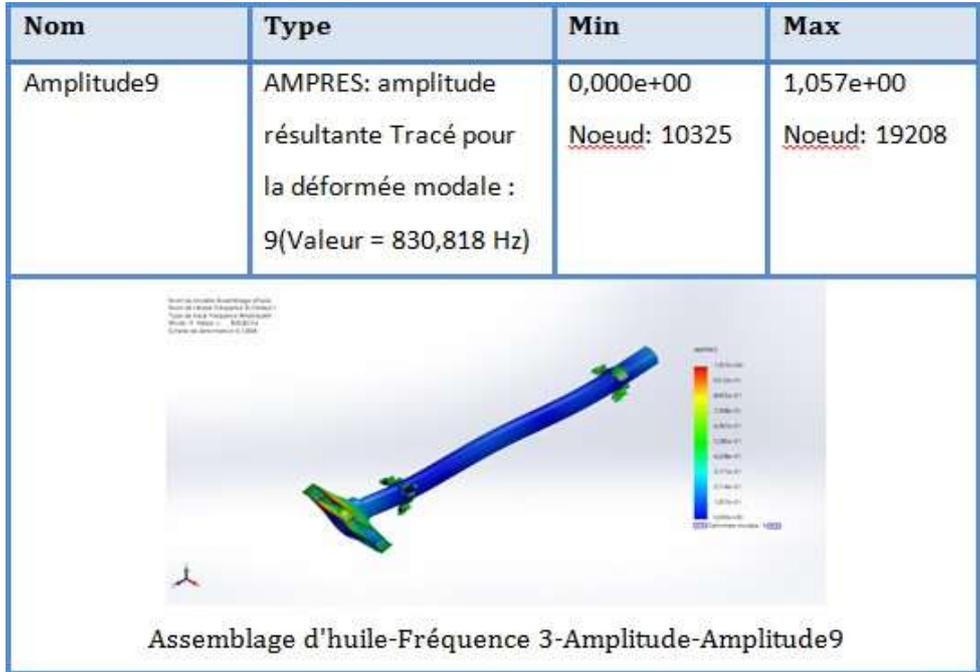






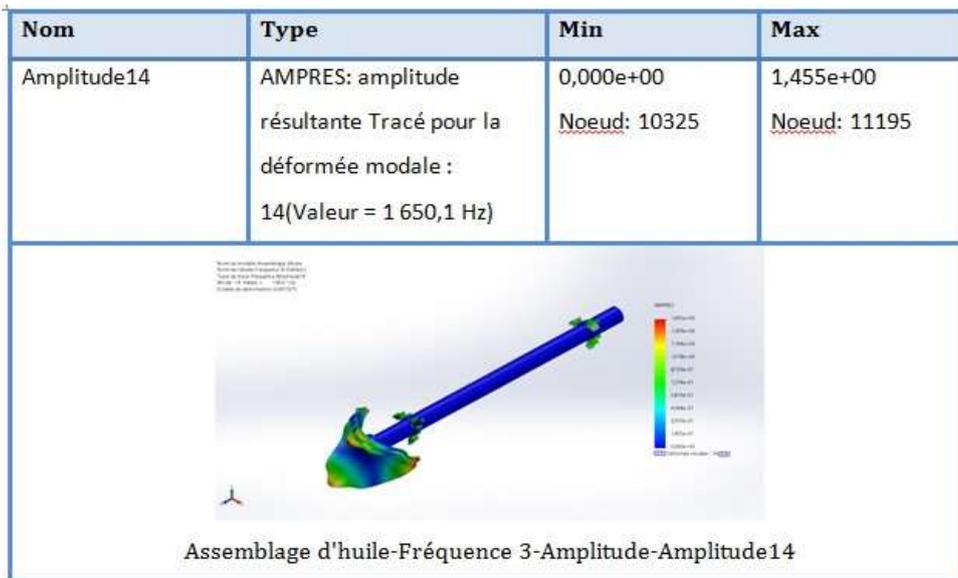
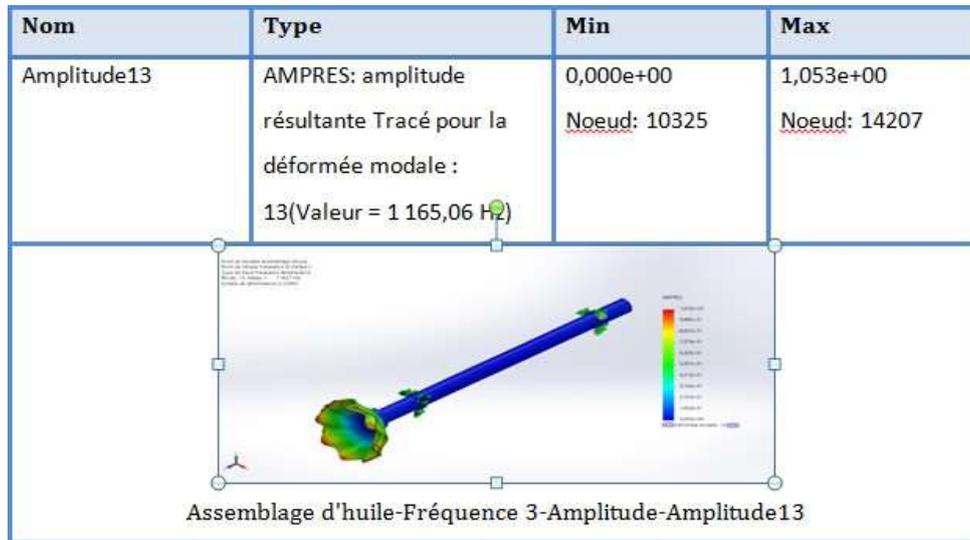
Nom	Type	Min	Max
Amplitude7	AMPRES: amplitude résultante Tracé pour la déformée modale : 7(Valeur = 656,49 Hz)	0,000e+00 Noeud: 10325	4,605e-01 Noeud: 19260
 <p>Assemblage d'huile-Fréquence 3-Amplitude-Amplitude7</p>			

