

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université M'Hamed Bougara- Boumerdes
Faculté de technologie
Département Génie Mécanique



Mémoire de Master
Filière: Electromécanique
Option: Electromécanique

Thème

Surveillance d'un système tournant mono-arbre par
analyse vibratoire d'un groupe turboalternateur de la
centrale thermique de Ras-Djinet

Réalisé par:

Mr. BENYAHIA Mahdi

Mr. AICHOUN Madjid

Promotrice : Dr. BAHLOUL Hassiba

Encadreur : Mr. SADEG Smail

2019 /2020



Remerciements

Avant tout nous tenons à remercier Allah Le Tout puissant de nous avoir donné la foi et la confiance, ainsi que la volonté et le courage pour accomplir ce mémoire de fin

D'étude.

Nous tenons également à adresser nos remerciements à notre encadreur Mr SADAG smail qui nous a accordé son soutien, son aide indéfectible et surtout sa patience et sa gentillesse sans oublier Mr CHELIL Sadék.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury, à monsieurqui a eu la gentillesse de présider notre soutenance, et aussi à madame BAHLOUL Hassiba pour l'intérêt qu'elle a apporté pour examiner notre travail et de l'enrichir par son proposition.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicace

Je dédie ce mémoire à:

Mes chers parents que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement contenu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices.

Mon cher frère pour son grand amour.

Mes chers amis qui sans leur encouragement ce travail n'aura jamais vu le jour.

Et à toute ma famille et à tous ceux que j'aime.

Aïchoun Madjid



Dédicace

Je dédie ce mémoire à:

Mes chers parents que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement contenu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices.

Mes chères frères et sœurs, pour leur grand amour.

Mes chers amis qui sans leur encouragement ce travail n'aura jamais vu le jour.

Et à toute ma famille et à tous ceux que j'aime.

Benyahia Mahdi



Liste des figures :

Fig.I.1 : La central thermique de Cap Djinet

Fig.I.2 : Salle de commande centralisée

Fig.I.3 : Les étapes de transformation d'énergie

Fig.I.4 : Schéma de fonctionnement de la centrale thermique

Fig.I.5 : Schéma cinématique de la ligne d'arbre

Fig.I.6 : Photos de corps HP

Fig.I.7 : Photos de corps MP

Fig.I.8 : Photo de corps BP

Fig.I.9 : Photo de partie fixe de l'alternateur (Le stator)

Fig.I.10 : Photo de partie mobile de la machine (Le rotor)

Fig.II.1 : Différentes formes de la maintenance

Fig.II.2 : Application des méthodes de maintenance

Fig.II.3 : fonctions de surveillance

Fig.II.4 : Les différentes étapes techniques du diagnostic

Fig.II.5 : Pourcentage des différentes techniques de maintenance conditionnelle.

Fig.II.6 : Diagnostic prédictif dans l'architecture générale de la surveillance

Fig.II.7 : Les types de surveillance des machines

Fig.II.8 : Surveillance ON-LINE (en ligne) ou suivi continu

Fig.II.9 : La chaîne de mesure vibratoire ON-LINE

Fig.II.10 : Surveillance OF-LINE ou suivi périodique

Fig.II.11 : Le choix du type de suivi

Fig.III.1 : Vibration harmonique

Fig.III.2 : Vibration périodique

Fig.III.3 : Vibration aléatoire

Fig.III.4 : Importance des vibrations

Fig.III.5 : Exemple d'un spectre

Fig.III.6 : Spectre d'un choc dû à une usure d'accouplement et le cepstre correspondant

Fig.III.7 : Signal vibratoire sinusoïdale généré par un balourd

Fig.III.8 : Signal vibratoire complexe

Fig.III.9 : Représentation vectorielle

Fig.III.10 : Le signal périodique complexe $F(t)$

Fig.III.11 : Décomposition en série de Fourier de la fonction $F(t)$

Fig.III.12 : Classification morphologique des signaux

Fig.III.13 : Les modes de détection

Fig.III.14 : Capteur de déplacement

Fig.III.15 : Capteur de déplacement (courant de Foucault)

Fig.III.16 : Capteur de vitesse (principe électrodynamique)

Fig.III.17 : Accéléromètre fonctionnant sur le principe piézo-électrique

Fig.III.18 : Mise en place des capteurs de déplacement sur le palier d'une turbomachine

Fig.III.19 : Mesure des déplacements axiaux

Fig.III.20 : Détermination des seuils par la méthode de relevé globale

Fig.III.21 : Signaux vibratoires en mode déplacement, vitesse et accélération

Fig.III.22 : Normes AFNOR E90-300 ou ISO 2372

Fig. IV.1 : Elément générale des Machines tournantes

Fig.IV.2 : Schéma de classement des conditions de naissance d'un défaut

Fig.IV.3 : Tolérances d'usinage sur un rotor

Fig.IV.4 : Points de mesure pour un défaut de balourd

Fig.IV.5 : Spectre théorique d'un défaut de balourd

Fig.IV.6 : Balourd statique

Fig.IV.7 : Balourd de couple

Fig.IV.8 : Balourd dynamique

Fig.IV.9 : balourd initial

Fig.IV.10 : Balourd évolué

Fig.IV.11 : Image vibratoire d'un défaut de balourd

Fig.IV.12 : Défauts d'alignement d'arbres

Fig.IV.13 : Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial

Fig.IV.14 : Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire

Fig.IV.15 : Image vibratoire d'un défaut de désalignement

Fig.IV.16 : Les contraintes sur un palier lisse

Fig.IV.17 : Image vibratoire d'un fouettement d'huile

Fig.IV.18 : Image vibratoire d'un corbillon d'huile

Fig.IV.19 : Spectre théorique d'un défaut d'une instabilité de paliers

Fig.IV.20 : Défaut d'usure d'accouplement

Fig.IV.21 : Caractéristique géométrique d'un roulement

Fig.IV.22 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure

Fig.IV.23 : Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure

Fig.IV.24 : Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant

Fig.IV.25 : Défaut de déversement

Fig.IV.26 : Image vibratoires théorique D'un défaut de type déversement de bague

Fig.IV.27 : Différents types d'engrenage

Fig.IV.28 : L'usure des engrenages a) usure par interférence b) usure abrasive

Fig.IV.29 : Piquêre engrenage

Fig.IV.30 : Ecaillage des dents

Fig.IV.31 : Le grippage engrenage

Fig.IV.32 : Spectre d'un engrenage sain

Fig.IV.33 : Spectre d'un engrenage marqué

Fig.IV.34 : Variation d'amplitude avec la charge

Fig.IV.35 : Image vibratoire du phénomène de turbulence

Fig.IV.36 : Défaut et image vibratoire du phénomène de cavitation

Fig.V.1: Accelerometer ASH 201-A

Fig.V.2 : Analyseur MVP-200

Fig.V.3 : Les points de mesures

Fig.V.4 : Les trois positions de mesures

Fig.V.5 : Spectre direction axiale

Fig.V.6 : Spectre direction radiale horizontale

Fig.V.7 : Spectre direction radiale verticale

Fig.V.8 : Spectre direction axiale

Fig.V.9 : Spectre direction radiale verticale

Fig.V.10 : Spectre direction radiale verticale

Fig.V.11 : Spectre direction axiale

Fig.V.12 : Spectre direction radiale horizontale

Fig.V.13 : Spectre direction radiale verticale

Fig.V.14 : Spectre direction axiale (P04)

Fig.V.15 : Spectre direction radiale horizontale (P04)

Fig.V.16 : Spectre direction radiale verticale (P04)

Fig.V.17 : Spectre direction axiale (P05)

Fig.V.18 : Spectre direction radiale horizontale (P05)

Fig.V.19 : Spectre direction radiale verticale (P05)

Fig.V.20 : Spectre direction axiale (P06)

Fig.V.21 : Spectre direction radiale horizontale (P06)

Fig.V.22 : Spectre direction radiale verticale (P06)

Fig.V.23 : Spectre direction axiale (P07)

Fig.V.24 : Spectre direction radiale horizontale (P07)

Fig.V.25 : Spectre direction radiale verticale (P07)

Liste des tableaux :

Tableau.II.1 : présentation les cinq niveaux de maintenance

Tableau.III.1 : Domaine de surveillance des indicateurs vibratoires

Tableau.III.2 : Seuil d'accélération

Tableau.IV.1 : Reconnaissance des principales anomalies

Tableau. IV.2 : Défaut des roulements

Tableau.V.1 : Les paramètres de la vapeur

Tableau. V.2 : Niveaux vibratoires (la norme AFNOR 90-300)

Tableau. V.3 : Résultats de mesure vibratoire

Tableau. V.4 : Analyse des spectres de palier 1

Tableau. V.5 : Analyse des spectres de palier 2

Tableau. V.6 : Analyse des spectres de palier 3

Tableau. V.7 : Analyse des spectres de palier 4

Tableau. V.8 : Analyse des spectres de palier 5

Tableau.V.9 : Analyse des spectres de palier 6

Tableau. V.10 : Analyse des spectres de palier 7

Résumé :

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

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

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

Abstract:

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

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

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

ملخص

المهمة الأكثر أهمية و الأكثر كلفة من حيث الوقت وتكلفة المراقبة والآلات الدوارة يكشف وتشخيص الأعطال هذه الدراسة مخصصة للصيانة التنبؤية عن طريق تحليل الاهتزاز. يعتمد مبدأ هذه الطريقة على التحليل الطيفي بواسطة تحويل فورييه.

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

الكلمات المفتاح: تحليل الاهتزاز، التشخيص، المراقبة، تحويل فورييه والطيف.

Sommaire

Sommaire

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

Chapitre I : Présentation de la centrale de Cap Djinet

I .1. Historique de la central	3
I .2. Position de site..... ;.....	3
I.2. Etude technologique.....	4
I.2.1. Commande et contrôles.....	4
I.2.2. Système de surveillance, d’alarme et d’analyse.....	4
I.2.3. Salle de commande centralisée.....	4
I.2.4. Principaux équipements constituant de la centrale.....	5
I.2.4.1. Générateurs De Vapeur (SGP Autriche).....	5
I.2.4.2. Turbine.....	5
I.2.4.3. Pompes.....	5
I.2.4.4. Ventilateurs.....	6
I.2.4.5. Alternateurs (SIEMENS Autriche).....	6
I.2.4.6. Condenseur.....	6
I.2.5. Rôle de la centrale thermique.....	6
I.3. Principe de fonctionnement de la centrale thermique de Ras-Djinet.....	6
I.4. Etude de groupe turbo alternateur (GTA).....	8
I.4.1. Définition.....	8
I.4.2. Rôle.....	8
I.4.3. Etude de la ligne d’arbre.....	8
I.4.4. Description de la turbine à vapeur.....	9
I.4.4.1. Introduction.....	9
I.4.4.2. Turbine à vapeur de la centrale de Cap Djinet.....	9
I.4.4.3. Alternateurs	13
I.4.4.4. L’excitatrice.....	15
I.5. Les auxiliaires communs aux quatre (4) tranches.....	15

Conclusion.....	15
-----------------	----

Chapitre II : Maintenance conditionnelle et surveillance

II. Introduction.....	16
II.1. Généralités.....	16
II.1.1. Définition de la maintenance (d'après AFNOR NF X 60-010).....	16
II.1.2. Objectifs de la maintenance.....	16
II.1.3. Les différentes formes de maintenance.....	17
II.1.3.1. La maintenance corrective	17
II.1.3.2. La maintenance préventive.....	18
II.1.3.3. Application des méthodes de maintenance.....	18
II.1.3.4. Types de la maintenance préventive.....	19
II.1.3.5. Opérations de la Maintenance préventive	20
II.1.4. Les niveaux de la maintenance	21
II.2. Pratique de la maintenance conditionnelle	22
II.2.1. La mise en place d'un programme de maintenance conditionnelle.....	22
II.3. Surveillance	23
II.3.1. Définition	23
II.3.2. Fonction	24
II.3.3. Détection.....	24
II.3.4. Diagnostic.....	24
II.4. Techniques de surveillance	26
II.5. La surveillance prédictive.....	27
II.6. Les types de la surveillance	27
II.7. Le Choix du type de surveillance	31
Conclusion.....	32

Chapitre III : Notions d'analyse vibratoire

III. Introduction.....	33
III.1. Définition d'une vibration	33

III.2. Origine des vibrations	33
III.2.1. Vibrations de machines voisines	33
III.2.2. Vibrations d'origine électrique	33
III.2.3. Résonance de la structure ou du rotor	33
III.3. Les différentes forme de vibration.....	34
III.3.1. Vibration harmonique.....	34
III.3.2. Vibration périodique.....	35
III.3.3. Vibration Apériodique.....	35
III.4. Importance des vibrations	35
III.5. Analyse spectrale.....	36
III.5.1. Définitions	36
III.6. Représentations d'un signal vibratoire	37
III.6.1. Représentation temporelle.....	38
III.6.2. Représentation vectorielle.....	38
III.6.3. Représentation spectrale	39
III.7. Classification des signaux.....	39
III.7.1. Classification phénoménologique	39
III.7.2. Classification morphologique	40
III.8. Transformée de Fourier.....	41
III.8.1. Décomposition en série de Fourier.....	41
III.8.2. Transformée de Fourier.....	41
III.8.2.1. Transformée de Fourier discrète (TFD).....	41
III.8.2.2. Transformée de Fourier rapide (TFR).....	42
III.9. Etude des Caractéristiques vibratoires.....	42
III.10. Les grandeurs de mesure d'une vibration mécanique.....	44
III.11. Les capteurs pour la détection des vibrations.....	45
III.11.1. Les capteurs de déplacement.....	45
III.11.2. Capteurs de vitesse.....	46
III.11.3. Capteurs d'accélération (accéléromètre).....	47

III.12. Les vibrations relatives et vibrations absolues.....	47
III.12.1. Vibration absolue.....	47
III.12.2. Vibration relative.....	48
III.13. Points de mesure.....	48
III.13.1. Mesure des déplacements radiaux.....	49
III.13.2. Mesure des déplacements axiaux.....	49
III.13.3. Classement <<VIS>> des machines.....	49
III.14. Détermination pratique des seuils.....	50
III.14.1. Méthodes de relevé globale.....	50
III.14.2. Méthodes de l'analyse spectrale.....	51
III.14.3. Définition de seuil d'intervention.....	51
III.14.4. Choix de la grandeur à mesurer.....	51
III.15. Seuil de jugement.....	53
III.15.1. Les groupes.....	53
III.15.2. Choix des seuils vibratoires.....	54
III.15.2.1. Seuil de vitesse vibratoire.....	54
III.15.2.2. Seuil d'accélération.....	55
Conclusion.....	56

Chapitre IV : Principaux défauts des machines tournantes

IV. Introduction.....	57
IV.1. Machines tournantes.....	57
IV.2. Reconnaissance des principales anomalies.....	59
IV.3. Classement des conditions de naissance d'un défaut.....	60
IV.4. Principaux défauts dans les machines tournantes.....	60
IV.4.1. Déséquilibre – défaut de balourd.....	60
IV.4.1.1. Différents types de balourd.....	62
IV.4.1.2. Origine de différents types de balourd.....	63
IV.4.1.2.1. Balourd d'origine mécanique.....	63
IV.4.1.2.2. Balourd d'origine thermique.....	63

IV.4.1.3. Signature vibratoire des défauts de balourd.....	63
IV.4.2. Défaut d'alignement (flexion de rotor).....	65
IV.4.2.1. Les couses du désalignement	65
IV.4.2.2. Différents types de défauts d'alignements.....	65
IV.4.2.3. Représentation spectrale.....	67
IV.4.3. Défaut de paliers lisses.....	67
IV.4.3.1. Instabilités des paliers.....	68
IV.4.3.2. Fouettement et tournoiement.....	69
IV.4.3.3. Origine des instabilités.....	69
IV.4.4. Défaut de serrage.....	69
IV.4.5. Défaut des roulements.....	70
IV.4.5.1. Signatures vibratoires des principaux défauts des roulements.....	72
IV.4.6. Défauts des engrenages.....	74
IV.4.6.1. Types de défaut.....	75
IV.4.7. Défauts spécifiques aux turbines.....	78
IV.4.7.1. Défauts liés à la fréquence de passage des aubes	78
IV.4.7.2. Défauts liés aux phénomènes de turbulence	78
IV.4.7.3. Défauts liés aux phénomènes de cavitation.....	79
Conclusion.....	79

Chapitre V : Etude expérimentale

V. Introduction.....	80
V.1. But de travail.....	80
V.2. Les outils de mesures.....	80
V.2.1. Capteur des vibrations.....	81
V.2.2. Analyseur-MVP-200.....	81
V.2.3. Logiciel de diagnostic et d'analyse XPR-300.....	82
V.3. Etude de cas.....	82
V.3.1. Les points de mesures.....	82
V.3.1.1. Description de l'installation surveillée.....	84

V.3.1.2. Description de la ligne d'arbre.....	84
V.3.2. Résultats de mesure.....	85
V.4. Manipulation.....	86
Conclusion.....	97
Conclusion générale	98
Référence bibliographie.....	99
Annexe.....	101

L'industrie en Algérie nécessite une énergie électrique croissante. Cela demande la réalisation de plusieurs centrales à savoir : nucléaire, hydraulique et thermique. Les centrales thermiques sont des sources importantes d'énergie électrique, qui fonctionnent avec des machines tournantes, de plus en plus performantes et complexes comme le groupe turboalternateur.

Ces types de machines composées d'organes fragiles soumis à des contraintes mécaniques importantes et à des environnements industriels difficiles ce qui implique des défaillances et des dégradations au fonctionnement de la machine. Lorsque la machine joue un rôle vital dans la production, ces défauts peuvent s'avérer lourds de conséquences.

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

Ce type de maintenance préventive utilise plusieurs outils tels que la surveillance qui nous donne un diagnostic des conditions de fonctionnement, une surveillance efficace des machines.

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

L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus largement employée. Il faut dire qu'elle permet à elle seule de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement.....

Autre outil de surveillance, l'analyse des huiles. Appliquée à toutes les machines pourvu qu'elles contiennent un fluide (huile) que l'on peut prélever, la méthode consiste à contrôler les particules d'usure drainées par le lubrifiant afin d'en déduire l'état de l'équipement. L'analyse d'un échantillon de quelques dizaines de millilitres d'huile peut alors suffire à révéler l'usure anormale de l'un des composants.

À côté de la surveillance vibratoire et de l'analyse des lubrifiants, la thermographie infrarouge suscite un intérêt encore récent dans le domaine de la maintenance. Jusqu'alors réservée au contrôle d'installations électriques, elle est depuis peu utilisée dans la surveillance des machines tournantes pour détecter les défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement.

Le groupe turboalternateur entre en résonance avec la structure qui le porte ce qui produit des vibrations qui vont détériorer la structure, L'analyse des modes permet d'établir un modèle de comportement vibratoire de la structure en basse fréquence.

Cette étude est organisée selon les chapitres suivants :

- ❖ Le premier chapitre est consacré à la présentation de la centrale thermique de CAP-DJINET.
- ❖ Le deuxième chapitre présente l'introduction à la maintenance conditionnelle.
- ❖ Le troisième chapitre présente des notions sur les vibrations.
- ❖ Le quatrième chapitre présente les principaux défauts des machines tournantes
- ❖ Le cinquième chapitre présente l'étude expérimentale application de l'analyse spectrale

Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Présentation de la
centrale de Cap Djinet

I.1. Historique de la centrale :

La centrale est située au nord de la wilaya de Boumerdès, au bord de la mer, à 30 Km à l'est du centre de la wilaya et à 80 Km à l'est de la capitale (Alger). Elle est installée sur une superficie de 35 hectares. Ils ont choisi le site sur la base de :

- ✓ Proximité de la mer.
- ✓ Possibilité d'extension.
- ✓ Proximité du consommateur important dans la zone industrielle Rouïba- Réghaia [1]

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

- Groupe 1, couplage sur réseau le 17/06/1986
- Groupe 2, couplage sur réseau le 17/09/1986
- Groupe 3, couplage sur réseau le 29/11/1986
- Groupe 4, couplage sur réseau le 21/02/1987



Fig. I.1 : La centrale thermique de Cap Djinet

La centrale thermique de **Cap Djinet** se compose de quatre tranches de type thermique à vapeur d'une puissance nominale unitaire de 176KW à borne de l'alternateur (BA). La puissance totale installée est de 704 MW(BA), la puissance fournie au réseau est de 672MW borne usine (BU) à la consommation totale des auxiliaires des 04 tranches et des auxiliaires communs est d'environ 32MW, et de trois groupes chaudières a pour rôle de transformer l'eau en vapeur sous haute pression pour alimenter le groupe turbo-alternateur (GTA) d'une capacité de vaporisation maximale de 523T /h sous une pression

de service de 160 bars à une température de vapeur de 540°C, le débit nominal combustible par groupe est de 40 000 m³ /h en marche avec gaz au fuel.

I.2. Etude technologique [2]:

I.2.1. Commande et contrôles :

La centrale se caractérise par un degré d'automatisme de centralisation des commandes. On dénombre une quarantaine de chaîne de régulation par groupe de production qui permette un pilotage automatique du groupe.

I.2.2. Système de surveillance, d'alarme et d'analyse :

Pour permettre une bonne conduite du groupe de production des paramètres d'exploitation (température, pression, niveau d'eau vibration,.....), des différents équipements du groupe ,sont indiqués, enregistrés en permanence en salle de commande et signalé en cas de dépassement de seuil.

Pour une analyse en cas d'incident un consigneur d'état est installé. Il permet d'enregistrer les alarmes dans un ordre chronologique.

I.2.3. Salle de commande centralisée :

Chaque partie de tranche est contrôlée et réglée depuis une salle de commande. La salle de commande comprend pour chaque tranche :

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



Fig.I.2 : Salle de commande centralisée.

I.2.4. Principaux équipements constituant la centrale :

La centrale se décompose de quatre (4) tranches identiques et chaque tranche contient comme équipements principaux (stratégiques) :

I.2.4.1. Générateurs De Vapeur (SGP Autriche)

❖ Rôle :

Le générateur de vapeur (chaudière) de type pressurisé à circulation naturelle a pour rôle de transformer l'eau en vapeur à haute pression pour alimenter le **GTA**.

❖ Constitution :

Chambre de combustion formée par les tubes écrans (faisceau vaporisateurs).

(01) Ballon (réservoir) et (01) Economiseur

(03) Surchauffeurs et (02) resurchauffeurs.

(03) Désurchauffeurs par injection d'eau pour la régulation T° vapeur.

(04) Colonnes de descentes.

(08) Brûleurs de combustion mixte gaz/fuel.

I.2.4.2. Turbine :

Turbine à 03 corps : HP, MP et BP Nombre de soutirages de vapeur : 06 alimentant 03 réchauffeurs BP la bache alimentaire et 02 réchauffeurs HP

I.2.4.3. Pompes :

- ❖ **Deux pompes d'extraction** : Assurent le transfert de l'eau du puit du condenseur jusqu'à la bache alimentaire en passant par les trois (03) réchauffeurs BP (débit nominale d'une pompe **414 m³/h**).
- ❖ **Trois Pompes d'alimentation** : servent à alimenter la Chaudière à partir de la bache alimentaire (Débit de **3 x 261,6 m³/h**)
- ❖ **Deux pompes de circulation** de **12 000 m³/h** chacune, qui refoulent l'eau de mer jusqu'au condenseur.

I.2.4.4. Ventilateurs :

- ❖ (02) **Ventilateurs de recyclage** : ont pour rôle de recycler, en fonction de la charge, une partie des fumées issues de la combustion afin de régler la T° à la sortie du resurchauffeur.
- ❖ (02) **Ventilateurs de soufflage** : ont pour rôle de fournir l'air de combustion nécessaire au générateur de vapeur.

I.2.4.5. Alternateurs (SIEMENS AUTRICHE) :

Les alternateurs sont à refroidissement à l'hydrogène sous pression de 03 bars en circuit fermé, l'hydrogène étant lui-même refroidi à l'eau d'extraction.

I.2.4.6. Condenseur :

Son rôle est d'assurer la condensation de la vapeur évacuée du corps BP de la turbine par la circulation de l'eau de mer de refroidissement (débit de $2 \times 12000 \text{ m}^3/\text{h}$).

I.2.5. Rôle de la centrale thermique :

Le rôle d'une centrale thermique est de transformer l'énergie chimique dans un combustible, en énergie électrique en passant par l'intermédiaire de l'énergie thermique et mécanique. Cette transformation s'opère dans divers appareils en utilisant les propriétés physiques de l'eau sous ses diverses formes liquides et vapeur.

I.3. Principe de fonctionnement de la centrale thermique de Ras-Djinet :

Avant d'écrire le fonctionnement de la central, il sera bon de rappeler les différentes transformations énergétique qui ont servi à la production de l'énergie électrique, dans une travaille suivant le cycle de Rankine (deux source énergétique l'une chaude (chaudière) et l'autre froide (condenseur) + un groupe turboalternateur).

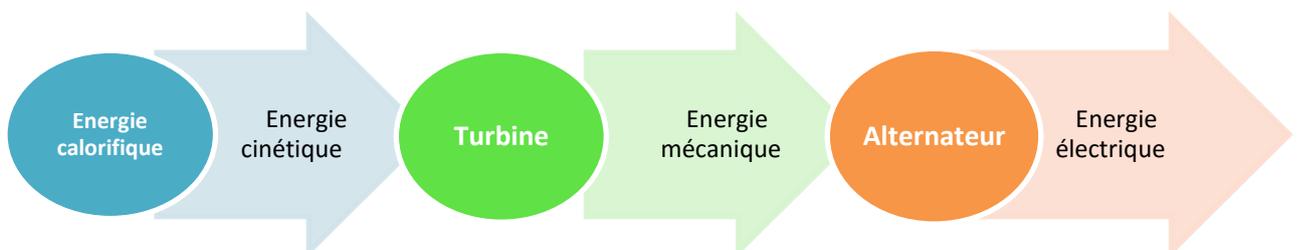


Fig.I.3 : Les étapes de transformation d'énergie.

❖ **On gros on a trois transformations :**

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

Le condensateur est extrait par la pompe d'extraction pour l'acheminer vers la bache alimentaire en passant par le réfrigérateur d'été, les réfrigérants d'hydrogène de l'alternateur et par les réchauffeurs BP.

L'eau d'alimentation de bache alimentaire sera refoulée par la pompe alimentaire vers la partie inférieure du ballon chaudière en passant par les réchauffeurs HP 5 et 6 pour le réchauffé à une température de 246.5°C sous une pression de 164.3 bars avant d'être introduite dans l'économiseur de 284.7°C et une pression de 160 bars. Ce mélange (eau, vapeur) sera vaporisé en descendant dans des colonnes d'alimentations qui traversant les huit brûleurs qui fonctionnent en présence d'oxygène fournis par le ventilateur de soufflage, la vapeur prend une température de 540°C et une pression de 170 bars.

La vapeur est canalisée dans les écrans vaporisateurs jusqu'à la partie supérieure du ballon chaudière et s'achemine vers le corps HP de la turbine en passant par les trois surchauffeurs.

La vapeur RC se rend au corps BP de la turbine après le passage par des resurchauffeurs 1 et 2 où elle est portée à 540°C et 48 bars puis vers le corps MP.

A la sortie de corps MP la vapeur à une pression de 30 bars.

L'effet de la vapeur dans les trois corps de la turbine est de fournir l'énergie mécanique au l'alternateur qui produit l'énergie électrique. Tous ses auxiliaires sont alimentés à travers le transformateur de soutirage.

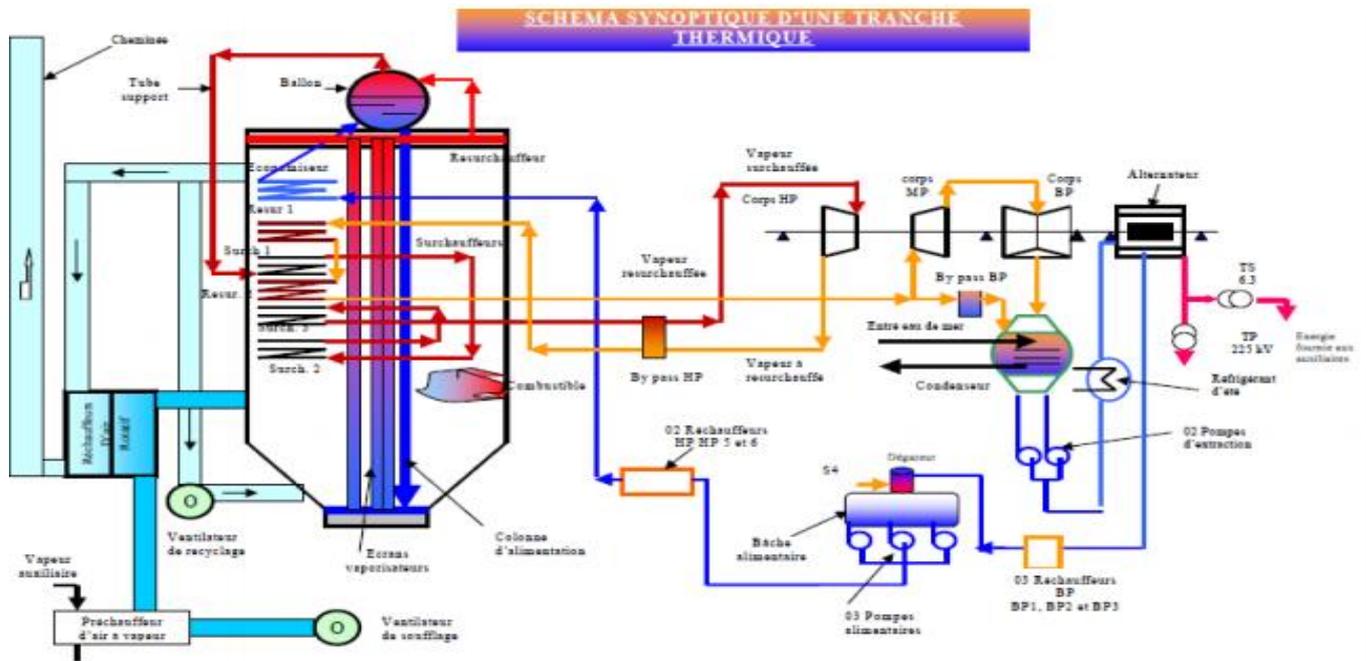


Fig. I.4 : Schéma de fonctionnement de la centrale thermique

I.4. Etude de groupe turbo alternateur (GTA) [3] :

I.4.1. Définition : Dispositif composé d'une turbine qui transmet l'énergie mécanique de l'eau au rotor de l'alternateur pour le faire tourner et crée un courant électrique se trouve dans la salle des machines.

I.4.2. Rôle : Le groupe turboalternateur joue un rôle fondamental dans la production de l'électricité, son but est de transformer l'énergie hydraulique ou thermique en énergie électrique.

