

---

## Résumer :

Les pannes imprévues sont quelques fois très coûteuses. La perte de production pendant les réparations engendre un manque à gagner qui peut affecter les bénéfices de l'entreprise. Il devient évident que de telles pannes ne doivent pas être tolérées. L'analyse vibratoire consiste à détecter d'éventuels dysfonctionnements et à suivre leur évolution dans le but de planifier ou reporter une intervention mécanique. Cependant, l'expérience a montré que le paramètre le plus fiable qui donne le plus précocement et de la meilleure façon l'état de détérioration d'une machine tournante est la vibration. Toutes les machines vibrent et, au fur et à mesure que l'état de la machine se détériore (balourd, défaut de roulement ou de palier etc....) le niveau de vibration augmente. En mesurant et en surveillant le niveau de vibration produit par une machine, on obtient un indicateur idéal sur son état. Si l'augmentation de vibration de la machine permet de détecter un défaut, l'analyse des caractéristiques de vibration de la machine permet d'en identifier la cause. On peut ensuite en déduire avec précision le délai avant qu'il ne devienne critique. Notre travail est consacré à l'étude du comportement vibratoire des machines tournantes, avec une application de la maintenance préventive. La surveillance vibratoire des machines tournantes permet d'éviter les pertes de production et améliore la fiabilité et la sécurité.

## **Abstract:**

Unexpected breakdowns are sometimes very costly. The loss of production during repairs results in a loss of revenue that can affect the company's profits. It becomes obvious that such breakdowns should not be tolerated. Vibration analysis consists in detecting possible malfunctions and following their evolution in order to plan or postpone a mechanical intervention. However, experience has shown that the most reliable parameter that gives the earliest and best indication of the state of deterioration of a rotating machine is the vibration. All machines vibrate, and as the condition of the machine deteriorates (unbalance, bearing failure, etc.) the vibration level increases. By measuring and monitoring the level of vibration produced by a machine, we obtain an ideal indicator of its condition. If the increased vibration of the machine allows the detection of a fault, the analysis of the vibration characteristics of the machine allows the identification of the cause. We can then accurately deduce the time before it becomes critical. Our work is devoted to the study of the vibratory behaviour of rotating machines, with an application of preventive maintenance. Vibration monitoring of rotating machines helps to avoid production losses and improves reliability and safety.

# REMERCIEMENT :

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous tenons à remercier sincèrement Madame **K. HEROUZ** qui, en tant qu'encadrant de mémoire, et aussi chef département de maintenance **BOUKRAA Mohammed** et l'ingénieur **KADA** au niveau de l'entreprise **GICA** (Cimenterais Zahana) sont toujours montré l'écoute et la disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire

Nous adressons nos remerciements aux membres du jury qui ont accepté de faire soutenir ce mémoire.

Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à toutes et à tous.

Nous adressons nos remerciements à **Mr. BOUHAFES Mohammed** qui nous ont apporté leur aide.

---

## DÉDICACE

Je dédie ce mémoire :

A mes chers parents ma MAMAN adorée et mon PAPA pour  
leur patience, leur amour, leur soutien et leur  
encouragement.

A mon frère MOHAMED NEJME EDDINE et ma sœur  
BOCHRA

A mes tantes et oncles

A ma chère grande mer

A mes cousins et cousines en particulier LABOUZE

A mes amies en particulier CHARAF YONES MAHMOUD  
et D53

A toute personne qui nous a aidés

A mon chère ami et binôme OMAR

SALAH

## DÉDICACE

Je dédie ce mémoire :

A mes chers parents ma MAMAN adorée et mon PAPA pour  
leur patience, leur amour, leur soutien et leur  
encouragement.

A mes frères et mes sœurs

A mes tantes et oncles

A mes cousins et cousines

A mes amies en particulier HALIM et MADJIDE

A toute personne qui nous a aidés

A mon chère ami et binôme SALAH

OMAR

---

## Table des matières

Résumer : .....	I
Abstract: .....	I
REMERCIEMENT : .....	II
DÉDICACE.....	III
Liste des figures .....	VIII
Liste des tableaux .....	XII
Introduction générale.....	1
Chapitre I Généralité sur la maintenance .....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition de la maintenance .....	3
I.3 Objectif de la maintenance : .....	3
I.4 Types de la maintenance : .....	4
I.4.1 Maintenance corrective.....	4
I.4.2 Maintenance préventive .....	5
I.5 Les temps de maintenance .....	6
I.5.1 La MTBF .....	6
I.5.2 La MTTA .....	6
I.5.3 La MTTR .....	6
I.6 Organisation de la maintenance .....	7
I.7 Opérations de la maintenance .....	8
I.7.1 Le dépannage .....	8
I.7.2 La réparation .....	8
I.7.3 Les inspections.....	8
I.7.4 Les visites.....	8
I.7.5 Les contrôles .....	8
I.7.6 Les révisions .....	8
I.8 Les niveaux de maintenance .....	9
I.9 Les techniques de la maintenance.....	11

I.9.1 La thermographie infrarouge .....	11
I.9.2 L'analyse des huiles .....	11
I.9.3 L'analyse acoustique.....	11
I.9.4 Contrôle par ultrasons .....	12
I.9.5 L'analyse vibratoire :.....	12
I.10 Choix de la technique de maintenance : .....	13
I.11 Avantages et limitations des techniques de maintenance : .....	14
I.12 Conclusion : .....	15
Chapitre II Généralité sur la vibration.....	16
II.1 Introduction : .....	16
II.2 Définition théorique d'une vibration : .....	16
II.3 Description d'un signal vibratoire : .....	16
II.4 Caractéristiques de vibration .....	17
II.4.1 Période $T$ .....	17
II.4.2 Fréquence $f$ .....	18
II.5 Grandeurs vibratoires .....	18
II.5.1 Déplacement .....	18
II.5.2 Vitesse .....	19
II.5.3 Accélération.....	20
II.6 Différents types de vibrations.....	21
II.6.4 Vibration périodique.....	21
II.6.5 Vibrations apériodiques.....	24
II.7 Conclusion .....	25
Chapitre III : l'analyse vibratoire .....	26
III.1 Introduction : .....	26
III.2 Capteurs de vibrations :.....	26
III.2.1 Caractéristiques et types :.....	26
III.3 Comparaison entre les différents types de capteurs : [17] .....	29
III.4 Vibro-test 60 :.....	29
III.4.2 Caractéristique de l'appareil: .....	30
III.5 Stratégies de surveillance vibratoire : .....	30

III.5.3 Choix des points de mesure : .....	30
III.5.4 Mesure vibratoire en niveau global : .....	31
III.5.5 Analyse spectrale : .....	32
III.5.6 Calcul de spectre : .....	34
III.6 Différents types de défauts : .....	35
III.6.7 Déséquilibre (défaut de balourd).....	35
III.6.8 Défaut d'alignement.....	38
III.6.9 Défaut de serrage : .....	40
III.6.10 Défauts de roulements : .....	40
III.6.11 Défauts des engrenages : .....	43
III.7 Conclusion : .....	47
Chapitre IV : Etude d'un cas industrielle .....	48
IV.1 Introduction : .....	48
IV.2 Présentation de l'entreprise .....	48
IV.2.1 Implantation .....	48
IV.2.2 Processus de fabrication du ciment .....	48
IV.2.3 Les étapes de fabrication du ciment : .....	49
IV.3 La chaine cinématique : .....	54
IV.4 L'analyse vibratoire : .....	55
IV.4.4 Niveau global : .....	55
IV.4.5 Analyse spectrale : .....	58
IV.5 Conclusion : .....	72
Conclusion générale .....	73
Bibliographie.....	74

---

## Liste des figures

Figure I-1: Principe de la maintenance corrective. ....	4
Figure I-2 Représentation synthétique de la maintenance .....	5
Figure I-3 Temps caractéristiques lors d'une intervention. [6] .....	6
Figure I-4 organisation de la maintenance [7] .....	7
Figure I-5 Organisation de la maintenance interne centralisée [7] .....	7
Figure I-6 Principe de l'analyse thermographique : a) Image visible d'un disjoncteur électrique, b) Visualisation d'un défaut de connexion sur l'image thermique.....	11
Figure I-7: Détecteur ultrason. ....	12
Figure I-8: Principe de l'analyse vibratoire : a) Mesures des vibrations, b) Représentation du spectre vibratoire. ....	13
Figure II-1 Description du signal vibratoire. [13] .....	16
Figure II-2 Période et fréquence d'une Vibration [13] .....	18
Figure II-3 Représentation temporelle de déplacement [13].....	19
Figure-II-4 Représentation fréquentielle d'un signal harmonique [13] .....	19
Figure II-5 Représentation temporelle de la vitesse vibratoire [13].....	20
Figure II-6 Représentation fréquentielle de la vitesse vibratoire [13] .....	20
Figure II-7 Représentation temporelle de l'accélération [13] .....	21
Figure II-8 Représentation fréquentielle de l'accélération [13] .....	21
Figure II-9 Vibrations périodiques [13] .....	22
Figure II-10 Vibration harmonique [13] .....	23
Figure II-11 Système masse ressort vibre harmoniquement [15] .....	24
Figure II-12 Vibration aléatoire .....	25
Figure III-1Principe du capteur inductif à courants de Foucault .....	27
Figure III-2Schéma de principe d'une vélocimétrie .....	28
Figure III-3Principe de fonctionnement d'un accéléromètre (piézoélectrique) .....	28
Figure III-4 de vibrotest 60 .....	30
Figure III-5 Des points de mesure.....	31
Figure III-6 Représentation temporelle du signal .....	33
Figure III-7représentation fréquentielle du signal.....	33
Figure III-8 Balourd statique.....	36

Figure III-9 Balourd couple.....	37
Figure III-10 Balourd dynamique .....	37
Figure III-11 spectre de défaut de balourd .....	38
Figure III-12 spectre de défaut d'alignement .....	38
Figure III-13 Signal temporel d'un défaut d'alignement .....	39
Figure III-14 Image vibratoire d'un .....	39
Figure III-15 spectre défaut d'alignement angulaire.....	39
Figure III-16 défaut de serrage.....	40
Figure III-17 Constitution d'un roulement.....	40
Figure III-18 Caractéristiques d'un roulement.....	41
Figure III-19 défaut de bague extérieur.....	42
Figure III-20 spectre de défaut de bague intérieure .....	42
Figure III-21 spectre de défaut de bille .....	43
Figure III-22 Schéma simplifié d'un engrenage .....	43
Figure III-23 Spectre d'un engrenage .....	44
Figure III-24 Représentation du spectre théorique d'un défaut d'engrenage.....	44
Figure III-25 Différents types d'engrenage.....	45
Figure III-26 spectre d'un engrenage présentant une dent détériorée .....	45
Figure III-27 spectre théorique d'une denture.....	46
Figure III-28 spectre réel d'un engrènement en fond de denture .....	46
Figure III-29 spectre d'un engrenage présentant une dent détériorée.....	47
Figure III-30 spectre de la modulation d'amplitude de $F_e$ par $F_r$ .....	47
Figure IV-1 prototype d'usine .....	48
Figure IV-2 schéma de fabrication du ciment.....	49
Figure IV-3 Carrière.....	49
Figure IV-4 Stocke polluer.....	50
Figure IV-5 Broyage Cru .....	51
Figure IV-6 Préchauffage.....	51
Figure IV-7 Four Rotatif .....	52
Figure IV-8 broyage ciment .....	53
Figure IV-9 remplissage de ciment .....	53

Figure IV-10 la chaine cinématique .....	54
Figure IV-11 Tendance du point N°9 de vitesse en mm/s .....	57
Figure IV-12 Tendance du point N°10 de vitesse en mm/s sur la direction horizontale .....	57
Figure IV-13 Spectre de vitesse P1 horizontal.....	58
Figure IV-14 Spectre de vitesse P1 vertical .....	58
Figure IV-15 Spectre d'accélération P1 horizontal.....	58
Figure IV-16 Spectre d'accélération P1 vertical .....	58
Figure IV-17 Spectre de vitesse P2 horizontal.....	59
Figure IV-18 Spectre de vitesse P2 vertical .....	59
Figure IV-19 Spectre de vitesse P2 axial .....	59
Figure IV-20 Spectre d'accélération P2 horizontal.....	59
Figure IV-21 Spectre d'accélération P2 vertical .....	59
Figure IV-22 Spectre de vitesse P3 horizontal.....	61
Figure IV-23 Spectre de vitesse P3 vertical .....	61
Figure IV-24 Spectre de vitesse P3 axial .....	61
Figure IV-25 Spectre d'accélération P3 horizontal.....	61
Figure IV-26 Spectre d'accélération P3 vertical .....	61
Figure IV-27 Spectre de vitesse P4 horizontal.....	62
Figure IV-28 Spectre de vitesse P4 vertical .....	62
Figure IV-29 Spectre de vitesse P4 axial .....	62
Figure IV-30 Spectre d'accélération P4 horizontal.....	62
Figure IV-31 Spectre d'accélération P4 vertical .....	62
Figure IV-32 Spectre de vitesse P5 horizontal.....	63
Figure IV-33 Spectre de vitesse P5 vertical .....	63
Figure IV-34 Spectre de vitesse P5 axial .....	63
Figure IV-35 Spectre d'accélération P5 horizontal.....	63
Figure IV-36 Spectre d'accélération P5 vertical .....	63
Figure IV-37 Spectre de vitesse P6 horizontal.....	64
Figure IV-38 Spectre de vitesse P6 vertical .....	64
Figure IV-39 Spectre de vitesse P6 axial .....	64
Figure IV-40 Spectre d'accélération P6 horizontal.....	64