Nom	Type	Min	Max
Amplitude8	AMPRES: amplitude résultante Tracé pour la déformée modale : 8(Valeur = 711,353 Hz)	0,000e+00 Noeud: 10325	3,844e-01 Noeud: 11162
 <p>Assemblage d'huile-Fréquence 3-Amplitude-Amplitude8</p>			



Nom	Type	Min	Max
Amplitude11	AMPRES: amplitude résultante Tracé pour la déformée modale : 11(Valeur = 1 139,14 Hz)	0,000e+00 <u>Noeud: 10325</u>	5,767e-01 <u>Noeud: 707</u>
 <p>Assemblage d'huile-Fréquence 3-Amplitude-Amplitude11</p>			

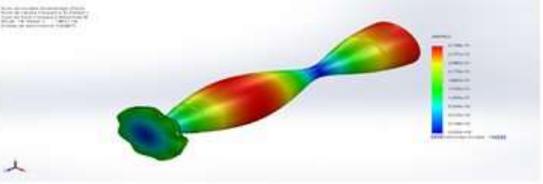
Nom	Type	Min	Max
Amplitude12	AMPRES: amplitude résultante Tracé pour la déformée modale : 12(Valeur = 1 139,64 Hz)	0,000e+00 <u>Noeud: 10325</u>	5,757e-01 <u>Noeud: 632</u>
 <p>Assemblage d'huile-Fréquence 3-Amplitude-Amplitude12</p>			



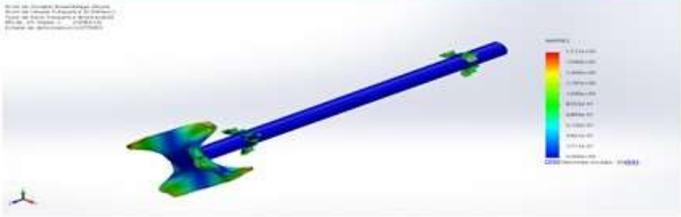
Nom	Type	Min	Max
Amplitude15	AMPRES: amplitude résultante Tracé pour la déformée modale : 15(Valeur = 1 673,11 Hz)	0,000e+00 Noeud: 10325	1,416e+00 Noeud: 18504
 <p>Assemblage d'huile-Fréquence 3-Amplitude-Amplitude15</p>			

Nom	Type	Min	Max
Amplitude16	AMPRES: amplitude résultante Tracé pour la déformée modale : 16(Valeur = 1 702,61 Hz)	0,000e+00 Noeud: 10325	3,628e-01 Noeud: 708
 <p>Assemblage d'huile-Fréquence 3-Amplitude-Amplitude16</p>			

Nom	Type	Min	Max
Amplitude17	AMPRES: amplitude résultante Tracé pour la déformée modale : 17(Valeur = 1 702,82 Hz)	0,000e+00 <u>Noeud: 10325</u>	3,628e-01 <u>Noeud: 670</u>
 <p>Assemblage d'huile-Fréquence 3-Amplitude-Amplitude17</p>			