I.4.3. Etude de la ligne d'arbre :

La turbine, l'alternateur et l'excitatrice sont montés sur la même ligne d'arbre qui comporte :

- 04 paliers turbine.
- 02 paliers alternateur.
- 01 palier excitatrice.
- La température maximale de fonctionnement des paliers est de 95°C.
- La température limite de fonctionnement est de 120°C
- La vitesse de rotation est de 3000 tr/min.
- La longueur de la ligne d'arbre est de 32m

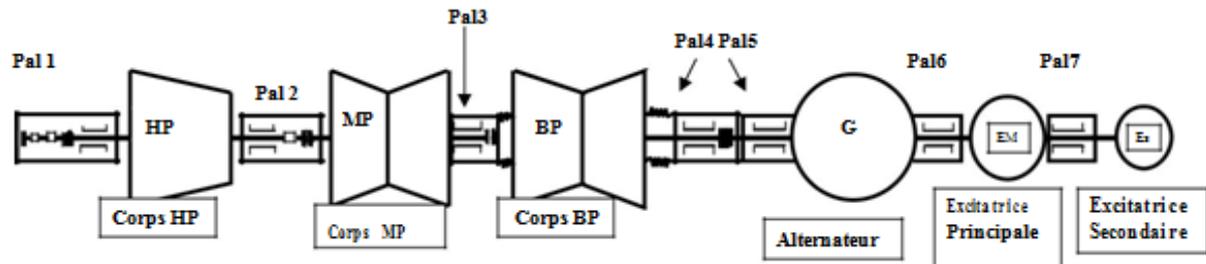


Fig.I.5: Schéma cinématique de la ligne d'arbre

I.4.4. description de la turbine à vapeur :

I.4.4 .1.Introduction :

La turbine à vapeur, comme toutes les turbomachines, sont des appareils à écoulement continu, qui prêtent, dans les conditions économiques, à la production de l'énergie électrique à partir de la vapeur.

Ces machines jouent un rôle important dans la production de l'énergie électrique à cause des avantages qu'elles présentent comparativement à d'autres modes de production d'énergie de même type.

I.4.4.2. Turbine à vapeur de la centrale de Cap Djinet :

Est une machine à une seule ligne d'arbre de type à condensation et à simple resurchauffe. Elle comporte six soutirages qui alimentent les réchauffeurs BP (Basse Pression), HP (Haute Pression) et la bêche alimentaire et elle est composée de trois corps HP, MP (Moyenne Pression) et BP qui sont séparés. Les rotors de la turbine et de l'alternateur sont accouplés rigidement [4].

❖ Ces caractéristiques sont :

- ❖ Numéro de la machine : N°117327
- ❖ Longueur : 13.725 m
- ❖ Pression : 138.2 bars
- ❖ Température vapeur : 535 °C
- ❖ Vitesse de rotation : 3000 tr/mn
- ❖ Fréquence : 50 Hz
- ❖ Pression de la vapeur d'échappement : 0,05 bar
- ❖ Puissance : 176 MW
- ❖ Poids : 500 tonnes

❖ **Constitution :**

1/Aubages

Hormis l'étage de réglage, toute la turbine est du type à réaction. Les aubes mobiles des corps HP sont fraisées dans la masse avec un pied en forme de marteau et tenon. Les derniers étages de corps BP sont dotés d'aubes à profil gauche venues de matrice dont le pied en forme de sapin ou de marteau double est émanché dans les rainures correspondantes de l'arbre. Les aubes directrices des corps HP et MP soumises à de fortes sollicitations sont fraisées dans la masse avec un pied en forme de marteau et un tenon comme les aubes mobiles. Les autres aubes directrices ont un pied en forme de crochet et un tenon river. Les trois derniers étages du corps BP sont constitués par des couronnes d'aubes directrices en tôle.

2/ Corps HP

Le corps HP (haute pression) de la turbine est une construction en tonneau, il est équipé d'un étage de réglage pour régularisation par groupe de tuyères. Quatre ensembles combinés vannes d'arrêt/ soupapes régulatrices sont associés à autant de groupes de tuyère, ils sont disposés de chaque côté du corps.

La vapeur conduite à la turbine par l'intermédiaire des tuyauteries parvient aux soupapes régulatrices après avoir traversé les vannes d'arrêt. A partir de ces soupapes la vapeur s'écoule dans l'enveloppe.

Des clapets anti-retour sont montés sur les tuyauteries sur les tuyauteries de resurchauffe entre le corps HP et le resurchauffeur pour empêcher le reflux chaud du resurchauffeur vers le corps MP.

❖ **Caractéristiques du corps HP :**

-Corps : **a simple flux**

-Débit vapeur : **532 t/h**

-Pression vapeur : **138 bars**

-Température vapeur : **535 °C**

-Etage de réglage a action : **1**

-Etage de réglage a réaction: **23**

-Poids : **4910 kg**

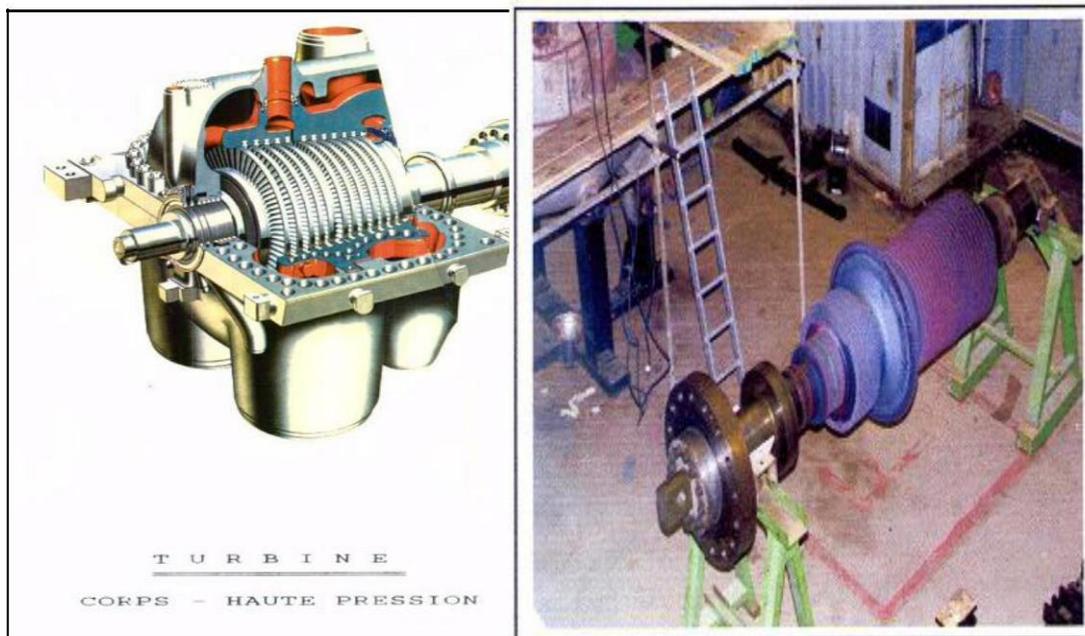


Fig. I.6: photos de corps HP

3/Corps MP

Le corps MP est à double flux. L'enveloppe externe possède un plan de joint horizontale. Elle porte l'enveloppe interne montée de façon à ne pas entraver les dilatations thermiques. Les aubes directrices sont logées dans l'enveloppe interne et la vapeur resurchauffée pénètre au milieu de l'enveloppe interne par le bas et le haut. La présence de l'enveloppe interne limite les caractéristiques élevées de la vapeur à la zone d'admission de cette enveloppe, alors le joint horizontal de l'enveloppe n'est exposé qu'aux faibles pressions et à la température réduite de la vapeur à la sortie de l'enveloppe interne

❖ Caractéristiques du corps MP

- Corps : **double flux.**
- Nombre d'étage à réactions : **2*19.**
- Pression à l'admission : **35.9 bar.**
- Température de la vapeur : **535 °C.**
- Débit de vapeur : **467.7 t/h.**

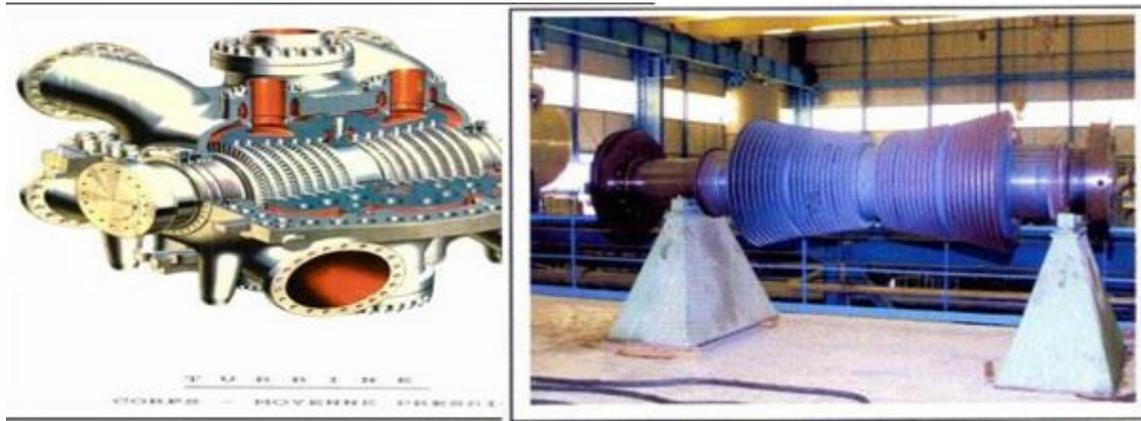


Fig. I.7 : photos de corps MP

4/Corps BP

Le corps BP (basse pression) est du type à double flux. Il s'agit d'une construction mécano-soudée comprenant une carcasse et une double enveloppe. La vapeur provenant du corps MP pénètre dans le corps interne de l'enveloppe double en amont des aubages BP par les pipes d'admission disposées de part et d'autre part du corps BP

❖ Caractéristiques du corps BP

- Corps : **double flux**
- Nombre d'étage à réactions : **2*8**
- Pression à l'admission : **5.5 bar**
- Température de la vapeur : **282°C**
- Débit de vapeur : **406 t/h**

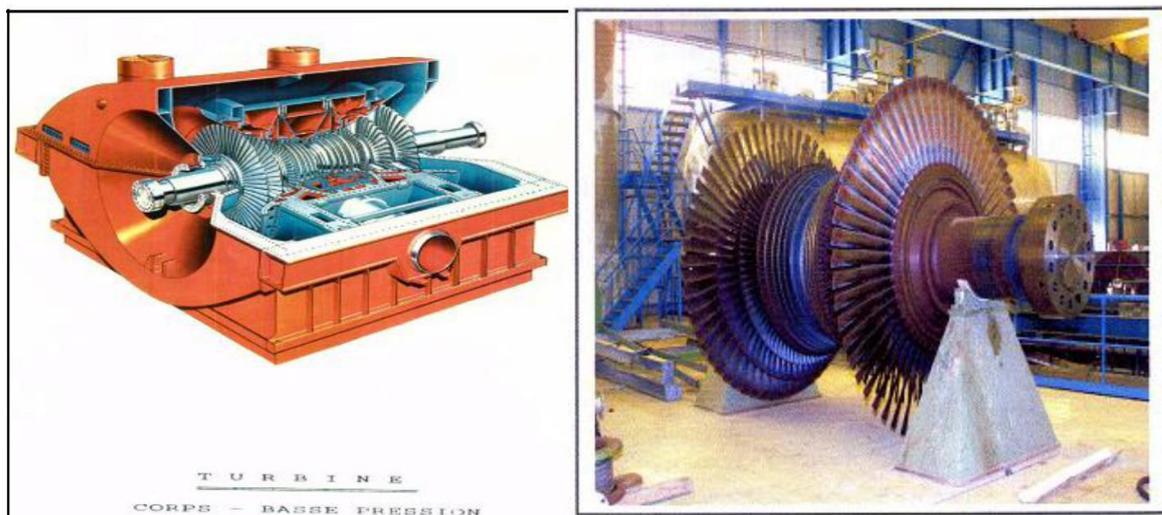


Fig. I.8 : photos de corps BP

I.4.4.3. Alternateurs [5] :

Un alternateur fonctionne selon la loi de l'induction électromagnétique. Cette loi montre que quand on déplace un conducteur dans un champ magnétique de façon à "couper" des lignes de force, une tension est induit entre les extrémités du conducteur. Les lignes de force sont appelées flux magnétique ou champ. La tension induite varie selon la vitesse avec laquelle on coupe les lignes de force: elle croit proportionnellement avec elle. Appliquons la loi d'induction électromagnétique à un conducteur en forme de cadre qui tourne entre les deux pôles N et S d'un électroaimant ou aimant. Les extrémités du cadre sont reliées par l'intermédiaire 2 bagues et de deux frotteurs (balais) aux bornes d'un millivoltmètre. Quand le conducteur tourne d'un mouvement uniforme, le millivoltmètre dévie alternativement dans un sens et dans l'autre, indiquant ainsi l'apparition dans le conducteur d'une tension induite (force électromotrice alternative). Le courant obtenu est un courant alternatif, dont la courbe est sinusoïdale. Il change de sens plusieurs fois par seconde. Ce résultat peut aussi être Obtenu par la rotation d'un aimant ou électroaimant à l'intérieur d'une bobine. L'aimant constitue l'inducteur (rotor), la bobine l'induit (stator).

Un alternateur possédé deux éléments distincts essentiels :

1-Le stator : (pièce statique c'est-à-dire qui ne tourne pas dans l'alternateur (stator provient de statique qui veut dire immobile)) est une bobine de cuivre donc conductrice et sensible aux phénomènes électromagnétique.



Fig.I.9 : Photo de partie fixe de l'alternateur (Le stator)

2- Le rotor : pièce qui tourne (rotor provient de rotation qui signifie en mouvement tournant) est aimant qui produit un champ magnétique. Cette pièce possède un axe est solidaire du rotor et lorsque l'axe est entraîné, il fait tourner le rotor.



Fig.I.10: Photo de partie mobile de la machine (Le rotor)

3. Les Paliers : Ce sont des paliers - flasques boulonnés aux deux extrémités de la carcasse. Ils sont munis de coussinets à rotule isolés électriquement du palier lui-même.

L'huile de graissage des paliers est prélevée du circuit de graissage de la turbine.

❖ Caractéristiques de l'alternateur

- Tension nominale : **15,5 KV**
- La longueur : **7,340m**
- $\cos \Phi = 0,8$
- Excitation : à **diodes tournantes**
- Poids du stator complet : **198 tonnes**

I.4.4.4.L'excitatrice :

L'énergie nécessaire à l'excitatrice est prélevée sous forme mécanique sur l'arbre du groupe, la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique continue s'effectue en utilisant un alternateur et des diodes.

L'alternateur principal contient l'inducteur principal fixe et l'induit tournant, ce dernier est alimenté par des diodes qui sont elles-mêmes alimentées par l'alternateur principal.

L'énergie nécessaire à l'excitation de l'alternateur est fournie par un alternateur pilote dont l'inducteur est constitué par un aimant.

❖ Caractéristiques de l'excitatrice

- Puissance de la machine $P=710$ KW
- Courant maximal d'excitation $I=2450$ A
- Plafond de la tension d'excitation $U_{\max}=240$ V
- Vitesse de rotation $V=3000$ tr/min
- Rendement du système d'excitation=90%

I.5.Les auxiliaires communs aux quatre (4) tranches :

❖ La station de production d'hydrogène :

Elle sert à produire de l'hydrogène nécessaire au refroidissement des quatre alternateurs de la centrale.

❖ **Le poste de détente gaz :** Il compose de deux lignes de filtration gaz et trois lignes de régulation pour la détente gaz de 60 à 6 bars.

❖ **Le poste de dépotage et transfert fuel :** Il est constitué de deux bâches de stockage de capacité $2 \times 10000 \text{m}^3$.

Conclusion :

Dans ce chapitre, une présentation succincte de la centrale thermique de RAS-DJENET est donnée à sa structure en passant par les différents compartiments qui la composent ainsi que les machines indispensables au bon fonctionnement de cette centrale.

Chapitre II

Maintenance

conditionnelle

et surveillance

I. Introduction :

Le rôle principal d'un service maintenance est de maintenir les capacités opérationnelles de moyens de production.

Lorsque la politique ou la stratégie de maintenance est définie on doit choisir ensuite la méthode la plus appropriée pour atteindre les objectifs fixés le choix de cette méthode dépendra également d'autres paramètres à savoir :

- la connaissance du matériel.
- la probabilité de pannes.
- la facilité d'intervention.
- la possession en stock de pièces de rechange.
- les moyens disponibles au moment de l'intervention.

II.1. Généralités :

II.1.1. Définition de la maintenance (d'après AFNOR NF X 60-010) [3] :

La maintenance est un ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou le rétablir dans un état qui lui permet d'accomplir la fonction requise.

II.1.2. Objectifs de la maintenance :

Les principaux objectifs de la maintenance sont:

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

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

II.1.3. les différentes formes de maintenance :

Il existe deux types principaux de maintenance :

- la maintenance corrective.
- la maintenance préventive.

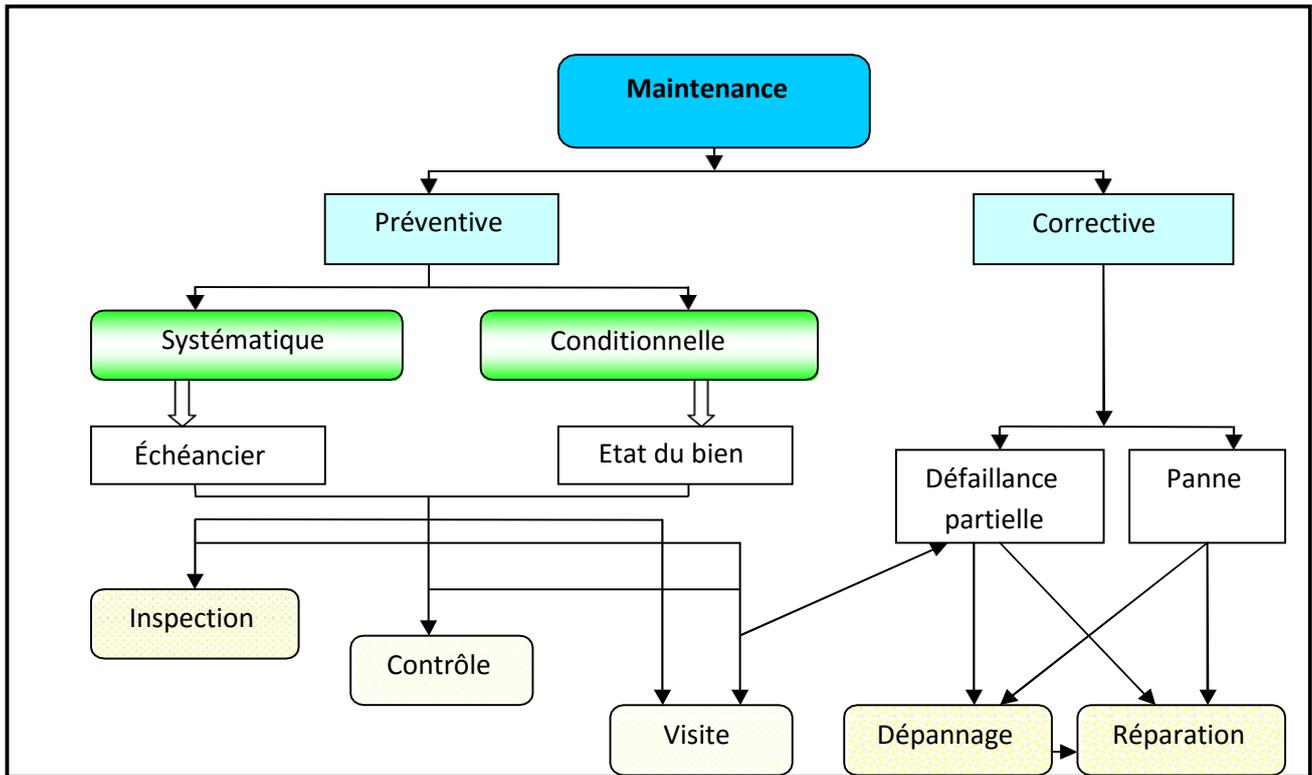


Fig.II.1 : Différentes formes de la maintenance

II.1.3.1. la maintenance corrective :

D'après la norme **AFNOR X 60-010**, la maintenance corrective est une maintenance effectuée après défaillance, consiste en une réparation ou un dépannage.

Les actions relatives à la maintenance corrective sont regroupées en trois sous-groupes:

- 1- sous-groupe d'action de localisation des pannes.
- 2- sous-groupe d'action de remise en état avec ou sans modification.
- 3- sous-groupe d'action de durabilité (contrôle du bon fonctionnement).

II.1.3.2. La maintenance préventive :

Selon la norme **AFNOR X60-010** C'est une maintenance effectuée selon des critères prédéterminés dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou dégradation d'un service. Donc, elle permet de éviter les défaillances du matériel en cours d'utilisation.

❖ Objectifs de la maintenance préventive :

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

II.1.3.3. Application des méthodes de maintenance :



Fig.II.2 : Application des méthodes de maintenance [6]

II.1.3.4. Types de la maintenance préventive [7] :**a) Maintenance préventive systématique :**

Maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage (d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité, la longueur et la masse des produits fabriqués, la distance parcourue, le nombre de cycles effectués, etc.).

Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle.

Cette méthode nécessite de connaître :

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

b) Maintenance préventive conditionnelle :

Maintenance prédictive (terme non normalisé). C'est la maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc...).

La maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendante de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel. Elle se caractérise par la mise en évidence des points faibles (surveillance de ces points et décision d'une intervention si certains seuils sont atteints).

Contrôles systématiques avec des moyens de contrôle non destructifs.

Tout le matériel est concerné ; cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement.

Les paramètres mesurés peuvent porter sur :

- Le niveau et la qualité de l'huile.
- Les températures et les pressions.
- La tension et l'intensité du matériel électrique.
- Les vibrations et les jeux mécaniques.
- Le matériel nécessaire pour assurer la maintenance préventive conditionnelle devra être fiable pour ne pas perdre sa raison d'être. Il est souvent onéreux, mais pour des cas bien choisis, il est rentabilisé rapidement.

❖ choix entre les méthodes de maintenance (préventives ou correctives)

Pour choisir, il faut connaître :

- Les objectifs de la direction.
- Les directions politiques de maintenance.
- Le fonctionnement et les caractéristiques du matériel.
- Le comportement du matériel en exploitation.
- Les conditions d'application de chaque méthode.
- Les coûts de maintenance.
- Les coûts de perte de production.

II.1.3.5. Opérations de la Maintenance préventive [8] :

Ces opérations trouvent leurs définitions dans la norme NF X 60-010 et NF EN 13306.

- **Inspection** : contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives; elle permet de relever des anomalies et d'exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de la production ou des équipements (pas de démontage).
- **Contrôle** : vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Ce contrôle peut déboucher sur une action de maintenance corrective ou alors inclure une décision de refus, d'acceptation ou d'ajournement.
- **Visite** : examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou une partie (visite limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance du premier et du deuxième niveau ; il peut également déboucher sur la maintenance corrective.
- **Test** : comparaison des réponses d'un système par rapport à un système de référence ou à un phénomène physique significatif d'une marche correcte.
- **Echange standard** : remplacement d'une pièce ou d'un sous-ensemble défectueux par une pièce identique, neuve ou remise en état préalablement, conformément aux prescriptions du constructeur.
- **Révision** : ensemble complet d'examens et d'actions réalisées afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité d'un bien. Une révision est souvent conduite à des intervalles prescrits du temps ou après un nombre déterminé d'opérations. Une révision demande un démontage total ou partiel du bien.

II.1.4. Les niveaux de la maintenance :

D'après la gravité de l'empanne on peut arriver à définir les cinq niveaux de la maintenance.

Tableau.II.1 : présentation des cinq niveaux de maintenance

Niveau	Types de travaux	Personnel Concerné	Exemples
1	réglages simples - pas de démontage ni ouverture	exploitant du bien	remise à zéro d'un automate après arrêt d'urgence
2	Dépannage par échange standard - opérations mineures de maintenance préventive	Technicien Habilité	changement d'un relais - contrôle de fusibles - réenclenchement de Disjoncteur
3	identification et diagnostic de pannes - réparation par échange standard - réparations mécaniques mineures - maintenance préventive (par ex. réglage ou réaligement des appareils de mesure)	Technicien Spécialisé	identification de l'élément défaillant, recherche de la cause, élimination de la cause, Remplacement
4	travaux importants de maintenance corrective ou préventive sauf rénovation et reconstruction - réglage des appareils de mesure	équipe avec Encadrement technique spécialisé	intervention sur matériel dont la remise en service est soumise à Qualification
5	rénovation - reconstruction - réparations importantes	moyens proches de la fabrication	mise en conformité selon réglementation d'équipements lourds

II.2. Pratique de la maintenance conditionnelle :

La maintenance conditionnelle comporte trois phases :

❖ **La détection du défaut qui se développe** : A la mise en route de chaque équipement, les principales caractéristiques de base des appareils sont enregistrées notamment la signature vibratoire et les divers paramètres de fonctionnement (température, performances ...).

Ces caractéristiques ou signature, serviront de référence pour suivre, par comparaison, l'évolution d'éventuels défauts ultérieurs.

❖ **L'établissement d'un diagnostic** : Dès qu'une anomalie est détectée par les outils que nous verrons dans le prochain chapitre, le responsable d'entretien aura la charge d'établir, dans la mesure du possible, un diagnostic concernant l'origine et la gravité du défaut constaté.

❖ **L'analyse de la tendance** : L'établissement du diagnostic permet à l'ingénieur de préjuger le temps dont il dispose avant la panne, pour laisser l'appareil fonctionner sous surveillance renforcée et prévoir la réparation.

II.2.1. La mise en place d'un programme de maintenance conditionnelle [3] :

❖ la technique et le choix du paramètre suivi

Les paramètres révélateurs de l'état de dégradation du bien, comme définit par la norme, peuvent être de deux types:

a) les paramètres de performance :

- Consommation énergétique
- Production (quantité et qualité d'un produit fini)

b) les paramètres de comportement :

- Les vibrations
- Le bruit
- La température (usure d'un roulement)
- L'huile (contrôle des dépôts significatifs de l'usure)

Dans le cas des machines tournantes, le paramètre le plus significatif de l'état d'une machine est le niveau vibratoire, l'augmentation du niveau vibratoire est révélatrice de la dégradation d'une machine.

❖ la périodicité des mesures

a) Avec un collecteur de données portable (maintenance "OFF LINE ") :

Elles seront différentes d'une machine à l'autre, et évolueront en trois phases :

1^{ère} phase :

Pendant la période de rodage d'une machine neuve, des mesures rapprochées sont réalisées (par exemple tous les 2 ou 3 jours), jusqu'à ce que les niveaux se stabilisent.

2^{ème} phase :

En fonctionnement normal, la périodicité peut être d'une semaine à plusieurs mois.

3^{ème} phase :

Lorsque le niveau commence à augmenter de manière continue, on réduira la périodicité, qui peut être ramenée à quelques heures si le cas évolue rapidement.

b) avec un système d'acquisition à poste fixe (maintenance "ON LINE ") :

Dans ce cas, les capteurs sont installés à poste fixe et la périodicité de mesure correspondra à la rapidité

❖ Les seuils d'alarme :

En cas de mesure de l'intensité vibratoire conformément aux normes, les niveaux maximaux admissibles sont déjà déterminés en fonction de différents critères, comme la puissance de la machine et le type de fondation

- **détection** ou action de déceler l'apparition d'une défaillance.
- **localisation** ou action conduisant à rechercher précisément les éléments par lesquels la défaillance se manifeste.
- **diagnostique** ou identification et analyse des causes de la défaillance.
- **dépannage, réparation** ou remise en état (avec ou sans modification).
- **contrôle** du bon fonctionnement après intervention.
- **amélioration éventuelle** : c'est à dire éviter la réapparition de la panne.
- **historique** ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure.

II.3. Surveillance :**II.3.1. Définition :**

La surveillance consiste à suivre l'évolution d'une machine par comparaison des relevés successifs de ses changements d'état. Une tendance à la hausse de certains indicateurs par rapport à des valeurs référence. Alerte généralement le technicien sur un dysfonctionnement probable. Puis intervenir par la détection et le classement des défaillances puis le diagnostic et la localisation des éléments défaillants et l'identification des causes premières.

II.3.2.Fonction :

La surveillance est composée de deux fonctions principales qui sont la détection et le diagnostique

La figure suivant nous montre ces composants :

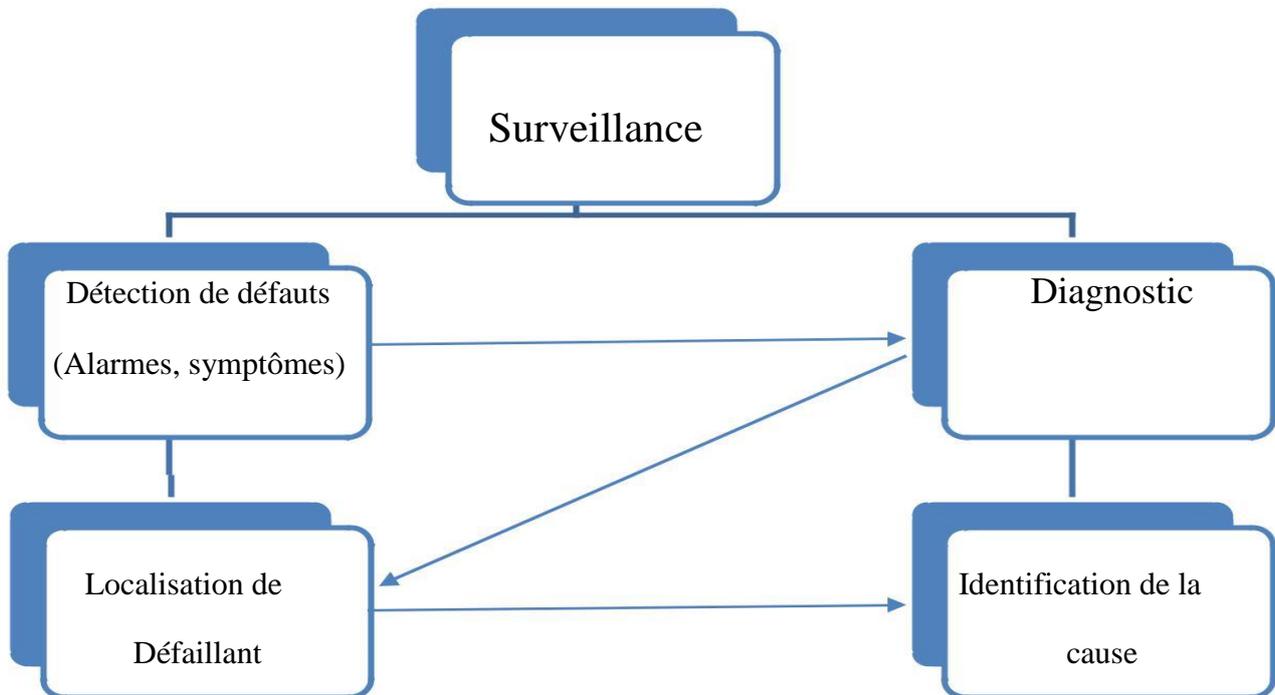


Fig.II.3 : fonctions de surveillance

II.3.3.Détection :

Avant de détecté une défaillance du système, il faut des gens capable de classer les situations observable comme étant normales ou anormales.

Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale [8].

II.3.4.Diagnostic :

Le diagnostic d'un système matériel désigne toute méthode permettant de déterminer si une machine est défaillante ou non et de déterminer l'origine de la panne à partir des informations relevées par observation, contrôles et tests. Le diagnostic permet d'identifier la cause ayant entraîné la défaillance. Une action sera reliée en intervenant sur la cause (actions Maintenance Corrective) ou sur la défaillance (Actions Maintenance palliative).

Cette fonction décompose en deux fonctions élémentaires : localisation et identification.

A partir de l'observation d'un état de panne (détection), la fonction diagnostic est chargée de retrouver la faute qui en est à l'origine [9].

a) Localisation

Elle permet de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant.

b) Identification de la cause

Cette dernière étape consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale. Ces causes peuvent être internes (sous-ensembles défaillants faisant partie de l'équipement), ou bien externes à l'équipement (l'environnement par exemple).

❖ Les différentes étapes techniques du diagnostic :

Les étapes techniques du diagnostic nécessaire à la conception sont définies dans la fig.II.3.

