



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم والعلمية والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance-Fiabilité-Qualité

Thème

ANALYSE VIBRATOIRE DES DÉFAILLANCES MÉCANIQUES – RÉALISATION D'UN BANC D'ESSAI D'ÉQUILIBRAGE

Présenté et soutenu publiquement par :

BAARA Nabil

DAOUD Taha

Devant le jury composé de :

| Nom et Prénom | Grade | Etablissement | Qualité |
|-------------------|-------|---------------------|-----------|
| YAHIAOUI Reda | MCB | Université d'Oran 2 | Président |
| NOUREDDINE Rachid | MCA | Université d'Oran 2 | Encadreur |
| HEROUZ Keltoum | MAA | Université d'Oran 2 | Examineur |

Juin 2018

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :

Mes très chers parents qui ont m'aider par ses invocations dans tous

moment, dans le bonheur et le malheur ;

Tous mes frères ; Tous mes sœurs.

toute ma famille ; Tous mes voisins.

Mon Binôme Taha qui m'a supporté le long de toutes ces années d'études.

Toutes mes chères amies.

Tout les professeurs qui nous ont aidé à en arriver jusqu'au là.

A tous mes amis de promotion de Genie industriel 2018.

Nabil.....

Dédicace

Chaleureusement je dédie ce modeste travail :

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

Mon Binôme Nabil qui m'a supporté le long de toutes ces années d'études

Mes très chers frères Moussa, Omar, Hocine, et tous la famille

Daoud, Bessekhouad, Seba, Fartas et Guellil

A tous mes amis de promotion de Genie industriel 2018

A tous mes amis S.Kamel, L.Selimane, F.Salahi, F.Sofiane, B.Islam, Z.Taha.

Taha....

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions - عز وجل - الله le tout puissant de nous avoir donné

La patience et la force pour terminer ce modeste travail, et nous tenons

Expressément à remercier nos parents pour leur soutien, leur confiance et leur encouragement tout le long de nos études.

Nous tenons Expressément et Chaleureusement à remercier notre encadreur M. NOUREDDINE Rachid, Maître de Conférences A, à l'université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed. En tant que Directeur de mémoire, il nous a guidé dans notre travail et nous a aidé à trouver des solutions pour avancer.

Nos remerciements iront naturellement vers tous ceux qui ont accepté avec bienveillance de participer au jury de mémoire :

Nous remercions Monsieur YAHIAOUI Reda, Maître de Conférences B, à l'université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed pour avoir accepté de présider ce jury.

Nous remercions également Madame H'EROUZ Keltoum, Maître Assistant A, à l'université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Enfin un grand merci à tous mes amis qui m'ont encouragé de près ou de loin pendant ce travail.

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Fig.1.1 : Représentation synthétique de la maintenance..... | 03 |
| Fig.1.2 : Intervention de la maintenance conditionnelle | 04 |
| Fig.1.3 : % D'utilisation des différentes méthodes d'analyse dans le monde..... | 05 |
| Fig.1.4 : Naissance d'une vibration..... | 08 |
| Fig.1.5 : Importance des vibrations..... | 09 |
| Fig.1.6 : Relation accélération, vitesse, déplacement..... | 11 |
| Fig.1.7 : Facteurs ayant une incidence sur les fréquences propres..... | 12 |
| Fig.1.8 : Conversion déplacement-accélération..... | 13 |
| Fig.1.9 : Capteurs de vibration..... | 13 |
| Fig.1.10 : Capteurs de déplacement..... | 14 |
| Fig.1.11 : Schéma d'une chaîne de mesure à courants de Foucault..... | 14 |
| Fig.1.12 : Vélocimétrie fonctionnant selon le principe électrodynamique..... | 15 |
| Fig.1.13 : Capteurs d'accélération (accéléromètres) | 15 |
| Fig.1.14 : Domaine d'utilisation des capteurs de vibration..... | 17 |
| Fig.1.15 : Architecture générale d'un système de surveillance en ligne..... | 18 |
| Fig.1.16: Composantes de la surveillance industrielle..... | 19 |
| Fig.1.17 :Types de surveillance des machines..... | 19 |
| Fig.1.18 : Surveillance On-line | 20 |
| Fig.1.19 : Surveillance off-line | 20 |
| Fig.1.20 : Choix du type de suivi..... | 21 |
| Fig. 2.1 : Détermination des seuils par la méthode de relevé globale..... | 24 |
| Fig. 2.2 : Seuils de vitesse vibratoire ISO 2372..... | 25 |
| Fig. 2.3 : Seuils d'accélération vibratoire..... | 26 |
| Fig. 2.4 : Exemple typique du tracé d'un spectre..... | 27 |
| Fig. 2.5 : Démodulation d'amplitude par l'enveloppe..... | 28 |
| Fig. 2.6 : Filtre passe-bande [fcb , fch]= fréquence de coupure basse et haute..... | 29 |
| Fig. 2.7 : points de mesure sur un réducteur | 30 |
| Fig. 2.8 : Différents points de mesure..... | 31 |
| Fig. 2.9 : Filtre passe –bande 10 – 1000 HZ pour le mesurage de l'intensité vibratoire..... | 32 |
| Fig. 2.10 : Ecart d'usinage (excentricité et parallélisme)..... | 33 |
| Fig.2.11 : Balourd statique..... | 34 |
| Fig. 2.12 : Balourd dynamique..... | 35 |

| | |
|---|----|
| Fig. 2.13 : points de mesure d'un défaut..... | 35 |
| Fig. 2.14 : Spectre théorique d'un défaut de balourd..... | 36 |
| Fig. 2.15 : Caractéristique géométrique d'un roulement..... | 36 |
| Fig. 2.16 : Différents types de roulement..... | 37 |
| Fig. 2.17 : Composants de roulement..... | 38 |
| Fig. 2.18 : vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure..... | 38 |
| Fig. 2.19 : vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure..... | 39 |
| Fig. 2.20 : vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant..... | 39 |
| Fig. 3. 1. Organigramme du)complexe GNL3/Z..... | 44 |
| Fig. 3. 2. Organisation du département maintenance..... | 45 |
| Fig. 3. 3. System 1..... | 46 |
| Fig. 3. 4. Unités suivis on line..... | 47 |
| Fig.3. 5. Collecteur des données (Vibro 80)..... | 47 |
| Fig. 3. 6. Logiciel de surveillance..... | 48 |
| Fig. 3. 7. Exemple des machines suivis -off line-..... | 48 |
| Fig. 3. 8. Mixed refrigerant Compressor Train16-MJ03/04..... | 49 |
| Fig. 3. 9. Comportement vibratoire au cours de démarrage du compresseur..... | 49 |
| Fig 3. 10. Pompe centrifuge 17-MJ-07- A..... | 50 |
| Fig 3. 11. Mesure de niveau global vertical et horizontal..... | 51 |
| Fig 3. 12. Spectre de défaut de balourd vertical..... | 52 |
| Fig 3. 13. Spectre de défaut de balourd horizontal..... | 52 |
| Fig 3. 14. Niveau globale vertical et horizontal après l'intervention..... | 53 |
| Fig 3. 15. Niveau spectral vertical et horizontal après l'intervention..... | 53 |
| Fig 3. 16. Moteur électrique 16-MJ-04-MJ07-A-M..... | 54 |
| Fig 3. 17. Seuils d'accélération..... | 55 |
| Fig 3. 18. Seuils de vitesse..... | 55 |
| Fig 3. 19. Spectre de défaut de roulement vertical..... | 55 |
| Fig 3. 20. Spectre de défaut de roulement horizontal..... | 56 |
| Fig 3. 21. Niveau spectral vertical et horizontal après l'intervention..... | 56 |
| Fig. 4.1 : Matériels utilisés au laboratoire..... | 59 |
| Fig. 4.2 : Perçage des pièces..... | 59 |
| Fig. 4.3 : Mesure des vibrations avec Micro Vibe P CMVL 3850 SKF..... | 60 |
| Fig. 4.4 : Essai à vide..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Fig. 4.5 : Montage de disc en acier sur le plan 2..... | 64 |
| Fig. 4.6 : Montage de ventilateur sur le plan 2..... | 66 |
| Fig. 4.7 : Montage de la roue sur le plan 1..... | 68 |
| Fig. 4.8 : Création de balourd 1 ^{er} essai plan 1..... | 70 |
| Fig. 4.9 : Création de balourd (essai 2) plan 1..... | 72 |
| Fig. 4.10 : Masse de correction à 180 ⁰ plan 1..... | 75 |
| Fig. 4.11 : Correction du balourd à l'aide de « Vibro toolbox »..... | 76 |
| Fig. 4.12 : Masse de correction à 180 ⁰ plan 1..... | 76 |

Liste des Tableaus

| | |
|--|----|
| Tableau. 1.1. Comparaisons des outils de maintenance préventive conditionnelle..... | 06 |
| Tableau. 1.2. Défauts selon les techniques de détection..... | 07 |
| Tableau 1. 3. Différents types de vibrations | 09 |
| Tableau 1. 4. Types de Montage de l'accéléromètre | 16 |
| Tableau 1. 5. Illustre les avantages et les inconvénients de chaque capteur | 17 |
| Tableau. 2.1 : Reconnaissance des principales anomalies | 41 |
| Tableau 4.1 : Caractéristiques du matériel utilisé..... | 58 |
| Tableau 4.2 : Mesures Niveau Globale à vide plan 1..... | 61 |
| Tableau 4.3 : Analyses Spectrales à vide plan 1..... | 62 |
| Tableau 4.4 : Mesures Niveau globale à vide plan 2..... | 63 |
| Tableau 4.5 : Analyses Spectrales à vide plan 2..... | 63 |
| Tableau 4.6 : Mesures Niveau Globales avec disc en acier plan 2..... | 65 |
| Tableau 4.7 : Analyses Spectrales avec disc en acier plan 2..... | 65 |
| Tableau 4.8 : Mesures Niveau Globales de ventilateur plan 2..... | 67 |
| Tableau 4.9 : Analyses spectrales de ventilateur plan 2..... | 67 |
| Tableau 4.10 : Mesures Niveau Globales de roue plan 2..... | 69 |
| Tableau 4.11 : Analyses Spectrales de roue plan 2..... | 69 |
| Tableau 4.12 : Mesures Niveau Global après création de balourd (essai 1) plan 1..... | 71 |
| Tableau 4.13 : Analyses Spectrales après création de balourd (essai 1) plan 1..... | 72 |
| Tableau 4.14 : Mesures Niveau Global après création de balourd (essai2) plan 1..... | 73 |
| Tableau 4.15 : Analyses spectrales après création de balourd (essai 2) plan 1..... | 74 |
| Tableau 4.16 : Analyses spectrales de la mesure de correction plan 1..... | 75 |
| Tableau 4.17 : Analyses spectrales de la correction de balourd plan 1..... | 77 |

Liste des abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation

NF : normalisation Français

EN : Européen Normalisation.

IPC : Intervention Préventive Conditionnelle.

IR : infrarouge

RC : Résolution constante.

VDI : Ventilation code of practice.

ISO : International Organization of Standardization.

BS: British Standards.

Dcc : Déplacement crête à crête gaz naturel liquéfié.

GNL : Gaz Naturel Liquéfier

GPL : Gaz Pértolier Liquéfier

TBF : temps de bon fonctionnement

G : Garage

GP : Garage de Production

GMS : Garage Mécanique Statique

GMT : Garage Mécanique Tournante

GIR : Garage instrument Réglage

GL : Garage de Logistique

GE : GENERAL ELECTRIC

D : Le diamètre primitif.

d : Le diamètre des éléments roulants.

α : Angle de contact.

[fcb , fch] : fréquence de coupure basse et haute.

f_r : La fréquence de rotation de la bague interne (la bague externe étant supposée fixe).

$f_{b.ext}$: Fréquence de passage de défaut de la bague externe.

$f_{b.int}$: Fréquence de passage de défaut de la bague externe.

f_{bille} : Fréquence de passage de défaut de la bague externe.

f_{cage} : Fréquence de passage de défaut de la bague externe.

f_{rot} : fréquence de rotation.

f_e : fréquence d'engrènement.

f_p : fréquence de passage de la courroie.

z : nombre de dents de l'engrenage.

C 4 : gaz butane

C 5 : gaz méthane

pp : pic to pic

rms : Root Mean Square

Liste des symboles

f : fréquence .

ω : pulsation

T : La période de ce mouvement

A : amplitude

x ; d : déplacement

t : temps

v : vitesse

γ ; a : acceleration

Hz : hertz

T/M : tour par minute

C/M : cycle par minute

R_1 ; R_2 : résistance

C_1 ; C_2 : capacité

Q : Charge électrique générée par l'effet piézo-électrique [pC]

P : Pression exercée sur la céramique [N/m^2]

F : Force exercée sur la céramique [N]

S : Surface de contact entre la masse sismique et la céramique [m^2]

M : Masse sismique [kg]

a : Accélération du capteur [m/s^2]

k : Constante [pC/ N/m^2]

K : Facteur de transmission [pC/ m/s^2]

V_{eff} : Vitesse efficace.

f_r : Fréquence de rotation (Hz).

N : Vitesse de rotation (tr/min).

N : Le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Liste des symboles

INTRODUCTION GENERALE..... 01

CHAPITRE I : Généralités sur la maintenance et l'analyse vibratoire

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction | 02 |
| 2. Maintenance | 02 |
| 2.1. Définition de la maintenance..... | 02 |
| 2.2. Maintenance corrective..... | 02 |
| 2.3. Maintenance préventive..... | 03 |
| 2.4. Maintenance préventive systématique..... | 03 |
| 2.5. Maintenance préventive conditionnelle..... | 03 |
| 2.6. Maintenance prévisionnelle..... | 04 |
| 3. Principe de la maintenance conditionnelle..... | 04 |
| 3.1. Différentes techniques de la maintenance préventive conditionnelle..... | 04 |
| 3.1.1. Analyse de vibrations..... | 05 |
| 3.1.2. Analyse des huiles..... | 05 |
| 3.1.3. Technique de la thermographie..... | 05 |
| 3.1.4. Analyse acoustique..... | 05 |
| 3.1.5. Contrôle par ultrasons..... | 05 |
| 3.2. Choix de la technique de surveillance..... | 05 |
| 3.2.1. Comparaison entre les techniques de maintenance préventive conditionnelle..... | 06 |

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 3.2.2. Relation technique de détection – type des défauts..... | 06 |
| 3.3. Les objectifs de la maintenance préventive conditionnelle..... | 07 |
| 4. Vibrations..... | 07 |
| 4.1. Définition..... | 07 |
| 4.2. Naissance d'une vibration..... | 07 |
| 4.3. Vibrations des machines tournantes..... | 08 |
| 4.4. Importance des vibrations..... | 08 |
| 4.5. Différents types de vibrations..... | 09 |
| 4.6. Relations déplacement – vitesse – accélération – amplitude – fréquence..... | 09 |
| 4.6.1. Déplacement..... | 09 |
| 4.6.2. Vitesse..... | 10 |
| 4.6.3. Accélération..... | 10 |
| 4.6.4. Amplitude..... | 10 |
| 4.6.5. Fréquence..... | 10 |
| 4.7. Choix des grandeurs de mesure..... | 10 |
| 4.8. Facteurs ayant une incidence sur les fréquences propres..... | 11 |
| 4.8.1. Amortissement..... | 11 |
| 4.8.2. Résonance..... | 11 |
| 4.8.3. Vitesse critique..... | 12 |
| 5. Capteur de vibration..... | 13 |
| 5.1. Capteurs de déplacement..... | 14 |
| 5.1.1. Plage de fréquence..... | 14 |
| 5.1.2. Mesure des déplacements d'après le principe des courants de Foucault..... | 14 |
| 5.2. Capteurs de vitesse (vélocimétries)..... | 14 |
| 5.2.1. Plage de fréquence..... | 15 |
| 5.3. Capteurs d'accélération (accéléromètres)..... | 15 |
| 5.3.1. Effet piézo-électrique..... | 15 |
| 5.3.2. Montage de l'accéléromètre..... | 16 |
| 5.4. Comparaison des différents types de capteurs..... | 17 |
| 5.5. Domaine d'utilisation des capteurs de vibration..... | 17 |

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 6. Collecteurs de données portables..... | 17 |
| 7. Logiciels de traitement..... | 18 |
| 8. Surveillance..... | 18 |
| 8.1. Etapes en processus de surveillance..... | 19 |
| 8.2. Types de surveillance..... | 19 |
| 8.2.1. Surveillance "On-line" ou suivi continu..... | 20 |
| 8.2.2. Surveillance "off-line" (hors ligne) ou suivi périodique..... | 20 |
| 8.3. Le Choix du type de surveillance..... | 21 |
| 9. Conclusion..... | 22 |
| Références bibliographiques du chapitre 1 | |
| CHAPITRE 2 : Techniques de mesure vibratoire et détection des défauts | |
| 1. Introduction..... | 23 |
| 2. Méthode du relevé global | 23 |
| 2.1. Seuils de vibration..... | 24 |
| 2.1.1. Seuils de vitesse vibratoire..... | 24 |
| 2.1.2. Seuils d'accélération..... | 25 |
| 2.2. Limites du suivi en mode global..... | 26 |
| 3. Analyse spectrale..... | 26 |
| 4. Technique de résonance..... | 27 |
| 5. Technique d'enveloppe..... | 28 |
| 6. Cepstre..... | 29 |
| 7. Types de mesure..... | 29 |
| 7.1. Mesure en bande large..... | 29 |
| 7.2. Points de mesurage..... | 30 |

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 7.3. Intensité vibratoire..... | 32 |
| 7.3.1.Appareillage : AFNOR E 90-100..... | 32 |
| 8. Principaux défauts d'une machine tournante et leurs manifestations | 33 |
| 8.1. Défaut de balourd..... | 33 |
| 8.1.1. Balourd statique..... | 34 |
| 8.1.2. Balourd dynamique..... | 34 |
| 8.2. Défauts de roulement..... | 36 |
| 8.2.1. Types de roulements..... | 37 |
| 8.2.2. Eléments de roulements..... | 37 |
| 8.2.3. Signatures vibratoires des principaux défauts des roulements..... | 38 |
| a. Défaut de type écaillage affectant la bague externe..... | 38 |
| b. Défaut de type écaillage affectant la bague interne..... | 39 |
| c. Défaut de type écaillage sur un élément roulant..... | 39 |
| d. Défauts de de la cage (rupture cage)..... | 40 |
| 8.3. Cause des défauts..... | 40 |
| 9. Autres types de défaut..... | 41 |
| 10. Conclusion..... | 42 |
| Références bibliographiques du chapitre 2 | |

Chapitre 3 : Etude de Cas industriels

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction..... | 43 |
| 2. Présentation générale du complexe GNL3/Z..... | 43 |
| 2.1. Généralités..... | 43 |
| 2.2. Organigramme du complexe GL3Z..... | 44 |
| 3. Département maintenance..... | 44 |

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 3.1. Organisation..... | 44 |
| 3.2. Travaux réalisés..... | 45 |
| 3.2.1. Service maintenance prédictive..... | 45 |
| 3.2.2. Service technique d’inspection..... | 45 |
| 4. Systèmes de suivis vibratoires..... | 45 |
| 4.1. Surveillance on-line..... | 45 |
| 4.1.1. Systeme 1..... | 46 |
| 4.1.2. Machines suivis –off line-..... | 46 |
| 4.2. Surveillance -off line-..... | 47 |
| 4.2.1. Collecteur des données..... | 47 |
| 4.2.2. Logiciel de surveillance..... | 47 |
| 4.2.3. Machines suivis off-line-..... | 48 |
| 5. Défauts industriels réels..... | 49 |
| 5.1. Défaut -on line-..... | 49 |
| 5.1.1. Défaut de balourd..... | 49 |
| 5.2. Défauts -off line-..... | 50 |
| 5.2.1. Défaut de balourd -Cas de la pompe 17-MJ-07-A-..... | 50 |
| 5.2.2. Défaut de roulement (Cas du moteur électrique -16-MJ-04-MJ07-A-M-..... | 54 |
| 6. Conclusion..... | 57 |

Références bibliographiques du chapitre 3

Chapitre 4 : Réalisation d’un banc d’essai d’équilibrage

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction..... | 58 |
| 2. Réalisation du banc l’essai..... | 58 |
| 2.1. Objectif..... | 58 |

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 2.2. Matériels utilisés..... | 58 |
| 2.2.1. Description et caractéristique..... | 58 |
| 2.2.2. Appareil de mesure (Micro Vibe P CMVL 3850 SKF)..... | 59 |
| 3. Essais d'équilibrage..... | 60 |
| 3.1. Essais à vide..... | 60 |
| 3.1.1. Plan 1..... | 61 |
| 3.1.2. Plan 2..... | 62 |
| 3.2. Essai avec disque en acier..... | 64 |
| 3.3. Essai avec ventilateur à 9 pales..... | 66 |
| 3.4. Essai avec roue en plastique..... | 68 |
| 4. Equilibrage dynamique..... | 70 |
| 4.1. Création de balourd (1^{er} essai)..... | 70 |
| 4.2. Création de balourd (essai 2)..... | 72 |
| 4.3. Masse de correction..... | 74 |
| 4.4. Correction final..... | 76 |
| 5. Conclusion..... | 77 |
| CONCLUSION GENERALE..... | 78 |

Références bibliographiques synthétisés

Introduction générale

Dans la compétition industrielle actuelle, la maintenance des équipements de production est une part essentielle et vitale pour les entreprises industrielles. Plus de disponibilité, fiabilité accrue, zéro panne, temps d'arrêt minimaux, diminution des coûts d'exploitation, tels sont les mots d'ordre.

La maintenance des biens de production repose en grande partie sur l'état des mécanismes nécessaires au fonctionnement. Personne n'ignore l'importance d'une maintenance organisée, mais lorsqu'il s'agit d'assurer la sécurité des biens, des personnes et de l'environnement, cela nécessite des approches plus fines et développées dans les stratégies de maintenance et surveillance.

Parmi les différentes méthodes de surveillance, on distingue l'analyse d'huile, l'analyse de température, l'analyse vibratoire, etc.. L'analyse vibratoire est la technique la plus utilisée, sur les machines tournantes, pour réaliser une surveillance et un diagnostic fiable et pour détecter l'apparition et l'évolution de la plupart des défauts mécaniques. L'analyse vibratoire permet l'élaboration d'un bilan mécanique complet du système qui caractérise qualitativement et quantitativement son état à un instant donné, et ainsi permet de passer de la maintenance systématique à la maintenance conditionnelle ou prédictive.

Notre travail est consacré à l'étude de la technique d'analyse vibratoire des machines tournantes, avec une réalisation d'un banc d'essai d'équilibrage. Pour cela ce mémoire est structuré de la manière suivante :

- Dans le premier chapitre on présente de façon générale la maintenance, l'analyse vibratoire et les rapports qui les lient.
- Le second chapitre est consacré à l'étude des techniques de mesure vibratoire et leurs corrélations à la détection des différents défauts mécaniques.
- Dans le troisième chapitre on présente plusieurs cas réels de détection-diagnostic de défauts mécaniques sur machines tournantes provenant du site GNL3/Z-Sonantrach.
- Enfin dans le dernier chapitre nous présentons la réalisation du banc d'essai d'équilibrage.

Chapitre 1:

Généralités sur la maintenance et l'analyse vibratoire

1. Introduction

Les pannes imprévues sont quelques fois très coûteuses. La perte de production pendant les réparations engendre un manque à gagner qui peut affecter les bénéfices de l'entreprise. Il devient évident que de telles pannes ne doivent pas être tolérées. L'expérience a montré que le paramètre le plus fiable qui donne le plus précocement et de la meilleure façon l'état de détérioration d'une machine tournante est la vibration. Toutes les machines vibrent et, au fur et à mesure que l'état de la machine se détériore (balourd, défaut de roulement ou de palier etc...) le niveau de vibration augmente. En mesurant et en surveillant le niveau de vibration produit par une machine, on obtient un indicateur idéal sur son état. Si l'augmentation de vibration de la machine permet de détecter un défaut, l'analyse des caractéristiques de vibration de la machine permet d'en identifier la cause. On peut ensuite en déduire avec précision le délai avant qu'il ne devienne critique.

Dans la 1^{ère} partie de chapitre on a présenté un aperçu sur la maintenance et la maintenance conditionnelle en particulier. Ce domaine d'activité constitue une part très importante permettant de rentabiliser l'instrument de production industriel. Et dans la 2^{ème} partie, on a montré une vue complète sur les techniques et les moyens d'analyse vibratoire en se basant sur les notions fondamentales de diagnostic vibratoire.

2. Maintenance

2.1. Définition de la maintenance

AFNOR (Association Française de Normalisation) définit la maintenance comme étant : « L'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié où en mesure d'assurer un service déterminé » .

La maintenance c'est un ensemble des activités destinées à maintenir, à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise [1].

La maintenance peut être représentée par la figure (Fig.1 .1).

2.2. Maintenance corrective

Définition d'après la Norme NF X 60010 : « Maintenance effectuée après défaillance »
Il s'agit d'une "*maintenance effectuée après défaillance*". C'est une politique de maintenance (Dépannage ou réparation) qui correspond à une attitude de réaction à des événements plus ou moins aléatoires et qui s'applique après la panne. [1]

2.3. Maintenance préventive

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. C'est une politique qui s'adresse aux éléments provoquant une perte de production ou des coûts d'arrêts imprévisibles, mais importants.

Les matériels visés sont ceux dont le coût des pannes est élevé (20 % des pannes représentant 80 % des coûts).

La mise en pratique nécessite de décomposer les sous-systèmes en éléments maintenable (palier, réducteur, etc...) La périodicité des visites s'établit par l'étude des lois statistiques de la durée de vie.

Des gammes d'entretien sont élaborées de façon à préciser le travail à exécuter et de garder la traçabilité de l'entretien. [1]

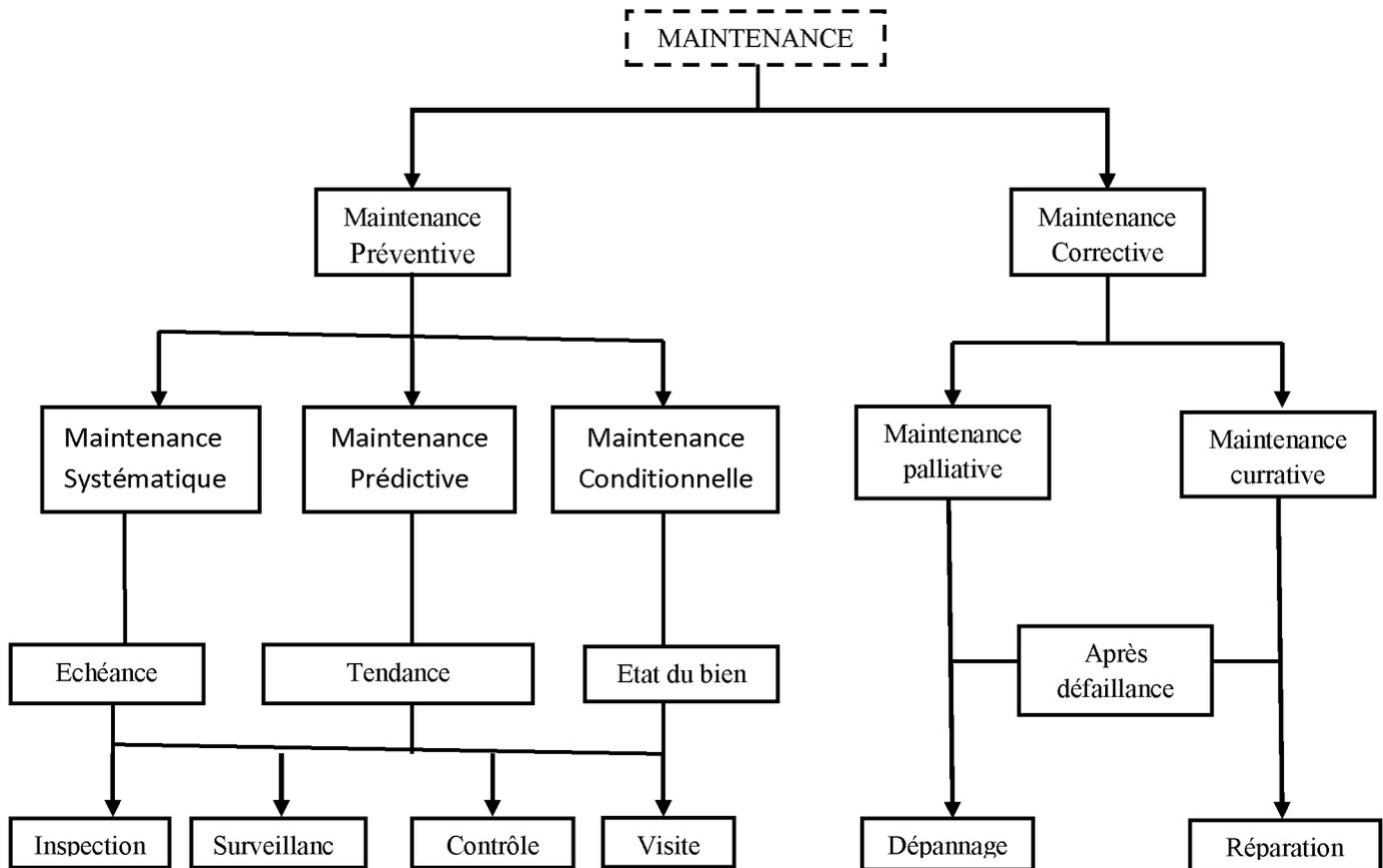


Fig. 1. 1. Représentation synthétique de la maintenance

2.4. Maintenance préventive systématique (Définition d'après la Norme NF X 60010)

« Maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage ». Généralement, la maintenance préventive s'adresse aux éléments dont le coût des pannes est élevé, mais ne revenant pas trop cher en changement (les meilleurs exemples sont le changement systématique de l'huile, changement de la courroie de synchronisation,...). [1]

2.5. Maintenance préventive conditionnelle (Définition d'après la Norme NFX 60010),

La maintenance préventive conditionnelle définit comme « une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, révélateur de l'état de dégradation du bien) » [1]

2.6. Maintenance prévisionnelle

Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien (EN 13306) [1]

3. Principe de la maintenance conditionnelle

La figure (Fig. 1.2) montre le principe de la maintenance conditionnelle (les interventions de la maintenance préventive conditionnelle). Une intervention préventive conditionnelle (IPC) programmée, s'il y a une mesure périodique d'une dégradation touchant le seuil d'alarme (un arrêt préventif).