Nom	Type	Min	Max
Amplitude18	AMPRES: amplitude résultante Tracé pour la déformée modale : 18(Valeur = 1 846,69 Hz)	0,000e+00 <u>Noeud: 10325</u>	3,108e-01 <u>Noeud: 570</u>
 <p>Assemblage d'huile-Fréquence 3-Amplitude-Amplitude18</p>			

Nom	Type	Min	Max
Amplitude19	AMPRES: amplitude résultante Tracé pour la déformée modale : 19(Valeur = 2 186,38 Hz)	0,000e+00 Noeud: 10325	1,581e+00 Noeud: 19311
 <p>Assemblage d'huile-Fréquence 3-Amplitude-Amplitude19</p>			

Nom	Type	Min	Max
Amplitude20	AMPRES: amplitude résultante Tracé pour la déformée modale : 20(Valeur = 2 208,41 Hz)	0,000e+00 Noeud: 10325	1,711e+00 Noeud: 11291
 <p>Assemblage d'huile-Fréquence 3-Amplitude-Amplitude20</p>			

Fréquence No	Rad/sec	Hertz	secondes
1	0,37248	0,059282	16,869
2	856,2	136,27	0,0073385
3	856,23	136,27	0,0073382
4	2 033,6	323,65	0,0030897
5	2 034,8	323,86	0,0030878
6	4 114,7	654,87	0,001527
7	4 124,8	656,49	0,0015233
8	4 469,6	711,35	0,0014058
9	5 220,2	830,82	0,0012036
10	5 297,7	843,15	0,001186
11	7 157,4	1 139,1	0,00087785
12	7 160,6	1 139,6	0,00087747
13	7 320,3	1 165,1	0,00085832
14	10 368	1 650,1	0,00060602
15	10 512	1 673,1	0,00059769
16	10 698	1 702,6	0,00058733
17	10 699	1 702,8	0,00058726
18	11 603	1 846,7	0,00054151
19	13 737	2 186,4	0,00045738
20	13 876	2 208,4	0,00045282

#### 4.7 CONCLUSION

Les résultats de la simulation modale montrent les amplitudes de déformation pour les différents modes propres de l'assemblage d'huile. L'analyse a permis d'identifier les points de la structure présentant les déformations maximales et minimales, ainsi que les

fréquences associées à ces modes. Ces informations sont cruciales pour le design et la vérification de la structure, aidant à éviter les résonances dangereuses. En conclusion, l'étude modale réalisée fournit des insights précieux pour optimiser la performance vibratoire de la structure et assurer sa fiabilité à long terme.

# CHAPTER 5

---

## ÉTUDE DE CAS PRATIQUE PAR ANALYSE DE VIBRATOIRE

---

### 5.1 INTRODUCTION

L'analyse des vibrations est un outil de diagnostic puissant utilisé dans diverses industries. Pour surveiller l'état des machines et prédire les pannes possibles. Mesurer et analyser les vibrations générées par les systèmes mécaniques pour identifier les anomalies pouvant indiquer une usure, des déséquilibres et des écarts. Ou d'autres problèmes Cette introduction donne un aperçu des méthodes d'analyse des vibrations appliquées à une étude de cas pratique. Se concentrer sur des pompes spécifiques, telles que les pompes fabriquées. Par Buffalo Pumps

### 5.2 DÉFINITIONS DE BUFFALO PUMPS

La Buffalo VCRE-30K est une pompe centrifuge verticale à haute performance, conçue pour des applications industrielles exigeantes, notamment dans les systèmes de lubrification nécessitant un débit important et constant.

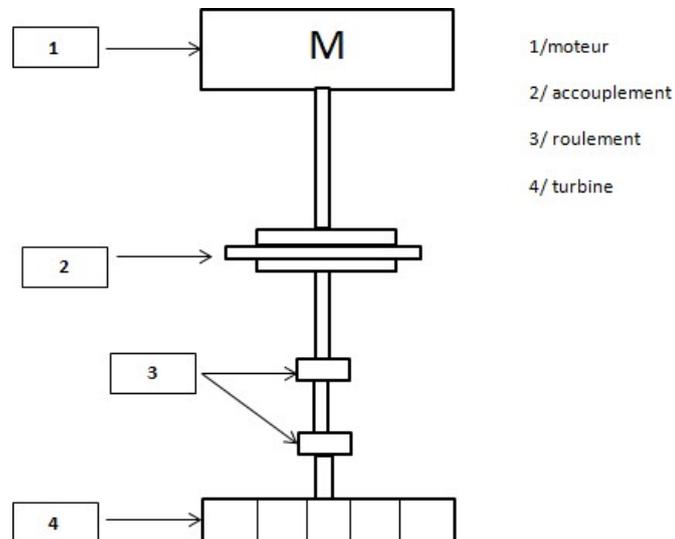


FIGURE 5.1 - schéma cinématique de pompe à huile

### 5.3 DESCRIPTIONS DE LA MACHINE

Ces pompes sont des pompes centrifuges verticales monocellulaires immergées à aspiration axiale. Elles peuvent être entraînées par un moteur électrique à arbre vertical ou par une turbine à vapeur ou à gaz (ci-après « système d'entraînement ») monté sur un support au-dessus du capot de la pompe et raccordé à l'arbre de la pompe par un raccord flexible. Consultez le Manuel de maintenance générale 3321.