Figure IV-41 Spectre d'accélération P6 vertical.....	64
Figure IV-42 Spectre de vitesse P7 horizontal.....	65
Figure IV-43 Spectre de vitesse P7 vertical.....	65
Figure IV-44 Spectre de vitesse P7 axial.....	65
Figure IV-45 Spectre d'accélération P7 horizontal.....	65
Figure IV-46 Spectre d'accélération P7 vertical.....	65
Figure IV-47 Spectre de vitesse P8 horizontal.....	66
Figure IV-48 Spectre de vitesse P8 vertical.....	66
Figure IV-49 Spectre de vitesse P8 axial.....	66
Figure IV-50 Spectre d'accélération P8 horizontal.....	66
Figure IV-51 Spectre d'accélération P8 vertical.....	66
Figure IV-52 Spectre de vitesse P9 horizontal.....	67
Figure IV-53 Spectre de vitesse P9 vertical.....	67
Figure IV-54 Spectre de vitesse P9 axial.....	67
Figure IV-55 Spectre d'accélération P9 horizontal.....	68
Figure IV-56 Spectre d'accélération P9 vertical.....	69
Figure IV-57 Spectre de vitesse P10 horizontal.....	69
Figure IV-58 Spectre de vitesse P10 vertical.....	69
Figure IV-59 Spectre de vitesse P10 axial.....	70
Figure IV-60 Spectre d'accélération P10 horizontal.....	71
Figure IV-61 Spectre d'accélération P10 vertical.....	71

## Liste des tableaux

Tableau I-1 les niveaux de la maintenance [4] [10] [1] .....	10
Tableau I-2 Choix de l'outil de technique de maintenance suivant les défauts potentiels.....	13
Tableau I-3 Choix de l'outil de technique de maintenance.....	14
Tableau III-1 de Comparaison entre les différents types de capteur.....	29
Tableau III-2Seuils d'accélération vibratoire.....	31
Tableau III-3 Seuils de la vitesse vibratoire.....	32
Tableau IV-1 les mesures de vibration de niveau globale .....	56

---

## Introduction générale

Les mutations techniques et économiques, amplifiées par la mondialisation ont généré d'importants changements dans les entreprises. La production industrielle évolue dans un contexte de plus en plus sévère en ce qui concerne la qualité, la sécurité et les nuisances. Le service de diagnostic et de maintenance dans la logique qualité est confronté à des problèmes de plus en plus complexes (concurrence rude, échange de grandes quantités de données hétérogènes, matériels sophistiqués, etc.). Or, les défaillances qui apparaissent dans les machines tournantes sont rarement décelables visuellement, ou alors il est déjà trop tard pour agir. De ce fait, la résolution nécessite des méthodes spécifiques d'aide à la décision et de nouvelles structures à intégrer dans la stratégie de l'entreprise. C'est pourquoi, l'outil de production doit faire l'objet d'une maintenance efficace. Des pannes catastrophiques inattendues entraînent à la fois une perte de production et des factures de réparations très élevées. Un arrêt de production pour une maintenance sur la chaîne de production d'une cimenterie algérienne peut coûter jusqu'à un milliard de Da/jour. De plus une maintenance mal adaptée à un maillon de la chaîne, peut également conduire à une situation critique, dangereuse aussi bien pour le personnel que pour le matériel et/ou pour l'environnement. De ce fait, la surveillance et le diagnostic des défauts sont aujourd'hui primordiaux pour la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et l'efficacité des systèmes de production ainsi que pour la protection de l'environnement. Désormais, la maintenance doit s'adapter continuellement au progrès des domaines techniques, technologiques et organisationnels. De plus, la crise existante dans le milieu industriel algérien conduit à des nouvelles implications sur les stratégies des entreprises dans ce domaine. Avec le nouveau contexte industriel (privatisation, économie du marché, etc.), les entreprises subissent de grandes pressions de la part des clients. Ces derniers deviennent de plus en plus exigeants et demandent, en outre, des produits et des services de bonne qualité, à moindre coût, livrés rapidement et au bon moment et un service après-vente défiant la compétition. Donc, pour satisfaire la demande en qualité et en quantité tout en respectant les délais de livraison et les coûts l'entreprise algérienne doit disposer d'un outil de production Fiable, donc bien entretenu. C'est pourquoi, le travail présenté est d'une importance capitale pour l'industrie algérienne et en particulier les cimenteries ou les pannes inattendues entraînent des factures de réparations très élevées, sans compter l'inflation et le retard cumulé dans le secteur de l'habitat et de la construction. L'expérience a montré, que parmi les différents phénomènes physiques utilisés pour mettre en évidence des défauts de fonctionnement ou de dégradation d'une machine tournante et donnant une meilleure mesure de son état, l'analyse vibratoire est la plus usitée en maintenance conditionnelle. Ces vibrations sont caractéristiques de l'état de l'équipement et constituent sa signature vibratoire. Le prélèvement et le traitement de tout ou une partie de cette signature permet de connaître rapidement l'état de l'équipement et de suivre son évolution dans le temps sans effectuer le démontage de la machine. Donc, notre objectif est de garantir la disponibilité des machines en diminuant au maximum les dépenses liées aux achats et opérations d'entretien, tout en mettant en place un système efficace de gestion de

maintenance. Un système de maintenance adéquat au système de production d'une entreprise doit à la fois satisfaire les critères techniques, maximiser l'impact stratégique et optimiser les critères économiques. En effet, l'utilisation des méthodes de traitement de signal émis par les machines de production ou certains organes de ces machines, nous permettent d'extraire des informations pertinentes et ainsi prévoir l'apparition des dysfonctionnements et l'intervention à bon escient, en suivant l'évolution dans le temps des symptômes de dérive d'état de l'équipement en cours d'exploitation, voire définir les améliorations nécessaires par une nouvelle conception. Dans ce contexte, et étant donné que le signal vibratoire contient la signature cinématique de la machine, liée aux conditions de fonctionnement : l'identité de la machine, et en utilisant ce signal, nous proposons une méthode d'évaluation des systèmes de production en intégrant les défaillances et les politiques de maintenance. Les équipements de la cimenterie de ZAHANA est composée essentiellement des machines tournantes, ces dernières sont soumises à des vibrations qui sont la cause principale de leurs défaillances, d'où l'intérêt de la surveillance vibratoire Notre travail est basé sur l'étude du comportement vibratoire des machines tournantes, avec une application de la maintenance préventive. Cette étude est répartie sur quatre chapitres suivants : Une introduction comprenant la mission et les objectifs de la recherche. Après avoir la généralité sur la maintenance, les différents types de maintenance, et les niveaux de maintenance dans le chapitre I. dans le deuxième chapitre représente des généralités sur les vibrations telles que les différentes formes de vibrations, les grandeurs de mesures et compositions des vibrations et le Troisième chapitre concerne l'analyse de vibratoire description de la ligne d'arbre du four et les organes qui la constituent. Le quatrième chapitre, c'est la partie du calcul de la chaine cinématique de notre ligne d'arbre.et fait pour faire un diagnostic des prélèvements vibratoires et ainsi on a déterminé les anomalies existant dans cet équipement.

## Chapitre I Généralité sur la maintenance

### I.1 Introduction

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques et administratives de management effectué durant le cycle de vie d'un bien. Ces actions sont destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

La maintenance a longtemps joué un rôle curatif dont l'unique objectif était de réduire la durée d'immobilisation des machines. Cette maintenance curative était axée sur le court terme et ne résolvait que les problèmes liés aux dégradations inévitables. La concurrence effrénée et la course à la compétitivité incitent l'entreprise à rechercher la qualité totale et surtout la réduction des coûts.

La maintenance est ainsi devenue l'une des fonctions stratégiques de l'entreprise. Elle vise donc moins à remettre en état l'outil de travail qu'à anticiper ses dysfonctionnements. L'arrêt ou le fonctionnement anormal de l'outil de production, et le non-respect des délais qui s'en suivent, engendrent des surcoûts que les entreprises ne sont plus en état de supporter. L'entreprise ne doit plus subir les événements, elles doivent les prévoir et analyser leurs effets sur le long terme.

Autrefois curative, la maintenance devient préventive et contribue à améliorer la fiabilité des équipements et la qualité des produits. Cette maintenance se traduit par la définition de plans d'actions et d'interventions sur l'équipement, par le remplacement de certaines pièces en voie de dégradation afin d'en limiter l'usure, par le graissage ou le nettoyage régulier de certains ensembles.

Ces actions préventives étaient dans un premier temps effectuées de façon systématique selon des calendriers prédéfinis. Elles permettaient d'anticiper les pannes, mais au prix d'un alourdissement important des coûts de maintenance.

### I.2 Définition de la maintenance

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

Une fonction requise est une fonction, ou un ensemble de fonctions d'un bien considérées comme nécessaires pour fournir un service donné. [1]

### I.3 Objectif de la maintenance :

Pour être compétitive, l'entreprise doit produire plus vite et au coût le plus bas. Mais produire plus, implique que les machines ne doivent jamais (ou presque) connaître de défauts, de défaillances, de pannes (d'arrêts pour pannes).

C'est le rôle de la fonction maintenance : Faire en sorte que les équipements de production soient toujours disponibles contribuant ainsi à la rentabilité et la compétitivité de l'entreprise. [2]

Cet objectif se résume par les actions suivantes :

- Augmenter la disponibilité des machines
- Augmenter la durée de vie des machines
- Réduire les taux de défaillances
- Réduire les temps d'intervention
- Réduire les taux de réparation
- Réduire les coûts d'exploitation
- Réduire les consommations anormales d'énergie
- Réduire les causes d'accidents graves. [3]

### I.4 Types de la maintenance :

#### I.4.1 Maintenance corrective

Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. [4]

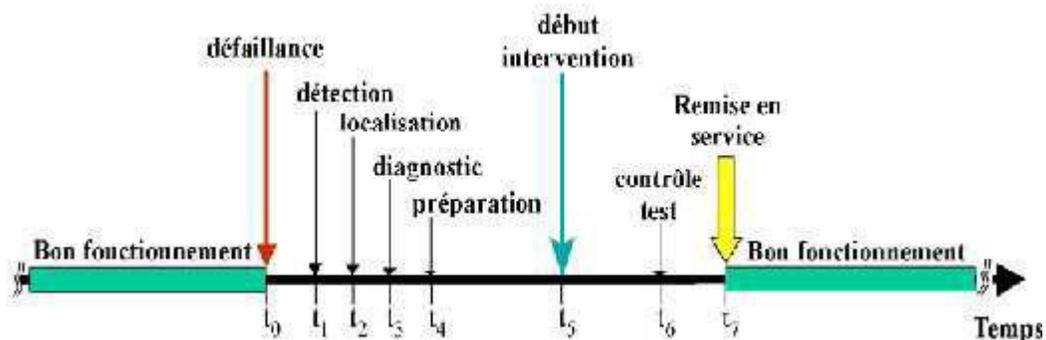


Figure I-1: Principe de la maintenance corrective.

##### I.4.1.1 Types de maintenance corrective

###### ➤ Maintenance palliative

Action de maintenance corrective destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelée couramment « dépannage », la maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui doivent être suivies d'actions curatives. [4]

###### ➤ Maintenance curative

Action de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié pour lui permettre d'accomplir une fonction requise. [4]

## I.4.2 Maintenance préventive

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien, elle est subdivisée en : [5]

### I.4.2.1 Types de maintenance préventive

➤ **La maintenance prévisionnelle**

Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien. [5]

➤ **La maintenance systématique**

Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien. [5]

➤ **La maintenance conditionnelle**

Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent. [5]