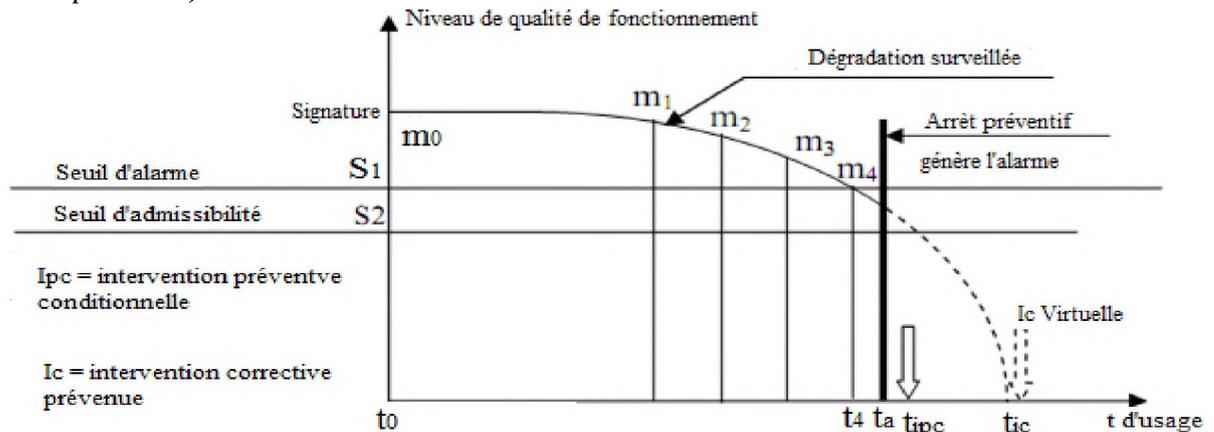


Fig. 1. 2. Intervention de la maintenance conditionnelle [2].

La signature est définie par une prise de référence de l'état de bon marche à l'origine.

Les mesures sont de simples observations visuelles, des images (spectre...). Probablement, elles sont changées par des alertes présélectionnées, ou des visites espacées de Δt de telle façon que la dégradation à prévenir ne puisse échapper à la surveillance :

$$\Delta t < t_{\text{admissibilité}} - t_{\text{alarme}}$$

La connaissance de la loi de dégradation, nous permet de prendre des mesures qui ne peuvent pas débuter à t0 (sauf signature). Les mesures peuvent être collectées par rondes au niveau du centre de surveillance.

- l'arrêt sera demandé automatiquement par l'alarme, ou différé par une décision volontaire jusqu'à l'Ipc programmée et organisée.
- l'intervention préventive conditionnelle sera préparée à partir de l'alarme, selon un temps de réflexe du service de maintenance prédéterminé.

3.1. Différentes techniques de la maintenance préventive conditionnelle

Les techniques de la maintenance préventive conditionnelle sont utilisées pour suivre et surveiller les installations industrielles ou les systèmes électromécaniques, parmi ses techniques on distingue l'analyse vibratoire, l'analyse des huiles, l'analyse acoustique, l'analyse thermique, et autres. (Fig 1. 3.).

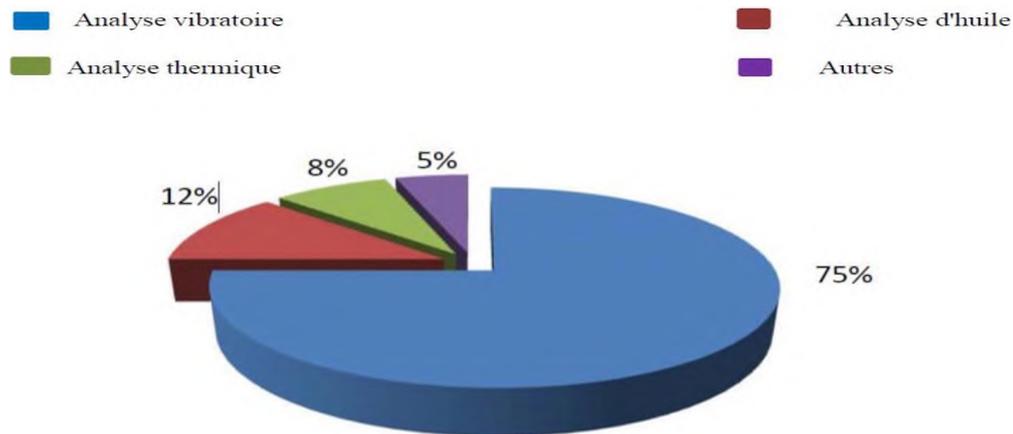


Fig. 1.3. % D'utilisation des différentes méthodes d'analyse dans le monde [3]

3.1.1. Analyse de vibrations

L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus largement utilisée 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[4].

3.1.2. Analyse des huiles

L'analyse des huiles est une autre technique de surveillance, qui décide l'état d'huile ou de graisse utilisée dans l'appareillage. La méthode consiste à analyser les particules d'usure drainées par le lubrifiant, afin d'en inférer l'état de l'installation[3]

3.1.3. Technique de la thermographie

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. [4]

3.1.4. Analyse acoustique

Permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés à distance de l'équipement. [4]

3.1.5. Contrôle par ultrasons

Permet de détecter des défauts de faibles amplitudes à hautes fréquences tels que l'initiation de la dégradation d'un roulement. [4]

3.2. Choix de la technique de surveillance

Chaque technique de surveillance, ne permet pas de capter les mêmes types de défauts, ni d'opérer un diagnostic détaillé pour connaître l'origine, la gravité du défaut et le domaine d'application favorisé pour chaque technique de surveillance, voir (Tableau I.1, et I.2). Donc,

avant de préférer la technique de surveillance, il doit déterminer la criticité de sa machine à l'aide de l'historique de défaillances qui touchent cette dernière et son dossier technique. [3]

3.2.1. Comparaison entre les techniques de maintenance préventive conditionnelle

Les éléments de comparaisons entre les différentes techniques de la maintenance préventive conditionnelle [3] sont montrés dans le tableau ci-dessous:

| | Principaux privilèges | Principales limitations | Domaine d'applications favorisé |
|----------------------|---|--|--|
| Analyse de vibration | <ul style="list-style-type: none"> - Découverte de défauts à une étape précoce - Occasion d'effectuer un diagnostic détaillé - Permet une surveillance continue - Autorise le contrôle de l'équipement à distance (télémaintenance) | <ul style="list-style-type: none"> - Spectres parfois difficiles à expliquer - Dans le cas de la Surveillance continue, équipements Relativement coûteuses | <ul style="list-style-type: none"> - Découverte des défauts de tous les éléments cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure |
| Analyse d'huiles | <ul style="list-style-type: none"> - Dépistage d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un dommage. - Occasion de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules. | <ul style="list-style-type: none"> - N'autorise pas de localiser régulièrement le défaut. - Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon. | <ul style="list-style-type: none"> - Vérification des Propriétés physicochimiques du lubrifiant, découverte d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse de transmission par le processus (étanchéité), etc. |
| Thermographie | <ul style="list-style-type: none"> - Permet d'effectuer un contrôle rapide de l'installation. - Interprétation souvent immédiate des résultats. | <ul style="list-style-type: none"> - Découverte de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire. - Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface). - Ne permet pas d'accomplir un diagnostic approfondi. | <ul style="list-style-type: none"> - Localisation de tous les défauts produisant un échauffement (manque de lubrification en particulier). |
| Analyse acoustique | <ul style="list-style-type: none"> - Permet de déceler l'apparition de défauts audibles. - Autorise une surveillance continue. | <ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité au bruit ambiant. - Diagnostic souvent difficile à effectuer. - Problèmes de répétition des mesures. | <ul style="list-style-type: none"> - Découverte d'un bruit inhabituel qui peut être expliqué par analyse vibratoire. |

Tableau. 1.1. Comparaisons des outils de maintenance préventive conditionnelle

3.2.2. Relation technique de détection – type des défauts

Les principales techniques de détection selon les défauts potentiels [3] sont présentées dans le tableau suivant :

| 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 | Non |
| 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. 1.2. Défauts selon les techniques de détection

3.3. Objectifs de la maintenance préventive conditionnelle

- Amélioration de la fiabilité des éléments du système.
- Assurer la qualité des produits.
- Améliorer l'organisation des tâches.
- Garantir la sûreté de fonctionnement.
- Améliorer le climat de relation humaine.
- Réduction du coût global de la maintenance.

4. Vibrations

4.1. Définition

On désigne par vibration la variation dans le temps d'une grandeur quelconque. Il existe de nombreux exemples, qu'ils soient artificiels ou naturels, pour lesquels on observe un tel phénomène de va-et-vient autour d'une position de repos.

4.2. Naissance d'une vibration

Dans la Fig. I. 4, une vibration est créée lorsque l'on déplace la masse de sa position d'équilibre à une position maximale ou minimale. Si l'on considère que le mouvement n'est pas amorti, la masse vibrera indéfiniment entre ses deux positions maximale et minimale.

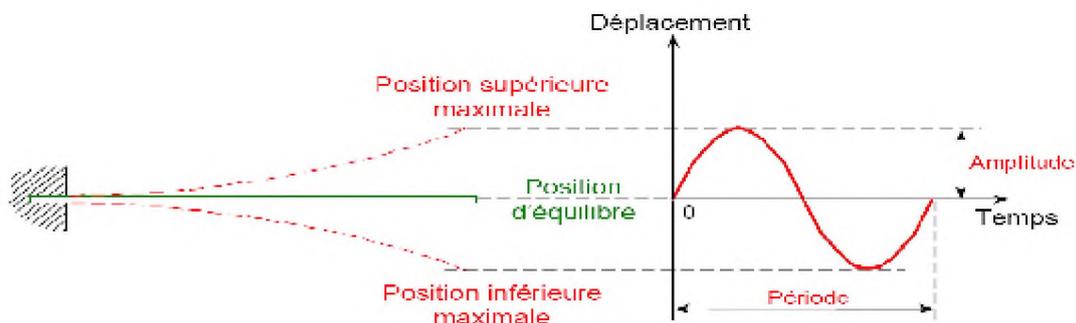


Fig. I. 4. Naissance d'une vibration [5]

4.3. Vibrations des machines tournantes

Toute machine en fonctionnement produit un degré de vibration généré par ses mouvements

rotatifs ou linéaires. Des petits niveaux de vibration ambiante sont parfaitement acceptables. Ce pendant des plus hauts niveaux et une tendance croissante sont symptomatiques d'une anomalie de fonctionnement.

En pratique, une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires dans une machine tournante.

Ce pendant, la machine vieillissant, les fondations travaillent, les pièces se déforment et s'usent, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent. Les arbres se désalignent, les rotors se déséquilibrent, les courroies se détendent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux paliers.

Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée, c'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser, lorsqu'un certain seuil (correspondant à un niveau de vibration limite) fixé est atteint, il est possible d'estimer la durée de vie résiduelle du composant dans les conditions de fonctionnement données à partir de la connaissance des lois d'endommagement.

4.4. Importance des vibrations

L'organigramme suivant indique l'importance des vibrations pour relever l'état de fonctionnement de la machine

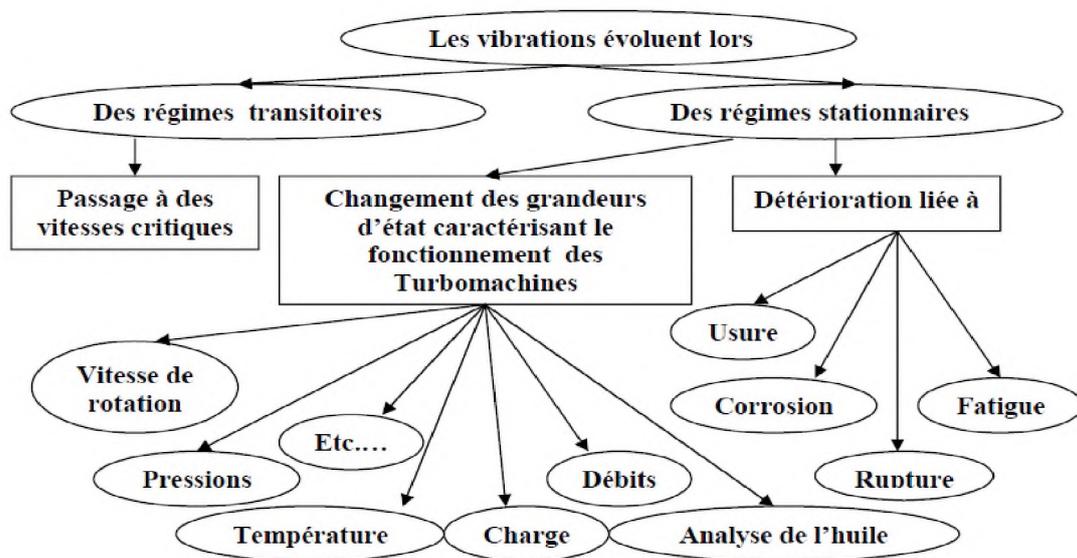


Fig. 1. 5. Importance des vibrations [6]

4.5. Différents types de vibrations

On classe généralement les vibrations d'après l'évolution de la variable considérée dans le temps (périodicité) comme dans le tableau ci-dessous :

| Nature de vibration | Forme temporelle | Forme spectrale | Phénomène générateur |
|------------------------|------------------|-----------------|---|
| Sinusoidale | | | Balourd |
| Sinusoidale complexe | | | Effort dynamique d'engrènement |
| Transitoire | | | Explosions, Marteaux-pilons, Laminoirs |
| Transitoire périodique | | | Presse automatiques, Cames |
| Aléatoire | | | Oscillations de pression exercées sur une structure baignant dans un fluide en écoulement |

Tableau 1. 3. Différents types de vibrations [1]

4.6. Relations déplacement – vitesse – accélération – amplitude - fréquence

4.6.1. Déplacement

On peut écrire l'équation de la variation du déplacement en fonction du temps, de la manière suivante : $X(t) = A \sin \omega t$ Où :

x = déplacement ; t = temps ; A = amplitude ; ω = pulsation ou vitesse angulaire (rad/s).

La période de ce mouvement (ici égale à un tour du rotor) est notée T ; elle est exprimée en secondes (s). L'inverse de la période, c'est-à-dire la fréquence est notée f , et est exprimée en Hertz (Hz). Nous vous rappelons que ω , T et f sont liés par les relations :

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.1)$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T \quad (1.2)$$

4.6.2. Vitesse

La vitesse du mouvement vibratoire correspond à la variation de son déplacement pour une unité de temps. Mathématiquement, la vitesse notée v est la dérivée du déplacement par rapport au temps. Elle s'écrit :

$$v = \frac{dx}{dt} = d \frac{A \sin \omega t}{dt} = A\omega \cos(\omega t) \quad (1.3)$$

4.6.3. Accélération

L'accélération est une variation de vitesse par unité de temps. Mathématiquement, l'accélération notée γ est la dérivée de la vitesse par rapport au temps. Elle s'écrit :

$$\gamma = \frac{dv}{dt} = \frac{d[\omega A \cos(\omega t)]}{dt} = -\omega^2 A \sin(\omega t) \quad (1.4)$$

4.6.4. Amplitude

L'amplitude (A) est le déplacement maximal par rapport à la position d'équilibre, ou encore la vitesse ou l'accélération maximale, selon le capteur de vibrations utilisé. Pour simplifier, nous ne tiendrons compte que du déplacement. Dans ce cas, l'unité utilisée habituellement pour mesurer l'amplitude des vibrations est le micromètre ($1\mu\text{m}$): $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$.

4.6.5. Fréquence

La fréquence (f) est le nombre de cycles de vibration par unité de temps. L'unité de fréquence est l'hertz (Hz), soit un cycle par seconde. Comme la vitesse de rotation des machines tournantes est exprimée en tours par minute (T/M), la fréquence des vibrations auxquelles celles-ci sont soumises est communément exprimée en cycles par minute (C/M). Comme une minute compte 60 secondes, $1\text{ Hz} = 60\text{ C/M}$.

4.7. 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.

Fig. 1. 6 illustre la relation accélération, vitesse, déplacement

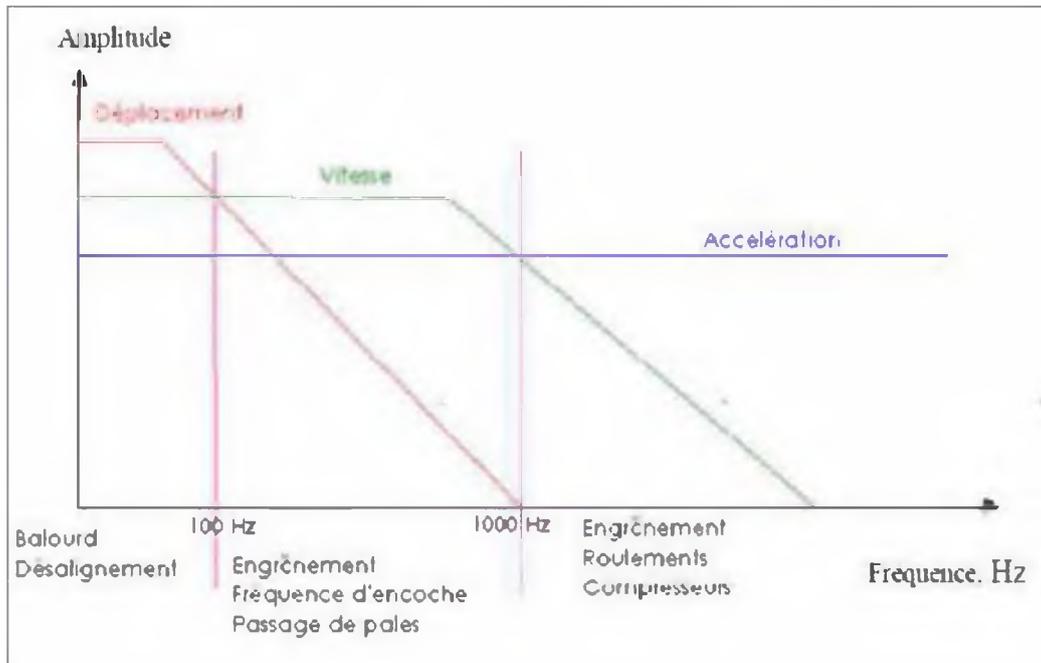


Fig. 1. 6. Relation accélération, vitesse, déplacement [6]

4.8. Facteurs ayant une incidence sur les fréquences propres

4.8.1. Amortissement

L'amortissement des vibrations est la dissipation de l'énergie mécanique d'un objet vibrant. Dans le cas des vibrations libres, l'amortissement réduit à zéro l'amplitude des vibrations.

Cette réduction est habituellement progressive. Si l'amortissement est suffisamment élevé, les vibrations libres cesseront même avant que le premier cycle ne soit complété. Dans les cas extrêmes, l'objet ne retournera même pas à sa position d'équilibre initiale après avoir été déplacé. Dans le cas des vibrations forcées, l'amortissement a pour effet d'absorber l'énergie mécanique produite par la force d'excitation exercée sur l'objet. L'amplitude des vibrations se stabilise à une valeur à laquelle l'énergie produite est égale à l'énergie absorbée.

En conséquence, plus l'amortissement est élevé, plus l'amplitude est faible. [5]

4.8.2. Résonance

Le phénomène de résonance se produit lorsque la fréquence d'excitation est égale à une des fréquences propres. La résonance est potentiellement dangereuse, car elle peut donner lieu à des vibrations excessives.

Lorsqu'un objet est en résonance, l'amplitude des vibrations augmente parce que la résistance que l'objet oppose alors aux vibrations est la plus faible.

Dans les centrales, le phénomène de résonance se produit parfois dans des pièces d'équipement comme les machines tournantes, les tuyaux et les tubes des échangeurs de chaleur. [5]

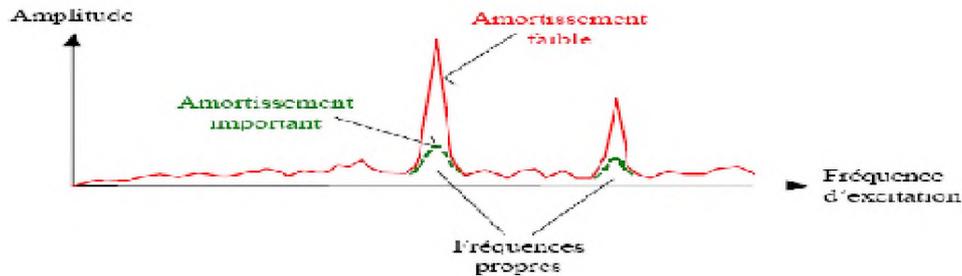


Fig. 1. 7. Facteurs ayant une incidence sur les fréquences propres [5]

4.8.3. Vitesse critique

La notion de vitesse critique s'applique seulement aux machines tournantes et surtout à l'élément principal de ces dernières, (le rotor).

La vitesse critique d'une machine tournante est la vitesse à laquelle une des fréquences propres de l'ensemble rotor-palier-socle est égale à la fréquence d'excitation correspondant à la vitesse de rotation de la machine. L'utilisation du terme « ensemble rotor-palier-socle » dénote le fait que les fréquences propres du rotor dépendent de la rigidité de ses supports.

On mentionne la vitesse de rotation dans la définition ci-dessus parce que beaucoup de problèmes dans les machines tournantes se traduisent par des vibrations forcées d'une fréquence correspondant à la vitesse de rotation de ces machines.

Par exemple, un arbre mal équilibré engendre une force qui tourne à la vitesse de l'arbre. Ainsi, le phénomène de résonance se produit lorsque la fréquence de rotation est à peu près égale à une des fréquences propres de l'ensemble rotor-palier-socle, c'est-à-dire lorsque la machine tourne à une vitesse critique. La résonance a pour effet d'accroître les vibrations, surtout si l'amortissement est faible.

Le fabricant spécifie habituellement la plage des vitesses critiques, mais pas toujours dans le cas des petites machines.

Cependant, les vitesses critiques peuvent varier selon les conditions de fonctionnement, notamment par suite d'une modification de la rigidité des supports du rotor. Les supports se composent des paliers et de leurs carters, soit le film d'huile dans les paliers dans le cas de paliers lisses.

- La modification de la rigidité des supports peut être attribuable à divers facteurs, par exemple une variation de la température de l'huile peut avoir un effet sur l'épaisseur du film d'huile et par conséquent sur sa rigidités;
- les boulons maintenant le palier peuvent se desserrer;
- le carter du palier ou le socle peuvent se fissurer. [5]

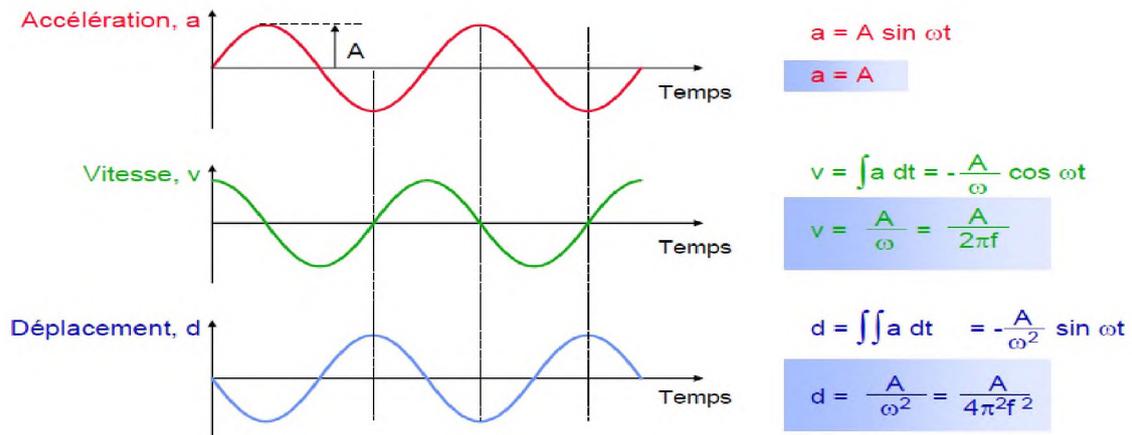


Fig. 1. 8. Conversion déplacement-accélération [5]

5. Capteur de vibration

Les trois grandeurs que l'on est amené à mesurer en technique vibratoire - le déplacement, la vitesse et l'accélération

- peuvent être appréhendées par des systèmes très différents les uns des autres.

On distingue trois principes plus particulièrement utilisés :

- Déplacement : principe des courants de *Foucault*
- Vitesse : principe électrodynamique
- Accélération : principe piézo-électrique

Ils ont tous les trois le même but : transformer une vibration mécanique en un signal électrique.

Les capteurs utilisant ces principes peuvent être *actifs* ou *passifs*. Les capteurs actifs ne nécessitent pas d'alimentation, alors que les capteurs passifs ne fonctionneraient pas sans source d'énergie auxiliaire [2].

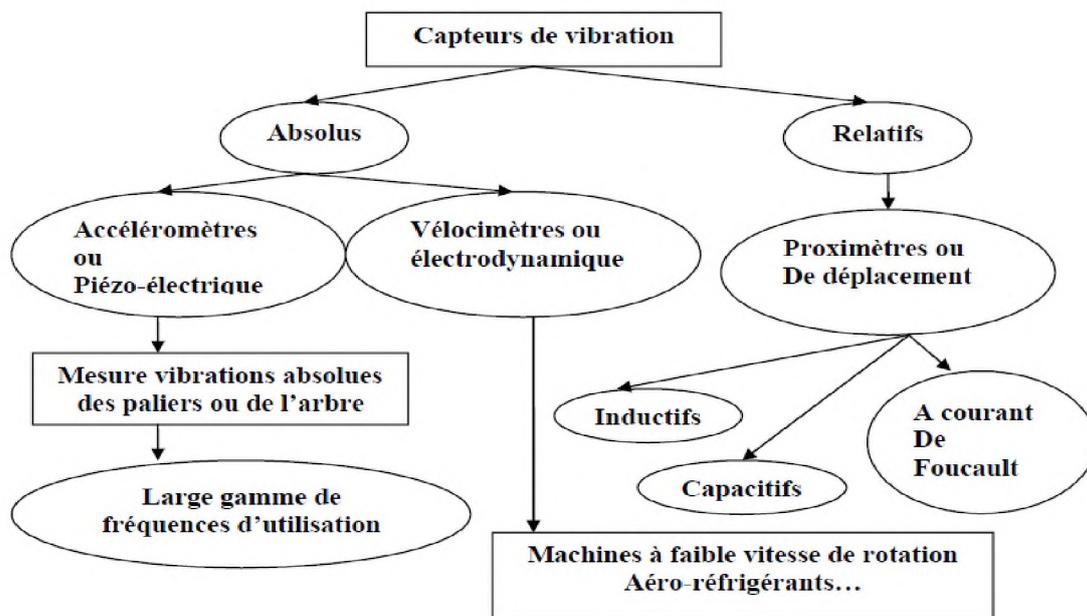


Fig. 1. 9. Capteurs de vibration [6]

5.1. Capteurs de déplacement

Il existe en effet des capteurs : (Inductifs , Capacitifs et à courants de Foucault) C'est ce dernier principe qui s'est imposé dans le monde entier. [7]

5.1.1. Plage de fréquence

Le principe de mesure à courants de Foucault présente généralement une plage de réponse en fréquence allant de 0 à 10000 Hz. La fréquence de 0 Hz correspond à une mesure statique : par exemple, la position axiale d'un arbre par rapport aux butées. La limite supérieure de 10000 Hz autorise, entre autres, la mesure dynamique des harmoniques d'ordre élevé de la fréquence de rotation



Fig. 1. 10. Capteurs de déplacement [9]

5.1.2. Mesure des déplacements d'après le principe des courants de Foucault

Ces chaînes sont constituées de deux parties essentielles :

- le capteur
- le conditionneur (oscillateur démodulateur)

Le capteur est constitué d'une bobine et d'un câble de raccordement. Ce câble, pour des raisons d'ordre pratique, présente le plus souvent un (connecteur).

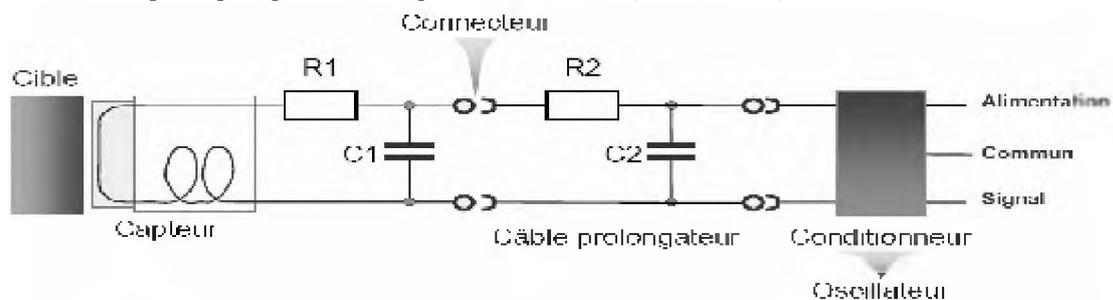


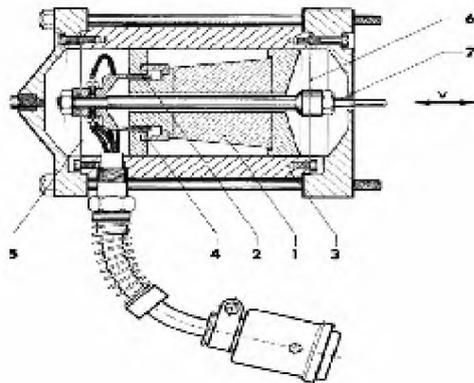
Fig. 1. 11. Schéma d'une chaîne de mesure à courants de Foucault [2]

5.2. Capteurs de vitesse (vélocimétries)

C'est un capteur électrodynamique, auto générateur d'une tension proportionnelle à la vitesse de déplacement de la bobine. Le mouvement de la pièce métallique dans les spires provoque une variation de flux, donc une induction de courant dans la bobine. Parmi tous les systèmes physiquement susceptibles de mesurer une vitesse de vibration, le principe *électrodynamique* est le plus robuste et le plus facile à mettre en œuvre. Par ailleurs, il est particulièrement adapté aux machines à faible vitesse de rotation (par exemple les aéroréfrigérants...). [7]

5.2.1. Plage de fréquence

Les plages de travail en fréquence des différents capteurs sont fonction de leurs caractéristiques. Les plages typiques sans linéarisation sont : 8 à 2000 Hz et 20 à 2000 Hz.



- 1 : Aimant permanent
- 2 : Entrefer
- 3 : Boîtier
- 4 : Bobine
- 5 & 6 : Membranes
- 7 : Tige

Fig. 1. 12. Vélocimétrie fonctionnant selon le principe électrodynamique [9]

5.3. Capteurs d'accélération (accéléromètres)

Les qualités des accéléromètres sont nombreuses : coût modéré, résistance aux chocs et à l'environnement, fonctionnement autonome.