FIGURE 5.2 - schéma cinématique de pompe à huile

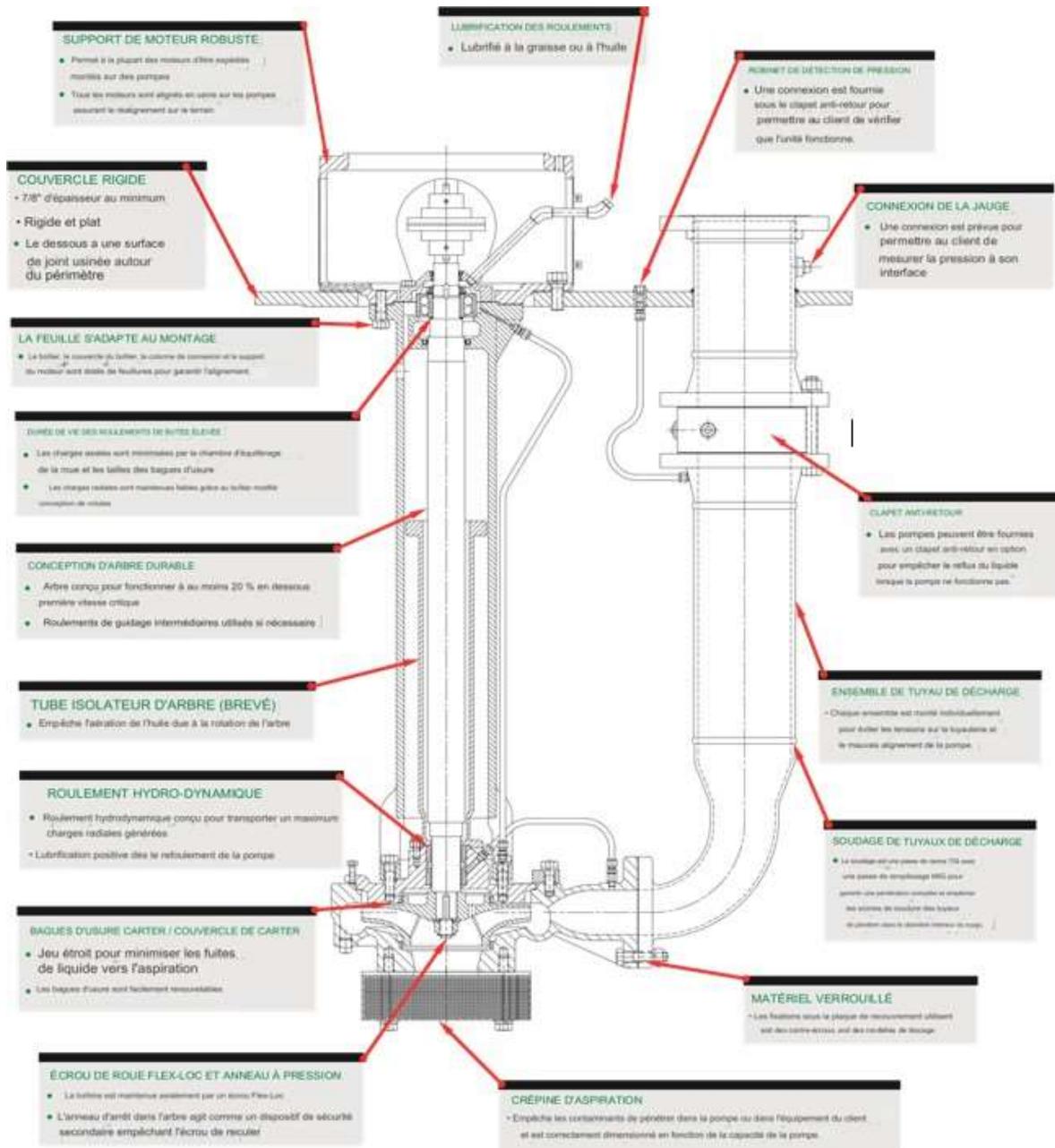


FIGURE 5.3 – POMPE À HUILE DE GRAISSAGE VERTICALE VCRE

## 5.4 HISTORIQUES DE LA MACHINE

Voici un texte narratif sur l'historique de la POMPE À HUILE DE GRAISSAGE VERTICALE VCRE :

L'histoire de notre pompe à huile de graissage verticale VCRE commence bien avant son arrivée sur notre site. Conçue par Buffalo Pumps, une entreprise renommée pour ses innovations dans le domaine des pompes industrielles, cette VCRE représente l'aboutissement de décennies d'expertise en ingénierie.

