

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université M'Hamed Bouguera- Boumerdes  
Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département Maintenance Industrielle



# MEMOIRE DE MASTER

Filière: Génie Mécanique  
Option : Mécatronique

## THEME

**DIAGNOSTIC PAR ANALYSE VIBRATOIRE DES  
DEFAUTS COURANTS DE GROUPE ALIMENTAIRE  
DE LA CENTRALE THERMIQUE DE RAS-DJINET**

**Promoteur :**

Dr. CHELLIL Ahmed

**Présenté par :**

MESLEM Walid

ABTOUN Adel

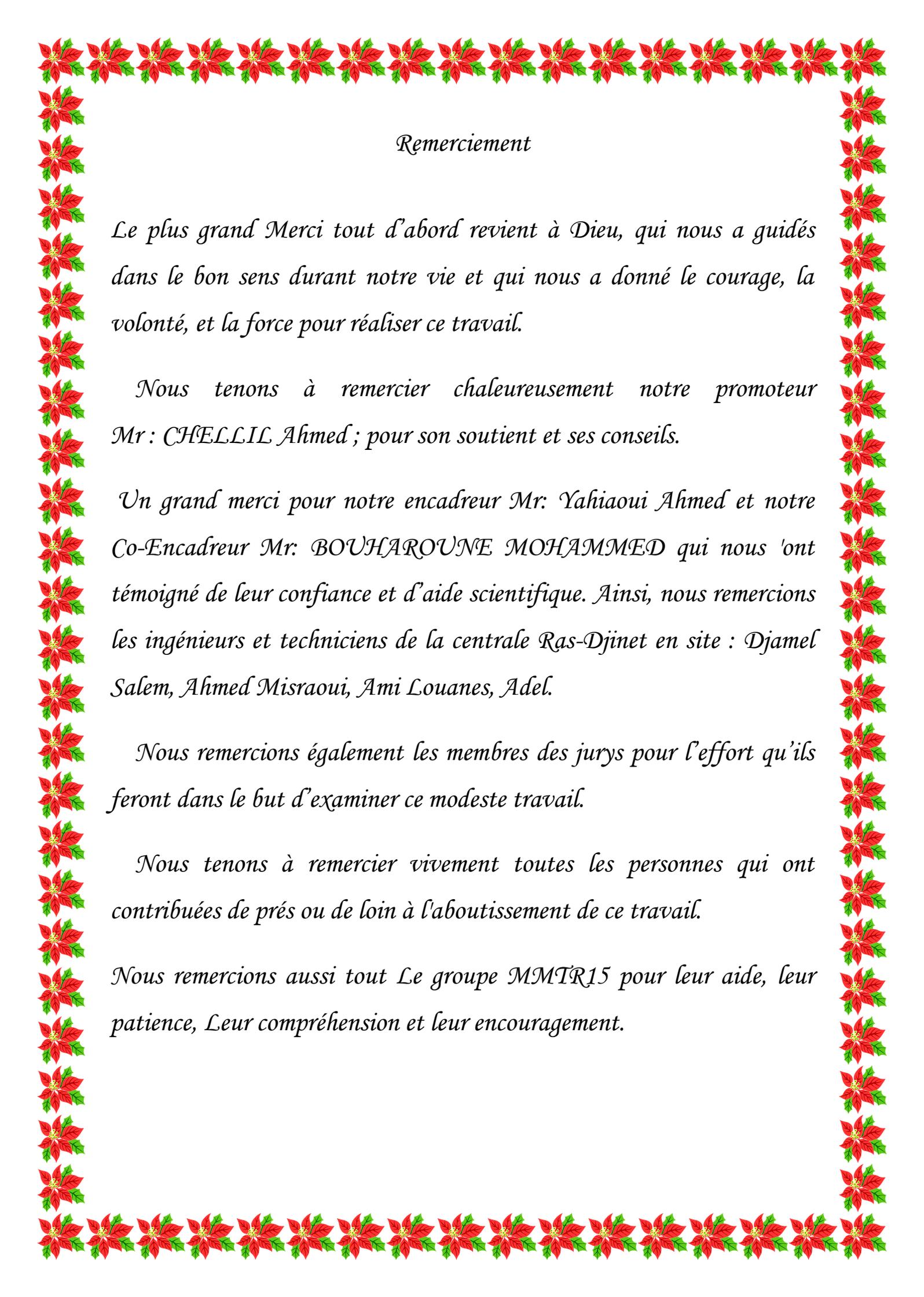
**Encadreur :**

Mr. YAHIAOUI Ahmed

**Co-Encadreur :**

M<sup>ed</sup>. BOUHAROUNE M<sup>ed</sup>

Promotion  
2016 / 2017



## Remerciement

*Le plus grand Merci tout d'abord revient à Dieu, qui nous a guidés dans le bon sens durant notre vie et qui nous a donné le courage, la volonté, et la force pour réaliser ce travail.*

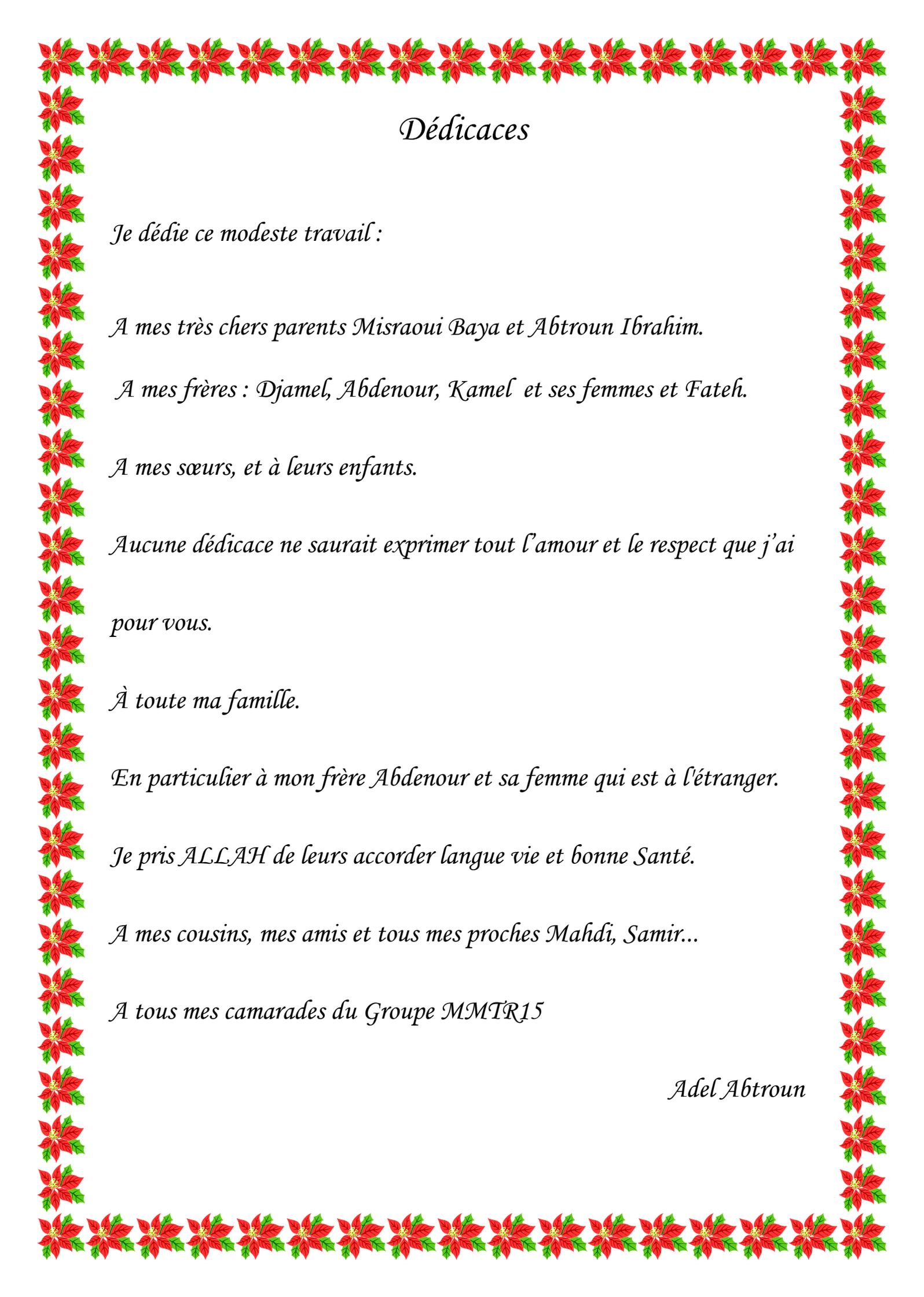
*Nous tenons à remercier chaleureusement notre promoteur Mr : CHELLIL Ahmed ; pour son soutien et ses conseils.*

*Un grand merci pour notre encadreur Mr: Yahiaoui Ahmed et notre Co-Encadreur Mr: BOUHAROUNE MOHAMMED qui nous 'ont témoigné de leur confiance et d'aide scientifique. Ainsi, nous remercions les ingénieurs et techniciens de la centrale Ras-Djinet en site : Djamel Salem, Ahmed Misraoui, Ami Louanes, Adel.*

*Nous remercions également les membres des jurys pour l'effort qu'ils feront dans le but d'examiner ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier vivement toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.*

*Nous remercions aussi tout Le groupe MMTR15 pour leur aide, leur patience, Leur compréhension et leur encouragement.*



## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents Misraoui Baya et Abtroun Ibrahim.*

*A mes frères : Djamel, Abdenour, Kamel et ses femmes et Fateh.*

*A mes sœurs, et à leurs enfants.*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour et le respect que j'ai  
pour vous.*

*À toute ma famille.*

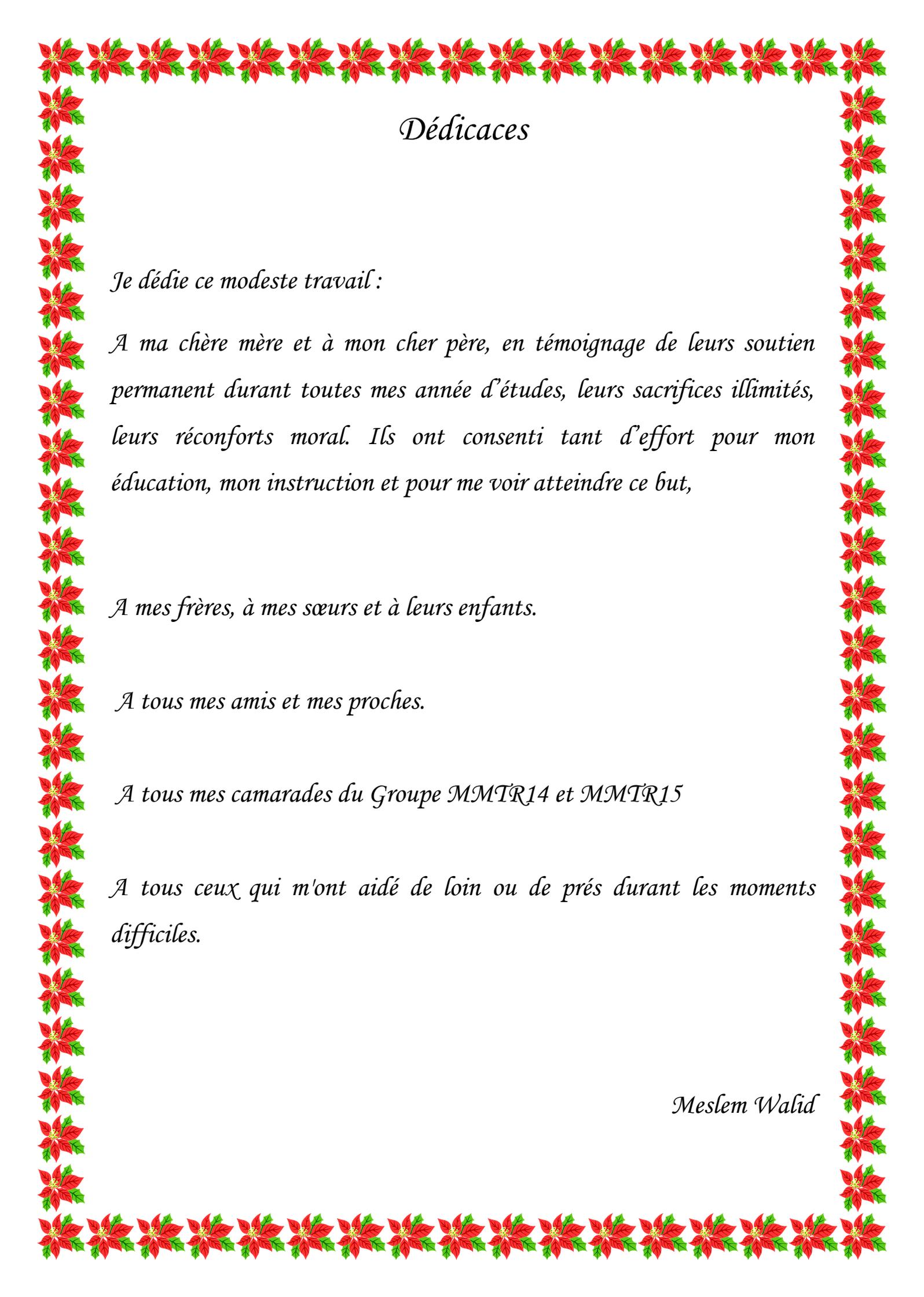
*En particulier à mon frère Abdenour et sa femme qui est à l'étranger.*

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

*A mes cousins, mes amis et tous mes proches Mahdi, Samir...*

*A tous mes camarades du Groupe MMTR15*

*Adel Abtroun*



## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma chère mère et à mon cher père, en témoignage de leurs soutien permanent durant toutes mes année d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconforts moral. Ils ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but,*

*A mes frères, à mes sœurs et à leurs enfants.*

*A tous mes amis et mes proches.*

*A tous mes camarades du Groupe MMTR14 et MMTR15*

*A tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près durant les moments difficiles.*

*Meslem Walid*

## SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Présentation de la centrale thermique	
Introduction .....	2
I.1. Présentation de site .....	2
I.2. Historique de la centrale .....	2
I.2.1. Réalisation de la centrale.....	3
I.2.2. Mise en service de la centrale .....	3
I.3. Taux de production de la centrale .....	3
I.4. Les équipements principaux dans la centrale.....	3
I.4.1. Poste d'eau .....	3
I.4.1.1. Un condenseur (source froide).....	4
I.4.1.2. Deux (02) pompes d'extraction .....	4
I.4.1.3. La bache alimentaire.....	4
I.4.1.4. Trois (03) Pompes alimentaires .....	4
I.4.2. La chaudière (générateur de vapeur, source chaude) .....	5
I.4.3. La Turbine à vapeur .....	5
I.4.4. L'alternateur (SIEMENS AUTRICHE).....	6
I.5. Evacuation de l'énergie .....	6
I.6. Les auxiliaires (accessoires commun) .....	7
I.6.1. Station de pompage .....	7
I.6.2. Station de dessalement de l'eau mer .....	7
I.6.3. Station de déminéralisation .....	7
I.6.4. Station électro chloration .....	7
I.6.5. Une station de production d'hydrogène.....	7
I.6.6. Un poste de détente de gaz et transfert fuel.....	7
I.7. Principe de fonctionnement de la centrale thermique de Cap-Djinet .....	8
Conclusion.....	11
Chapitre II : Etude technologie de groupe alimentaire	
Introduction .....	12
II.1. Définition.....	12
II.2. Description technique .....	12
II.3. Circuit eau d'alimentation RL.....	13
II.4. Composition de groupe alimentaire.....	13
II.4.1. La pompe booster (nourricière) .....	13
II.4.1.1. Définition .....	13
II.4.1.2. Principe de fonctionnement.....	13
II.4.1.3. Les caractéristiques techniques de la pompe nourricière .....	14
II.4.1.4. Plan de la pompe nourricière.....	15
II.4.1.5. Nomenclature de la pompe nourricière .....	16

II.4.1.6. Circuit d'huile de refroidissement et de graissage .....	17
II.4.2. Le moteur électrique asynchrone .....	17
II.4.2.1. Définition .....	17
II.4.2.2. Principe de fonctionnement.....	17
II.4.2.3. Composition du moteur .....	18
II.4.2.4. Les caractéristiques techniques de notre moteur MT .....	18
II.4.2.5. Circuit d'huile de lubrification et de refroidissement .....	18
II.4.3. Le multiplicateur de vitesse .....	19
II.4.3.1. Caractéristiques .....	19
II.4.4. Coupleur hydraulique.....	19
II.4.4.1. Principe de fonctionnement.....	20
II.4.4.2. Description .....	20
II.4.4.3. Composition du coupleur .....	21
II.4.4.4. Les caractéristiques techniques du coupleur hydraulique .....	22
II.4.4.5. Les paramètres (température, pression d'huile) aux cours de fonctionnement...	23
II.4.4.6. Circuit d'huile de fonctionnement et de graissage .....	23
II.4.4.7. Réglage de la vitesse de sortie.....	24
II.4.5. La pompe principale .....	24
II.4.5.1. Définition .....	24
II.4.5.2. Description .....	25
II.4.5.3. Accessoire de la pompe principale.....	25
II.4.5.4. Caractéristiques techniques .....	26
II.4.5.5. Lubrification des paliers.....	26
II.4.5.6. Refroidissement.....	26
II.4.5.7. La nomenclature .....	28
II.5. Mise en service du groupe motopompe alimentaire .....	29
II.5.1. Mise en marche de la pompe nourricière .....	29
II.5.2. Mise en marche de la pompe principale .....	29
II.5.3. Démarrage par protection du groupe motopompe alimentaire .....	29
II.5.4. Mise à l'arrêt du groupe motopompe alimentaire.....	30
II.5.5. Arrêt par protection du groupe motopompe alimentaire.....	30
II.5.6. Les différentes charges du groupe motopompe alimentaire .....	30
II.6. Redondance des groupes motopompes alimentaire.....	32
II.6.1. Définition .....	32
Conclusion.....	32

## Chapitre III : Introduction a la maintenance conditionnelle

Introduction .....	33
III.1. Maintenance .....	33
III.2. Différents types de maintenance .....	33
III.2.1. Maintenance corrective.....	34
III.2.2. Maintenance préventive.....	34

III.2.2.1. Maintenance préventive systématique .....	34
III.2.2.2. Maintenance préventive conditionnelle (prédictive).....	35
III.2.3. Principaux Avantages de la M. P. C .....	36
III.3. Surveillance .....	37
III.3.1. Etapes en processus de surveillance .....	37
III.3.2. Types de surveillance .....	38
III.3.2.1. Surveillance "On-line" ou suivi continu .....	38
III.3.2.2. Surveillance "off-line" (hors ligne) ou suivi périodique.....	39
III.3.3. Le Choix du type de surveillance.....	39
III.3.4. Techniques en surveillance des machines tournantes.....	40
III.3.5. Choix d'outils de surveillance.....	41
III.3.5.1. Choix de l'outil de surveillance suivant les défauts potentiels.....	43
III.3.6. Terminologies utilisées en surveillance.....	44
Conclusion.....	44

## Chapitre IV : Analyse vibratoire des machines tournant

Introduction .....	45
IV.1. Définition (norme AFNOR E 90 0001) .....	45
IV.2. Caractéristiques d'une vibration .....	45
IV.2.1. Fréquence .....	45
IV.2.2. Amplitude.....	46
IV.3. Les différents types de vibration .....	46
IV.3.1. Vibration harmonique.....	46
IV.3.2. Vibration périodique complexe .....	47
IV.3.3. Vibration aléatoire.....	47
IV.4. Représentation en temps et en fréquence d'un signal.....	47
IV.4.1. Représentation temporelle .....	47
IV.4.2. Représentation fréquentielle.....	48
IV.5. Le passage d'une représentation temporelle a une représentation fréquentielle .....	48
IV.6. Les modes de détection .....	49
IV.6.1. Valeur Efficace <b>X<sub>eff</sub></b> .....	49
IV.6.2. Valeur crête <b>X<sub>c</sub></b> .....	49
IV.6.3. Valeur Crête A Crête <b>X<sub>CC</sub></b> .....	49
IV.6.4. Valeur moyenne <b>X<sub>m</sub></b> .....	50
IV.6.5. Relations entre les Différents Modes De Détection .....	50
IV.7. Les grandeurs de mesure .....	50
IV.7.1. Déplacement vibratoire $x(t)$ .....	50
IV.7.2. Vitesse vibratoire $v(t)$ .....	50
IV.7.3. Accélération vibratoire $a(t)$ .....	50
IV.7.4. Choix des grandeurs de mesure.....	51
IV.8. Capteurs de vibrations.....	51
IV.8.1. Capteur de déplacement .....	51

IV.8.2. Capteurs de vitesse .....	52
IV.8.3. Capteurs d'accélération .....	52
IV.8.4. Domaine d'utilisation des capteurs de vibration .....	53
IV.9. Choix de l'emplacement des capteurs.....	53
IV.10.1. Quelques fréquences caractéristiques des phénomènes excitateurs.....	54
IV.10.2. Déséquilibre (défaut de balourd).....	55
IV.10.2.1. Différents types de balourd [12] .....	55
IV.10.2.2. Origine des différents types de balourds [13].....	56
IV.10.2.2.1. Balourd d'origine mécanique.....	56
IV.10.2.2.2. Balourd d'origine thermique.....	57
IV.10.2.3. Représentation spectrale d'un balourd.....	57
IV.10.3. Défaut d'alignement - flexion du rotor.....	57
IV.10.3.1. Les types des défauts d'alignements.....	57
IV.10.3.1.1. Défaut de désalignement angulaire.....	57
IV.10.3.1.2. Défaut de désalignement axial.....	58
IV.10.4. Défauts de serrage .....	58
IV.10.5. Défaut des paliers lisses .....	58
IV.10.6. Forces hydrauliques et aérodynamiques.....	59
IV.10.6.1. Passage d'aubes et de palettes .....	59
IV.10.6.2. Écoulement turbulent.....	60
IV.10.6.3. Cavitation.....	60
IV.10.7. Défauts de roulements .....	61
IV.10.7.1. Causes et types de dégâts.....	62
IV.10.7.2. Fréquence des défaillances des éléments de roulement.....	62
IV.10.7.3. Signatures vibratoires des défauts d'écaillage.....	63
IV.10.7.4. Défaut de déversement.....	63
IV.10.8. Défauts des engrenages .....	64
IV.10.8.1 Signatures vibratoires des défauts .....	65
IV.10.8.1.1. Détérioration d'une dent .....	65
IV.10.8.1.2. Détérioration de l'ensemble de dentures .....	66
IV.10.8.1.3. Entraxe insuffisant (jeu insuffisant au fond de denture).....	66
IV.10.8.1.4. Jeu de fond de denture trop grand.....	66
IV.10.8.1.5. Défauts induisant une modulation d'amplitude.....	67
IV.11. Groupes des machines.....	67
IV.12. Seuils de jugement .....	68
Conclusion.....	69

## Chapitre V : Etude expérimentale des défauts survenant sur le groupe alimentaire

Introduction .....	70
V.1. Matériel utilisé.....	70
V.1.1. Capteur des vibrations [16].....	70
V.1.2. Analyseur- MVP-200 [17].....	71

V.1.3. Logiciel de diagnostic et d'analyse XPR-300 [17] .....	71
V.2. Etude de cas .....	72
V.2.1. Les points de mesures .....	72
V.2.2. Les défauts au niveau de la pompe booster (nourricière) .....	72
V.2.2.1. Mesures de niveau global avant l'intervention.....	72
V.2.2.2. Interprétation de résultat .....	73
V.2.2.3. Analyse spectrale de la pompe booster .....	74
V.2.2.4. Interprétation des résultats .....	76
V.2.2.5. Mesures de niveau global après l'intervention .....	76
V.2.2.6. Interprétation des résultats .....	77
V.2.3. Les défaut au niveau de multiplicateur de vitesse .....	78
V.2.3.1. Mesures de niveau global avant l'intervention.....	78
V.2.3.2. Interprétation de résultat .....	78
V.2.3.3. Analyse spectrale de multiplicateur de vitesse .....	79
V.2.3.4. Interprétation des résultats .....	79
V.2.3.5. Mesures de niveau global après l'intervention .....	79
V.2.3.6. Interprétation des résultats .....	80
V.2.4. Les défaut au niveau de la pompe principale.....	80
V.2.4.1. Défaut de balourd.....	80
V.2.4.1.1. Mesures de niveau global avant l'intervention .....	80
V.2.4.1.2. Interprétation de résultat .....	81
V.2.4.1.4. Interprétation des résultats .....	82
V.2.4.1.5. Mesures de niveau global après l'intervention .....	82
V.2.4.1.5. Interprétation des résultats .....	83
Conclusion.....	83
Conclusion générale .....	84

Liste des figures

Figure I.1. Position du site de la centrale .....	2
Figure I.2. Schéma synoptique d'une tranche thermique .....	10
Figure II.1. Photo de la pompe d'alimentation sur site .....	12
Figure II.2. Schéma du système .....	13
Figure II.3. La pompe nourricière Figure.....	14
Figure II.4. Schéma technique d'une pompe nourricière .....	15
Figure II.5. Composition du moteur électrique .....	18
Figure II.6. Photo coupleur et multiplicateur .....	20
Figure II.7. Photo pompe principale.....	24
Figure II.8. Schéma technique d'une pompe principale.....	27
Figure II.9. Organigramme du démarrage du groupe motopompe par protection .....	29
Figure II.10. Organigramme de l'arrêt du groupe motopompe par protection .....	30
Figure II.11. Diagramme variation de débit en fonction de la charge .....	31
Figure III.1. Différents types de maintenance.....	33
Figure III.2. Principe de la maintenance corrective .....	34
Figure III.3. Principe de la maintenance préventive systématique.....	35
Figure III.4. Principe de la maintenance préventive conditionnelle.....	35
Figure III.5. Enoncé de la fonction globale d'une politique de maintenance préventive conditionnelle.....	36
Figure III.6. Choix optimal du temps d'intervention de la maintenance et son impact sur la production.....	36
Figure III.7. Composantes de la surveillance industrielle .....	37
Figure III.8. Les types de surveillance des machines.....	38
Figure III.9. Surveillance On-line (en ligne) ou suivi continu .....	39
Figure III.10. Surveillance off-line ou suivi périodique.....	39
Figure III.11. Le choix du type de suivi .....	40
Figure III.12. Différentes techniques de la surveillance des machines tournantes .....	40
Figure IV.1. Signal harmonique .....	46
Figure IV.2. Signal périodique complexe .....	47
Figure IV.3. Signal aléatoire .....	47
Figure IV.4. Décomposition d'un signal vibratoire en deux composantes harmonique.....	48
Figure IV.5. Exemples de conversion temps/fréquence.....	48
Figure IV.6. Schéma de principe d'un analyseur FFT .....	49
Figure IV.7. Traitement de signal FFT .....	49
Figure IV.8. Les modes de détection.....	50
Figure IV.9. Relation accélération, vitesse, déplacement .....	51
Figure IV.10. Principe de fonctionnement d'un capteur de déplacement .....	52
Figure IV.11. Principe de fonctionnement d'un capteur de vitesse .....	52
Figure IV.12. Principe de fonctionnement d'un capteur d'accélération .....	53

Figure IV.13. Domaine d'utilisation des capteurs de vibration .....	53
Figure IV.14. Fixation d'un capteur sur palier .....	54
Figure IV.15. Choix directionnel pour la prise de mesure .....	54
Figure IV.16. Défaut de balourd .....	55
Figure IV.17. Image vibratoire d'un défaut de balourd .....	55
Figure IV.18. Balourd statique .....	56
Figure IV.19. Balourd de couple .....	56
Figure IV.20. Evolution brutale de la vibration du balourd .....	56
Figure IV.21. Image vibratoire d'un défaut de balourd .....	57
Figure IV.22. Désalignement angulaire .....	57
Figure IV.23. Désalignement axial (radial) .....	58
Figure IV.24. Défaut d'usure d'accouplement .....	58
Figure IV.25. Les contraintes sur un palier lisse .....	59
Figure IV.26. Image vibratoire d'un fouettement d'huile .....	59
Figure IV.27. Image vibratoire d'un tourbillon d'huile .....	59
Figure IV.28. Passage d'aubes et de palettes .....	60
Figure IV.29. Image théorique d'un défaut de l'écoulement turbulent .....	60
Figure IV.30. Image théorique d'un défaut de cavitation .....	61
Figure IV.31. Eléments composant un roulement à billes [11] .....	61
Figure IV.32. Les caractéristiques des éléments de roulement .....	63
Figure IV.33. Spectre théorique d'un défaut d'écaillage d'un roulement .....	63
Figure IV.34. Déversement de bague externe .....	63
Figure IV.35. Déversement de bague interne .....	64
Figure IV.36. Schéma simplifié d'un engrenage .....	64
Figure IV.37. Spectre d'un engrenage sain .....	64
Figure IV.38. Représentation du spectre théorique d'un défaut d'engrenage .....	65
Figure IV.39. Différents types d'engrenage .....	65
Figure IV.40. Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée .....	65
Figure IV.41. Image vibratoire théorique d'une denture .....	66
Figure IV.42. Image théorique et spectre réel d'un engrenement en fond de denture .....	66
Figure IV.43. Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée .....	67
Figure IV.44. Image théorique de la modulation d'amplitude de $F_e$ par $F_r$ .....	67
Figure V.1. Accéléromètre ASH201-A .....	70
Figure V.2. Analyseur MVP-200 .....	71
Figure V.3. Signal temporelle de palier 01 .....	73
Figure V.4. Signal temporelle de palier 02 .....	73
Figure V.5. Spectre de vibration de la pompe booster de PAL1RV avant l'intervention .....	75
Figure V.6. Spectre de vibration de la pompe booster de PAL2RH avant l'intervention .....	75
Figure V.7. Spectre de vibration de la pompe booster de PAL2RV avant l'intervention .....	75
Figure V.8. Spectre de vibration de la pompe booster de PAL1RV après l'intervention .....	76
Figure V.9. Spectre de Vibration de la pompe booster de PAL2RH après l'intervention .....	77
Figure V.10. Spectre de vibration de la pompe booster de PAL2RV après l'intervention .....	77
Figure V.11. Niveau global de pallier 06 position verticale .....	78

Figure V.12. Spectre de vibration de multiplicateur de vitesse de PAL6RV avant l'intervention.....	79
Figure V.13. Spectre de Vibration de multiplicateur de vitesse de PAL6RV après l'intervention.....	80
Figure V.14. Niveau global de pallier 09 .....	80
Figure V.15. Spectre de vibration de la pompe principale de PAL9RH avant l'intervention ..	81
Figure V.16. Spectre de vibration de la pompe principale de PAL9RH après l'intervention ..	82

### **Liste des Tableaux**

Tableau II.1. Caractéristique technique de la pompe nourricière .....	14
Tableau II.2. Nomenclature de la pompe nourricière.....	16
Tableau II.3. La nomenclature du moteur électrique .....	18
Tableau II.4. Les caractéristiques techniques du moteur électrique.....	18
Tableau II.5. Les caractéristiques techniques du coupleur hydraulique.....	22
Tableau II.6. Les paramètres (température, pression d'huile) aux cours de fonctionnement ..	23
Tableau II.7. Caractéristiques techniques de la pompe principale.....	26
Tableau II.8. La nomenclature de la pompe principale.....	28
Tableau III.1. Choix de l'outil de surveillance.....	42
Tableau III.2. Choix de l'outil de surveillance suivant les défauts potentiels .....	43
Tableau IV.1. Quelque fréquence caractéristique des phénomènes excitateurs.....	54
Tableau IV.2. Quelques causes de dégâts sur les roulements .....	62
Tableau IV.3. Les fréquences caractéristiques de différents défauts des roulements .....	62
Tableau IV.4. Exemples de limites vibratoires proposées par les normes AFNOR E 90-300.	68
Tableau V.1. Les points de mesure .....	72
Tableau V.2. Niveau global dans les points de mesures .....	72
Tableau V.3. Les fréquences caractéristique de la pompe booster .....	74
Tableau V.4. Niveau global dans les points de mesures après l'intervention.....	76
Tableau V.5. Niveau global dans les points de mesures .....	78
Tableau V.6. Niveau global dans les points de mesures après l'intervention.....	79
Tableau V.7. Niveau global dans les points de mesures .....	80
Tableau V.8. Les fréquences caractéristique de la principale .....	81
Tableau V.9. Niveau global dans les points de mesures après l'intervention.....	82

**Abréviations**

<b>RL</b>	: Circuit d'eau d'alimentation (bâche alimentaire jusqu'à la chaudière).
<b>TR</b>	: Tranche de production
<b>10 RL 12/22/32</b>	: La tranche 10, groupe motopompe alimentaire 12, 22, 32.
<b>RH 40 B001</b>	: Bâche alimentaire.
<b>RL 11/12/31</b>	: Conduits d'arrivées des pompes nourricières.
<b>RL 11/21/31 S001</b>	: Vanne d'arrêt des pompes nourricières.
<b>RL 12 D001</b>	: Tuyauterie de débit nul.
<b>RL40</b>	: Conduite de regroupement des trois pompes alimentaire.
<b>RF 50 W001</b>	: Réchauffeur haut pression HP5.
<b>RF 60 W001</b>	: Réchauffeur haut pression HP6.
<b>RL50 S001</b>	: Soupape (vanne) d'arrêt rapide.
<b>RL50 S003</b>	: Soupape (vanne) alimentaire régulatrice.
<b>VG</b>	: Circuit d'eau de refroidissement secondaire.
<b>N</b>	: Vitesse de rotation.( $\Omega$ )
<b>T<sup>0</sup>c</b>	: Température de fluide refoulé en degré Celsius.
<b>Pa</b>	: Pression d'aspiration de la pompe (N/m <sup>3</sup> ).
<b>Pr</b>	: Pression de refoulement de la pompe (N/m <sup>3</sup> ).
<b>Q</b>	: Débit refoulé de la pompe.
<b>Kg</b>	: Kilo gramme.
<b>R</b>	: Rapport d'engrenage du coupleur.
<b>G</b>	: Facteur de glissement du coupleur en pleine charge.
<b>V</b>	: Capacité de remplissage du bac d'huile du coupleur.
<b>Pa</b>	: Puissance électrique absorbée par le moteur.
<b>U</b>	: Tension entre phases (V).
<b>I</b>	: Courant en ligne (A).
<b>Cos <math>\phi</math></b>	: Facteur de puissance.
<b>F</b>	: Fréquence du courant l/s.
<b><math>\omega</math></b>	: Pulsation des courants alternatifs en rad/s.
<b><math>\Omega</math>s</b>	: Vitesse synchrone de rotation du champ rad/s.
<b>Mw</b>	: Méga watt.
<b>MVA</b>	: Méga volt ampère.
<b>KV</b>	: Kilo volt.
<b>GTA</b>	: Groupe turbo alternateur.
<b>AFNOR E90-300</b>	: Association de normalisation française.
<b>ISO10816</b>	: Organisation internationale de normalisation.

