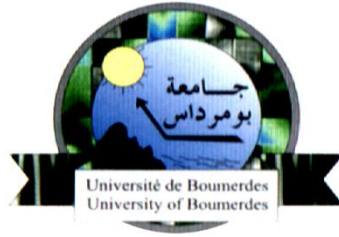


**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**



**Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique**

Mémoire de Master

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

**Filière : Electromécanique.
Spécialité : Mécatronique**

THEME

**Diagnostic de la pompe alimentaire par l'analyse
vibratoire.**

Présentée par :
Benhalima Nesma

Promoteur : Pr.Aknouche Hamid
Encadrant : Mr. Bennebri Smail
Co- encadrant: Mr.Malki mohammed

Année universitaire 2023- 2024

Dédicaces

À ma chère maman,

Ta force, ta tendresse et ton soutien inconditionnel ont sculpté le meilleur de moi. Merci pour tout ce que tu es et tout ce que tu fais. Je t'aime plus que les mots ne sauraient l'exprimer.

A toute la famille

A tous mes amis

Avec tout mon amour

BENHALIMA Nesma

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu, tout puissant, de m'avoir permis de mener à terme mon projet, et de m'avoir donné la volonté, la patience et le courage pour terminer ce travail.

J'exprime aussi mes vifs et sincères remerciements à mon promoteur professeur Hamid Aknouche pour avoir accepté de diriger ce mémoire, ainsi que pour tous ses conseils judicieux et sa disponibilité durant toute la réalisation de mon mémoire.

Je remercie infiniment Mr. Bennebri smail et Mr. malki mohammed , au sein de la centrale électrique de RAS-DJINET

Enfin, je remercie les membres du jury qui ont bien voulu accepter, malgré leurs lourdes et exaltantes responsabilités, d'évaluer ce modeste travail.

Résumé

Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur l'analyse vibratoire et son importance pour la détection des défauts. La surveillance et le diagnostic vibratoire des machines tournantes jouent un rôle essentiel dans l'industrie pour prolonger la durée de vie des équipements. Nous avons appliqué cette technique à la pompe de la centrale de Ras-Djinet 2, ce qui nous a permis de détecter les défauts en analysant son comportement dynamique.

Suite à cette analyse, nous avons réalisé un diagnostic afin d'identifier la nature et l'origine des défauts présents sur la pompe. La tâche la plus importante et la plus coûteuse, en termes de temps et de ressources, dans la surveillance et la maintenance des machines tournantes est la détection et le diagnostic des défauts. Cette étude est dédiée à la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire, démontrant ainsi l'efficacité de cette méthode pour assurer le bon fonctionnement et la durabilité des machines tournantes.

Mots clés : Maintenance conditionnelle, L'analyse vibratoire, Diagnostic, La pompe alimentaire

Abstract

In this work, we focused on vibration analysis and its importance for fault detection. Vibration monitoring and diagnostics of rotating machinery play a crucial role in the industry for extending the lifespan of equipment. We applied this technique to the pump at the Ras-Djinet 2 plant, which allowed us to detect faults by analyzing its dynamic behavior.

Following this analysis, we performed a diagnostic to identify the nature and origin of the faults present in the pump. The most important and costly task, in terms of time and resources, in the monitoring and maintenance of rotating machinery is the detection and diagnosis of faults. This study is dedicated to condition-based maintenance through vibration analysis, thereby demonstrating the effectiveness of this method in ensuring the proper functioning and durability of rotating machinery.

Keywords: Conditional monitoring, Vibration analysis, Diagnostics, The boiler feed water

ملخص

في هذا العمل، ركزنا على تحليل الاهتزاز وأهميته في اكتشاف العيوب. تلعب مراقبة وتشخيص الاهتزازات في الآلات الدوارة دورًا حيويًا في الصناعة لتمديد عمر المعدات. قمنا بتطبيق هذه التقنية على المضخة في محطة رأس جنات 2، مما سمح لنا باكتشاف العيوب من خلال تحليل سلوكها الديناميكي

بعد هذا التحليل، قمنا بإجراء تشخيص لتحديد طبيعة وأصل العيوب الموجودة في المضخة. تعتبر المهمة الأكثر أهمية والأكثر تكلفة من حيث الوقت والموارد في مراقبة وصيانة الآلات الدوارة هي اكتشاف وتشخيص العيوب. هذه الدراسة مكرسة للصيانة الشرطية من خلال تحليل الاهتزاز، مما يثبت فعالية هذه الطريقة في ضمان الأداء الجيد والدوام للآلات الدوارة

الكلمات المفتاحية: الصيانة حسب الحالة، تحليل الاهتزازات، التشخيص، المضخة المغذية

Liste d'abréviations

Mot définition

TV : Turbine à vapeur

ST: Steam Turbine

TG: Turbine à gaz

SPE : Société de Production d'Électricité

CC : Cycle combiné

HP : Haut pression

MP : Moyenne pression

BP : Base pression

IP : Pression Intermédiaire

LP: Basse Pression

BFP: Boiler Feed Pump

HRSG: Heat Recovery Steam Generator

CEP: Condensate Extraction Pump

CCW: Circuit de Refroidissement des Circuits

NO : Oxydes d'azote

STG: Steam Turbine Generator

DM: Demi-Water

GSC: Gland Steam Condenser

MP: Medium Pressure

DMCW : Eau de Refroidissement Déminéralisée

CW : Cooling Water(Circulation d'Eau)

SOMMAIRE

Introduction générale	2
I. Présentation de l'entreprise.....	5
Introduction.....	5
I.1 Historique de la centrale Ras-Djinet	6
I.2 Fiche Technique :.....	6
I.3 Caractéristiques La centrale de RAS-DJINET	7
I.4 Eléments de base de cycle combiné	8
I.4.1 Turbine à gaz.....	8
I.4.2 Chaudière de recuperation (HRSG).....	8
I.4.3 Turbine à vapeur	10
I.4.4 Le transformateur.....	10
I.4.5 Le poste d'eau	11
I.4.6 Le condenseur	11
I.5 Principe de fonctionnement de la centrale de RAS-DJINET :.....	11
I.5.1 Turbine à gaz :	12
I.5.2 Chaudière de récupération de chaleur :.....	12
I.5.3 Turbine à vapeur :	13
I.5.4 Condenseur:	13
I.6 Fonctionnement des autres composants du cycle combiné.....	14
I.6.1 Fonctionnement des vannes de by-pass HP, IP et LP :.....	14
I.6.2 Fonctionnement du système air comprimé-compresseur :.....	14
I.6.3 Fonctionnement des pompes d'alimentation en eau de la chaudière :.....	14
I.6.4 Fonctionnement des pompes d'extraction de condensat :.....	15
I.6.5 Fonctionnement du condenseur :	15

I.6.6	Fonctionnement de Gland Stream Condenseur :	15
I.6.7	Fonctionnement d'éjection d'air à jet de vapeur.....	15
I.6.8	Fonctionnement de la chaudière auxiliaire	16
I.6.9	Fonctionnement des pompes de circulation d'eau (CW) :.....	16
I.6.10	Fonctionnement des pompes d'alimentation pour installation de dessalement :	16
I.6.11	Fonctionnement des pompes d'eau de refroidissement déminéralisée :	16
I.6.12	Fonctionnement des échangeurs de chaleur (type à plaques) :	16
I.6.13	Fonctionnement des réservoirs de stockage de mazout :	17
I.6.14	La fonction du réservoir de stockage d'eau déminée :	17
I.6.15	Fonctionnement des réservoirs de stockage d'eau dessalée :	17
I.7	Salle de commande :	17
	Conclusion	17
II.	Généralités sur la maintenance	19
	Introduction.....	19
II.1	Définition de la maintenance.....	19
II.2	Objectifs de la maintenance	19
II.3	Les Différentes formes de maintenance	20
II.3.1	La maintenance corrective	20
II.3.2	La maintenance préventive	21
II.4	Choix d'outils de surveillance.....	24
	Conclusion	27
III.	Théorie sur l'analyse vibratoire	29
	Introduction sur les Vibrations.....	29
III.1	Définition d'une vibration:	29
III.2	Caractéristiques d'une vibration:.....	29

III.2.1	La fréquence.....	30
III.2.2	L'amplitude.....	30
III.3	Niveaux de vibrations	31
III.4	Les différentes formes de vibrations:	32
III.4.1	Vibrations harmoniques:.....	33
III.4.2	Vibrations périodiques :.....	33
III.4.3	Vibrations apériodiques :	34
III.5	Définitions et principes généraux des capteurs de vibration	35
III.5.1	Les types de capteurs	35
III.6	Défauts sur les machines tournantes.....	39
III.6.1	. Balourd.....	39
III.6.2	Désalignement :	41
		43
III.6.3	Les défauts des engrenages :.....	43
III.6.4	Les défauts de roulement :	47
	Conclusion	53
IV.	Partie expérimentale.....	55
	Introduction.....	55
IV.1	Définition de la Pompe Booster 40RL12D001.....	55
IV.2	Caractéristiques Techniques	55
IV.3	Fonctionnement	56
IV.4	But de travail	56
IV.5	. Matériels utilisés :.....	56
IV.5.1	Vibrotest60.....	56
IV.5.2	. Capteur de vibration utilisé : accéléromètre	56

IV.5.3	Logiciel d'analyse.....	57
IV.6	État vibratoire de la pompe alimentaire.....	57
IV.6.1	Les points de mesure de la pompe alimentaire	57
IV.6.2	Analyse globale.....	58
IV.6.3	Description du Graphique	59
IV.6.4	Analyse fréquentielle	59
IV.6.5	Interprétation :.....	60
IV.6.6	Travaux effectués.....	60
IV.6.7	Après l'intervention	61
IV.6.8	Interprétation :.....	62
IV.6.9	Travaux effectués.....	62
	Conclusion	63
	Conclusion générale et perspectives	65
	Bibliographie.....	66

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Centrale de RAS DJINET (cycle combiné)	5
Figure 2: Turbine à gaz	8
Figure 3 : Vue en coupe d'une turbine à vapeur	10
Figure 4 : Fonctionnement d'une turbine à gaz	12
Figure 5 : Formes de la maintenance selon la norme NF EN 13306 (2010)	20
Figure 6 : Représentation des différentes amplitudes caractéristiques dans le cas d'un signal sinusoïdal (en a), complexe (en b), impulsionnel périodique (en c)	31
Figure 7 : Critère de sévérité de vibration (selon ISO 2372).	32
Figure 8 : System de mouvement mass ressort	32
Figure 9: Représentation d'un signal harmonique	33
Figure 10 : Signaux vibratoire périodique	34
Figure 11 : Signaux vibratoire apériodique	34
Figure 12 : Principe du capteur inductif à courants de Foucault	36
Figure 13 : Exemples de proximètres	36
Figure 14 : Schéma de principe d'un vélocimètre	37
Figure 15 : Principe de fonctionnement d'un accéléromètre	38
Figure 16 : Grandeurs d'influence sur un accéléromètre	38
Figure 17: Spectre théorique d'un défaut de balourd.....	40
Figure 18: Balourd statique.....	40
Figure 19: Balourd dynamique	41
Figure 20: Désalignements d'arbre	41
Figure 21: Image vibratoire d'un défaut d'alignement radia	42
Figure 22: Image vibratoire d'un défaut d'alignement axial	43
Figure 23: Les différentes classes d'engrenages.....	44
Figure 24: Image vibratoire d'un engrenage sain	45
Figure 25: Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée	45
Figure 26: Image vibratoire théorique d'une denture	46
Figure 27: Image théorique d'un engrènement en fond de denture	47
Figure 28: Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée	47

Figure 29: Caractéristique géométrique d'un roulement.	48
Figure 30: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage	49
Figure 31: Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure.....	50
Figure 32: Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant.....	50
Figure 33: Image vibratoires théorique d'un défaut de type déversement de bague	51
Figure 34: Défaut de déversement	51
Figure 35: Vibrotest60	56
Figure 36: La fenêtre principale du logiciel.....	57
Figure 37: Points de mesures de pompe alimentaire.	58
Figure 38: Niveau Global Vitesse.....	58
Figure 39: Spectre du point PAL1 AX	59
Figure 40: Spectre du point PAL 2 RH.....	60
Figure 41: Niveau Global Vitesse.....	61
Figure 42: Spectre du point PAL 2 RH.....	62
Figure 43: Spectre du point PAL 1 AX	62

LISTE DES TABLEAU

Table 1: Choix de l'outil de surveillance [6]	25
Table 2: Choix de l'outil de surveillance suivant les défauts potentiels [6]	26
Table 3: reconnaissance des principales anomalies [9]	51

Introduction générale

Introduction générale

Dans l'industrie de la production d'électricité, la fiabilité et l'efficacité des machines tournantes, telles que les turbines, les générateurs et les moteurs, sont essentielles pour assurer une production continue et économique. Un arrêt imprévu de ces machines peut entraîner des pertes de production significatives, des coûts de réparation élevés et des risques pour la sécurité. Par conséquent, la maintenance prédictive, visant à anticiper les pannes avant qu'elles ne se produisent, est devenue une pratique courante et indispensable.

Parmi les différentes techniques de maintenance prédictive, le diagnostic par signatures vibratoires se distingue comme un outil puissant et largement utilisé. Cette méthode repose sur l'analyse des vibrations émises par les machines en fonctionnement pour détecter les anomalies et les défaillances potentielles. Chaque type de défaut, qu'il s'agisse de déséquilibre, de désalignement, de défauts de roulements ou de problèmes de lubrification, génère une signature vibratoire unique. En surveillant et en analysant ces signatures, il est possible de diagnostiquer avec précision l'état de la machine et d'identifier les problèmes avant qu'ils ne provoquent des pannes catastrophiques.

Le diagnostic par signatures vibratoires offre plusieurs avantages. Il permet non seulement de prolonger la durée de vie des équipements, mais aussi d'optimiser les intervalles de maintenance, réduisant ainsi les coûts et augmentant la disponibilité des machines. De plus, cette méthode est non intrusive et peut être appliquée en temps réel, offrant une surveillance continue et une réactivité accrue face aux anomalies.

Dans cette étude, nous explorerons les principes fondamentaux de la méthode des signatures vibratoires, les types de défauts qu'elle peut détecter, les technologies et les outils utilisés pour sa mise en œuvre, ainsi que les avantages spécifiques qu'elle offre dans le contexte de la production d'électricité. Nous examinerons également quelques études de cas pour illustrer l'efficacité de cette approche dans la maintenance prédictive des machines tournantes.

Ce mémoire de fin d'étude est divisé en quatre chapitres :

1. Le premier chapitre présente l'historique de la centrale thermique de Ras-Djinet ainsi que son principe de fonctionnement.
2. Le deuxième chapitre aborde des notions générales sur la maintenance.
3. Le troisième chapitre se concentre sur le système de diagnostic par analyse vibratoire.
4. Dans le dernier chapitre, une étude de cas est proposée avec des prélèvements des signatures vibratoires de la pompe booster 40RL12D001.

Ce mémoire commence par une introduction générale et se termine par une conclusion générale et des perspectives

Chapitre I : présentation de l'entreprise

I. Présentation de l'entreprise

Introduction

Dans le domaine de la production d'électricité, le cycle combiné représente une avancée technologique majeure, fusionnant l'efficacité des turbines à gaz avec la fiabilité des turbines à vapeur. Cette combinaison ingénieuse permet d'exploiter de manière optimale les ressources énergétiques en répondant à la demande croissante en électricité de manière plus efficace et écologique. La synergie entre ces deux technologies offre une solution polyvalente et adaptable, capable de s'accommoder aux fluctuations de la demande électrique tout en réduisant l'empreinte environnementale grâce à une utilisation plus efficace des combustibles fossiles.

Un exemple concret de ce développement est illustré par des installations telles que la centrale à cycle combiné de RAS-DJINET, située sur la côte est de l'Algérie. Cette centrale récupère les gaz d'échappement des turbines à gaz et les utilise dans une chaudière de récupération pour produire de la vapeur, assurant ainsi une production électrique efficace. La capacité de production totale de cette centrale s'élève à 1113.1 MW



Figure 1 : Centrale de RAS DJINET (cycle combiné)

I.1 Historique de la centrale Ras-Djinet

Le central cycle combiné de RAS DJINET 2 est d'une technologie nouvelle, 3 (unités TG + TV + Alternateur) SINGLE SHAFT répondant, aux normes récentes, en matière d'efficacité énergétique et du respect de l'environnement, ce qui permet :

- De réduire la consommation du gaz et du fuel ;
- De réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO₂ et NO_x).