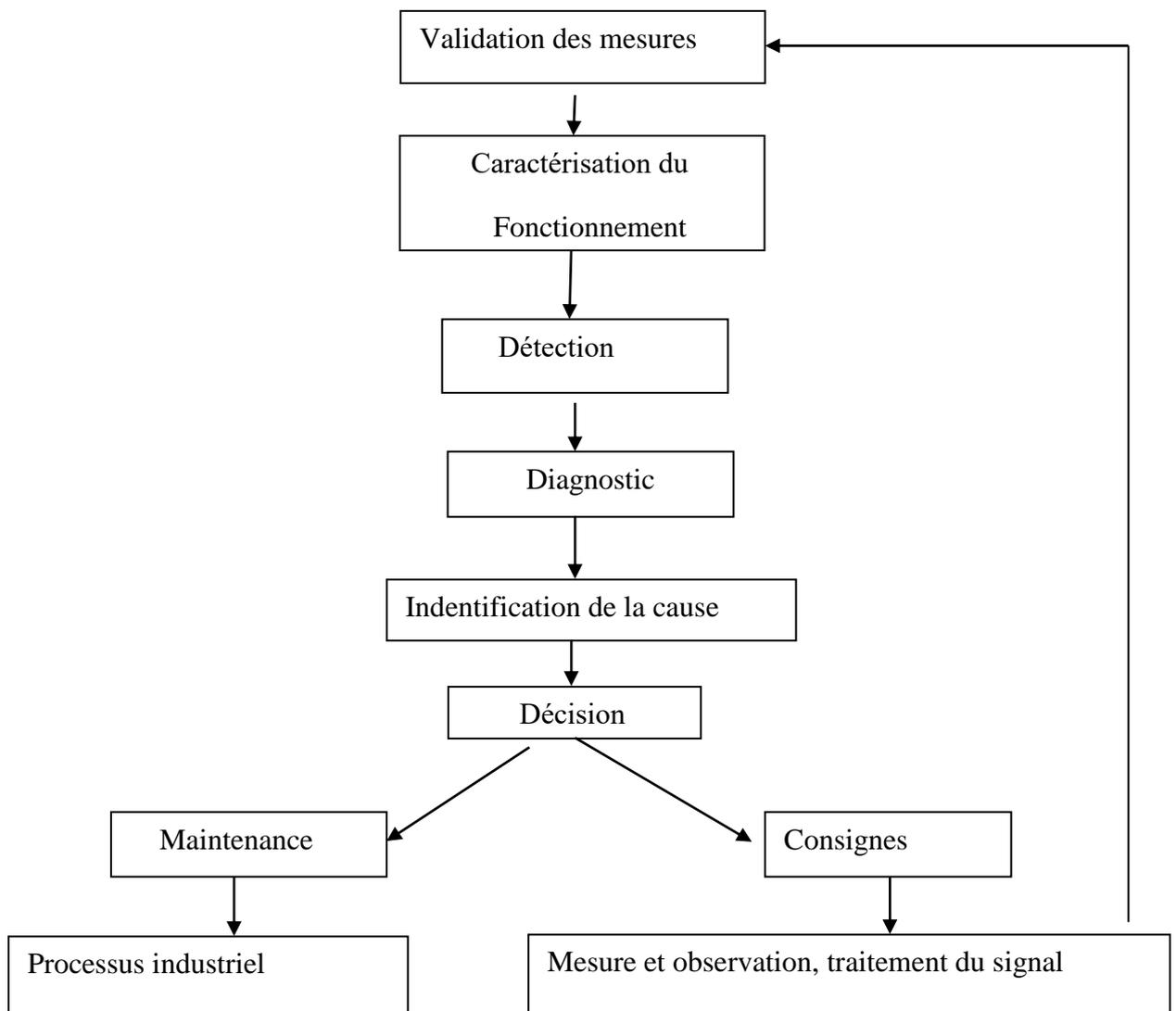


Fig.II.4 : Les différentes étapes techniques du diagnostic

II.4. Techniques de surveillance :

La surveillance des machines est basée sur trois techniques :

- 1) **La thermographie infrarouge** : cette technique permet de mesurer la température de composants sans contact.
Tout défaut se traduisant souvent par une élévation de la température. On peut ainsi mesurer les conséquences.
- 2) **L'analyse des huiles** : cette technique permet à la fois de surveiller l'huile d'une machine afin de ne la changer que lorsqu'elle est dégradée (surveillance de lubrifiant) mais également à l'instar d'une analyse de sang pour un être humain, de mesurer l'état de santé de la machine.
- 3) **L'analyse vibratoire** : cette technique est principalement utilisée pour la surveillance des machines tournantes. Toute machine tournante vibre. Ces vibrations sont les conséquences de défaut de la machine. Plus la machine ne vibre plus les défauts sont importants.

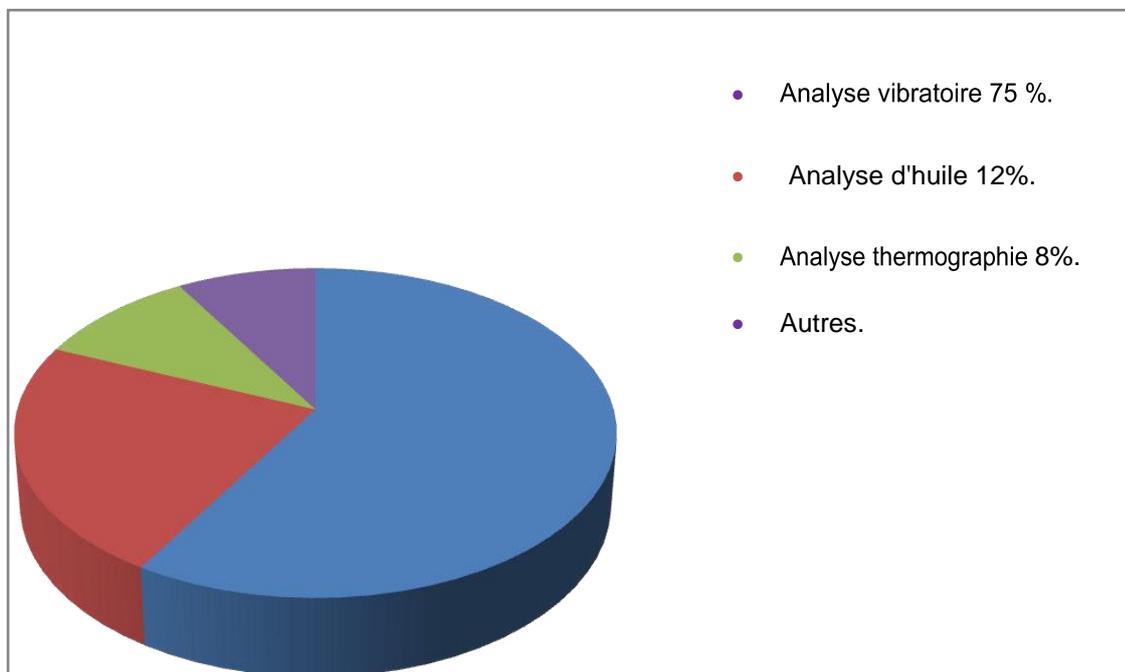


Fig.II.5 : Pourcentage des différentes techniques de maintenance conditionnelle.

II.5. La surveillance prédictive :

Comme pour la surveillance classique, la surveillance prédictive est un dispositif passif, informationnel qui analyse l'état présent et passé du système et fournit des indicateurs sur les tendances d'évolution future du système. La surveillance prédictive se compose de la **détection** prédictive et du Diagnostic prédictif [RAC06].



Fig.II.6 : Diagnostic prédictif dans l'architecture générale de la surveillance

❖ Détection prédictive :

Elle consiste à prédire une défaillance future. En d'autres termes, le but de la détection prédictive est de détecter une dégradation au lieu d'une défaillance pour le cas de la détection classique.

❖ Diagnostic prédictif (pronostic) :

Son objectif est d'identifier les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une dégradation particulière. La figure suivante nous permet d'éclaircir et de situer ce type de diagnostic dans la surveillance [10].

II.6. Les types de la surveillance :

Selon leur importances et leur criticités, 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 deux types de surveillance (voir figure III.6).

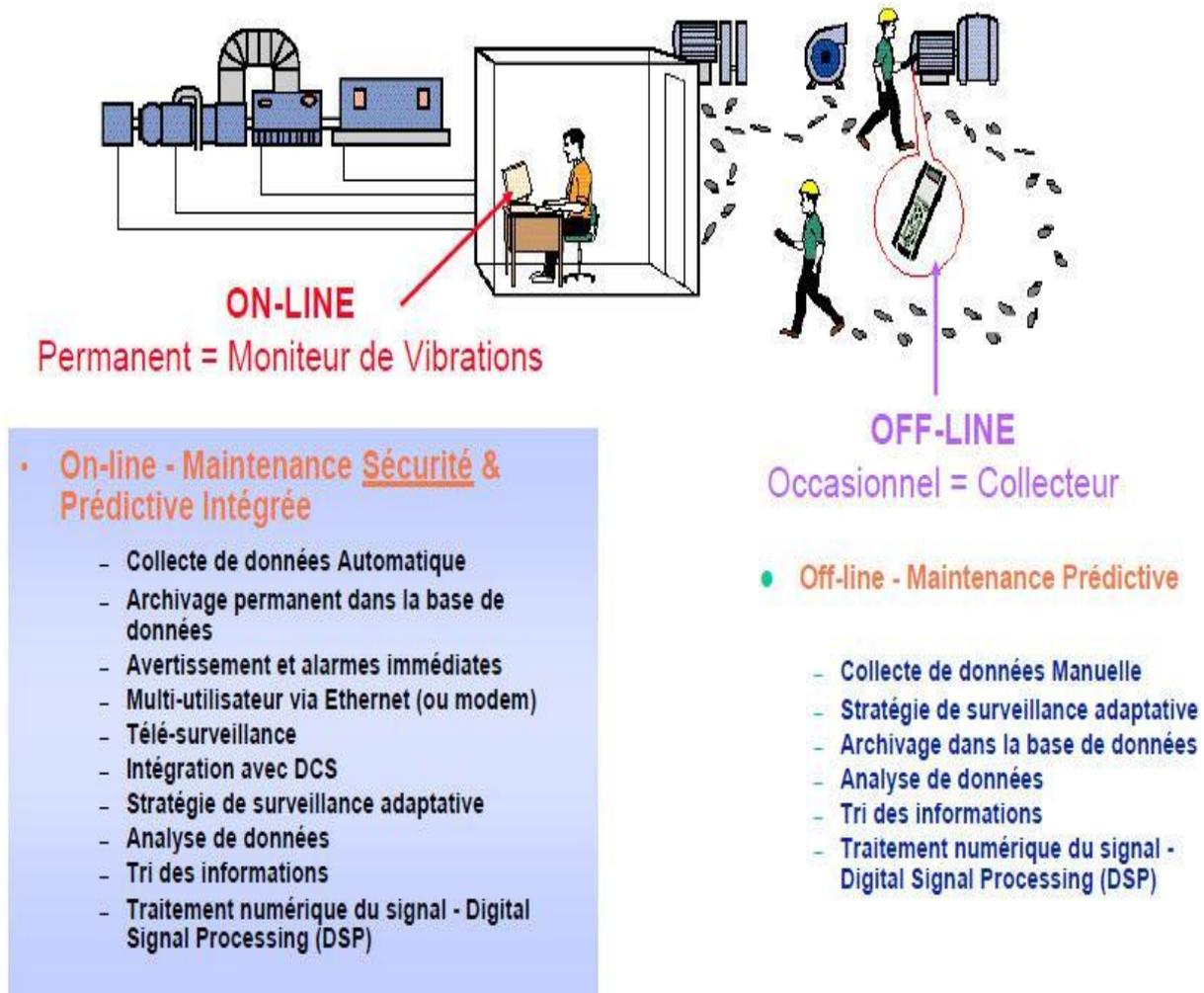


Fig.II.7 : Les types de surveillance des machines [6]

❖ La surveillance en continu (ON LINE) :

Les capteurs sont placés à demeure sur la machine surveiller en générale la surveillance des paramètres préalablement établis en salle de contrôle, cette méthode n'analyse pas l'évolution ou la tendance du défaut considéré, mais alerte si le défaut dépasse le seuil prédéterminé. Du fait de la multiplicité des capteurs, cette méthode nécessite un investissement initial important.

Cette technique se base, généralement, sur un diagnostic dit à base de modèles qui reposent 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.

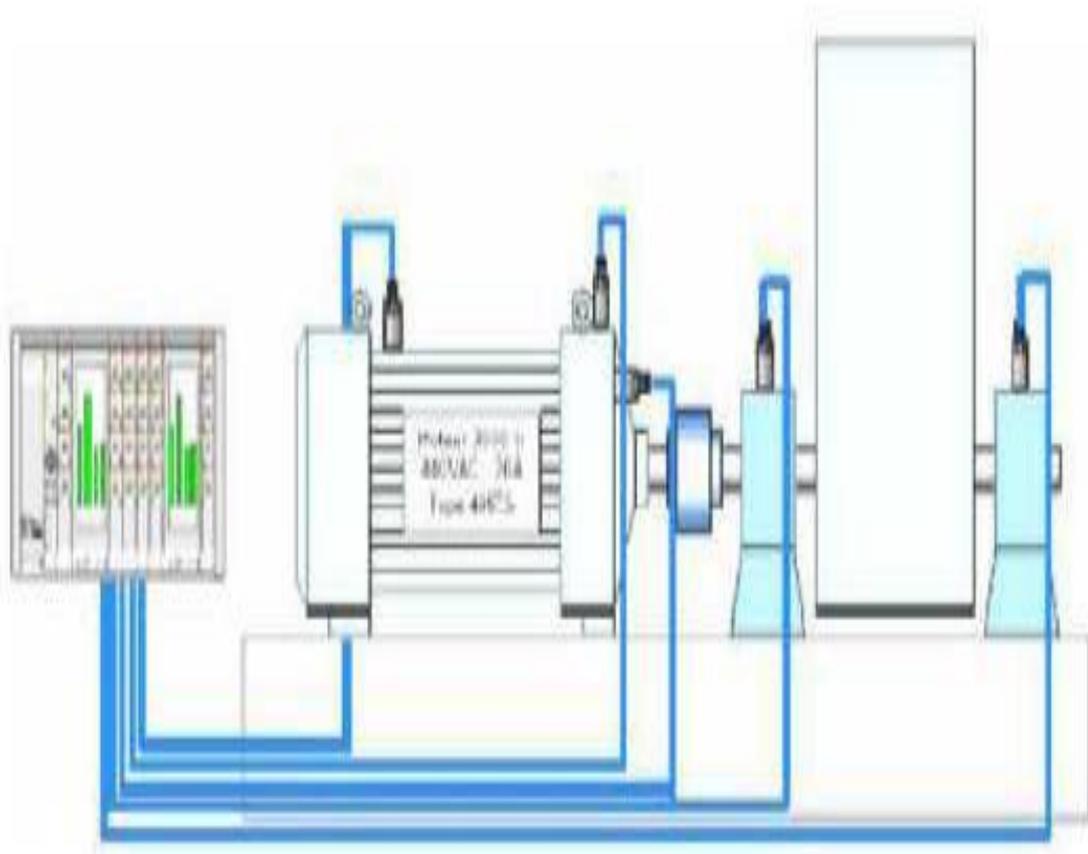


Fig. II.8 : Surveillance On-line (en ligne) ou suivi continu

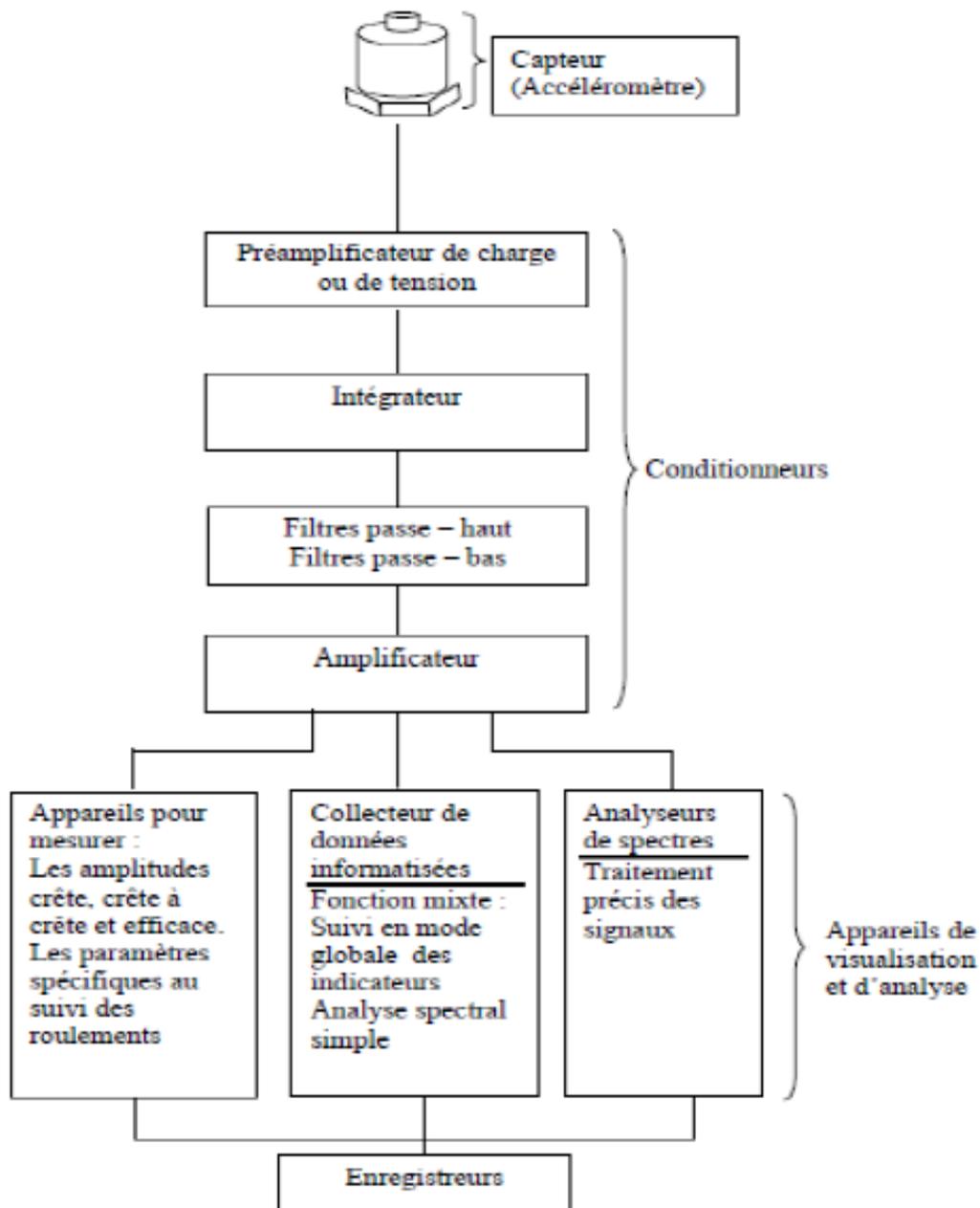
❖ **Chaîne de mesure vibratoire on-line :**

Fig. II.9 : La chaîne de mesure vibratoire ON- LINE

❖ **La surveillance périodique (OF LINE) :**

Les résultats obtenus à partir des mesures effectuées à des intervalles de temps réguliers (périodiquement) par des gens qui maîtrisent le système portable de plus en plus fréquemment informatisé, dans ce système de surveillance un seul technicien capable d'enregistrer précisément les paramètres désirés pour un grand nombre de machines. Cette méthode donne un avantage dans l'aspect économique (minimum de temps et faible coût), par ce qu'un seul capteur placé sur l'outil de mesure est suffisant [4].

- Au début, on charge l'outil de mesure (ONE PROD, SCHENCK) par tous les données que n'a besoin de faire après en vas partir au site (machine concerné) on fait les mesure après on va retourner à la salle pour décharger les données et transférer à un microordinateur permettant au responsable de maintenance de les stocker et analyser.
- La périodicité des contrôles est déterminée en fonction :
- Du nombre de machines à contrôler.
- Du nombre de points de mesure nécessaires.
- De la durée d'utilisation de l'installation.
- Du caractère<<stratégique>> de l'appareil considéré.
- Des moyens matériels dont dispose le service.

La figure II.9 représente un système de surveillance off-line ou suivi périodique.

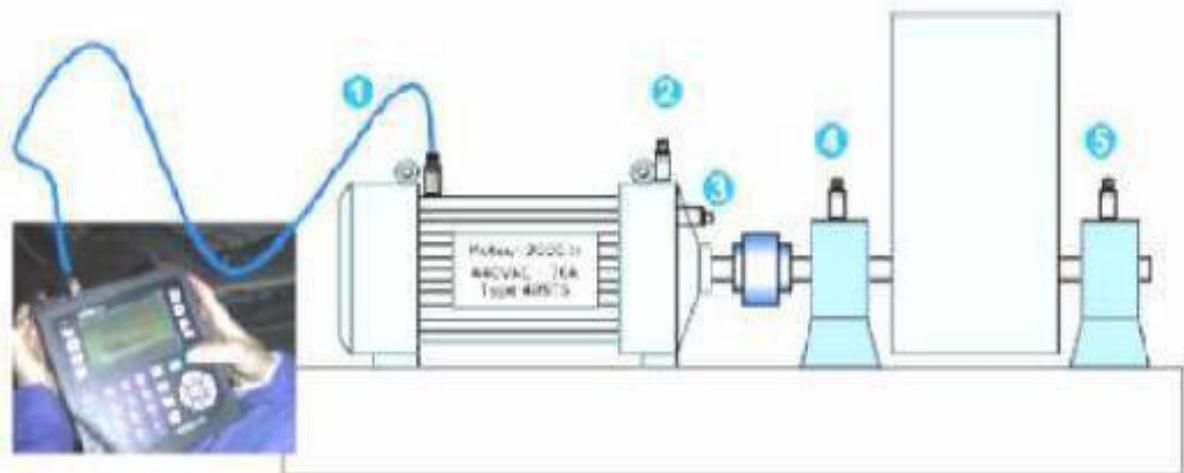


Fig.II.10 : Surveillance off-line ou suivi périodique [11]

II.7. Le Choix du type de surveillance :

Le choix du type de surveillance dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Les questions déterministes sur le choix du type de surveillance sont résumées sur la figure II.10.

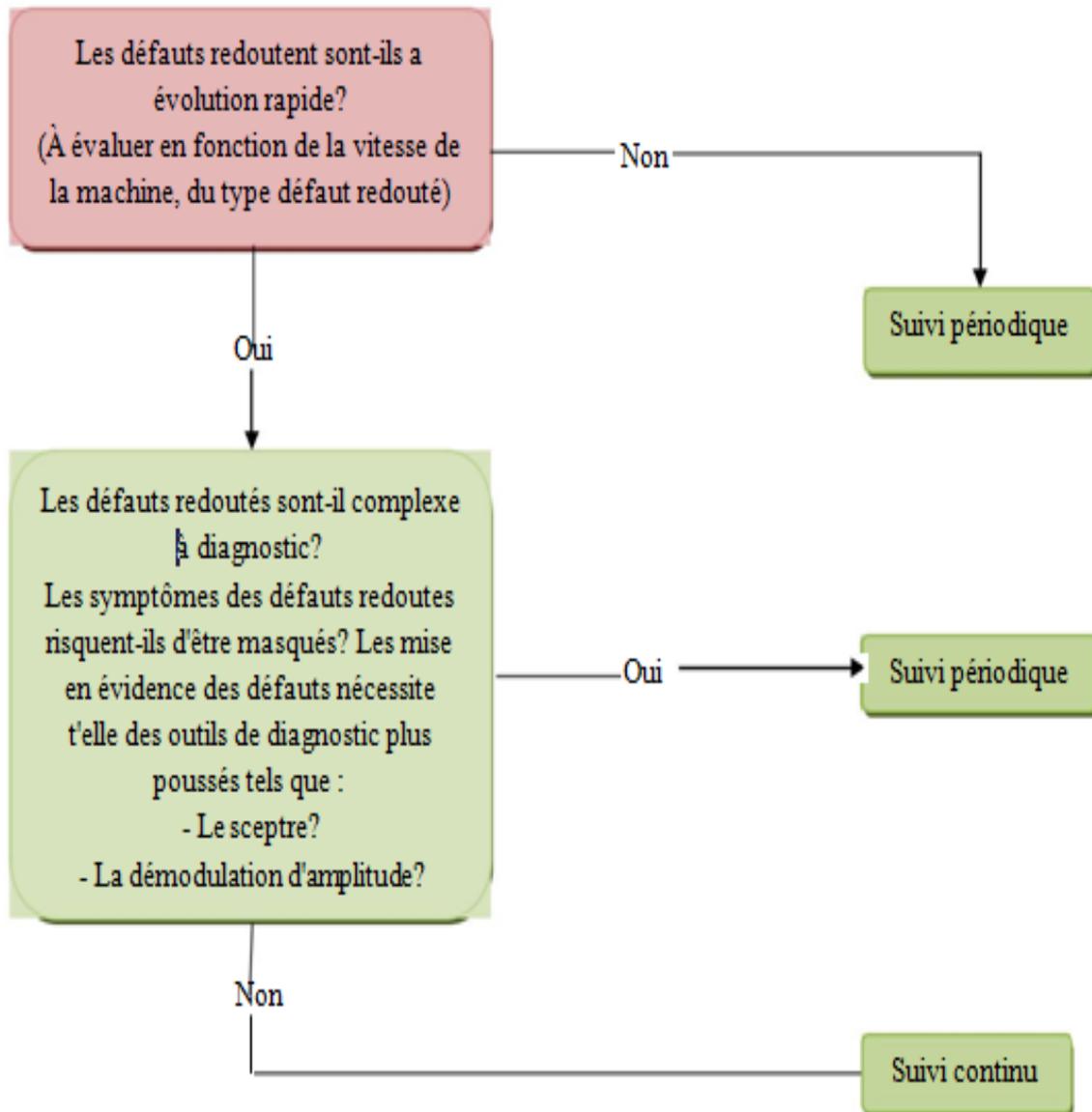


Fig. II.11 : Le choix du type de suivi

Conclusion :

La maintenance est une fonction complexe qui, selon le type de processus, peut être déterminante pour la réussite d'une entreprise. Les fonctions qui la composent et les actions qui les réalisent doivent être soigneusement dosées pour que les performances globales de l'outil de production soient optimisées.

Chapitre III

Notions d'analyse vibratoire

III. Introduction :

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

III.1.Définition d'une vibration :

D'après la norme NFE 90-001 la vibration est une variation avec le temps d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique lorsque la grandeur est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence.

III.2.Origine des vibrations :

III.2.1.Vibrations de machines voisines :

Le sol et les socles de fixation peuvent transmettre les vibrations d'une machine à l'autre. Si l'on arrête la machine voisine mise en cause, le pic spectral disparaît.

III.2.2.Vibrations d'origine électrique :

Les vibrations des parties métalliques du stator et du rotor sous l'excitation de champs électromagnétiques produisent des pics à des fréquences égales à celle du secteur et à ses harmoniques ; l'augmentation de ces pics peut être le signe de la dégradation du moteur.

III.2.3.Résonance de la structure ou du rotor :

Chaque sous-ensemble de la machine possède une fréquence propre de résonance qui est fonction de paramètres multiples tels que la rigidité, la masse, la forme géométrique. Si une excitation quelconque possède une fréquence voisine de celle de la résonance, un pic apparaît dans le spectre.

III.3. Les différentes formes de vibration : [12]

On classe généralement les vibrations d'après l'évolution de la variable considérée dans le temps (**périodicité**). On distingue ainsi les vibrations :

- harmoniques
- périodiques
- apériodiques

III.3.1. Vibrations Harmoniques :

Une vibration harmonique est une vibration périodique particulière dont le diagramme amplitude temps est représenté par une sinusoïde (figure.III.1)

Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle qui est générée par le balourd d'un rotor en mouvement.

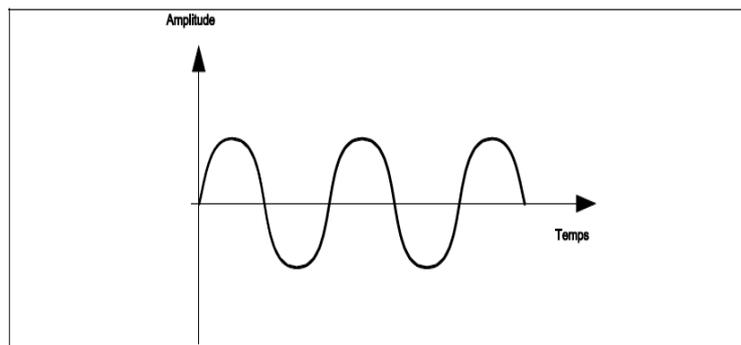


Fig.III.1 : Vibration harmonique

Elle est décrite par l'équation suivante :

$$X(t) = X \sin(\omega t + \phi) \dots\dots\dots (III.1)$$

avec :

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

f = fréquence du mouvement

ϕ = phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps Ces notions.

III.3.2. Vibration Périodique :

Une vibration périodique est telle qu'elle se reproduit exactement après un certain temps appelé période (figure III.2).

Une telle vibration est créée par excitation elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquemment rencontré sur les machines.

Une vibration périodique est la composée de plusieurs vibrations harmoniques.