Une caractéristique de l'accéléromètre est sa très grande dynamique, c'est à dire sa capacité à détecter simultanément des phénomènes de très grande et de très faible amplitude. [7]

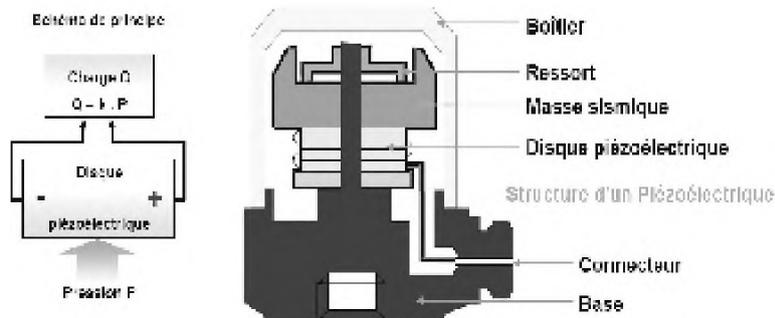


Fig. 1. 13. Capteurs d'accélération (accéléromètres) [8]

5.3.1. Effet piézo-électrique

Les éléments actifs de ce type de capteur sont des disques de cristal piézo-électrique 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.

$$Q = k \cdot P$$

$$P = F / S$$

$$F = M \cdot a \Rightarrow Q = K \cdot a$$

avec :

Q : Charge électrique générée par l'effet piézo-électrique [pC]

P : Pression exercée sur la céramique [N/m^2]

F : Force exercée sur la céramique [N]

S : Surface de contact entre la masse sismique et la céramique [m^2]

M : Masse sismique [kg]

a : Accélération du capteur [m/s^2]

k : Constante [pC/ N/m^2]

K : Facteur de transmission [pC/ m/s^2]

Le dispositif à compression décrit ci-dessus a été amélioré en désolidarisant le cristal de la base. On utilise maintenant des accéléromètres à cisaillement. [7]

5.3.2. Montage de l'accéléromètre

La méthode de montage de l'accéléromètre sur la surface de mesure est l'un des facteurs le plus critique pour l'obtention de résultats exacts à partir de mesures des vibrations pratiques.

Le tableau suivant montre les types de montage des embases et leurs fréquences de résonance

| Types de montage | Fréquence de résonance (KHz) |
|----------------------------------|------------------------------|
| Goujon fileté | 31 |
| Collage par cire d'abeille | 29 |
| Colle époxy ou cyanoacrylate | 28 |
| Goujon isolé ou rondelle de mica | 28 |
| Aiment permanent | 7 |
| Point de touche | 2 |

Tableau 1. 4. Types de Montage de l'accéléromètre [1]

Le point de mesure peut être quelconque. Aucune précaution particulière n'est requise tant que les fréquences à mesurer restent basses (quelques centaines de Hz). Les hautes fréquences ne pourront être appréhendées que si la fixation du capteur est particulièrement soignée.

La norme AFNOR E 90-152 indique les moyens de fixation couramment utilisés, leurs avantages, leurs inconvénients.

5.4. Comparaison des différents types de capteurs

| | Avantages | Inconvénients |
|-------------------------------|--|---|
| Capteur d'accélération | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Facile à installer ▪ Bonne détection des défauts HF ▪ Bonne gamme dynamique/fréquentielle ▪ Petit, léger ▪ Supporte les hautes températures ▪ Pas de pièce mobile | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nécessite une double intégration pour le déplacement ▪ Nécessite une source extérieure ▪ Fournit des informations limitées sur la dynamique d'arbre ▪ Médiocre pour les faibles vitesses |

| | | |
|--------------------------------------|---|---|
| <p>Capteur de déplacement</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mesure directement les mouvements d'arbre ▪ Même capteur pour les butées axiales, les vibrations radiales et la vitesse ▪ Mesure directement le déplacement ▪ Mesures DC (position d'arbre) ▪ Pas de pièce mobile | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Problème de « run-out » ▪ Sensible au matériau de l'arbre ▪ Installation ▪ Gamme de fréquence limitée. Pas de détection des défauts de roulements ▪ Restriction de températures ▪ Oscillateur externe nécessaire |
|--------------------------------------|---|---|

Tableau 1. 5. Illustre les avantages et les inconvénients de chaque capteur[9-8-7]

5.5. Domaine d'utilisation des capteurs de vibration

Fig. 1. 14. illustre le domaine d'utilisation de différents types de capteurs de vibration [9-8].



Fig. 1. 14. Domaine d'utilisation des capteurs de vibration [8]

6. Collecteurs de données portables

Ces appareils présentent l'ensemble des mesures : déplacement, vitesse et accélération. Ils contiennent une mémoire interne importante pour stocker les données et permettent une communication facile avec un ordinateur.

Les paramètres de choix sont essentiellement les fonctions de gestion des circuits de mesure, le dialogue avec l'opérateur, l'ergonomie et le poids.

Certains appareils proposent des fonctions correctives supplémentaires comme l'équilibrage sur site ou le lignage d'arbre au laser. [1]

7. Logiciels de traitement

Les logiciels associés aux électroniques de mesure assurent le stockage des données, la mise à jour des historiques, la configuration des appareils, l'établissement des courbes de tendance, l'élaboration de rapports, la gestion des alarmes et aident à l'analyse diagnostique.

Par ailleurs, ils possèdent aussi les fonctions nécessaires à leur intégration dans le système de communication existant (Ethernet, Modbus, Profibus...). [1]

8. Surveillance

Élément de la maintenance préventive conditionnelle, le rôle principal de la surveillance des machines tournantes est de fournir, de manière continue, des connaissances sur leurs états sans arrêter la ligne de production. L'objectif à ce niveau est d'améliorer la disponibilité et la sécurité, ainsi que la minimisation des pertes dans la production [6].

Fig. 1. 15 représente l'architecture générale d'un système de Surveillance en ligne.

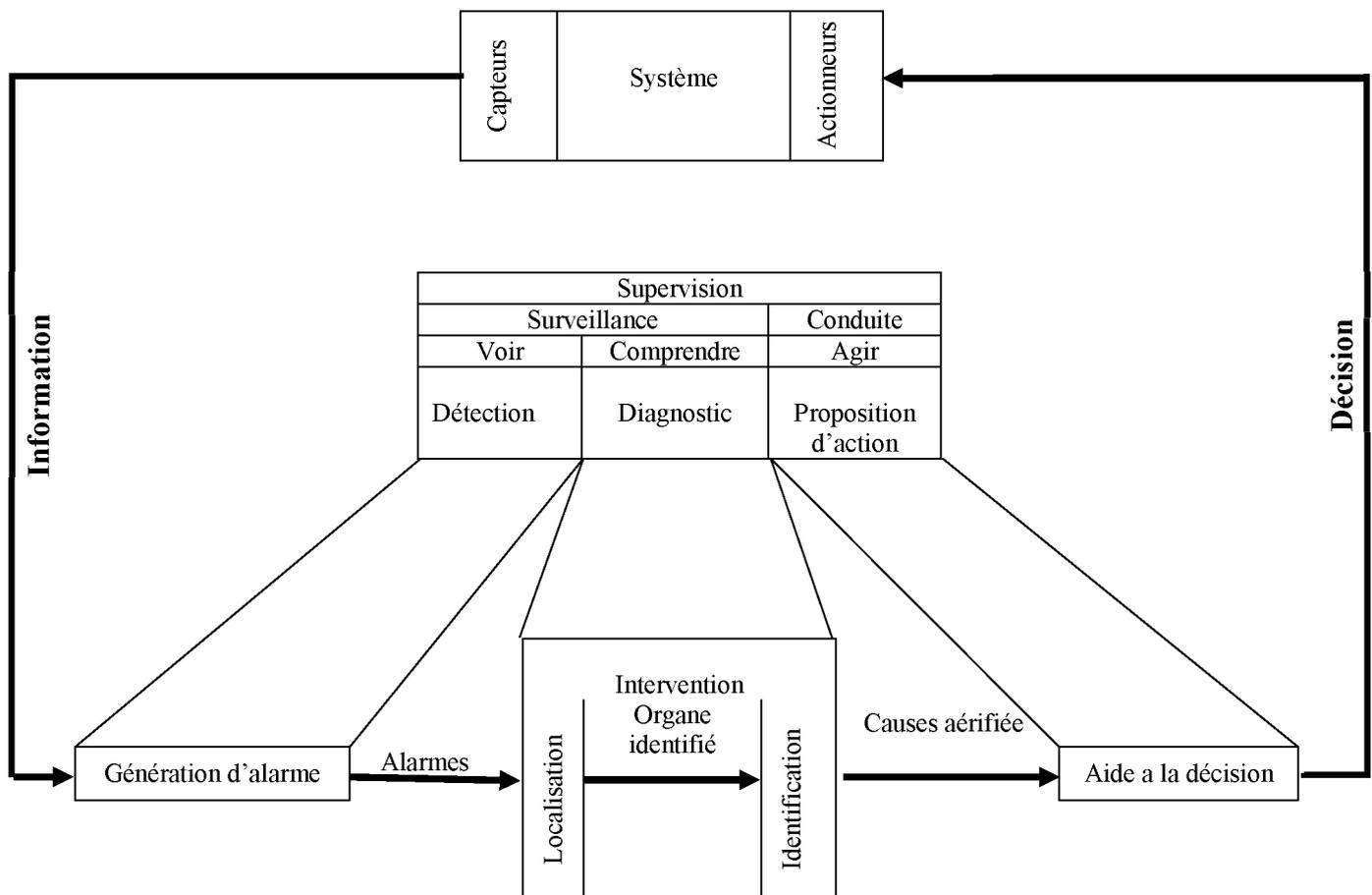


Fig. 1. 15. Architecture générale d'un système de surveillance en ligne [6].

8.1.Étapes en processus de surveillance

La surveillance se compose de deux phases principales qui sont la détection et le diagnostic (Fig. 1. 16) [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.

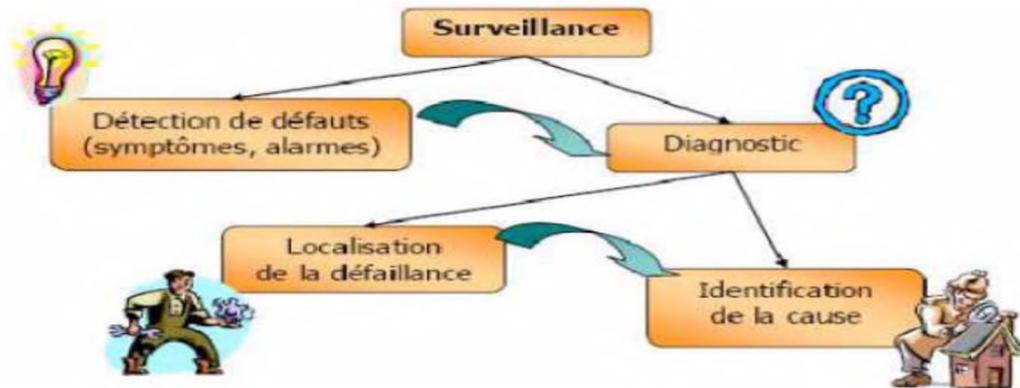


Fig. 1. 16. Composantes de la surveillance industrielle [6].

8.2.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 la cas des machines simples comme les pompes ou les ventilateurs. On distingue fondamentalement ces deux types de surveillance (Fig. 1. 17) [6].

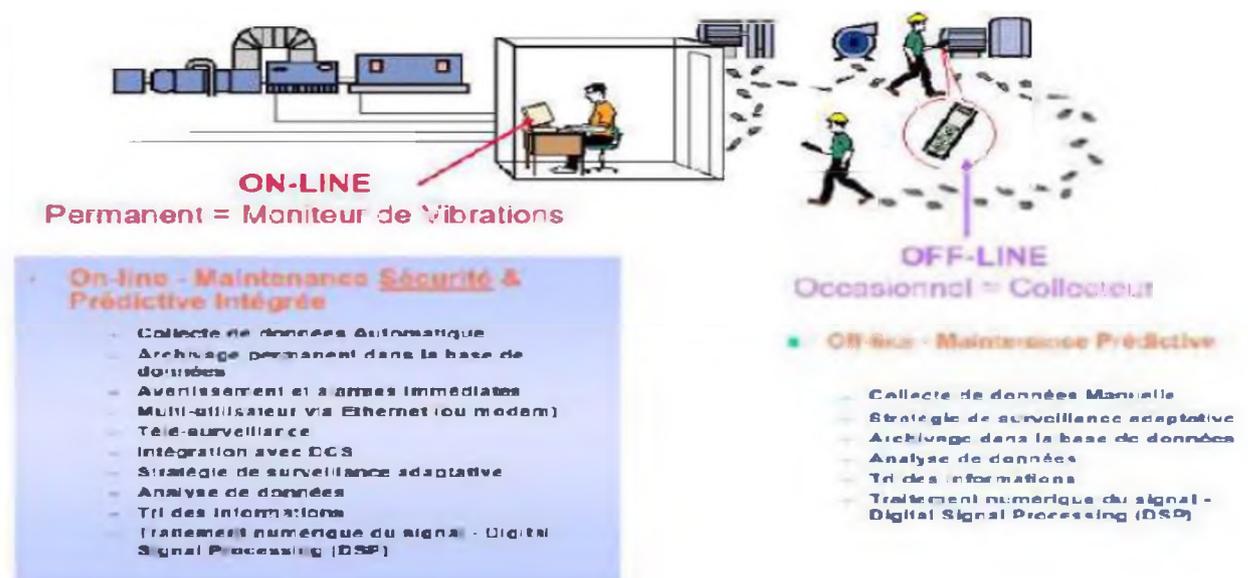


Fig. 1. 17 Types de surveillance des machines [6].

8.2.1. 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 Fig. 1. 18 représente un système de surveillance en ligne[6].

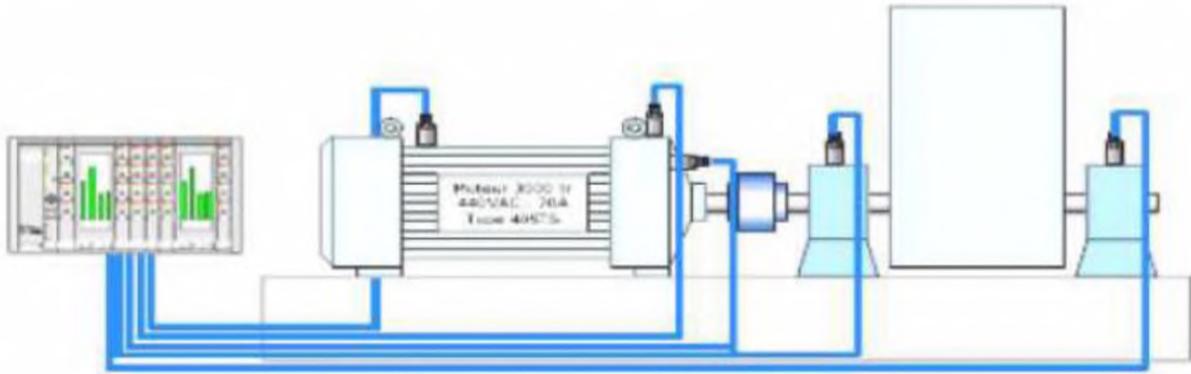


Fig. 1. 18. Surveillance On-line [6].

8.2.2. 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 [8].

La Fig. 1. 19 représente un système de surveillance off-line ou suivi périodique [6].

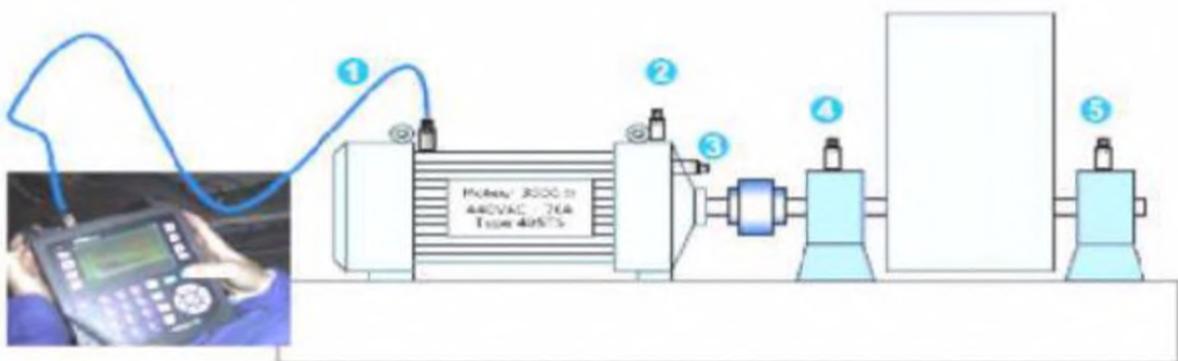


Fig. 1. 19. Surveillance off-line [6].

8.3. 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 Fig. 1. 20 [6].

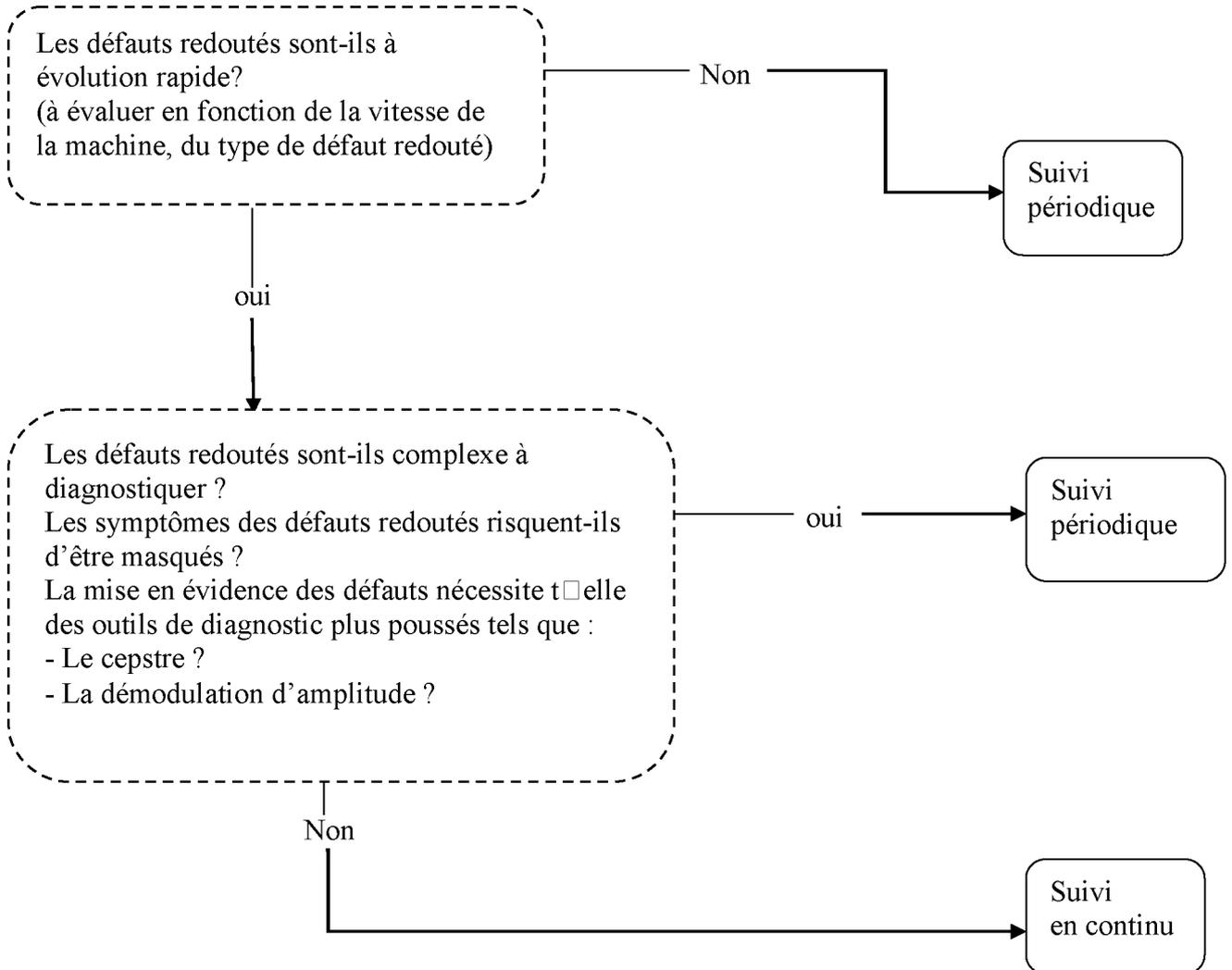


Fig. 1. 20. Choix du type de suivi [6].

9. Conclusion

Pour que la maintenance prédictive soit efficace, il faut des mesures précises et fiables de l'état des machines. L'analyse vibratoire est un moyen utilisé pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement

L'utilisation de l'analyse des signaux vibratoires comme méthode de diagnostic remonte aux années 1960. Depuis, on y fait largement appel dans la plupart des installations industrielles, particulièrement dans la prévention des pannes mécaniques.

Si l'augmentation de vibration de la machine permet de détecter un défaut, l'analyse des caractéristiques de vibration de la machine permet d'identifier la cause. On peut ensuite déduire avec précision du délai avant qu'il ne devienne critique. Les systèmes de capture et de transmission des vibrations influent sur la qualité de la méthode de diagnostic vibratoire.

L'analyse vibratoire représente une part de 75 % du domaine de la maintenance conditionnelle et ou prédictive.

Références bibliographiques du chapitre 1

- [1] Jean Hég : PRATIQUE DE LA MAINTENANCE PREVENTIVE –Mécanique- Pneumatique - Hydraulique- Electrique- Froide, Édition DUNOD, Paris 2002
- [2] François Monchy : « Maintenance méthodes et organisations » Edition Dunod, Paris 2000.
- [3] Marie-Line Zani : « la surveillance des machines tournantes, mesure 757 » Septembre 2003
- [4] Omar 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 , Université De Reims Champagne Ardenne, 2013.
- [5] Théorie du réacteur et notions scientifiques fondamentales – Équipement mécanique, Groupe de formation technique, <https://www.yumpu.com/fr/account/profile/edit>.
- [6] A. BOUDIAF ; “Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Tournantes par Analyse Multirésolution”, These de Doctorat, Université 08 mai 1945 ,Guelma, Algérie, 2016.
- [7] F. Landolsi : “ Cours De Techniques De Surveillance”,2010.
- [8] Formation du Bruel & kjaer «CAPTEURS».
- [9] Z. Ghemari ; “Modélisation, simulation et analyse expérimentale du capteur de vibration (accéléromètre)”, These de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2013.

CHAPITRE 2 :

Techniques de mesure vibratoire et détection des défauts

1. Introduction

Dans un service de maintenance, il convient d'éviter soit des mesures non significatives donc inutilisables en terme de prévision soit, à l'opposé, des analyses trop complexes et trop coûteuses en matériel, en homme, en temps. Une démarche optimale de détection préventive des défauts doit répondre aux critères suivants :

- Détecter et valider la majorité des défauts aussitôt que possible.
- Conduire au minimum de fausses détections de défauts.
- Donner et conserver suffisamment d'information sur le défaut pour se laisser la possibilité d'une analyse ultérieure plus complexe et plus validant.

Nous identifions et classons les techniques de maintenance par mesure de vibration suivant le matériel et les analyses mis en jeu. Les différents techniques se côtoient et se complètent.

Une onde vibratoire peut être étudié par plusieurs méthodes qui correspondent à des niveaux différents de connaissance du phénomène et à l'utilisation de matériels d'analyse plus ou moins sophistiqués :

- Mesure de la valeur globale
- Technique de résonance
- Analyse spectrale
- Technique spécifiques : Cepstre, détection d'enveloppe, autre

2. Méthode du relevé global

Cette méthode consiste à relever les mesures globales sur une machine lorsqu'elle est réputée fonctionner de manière satisfaisante (rendement, consommations, disponibilité, ...). Cet état est dit "de référence".

Dans la pratique, le seuil d'alarme est généralement fixé à 8 dB (rapport 2,5) au-dessus du niveau de référence (Fig. 2.1) [1].

De même, le seuil d'arrêt est généralement fixé à 8 dB (rapport 2,5) au-dessus du niveau d'alarme (Fig. 2.1) [1].

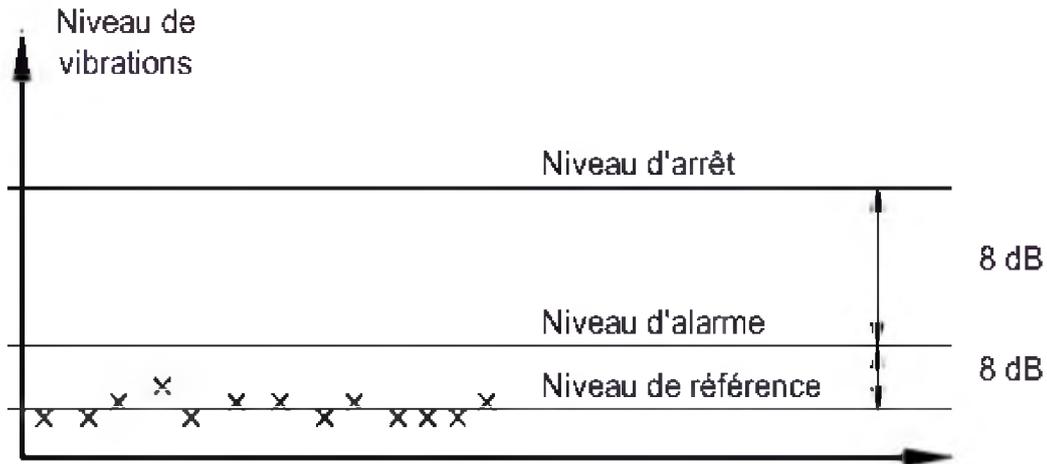


Fig. 2.1 : Détermination des seuils par la méthode de relevé globale [1]

Cette méthode pourra être utilisée lorsque les défauts à surveiller émettent des vibrations très importantes, comme le balourd ou les défauts de lignage.

2.1. Seuils de vibration

Une question souvent controversée est celle de la détermination des seuils de vibration admissible en exploitation, pendant de nombreuses années et encore maintenant, le suivi vibratoire a été fait en comparant les niveaux de vitesse efficace soit à des mesures préalable, soit à des standards [1].

2.1.1. Seuils de vitesse vibratoire

Les normes expriment les valeurs limites ou seuils de l'intensité vibratoire d'une machine et donnent des valeurs efficaces pour la vitesse de vibration des différents types de machines ou support, telles que les normes :

- La norme allemande : **VDI 2056**
- La norme internationale : **ISO 2372 ou 3945**
- La norme anglaise : **BS 4675**
- La norme française : **AFNOR E90-300** (Fig. 2.2)

Ces standards sont basés sur le fait que des machines similaires et de même taille doivent avoir la même énergie vibratoire donc le même niveau vitesse efficace entre 10 et 1000 HZ.

Une surveillance basé sur de tels critères détectera de façon indifférenciée balourd, désalignement, certains défauts électriques à un stade déjà avancé sans pour cela les distinguer ni les identifier [2].

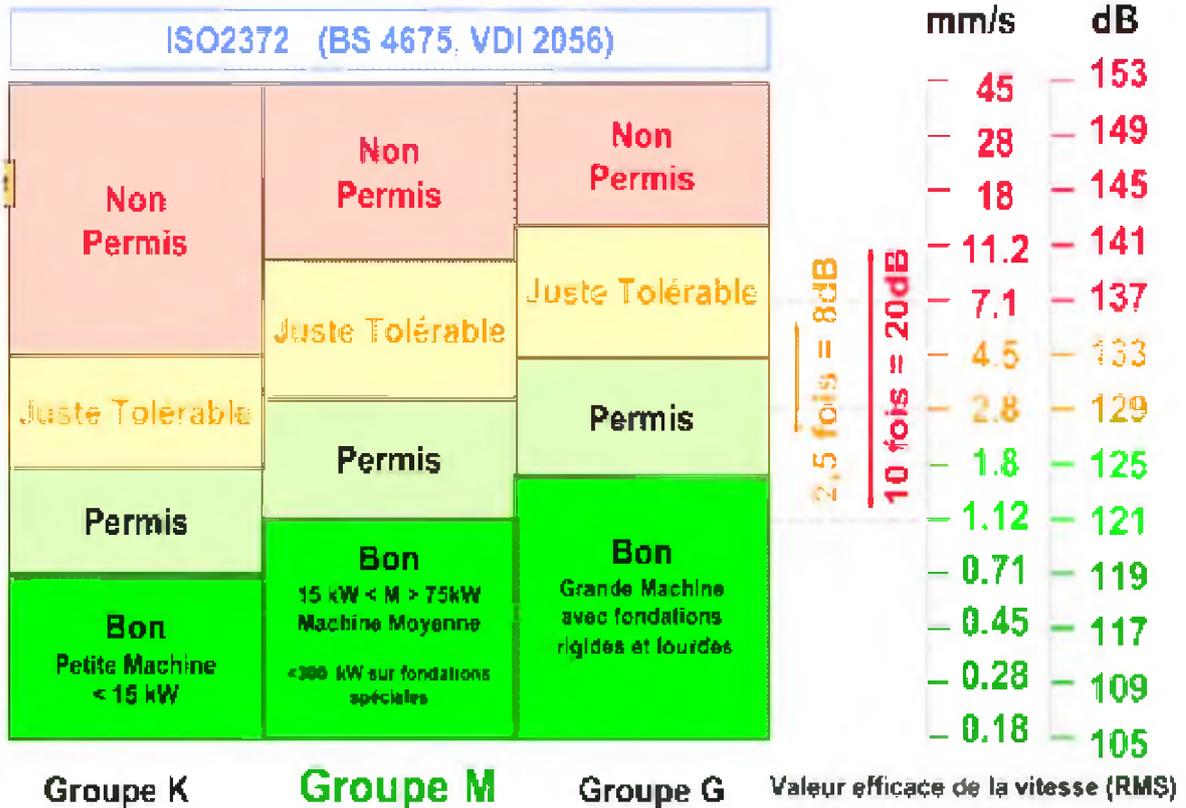


Fig. 2.2 : Seuils de vitesse vibratoire ISO 2372 [1]

Groupe 1, K : Eléments de moteurs ou de machines qui, dans des conditions normales de fonctionnement, sont intimement solidaires de l'ensemble d'une machine. (Les moteurs électriques produits en série, de puissance jusqu'à 15 kW).

Groupe 2, M : 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 (puissances jusqu'à 300 kW) sur fondations spéciales.

Groupe 3, G : Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations rigides et lourdes, relativement rigides dans le sens de la vibration.