La mise en service du groupe s'est effectuée comme suit :

- Groupe1, couplage en cycle combiné sur réseau le 12/09/2018 ;
- Groupe2, couplage en cycle combiné sur réseau le 13/12/2018 ;
- Groupe3, couplage en cycle combiné sur réseau le 11/05/2019.

La mise en réception pour SPE (SONALGAZ) :

- Groupe1, le 01/07/2019 ;
- Groupe2, le 11/07/2019 ;
- Groupe3, le 20/08/2019.

I.2 Fiche Technique :

- Lieu de : RAS-DJINET Wilaya de Boumerdes Surface : 18 Hectares
- Constructeur : DAEWOO ENGINEERING & CONSTRUCTION (Corée du sud)
- Puissance : 1131,1 MW
- Configuration : 3 Tranches en Cycle Combinée (1 Turbines à Gaz + 1 Turbine à vapeur+ 1 Alternateur)
- Application : Production d'électricité
- Combustible : Gaz Naturel/Gasoil.

I.3 Caractéristiques La centrale de RAS-DJINET

Elle se compose principalement de trois (3) unités de centrale électrique à cycle combiné à arbre-simple, ainsi que les systèmes qui supportent l'équilibre de la centrale. Chaque module a une turbine à gaz (modèle : SIEMENSSGT54000F), une chaudière de récupération (HRSG) associé, une turbine à vapeur (Modèle : SIEMENSSST5- 3000 H-IL) et un générateur commun refroidi par hydrogène (Modèle : SIEMENS SGEN5- 2000 H) situé sur le même arbre entre la turbine à gaz (GT) et la turbine à vapeur (ST). Les turbines à gaz sont conçues pour brûler le gaz naturel comme le combustible de base et le carburant diesel comme le combustible de secours

Les principaux composants mécaniques du cycle combiné de la nouvelle centrale de RASDJINET sont

- Turbine à gaz.
- Générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG).
- Turbine à vapeur.
- Vannes de by-pass HP, IP et LP.
- Système d'air comprimé–Pompes d'eau d'alimentation de la chaudière (BFP).
- Pompes d'extraction de condensat (CEP).
- Condenseur.
- Gland Stream Condenser (GSC).
- Éjecteur d'air à jet de vapeur.
- Chaudière auxiliaire.
- Pompes de circulation d'eau.
- Pompes d'alimentation usine de dessalement
- Échangeur de chaleur CCW (Type de plaque)
- Pompes d'eau de refroidissement déminéralisée

- Station d'alimentation en gaz naturel–Réservoirs de stockage de mazout.
- Réservoir de stockage d'eau DM.
- Réservoir de stockage d'eau dessalée.

I.4 Eléments de base de cycle combiné

I.4.1 Turbine à gaz

Une turbine à gaz typique se compose d'un système d'air d'admission, d'un compresseur, d'un système de combustion, d'une turbine, d'un système d'échappement et d'un générateur comme il est illustré dans le schéma ci-dessous :

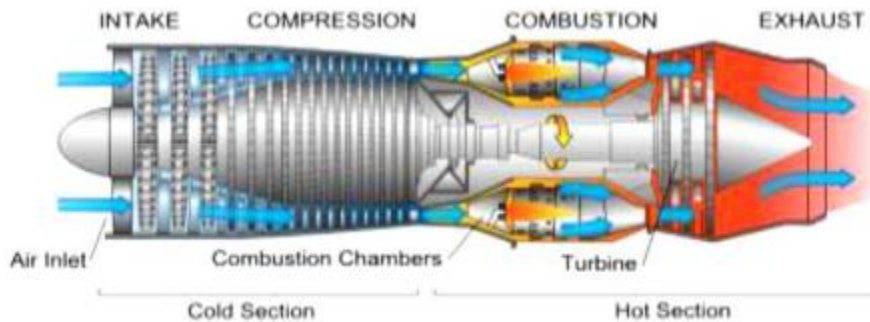


Figure 2: Turbine à gaz

I.4.2 Chaudière de recuperation (HRSG)

a. Ballon vapeur pour chaque niveau de pression (HP, IP et BP)

Le ballon vapeur est conçu pour séparer le mélange de vapeur et d'eau pour fournir de la vapeur saturée à la surchauffeur et pour absorber les à-coups de l'évaporateur pendant les transitoires de démarrage et de fonctionnement.

b. Sections économiseur pour chaque niveau de pression (HP, IP et BP)

La fonction principale de la section économiseur du HRSG est de préchauffer l'eau de condensation (pour économiseur LP) ou bien l'eau d'alimentation (pour économiseur IP et économiseur HP)

c. Sections évaporateur pour chaque niveau de pression (LP, IP et HP)

L'eau de condensation traversant la section économiseur entre dans le ballon vapeur et est répartie sur toute la longueur du ballon par un collecteur de distribution où il se mélange à l'eau saturée revenant de la section évaporateur. L'eau saturée est extraite du fond du ballon vapeur LP et traverse la section de l'évaporateur par le processus de circulation naturelle. L'eau saturée entre dans le collecteur situé au fond de l'évaporateur et s'écoule vers le haut par évaporation dans les tubes de l'évaporateur. La section évaporateur fonctionne essentiellement à température constante.

d. Sections surchauffeur pour chaque niveau de pression (LP, IP et HP)

La vapeur saturée est extraite du ballon vapeur vers le collecteur d'entrée de la surchauffeur, puis s'écoule à travers la structure grillagée des tubes à ailettes vers le collecteur de sortie. Le débit de vapeur est à courant du débit des gaz d'échappement. La section surchauffeur élève la température de la vapeur depuis la température de Saturation jusqu'à une température de surchauffe conforme aux exigences de la turbine à vapeur basse pression.

e. Section réchauffeur (pour la section IP)

La fonction principale de la section réchauffeur est de chauffer la vapeur de réchauffage à froid (CRH) jusqu'à la température de vapeur de réchauffage à chaud (HRH).

f. Dégazeur intégral ballon LP

Le dégazeur a pour fonction d'éliminer les gaz non condensables comme O₂ et le CO₂ des condensats lors du remplissage initial de la chaudière et du démarrage de l'installation. Il fait partie intégrante du ballon basse pression (LP). Le ballon LP agit comme un réservoir de stockage pour le dégazeur.

g. Cheminée HSRG avec silencieux

La cheminée du HRSG et son silencieux sont fournis pour acheminer les gaz d'échappement de la turbine à gaz depuis la sortie du HRSG vers l'atmosphère. Des ports d'échantillonnage sont fournis dans la cheminée pour les contrôles d'émission. Les gaz d'échappement chauds de la turbine à gaz font du bruit. De ce fait, un silencieux est fourni afin de réduire le bruit en sortie de cheminée

I.4.3 Turbine à vapeur

Chaque module de la centrale à cycle combiné (CCPP) est fourni avec une turbine à vapeur (modèle Siemens SST5-3000) représentée sur la figure 3 ainsi que tous les accessoires nécessaires. La turbine à vapeur se compose d'un cylindre HP et d'un cylindre IP/LP à écoulement direct. La vapeur d'échappement sortant de la turbine à vapeur sera condensée dans le condenseur refroidi à eau. La turbine HP est de construction à simple flux et à double paroi avec un porte-lame fixe et un carter externe.

Elle est munie d'une vanne d'arrêt et de contrôle de vapeur principale, soudée, soutenue par des supports supplémentaires. Le carter extérieure est de type cylindrique. Le carter extérieur IP/LP est divisé en deux sections, la section du carter d'entrée moulé et la section du carter d'échappement soudé. Les deux sections sont divisées horizontalement. Les demi-carter sont boulonnés ensemble par des boulons d'assemblage. Les sections d'entrée et d'échappement sont également boulonnées ensemble.

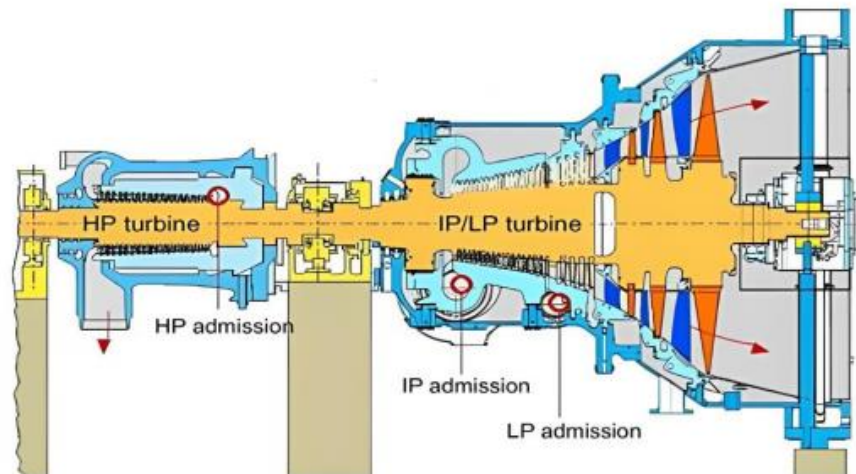


Figure 3 : Vue en coupe d'une turbine à vapeur

I.4.4 Le transformateur

Un transformateur électrique est un convertisseur qui modifie les valeurs de tension et d'intensité du courant donné par une source d'énergie électrique distincte dans un système de tension et de courant avec des valeurs variées mais la même fréquence et même forme. Étant donné que le courant électrique de l'alternateur est trop faible pour être livré par des avions

haute tension, il est connecté à un transformateur d'ascenseur avec une plage de tension de 22 à 400 kV et une puissance de 400 MW via un disjoncteur de coupleur. Le transformateur est refroidi par la circulation d'huile forcée dans un circuit fermé, qui est refroidi par l'air.

I.4.5 Le poste d'eau

La station d'eau se compose des éléments suivants et comprend tout l'équipement de l'échappement de la turbine à l'entrée de la sauvegarde de la chaudière : (Le condenseur - La bêche alimentaire et le dégazeur - Les pompes (d'extraction et d'alimentation). - Les réchauffeurs HP et BP).

I.4.6 Le condenseur

Le condenseur est un échangeur de chaleur surfacique installé sous le corps basse pression BP de la turbine. La vapeur se condense au contact des parois des tubes qui transportent l'eau de refroidissement marine. Un échange de chaleur fluide séparé avec des faisceaux de tubes est utilisé.

I.5 Principe de fonctionnement de la centrale de RAS-DJINET :

La centrale à cycle combiné de RAS-DJINET utilise le gaz naturel comme combustible principal dans un système de production en deux étapes.

Premièrement la turbine à gaz met l'alternateur en mouvement grâce à la combustion du gaz naturel pour générer de l'électricité (cycle gaz). Deuxièmement, la chaleur issue du premier cycle est récupérée au maximum pour générer de la vapeur qui fait tourner une turbine à vapeur, pour aussi générer de l'électricité. Deux tiers de la puissance totale sont générés par la turbine à gaz et un tiers par la turbine à vapeur.

La combinaison de ces deux cycles permet à la centrale électrique d'atteindre un rendement qui se situe aux alentours de 60 %.

On donne dans ce qui suit le fonctionnement détaillé de la centrale étape par étape.

I.5.1 Turbine à gaz :

Le processus de production commence dans la turbine à gaz ou le gaz naturel est mélangé à l'air et brûlé dans la chambre à combustion à une température qui arrive jusqu'à 1200°C. La puissance fournie par la turbine à gaz dépendant notamment de la température ambiante et de la pression atmosphérique.

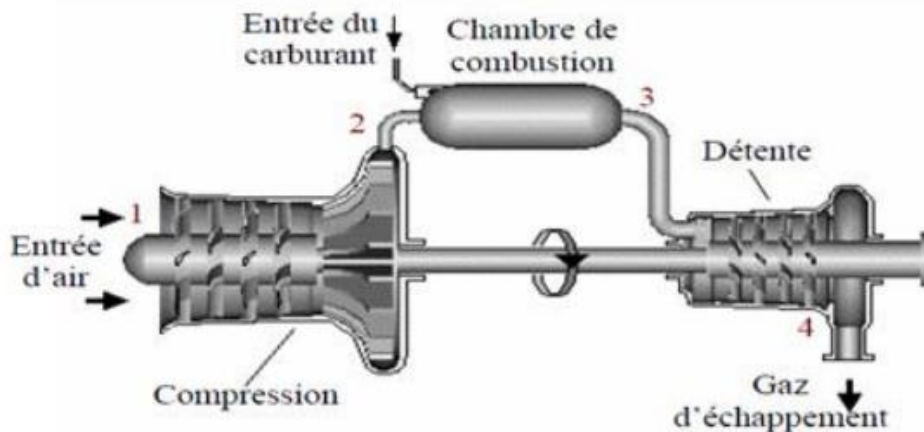


Figure 4 : Fonctionnement d'une turbine à gaz

Le compresseur des turbines à gaz aspire l'air ambiant à travers un filtre à air d'admission, le comprime et alimente le système de combustion. Le gaz combustible est introduit dans le système de combustion et est brûlé avec l'air comprimé. Les gaz brûlés de combustion (chauds et comprimés) qui en résultent s'écoulent dans la turbine de détente. Les gaz brûlés se dilatent et entraînent la turbine à gaz. La puissance mécanique générée dans la turbine entraîne l'alternateur et le compresseur. La sortie du générateur est connectée par un transformateur élévateur et des barres omnibus au réseau.

I.5.2 Chaudière de récupération de chaleur :

Aucune combustion ne se passe dans la chaudière de récupération. Cette dernière est un générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) horizontal à trois niveaux de pression. Les gaz brûlés qui sortent de la turbine à gaz ont une température élevée et transportent donc beaucoup d'énergie thermique. Cette énergie thermique d'échappement de la turbine à gaz (GT) est utilisée pour produire de la vapeur par le générateur de vapeur HRSG.

La chaudière à récupération de chaleur est un générateur de vapeur à débit horizontal avec trois niveaux de pression LP, IP et HP à circulation naturelle sans poste de combustion de fabricant NOOTER ERIKSEN.

La vapeur d'eau générée par le HRSG alimente successivement la turbine à vapeur haute pression (HP), la turbine à vapeur moyenne pression (MP) et la turbine basse pression (BP). Le gaz combustible, pour le maintenir au-dessus de la température du point de rosée, est chauffé par le réchauffeur d'efficacité alimenté en eau par l'économiseur HRSG.

Les pompes d'alimentation HRSG aspirent l'eau depuis le ballon de vapeur BP et alimentent le circuit haute pression (HP) et, par une purge intermédiaire, le circuit de pression intermédiaire (MP).

La vapeur du tambour à vapeur HP circule à travers le surchauffeur et va vers la turbine à vapeur HP. La vapeur prélevée de la décharge de la turbine HP retourne au HRSG, où elle est mélangée avec la vapeur surchauffée de la turbine MP ; puis, en passant par le réchauffeur (RH), retourne à la turbine MP.

Enfin, la vapeur prélevée de la décharge de la turbine MP va directement à la turbine BP. La vapeur de la turbine BP provenant du HRSG est admise dans la décharge de la turbine MP. La vapeur déchargée de la turbine BP est envoyée au condenseur de surface de vapeur

I.5.3 Turbine à vapeur :

La vapeur produite dans la HRSG est injectée dans la turbine à vapeur pour produire et transmettre un couple moteur supplémentaire à l'arbre de l'alternateur via un embrayage de synchronisation. Le type de la turbine à vapeur utilisée dans la centrale à cycle combiné de RDJ est de marque Siemens SST_3000 composée d'un cylindre HP de type baril à 27 étages et d'un cylindre d'écoulement direct MP/BP à 16 et 07 étages successifs.

I.5.4 Condenseur:

Pour que la vapeur déjà utilisée puisse être récupérée et réutilisée dans la chaudière elle passe au travers d'un condenseur à surface refroidi à l'eau de mer. La différence de température condense la vapeur en eau, qui est pompée à nouveau dans la chaudière pour produire de nouveau de la vapeur et le cycle recommence.

Ainsi, la vapeur d'échappement de la turbine MP, la vapeur d'étanchéité, les drains de turbine et / ou la vapeur de dérivation HP/BP sont acheminées vers le condenseur et condensées dans celui-ci. L'eau d'appoint DM est également apportée dans la cheminée du condenseur. Le condensat de la cheminée est évacué par des pompes d'extraction de condensat vers le système de préchauffage des condensats (économiseur MP) et vers plusieurs consommables STG via les échangeurs et refroidisseurs de l'éjecteur d'air à vapeur (SJAЕ) et du condensateur de vapeur du presse-étoupes (GSC). Le dégazeur est intégré au ballon de vapeur à basse pression (BP).