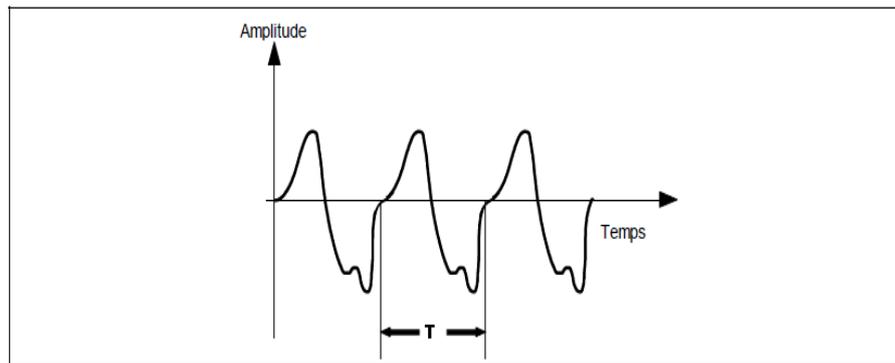


Fig.III.2 : Vibration périodique

III.3.3. Vibrations Apériodiques :

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

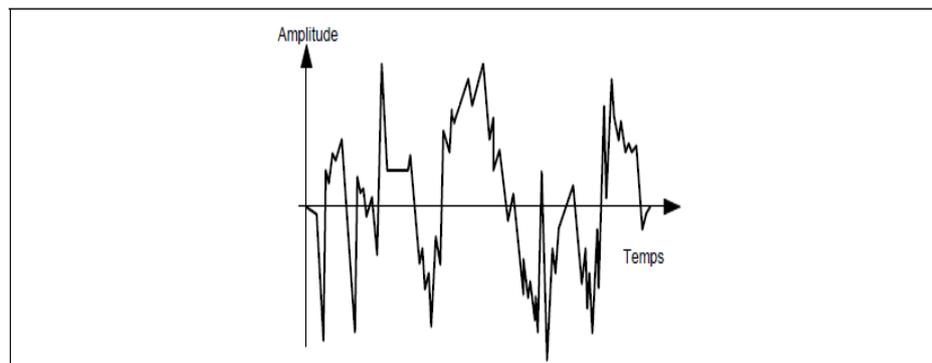


Fig.III.3 : Vibration Aléatoire

Elle décrite par l'équation :

$$X(t) = \sum_{i=1}^{\infty} [X_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)] \quad \dots \dots \dots \text{(III.2)}$$

III.4 Importance des vibrations : [14]

L'organigramme suivant indique l'importance des vibrations pour relever

l'état de fonctionnement de la machine :

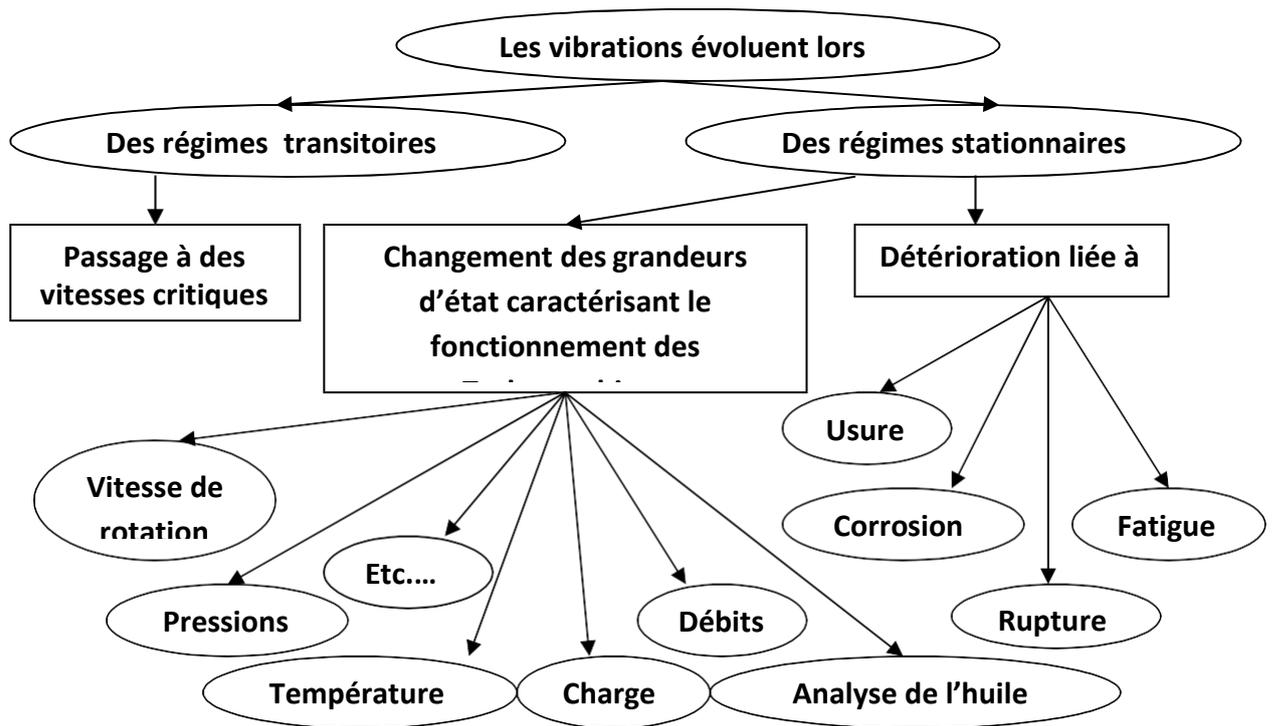


Fig.III.4: Importance des vibrations

III.5. Analyse spectrale :

III.5.1. Définitions :

❖ **L'analyse spectrale** : repose sur une analyse systématique du signal vibratoire pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela demande une connaissance des caractéristiques cinématiques des différents organes constitutifs, de leur vitesse de rotation ou mieux encore de leur fréquence de mouvement.

❖ **Un spectre** : est un graphe dans lequel sont représentées les amplitudes et les fréquences de toutes les composantes vibratoires élémentaires induites par le fonctionnement d'une machine. chaque composante est représentée un segment verticale appelé raie dont l'abscisse représente la fréquence et l'ordonnée, l'amplitude. Notons que dans certains cas (raies confondues et dépassant largement du signal,...) nous parlons plus de rais, mais de pic.

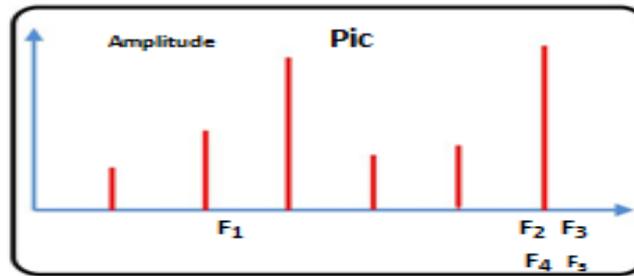


Fig. III.5 : Exemple d'un spectre [13]

❖ **Le cepstre :**

Le Cepstre est un outil mathématique qui permet la mise en évidence des périodicités dans un spectre en fréquence. Il résulte de la transformée de Fourier inverse d'un spectre de puissance. Le cepstre associe à une famille de raies harmoniques ou un ensemble de bandes latérales une raie unique dans sa représentation graphique. Il est utilisé pour le diagnostic des phénomènes de chocs périodiques (desserrages, défauts de dentures, écaillage de roulements) et des phénomènes modulation en fréquence ou en amplitude.

La figure [Fig.III.6] montre le spectre d'un choc du à une usure d'accouplement et le cepstre correspondant [13].

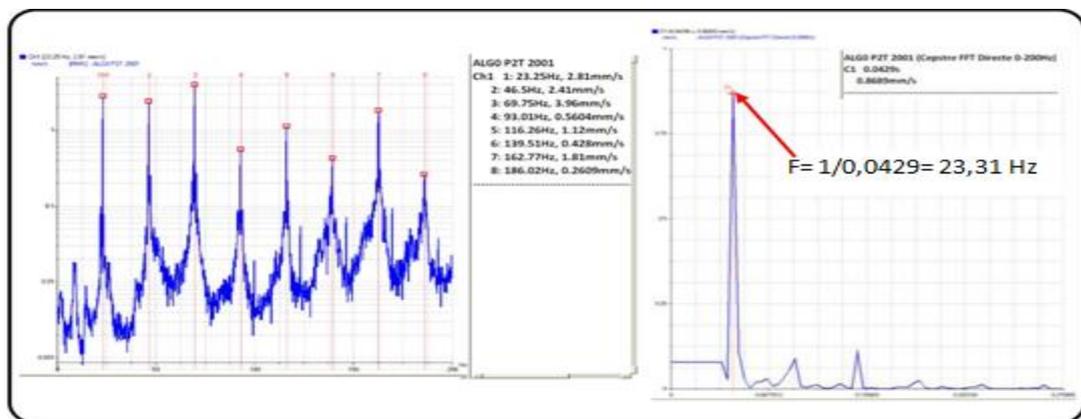


Fig. III.6 : spectre d'un choc du à une usure d'accouplement et le cepstre correspondant

III.6.Représentations d'un signal vibratoire :

Un signal sinusoïdal mathématique est une équation de forme [15]

$$X(t) = X \sin (\omega t + \phi) \dots \dots \dots \text{(III.3)}$$

III.6.1.Représentation temporelle :

La première façon de représentation du signal vibratoire délivré par un capteur, est la représentation en fonction du temps (représentation **temporelle**). Cette représentation est utilisée pour suivre le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ces paramètres de fonctionnement (étude de la vibration d'une turbine lors de sa décélération). Ce type de représentation, aisé à exploiter lorsque le signal est simple (vibration sinusoïdale induite par un balourd) [figure. III.7] devient vite inexploitable lorsque le signal a pour origine des sollicitations multiples [figure. III.8].

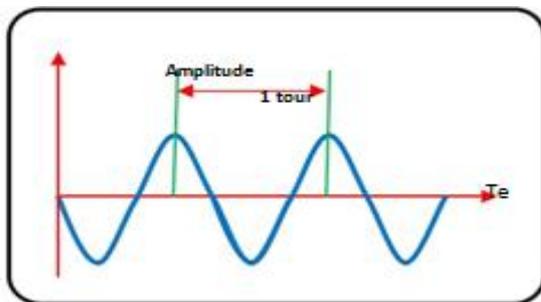


Fig.III.7 : Signal vibratoire sinusoïdal

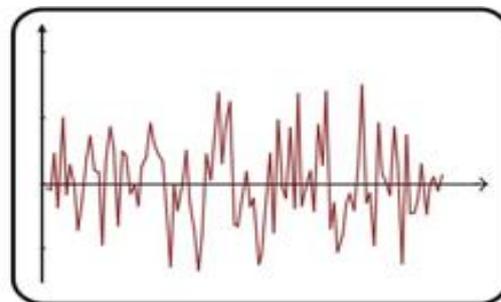


Fig.III.8 : Signal vibratoire complexe

génère d'un balourd

II.6.2.Représentation vectorielle :

Cette représentation est base sur des vecteurs.

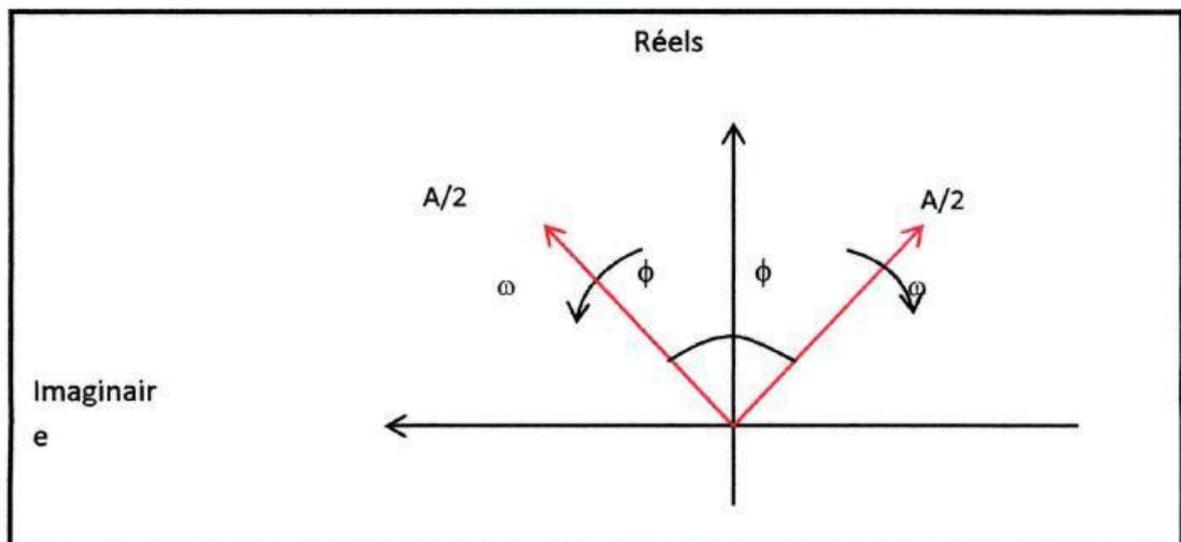


Fig.III.9 : Représentation vectorielle

III.6.3.Représentation spectrale :

Le deuxième type de représentation est la représentation en fonction de la fréquence dans un diagramme **amplitude fréquence** appelé **spectre** : représentation **spectrale**. Le signal complexe $F(t)$ [Figure III.10], difficile à interpréter, est décomposé en une série de composantes sinusoidales élémentaires définies par leurs amplitudes et leurs fréquences [13].

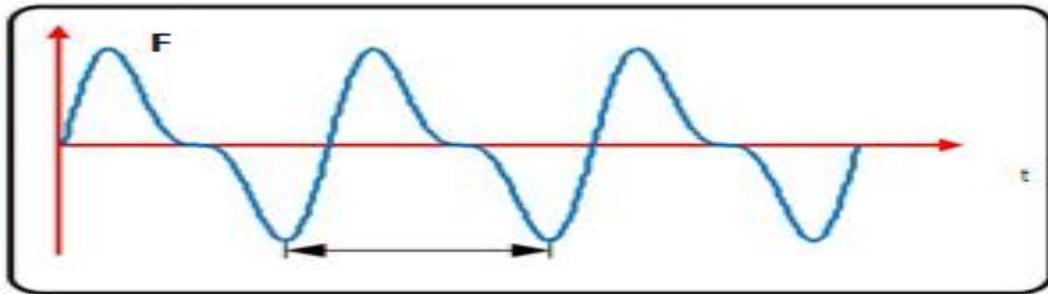


Fig.III.10 : Le signal périodique complexe $F(t)$

L'outil mathématique utilisé est la décomposition en série de fourrier [Figure III.11]

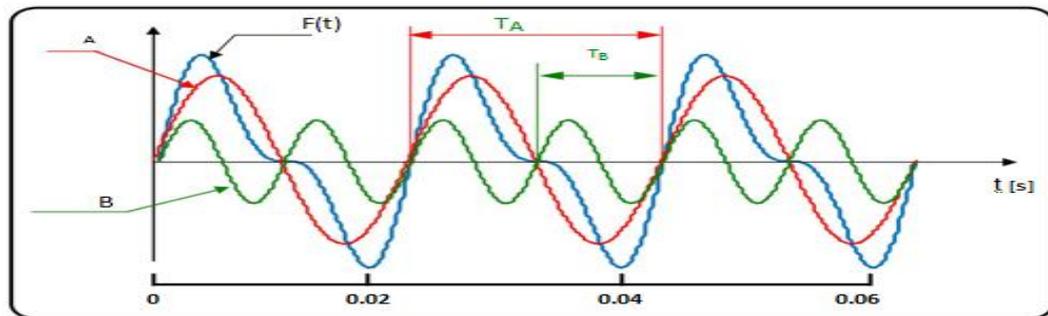


Fig.III.11 : Décomposition en série de Fourier de la fonction $F(t)$

III.7.Classification des signaux [14] :

On peut envisager plusieurs modes de classification pour les signaux suivant leurs propriétés.

III.7.1.Classification phénoménologique :

On considère la nature de l'évolution du signal en fonction du temps. Il apparaît deux types de signaux :

❖ Les signaux déterministes :

Ou signaux certains, leur évolution en fonction du temps peut-être parfaitement modélisé par une fonction mathématique. On retrouve dans cette classe les signaux périodiques, les signaux transitoires, les signaux pseudo-aléatoires, etc....

❖ Les signaux aléatoires :

Leur comportement temporel est imprévisible. Il faut faire appel leurs propriétés statistiques pour

les décrire. Si leurs propriétés statistiques sont invariantes dans le temps, on dit qu'ils sont stationnaires.

III.7.2. Classification morphologique :

On distingue les signaux a variable continue des signaux a variable discrète aussi ceux dont l'amplitude est discrète ou continue.

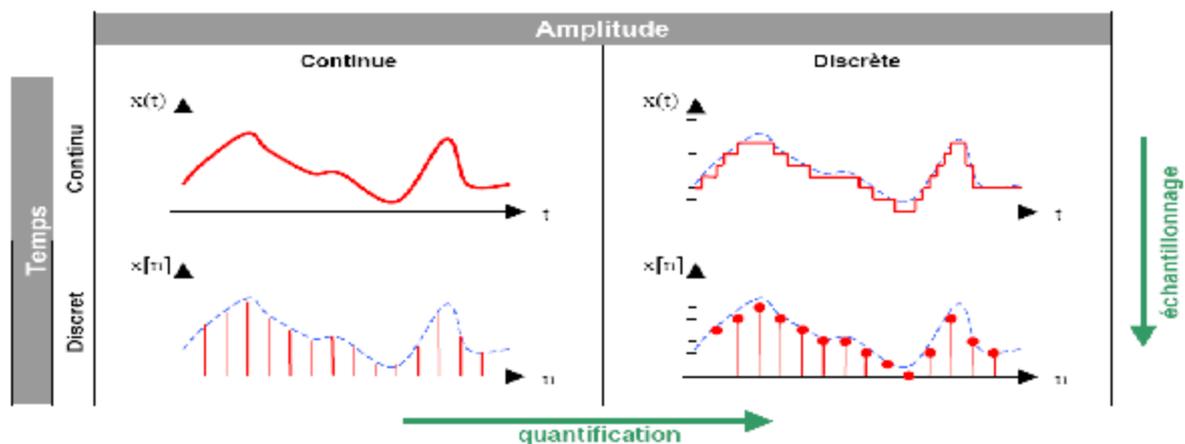


Fig. III.12 : Classification morphologique des signaux [14]

On obtient donc 4 classes de signaux [14] :

- ✓ Les signaux analogiques : dont l'amplitude et le temps sont continus.
- ✓ Les signaux quantifiés : dont l'amplitude est discrète et le temps continu.
- ✓ Les signaux échantillonnés : dont l'amplitude est continue et le temps discret.
- ✓ Les signaux numériques : dont l'amplitude et le temps sont discrets.

III.8. Transformée de Fourier [15] :

En fonction du type de signal, on dispose 3 outils mathématiques pour calculer le spectre d'un signal $x(t)$:

III.8.1. Décomposition en série de Fourier :

La décomposition en série de Fourier est utilisée pour calculer le spectre des signaux le périodique sa représentation est donnée par :

$$x(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} C_i e^{j.2\pi.f_i.t} \dots\dots\dots (III.4)$$

Où C_i les coefficients de Fourier définies par :

$$C_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x(t). e^{-2\pi.f_i.t} dt \dots\dots\dots (III.5)$$

III.8.2. Transformée de Fourier :

Pour les signaux non périodique on utilise la transformé de Fourier qui est donné par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j.\omega.t} dt \dots\dots\dots (III.6)$$

III.8.2.1. Transformée de Fourier discret (TFD) :

La transformation de Fourier discrète s'introduit quand il s'agit de calculer la transformé de Fourier d'une fonction à l'aide d'un calculateur numérique. Le traitement commence par le remplissage d'une mémoire de taille donnée (généralement une puissance de 2. Par exemple un bloc de $N = 1024 = 2^{10}$ échantillons temporels sont ensuite passés dans un algorithme de calcul FFT (Transformé de Fourier rapide). La transformé de Fourier discrète $S(f)$ est défini par :

$$X(k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j.2.\pi.\frac{nk}{N}} \dots\dots\dots (III.7)$$

III.8.2.2. Transformée de Fourier rapide (TFR) :

C'est une transformé basée sur un algorithme de calcul rapide de la TFR. L'algorithme de base de cette transformé utilisée un nombre de points N égale a une puissance de 2.

Ce qui permet d'obtenir un gain en temps de calcul, par rapport à un calcul avec la TFD, de :

$$G_{\text{ain}} = \frac{N}{\text{Log}_2(N)} \dots\dots\dots(\text{III.8})$$

Cette transformé de Fourier rapide est très utilisée lorsqu'il est indispensable d'obtenir une analyse fréquentielle en ligne dans certains processus à travers d'une fenêtre glissante d'observation.

III.9. Etude des Caractéristiques vibratoires :

Lorsque on parle sur un phénomène vibratoire on se base sur trois caractéristiques principal sont [14], [16]:

- Amplitude
- Fréquence
- phase

1) Amplitude : C'est le déplacement maximal que subit le corps en mouvement. En mesure vibratoire, on utilise couramment trois modes de détection [17] :

❖ Valeur Efficace Jeff :

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

$$X_{\text{eff}} = \sqrt{X_{1\text{eff}}^2 + X_{2\text{eff}}^2 + \dots + X_{n\text{eff}}^2}$$

ou

$$X_{\text{eff}} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \right)} \dots\dots\dots (\text{III.9})$$

Dans la littérature, X_{eff} peut également être notée (**Rms=Rootmean Square**)

❖ **Valeur maximale X_c :**

C'est la valeur instantanée définie par la plus grande valeur positive atteinte. Elle est appelée aussi valeur Crête (X_c).

❖ **Valeur Crête à Crête :**

C'est la grandeur d'un extrême positif à un extrême négatif d'un mouvement. Dans le cas où le signal est symétrique, cette valeur sera égale à deux fois la valeur maximale (X_{cc}).

❖ **Valeur moyenne :**

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

$$\text{Moyen} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \dots\dots\dots(\text{III.10})$$

• **Relations entre les Différents Modes De Détection :**

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

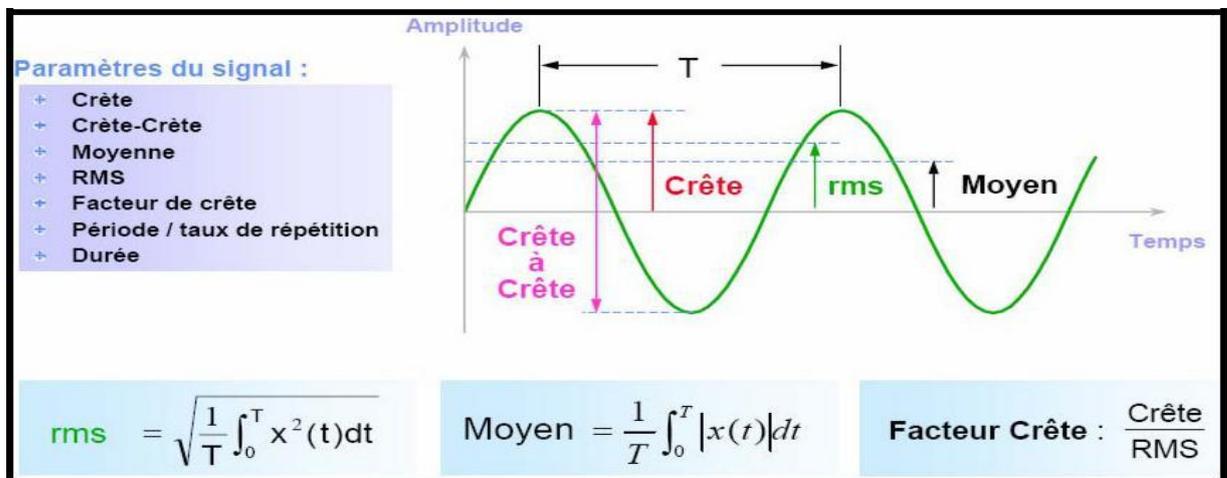


Fig. III.13 : Les modes de détection [17]

2) **Fréquence :** Elle représente le nombre d'oscillations ou de cycle par seconde. C'est aussi l'inverse de la période.

3) **phase :** Elle permet de déterminer la position d'un corps à un instant donné.

III.10. Les grandeurs de mesure d'une vibration mécanique :

Dans le domaine des vibrations mécaniques, on se base généralement de mesurée trios grandeurs : Déplacement- vitesse- Accélération.

❖ **Déplacement vibratoire x (t) :**

Le déplacement x (t) d'une vibration est décrit par l'équation:

$$x(t) = x \sin(\omega t + \varphi)_{\mu\text{m}} \dots \dots \dots \text{(III.11)}$$

❖ **Vitesse vibratoire v (t) :**

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

$$v(t) = \frac{d(x)}{dt} = x \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi) \qquad v(t) = v \cdot \sin(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2})_{\text{mm/s}} \dots \dots \dots \text{(III.12)}$$

❖ **Accélération vibratoire a(t) :**

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

$$a(t) = \frac{d(v)}{dt} = v \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) \qquad a(t) = a \cdot \sin(\omega t + \varphi + \pi)_{\text{m/s}^2} \dots \dots \dots \text{(III.14)}$$

L'unité d'accélération de la pesanteur [g],

Relations entre **A, V et S**

$$x = \frac{v}{\omega} = \frac{a}{\omega^2} \qquad v = s \cdot \omega = \frac{a}{\omega} \qquad a = v \cdot \omega = s\omega^2 \dots \dots \text{(III.15)}$$

L'équation (III.12) montre que l'on choisira préférentiellement :

- La grandeur déplacement pour détecter des phénomènes à basse fréquence ($\omega = 2\pi f$ petit)
- La grandeur accélération pour détecter des phénomènes à haute fréquence ($\omega = 2\pi f$ grand)
- La grandeur vitesse pour détecter des phénomènes se situant dans une large gamme de fréquence ($\omega = 2\pi f$ moyen).

III.11. Les capteurs pour la détection des vibrations :

Pour collecter les données nécessaires à la mesure et à l'analyse, on utilise des capteurs dont le rôle est de transformer l'énergie mécanique dispensée par la machine en un signal électrique proportionnel mesurable de manière reproductible. Il existe trois types de capteurs [14].

III.11.1. Les capteurs de déplacement [17] :

Capteurs sans contact à courants de Foucault. Réservées à la mesure relative d'arbre (paliers fluides). Le capteur est constitué d'une bobine et d'un câble de raccordement. Ce câble présente le plus souvent une interruption (connecteur).

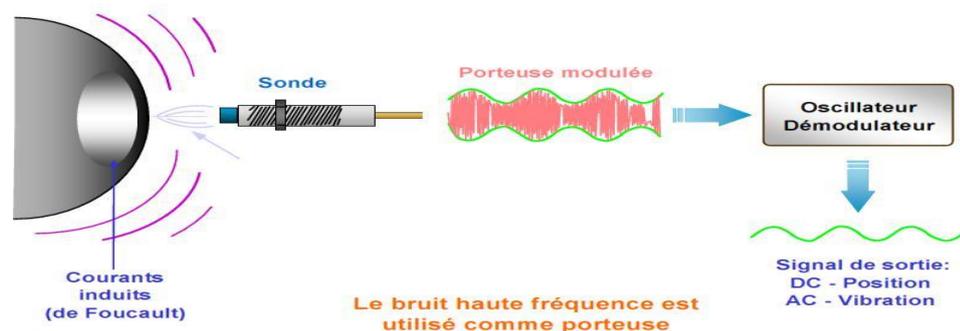


Fig. III.14 : Capteur de déplacement [6].

La bobine et le conditionneur forment ensemble un circuit électronique oscillant. La figure montre que le câble du capteur aussi bien que le câble prolongateur sont des composantes figées du circuit oscillant. Une modification de la longueur totale de ces câbles conduit automatiquement à une variation de ses paramètres électrique : résistance et capacité.

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

Il existe des capteurs de déplacement :

- Inductifs
- Capacitifs
- A courant de Foucault

C'est ce dernier principe qui s'est imposé dans le monde entier.

Le capteur qui mesure le déplacement d'après le principe de courant de Foucault est constitué d'une bobine et d'un câble de raccordement. Ce câble, pour des raisons d'ordre pratique, présente le plus souvent une interruption (connecteur) [3].

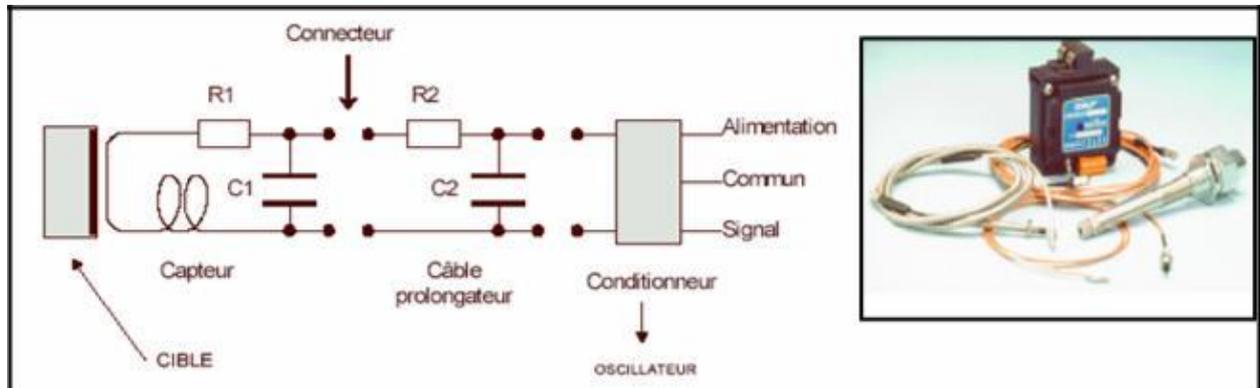


Fig. III.15 : Capteur de déplacement (courants de Foucault) [6]

❖ Plage de fréquence :

Le principe de mesure à courant de Foucault présente généralement une plage de réponse en fréquence allant de 0 à 1000 Hz.

III.11.2. Capteurs de vitesse :

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.

❖ Principe électrodynamique [6]

Le principe électrodynamique est le plus robuste et facile à mettre en œuvre. Par contre, il est adapté aux machines à faible vitesse. Un aimant permanent (1) génère une induction magnétique constante B . Les lignes de champs se referment par l'intermédiaire du boîtier (3). Une bobine (4) suspendue par des membranes (5) et (6) peut se déplacer dans la direction des lignes de champs. Une force électromotrice ($f.e.m$) d'induction e est générée. Elle est le produit de la vitesse de vibration, de l'induction magnétique B et de la longueur l de l'enroulement.

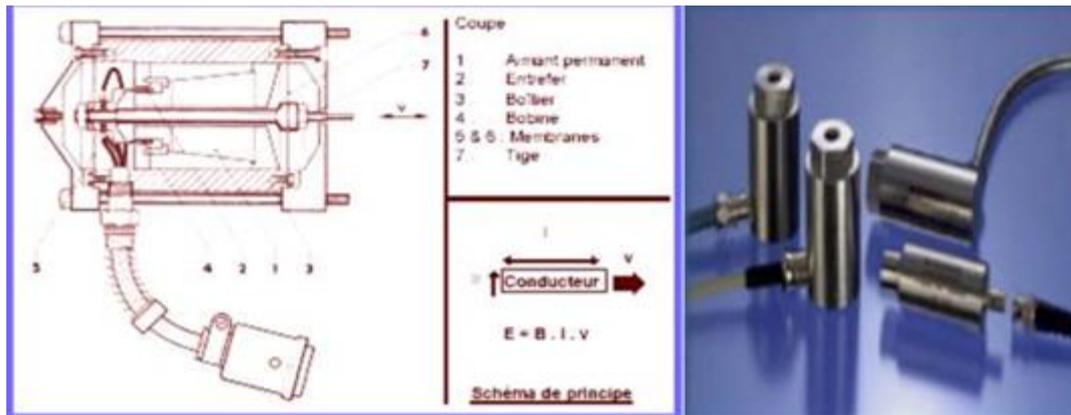


Fig. III.16 : Capteur de vitesse (principe électrodynamique)

III.11.3. Capteurs d'accélération (Accéléromètres) :

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. Typiquement, cette capacité est de 160dB. [18]

❖ Mesure des accélérations vibratoires d'après le Principe Piézo-électrique :

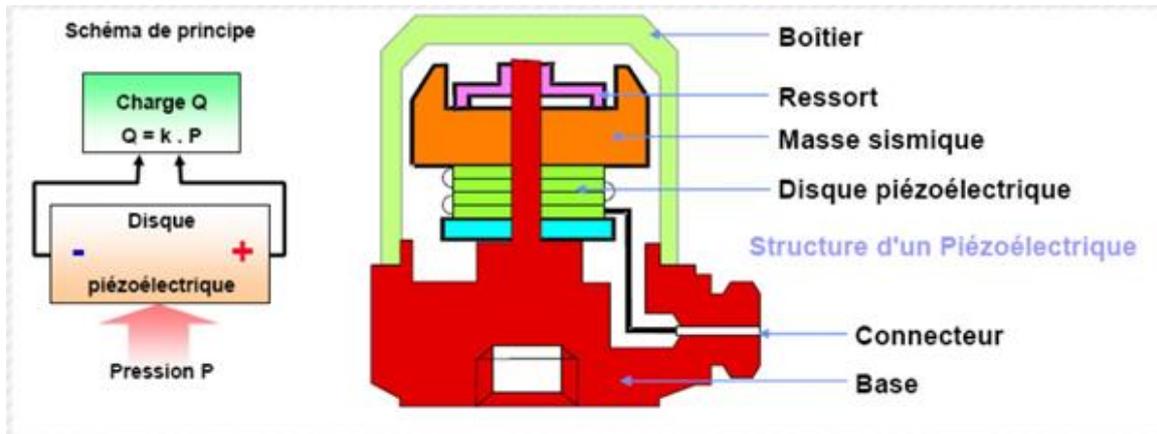


Fig. III.17 : Accéléromètre fonctionnant sur le principe piézo-électrique. [17]

III.12. Les vibrations relatives et vibrations absolues :

III.12.1. Vibration absolue :

La vibration absolue est le mouvement vibratoire d'une partie non rotative de la machine par rapport à un espace lié à la terre.