En juin 2014, notre unité reçoit enfin ce joyau de technologie. Imposante et élégante dans sa verticalité, la VCRE promet de révolutionner notre système de lubrification. Son installation est un événement en soi, mobilisant une équipe d'experts pour s'assurer que chaque connexion, chaque alignement soit parfait.

Dès sa mise en service, la VCRE impressionne par sa puissance et sa précision. Capable de délivrer un débit constant de 301 gallons par minute à une vitesse vertigineuse de 2950 tours par minute, elle devient rapidement le cœur palpitant de notre système de graissage.

Les premiers mois sont une période d'adaptation et d'observation. Nos ingénieurs surveillent attentivement ses performances, ajustant finement les paramètres pour optimiser son rendement. La VCRE répond admirablement, s'intégrant harmonieusement dans nos processus.

En 2016, nous vivons notre premier défi. De légères vibrations se font sentir, signe que notre pompe a besoin d'attention. Une inspection révèle un désalignement mineur, rapidement corrigé. Cet incident renforce notre conviction qu'une surveillance constante est essentielle.

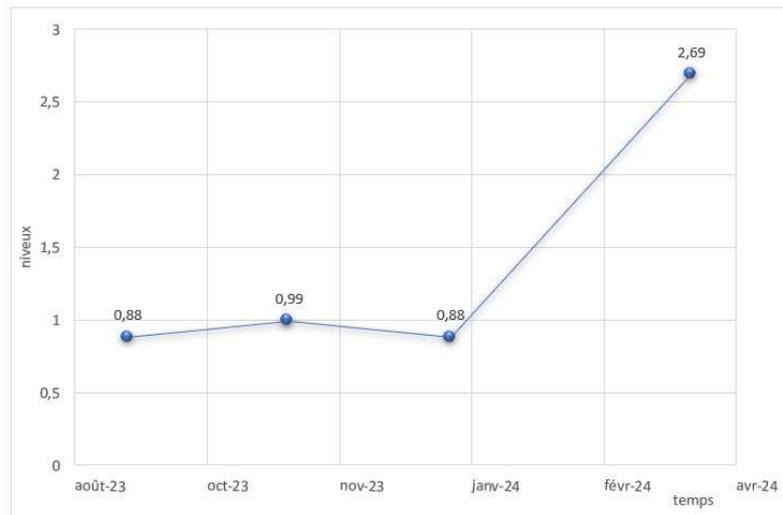
L'année 2017 marque un tournant technologique pour notre VCRE. Nous l'équiperons d'un système de monitoring vibratoire de pointe, lui donnant ainsi une voix pour communiquer son état en temps réel. Cette amélioration s'avérera cruciale pour anticiper ses besoins d'entretien. Au fil des ans, notre pompe VCRE traverse diverses épreuves. En 2019, elle fait face à une obstruction partielle de son impulseur, un défi qu'elle surmonte grâce à l'intervention rapide de notre équipe de maintenance. En 2020, l'introduction d'un nouveau type d'huile nécessite des ajustements, démontrant la flexibilité de notre pompe.

La révision majeure de 2021 est un moment clé. Telle une athlète se préparant pour une nouvelle saison, notre VCRE bénéficie d'une refonte complète : nouvel arbre, nouveaux impulseurs, système de lubrification amélioré. Elle en ressort plus performante que jamais.

Aujourd'hui, en 2024, notre pompe à huile de graissage verticale VCRE continue de jouer un rôle central dans nos opérations. Bien qu'elle montre quelques signes de l'âge, principalement sous forme de vibrations accrues, elle reste un pilier fiable de notre installation.

Chaque jour, alors que le vrombissement régulier de la VCRE résonne dans notre unité, nous sommes rappelés de son histoire, des défis qu'elle a surmontés, et de son importance cruciale dans notre chaîne de production. Cette pompe n'est pas qu'une simple machine ; c'est un témoin de notre évolution technologique, un symbole de fiabilité et d'innovation continue dans le monde exigeant de l'industrie.