Le condenseur est conçu pour fonctionner à 0,051 bar tout en faisant circuler 34,000 m^3 /hr d'eau de mer et en condensant 355,706 kg/h de vapeur d'eau.

I.6 Fonctionnement des autres composants du cycle combiné

I.6.1 Fonctionnement des vannes de by-pass HP, IP et LP :

La fonction de la vanne de by-pass est de dévier la vapeur vers la conduite de réchauffage à froid (CRH) ou à chaud (HRH) et de maintenir le HRSG en fonctionnement pendant le démarrage ou l'arrêt de la turbine à vapeur, ou pendant d'autres états particuliers. Le système de by-pass se compose d'une vanne d'arrêt de vapeur, d'une vanne de conditionnement de vapeur et d'une vanne de régulation de température pour chaque niveau.

I.6.2 Fonctionnement du système air comprimé-compresseur :

Les compresseurs d'air sont de type à vis sans fin, sans huile, à entraînement par moteur, avec filtre d'aspiration, refroidisseurs d'air et instruments nécessaires. Les compresseurs sont de construction robuste et conçus pour un fonctionnement continu et intermittent à pleine ou faible capacité.

I.6.3 Fonctionnement des pompes d'alimentation en eau de la chaudière :

La fonction des pompes d'alimentation en eau de la chaudière est de fournir de l'eau du ballon LP, à la section économiseur haute pression (HP) du générateur de vapeur à récupération de chaleur et, par un étage intermédiaire, à la section économiseur pression intermédiaire (IP) du générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG). Les pompes d'alimentation en eau de la chaudière fournissent également de l'eau de pulvérisation

désurchauffeur pour le système de by-pass HP et de l'eau de pulvérisation désurchauffeur pour la surchauffeur HP.

I.6.4 Fonctionnement des pompes d'extraction de condensat :

La fonction des pompes d'extraction de condensat est d'effectuer ce qui suit :

- Maintenir le niveau du puits du condenseur à son niveau normal en extrayant les condensats du puits du condenseur et fournir de l'eau de condensation au dégazeur en passant par l'économiseur LP
- Fournir de l'eau pulvérisée désurchauffeur pour le système de by-pass IP et LP, la station auxiliaire de réduction de pression de vapeur et de désurchauffe (PRDS) et d'autres auxiliaires.
- De la turbine à vapeur, et fournir aussi de l'eau d'étanchéité aux vannes pour empêcher l'entrée d'air dans le système.

I.6.5 Fonctionnement du condenseur :

Le condenseur axial refroidi à l'eau remplit la fonction de condenser la vapeur d'échappement de la turbine à vapeur et / ou du système de by-pass de vapeur haute pression (HP), pression intermédiaire (IP) et basse pression (LP).

Le condenseur reçoit la vapeur d'échappement de la turbine dans le sens horizontal. Il est équipé d'une soupape de dépression, de transmetteurs de pression, de transmetteurs de température et de transmetteurs de niveau pour la protection du condenseur et de la turbine.

I.6.6 Fonctionnement de Gland Stream Condenseur :

Le Gland Stream Condenseur a pour fonction de condenser la vapeur évacuée par les joints d'étanchéité de l'arbre et de récupérer le condensat. Le Gland Stream Condenseur est refroidi avec les condensats provenant des pompes d'extraction de condensat.

I.6.7 Fonctionnement d'éjection d'air à jet de vapeur

- Éjecteur d'air à jet de vapeur (HOGGING)

La fonction de l'éjecteur est d'évacuer l'air et les autres gaz non condensables dans le condenseur lors de la mise en marche

- Éjecteur d'air à jet de vapeur (HOGGING)

La fonction de l'éjecteur d'air à jet de vapeur est d'évacuer l'air et les autres gaz non condensables dans le condenseur en fonctionnement normal. La source de vapeur motrice pour l'éjecteur d'air à jet de vapeur doit provenir du collecteur auxiliaire

I.6.8 Fonctionnement de la chaudière auxiliaire

La fonction de la chaudière auxiliaire est de fournir les besoins en vapeur auxiliaire lors du démarrage et le fonctionnement à faible charge de l'installation. La chaudière auxiliaire doit Fournir de la vapeur pour l'étanchéité à la turbine du presse-étoupe ainsi que pour station de dessalement.

I.6.9 Fonctionnement des pompes de circulation d'eau (CW) :

La principale fonction des pompes de circulation d'eau est d'alimenter en eau froide le condenseur à eau de mer pour absorber la chaleur du cycle. Chaque ligne de refoulement des pompes de circulation d'eau est équipée d'une vanne papillon motorisée. Deux (2 x 50%) pompes de circulation d'eau sont prévues pour chaque module de la centrale à cycle combiné (CCPP).

I.6.10 Fonctionnement des pompes d'alimentation pour installation de dessalement :

La fonction principale des pompes d'alimentation est de fournir de l'eau pour l'usine de dessalement.

I.6.11 Fonctionnement des pompes d'eau de refroidissement déminéralisée :

La fonction principale des pompes à eau de refroidissement déminéralisée (DMCW) est de faire circuler l'eau de refroidissement pour des équipements et composants de la turbine à gaz, de la turbine à vapeur, du cycle eau / vapeur et du générateur.

I.6.12 Fonctionnement des échangeurs de chaleur (type à plaques) :

La fonction de l'échangeur de chaleur à plaques pour l'eau de refroidissement en circuit fermé est de transférer la chaleur absorbée par le circuit d'eau de refroidissement fermé au système de refroidissement auxiliaire à l'eau de mer.

I.6.13 Fonctionnement des réservoirs de stockage de mazout :

La fonction du réservoir de stockage de mazout est de stocker du mazout pour (Turbine à gaz / GT). Le mazout est utilisé comme carburant alternatif pour les turbines à gaz.

I.6.14 La fonction du réservoir de stockage d'eau déminérée :

Le fonctionnement des réservoirs de stockage d'eau déminéralisée est de stocker l'eau déminéralisée pour eau d'appoint du cycle de puissance, eau d'appoint du cycle de puissance, eau d'appoint de la chaudière auxiliaire, eau d'appoint pour la génération d'hydrogène et le lavage du compresseur GT

I.6.15 Fonctionnement des réservoirs de stockage d'eau dessalée :

Dans la nouvelle centrale de RAS DJINET, la principale fonction du réservoir de stockage d'eau dessalée est de stocker l'eau dessalée pour l'approvisionnement en eau de l'usine d'eau DM, du système d'eau de service et du système d'eau d'incendie. Ce réservoir est utilisé selon le système de refroidissement par film

I.7 Salle de commande :

Chaque paire de tranches est contrôlée et réglée depuis la salle de commande. La salle de commande comprend pour chaque tranche :

- Deux (02) pupitres de conduites.
- Deux (02) tableaux verticaux où sont rassemblés les organes de commande et les appareils d'enregistrement de la plus grande partie des paramètres.
- Un (01) tableau synoptique schématisant les auxiliaires électriques

Conclusion

Une présentation exhaustive de la centrale à cycle combiné de Ras Djinet, accompagnée d'une description détaillée de ses équipements, offre une vision claire des processus impliqués dans la production d'électricité. Pour répondre aux besoins énergétiques des consommateurs, la continuité de la production électrique est essentielle, ce qui nécessite une attention particulière à la sécurité des personnes, à la préservation de l'environnement et à l'optimisation de la durabilité des équipements de l'usine.

Chapitre II : Généralités sur la maintenance

II. Généralités sur la maintenance

Introduction

Les méthodes de maintenance ont souvent recours à une information basée sur l'expérience pour prédire les performances futures. Elles sont formalisées en une discipline systématique qui se base sur une évaluation technique complète des événements survenus pendant les phases expérimentales ou d'exploitation. Les méthodes de maintenance apportent, à la conception de produit, des méthodes et des informations qui permettent de faire mieux qu'avant et surtout, de prévoir le comportement futur d'un matériel nouveau [1]

II.1 Définition de la maintenance

D'après L'Association française de Normalisation (AFNOR X 60-010-1994), La maintenance est définie comme l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités technique, administratives et de management [2]

II.2 Objectifs de la maintenance

Les principaux objectifs de la maintenance sont [2] :

- De maintenir l'équipement dans un bon état de marche, dans les meilleures conditions de qualité, de délai et de prix de revient ;
 - De remplacer l'équipement à des périodes prédéterminées ;
 - D'assurer à l'équipement des performances de haute qualité ;
 - D'améliorer la sécurité du travail ;
 - De former le personnel dans les spécialités spécifiques à la maintenance ;
 - De conseiller la direction d'usine et la fabrication ;
 - De maintenir l'installation dans un état de propreté absolue.

La fonction maintenance a donc un caractère productif tout comme la fonction production. On parle souvent de la maintenance productive, et il convient de lui attacher une importance aussi grande que la fonction fabrication. Les deux ont la tâche d'assurer une conduite et une qualité constante de la production.

II.3 Les Différentes formes de maintenance

Il existe deux types de maintenance qui peuvent être représentés par la figure suivante [2] :

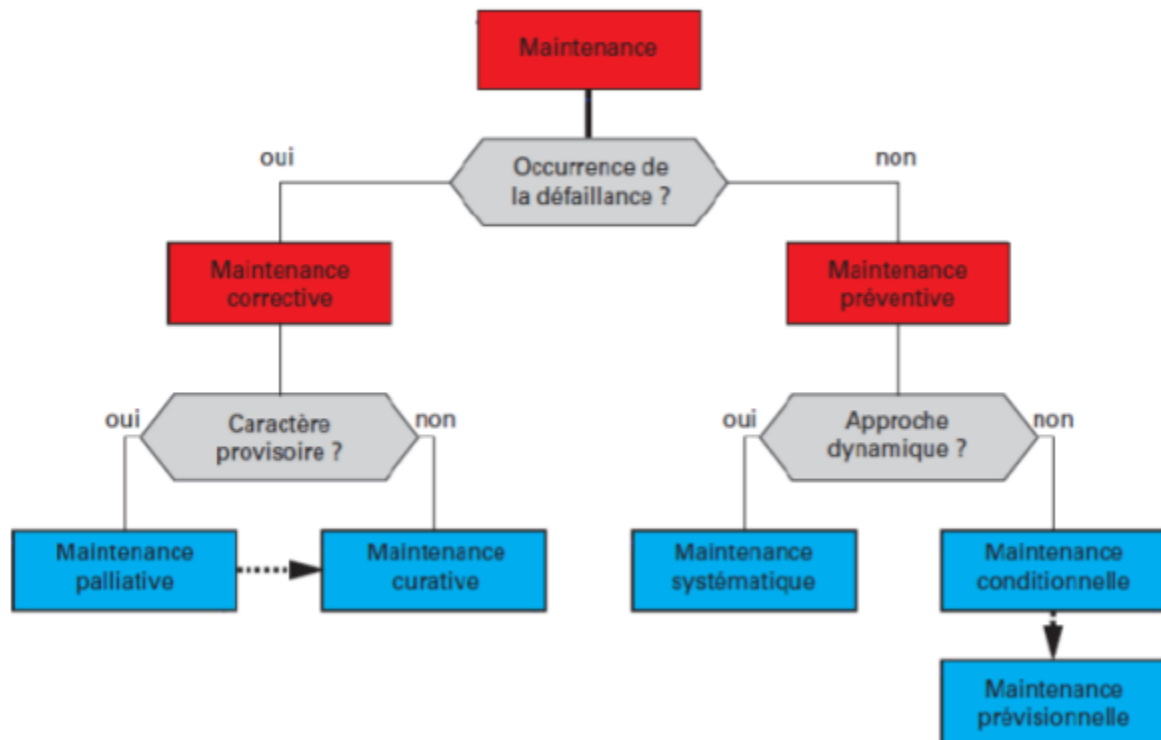


Figure 5 : Formes de la maintenance selon la norme NF EN 13306 (2010)

II.3.1 La maintenance corrective

Ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien, ou la dégradation de sa fonction, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement [3]

NOTE : La maintenance corrective comprend en particulier :

- la localisation de la défaillance et son diagnostic ;

- la remise en état avec ou sans modification ;
- le contrôle du bon fonctionnement

II.3.2 La maintenance préventive

Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. Elle doit permettre d'éviter les défaillances du matériel en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter [4].

a. Objectifs de la maintenance préventive

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

b. La maintenance préventive systématique

C'est la Maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage. Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité, la longueur et la masse des produits fabriqués, la distance parcourue, le nombre de cycles effectués, etc. Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle [4].

Cette méthode nécessite de connaître :

- Le comportement du matériel.
- Les modes de dégradation.
- Le temps moyen de bon fonctionnement entre 2 avaries.

Cas d'application :

- Equipements soumis à une législation en vigueur (sécurité réglementée) : appareils de levage, extincteurs, réservoirs sous pression, convoyeurs, ascenseurs, monte-charge, etc. . . .
- Equipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves : tout matériel assurant le transport en commun des personnes, avions, trains, etc. . . .
- Equipement ayant un coût de défaillance élevé : éléments d'une chaîne de production automatisée, processus fonctionnant en continu (industries chimiques ou métallurgiques).
- Equipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevées au cours de leur temps de service : consommation excessive d'énergie, éclairage par lampes usagées, allumage et carburation déréglés (moteurs thermiques), etc. . . .

c. La maintenance préventive conditionnelle

On l'appelle aussi maintenance prédictive (terme non normalisé). C'est la maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc...). La maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendante de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel. Elle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant le cas, il est souhaitable de les mettre sous surveillance et, à partir de là, de décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint. Mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs. Tout le matériel est concerné ; cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement.

Les paramètres mesurés peuvent porter sur [4] :

- Le niveau et la qualité de l'huile.
- Les températures et les pressions.
- La tension et l'intensité du matériel électrique.
- Les vibrations et les jeux mécaniques.

- Le matériel nécessaire pour assurer la maintenance préventive conditionnelle devra être fiable pour ne pas perdre sa raison d'être. Il est souvent onéreux, mais pour des cas bien choisis, il est rentabilisé rapidement.

d. Types de maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle fait appel à une multitude de techniques de surveillance, mais voici les types de maintenance conditionnelle que vous avez le plus de chances de rencontrer [5].

- **Thermographie infrarouge**

La thermographie infrarouge utilise l'imagerie thermique pour détecter la surchauffe et d'autres problèmes liés à la température. Elle s'appuie sur des mesures sans contact pour identifier des variations de température potentiellement problématiques dans les objets et les surfaces.

La thermographie infrarouge utilise des caméras d'imagerie thermique pour capturer le rayonnement infrarouge émis par un objet ou une surface et le convertir en image visuelle (ou thermogramme). Le thermogramme est ensuite utilisé pour mesurer la température actuelle de l'actif par rapport à sa température de base.

Les organisations utilisent principalement ce type de maintenance conditionnelle pour surveiller des moteurs, inspecter des roulements et vérifier des niveaux de gaz, de boue ou de liquide.

- **Surveillance des vibrations**

La surveillance (ou l'analyse) des vibrations utilise des capteurs de vibrations pour mesurer les fréquences de vibration dans un actif et détecter des anomalies susceptibles d'indiquer un problème. Étant donné que les actifs tournants (comme les moteurs et les pompes) ont tendance à vibrer plus intensément et plus fortement avec le temps, la mesure des variations de vibrations peut aider à identifier l'usure et les dommages avant que l'actif ne tombe en panne. La surveillance des vibrations permet de détecter un grand nombre de problèmes, notamment les défauts d'alignement, les déséquilibres, l'usure ou les arrêts anormaux des roulements, la déformation des arbres et le desserrage des composants.

- **Analyse de l'huile**

L'analyse de l'huile permet d'évaluer les propriétés de l'huile lubrifiante d'un actif (par exemple, sa viscosité, son acidité, etc.) pour détecter des contaminants ou des particules d'usure. Elle

consiste généralement à prélever un échantillon d'huile lubrifiante sur l'équipement et à l'envoyer à un laboratoire pour analyse. L'analyse de l'huile peut s'avérer utile pour surveiller les actifs tels que les moteurs, les boîtes d'engrenages et les systèmes hydrauliques.