---

### Résumé

La tâche la plus importante et la plus coûteuse en termes de temps et de coûts dans la surveillance et la maintenance des machines tournantes est la détection et le diagnostic de défaut. Cette étude est consacré à la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire, Le principe de cette méthode est basé sur l'analyse spectrale par la transformée de Fourier.

A partir des caractéristiques techniques de la machine on a calculé les fréquences caractéristiques des défauts qui peuvent produire, puis nous avons analysé le spectre des vibrations pour localisé le défaut qui a conduit à une augmentation du niveau des vibration.

**Mots-clés :** Analyse vibratoire, diagnostic, surveillance, transformée de Fourier, spectre.

### ملخص

المهمة الأكثر أهمية والأكثر كلفة من حيث الوقت والتكاليف في رصد وصيانة الآلات الدوارة هي كشف وتشخيص الأخطاء. وتركز هذه الدراسة على الصيانة التنبؤية من خلال تحليل اهتزازي ويستند مبدأ هذا الأسلوب على التحليل الطيفي بواسطة تحويل فورييه.

من الخصائص التقنية للجهاز تم حساب الترددات المميزة للعيوب التي يمكن أن تحدث، ثم قمنا بتحليل طيف الاهتزاز لتحديد مكان وجود العيب الذي أدى إلى زيادة في مستوى الاهتزاز.

**كلمات المفتاح :** تحليل الاهتزاز، التشخيص، الرصد، تحويل فورييه والطيف.

### Abstract

The most important and costly task in terms of time and cost in monitoring and maintaining rotating machines is fault detection and diagnosis. This study is devoted to conditional maintenance by vibrationl analysis. The principle of this method is based on spectral analysis by the Fourier transform.

From the technical characteristics of the machine, we calculated the characteristic frequencies of the defects that can produce, and then we analyzed the spectrum of vibrations to localize the defect which led to an increase in the level of vibrations.

**Keywords:** Vibration analysis, diagnosis, monitoring, Fourier transform, spectrum.

---

### Introduction générale

Le secteur de l'énergie est l'un des plus stratégiques pour l'économie. L'importance de son rôle dans le développement d'un pays est énorme, la plupart des pays développés donnent un grand intérêt à ce secteur.

Parmi les sources importantes de l'énergie, les centrales électriques thermiques qui nécessitent une disponibilité permanente des machines tournant.

Pour éviter des arrêts de production imprévus et les pertes économiques qui en découlent et pour détecter les défauts qui réduisent le fonctionnement dans le but d'assurer à l'équipement des performances de haute qualité, les entreprises doivent choisir avec précaution la politique de maintenance convenable pour le suivi de leurs équipements, on sous entend par cette politique : « la maintenance conditionnelle » qui est considérée comme la maintenance la plus adéquate pour le bon fonctionnement et l'exploitation optimale en quantité et en qualité et au moindre coût.

Les centrales thermiques de production d'électricité telle que la centrale de RAS-DJINET contiennent des machines vitales (turbines, alternateurs etc....) qui fonctionnent en permanence et avec une vitesse constante, donc il faut éviter le minimum des vibrations. Pour cela il faut une surveillance et une analyse vibratoire permanente réalisée par des gents qualifiés.

Notre sujet consiste a étudier le diagnostic par analyse vibratoire des défauts courant de groupe alimentaire.

Cette étude est organisée selon les chapitres suivants :

- ✓ Le premier chapitre est consacré à la présentation de la centrale thermique de RAS-DJINET.
- ✓ Le deuxième chapitre présente l'introduction a la maintenance conditionnelle.
- ✓ Le troisième chapitre présente l'analyse vibratoire des machines tournantes.
- ✓ Le quatrième chapitre présente étude technologie de groupe alimentaire.
- ✓ Le cinquième chapitre présente analyse vibratoire des défauts survenant sur le groupe alimentaire.

## Introduction

Au début des années quatre-vingt l'Algérie avais d'énergie électrique pour cela l'état a décidé de construire une centrale électrique et comme l'Algérie à 1200 Km de cote soit une très grande source d'énergie aquatique l'état opte pour la construction d'une centrale thermique à gaz site choisie est Ras-Djenet.

### I.1. Présentation de site

La centrale implantée sur une surface de 35 hectares spécialement sélectionnée sur le littoral de Ras-Djenet (25 km à l'est de Boumerdes) pour sa conformité avec les critères nécessaires pour ce genre d'installation, dont la proximité avec les RN 24 et 12, ainsi que la voie ferré.



Figure I.1. Position du site de la centrale

#### Les critères de choix du site sont :

- ✓ À proximité des consommateurs importants, situés notamment dans la zone industrielle ROUIBA-REGHAIA.
- ✓ La Possibilité d'extension.
- ✓ Les conditions du sous-sol favorables, ne nécessitant pas des fondations profondes.

### I.2. Historique de la centrale

La centrale à été construite par un consortium

**Austro-allemand** : SIEMENS-KWU-SGP.

**KWU** : KRAFTWERK-AG (RFA)

**SGP** : SIMMERING GRAZ PAUKER (Autriche)

**SIEMENS** (Autriche)

Qui avaient la responsabilité des études, de la supervision du montage et du contrôle de l'ouvrage, ainsi que d'une entreprise Espagnole (DRAGADOS) à laquelle a été confiée la réalisation de la prise d'eau de mer.

Les principales entreprises algériennes qui ont participé à la réalisation de la centrale sont les suivantes : ENCC, ETTERKIB, BATIMETAL, GENISIDER, INERGA, SNLB, PROSIDER, ENATUB, SNIC, GTP, SONATRAM, SOGEP.

### **I.2.1. Réalisation de la centrale**

La réalisation de la centrale et le couplage en réseau de trois groupes ayant été fait au cours de l'année 1986, le montage de toutes les structures de l'installation est effectué suivant un plan bien déterminé qui se présente comme suit :

- ✓ Travaux de génie-civil début : Juin 1981 jusqu'à fin Mars 1985.
- ✓ Montage mécanique début : Mars 1984 jusqu'à fin Septembre 1986.
- ✓ Montage électrique début : Mars 1984 jusqu'à fin Septembre 1986.

### **I.2.2. Mise en service de la centrale**

La mise en service des groupes s'est effectuée comme suit :

- ✓ Groupe 10, couplage sur réseau le 17/06/86
- ✓ Groupe 20, couplage sur réseau le 17/09/86
- ✓ Groupe 30, couplage sur réseau le 29/11/86
- ✓ Groupe 40, couplage sur réseau le 21/02/87

## **I.3. Taux de production de la centrale**

La Centrale de Ras-Djenet se compose de 4 tranches de type thermique vapeur d'une puissance unitaire de 176 MW Borne alternateur (BA).

La puissance totale installée est de 704 MW (BA), La puissance fournie au réseau est de 672 MW borne usine (BU).

La consommation totale des auxiliaires des 4 tranches et des auxiliaires communs est d'environ 32 MW.

## **I.4. Les équipements principaux dans la centrale**

Chaque groupe contient les équipements principaux suivants :

### **I.4.1. Poste d'eau**

Le rôle de poste d'eau est de transformer la vapeur sortant de la turbine à l'état liquide, se liquide est ensuite réchauffer et dégaze fier, il se constitua de :

**I.4.1.1. Un condenseur (source froide)**

C'est un condenseur de type à échange par surface, assure la condensation de la vapeur évacuée du corps BP de la turbine par la circulation de l'eau de mer refroidie (débit de  $2 \times 1200 \text{ m}^3/\text{h}$ ), dans les 14850 tubes en titane contenu dans le condenseur.

En ajoutant que :

- ✓ La pression dans le condenseur est maintenue à 0.04 bars.
- ✓ Niveau d'eau condensée maintenue à 900 mm.

De plus le condenseur nous a permis :

- ✓ D'assurer la condensation de la vapeur d'eau évacuée du corps BP de la turbine par la circulation de l'eau de refroidissement (eau de mer) dans des tubes titane.
- ✓ D'augmenter la chute d'enthalpie de la vapeur détendue en établissant une dépression atmosphérique, afin d'obtenir un rendement de la turbine aussi élevé que possible.
- ✓ Recevoir également le condensat des réchauffeurs (BP, HP).

**I.4.1.2. Deux (02) pompes d'extraction**

Assurent le transfert de l'eau du puis du condenseur jusqu'à la bêche alimentaire en passant par les trois (03) réchauffeurs BP (débit nominale d'une pompe  $414 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

**I.4.1.3. La bêche alimentaire**

C'est un réservoir cylindrique combiné avec dégazeur, il reçoit de l'eau en provenance de la pompe d'extraction. Eau qui traverse trois réchauffeurs de basse pression, Il reçoit donc une quantité d'énergie thermique (température) provenant du soutirage de la turbine avant d'être stockée dans la bêche alimentaire.

**Caractéristique de la bêche alimentaire :**

- ✓ Longueur : 16.5 m.
- ✓ Diamètre de l'enveloppe : 3.6 m.
- ✓ Volume total :  $163 \text{ m}^3$ .
- ✓ Température nominale :  $152^\circ\text{C}$ .
- ✓ Pression nominale : 4.5 bars.

**I.4.1.4. Trois (03) Pompes alimentaires**

Servent à alimenter la chaudière (ballon chaudière) en eau à partir de la bêche alimentaire (débit  $3 \times 261,6 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

**I.4.2. La chaudière (générateur de vapeur, source chaude)**

Son rôle est de faire passer l'eau d'alimentation de l'état liquide à l'état vapeur surchauffée à haute température et à haute pression, et pour but d'alimenter le groupe turboalternateur (GTA), elle est typiquement à circulation naturelle. L'alimentation en combustible se fait par huit (08) bruleurs en quatre étages (niveaux).

**Caractéristiques chaudière avec son ballon chaudière :**

- ✓ Capacité de vaporisation maximale : 530 t/h.
- ✓ Température du vapeur : 540°C.
- ✓ Pression de service : 160 bars.
- ✓ Ballon chaudière contient 50 % eau d'alimentation et 50 % vapeur.

**Chaque générateur de vapeur comprend notamment :**

- ✓ Une chambre de combustion formée par les tubes écrans (faisceaux vaporisateurs).
- ✓ Un ballon (réservoir) et un (01) Economiseur.
- ✓ Trois (03) Surchauffeurs et deux (02) resurchauffeurs.
- ✓ Trois (03) Désurchauffeurs par injection d'eau pour la température de la vapeur.
- ✓ Quatre (04) Colonnes de descentes.
- ✓ Huit (08) Bruleurs de combustion mixte gaz/fuel.
- ✓ Deux (02) Ventilateurs de recyclage, ont pour rôle de recycler, en fonction de la charge, une partie des fumées issues de la combustion afin de régler à  $T_0$  à la sortie du resurchauffeur.
- ✓ Deux (02) Ventilateurs de soufflage, ont le rôle de fournir l'air frais de combustion nécessaire au générateur de vapeur.
- ✓ Un réchauffeur rotatif d'air de combustion, sert à réchauffer l'air frais de la combustion par récupération de la chaleur des fumées.

**I.4.3. La Turbine à vapeur**

La turbine à vapeur c'est une machine thermique qui transforme l'énergie thermique contenue dans la vapeur (température, pression) provenant de la chaudière en énergie mécanique (un mouvement de rotation de son arbre), le travail mécanique obtenu sert à entrainer l'alternateur.

**Caractéristique principale de la turbine :**

- ✓ Longueur : 16.125 m.
- ✓ Poids : 500.103 Kg.
- ✓ Température vapeur : 540°C.

- ✓ Pression de vapeur : 140 bars.
- ✓ Régime de rotation : 3000 tr/mn.
- ✓ Fréquence : 50 Hz.

**Description :**

- ✓ L'installation comprend quatre (04) turbines identiques à condensation.
- ✓ Chaque turbine est composée de trois (03) corps : Haute pression (HP) à simple flux, moyenne pression (MP) et basse pression (BP) elles ont double flux.
- ✓ La turbine contient six (06) soutirages, alimentant trois (03) réchauffeurs BP, deux (02) réchauffeurs HP et de la bêche alimentaire.

**I.4.4. L'alternateur (SIEMENS AUTRICHE)**

L'alternateur est un générateur qui transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, est une machine tournante destinée à produire un courant alternatif sinusoïdal. Son fonctionnement est proche de celui d'une génératrice de bicyclette, il pèse plusieurs dizaines de tonnes, l'alternateur est couplé avec la turbine.

L'hydrogène étant lui-même refroidi par l'eau d'extraction [1].

**Caractéristiques principales des alternateurs :**

- ✓ Tension nominale : 15,5 KV.
- ✓ Puissance nominale : 220 MVA.
- ✓ Puissance active : 176 MW.
- ✓  $\cos \varphi = 0.8$ .
- ✓ Excitation : à diodes tournantes.
- ✓ Poids du stator complet : 198 tonnes.
- ✓ Poids du rotor seul : 36.7 tonnes.
- ✓ La longueur : 7,340m.

**I.5. Evacuation de l'énergie**

L'énergie est évacuée vers deux postes situés à Boudouaou (l'énergie produite par TR10 et TR20) et si-Mustapha (l'énergie produite par TR30 et TR40). L'évacuation se fait par des lignes de 220 Kv chaque tranche est équipée d'un transformateur de séchage pour alimenter les auxiliaires de la centrale il génère une puissance de 220 MVA.

## **I.6. Les auxiliaires (accessoires commun)**

### **I.6.1. Station de pompage**

L'eau est pompée dans trois tuyaux de biton de 3.7 m à 900 m de la station de pompage, cette dernière se compose par tranche :

- ✓ Une (01) grille filtrante à grosses mailles et dé grilleurs.
- ✓ Un (01) tambour filtrant, à maille fine muni d'un dispositif automatique de lavage.
- ✓ Deux (02) pompes de circulation de 12000 m<sup>3</sup>/h, qui refoulent l'eau de mer jusqu'au condenseur à travers des tuyaux Bonna.

### **I.6.2. Station de dessalement de l'eau mer**

Son rôle est de dessaler l'eau de mer avant être mise au circuit (l'eau-vapeur). Quatre (04) unités de dessalement produisant 500m<sup>3</sup> /j chacune assure la production en eau dessalée, stockée dans deux (02) bâches (2700 m<sup>3</sup>) pour chacune.

### **I.6.3. Station de déminéralisation**

La centrale contient deux chaînes de déminéralisation de 40 m<sup>3</sup>/h chacune, parachèvent le traitement de l'eau avant son utilisation dans le cycle eau-vapeur, les lits mélangés sont un mélange de résines cationique (Duo lite A 101 et C20 MB).Le stockage d'eau déminéralisée se fait dans deux (02) réservoirs de 1500 m<sup>3</sup> pour chacun.

### **I.6.4. Station électro chloration**

La chloration de l'eau de mer permet de protéger le circuit d'eau de mer (condenseur, conduite d'amenée d'eau de mer). Contre tout encrassement pouvant être causé par les micro-organismes marins. Elle se fait par injection d'hypochlorite de sodium. L'installation est prévue pour produire 2×150Kg/h de chlore actif.

### **I.6.5. Une station de production d'hydrogène**

Sert à produire l'hydrogène nécessaire au refroidissement des quatre alternateurs de la centrale le refroidissement de l'alternateur se fait à l'aide des quatre réfrigérants d'hydrogène H<sub>2</sub> (4×25%), qui sont des échangeurs par surface qui refroidissent l'H<sub>2</sub> chaud par la méthode des courants croisés. L'échange de chaleur entre H<sub>2</sub> et l'eau de refroidissement s'effectue par l'intermédiaire de tubes ailettes parcourus par l'eau.

### **I.6.6. Un poste de détente de gaz et transfert fuel**

La centrale utilise deux combustibles comme source d'énergie thermique :

- ✓ Gaz naturel comme combustible principal, acheminé par gazoduc de Hassi-R'mel avec un débit de 160.000 Nm<sup>3</sup>/h et une pression de soixante (60) bars, et la régulation ramené à six (06) bars pour assurer la pleine charge des quatre tranches.
- ✓ Fuel léger utilisé en cas ou l'indisponibilité de gaz, stocké dans deux bâches de stockage de capacité : 2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>.

**La consommation nominale du combustible par groupe :**

- ✓ En marche au gaz :  $Q = 4 \times 10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .
- ✓ En marche en fuel :  $q = 42 \text{ m}^3/\text{h}$ .

**I.7. Principe de fonctionnement de la centrale thermique de Cap-Djinet**

Avant d'écrire le fonctionnement de la centrale, il sera bon de rappeler les différentes transformations énergétiques qui ont servi à la production de l'énergie électrique, dans un travail suivant le **cycle de Rankine** (deux sources énergétiques l'une chaude (chaudière) et l'autre froide (condenseur) + un groupe turboalternateur). En gros on a trois transformations :

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

Le circuit eau vapeur est un circuit fermé dont le point de départ est le condenseur. On a deux pompes d'extraction qui sont-en plein débit (chaque pompe assure 100% de la charge), ces pompes aspirent le condensat de condenseur à une pression de 0.04 bars et une température de 33°C, elle refoule l'eau vers les réchauffeurs de basse pression BP1, BP2 et BP3, ou l'augmentation de la température se fait comme suit :

- ✓ 52°C à la sortie de réchauffeur BP1.
- ✓ 84°C à la sortie de réchauffeur BP2.
- ✓ 113°C à la sortie de réchauffeur BP3.

L'eau arrivée à la bache alimentaire a une température de 1520 c et une pression de 4.5 bars grâce au soutirage S6, au-dessous de la bache se trouve trois pompes alimentaire qui assurent chacune d'elle un demi débit (50% de la charge). Ces pompes travaillent en paires, elles aspirent l'eau a 11 bars et le refoulent au niveau de ballon chaudière à 177 bars à travers les réchauffeurs haute pression HP5 et HP6, et on constate que la température augmente comme suit :

- ✓ 200°C à la sortie de réchauffeur HP5.
- ✓ 246°C à la sortie de réchauffeur HP6.

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

Le passage de la vapeur dans ces trois favorise la formation du travail moteur, qui définit l'énergie mécanique produite par la turbine. Dans le corps HP la vapeur se détente le maximum possible et elle s'écoule dans le condenseur qui se trouve à 0.04 bars de pression grâce aux quatre éjecteurs qui aspirent l'air pour créer le vide dans le condenseur.

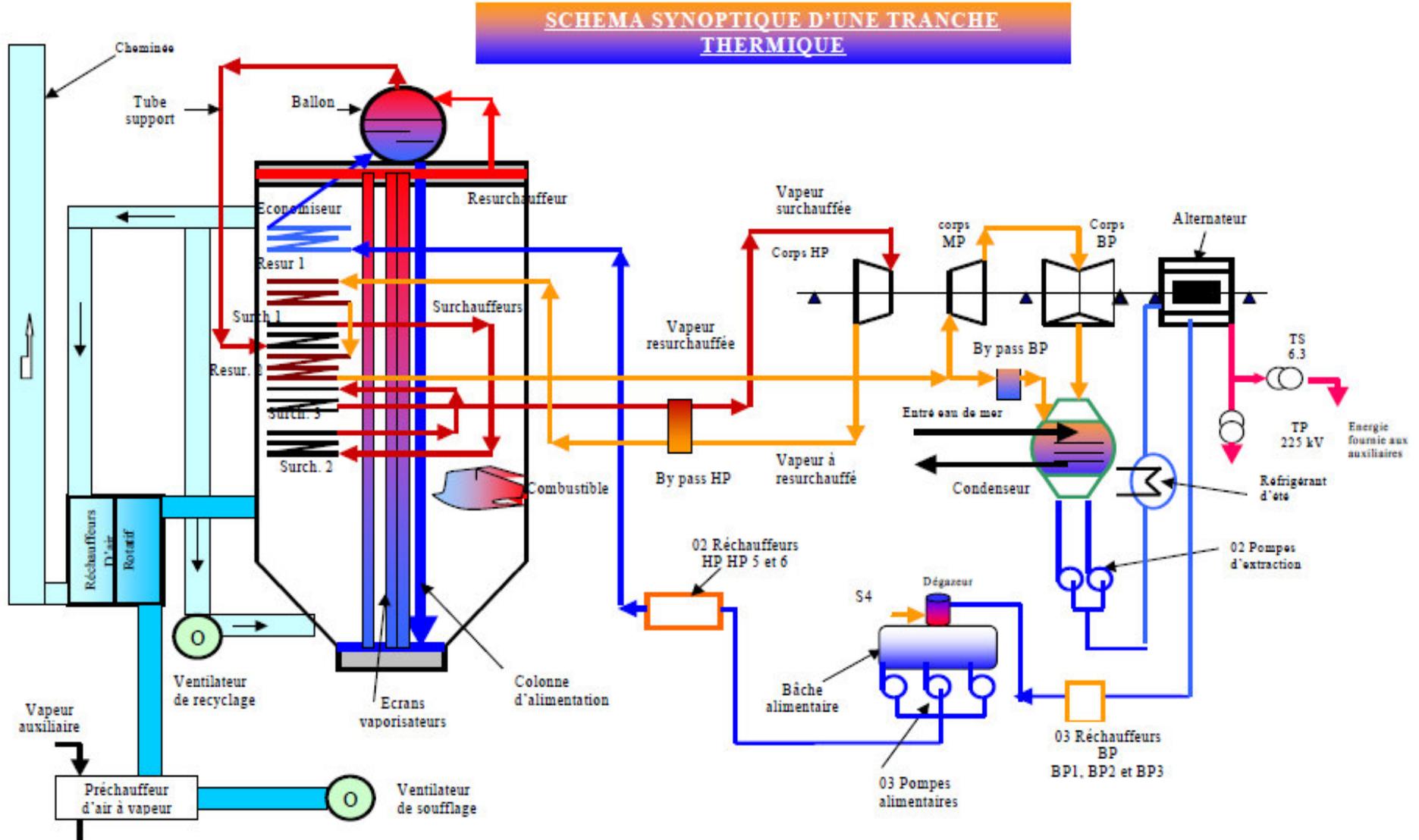


Figure I.2. Schéma synoptique d'une tranche thermique

**Conclusion**

L'étude d'une tranche de production dans la centrale thermique de Cap-Djenet nous a permis de mieux comprendre les étapes et transformations nécessaires pour la production de l'électricité, le rôle des divers organes qui participe à ces transformations (chaudière, condenseur, turbine ), ainsi que l'importance des auxiliaires intervenant dans un cycle de production .

Dans le chapitre quatrième, nous présenterons en détail les caractéristiques techniques de la pompe alimentaire, un maillon essentiel dans la chaîne de production de la centrale.

## Introduction

Les pompe alimentaires figurent parmi les auxiliaires essentiels d'une centrale thermique tant par l'importance de la fonction qu'elles remplissent la production du couple moteur par la turbine est obtenue par la valeur provenant de la chaudière. En principe la chaudière est une génératrice qui permet de transformer l'eau de l'état liquide (l'eau de pompage) à l'état vapeur saturé, par conséquent la présence d'un système de pompage pour alimenter la chaudière en eau est primordiale voir même obligatoire.

### II.1. Définition

Un système de pompage est l'ensemble de tous les mécanismes (motopompe alimentaire) qui sert à alimenter la chaudière (ballon chaudière) en eau à partir de bêche alimentaire [1].

Le rôle de cette pompe est de transformer l'énergie mécanique fournie par le moteur, en énergie cinétique transmet à l'eau, ce qui lui permet de vaincre la hauteur manométrique et la pression dans le ballon chaudière pour alimenter ce dernier. Elle a aussi un rôle secondaire qui est de refroidir les surchauffeurs et les resurchauffeurs en cas de surchauffe.

### II.2. Description technique

Chaque compartiment de production est équipé de trois pompes alimentaires identiques, au cours de fonctionnement normal deux pompes sont en service et assurent 50% du débit d'eau nécessaire pour chacune, la troisième pompe est présélectionner (en stand-by) [17].

La nomenclature normalisée (N° de série) de ces pompes est : 10RL12/22/32 OÙ 10 signifie la trancher ou le compartiment, RL est la nomenclature de circuit eau d'alimentation, 12/22/32 est l'ordonnancement de ces pompes sur le site.

La pompe d'alimentation est un système composé de : (figure II.1)

- ✓ Deux pompes, la première nourricière et le second est la principale.
- ✓ Un moteur asynchrone.
- ✓ Un multiplicateur de vitesse.
- ✓ Un coupleur hydraulique.
- ✓ Pompe principale.

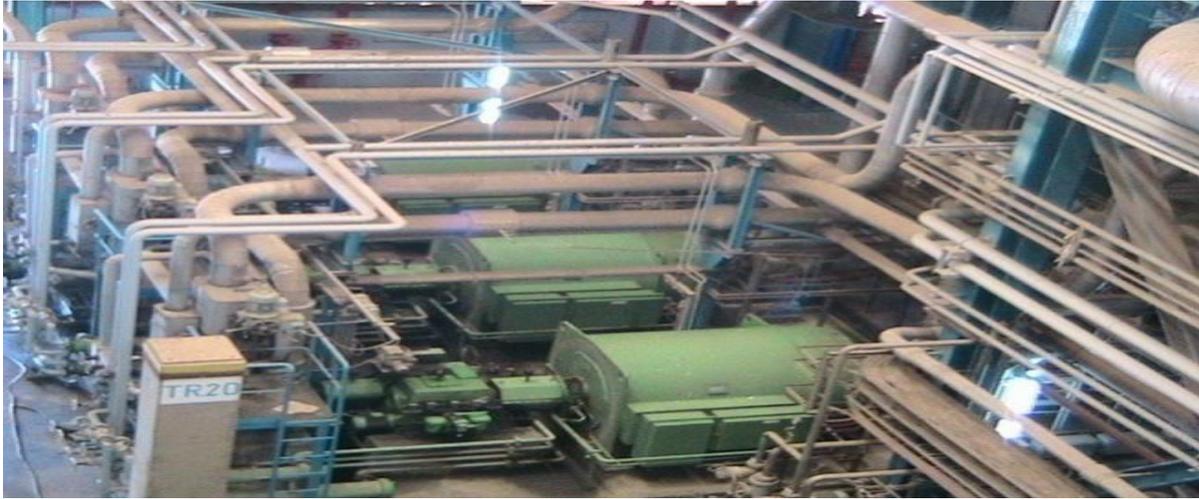


Figure II.1. Photo de la pompe d'alimentation sur site

### II.3. circuit eau d'alimentation RL

L'eau d'alimentation qui provient de la bache alimentaire RH 40B001 par des conduites RL11/12/31 est afflue par déclivité (force de gravitation) à la pompe nourricière en passant par la vanne d'arrêt RL 11/21/31 S001. La pompe nourricière augmente la pression de l'eau d'alimentation RL de 5 bars à 11bars.

Chaque groupes de pompes alimentaires est entrainé par un moteur électrique asynchrone triphasé, la vitesse de rotation de la pompe principale est variable grâce à un coupleur hydraulique réglable, afin de maintenir également le débit d'eau à l'entrée de la chaudière constant.

Le flux d'eau provenant des pompes est regroupé dans la conduite RL40 et amené jusqu'à la vanne d'arrêt RL 50 S001, l'eau d'alimentation arrive par la conduite RL42 à travers les réchauffeurs HP (RF 50 w001 et RF 60 001) à la soupape d'arrêt rapide RL50 S001, par la suite l'eau d'alimentation est réglée suivant le niveau du ballon chaudière à travers la soupape alimentation de réglage RL50 S003.

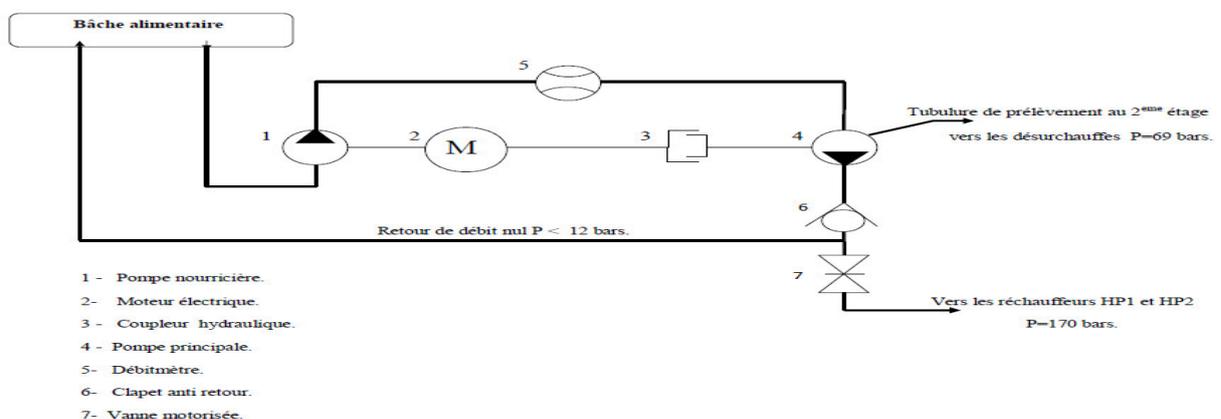


Figure II.2. Schéma du système

## II.4. composition de groupe alimentaire

### II.4.1. La pompe booster (nourricière)

#### II.4.1.1. Définition

C'est une pompe centrifuge, son rôle est d'aspirer l'eau de la bache alimentaire à 5 bar est d'alimenter la pompe principale à 10 bar. Elle est entraînée par un moteur électrique avec une vitesse constante.

#### II.4.1.2. Principe de fonctionnement

Les pompes centrifuges fonctionnaient suivant le principe d'une mise en rotation du fluide pompé dans une roue tournante à grande vitesse (600-3500tr/min).

À la sortie de la roue, le fluide est canalisé dans un diffuseur puis ralenti dans une volute, et la pression dynamique acquise au niveau de la roue (énergie de vitesse ou cinétique) est transformée en pression statique (énergie de pression).