2.1.2. Seuils d'accélération

En haute fréquence, l'unité appropriée est l'accélération et la norme ISO 2372 n'est pas adaptée à cette unité. Le tableau ci-dessous, (Fig. 2.3) est une proposition de niveaux, en fonction de la vitesse de rotation et du diamètre de l'arbre ou du type de roulement.

| Seuils d'alarme en accélération (g crête) pour les paramètres hautes fréquences. | | | | | | | | |
|--|---------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| Vitesse | 300 RPM | | 1000 RPM | | 2000 RPM | | 4000 RPM | |
| Diamètre de l'arbre en [mm] | Alerte | Alarme | Alerte | Alarme | Alerte | Alarme | Alerte | Alarme |
| Ø25 | 0.06 | 0.21 | 0.35 | 1.1 | 0.77 | 2.5 | 2.1 | 6.6 |
| Ø100 | 0.17 | 0.5 | 0.9 | 2.8 | 2.1 | 6.4 | 5.6 | 17 |
| Ø200 | 0.3 | 0.9 | 1.6 | 5.0 | 3.4 | 10.0 | / | / |
| Ø400 | 0.45 | 1.4 | 2.4 | 7.6 | / | / | / | / |

Fig. 2.3 : Seuils d'accélération vibratoire [1]

Ceci peut être dangereux dans l'établissement de seuil d'intervention car ces seuils doivent être différents selon qu'il s'agit d'un problème de balourd, d'un défaut de roulement ou encore d'une mauvaise lubrification.

Cependant les normes présentent un intérêt incontestable pour la réception d'une machine neuve. Pour les machines en service, concernant l'incidence de la fonction de transfert ou caractéristique de la structure ; il sera plus judicieux de faire des comparaisons avec des valeurs relevées lorsque le matériel était neuf. Ici interviendra l'appréciation du responsable entretien qui fixera les seuils d'alarme en fonction de l'expérience qu'il aura acquise concernant ce type de matériel [2].

2.2. Limites du suivi en mode global

Le suivi en mode global permet d'appréhender l'état de la machine par une évolution significative d'une dégradation ou par la comparaison à des seuils d'alarme et de danger, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis. C'est l'analyse spectrale qui le permettra [2].

3. Analyse spectrale

C'est une méthode d'investigation par analyse en fréquence. Dans la plupart des mesures de vibrations, il est beaucoup plus aisé de travailler dans le domaine des fréquences que dans le domaine des temps.

De ce fait est née l'idée de l'analyse en fréquence ou spectral où le signal amplitude/temps est converti en signal complexe les différentes composantes sinusoïdales.

Le spectre, outil de cette analyse, se présente sous forme d'un graphique montrant l'amplitude de la vibration à chaque fréquence. Le graphique suivant illustre l'exemple typique du tracé d'un spectre. [2]

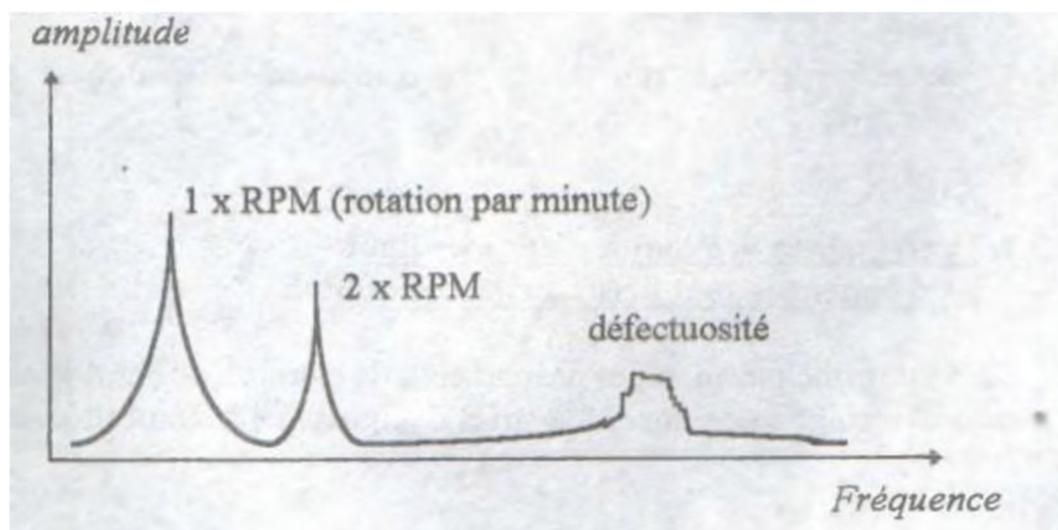


Fig. 2.4 : Exemple typique du tracé d'un spectre [2]

Dans un spectre toutes les composantes du signal vibratoire sont représentées sous forme de pics et l'on peut suivre individuellement une variation d'amplitude sans qu'il y ait, comme dans la mesure globale, l'effet de masque qui risque d'estomper la mise en évidence d'un défaut en développement.

A noter que les unités de fréquence les plus utilisées sont :

- Le **RPM** ou nombre de rotations par minute
- Le **CPM** ou nombre de cycles par minute
- Le hertz (**HZ**) ou nombre de cycle par seconde :

$$1 \text{ HZ} = 60 \text{ CPM} = 60 \text{ RPM}$$

Cette analyse est plus riche et plus fine. Un spectre, en effet, permet de déterminer non seulement l'importance de l'anomalie mais aussi sa nature (balourd, lignage, roulement, engrenage,.....). Le diagnostic ainsi rendu possible permet de définir la cause et l'urgence de l'intervention à effectuer [2].

4. Technique de résonance

Définissons d'abord le terme résonance : il y a résonance lorsque le signal de sortie d'un système est fortement amplifié par rapport au signal d'entrée pour une fréquence particulière appelée propre de système.

La technique de résonance représente une méthode utilisée pour le dépistage spécifique des défauts de roulements. Les fréquences engendrées au-delà de 20.000 Hz sont des fréquences dues principalement, sur une machine tournante, à un défaut de roulement ou d'engrenage, à l'exclusion des défauts de balourd, désalignement ; problème électrique, forces hydraulique et aérodynamique.

La méthode de mesure par technique de résonance est donc basée sur l'utilisation d'un filtre éliminant les fréquences inférieures à 20.000 Hz et d'un capteur de vibration dont la fréquence propre ou résonance est de l'ordre de 30.000Hz et dont on mesure l'excitation ou pointe d'énergie ou onde de choc [2].

5. Technique d'enveloppe

Cette technique est très utilisée pour la détection des défauts se manifestant dans les hautes fréquences. Ces défauts sont forcément de faible énergie. Ils n'émergent en général pas du bruit de fond sur un spectre RC (Résolution constante) dans les hautes fréquences. Ils peuvent s'apparenter à des petits chocs qui excitent la structure de la machine qui répond généralement entre 1 et 10 kHz [3].

Un spectre enveloppe (SE) (Fig. 2.5) doit se paramétrer de façon précise sur deux gammes de fréquences différentes :

- la gamme HF (haut fréquence) ; c'est la gamme de fréquences excitée par les défauts sur laquelle réagit la structure. Elle est généralement comprise entre 1 et 10 kHz. C'est la gamme dont les valeurs croissent en forme de « cloche » ou de « bosses de chameau » sur un spectre RC en HF ;
- la gamme de fréquences des défauts « excitateurs » possibles. Ces défauts sont Ceux des roulements. L'élément fautif peut être
 - la piste interne (sur l'arbre),
 - la piste externe (sur l'alésage)
 - une bille ou un rouleau

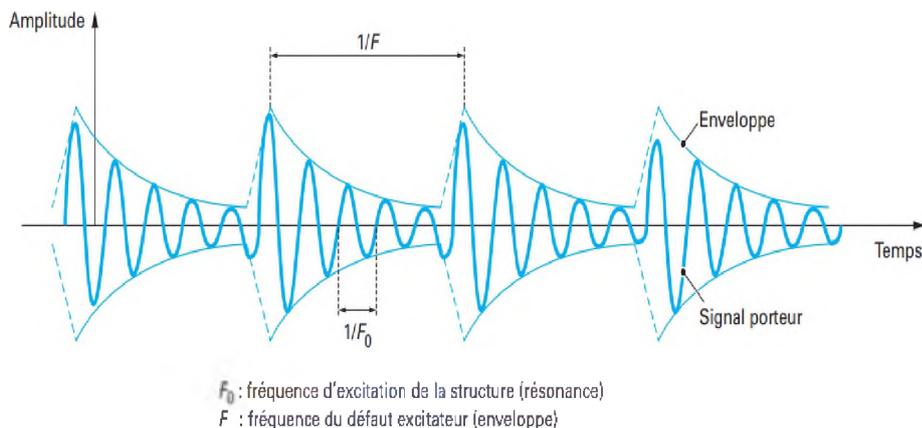


Fig. 2.5: Démodulation d'amplitude par l'enveloppe [4]

6. Cepstre

C'est la représentation de la transformée de Fourier du spectre ; soit deux fois la transformée de Fourier du signal temporel de base. L'image obtenue est une courbe en fonction du temps (qué-frence) mesuré en secondes.

Le Cepstre est au spectre ce que le spectre est à la représentation temporelle du signal. Un phénomène périodique dans le temps n'est représenté que par un seul pic sur un spectre. De la même façon, un phénomène représenté par un spectre périodique (modulation) ne donne qu'un seul pic sur un Cepstre.

C'est un outil de diagnostic utilisé pour distinguer des défauts qui donnent des images spectrales complexes dues à plusieurs modulations d'amplitude concomitantes. Les engrenages peuvent nécessiter ce type d'analyse. En effet, la fréquence d'engrènement est souvent modulée par les fréquences de rotation des roues menant et menée.

Le Cepstre permet de séparer et d'identifier sur une seule image toutes les fréquences de modulation (fréquences de rotation des arbres d'entrée, intermédiaire et de sortie dans un réducteur) [3].

7. Types de mesure

7.1. Mesure en bande large

En première approche, une mesure des vibrations sur tout le domaine des fréquences devrait répondre au but recherché. En pratique, on utilise un filtre passe-bande (Fig. 2.6), qui permet de ne prendre en compte que les phénomènes vibratoires intéressants pour la mesure.

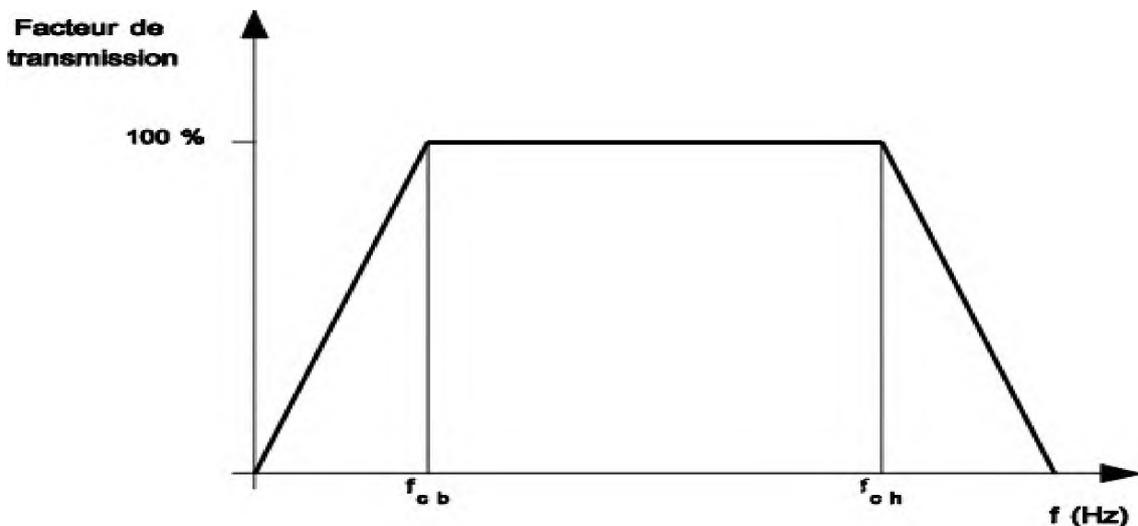


Fig. 2.6 : Filtre passe-bande [f_{cb} , f_{ch}]= fréquence de coupure basse et haute [1]

Pour minimiser le danger d'effet de masque, certains appareils offrent la possibilité de mesurer les indicateurs à l'intérieur de plusieurs bandes de fréquences définies par l'utilisateur et de suivre l'évolution du niveau global à l'intérieur de chacune de ces bandes. Cette technique est aisée à mettre en place et à exploiter lorsqu'il est possible de :

- définir des bandes de fréquences bien dissociées en fonction des principaux défauts redoutés sur la machine à surveiller.
- fixer, pour chacune de ces bandes, un seuil d'intervention.
- une bande « basses fréquences » pour suivre les défauts de déséquilibre et désalignement.
- une bande « moyennes fréquences » pour suivre les défauts d'engrènement.
- une bande « hautes fréquences » pour suivre les défauts de roulement [4].

7.2. Points de mesure

La plupart des vibrations de machines sont issues des parties tournantes ou oscillantes. Elles peuvent être d'origine mécanique, électromagnétique, hydraulique, etc. Elles sont transmises à la structure par l'intermédiaire des paliers, et aux fondations par l'intermédiaire des fixations. On conçoit aisément que les meilleurs points de mesure (Fig. 2.7), dans le cadre de la maintenance des machines sont les paliers et qu'il serait déraisonnable de prendre des mesures sur les carters [1].

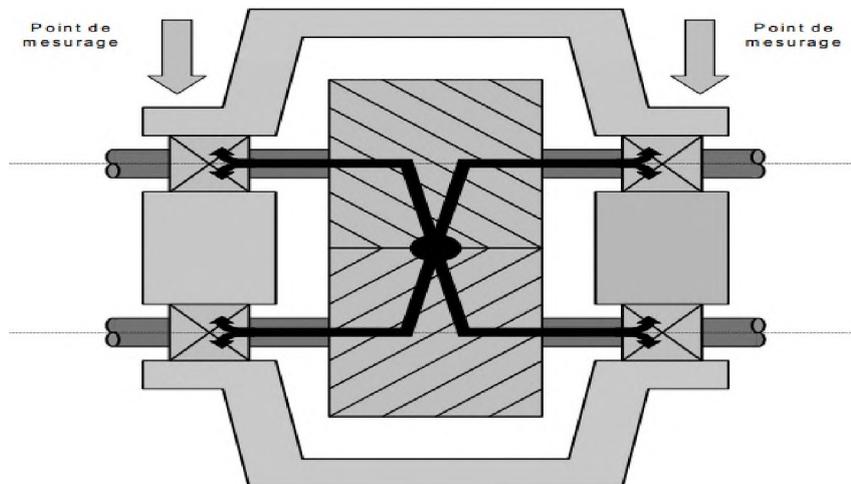


Fig. 2.7 : points de mesure sur un réducteur [1]

La transmission de ces vibrations dépendra de plusieurs paramètres auxquels il faudra adapter le mode de mesure :

- Paliers à roulements : la transmission des vibrations aux paliers est bonne. Aussi suffira-t-il de mesurer les vibrations absolues de paliers à l'aide d'un **vélocimétrie** ou d'un **accéléromètre**.

- Paliers lisses : la transmission des vibrations aux paliers est mauvaise. Aussi devra-t-on mesurer de préférence les vibrations relatives d'arbre. Cette technique est plus délicate car l'implantation des capteurs ainsi que la préparation de leur piste de mesure doivent être prévues par le constructeur de la machine. Si ces conditions ne sont pas remplies, on préférera alors la mesure des vibrations absolues de paliers (Fig. 2.8).

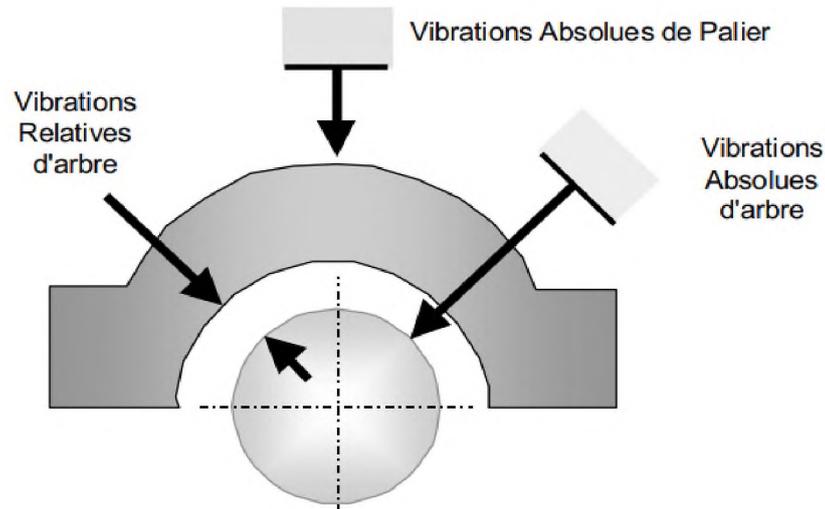


Fig. 2.8 : Différents points de mesure [1]

Il est évident que des rotors légers tournant dans une structure très rigide et très lourde ne produiront que des vibrations de paliers faibles. C'est le cas de la plupart des compresseurs rotatifs. Par contre, les mouvements relatifs de l'arbre par rapport aux paliers lisses seront importants. L'amplitude des vibrations relatives d'arbre sera supérieure aux vibrations absolues de paliers dans un rapport variant entre 10 et 50. Dans ce cas, il conviendra donc de surveiller les premières.

Lorsque la masse du rotor augmente, dans une même structure, le rapport entre vibrations relatives d'arbre et vibrations absolues de paliers change. Pour une turbomachine de 100 MW par exemple, le rapport n'est plus compris qu'entre 4 et 10. Il est toujours utile ici de mesurer les vibrations relatives d'arbre, mais il est sage aussi de surveiller les vibrations absolues de paliers. De cette manière, on peut connaître parfaitement le comportement vibratoire de la machine.

Dans le cas de très grosses machines, comme par exemple les turbomachines de production d'énergie de grande puissance, le rapport entre la masse du rotor et celle des paliers augmente encore. Les vibrations absolues de paliers peuvent alors devenir aussi grandes que les vibrations relatives d'arbre. Dans ce cas, on mesure de préférence Les vibrations absolues d'arbre [1].

7.3. Intensité vibratoire :

Dans ce type de mesure, nous allons appréhender les vibrations apparaissant à la surface de la machine, et plus particulièrement sur les paliers.

7.3.1. Appareillage : AFNOR E 90-100

Afin de pouvoir procéder à des mesurages comparatifs, il convient de définir les caractéristiques de l'appareillage.

La norme française AFNOR E 90-1001 décrit précisément ces caractéristiques. Cette norme française présente une large concordance avec la norme internationale ISO 2954 et la norme allemande DIN 45 666. Le point le plus important de ces normes est le suivant :

“La grandeur de mesure de l'intensité vibratoire est la vitesse vibratoire efficace”

Elle est définie par les équations suivantes :

$$v_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v^2(t) \cdot dt} \quad (2.1)$$

$$v_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2} (v_{1\,eff}^2 + v_{2\,eff}^2 + \dots + v_{n\,eff}^2)} \quad (2.2)$$

où v_{neff} est la vitesse vibratoire efficace de la composante à la fréquence f_n . La gamme de fréquence de l'appareillage doit être comprise entre 10 et 1 000 Hz (Figure 2.9) [1].

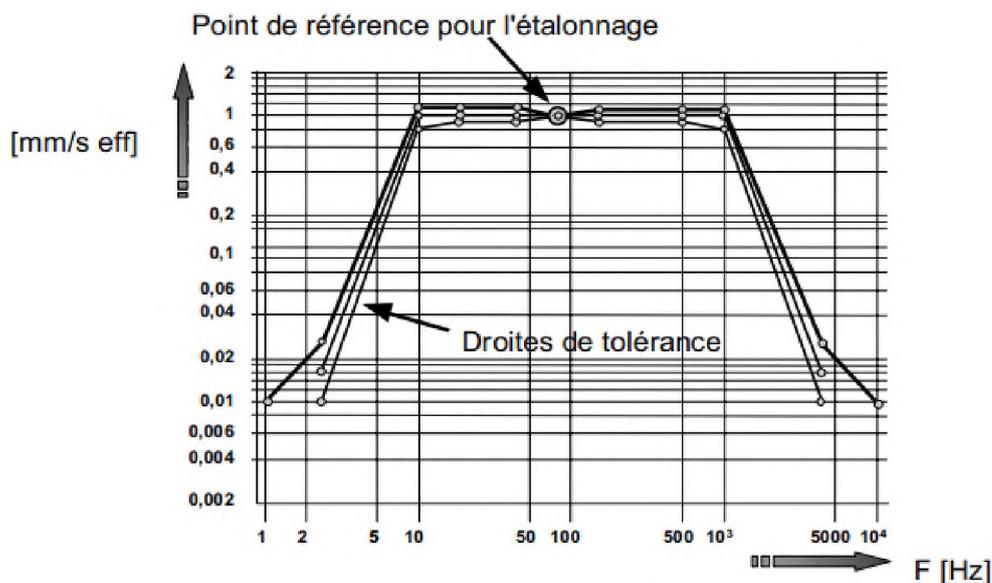


Fig. 2.9 : Filtre passe-bande 10 – 1000 Hz pour le mesurage de l'intensité vibratoire [1]

8. Principaux défauts d'une machine tournante et leurs manifestations

8.1. Défaut de balourd

Le balourd est un déséquilibre massique qui provient généralement du défaut d'usinage, d'assemblage et de l'échauffement dissymétrique du rotor lors du fonctionnement.

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor, ce qui caractérise le balourd. Il en résulte que l'arbre en rotation est soumis à des efforts centrifuges qui le déforment (Fig. 2.10). Les origines des balourds sont multiples [5].

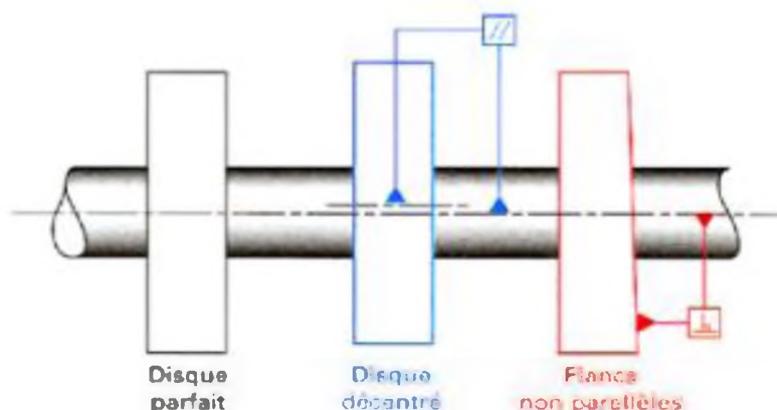


Fig. 2.10 Ecart d'usinage (excentricité et parallélisme) [5]

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

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

Généralement, le spectre est issu d'une mesure prise radialement (souvent dans la direction radiale horizontale) [5].

➤ Manifestation :

Ce défaut se manifeste par :

- l'augmentation du niveau global choisi en basses fréquences, soit D_{cc} [10-1000 Hz], soit V_{eff} [10-1000 Hz],

- la nette augmentation de l'amplitude de la fréquence fondamentale (fréquence de rotation, f_r).

$$f_r = \frac{N}{60} \quad (2.3)$$

N : vitesse de rotation (tr/min).

Il existe deux types de balourd statique et dynamique :

1.1.1. Balourd statique

L'axe principal d'inertie et l'axe de rotation sont parallèles, mais non confondus (Fig.2.11).

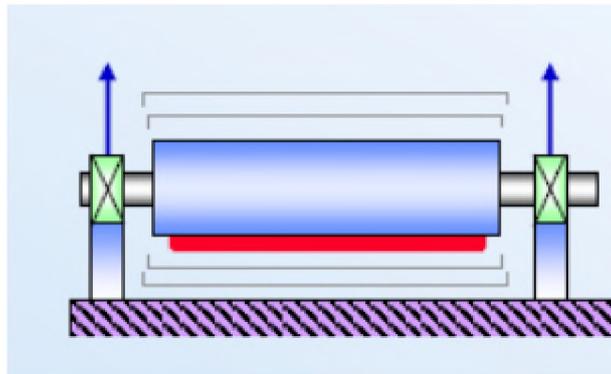


Fig. 2.11 : Balourd statique [4]

- Même phase sur chaque roulement.
- Principalement des vibrations radiales Balourd (équilibre).

1.1.2. Balourd dynamique

C'est la conjonction des deux balourds précédents : l'axe principal d'inertie forme un angle non nul par rapport à l'axe de rotation, mais leur intersection ne coïncide pas avec le centre de masse.

Pour des raisons de construction, les rotors présentent généralement un balourd statique et également un couple de balourd, donc un balourd dynamique (Fig. 2.12).

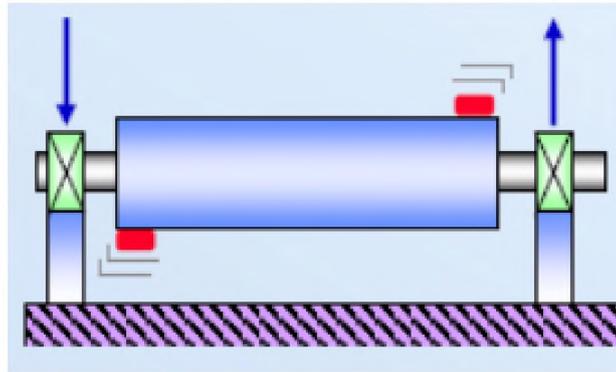


Fig. 2.12 : Balourd dynamique [4]

- Déphasage de 180° autour du roulement.
- Principalement des vibrations radiales.

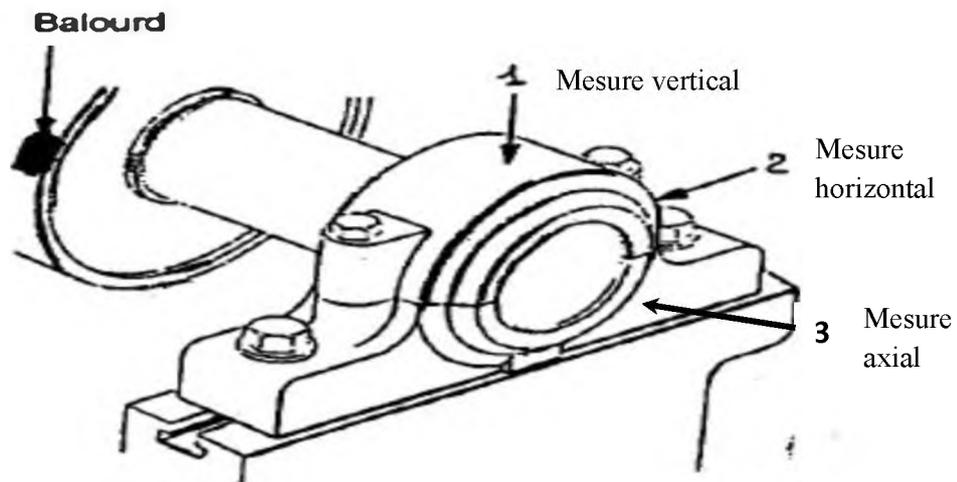


Fig. 2.13 : points de mesure d'un défaut [4]

Le balourd va induire, dans un plan radial, une vibration dont le spectre présente une composante dont la fréquence de base correspond à la fréquence de rotation f_r .

Elle représente alors le pic le plus élevé avec des pics d'amplitudes plus faibles sur les harmoniques de f_r (Fig. 2.14).

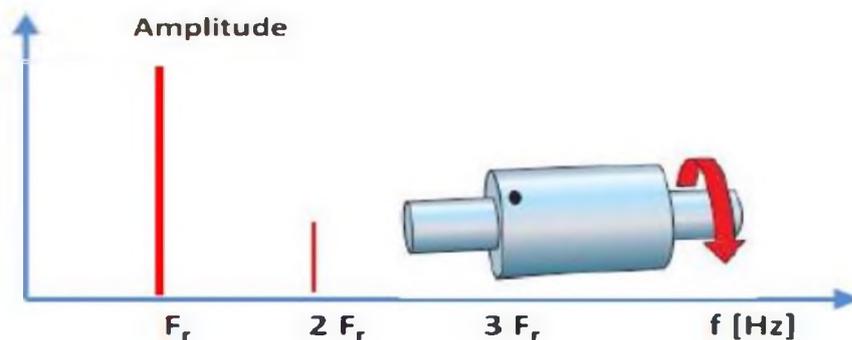


Fig. 2.14 : Spectre théorique d'un défaut de balourd [4]

8.2. Défauts de roulement

Le roulement, organe de base pouvant assurer à lui seul plusieurs fonctions parmi lesquelles la liaison mobile en rotation avec un minimum de frottement entre deux éléments, tout en supportant des charges radiales ou axiales plus ou moins importantes, il peut être aussi utilisé pour assurer un positionnement précis de l'arbre, et corriger des défauts d'alignement. Selon le type de roulement utilisé [6].

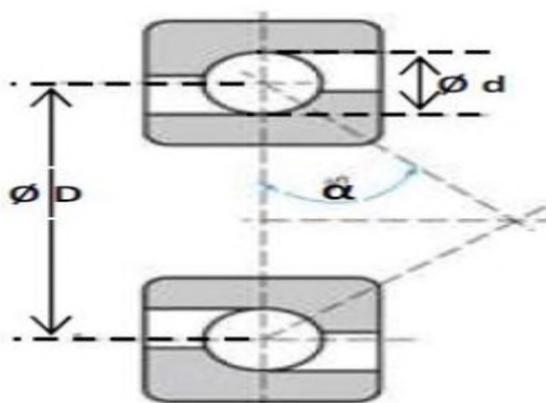


Fig. 2.15 : Caractéristique géométrique d'un roulement [4]

N : le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles),
 D : le diamètre primitif,
 d : le diamètre des éléments roulants,
 α : angle de contact,
 f_r : la fréquence de rotation de la bague interne (la bague externe étant supposée fixe).

8.2.1. Types de roulements

En pratique pour chaque application existe un roulement approprié, le roulement à billes offre un faible frottement grâce au contact ponctuel mais n'est utilisé que pour des charges limitées.

- Le roulement à rouleaux offre une plus grande capacité de chargement grâce au contact linéaire provoquant aussi un frottement plus important.
- Les rouleaux peuvent prendre différentes formes cylindriques, coniques ou sphériques.
- Les roulements à aiguilles sont quant à eux utilisés lorsqu'un rapport charge/encombrement important est requis [6].

Les principaux types de roulements sont illustrés dans la figure suivante :

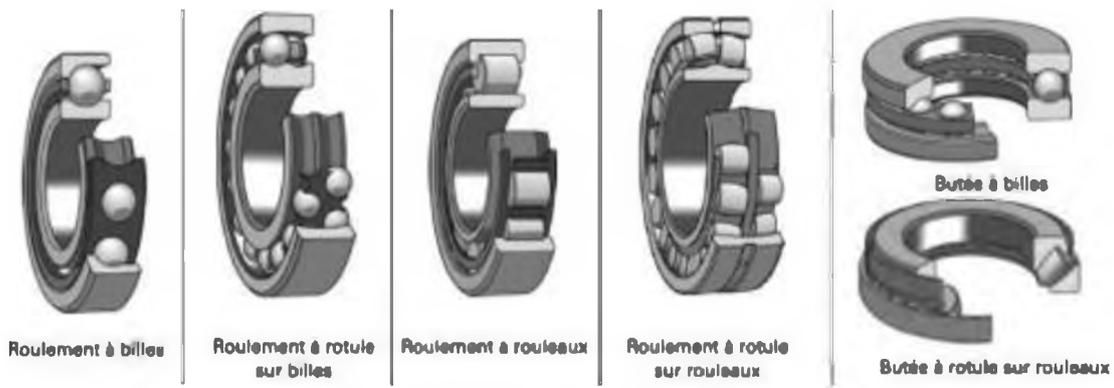


Fig. 2.16 : Différents types de roulement [6]

8.2.2. Éléments de roulements

Le roulement est composé des éléments (Fig. 2.17) suivants :

- deux bagues concentriques en acier, appelés bague intérieure et bague extérieure, comportant des chemins de roulement.
- des corps roulants, billes ou rouleaux généralement en acier, permettant le mouvement des deux bagues avec un frottement minimal.
- une cage séparant et guidant les corps roulants (en polyamide, tôle acier, laiton ou résine) [6].