- **Analyse ultrasonique**

L'analyse ultrasonique (ou contrôle par ultrasons) utilise des ondes sonores à haute fréquence pour détecter des fuites, des fissures ou des défauts dans un équipement. Elle s'appuie sur des techniques de collecte de données avec et sans contact pour déterminer l'usure des actifs. Les méthodes avec contact sont généralement utilisées pour détecter des problèmes mécaniques, comme les problèmes de lubrification, les dommages au niveau des engrenages et les ruptures de barres de rotor, qui génèrent des sons à haute fréquence. Les méthodes sans contact peuvent détecter des problèmes tels que les fuites de pression et de vide dans les systèmes de gaz comprimé, qui produisent généralement des sons à basse fréquence.

- **Analyse de la pression**

Les actifs qui transportent du gaz, de l'air ou du liquide sont plus faciles à surveiller au moyen de l'analyse de la pression, c'est-à-dire le processus de mesure et d'évaluation des niveaux de pression au sein d'un actif. Les équipes de maintenance peuvent utiliser l'analyse de la pression pour déterminer le débit et la vitesse des liquides à travers les tuyaux et les vannes, pour optimiser les performances des compresseurs et des régulateurs d'air, et pour contrôler la pression des gaz et des liquides dans les réservoirs et les pipelines.

- **Analyse électrique**

L'analyse électrique évalue la qualité du courant entrant dans les systèmes ou les composants électriques à l'aide de pinces ampèremétriques qui mesurent le courant du moteur. Le fait de mesurer la tension, le courant, la résistance, la capacité, l'inductance et la puissance peut aider les équipes de maintenance à anticiper les chutes de tension, les problèmes de facteur de puissance, ainsi que les défauts et les distorsions de circuit.

II.4 Choix d'outils de surveillance

Tenant compte des impératifs du processus, tel qu'une chaîne de production, de son type, de sa complexité et autres conditions de l'environnement, Le choix d'une technique de surveillance pour le diagnostic, la localisation et l'identification d'une défaillance revêt une grande

importance et se doit d'être le plus approprié. Ainsi, en fonction de ces considérations on pourra opter pour un ou plusieurs choix pour un type de surveillance [6].

Le tableau 1 critères pour le choix de l'outil de surveillance.

Table 1: Choix de l'outil de surveillance [6]

	Principaux avantages	Principales limitations	Champ d'applications privilégié
Analyse vibratoire	Détection de défauts à un stade précoce Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi Autorise une surveillance continue Permet de surveiller l'équipement à distance	Spectre parfois difficiles à interpréter Dans le cas de la surveillance continue installation relativement couteuse	Détection de défauts de tous les organes de la cinématique de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure
Analyse d'huiles	Détection d'une pollution anormale du lubrification avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse de particules	Ne permet pas de localiser précisément le défaut Nécessite de prendre de nombreuses précaution dans le prélèvement de l'échantillon	Contrôles des propriétés physico-chimiques du lubrifiant Détection d'un manque de lubrification analyse des éléments d'usure, analyse de contamination par le process (étanchéité)
Thermographie IR	Permet de réaliser un contrôle rapide de	Détection de défauts à un stade moins	Détection de tous les défauts engendrant un

	l'installation Interprétation souvent immédiat de résultat	précoce que l'analyse vibratoire Contrôle limite à ce que 'voit' la camera (échauffement de surface) Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi	échauffement (manque de lubrification en particulier)
Analyse acoustique	Permet de détecter l'apparition de défauts audible Autorise une surveillance continue	Sensibilité au bruit ambiant Diagnostic souvent difficile à réaliser Problème de répétabilité des mesures	Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuit être analyse par analyse vibratoire

Choix de l'outil de surveillance suivant les défauts potentiels

Table 2: Choix de l'outil de surveillance suivant les défauts potentiels [6]

Type de défauts	Analyse vibratoire	Thermographie IR	Analyse d'huiles	Analyse acoustique
Déséquilibres, balourd	Oui	Non (Sauf s'il y a usure)	Oui (S'il y a un échauffement)	Non
Jeux, défauts de serrage	Oui	Non (Sauf s'il y a usure)	Oui (S'il y a un échauffement)	Oui S'il y a une résonance
Défauts spécifique aux	Oui	Oui	Oui	Oui

roulements				
Défauts spécifique aux engrenages	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts de courroies	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts d'alignement	Oui	Non	Oui	Non
Défauts lies a la lubrification : dégradation de la qualité de l'huile	Non (Sauf paliers fluides)	Oui	Non	Oui
Manque d'huile	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts de nature électrique ou électromagnétique	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts lies aux écoulements (pour pompes et machines hydraulique	Oui	Non	Non	Oui

Conclusion

La maintenance joue un rôle essentiel dans le succès d'une entreprise, et sa complexité dépend du type de processus industriel en place. Elle englobe plusieurs composantes essentielles, telles que la maintenance préventive, corrective et prédictive. La maintenance préventive vise à anticiper les pannes par des inspections régulières et des entretiens planifiés. La maintenance corrective intervient pour réparer les équipements défectueux et minimiser les temps d'arrêt imprévus. Enfin, la maintenance prédictive utilise des technologies avancées, comme l'analyse de données et les capteurs intelligents, pour prévoir les défaillances avant qu'elles ne surviennent.

Chapitre III : Théorie sur l'analyse vibratoire

III. Théorie sur l'analyse vibratoire

Introduction sur les Vibrations

Dans le vaste domaine de l'ingénierie et de la physique, les vibrations représentent un phénomène fondamental et omniprésent. Que ce soit dans les machines industrielles, les structures de génie civil, les systèmes mécaniques ou même les processus biologiques, les vibrations jouent un rôle essentiel et peuvent avoir des conséquences significatives sur le fonctionnement et la durabilité des systèmes.

Les vibrations se manifestent sous différentes formes et peuvent être causées par une variété de facteurs, tels que les forces externes, les excitations mécaniques, les fluctuations de pression ou les oscillations naturelles. Comprendre les mécanismes et les caractéristiques des vibrations est donc crucial pour anticiper, contrôler et optimiser les performances des systèmes et des structures.

Les vibrations sont parfois perturbatrices et doivent être combattues dans plusieurs domaines par exemple : Les vibrations des voitures, des avions, des trains ou des bateaux provoquent, en plus des inconvénients précédents, l'inconfort des voyageurs et diminuent parfois la sécurité de conduite de ces véhicules.

III.1 Définition d'une vibration:

La norme ISO 2041 « Vibrations et chocs - Vocabulaire (Août 1990) » définit la notion de vibration : Variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du Mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement Plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence. En fait, un corps Est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position D'équilibre ou de référence [7].

III.2 Caractéristiques d'une vibration:

Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence et son amplitude [8].

III.2.1 La fréquence

a. Définition

La fréquence représente la cadence de répétition d'un phénomène ou le nombre de fois qu'il se reproduit en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisi est la seconde, la fréquence s'exprime en Hertz (Hz). Une vibration qui se produira 50 fois/seconde aura donc une fréquence de 50 Hz. 1 Hertz = 1 cycle par seconde

b. Relation entre fréquence et période

Le Hertz est la fréquence d'un phénomène dont la période est d'une seconde (Source : Norme française NF X 02-202). Si la fréquence (f) d'un phénomène est de 50 Hertz, c'est-à-dire 50 cycles par seconde, la durée d'un cycle (ou période T) est de 1/50e de seconde soit 20 ms. Ainsi dans cet exemple : f = 50 Hertz (50 Hz) T = 1/50e de seconde La fréquence f est donc l'inverse de la période T :

$$f = \frac{1}{T}$$

III.2.2 L'amplitude

L'amplitude est la première sensation ressentie lorsque l'on pose la main sur le palier d'une machine qui vibre.

a. Définitions

On appelle amplitude d'un mouvement vibratoire la valeur de ses écarts par rapport à sa position d'équilibre. De cette définition générale, la complexité d'un signal vibratoire réel conduit à définir plusieurs grandeurs (figure 6) pour caractériser son amplitude.

– L'amplitude « crête (Ac) ».

Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.

– L'amplitude « crête à crête (Ac-c) » appelée « peak to peak » (Ap-p) en anglais.

Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné. Dans le cas d'une vibration sinusoïdale, elle est parfois appelée « amplitude double » (Ac-c = 2Ac).

– L'amplitude « efficace (Aeff) » ou RMS en anglais (Root Mean Square).

Comme en électricité, elle représente l'amplitude corrigée « statique » du signal redressé, indiquant ainsi l'énergie donnée par le mouvement vibratoire.

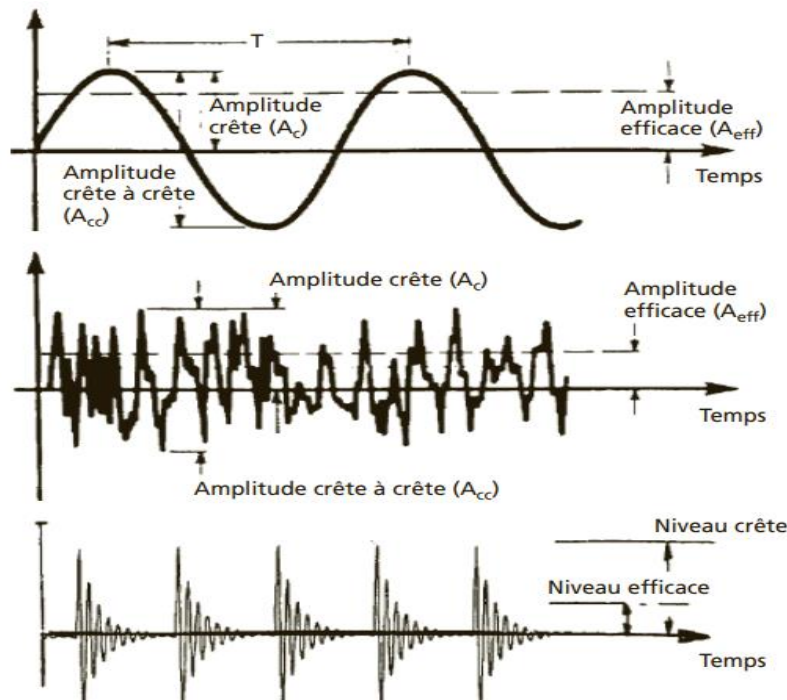


Figure 6 : Représentation des différentes amplitudes caractéristiques dans le cas d'un signal sinusoïdal (en a), complexe (en b), impulsionnel périodique (en c)

III.3 Niveaux de vibrations

Un critère de sévérité de vibration typique se présente le plus souvent sous la forme d'un tableau, la condition d'une machine est classifiée, par exemple, en un état jugé bon, acceptable ou inadmissible en fonction de la valeur globale de vibration mesurée [2].

III.4.1 Vibrations harmoniques:

Une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme amplitude-temps est représenté par une sinusoïde (figure 9). Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle qui est générée par le balourd d'un rotor en mouvement.

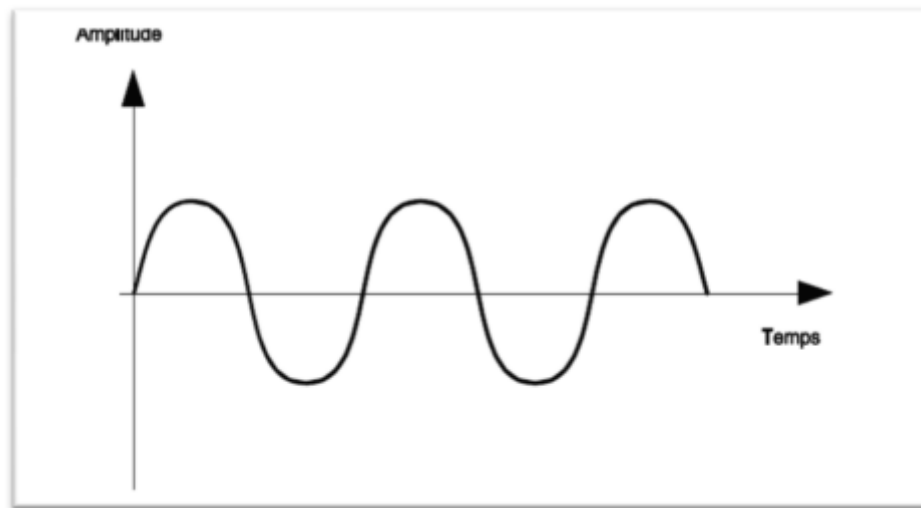


Figure 9: Représentation d'un signal harmonique

$$X(t) = A \sin(\omega t + \theta)$$

(1)

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

f = fréquence du mouvement

θ = phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps

III.4.2 Vibrations périodiques :

Une vibration périodique est telle qu'elle se reproduit exactement après un certain temps appelé période (figure 10). Une telle vibration est créée par une excitation elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines.

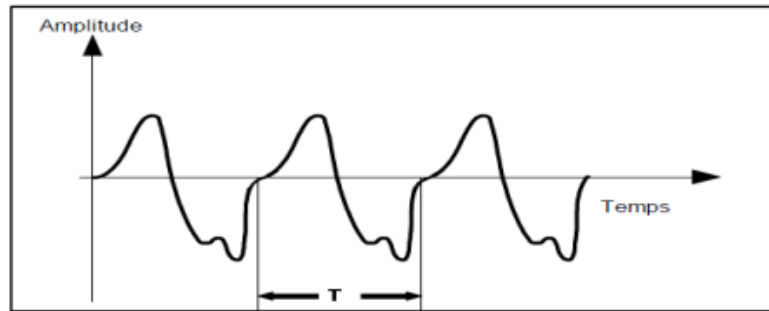


Figure 10 : Signaux vibratoire périodique

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

(2)

III.4.3 Vibrations apériodiques :

Une vibration apériodique est telle que son comportement temporel est quelconque, c'est-à-dire que l'on n'observe jamais de reproductibilité dans le temps (figure 11). C'est le cas des chocs que l'on enregistre sur un broyeur.

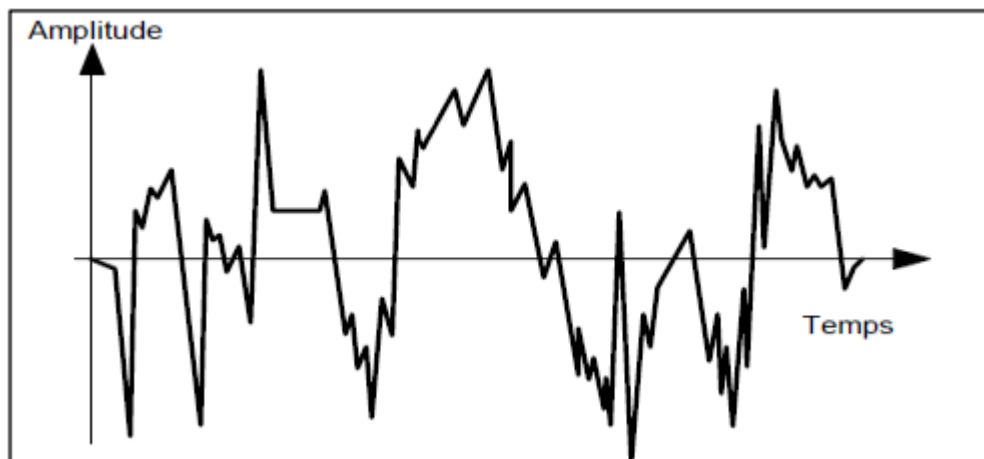


Figure 11 : Signaux vibratoire apériodique

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

(3)

III.5 Définitions et principes généraux des capteurs de vibration

Un capteur de vibration est un transducteur capable de convertir en signal électrique le niveau de vibrations qu'il subit à un instant donné

Un capteur ne donnant qu'une valeur quantitative d'une mesure ne peut être employé pour donner un signal d'alarme, et n'est donc pas utilisable pour la maintenance conditionnelle. Les capteurs de vibration utilisés actuellement en industrie pour la maintenance conditionnelle sont les capteurs de déplacement, les capteurs inductifs de vitesse, et les accéléromètres. A côté de ces capteurs classiques, il existe aussi des capteurs capacitifs, des capteurs laser, etc..., mais ceux-ci trouvent leurs applications plutôt dans d'autres domaines [2].

III.5.1 Les types de capteurs

On remarque trois principes plus particulièrement utilisés [2] :

- Déplacement : principes des courants de Foucault.
- Vitesse : principes électrodynamique.
- Accélération : principes piézo-électrique.

a. Les proximètres

Aujourd'hui, le proximètre le plus utilisé pour la surveillance de machines est le capteur inductif à courants de Foucault. Ce capteur, représenté en (figure 12), est relié à un émetteur-démodulateur-conditionneur. Il est constitué d'une bobine parcourue par un courant électrique « hautes fréquences ». Le champ magnétique ainsi créé induit, à la surface de l'arbre, des courants appelés courants de Foucault qui modifient l'impédance de la bobine (figure 13)

Ces variations d'impédance sont transformées en [8] :

- une tension continue proportionnelle à la distance moyenne entre l'arbre et le capteur (composante statique),
- une tension alternative proportionnelle aux écarts de distance par rapport à la distance moyenne (composante dynamique), qui renseigne donc sur les déplacements relatifs de l'arbre par rapport à la sonde du capteur.