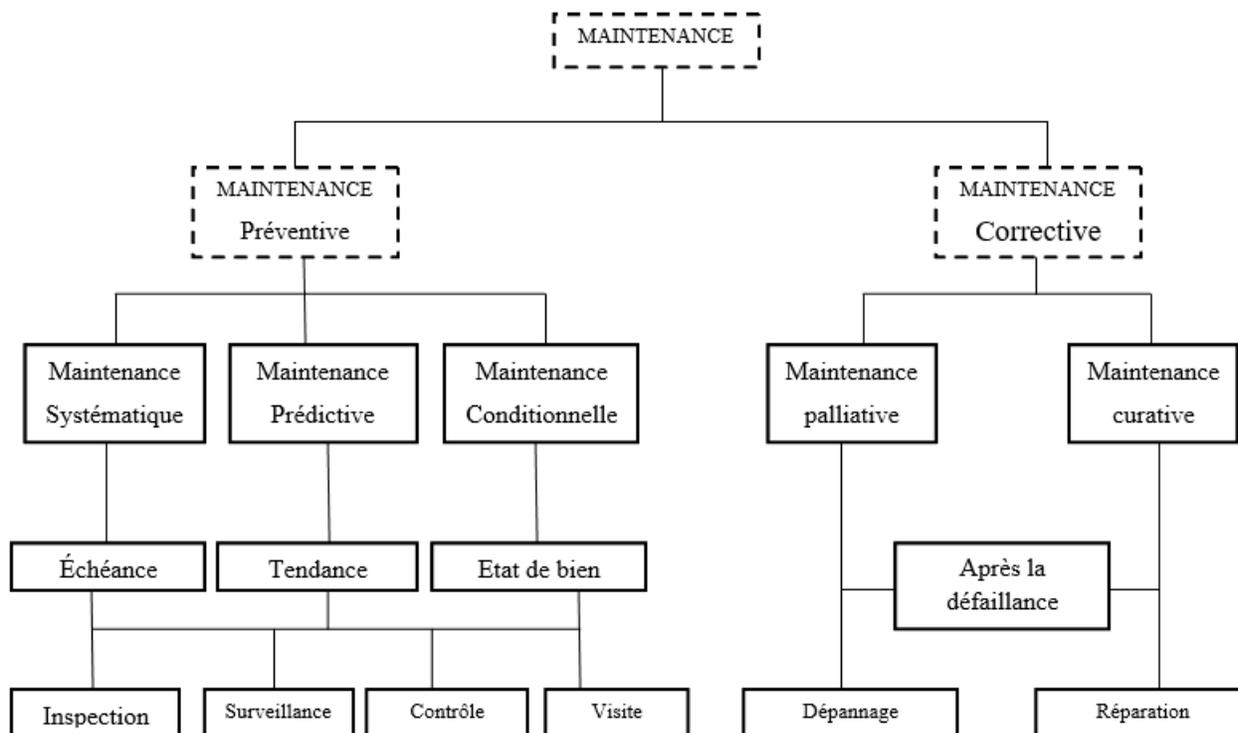


Figure I-2 Représentation synthétique de la maintenance

## I.5 Les temps de maintenance

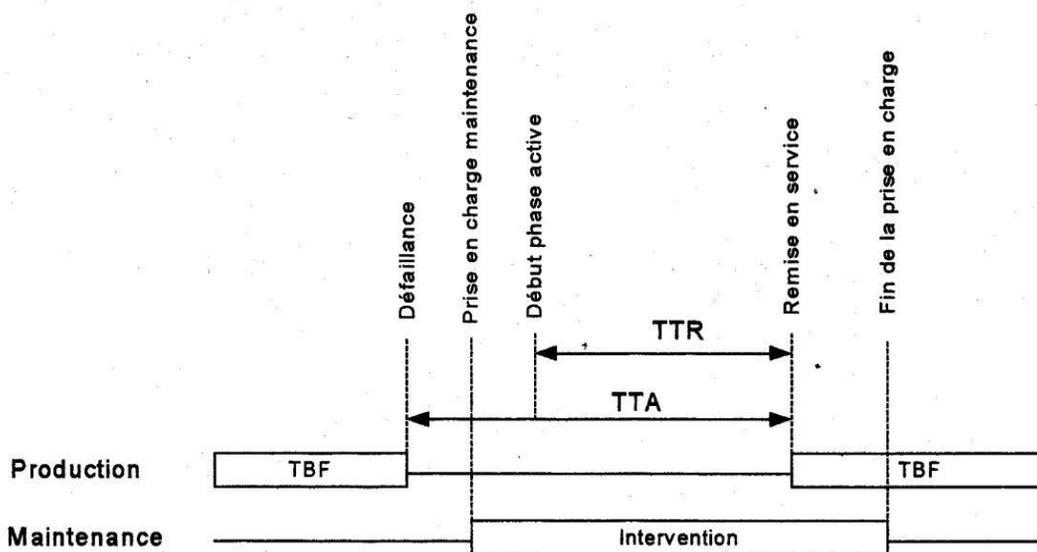


Figure I-3 Temps caractéristiques lors d'une intervention. [6]

### I.5.1 La MTBF

La MTBF est la moyenne des temps de bon fonctionnement (TBF).

Un temps de bon fonctionnement est le temps compris entre deux défaillances. [6]

### I.5.2 La MTTA

La MTTA est la moyenne des temps techniques d'arrêt (TTA).

Les temps techniques d'arrêt sont une partie des temps d'arrêt que peut connaître un système de production en exploitation. Ils ont pour cause une raison technique et, ce faisant, sont à distinguer des arrêts inhérents à la production (attente de pièce, de matière, d'énergie, changement de production, etc.). [6]

### I.5.3 La MTTR

La MTTR est la moyenne des temps techniques de réparation (TTR).

Le TTR est le temps durant lequel on intervient physiquement sur le système défaillant. Il débute lors de la prise en charge de ce système jusqu'après les contrôles et essais avant la remise en service [6].

**Remarque :** MTTA (signifie mean time to restoration (*norme X60-500*)) en anglais

- MTBF (signifie mean time between failures (*norme X60-500*)). En anglais

I.6 Organisation de la maintenance

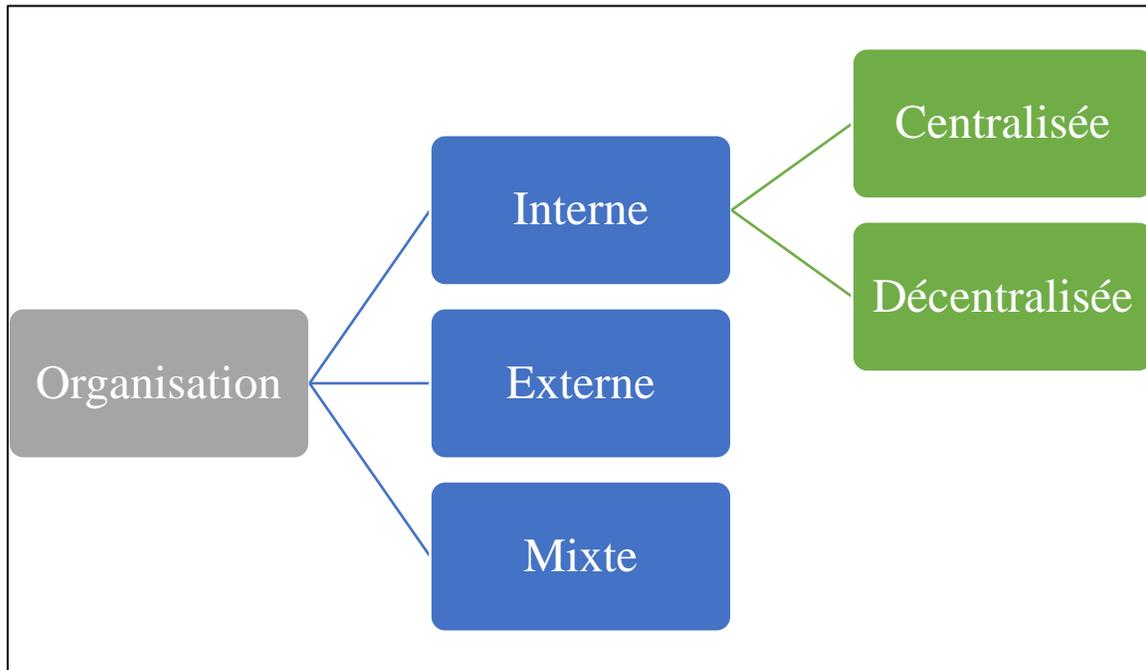


Figure I-4 organisation de la maintenance [7]

➤ **Organisation de la maintenance interne centralisée :**

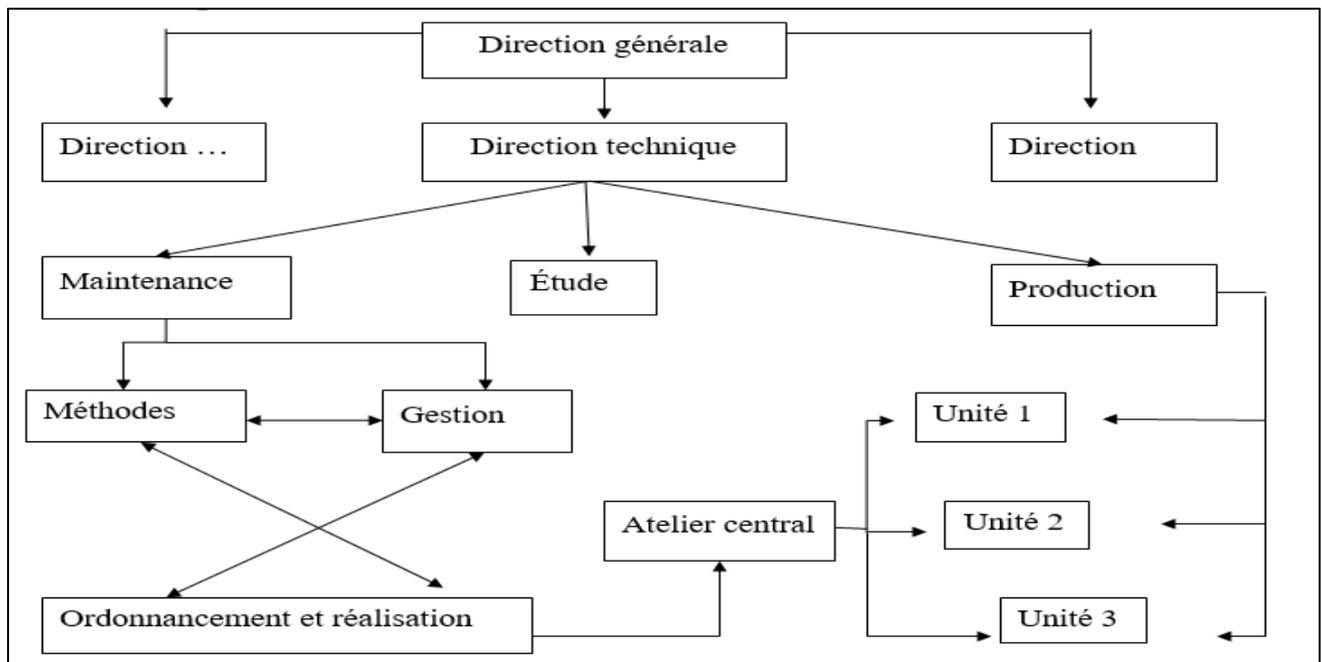


Figure I-5 Organisation de la maintenance interne centralisée [7]

### I.7 Opérations de la maintenance

#### I.7.1 Le dépannage

C'est une action ou opération de maintenance corrective sur un équipement en panne en vue de le remettre en état de fonctionnement. Cette action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas elle sera suivie par la réparation. Souvent les interventions de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses et n'exigent pas la connaissance du comportement des équipements et des modes de dégradation. Le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute inspection ou intervention à l'arrêt [8]

#### I.7.2 La réparation

C'est une intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance. L'équipement réparé doit assurer les performances pour lesquelles il a été conçu. La réparation peut être faite, après décision, soit immédiatement à la suite d'un incident, ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique. [8] [9]

#### I.7.3 Les inspections

Ce sont des activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements. [8] [9]

#### I.7.4 Les visites

Ce sont des opérations de surveillance qui dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité prédéterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies au préalable qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel [8] [9]

#### I.7.5 Les contrôles

Ils correspondent à des vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement. Le contrôle peut, comporter une activité d'information, inclure une décision, acceptation, rejet, ajournement, déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective. Les opérations de surveillance (inspection, visite, contrôle) sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien, effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage [8] [9]

#### I.7.6 Les révisions

Ensemble des actions d'examen, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné, Il est d'usage de distinguer suivant l'étendue de cette opération les révisions partielles des révisions générales. Dans les deux cas, cette opération implique la dépose de différents sous-ensembles. [8] [9]

## I.8 Les niveaux de maintenance

La maintenance et l'exploitation d'un bien s'exercent à travers de nombreuses opérations, parfois répétitives, parfois occasionnelles, communément définies jusqu'alors en cinq niveaux de maintenance. [10]

<p><b>Niveau 1</b></p>	<p><b>Définition</b> : Actions simples nécessaires à l'exploitation et réalisées sur des éléments facilement accessibles en toute sécurité à l'aide d'équipements de soutien intégrés au bien.</p> <p><b>Intervenant</b> : L'utilisateur du bien</p> <p><b>Exemples en préventif</b> : Ronde de surveillance d'état ; Graissages journaliers ; Manœuvre manuelle d'organes mécaniques ; Relevés de valeurs d'état ou d'unités d'usage ; Test de lampes sur pupitre ; Purge d'éléments filtrants ; Contrôle d'encrassement des filtres.</p> <p><b>Exemples en correctif</b> : Remplacement des ampoules ; Ajustage, remplacement d'éléments d'usure ou détériorés, sur des éléments ou composants simples et accessibles.</p>
<p><b>Niveau 2</b></p>	<p><b>Définition</b> : Actions qui nécessitent des procédures simples et/ou des équipements de soutien (intégrés au bien ou extérieurs) d'utilisation ou de mise en œuvre simple.</p> <p><b>Intervenant</b> : Personnel qualifié Un personnel est qualifié lorsqu'il a reçu une formation lui permettant de travailler en sécurité sur un bien présentant certains risques potentiels, et est reconnu apte pour l'exécution des travaux qui lui sont confiés, compte tenu de ses connaissances et de ses aptitudes.</p> <p><b>Exemples en préventif</b> : Contrôle de paramètres sur équipements en fonctionnement, à l'aide de moyens de mesure intégrés au bien ; Réglages simples (alignement de poulies, alignement pompe-moteur, etc.) ; Contrôle des organes de coupure (capteurs, disjoncteurs, fusibles), de sécurité, etc. ; Détartrage de surface de ruissellement (tour aérorefrigérante) ; Graissage à faible périodicité (hebdomadaire, mensuelle) ; Remplacement de filtres difficiles d'accès.</p> <p><b>Exemples en correctif</b> : Remplacement par échange standard de pièces : fusibles, courroies, filtres à air, etc. ; Remplacement de tresses, de presse-étoupe, etc. ; Lecture de logigrammes de dépannage pour remise en cycle ; Remplacement de composants individuels d'usure ou détériorés par échange standard (rail, glissière, galet, rouleaux, chaîne, fusible, courroie,...).</p>
<p><b>Niveau 3</b></p>	<p><b>Définition</b> : Opérations qui nécessitent des procédures complexes et/ou des équipements de soutien portatifs, d'utilisation ou de mise en œuvre complexes.</p> <p><b>Intervenant</b> : Technicien qualifié</p> <p><b>Exemples en préventif</b> : Contrôle et réglages impliquant l'utilisation d'appareils de mesure externes aux biens ; Visite de maintenance préventive sur les équipements complexes ; Contrôle d'allumage et de combustion (chaudières) ; Intervention</p>

## CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LA MAINTENANCE

	<p>de maintenance préventive intrusive ; Relevé de paramètres techniques d'état de biens à l'aide de mesures effectuées</p> <p>d'équipements de mesure individuels (prélèvement de fluides ou de matière,...).</p> <p><b>Exemples en correctif</b> : Diagnostic ; Réparation d'une fuite de fluide frigorigène (groupe de froid) ; Reprise de calorifuge ; Diagnostic d'état avec usage d'équipements de soutien portatifs et individuels (Pocket automate, multimètre) ; Remplacement d'organes et de composants par échange standard de technicité générale, sans usage de moyens de soutien communs ou spécialisés (carte automate, vérin, pompe, moteurs, engrenage, roulement,...) ; Dépannage de moyens de production par usage de moyens de mesure et de diagnostics individuels.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Niveau 4</b></p>	<p><b>Définition</b> : Opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technique ou technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés.</p> <p><b>Intervenant</b> : Technicien ou équipe spécialisée</p> <p><b>Exemples en préventif</b> : Révisions partielles ou générales ne nécessitant pas le démontage complet de la machine ; Analyse vibratoire ; Analyse des lubrifiants ; Thermographie infrarouge (installations électriques, mécanique, thermique,...) ; Relevé de paramètres techniques nécessitant des moyens de mesure collectifs (oscilloscope, collecteur de données vibratoires) avec analyse des données ; Révision d'une pompe en atelier, suite à dépose préventive.</p> <p><b>Exemples en correctif</b> : Remplacement de clapets de compresseur ; Remplacement de tête de câble en BTA ; Révision d'une pompe en atelier spécialisé suite à dépose préventive ; Réparation d'une pompe sur site, suite à une défaillance ; Dépannage de moyens de production par usage de moyens de mesure ou de diagnostics collectifs et/ou de forte complexité (valise de programmation automate, système de régulation et de contrôle des commandes numériques, variateurs,...) ; Reprise de clôture extérieure ; Remplacement d'une porte et mise en peinture ; Réparations de fissures et défauts d'étanchéité ; Reprise de fuite de toiture.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Niveau 5</b></p>	<p><b>Définition</b> : Opérations dont les procédures impliquent un savoir-faire, faisant appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et/ou des équipements de soutien industriels. Ce sont des opérations de rénovation, reconstruction, etc.</p> <p><b>Intervenant</b> : Constructeur ou société spécialisée</p> <p><b>Exemples</b> : Révisions générales avec le démontage complet de la machine ; Reprise dimensionnelle et géométrique ; Réparations importantes réalisées par le constructeur ou le reconditionnement de ses biens ; Remplacement de biens obsolètes ou en limite d'usure.</p>

Tableau I-1 les niveaux de la maintenance [4] [10] [1]

## I.9 Les techniques de la maintenance

### I.9.1 La thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est la technique permettant de mesurer, par l'intermédiaire d'un détecteur, la puissance du rayonnement électromagnétique dans le spectre des infrarouges, émis par chaque point d'une scène ou d'un objet observé. Le détecteur ou caméra infrarouge reçoit ce rayonnement, le convertit en signal électrique et reconstitue sur un écran une image thermique visible de l'objet émetteur. Cette image est le thermogramme. Le thermogramme est constitué par l'ensemble des points de valeurs de mesures thermiques. Ces valeurs thermiques (en °C) sont obtenues par transcription des valeurs radiométriques données par la caméra infrarouge. [11] [12]

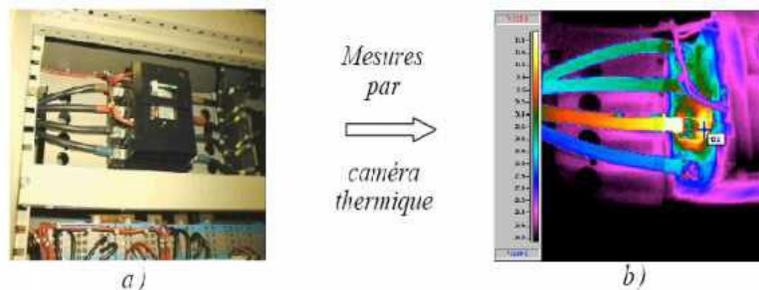


Figure I-6 Principe de l'analyse thermographique : a) Image visible d'un disjoncteur électrique, b) Visualisation d'un défaut de connexion sur l'image thermique.

### I.9.2 L'analyse des huiles

Le lubrifiant est comparable au sang de la machine. Il reflète le comportement l'état du système dans lequel il circule. Le suivi de ses caractéristiques physico-chimiques permet d'apprécier l'état de dégradation de l'huile et de connaître son aptitude à remplir totalement ses fonctions initiales de lubrification. L'évolution de cette dégradation peut être un indicateur des conditions d'exploitation de l'équipement. Elle va permettre d'optimiser les fréquences des vidanges, dans le cas de quantités importantes. [11] [12]

### I.9.3 L'analyse acoustique

Pour des applications spécifiques et la recherche de défauts bien précis, on retrouve ces deux méthodes, dont la première consiste en une détection de tout bruit anormal en moyen de microphones placés à une certaine distance de l'équipement, tandis que la deuxième est dédiée à la détection de défauts dont la signature est de faible amplitude et de haute fréquence tel qu'un début de dégradation d'un roulement [11] [12]

## I.9.4 Contrôle par ultrasons

Les signaux ultrasoniques sont envoyés par un palpeur placé sur la surface de la pièce. En traversant les différentes couches, les ondes ultrasoniques sont réverbérées aux couches limites et renvoyées au palpeur. Connaissant la vitesse de propagation des ultrasons dans le matériau, l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'émission et la réception des signaux est exploité par un microprocesseur pour définir l'épaisseur totale et celle des couches individuelles. La fréquence des ondes ultrasoniques est choisie en fonction des caractéristiques du matériau à contrôler. En général pour le contrôle d'épaisseur, les fréquences sont comprises entre 1 et 10 MHz. Les vitesses de propagation des ultrasons sont très élevées Cette technique est aussi employée pour déterminer la profondeur des défauts internes d'un matériau. Il faut donc un système électronique rapide pour distinguer les échos. [11] [12]

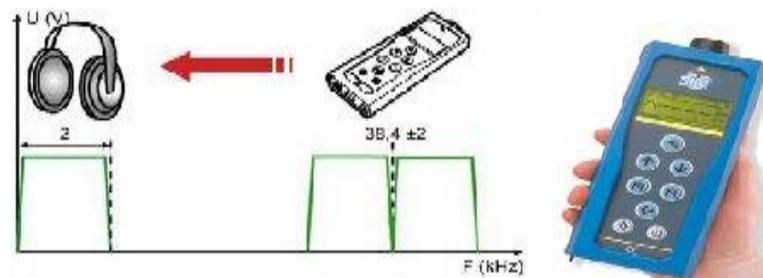


Figure I-7: Détecteur ultrason.

## I.9.5 L'analyse vibratoire :

Les vibrations d'une machine peuvent être considérées comme une manifestation extérieure des forces internes. En effet l'analyse de leurs signaux donne des informations sur les processus de dégradations internes. Il existe deux niveaux d'investigation :

- La mesure de niveau global permet de qualifier un état général par comparaison à des normes ou à des mesures précédentes ;
- L'analyse spectrale permet de diagnostiquer l'origine des défauts et de suivre l'évolution en fonction du temps.

Cette technique sera plus détaillée dans le chapitre III.

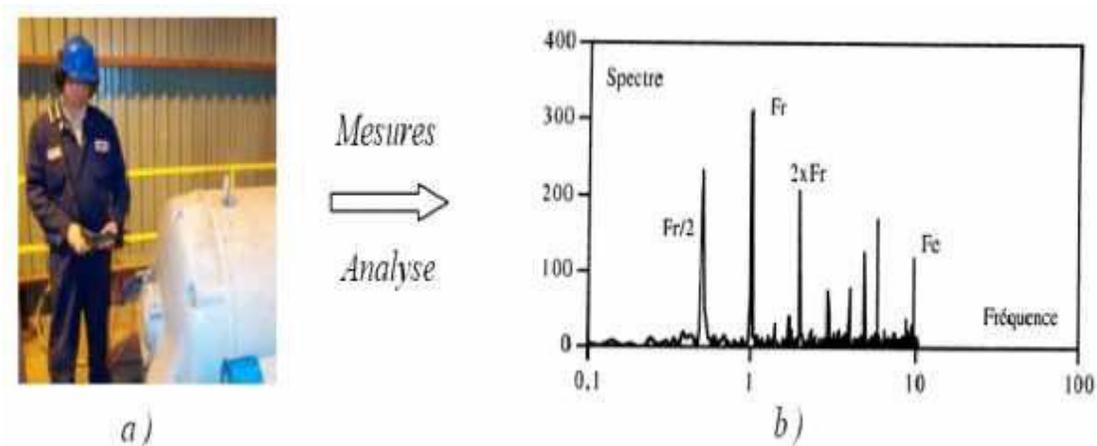


Figure I-8: Principe de l'analyse vibratoire : a) Mesures des vibrations, b) Représentation du spectre vibratoire.

### I.10 Choix de la technique de maintenance :

Type de défauts	Analyse vibratoire	Thermographie IR	Analyse d'huiles	Analyse acoustique
Déséquilibres, balourd	Oui	Non (sauf s'il y a usure)	Oui (s'il y a un échauffement)	Non
Jeux, défauts de serrage	Oui	Non (sauf s'il y a usure)	Oui (s'il y a un échauffement)	Oui (s'il y a une résonance)
Défauts spécifiques aux roulements	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts spécifiques aux engrenages	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts de courroies	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts d'alignement	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts liés à la lubrification dégradation de la qualité de l'huile	Non (Sauf paliers fluides)	Oui	Non	Oui
Manque d'huile	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts de nature électrique ou électromagnétique	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts liés aux écoulements (pour pompes et machines hydrauliques)	Oui	Non	Non	Oui

Tableau I-2 Choix de l'outil de technique de maintenance suivant les défauts potentiels

**I.11 Avantages et limitations des techniques de maintenance :**

Tenant compte des impératifs du process, tel qu'une chaîne de production, de son type, de sa complexité et autres conditions de l'environnement, Le choix d'une technique de surveillance pour le diagnostic, la localisation et l'identification d'une défaillance revêt une grande importance et se doit d'être le plus approprié. Ainsi, en fonction de ces considérations on pourra opter pour un ou plusieurs choix pour un type de technique de maintenance. Le tableau I-2 donne un aperçu sur les critères pris en compte pour le choix de l'outil de technique de maintenance.

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

Tableau I-3 Choix de l'outil de technique de maintenance

### **I.12 Conclusion :**

Ce chapitre nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine de la maintenance. Pour se rapprocher de ce dernier on a choisi le problème de vibration dans les machines tournantes. Pour pouvoir traiter ce phénomène on a consacré le chapitre II pour la généralité sur les vibrations.

## Chapitre II Généralité sur la vibration

### II.1 Introduction :

Après l'étude des vibrations et le traitement leurs caractéristique des problèmes lie a ce phénomène devient plus facile et abordable.

Le chapitre suivent traite le problème de vibration en utilisant la méthode de l'analyse vibratoire comme outil de maintenance.

### II.2 Définition théorique d'une vibration :

Une vibration est une oscillation ou la quantité est un paramètre définissant le mouvement d'un système mécanique.

Une oscillation est une variation, normalement dans le temps, de la magnitude d'une quantité en regard d'une référence spécifiée, lorsque cette magnitude est alternativement plus grande ou plus petite que la référence.

L'organisation Internationale de Normalisation (ISO) a édité en Aout 1990 une révision de la norme ISO 2041, définissant la notion de vibration : Une vibration est une variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence. En effet, un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence. Les différents éléments de la machine vibrent à des fréquences et des amplitudes différentes. C'est pourquoi une vibration se caractérise principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature. [13]

### II.3 Description d'un signal vibratoire :

Généralement, une vibration est caractérisée principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature, figure.1. [13]

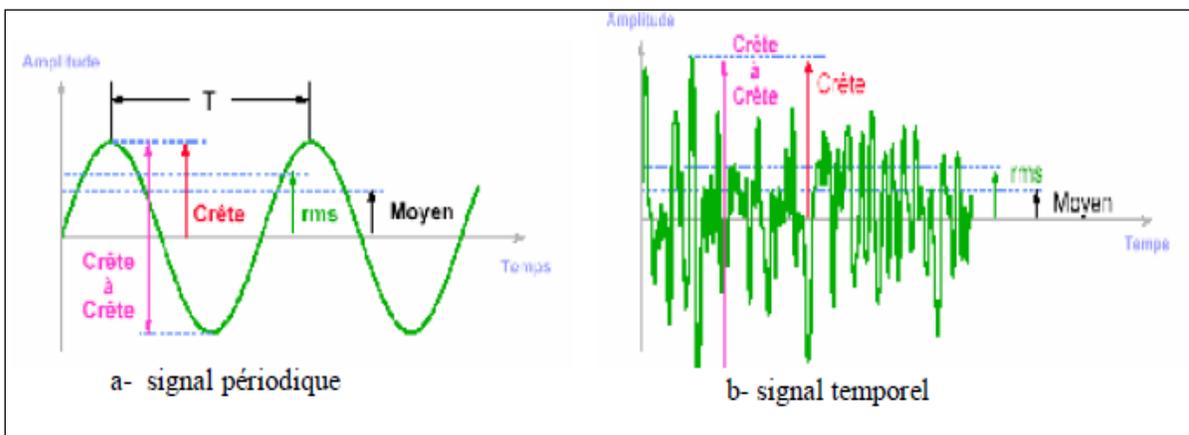


Figure II-1 Description du signal vibratoire. [13]

- La valeur maximale  $X_c$  (crête) : c'est la plus grande valeur atteinte qui ne prend pas en compte l'évolution de la vibration en fonction du temps. Elle est rarement utilisée ;

- La valeur crête à crête  $X_{cc}$  (crête à crête) : c'est la différence entre la plus grande valeur du signal et sa plus petite valeur ;
- La valeur moyenne absolue  $X_{moy}$  : c'est la moyenne du signal redressé sur une période, elle est peu utilisée car elle n'est pas reliée directement à une grandeur physique,

$$X_{moyenne} = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt$$

- La valeur efficace RMS (Root Mean Square) : c'est l'image de l'énergie contenue dans un signal. Elle est exprimée en unité physique ( $m/s^2$ ,  $m/s$ ,  $m$  ou  $g$  pour les vibrations par exemple). Elle est très bien adaptée pour les composantes déterministes du spectre (raies pures). La valeur efficace se détermine par la formule suivante :

$$\text{Valeur efficace (RMS)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt}$$

- Le facteur de crête : ce facteur est défini par la relation :

$$F_c = X_c / \text{RMS}$$

C'est un indicateur sans dimension.