### COURBE DE TENDONS



**FIGURE 5.4** - courbe de tendance c.a (horizontal)

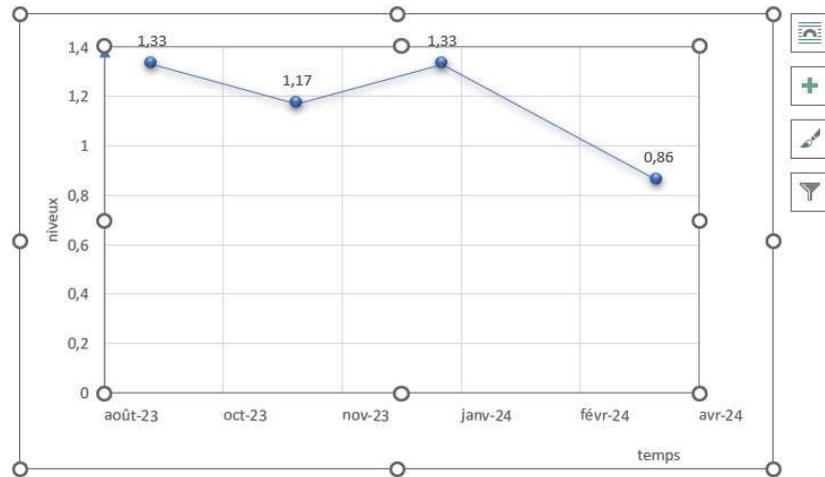


FIGURE 5.5 - courbe de tendance c.a.o (horizontal)

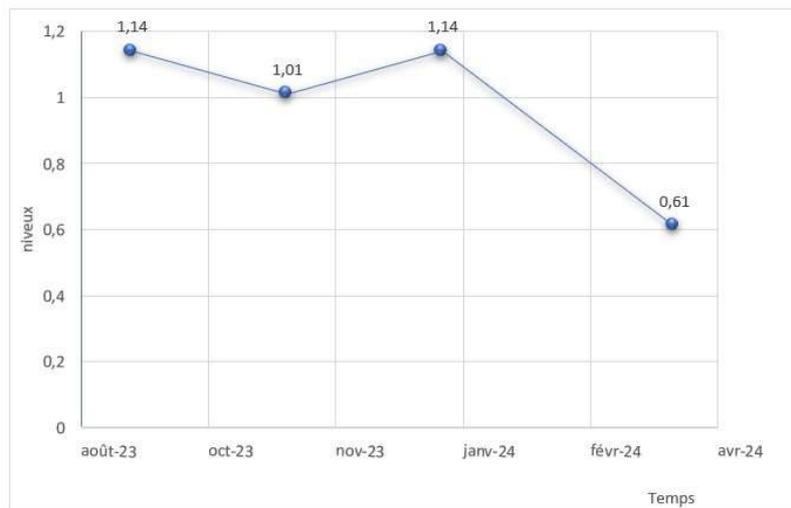
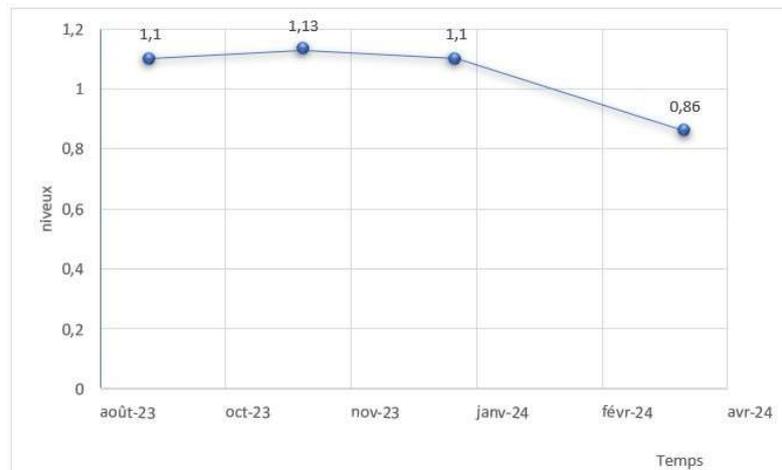
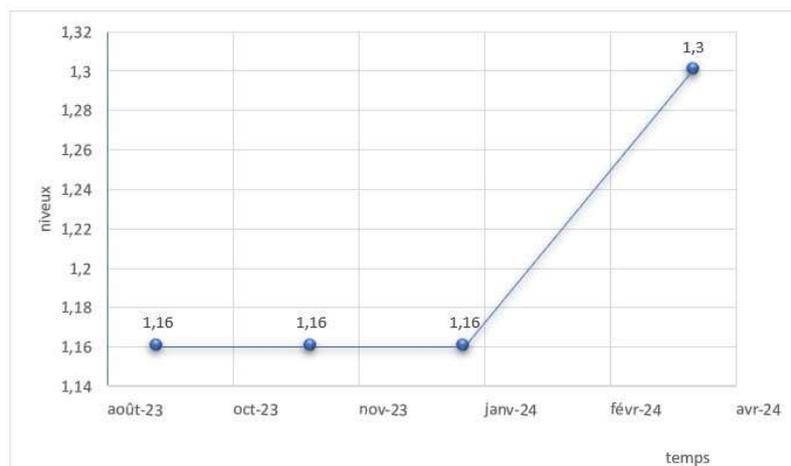