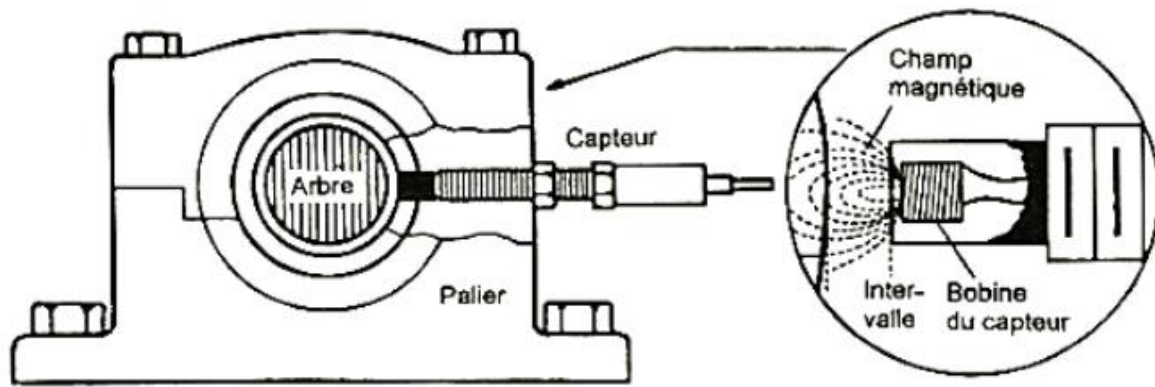


Figure 12 : Principe du capteur inductif à courants de Foucault

Les capteurs de déplacement ou proximètres (ou encore appelés capteurs de proximité) mesurent la distance comprise entre la surface surveillée (généralement celle d'un arbre tournant) et l'élément détecteur du capteur (appelée sonde). Ce sont des capteurs dits relatifs, par opposition aux capteurs de vitesse ou d'accélération qui sont dits absolus. Un capteur de déplacement à courants de Foucault mesure le mouvement relatif de l'arbre par rapport au support sur lequel il est fixé (généralement le corps du palier) alors qu'un vélocimètre ou un accéléromètre mesurent le mouvement vibratoire de ce support consécutif à la vibration du rotor.

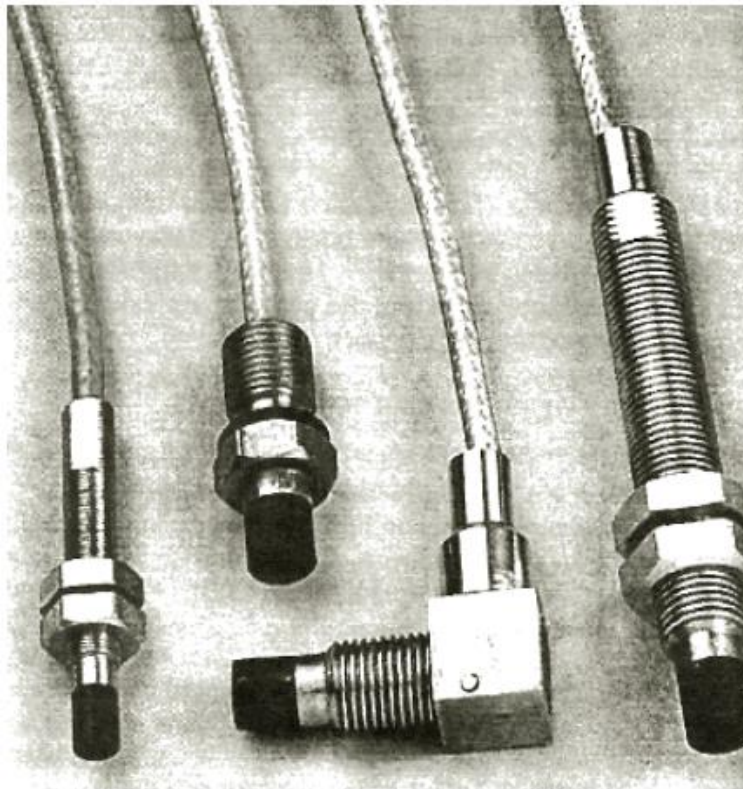


Figure 13 : Exemples de proximètres

Ces capteurs sont le plus souvent fixés à demeure dans les paliers et leur mise en place nécessite beaucoup de soin. En effet, ils sont sensibles non seulement au déplacement réel de l'arbre, mais également à des phénomènes parasites.

b. Les vélocimètres

Les capteurs de vitesse ou vélocimètres sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. Les vélocimètres les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté (figure 14). Le mouvement de la bobine, induit par la vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse du mouvement de la bobine [8].

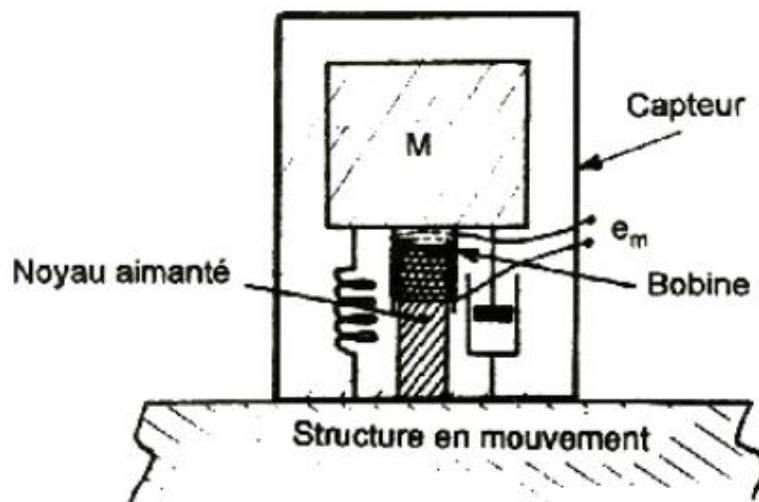


Figure 14 : Schéma de principe d'un vélocimètre

c. Les accéléromètres

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibrations absolues les plus utilisés pour la surveillance des machines tournantes. Leur principe de fonctionnement repose sur la propriété des matériaux piézoélectriques de générer une charge électrique proportionnelle à la contrainte de compression ou de cisaillement subie. Schématiquement (figure 15), un accéléromètre est composé d'un disque en matériau piézoélectrique qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte. Quand la masse se déplace sous l'effet d'une

accélération, elle exerce sur le disque piézoélectrique des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération [8].

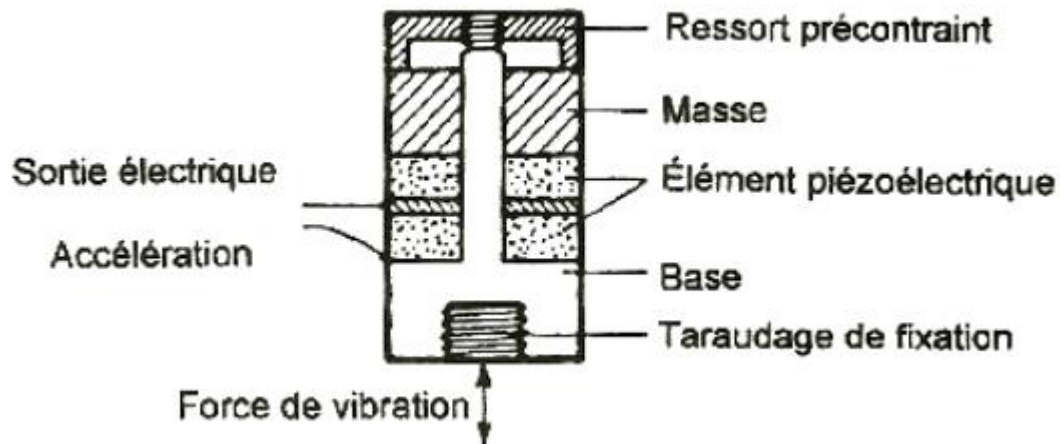


Figure 15 : Principe de fonctionnement d'un accéléromètre

- Grandeurs d'influence

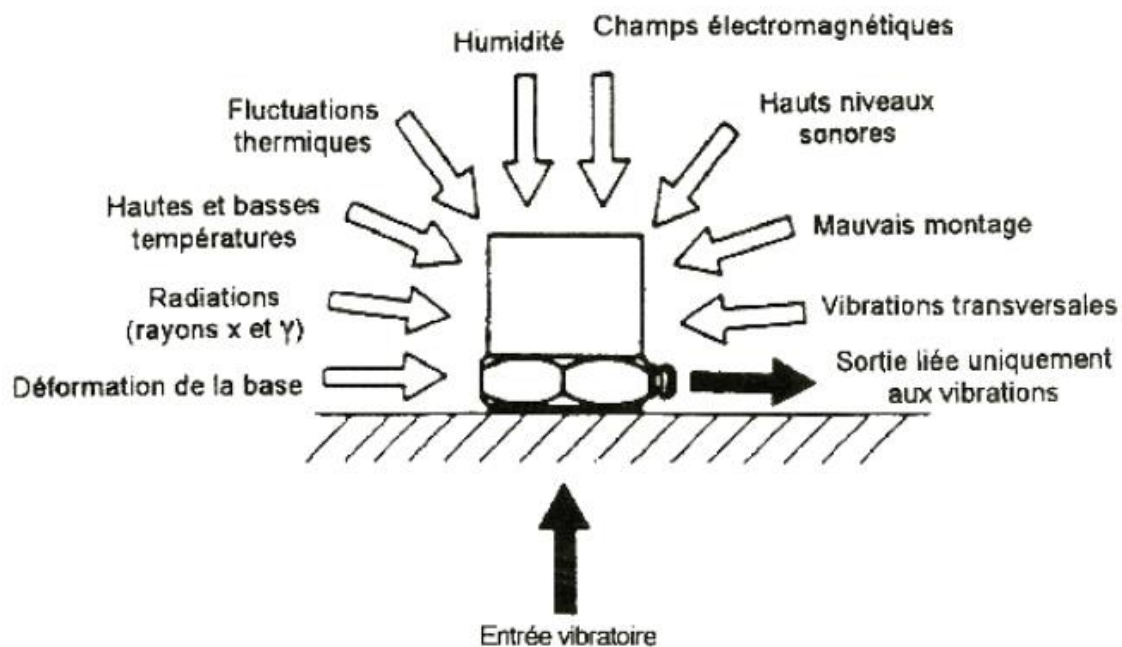


Figure 16 : Grandeurs d'influence sur un accéléromètre

Un accéléromètre piézoélectrique, comme tout capteur, est sensible à un certain nombre de grandeurs susceptibles d'altérer les résultats de mesure (figure 16) : température et variations rapides de température, humidité, champ sonore, champ électromagnétique..., même si les capteurs haut de gamme à cisaillement Delta sont moins sensibles à l'ensemble de ces grandeurs d'influence. Il conviendra donc de se prémunir des effets de champs électromagnétiques et de la présence éventuelle de circulation de courants d'arbre (élimination des boucles de masse, cage de Faraday pour isolation électrique du capteur).

III.6 Défauts sur les machines tournantes

Les machines tournantes sont essentiellement des ensembles de mécanismes mobiles et d'organes combinés dans le but précis d'exécuter des tâches telles que la transformation de l'énergie ou la transmission du mouvement. Lorsqu'une panne survient dans une machine tournante, elle résulte généralement d'une défaillance ou d'une série de défaillances affectant un ou plusieurs de ses composants. Parmi les défauts les plus fréquents dans ces machines, on trouve le déséquilibre, le désalignement, le balourd, désalignement, fissuration et jeu, courroies, engrenages, roulements, cavitation, et les défauts électriques. Dans ce qui suit, nous examinerons les fréquences caractéristiques de ces défauts [10].

III.6.1 . Balourd

Le balourd est un défaut qui se rencontre en présence du déséquilibre de l'arbre d'une machine tournante, causé par une mauvaise répartition spatiale des masses dans la structure, entraînant un déplacement du centre de gravité en dehors de l'axe géométrique du rotor de la machine tournante. Il existe plusieurs types de balourd : balourd statique, balourd de couple, balourd dynamique et balourd thermique [10].

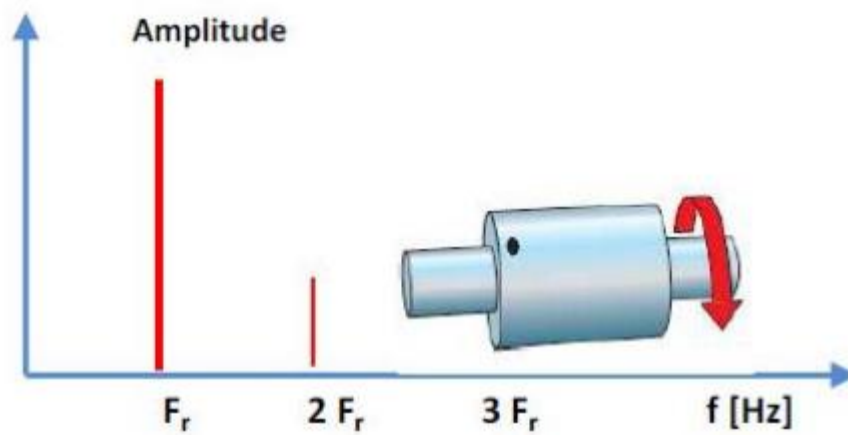


Figure 17: Spectre théorique d'un défaut de balourd

Il existe deux types de balourd statique et dynamique :

a. Balourd statique

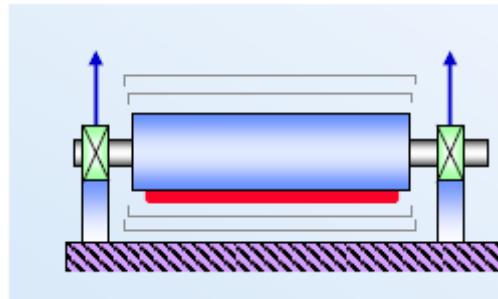


Figure 18: Balourd statique

Même phase sur chaque roulement

Principalement des vibrations radiales Balourd (équilibrage)

b. Balourd dynamique

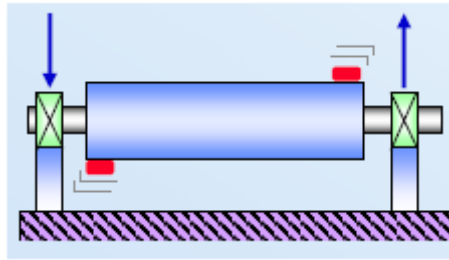


Figure 19: Balourd dynamique

Déphasage de 180° autour du roulement

III.6.2 Désalignement :

Dans ce cas l'arbre moteur et l'arbre récepteur ne sont pas parfaitement alignés. L'objectif de l'alignement de deux machines est de faire en sorte que les axes des deux lignes d'arbres soient parallèle est confondue. Le choix d'un type d'accouplement dépend d'abord des défauts d'alignement pouvant exister entre les deux arbres : désalignements radial, axial, angulaire et écart en torsion [10].

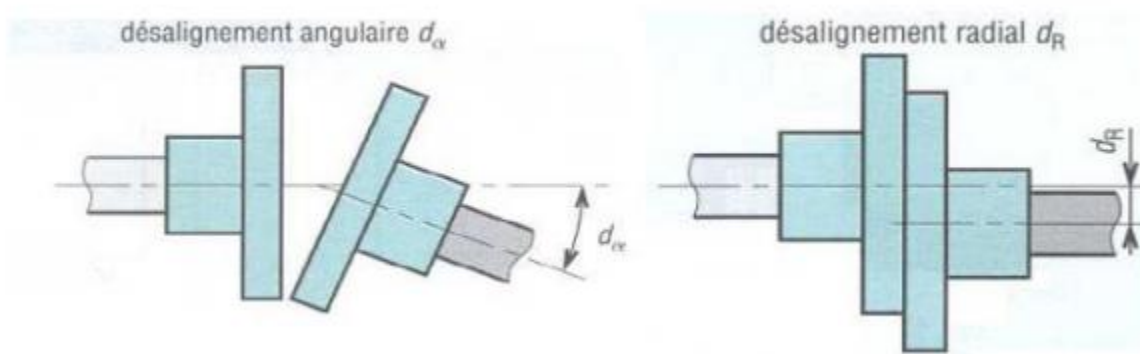


Figure 20: Désalignements d'arbre

Il se manifeste par une augmentation des proches harmoniques de la fréquence de rotation. Le plus souvent l'harmonique de rang 2 tend à s'élever au-delà de la fréquence fondamentale. Parfois le phénomène se transmet aux 3ème et 4ème harmoniques.

a. Désalignement radial :

Un défaut d'alignement est révélé par un pic d'amplitude prépondérante généralement 2 fois la fréquence de rotation (parfois 3 ou 4 fois). Il apparaît une vibration dans la direction radiale de composante d'ordre 2 de la fréquence de rotation (rarement d'ordre 3, voire exceptionnellement d'ordre 4), avec des amplitudes supérieures aux composantes d'ordre 1 [9].