❖ Mesure des vibrations absolues :

La mesure s'effectue au moyen des capteurs sismiques appelés accéléromètre ou vélocimétrie qui a un axe de sensibilité pour avoir la mesure des vibrations de rotor.

❖ Emplacement des capteurs :

Se fait sur chaque palier de la machine en axiale et radiale afin de pouvoir déceler le niveau maximal de vibration.

III.12.2. vibration relative :

La vibration relative est le mouvement d'une partie rotative de la machine par rapport à une partie non rotative.

❖ Mesure de vibration relative :

Se fait principalement perpendiculairement à l'axe de rotation de l'arbre (vibration radiale) et accessoirement dans le sens de l'axe de rotation (vibration axiale) deux capteurs sont placés à proximité de chaque paliers selon deux axes perpendiculaires afin de pouvoir déceler le niveau maximale de vibration.

❖ Emplacements des capteurs :

Les capteurs de proximité peuvent être montés directement sur les paliers à l'intérieur des enveloppes et qui sont généralement disposés à plus au moins 45° de la verticale entre deux capteurs.

III.13. Points de mesure :

L'implantation de l'accéléromètre sur les machines est, elle aussi, très importante. Chaque campagne de mesures doit être effectuée en des points précis et toujours les mêmes. En effet, un phénomène mécanique peut donner des images vibratoires sensiblement différentes en fonction du point de mesure. On essaiera toujours de rapprocher le plus possible les points de mesure des paliers. Cela permet d'obtenir les images les plus fidèles des défauts mécaniques (bande passante de la chaîne d'acquisition maximale, amortissement minimisé). Pour avoir une image complète des vibrations (en trois dimensions), il faut prendre les mesures selon trois directions perpendiculaires sur chaque palier de la machine surveillée : deux directions radiales (horizontale et verticale) et une direction axiale

III.13.1. Mesures des déplacements radiaux :

La prise des mesures de vibrations radiales s'effectue à l'aide de deux capteurs fixés à demeure au travers du palier et disposés sur sa périphérie, suivant un angle voisin de 90° (Figure. III.18)



Fig. III.18 : Mise en place des capteurs de Déplacement sur le palier d'une turbomachine

III.13.2. Mesures des déplacements axiaux :

Pour obtenir ces mesures, la sonde sera placée en un point fixe parallèlement à l'axe du rotor et visera soit l'extrémité de l'arbre soit un épaulement.

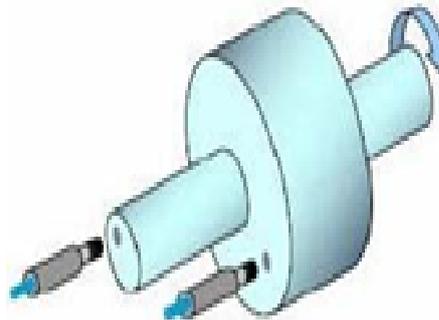


Fig. III.19 : mesure les déplacements axiaux

III.13.3. Classement « VIS » des machines [19] :

- ❖ **Machines Vitales** : machines non doublées dont la panne entraîne l'arrêt de la production. Les frais et les délais de remise en état sont importants. Les pertes de production sont inacceptables.
- ❖ **Machines importantes** : machines doublées ou non dont la panne entraîne une baisse sensible de la production. Les frais et délais de remise en état sont importants, les pertes de production aussi.
- ❖ **Machines Secondaires** : machines doublées ou dont une panne ne remet pas en cause les capacités de production.

III.14. détermination pratique des seuils [14] :

Une mesure de vibrations doit être considérée comme relative. En effet, elle n'a aucune signification lorsqu'elle est isolée.

Elle n'est que le résultat des forces émises par les différents éléments de la machine pondérées par la fonction de transfert des liaisons (roulements, film d'huile, film d'air, boulons, supports élastiques, ressorts, etc.). Il faut donc définir des méthodes qui permettront de déterminer des seuils "d'avertissement" et "d'arrêt", avec une bonne probabilité de réussite.

Le seuil d'avertissement est également appelé niveau d'alarme.

III.14.1. Méthode de relevé globale :

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

Cette méthode pourra être utilisée lorsque les défauts à surveiller émettent des vibrations très importantes, comme le balourd ou les défauts de lignage [14].

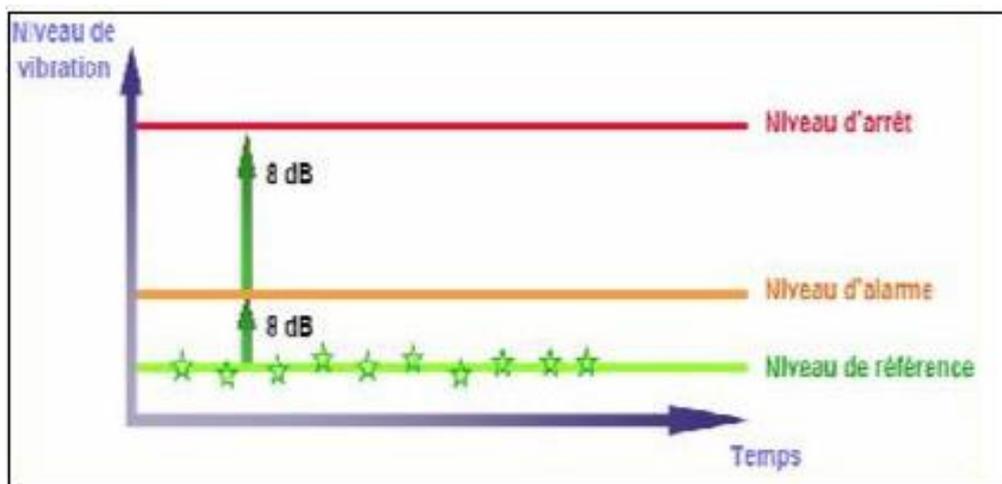


Fig. III.20 : Détermination des seuils par la méthode de relevé globale [14]

III.14.2. Méthode de l'analyse spectrale :

Cette méthode met en œuvre un analyseur en lieu et place d'un vibromètre. Les seuils d'alarme et d'arrêt sont déterminés selon la même méthode que précédemment, sur le spectre au lieu de la mesure globale. Cette méthode devra être préférée lorsque les défauts à surveiller émettent des vibrations très faibles, comme les défauts d'engrènement ou de roulement.

III.14.3. Définition de seuil d'intervention [13] :

Le tracé des courbes d'évolution des amplitudes vibratoires doit être complété par une comparaison des mesures à des seuils d'alarme et de danger.

❖ **Seuil d'alarme :**

Déclenche systématiquement une procédure de diagnostic afin de localiser voir de déterminer l'origine exacte de l'anomalie. Selon la nature et la gravité du défaut les modalités de surveillance seront modifiées pour mieux suivre son évolution ou procédure à un arrêt pour inspection.

❖ **Seuil de danger :**

Nécessite de procéder à un diagnostic immédiat de l'état de l'installation arrêt suivi d'une action corrective.

La quantification de ces seuils est très délicate et de nombreux paramètres, tels que le montage (fondation, châssis, paliers,...), tolérance du constructeur, vécu de l machine, besoin de l'utilisateur ... cependant, des ordres de grandeurs de niveaux acceptables, alarmants ou dangereuse, sont indiqués dans les normes (NF, ISO, VDI, API...).

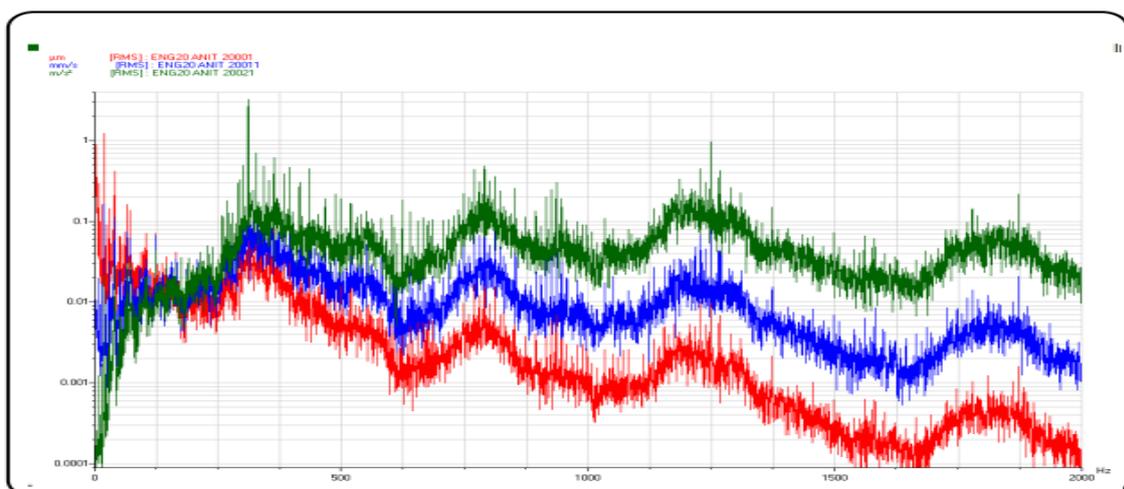
En début de suivi les seuils peuvent se référer aux normes, mais les seuils ne seront fixés qu'après retour à l'expérience.

III.14.4. Choix de la grandeur à mesurer :

Le choix de la grandeur à mesurer (déplacement, vitesse ou accélération) pour la surveillance d'une machine tournante dépend essentiellement du défaut recherché et la plage de fréquences dans laquelle il est susceptible de s'exprimer. La grandeur retenue est appelée paramètre ou indicateur de surveillance. Le tableau 3.1 donne le domaine de surveillance pour chaque indicateur.

Tableau. III.1 : Domaine de surveillance des indicateurs vibratoires [13]

Indicateur (niveau globale)	Domaine de surveillance
Déplacement (μm c/c)	Phénomènes lents basses fréquences [2–100 Hz] : balourd, désalignement, instabilités de paliers etc.
Vitesse (mm/s eff)	Moyennes fréquences [1 000 Hz] : balourd, lignage, instabilités de paliers, cavitation, passage d'aubes, engrenement etc.
Accélération (g eff)	Phénomènes très rapides Hautes fréquences [20 000 Hz] : engrenages, roulements, passages d'ailettes, cavitation...)

**Fig.III.21** : signaux vibratoires en mode déplacement, vitesse et accélération [13]

III.15. seuil de jugement [14] :

La norme propose pour chacun des quatre premiers groupes des seuils de jugement qui déterminent les domaines suivants :

- Bon
- Admissible
- Encore admissible
- Inadmissible

Ces seuils ne sont qu'une proposition basée sur une statistique regroupant de très nombreuses machines de types très différents. Il est de la responsabilité de l'utilisateur d'affiner ces seuils machine par machine, en fonction de leur historique. Ces seuils pourront ainsi être modifiés à la baisse ou à la hausse.

La norme ne propose aucun seuil de jugement pour les machines des groupes V et VI, car ils comprennent les machines alternatives, présentant des comportements très variables en fonction du nombre de cylindres, de l'angle entre ces cylindres et du calage des manetons. Ces groupes comprennent également des machines à balourd variable ou des machines construites spécialement pour vibrer.

Les seuils de jugement pour les machines des groupes V et VI ne pourront donc être déterminés que par le constructeur ou l'utilisateur.

III.15.1. Les groupes :

Cette norme distingue six groupes de machines. Les critères de distinction sont la puissance, les fondations et la présence d'effets de masse alternatifs non compensables (par exemple pour les machines à piston). Ces groupes sont définis comme suit [14] :

- ✓ GROUPE I : Eléments de moteurs ou de machines qui, dans leurs conditions normales de fonctionnement, sont intimement solidaires de l'ensemble d'une machine (par exemple moteurs électriques produits en série, puissance jusqu'à 15 kW).
- ✓ GROUPE II : Machines de taille moyenne (en particulier moteurs électriques de puissance comprise entre 15 et 75 kW) sans fondations spéciales. Moteurs montés de façon rigide ou machines (puissance jusqu'à 300 kW) sur fondations spéciales.
- ✓ GROUPE III : Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations lourdes et relativement rigides dans la direction des vibrations.

- ✓ GROUPE IV : Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations relativement souples dans la direction des vibrations (par exemple groupes turbogénérateurs, particulièrement ceux qui sont installés sur des fondations légères).
- ✓ GROUPE V : Machines et dispositifs mécaniques d'entraînement avec effets d'inertie non équilibrés (dus au mouvement alternatif des pièces), montés sur des fondations relativement rigides dans la direction des vibrations.
- ✓ GROUPE VI : Machines et dispositifs mécaniques d'entraînement avec effets d'inertie non équilibrés (dus au mouvement alternatif des pièces), montés sur des fondations relativement souples dans la direction des vibrations. Machines avec masses tournantes accouplées souplement (par exemple arbres de broyeurs). Machines telles que centrifugeuses avec déséquilibres variables, capables de fonctionner isolément, sans l'aide d'éléments de liaison. Cribles, machines à tester la fatigue dynamique et générateurs de vibrations pour les industries de transformation.

III.15.2. Choix des seuils vibratoire [14] :

III.15.2.1. seuil de vitesse vibratoire :

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

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

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

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

Fig. III.22 : Normes AFNOR E90-300 ou ISO 2372 [14]

III.15.2.2. seuil d'accélération :

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

Tableau. III.2 : Seuils d'accélération [14]

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	/	/	/	/

Conclusion

Les vibrations sont le résultat de forces dynamiques à l'intérieur des machines qui comprennent des éléments roulants à l'intérieur des structures qui sont connectées à la machine.

Les différents éléments vibreront à des fréquences et des amplitudes différentes. Les vibrations créent de la fatigue et de l'usure et elles sont souvent à l'origine de la rupture de la machine.

Chapitre IV

Principaux défauts des machines tournante

IV. Introduction :

Le diagnostic de l'état d'une machine n'est possible que si l'on connaît les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible d'affecter la machine considérée, C'est à dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts. La connaissance de ces images vibratoires et de la cinématique de la machine permet de formuler un diagnostic de l'état de la machine.

D'après les expériences on peut établir un tableau (Tableau.IV.1) qui permet la reconnaissance des principales anomalies pouvant affecter une machine. Malheureusement, une même image vibratoire peut correspondre à plusieurs défauts. Il faut donc établir la liste de tous les défauts correspondant à chaque image et par déduction, entreprendre les analyses complémentaires et rechercher d'autres symptômes pour se diriger progressivement vers l'hypothèse la plus probable. On se propose dans ce chapitre d'étudier les images vibratoires des principaux défauts.

IV.1. Machines tournantes :

Les machines tournantes sont des systèmes (figure II.1) dans lesquels peut se distinguer :

- Un rotor.
- Une structure.
- Des liaisons.

❖ Un rotor :

Le rotor est une structure dont les éléments tournent autour d'une ligne de rotation. Le rotor fait de plusieurs matériaux (acier, cuivre, bois, plastique...), réalise une fonction bien définie : (manipulation de fluides, de solides, parcours dans un champ électromagnétique...).

❖ La structure :

La structure non rotative comprend les éléments essentiels suivants :

- **Les coussinets** de faibles dimensions au droit des tourillons du rotor. Des bagues peuvent être substituées aux coussinets : roulements.
- **Les paliers** qui relient les coussinets (bague) au stator.

- **Le stator** ou enveloppe de la machine ; il contient des éléments essentiels : circuit magnétique dans les machines électriques, ailette pour les turbomachines...etc.
- **Le massif** des systèmes embraqués peut prendre des formes beaucoup plus variées que celles des systèmes terrestres dont les massifs sont liés aux radies. Une interface adapte le stator au massif. Cette adaptation exige de résoudre un problème qui relève de la suspension des machines dont peut dépendre la tranquillité vibratoire, spécialement celle de l'envenimement.
- **Le radier** est un élément spécifique aux systèmes terrestres. Il assure la liaison entre le massif et sols et a pour mission de diminuer les pressions exercées au sol dans des limites acceptables. C'est par lui que les séismes perturbent les machines tournantes ; il peut être responsable de certains déliègnages entre les paliers.

❖ Les liaisons :

Le rotor est lié à la structure non rotative par des liaisons qui assurent le guidage du rotor. : liaisons sont classées dans trois ensembles Les

- Les liaisons à fluides ;
- Les liaisons à roulements ;
- Les liaisons magnétiques.

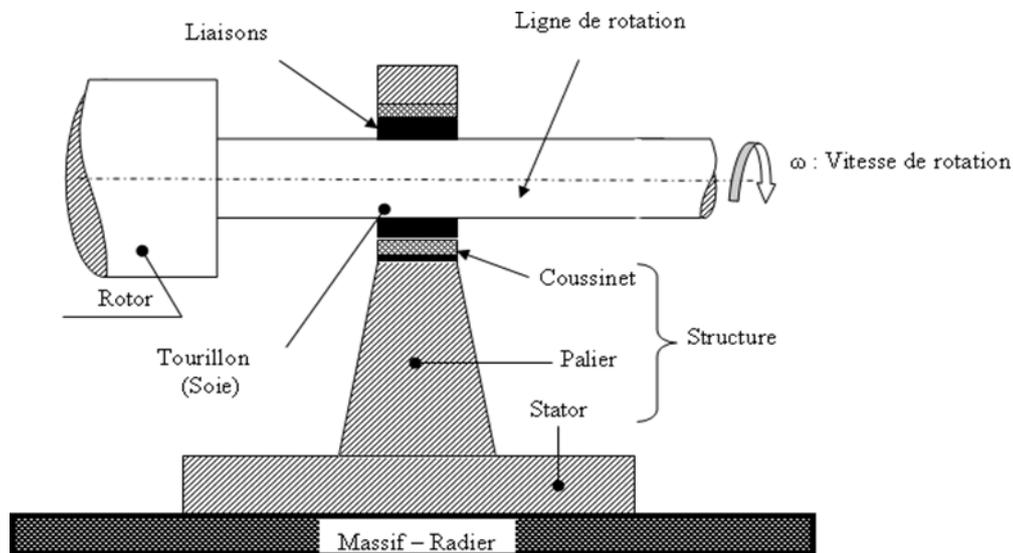


Fig. IV.1: Elément générale des Machines tournantes [20].

IV.2. Reconnaissance des principales anomalies [15] (voir le tableau suivant)**Tableau.IV.1:** Reconnaissance des principales anomalies

Type d'anomalie	Vibration		Remarques
	Fréquence	Direction	
Tourbillon d'huile	De 0,42 à 0,48 x f_{rot}	Radiale	Uniquement sur paliers lisses hydrodynamique à grande vitesse
Balourd	1 x f_{rot}	Radiale	Amplitude proportionnelle à la vitesse de rotation. Déphasage de 90° sur 2 mesures orthogonales
Défaut de fixation	1, 2, 3, 4 x f_{rot}	Radiale	Aucun déphasage sur 2 mesures Orthogonales
Défaut d'alignement	2 x f_{rot}	Axiale et Radiale	Vibration axiale est en général plus important si le défaut d'alignement comporte un écart angulaire
Excitation Electrique	1, 2, 3, 4x 50Hz	Axiale et Radiale	Vibration disparaît dès coupure de l'alimentation
Vitesse critique de Rotation	Fréquence critique de rotor	Radiale	Vibration apparaît en régime transitoire et s'atténue en suite
Courroie en mauvais état	1, 2, 3, 4 x 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	$f_e \pm f_{rot}$ 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 ».

fréquence de rotation = f_{rot}

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

f_p = fréquence de passage de la croie

z = nombre de dents de l'engrenage.

IV.3. Classement des Conditions de naissance d'un défaut :

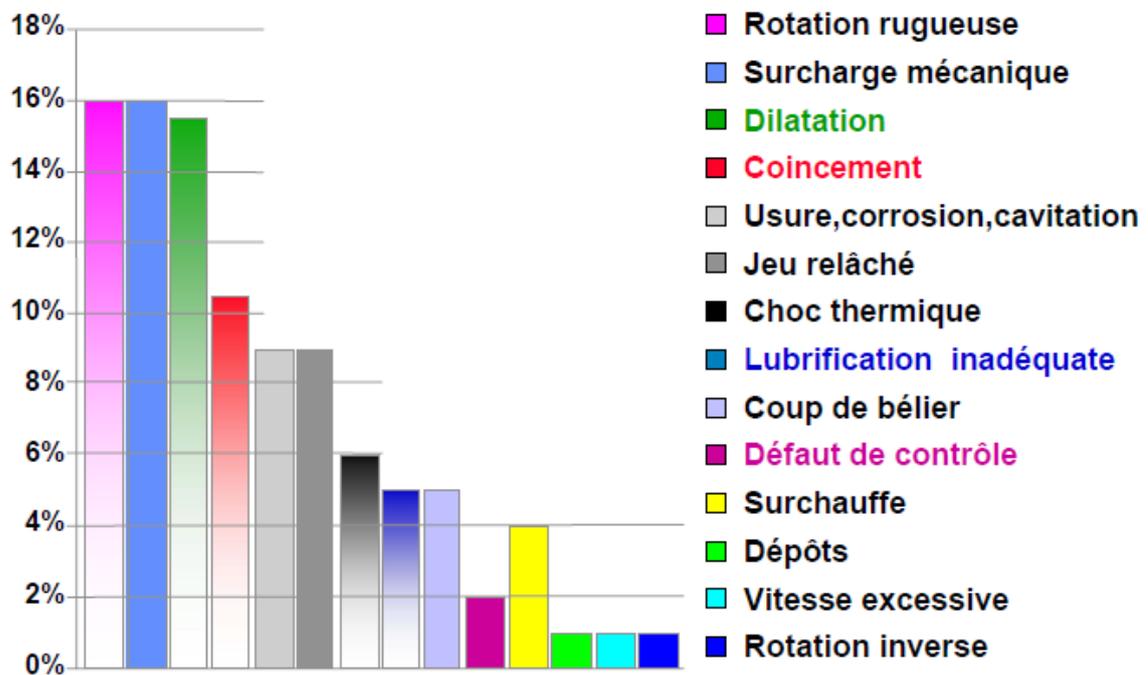


Fig.IV.2 : schémas de classement des conditions de naissance d'un défaut [6]

IV.4. Principaux défauts dans les machines tournantes :

IV.4.1. Déséquilibre - Défaut de balourd :

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor [Fig.IV.3].

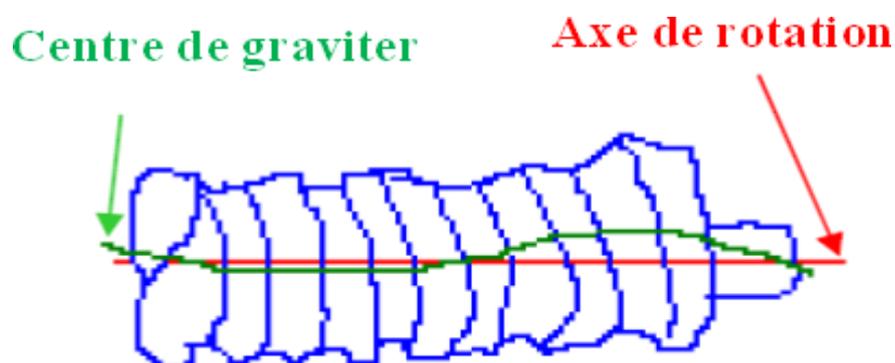


Fig.IV.3 : Tolérances d'usinage sur un rotor. [13]

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 a des différences de température localisées ...

Généralement, le spectre est issu d'une mesure prise radialement (souvent dans la direction radiale horizontale) [Fig.IV.4].

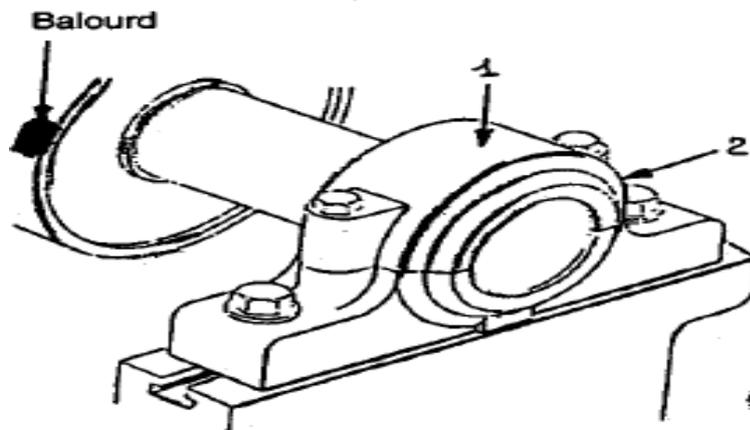


Fig.IV.4 : Points de mesure pour un défaut de balourd. [13]

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.IV.5]

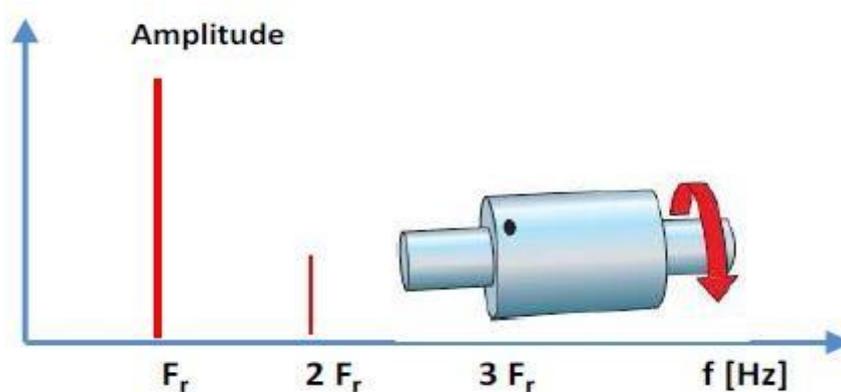


Fig.IV.5 : Spectre théorique d'un défaut de balourd. [13]

IV.4.1.1. Différents types de balourd :

a)- Balourd statique :

Ce déséquilibre agit aussi s'il n'y a pas de rotation; on l'appelle alors "déséquilibre statique".

Il provoque un déplacement du centre de la masse en dehors du plan géométrique, durant son utilisation, le rotor oscille parallèlement à son axe de rotation.

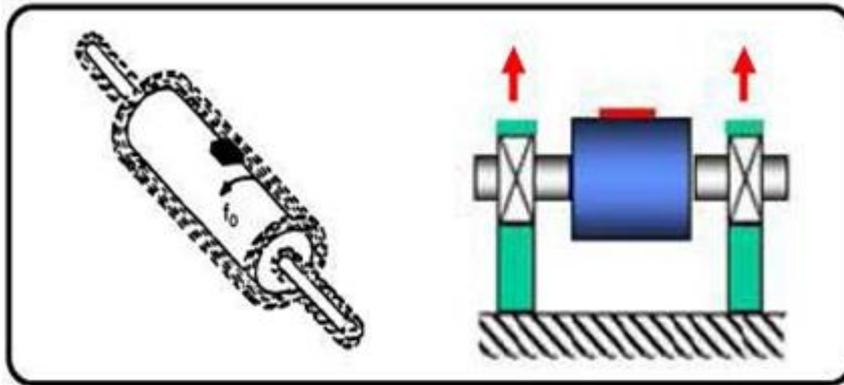


Fig.IV.6 : balourd statique [14]

b)- Balourd de couple :

Dans le cas de balourd de couple les deux paliers supportant le rotor vont subir les efforts centrifuges de façon alternée .Cette répartition du déséquilibre ne peut plus être déterminée par oscillation, car le rotor n'accepte plus aucune position stable. Le rotor tourne, ce qui donne un mouvement de saut autour de son axe (verticalement par rapport à l'axe de rotation), car les deux déséquilibres déclenchent un couple. Par conséquent, cette sorte de répartition du déséquilibre est indiquée comme un déséquilibre de couple [14].

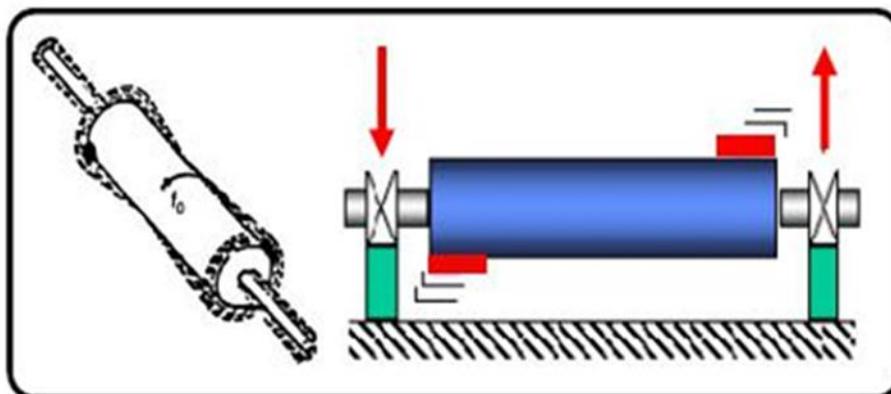


Fig. IV.7 : balourd de couple

c)- Balourd dynamique :

Le rotor réel possède non seulement un déséquilibre indépendant, mais théoriquement plusieurs autres qui sont répartis arbitrairement le long de l'axe de rotation. Ceux-ci peuvent être remplacés par deux déséquilibres résultants (comme ici, représentés par les flèches) dans deux plans quelconques qui ont en général des intensités diverses et des positions angulaires différentes. Le déséquilibre dynamique se produit pratiquement sur tous les rotors.

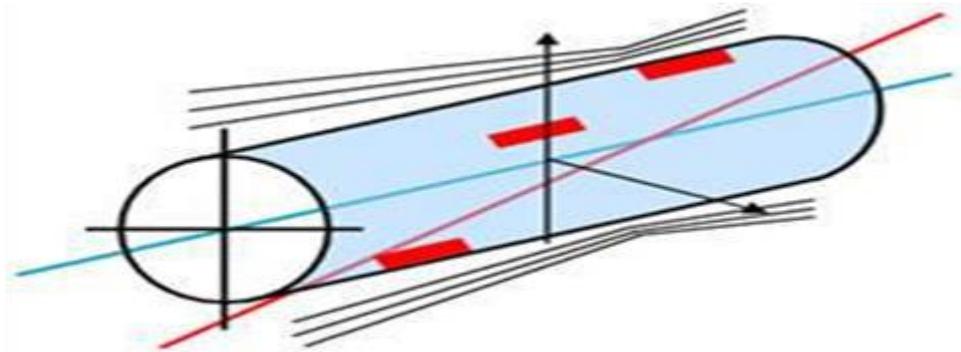


Fig.IV.8 : Balourd dynamique

IV.4.1.2. Origine de différents types de balourds [14] :

IV.4.1.2.1. Balourd d'origine mécanique:

Lorsqu'il y a une masse de matière qui se détache du rotor ou vient de déposer sur ce dernier (perte d'ailette ou rupture d'une aube, érosion ou dépôt de matière, fluage du rotor), on observe généralement une évolution instantanée des vibrations.

IV.4.1.2.2. Balourd d'origine thermique :

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

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

IV.4.1.3. Signature vibratoire des défauts de balourd :

Le balourd se manifeste par une énergie vibratoire localisée :

- A la fréquence de rotation Fr .
- Aux fréquences des harmoniques $2Fr$, $3Fr$... (Avec des pics d'amplitudes plus faibles) L'évolution du balourd se manifeste par une augmentation de la raie à Fr et des harmoniques $2Fr$, $3Fr$,...