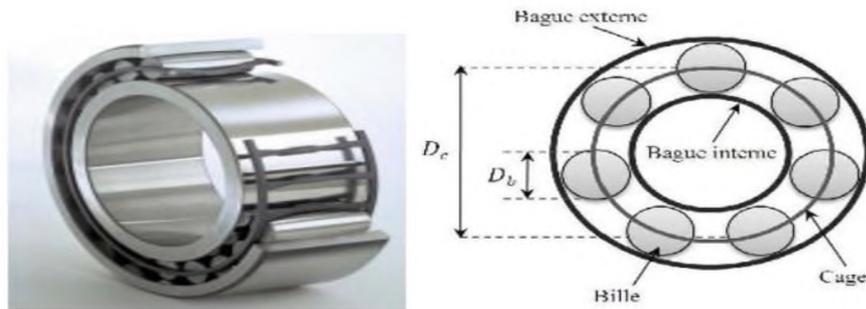


Fig. 2.17 : Composants de roulement [6]

8.2.3. Signatures vibratoires des principaux défauts des roulements :

a. Défaut de type écaillage affectant la bague externe :

Un défaut de type écaillage affectant la bague externe d'un roulement a pour image vibratoire un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence du défaut. A chaque composante de ce peigne, est associée une paire de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique importante (fig. 2.18) [7].

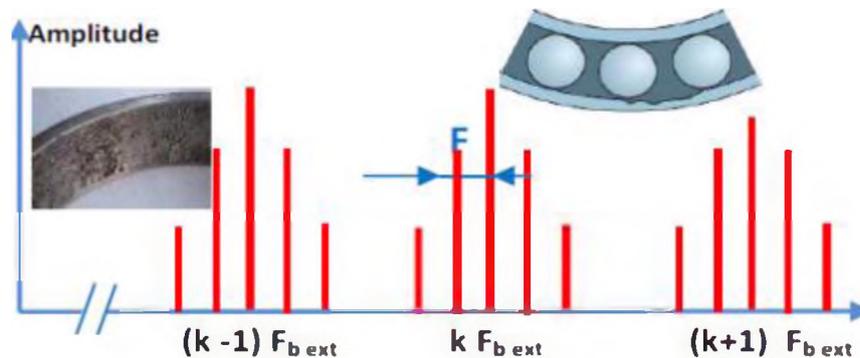


Fig. 2.18 : vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure [4]

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

$$f_{b.ext} = \left(\frac{N}{2}\right) fr \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right) \cos \alpha\right] \quad (2.4)$$

b. Défaut de type écaillage affectant la bague interne :

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation (fig. 2.19) [7]

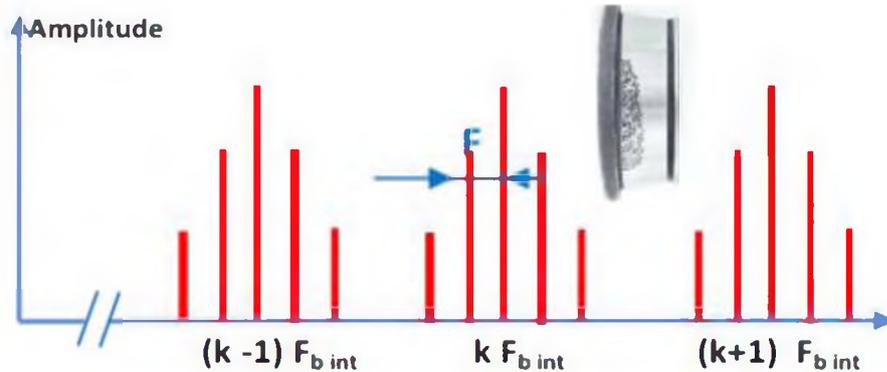


Fig. 2.19 : vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure [4]

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

$$f_{b.int} = \left(\frac{N}{2}\right) f_r \left[1 + \left(\frac{d}{D}\right) \cos \alpha\right] \quad (2.5)$$

c. Défaut de type écaillage sur un élément roulant :

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant (bille, rouleau ou aiguille) a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de la cage (figure 2.20) [7].

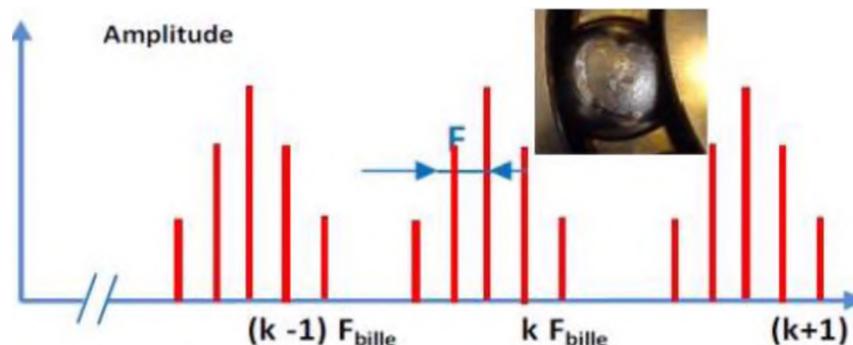


Fig. 2.20 : vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant [4]

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

$$f_{bille} = \left(\frac{D}{d}\right) fr \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right) \cos \alpha\right]^2 \quad (2.6)$$

d. Défauts de de la cage (rupture cage) :

L'évolution rapide de ce type de défaut en rend la surveillance difficile. Dans la plupart des cas, un roulement dont la cage est cassée va très vite se détériorer. Les éléments roulants (billes ou rouleaux) n'étant plus maintenus, ils vont se regrouper et créer un fléchissement de l'arbre ou, notamment dans le cas de rouleaux, se mettre en travers, entraînant ainsi le blocage immédiat du rotor [7].

- La fréquence de passage d'un défaut de la cage f_{cage} est donnée par l'équation suivante :

$$f_{cage} = \left(\frac{1}{2}\right) fr \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right) \cos \alpha\right] \quad (2.7)$$

Aujourd'hui, la plupart des fabricants de roulements fournissent des tables de référence qui permettent de s'affranchir de ces calculs. Ces données de roulement présenter ce forme des base des donné.

8.3. Cause des défauts

Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme:

- contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides
- lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement, mauvais alignement du rotor.
- courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques [7].

9. Autres types de défaut

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

Tableau. 2.1 : Reconnaissance des principales anomalies [7]

f_{rot} : fréquence de rotation

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

f_p : fréquence de passage de la courroie

z : nombre de dents de l'engrenage

10. Conclusion

Il existe plusieurs techniques d'analyse vibratoire : mesure de la valeur globale, la Technique de résonance, l'analyse spectrale, le Cepstre, la détection d'enveloppe. Le choix de la technique se fait en fonction du défaut à surveiller (niveau vibratoire ; balourd, roulement, etc).

La bonne connaissance des différentes techniques de mesure vibratoire, et les méthodes de détection des différents défauts, associée à une bonne planification de la maintenance et de la gestion de stock peut augmenter la fiabilité et la disponibilité du système industriel à 80%.

Références bibliographiques du chapitre 2

- [1] Document, Bruel & kjaer « MC. Introduction à la détection des défauts 2002 ».
- [2] S.BENSAADA, D.FELIACHI « La maintenance industrielle ».
- [3] David AUGÉIX « Analyse vibratoire des machines tournantes » Technique de l'ingénieur (22/04/2012), Ingénieur de l'Institut national des sciences appliquées (INSA Toulouse).
- [4] Fouad. Landolsi , « Cours De Techniques De Surveillance », 2010.
- [5] Omar 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, Université De Reims Champagne Ardenne
- [6] Moret et P. Guay. «Roulements - les différents types et montages -». Techniques de l'ingénieur, (2013)
- [7] A.BOULENGER, P.CHRISTIAN Surveillance des Machines Tournantes par Analyse des Vibrations, AFNOR, 2ème tirage, (1998)

Chapitre 3 :

***Etude de Cas
industriels***

1. Introduction

Le cas industriel que nous présentons s'inscrit dans le cadre de notre stage pédagogique de formation qui s'est déroulé au complexe GNL 3 de SONATRACH, sur la période du 29 avril au 30 mai 2018. La compagnie née en 1963 n'a cessé de se développer et en 2014, la zone industrielle d'Arzew s'est dotée du complexe de liquéfaction de gaz naturel GNL3 avec une capacité de production de 4,7 millions de tonnes par an.

Dans ce chapitre on commence par une présentation du complexe GNL3 ou on s'intéresse plus particulièrement aux travaux réalisés par le service maintenance d'une part. D'autre part on présente les défauts industriels auxquels ce service est confronté sous surveillance vibratoire, que ce soit offline ou online.

2. Présentation générale du complexe GNL3/Z

2.1. Généralités

Le site est situé sur une surface de 54 ha à Bethioua, dans la zone du port industriel d'Arzew El Djedid, et bordé de l'usine GP1Z à l'Est, l'usine de dessalement et l'usine GL2Z à l'ouest, la mer méditerranée et la rue du port au nord, et la route principale de la zone industrielle au sud.

Sa mission principale est la liquéfaction du méthane et particulièrement la production de :

- Éthane pour la consommation interne (réintégration au réfrigérant mixte et Injection dans le gaz combustible) et exportation
- Propane et Butane (GPL) pour exportation stockés dans des réservoirs de rétention totale et séparés, d'une capacité de 56 000 m³ pour le propane et 12 000 m³ pour le butane
- Gazoline pour exportation dans une sphère d'une capacité de 1800 m³
- Gaz riche en hélium

Il produit 4,7 millions de tonnes / an de GNL exporté aux marchés internationaux stocké dans deux réservoirs de rétention totale, chacun ayant une capacité de 160 000 m³.

L'unité GNL3/Z, comprend :

- Un train du GNL pour :
 - Traitement du gaz d'entrée
 - Fractionnement
 - Liquéfaction du méthane
- Toutes les infrastructures nécessaires :

Utilités, Stockages, Jetée pour chargements des navires, etc.

L'usine est conçue pour une vie nominale de 30 ans. L'usine est conçue pour fonctionner au moins 330 jours par an. La disponibilité de l'usine est une partie intégrante du calcul de la production du GNL, donc la philosophie de réserve adoptée doit garantir que la disponibilité soit atteinte [1].

2.2. Organigramme du complexe GL3Z

L'organisation générale de gestion du GL3Z est représenté par l'organigramme ci-dessous (Fig. 3. 1)

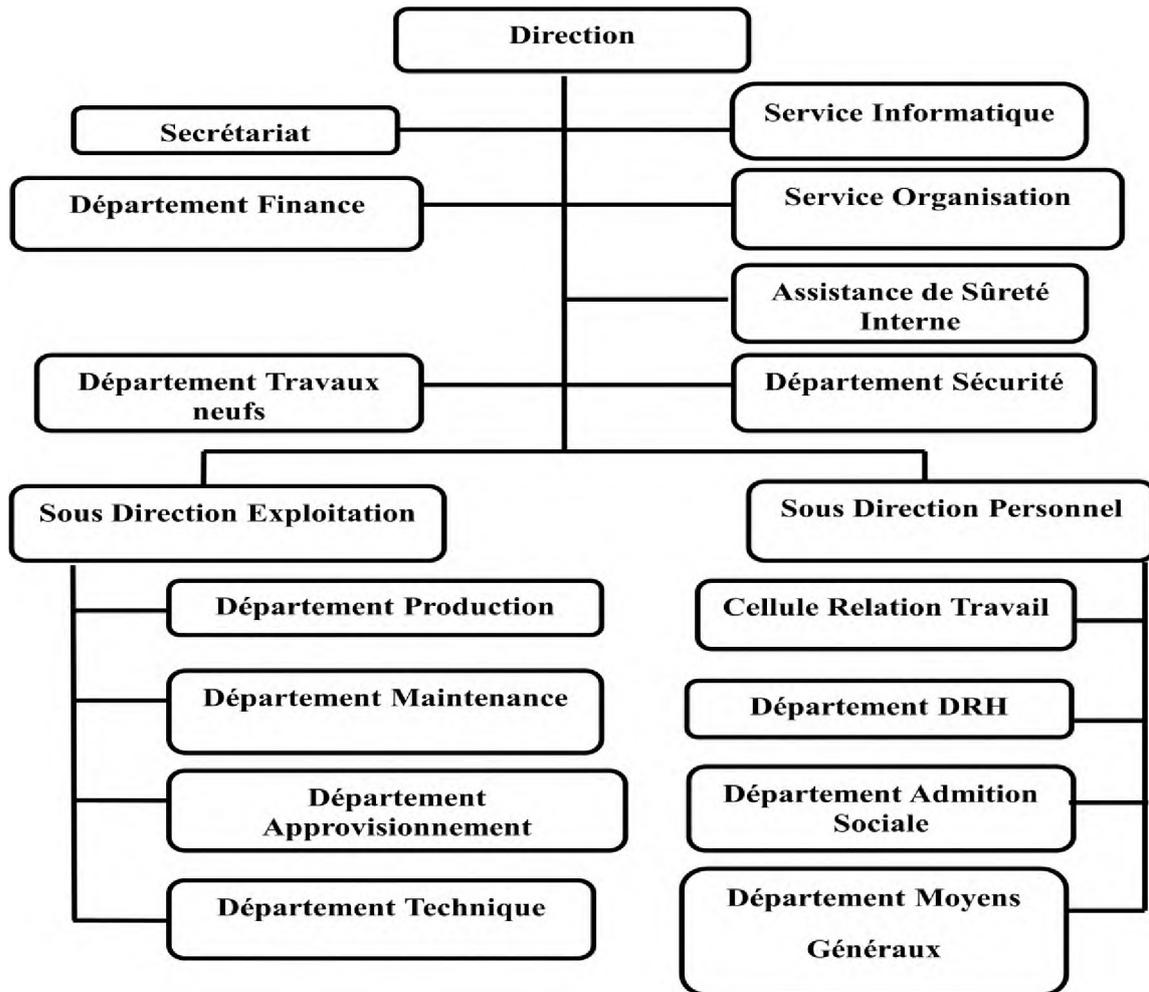


Fig. 3. 1. Organigramme du) complexe GNL3/Z [1]

3. Département maintenance

3.1. Organisation

L'organigramme du département maintenance est présenté ci-dessous (Fig. 3.2).

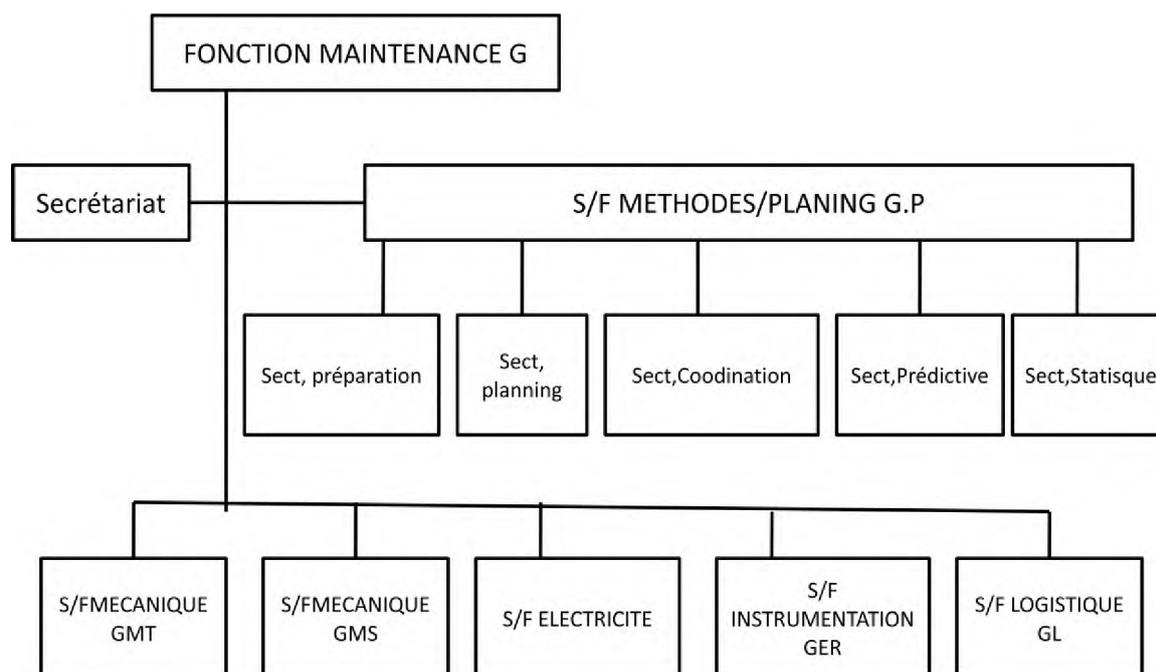


Fig. 3. 2. Organisation du département maintenance [1]

3.2. Travaux réalisés

3.2.1. Service maintenance prédictive

- Le suivi des machines critiques connectées on line.
- L'archivage des historiques des machines (TBF, vibration. etc.).
- Le contrôle des vibrations des machines tournantes off line.
- L'organisation de la maintenance en collaboration avec d'autres services de GP (planning, coordination, préparation).
- Le suivi de démarrage des machines tournantes après les interventions.

3.2.2. Service technique d'inspection

- L'inspection de tous paramètres des machines tournantes (vibration, huile, température.etc.).
- L'analyse des données.
- La proposition des solutions de la maintenance.
- Le suivi de démarrage des machines tournantes après les interventions.

4. Systèmes de suivis vibratoires

4.1. Surveillance -on line-

Chaque fois qu'une machine est démontée, il y a toujours un risque de réassemblage incorrect et, par conséquent, plus de dommages possibles et plus de temps d'arrêt. qui

nécessite un système de suivi par distance qui nous permette à détecter le problème afin de bien déterminer le genre de l'intervention.

4.1.1. Système 1

Le système 1 (system one) est la plate-forme logicielle de surveillance des conditions brevetée de GE pour l'optimisation en temps réel des équipements et des processus sélectionnés, la surveillance des conditions et le diagnostic des événements. Semblable à un système de contrôle de processus qui permet aux utilisateurs de comprendre, de diagnostiquer et de contrôler leurs conditions de processus en temps réel, la plate-forme Bently Nevada System 1 de GE offre cette capacité pour les actifs qui pilotent votre processus [2].

➤ **Avantages**

- Évitez les temps d'arrêt coûteux avec un diagnostic rapide et précis du problème, permettant au machine d'être opérationnel dans les 24 heures.
- Réduction spectaculaire des coûts de main-d'œuvre et de déplacement grâce à la surveillance centralisée à distance et au diagnostic.
- Évite les coûts de maintenance inutiles en diagnostiquant précisément le problème et en empêchant le client de poursuivre l'exploration.

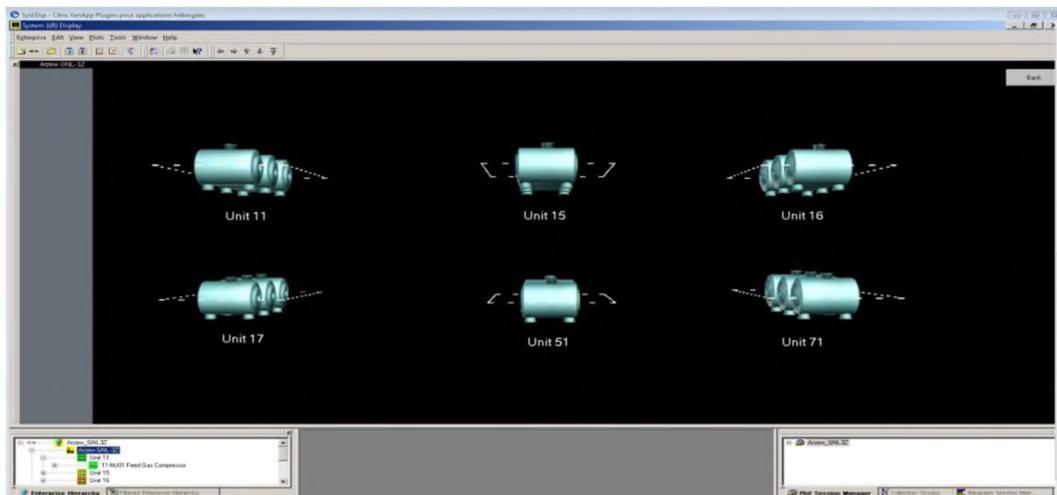
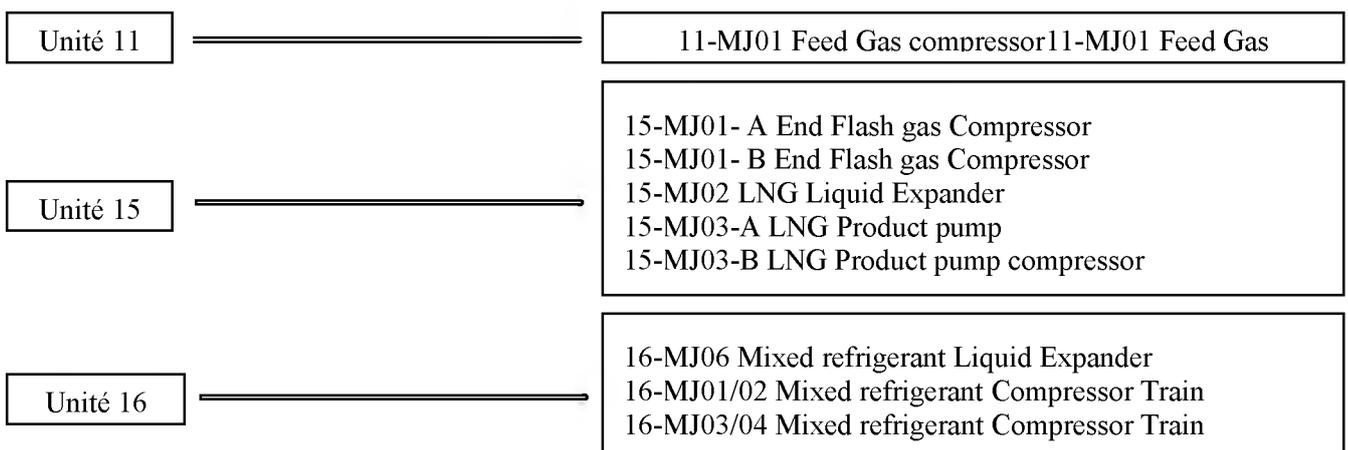


Fig. 3. 3. System 1 [3]

4.1.2. Machines suivis –off line-



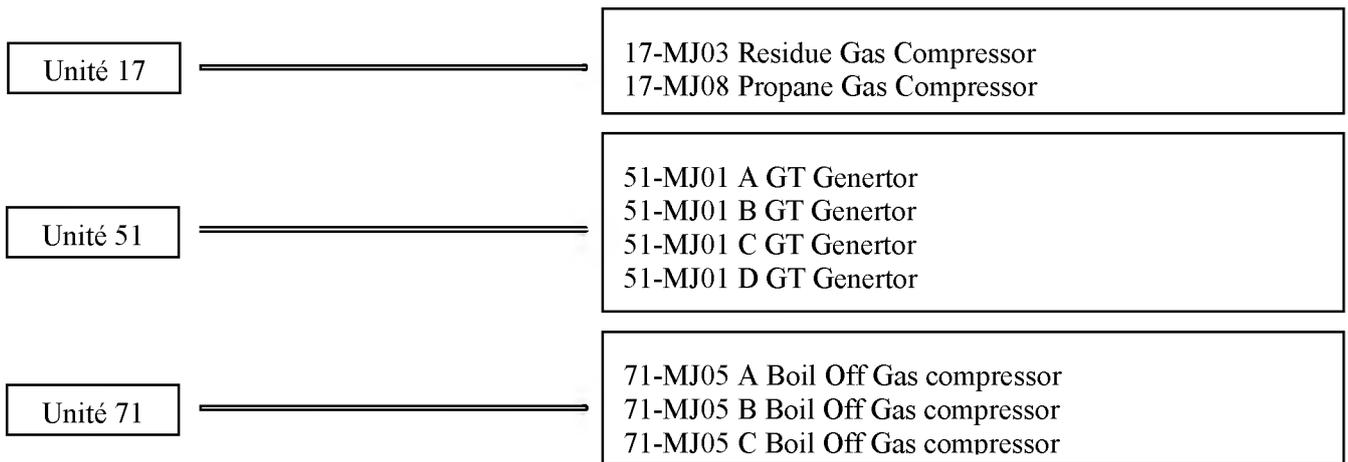


Fig. 3. 4. Unités suivis on line

4.2. Surveillance -off line-

4.2.1. Collecteur des données

Il convient de créer et de configurer les routes adéquates, puis de les charger sur le collecteur de données afin de pouvoir mesurer les points de l'installation (site) avec celui-ci. [4]



Fig.3. 5. Collecteur des données (Vibro 80)

4.2.2. Logiciel de surveillance

Le logiciel Report & Route Manager est un outil essentiel pour la surveillance et la maintenance conditionnelle des machines tournantes. Ce logiciel permet de transférer les données vibratoires et de procès à une base de données système, après qu'elles auront été enregistrées à intervalles réguliers au moyen du VIBROPORT 80 et de routes sur les machines du site, puis d'analyser ces mesures.

L'organisation et l'analyse des données de mesure ainsi rassemblées sont facilitées par ce logiciel Report & Route Manager. Vous pouvez déterminer les machines de l'installation qui demandent un entretien imminent, en permettant de détecter et d'identifier l'origine des dégradations des machines surveillées dès leur apparition [4].

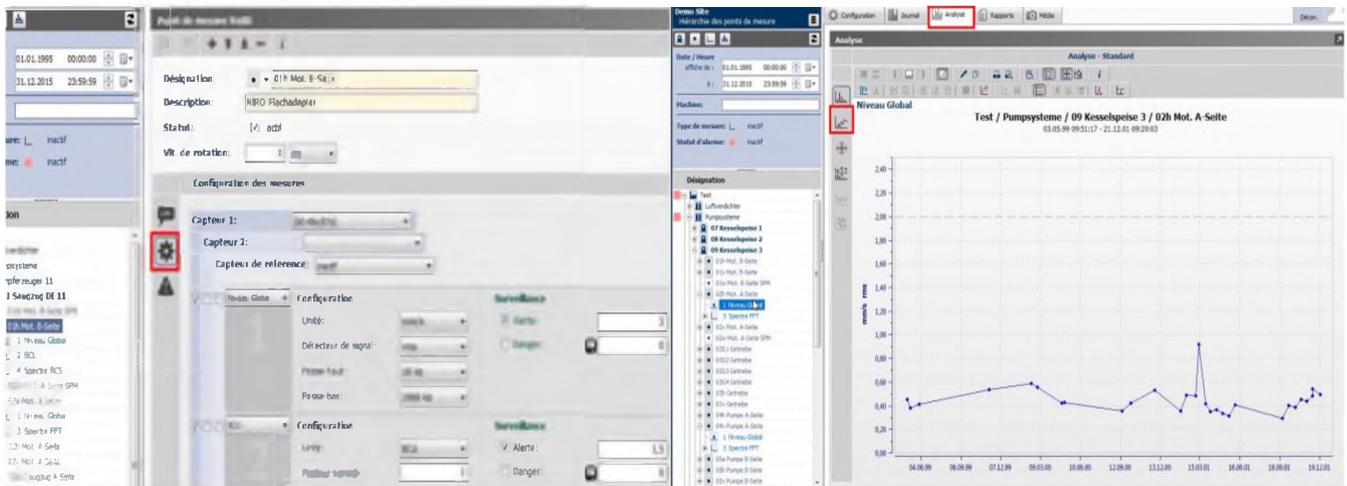


Fig. 3. 6. Logiciel de surveillance [4].

4.2.3. Machines suivis -off line-

Sont des machines qui ont un suivie vibratoire par le collecteur des données (VIBROPORT 80) et le logiciel de surveillance *Report & Route Manager*.

| UNITE | CCDE PROJET | CODE SH | DESCRIPTION |
|-------------|------------------|--|---|
| UNITE 11 | 11-MJ01-MJ18-B-M | 11-MJ01-GT-MJ01-MJ18-B-M | DUST EXTRACTOR FAN MOTOR \ Moteur ventilateur d'extraction de poussière |
| | 11-MJ01-MJ18-C | 11-MJ01-GT-MJ01-MJ18-C | DUST EXTRACTOR FAN \ Ventilateur d'extraction de poussière |
| | 11-MJ01-MJ18-C-M | 11-MJ01-GT-MJ01-MJ18-C-M | DUST EXTRACTOR FAN MOTOR \ Moteur ventilateur d'extraction de poussière |
| | 11-MJ01-MJ12-A | 11-MJ01-GT-MJ10-MJ12-A | VENTILATION FAN \ Ventilateur d'aération |
| | 11-MJ01-MJ12-A-M | 11-MJ01-GT-MJ10-MJ12-A-M | GT ENCLOSURE VENTILATION FAN MTR \ Moteur du ventilateur d'aération de l'enceinte turbine |
| | 11-MJ01-MJ12-B | 11-MJ01-GT-MJ10-MJ12-B | VENTILATION FAN \ Ventilateur d'aération |
| UNITE 12 | 11-MJ01-MJ12-B-M | 11-MJ01-GT-MJ10-MJ12-B-M | GT ENCLOSURE VENTILATION FAN MTR \ Moteur du ventilateur d'aération de l'enceinte turbine |
| | 12-MJ21-A | 12-MJ21-A | LEAN SOLVENT PUMP \ Pompe du solvant pauvre |
| | 12-MJ21-A-M | 12-MJ21-A-M | LEAN SOLVENT PUMP ELECT MOTOR \ Mot electric de la Pompe du solvant pauvre |
| | 12-MJ21-B | 12-MJ21-B | LEAN SOLVENT PUMP \ Pompe du solvant pauvre |
| | 12-MJ21-B-M | 12-MJ21-B-M | LEAN SOLVENT PUMP ELECT MOTOR \ Mot electric de la Pompe du solvant pauvre |
| | 12-MJ22-A | 12-MJ22-A | LEAN SOLVENT BOOSTER PUMP \ Pompe booster d'amine pauvre |
| | 12-MJ22-A-M | 12-MJ22-A-M | LEAN SOLVENT BOOSTER PUMP ELECT MOTOR \ Mot elec de la Pompe booster d'amine pauvre |
| | 12-MJ22-B | 12-MJ22-B | LEAN SOLVENT BOOSTER PUMP \ Pompe booster d'amine pauvre |
| | 12-MJ22-B-M | 12-MJ22-B-M | LEAN SOLVENT BOOSTER PUMP ELECT MOTOR \ Mot elec de la Pompe booster d'amine pauvre |
| | 12-MJ23-A | 12-MJ23-A | REGENERATOR REFUX PUMP \ Pompe de reflux du régénérateur |
| | 12-MJ23-A-M | 12-MJ23-A-M | REGENERATOR REFUX PUMP ELECT MOTOR \ Mot elec Pompe de reflux du régénérateur |
| | 12-MJ23-B | 12-MJ23-B | REGENERATOR REFUX PUMP \ Pompe de reflux du régénérateur |
| | 12-MJ23-B-M | 12-MJ23-B-M | REGENERATOR REFUX PUMP ELECT MOTOR \ Mot elec Pompe de reflux du régénérateur |
| | 12-MJ25 | 12-MJ25 | SOLVENT DRAIN PUMP \ Pompe de drainage d'amine pauvre |
| | 12-MJ25-M | 12-MJ25-M | SOLVENT DRAIN PUMP ELECTRIC MOTOR \ Mot elec de la Pompe de drainage d'amine pauvre |
| | 12-MJ26 | 12-MJ26 | SKIM OIL PUMP \ Pompe d'huile écumée |
| | 12-MJ26-M | 12-MJ26-M | SKIM OIL PUMP ELECTRIC MOTOR \ Mot elect de la Pompe d'huile écumée |
| | 12-MJ29-A | 12-MJ29-A | SOUR WATER DRAIN PUMP \ Pompe de drainage d'eau d'acide |
| 12-MJ29-A-M | 12-MJ29-A-M | SOUR WATER DRAIN PUMP ELECTRIC MOTOR \ Mot elect de la Pompe de drainage d'eau d'acide | |
| 12-MJ29-B | 12-MJ29-B | SOUR WATER DRAIN PUMP \ Pompe de drainage d'eau d'acide | |

Fig. 3. 7. Exemple des machines suivis -off line- [5].