L'énergie du fluide et donc celle provenant de la force centrifuge le débit pompé dépend essentiellement des :

- ✓ différence de pression entre aspiration et refoulement (en mètre colonne de liquide mcl).
- ✓ vitesse de rotation(t/mn) de la roue (régime de la pompe).
- ✓ diamètre de la roue (vitesse périphérique).
- ✓ caractéristique du fluide telle que la viscosité, la température, la densité. [1]



Figure II.3. La pompe nourricière

**II.4.1.3. Les caractéristiques techniques de la pompe nourricière**

Vitesse de rotation	N=1492tr/mn
Fluide refoulé	(eau d'alimentation H <sub>2</sub> O
Température de fluide	T <sup>0</sup> =152 <sup>0</sup> c
Débit refoulé	Q=261.6t/h
Pression d'aspiration	Pa=5bars
Pression de refoulement	Pr=11bars
Nombre d'étage	un étage
Type du palier N°1	palier a roulement à billes [NU313]
Type de palier N°2	palier a roulement à rouleaux [7313B]
Poids de la pompe	808 Kg
Hauteur refoulement	58m

**Tableau II.1. Caractéristique technique de la pompe nourricière****II.4.1.4. Plan de la pompe nourricière**

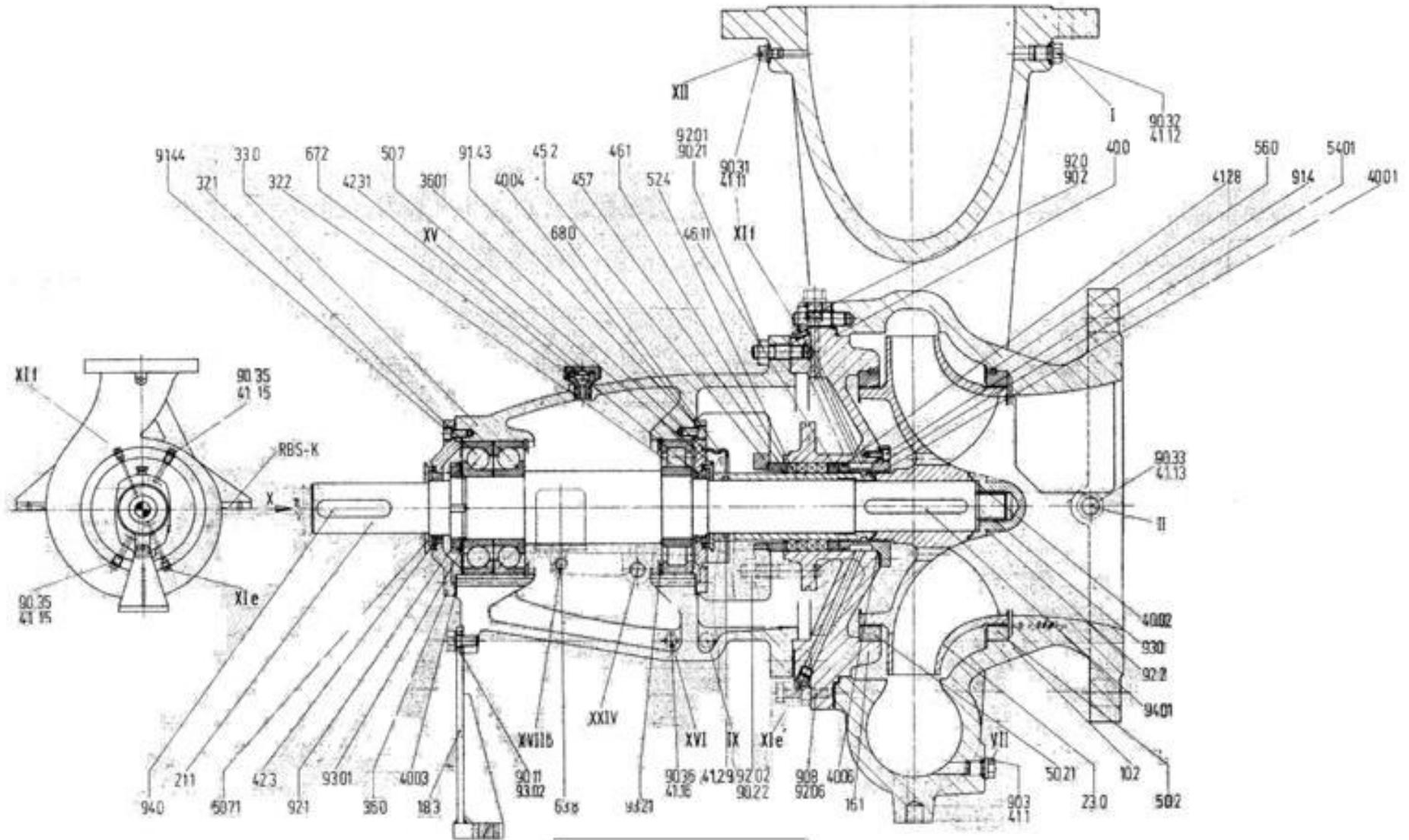


Figure II.4. Schéma technique d'une pompe nourricière

## II.4.1.5. Nomenclature de la pompe nourricière

Repère	Désignation
10.2	Corps à volute
16.1	Fond de corps
18.3	Béquille
21.1	Arbre de pompe
23.0	Roue
32.1	Roulement à billes
32.2	Roulement à rouleaux
33.0	Corps- palier
36.0/ 01	Couvercle de palier
40.0/ 01/ 02/ 03/ 04/ 05/ 06	Joint plat
41.1/ 11/ 12/ 13/ 14/ 15/ 16/ 41	Joint circulaire
41.28	Joint torique
42.3/ 31	Racleur d'huile
45.2	Fouloir de presse-étoupe
45.7	Bague de serrage
46.1/ 11	Garniture de presse-étoupe
50.2/ 21	Bague d'usure
50.7/ 71	Défecteur
52.4	Chemise d'arbre
54.01	Douille de refroidissement
56.0	Goupille
63.8	Graisser à niveau constant.
67.2	Purge
68.0	Tôle déflectrice
90.11	Vis à six pans
90.2/ 21/ 22	Goujon
90.3/ 31/ 32/ 33/ 35/ 36	Bouchon fileté
90.8	Vis à décolage
91.4/ 43/ 44	Vis à six pans creux
92.0/ 01/ 02/ 06	Ecrou
92.1	Ecrou à rainure
92.2	Ecrou de roue
93.0/ 01/ 02	Rondelle de blocage
93.21	Cire clips
94.0/ 01	Clavette

Tableau II.2. Nomenclature de la pompe nourricière

#### **II.4.1.6. Circuit d'huile de refroidissement et de graissage**

##### **a). Refroidissement de la boîte à garniture**

Lorsque la pompe véhicule un liquide, qui sous pression atmosphérique et à température ambiante s'évapore, il est indispensable de refroidir la boîte à garniture pour éviter la marche à sec des tresses due à l'évaporation du liquide.

Le robinet de réglage du débit d'eau à prévoir sur la tuyauterie de sortie, devra être réglé pour que l'échauffement de l'eau de refroidissement ne dépasse pas 15°C.

##### **b). Lubrification des paliers**

Remplir le corps du palier par le trou de remplissage jusqu'à ce que l'huile arrive au trait repère du voyant. Lorsque un contrôle automatique du niveau d'huile a été livré avec la pompe, visser ce dernier dans le trou correspondant et le remplir comme suite :

Abattre dans le réservoir et le remplir d'huile et basculer rapidement dans la position normale pour que l'huile s'écoule dans le corps de palier, répéter cette opération jusqu'à ce que l'huile ne s'écoule plus du réservoir, à ce moment le niveau d'huile désiré est atteint dans le corps de paliers.

#### **II.4.2. Le moteur électrique asynchrone**

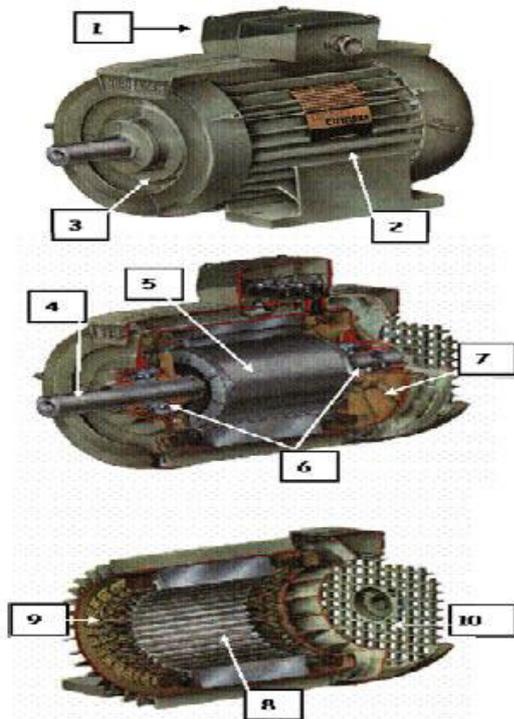
##### **II.4.2.1. Définition**

Le moteur électrique est une machine asynchrone triphasée composée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor). Il a pour but de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique. Il entraîne les deux pompes : la pompe nourricière par une vitesse constante, et la pompe principale avec une vitesse variable grâce au coupleur hydraulique et un multiplicateur de vitesse.

##### **II.4.2.2. Principe de fonctionnement**

On alimente un système de trois bobines décalés de 120° dans l'espace par un système de trois courants triphasés. Il se crée dans l'entrefer un champ magnétique tournant engendrant un couple de force sur le rotor, ce couple de forces agissant sur le rotor tend à rattraper le champ tournant statorique. Le rotor tourne donc dans le même sens que le champ tournant.

II.4.2.3. Composition du moteur



éléments	Constitutifs
1	Plaque à bornes.
2	Carcasse.
3	Flasque avant coté accouplement.
4	Arbre du moteur.
5	Rotor.
6	Roulements.
7	Ventilateur.
8	Stator.
9	Bobinage statorique.
10	flasque arrière coté ventilateur.

Figure II.5.  
Composition du moteur électrique

Tableau II.3.  
La nomenclature du moteur électrique

II.4.2.4. Les caractéristiques techniques de notre moteur MT

Puissance nominale 3000Kw	Tension nominale 6.3KV
Temps de démarrage 5 secondes	L'intensité nominale 330 A
Facteur de puissance $\cos \varnothing=0.86$	Vitesse nominale 1429tr/min
Couplage en étoilée	Niveau de bruit 95db(A)
Sens de rotation à droite	Poids : 15100 kg
Type du palier N°1 : palier lisse	Type de palier N°2 : palier lisse
Fréquence du courant d'alimentation 50Hz	Puissance réelle : 2410 KW.

Tableau II.4. Les caractéristiques techniques du moteur électrique

II.4.2.5. Circuit d'huile de lubrification et de refroidissement

a. Lubrification des paliers

Les paliers à glissement à graissage forcé doivent être raccordés à une installation d'alimentation en huile. Il importe de veiller à ce que les paliers ne soient alimentés que d'huile à dynamo pure dans la gamme de température de 10°C à 40°C au maximum. Le débit

requis d'huile réfrigérante, la qualité d'huile ainsi que la pression d'huile nécessaire avant le palier est indiqué sur la plaque de lubrification. L'huile réfrigérante est amenée directement à la coquille de coussinet. Une soupape de réglage de débit installée avant le palier sert à un dosage du débit d'huile.

### **b. Refroidissement**

#### ✓ **Aération extérieur:**

Le circuit de refroidissement extérieur des moteurs à refroidissement tubulaire est ventilé d'après le principe de la ventilation forcée par des ventilateurs radiaux.

#### ✓ **Ventilation intérieur:**

Les ventilateurs intérieurs conduisent l'air réchauffé vers les tubes de refroidissement où s'effectue l'échange de chaleur. Des conduites aériennes spéciales assurent un refroidissement efficace de tous les organes actifs du moteur. L'aération intérieure est assurée par des ventilateurs axiaux, équipés de pale d'une forme spéciale pour réduire les pertes par ventilateur qui fonction du sens de rotation.

### **II.4.3. Le multiplicateur de vitesse**

Il multiplie la vitesse du moteur pour permettre d'atteindre une vitesse de rotation élevée dans le coupleur. Il est constitué de deux roues à denture hélicoïdale.

#### **II.4.3.1. Caractéristiques**

- ✓ Vitesse de rotation :
  - Entré 1500 tour/min.
  - Sortie 5250 tour/min.
- ✓ Engrenage hélicoïdale :
  - Roue menant  $n_1 = 112$  dents.
  - Roue menée  $n_2 = 32$  dents.
- ✓ Type du palier :
  - N°1 : palier lisse.
  - N°2 : palier lisse.
- ✓ Rapport d'engrènement : 3,5.

### **II.4.4. Coupleur hydraulique**

Sa fonction est de changer la vitesse de rotation de la pompe en variant le niveau d'huile dans le coupleur, et donc le rapport de transmission de mouvement, pour un but bien précis, changer le débit d'eau fournie à la chaudière suivant les besoins de la production.



**Figure II.6. Photo coupleur et multiplicateur**

#### **II.4.4.1. Principe de fonctionnement**

Le couple de la machine menant est transmis par un accouplement à l'arbre d'entrée. Entre cet arbre et l'arbre primaire la transmission de couple est faite par des engrenages cylindriques à dentures hélicoïdales.

Ce couple accélère le fluide qui se trouve dans la roue primaire (roue pompe) du coupleur. La vitesse de fluide est ralentie par la roue secondaire (roue turbine), ainsi le couple est transmis à l'arbre secondaire (arbre de sortie). La condition de l'établissement du circuit d'huile de fonctionnement est une différence de pression entre la roue primaire et secondaire, il est alors nécessaire que la vitesse de la roue secondaire soit inférieure à celle de la roue primaire. Pour la transmission de la puissance une déperdition (glissement de 2.7%) est donc nécessaire.

Donc on constate que :

- ✓ Si la quantité d'huile augmente, le glissement diminue par conséquent la vitesse de sortie augmente.
- ✓ Si la quantité d'huile diminue, le glissement augmente et la vitesse de la sortie diminue.

#### **II.4.4.2. Description**

La transmission du couple entre l'arbre primaire de la machine montante et l'arbre d'entrée du coupleur se fait par des engrenages à dentures hélicoïdales (multiplicateur de vitesse).

Le carter fait en fonte grise est vissé (attaché) à la fonction tandis que le réservoir d'huile est fixé au carter dans le trou de fondation.

La servocommande pour le déplacement hydraulique de l'écope est montée au-dessus du coupleur. Les instruments de surveillance sont bien disposés sur un tableau d'instrument fixé au carter.

### II.4.4.3. Composition du coupleur

#### ✓ **Transmission mécanique**

Le couple de la machine menant est transmis par un accouplement à l'arbre d'entrée de ce dernier par des engrenages à l'arbre primaire. Le pignon de l'arbre primaire est enfoncé directement sur l'arbre correspondant moyennant un joint ajustement serré est logé au carter radialement et axialement par des butées.

#### ✓ **Rotor**

Le rotor comprend l'arbre primaire, la roue primaire, la coquille, l'arbre secondaire.

#### ✓ **Corps d'écope**

Le corps de l'écope a une fonction multiple.

Logement de l'écope et de la commande de l'écope ainsi que celui des paliers et butées, refoulement de l'huile enlevée au carter d'huile de fonctionnement.

#### ✓ **Logement**

Les arbres d'entrées, primaire et secondaire du coupleur sont logés dans les paliers lisses, pour faciliter le montage.

Les paliers sont exécutés en deux pièces et pourvus d'un coussinet pour les deux sens de rotation. Les jeux des paliers sont choisis de sorte qu'un film suffisant est assuré pour toute condition de régime admissible et qu'un remplacement sans finissage des paliers.

Les butées sont des paliers oscillant à segment, pour assurer une bonne force portante.

#### ✓ **Servo-commande**

Pour maintenir les charges sur la Servo-commande à un niveau assez bas, le déplacement de l'écope se fait par commande séquentielle hydraulique.

#### ✓ **Pompe principale**

La pompe principale c'est une pompe à engrenage alimentant les circuits de fonctionnement et de graissage est entraînée à partir de l'arbre d'entrée par un accouplement. La pompe aspire l'huile par la conduite d'aspiration, et ensuite elle la refoule au circuit d'huile.

#### ✓ **Pompe de graissage auxiliaire**

La pompe à engrenage logée dans des paliers lisses est entraînée par un moteur électrique moyennant un accouplement élastique. La pompe de graissage auxiliaire à commande électrique assure l'alimentation en huile de graissage pendant le démarrage et la marche par inertie ainsi qu'en cas de panne.

#### ✓ **Filtre d'huile**

Le filtre d'huile est un filtre double à commutation. Lorsque le levier de reversement est bien mis, ce n'est qu'un demi-filtre qui est en service pour le filtrage de l'huile.

✓ **Réfrigérant d'huile**

Le réfrigérant d'huile est constitué par un faisceau de tube en cupronickel ou autre alliage selon la nature de l'eau de réfrigérant. L'installation comprend au moins deux réfrigérant dont un seul est en service.

✓ **Soupape de mise en circuit**

C'est la soupape de mise en circuit qui assure l'alimentation du circuit d'huile de graissage en huile sous pression requise pour la lubrification des paliers et des engrenages.

✓ **Limiteur de pression**

Après avoir démonté le bouchon fileté, le limiteur de pression peut être ajusté de dehors en tournant la vis d'ajustage. La pression d'huile de fonctionnement est ajustée moyennant le limiteur de pression à environ 1.7 bar.

✓ **Soupape de réglage de température**

La soupape de réglage de température est ajustée à un certain débit minimum. Pour les températures d'huile de fonctionnement en montée, la soupape s'ouvre, le débit d'huile de fonctionnement augmente et le dégagement de la chaleur de déperdition qui se produit dans le coupleur se fait plus vite, il en résulte une stabilisation de la température d'huile de fonctionnement.

#### II.4.4.4. Les caractéristiques techniques du coupleur hydraulique

Vitesse de moteur d'entraînement	N=1492tr/min
Vitesse de l'arbre primaire d'entrée	N=5380tr/min
Vitesse max de l'arbre secondaire	N=5200tr/min
Rapport d'engrenage	R=3.6
Facteur de glissement en plein charge	G=2.7%
Volume d'huile dans le carter	V=600L
Type d'huile utilisé	TORBA 32

**Tableau II.5. Les caractéristiques techniques du coupleur hydraulique**

**II.4.4.5. Les paramètres (température, pression d'huile) aux cours de fonctionnement**

Températures des paliers	Valeur de consigne jusqu'à	83 °C
	Alarme à	90 °C
	Arrêt à (déclanchement)	95 °C
Température d'huile de fonctionnement après le réfrigérant	Valeur de consigne jusqu'à	(35-70) °C
	Alarme à	75 °C
	Arrêt à (déclanchement)	85 °C
Température d'huile de graissage après le réfrigérant	Valeur de consigne jusqu'à	(35-50) °C
	Alarme à	53 °C
	Arrêt à (déclanchement)	60 °C
Pression d'huile de graissage	Valeur de consigne jusqu'à	2.5 bar
	Alarme à	1 bar
	Arrêt à (déclanchement)	0.5bar
Pression différentielle filtre d'huile	Passage d'un demi-filtre a l'autre et nettoyer a 0.6 bar	

**Tableau II.6. Les paramètres (température, pression d'huile) aux cours de fonctionnement****II.4.4.6. Circuit d'huile de fonctionnement et de graissage****a).Circuit d'huile de fonctionnement**

Le circuit d'huile de fonctionnement entre le coupleur réglable et le réfrigérant forme un système fermé. L'huile de fonctionnement est refoulée par la pression dynamique à l'écope a partir du rotor à l'échangeur thermique et retournée au coupleur. Le circuit d'huile de fonctionnement est alimenté en huile excédentaire venue du circuit d'huile de graissage par l'intermédiaire de la soupape de mise en circuit. Le limiteur de pression maintient la pression d'huile de fonctionnement avant la soupape de réglage de température au niveau de l'ordre de 1.7 bar.

**b).Circuit d'huile de graissage**

L'huile est refoulée par la pompe principale (pompe à engrenage) a travers l'échangeur thermique et le filtre aux différents points de lubrification.

Une pompe de graissage auxiliaire à commande électrique (pompe à engrenage) est montée pour assurer l'alimentation en huile de graissage pendant le démarrage. La pompe de graissage auxiliaire s'arrête dès que le refoulement est assuré par la pompe mécanique (principale).

La pompe de graissage auxiliaire est mise en circuit lorsque :

- ✓ A la suite d'une panne.
- ✓ La pression de graissage tombe à environ 1 bar.

En cas de panne continue, le moteur principal doit être arrêté.

**Remarque**

Pour l'alimentation en huile de fonctionnement et de graissage en utilise la même huile.

Débit d'huile = quantité d'huile nécessaire au circuit d'huile de graissage + quantité d'huile alimentée au circuit d'huile de fonctionnement.

**II.4.4.7. Réglage de la vitesse de sortie****✓ Pour augmenter la vitesse de sortie**

L'écope s'éloigne du niveau d'huile existant dans le coupleur, la quantité d'huile enlevée diminue, le débit de pompe de remplissage utilisé pour remplir la chambre de travail (chambre d'accouplement), donc la transmission sera maximum.

**✓ Pour diminuer la vitesse de sortie**

L'écope s'immerge dans l'huile, la quantité d'huile enlevée augmente, donc la vitesse de sortie diminue.

L'huile enlevée et le surplus d'huile sont refoulés vers le carter d'huile.

**II.4.5. La pompe principale****II.4.5.1. Définition**

C'est une pompe centrifuge qui reçoit l'eau d'une conduite verticale, et le refoule en verticale. Son rôle est d'alimenter le ballon chaudière avec une pression de 160 bars. Elle est entraînée par un moteur électrique à travers un multiplicateur de vitesse, et un coupleur hydraulique. Cette pompe exige une pression d'entrée égale ou supérieure à 10 bars, ce qui explique le besoin d'une pompe nourricière.



Figure II.7. Photo pompe principale

### II.4.5.2. Description

C'est une pompe centrifuge multicellulaire à six étages à reprendre diffuseur-volte avec aspiration radiale et refoulement radiale. L'entraînement de la pompe se fait par un moteur électrique de puissance 2168w et vitesse de rotation de 1490tr /mn.

La pompe alimentée la chaudière par l'eau chaude décalée et déminéralisée avec une pression. La pompe admet l'eau par son corps d'aspiration verticalement par rapport à l'axe de son arbre.

L'eau aspirée rentre à la première roue a une pression de 11 bars. Ensuite, l'eau arrive au diffuseur pour augmenter la pression.

De cette manière l'eau continue son écoulement à travers les autres étages jusqu'à au sixième étages, sa pression atteint 170bars qui quitte la pompe à travers le corps de refoulement.

L'étanchéité entre les étages est assurée par des joints toriques disposés entre les étages.

### II.4.5.3. Accessoire de la pompe principale

Divers tuyauteries sont équipées sur la pompe notamment :

- ✓ Tuyauterie de retour des fuites du dispositif d'équilibrage :

Elle va de boîte de garniture cotée refoulement au corps d'aspiration de la pompe. Elle ne comporte ni diaphragme ni robinet, mais seulement un orifice de vidange et un manomètre.

- ✓ Tuyauterie d'eau de refroidissement secondaire(VG) :

Sont montées en usine dans les limites d'encombrement du la plaque support de pompe.

Les éléments à refroidir :

- ✓ Huile de graissage des paliers lisse : lubrifiée par bague de graissage ou sous pression (l'entrée d'huile 40°C, la sortie d'huile 45°C).

- ✓ Les boîtes à garniture mécanique : coté aspiration et coté refoulement réglé le débit (eau de refroidissement) pour obtenir une température de sortie d'eau de 40-50°C.

- ✓ Fouloir de presse-étoupe.

- ✓ Tuyauterie débit nul :

Un dispositif de débit nul n'évite la pompe à tout échauffement dangereux au faible débit, à cet effet, une soupape de décharge vers la bêche alimentaire est équipée au refoulement de la pompe.

Cette soupape est s'œuvre quand l'écart de température entrée et sortie de la pompe atteint une certaine valeur (25°C par exemple) et se ferme quand cet écart redescend à une valeur nettement inférieure à 5°C. Si l'on ferme complètement la soupape de réglage située au refoulement, on annule le débit de refoulement de la pompe, la pression s'élève dans le corps de la pompe et atteint sa valeur maximale.

L'eau contenue dans la pompe n'étant pas renouvelée, il est brassé par les roues ce qui apporte une dépense d'énergie transformée en chaleur.

Cette chaleur est donc transmise à l'eau et à la pompe, il en résulte :

✓ Une augmentation de la température de l'eau qui peut atteindre sa température d'ébullition correspondant à sa pression. (formation des bulles de vapeur amenant la cavitation, donc la détérioration plus au moins rapide de la pompe).

✓ Augmentation de la température des pièces internes de la pompe (dilatation anormale).

#### II.4.5.4. Caractéristiques techniques

Fluide refoulé	Eau d'alimentation
Température de fluide	T = 152°C
Pression d'aspiration	Pa = 11 bars
Pression de refoulement	Pr = 177 bars
Débit d'eau refoulé	Q = 261.6 t/h
Vitesse de rotation	N = 5200 tr /mn
Nombre d'étage	six étages
Nombre d'aube	sept aubes
Les paliers	Deux paliers lisses

**Tableau II.7. Caractéristiques techniques de la pompe principale**

A cause de la grande hauteur manométrique de refoulement, la poussée axiale est très élevée, pour équilibrer cette poussée on utilise soit :

- ✓ Un disque d'équilibrage.
- ✓ Un tambour d'équilibrage.
- ✓ Une butée à patins. (patin à roulettes).

#### II.4.5.5. Lubrification des paliers

Le Système de lubrification des garnitures mécanique est assuré par deux circuits : l'un en amont et l'autre en aval de la pompe principale, c'est un circuit fermé (eau déminéralisée).

#### II.4.5.6. Refroidissement

Le circuit de refroidissement secondaire (VG) sert à refroidir huile de graissage et de fonctionnement à travers les réfrigérant.

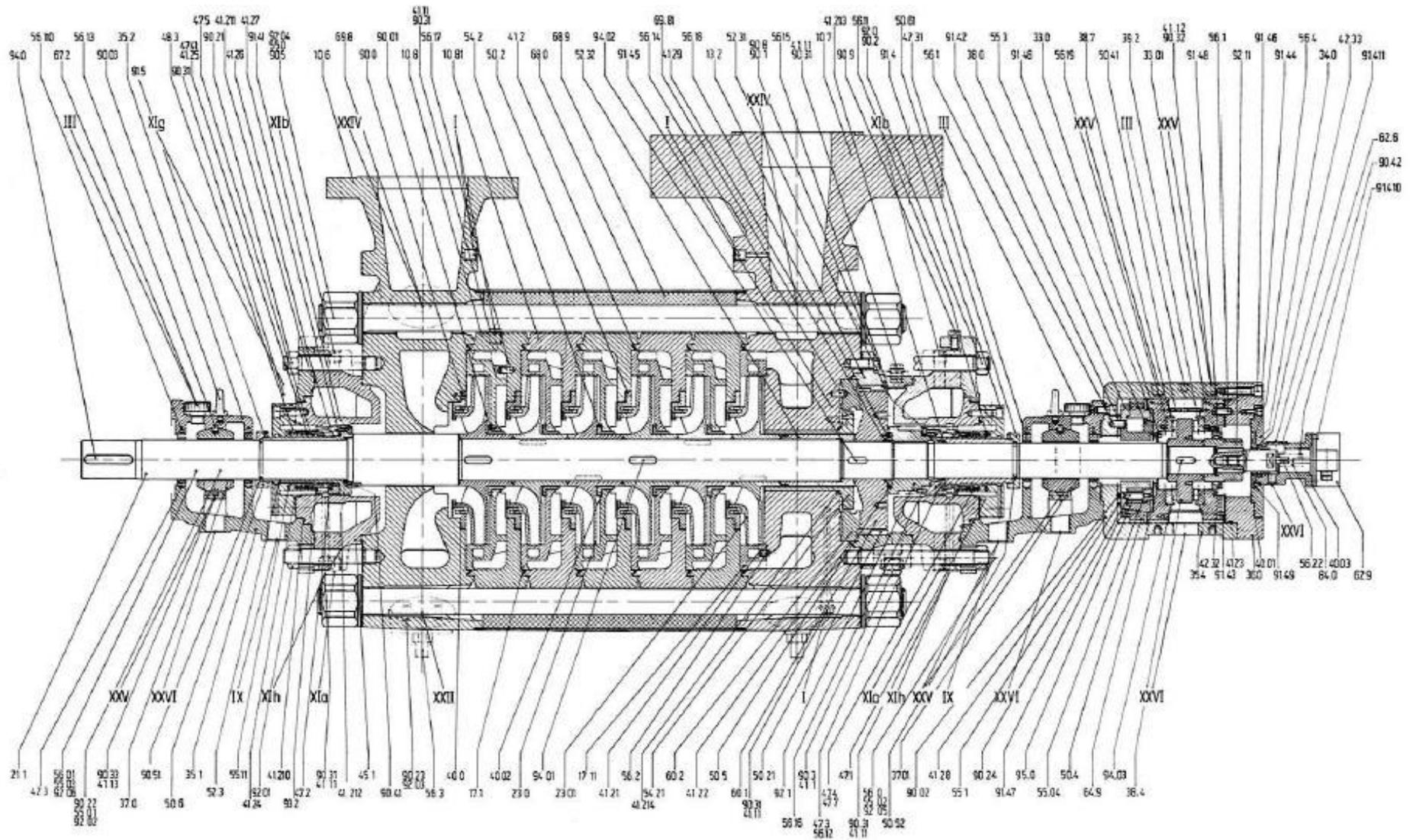


Figure. IV.8. Schéma technique d'une pompe principale.

## II.4.5.7. La nomenclature

Repère	Désignation
10.6	Corps d'aspiration
10.7	Corps de refoulement
10.8 / 81	Cops d'étage
17.1 / 11	Diffuseur
21.1	Arbre de pompe
23.0 / 01	Roue
35.1	Corps de palier partie inférieur
35.2	Corps de palier partie supérieur
35.4	Carter de butée
38.0	Composant de butée
45.1	Corps de boîte à garniture
47.1	Couvercle de garniture
47.7	Ressort
50.2 / 21	Bague d'usure sur le corps
52.3 / 31 / 32	Chemise d'arbre
56.3	Rondelle d'entretoise
60.1	Disque d'équilibrage
60.2	Contre disque d'équilibrage
62.9	Transmetteur de vitesse
84.0	Accouplement
90.4 / 41 / 42	Vis sans tête partiellement filetée
90.8	Vis de décolage
91.4 / 41 / 42 / 43 / 44 / 45 / 46 / 47 / 48 / 49	Vis à tête à six pans creux
92.0 / 01 / 02 / 03 / 04 / 05 / 06	Ecrou
92.1 / 11	Ecrou d'arbre
94.0 / 01 / 02 / 03	Clavette

Tableau II.8. La nomenclature de la pompe principale

## II.5. Mise en service du groupe motopompe alimentaire

### II.5.1. Mise en marche de la pompe nourricière

Avant qu'elle soit mise en marche il doit satisfaire aux conditions et avec l'ordonnancement suivantes :

- ✓ Mettre la pompe auxiliaire de pré graissage en service.
- ✓ Ouvrir la conduite d'arrivée d'eau de refroidissement du réfrigérant d'huile.
- ✓ Ouvrir la tuyauterie de débit nul 10RL12 D001 à 100%.
- ✓ Ouvrir la vanne d'aspiration 10RL11 S001 à 100%.
- ✓ Mettre le moteur d'entraînement en marche.

### II.5.2. Mise en marche de la pompe principale

Avant qu'elle soit mise en marche il doit satisfaire aux conditions suivantes :

- ✓ Mettre le coupleur a zéro(0), libération de la pompe principale.
- ✓ La vanne de refoulement soit fermée 10RL22 S001.
- ✓ La soupape alimentaire soit fermée 10RL50 S003.
- ✓ Mettre les réchauffeurs HP5, HP6 sur by-pass.

### II.5.3. Démarrage par protection du groupe motopompe alimentaire

Pour que le groupe motopompe qui est à l'arrêt réponde au signal de démarrage par protection il faut que les conditions citées dans l'organigramme doivent elle satisfaites.

Voici l'organigramme de démarrage du groupe motopompe par protection :

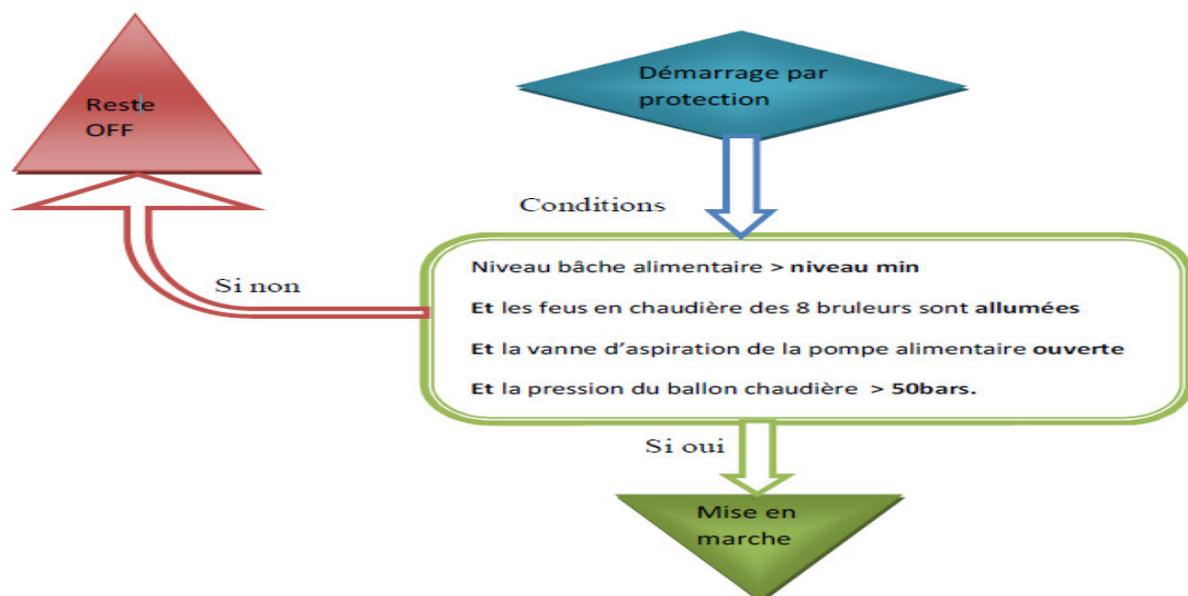


Figure II.9. Organigramme du démarrage du groupe motopompe par protection

### II.5.4. Mise à l'arrêt du groupe motopompe alimentaire

Pendant la période dont la pompe fonctionne avec la vanne de refoulement 10RL22 s001 partiellement ou totalement fermée :

- ✓ Ouvrir la tuyauterie de débit nul 10RL12 D001 (refoulement vers la bêche alimentaire).
- ✓ Fermée la vanne de refoulement 10RL22 S001.
- ✓ Arrêter le moteur d'entraînement.