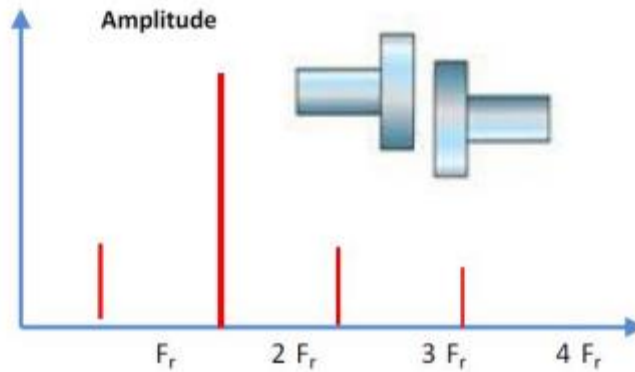


Figure 21: Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial

b. Désalignement angulaire :

Il apparaît une vibration axiale de composante d'ordres 1, 2, 3 ou 4 de la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles des composantes radiales correspondantes [9].

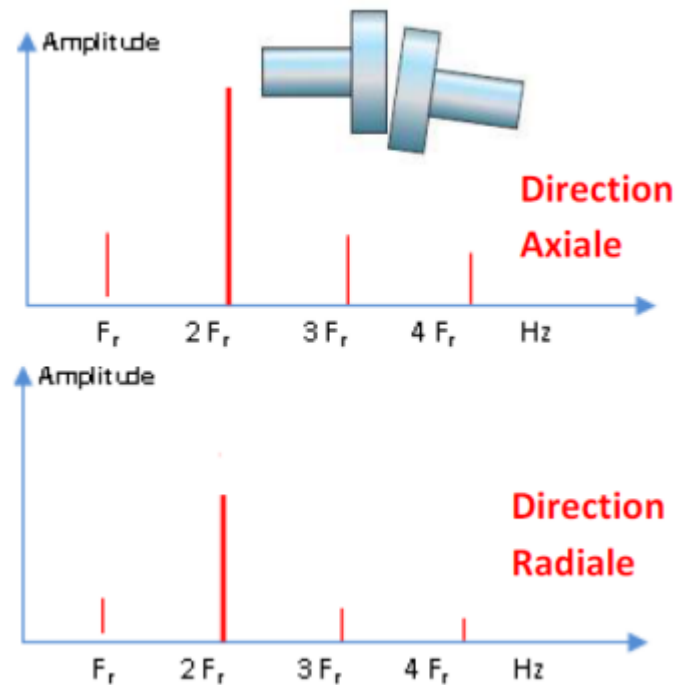


Figure 22: Image vibratoire d'un défaut d'alignement axial

III.6.3 Les défauts des engrenages :

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues dentées engrenant l'une avec l'autre, permettant de transmettre de la puissance entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse constant. Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes d'engrenages (figure 23) [9].

Les engrenages parallèles (les 2 arbres sont parallèles).

Les engrenages concourants (les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se coupent).

Les engrenages gauches (les 2 arbres occupent une position relative quelconque)

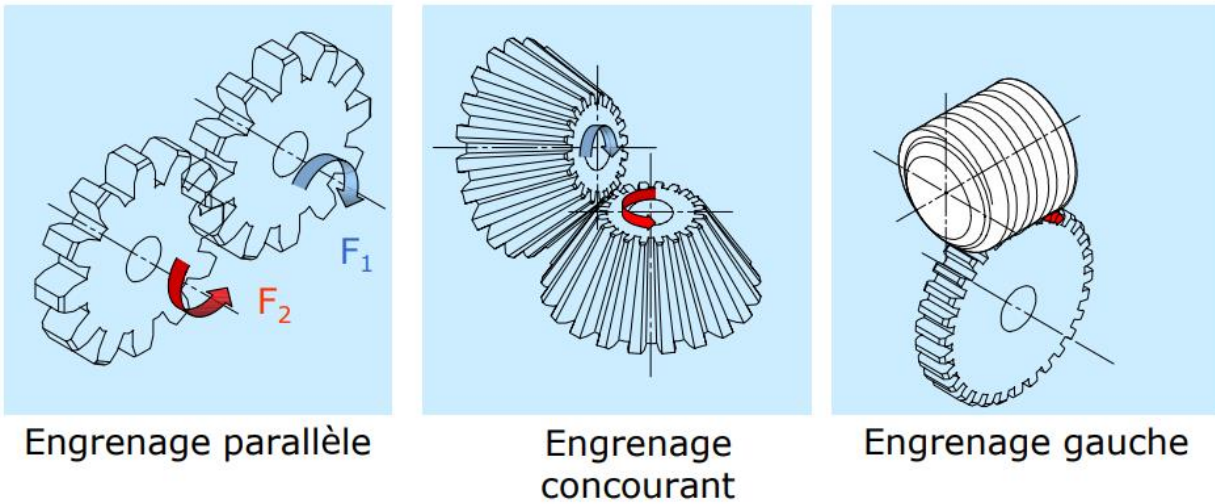


Figure 23: Les différentes classes d'engrenages

a. Fréquence d'engrènement :

Observons un engrenage, composé de deux roues dentées 1 et 2, présentant Z_1 et Z_2 dents et tournant aux fréquences F_1 et F_2 . Chaque fois qu'une dent de la roue menante 1 s'engage dans la roue menée 2, il se produit une prise de charge périodique au rythme d'engagement des dents selon une fréquence d'engrènement F_e égale à la fréquence de rotation de la roue multipliée par son nombre de dents[9].

$$F_e = F_1 \cdot Z_1 = F_2 \cdot Z_2$$

F_e : fréquence d'engrènement

F_1 et F_2 : fréquences de rotations des roues 1 et 2

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

Si la denture est correcte, le spectre (figure 24) est constitué de composantes dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement ou à ses harmoniques.

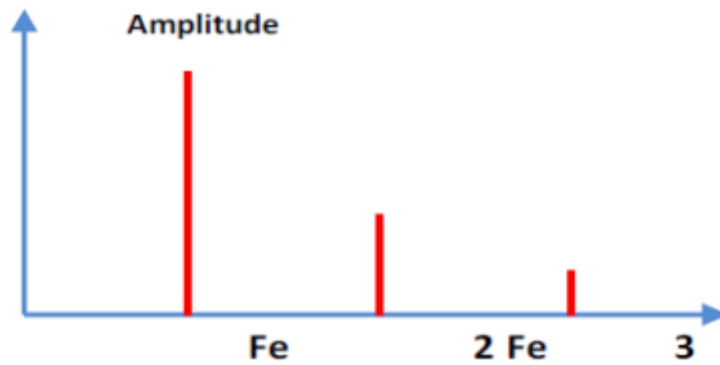


Figure 24: Image vibratoire d'un engrenage sain

b. Signatures vibratoires des défauts d'engrènement :

- **Détérioration d'une dent :**

Si l'une des roues présente une dent détériorée, il se produit un choc dur, à chaque tour du pignon. Le spectre correspondant (figure 25) montre un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de rotation du pignon détérioré s'étalant jusqu'aux hautes fréquences [9].

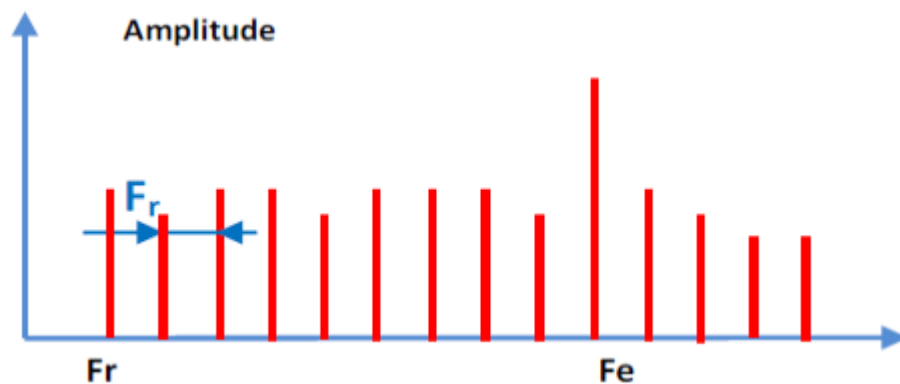


Figure 25: Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée

- **Détérioration de deux dents sur les deux roues**

Si les deux roues dentées présentent chacune une dent détériorée, les chocs peuvent être importants lorsque les deux défauts se rencontrent «coïncidence ». La rencontre s'effectue à la fréquence F_{co} , appelée fréquence de coïncidence et telle que [9] :

$$F_{co} = \frac{F_e}{PPCM(Z_1, Z_2)}$$

(4)

F_e : fréquence d'engrènement.

PPCM : plus petit commun multiple de Z_1 et Z_2 .

La fréquence de coïncidence F_{co} est inférieure aux fréquences de rotation F_1 et F_2

- **Détérioration de l'ensemble de dentures :**

Lorsque l'ensemble de la denture est use ou détériore, les chocs se produisent au passage de chacune des dents. Le spectre est constitué d'un peigne de raies dont la fréquence correspond à la fréquence d'engrènement, mais cette fois avec une amplitude beaucoup plus élevée (figure 26) [9].

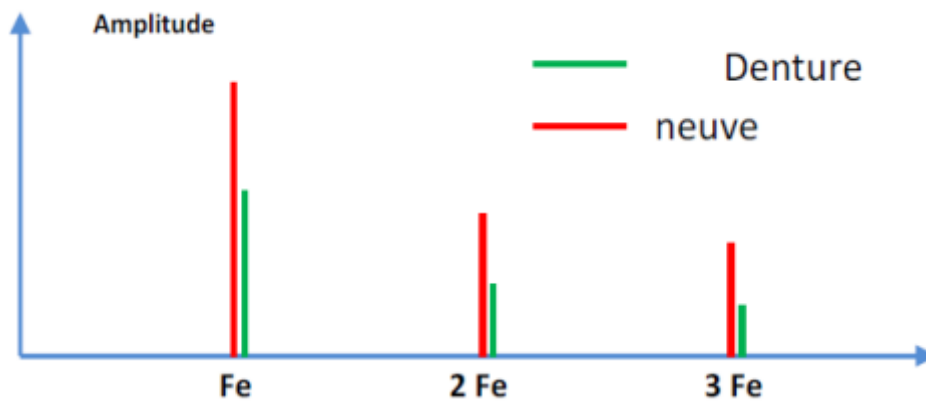


Figure 26: Image vibratoire théorique d'une denture

- **Entraxe insuffisant (jeu insuffisant au fond de denture) :**

En analyse spectrale ce phénomène se traduit par l'apparition d'une raie d'amplitude prépondérante à deux fois la fréquence d'engrènement F_e et la disparition partielle, voire totale de l'amplitude à cette fréquence (figure 27) [9].

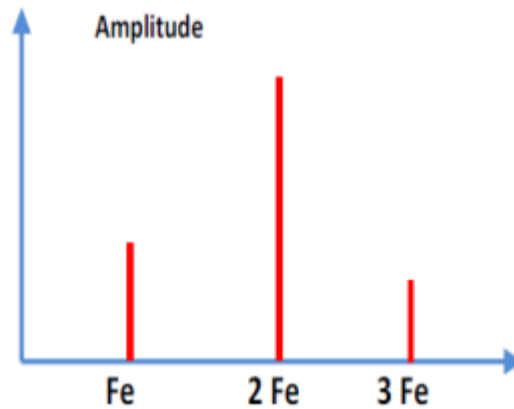


Figure 27: Image théorique d'un engrenement en fond de denture

- **Jeu de fond de denture trop grand :**

On obtient alors un spectre de choc dur périodique, à la fréquence d'engrènement (présence de nombreuses harmoniques de niveau du même ordre de grandeur) (figure 28) [9].

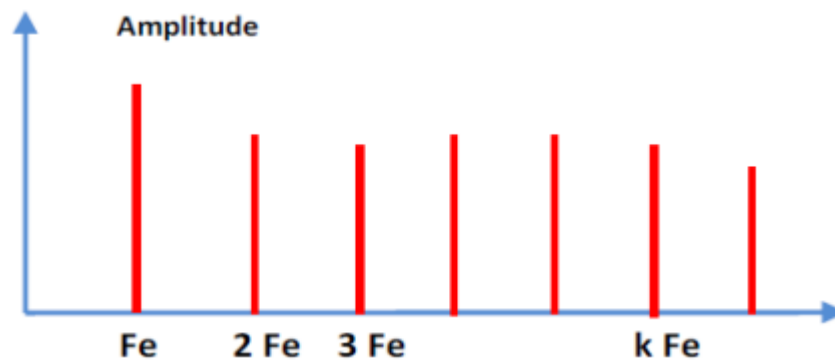


Figure 28: Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée

III.6.4 Les défauts de roulement :

Les roulements sont parmi les composantes les plus sollicitées des machines et représentent une source de panne fréquente. Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage), ...etc.

Pour chaque type de roulement et en fonction de ses cotes de fabrication [figure 29], on peut considérer les fréquences caractéristiques données formules ci-dessous [9].

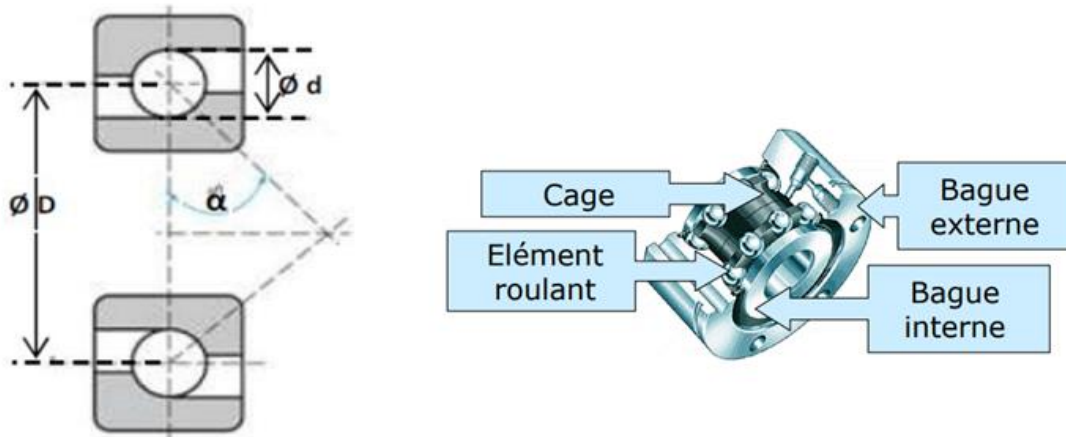


Figure 29: Caractéristique géométrique d'un roulement.

n : le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles),

D : le diamètre primitif,

d : le diamètre des éléments roulants,

α : angle de contact,

F_r : la fréquence de rotation de la bague interne (la bague externe étant supposée fixe)

Ainsi, on a :

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

$$F_{b \text{ ext}} = \frac{1}{2} f_a \cdot Z \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right) \cos \varphi \right)$$

(5)

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

$$F_{b \text{ int}} = \frac{1}{2} f_a \cdot Z \left(1 + \left(\frac{d}{D} \right) \cos \varphi \right) \quad (6)$$

- La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de roulant) sur la bague externe ou sur la bague interne " F bille " est donnée par l'équation suivante :

$$F_{bille} = \frac{1}{2} f_a \cdot \frac{D}{d} \left(1 - \left(\left(\frac{d}{D} \right) \cos \varphi \right)^2 \right) \quad (7)$$

a. Signatures vibratoires des principaux défauts des roulements :

- **Défaut de type écaillage affectant la bague externe :**

Un défaut de type écaillage affectant la bague externe d'un roulement a pour image vibratoire un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence du défaut. A chaque composante de ce peigne, est associée une paire de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique importante (figure 30) [9].