5. Défauts industriels réels

5.1. Défaut -on line-

Le défaut en ligne traité concerne un balourd sur le compresseur de réfrigération MJ03/04 de l'unité 16, figure (Fig. 3.8).

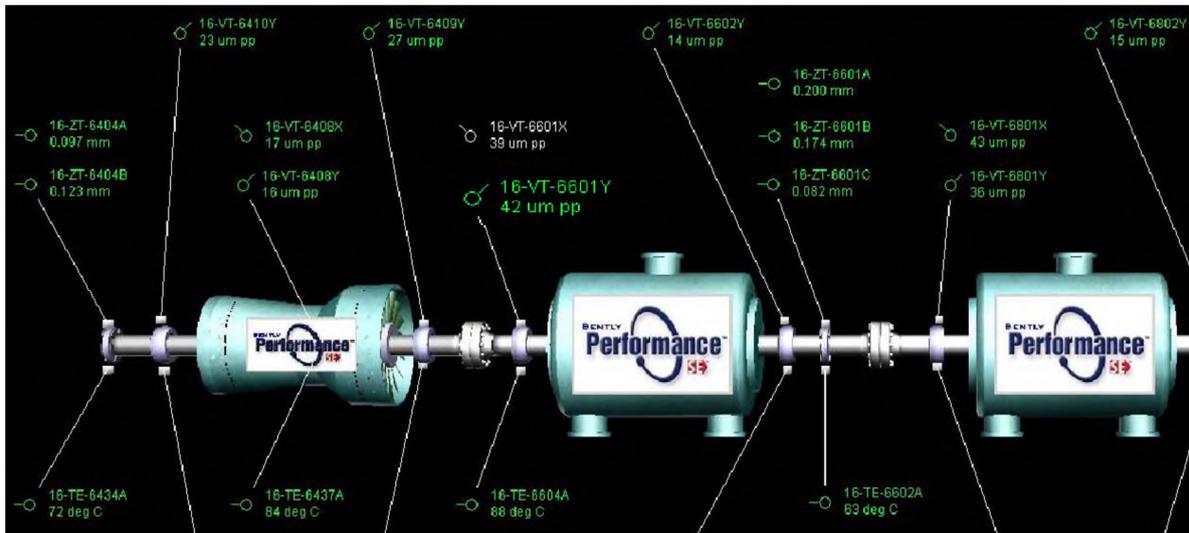


Fig. 3. 8. Mixed refrigerant Compressor Train 16-MJ03/04 [3].

5.1.1. Défaut de balourd

Le défaut a été détecté au niveau du palier de premier compresseur par le capteur de vibration 16-VT-6601Y (fig 3. 9.)

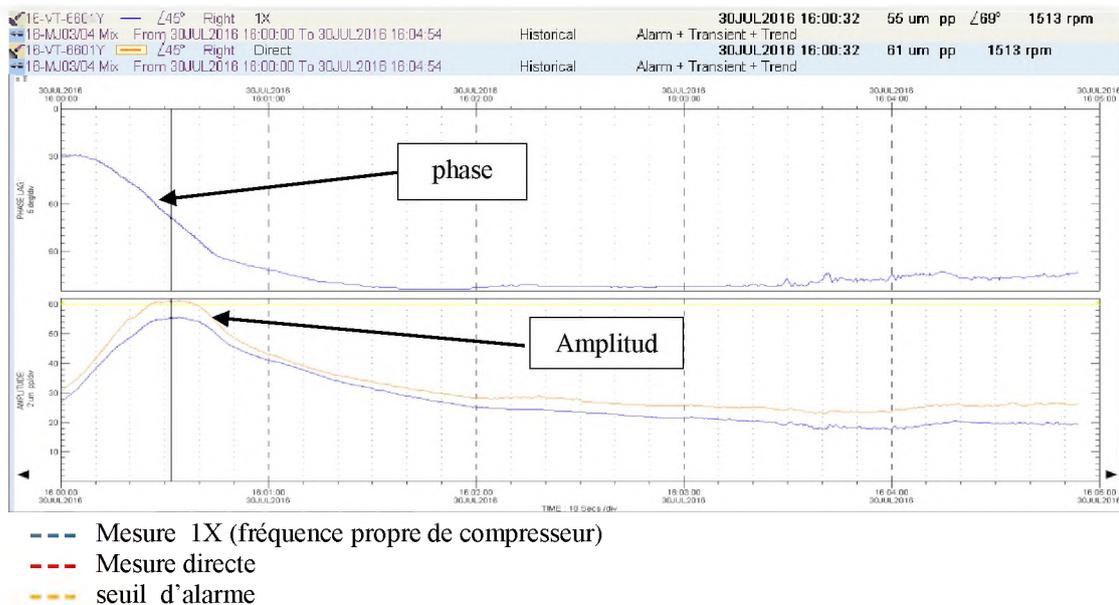


Fig 3. 9. Comportement vibratoire au cours de démarrage du compresseur [3].

✓ **Interprétation**

Le démarrage des machines tournantes passe toujours par un point de résonance qui dure quelque milliseconde avec un changement de déphasage.

Un défaut de balourd a été détecté au niveau du palier du premier compresseur par le capteur de vibration 16-VT-6601Y, lors d'un dépassement de seuil d'alarme à 1513rpm.

Mesure direct = 62µm pp.

Mesure 1X = 55 µm pp.

5.2. Défauts -off line-

Les défauts hors ligne traités concernent le balourd et le défaut de roulement respectivement de la pompe 17-MJ-07-A de l'unité 17 et du moteur électrique 16-MJ-04-MJ07-A-M de l'unité 16.

5.2.1. Défaut de balourd -Cas de la pompe 17-MJ-07-A-

- **Fiche technique**

| | |
|--------------------------------|----------------------------|
| Numéro d'équipement | 17-MJ-07-A |
| Le fluide | Butane |
| Débit moyenne d'écoulement | 93 m³ /h |
| Pression maximal de service | 50 bar |
| Température maximal de service | 45.6 c⁰ |
| Hauteur total | 23 m |
| NPSH | 3.6 m |
| Fréquence de rotation | 50 HZ / 3000 rpm |
| Puissance d'absorbation | 29 kw |
| Poids | 1600 kg |



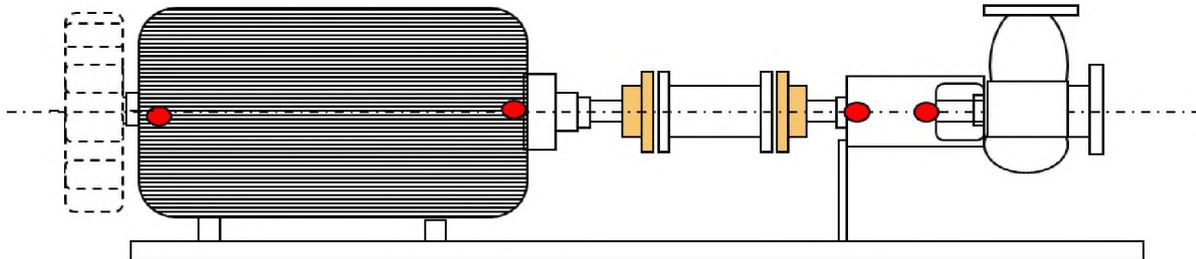
Fig 3. 10. Pompe centrifuge 17-MJ-07- A

- **Etude du système pompe**

C'est une Pompe de Reflux du Débutaniseur de type centrifuge au sommet de la colonne de séparation de C 4 et C 5.

On a un système motopompe, une pompe centrifuge entraîné par un moteur électrique avec un couplage rigide. La vitesse de rotation de la pompe égale à la vitesse de rotation du moteur électrique.

Les points rouges indiquent les points de mesure.



➤ Mesure global

La figure 3.11 représente le relevé du niveau global effectué sur la pompe uniquement.



Fig 3. 11. Mesure de niveau global vertical et horizontal

✓ Interprétation

On remarque que le seuil d'alarme indiqué de la pompe égale à 8.1mm/s. La mesure globale donne les valeurs suivantes :

- **En vertical** égale presque 7.2 mm/s
- **En l'horizontal** égale presque 4.5mm/s

Ces valeurs signifient que la pompe est en risque de dépassement du seuil d'alarme (risque de défaillance), mais on ne connaît pas quelle est sa nature : Il faut faire une analyse spectrale.

➤ **Mesure spectrale :**

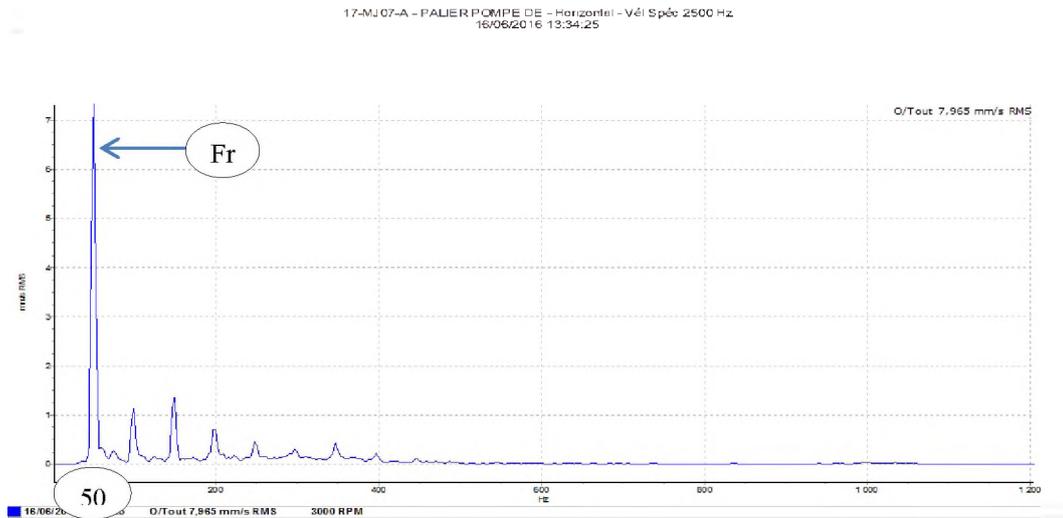


Fig 3. 12. Spectre de défaut de balourd vertical

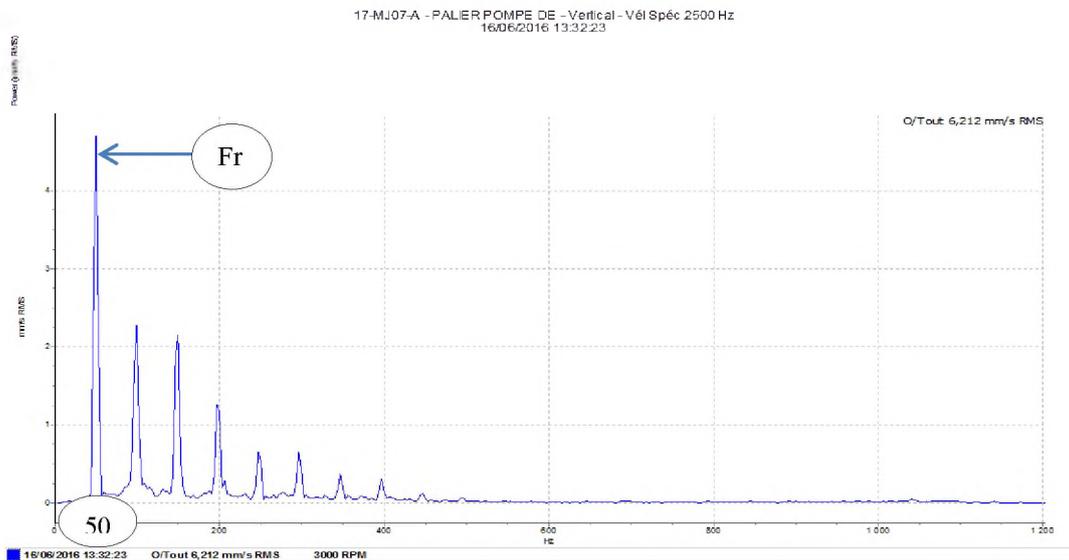


Fig 3. 13. Spectre de défaut de balourd horizontal

Fig. spectre de défaut de balourd Horizontal

✓ **Interprétation**

Les spectres suivants nous donnent le comportement vibratoire de la pompe en forme de pics. On remarque que à une fois la fréquence de rotation (1x rpm) de la pompe, nous avons une augmentation de pic

- **En vertical** égal à (7.965mm/s rms)
- **En horizontal** égal à (4.5mm/s rms)

On peut diagnostiquer qu'il y`a un **défaut de Balourd**.

• **Le comportement de la pompe après l'intervention**

➤ **Mesure global**

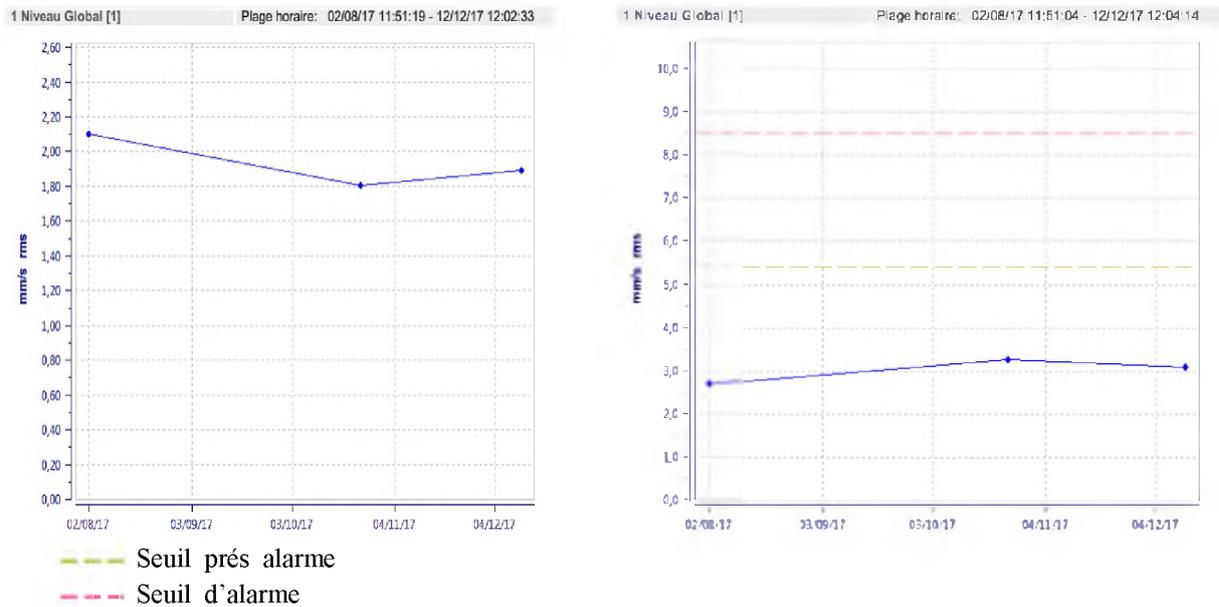


Fig 3. 14. Niveau globale vertical et horizontal après l'intervention

✓ **Interprétation**

- **En vertical**, on remarque que le niveau des vibrations a diminué à presque 2.10 mm/s rms au 02/08/17 et jusqu'à 1.70mm/s (rms) au 04/12/17 : Donc les vibrations sont **bonnes**.
- **En horizontal**, on remarque que le niveau des vibrations a diminué à presque 2.80 mm/s rms au 02/08/17 et il a augmenté légèrement la valeur de 3mm/s rms au 04/12/17 : Donc les vibrations sont **bonnes**.

➤ **Mesure spectral**

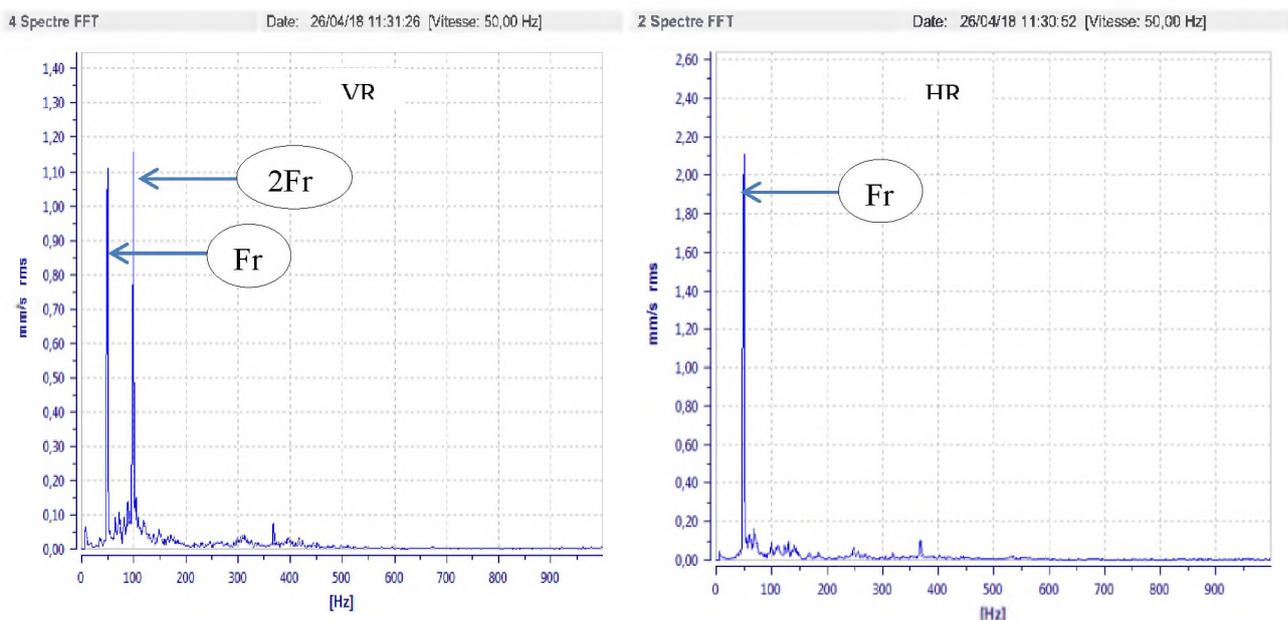


Fig 3. 15. Niveau spectral vertical et horizontal après l'intervention

✓ **Interprétation**

- **En vertical** : On remarque que la valeur de pic en (1Fr) égal à 1.10mm/s rms, indique l'existence d'un balourd admissible. (2Fr) égal à 1.1mm/s rms, indique l'existence d'un désalignement admissible.
- **En horizontal** : On remarque que la valeur de pic en (1Fr) égale à 2.10 mm/s rms, indique l'existence d'un balourd admissible.

5.2.2. Défaut de roulement (Cas du moteur électrique -16-MJ-04-MJ07-A-M-

C'est un moteur électrique qui a le rôle du refroidissement du corps de la turbine.

- **Fiche technique**

| | |
|--------------------------|--------------------------|
| Numéro d'équipement | 16-MJ-04-MJ07-A-M |
| Température ambiante | +47 |
| Vitesse de rotation | 3000tr/min |
| Fréquence | 50 hz |
| puissance | 75kw |
| Tension | 400V |
| Intensité | 128A |
| Déphasage $\cos \varphi$ | 0.90 |
| Type de roulement | 6316/c3 |



Fig 3. 16. Moteur électrique 16-MJ-04-MJ07-A-M

- **La cinématique du moteur**

Côté accouplé avec la turbine

| | Ref. Palier | 6316 |
|--|--------------------|--------------------|
| Désignation | | Fréq. en HZ |
| Fréquence Défaut Bague Intérieur | | <i>14742</i> |
| Fréquence Défaut Bague Extérieur | | <i>9258</i> |
| Fréquence Défaut Élément Roulant (bille) | | <i>6219</i> |
| Vitesse rotation bague intérieur | | <i>50</i> |
| Fréquence Défaut du cage | | <i>1158</i> |

➤ **Mesure global**

Le service technique d'inspection est en cours d'enregistrer toutes les machines tournantes dans le système afin de programmer les prés alarmes et les alarmes.

Le moteur électrique 16-MJ-04-MJ07-A-M est parmi les machines hors route, donc son niveau global est repéré avec les tableaux de normalisation suivants :

Seuils d'alarme en accélération (g crête) pour les paramètres hautes fréquences

| Vitesse | 300 RPM | | 1000 RPM | | 2000 RPM | | 4000 RPM | |
|-----------------------------|---------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| Diamètre de l'arbre en [mm] | Alerte | Alerte | Alerte | Alerte | Alerte | Alerte | Alerte | Alerte |
| Ø25 | 0.06 | 0.21 | 0.35 | 1.1 | 0.77 | 2.5 | 2.1 | 6.6 |
| Ø100 | 0.17 | 0.5 | 0.9 | 2.8 | 2.1 | 6.4 | 5.6 | 17 |
| Ø200 | 0.3 | 0.9 | 1.6 | 5.0 | 3.4 | 10.0 | 8.8 | 27 |
| Ø400 | 0.45 | 1.4 | 2.4 | 7.6 | 5.1 | 15.6 | 13.8 | 42 |

Fig 3. 17. Seuils d'accélération[4]

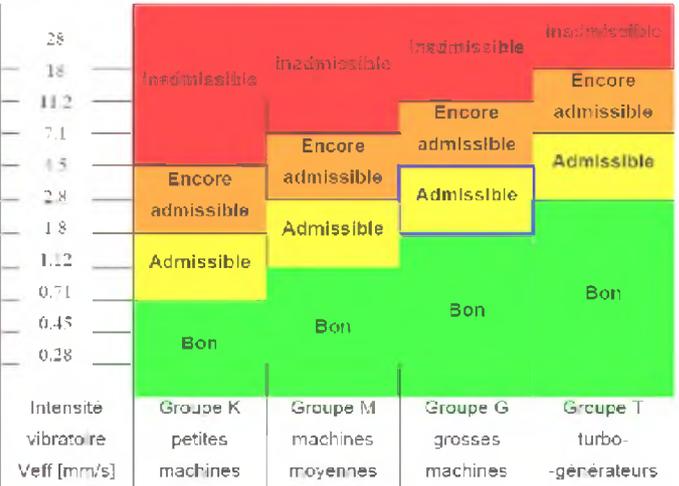


Fig 3. 18. Seuils de vitesse [4]

➤ **Mesure spectral**

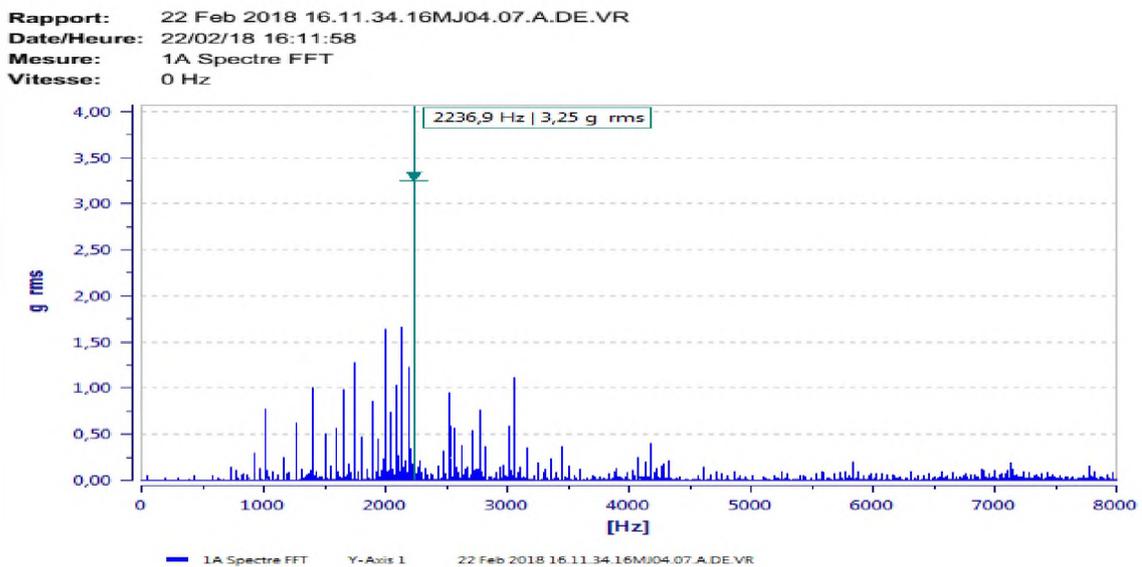


Fig 3. 19. Spectre de défaut de roulement vertical

Rapport: 22 Feb 2018 16.08.57.16MJ04.07M.DE.HR
Date/Heure: 22/02/18 16:09:54
Mesure: 1A Spectre FFT
Vitesse: 0 Hz

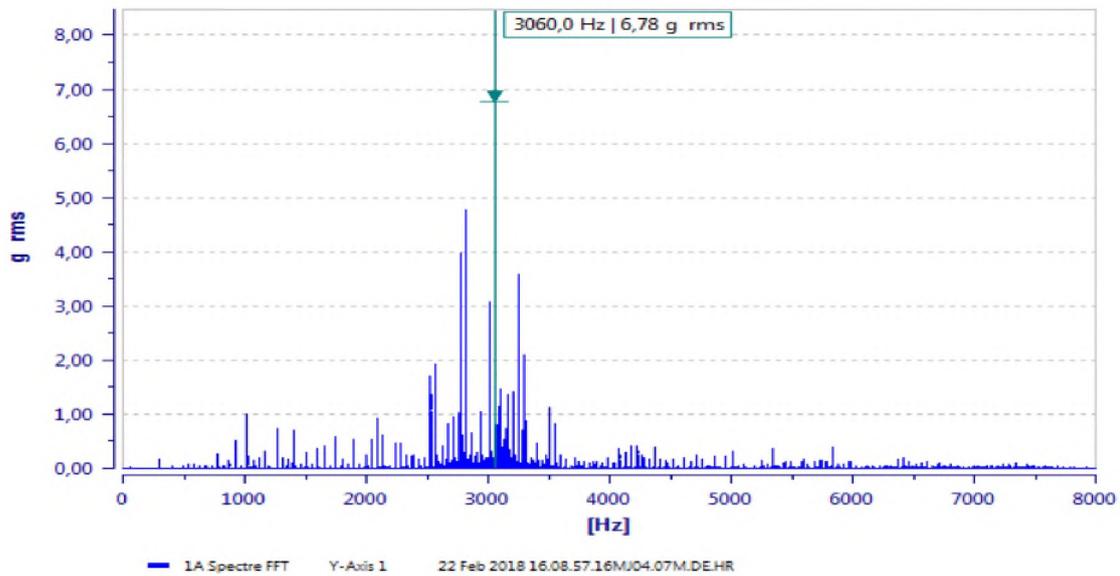


Fig 3. 20. Spectre de défaut de roulement horizontal

✓ **Interprétation**

Les spectres ci-dessus nous donnent le comportement vibratoire du moteur électrique en forme des pics. On remarque que nous avons une augmentation des pics à la haute fréquence.

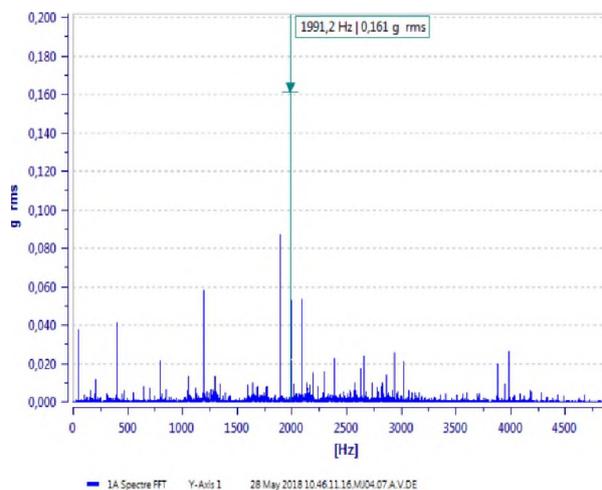
- **En vertical** : la plus grande valeur égale à 3.25 g rms.
- **En horizontal** : la plus grande valeur égale à 6.78g rms

Donc, ils signifient qu'il y'a un **défaut de roulement**.