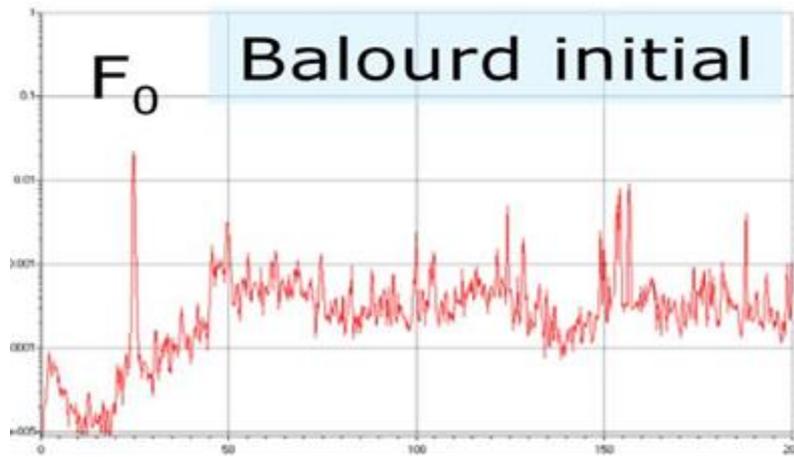


Fig.IV.9 : balourd initial.

Il existe toujours un balourd résiduel sur une machine tournante. L'évolution du balourd se manifeste par une augmentation de la raie à F_r et des harmonique $2F_r$, $3F_r$,...



Fig.IV.10 : Balourd évolué.

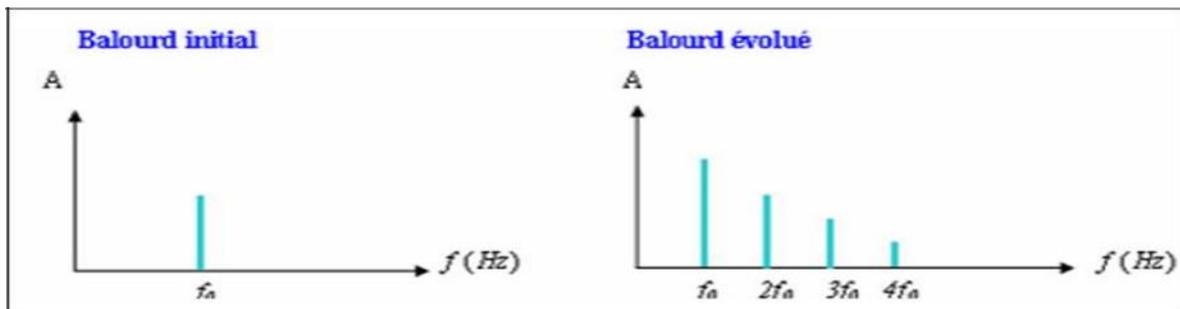


Fig.IV.11 : Image vibratoire d'un défaut de balourd

IV.4.2. Défaut d'alignement (flexion du rotor) :

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

IV.4.2.1. Les causes du désalignement :

Un désalignement peut être également la conséquence :

- D'un défaut de montage d'un palier.
- D'un mauvais calage des pattes de fixation.
- D'une déformation du châssis qui se traduit par une flexion de l'arbre du rotor. Dans ce cas les deux paliers ne sont pas concentriques.

Le défaut de désalignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des machines tournantes. Il engendre des efforts importants qui entraînent la dégradation rapide du système d'accouplement.

IV.4.2.2. Différents types de défauts d'alignements :

Les axes des deux rotors peuvent présenter un *désalignement angulaire* au niveau de l'accouplement ou un *désalignement radial* (défaut de concentricité) ou la combinaison des deux [Fig.IV.12].

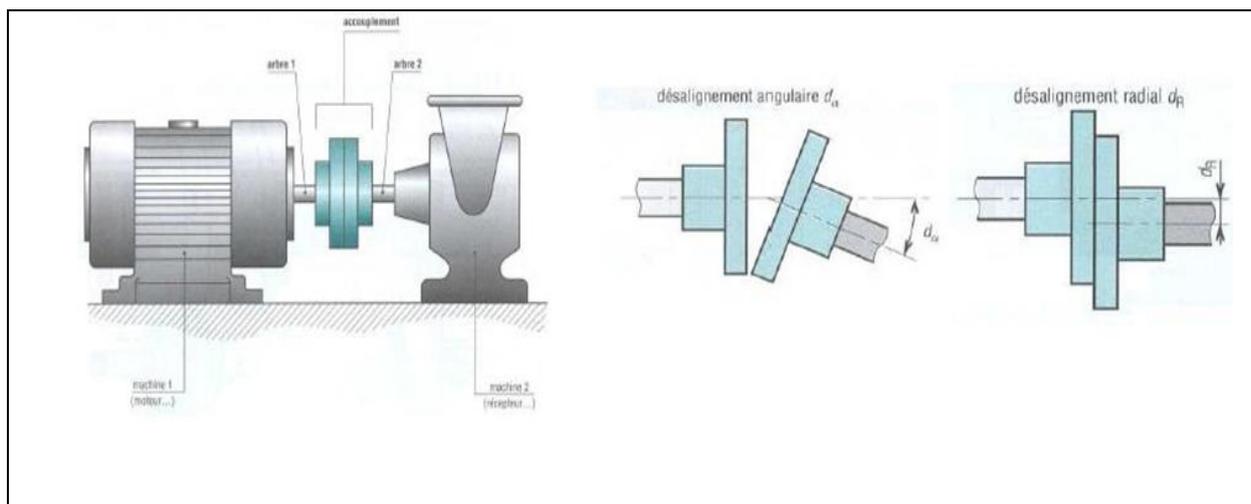


Fig.IV.12 : Défauts d'alignement d'arbres. [13]

a. Désalignement radial :

Un défaut d'alignement est révèlé par un pic d'amplitude prépondérante généralement 2 fois la fréquence de rotation (parfois 3 ou 4 fois). Il apparait une vibration dans la direction radiale de composante d'ordre 2 de la fréquence de rotation (rarement d'ordre 3, voire exceptionnellement d'ordre 4), avec des amplitudes supérieures aux composantes d'ordre 1 [Fig.IV.13].

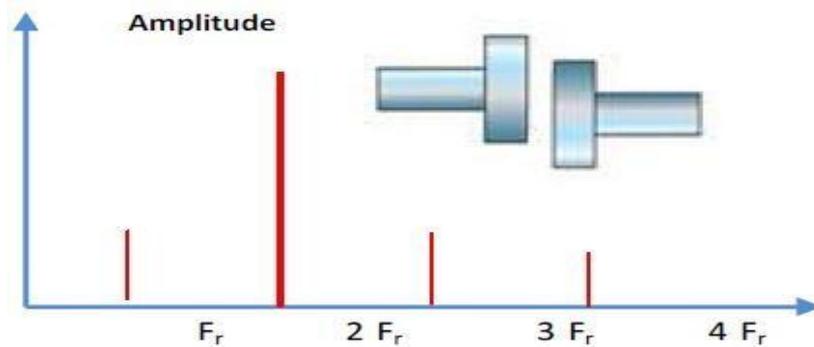


Fig.IV.13 : Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial. [13]

b. Désalignement angulaire :

Il apparait une vibration axiale de composante d'ordres 1, 2, 3 ou 4 de la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles des composantes radiales correspondantes [Fig.IV.14].

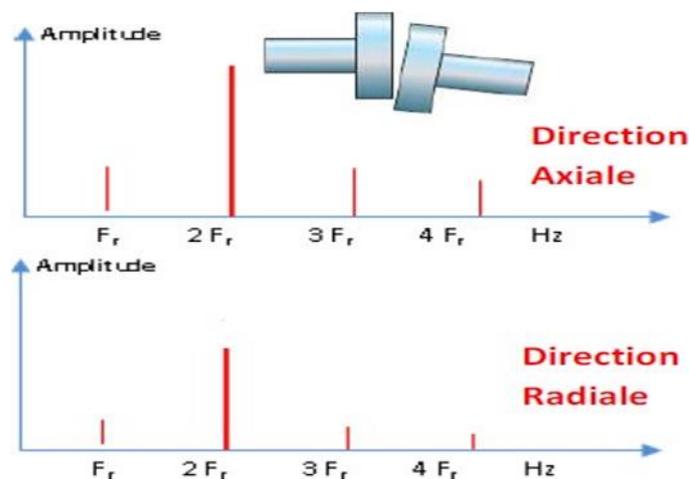


Fig.IV.14 : Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire. [13]

IV.4.2.3. Représentation spectrale :

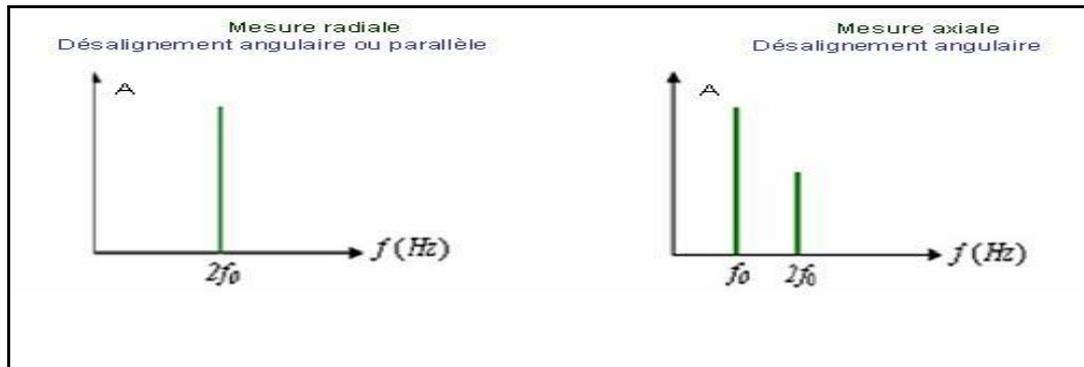


Fig.IV.15 : image vibratoire d'un défaut de désalignement

IV.4.3. Défaut de paliers lisses [12] :

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

La position d'équilibre est donnée par :

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

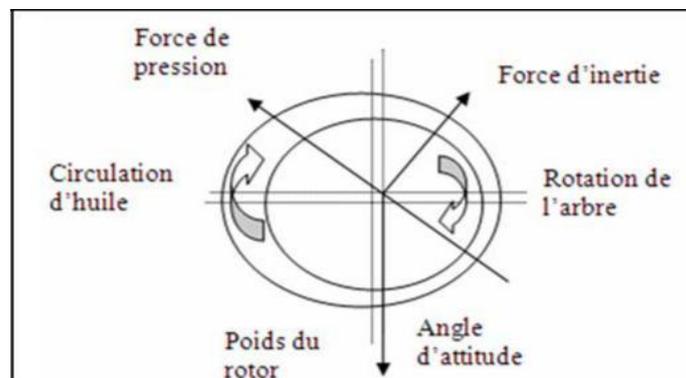


Fig.IV.16 : Les contraintes sur un palier lisse.

Il s'agit des défauts de type :

❖ **tourbillon d'huile**

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

❖ **fouettement d'huile**

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

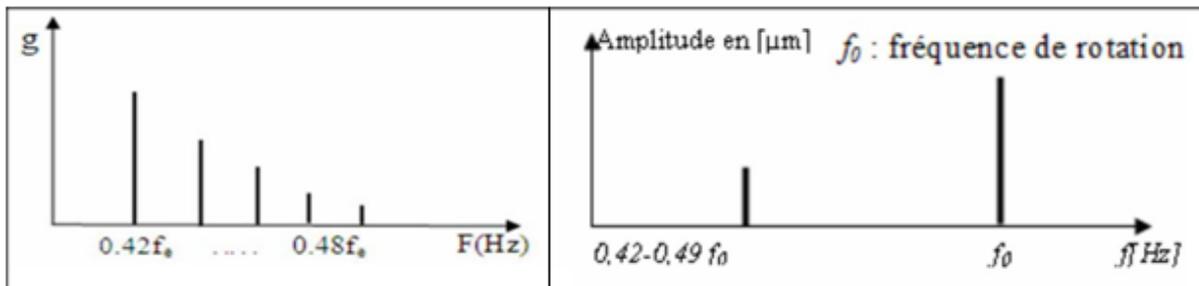


Fig.IV.17 : Image vibratoire d'un fouettement d'huile

Fig.I.18 : Image vibratoire d'un corbillon d'huile

IV.4.3.1. Instabilités des paliers :

Des instabilités de l'arbre dans le palier peuvent apparaître sous l'effet de variations de certains paramètres tels que :

- ✓ Charge appliquée au rotor
- ✓ Vitesse de rotation
- ✓ Viscosité de l'huile

L'instabilité se manifeste par une vibration auto-entretenu qui entraîne une précession du rotor, avec une période différente de la période de rotation, dont la fréquence est :

$$0.23F_0 < F_{\text{instabilité}} < 0.63F_0$$

Selon la technologie du palier.

IV.4.3.2. Fouettement et tournoiement :

Il existe deux types d'instabilités :

- ❖ **Le tournoiement d'huile (Oil Whirl) :** Instabilité dont la fréquence varie avec la fréquence de rotation du rotor.
- ❖ **Le fouettement d'huile (Oil Whip) :** Instabilité dont la fréquence coïncide avec la vitesse critique correspondant à la première pulsation propre du rotor (rotor en état flexible).

IV.4.3.3. Origine des instabilités :

Les instabilités de paliers peuvent apparaître au cours des phases transitoires des machines tournant à vitesse élevée (turbines). Elles peuvent être observées sur des acquisitions spectrales en cascade.

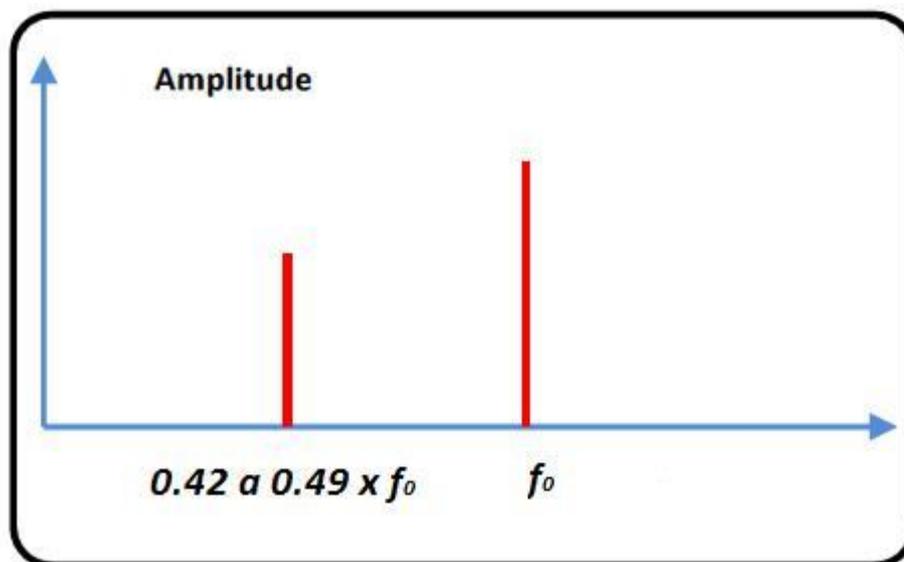


Fig.IV.19 : Spectre théorique d'un défaut d'une instabilité de paliers.

IV.4.4. Défauts de serrage [12] :

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

Il est également parfois possible de retrouver des pics à l'harmonique ($1/2 \times$ la fréquence de rotation de l'arbre) et ses multiples.

Les causes d'un jeu sont principalement l'usure ou un mauvais montage. Comme exemples de jeu, on peut entre autre citer : accouplement dont le caoutchouc est usé, paliers montés avec un jeu excessif, ou boulons cassés (plus de jonction mécanique).

Une roue à aubes dont les aubes touchent la carcasse nous donne un défaut semblable au jeu, amplifié.

La figure suivante montre un exemple spectre sur une machine dont le joint de l'accouplement est usé. La fréquence de rotation est de 24,25 Hz.

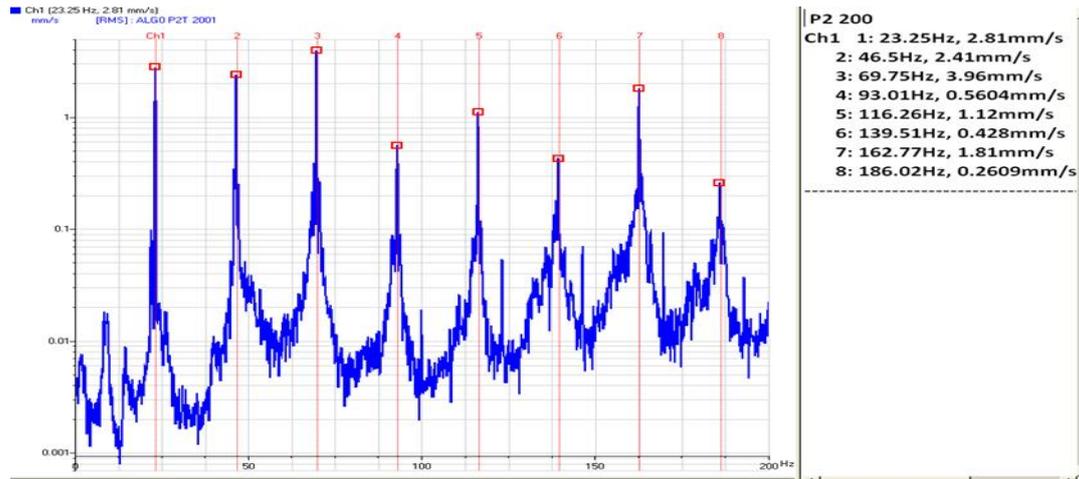


Fig.IV.20 : Défaut d'usure d'accouplement

IV.4.5. Défauts des roulements :

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

Pour chaque type de roulement et en fonction de ses cotes de fabrication [Fig.IV.21], on peut considérer les fréquences caractéristiques données par les formules ci-dessous.

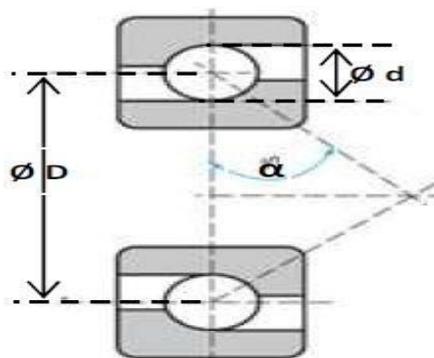


Fig.IV.21 : Caractéristiques géométriques d'un roulement. [13]

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

D : le diamètre primitif,

d : le diamètre des éléments roulants,

α : angle de contact,

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

Ainsi, on a :

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

$$\underline{f}_{b \text{ ext}} = \frac{1}{2} f_a . Z (1 - (d/D) \cos \varphi) \quad (\text{IV.1})$$

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

$$\underline{f}_{b \text{ int}} = \frac{1}{2} f_a . Z (1 + (d/D) \cos \varphi) \quad (\text{IV.2})$$

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

$$f_{bille} = \frac{1}{2} f_a . \frac{D}{d} (1 - ((d/D) \cos \varphi)^2) \quad (\text{IV.3})$$

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.

IV.4.5.1. 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.IV.22].

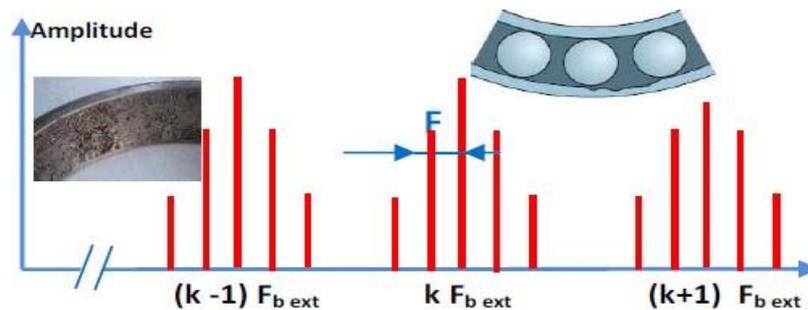


Fig.IV.22 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure. [13]

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.IV.23].

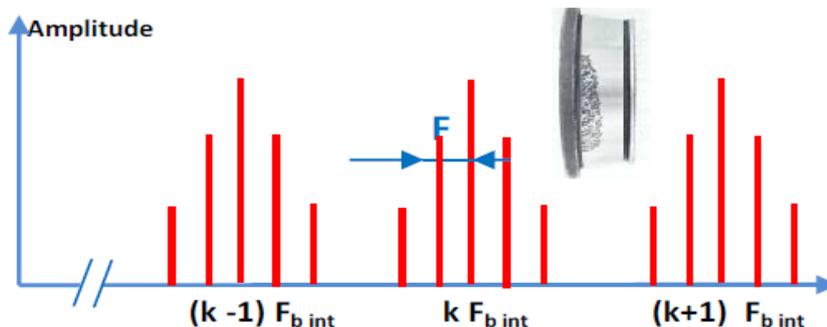


Fig.IV.23 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure. [13]

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 [Fig.IV.24].

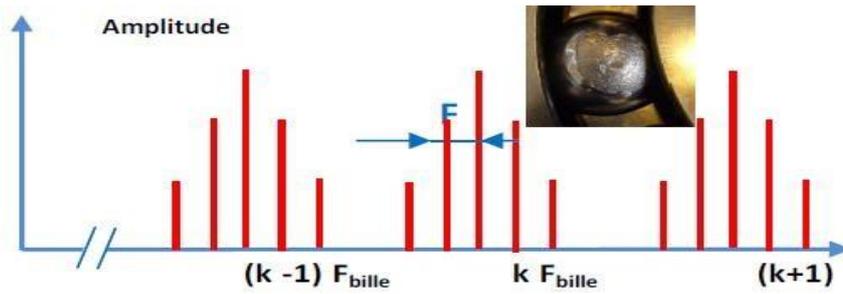


Fig.IV.24 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant. [13]

d. Défauts de type déversement de bague :

Le défaut de type déversement de bague extérieure [Fig.IV.25] s'exprime par une composante fondamentale d'amplitude élevée dont la fréquence correspond à la fréquence du défaut de la bague déversée, et par des composantes d'ordre supérieur d'amplitude très faible [Fig.IV.26]

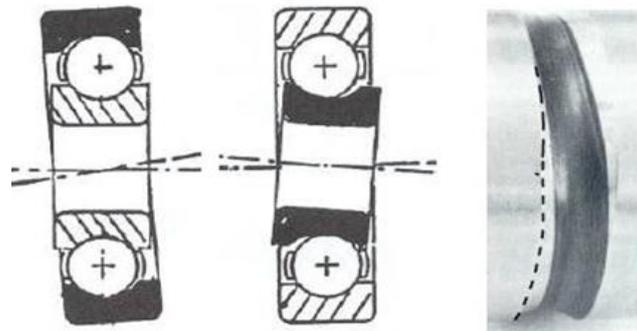


Fig.IV.25 : Défaut de déversement

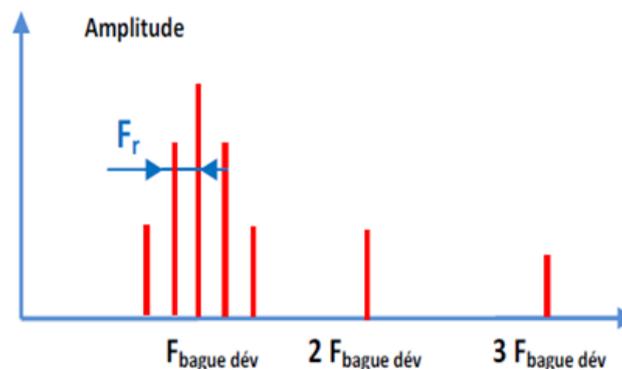


Fig.IV.26 : Image vibratoire théorique d'un défaut de type déversement de bague. [13]

IV.4.6. Défauts des engrenages [21] :

L'engrenage est un des mécanismes élémentaires les plus utilisés pour transmettre du mouvement, et adapter les vitesses de rotation entre organes moteurs et récepteurs.

Il est constitué de deux roues dentées mobiles autour d'axes de rotation, et dont l'une entraîne l'autre par l'action de dents successivement en contact.

Les engrenages sont parmi les organes les plus sensibles de la chaîne cinématique peuvent être soumis à un grand nombre d'avaries apparaissant lors du fonctionnement, et dont les causes sont multiples

Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes d'engrenages [Fig.IV.27] :

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



Fig.IV.27 : Différents types d'engrenage. [13]

IV.4.6.1. Types de défaut :

Plusieurs types de défauts peuvent affecter les dents d'engrenage, on peut citer les défauts répartis sur toutes les dents :

❖ L'usure :

Est un phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière dû au glissement de deux surfaces l'une contre l'autre. Le développement de l'usure est lié à la charge et à la vitesse de glissement en chaque point des surfaces de contact, ainsi qu'à la présence plus ou moins grande d'éléments abrasifs dans le lubrifiant. L'usure normale, progresse lentement, elle est inversement proportionnelle à la dureté superficielle de la denture. L'usure anormale se produit lorsque le lubrifiant est souillé de particules abrasives ou lorsque le lubrifiant est corrosif, elle conduit à un mauvais fonctionnement de l'engrenage, voire à sa mise hors service.

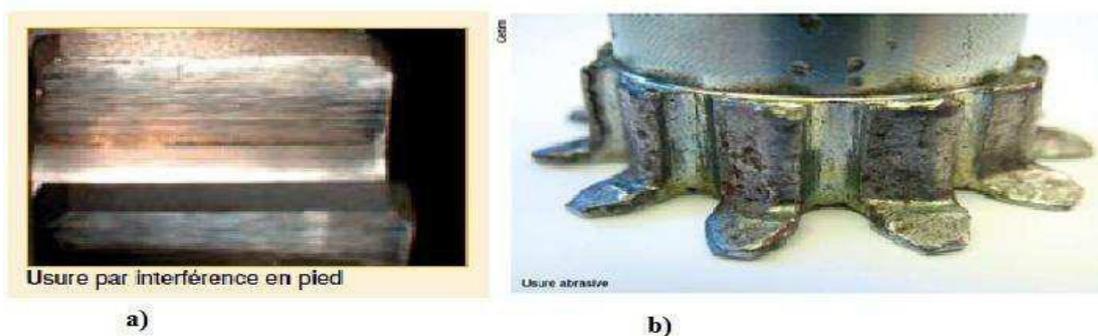


Fig.IV.28 : L'usure des engrenages a) usure par interférence b) usure abrasive

❖ La piqûre :

Il s'agit de trous peu profonds, qui affectent toutes les dents. La piqûre est une avarie qui se produit surtout sur des engrenages en acier de construction relativement peu dur. Il est moins à craindre si la viscosité du lubrifiant est élevée. L'apparition des piqûres est associée aussi à un rapport épaisseur de film lubrifiant sur rugosité composite insuffisant pour éviter des contacts entre aspérités.

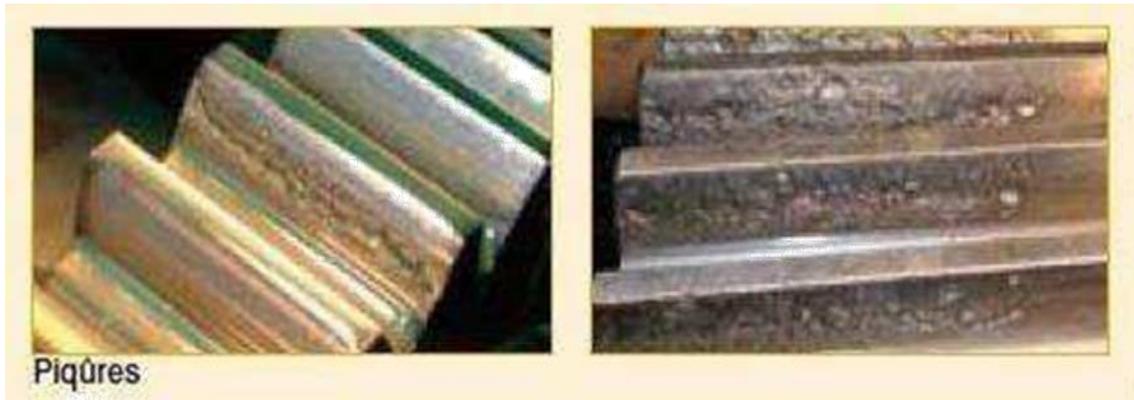


Fig.IV.29 : Piqûre Engrenages

❖ **L'écaillage :**

Il se manifeste aussi sous forme de trous, mais ceux-ci sont beaucoup moins nombreux, plus profonds et plus étendus que ceux des piqûres. L'écaillage se trouve dans les engrenages cimentés, qui sont les plus répandus à l'heure actuelle car ils permettent de passer des couples importants avec des dimensions faibles.



Fig.IV.30 : Écaillage des dents

❖ **Grippage :**

Conséquence directe d'une destruction brutale du film d'huile, ou d'un frottement sous charge provoquant des hausses de températures, le grippage est favorisée essentiellement par des vitesses élevées, de gros modules, un faible nombre de dents en contact.



Fig.IV.31. Le grippage Engrenage.

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

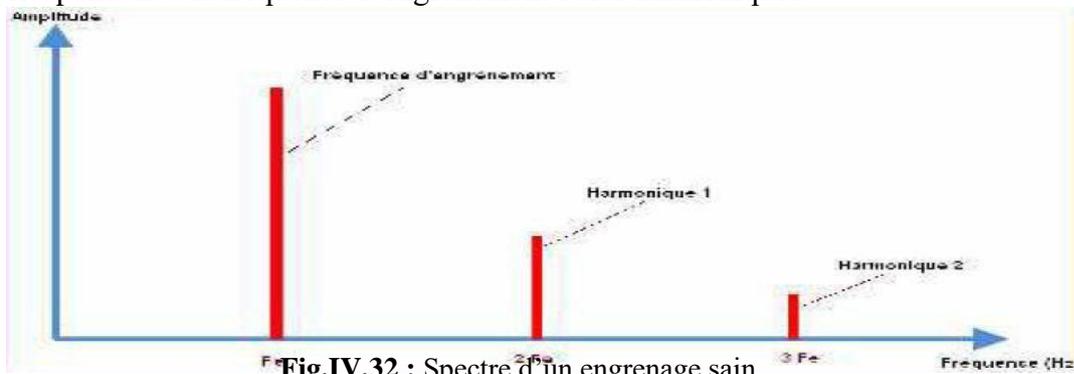


Fig.IV.32 : Spectre d'un engrenage sain

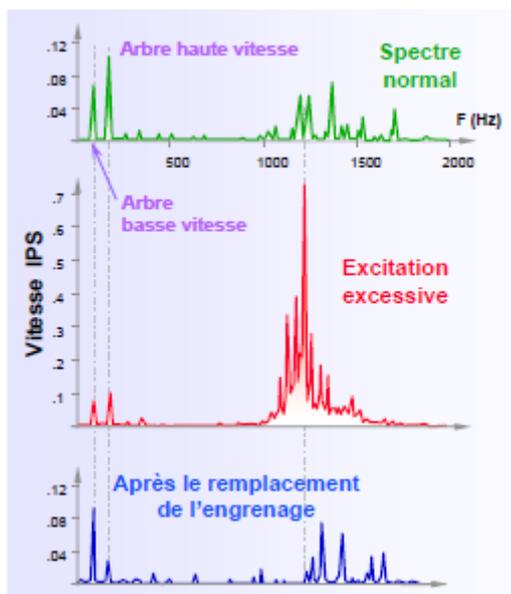


Fig.IV.33 : Spectre d'un engrenage marqué [16]

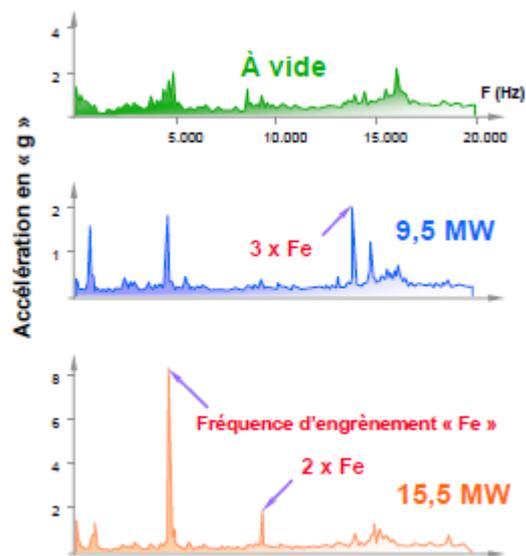


Fig.IV.34 : variation d'amplitude avec la charge [6]

IV.4.7. Défauts spécifiques aux turbines :

Ces défauts sont de trois types :

- Défaut lié à la fréquence de passage des aubes ;
- Défauts liés au phénomène de turbulence ;
- Défauts liés au phénomène de cavitation.