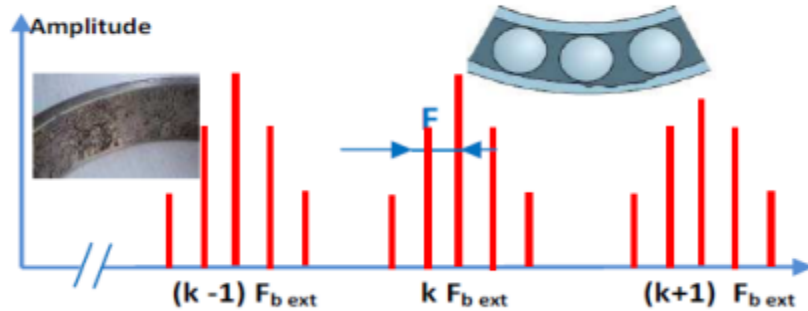


Figure 30: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage

- **Défaut de type écaillage affectant la bague interne :**

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes Latérales espacées de la fréquence de rotation (figure 31) [9].

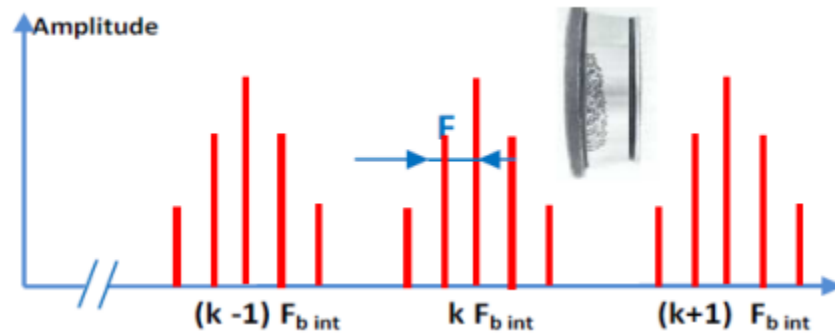


Figure 31: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure

- **Défaut de type écaillage sur un élément roulant :**

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant (bille, rouleau ou aiguille) a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de la cage (figure 32) [9].

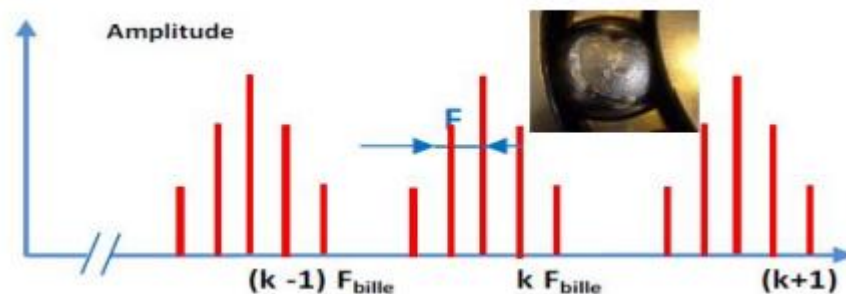


Figure 32: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant

- **Défauts de type déversement de bague :**

Le défaut de type déversement de bague extérieure (figure 33) s'exprime par une composante fondamentale d'amplitude élevée dont la fréquence correspond à la fréquence du défaut de la bague déversée, et par des composantes d'ordre supérieur d'amplitude très faible (figure 34) [9].

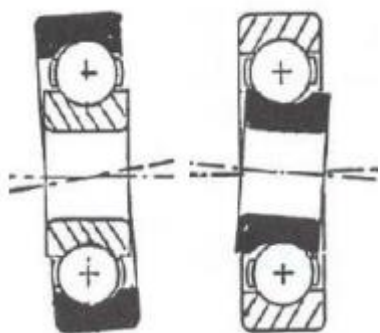


Figure 34: Défaut de déversement

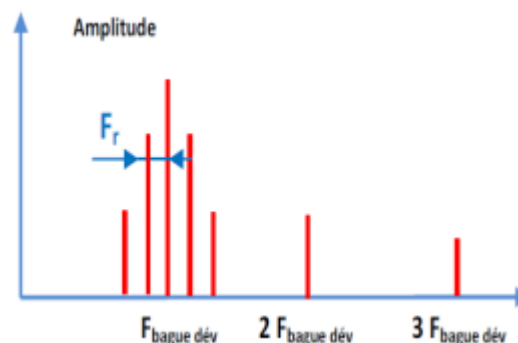


Figure 33: Image vibratoire théorique d'un défaut de type déversement de bague

Ce tableau présente les différentes anomalies pouvant survenir dans les machines tournantes, en indiquant pour chacune la fréquence vibratoire associée, la direction des vibrations, et des remarques spécifiques pour aider à l'identification et au diagnostic précis des défauts.

Table 3: reconnaissance des principales anomalies [9]

Type d'anomalie	Vibration		Remarques
	Fréquence	Direction	
Tourbillon d'huile	De 0,42 à 0,48 x frot	Radiale	Uniquement sur paliers lisses hydrodynamique à grande vitesse
Balourd	1x frot	Radiale	Amplitude proportionnelle à la vitesse de rotation. Déphasage de 90° sur 2 mesures orthogonales
Défaut de fixation	1, 2, 3, 4 x frot	Radiale	Aucun déphasage sur 2 mesures orthogonales

Défaut d'alignement	2 x frot	Axiale et radiale	Vibration axiale est en général plus important si le défaut d'alignement comporte un écart angulaire
Excitation électrique	1, 2, 3, 4x 50Hz	Axiale et radiale	Vibration disparaît dès coupure de l'alimentation
Vitesse critique de rotation	Fréquence critique de rotor	Radiale	Vibration apparaît en régime transitoire et s'atténue en suite
Courroie en mauvais état	1, 2, 3, 4 x fp	Radiale	
Engrenage endommagé	Fréquence d'engrènement $f_e = z \times \text{frot}$	Axiale et radiale	Bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement.
Faux-rond d'un pignon	$f_e \pm \text{frot pignon}$	Axiale et radiale	Bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement dues au faux-rond
Excitation hydrodynamique	Fréquence de passage des aubes	Axiale et radiale	
Détérioration de roulement	Hautes fréquences	Axiale et radiale	Ondes de choc dues aux écaillages. Aide possible par « détection d'enveloppe ».

frot = fréquence de rotation

f_e = fréquence d'engrènement ; cette fréquence est aussi notée f_{eng}

f_p = fréquence de passage de la croie

z = nombre de dents de l'engrenage.

Conclusion

La surveillance de la santé des machines tournantes s'effectue par la méthode d'analyse vibratoire. Parmi les éléments étudiés dans cette section, on compte l'analyse vibratoire des machines tournantes et ses outils de surveillance et de diagnostic. Les défauts dus à une augmentation des vibrations ne sont pas suffisants à eux seuls, leur nature et leur temps de progression d'apparition à un état critique sont également identifiés.

Chapitre IV : Partie expérimentale

IV. Partie expérimentale

Introduction

Ce chapitre est dédié à l'étude et à l'analyse vibratoire de la pompe booster 40RL12D001. L'objectif principal de cette partie expérimentale est de mesurer et d'analyser les vibrations de la pompe afin de détecter les éventuels défauts qui pourraient compromettre son bon fonctionnement. En utilisant des outils de diagnostic avancés, nous avons pu collecter des données précises sur les vibrations de la pompe. Cette analyse nous a permis d'identifier les sources de problèmes et de proposer des solutions pour améliorer la performance et la fiabilité de la pompe.

IV.1 Définition de la Pompe Booster 40RL12D001

La pompe booster 40RL12D001 est une pompe centrifuge conçue pour augmenter la pression des fluides dans un système de circulation. Elle est utilisée dans diverses applications industrielles, notamment dans les centrales thermiques, pour assurer un flux continu et efficace de fluides tels que l'eau ou les fluides thermiques. Sa fonction principale est d'augmenter la pression d'un fluide entrant afin de maintenir un débit adéquat et d'assurer une performance optimale du système dans lequel elle est intégrée.

IV.2 Caractéristiques Techniques

- **Modèle** : 40RL12D001
- **Type** : Pompe centrifuge
- **Capacité de Débit** : Capable de manipuler de grands volumes de fluide à des taux élevés
- **Pression de Sortie** : Conçue pour générer une pression de sortie significative pour satisfaire les exigences du système
- **Matériaux de Construction** : Fabriquée à partir de matériaux résistants à la corrosion et à l'usure, adaptés aux conditions exigeantes de la centrale thermique
- **Moteur** : Équipée d'un moteur électrique puissant, conçu pour un fonctionnement continu et efficace

IV.3 Fonctionnement

La pompe booster 40RL12D001 fonctionne en augmentant la pression du fluide entrant à travers un rotor qui accélère le fluide, augmentant ainsi son énergie cinétique. Ce processus se traduit par une augmentation de la pression à la sortie de la pompe, permettant ainsi au fluide de circuler efficacement dans le système.

IV.4 But de travail

Le but de ce travail est de détecter les défauts potentiels de la pompe booster 40RL12D001 en utilisant l'analyse vibratoire, un outil de maintenance conditionnelle. Les résultats obtenus permettront aux opérateurs de corriger rapidement les anomalies éventuelles.

IV.5 . Matériels utilisés :

IV.5.1 Vibrotest60

Le VIBROTEST 60 est un instrument portable de mesure de vibrations utilisé principalement dans le domaine de la maintenance conditionnelle des machines industrielles. Fabriqué par Schenck, cet appareil est conçu pour diagnostiquer et surveiller l'état des équipements rotatifs, aidant ainsi à détecter les problèmes avant qu'ils ne conduisent à des pannes coûteuses.



Figure 35: Vibrotest60

IV.5.2 . Capteur de vibration utilisé : accéléromètre

Nous utilisons des capteurs piézoélectriques de type accéléromètre car ils offrent de nombreux avantages. Ils permettent de mesurer simultanément l'accélération, la vitesse.

IV.5.3 Logiciel d'analyse

Le logiciel Schenck XMS (eXtended Monitoring System) est un outil sophistiqué conçu pour la surveillance et l'analyse des vibrations des machines industrielles. Développé par Schenck, ce logiciel est essentiel pour les professionnels de la maintenance conditionnelle, car il permet de détecter et d'analyser les anomalies mécaniques avant qu'elles ne provoquent des pannes coûteuses.



Figure 36: La fenêtre principale du logiciel.

IV.6 État vibratoire de la pompe alimentaire

IV.6.1 Les points de mesure de la pompe alimentaire

Chaque palier est surveillé selon trois directions orthogonales :

Directions orthogonales Axiale

Directions orthogonales horizontale

Directions orthogonales verticale

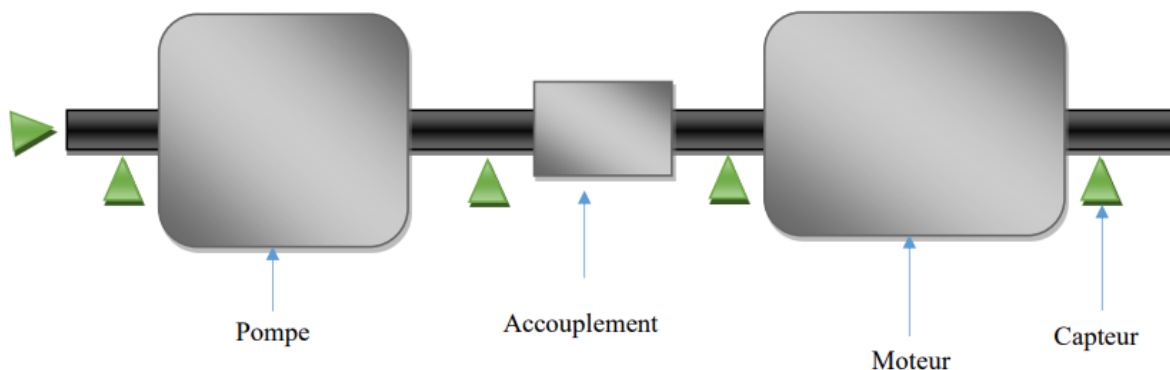


Figure 37: Points de mesures de pompe alimentaire.

IV.6.2 Analyse globale

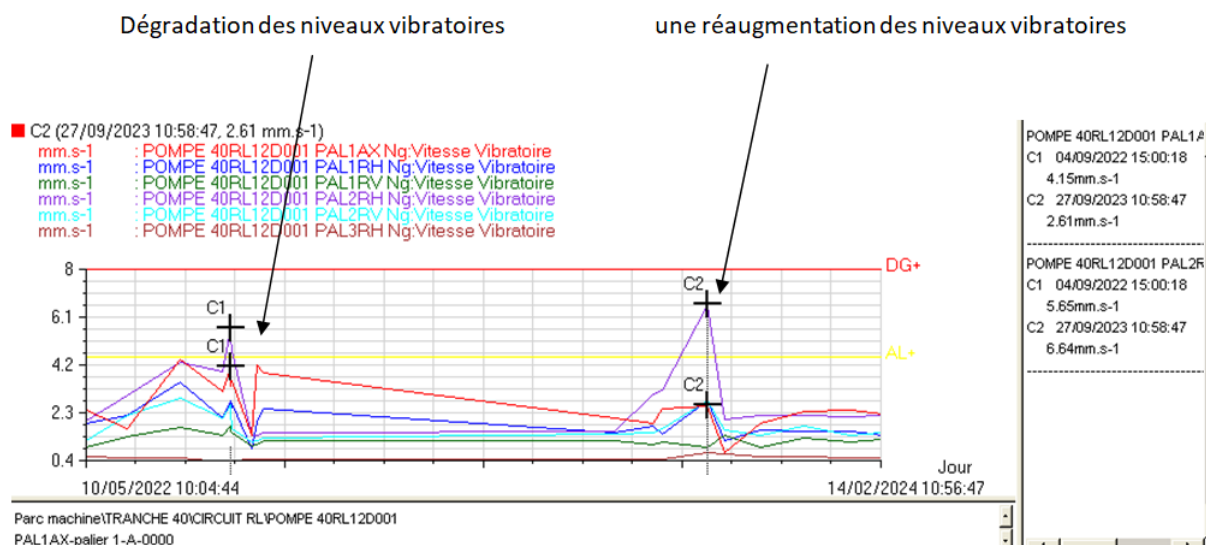


Figure 38: Niveau Global Vitesse

Le graphique de vitesse vibratoire montre deux pics significatifs indiquant des événements perturbateurs ou des défauts majeurs dans la pompe..

IV.6.3 Description du Graphique

Le graphique présente l'évolution des vitesses vibratoires (en mm/s) de plusieurs points de mesure sur une pompe sur une période donnée allant du 10/05/2022 au 14/02/2024. Les courbes de différentes couleurs représentent les vitesses vibratoires de ces points.

Pic C1

- **Date** : 04/09/2022

L'augmentation des vitesses vibratoires à cette date indique un événement perturbateur, tel qu'un déséquilibre ou un défaut soudain dans la pompe.

2. Pic C2

- **Date** : 27/09/2023

Ce deuxième pic plus élevé en PAL2PH (6.54 mm/s) suggère une détérioration continue ou un nouvel incident majeur affectant la pompe.