- **Le comportement de Moteur électrique après l'intervention**

➤ **Mesure spectral**

Rapport: 28 May 2018 10.46.11.16.MJ04.07.A.V.DE
Date/Heure: 28/05/18 10:46:33
Mesure: 1A Spectre FFT
Vitesse: 0 Hz



Rapport: 28 May 2018 10.43.14.16MJ04.07.A.H.DE
Date/Heure: 28/05/18 10:43:39
Mesure: 1A Spectre FFT
Vitesse: 0 Hz

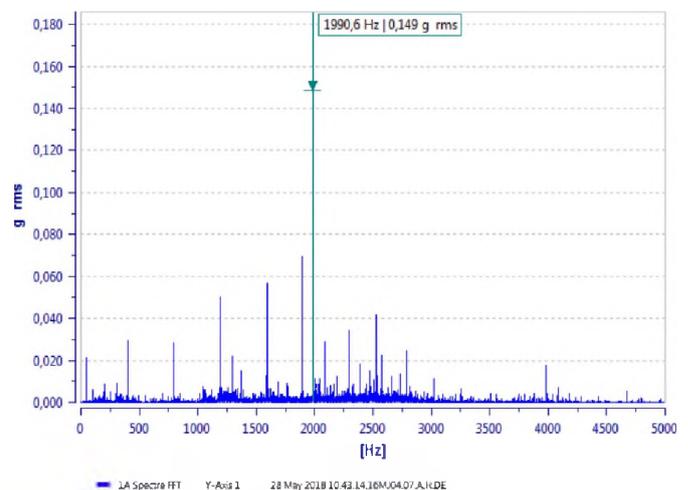


Fig 3. 21. Niveau spectral vertical et horizontal après l'intervention

✓ **Interprétation**

Le service de la maintenance a décidé de changer le moteur complètement, parce que le changement de roulement va prendre un temps d'arrêt qui est inacceptable pour laisser le refroidissement de la turbine fonctionner avec un seul moteur.

- **En vertical** : on remarque une diminution des vibrations jusqu'à (0.161g rms)
- **En horizontal** : on remarque une diminution des vibrations jusqu'à (0.149g rms)

Donc, il n'y'a plus de défauts de roulement.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la partie pratique de la surveillance des machines tournantes au sein du département maintenance du complexe GL3/Z de Sonatrach Arzew. A travers cette partie, nous avons pu acquérir de nouvelles compétences et connaissances sur l'analyse vibratoire, plus particulièrement sur la technique d'analyse spectrale.

De même nous avons pu consulté et analyser l'historique des défaillances tout en abordant les deux types de surveillance, on line et off line, et relever les défauts des différentes machines.

Enfin, ce chapitre nous est d'une grande importance car il nous a faciliter l'étude de l'équilibrage et du balourd effectuée au dernier chapitre. Son importance aussi est qu'il a complété notre parcours de formation.

Références bibliographiques du chapitre 3

- [1] Documentation SONATRACH .
- [2] <https://www.gemeasurement.com/condition-monitoring-and-protection/software/system-1r-condition-monitoring-and-diagnostics-software-platform> .
- [3] capture d'écran , Sonatrach , Departement Maintenance , Service prédictive, logiciel system 1 , avril 2018.
- [4] Manuel d'instruction ,Report & ROute Manager ,Collecteur de données & Base de données ,Logiciel d'analyse & de rapports, VIBROPORT 80, Bruel & kjaer Vibro.
- [5] capture d'écran , Sonatrach , Departement Maintenance , Service prédictive, des machines suivis -off line-, avril 2018.

Chapitre 4 :

Réalisation d'un banc d'essai d'équilibrage

1. Introduction

Le défaut de balourd est l'un des défauts les plus fréquents dans l'industrie. Après chaque révision générale sur une machine tournante, l'équilibrage dynamique de l'arbre de rotation doit impérativement être réalisé.

On a réalisé un banc d'essai d'équilibrage dynamique à l'atelier de mécanique de L'IMSI (Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle), (Fig.4.1) et (Fig.4.2). L'utilisation de ce banc d'essai servira à corriger les défauts de balourd créés. Le matériel utilisé : appareil de mesure, moteur électrique ainsi que l'ensemble des pièces nécessaires sont lister au tableau 4.1.

2. Réalisation du banc d'essai

2.1. Objectif

Application des différentes charges sur l'arbre de rotation du moteur afin de créer un défaut de balourd, qui peut être de nature différentes, ensuite la détection du défaut par analyse vibratoire et la correction par un équilibrage dynamique.

2.2. Matériels utilisés

2.2.1. Description et caractéristiques

| N° | Description | Caractéristique |
|----|----------------------------------|---|
| 1 | Meule d'établi | Rondy Rdy 200/FG, moteur électrique 230V-50Hz-250W, arbre Ø 20 mm (* plan1), arbre Ø 12 mm (** plan2) |
| 2 | Equipment de mesure de vibration | Micro Vibe P CMVL 3850 SKF, capteur CMSS381111 |
| 3 | Balance électronique | 500 g x 0.1 g |
| 4 | Disque en acier | Ø _{ext} = 72.4mm, Ø _{int} = 12mm, Masse = 178.8g |
| 5 | Roue en plastique percée | Ø _{ext} = 70 mm, Ø _{int} = 20 mm, Masse = 26.8g |
| 6 | Ventilateur à 9 pales | Ø _{ext} = 82 mm, Ø _{int} = 12mm, Masse = 13.9 |
| 7 | Boulon | M4x 14 (Vis = 1.5g, Erou = 0.8g) |
| 8 | Boulon | M5x 9.5 (Vis = 2,1g, Erou = 1.1g) |
| 9 | Goupille | Ø 5 mm, Masse = 1.9g |
| 10 | Rondelle | Ø 12,5mm, Masse = 5.1 g |
| 11 | Erou | M 12mm, Masse = 12.8g |

Tableau 4.1 : Caractéristiques du matériel utilisé

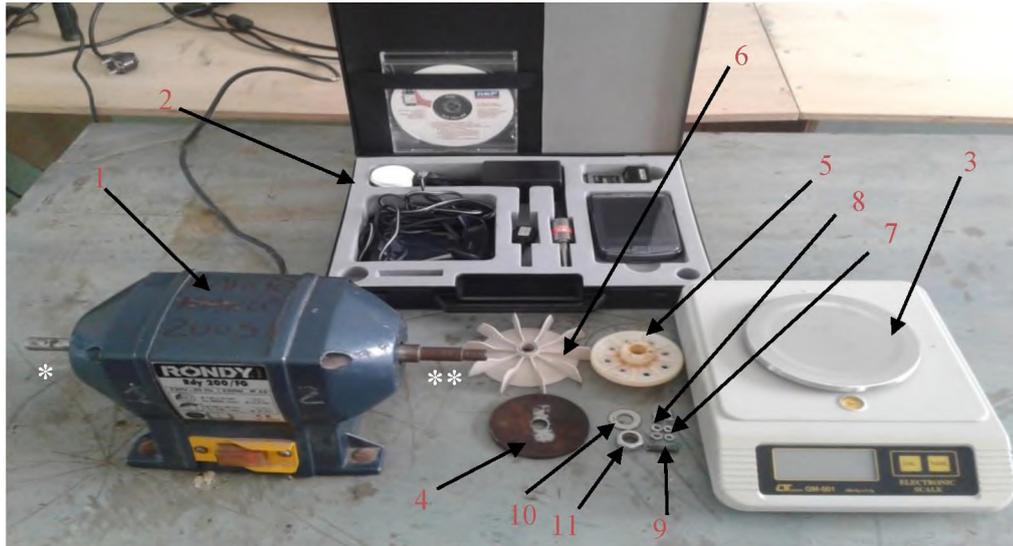
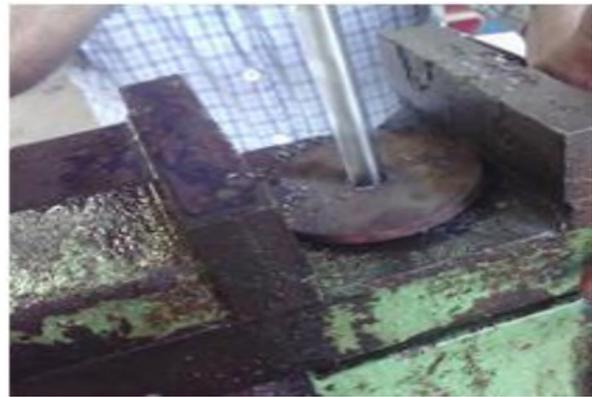


Fig. 4.1 : Matériels utilisés au laboratoire



a) Perçage périphérique de la roue plastique



b) perçage centrale du disque acier

Fig. 4.2 : Perçage des pièces

2.2.2. Appareil de mesure (Micro Vibe P CMVL 3850 SKF)

C'est un appareil de mesure vibratoire utilisé pour la détection des différents défauts manifestés dans les machines tournantes. Il permet de mesurer le niveau global et donne le niveau de criticité des vibrations ainsi que le niveau spectral en forme d'un spectre. L'appareil donne les cinq premières valeurs détectées. La prise des valeurs, est assurée par un accéléromètre (CMSS381111) branché avec l'analyseur (Fig.4.3). Ce capteur ponctuel permet la prise de mesure sur les structures non ferromagnétiques.



a) Niveau global (Vertical)

b) Analyse spectrale (Horizontal)

Fig. 4.3 : Mesure des vibrations avec Micro Vibe P CMVL 3850 SKF

3. Essais d'équilibrage

3.1. Essais à vide

L'objectif de l'essai est de voir l'état de l'arbre du moteur électrique à vide (sans charge), de la meule, (Fig.4.4), en deux plans mesurer les valeurs Niveau Globale et Analyses Spectrales. Ces mesures sont présentées au tableau. 4.2et 4.3 respectivement.

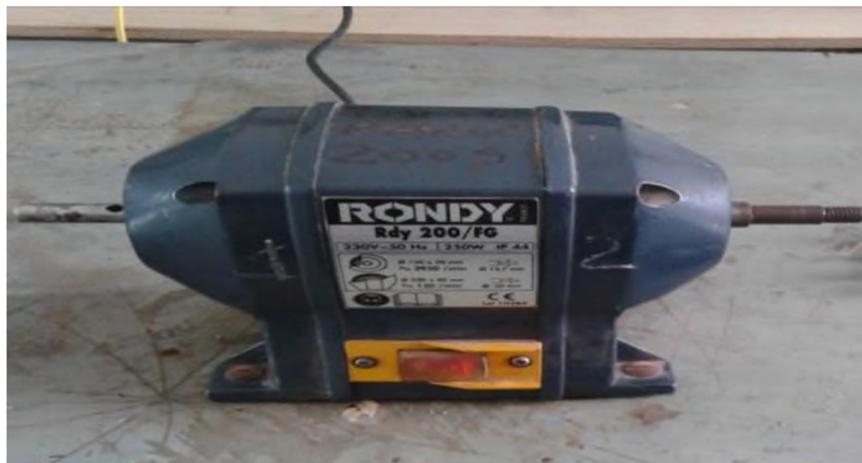


Fig. 4.4 : Essai à vid

3.1.1. Plan 1

| Mesures Niveau Global | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|-----------|--------|------|----------|-------|---------|---------|----------|--------|--|-----------|-----------|--------|-------|----------|---------|---------|---------|---------|---|--|-----------|-----------|--------|-------|----------|-------|---------|----------|---------|--------|-------|--------|-----|-------|-----|---------|-------|-------|-------|---|--|-----|------|----|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|--------|-----|-------|-----|---------|-------|-------|-------|
| Vertical | Horizontal | Axial | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>MicroVibe P Rec. No. : 43 Duration : 0.1s</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>RMS</th> <th>PEAK</th> <th>CF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A [G]</td> <td>0.054</td> <td>0.214</td> <td>3.950</td> </tr> <tr> <td>V [mm/s]</td> <td>0.744</td> <td>1.607</td> <td>2.161</td> </tr> <tr> <td>D [um]</td> <td>---</td> <td>4.996</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>E3 [GE]</td> <td>0.058</td> <td>0.136</td> <td>2.333</td> </tr> </tbody> </table> <p>Buttons: Start, Save, Judge, Menu</p> | | RMS | PEAK | CF | A [G] | 0.054 | 0.214 | 3.950 | V [mm/s] | 0.744 | 1.607 | 2.161 | D [um] | --- | 4.996 | --- | E3 [GE] | 0.058 | 0.136 | 2.333 | <p>MicroVibe P Rec. No. : 44 Duration : 0.1s</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>RMS</th> <th>PEAK</th> <th>CF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A [G]</td> <td>0.219</td> <td>0.587</td> <td>2.687</td> </tr> <tr> <td>V [mm/s]</td> <td>2.537</td> <td>4.672</td> <td>1.842</td> </tr> <tr> <td>D [um]</td> <td>---</td> <td>17.50</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>E3 [GE]</td> <td>0.194</td> <td>0.342</td> <td>1.763</td> </tr> </tbody> </table> <p>Buttons: Start, Save, Judge, Menu</p> | | RMS | PEAK | CF | A [G] | 0.219 | 0.587 | 2.687 | V [mm/s] | 2.537 | 4.672 | 1.842 | D [um] | --- | 17.50 | --- | E3 [GE] | 0.194 | 0.342 | 1.763 | <p>MicroVibe P Rec. No. : 45 Duration : 0.1s</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>RMS</th> <th>PEAK</th> <th>CF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A [G]</td> <td>0.081</td> <td>0.225</td> <td>2.782</td> </tr> <tr> <td>V [mm/s]</td> <td>0.554</td> <td>1.335</td> <td>2.408</td> </tr> <tr> <td>D [um]</td> <td>---</td> <td>3.814</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>E3 [GE]</td> <td>0.071</td> <td>0.175</td> <td>2.482</td> </tr> </tbody> </table> <p>Buttons: Start, Save, Judge, Menu</p> | | RMS | PEAK | CF | A [G] | 0.081 | 0.225 | 2.782 | V [mm/s] | 0.554 | 1.335 | 2.408 | D [um] | --- | 3.814 | --- | E3 [GE] | 0.071 | 0.175 | 2.482 |
| | RMS | PEAK | CF | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A [G] | 0.054 | 0.214 | 3.950 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V [mm/s] | 0.744 | 1.607 | 2.161 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D [um] | --- | 4.996 | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E3 [GE] | 0.058 | 0.136 | 2.333 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | RMS | PEAK | CF | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A [G] | 0.219 | 0.587 | 2.687 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V [mm/s] | 2.537 | 4.672 | 1.842 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D [um] | --- | 17.50 | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E3 [GE] | 0.194 | 0.342 | 1.763 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | RMS | PEAK | CF | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A [G] | 0.081 | 0.225 | 2.782 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V [mm/s] | 0.554 | 1.335 | 2.408 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D [um] | --- | 3.814 | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E3 [GE] | 0.071 | 0.175 | 2.482 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>ISO Vibration Evaluation Measured Value 0.744 mm/s Vibration Severity Small machine</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>mm/s(RMS)</th> <th>Judgement</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-0.71</td> <td>Good</td> </tr> <tr> <td>0.71-1.8</td> <td>Fair</td> </tr> <tr> <td>1.8-4.5</td> <td>Caution</td> </tr> <tr> <td>over4.5</td> <td>Danger</td> </tr> </tbody> </table> <p>Button: OK</p> | mm/s(RMS) | Judgement | 0-0.71 | Good | 0.71-1.8 | Fair | 1.8-4.5 | Caution | over4.5 | Danger | <p>ISO Vibration Evaluation Measured Value 2.537 mm/s Vibration Severity Small machine</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>mm/s(RMS)</th> <th>Judgement</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-0.71</td> <td>Good</td> </tr> <tr> <td>0.71-1.8</td> <td>Fair</td> </tr> <tr> <td>1.8-4.5</td> <td>Caution</td> </tr> <tr> <td>over4.5</td> <td>Danger</td> </tr> </tbody> </table> <p>Button: OK</p> | mm/s(RMS) | Judgement | 0-0.71 | Good | 0.71-1.8 | Fair | 1.8-4.5 | Caution | over4.5 | Danger | <p>ISO Vibration Evaluation Measured Value 0.554 mm/s Vibration Severity Small machine</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>mm/s(RMS)</th> <th>Judgement</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-0.71</td> <td>Good</td> </tr> <tr> <td>0.71-1.8</td> <td>Fair</td> </tr> <tr> <td>1.8-4.5</td> <td>Caution</td> </tr> <tr> <td>over4.5</td> <td>Danger</td> </tr> </tbody> </table> <p>Button: OK</p> | mm/s(RMS) | Judgement | 0-0.71 | Good | 0.71-1.8 | Fair | 1.8-4.5 | Caution | over4.5 | Danger | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mm/s(RMS) | Judgement | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0-0.71 | Good | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.71-1.8 | Fair | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.8-4.5 | Caution | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| over4.5 | Danger | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mm/s(RMS) | Judgement | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0-0.71 | Good | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.71-1.8 | Fair | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.8-4.5 | Caution | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| over4.5 | Danger | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mm/s(RMS) | Judgement | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0-0.71 | Good | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.71-1.8 | Fair | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.8-4.5 | Caution | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| over4.5 | Danger | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tableau 4.2 : Mesures Niveau Globale à vide plan 1

✓ **Interprétation**

Sur le tableau 4.2 :

- **En vertical** : La valeur de mesure niveau global est 0.744mm/s rms, est en état « Acceptable ».
- **En horizontal** : La valeur de mesure niveau global est 2.537 mm/s rms, est en état « Alarme ».
- **En axial** : La valeur de mesure niveau global est 0.554 mm/s rms, est en état « Bon ».

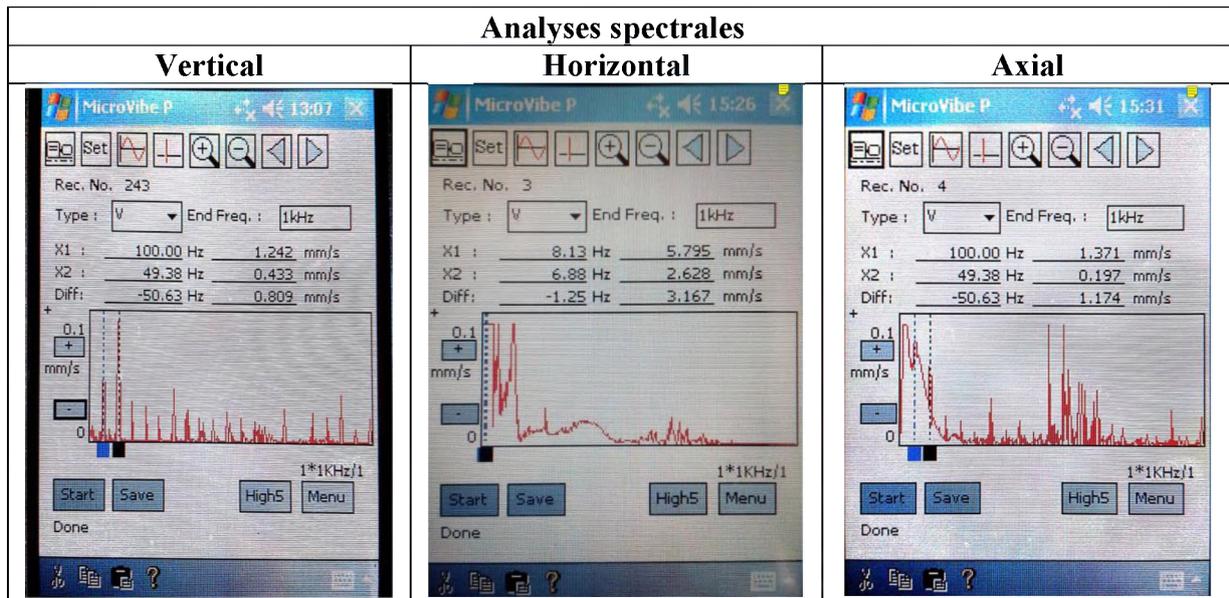


Tableau 4.3 : Analyses Spectrales à vide plan 1

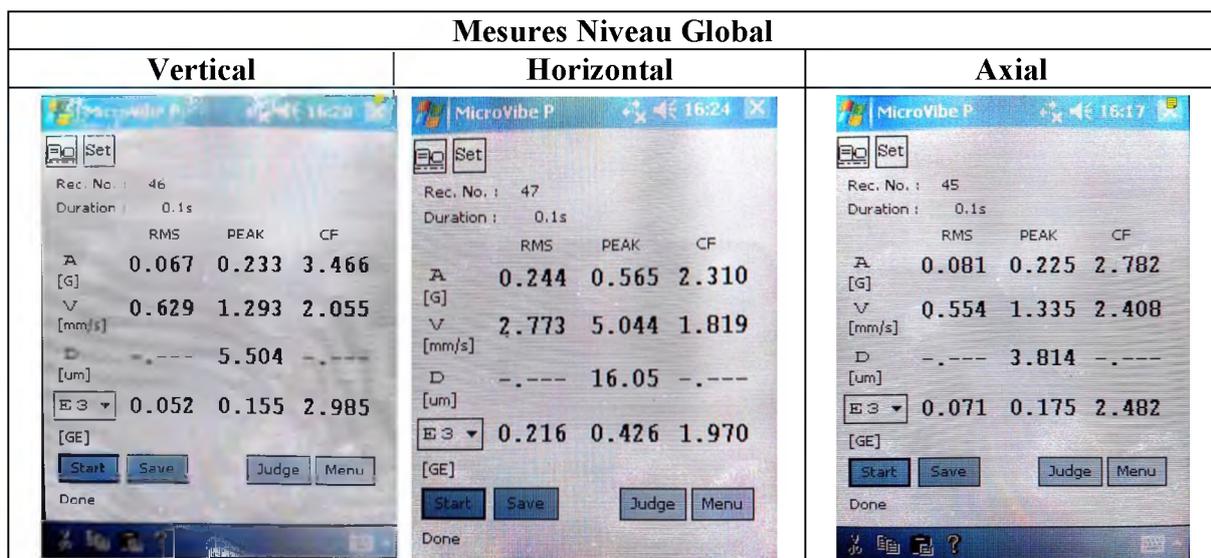
✓ **Interprétation**

A (49.38 Hz) 1 fois la fréquence de rotation (Tableau 4.3), on remarque que :

- **En vertical** : La valeur de pic est 0.433 mm/s, est en état « Bon ».
- **En horizontal** : La fréquence de rotation n'est pas détectée « pas de balourd ». Mais à 8,13Hz il y a un pic de 5,795mm/s : Il faut chercher la cause autre part.
- **En axial** : La valeur de pic est 0.197 mm/s, est en état « Bon ».

Au vu de ces deux analyses (Niveau Global et analyse spectrale), l'arbre du moteur est en état d'équilibre.

3.1.2. Plan2



| mm/s(RMS) | Judgement |
|-----------|-----------|
| 0-0.71 | Good |
| 0.71-1.8 | Fair |
| 1.8-4.5 | Caution |
| over4.5 | Danger |

Tableau 4.4 : Mesures Niveau globale à vide plan 2

✓ **Interprétation**

Sur le Tableau 4.4 :

- **En vertical** : La valeur de mesure niveau global est 0.629mm/s rms, est en état « Acceptable ».
- **En horizontal** : La valeur de mesure niveau global est 2.773 mm/s rms, est en état « Alarme ».
- **En axial** : La valeur de mesure niveau global est 0.554mm/s rms, est en état « Bon ».

| Analyses Spectrales | | |
|---------------------|------------|-------|
| Vertical | Horizontal | Axial |
| | | |

Tableau 4.5 : Analyses Spectrales à vide plan 2

✓ **Interprétation**

A (49.28 Hz), 1 fois la fréquence de rotation du moteur (Tableau 4.5) on remarque que :

- **En vertical** : La fréquence de rotation n'est pas détectée : Pas de balourd.
Mais à 8,75Hz il y a un pic de 2.886 mm/s : Il faut chercher la cause autre part.
- **En horizontal** : La fréquence de rotation n'est pas détectée : Pas de balourd.
Mais à 6.88Hz il y a un pic de 1.195 mm/s : Il faut chercher la cause autre part.
- **En axial** : La valeur de pic est 0.197 mm/s, est en état « Bon ».

Au vu de ces deux analyses (Niveau Global et analyse spectrale), l'arbre du moteur est en état d'équilibre.

3.2. Essai avec disque en acier

On a monté le disque en acier sur le plan 2, pour voir son effet sur l'arbre (Fig.4.5) et prendre les mesures des vibrations de Niveau Globale et Analyse Spectrale (Tableau 4.6), (Tableau 4.7) respectivement.



Fig. 4.5 : Montage du disque en acier sur le plan 2

| Mesures Niveau Global | | |
|-----------------------|------------|-------|
| Vertical | Horizontal | Axial |
| | | |

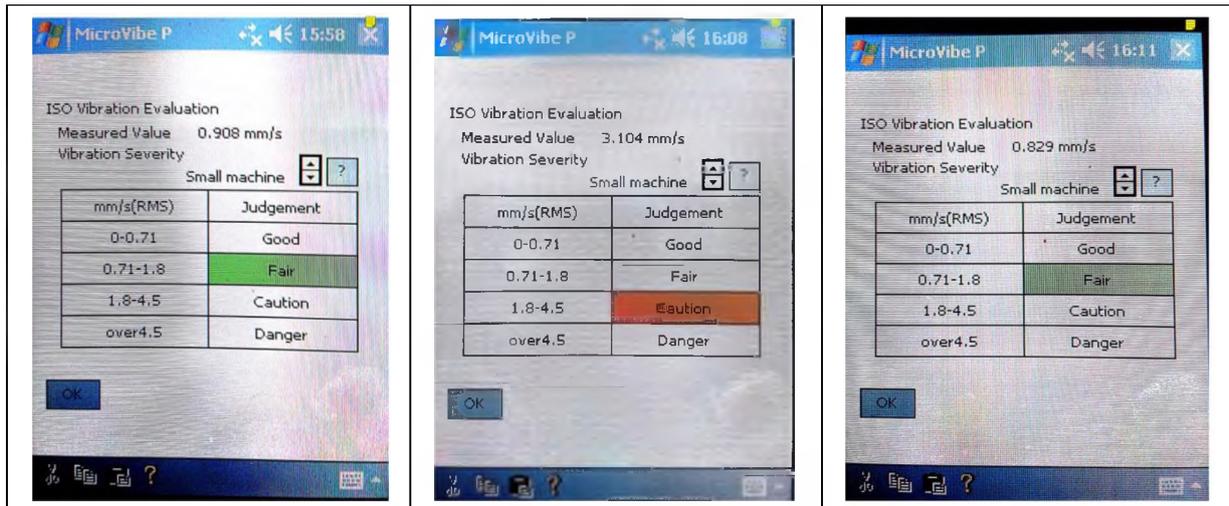


Tableau 4.6 : Mesures Niveau Globales avec disc en acier plan 2

✓ **Interprétation**

Sur le Tableau 4.6 :

- **En vertical** : La valeur de mesure niveau global est 0.908mm/s rms, est en état « Acceptable ».
- **En horizontal** : La valeur de mesure niveau global est 3.104 mm/s rms, est en état « Alarme ».
- **En axial** : La valeur de mesure niveau global est 0.829mm/s rms, est en état « Acceptable ».

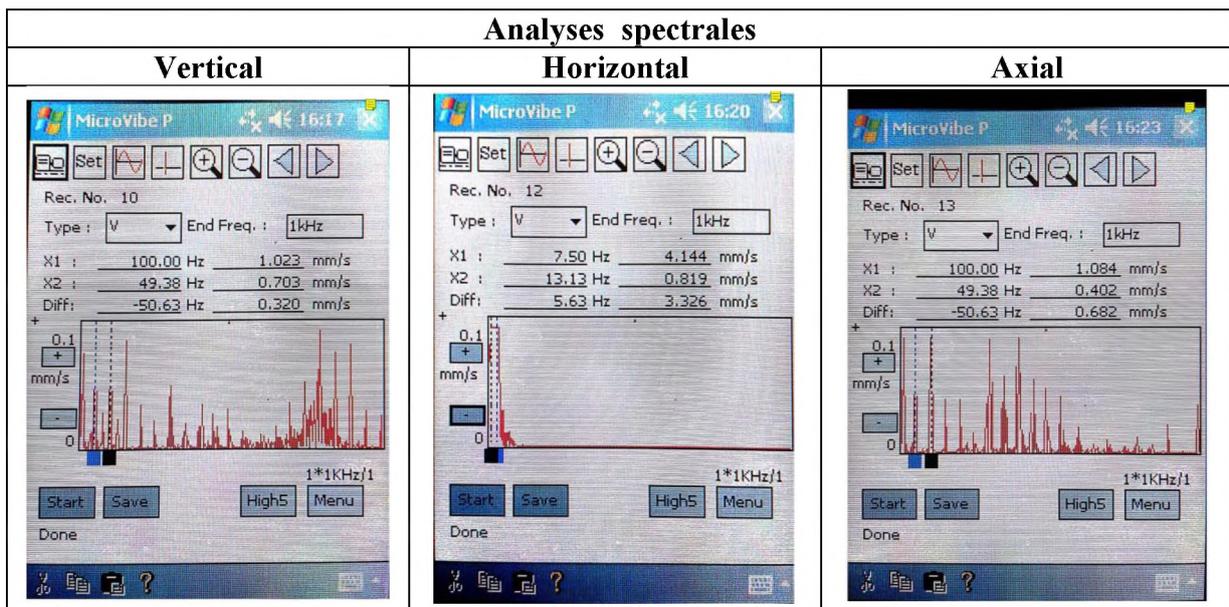


Tableau 4.7 : Analyses Spectrales avec disc en acier plan 2

✓ **Interprétation**

A(49.38Hz) 1 fois la fréquence de rotation du moteur (Tableau 4.7) on remarque que :

- **En vertical** : La valeur de pic est 0.703 mm/s, est en état « Bon ».
- **En horizontal** : La fréquence de rotation n'est pas détectée : Pas de balourd.
Mais à 7.50 Hz il y a un pic de 4,144mm/s : Il faut chercher la cause autre part.
- **En axial** : La valeur de pic est 0.402 mm/s, est en état « Bon ».

Dans ce cas, l'arbre du moteur est en état d'équilibre. En vertical il y a une apparition d'une amplitude vibratoire 0.703mm/s de l'effet de balourd par rapport à l'état du moteur à vide qui n'existait pas.

3.3. Essai avec ventilateur à 9 pales

On a monté le ventilateur à 9 pales sur le plan 2, pour voir son effet sur l'arbre(Fig.4.6) et prendre les mesures des vibrations de Niveau Globales et Analyses spectrales (Tableau 4.8), (Tableau 4.9).