IV.4.7.1. Défaut lié à la fréquence de passage des aubes [12] :

La fréquence de passage des aubes est définie par : $f_a = f_0 N_a$

Avec : f_0 : fréquence de rotation du rotor

N_a : nombre d'aubes de la machine

On observe une amplitude trop importante à la fréquence de passage des aubes et de ses harmoniques si :

- ✓ L'entrefer entre les aubes en rotation et les aubes du diffuseur n'est pas constant.
- ✓ f_a coïncide avec une fréquence propre de la structure.
- ✓ Des aubes se sont légèrement décalées sur leur support ou si elles n'ont pas l'orientation voulue ;
- ✓ Des aubes de la turbine ou du diffuseur sont corrodées ou fissurées.
- ✓ Le flux est perturbé par une déformation ou obstruction de conduite

IV.4.7.2. Défaut lié au phénomène de turbulence [12] :

Des structures apparaissent lorsqu'il y a de pression ou de vitesse du gaz ou de l'air passant à travers une turbine. Ces turbulences génèrent une vibration de type aléatoire de fréquence comprise entre 1 et 50 Hz.

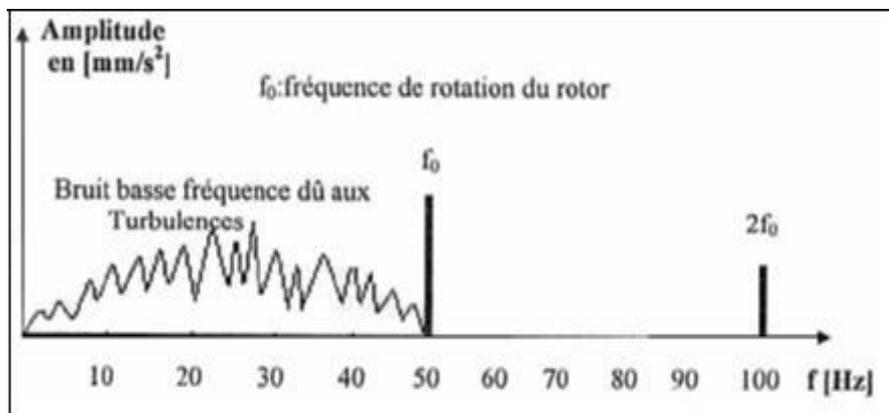


Fig.IV.35 : Image vibratoire du phénomène de turbulence.

IV.4.7.3. Défauts liés au phénomène de cavitation [12] :

Le phénomène de la cavitation présente dans les écoulements de liquide par la formation de petites bulles d'air dues à une baisse de pression trop brusque. La cavitation a un bruit caractéristique : on entend une série de chocs comme si des pierres passaient à travers la turbine, la cavitation provoque à long terme une érosion sur les aubes des turbines.

Sur le spectre, la cavitation présente un bruit de large bande parfois superposée à la fréquence de passage des aubes pouvant s'étaler de 2 000 à 10 000 Hz .

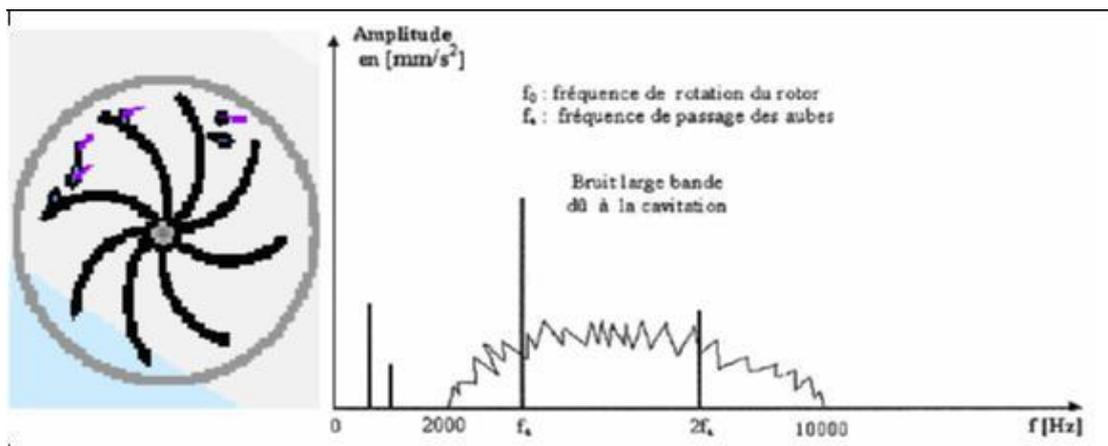


Fig.IV.36 : Défaut et image vibratoire du phénomène de cavitation

Conclusion :

Ce chapitre est consacré aux différents défauts et leurs spectres caractéristiques. L'idée qu'on peut constater de ce chapitre est :

Il n'y a pas de bon diagnostic sans une bonne connaissance des défauts. C'est pourquoi, la première démarche d'une action de surveillance, c'est de rechercher quels sont les incidents les plus fréquemment rencontrés sur les machines et comment ils se manifestent et quelle est leur signature.

Pour être efficace, il faut d'abord avoir une idée aussi claire que possible des mécanismes qui influent sur les grandeurs significatives (nombre de pannes, temps de réparation, délais logistiques, coûts de maintenance préventive, coûts du stockage des matières, actions de communication, etc.). Il faut ensuite mesurer ces grandeurs et construire des indicateurs pour juger de l'état du système maintenance et pour identifier.

Les différentes représentations des signaux (temporel, vectoriel, spectral) aident les agents de maintenance pour déterminer le défaut.

Chapitre V

Application d'analyse spectrale

V. Introduction :

La surveillance des équipements de centrale est assurée par les différentes techniques de la maintenance conditionnelle. L'obligation de mise en service la GTA pose une max de disponibilité pour l'intérêt de production de l'électricité. Cette mise en service obligé des révisions systématique. Ces révisions périodiques faites par des systèmes de surveillance qui permet de maintenir le groupe en bonne état de fonctionnement avec une plateforme bien organisée pour les interventions et les révisions.

V.1. But de travail :

Ce modeste travail sert à étudier le comportement vibratoire du groupe turboalternateur du la central de CAP Djinet et l'application de l'analyse spectrale pour le diagnostic et l'interprétation de type des défauts présents sur les paliers dans le groupe turboalternateur.

Les mesures sont effectuées à des intervalles de temps régulier (périodiquement) par un technicien qui utilise des systèmes portables de plus en plus fréquemment informatises.

Ce système permet à un opérateur d'enregistrer précisément les paramètres désirés pour un grand nombre de machine en un minimum de temps avec un faible coût puisque l'investissement en capteurs est réduit (un seul capteur portatif est suffisant), les vibrations sont transférées par un collecteur de données sur une carte.

Les informations recueillies sont ensuite transférées sur microordinateur par un logiciel qui traduit les données sous forme des signaux, permettant ainsi au responsable de la maintenance de les stocker et de les analyser.

V.2. Les outils de mesures [22] :

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

V.2.1. Capteur des vibrations [22] :

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

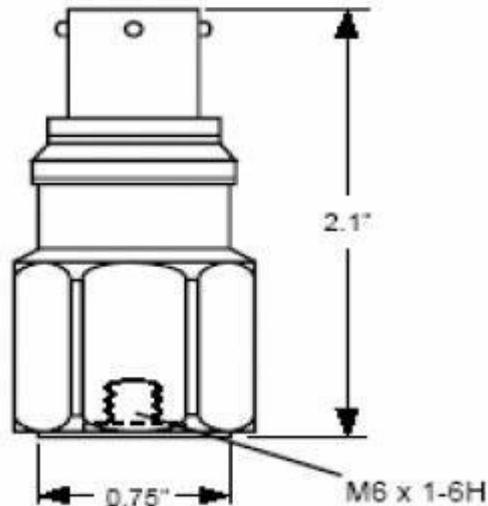


Fig.V.1 : Accéléromètre ASH201-A [22]

Caractéristiques techniques :

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

V.2.2. Analyseur- MVP-200 [22] :

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

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



Fig.V.2 : Analyseur MVP-200

Caractéristique techniques :

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

V.2.3. Logiciel de diagnostic et d'analyse XPR-300 [22] :

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

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

V.3. Etude de cas :

V.3.1. les points de mesure :

L'implantation de l'accéléromètre sur les machines est très importante. Chaque compagne de mesure doit être effectuée en des points précis et toujours les mêmes, en effet un phénomène mécanique peut donner des images vibratoires sensiblement différentes en fonction des points de mesure. On essaie de rapprocher le plus possible les points de mesures des paliers, cela nous a permis d'obtenir des images les plus fidèles des défauts mécaniques. Chaque palier du GTA à

trois capteurs de mesure :

- Palier avant le corps HP : deux capteurs absolus et un capteur relatif.
- Palier après HP et avant MP : deux capteurs absolus et un capteur relatif.
- Paliers après MP et avant BP : deux capteurs absolus et un capteur relatif.
- Entre le corps BP et l'alternateur, on a deux paliers, tels que chaque palier comporte deux capteurs absolus et un capteur relatif.
- Palier après l'alternateur et avant l'excitatrice : deux capteurs absolus et un capteur relative ;
- Palier entre les excitatrices : deux capteurs absolus et un capteur relatif.

Les capteurs absolus sont des accéléromètres qui servent à mesurer les vibrations absolues des paliers, par contre les capteurs relatives sont des proximités (capteur à courant de Foucault) servent à mesurer les vibrations relatives.

Et pour avoir une image vibratoire complète des vibrations. On a pris les mesures selon trois directions perpendiculaires sur chaque palier du groupe turboalternateur : les trois directions possibles sont verticale, horizontale, axiale. Ces mesures sont faites par le **ONEprod XPR-300**

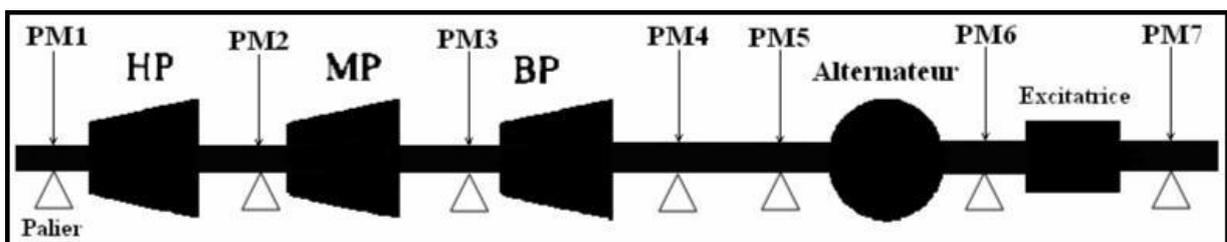


Fig.V.3 : Les points de mesures

Les mesures sont faites à l'aide d'ONEPROD- MVP-200

Les mesures sont faites sur trois positions : axiale, horizontale et verticale (voir la figure V.9).

Le traitement de ces signaux se fait à l'aide d'un logiciel s'appelle XPR-300.



Fig. V.4 : Les trois positions de mesure

V.3.1.1. Description de l'installation surveillée :

L'installation comprend quatre (04) groupes turboalternateurs contrôlés par deux salles de commande. Chaque groupe est composé d'une turbine à réaction à trois (03) corps (HP, MP, BP) d'un alternateur et une excitatrice.

Chaque groupe fournit une puissance de 176MW aux bornes de l'alternateur. La turbine est du type à réaction : le corps HP à simple flux et les corps MP, BP à double flux.

❖ Paramètres de la vapeur :

Tableau V.1 : Les Paramètres de la vapeur

Paramètres	Température d'entrée (°C)	Pression d'entrée (bar)
CORPS HP	540	153
CORPS MP	540	36
CORPS BP	275	10

V.3.1.2. Description de la ligne d'arbre :

La turbine, l'alternateur et l'excitatrice sont montés sur la même ligne d'arbre qui comporte

- 04 paliers turbine.
- 02 paliers alternateur.
- 01 palier excitatrice.
- La température maximale de fonctionnement des paliers est de 95°C.
- La température limite de fonctionnement est de 120°C
- La vitesse de rotation est de 3000 tr/min.
- La longueur de la ligne d'arbre est de 32m

V.3.2. Résultats de mesure :

❖ Représentation spectrale (fréquentielle) :

- Calcul de la fréquence de rotation du rotor du groupe turboalternateur

$$\omega = 2\pi f_0 \quad \Rightarrow \quad f_0 = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad \Rightarrow \quad f_0 = \frac{N}{60}$$

Donnée : $N = 3000$ tr/min

Application : $f_0 = \frac{3000}{60} = 50$ Hz

- Niveaux vibratoires des turbomachines (groupe IV)

Tableau V.2 : niveaux vibratoires (la norme AFNOR 90-300)

[mm/s eff]	Niveau
28	Inadmissible
18	Encore admissible
11	
7	
4,5	Admissible
2,8	
1,8	Bon
1,1	
0,71	
0,46	
0,28	

❖ Résultats de mesure vibratoire prise par ONEPROD-XPR-300 :

Tableau V.3 : Résultats de mesure vibratoire

VEP	Pal 1AX	pal 1RH	Pal 1RV	Pal 2AX	pal 2RH	pal 2RV	Pal 3AX	Pal 3RH	Pal 3RV
Ng:Accélération	1.57	1.22	2.90	0.463	0.955	0.591	0.115	0.223	0.399
Ng:Vitesse Vibratoire	1.26	2.06	3.23	0.674	1.05	1.10	0.496	1.77	3.71
Balourd F0	0.917	1.57	0.622	0.538	0.772	0.922	0.075	1.37	3.44
Desalignement 2F0	0.156	0.353	0.232	0.224	0.267	0.307	0.168	0.044	0.281
Desalignement 3F0	0.293	0.158	0.554	0.145	0.022	0.150	0.143	0.515	0.073

VEP	pal4 AX	PAL4RH	PAL4RV	Pal 5AX	Pal 5RH	pal 5RV	Pal 6AX	Pal 6RH	pal 6RV	pal 6RV	PAL7AX	PAL7RH	PAL7RV
Ng:Accélération	0.286	0.279	0.341	0.085	0.081	0.241	0.097	0.108	0.198	0.198	0.669	0.237	0.268
Ng:Vitesse Vibratoire	8.38	2.46	1.78	1.26	1.72	5.84	1.39	1.64	5.84	5.84	15.8	4.89	5.49
Balourd F0	8.22	1.56	1.28	1.02	1.52	5.53	0.866	0.799	5.77	5.77	15.3	4.68	4.37
Desalignement 2F0	0.488	1.32	0.249	0.265	0.638	1.49	0.829	1.27	0.130	0.130	2.51	0.917	2.99
Desalignement 3F0	0.360	0.076	0.155	0.522	0.152	0.208	0.465	0.303	0.249	0.249	0.127	0.063	0.161

V.4. Manipulation :

❖ Spectres de palier 1 :

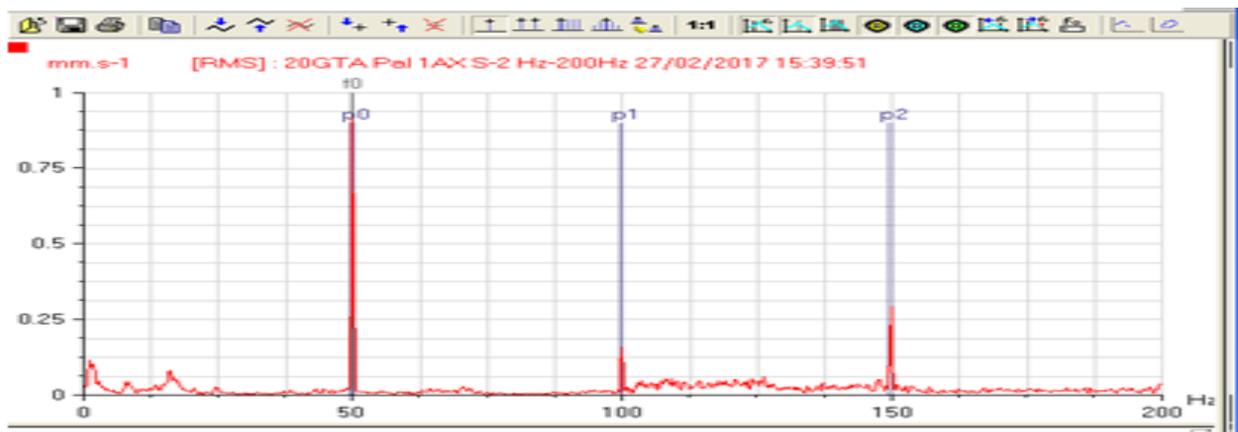


Fig. V.5.spectre direction axial

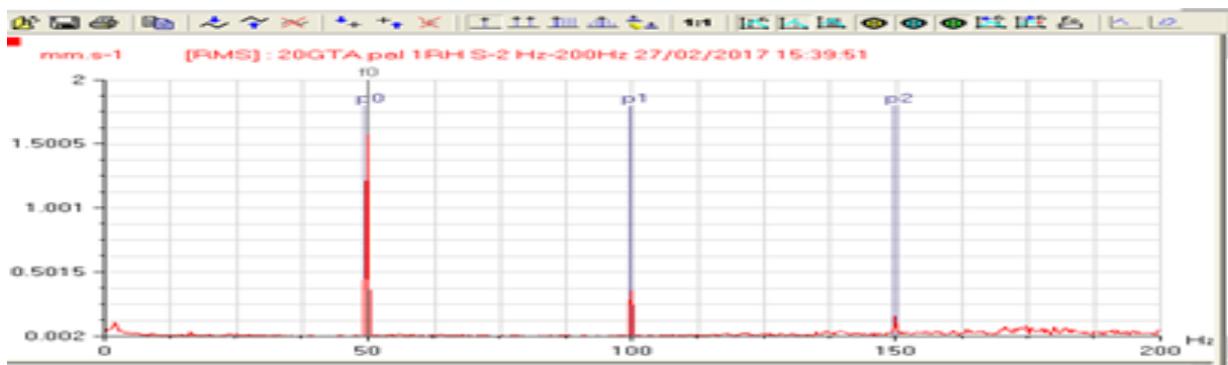


Fig. V.6. Spectre direction radiale horizontale

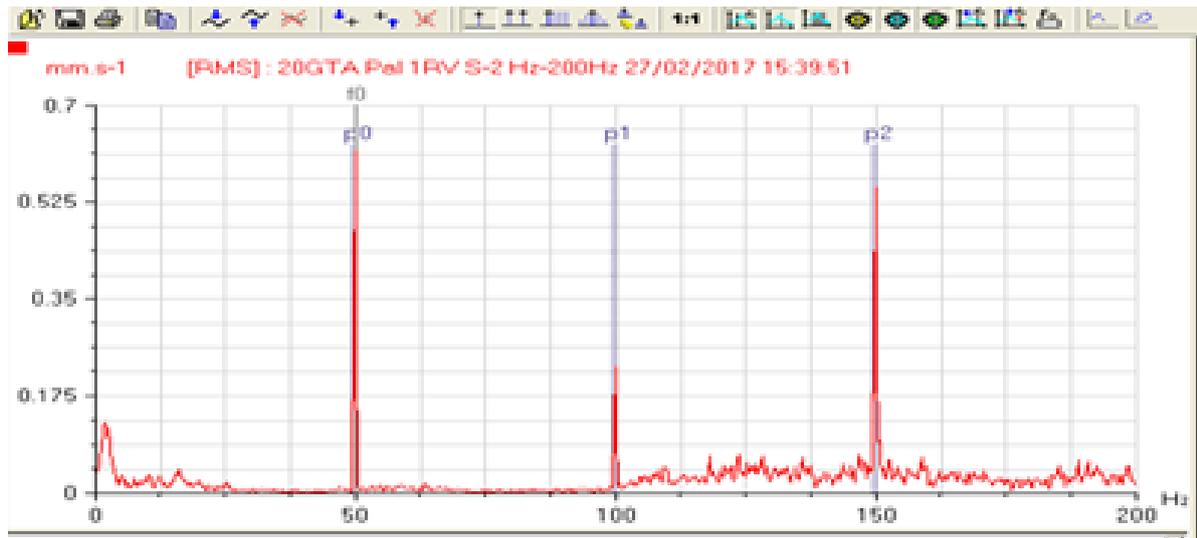


Fig. V.7.spectre direction radiale verticale

❖ **Analyse des résultats pour le palier 1 :**

Tableau. V.4 :Analyse des spectres de palier 1

Direction	A (mm/s)	Fréquence (Hz)	Etat
Axiale	1.26	50	Bon
Radiale horizontale	2.06	50	Bon
Radial verticale	3.23	50	admissible

D'après les spectres de palier 1 sur les trois directions, on peut constater très clairement que des pics d'amplitude en vitesse (RMS) correspondant à la fréquence de rotation de l'arbre (50 Hz) et ses harmoniques (2×50 , 3×50).

Le pic à la fréquence de rotation représente un défaut de balourd qui est caractérisé **Bon** sur la direction axiale et horizontale est **admissible** sur la direction verticale selon la norme AFNOR 90-300.

❖ Spectres de palier 2 :

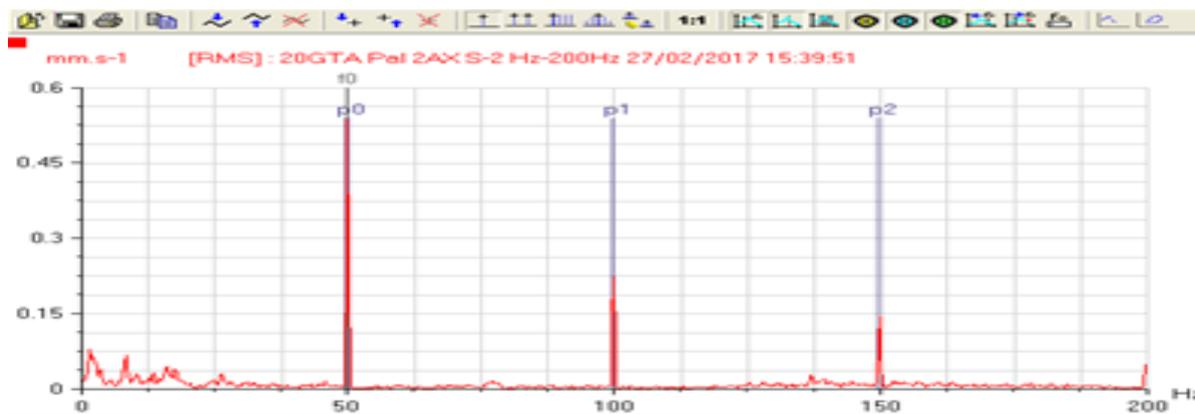


Fig. V.8 : spectre direction axial

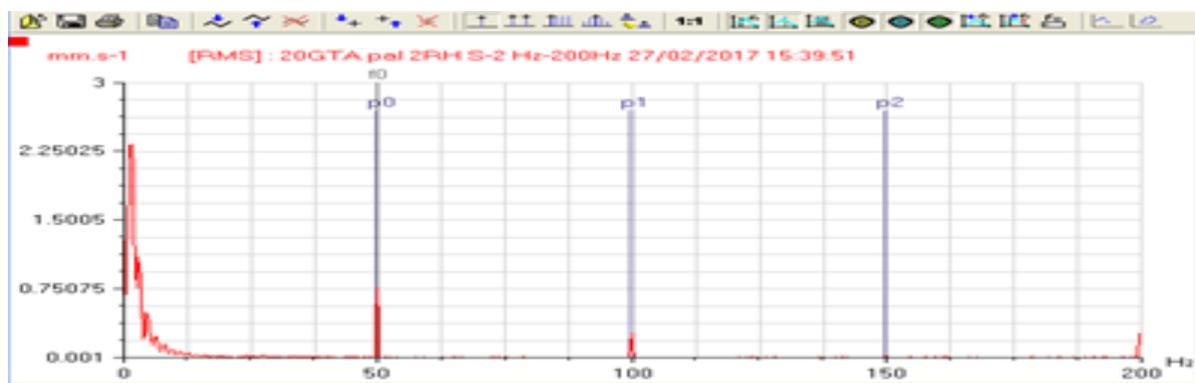


Fig. V.9 : spectre direction radiale horizontale

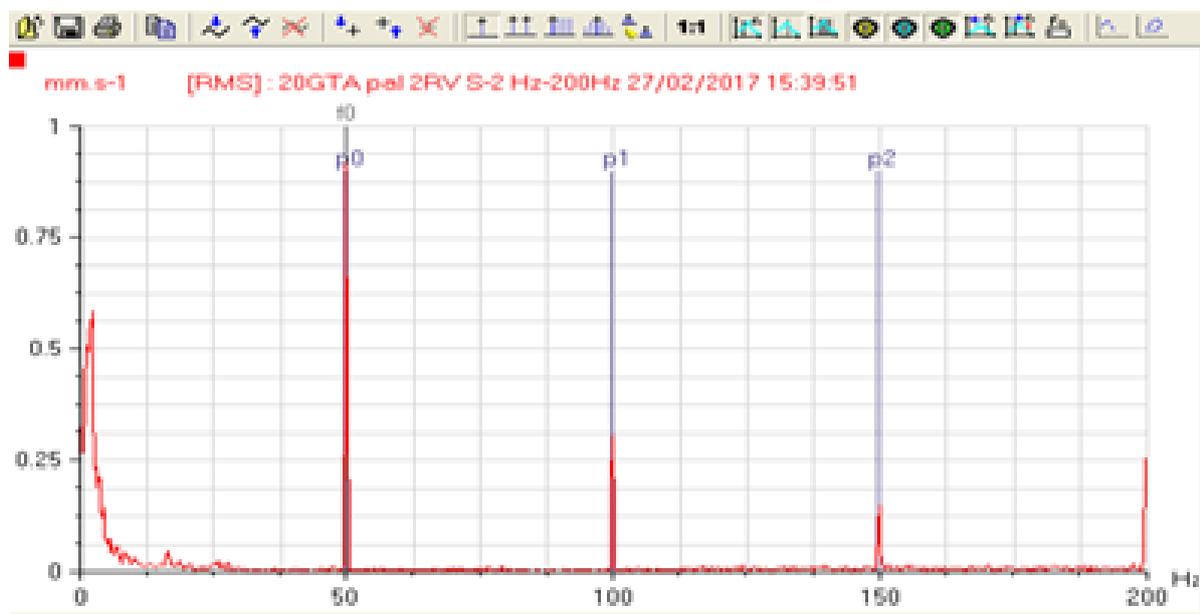
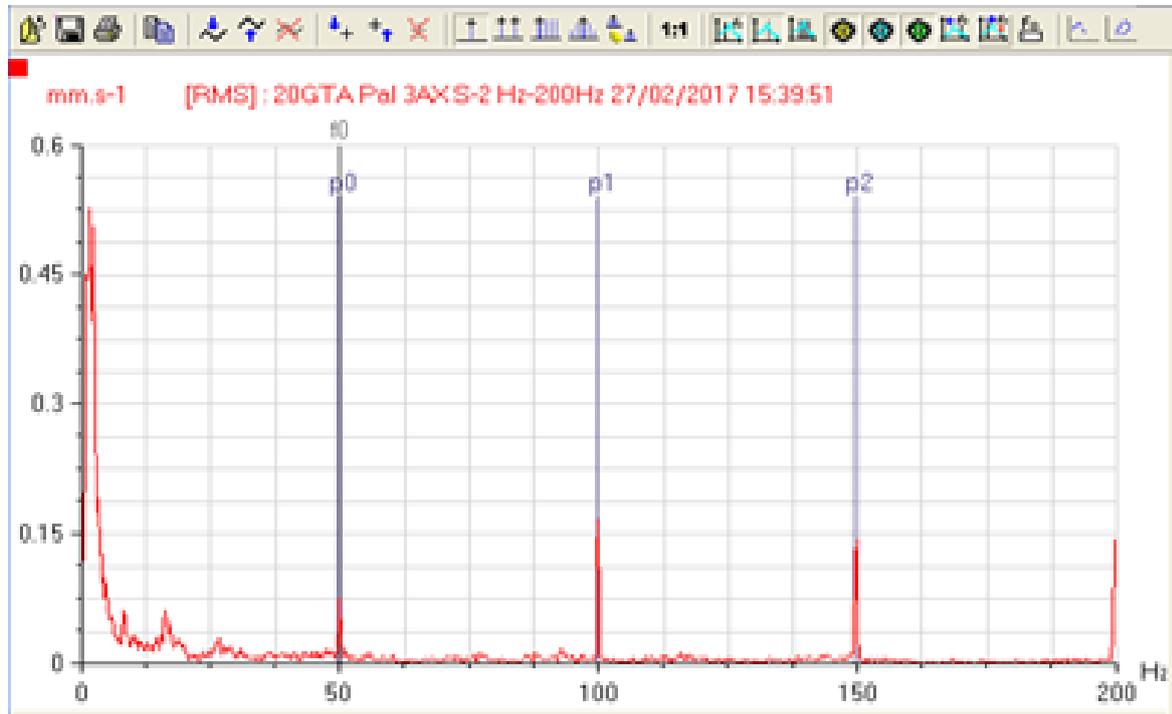


Fig. V.10 : spectre direction radiale verticale

❖ **Analyse des résultats pour le palier 2 :****Tableau. V.5 :** Analyse des spectres de palier 2

Direction	A (mm/s)	Fréquence (Hz)	Etat
Axiale	0.674	50	Bon
Radiale horizontale	1.05	50	Bon
Radial verticale	1.10	50	Bon

D'après les spectres de palier 2 sur les trois directions, on peut constater très clairement que des pics d'amplitude en vitesse (RMS) correspondant à la fréquence de rotation de l'arbre (50 Hz) et ses harmoniques (2×50 , 3×50). Le pic à la fréquence de rotation représente balourd caractérisé **Bon** sur les trois directions selon la norme AFNOR 90-300.