Il faut remarquer que l'amplitude nous renseigne sur l'importance du défaut surveillé, alors que la fréquence nous renseigne sur son origine.

### II.4 Caractéristiques de vibration

#### II.4.1 Période T

La vibration est périodique si le système physique se retrouve exactement dans le même état aux instants séparés par un intervalle de temps  $T$ , appelé période de vibration. Toute grandeur physique  $x$  du système reprend alors la même valeur après des intervalles de temps  $T$ ,  $2T$ ,  $3T$ , etc., (figure .2) illustre la variation de  $x$  en fonction du temps dans le cas d'une grandeur périodique. La périodicité de  $x$  peut être exprimée mathématiquement par la relation :

$$x(t) = x(t + T) = x(t + 2T) = x(t + 3T) = \dots = x(t + nT)$$

La grandeur  $x$  est la position d'un corps mécanique (position d'un corps sur un Axe, angle d'un pendule, déplacement des tranches d'un gaz, ..., etc.), la période est exprimée ordinairement en secondes (s). [13]

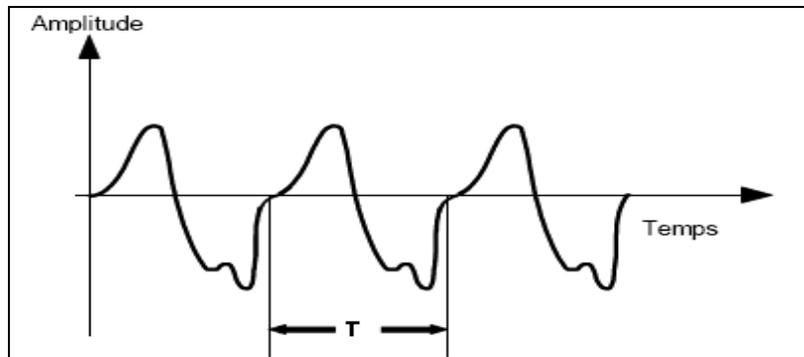


Figure II-2 Période et fréquence d'une Vibration [13]

### II.4.2 Fréquence $f$

Est le nombre de vibrations complètes par unité de temps. Elle est liée à la période par la relation :

$$f = 1/T$$

La fréquence la période est exprimée ordinairement en  $[(s)^{-1}]$ , en cette unité de fréquence est appelée aussi hertz (Hz). Pour les hautes fréquences, on emploie le kilohertz (kHz=10<sup>3</sup> Hz), le mégahertz (mhz=10<sup>6</sup> Hz) et le gigahertz (gHz = 10<sup>9</sup> Hz). D'habitude, on utilise le terme « vibrations » dans le cas des phénomènes mécaniques habituellement de basse fréquence (d'un pendule, d'une structure métallique, des tranches d'un gaz s'il est le siège d'une onde sonore, etc.) et le terme « oscillation » dans tous les cas surtout dans le cas des phénomènes électromagnétiques de fréquence élevé. [14]

## II.5 Grandeurs vibratoires

### II.5.1 Déplacement

Tout déplacement est une grandeur vectorielle qui définit le changement de position d'un corps ou d'un point donné par rapport à un système référence ce dernier se compose d'un système d'axes se rapportant à la position de repos ou une position d'équilibre.

En règle générale, tout déplacement peut être représenté par un vecteur –rotation ou un vecteur- translation.

Un déplacement est qualifié é de « déplacement relative » s'il est calculé par rapport à un système de référence autre que le système de référence de base. Pour calculer le déplacement relatif entre deux points, il suffit de faire la différence vectorielle entre les déplacements de cas deux points Considérant une fonction de déplacement de type harmonique :

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

## CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉ SUR LA VIBRATION

L'amplitude de vibration est  $A$  et sa fréquence est  $f = \omega/2\pi$  la forme temporelle de cette fonction est illustrée dans le domaine fréquentiel, le même signal est plus simplement représenté par la (figure.3.). [15]

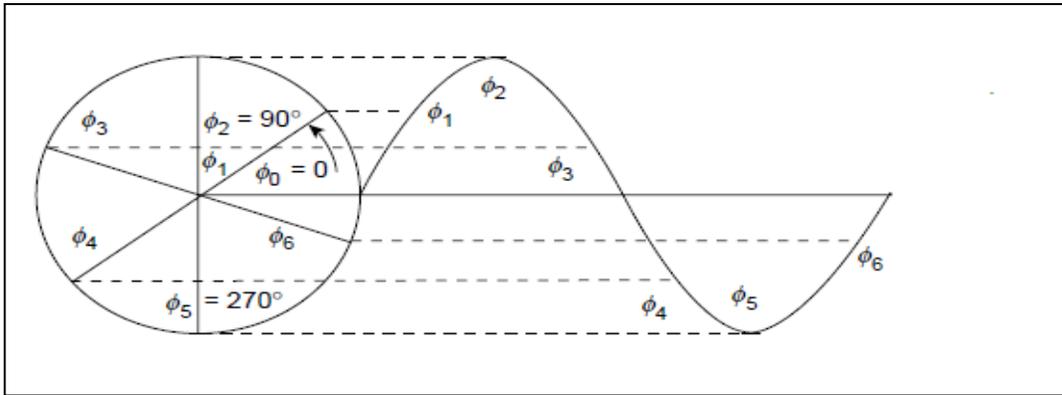


Figure II-3 Représentation temporelle de déplacement [13]

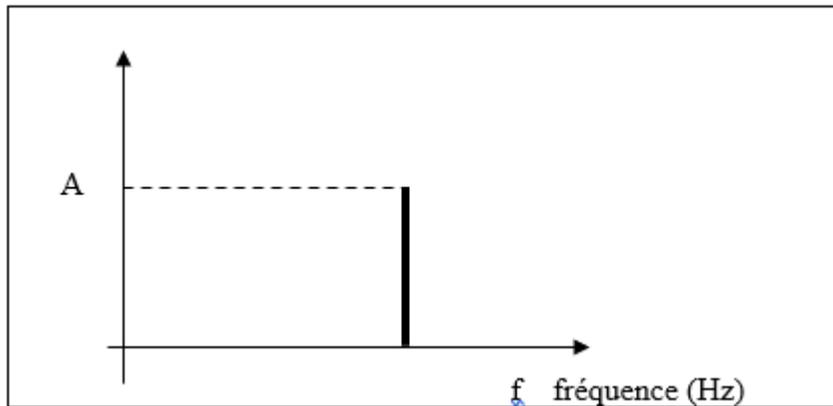


Figure-II-4 Représentation fréquentielle d'un signal harmonique [13]

### II.5.2 Vitesse

La vitesse représente la dérivée du déplacement par rapport au temps et définie comme étant la limite de  $\Delta x/\Delta t$  quand  $\Delta t$  tends vers 0.

Une vitesse est qualifiée « vitesse relative » si elle est calculée dans un système de référence autre que le système de référence de base la vitesse relative entre deux points est obtenue en calculant la différence vectorielle entre les deux vitesses de deux points donnés :

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \dot{x}(t) = A\omega \sin(\omega t + \varphi) = \omega A \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) = V \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) .$$

Par conséquent nous pouvons dire que la vitesse vibratoire est un signal harmonique déphasé de 90 degrés par rapport au déplacement avec la même fréquence, mais dont l'amplitude  $V = \omega A$  (figures .5). [13].

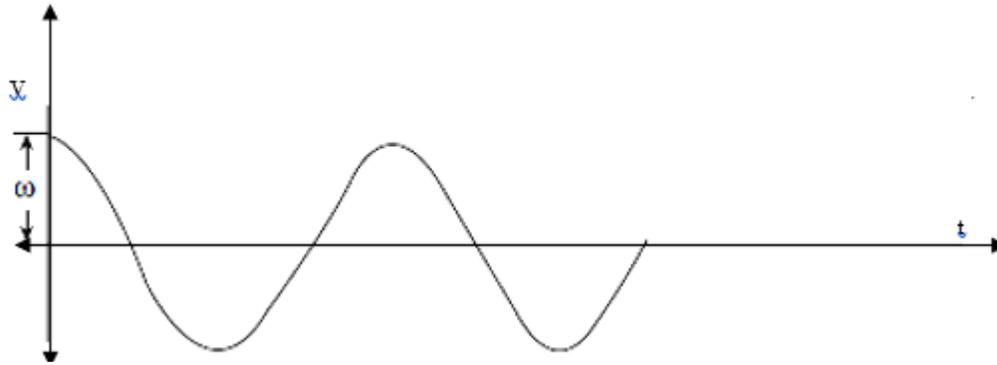


Figure II-5 Représentation temporelle de la vitesse vibratoire [13]

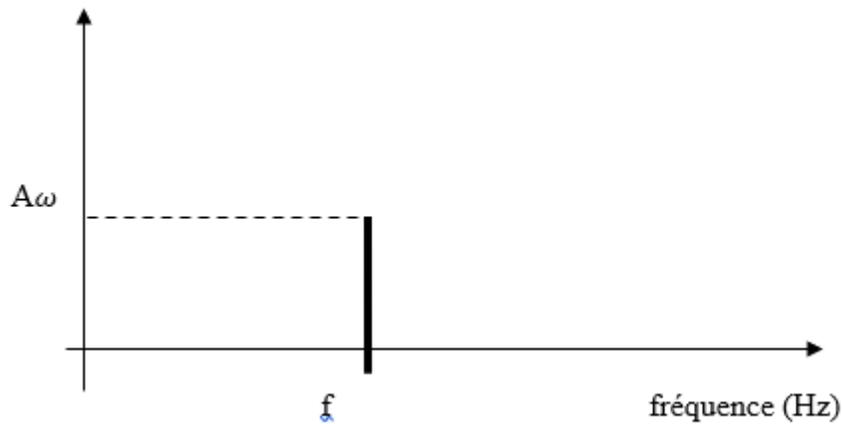


Figure II-6 Représentation fréquentielle de la vitesse vibratoire [13]

### II.5.3 Accélération

L'accélération est un vecteur représente la dérivée de la vitesse par rapport au temps

$$\gamma(t) = \frac{dv}{dt} = \dot{x}(t) = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi)$$

L'accélération est donc un signal harmonique déphasé de 90 degrés par rapport à la vitesse et de 180 degrés par rapport au déplacement, dont l'amplitude  $\gamma = \omega^2 A$ , et dont la pulsation est  $\omega$  (figures .7) [13]

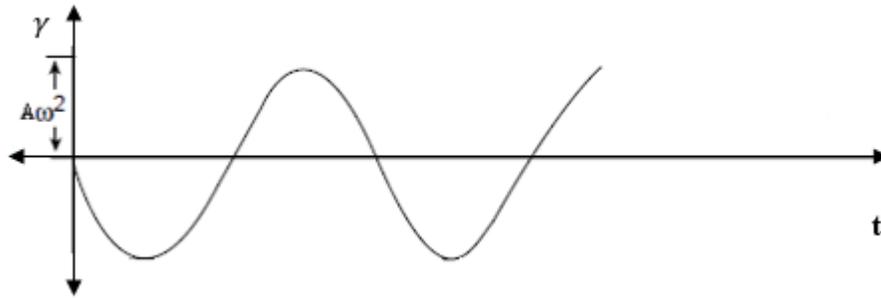


Figure II-7 Représentation temporelle de l'accélération [13]

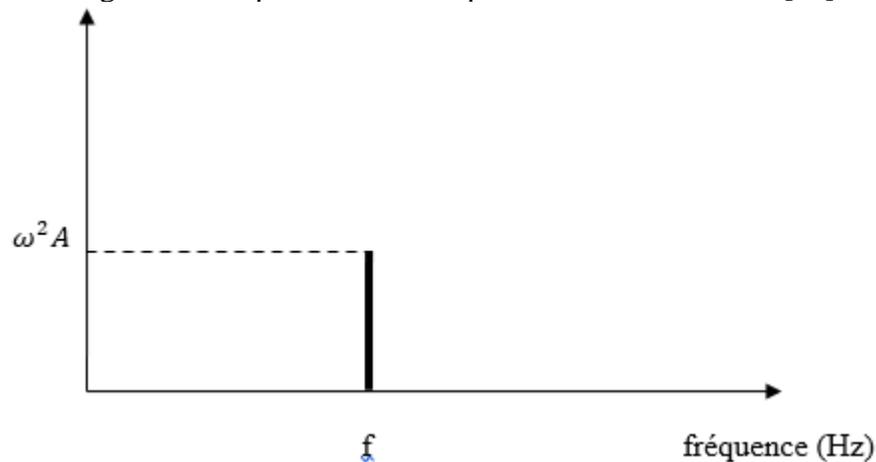


Figure II-8 Représentation fréquentielle de l'accélération [13]

On constate qu'il existe une relation très simple entre les amplitudes  $x$ , de vitesse  $v$ , d'accélération  $\gamma$  et de pulsation  $\omega$  aussi nous pouvons écrire que :

$$Y = \omega V = \omega^2 A$$

## II.6 Différents types de vibrations

Les vibrations mécaniques sont des mouvements oscillant autour d'une position moyenne d'équilibre. Ces mouvements oscillants caractéristiques de l'effort qui les génère, peuvent être, soit Périodiques, soit aperiodiques (transitoires ou aléatoires) selon qu'ils se répètent ou non, Identiquement à eux-mêmes après une durée déterminée

### II.6.4 Vibration périodique

C'est un mouvement oscillatoire qui se répète de la même façon à des intervalles de temps réguliers que l'on appelle période  $T$ . On le qualifie de phénomène déterministe, ce mouvement peut être décrit par des équations mathématiques.

Les vibrations périodiques peuvent correspondre à un mouvement sinusoïdal pur comme celui d'un diapason ou, plus généralement, à un mouvement complexe périodique que l'on peut décomposer en une somme de mouvements sinusoïdaux élémentaires, plus faciles à analyser.