Après quelques minutes :

- ✓ Arrêter la pompe auxiliaire de pré graissage.
- ✓ Fermer le circuit d'eau de refroidissement secondaire (VG).

### II.5.5. Arrêt par protection du groupe motopompe alimentaire

Dans ce cas, si l'une des conditions citées dans l'organigramme est satisfaite, le groupe motopompe répond au signal de l'arrêt par protection, donc la mise hors service du groupe motopompe alimentaire.

Voici l'organigramme de l'arrêt du groupe motopompe par protection :

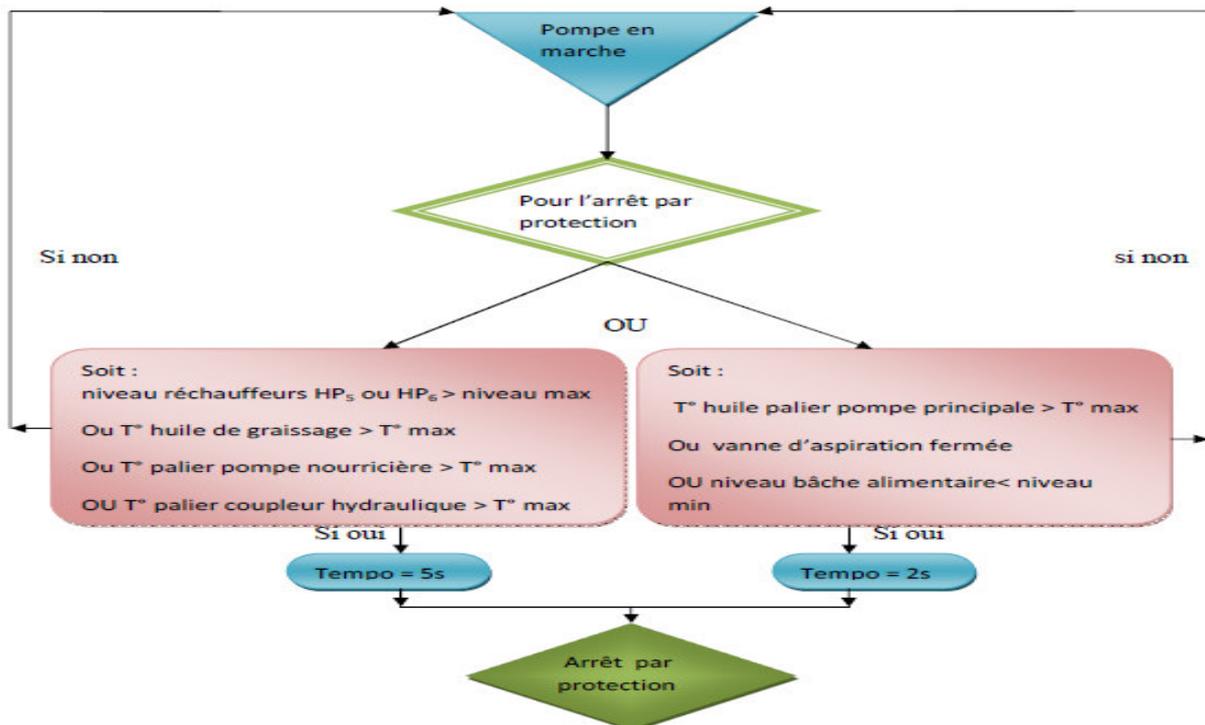


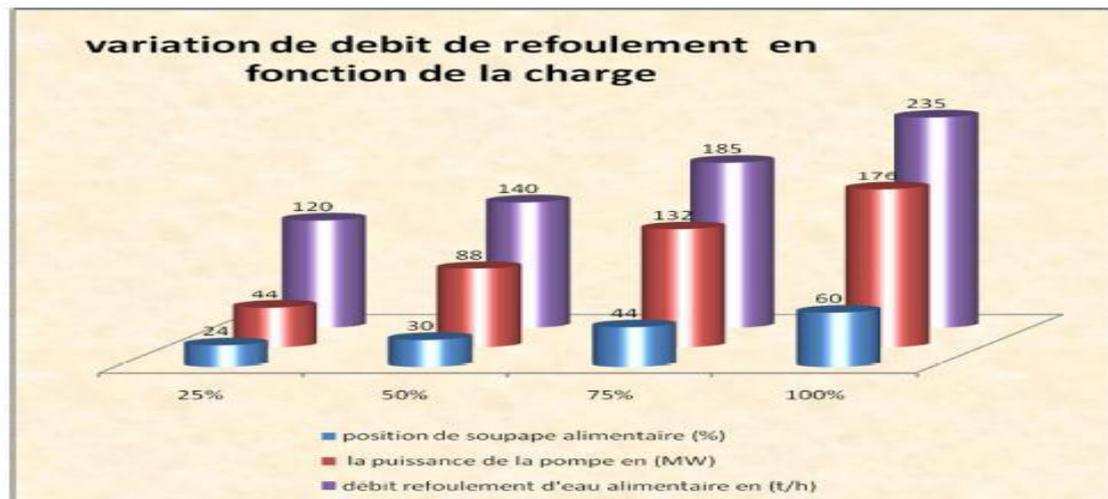
Figure II.10. Organigramme de l'arrêt du groupe motopompe par protection

### II.5.6. Les différentes charges du groupe motopompe alimentaire

Notre groupe motopompe alimentaire nous a permis de travailler aux différentes charges grâce à un coupleur hydraulique tel que :

- ✓ 25% de la charge correspond a une puissance de 44 MW (méga watt).
- ✓ 50% de la charge correspond à une puissance de 88 MW.
- ✓ 75% de la charge correspond à une puissance de 132 MW.
- ✓ 100% de la charge correspond à une puissance de 176 MW.

Voici des valeurs des paramètres de fonctionnement d'eau alimentaire (débit, ouverture de la soupape alimentaire, la puissance) aux déférentes charges (25%,50%,75%,100%) :



**Figure II.11. Diagramme variation de débit en fonction de la charge**

#### Remarque :

✓ En augmente la charge de 25% à 100% on constate que le débit de refoulement augmente qui est correspondant à une ouverture de la soupape régulatrice RL50 S001 bien déterminé. Ce qui est normale pour permettre de lisser passer le débit d'eau nécessaire (pression au niveau de la soupape régulatrice est maintenue constante a 168 bars).

✓ L'augmentation de la charge de 25% à 100% est un phénomène physique intervienne au sein de l'alternateur (générateur de tension) qui représenté par un couple résistant (freinage) qui augmente suivant la charge, pour vaincre ce couple résistant par la turbine. On doit fournir un débit vapeur a la turbine de tel sorte maintenir la vitesse de rotation de l'ensemble (groupe turbo-alternateur) à 3000 tr/mn.

✓ Notons que les conditions de fonctionnement normal exigent que la pression au niveau de ballon chaudière égale a 160 bar, son volume est divisé en 50% vapeur d'eau et 50% eau d'alimentation.

Il faut que le débit vapeur sortant au niveau de ballon chaudière égale le débit d'eau d'alimentation rentrant au ballon chaudière qui est débité par notre pompe d'alimentation. Donc notre pompe d'alimentation elle est toujours entraine de faire l'appoint du ballon chaudière.

## II.6. Redondance des groupes motopompes alimentaire

### II.6.1. Définition

La redondance consiste à disposer plusieurs exemplaires d'un même équipement à une solution industrielle. Selon les circonstances elle est utile :

- ✓ pour augmenter la capacité totale ou les performances d'un système.
- ✓ Pour garantir la disponibilité de production.
- ✓ Pour combiner ces deux effets.

La redondance utilisé dans toutes les installations stratégique qui ayant une fonction principale dans une chaine de production.

Dans notre cas et comme nous avons dit que chaque tranche de production est équipée par trois(03) groupes motopompes alimentaires, parmi les deux(02) sont en service et le troisième est présélectionnée (stand-by).

### Conclusion

D'après l'étude descriptive qu'on a faite sur la pompe alimentaire on a constaté que cette dernière est un organe vital pour une tranche de production de l'électricité dans la centrale thermique de RAS-DJINET.

**Introduction**

Aujourd'hui, les machines tournantes sont présentes dans d'innombrables applications industrielles, telles que les centrales thermique, les usines pétrochimiques, le domaine de l'aéronautique....etc. Leurs rôle est si important pour que tout défaut dans ces machines conduirait à des pertes au niveau de la production et des équipements et compromettrait même dans certaines situations la sécurité des travailleurs ou usagers. Pour ces raisons, la maintenance industrielle est devenue un enjeu clef pour la durabilité des machines et des installations mécaniques dont dépend l'accroissement de la productivité des unités de production.

Ce chapitre donne des notions sur la maintenance industrielle et ses différents types. Ainsi qu'un aperçu sur les techniques les plus utilisées et les applications dans la surveillance industrielle des machines tournantes.

**III.1. Maintenance**

Dans les entreprises, la maintenance est considérée comme fonction stratégique et est définie comme étant un ensemble des actions techniques, administratives et de management destinées à maintenir un bien industriel en bon état de marche durant un cycle de vie ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [2-3].

**III.2. Différents types de maintenance**

Selon l'évolution de la maintenance, on distingue trois types de maintenance [4] comme le montre la figure (III.3):

- ✓ La maintenance corrective (MC).
- ✓ La maintenance préventive systématique (MPS).
- ✓ La maintenance préventive conditionnelle (MPC).

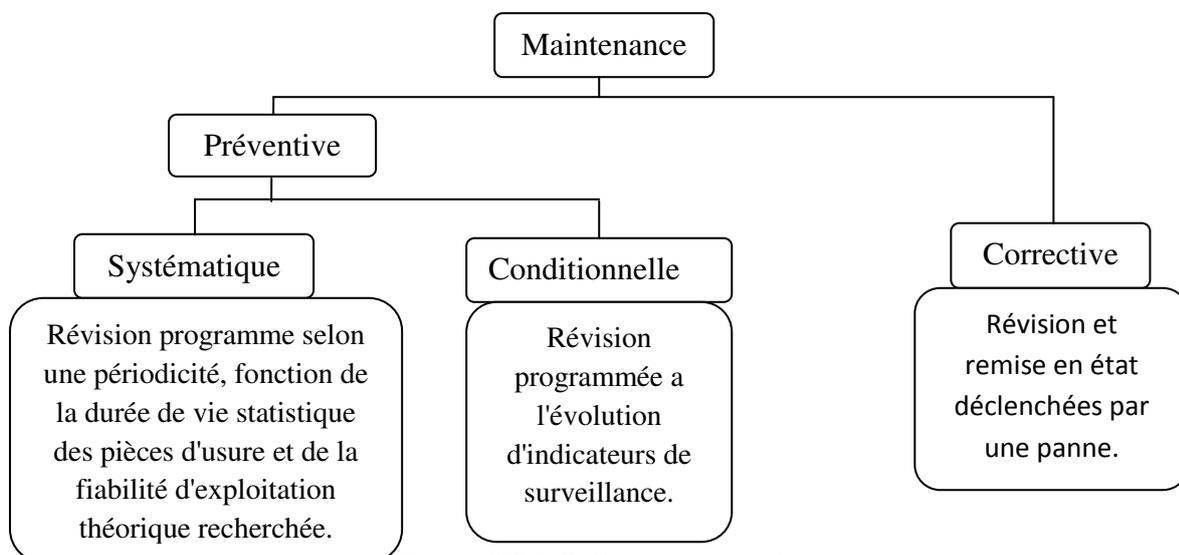


Figure III.1. Différents types de maintenance

### III.2.1. Maintenance corrective

La maintenance corrective (appelée également réactive) est exécutée après détection d'une panne et est destinée à remettre un bien dans un état lui permettant d'accomplir une fonction requise. Ainsi l'application d'actions relevant de la maintenance corrective vient en réponse directe à l'apparition d'une défaillance [4].

La figure I-4 présente ces activités qui touchent généralement deux types d'intervention :

- ✓ Les interventions palliatives qui remettent le système en état de fonctionnement provisoire ;
- ✓ Les interventions curatives permettant de réparer le système d'une manière définitive.

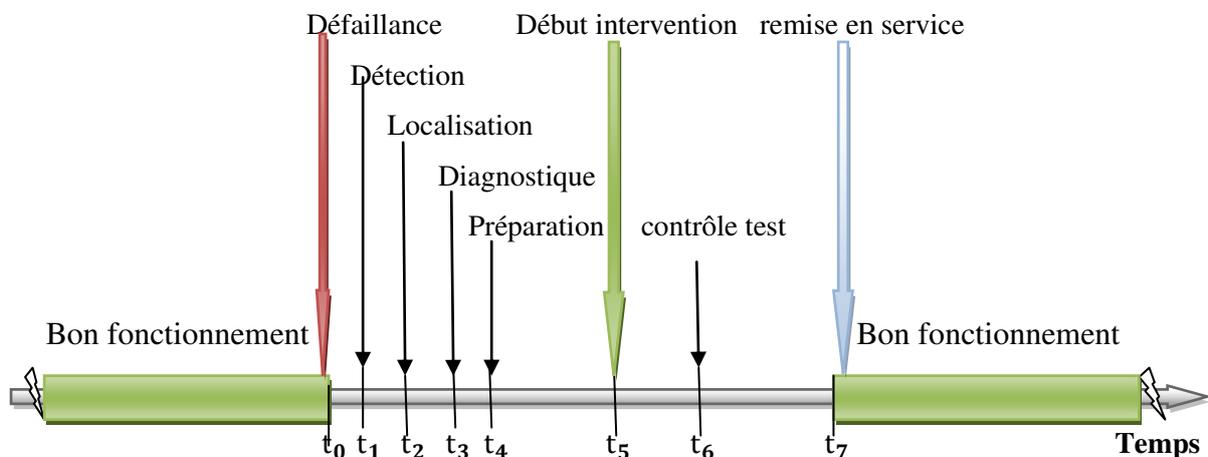


Figure III.2. Principe de la maintenance corrective

### III.2.2. Maintenance préventive

La maintenance préventive dont le but est de minimiser l'apparition des défaillances des équipements, est exécutée avant la détection de toute panne [4]. La continuité du service s'en voit, ainsi, assurée, car ce type de maintenance permet :

- ✓ La diminution du temps d'arrêt dû aux pannes ;
- ✓ L'augmentation de la durée de vie des équipements ;
- ✓ La diminution ou même par annulation des défaillances en service ;
- ✓ L'élimination des causes d'accidents dus aux dépannages ;
- ✓ La décision d'opérations de révision au moment des arrêts de travail.

Parmi les techniques de maintenance préventive, on distingue deux types de maintenance (systématique et conditionnelle).

#### III.2.2.1 Maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique est exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un échéancier fixé sur la base de la durée de vie minimale des composants mécaniques

ou électriques d'une machine [4]. En d'autres termes, les interventions sont effectuées à des dates planifiées à l'avance, avec une périodicité dépendant de différents facteurs d'usures des matériels (voir figure III.3).

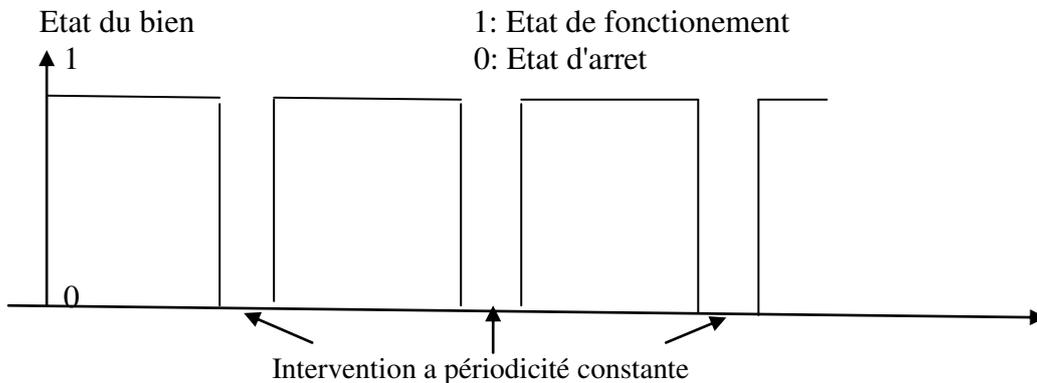


Figure III.3. Principe de la maintenance préventive systématique

### III.2.2.2. Maintenance préventive conditionnelle (prédictive)

La maintenance préventive conditionnelle (MPC) s'intéresse plus étroitement à l'état du système. Tout en étant, comme la précédente, exécutée à titre préventif, elle reste conditionnée par l'état de la machine. Ainsi, ce type de maintenance s'appuie sur la surveillance du procès et/ou des paramètres indicatifs (indicateur vibratoire, température, ..., etc.) de son fonctionnement pour décider et intégrer des actions conséquentes. Cette définition est illustrée dans la figure III.4.

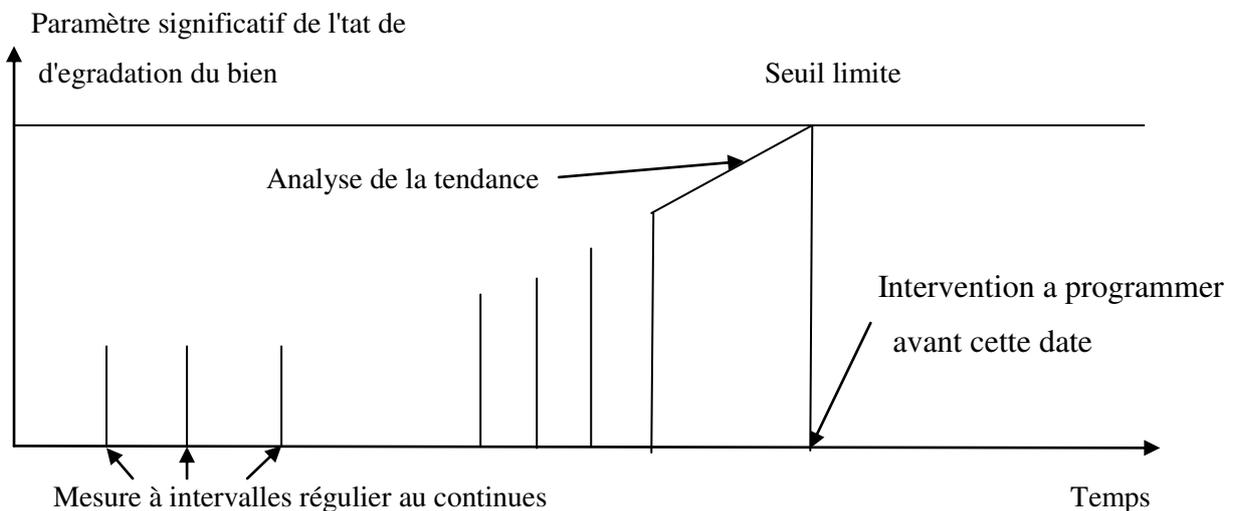
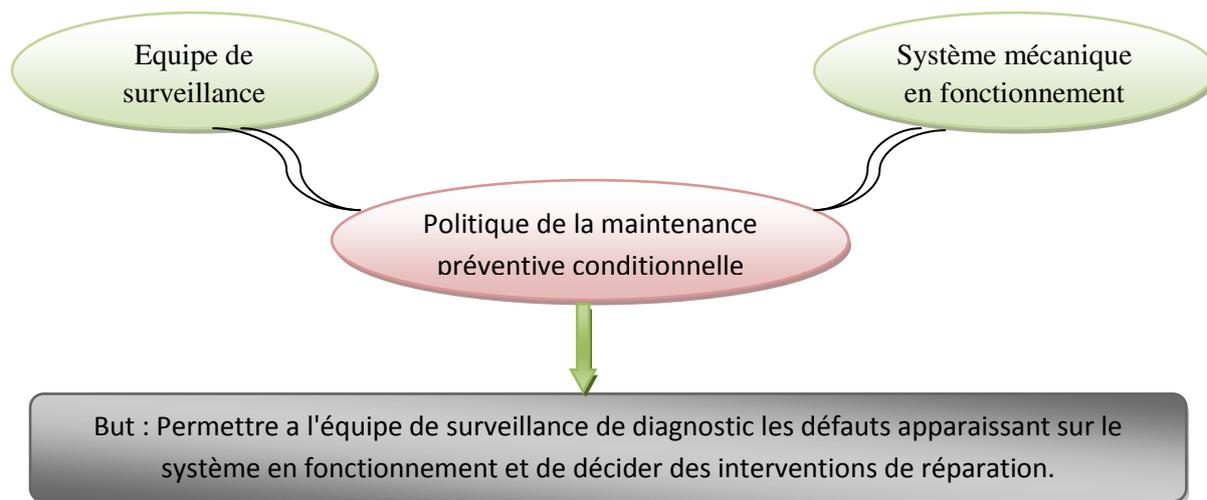


Figure III.4. Principe de la maintenance préventive conditionnelle

Devant la diversité et les spécificités des systèmes mécaniques, l'application de politique de maintenance préventive conditionnelle dépend des outils disponibles ou à développer et qui doivent être appropriés. La politique adoptée et les moyens mis en œuvre sont à même de permettre à l'équipe de surveillance de diagnostiquer les défauts apparaissant sur le système en fonctionnement et de décider des interventions de réparation (voir Figure III.5).



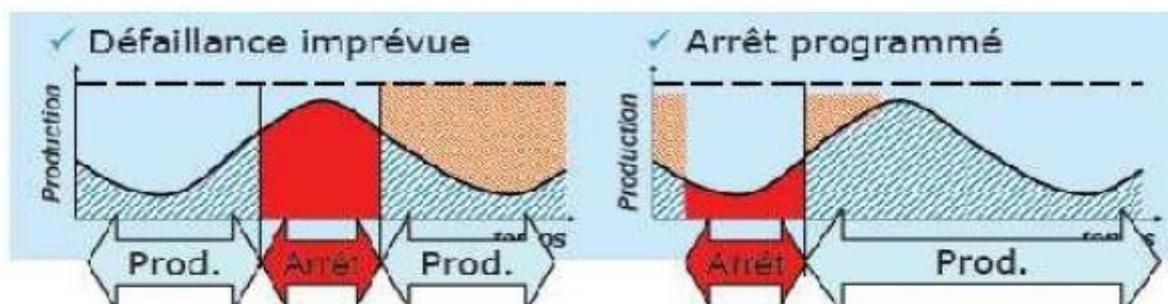
**Figure III.5. Enoncé de la fonction globale d'une politique de maintenance préventive conditionnelle**

### III.2.3. Principaux Avantages de la M. P. C

Répondant au critère d'optimisation de processus et au souci de rationalisation des ressources, tous types confondus, la description décrite ci-dessus, semble être très appropriée, notamment lorsqu'il s'agit de processus importants et/ou des systèmes complexes. On compte parmi les avantages de la maintenance préventive conditionnelle, ce qui suit:

- ✓ Diminution du nombre d'arrêts de production intempestifs.
- ✓ Réparation des machines seulement lorsqu'elles le nécessitent.
- ✓ Augmentation de la disponibilité des équipements.
- ✓ Suppression des arrêts systématiques.
- ✓ Limitation de la gravité des réparations.
- ✓ Intervention plus ciblée (localisation préalable des pannes).
- ✓ Réduction des coûts de réparation.
- ✓ Amélioration de la sécurité.
- ✓ Approvisionnement des pièces de rechange selon les besoins réels.

Le choix optimal du temps d'intervention de la maintenance et son impact sur la production est illustré dans la figure III.6.



**Figure III.6. Choix optimal du temps d'intervention de la maintenance et son impact sur la production**

### III.3. Surveillance

La comparaison des mesures vibratoires effectuées à intervalles de temps déterminés dans des conditions de fonctionnement identiques permet de suivre l'évolution d'un défaut en exploitant le signal vibratoire [5]. A partir de ces mesures, il est possible d'obtenir un historique de l'évolution du défaut par rapport à un niveau de référence caractérisé par la signature vibratoire de la machine en bon état. La norme [ISO10816] fixe des critères d'évaluation des niveaux vibratoires permettant d'estimer la sévérité des défauts et donc de l'état de fonctionnement de la machine. La sévérité vibratoire représente la valeur efficace de la vitesse de vibration mesurée dans la bande fréquentielle [10-1000 Hz] sachant que les critères d'évaluation dépendent de la classe dans laquelle la machine se situe. Mais ces méthodes dites « mesures des niveaux globaux » restent imprécises et ne permettent pas la détermination de la cause de l'augmentation du niveau vibratoire.

#### III.3.1. Etapes en processus de surveillance

La surveillance se compose de deux phases principales qui sont la détection et le diagnostic (voir la figure III.7) [6]:

✓ **La détection** : Dont le but est de déterminer la présence ou non d'un défaut affectant le procédé. Elle consiste à analyser et déceler ses effets sur le système (symptômes).

✓ **Le diagnostic** : Se basant sur les défauts détectés, cette étape consiste en :

- Une localisation : Qui sert à déterminer le type de défaut affectant le procédé en moyen d'indications relatives à l'élément en défaut ;
- Une identification : Qui sert à déterminer exactement la cause de ces symptômes en Identifiant la nature du défaut.

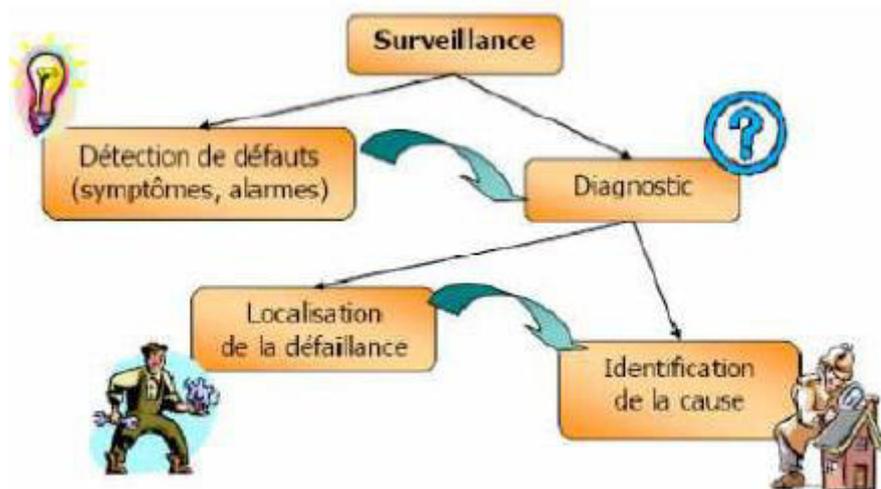


Figure III.7. Composantes de la surveillance industrielle

### III.3.2. Types de surveillance

Selon leur importance et leur criticité, les machines peuvent nécessiter un système de surveillance en ligne doté de fonctions de diagnostic ou un système de surveillance hors ligne, tel est le cas des machines simples comme les pompes ou les ventilateurs. On distingue fondamentalement deux types de surveillance (voir figure III.8).



Figure III.8. Les types de surveillance des machines

#### III.3.2.1. Surveillance "On-line" ou suivi continu

Ce type de surveillance est utilisé en permanence sur des machines spécifiques et dont il surveille constamment les états de fonctionnement par la mesure en continu des paramètres physiques notamment ceux à évolution rapide tels que vitesse, traction, vibrations, etc. Ainsi, il joue un rôle important dans l'efficacité de la conduite de processus, générant immédiatement, dans la salle de contrôle, un signal d'alarme lors d'un changement soudain de l'état de la machine. Cette technique se base, généralement, sur un diagnostic dit à base de modèles qui repose sur une modélisation comportementale et structurelle du système à diagnostiquer. Son principe consiste à faire une comparaison entre le comportement prédit issu d'un modèle de représentation (de bon fonctionnement) et le comportement réellement observé. Cette comparaison permet de détecter les incohérences afin de déduire les causes de défauts. Le maintien d'un bon fonctionnement de l'ensemble passe donc par la mise en place des outils de détection des défaillances éventuelles et des systèmes de commande robustes.

La figure III.9 représente un système de surveillance en ligne.

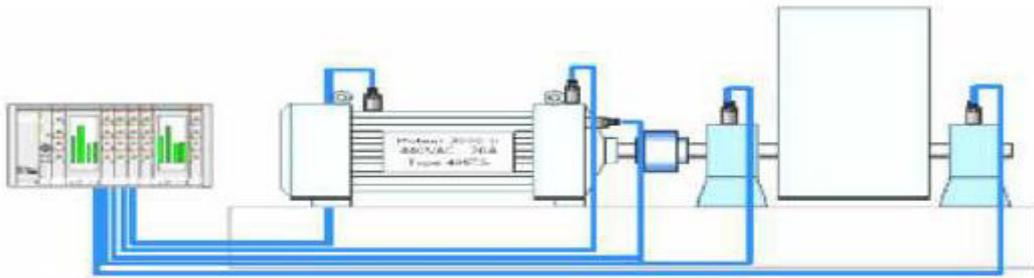


Figure III.9. Surveillance On-line (en ligne) ou suivi continu

### III.3.2.2. Surveillance "off-line" (hors ligne) ou suivi périodique

Avec ce type de surveillance, les mesures, prélèvements, vérifications sont effectués à des moments préétablis et à intervalles réguliers. En thermographie infrarouge ou en analyse d'huiles, par exemple, où l'évolution du paramètre physique est plutôt lente, la surveillance est nécessairement périodique.

La figure III.10 représente un système de surveillance off-line ou suivi périodique.

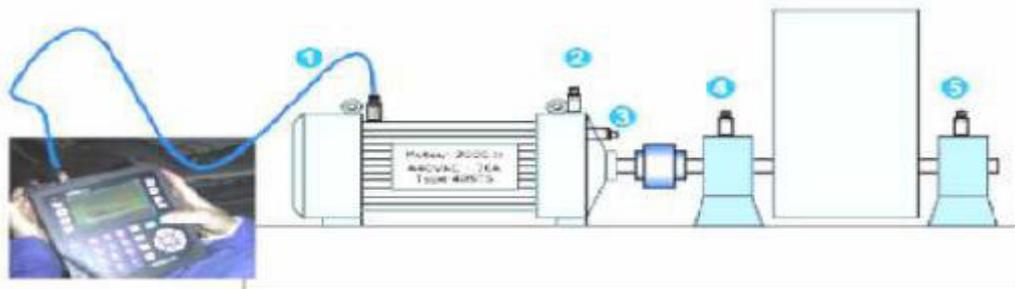


Figure III.10. Surveillance off-line ou suivi périodique

### III.3.3. Le Choix du type de surveillance

Le choix du type de surveillance dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Les questions déterministes sur le choix du type de surveillance sont résumées sur la figure III.11.

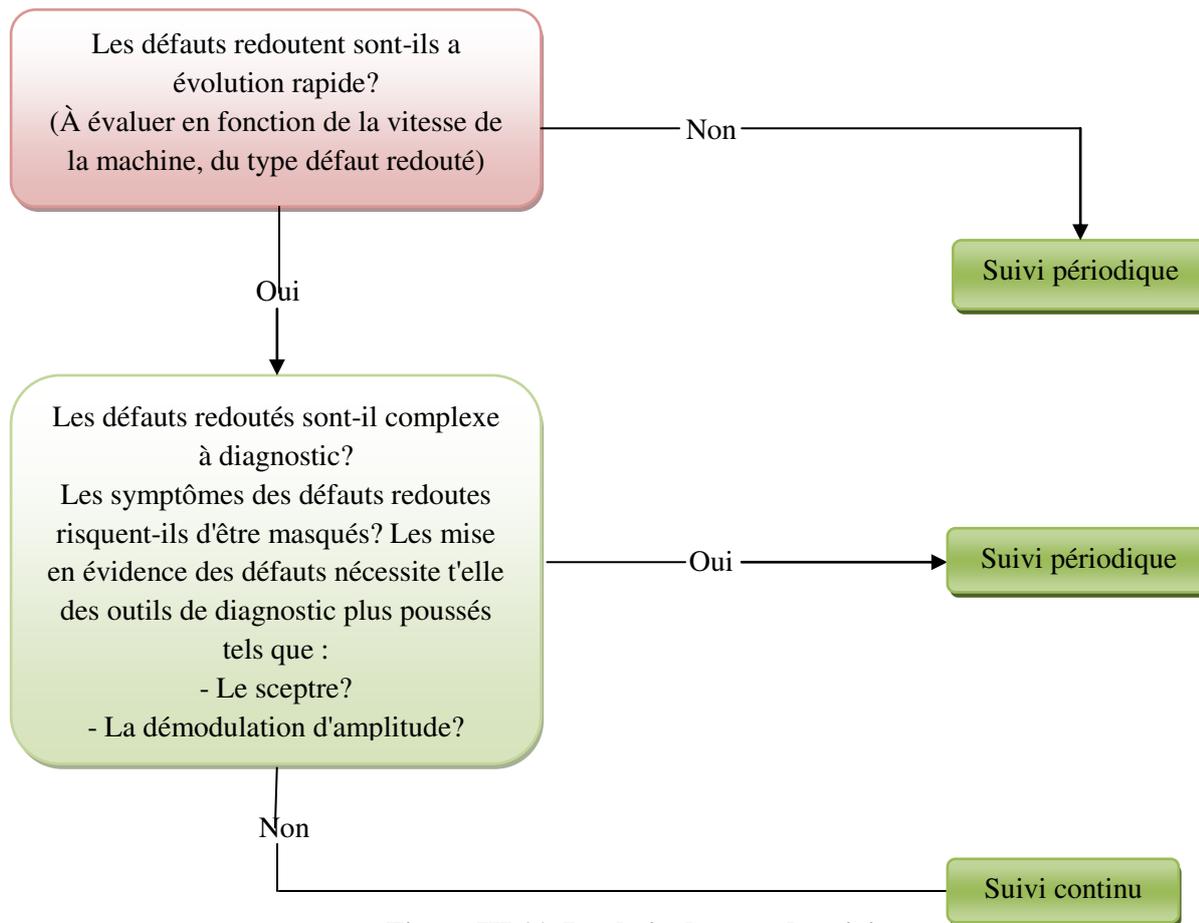


Figure III.11. Le choix du type de suivi

### III.3.4. Techniques en surveillance des machines tournantes

Aujourd’hui, plusieurs techniques peuvent être employées pour surveiller l’état des machines tournantes par l’analyse des vibrations, du bruit, de la température, du courant, etc. [7].