FIGURE 5.6 - courbe de tendance c.a. (vertical)

**FIGURE 5.7** – courbe de tendance c.o.a. (vertical)**FIGURE 5.8** – courbe de tendance c.o.a. (axial)

#### 5.4.1 ANALYSE D'USURE

Les figure (4,5,6,7,8) présente un graphique représentant l'usure moyenne d'un axe sur une période donnée. L'axe horizontal (X) représente le nombre d'ordres, tandis que l'axe vertical (Y) représente l'usure en mm/sec. L'usure est la dégradation progressive d'un matériau due au frottement ou à d'autres sollicitations mécaniques. Elle peut entraîner une perte de fonction, une diminution de la précision ou une défaillance totale du composant. L'analyse de l'usure permet d'identifier les causes de la dégradation, d'évaluer la gravité

des dommages et de prendre des mesures préventives pour prolonger la durée de vie du composant. Analyse du graphique

Le graphique montre que l'usure de l'axe augmente progressivement au cours du temps. Cela indique que le composant est soumis à des contraintes qui entraînent une perte de matière. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à l'usure de l'axe, notamment :

- Frottement : Le contact entre l'axe et d'autres pièces peut générer du frottement, ce qui entraîne une abrasion progressive du matériau.
- Charge mécanique : L'axe peut être soumis à des forces mécaniques qui dépassent sa capacité de résistance, ce qui peut entraîner des déformations et des fissures.
- Corrosion : L'exposition à des agents corrosifs, tels que l'humidité ou les produits chimiques, peut dégrader la surface du matériau.

#### MESURES PREVENTIVES

Différentes mesures préventives peuvent être utilisées. Pour réduire l'usure de l'arbre, par exemple :

- Lubrification : une lubrification adéquate des surfaces de contact réduit la friction et protège le matériau de l'usure.
- Protection contre la corrosion : les effets des substances corrosives peuvent être limités en utilisant des revêtements protecteurs ou des matériaux résistants à la corrosion.
- Contrôle de l'usure : des contrôles d'usure réguliers peuvent détecter les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent graves.

L'analyse de l'usure est un outil important dans la maintenance préventive des machines et des composants. En identifiant la cause de l'usure et en prenant les mesures appropriées. Par conséquent, elle peut prolonger la durée de vie de l'équipement et réduire les coûts de maintenance.

## 5.5 CONCLUSION

L'analyse de l'usure de l'axe révèle une dégradation progressive du composant, probablement causée par des contraintes mécaniques, le frottement ou la corrosion. Pour limiter l'usure et prolonger la durée de vie de l'axe, il est recommandé de mettre en place

des mesures préventives telles qu'une meilleure lubrification, une protection contre la corrosion et une surveillance régulière de l'usure. Une analyse plus approfondie pourrait être nécessaire pour identifier les causes précises de l'usure et proposer des solutions plus spécifiques.

---

## CONCLUSION GENERALE

---

Ce mémoire a exploré en profondeur le diagnostic vibratoire appliqué aux pompes à huile, en particulier le modèle VCRE-30k.

À travers une analyse structurée en cinq chapitres, nous avons examiné les aspects théoriques, numériques et pratiques du comportement dynamique de cette pompe, en mettant l'accent sur l'identification et la prévention des défaillances mécaniques.

La première partie du mémoire a établi une base de connaissances sur les différents types de pompes, leur fonctionnement, et les spécificités des pompes à huile. Cette introduction générale était essentielle pour comprendre les enjeux et les défis associés à la maintenance de ces équipements.

Ensuite, nous avons détaillé les diverses défaillances mécaniques courantes, telles que la cavitation, l'usure des composants, le désalignement et les déséquilibres. La compréhension de ces problèmes est cruciale pour développer des stratégies de diagnostic efficaces.