IV.6.4 Analyse fréquentielle

- **Cas de désalignement : période septembre 2022**

Vitesse de rotation 1500tr/mn, F0 :25Hz

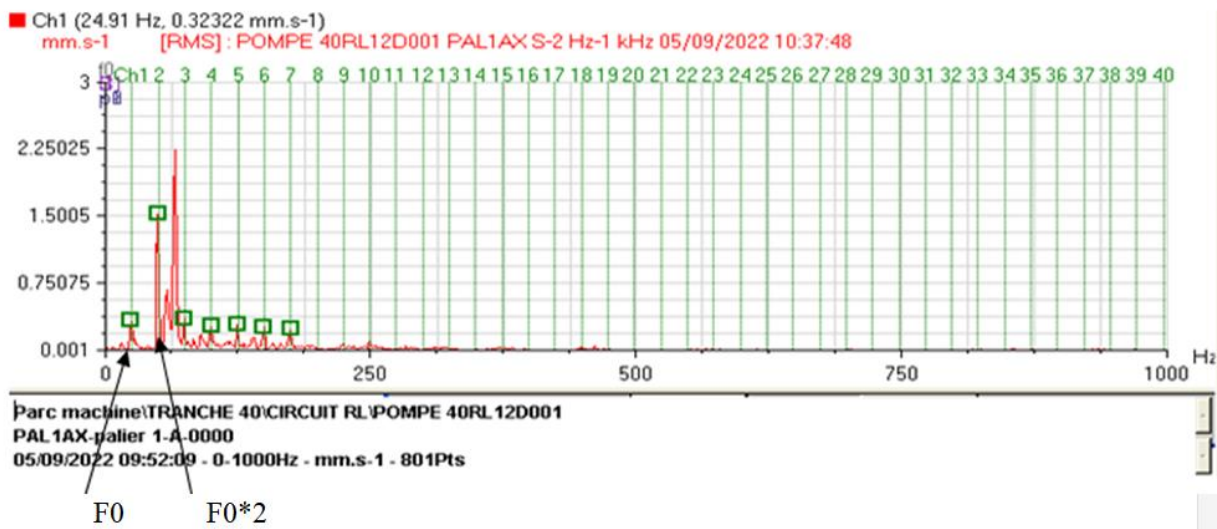


Figure 39: Spectre du point PAL1 AX

IV.6.5 Interprétation :

Le graphique montre les vibrations enregistrées pour une pompe (POMPE 40RL12D001) en septembre 2022, avec une analyse de spectre en fonction de la fréquence jusqu'à 1000 Hz. La présence d'un pic dominant à 24,91 Hz, accompagné de plusieurs harmoniques, indique un probable désalignement de l'arbre de la pompe. La deuxième harmonique ($F_0 \times 2$) est supérieure au pic à F_0 en direction axiale. Les harmoniques sont une signature classique des problèmes de désalignement, où l'alignement incorrect des composants rotatifs crée des forces périodiques supplémentaires.

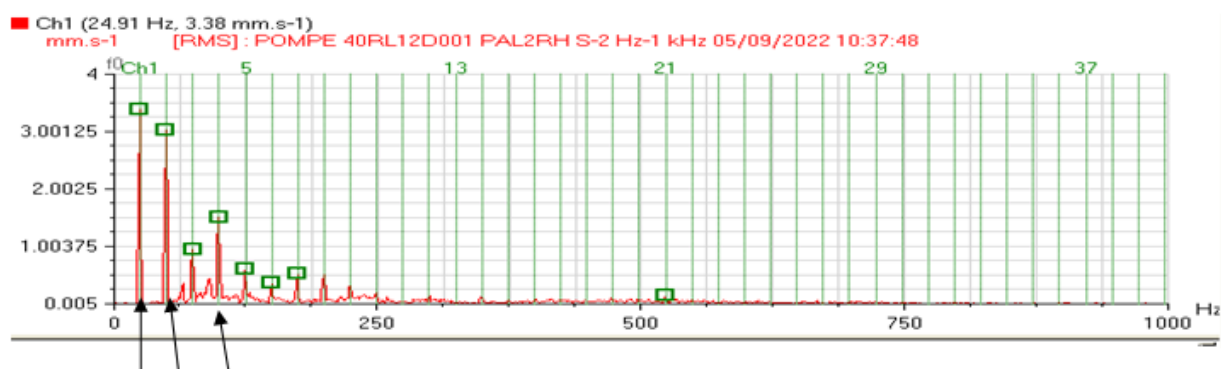


Figure 40: Spectre du point PAL 2 RH

L'allure du spectre dans la direction horizontale donne présence de plusieurs harmoniques décroissantes (présence d'un choc causé par le désalignement)

IV.6.6 Travaux effectués

Lorsqu'un désalignement est, il est crucial de résoudre ce problème pour éviter des dommages supplémentaires et assurer le bon fonctionnement de l'équipement. Tout d'abord, il faut arrêter la pompe et l'isoler électriquement pour garantir la sécurité des opérateurs. Ensuite, une inspection visuelle des composants doit être effectuée pour identifier les signes évidents de désalignement, et les surfaces de montage doivent être nettoyées. L'utilisation d'un appareil de mesure

d'alignement laser est essentielle pour vérifier l'alignement des arbres de la pompe et du moteur. Cet outil fournit des mesures précises des alignements axial et radial, permettant d'identifier les corrections nécessaires. Les ajustements doivent être effectués en desserrant les boulons de montage de la pompe et du moteur, puis en ajustant la position des composants pour obtenir l'alignement correct. Après chaque ajustement, il est crucial de resserrer les boulons et de révéifier l'alignement jusqu'à ce qu'il soit dans les tolérances recommandées par le fabricant. Une fois l'alignement correct obtenu, tous les boulons doivent être définitivement resserrés selon les spécifications du fabricant. La pompe doit ensuite être remise en marche et des tests de fonctionnement doivent être effectués pour vérifier que les vibrations ont diminué et que la pompe fonctionne correctement. Enfin, il est important d'intégrer des vérifications régulières de l'alignement dans le programme de maintenance préventive pour éviter que le problème ne se reproduise et documenter toutes les interventions pour un suivi historique et une référence future.

IV.6.7 Après l'intervention

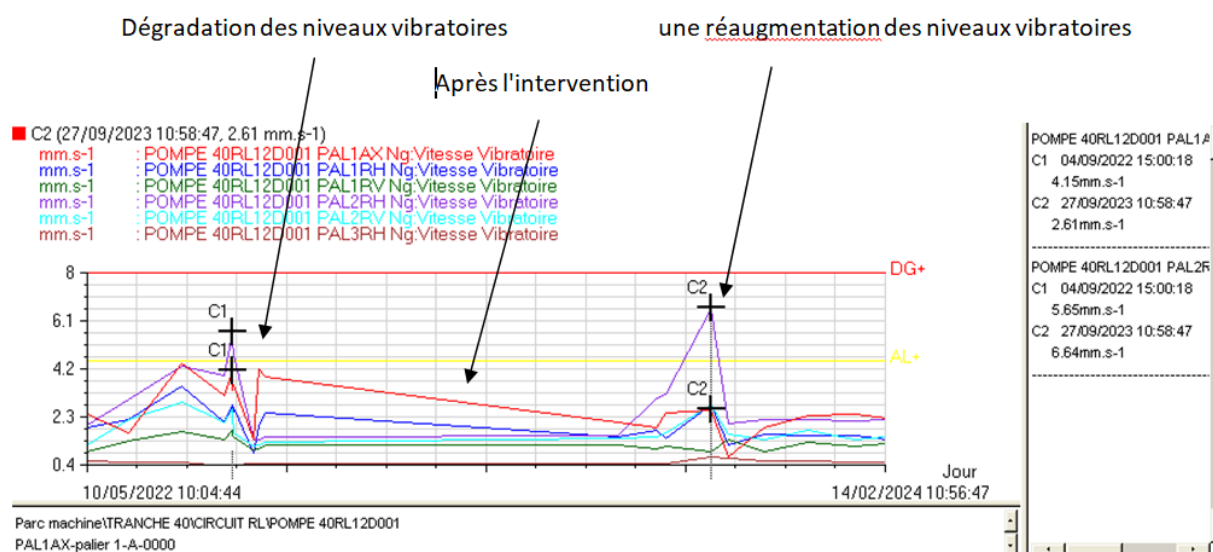


Figure 41: Niveau Global Vitesse

Après la réparation de la pompe, les niveaux vibratoires sont effectivement revenus à des niveaux plus bas, ce qui est un bon signe de rétablissement de la stabilité de la pompe.

- Cas de desserrage : période septembre 2023

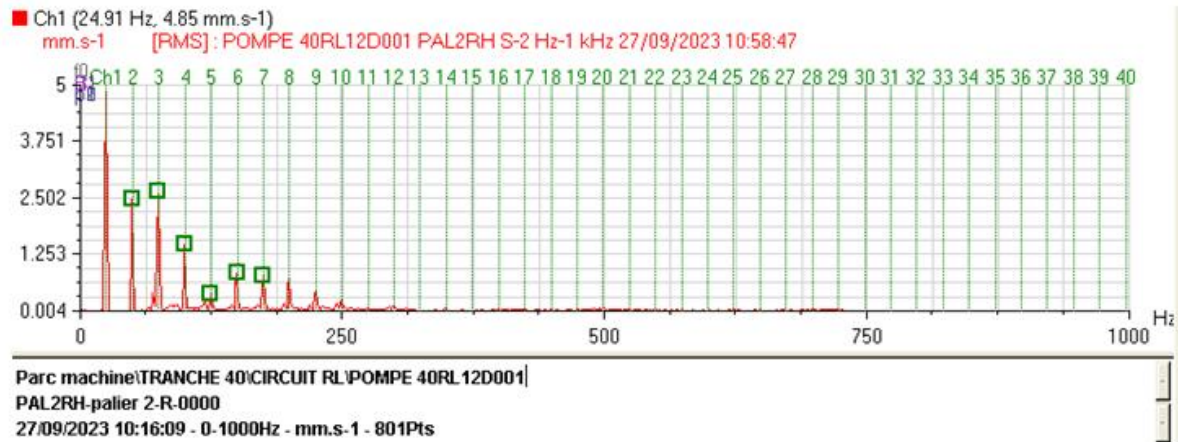


Figure 42: Spectre du point PAL 2 RH

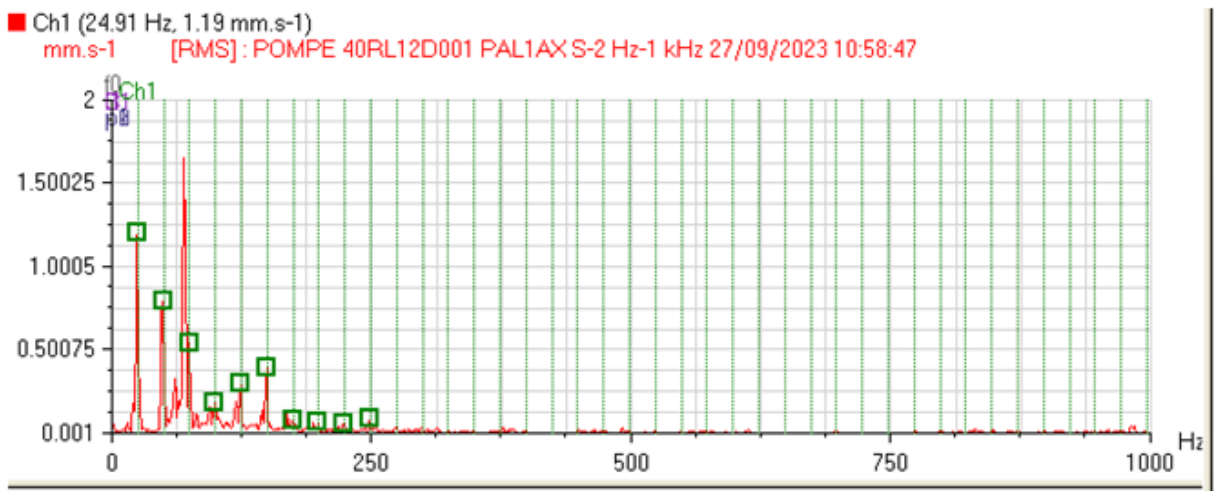


Figure 43: Spectre du point PAL 1 AX

IV.6.8 Interprétation :

Le desserrement des composants identifié par la présence de fréquences multiples. Le pic dominant à 24,91 Hz, accompagné de ces fréquences, indique un possible desserrement des éléments de la pompe, tels que des boulons ou des fixations non serrés correctement.

IV.6.9 Travaux effectués

Pour résoudre le problème, une approche méthodique et complète est nécessaire. Tout d'abord, il est essentiel de procéder à une inspection minutieuse de toutes les fixations de la pompe, y

compris les boulons, écrous et vis, en utilisant une clé dynamométrique pour vérifier leur serrage selon les spécifications du fabricant. Remplacer toute fixation usée ou endommagée est crucial pour garantir la sécurité et l'efficacité. Ensuite, l'utilisation de fixations avec dispositifs de freinage, tels que des rondelles élastiques ou des écrous auto freinés, peut significativement améliorer la résistance aux vibrations et prévenir les desserrages futurs. Après avoir effectué ces corrections, une nouvelle analyse vibratoire doit être réalisée pour s'assurer que les niveaux de vibration sont revenus à des valeurs normales, confirmant ainsi l'efficacité des mesures prises. Enfin, il est crucial de former le personnel de maintenance sur les techniques de serrage appropriées et l'identification des signes de desserrement, en sensibilisant également aux conséquences potentielles sur la performance de la pompe. En combinant ces mesures, on peut garantir une performance optimale de la pompe et réduire considérablement les risques de défaillance mécanique.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude expérimentale pour identifier et corriger les défauts de desserrage et de désalignement de la pompe booster 40RL12D001. Les mesures vibratoires ont permis de détecter ces anomalies, et des interventions précises, telles que le resserrage des fixations et l'ajustement de l'alignement à l'aide d'un appareil laser, ont été effectuées. Ces actions ont considérablement réduit les vibrations et amélioré le fonctionnement de la pompe. Cette étude a démontré l'importance de la surveillance et de la maintenance préventive pour assurer la performance et la longévité des équipements industriels.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail, nous avons souligné l'importance de la maintenance conditionnelle pour la détection des défauts dans les groupes alimentaires, en nous concentrant sur la surveillance de l'état vibratoire des équipements. Cette surveillance permet de prévenir les arrêts non programmés, qui peuvent entraîner des pertes de production significatives. En acquérant et en analysant les données vibratoires des machines tournantes, nous avons pu obtenir des descripteurs (tels que les mesures globales et les spectres) qui sont des outils puissants pour le diagnostic des machines.

Cette étude nous a permis de mieux comprendre le signal vibratoire, lequel contient des informations sur les efforts générés par le fonctionnement de la machine ainsi que sur l'état mécanique des structures. Cela permet de dresser un tableau des contraintes internes et de diagnostiquer divers défauts de fonctionnement.

Enfin, la mise en place de la maintenance conditionnelle repose essentiellement sur l'utilisation d'équipements adéquate et la formation du personnel aux méthodes de diagnostic et à l'interprétation des résultats de mesure. Ce type de maintenance permet d'augmenter considérablement la disponibilité des équipements de production, leur durée de vie et, surtout, la sécurité du personnel.

En conclusion, ce projet a démontré l'importance cruciale de la maintenance conditionnelle et de l'analyse vibratoire pour garantir la fiabilité et la durabilité des équipements industriels, assurant ainsi une performance optimale et une réduction des interruptions de production.

Il est recommandé, dans le domaine du diagnostic par la méthode vibratoire, d'intégrer intelligence artificielle couplée à des simulations sous environnement Simulink. L'association de ces deux techniques peut considérablement améliorer la gestion de la maintenance conditionnelle en général et le diagnostic par la méthode vibratoire en particulier.

Bibliographie

- [1] Y. Debbah, A. Cherfia, A. Saadi, « Application de la méthode des réseaux de neurones pour la prédiction des vibrations induites par des défauts combinés (désalignement et balourd) », The Second International Conference of Mechanics (ICM'15). Constantine, Algérie., pp. 320-327, 25-26 Novembre 2015.
- [2] Bentafat, Abdeldjalil, and Ali Kichni. Analyse vibratoire d'une pompe alimentaire (200HMBR10) au niveau de la centrale de Cap Djénét CC2. Mémoire de projet de fin d'études, Université de Boumerdes, 2021- 2022
- [3] AFNOR. Norme X 60-010: Concepts et définitions des activités de maintenance. *décembre 1994*
- [4] Tahar EL BAHRI Projet de recherche en énergie électrique (La maintenance électrique industrielle) université Hassan 1^{er} 22 Décembre 2015
- [5] IBM. Qu'est-ce que la maintenance conditionnelle? www.ibm.com
- [6] Kemoun, Yanis, and Sid Ali Kebaili. Diagnostic vibratoire et équilibrage des machines tournantes: Application pour le rotor d'une turbine à gaz. Mémoire de projet de fin d'études, Université de Boumerdès,r. 2021/2022
- [7] International Organization for Standardization. ISO 2041:1990(E/F) Vibrations et chocs – Vocabulaire. 1990.
- [8] Boulenger, Alain, and Christian Pachaud. "Surveillance des machines par analyse des vibrations." In Aide-mémoire de l'ingénieur,
- [9] Hachemi, Mohammed. Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration des machines tournantes. Mémoire de projet de fin d'études, Université de Tlemcen, July 2012.
- [10] Ounoughi, Safi Eddine. Diagnostic des défauts de machines tournantes par analyse vibratoire: Surveillance et diagnostic des défauts de roulements par analyse spectrale. Mémoire de projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, 2020