Les différentes techniques de la surveillance des machines tournantes sont illustrées dans la figure III.12.

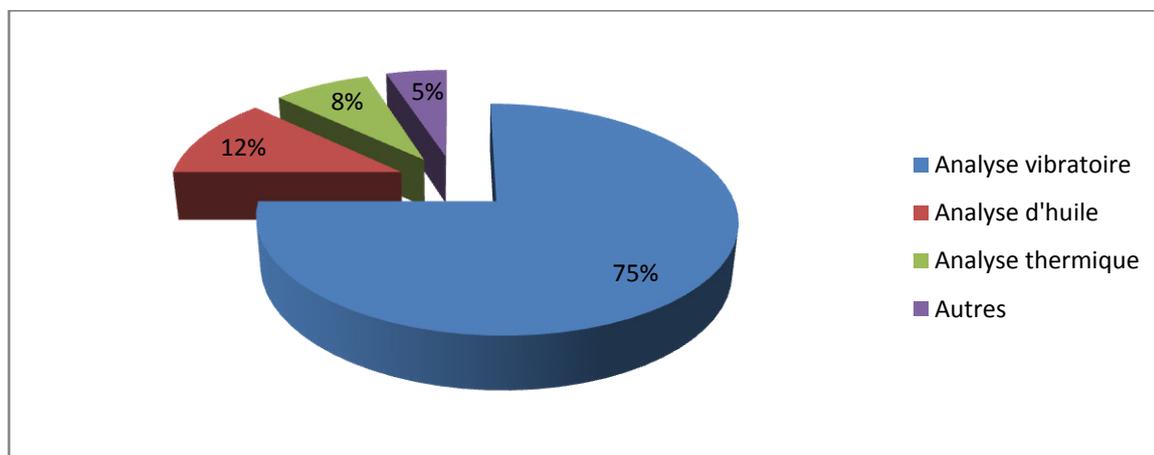


Figure III.12. Différentes techniques de la surveillance des machines tournantes

✓ **L'analyse vibratoire** est la plus connue et la plus largement utilisée [6] car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes.

✓ **L'analyse d'huile** est appliquée à toutes les machines contenant des fluides de lubrification (réducteurs, motoréducteurs, moteurs thermiques...). Elle consiste à prélever un échantillon d'huile et de l'analyser (particules d'usure) pour déduire l'état de l'équipement.

✓ **La thermographie infrarouge** : suscite un intérêt encore récent dans le domaine de la maintenance jusqu'alors réservée au contrôle d'installations électriques. Elle est peu utilisée pour la surveillance des machines tournantes notamment pour la détection de défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement. La thermographie permet de réaliser des mesures à distances et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée.

✓ **L'analyse acoustique** : permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés à distance de l'équipement.

✓ **Le contrôle par ultrasons** : permet de détecter des défauts de faibles amplitudes à hautes fréquences tels que l'initiation de la dégradation d'un roulement.

### **III.3.5. Choix d'outils de surveillance**

Tenant compte des impératifs du procès, 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.

Le tableau III.1 donne un aperçu sur les critères pris en compte pour le choix de l’outil de surveillance.

	<b>Principaux avantages</b>	<b>Principales limitations</b>	<b>Champ d’applications Privilégié</b>
Analyse Vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Détection de défauts à un stade précoce</li> <li>- Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi</li> <li>- Autorise une surveillance continue</li> <li>- Permet de surveiller l’équipement à distance (télémaintenance)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Spectres parfois difficiles à interpréter</li> <li>- Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d’alignement, jeux, etc.) et de sa structure</li> </ul>
Analyse d’huiles	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Détection d’une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n’entraîne une usure ou un échauffement</li> <li>- Possibilité de connaître l’origine de l’anomalie par analyse des particules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Ne permet pas de localiser précisément le défaut</li> <li>- Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l’échantillon</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d’un manque de lubrification, analyse des éléments d’usure, analyse de contamination par le procès (étanchéité), etc.</li> </ul>
Thermographie IR	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet de réaliser un contrôle rapide de l’installation</li> <li>- Interprétation souvent immédiate des résultats</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection de défauts à un stade moins précoce que l’analyse vibratoire</li> <li>- Contrôle limité à ce que “voit” la caméra (échauffements de surface)</li> <li>- Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier)</li> </ul>
Analyse Acoustique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet de détecter l’apparition de défauts audibles</li> <li>- Autorise une surveillance continue</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilité au bruit ambiant</li> <li>- Diagnostic souvent difficile à réaliser</li> <li>- Problèmes de respectabilité des mesures</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Détection d’un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire</li> </ul>

**Tableau III.1. Choix de l’outil de surveillance**

**III.3.5.1 Choix de l'outil de surveillance suivant les défauts potentiels**

Le tableau III.2 illustre le choix de l'outil de surveillance suivant les défauts potentiels[8].

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 spécifiques aux Roulements	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts spécifiques aux Engrenages	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts de courroies	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts d'alignement	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts liés à 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 liés aux écoulements (pour pompes et machines hydrauliques)	Oui	Non	Non	Oui

**Tableau III.2. Choix de l'outil de surveillance suivant les défauts potentiels**

**III.3.6. Terminologies utilisées en surveillance**

Différentes Terminologies sont utilisées en surveillance, tel que:

✓ **Système** : un ensemble déterminé d'éléments discrets (composants, constituants) interconnectés ou en interaction.

✓ **Processus** : un processus est un système, équipement ou machine. Un processus est un ensemble d'éléments ou composants réagissant entre eux et avec le milieu extérieur, susceptible d'évoluer dans le temps afin d'accomplir une activité clairement définie et générer de la valeur ajoutée.

✓ **Composant** : un composant industriel est un organe technologique qui forme une partie du processus industriel.

✓ **Dégradation** : une dégradation représente une perte de performances d'une des fonctions assurées par un équipement.

✓ **Défaut** : est une déviation par rapport aux conditions acceptables ou normales d'un paramètre caractéristique du système

✓ **Panne** : une panne est l'état d'un système incapable d'assurer le service spécifié à la suite d'une défaillance.

✓ **Résidu** : est un signal potentiellement indicateur de défauts.

**Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la maintenance industrielle pour l'importance que présente cette fonction en entreprise. A impact direct sur les taux de production et la qualité des produits, sa maîtrise permet la minimisation des autres postes de dépense pour l'industriel. Nous en avons, ainsi, présenté, dans ce deuxième chapitre, les concepts, et exposé ses différents types avec les techniques de surveillance relevant de ce domaine. Nous avons, également, donné un aperçu sur les différentes stratégies de surveillance, en mettant en évidence les inconvénients et les avantages de chacune d'elles.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation des notions de base de l'analyse vibratoire, ainsi que les différents défauts des machines tournantes.

## Introduction

Toute machine possédant des composantes en mouvement génère un certain niveau des images des efforts dynamiques, quel que soit le soin apporté à leur fabrication. De ce fait, toute modification du processus dynamique de la machine engendre une variation des énergies vibratoires. Ces vibrations sont stable si la machine fonctionne normalement, quantifiable et reproductible, si l'environnement est le même. Ces vibrations sont caractéristiques de l'état de fonctionnement de l'équipement et constituent sa signature cinématique. Au fur et à mesure que l'état de la machine se détériore, le niveau vibratoire augmente et change radicalement avec l'apparition d'un défaut, première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradation et de panne. Les vibrations sont le résultat d'un ensemble d'efforts exercé par la machine elle-même ou le résultat de l'interaction avec l'environnement dans lequel la machine est intégrée.

### IV.1. Définition (norme AFNOR E 90 0001)

La variation avec le temps de la valeur d'une grandeur caractéristique du mouvement ou la position d'un système mécanique, lorsque la grandeur est alternativement plus grande est plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence [9].

### IV.2. Caractéristiques d'une vibration

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

#### IV.2.1. Fréquence

##### a. Définition

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

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 1/50<sup>ème</sup> de seconde. La fréquence  $f$  est l'inverse de la période  $T$  :  **$f = 1/T$** .

##### b. Remarque

Si l'unité normalisée de la fréquence est l'hertz [Hz], on rencontre parfois des valeurs exprimées en CPM (cycle par minute) ou RPM (rotation par minute). D'ou:

$$1 \text{ hertz} = \frac{1\text{CPM}}{60} = \frac{1\text{RPM}}{60}$$

Il est intéressant parfois d'exprimer des phénomènes liés à la rotation en multiple ou **ordre** de la fréquence de rotation.

### IV.2.2. Amplitude

#### a. Définition

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre et on peut définir :

- ✓ l'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête (**Ac**) ou niveau crête;
- ✓ l'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête (**Acc**) (peak to peak, en anglais) ou niveau crête-crête ;
- ✓ l'amplitude efficace (**Aeff**), aussi appelée **RMS** (RootMean Square) ou niveau efficace.

### IV.3. Les différents types de vibration

Il existe plusieurs sortes de vibrations dont les principales sont les suivantes :

#### IV.3.1. Vibration harmonique

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

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

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$

Avec :  $X$  : amplitude.

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

$f$  : fréquence du mouvement.

$\varphi$  : phase du mouvement par rapport à une référence dans le temps.

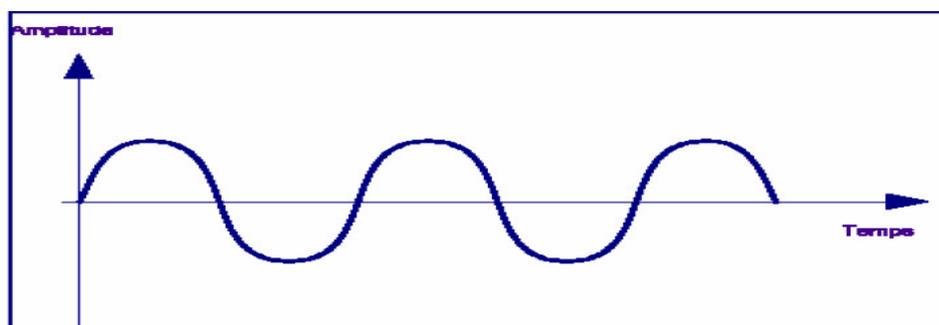


Figure IV.1. Signal harmonique

### IV.3.2. vibration périodique complexe

Deux ou plusieurs vibrations périodiques peuvent se superposer et donner comme résultante un mouvement qui est la composition de tous les mouvements élémentaires.

Elle est décrite par l'équation suivante :

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

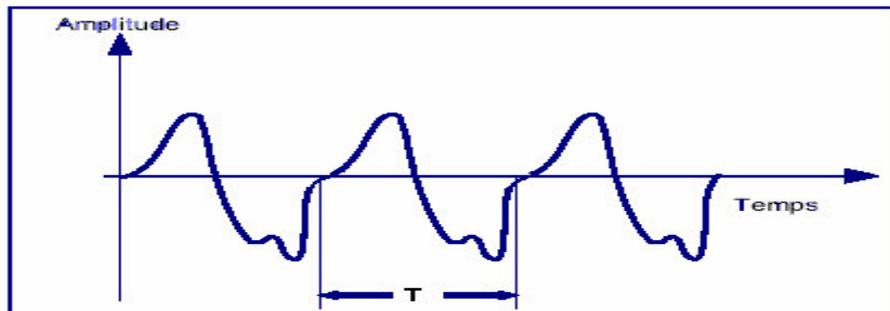


Figure IV.2. Signal périodique complexe

### IV.3.3. vibration aléatoire

C'est une vibration continue pour laquelle il est possible de déterminer une période de répétition. Cette vibration ne peut être représentée par une fonction mathématique exacte, d'où l'utilisation des lois de probabilités pour la caractériser.

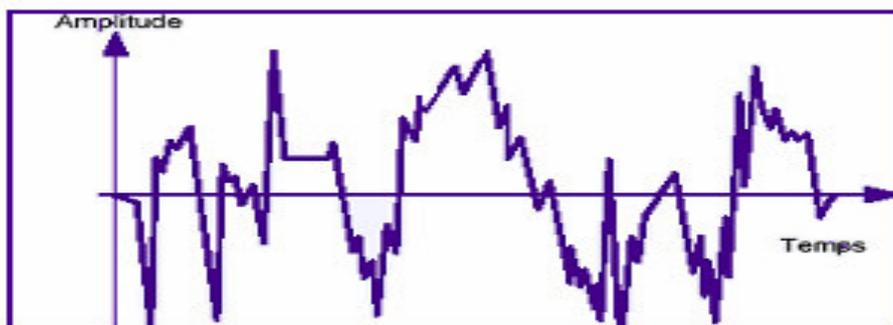


Figure IV.3. Signal aléatoire

## IV.4. Représentation en temps et en fréquence d'un signal

La représentation graphique des signaux peut être réalisée de deux manières, en amplitude fonction du temps ou en amplitude fonction de la fréquence.

### IV.4.1. Représentation temporelle

La représentation en fonction du temps d'un signal vibratoire est utilisée pour suivre le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ses paramètres de fonctionnement.

Cette représentation est facile à exploiter lorsque le signal est simple (vibration sinusoïdale induite par le balourd d'un rotor), mais elle devient inexploitable lorsque le signal est complexe comme dans le cas de sollicitation multiple. À cet effet, ce signal peut être décomposé en différentes composantes sinusoïdales et ceci pour faciliter son interprétation.

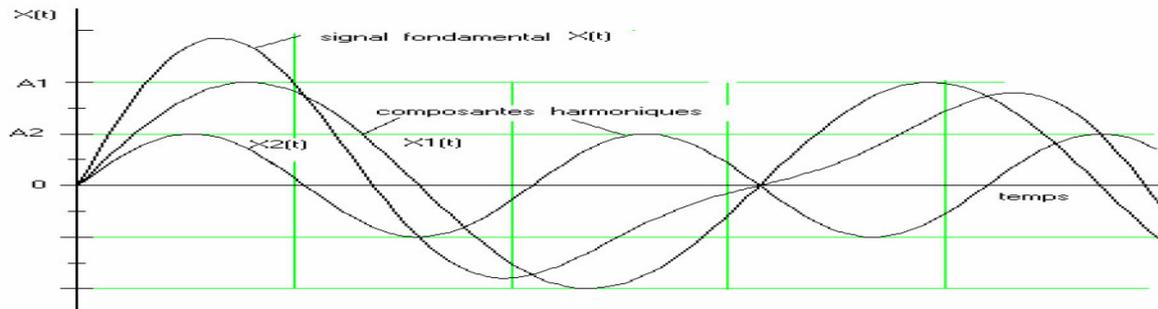


Figure IV.4. Décomposition d'un signal vibratoire en deux composantes harmoniques

#### IV.4.2. Représentation fréquentielle

La représentation du signal en fonction de la fréquence (représentation spectrale) permet de décomposer un signal complexe en composantes sinusoïdales caractérisées par leur amplitude et leur fréquence.

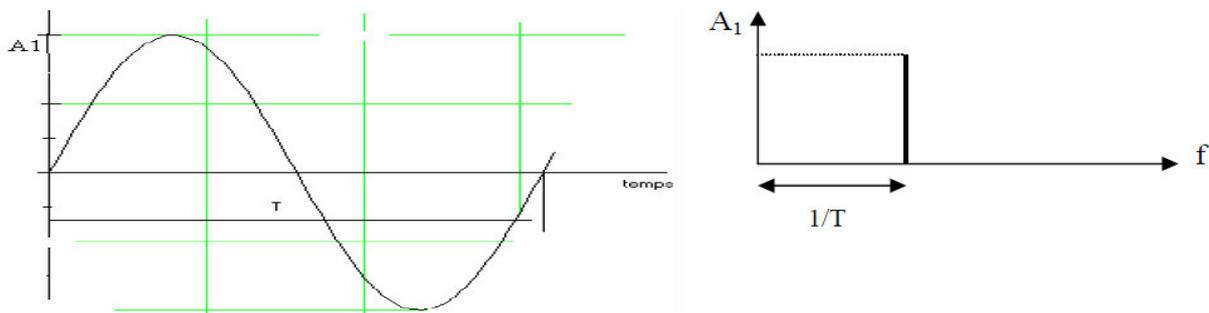


Figure IV.5. Exemples de conversion temps/fréquence

#### IV.5. Le passage d'une représentation temporelle à une représentation fréquentielle

Les analyseurs de spectres permettent la visualisation du signal en fonction de la fréquence. Les analyseurs réalisent la décomposition du signal en fonction de la fréquence en appliquant un traitement spécifique. Ils fonctionnent selon le principe suivant :

- ✓ Le signal électrique issu du capteur de vibrations est amplifié et filtré ;
- ✓ Le signal analogique est échantillonné et transformé en une suite de valeurs numériques représentatives (conversion analogique/numérique) ;
- ✓ Il réalise un calcul de transformée de Fourier rapide (en anglais Fast Fourier Transform, FFT).
- ✓ Un afficheur indique le résultat

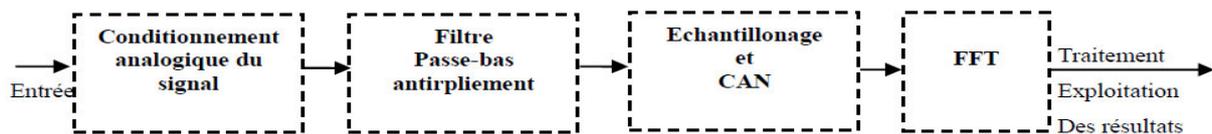


Figure IV.6. Schéma de principe d'un analyseur FFT

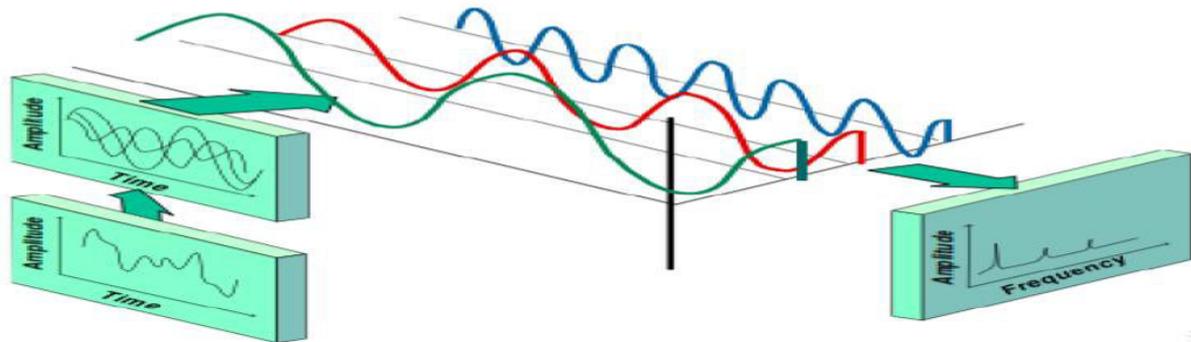


Figure IV.7. Traitement de signal FFT

## IV.6. Les modes de détection

En mesure vibratoire, on utilise couramment trois modes de détection [10]:

- ✓ Valeur efficace
- ✓ Valeur crête
- ✓ Valeur crête à crête
- ✓ Valeur moyenne

### IV.6.1. Valeur Efficace $X_{eff}$

Pour une vibration périodique, la valeur efficace est la moyenne quadratique des valeurs efficaces de chacune des vibrations harmoniques la constituant :

$$X_{eff} = \sqrt{(X_{1\,eff}^2 + X_{2\,eff}^2 + \dots + X_{n\,eff}^2)}$$

$$X_{eff} = \sqrt{1/T \int_0^T x^2(t) dt}$$

Dans la littérature,  $X_{eff}$  peut également être notée (**rms= rootmean square**)

### IV.6.2. Valeur crête $X_c$

La valeur crête d'une vibration est la valeur maximale prise par la valeur  $x(t)$  dans l'un des sens positif ou négatif.

### IV.6.3. Valeur Crête A Crête $X_{cc}$

La valeur crête à crête d'une vibration est la somme des deux valeurs crêtes pour les sens positif et négatif.

### IV.6.4. Valeur moyenne $X_m$

C'est la valeur constante qui correspond à la moyenne du signal sur une période T.

$$X_m = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt$$

$X_m$  Est inférieure à la valeur crête.

### IV.6.5. Relations entre les Différents Modes De Détection

Pour une vibration harmonique, à l'exclusion de toute autre vibration périodique, les relations suivantes sont vérifiées :

$$X_{eff} = \frac{X_c}{\sqrt{2}} = \frac{X_{cc}}{2\sqrt{2}}$$

$$X_c = X_{eff} \cdot \sqrt{2} = \frac{X_{cc}}{2}$$

$$X_{cc} = X_{eff} \cdot 2\sqrt{2} = 2 \cdot X_c$$

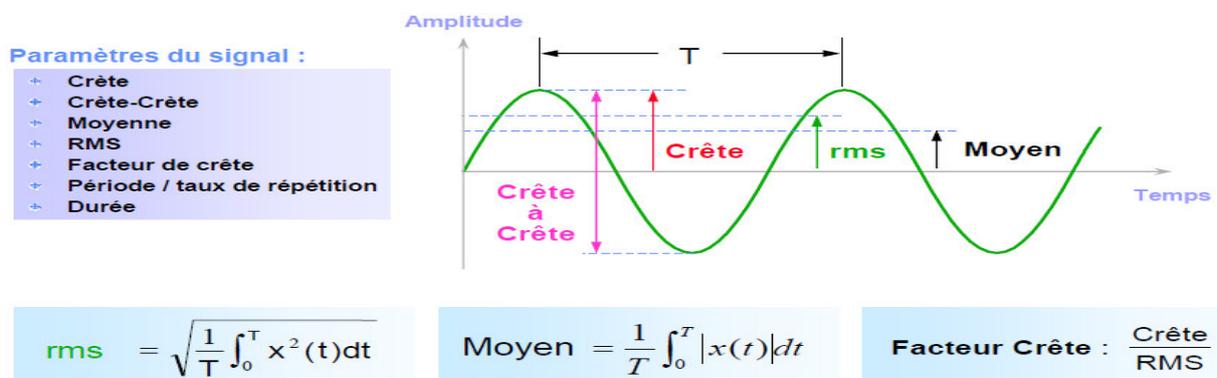


Figure IV.8. Les modes de détection

## IV.7. Les grandeurs de mesure

Une vibration mécanique peut être mesurée selon les trois grandeurs suivantes [9] :

Déplacement- vitesse- Accélération.

### IV.7.1. Déplacement vibratoire $x(t)$

Le déplacement  $x(t)$  d'une vibration est décrit par l'équation :  $x(t) = X \sin(\omega t + \varphi)$  [ $\mu\text{m}$ ].

### IV.7.2. Vitesse vibratoire $v(t)$

La vitesse  $v(t)$  de cette vibration s'obtient par dérivation du déplacement :

$$v(t) = \frac{d(x)}{dt} = x \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad v(t) = V \cdot \sin(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) [\text{mm/s}].$$

### IV.7.3. Accélération vibratoire $a(t)$

L'accélération  $a(t)$  de cette vibration s'obtient par dérivation de la vitesse:

$$a(t) = \frac{d(v)}{dt} = V \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) \quad a(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi + \pi) [\text{m/s}^2].$$

L'unité d'accélération de la pesanteur [g], relations entre **A**, **V** et **S**

$$X = \frac{V}{\omega} = A/\omega^2 \quad V = S.\omega = \frac{A}{\omega} \quad A = V.\omega = S.\omega^2$$

#### IV.7.4. Choix des grandeurs de mesure

On choisira préférentiellement :

- ✓ La grandeur déplacement pour détecter des phénomènes à basse fréquence  $F \leq 100$  Hz;
- ✓ La grandeur vitesse pour détecter des phénomènes se situant dans une large gamme de fréquence  $F \leq 1000$  Hz.
- ✓ La grandeur accélération pour détecter des phénomènes se situant à haute fréquence  $0 \leq F \leq 20000$  Hz.

La Figure IV.9 illustre la relation accélération, vitesse, déplacement.

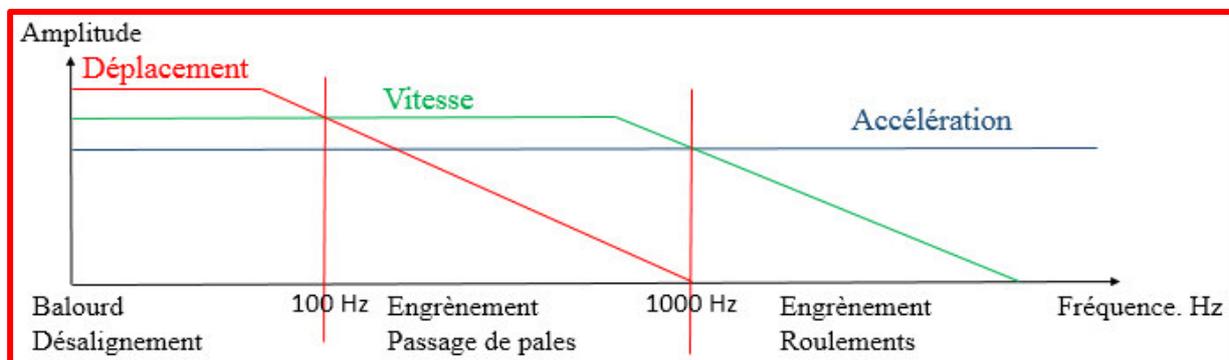


Figure IV.9. Relation accélération, vitesse, déplacement

### IV.8. Capteurs de vibrations

Le capteur de vibrations est le premier maillon de la chaîne de mesure. Le but de ce capteur est de transformer une vibration mécanique en un signal électrique. Les capteurs de vibration utilisés peuvent être actifs, ne nécessitant aucune alimentation et ne pouvant fonctionner qu'avec une source d'énergie auxiliaire [11].

On distingue :

- ✓ Les capteurs de déplacement ;
- ✓ Les capteurs de vitesse (vélocimétries) ;
- ✓ Les capteurs d'accélération (accéléromètres).

#### IV.8.1. Capteur de déplacement

Un capteur de déplacement mesure le déplacement relatif entre l'arbre et le palier qui est de la vibration. La bobine et le conditionneur intégrés forment ensemble un circuit électronique oscillant. La figure IV.10 présente le principe de fonctionnement d'un capteur de déplacement.

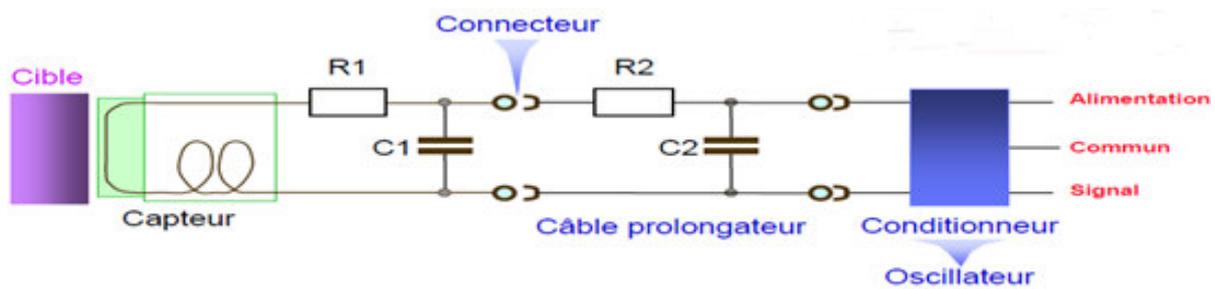


Figure IV.10. Principe de fonctionnement d'un capteur de déplacement

Le circuit oscillant crée un champ magnétique alternatif dans la bobine du capteur. D'après le principe d'induction, il se crée alors des courants de Foucault dans un corps conducteur que l'on approche du capteur. Ces courants de Foucault agissent à leur tour sur la bobine par l'intermédiaire du champ magnétique et consomment ainsi de l'énergie électrique. Cette transformation d'énergie est d'autant plus importante que le corps métallique est proche de la bobine et que sa susceptibilité magnétique est élevée [11].

### IV.8.2. Capteurs de vitesse

Un capteur de vitesse (vélocimétrie) est un capteur actif qui n'est pas alimenté.

La figure IV.11 illustre le fonctionnement d'un capteur de vitesse [4].

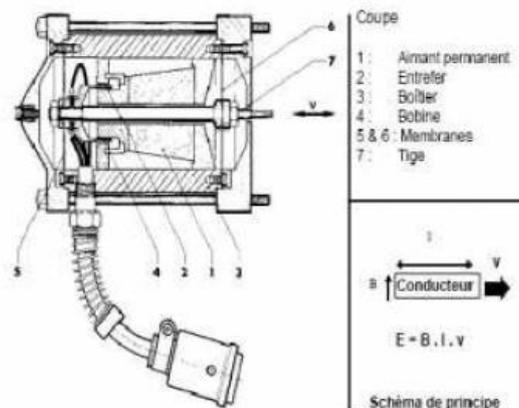


Figure IV.11. Principe de fonctionnement d'un capteur de vitesse

L'aimant permanent (1) génère une induction magnétique constante  $B$ . Les lignes de champ se referment par l'intermédiaire du boîtier (3). Une bobine (4) suspendue par des membranes (5) et (6) peut se déplacer dans la direction des lignes de champ. Une force électromotrice ( $f_{em}$ ) d'induction  $E$  est alors générée, qui est le produit de la vitesse  $v$  de vibration, de l'induction magnétique  $B$  et de la longueur  $l$  de l'enroulement.

### IV.8.3. Capteurs d'accélération

Les capteurs d'accélération (accéléromètres) mesurent des vibrations absolues de la cage ou les vibrations relatives dans l'espace [4].

La figure IV.12 illustre le principe de fonctionnement d'un capteur d'accélération.

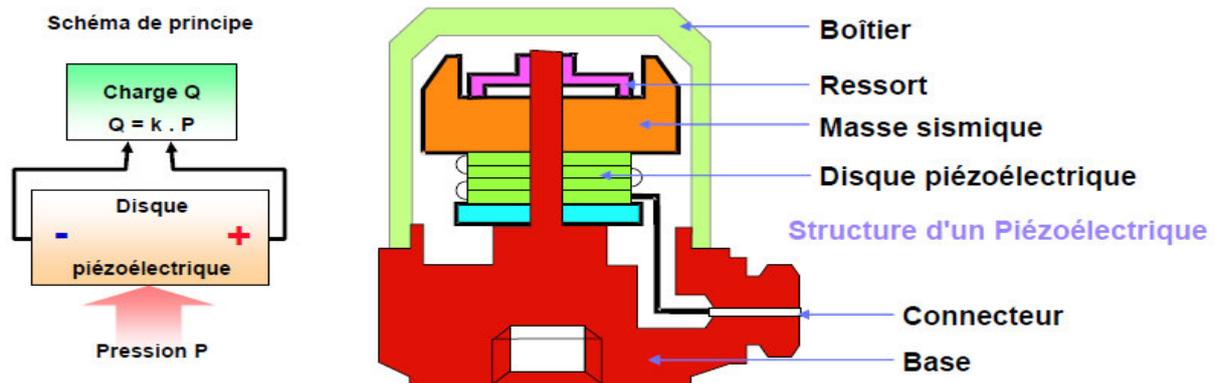


Figure IV.12. Principe de fonctionnement d'un capteur d'accélération

Les éléments actifs de ce type de capteur sont des disques de cristal piézoélectrique présentant la propriété de transformer une sollicitation mécanique (pression ou cisaillement) en charges électriques. Ces disques sont pris entre deux masses relativement importantes par l'intermédiaire d'un ressort de tarage élevé. Lorsque le capteur est soumis à une vibration, les masses exercent une pression alternative sur les disques qui, grâce à leur effet piézoélectrique, créent une variation de charge électrique proportionnelle à la force appliquée et donc à l'accélération des masses [11].

#### IV.8.4. Domaine d'utilisation des capteurs de vibration

La figure IV.13 illustre le domaine d'utilisation de différents types de capteurs de vibration.