L'analyse modale théorique a permis de définir les modes propres et les fréquences naturelles de vibration de la pompe VCRE-30k. Ces connaissances théoriques sont indispensables pour interpréter correctement les données vibratoires et identifier les anomalies.

L'étude numérique du système a offert des insights précieux grâce à la modélisation et à la simulation des conditions de fonctionnement réelles. Ces outils numériques ont facilité la prédiction des comportements dynamiques et des défaillances potentielles, renforçant ainsi notre capacité à prévenir les pannes.

Enfin, l'étude de cas pratique par analyse de vibrations a démontré l'application concrète des concepts théoriques et numériques. Cette approche pratique a mis en lumière les avantages du diagnostic vibratoire dans la détection précoce des anomalies et la planification

d'interventions de maintenance ciblées.

En conclusion, ce mémoire souligne l'importance du diagnostic vibratoire comme outil de maintenance prédictive pour les pompes à huile. L'utilisation de techniques vibratoires permet non seulement d'améliorer la fiabilité et la durabilité des équipements, mais aussi de réduire les coûts et les temps d'arrêt associés aux pannes imprévues. Les résultats et recommandations présentés ouvrent des perspectives prometteuses pour l'optimisation de la gestion des pompes à huile, avec des applications potentielles dans divers secteurs industriels. En adoptant une approche proactive basée sur le diagnostic vibratoire, les entreprises peuvent assurer un fonctionnement optimal de leurs équipements, contribuant ainsi à une meilleure performance globale et à une réduction des risques opérationnels.

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] Ahmed Misbah Youssef, PUMP TECHNOLOGY
- [2] JOEL.M. ZINSALO, note de cours « pompes et stations de pompage » université d'abomeycalavi.
- [3] Etude de défaillance d'une pompe à eau centrifuge de type GUINARD HP 2016
- [4] cours CIRA 1ère année PASCAL BIGOT
- [5] BENI HAROUN -formation maintenance mécanique (ALSTOM)
- [6] BASCAL BIGOT, " cours : Les pompes "
- [7] Copyright 2021 Thermal Engineering | All Rights Reserved | Nuclear Power | Reactor
- [8] Grusenmeyer, C. (2005). *Les accidents liés à la maintenance. Etude bibliographique* (Doctoral dissertation, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)).
- [9] Berlatier, A., & Abdesselam, A. (2018, October). Construction D'Une Méthodologie De Définition De La Maintenance Basée Sur Les Risques (Risk-Based Maintenance). In *Congrès Lambda Mu 21 «Maîtrise des risques et transformation numérique: opportunités et menaces»*.
- [10] Bloch-Mercier, S. (2000). Optimisation de la maintenance corrective d'un système repérable. *Journal de la Société française de statistique*, 141(3), 23-36.
- [11] Zhang, H., Li, Y., & McConnell, W. (2021). Predicting potential palliative care beneficiaries for health plans: A generalized machine learning pipeline. *Journal of Biomedical Informatics*, 123, 103922.
- [12] Sy, F. (2019). Maintenance Curative et Etude d'Efficacité Energétique des charges d'un chantier photovoltaïque chez un particulier.
- [13] Thun, J. H. (2006). Maintaining preventive maintenance and maintenance prevention: analysing the dynamic implications of Total Productive Maintenance. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 22(2), 163-179.
- [14] BENZOUAI, M. (2020). MAINTENANCE DES SYSTEMES INDUSTRIELS.
- [15] Deloux, E. (2008). *Politiques de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant* (Doctoral dissertation, Université de Nantes).

- [16] Boulenger, A., & Pachaud, C. (2007). *Analyse vibratoire en maintenance: surveillance et diagnostic des machines*. Dunod.
- [17] Muselli, A. (1999). *Contribution de la RMN du carbone 13 à l'analyse d'huiles essentielles de Corse et du Viet-Nam* (Doctoral dissertation, Corte).
- [18] Chrysochoos, A., Chezeaux, J. C., & Caumon, H. (1989). Analyse thermomécanique des lois de comportement par thermographie infrarouge. *Revue de physique appliquée*, 24(2), 215-225.
- [19] Oulmane, A. (2014). *Surveillance et diagnostic des défauts des machines tournantes dans le domaine temps-fréquences utilisant les réseaux de neurones et la logique floue* (Doctoral dissertation, École Polytechnique de Montréal).
- [20] Lelkes, M. (2002). *Définition des engrenages klingelberg* (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).
- [21] Brentner, K. S. (1986). *Prediction of helicopter rotor discrete frequency noise: A computer program incorporating realistic blade motions and advanced acoustic formulation* (No. L-16130).