La période  $T$  correspond à l'intervalle de temps qui sépare deux passages du signal par le même état (figure .9). [13]

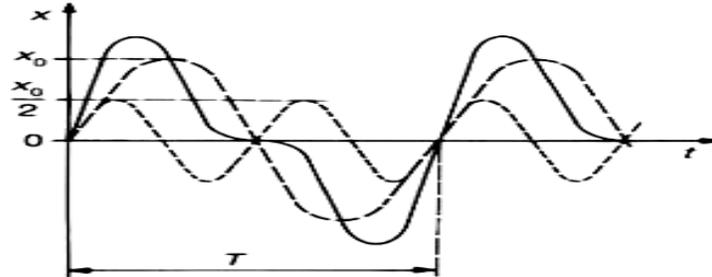


Figure II-9 Vibrations périodiques [13]

On définit en outre les valeurs caractéristiques suivant :

**a. Valeur maximale  $x_{\max}$**

C'est la valeur crête prise par la variable  $x(t)$  dans l'un de sens positif ou négatif. Dans la littérature on note :  $x_c$  peut être notée  $x_p$  (peak) ou  $x_s$  (spitze) ou encore  $\hat{x}$ .

**b. Valeur moyenne  $\bar{x}$**

On peut définir sur un intervalle de temps  $t$  ; la valeur moyenne comme est l'intégrale suivant :

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (I.9)$$

**c. Valeur efficace  $x_{\text{eff}}$**

Pour une vibration périodique on définit la valeur efficace comme la valeur du signal continu qui dissiperait la même énergie dans le même intervalle de temps.

Dans la littérature  $x_{\text{eff}}$  peut également être notée  $x_{\text{rms}}$  (rms : root mean square) On a donc :

$$x_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (I.10)$$

### II.6.4.1 Vibration harmonique

La vibration la plus simple est la vibration harmonique (la figure.10) C'est une notion mathématique ; cependant, beaucoup de systèmes physiques ont des vibrations presque harmoniques. D'autre part, la théorie de Fourier permet de considérer toute fonction du temps comme une superposition de vibrations harmoniques une grandeur harmonique  $x$  est une fonction du temps de la forme :

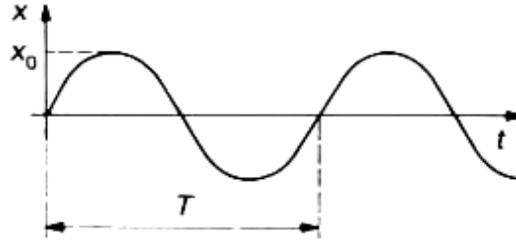


Figure II-10 Vibration harmonique [13]

Les fonctions sinusoïdales harmoniques reprennent les mêmes valeurs si la phase varie de  $2\pi$  après une période  $T$  telle que :

$$\omega(t + T) + \varphi = \omega t + \varphi + 2\pi$$

D'où les relations de  $\omega$  à  $T$  et  $f$  :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Dérivant l'expression [3] deux fois par rapport au temps, nous trouvons :

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = -A\omega \cos(\omega t + \varphi) = A\omega \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) = A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi + \pi)$$

Nous en déduisons que  $x$  vérifie l'équation différentielle des oscillations harmoniques :

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0$$

C'est une équation différentielle de second degré, homogène et à coefficients constants. Inversement, toute solution de cette équation est tout état d'oscillation du système est et tout solution de cette forme est un état possible d'oscillation. Les deux constantes arbitraires  $A$  et  $\varphi$  sont des constantes d'intégration. Pour un état d'oscillation donné, ces constantes d'intégration peuvent être déterminées à partir des conditions initiales c'est-à-dire la valeur de  $x$  et celle de sa dérivée première  $\dot{x}$  à l'instant ( $t=0$ ). en effet ,nous avons :

$$x(0) = A \cos \varphi, \quad \dot{x}(0) = -A\omega \sin \varphi$$

Ce qui donne l'amplitude :

$$A = \sqrt{x(0)^2 + \frac{\dot{x}(0)^2}{\omega^2}}$$

Tandis que la phase  $\varphi$  est donnée par les équations :

$$\cos \varphi = \frac{x(0)}{A}, \quad \sin \varphi = \frac{\dot{x}(0)}{\omega A}$$

Ces relations déterminent complètement la phase  $\varphi$  à  $2\pi$  près, nous pouvons écrire aussi :

$$\tan \varphi = -\frac{\dot{x}(t)}{\omega x(0)}$$

Cependant cette relation seule ne permet de déterminer  $\varphi$  qu'à  $\pi$  près. au lieu de [3] il est possible d'utiliser la forme  $x = A \sin(\omega t + \varphi)$ . en ajoutant ou en retranchant  $\frac{\pi}{2}$  ou  $\pi$  à la phase il est toujours possible d'écrire toute vibration harmonique Avec une amplitude A positive

Le fait que la grandeur x oscille avec la même pulsation  $\omega$ , indépendamment des conditions initiales, veut dire que la pulsation des oscillations est une grandeur dynamique caractéristique du système, tandis que les constantes A et  $\omega$  dépendent de la façon de l'exciter

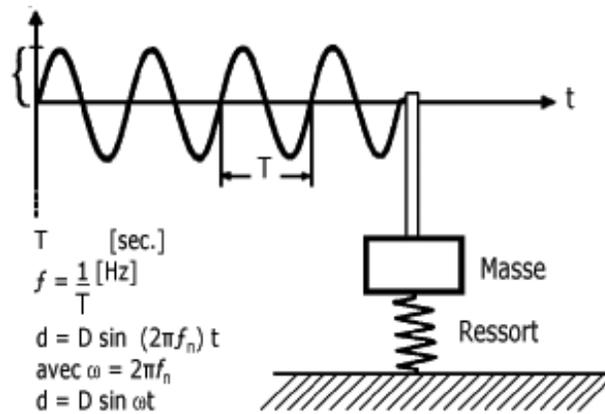


Figure II-11 Système masse ressort vibre harmoniquement [15]

### II.6.4.2 Cas général

Si le mouvement a une représentation de forme quelconque, sa représentation correspond à une série de Fourier qui comporte généralement un terme moyen  $a_0$  représentant la valeur moyenne et une série de composantes sinusoïdale de diverses fréquences et phases :

$$x = a_0 + a_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + a_2 \cos(2\omega t + \varphi_2) + \dots a_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$$

### II.6.5 Vibrations apériodiques

Une vibration apériodique ne se répète pas. Elle a une périodicité qui est infiniment longue. Dans cette catégorie, on distingue les vibrations transitoires et les vibrations aléatoires. [13]

### II.6.5.1 Vibrations transitoires

Les vibrations transitoires sont produites pendant un intervalle de temps limité (comme par exemple la vibration provoquée par un marteau pilon) sont générées par des forces discontinues (chocs). Elles peuvent présenter ou non un aspect oscillatoire revenant à une position d'équilibre après amortissement. Lorsqu'il existe des oscillations, comme pour une structure qui vibre après un choc et pour laquelle le coefficient d'amortissement est faible, on dit qu'il y a un amortissement sous-critique, et le mouvement est pseudopériodique. Si l'amortissement est très important, la structure revient à sa position d'équilibre sans oscillation, on dit alors que l'amortissement est surcritique et le mouvement est apériodique.

Ces deux types de mouvements transitoires peuvent être décrits par des fonctions mathématiques.

### II.6.5.2 Vibrations aléatoires

Les vibrations aléatoires (comme par exemple la vibration générée par le phénomène de Cavitation sur une pompe) sont caractérisées par un mouvement oscillant aléatoire qui ne se produit pas identiquement à lui-même comme les mouvements périodiques. Les vibrations aléatoires ne peuvent être représentées mathématiquement que par une série de relations de probabilités car il faudrait théoriquement un temps infini pour les analyser, mais on peut considérer que la fonction aléatoire est une fonction périodique dont la périodicité est égale à l'infini et que cette fonction est constituée d'une infinité de fonctions sinusoïdales dont la fréquence varie de façon continue.



Figure II-12 Vibration aléatoire

## II.7 Conclusion

L'analyse vibratoire est un outil de maintenance des machines tournantes pour la maîtrise de cet outil il faut avoir des connaissances générales et de base sur la vibration ce qui est utilisé dans ce chapitre

### Chapitre III : l'analyse vibratoire

#### III.1 Introduction :

L'analyse vibratoire est un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une politique de maintenance prévisionnelle de l'outil de production industrielle.

Les objectifs d'une telle démarche sont de :

- Réduire le nombre d'arrêts sur casse
- Fiabiliser l'outil de production
- Augmenter son taux de disponibilité
- Mieux gérer le stock de pièces détachées, etc.

À partir des vibrations régulièrement recueillies sur une machine tournante, l'analyse vibratoire consiste à détecter d'éventuels dysfonctionnements et à suivre leur évolution dans le but de planifier ou reporter une intervention mécanique.

#### III.2 Capteurs de vibrations :

Le capteur de vibrations est le premier maillon de la chaîne de mesure. Le but de ce capteur est de transformer une vibration mécanique en un signal électrique. Les capteurs de vibration utilisés peuvent être actifs, ne nécessitant aucune alimentation et ne pouvant fonctionner qu'avec une source d'énergie auxiliaire. [16]

##### III.2.1 Caractéristiques et types :

Un capteur se caractérise principalement par :

- Bande passante.
- Dynamique
- Sensibilité.
- Tenue en température.
- Grandeurs d'influence.
- Masse et ses dimensions. [17]

### III.2.1.1 Capteur de déplacement :

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications où la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers s'avère essentielle. C'est pourquoi l'on retrouve des capteurs de déplacement installés sur la plupart des turbines hydroélectriques et des turbomachines. A partir des connaissances des jeux radiaux réels d'un palier ou des jeux axiaux rotor-stator, il est beaucoup plus facile de déterminer des seuils d'alerte et de danger en termes de déplacement qu'en terme de vitesse ou d'accélération. [18] [19] [20]

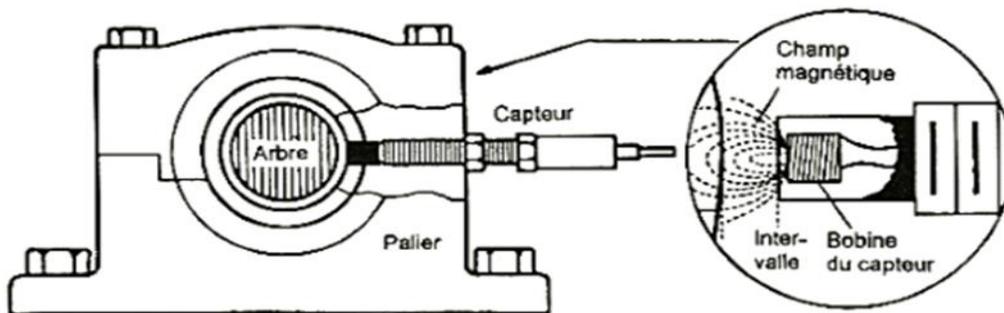


Figure III-1 Principe du capteur inductif à courants de Foucault

### III.2.1.2 Capteurs de vitesse :

Les capteurs de vitesse ou vélocimètres sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée.

Ce type de capteur présente l'avantage de ne nécessiter ni source d'alimentation ni préamplificateur. L'amplitude du signal délivré est directement proportionnelle à la vitesse de la vibration absolue du palier au point de mesure. La fréquence de résonance de ce type de capteur se situe généralement entre 8 et 15 Hz et la gamme dynamique s'étend de 10-20 Hz à 2000 Hz environ, bien qu'il soit cependant possible d'abaisser à 1 Hz la fréquence de coupure inférieure du capteur, en insérant dans l'unité de mesure un circuit de linéarisation. L'utilisation des vélocimètres, très fréquente dans les services de maintenance jusqu'aux années 1990, tend aujourd'hui à disparaître au profit des accéléromètres piézoélectriques qui, moins encombrants et plus fiables, présentent une bande passante et une dynamique de mesure beaucoup plus étendues. [18] [19]

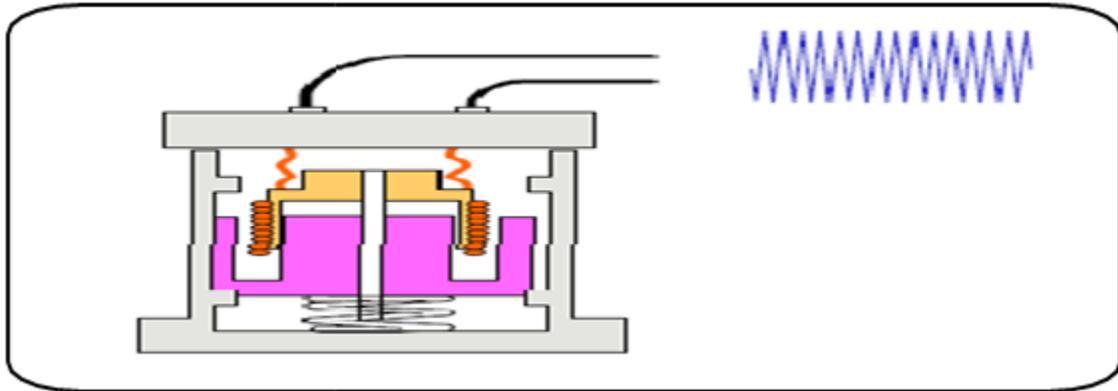


Figure III-2 Schéma de principe d'une vélocimétrie

### III.2.1.3 Capteurs d'accélération :

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibrations absolues les plus utilisés pour la surveillance des machines tournantes. Leur principe de fonctionnement repose sur la propriété des matériaux piézo-électriques de générer une charge électrique proportionnelle à la contrainte de compression ou de cisaillement subie. Schématiquement, un accéléromètre est composé d'un disque en matériau piézoélectrique qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte. Quand la masse se déplace sous l'effet d'une accélération, elle exerce sur le disque piézoélectrique des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération. [18] [19]