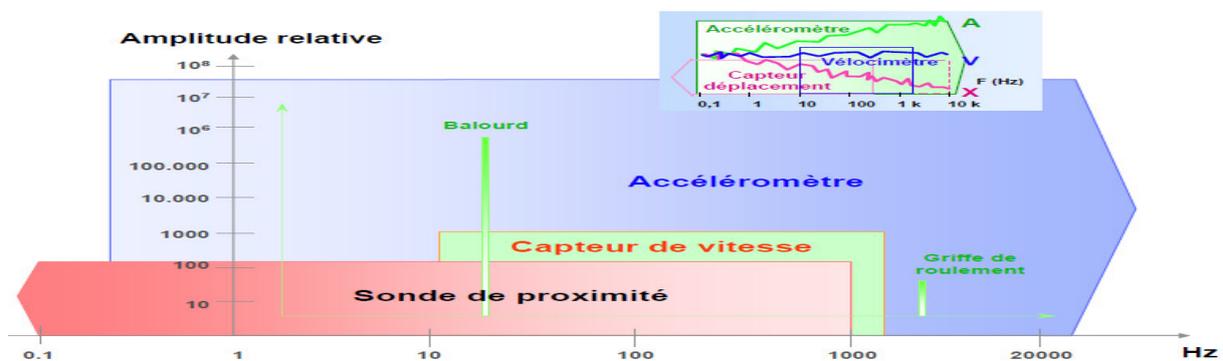


Figure IV.13. Domaine d'utilisation des capteurs de vibration

#### IV.9. Choix de l'emplacement des capteurs

Dans le cas des machines tournantes, les principales mesures seront effectuées le plus souvent au droit des paliers qui sont les parties fixes les plus directement en relation avec les efforts appliqués à la partie mobile [figures 14 et 15]. Ces efforts sont de deux types :

- **Efforts tournants** : par exemple un balourd ou un désalignement, et dont les amplitudes seront plus grandes dans le cas d'une mesure effectuée dans un plan radial ;
- **Efforts directionnels** : la tension d'une courroie (effort directionnel radial), ou le contact d'un engrenage conique (effort directionnel axial).



Figure IV.14. Fixation d'un capteur sur palier

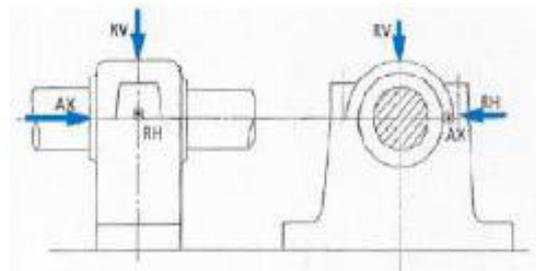


Figure IV.15. Choix directionnel pour la prise de mesure

## IV.10. Principaux défauts dans les machines tournantes

### IV.10.1. Quelques fréquences caractéristiques des phénomènes excitateurs

Type d'anomalie	Vibration		Remarques
	Fréquence	Direction	
Tourbillon d'huile	De 0.42 à 0.48 $\times$ $f_{rot}$	Radiale	Uniquement sur paliers lisses Hydrodynamique à grande vitesse
Balourd	$1 \times f_{rot}$	Radiale	Amplitude proportionnelle à la vitesse de rotation. Déphasage de 90° sur 2 mesures orthogonales
Défaut de fixation	1, 2, 3,4 $\times f_{rot}$	Radiale	Aucun déphasage sur 2 mesures orthogonales
Défaut d'alignement	$2 \times f_{rot}$	Axiale et radiale	Vibration axiale est en général plus importante si le défaut d'alignement comporte un écart angulaire
Excitation électrique	1, 2, 3,4 $\times$ 50 Hz	Axiale et radiale	Vibration disparaît dès coupure de l'alimentation
Vitesse critique de rotation	Fréquence critique du rotor	Radiale	Vibration apparaît en régime transitoire et s'atténue ensuite
Courroie en mauvais état	1, 2, 3,4 $\times f_p$	Radiale	
Excitation hydrodynamique	Fréquence de passage des aubes	Radiale et axiale	
Détérioration de roulement	Hautes fréquences	Radiale et axiale	
Dentures d'engrenage	$f_{eng} = f1.z1$ ou $f2.z2$	Radiale et axiale	Ondes de choc dues aux écaillages. Aide possible par «détection d'enveloppe» Détérioration des dents

Tableau IV.1. Quelques fréquences caractéristiques des phénomènes excitateurs

### IV.10.2. Déséquilibre (défaut de balourd)

Un balourd est une dissymétrie de masse par rapport à l'axe de rotation. Car en pratique, il est impossible d'obtenir un centrage parfait de tous les éléments d'un rotor. Il existe toujours un déséquilibre provenant de :

- ✓ défaut d'usinage
- ✓ défaut d'assemblage : décalage d'une pale de turbine, dissymétrie d'un pôle de rotor d'alternateur.
- ✓ altérations mécaniques : perte d'un bout d'ailette, érosion, encrassement.

Ce déséquilibre appelé « balourd » va générer une vibration due à la force centrifuge.



$$F = m_b \omega^2 r_b \text{ [N]}$$

Figure IV.16. Défaut de balourd

Avec  $m_b$  masse théorique du balourd [Kg]

$r_b$  rayon théorique du balourd [m]

$\omega$  pulsation ou vitesse angulaire [rad /s].

Le balourd engendre en pratique une vibration radiale qui croit fortement avec la vitesse de rotation et qui va se traduire sur le spectre par la présence d'amplitude prépondérante à la fréquence de rotation du rotor et cette vibration ne contient que peu d'harmoniques.

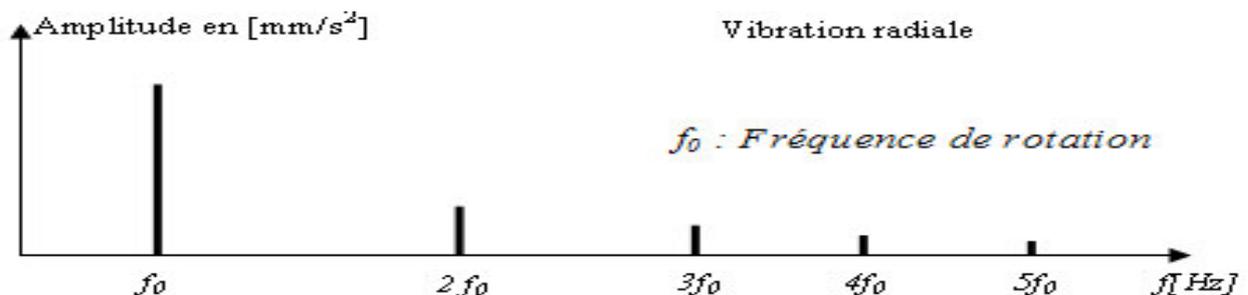


Figure IV.17. Image vibratoire d'un défaut de balourd

#### IV.10.2.1. Différents types de balourd [12]

##### a)- Balourd statique

Dans le cas de balourd statique les deux paliers supportant le rotor vont subir en même temps l'effort centrifuge du au des équilibres. Il n'y aura donc aucun déphasage entre les mesures prises au même point, sur les deux paliers.

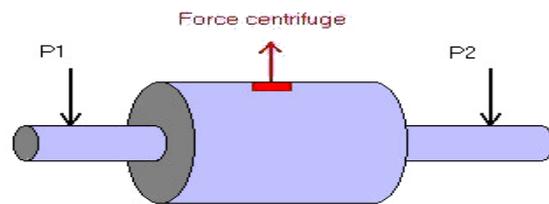
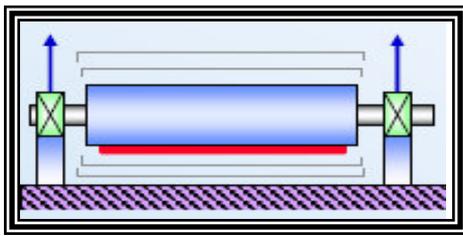


Figure IV.18. Balourd statique

**b)- Balourd de couple**

Dans le cas de balourd de couple les deux paliers supportant le rotor vont subir les efforts centrifuges de façon alternée.

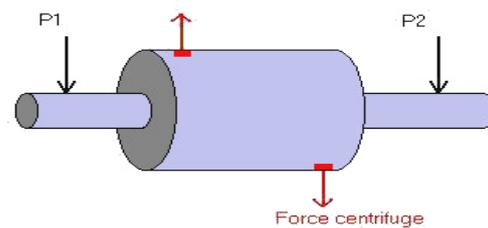
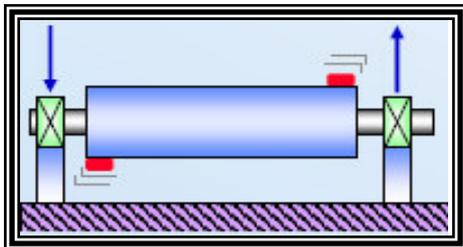


Figure IV.19. Balourd de couple

**c)- Balourd dynamique**

C'est une combinaison des deux premiers, il correspond au cas réel le plus fréquent.

**IV.10.2.2. Origine des différents types de balourds [13]**

**IV.10.2.2.1. Balourd d'origine mécanique :** lorsqu'il y a une masse de matière qui se détache du rotor ou vient de déposer sur ce dernier (perte d'ailette ou rupture d'une aube, érosion ou dépôt de matière, fluage du rotor), on observe généralement une évolution instantanée des vibrations (figure IV.20).

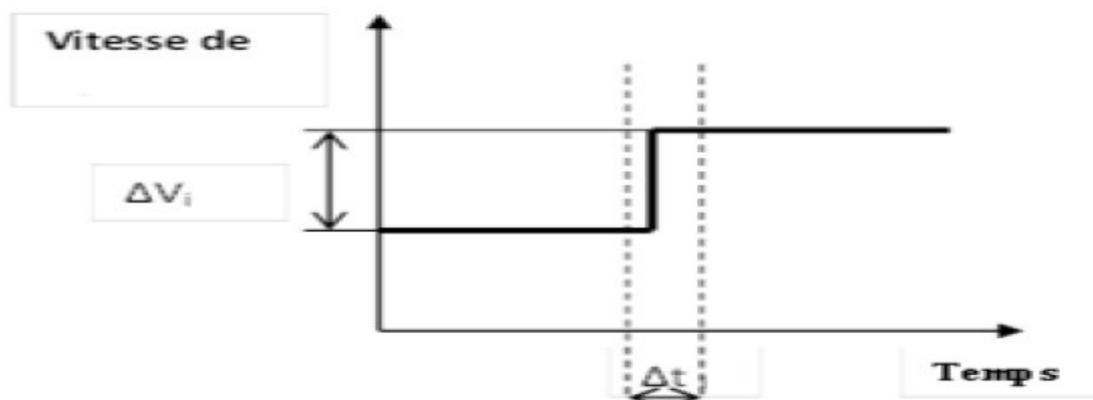


Figure IV.20. Evolution brutale de la vibration du balourd

#### IV.10.2.2. Balourd d'origine thermique

Lorsque les rotors ne sont pas homogènes ou la température n'est pas répartie de façon uniforme, les rotors se déforment sous l'effet de contraintes thermiques :

- déformation des rotors de turbines,
- déformation des rotors d'alternateurs ou de moteurs électriques.

✓ **Balourd évolutif** : est dû aux frottements de l'arbre avec un des paliers de la machine et provoquant un échauffement dissymétrique.

#### IV.10.2.3. Représentation spectrale d'un balourd

Pour toute machine, il existe donc un déséquilibre résiduel (normal ou anormal) qui va se traduire sur le spectre vibratoire par la présence d'une composante d'amplitude prépondérante à la fréquence de rotation de rotor.

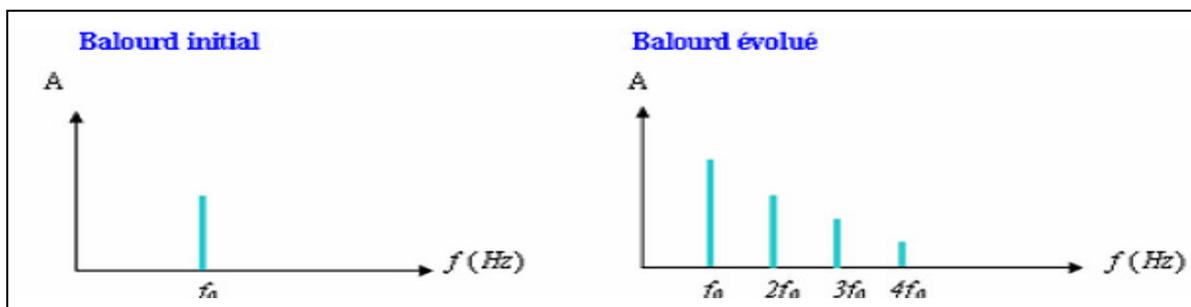


Figure IV.21. Image vibratoire d'un défaut de balourd

### IV.10.3. Défaut d'alignement - flexion du rotor

Parmi les principales causes de détérioration des machines on peut citer le défaut d'alignement, car il engendre des efforts importants au niveau des paliers et des accouplements.

#### IV.10.3.1. Les types des défauts d'alignements

Deux types de défauts d'alignements sont donc rencontrés : L'alignement angulaire et L'alignement parallèle.

##### IV.10.3.1.1. Défaut de désalignement angulaire

Désalignement angulaire est observé lorsque les axes des arbres sont dans le même plan mais non parallèles [11].

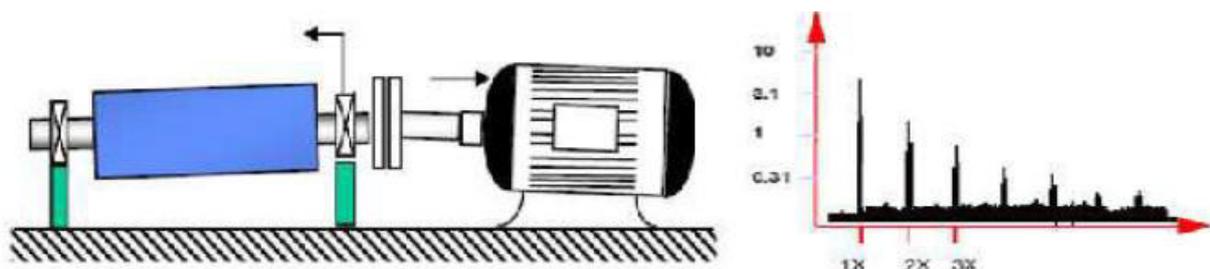


Figure IV.22. Désalignement angulaire

#### IV.10.3.1.2. Défaut de désalignement axial

Désalignement axial: il se produit lorsque les axes des arbres sont parallèles mais ne coïncident pas.

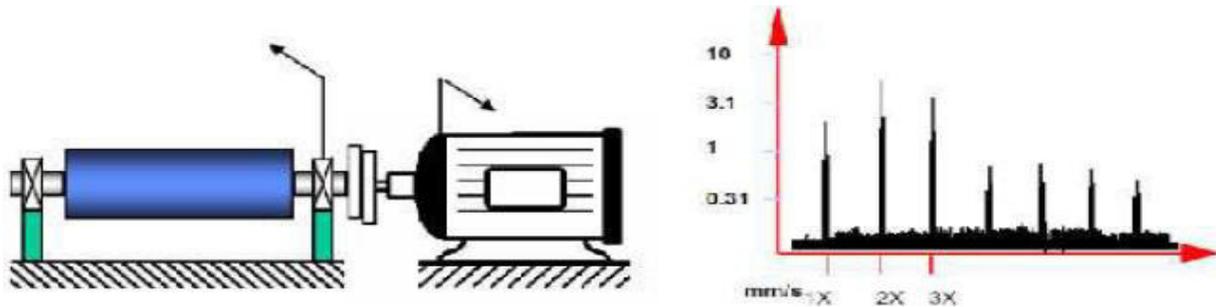


Figure IV.23. Désalignement axial (radial)

#### IV.10.4. Défauts de serrage

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

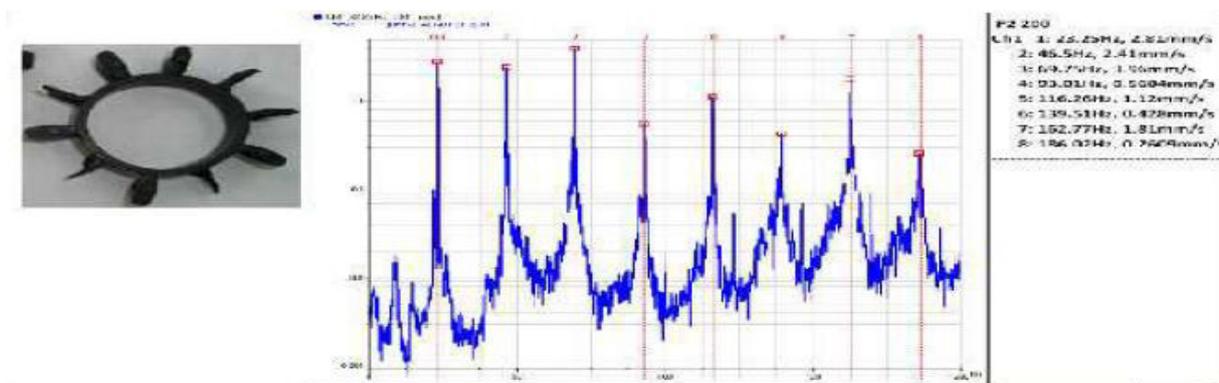


Figure IV.24. Défaut d'usure d'accouplement

#### IV.10.5. Défaut des paliers lisses

Dans un palier hydrodynamique, l'arbre est porté par un film d'huile sous pression. Sous l'effet de la rotation, l'axe de l'arbre prend une position d'équilibre. Par rapport à l'axe du palier, cette position est définie d'une part, par la distance entre les axes (de l'arbre et de palier) et d'autre part, par l'angle d'attitude (angle formé par la droite qui relie les centres et par la direction de la charge) [14].

La position d'équilibre est donnée par :

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

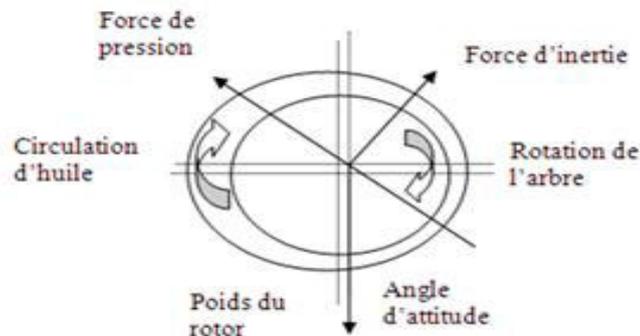


Figure IV.25. Les contraintes sur un palier lisse

Il s'agit des défauts de type :

➤ **tourbillon d'huile :**

Se produisant à une fréquence dépendante de la vitesse de l'huile dans le palier, de 0.42 à 0.48 fois la fréquence de rotation de l'arbre.

➤ **fouettement d'huile :**

Lorsque la fréquence de vibration dépendante de la vitesse de l'huile (0.42 à 0.48 fois la fréquence de rotation) coïncide ou est supérieure à la fréquence critique de l'arbre. Ce dernier défaut, extrêmement grave peut entraîner des dégradations rapides et catastrophiques pour la machine.

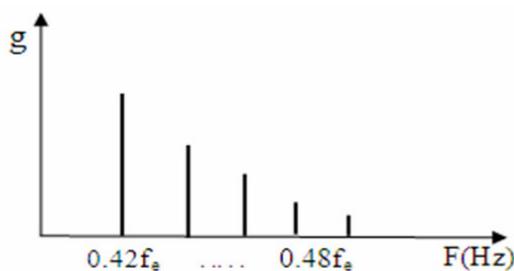


Figure IV.26. Image vibratoire d'un fouettement d'huile

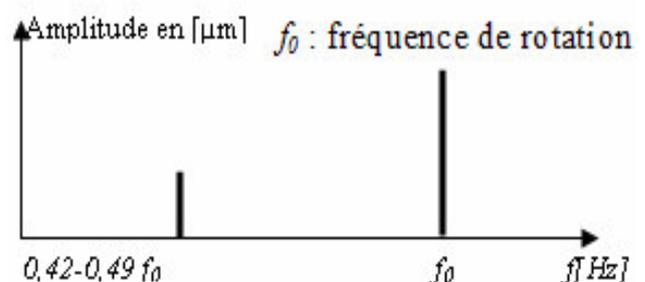


Figure IV.27. Image vibratoire d'un tourbillon d'huile

## IV.10.6. Forces hydrauliques et aérodynamiques

### IV.10.6.1. Passage d'aubes et de palettes

La fréquence de passage d'aube (BPF) est une fréquence fonctionnelle des pompes, ventilateurs et compresseurs, elle ne pose pas de problème. Cependant, de grandes amplitudes de BPF et ces harmoniques peuvent être générés dans la pompe si le jeu entre les aubes rotatives et des diffuseurs fixes n'est pas maintenue égale sur tout le tour. Parfois, la

coïncidence de BPF (ou ces harmoniques) avec une fréquence naturelle du système provoque de fortes vibrations. Une BPF élevée peut être générée si la bague d'usure se casse sur l'arbre ou la défaillance des soudures des diffuseurs. En outre, une grande BPF peut être causée par les coudes brusques de la conduite qui perturbent d'écoulement, ou si le rotor de la pompe ou du ventilateur est positionné de manière excentrique dans le boîtier.

BPF : Blade Pass Frequency = nombre d'aubes (ou palettes) x RPM

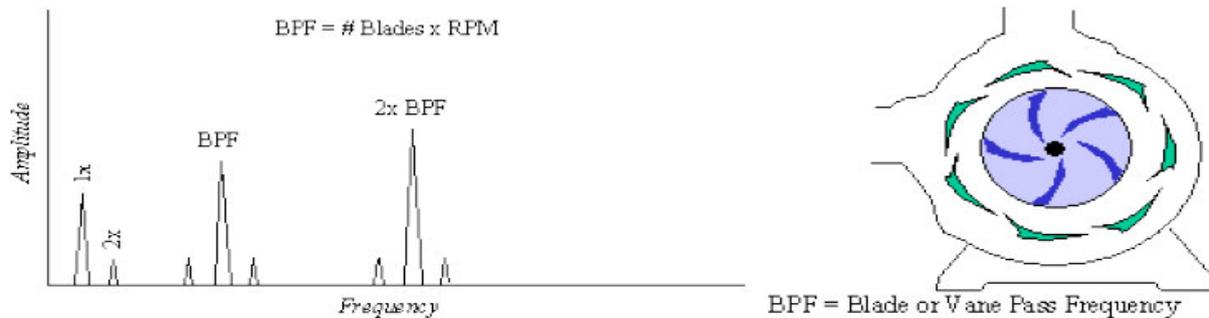


Figure IV.28. Passage d'aubes et de palettes

#### IV.10.6.2. Écoulement turbulent

L'écoulement turbulent se produit souvent dans des soufflantes à cause des variations de la pression ou de la vitesse de l'air traversant le ventilateur ou les connexions des tubes. Cette perturbation de l'écoulement provoque des turbulences qui génèrent des vibrations aléatoires à basses fréquences dans la gamme de 20 à 2000 RPM.

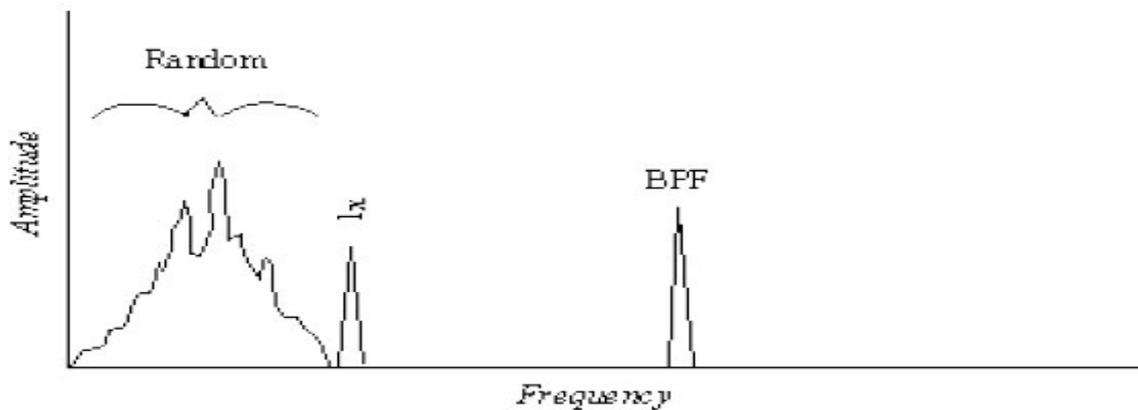


Figure IV.29. Image théorique d'un défaut de l'écoulement turbulent

#### IV.10.6.3. Cavitation

La cavitation génère aléatoirement une énergie de fréquence élevée à large bande qui est parfois superposée avec des harmoniques de la fréquence de passage d'aubes. Cela indique l'insuffisance de la pression d'aspiration. La persistance de la cavitation est destructrice des parties intérieures de la pompe. Elle peut éroder les aubes de la roue. La cavitation ressemble au passage du "gravier" à travers la pompe.

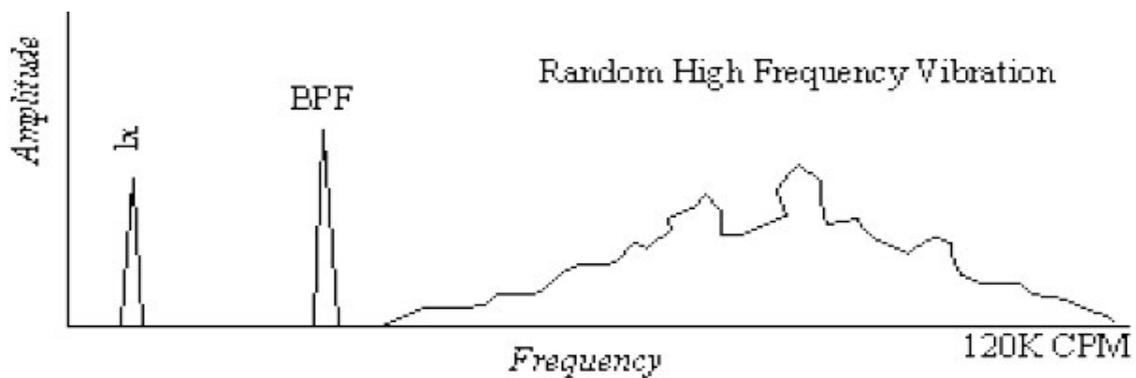


Figure IV.30. Image théorique d'un défaut de cavitation

#### IV.10.7. Défauts de roulements

Les roulements sont les éléments mécaniques les plus importantes des machines tournantes. Ils sont employés pour guider et soutenir les arbres de machines tournantes. Etant donné leurs grandes sollicitations les sont la source de panne fréquente. De manière générale, les roulements sont constitués de quatre composants essentiels Une bague extérieure, une bague intérieure, des organes roulants (billes) et un organe de lubrification (cage) (Figure IV.31).

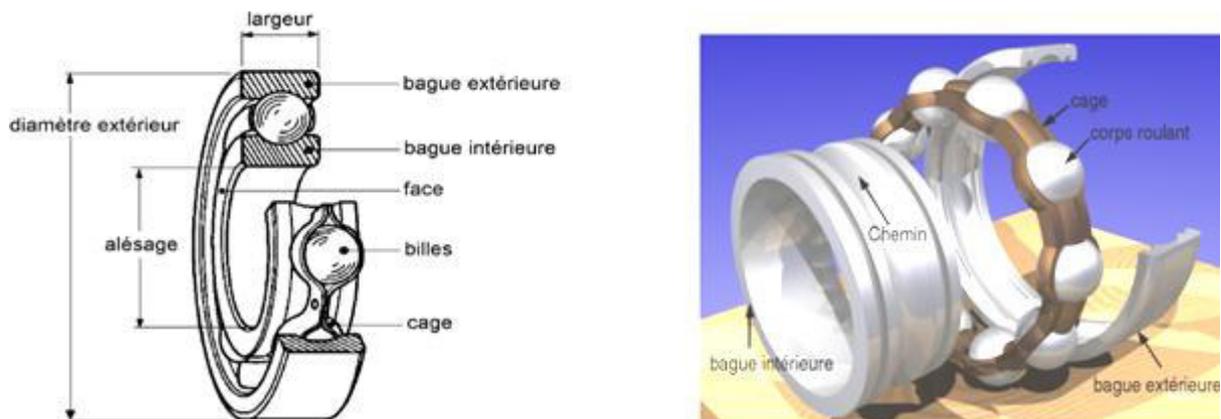


Figure IV.31. Éléments composant un roulement à billes [11]

## IV.10.7.1. Causes et types de dégâts

Un récapitulatif des causes les plus fréquentes se trouve ci dessous

Stade	Causes de dégâts
Fabrication	Matériau non homogène Tolérance sur les cotes
Stockage/transport	Emballage insuffisant Vibration
Montage	Chocs Mauvaise précontrainte Erreur de cote
Service	Surcharge Manque ou excès de graisse Corps étrangers (poussière) Charge thermique

**Tableau IV.2. quelques causes de dégâts sur les roulements**

## IV.10.7.2. Fréquence des défaillances des éléments de roulement

Pour chaque type de roulement et en fonction de ses cotes de fabrication, on peut considérer quatre fréquences caractéristiques :

Fréquence caractérise un défaut sur bague externe	$f_e = \frac{n \cdot N}{2 \cdot 60} \cdot \left( 1 - \frac{d_b}{D_m} \cdot \cos \beta \right)$
Fréquence caractérise un défaut sur bague interne	$f_i = \frac{n \cdot N}{2 \cdot 60} \cdot \left( 1 + \frac{d_b}{D_m} \cdot \cos \beta \right)$
Fréquence caractérise un défaut sur bille	$f_b = \frac{D_m}{d} \cdot \frac{N}{60} \cdot \left( 1 - \frac{d_b^2}{D_m^2} \cdot \cos^2 \beta \right)$
Fréquence caractérise un défaut sur cage	$f_c = \frac{N}{2 \cdot 60} \cdot \left( 1 - \frac{d_b}{D_m} \cdot \cos \beta \right)$

**Tableau IV.3. Les fréquences caractéristiques de différents défauts des roulements**

$d_b$ : diamètre des éléments roulants.

$D_i$ : Diamètre du chemin de roulement de la bague interne.

$D_e$ : Diamètre du chemin de roulement de la bague externe.

$\beta$  : L'angle de contact des éléments roulants (en degrés).

$n$  : nombre de billes (ou de rouleaux).

$N$  : vitesse de rotation de l'arbre.

$D_m$  : Diamètre moyen du roulement, avec  $D_m = \frac{D_i + D_e}{2}$

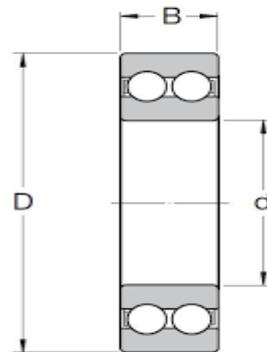


Figure IV.32. Les caractéristiques des éléments de roulement

**IV.10.7.3. Signatures vibratoires des défauts d'écaillage**

Les défauts de type écaillages vont être modulés en amplitude par la vitesse de rotation. Cela se traduira sur le spectre par un pic a la fréquence du défaut ( $F_{\text{défaut}} = \text{BPFI}$  ou  $\text{BPFO}$  ou  $\text{FTF}$  ou  $\text{BSF}$ ) et des bandes latérales a la fréquence de rotation de l'arbre. De plus, les défauts d'écaillage se traduisent par des chocs. Le spectre va donc faire apparaitre un peigne de raie a la fréquence du défaut ( $F_{\text{défaut}} = \text{BPFI}$  ou  $\text{BPFO}$  ou  $\text{FTF}$  ou  $\text{BSF}$ ).

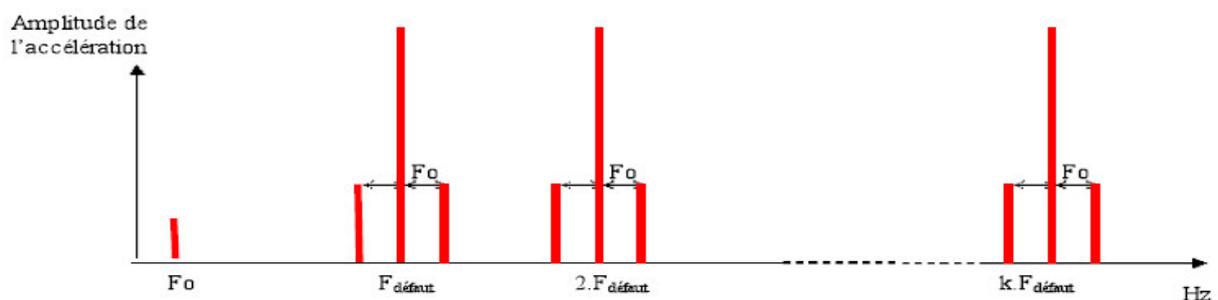


Figure IV.33. Spectre théorique d'un défaut d'écaillage d'un roulement

**IV.10.7.4. Défaut de déversement**

Le déversement de bague interne ou externe peut être la conséquence d'un désalignement.