❖ **Spectres de palier 3 :****Fig. V.11 :** spectre direction axial

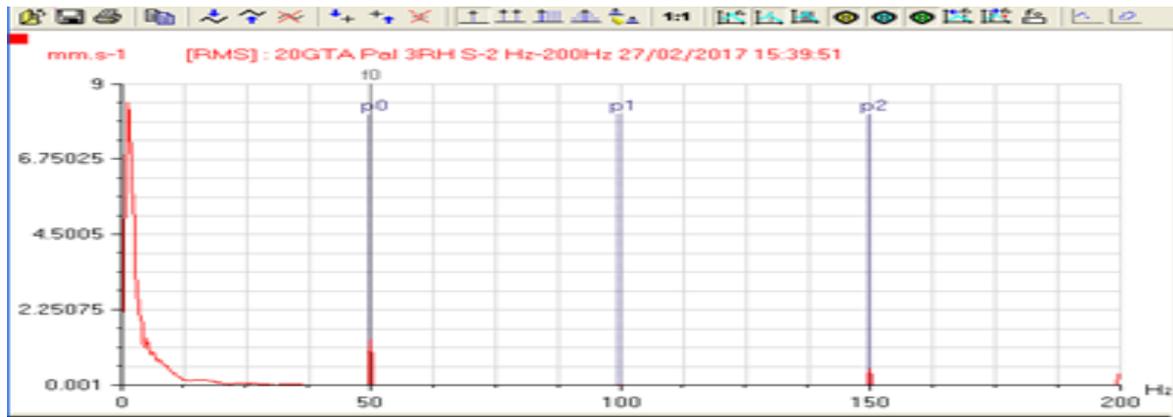


Fig. V.12 : spectre direction radiale horizontale

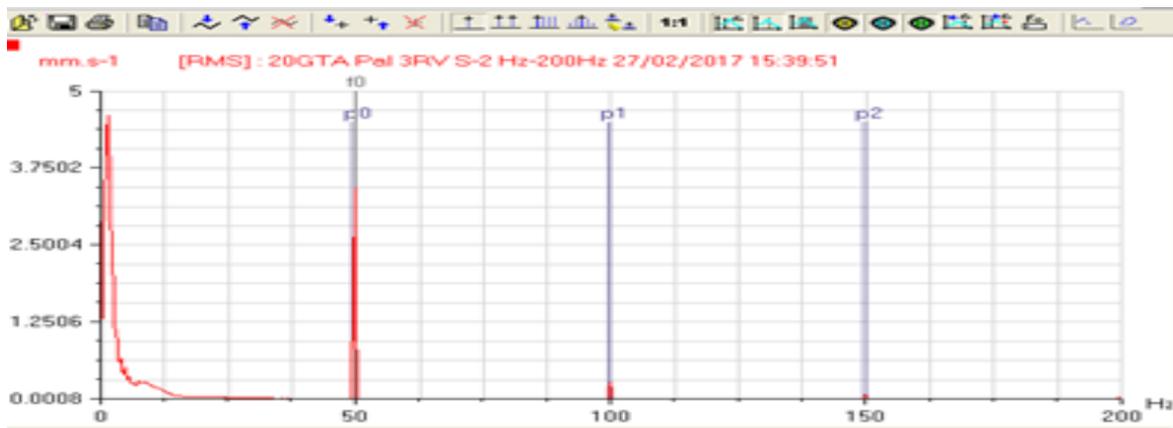


Fig. V.13 : spectre direction radiale verticale

❖ Analyse des résultats pour le palier 3 :

Tableau. V.6 : Analyse des spectres de palier 3

Direction	A (mm/s)	Fréquence (Hz)	Etat
Axiale	0.499	100	Bon
Radiale horizontale	1.77	50	Bon
Radial verticale	3.71	50	admissible

Dans la **direction axiale**, une amplitude remarquable est obtenue à une fréquence égale au double de la fréquence de rotation. Donc, ce défaut correspond à un désalignement angulaire, car la vibration est enregistrée dans la direction axiale. Ce défaut est caractérisé **Bon** selon la norme AFNOR 90-300. Dans les **directions radiales (verticale et horizontale)**, on a un

défaut de balourd qui est caractérisé **Bon** sur la direction horizontale et **admissible** sur la direction verticale selon la norme AFNOR 90-300.

❖ Spectres de palier 4 :

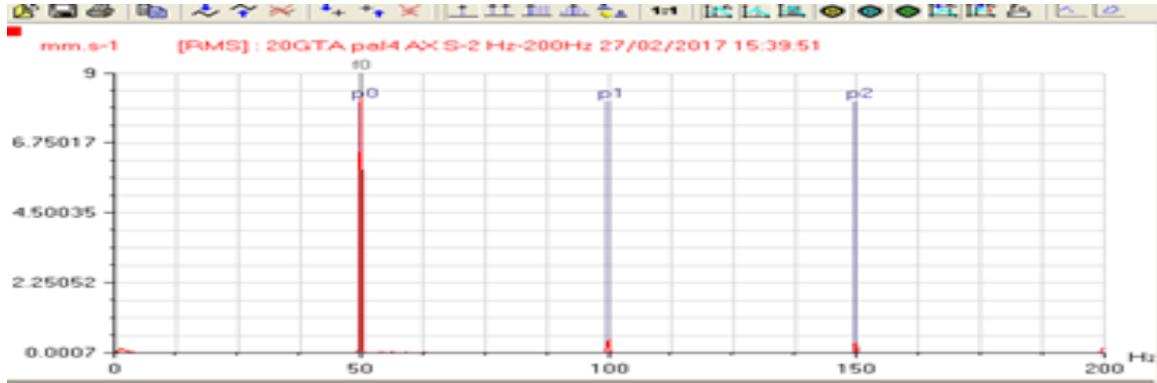


Fig. V.14 : spectre direction axiale (P04)

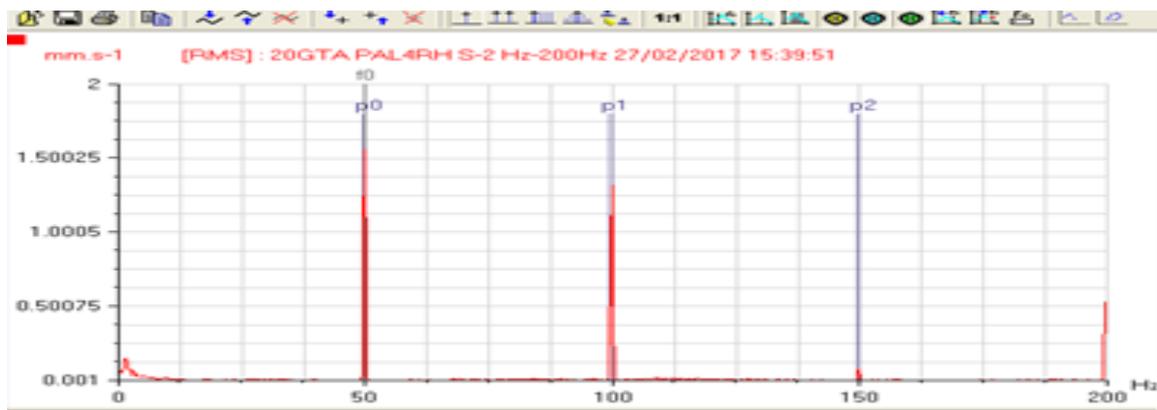


Fig. V.15 : spectre direction radiale horizontale (P04)

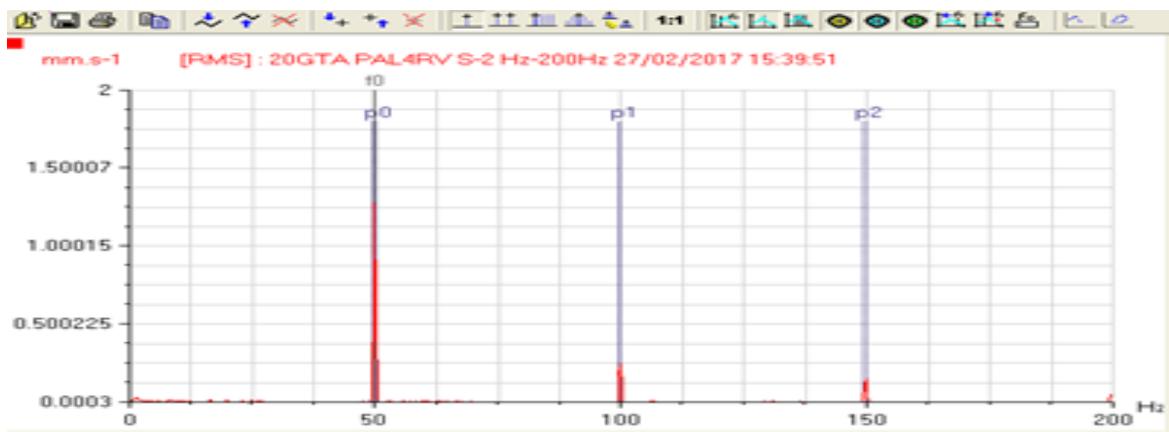


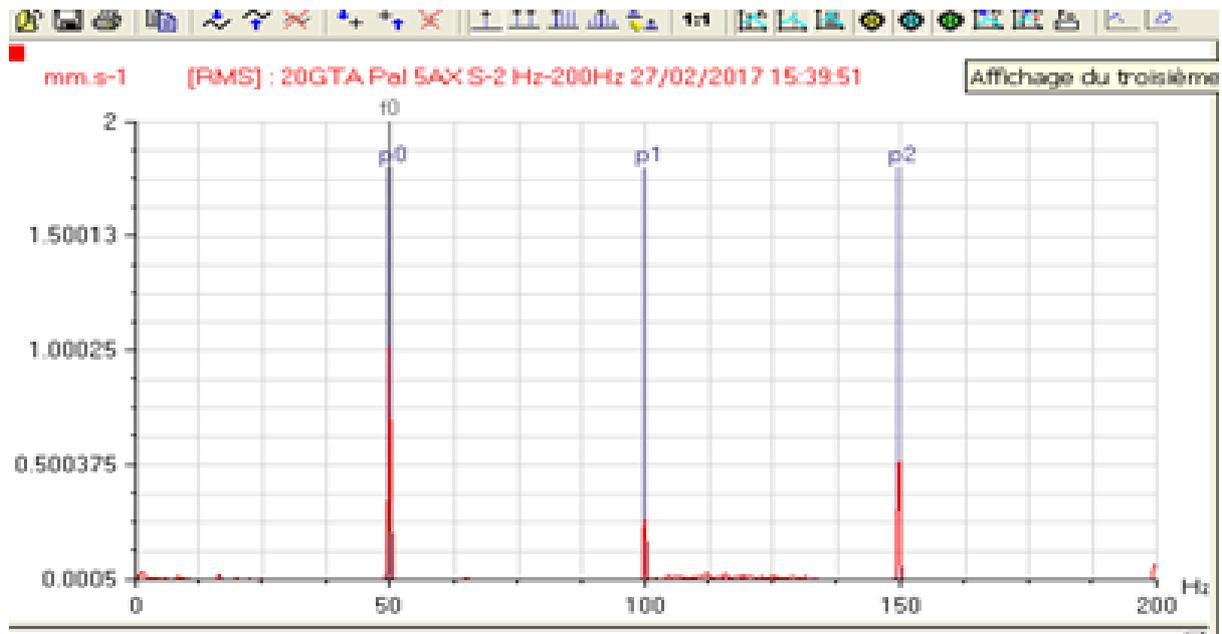
Fig. V.16 : spectre direction radiale verticale P(04)

❖ **Analyse des résultats pour le palier 4 :****Tableau. V.7 :** Analyse des spectres de palier 4

Direction	A (mm/s)	Fréquence (Hz)	Etat
Axiale	8.38	50	Encore admissible
Radiale horizontale	2.49	50	Bon
Radial verticale	1.78	50	Bon

D'après les spectres de palier 4 sur les trois directions, on peut constater très clairement que des pics d'amplitude en vitesse (RMS) correspondant à la fréquence de rotation de l'arbre (50 Hz) et ses harmoniques ($2 \cdot 50$, $3 \cdot 50$).

Le pic à la fréquence de rotation représente un défaut de balourd qui est caractérisé **Encore admissible** sur la direction axiale et **Bon** sur la direction horizontale et verticale selon la norme AFNOR 90-300.

❖ **Spectres de palier 5 :****Fig. V.17 :** spectre direction axiale (P05)

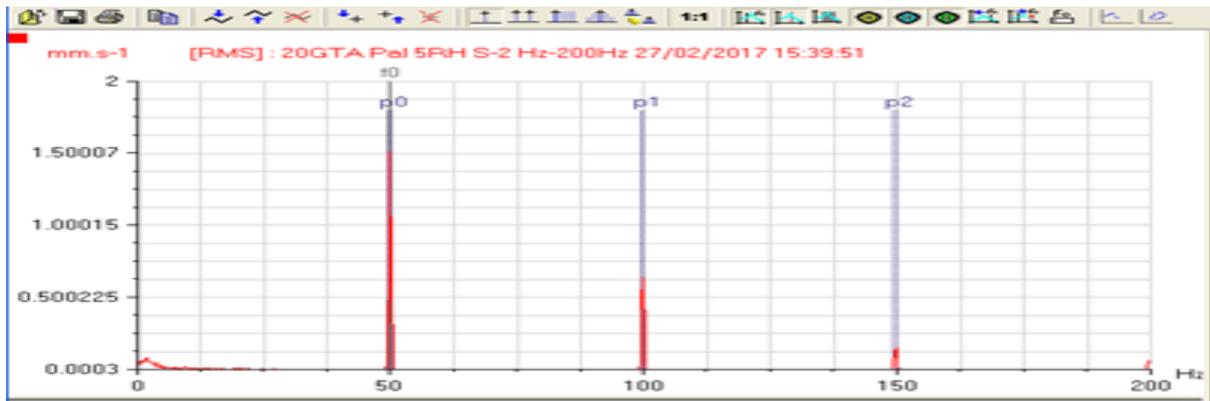


Fig. V.18 : spectre direction radiale horizontale (P05)

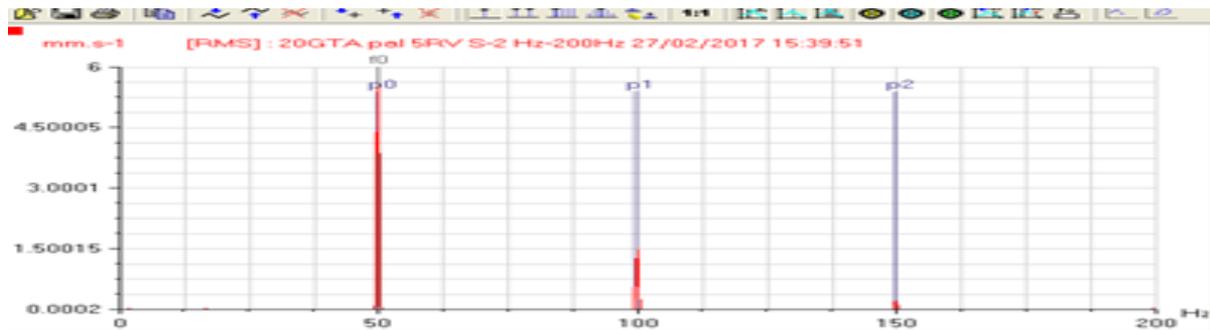


Fig. V.19 : spectre direction radiale verticale (P05)

❖ Analyse des résultats pour le palier 5 :

Tableau. V.8 : Analyse des spectres de palier 5

Direction	A (mm/s)	Fréquence (Hz)	Etat
Axiale	1.26	50	Bon
Radiale horizontale	1.72	50	Bon
Radial verticale	5.84	50	Admissible

D'après les spectres de palier 5 sur les trois directions, on peut constater très clairement que des pics d'amplitude en vitesse (RMS) correspondant à la fréquence de rotation de l'arbre (50 Hz) et ses harmoniques (2×50 , 3×50). Le pic à la fréquence de rotation représente un défaut de balourd qui est caractérisé **Bon** sur les directions axiale et horizontale et **Admissible** sur la direction verticale selon la norme AFNOR 90-300.

❖ Signaux de palier 6 :

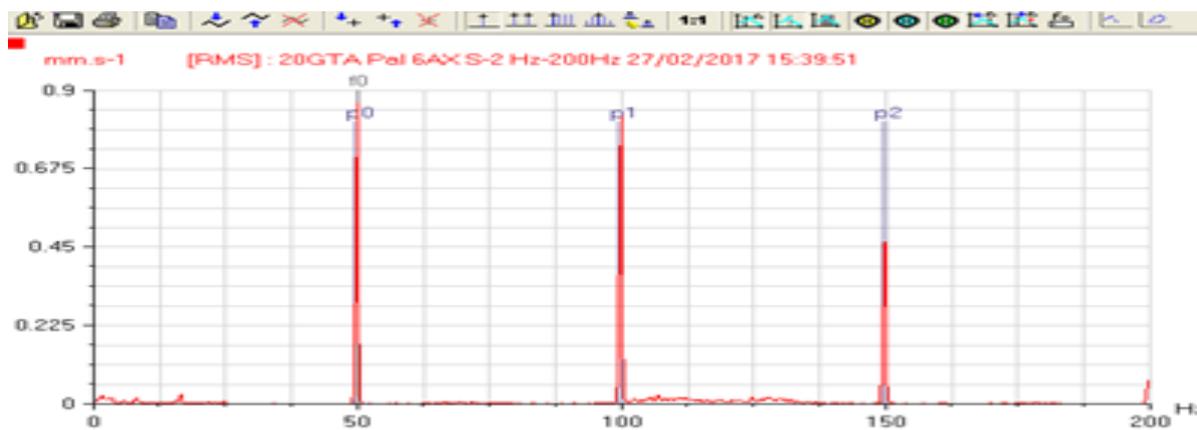


Fig. V.20 : spectre direction axiale (P06)

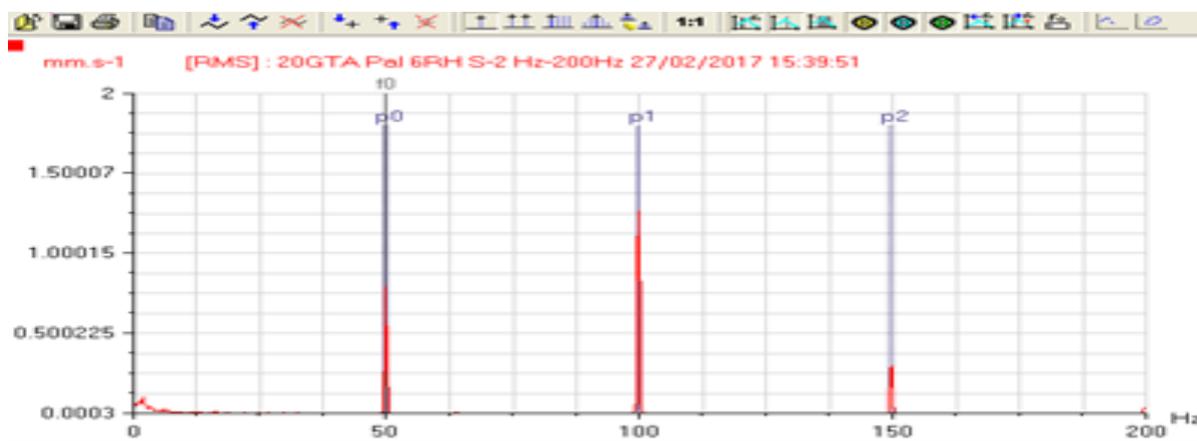


Fig. V.21 : spectre direction radiale horizontale (P06)

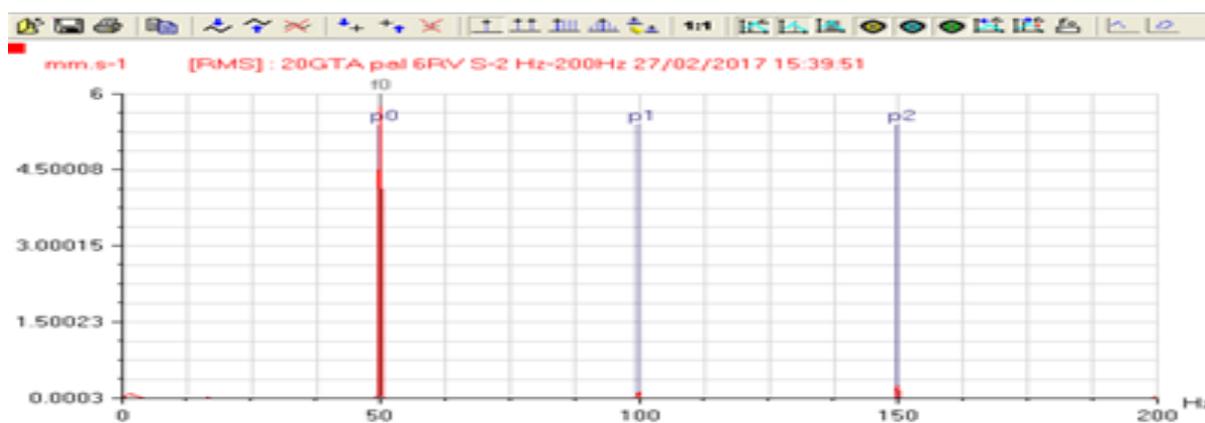


Fig. V.22 : spectre direction radiale verticale (P06)

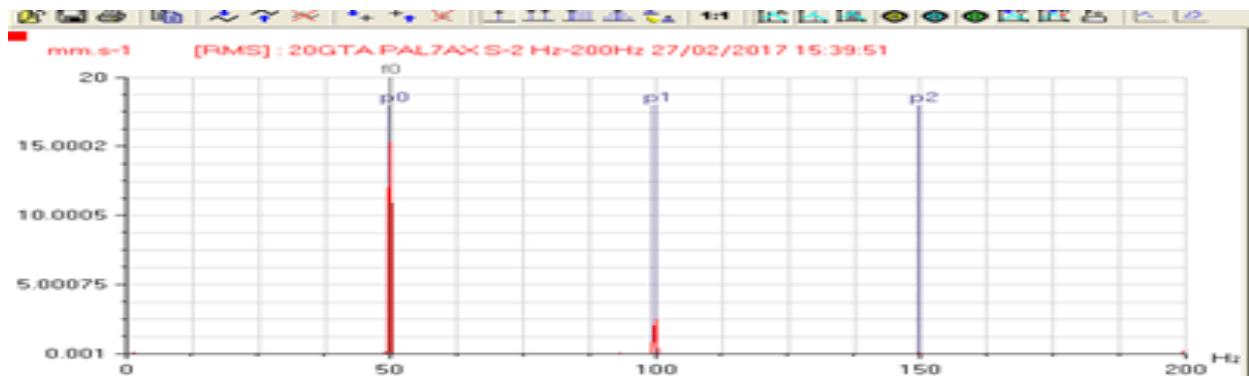
❖ **Analyse des résultats pour le palier 6 :****Tableau. V.9 :** Analyse des spectres de palier 6

Direction	A (mm/s)	Fréquence (Hz)	Etat
Axiale	1.39	50	Bon
Radiale horizontale	1.64	100	Bon
Radial verticale	5.84	50	Encore admissible

Dans la **direction axiale**, le spectre à un pic remarquable correspondant à la fréquence de rotation de l'arbre (50Hz) qui représente un défaut de balourd qui est caractérisé **Bon** selon la norme AFNOR 90-300.

Dans la **direction radiale horizontale**, une amplitude remarquable est obtenue à une fréquence égale au double de la fréquence de rotation. Donc, ce défaut correspond à un désalignement parallèle, car la vibration est enregistrée dans la direction radiale. Ce défaut est caractérisé **Bon** selon la norme AFNOR 90-300.

Dans la **direction radiale verticale**, on a un défaut de balourd caractérisé **Encore admissible** selon la norme AFNOR 90-300.

❖ **Signaux de palier 7 :****Fig. V.23 :** spectre direction axiale (P07)

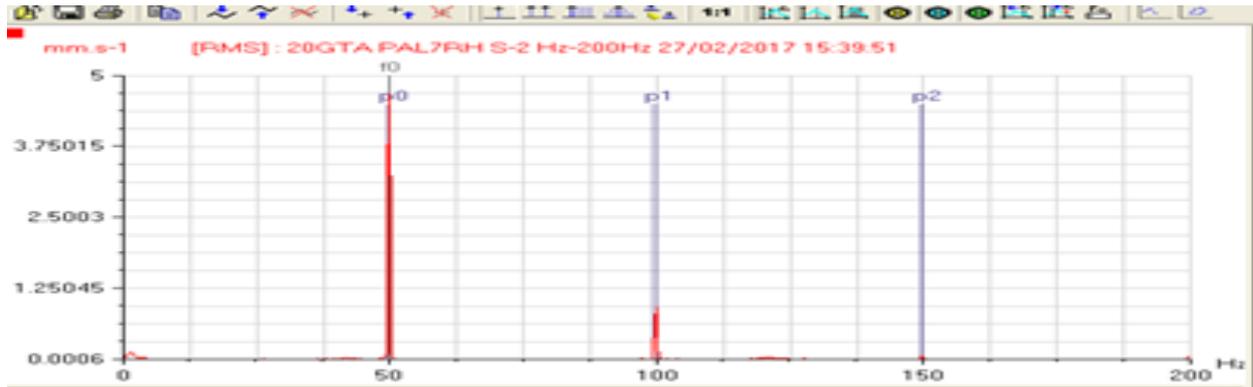


Fig. V.24 : spectre direction radiale horizontale (P07)

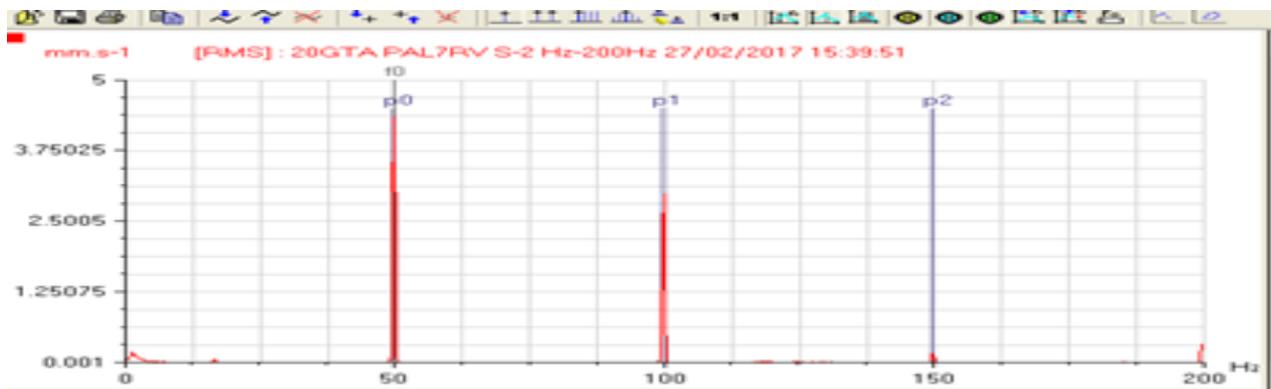


Fig. V.26 : spectre direction radiale verticale (P07)

❖ Analyse des résultats pour le palier 7 :

Tableau. V.10 : Analyse des spectres de palier 7

Direction	A (mm/s)	Fréquence (Hz)	Etat
Axiale	15.0	50	Encore admissible
Radiale horizontale	4.09	50	Admissible
Radial verticale	5.49	50	Admissible

D'après les spectres de palier 1 sur les trois directions, on peut constater très clairement que des pics d'amplitude en vitesse (RMS) correspondant à la fréquence de rotation de l'arbre (50 Hz) et ses harmoniques (2×50 , 3×50). Le pic à la fréquence de rotation représente un défaut de

balourd qui est caractérisé **Encore admissible** sur la direction axiale et **Admissible** sur les directions horizontale et verticale selon la norme AFNOR 90-300.

❖ **Remarque :**

D'après les spectres des 7 paliers et le tableau de reconnaissance des défauts (**Tableau. IV.1.** Reconnaissance des principales anomalies), autres défauts peuvent apparaître sur le groupe turboalternateur par rapport à la fréquence des vibrations et la direction de mesure :

- Le défaut de fixation : on peut le constater dans la fréquence (1, 2, 3,4 x f_{rot}) et uniquement sur la direction radiale (RH, RV).
- Le défaut d'excitation électrique : on peut aussi le constater dans la fréquence (1, 2, 3,4 x f_{rot}) sur les deux directions de mesure axiale et radiale (RH, RV).

Conclusion :

Dans ce chapitre on a appliqué l'analyse spectrale pour détecter le type de défaut constaté sur les paliers de GTA et leur niveau vibratoires selon la norme AFNOR 90-300.

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

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

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

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

On a fait des relevées qui indique l'état vibratoire de GTA pour faire une application de l'analyse spectrale pour indiquer les types des défauts dont on doit suivre l'évolution et en programme le temps d'intervention.

- [1] KWU service de formation professionnelle, « circuit d'eau et de vapeur »
- [2] fkww .service de formation professionnel. Turbine à vapeur .N° d'enregistrement.
- [3] Chellil Sadek Hamzaoui Salah surveillance d'un système tournant et modélisation par ANSYS applications du groupe turbo alternateur de la centrale de Cap _ Djinet.
- [4] Boussalah optimisation des méthodes de diagnostic d'un turboalternateur par analyse des caractéristiques vibratoires.
- [5] Ghersallah, alternateur. Module II : équipement principal. (Norme spécifique).
- [6] Brül et Kjaer, Schank. Vibrations. Equilibrage sur site. Applications à la maintenance conditionnelle. Imprimé en France, Février 1994.
- [7] <http://medias.denud.com/document/9782100543977/feuilleter.pdf>
- [8] RAHMI FAHIM et HAMAD MAKHLOUF, Suivi et analyse vibratoire du groupe turbo-alternateur par le système ON-LINE Mémoire de fin d'étude (2006/2007)
- [9] <http://www.maxicours.com/se/fiche/2/2/129722.html>
- [10] Daniel RACOCEANU « Contribution à la surveillance des Systèmes de Production en utilisant les Techniques de l'Intelligence Artificielle ». Thèse de doctorat à l'UFR des Sciences et Techniques de l'Université de Franche-Comté. Janvier 2006.
- [11] Meslem Walid <<diagnostic par analyse vibratoire des défauts courants de groupe turboalternateur de centrale thermique de Cap-Djinet.
- [12] Agroum Mohamed Lamine, Moussaoui Hamid, Etude de maintenance conditionnelle par analyse vibratoire d'un groupe turboalternateur.
- [13] Landolsi Foued cours de technique de surveillance.
- [14] Bensana Toufik<<diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une turbine à vapeur>> mémoire de magister 2008 université de Badji Mokhtar .Annaba.
- [15] Alain Boulenger, Christian panchaud, Surveillance des machines par analyse de vibrations, Préface de Claude Pichot ,2^e tirage 1998 (AFNOR).

[16] Allalou Ali suivi et analyse vibratoire de groupe turboalternateur (centrale thermique de Cap-Djinet).

[17] Nacer Hamzaoui, maintenance et analyse vibratoire, laboratoire vibrations acoustique INSA, lion édition Veil- Tech.

[18] Mesure EC, la maintenance prédictive des machines tournantes par surveillance vibratoire, l'expertise dynamique 9 rue du 11 novembre -38200 vienne.

[19] David Ougeix. Analyse vibratoire des machines tournantes (technique de l'ingénieur BM4145).

[20] Service de maintenance « Sonatrach du site Hassi R'mel ».

[21] Akbi Brahim Hamzaoui Med essaïd analyse vibratoire des défauts courant dans le parc machine de la centrale thermique.

[22] Documentation du central service diagnostic machines <<fiche technique

ONEPROD XPR-300, MVP-200.

a) Vibrations Relatives Selon La Norme ISO 7919-2

Répartition en zone pour 3000 Tr /min	Vibration absolue d'arbre En m 0-crête	Explication selon ISO
A	< 45	Machine neuve
B	45 > valeur < 83	Service autorisé
C	83 > valeur < 120	Durée limité autorisé
D	> 120	Endommagement possible de la machine

❖ Vibrations Absolue Selon La Norme ISO10816-2

Répartition en zone pour 3000 Tr /min	Vibration absolue d'arbre En mm /s eff	Explication selon ISO
A	< 3,8	Machine neuve
B	3,8 > valeur < 7.5	Service autorisé
C	7.5 > valeur < 11.8	Durée limité autorisé
D	> 11.8	Endommagement possible de la machine