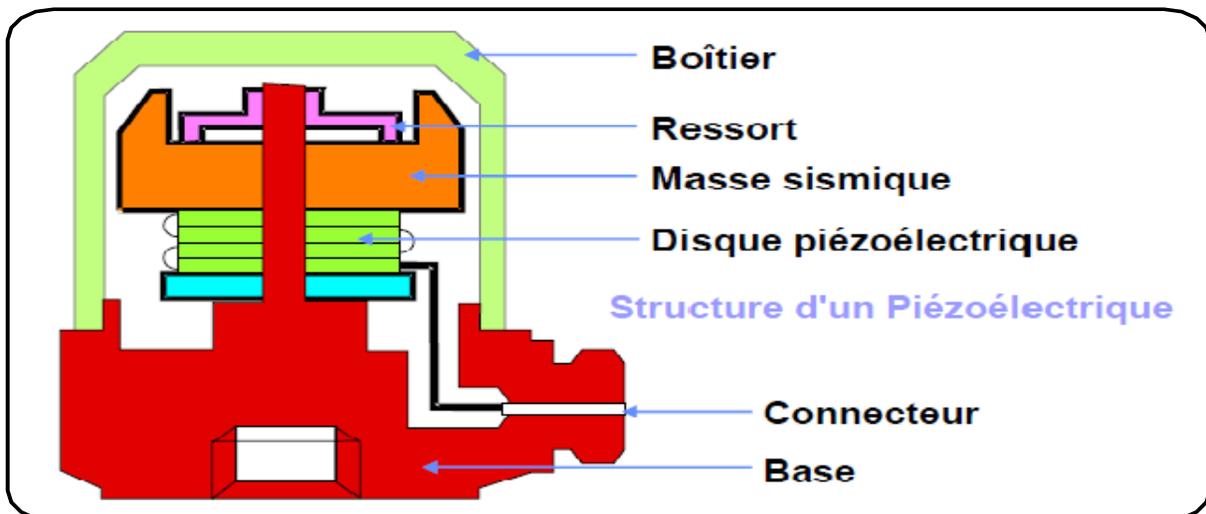


Figure III-3 Principe de fonctionnement d'un accéléromètre (piézoélectrique)

**III.3 Comparaison entre les différents types de capteurs : [17]**

	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Capteur d'accélération</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Facile à installer</li> <li>➤ Bonne détection des défauts HF</li> <li>➤ Bonne gamme dynamique/fréquentielle</li> <li>➤ Petit, léger</li> <li>➤ Supporte les hautes températures</li> <li>➤ Pas de pièce mobile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nécessite une double intégration pour le déplacement</li> <li>➤ Nécessite une source extérieure</li> <li>➤ Fournit des informations limitées sur la dynamique d'arbre</li> <li>➤ Médiocre pour les faibles vitesses</li> </ul>
<b>Capteur de déplacement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Mesure directement les mouvements d'arbre</li> <li>➤ Même capteur pour les butées axiales, les vibrations radiales et la vitesse</li> <li>➤ Mesure directement le déplacement</li> <li>➤ Mesures DC (position d'arbre)</li> <li>➤ Pas de pièce mobile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Problème de « run-out »</li> <li>➤ Sensible au matériau de l'arbre</li> <li>➤ Installation</li> <li>➤ Gamme de fréquence limitée. Pas de détection des défauts de roulements</li> <li>➤ Restriction de températures</li> <li>Oscillateur externe nécessaire</li> </ul>
<b>Capteur de vitesse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Peut fournir des données de Déplacement par l'intermédiaire d'intégrateur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La réponse en fréquence limite sa plus basse fréquence (5-10hz).</li> <li>La réponse de phase Change avec la fréquence.</li> </ul>

Tableau III-1 de Comparaison entre les différents types de capteur

**III.4 Vibro-test 60 :**

Le VIBRTEST 60 est un appareil pratique de mesure des vibrations, permettant d'apprécier l'état des machines, d'établir les diagnostics des défauts dans le cadre de la maintenance

conditionnelle. Il peut être utilisé comme collecteur de données. Cet appareil réunit à la fois les fonctions d'analyse 'FFT', d'équilibrage et de collecte de données



Figure III-4 de vibrotest 60

### III.4.2 Caractéristique de l'appareil:

- 1- Appareil bi voie avec mesure de la vitesse de rotation.
- 2- Appareil portable (900 g).
- 3- Nouvelle technologie de collecte de données.
  - traitement rapide et simultané des données (jusqu'à 5 données à la fois).
  - Des routes de mesure multiples.
  - Possibilité de basculer entre les fonctions analyseur, équilibreur et collecteur de Données.
- 4- Technologie de points de traitement numérique grâce à un processeur numérique (DSP).
- 5- Précision élevée grâce au convertisseur 'CAN' 16 bits.
- 6- Bonne résolution pour les spectres en fréquence (jusqu'à 12800 lignes).
- 7- Possibilité d'utilisation d'une variété de capteurs d'accélération, de vitesse et de déplacement vibratoire.

### III.5 Stratégies de surveillance vibratoire :

#### III.5.3 Choix des points de mesure :

Il est préférable de choisir comme point du mesurage les endroits où s'effectue la transmission d'énergie.

La plupart des vibrations peuvent être d'origine mécanique, elles sont transmises à la structure par l'intermédiaire des fixations.

On conçoit aisément que les meilleurs points de mesure dans le cadre de maintenance des machines sont les paliers.

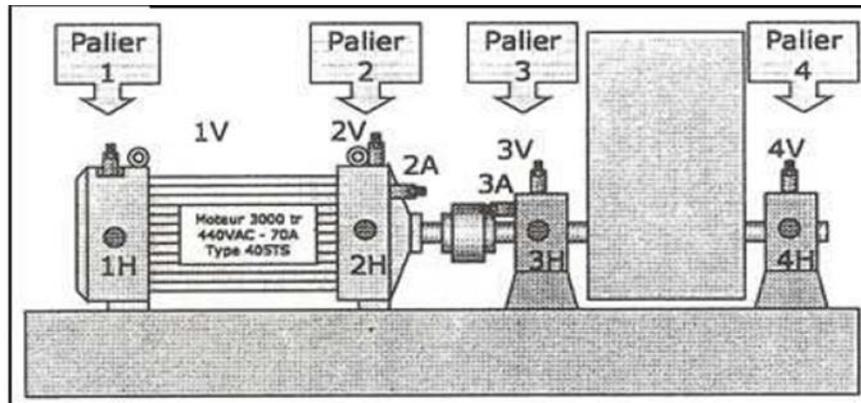


Figure III-5 Des points de mesure

### III.5.4 Mesure vibratoire en niveau global :

Cette stratégie de surveillance consiste à mesurer, à l'aide de capteurs, le niveau global d'un ou de plusieurs indicateurs (déplacement, vitesse ou accélération), à suivre son évolution dans le temps et à le comparer à des normes ou des mesures précédentes. Certes, toute évolution est due à une dégradation de la machine.

Cela permet de mettre en évidence l'existence d'une anomalie à un stade précoce et de faire une première idée des types de défauts qui affectent la machine, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis. [20]

Accélération	1	2	3	4
8 g	1.5	3	5	8
5 g				4
4 g		1.5	2.5	4
3 g				
2.5 g		1.5	0.75	1.5
1.5 g	0.75			
0.75 g				
CLASSE	1	2	3	4
PUISSANCE	P < 15 kW	15 à 75 kW	> 75 kW (rigide)	> 75 kW (flexible)

Tableau III-2 Seuils d'accélération vibratoire

## CHAPITRE III : L'ANALYSE VIBRATOIRE

<b>NIVEAUX VIBRATOIRES ADMISSIBLES SUR LES MACHINES TOURNANTES</b>				
Norme AFNOR E 90-300				
Niveaux vibratoires admissibles (mm/s rms)	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
Amplitude efficace de la Vitesse Vibratoire en <b>(mm/s)</b> RMS dans la bande  [10 ; 1000] Hz		Mauvais	Mauvais	Mauvais
	18.0	Mauvais	Mauvais	Mauvais
	11.2	Mauvais	Mauvais	Limite
	7.1	Mauvais	Limite	Limite
	4.5	Limite	Limite	Moyen
	2.8	Limite	Moyen	Moyen
	1.8	Moyen	Moyen	Bon
	1.12	Moyen	Bon	Bon
	0.71	Bon	Bon	Bon
		Bon	Bon	Bon
		Bon	Bon	Bon
		Bon	Bon	Bon
		Bon	Bon	Bon

Tableau III-3 Seuils de la vitesse vibratoire

- Groupe 1 : Petites machines telles que moteurs électriques jusqu'à 15kW
- Groupe 2 : Machines de taille moyenne, de 15kW à 75kW, ou grandes machines jusqu'à 300kW sur assises spéciales
- Groupe 3 : Grandes machines sur fondations rigides et lourdes opérant à une vitesse inférieure à la fréquence propre de la fondation
- Groupe 4 : Grandes machines opérant à une vitesse supérieure à la fréquence propre de la fondation (ex : turbomachines)

### III.5.5 Analyse spectrale :

L'analyse spectrale consiste à relever le signal vibratoire mesuré sur la machine et de procéder à une analyse systématique pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela permet d'accéder au diagnostic, c'est à dire, d'identifier avec précision la nature de l'anomalie et si possible en préciser la gravité. [21]

### III.5.5.1 Représentation en fonction de temps :

Le signal vibratoire délivré par un capteur est représenté de différentes façons. La première qui vient à l'esprit est la représentation en fonction du temps (représentation temporelle). Cette représentation est d'ailleurs utilisée pour suivre le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ses paramètres de fonctionnement.

Ce type de représentation, aisé à exploiter lorsque le signal est simple (par exemple, vibration de type sinusoïdale), devient vite inexploitable lorsque le signal a pour origine des sollicitations multiples. Figure III-6 [22]

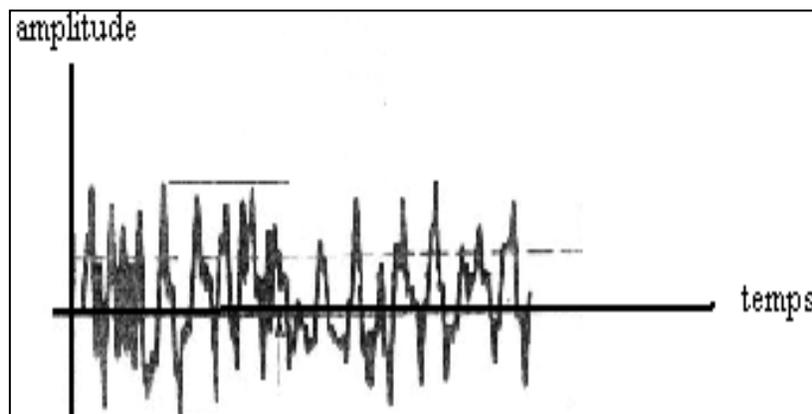


Figure III-6 Représentation temporelle du signal

### III.5.5.2 Représentation en fonction de la fréquence :

Pour représenter le signal vibratoire sous une forme exploitable, on a cherché à le représenter dans un diagramme amplitude–fréquence appelé spectre. Avec ce type de représentation, chacune des composantes sinusoïdales élémentaires du signal est parfaitement définie par son amplitude et sa fréquence. La représentation spectrale du signal devient ainsi claire et exploitable figure III-7. [22]

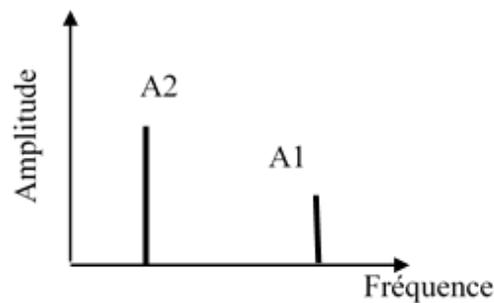


Figure III-7représentation fréquentielle du signal

### III.5.6 Calcul de spectre :

Le spectre peut être obtenu par l'application d'une fonction mathématique (transformée de Fourier) qui a la propriété de décomposer un signal complexe en ses différentes composantes élémentaires définies par leur amplitude et leur fréquence et qui permet de passer d'une représentation temporelle à une représentation spectrale (fréquentielle). [22]

#### III.5.6.1 Transformée de Fourier :

La notion de transformée de Fourier peut être étendue à des fonctions non périodiques (aléatoire par exemple). La fréquence  $1/T$  du terme fondamental tend alors vers 0, et les fréquences des différents harmoniques se rapprochent pour donner à la limite une fonction continue de la variable  $F=1/T$ . La fonction  $f(t)$  n'est plus représentée par une somme de composantes de fréquences discrètes, mais par une intégrale sur toutes les valeurs des fréquences  $F(v)$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(V) \exp(2i\pi vt) dt$$

Remarques :  $F(v)$ , spectre de  $f(t)$ , est appelé **transformée de Fourier** de la fonction  $f(t)$ . L'énorme avantage est que  $F(v)$  peut se déduire de  $f(t)$  par une expression comparable et qui donne les valeurs de  $C_k$  lorsque  $f(t)$  est périodique.

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(V) \exp(-2i\pi vt) dt$$

On remarquera la symétrie des deux expressions et on appellera la fonction  $f(t)$ , la transformée de Fourier inverse de  $F(v)$ . C'est entre autres grâce à cette propriété que les calculs de transformées de Fourier sont très utiles en traitement numérique d'un signal. Les appareils de mesures utilisés pour faire une analyse vibratoire utilisent ces propriétés pour déterminer les caractéristiques d'un signal mesuré. Ainsi, l'analyse FFT sert à observer des signaux qui ne sont pas périodiques. Il faut remarquer que cette extension de capacité du calcul FFT, qui n'est pas naturelle pour ce type de signal, appelle à la plus grande prudence dans l'interprétation des résultats. En conclusion, l'analyse FFT est utilisée pour la description du signal temporel dans le domaine fréquentiel avec une résolution fréquentielle constante sur une échelle linéaire de fréquence. La résolution peut être très fine pour chercher avec précision les composantes périodiques des signaux vibratoires.