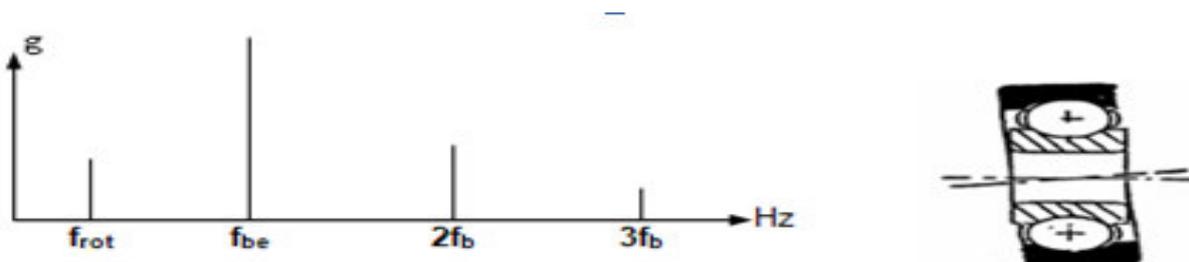


Figure IV.34. Déversement de bague externe

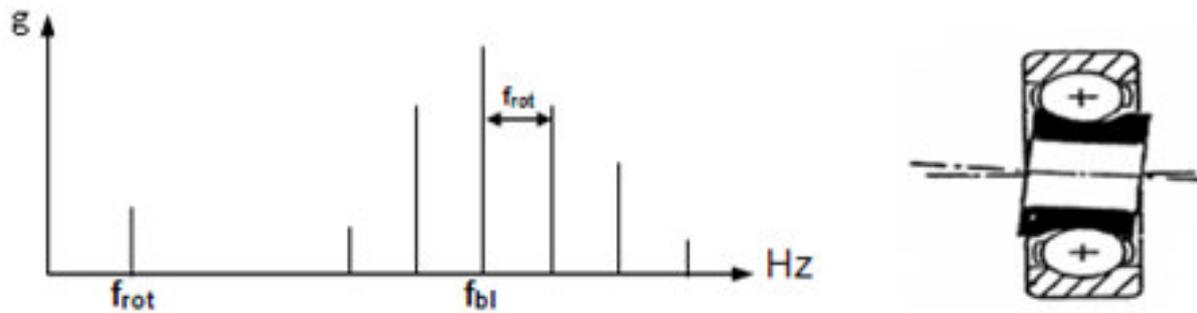


Figure IV.35. Déversement de bague interne

### IV.10.8. Défauts des engrenages

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

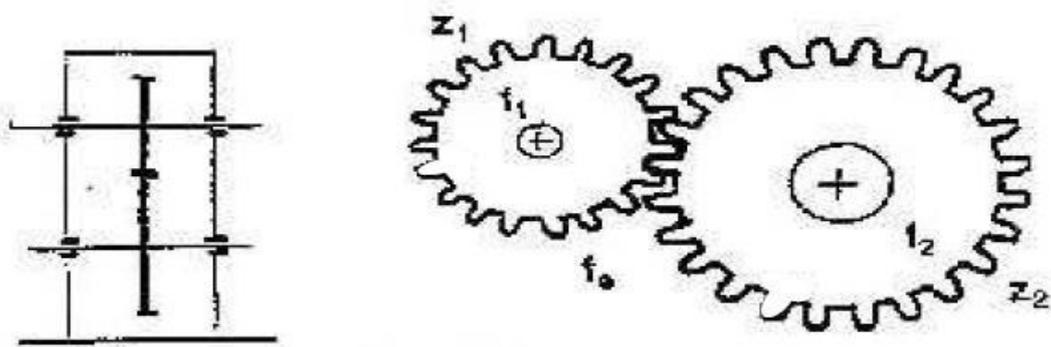


Figure IV.36. Schéma simplifié d'un engrenage

Si la denture est correcte, le spectre est constitué de composante dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement et ses harmoniques.

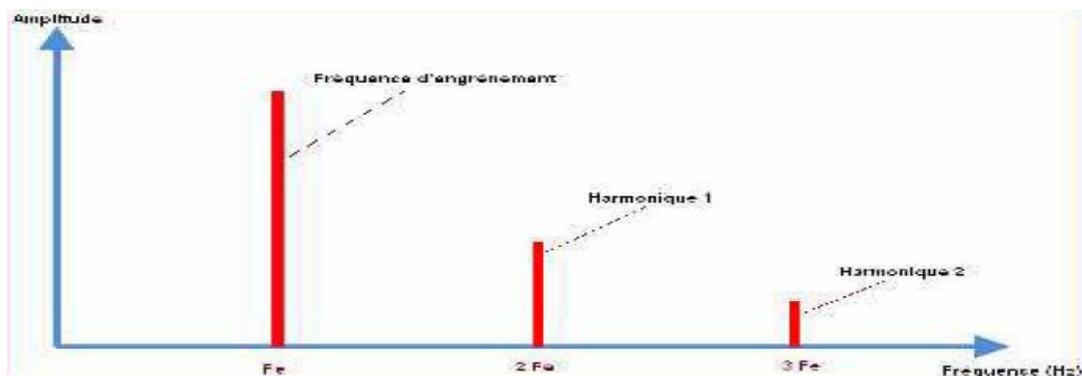


Figure IV.37. Spectre d'un engrenage sain

Le défaut d'engrenage introduit une modulation d'amplitude a la fréquence de rotation de l'arbre, ce qui se traduit par l'apparition dans le spectre, de raies à la fréquence de rotation des arbres et des bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement et de ses harmoniques. Ces bandes latérales se composent de plusieurs raies espacées de  $f_1$  et  $f_2$ . La figure III.38 montre le spectre théorique d'un défaut d'engrenage [15-16].

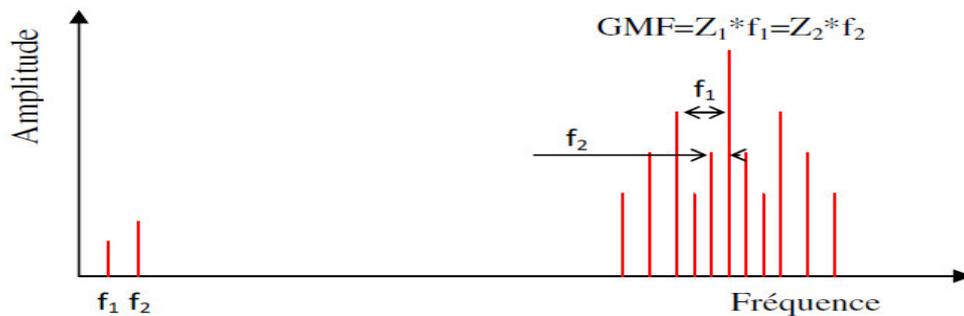


Figure IV.38. Représentation du spectre théorique d'un défaut d'engrenage

Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes (voir figure III.39):

- ✓ 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 IV.39. Différents types d'engrenage

#### IV.10.8.1 Signatures vibratoires des défauts

##### IV.10.8.1.1. Détérioration d'une dent

Si l'une des roues présente une dent détériorée, il se produit un choc dur, a chaque tour du pignon. Le spectre correspondant (Figure IV.40).

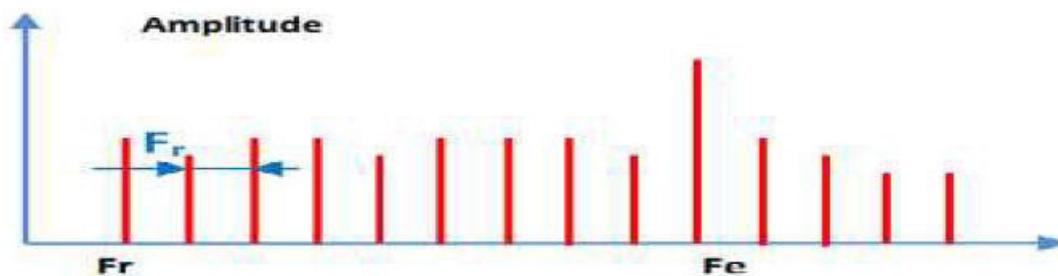


Figure IV.40. Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée

#### IV.10.8.1.2. Détérioration de l'ensemble de dentures

Lorsque l'ensemble de la denture est usé ou détérioré, 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 (voir figure IV.41). Le spectre peut présenter des raies à la fréquence de rotation correspondant à des équilibrages imparfaits [15-16].

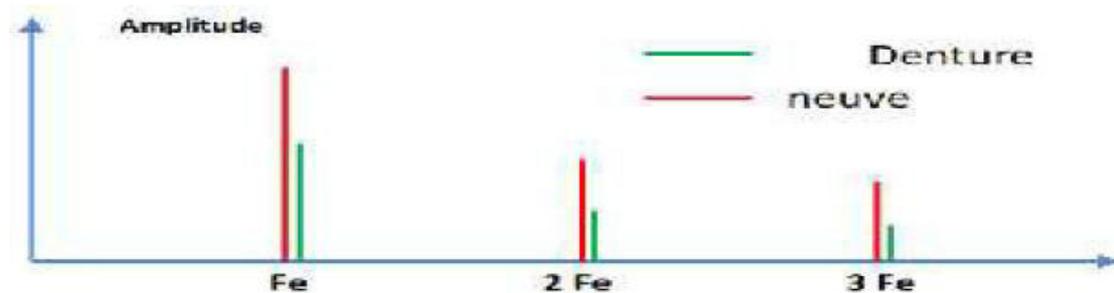


Figure IV.41. Image vibratoire théorique d'une denture

#### IV.10.8.1.3. Entraxe insuffisant (jeu insuffisant au fond de denture)

Si l'entraxe des arbres portant les deux roues est insuffisant, il se produit un engrènement en fond de denture. La dent menant force à l'engagement et au déengagement ce qui provoque une usure des deux côtés de la denture. En analyse spectrale ce phénomène se traduit par l'apparition d'une raie d'amplitude prépondérante à deux fois la fréquence d'engrènement et la disparition partielle, voire totale de l'amplitude à cette fréquence (Figure IV.42).

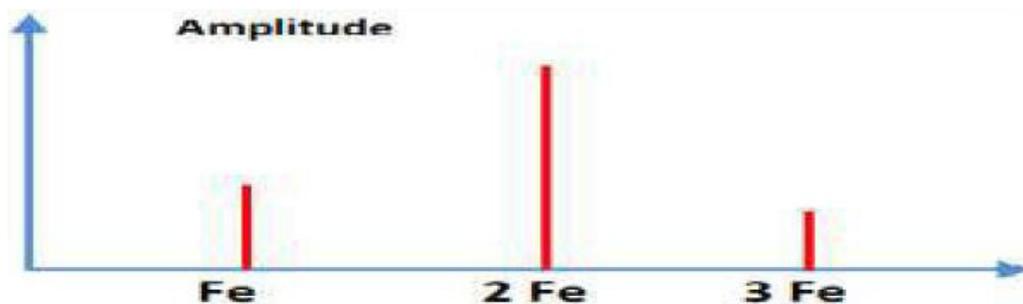


Figure IV.42. Image théorique et spectre réel d'un engrènement en fond de denture

#### IV.10.8.1.4. Jeu de fond de denture trop grand

Un jeu de fond de denture trop grand a pour conséquence un choc dur à chaque passage d'une dent à l'autre ("rattrapage" du jeu). On obtient alors un spectre de choc dur, périodique, à la fréquence d'engrènement (présence de nombreuses harmoniques de niveaux de même ordre de grandeur) (Figure IV.43) [15-16].

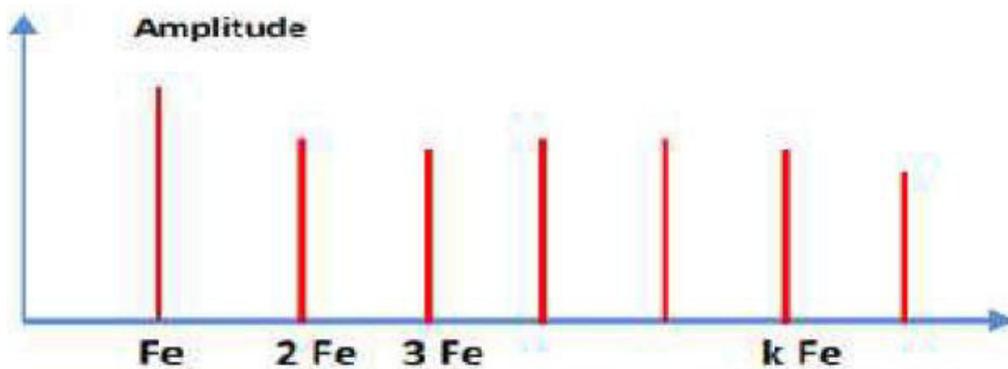


Figure IV.43. Image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée

#### IV.10.8.1.5. Défauts induisant une modulation d'amplitude

Si l'arbre ou le pignon présente un défaut d'excentricité, ou de faux rond, il va apparaître une modulation d'amplitude du signal vibratoire par la fréquence de rotation due à la modélisation de l'effort d'engrènement (Figure IV.44).

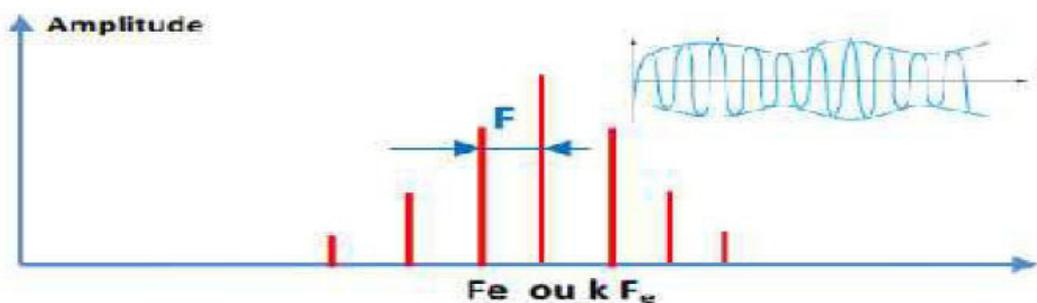


Figure IV.44. Image théorique de la modulation d'amplitude de  $F_e$  par  $F_r$

### IV.11. Groupes des machines

La norme AFNOR E 90-300 distingue six groupes de machines. Les critères de distinction sont la puissance, les fondations et la présence d'effets de masse alternatifs non compensables (par exemple pour les machines à piston). Ces groupes sont définis comme suit :

#### Groupe 1 :

Eléments de moteurs ou de machines qui, leurs conditions normales de fonctionnement, sont intimement solidaires de l'ensemble d'une machine (par exemple: moteurs électriques produits en série, puissance jusqu'à 15kW).

#### Groupe 2 :

Machines de taille moyenne (en particulier moteurs électriques de puissance comprise entre 15 et 75 kW) sans fondations spéciales. Moteurs montés de façon rigide ou machines (puissance jusqu'à 300 kW) sur fondations spéciales.

#### Groupe 3 :

Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations relativement rigides dans la direction des vibrations.

**Groupe 4 :**

Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations relativement souples dans la direction des vibrations (par exemple groupes turbogénérateurs, particulièrement ceux qui sont installés sur des fondations légères).

**Groupe 5 :**

Machines et dispositifs mécaniques d'entraînement avec effets d'inertie équilibrés (dus au mouvement alternatif des pièces), montés sur des fondations relativement rigides dans la direction des vibrations.

**Groupe 6 :**

Machines et dispositifs mécaniques d'entraînement avec effets d'inertie non équilibrés (dus au mouvement alternatif des pièces), montés sur des fondations relativement souples dans la direction des vibrations. Machines avec masses tournantes accouplées souplement (par exemple arbres de broyeurs). Machines telles que centrifugeuses avec déséquilibres variables, capables de fonctionner isolément, sans l'aide d'élément de liaison. Cribles, machines à tester la fatigue dynamique et générateur de vibrations pour les industries de transformation.

**III.12. Seuils de jugement**

La norme AFNOR E90-300 propose pour chacun des quatre premiers groupes des seuils de jugement qui déterminent les domaines suivants : bon, admissible, encore admissible, inadmissible.

[mm/s eff]	Groupe I Petites machines	Groupe II Machines Moyennes	Groupe III Grosses machines	Groupe IV Turbo-machines
28	Inadmissible	Inadmissible	Inadmissible	Inadmissible
18	Inadmissible	Inadmissible	Inadmissible	Encore admissible
11	Inadmissible	Inadmissible	Encore admissible	Encore admissible
7	Inadmissible	Inadmissible	Encore admissible	Admissible
4,5	Inadmissible	Encore admissible	Admissible	Bon
2,8	Encore admissible	Admissible	Bon	Bon
1,8	Encore admissible	Bon	Bon	Bon
1,1	Bon	Bon	Bon	Bon
0,71	Bon	Bon	Bon	Bon
0,46	Bon	Bon	Bon	Bon
0,28	Bon	Bon	Bon	Bon

Tableau IV.4. Exemples de limites vibratoires proposées par les normes AFNOR E 90-300

**Conclusion**

Les vibrations sont le résultat de forces dynamiques à l'intérieur des machines qui comprennent des éléments roulants et à l'intérieur des structures qui sont connectées à la machine .les différents éléments vibreront à des fréquences et des amplitudes différentes Les vibrations créent de la fatigue et de l'usure et elles sont souvent à l'origine de la rupture de la machine.

## Introduction

L'objectif du travail présenté ici est d'appliquer la surveillance (off line) par analyse vibratoire sur la pompe RL pour diagnostic son état, et de voir l'évolution vibratoire de la pompe avant et après révision.

### V.1. Matériel utilisé

Le service **DIAGNOSTIC MACHINES** de la centrale thermique de Cap Djinet utilise un système appelé **OneproD** pour la maintenance conditionnelle (détections des défauts des machines tournantes à traverses les vibrations). Ce système est composé d'un collecteur de données appelé **MVP-200**, qui permet de faire l'acquisition du signal vibratoire généré par les vibrations d'une machine. Les données acquises stockées dans une carte seront transmises, ver le logiciel **XPR-300**, qui fait le traitement du signal et l'analyse des tendances.

#### V.1.1. Capteur des vibrations [16]

C'est un accéléromètre **ASH201-A** de type piézoélectrique raccordé au collecteur analyseur **MVP-200**. On utilise ce capteur pour mesurer l'accélération vibratoire.

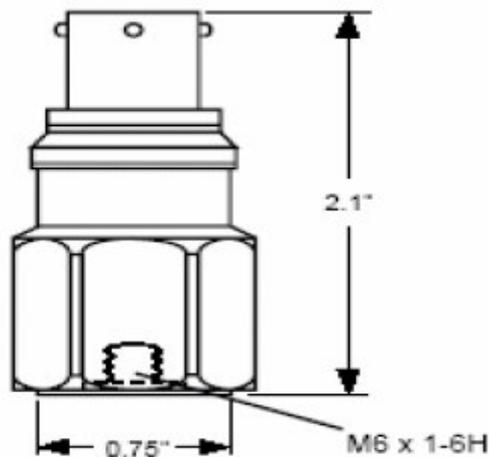


Fig. V.1 : Accéléromètre ASH201-A

#### Caractéristiques techniques :

- ✓ Marque : Nemrod
- ✓ TYPE : ASH201-A
- ✓ Principe : Piézo-électrique avec amplificateur de charge intégré
- ✓ Mode de fixation : Vissage, Aimant ou Point de touche
- ✓ Facteur de transmission : 100 mV/g
- ✓ Plage de fréquence : 1 – 9 000 Hz ( $\pm 10\%$ ) - 0.5 – 14 000 Hz ( $\pm 3$  dB)
- ✓ Fréquence propre : 30 kHz
- ✓ Plage de température : -50 ... +120 °C

### V.1.2. Analyseur- MVP-200 [17]

Le MVP-200 est un appareil d'acquisition pratique destiné à faire : des mesures globales de vibrations, de paramètre de procédé, de signaux temporels et des spectres.

Le MVP-200 c'est un collecteur de données portable. Il permet la collecte des données vibratoire qui seront transférés dans un micro-ordinateur par l'intermédiaire d'une carte.



Figure V.2. Analyseur MVP-200

#### Caractéristique techniques :

- ✓ Marque : Nemrod
- ✓ Type : MVP-200
- ✓ Modes de fonctionnement :
  - Mode analyseur de spectre
  - Fonction enregistreur (Temps)
  - Mode collecteur de données

### V.1.3. Logiciel de diagnostic et d'analyse XPR-300 [17]

Le logiciel XPR-300 Logiciel permet d'exploiter les données de mesure de la carte, pour apprécier l'état des machines, faire le diagnostic des défauts et réaliser la maintenance conditionnelle.

- ✓ **Rapidité de configuration** : Modèles, base roulements, copier/coller, modification par lot.
- ✓ **Multi technique**: Vibration, Procès, Huile, Thermographie
- ✓ **Modules de base**: En ligne (OneproD MVX), Hors ligne (OneproD MVP)

## V.2. Etude de cas

Dans notre travail nous avons étudié pour chaque équipement de circuit RL les défauts courants.

### V.2.1. Les points de mesures

La localisation des défauts pour les différents cas des vibratoires de circuit RL sont mesurées à partir des points de mesure (pallier) dans trois directions verticale, axiale et horizontale qui sont données par le tableau :

N° Pallier	Type de pallier	Equipement
P1	Roulement à billes [NU313]	Pompe booster
P2	Roulement à rouleaux [7313B]	Pompe booster
P3	Pallier lisse	Moteur
P4	Pallier lisse	Moteur
P5	Pallier lisse	Multiplicateur
P6	Pallier lisse	Multiplicateur
P7	Pallier lisse	Coupleur
P8	Pallier lisse	Pompe principale
P9	Pallier lisse	Pompe principale

Tableau V.1. Les points de mesures

### V.2.2. Les défauts au niveau de la pompe booster (nourricière)

Le défaut le plus courant au niveau de la pompe booster est le défaut de roulement.

#### V.2.2.1. Mesures de niveau global avant l'intervention

VEP	PAL1AX	PAL1RH	PAL1RV	PAL2RH	PAL2RV
Ng: Accélération	2.93	3.32	4.39	4.66	6.09
Ng: Vitesse Vibratoire	2.34	3.74	9.07	10.9	9.97

Tableau V.2. Niveau global dans les points de mesures

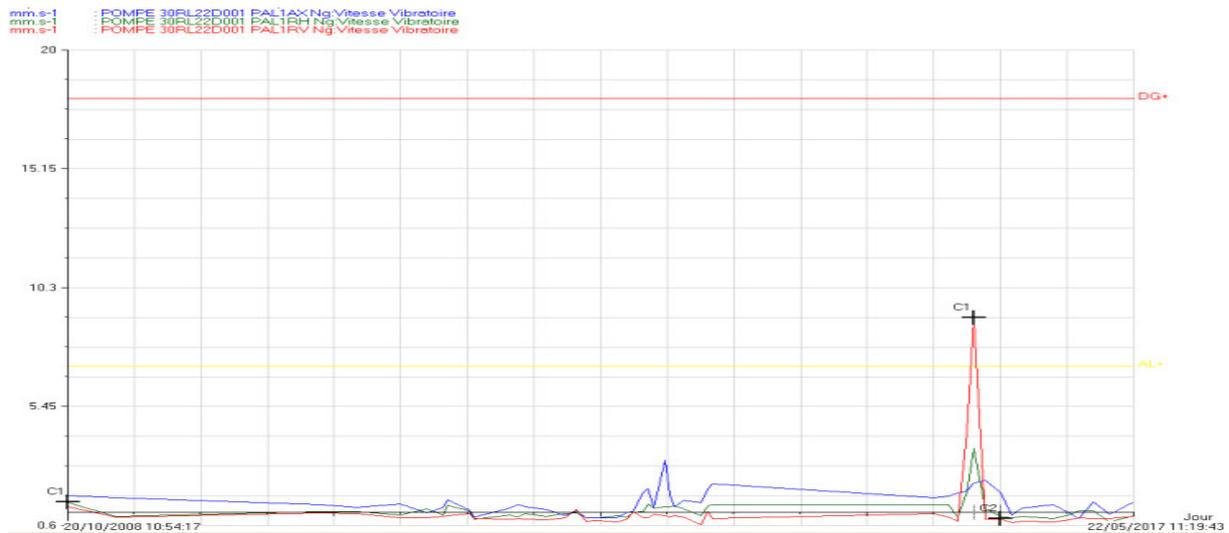


Figure V.3. Signal temporel de palier 1

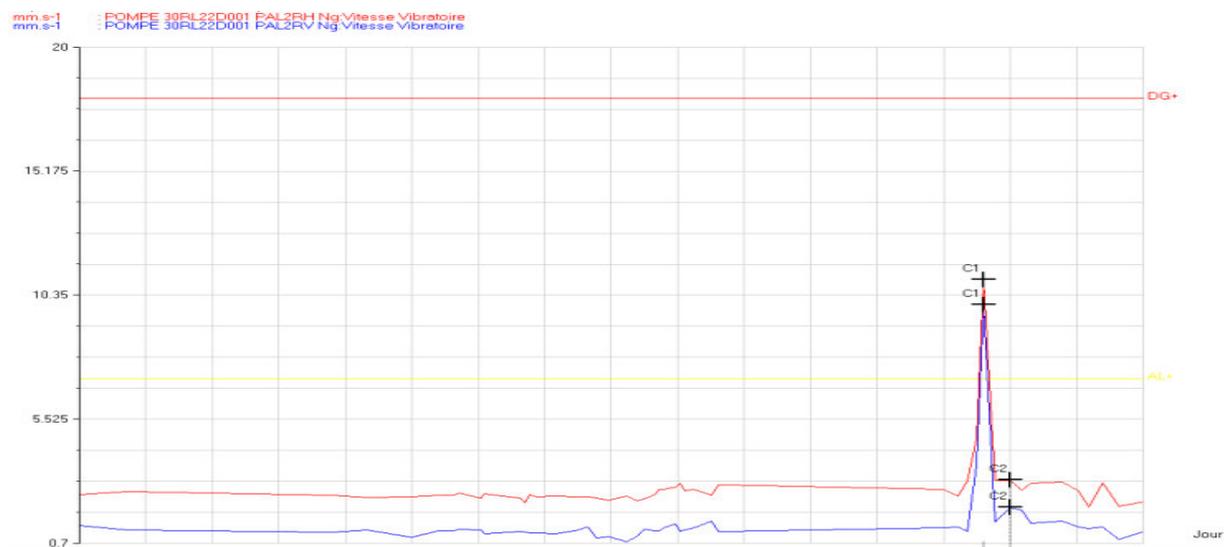


Figure V.4. Signal temporel de palier 2

### V.2.2.2. Interprétation de résultat

D'après la norme AFNOR E90-300, la pompe booster classer dans le groupe 04.

#### - Pallier 01 :

Les niveaux de vibration de (PAL1AX) et (PAL1RH) sont admissibles par rapport à la norme, mais le niveau de vibration de (PAL1RV) dépasse l'alarme.

#### - Pallier 02 :

Les niveaux de vibration de (PAL2AX) et (PAL2RV) dépassent l'alarme.

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

## V.2.2.3. Analyse spectrale de la pompe booster

## ✓ Calcul de la fréquence de rotation

La vitesse de rotation de la pompe booster est de 1500 tr/min, donc la fréquence de rotation

$$\text{est : } f_r = \frac{N}{60} = \frac{1500}{60} = 25 \text{ Hz.}$$

## ✓ Les fréquences caractéristique de la pompe booster

Pour compléter les démarches de l'application de l'analyse spectrale, il faut déterminer les fréquences ou les anomalies et les défauts peuvent apparaître.

Défaut		Fréquence caractéristique	Valeurs (Hertz)
Balourd		$f_b = f_r$	25
Désalignement		$f_d = 2 * f_r$	50
Roulement Palier 1	Cage	$f_c = \frac{N}{2 \cdot 60} \cdot \left( 1 - \frac{d_b}{D_m} \cdot \cos \beta \right)$	08
	Bille	$f_b = \frac{D_m}{d} \frac{N}{60} \cdot \left( 1 - \frac{d_b^2}{D_m^2} \cdot \cos^2 \beta \right)$	130
	Bague externe	$f_e = \frac{n \cdot N}{2 \cdot 60} \cdot \left( 1 - \frac{d_b}{D_m} \cdot \cos \beta \right)$	122
	Bague interne	$f_i = \frac{n \cdot N}{2 \cdot 60} \cdot \left( 1 + \frac{d_b}{D_m} \cdot \cos \beta \right)$	177,75
Roulement Palier 2	Cage	$f_c = \frac{N}{2 \cdot 60} \cdot \left( 1 - \frac{d_b}{D_m} \cdot \cos \beta \right)$	10.5
	Bille	$f_b = \frac{D_m}{d} \frac{N}{60} \cdot \left( 1 - \frac{d_b^2}{D_m^2} \cdot \cos^2 \beta \right)$	104.25
	Bague externe	$f_e = \frac{n \cdot N}{2 \cdot 60} \cdot \left( 1 - \frac{d_b}{D_m} \cdot \cos \beta \right)$	123.65
	Bague interne	$f_i = \frac{n \cdot N}{2 \cdot 60} \cdot \left( 1 + \frac{d_b}{D_m} \cdot \cos \beta \right)$	177

Tableau V.3. Les fréquences caractéristique de la pompe booster

✓ Spectre Avant L'intervention

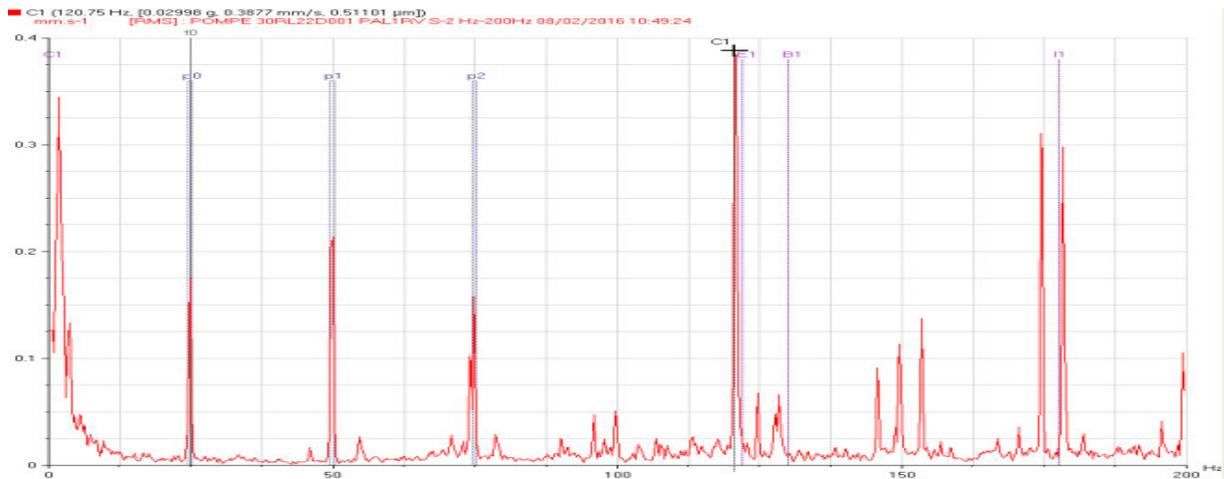


Figure V.5. Spectre de vibration de la pompe booster au niveau de PAL1RV avant l'intervention

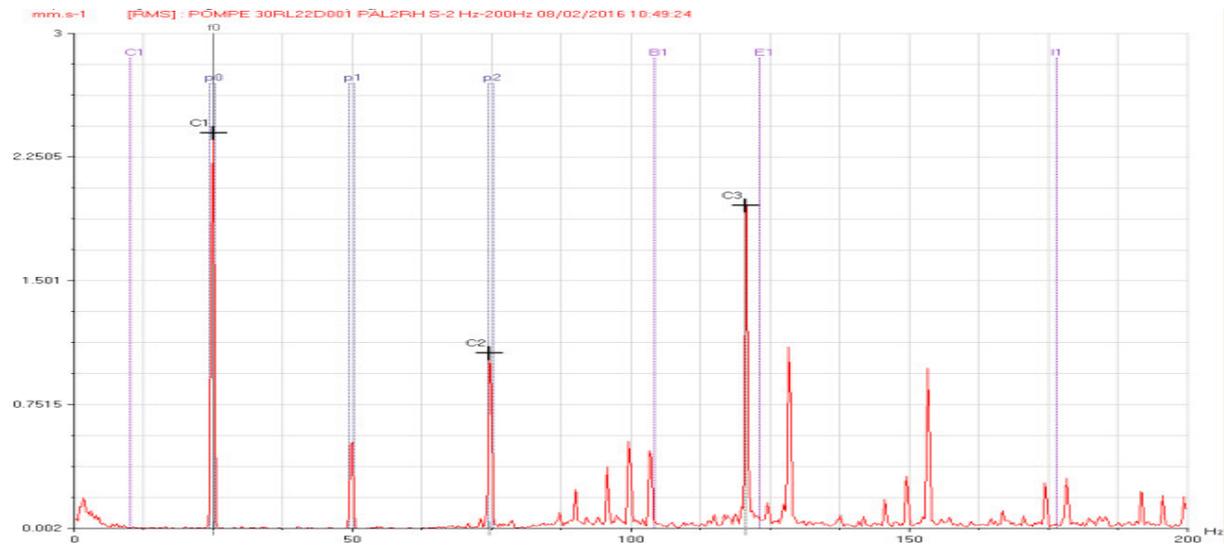


Figure V.6. Spectre de vibration de la pompe booster de PAL2RH avant l'intervention

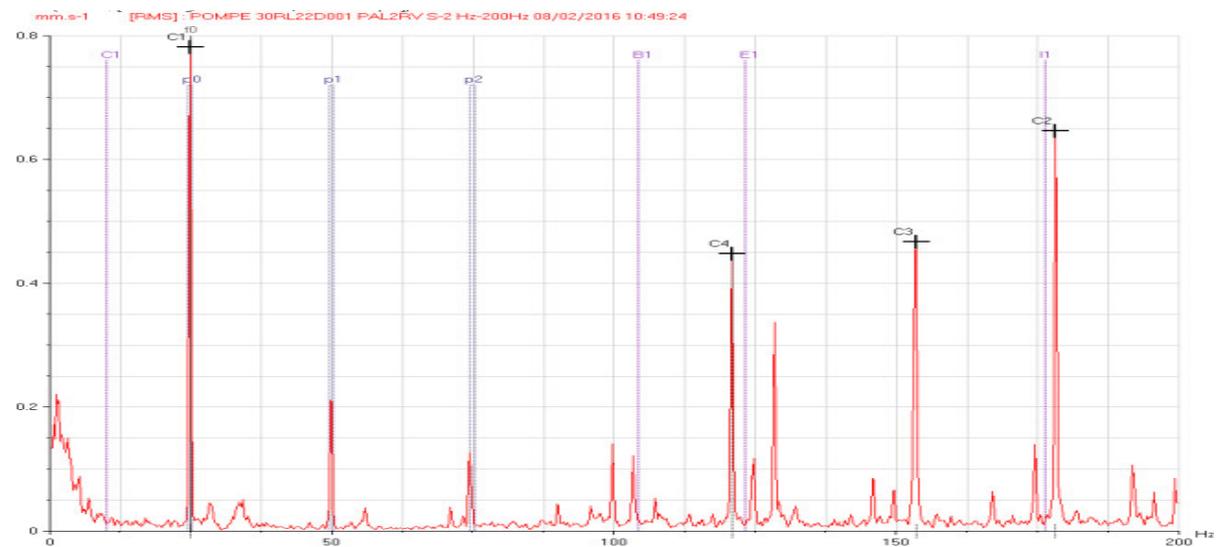


Figure V.7. Spectre de vibration de la pompe booster de PAL2RV avant l'intervention

### V.2.2.4. Interprétation des résultats

#### - Pallier 01

On remarque la présence d'un pic important qui coïncide avec la fréquence 120,75 Hz, ce qui montre que cette élévation est produite par un défaut de bague externe.