Fig. 4.6 : Montage de ventilateur à sur le plan 2

| Mesures Niveau Global | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|-------|-------|----|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|--------|-----|-------|-----|----|-------|-------|-------|---|--|-----|------|----|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|--------|-----|-------|-----|----|-------|-------|-------|---|--|-----|------|----|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|--------|-----|-------|-----|----|-------|-------|-------|
| Vertical | Horizontal | Axial | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>MicroVibe P 11:38</p> <p>Rec. No. : 14 Duration : 0.1s</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>RMS</th> <th>PEAK</th> <th>CF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A [G]</td> <td>0.090</td> <td>0.216</td> <td>2.396</td> </tr> <tr> <td>V [mm/s]</td> <td>2.331</td> <td>3.728</td> <td>1.599</td> </tr> <tr> <td>D [um]</td> <td>---</td> <td>23.60</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>GE</td> <td>0.062</td> <td>0.164</td> <td>2.649</td> </tr> </tbody> </table> <p>Buttons: Start, Save, Judge, Menu</p> | | RMS | PEAK | CF | A [G] | 0.090 | 0.216 | 2.396 | V [mm/s] | 2.331 | 3.728 | 1.599 | D [um] | --- | 23.60 | --- | GE | 0.062 | 0.164 | 2.649 | <p>MicroVibe P 11:41</p> <p>Rec. No. : 15 Duration : 0.1s</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>RMS</th> <th>PEAK</th> <th>CF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A [G]</td> <td>0.156</td> <td>0.403</td> <td>2.582</td> </tr> <tr> <td>V [mm/s]</td> <td>2.342</td> <td>4.623</td> <td>1.974</td> </tr> <tr> <td>D [um]</td> <td>---</td> <td>21.54</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>GE</td> <td>0.130</td> <td>0.271</td> <td>2.086</td> </tr> </tbody> </table> <p>Buttons: Start, Save, Judge, Menu</p> | | RMS | PEAK | CF | A [G] | 0.156 | 0.403 | 2.582 | V [mm/s] | 2.342 | 4.623 | 1.974 | D [um] | --- | 21.54 | --- | GE | 0.130 | 0.271 | 2.086 | <p>MicroVibe P 11:45</p> <p>Rec. No. : 16 Duration : 0.1s</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>RMS</th> <th>PEAK</th> <th>CF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A [G]</td> <td>0.110</td> <td>0.376</td> <td>3.432</td> </tr> <tr> <td>V [mm/s]</td> <td>0.613</td> <td>1.259</td> <td>2.055</td> </tr> <tr> <td>D [um]</td> <td>---</td> <td>2.729</td> <td>---</td> </tr> <tr> <td>GE</td> <td>0.140</td> <td>0.305</td> <td>2.187</td> </tr> </tbody> </table> <p>Buttons: Start, Save, Judge, Menu</p> | | RMS | PEAK | CF | A [G] | 0.110 | 0.376 | 3.432 | V [mm/s] | 0.613 | 1.259 | 2.055 | D [um] | --- | 2.729 | --- | GE | 0.140 | 0.305 | 2.187 |
| | RMS | PEAK | CF | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A [G] | 0.090 | 0.216 | 2.396 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V [mm/s] | 2.331 | 3.728 | 1.599 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D [um] | --- | 23.60 | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| GE | 0.062 | 0.164 | 2.649 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | RMS | PEAK | CF | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A [G] | 0.156 | 0.403 | 2.582 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V [mm/s] | 2.342 | 4.623 | 1.974 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D [um] | --- | 21.54 | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| GE | 0.130 | 0.271 | 2.086 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | RMS | PEAK | CF | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A [G] | 0.110 | 0.376 | 3.432 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| V [mm/s] | 0.613 | 1.259 | 2.055 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D [um] | --- | 2.729 | --- | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| GE | 0.140 | 0.305 | 2.187 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| mm/s(RMS) | Judgement |
|-----------|-----------|
| 0-0.71 | Good |
| 0.71-1.8 | Fair |
| 1.8-4.5 | Caution |
| over4.5 | Danger |

Tableau 4.8 : Mesures Niveau Globales de ventilateur plan 2

✓ **Interprétation**

Sur le Tableau 4.8 :

- **En vertical** : La valeur de mesure niveau global est 2.331 mm/s rms, est en état « Alarme ».
- **En horizontal** : La valeur de mesure niveau global est 2.342 mm/s rms, est en état « Alarme ».
- **En axial** : La valeur de mesure niveau global est 0.613mm/s rms, est en état « Bon ».

| Analyses spectrales | | |
|---------------------|------------|-------|
| Vertical | Horizontal | Axial |
| | | |

Tableau 4.9 : Analyses spectrales de ventilateur plan 2

✓ **Interprétation**

A (49.38 Hz), 1 fois la fréquence de rotation (Tableau 4.9), on remarque que :

- **En vertical** : La valeur de pic est 1.592 mm/s, le balourd est en état « Acceptable », mais à surveiller.
- **En horizontal** : La valeur de pic est 2.202 le balourd est en état « Alarme ».
- **En axial** : La valeur de pic est 0.171 mm/s le balourd est en état « Bon ».

Dans ce cas, l'arbre du moteur est en état de déséquilibre. Pour le cas similaire aux sites industriels l'équipement doit être arrêté pour subir à une intervention d'équilibrage afin d'éviter l'endommagement de l'arbre de rotation.

3.3. Essai avec roue en plastique

On a monté la roue en plastique sur le plan 1, pour voir son effet sur l'arbre (Fig.4.7) et prendre les mesures des vibratoires de Niveau Globales et Analyse spectrales (Tableau 4.10), (Tableau 4.11).



Fig. 4.7 : Montage de la roue sur le plan 1

| Mesures Niveau Global | | |
|-----------------------|------------|-------|
| Vertical | Horizontal | Axial |
| | | |

| mm/s(RMS) | Judgement |
|-----------|-----------|
| 0-0.71 | Good |
| 0.71-1.8 | Fair |
| 1.8-4.5 | Caution |
| over4.5 | Danger |

Tableau 4.10 : Mesures Niveau Globales de roue plan 2

✓ **Interprétation**

Sur le Tableau 4.10 :

- **En vertical** : La valeur de mesure niveau global est 1.192 mm/s rms, est en état « Acceptable ».
- **En horizontal** : La valeur de mesure niveau global est 2.012 mm/s rms, est en état « Alarme ».
- **En axial** : La valeur de mesure niveau global est 0.720mm/s rms, est en état « Acceptable ».

| Analyses Spectrales | | |
|---------------------|------------|-------|
| Vertical | Horizontal | Axial |
| | | |

Tableau 4.11 : Analyses Spectrales de roue plan 2

- ✓ **Interprétation A** (49.38 Hz), 1 fois la fréquence de rotation (Tableau 4.11), on remarque que :
- **En vertical** : La valeur de pic est 0.602 mm/s, est en état « Bon ».
 - **En horizontal** : La valeur de pic est 0.962mm/s, est en état « Acceptable ».
 - **En axial** : La valeur de pic est 0.243 mm/s, est en état « Bon ».

Dans ce cas, l'arbre du moteur est en état d'équilibre malgré qu'il existe un effet de balourd naissant, mais c'est acceptable.

4. Equilibrage dynamique

Dans cette partie, en premier lieu on a simulé le travail d'équilibrage sur site, utilisé dans les sites industriels à l'aide d'appareil de mesure portatif. En second lieu, pour la correction finale, on a utilisé une application Android « Vibra ToolBox », téléchargée gratuitement sur Play store.

4.1. Création de balourd (1^{er} essai)

On a repris la roue en plastique, dont le balourd était diagnostiqué acceptable à la section 4.4.

On a créé l'effet de balourd par l'ajout de masses en forme de boulons fixés sur la roue. Plus précisément on a ajouté une masse de 3.2 g (boulon N° 8) à 0 degré repéré (Fig. 4.8).



Fig. 4.8 : Création de balourd 1^{er} essai plan 1

| Mesures Niveau Global | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|-----------|--------|------|----------|------|---------|---------|---------|--------|--|-----------|-----------|--------|------|----------|------|---------|---------|---------|--------|--|-----------|-----------|--------|------|----------|------|---------|---------|---------|--------|
| Vertical | Horizontal | Axial | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>ISO Vibration Evaluation</p> <p>Measured Value 1.427 mm/s</p> <p>Vibration Severity Small machine</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>mm/s(RMS)</th> <th>Judgement</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-0.71</td> <td>Good</td> </tr> <tr> <td>0.71-1.8</td> <td>Fair</td> </tr> <tr> <td>1.8-4.5</td> <td>Caution</td> </tr> <tr> <td>over4.5</td> <td>Danger</td> </tr> </tbody> </table> | mm/s(RMS) | Judgement | 0-0.71 | Good | 0.71-1.8 | Fair | 1.8-4.5 | Caution | over4.5 | Danger | <p>ISO Vibration Evaluation</p> <p>Measured Value 1.871 mm/s</p> <p>Vibration Severity Small machine</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>mm/s(RMS)</th> <th>Judgement</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-0.71</td> <td>Good</td> </tr> <tr> <td>0.71-1.8</td> <td>Fair</td> </tr> <tr> <td>1.8-4.5</td> <td>Caution</td> </tr> <tr> <td>over4.5</td> <td>Danger</td> </tr> </tbody> </table> | mm/s(RMS) | Judgement | 0-0.71 | Good | 0.71-1.8 | Fair | 1.8-4.5 | Caution | over4.5 | Danger | <p>ISO Vibration Evaluation</p> <p>Measured Value 0.855 mm/s</p> <p>Vibration Severity Small machine</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>mm/s(RMS)</th> <th>Judgement</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-0.71</td> <td>Good</td> </tr> <tr> <td>0.71-1.8</td> <td>Fair</td> </tr> <tr> <td>1.8-4.5</td> <td>Caution</td> </tr> <tr> <td>over4.5</td> <td>Danger</td> </tr> </tbody> </table> | mm/s(RMS) | Judgement | 0-0.71 | Good | 0.71-1.8 | Fair | 1.8-4.5 | Caution | over4.5 | Danger |
| mm/s(RMS) | Judgement | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0-0.71 | Good | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.71-1.8 | Fair | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.8-4.5 | Caution | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| over4.5 | Danger | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mm/s(RMS) | Judgement | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0-0.71 | Good | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.71-1.8 | Fair | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.8-4.5 | Caution | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| over4.5 | Danger | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mm/s(RMS) | Judgement | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0-0.71 | Good | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.71-1.8 | Fair | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.8-4.5 | Caution | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| over4.5 | Danger | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tableau 4.12 : Mesures Niveau Global après création de balourd (essai 1) plan 1

✓ **Interprétation**

Sur le Tableau 4.12 :

- **En vertical** : La valeur de mesure global est 1.427 mm/s rms, est en état « Acceptable ».
- **En horizontal** : La valeur de mesure global est 1.871 mm/s rms, est en état « Alarme ».
- **En axial** : La valeur de mesure global est 0.855 mm/s rms, est en état « Acceptable ».

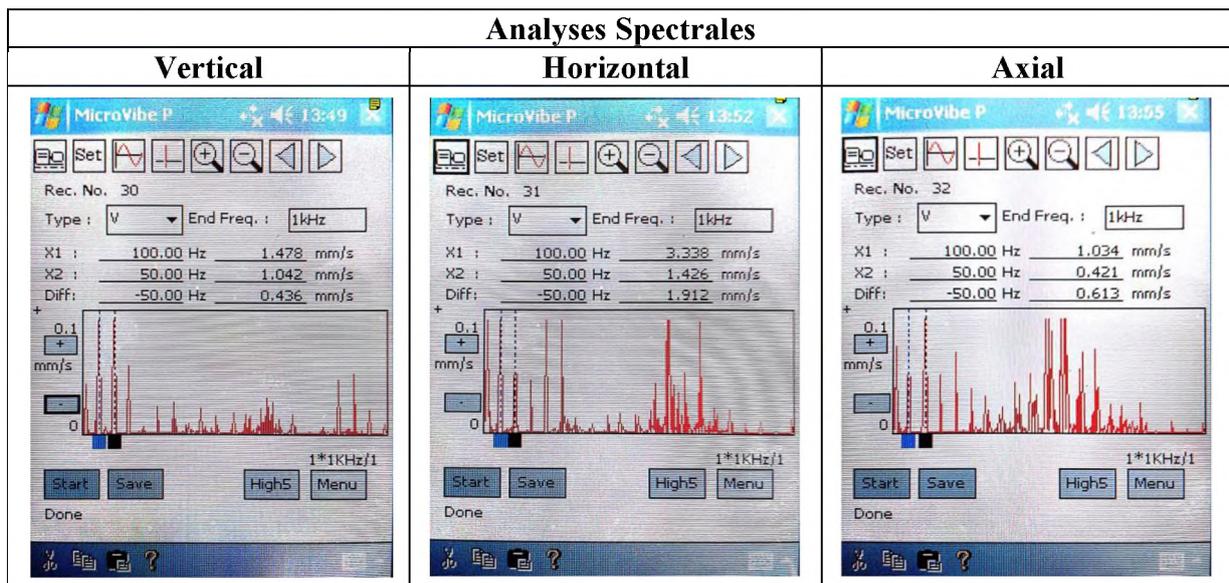


Tableau 4.13 : Analyses Spectrales après création de balourd (essai 1) plan 1

✓ Interprétation

A (50 Hz), 1 fois la fréquence de rotation, (Tableau 4.13) on remarque que :

- **En vertical** : La valeur de pic est 1.042 mm/s : Le balourd est naissant, il faut faire attention.
- **En horizontal** : La valeur de pic est 1.426 : Le balourd est avancé, il faut faire très attention.
- **En axial** : La valeur de pic est 0.421 mm/s, « bon ».

Dans ce cas, l'arbre du moteur est en état d'équilibre fragile et il existe un effet de balourd naissant et avancé qu'il faut surveiller.

4.2. Création de balourd (essai2)

Dans cet essai on a ajouté une masse de 1.1g (un 2^{ème} écrou : Ecrus N° 8) pour augmenter l'effet de balourd(Fig.4.9).



Fig. 4.9 : Création de balourd (essai 2) plan 1

| Mesures Niveau Global | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|-----------|--------|------|----------|------|---------|---------|---------|--------|---|-----------|-----------|--------|------|----------|------|---------|---------|---------|--------|---|-----------|-----------|--------|------|----------|------|---------|---------|---------|--------|
| Vertical | Horizontal | Axial | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>mm/s(RMS)</th> <th>Judgement</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-0.71</td> <td>Good</td> </tr> <tr> <td>0.71-1.8</td> <td>Fair</td> </tr> <tr> <td>1.8-4.5</td> <td>Caution</td> </tr> <tr> <td>over4.5</td> <td>Danger</td> </tr> </tbody> </table> | mm/s(RMS) | Judgement | 0-0.71 | Good | 0.71-1.8 | Fair | 1.8-4.5 | Caution | over4.5 | Danger | <table border="1"> <thead> <tr> <th>mm/s(RMS)</th> <th>Judgement</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-0.71</td> <td>Good</td> </tr> <tr> <td>0.71-1.8</td> <td>Fair</td> </tr> <tr> <td>1.8-4.5</td> <td>Caution</td> </tr> <tr> <td>over4.5</td> <td>Danger</td> </tr> </tbody> </table> | mm/s(RMS) | Judgement | 0-0.71 | Good | 0.71-1.8 | Fair | 1.8-4.5 | Caution | over4.5 | Danger | <table border="1"> <thead> <tr> <th>mm/s(RMS)</th> <th>Judgement</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-0.71</td> <td>Good</td> </tr> <tr> <td>0.71-1.8</td> <td>Fair</td> </tr> <tr> <td>1.8-4.5</td> <td>Caution</td> </tr> <tr> <td>over4.5</td> <td>Danger</td> </tr> </tbody> </table> | mm/s(RMS) | Judgement | 0-0.71 | Good | 0.71-1.8 | Fair | 1.8-4.5 | Caution | over4.5 | Danger |
| mm/s(RMS) | Judgement | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0-0.71 | Good | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.71-1.8 | Fair | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.8-4.5 | Caution | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| over4.5 | Danger | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mm/s(RMS) | Judgement | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0-0.71 | Good | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.71-1.8 | Fair | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.8-4.5 | Caution | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| over4.5 | Danger | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| mm/s(RMS) | Judgement | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0-0.71 | Good | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.71-1.8 | Fair | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.8-4.5 | Caution | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| over4.5 | Danger | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tableau 4.14 : Mesures Niveau Global après création de balourd (essai2) plan 1

✓ **Interprétation**

Sur le Tableau 4.14 :

- **En vertical** : La valeur de mesure niveau global est 2.431mm/s rms, est en état « Alarme ».
- **En horizontal** : La valeur de mesure niveau global a diminué et est 1.409 mm/s rms, est en état « Acceptable ».
- **En axial** : La valeur de mesure niveau global est 0.432 mm/s rms, est en état « Bon ».

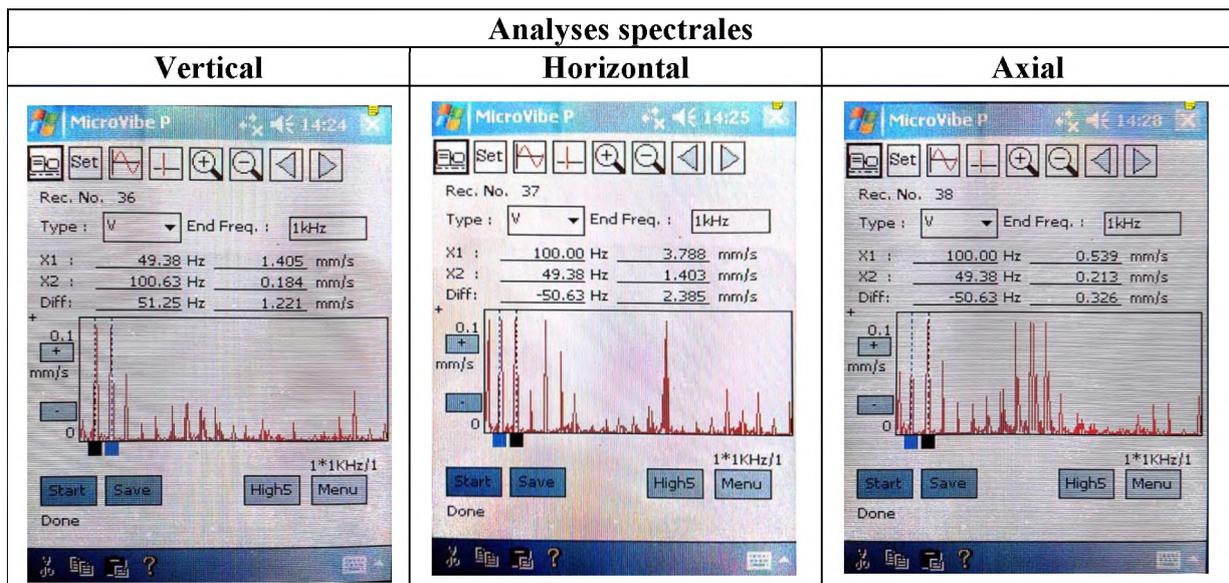


Tableau 4.15 : Analyses spectrales après création de balourd (essai 2) plan 1

✓ Interprétation

A(49.38Hz), 1 fois la fréquence de rotation du moteur, (Tableau 4.15), on remarque qu'il y a une augmentation en vertical de 1.042mm/s à 1.405 mm/s de l'amplitude vibratoire, par rapport au 1^{er} essai, ce qui donne un effet de balourd.

- **En vertical** : La valeur de pic est 1.405 mm/s, ce qui donne un état de balourd avancé.
- **En horizontal** : La valeur de pic est 1.403 mm/s, ce qui donne un état de balourd avancé.
- **En axial** : La valeur de pic est 0.213mm/s, état « Bon ».

Etant donné que l'arbre se trouve en présence de balourds avancés et qu'il doit être surveillé, on va procéder à sa correction.

4.3. Masse de correction

On a ajouté une masse d'essai de 3.2g (boulon N° 8) à l'opposé (180°) de celle du balourd, (Fig. 4.10)



Fig. 4.10 : Masse de correction à 180° plan 1

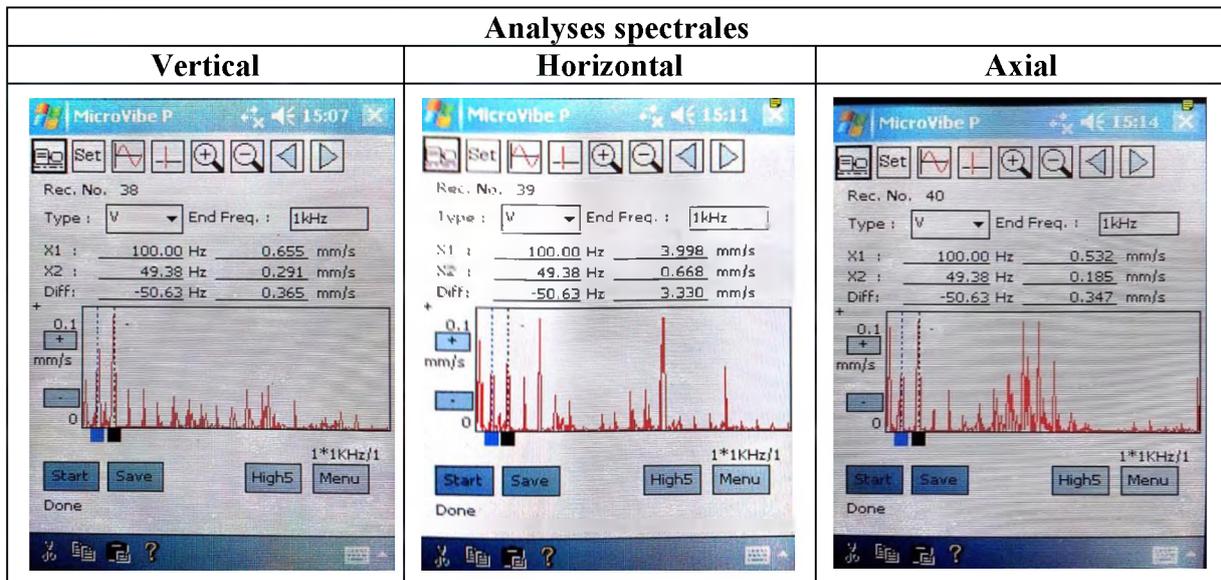


Tableau 4.16 : Analyses Spectrales de la masse de correction plan 1

✓ **Interprétation**

A(49.38Hz), 1 fois la fréquence de rotation du moteur, (Tableau 4.16)

- **En vertical** : La valeur de pica sensiblement diminué pour atteindre la valeur de 0.291 mm/s et devenir en état « bon ».
- **En horizontal** : La valeur pica sensiblement diminué pour atteindre la valeur de 0.668 mm/s et devenir en état « bon ».
- **En axial** : La valeur de pic a diminué pour atteindre la valeur de 0. 185mm/s et rester en état « Bon ».

Dans ce cas le balourd est diminué de 1.114m/s en vertical, de 0.735mm/s en horizontal et de 0.028mm/s en axial.

4.4. Correction final

Cette opération a été effectuée à l'aide de l'application Android « Vibra toolbox ».

- Etape 1 : introduction de la masse et de l'angle de balourd créés (essai 2), (Fig. 4.11 a).
- Etape 2 : introduction de la masse, de l'amplitude et de l'angle de correction, (Fig. 4.11 b).
- Etape 3 : Affichage de la correction de la masse et de l'angle comme résultat à faire. (Fig. 4.11 c).

Dans notre cas, les valeurs de correction sont 2.2g (boulon N° 7) à 0° (Fig. 4.11).



Fig. 4.11 : Correction du balourd à l'aide de « Vibra ToolBox »

Après les résultats obtenus par l'application, on a réalisé la correction de 2.2g de masse à l'angle de 0° (Fig. 4.12).



Fig. 4.12 : Masse de correction à 180° plan 1

✓ **Contrôle**

Après cette correction nous avons effectué un contrôle par analyse spectrale.

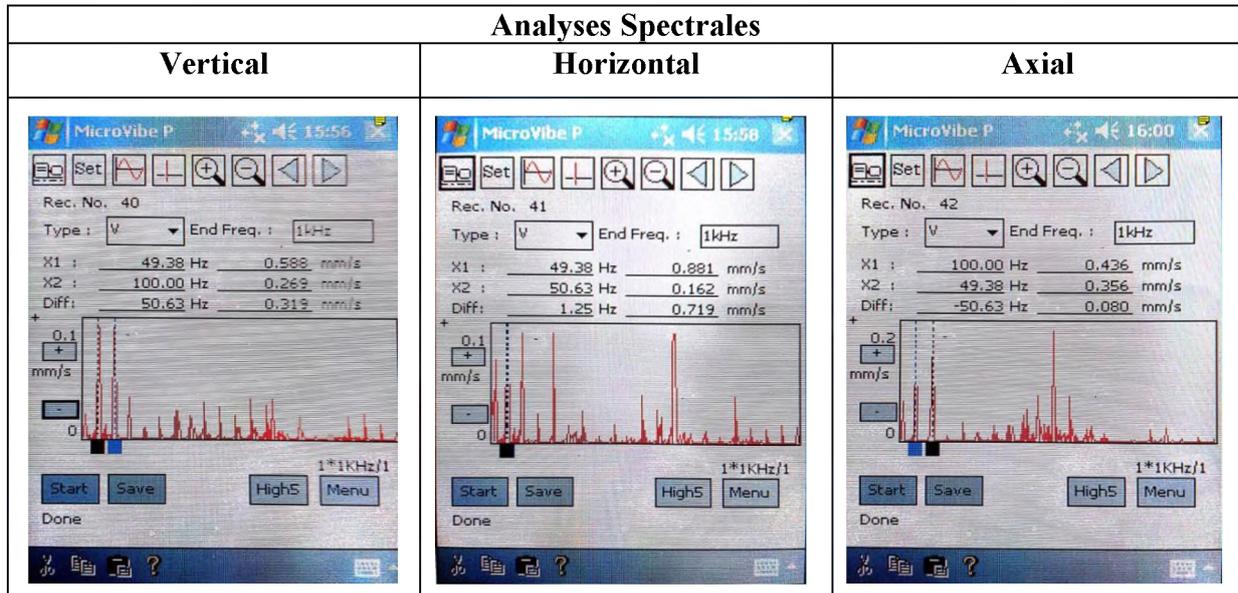


Tableau 4.17 : Analyses spectrales de la correction de balourd plan 1

✓ **Interprétation**

Après la correction finale, on remarque qu'il y a une légère augmentation du balourd (à 50 Hz) 1 fois la fréquence de rotation), (Tableau 4.17), par rapport au résultat de la première correction, mais qui reste sensiblement en état « bon ». Cette augmentation peut être justifiée par le jeu de la masse de correction finale (montage du boulon M4 dans trou Ø 5).

5. Conclusion

Dans ce chapitre ont utilisé l'ensemble des informations et des connaissances obtenues au cours de la préparation de ce mémoire ainsi que le stage pédagogique à SONATRACH pour faire une approche des travaux de détection de défaut de balourd et sa correction par équilibrage dynamique sur site. Pour cela nous avons réalisé un banc d'essai d'équilibrage muni de l'appareillage de mesure (MicroVibe P CMVL 3850 SKF) auquel nous avons ajoutés l'application (Vibra ToolBox) de correction.

Conclusion générale

Dans un monde où une concurrence accrue existe entre les compagnies industrielles afin de satisfaire les demandes de leurs clients en termes de service, qualité du produit et performance, la maintenance garde une position primordiale dans la réussite de ces objectifs. Les machines tournantes représentent une classe dominante, dans les systèmes de production, et peuvent y occuper des positions stratégiques. La surveillance de leurs états de fonctionnement présente donc un intérêt indéniable.

A l'image de la médecine, l'analyse vibratoire permet l'élaboration d'un bilan complet de la machine. La procédure consiste à détecter l'apparition d'un défaut sans démontage de la machine en prélevant le signal vibratoire à l'aide des capteurs de vibration. Le contenu fréquentiel des vibrations est une information clé pour le diagnostic des défauts sur les machines tournantes et pour la caractérisation de la dynamique des structures.

Les résultats des travaux réalisés dans ce mémoire font apparaître clairement les avantages de l'utilisation des techniques d'analyse vibratoire pour la détection et le diagnostic des défauts mécaniques sur les machines tournantes.

D'une part les défauts de balourd et de roulements, en off-line et on-line, ont été mis en évidence sur site dans les cas industriels du département de maintenance de GNL3/Z Sonatrach, à travers des mesures en niveau global et en analyse spectrale. Les spectres analysés montrent la pertinence et la précision de la technique vibratoire utilisé par le service inspection. Sur ce site, l'importance de l'équilibrage des arbres des machines tournantes est aussi montrée.

D'autre part et pour son importance, nous avons réalisé un banc d'essai d'équilibrage dans les ateliers de l'Institut (IMSI), à partir d'une meuleuse d'établi et de certains autres matériels. Ce banc d'essai a été validé par différents essais (à vide, sans défaut, avec défaut) et les mesures, en niveau global et spectrales, correspondantes réalisés. Les mesures ont été effectuées à l'aide de l'analyseur Micro Vibe P CMVL 3850 SKF. De plus, à cela, on a ajouté l'application Vibra toolbox qui permet de faire la correction finale de l'équilibrage (valeurs de la masse et de l'angle).

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire pourraient donner lieu à des études supplémentaires sur le cas de l'équilibrage des machines tournantes et plus précisément sur sa simulation pour une étude plus théorique. Et aussi sur l'investigation des autres défauts par la technique vibratoire.

Références bibliographiques synthétisés

- Jean Héng : PRATIQUE DE LA MAINTENANCE PREVENTIVE –Mécanique-Pneumatique - Hydraulique- Electrique- Froide, Édition DUNOD, Paris 2002
- François Monchy : « Maintenance méthodes et organisations » Edition Dunod, Paris 2000.
- Marie-Line Zani : « la surveillance des machines tournantes, mesure 757 » Septembre 2003
- Omar 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 , Université De Reims Champagne Ardenne, 2013.
- Théorie du réacteur et notions scientifiques fondamentales – Équipement mécanique, Groupe de formation technique, [http/www](http://www).
- A. BOUDIAF ; “Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Tournantes par Analyse Multirésolution”,These de Doctorat, Université 08 mai 1945 ,Guelma, Algérie, 2016.
- F. Landolsi : “ Cours De Techniques De Surveillance”,2010.
- Formation du Bruel & kjaer «CAPTEURS».
- Z. Ghemari ; “Modélisation, simulation et analyse expérimentale du capteur de vibration (accéléromètre)”, These de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2013.
- Document, Bruel & kjaer « MC. Introduction à la détection des défauts 2002 ».
- S.BENSAADA, D.FELIACHI « La maintenance industrielle ».
- David AUGÉIX « Analyse vibratoire des machines tournantes » Technique de l'ingénieur (22/04/2012), Ingénieur de l'Institut national des sciences appliquées (INSA Toulouse).
- Fouad. Landolsi , « Cours De Techniques De Surveillance », 2010.
- Omar 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, Université De Reims Champagne Ardenne
- Moret et P. Guay. «Roulements - les différents types et montages ->. Techniques de l'ingénieur, (2013)
- A.BOULENGER, P.CHRISTIAN Surveillance des Machines Tournantes par Analyse des Vibrations, AFNOR, 2ème tirage, (1998)
- Documentation SONATRACH .
- <https://www.gemasurement.com/condition-monitoring-and-protection/software/system-1r-condition-monitoring-and-diagnostics-software-platform> .
- capture d'écran , Sonatrach , Departement Maintenance , Service prédictive, logiciel system 1 , avril 2018.
- Manuel d'instruction ,Report & ROute Manager ,Collecteur de données & Base de données ,Logiciel d'analyse & de rapports, VIBROPORT 80, Bruel & kjaer Vibro.
- capture d'écran , Sonatrach , Departement Maintenance , Service prédictive, des machines suivis - off line-, avril 2018.