Un deuxième pic qui coïncide avec la fréquence 177,75 Hz, ce qui montre que cette élévation est produite par un défaut de bague interne.

#### - Pallier 02

**PAL2RH :** On remarque la présence d'un pic important (C1) qui coïncide avec la fréquence 25 Hz, ce qui montre que cette élévation est produite par un défaut de balourd.

Un deuxième pic (C3) qui coïncide avec la fréquence 120,75 Hz, ce qui montre que cette élévation est produite par un défaut de bague externe.

**PAL2RV:** On remarque la présence d'un pic important (C1) qui coïncide avec la fréquence 25 Hz, ce qui montre que cette élévation est produite par un défaut de balourd.

Un deuxième pic (C4) qui coïncide avec la fréquence 121 Hz, ce qui montre que cette élévation est produite par un défaut de bague externe.

Un troisième pic (C2) qui coïncide avec la fréquence 178,25 Hz, ce qui montre que cette élévation est produite par un défaut de bague interne.

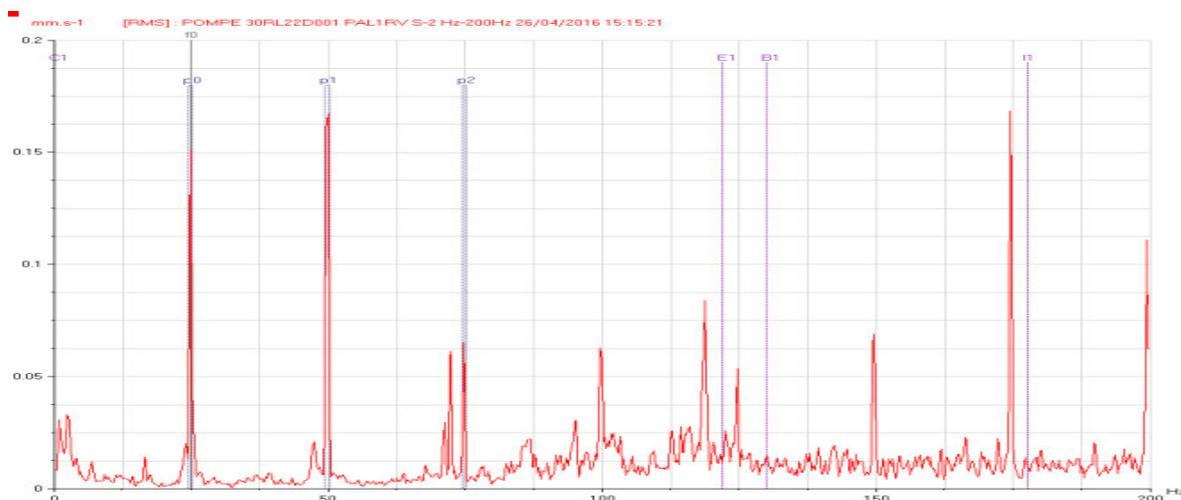
### V.2.2.5. Mesures de niveau global après l'intervention

VEP	PAL1AX	PAL1RH	PAL1RV	PAL2RH	PAL2RV
Ng: Accélération	2.57	0.626	0.461	0.342	0.685
Ng: Vitesse Vibratoire	1.96	0.967	0.863	3.14	2.08

**Tableau V.4. Niveau global dans les points de mesures après l'intervention**

Les niveaux de vibration dans les points de mesures est bon par rapport à la norme.

#### ✓ Spectre après l'intervention



**Figure V.8. Spectre de vibration de la pompe booster de PAL1RV après l'intervention**

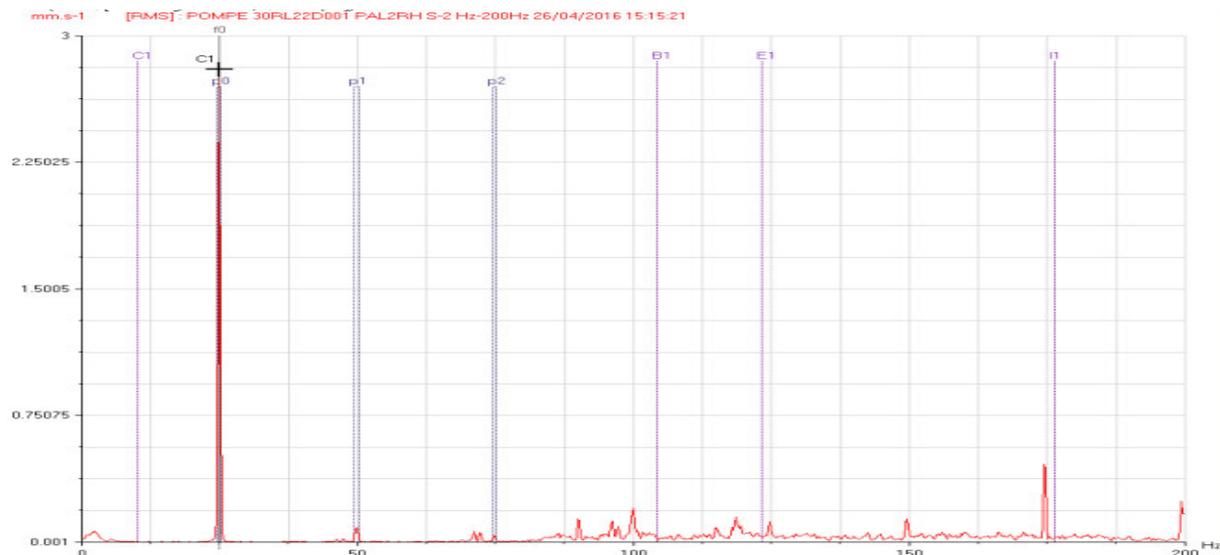


Figure V.9. Spectre de Vibration de la pompe booster de PAL2RH après l'intervention

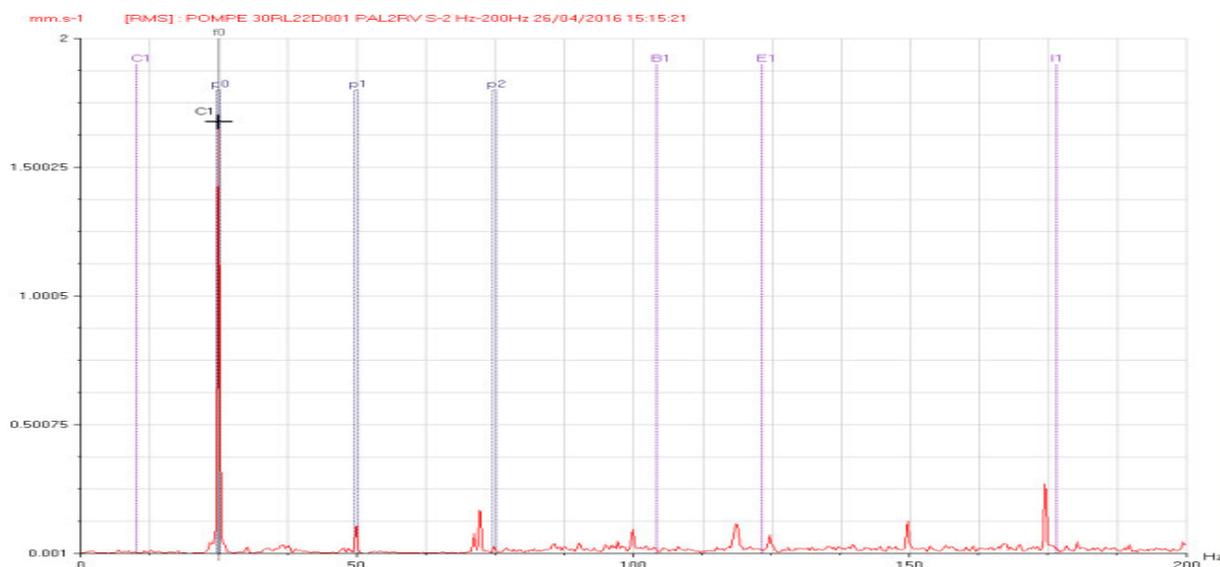


Figure V.10. Spectre de vibration de la pompe booster de PAL2RV après l'intervention

### V.2.2.6. Interprétation des résultats

#### - Pallier 01

On remarque que l'amplitude au niveau de la fréquence 120.75 Hz a été réduite de 0.3877 (mm/s eff) jusqu'à 0.025 (mm/s eff), donc le défaut de la bague externe est éliminé.

L'amplitude au niveau de la fréquence 177.75 Hz a été réduite de 0.3 (mm/s eff) jusqu'à 0.01 (mm/s eff), donc le défaut de la bague interne est éliminé.

#### - Pallier 02

On remarque que l'amplitude au niveau de la fréquence 121 Hz et 178.25 Hz sont réduite, donc les défauts de la bague externe et interne est éliminé.

### V.2.3. Les défaut au niveau de multiplicateur de vitesse

Le défaut principale de multiplicateur de vitesse est le défaut d'engrenage, donc on va étudier dans cette partie un seul point de mesure PAL6RV qui visualise le comportement vibratoire de défaut d'engrenage.

#### V.2.3.1. Mesures de niveau global avant l'intervention

VEP	PAL5AX	PAL5RH	PAL5RV	PAL6AX	PAL6RH	PAL6RV
Ng:Accélération	9.58	9.12	7.43	8.26	5.66	11.5
Ng:Vitesse Vibratoire	0.960	1.94	1.11	1.88	1.92	1.33

Tableau V.5. Niveau global dans les points de mesures

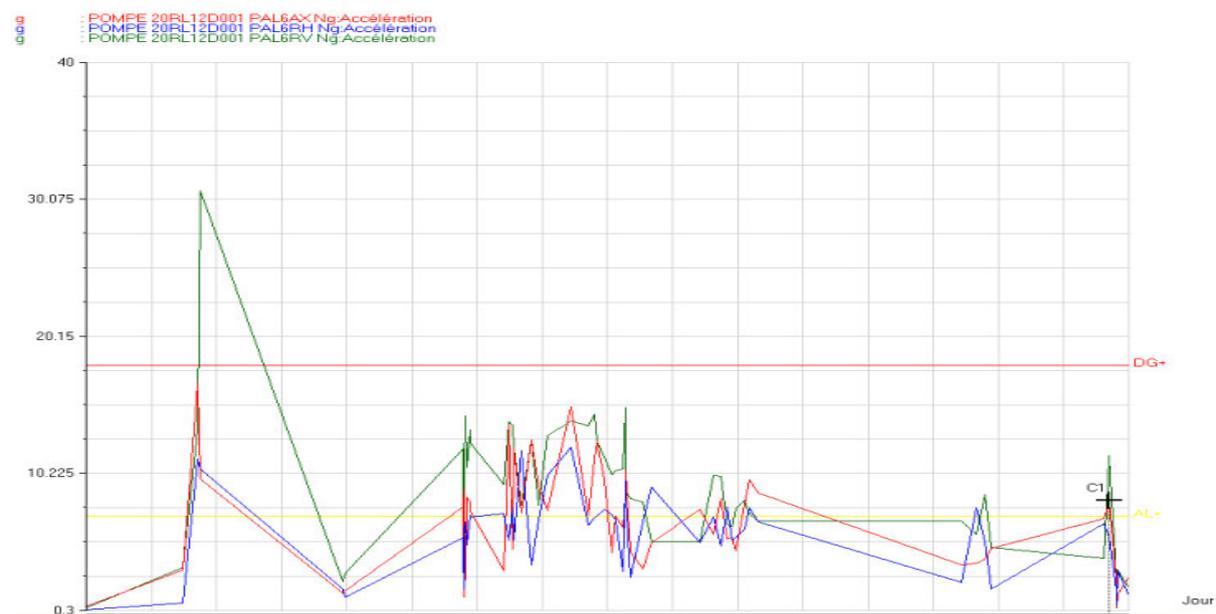


Figure V.11. Niveau global de pallier 06 position verticale

#### V.2.3.2. Interprétation de résultat

##### - Pallier 05:

Les niveaux de vibration de PAL5AX, PAL5RH et PAL5RV dépassent le seuil d'alarme par rapport à la norme.

##### - Pallier 06 :

Les niveaux de vibration de PAL6AX et PAL6RV dépassent le seuil d'alarme par rapport à la norme.

Le niveau de vibration de PAL6RH est admissible par rapport à la norme.

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

**V.2.3.3. Analyse spectrale de multiplicateur de vitesse**

✓ calcul de la fréquence de rotation

La vitesse de rotation de multiplicateur de vitesse est de 1500 tr/min, donc la fréquence de

rotation est : - fréquence d'entrée  $f_{r1} = \frac{N}{60} = \frac{1500}{60} = 25\text{Hz}$

- fréquence de sortie  $f_{r2} = \frac{N}{60} = \frac{5250}{60} = 87,5\text{Hz}$ .

✓ Les fréquences caractéristiques de multiplicateur de vitesse

**Fréquence d'engrenage**

On a :  $Z_1 = 112$  dents,  $f_{r1} = 25$  Hz

$Z_2 = 32$  dents,  $f_{r2} = 87,5$  Hz

$f_{eng} = f_{r1} * Z_1 = f_{r2} * Z_2$

**A.N :**  $f_{eng} = 25 * 112 = 2800$  Hz

✓ Spectre Avant L'intervention

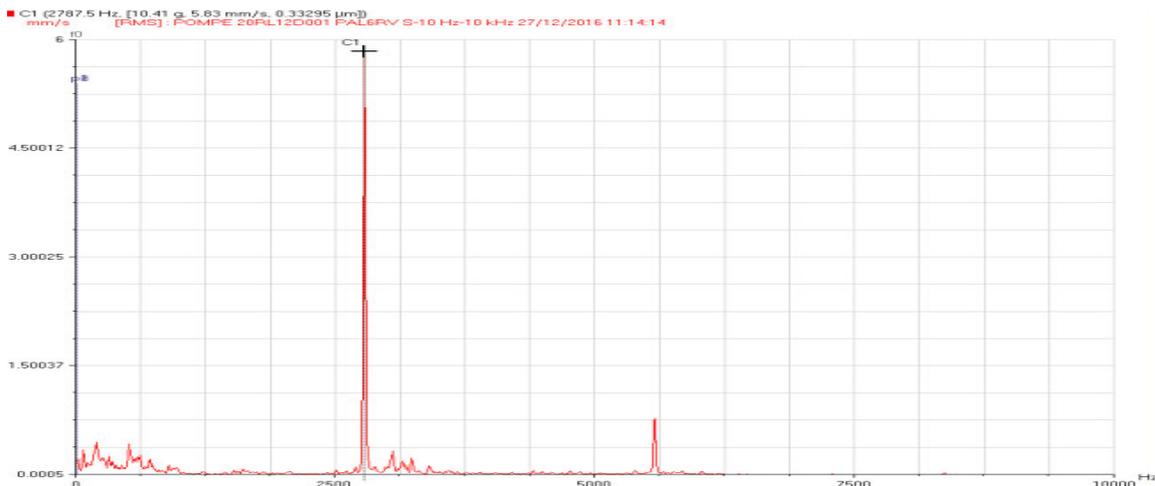


Figure V.12. Spectre de vibration de multiplicateur de vitesse de PAL6RV avant l'intervention

**V.2.3.4. Interprétation des résultats**

On remarque la présence d'un pic important (5.83 mm/s eff) qui coïncide avec la fréquence 2787,5 Hz  $\approx$  2800 Hz, ce qui montre que cette élévation est produite par un défaut d'engrenage.

**V.2.3.5. Mesures de niveau global après l'intervention**

VEP	PAL5AX	PAL5RH	PAL5RV	PAL6AX	PAL6RH	PAL6RV
Ng: Accélération	3.04	1.90	1.29	2.75	1.45	2.01
Ng: Vitesse Vibratoire	0.820	1.43	1.01	1.26	1.42	1.18

Tableau V.6. Niveau global dans les points de mesures après l'intervention

Le niveau global dans les points de mesures est bon par rapport à la norme.

✓ Spectre après l'intervention

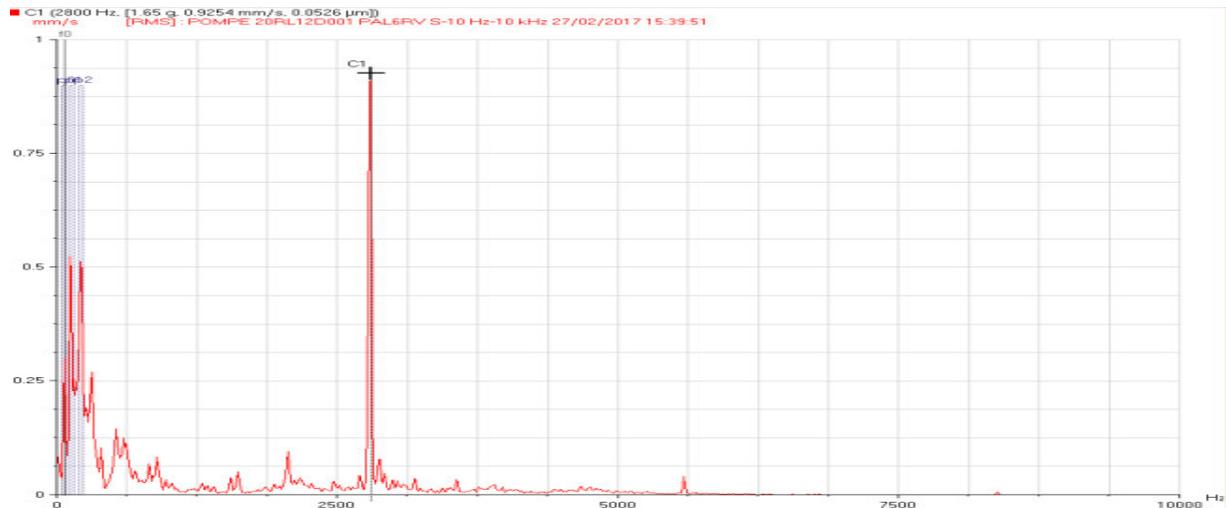


Figure V.13. Spectre de Vibration de multiplicateur de vitesse de PAL6RV après l'intervention

V.2.3.6. Interprétation des résultats

On remarque que l'amplitude au niveau de la fréquence 2800 Hz a été réduite de (5.83 mm/s eff) jusqu'à (0.9254 mm/s eff), donc le défaut d'engrenage est éliminé.

V.2.4. Les défaut au niveau de la pompe principale

On va étudier dans cette partie les défauts de désalignement et balourd.

V.2.4.1. Défaut de balourd

V.2.4.1.1. Mesures de niveau global avant l'intervention

VEP	PAL8RH	PAL8RV	PAL9AX	PAL9RH	PAL9RV
Ng: Accélération	1.87	3.25	3.79	0.785	1.28
Ng: Vitesse Vibratoire	4.52	2.71	1.35	9.42	3.23

Tableau V.7. Niveau global dans les points de mesures

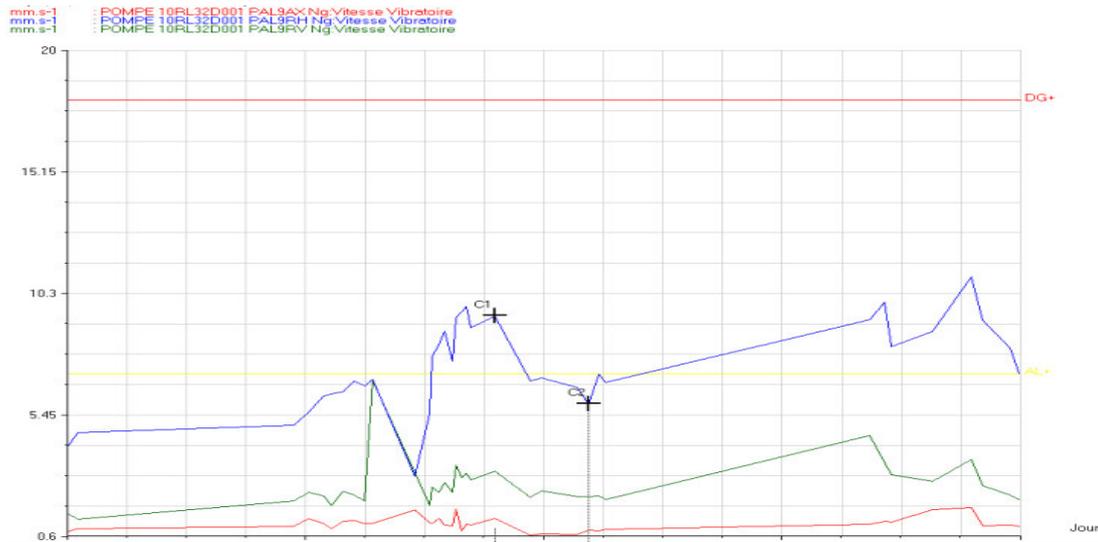


Figure V.14. Niveau global de pallier 09

**V.2.4.1.2. Interprétation de résultat**

**- Pallier 08 :**

Le niveau de vibration de (PAL8RH) est admissible par rapport à la norme, et le niveau de vibration de(PAL8RV) est bon.

**- Pallier 09 :**

Les niveaux de vibration de(PAL9AX)est bon et de (PAL9RV)est admissible par rapport à la norme, mais a la position horizontal(PAL9RH)est dépassé le seuil d'alarme.

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

**V.2.4.1.3. Analyse spectrale de la pompe principale**

✓ **calcul de la fréquence de rotation**

La vitesse de rotation de la pompe principale est de 4500 tr/min, donc la fréquence de rotation

$$\text{est : } f_r = \frac{N}{60} = \frac{4500}{60} = 75 \text{ Hz}$$

✓ **Les fréquences caractéristiques de la pompe principale**

Pour compléter les démarches de l'application de l'analyse spectrale, il faut déterminer les fréquences ou les anomalies et les défauts peuvent apparaitre.

Défaut	Fréquence caractéristique	Valeurs (Hertz)
Balourd	$f_b = f_r$	75
Désalignement	$f_d = 2 * f_r$	150

Tableau V.8. Les fréquences caractéristiques de la principale

✓ Spectre Avant L'intervention

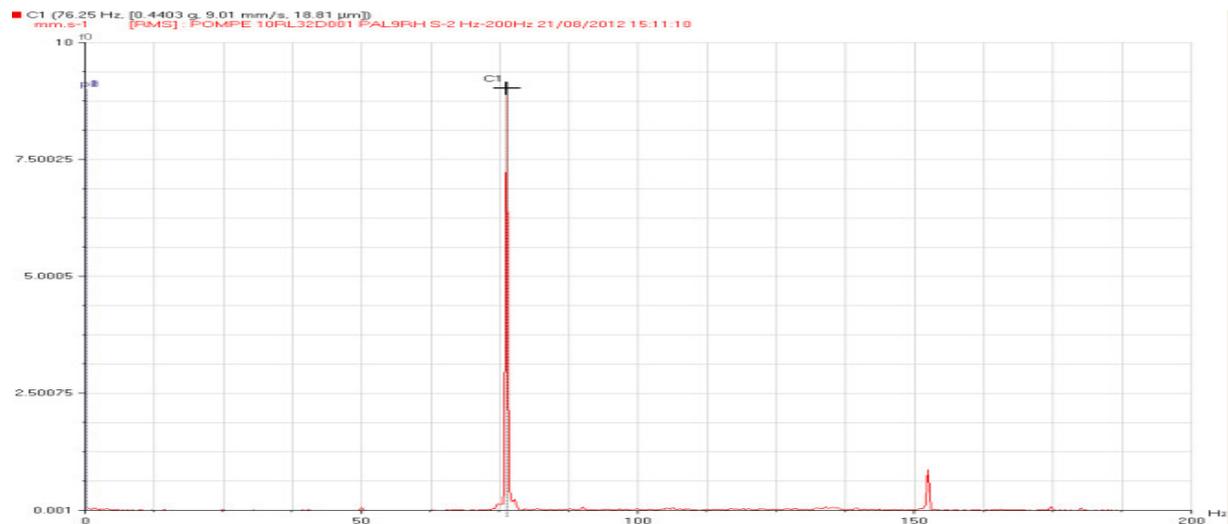


Figure V.15. Spectre de vibration de la pompe principale de PAL9RH avant l'intervention

V.2.4.1.4. Interprétation des résultats

On remarque la présence d'un pic important qui coïncide avec la fréquence 75 Hz, ce qui montre que cette élévation est produite par un défaut de balourd.

V.2.4.1.5. Mesures de niveau global après l'intervention

VEP	PAL8RH	PAL8RV	PAL9AX	PAL9RH	PAL9RV
Ng: Accélération	1.39	1.83	3.45	0.786	1.21
Ng: Vitesse Vibratoire	3.88	3.11	0.890	5.91	2.21

Tableau V.9. Niveau global dans les points de mesures après l'intervention

Le niveau global dans les points de mesures est bon par rapport à la norme.

✓ Spectre après l'intervention

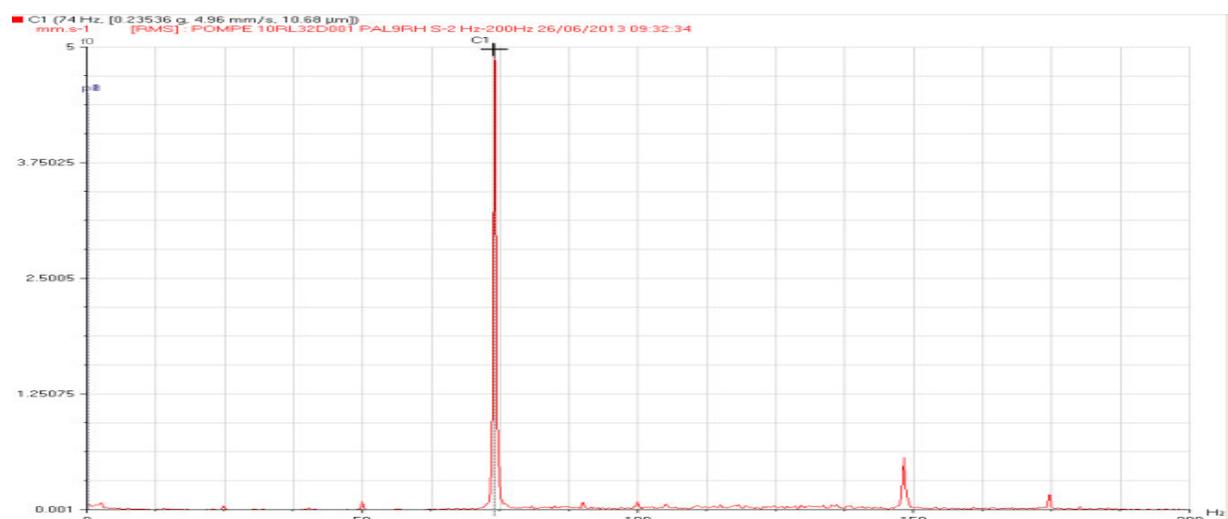


Figure V.16. Spectre de vibration de la pompe principale de PAL9RH après l'intervention

#### **V.2.4.1.5. Interprétation des résultats**

On remarque que l'amplitude au niveau de la fréquence 75 Hz a été réduite de 9.01 (mm/s eff) jusqu'à 4.96 (mm/s eff), donc il existe encore un léger balourd.

#### **Conclusion**

Au cours de cette étude, nous avons montré l'influence des défauts des éléments tournants sur le comportement vibratoire de groupe alimentaire.

A partir des spectres nous avons établi un diagnostic des défauts survenant sur la machine, on a constaté que le niveau vibratoire après l'intervention devient admissible.

### Conclusion générale

Le stage que nous avons entrepris au niveau de la centrale thermique de RAS-DJINET est très bénéfique sur plusieurs plans ; tant en un apport supplémentaire en connaissances pratiques et aussi sur le monde du travail en milieu industriel.

Dans ce travail, nous avons mis l'accent sur l'importance de la maintenance conditionnelle dans la détection des défauts de groupe alimentaire, qui consiste à surveiller l'état vibratoire de l'équipement. Cette surveillance permet d'éviter des arrêts non programmés qui peuvent nous conduire à une perte de production. C'est à travers une bonne acquisition, issu du comportement vibratoire des machines tournantes, qu'on peut avoir des descripteurs (Mesure globale, spectre,...) qui servent comme un outil très puissant pour le diagnostic des machines.

Cette étude nous a permis de mieux comprendre le signal vibratoire qui contient des informations sur les efforts engendrés par le fonctionnement de la machine, mais aussi de l'état mécanique des structures. Il permet par conséquent d'avoir une image des contraintes internes et de diagnostiquer un certain nombre de défauts de fonctionnement.

Enfin, la mise en place de la maintenance conditionnelle est basée essentiellement sur l'utilisation du matériel et la formation du personnel sur les méthodes de diagnostic et l'interprétation des résultats de mesures. Ce type de maintenance permet d'augmenter considérablement la disponibilité des équipements de production, leur durée de vie et surtout la sécurité du personnel.

### Références bibliographiques

- [1] GHERSALLAH. Alternateur. Module II : équipement principal.(norme spécifique) Cap Djinet, Mars 1995.
- [2] Afnor, "Terminologie de la maintenance", NF EN 13306 X 60-319, 2001.
- [3] H. Mahgoun, "Analyse non stationnaire des signaux vibratoires dans la surveillance des machines et la prévention des défaillances", Thèse de doctorat , Université de Ferhat Abbas - Sétif , Algérie, 2013.
- [4] B. Adel "Contribution au Diagnostic des Défaits dans les Machines Tournantes par Analyse Multi résolution", Thèse de doctorat, Université 08 mai 1945 Guelma.
- [5] C. Lurette, " développement d'une technique neuronale auto-adaptative pour la classification dynamique de données évolutives. Application a la supervision d'une presse hydraulique", Thèse de doctorat des Sciences et Technologies de Lille, France, 2003.
- [6] D. Racoceanu, " Contribution a la Surveillance des Systèmes de Production en Utilisant l'Intelligence Artérielle", Thèse de Habilitation a diriger des recherches de l'université de FRANCHE-COMTÉ de Besançon, France,2006.
- [7] C. Rahmoune, " Analyse et traitement du courant statorique pour la détection des défauts dans les systèmes électromécaniques", Thèse de Magister université m'Hamed bougera Boumerdes , Algérie,2011.
- [8] O. Djebili, "Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement" Thèse de doctorat universite de Reims champagne Ardenne, France, 2013.
- [9] MC- Généralités sur les vibrations, Kjaer. Edition novembre 2002.
- [10] Archive de la centrale thermique Cap Djinet, SONALGAZ.
- [11] Z. Ghemari, " Modélisation, simulation et analyse expérimentale du capteur de vibration (accéléromètre)", Thèse de Doctorat, Universite Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2013.
- [12] F. Landolsi , " Cours De Techniques De Surveillance",2010.
- [13] Morel J., «surveillance vibratoire et maintenance prédictive», Techniques de l'ingénieur R 6 100, 2007.
- [14] A. LALOUCHE. Diagnostic des machines tournantes. Etude numérique et expérimentale Mémoire de Magister en mécanique présenté à l'UMBB le Mai 2006.
- [15] T. Bensana, " Diagnostic des défaillances base sur l'analyse vibratoire d'une turbine a vapeur.", Thèse de Magister, Universite Badji Mokhtar -Annaba, Algérie, 2008.
- [16] H. Cherif, " Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes", Thèse de Magister, Mohamed Khider - Biskra, Algérie, 2014.
- [17] Documentation du constructeur (Halberg, Siemens, Voith).
-