### III.5.6.2 Analyse harmonique, série de Fourier :

Physiquement, les signaux sont enregistrés sous la forme de la variation d'un paramètre (force, contrainte, amplitude, accélération, tension, pression, etc.) en fonction du temps. Or il est souvent plus facile de caractériser un signal dans le domaine fréquentiel. Cette représentation est obtenue grâce au théorème de Fourier qui démontre que toute fonction périodique  $f(t)$  de période  $T$ , peut se représenter par la somme d'une série de fonctions sinusoïdales de périodes  $T, T/2, \dots, T/k \dots$  que l'on appelle série de Fourier que l'on peut écrire sous la forme d'un développement :

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(2\pi kt/T) + b_k \sin(2\pi kt/T)$$

Où les coefficients  $a_0, a_k$  et  $b_k$  ont les expressions suivantes :

$$a_0 = \int_0^T \frac{1}{T} f(t) dt$$

$$a_k = \int_0^T \frac{2}{T} f(t) dt \cos(2\pi kt/T)$$

$$b_k = \int_0^T \frac{2}{T} f(t) dt \sin(2\pi kt/T)$$

L'ensemble des valeurs des coefficients  $a_k$  et  $b_k$  forme le spectre de fréquences de la fonction  $f(t)$ . Un formalisme plus simple est possible en utilisant des fonctions exponentielles imaginaires, à savoir :

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \exp(2i\pi kt/T)$$

$$c_k = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \exp(-2i\pi kt/T) dt$$

Dans la pratique, cela veut dire que l'on peut décomposer notre fonction comme une somme de sinus (cosinus) de périodes multiples de la période de base de notre fonction. Les coefficients représentent ainsi les niveaux « énergétique de chacune des fréquences élémentaires ». L'application principale de l'analyse FFT est donc la mise en évidence des périodicités du signal et le calcul de l'énergie contenue dans le signal pour chacune des fréquences.

## III.6 Différents types de défauts :

### III.6.7 Déséquilibre (défaut de balourd)

Le défaut de balourd est le générateur de vibrations le plus commun dans une machine tournante et il est dû à la distribution non symétrique de la masse autour de l'axe de rotation.

Un rotor est bien équilibré si son centre de masse appartient à l'axe de rotation et si cet axe est l'axe principal d'inertie. Ce balourd provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage, qui peuvent être la conséquence :

D'une altération mécanique : perte d'ailette, érosion ou encrassement, ....

D'une altération thermique : déformation suite à des dilatations différentes des matériaux constituant le rotor ou à des différences de température localisées ...

On distingue le balourd statique, de couple, et dynamique.

Le balourd va induire, dans un plan radial, une vibration dont la fréquence de base d'une composante du correspond à la fréquence de rotation  $F_r$ . Elle représente alors le pic le plus élevé avec d'autres pics d'amplitudes plus faibles sur les harmoniques de  $F_r$ . [23] [24]

### III.6.7.1 Différents types de balourd :

#### 6-7-1-1 Balourd statique

Le balourd statique apparaît dans le cas où le centre de la masse (centre de gravité) du rotor ne coïncide pas avec l'axe de rotation

L'axe d'inertie est parallèle à l'axe de rotation, ce type de balourd est surtout présent lorsque le rotor comprend un disque de rayon important par rapport à l'axe.

- Même phase sur chaque roulement.
- Principalement des vibrations radiales. [23] [24]

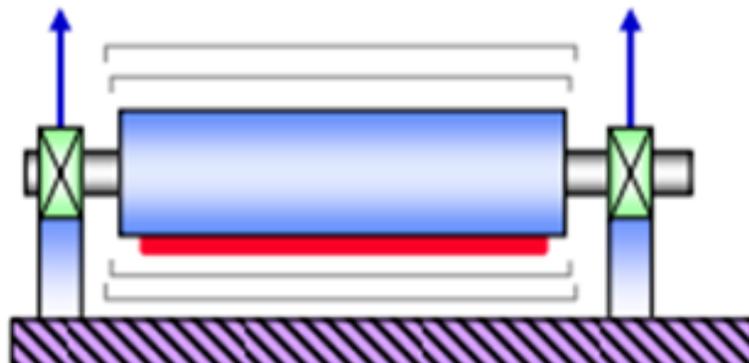


Figure III-8 Balourd statique

### 6-7-1-2 Balourd couple :

L'axe d'inertie est sécant avec l'axe de rotation, mais les deux axes sont dans un même Plan

- Vibrations radiales et horizontales à la fois.
- Souvent un balourd (déséquilibre) statique et dynamique à la fois. [23] [24]

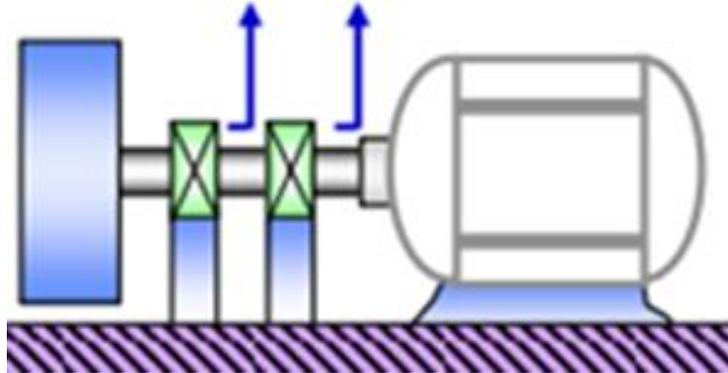


Figure III-9 Balourd couple

### 6-7-1-3 Balourd dynamique :

Dans un rotor flexible, même si le centre de celui-ci coïncide avec l'axe de rotation (on dit que le rotor est statiquement équilibré), on peut avoir dans certains cas les deux parties du rotor (suivant l'axe de rotation) statiquement déséquilibrées avec la même quantité. Les centres de gravité des deux parties se trouvent de part et d'autre de l'axe de rotation. Il s'agit d'un balourd dynamique. [23] [24]

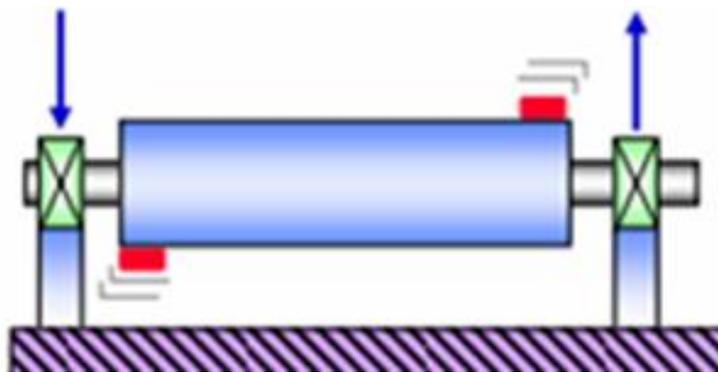


Figure III-10 Balourd dynamique

### III.6.7.2 Spectre typologique :

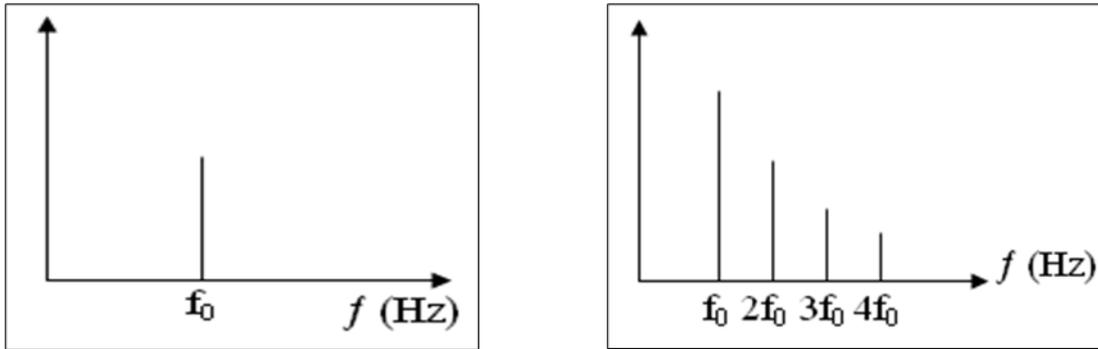


Figure III-11 spectre de défaut de balourd

### III.6.8 Défaut d'alignement

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. [23] [24]

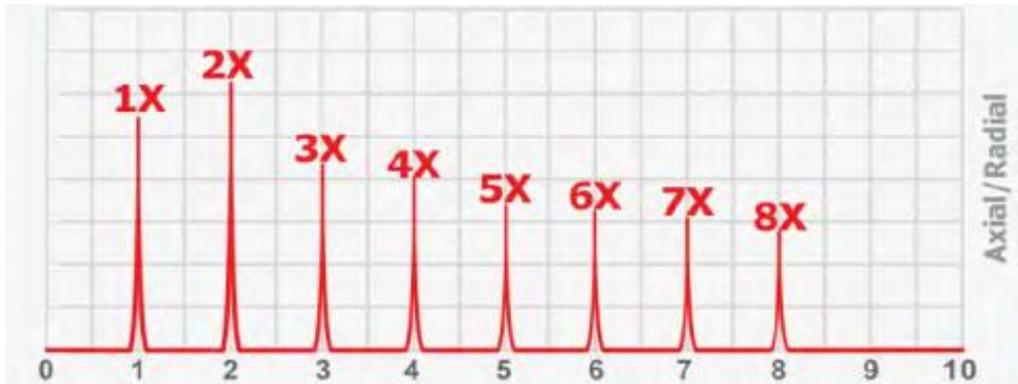


Figure III-12 spectre de défaut d'alignement

#### III.6.8.1 Désalignement radial

Le signal temporel d'un défaut de désalignement à l'allure de la figure (12). On retrouve un phénomène périodique à la fréquence de rotation (période = 1 tour), mais également des phénomènes se répétant chaque 1/2 tour et 1/3 tour. Cela se traduira le plus souvent par la présence des composantes de l'ordre 2, 3 ou même 4 fois la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles de la composante d'ordre 1.

Un défaut d'alignement est révélé par un pic d'amplitude prépondérante généralement 2 fois la fréquence de rotation (parfois 3 ou 4 fois). Il apparaît une vibration dans la direction radiale de composante d'ordre 2 de la fréquence de rotation (rarement d'ordre 3, voire exceptionnellement d'ordre 4), avec des amplitudes supérieures aux composantes d'ordre 1 Figure (13) [23] [24]

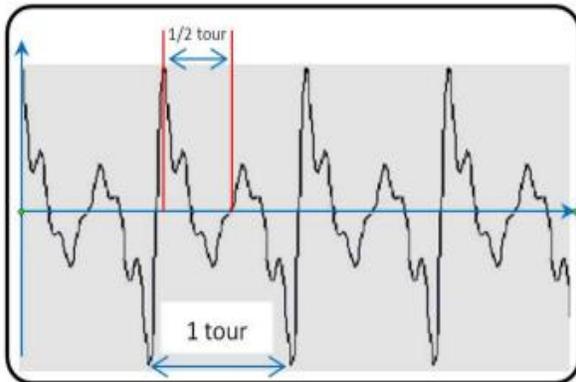


Figure III-13 Signal temporel d'un défaut d'alignement

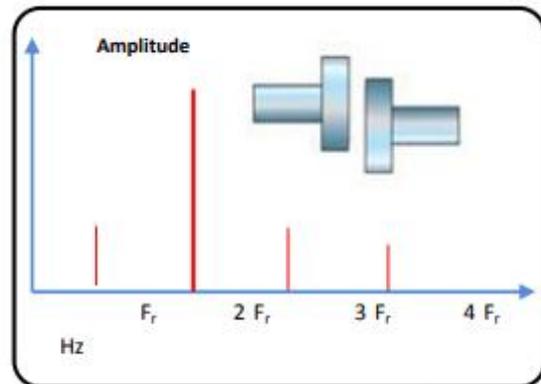


Figure III-14 Image vibratoire d'un défaut d'alignement

### III.6.8.2 Désalignement angulaire

Il apparaît une vibration axiale de composante d'ordre 1, 2, 3 ou 4 de la fréquence de

Rotation avec des amplitudes supérieures à celles des composantes radiales correspondantes figure (13). [23] [24]

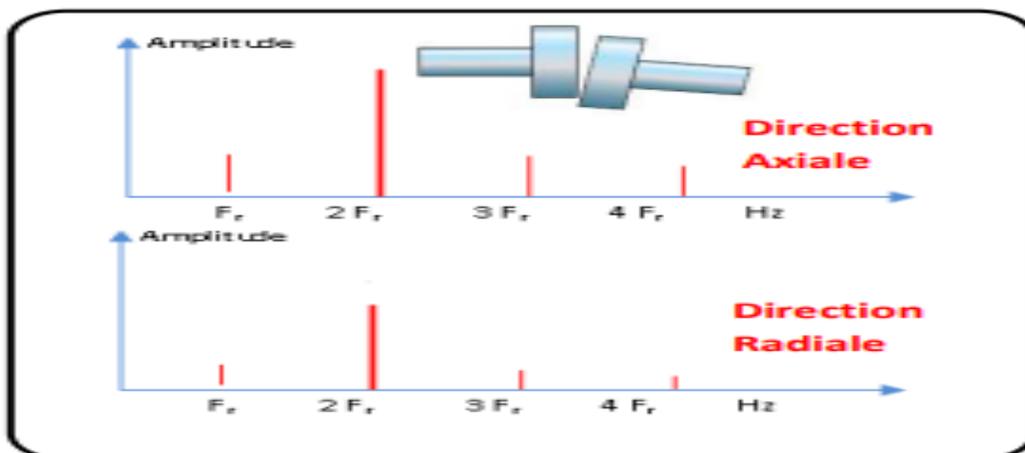


Figure III-15 spectre défaut d'alignement angulaire

### III.6.9 Défaut de serrage :

Le mauvais serrage de la structure de la machine génère des vibrations et un certain bruit. Le spectre typique mesuré sur une machine dans laquelle il existe un jeu contient un grand nombre de pic à des fréquences multiples de la fréquence de rotation. Il est également parfois possible de retrouver des pics à l'harmonique  $\frac{1}{2}$  ( $1/2 \times$  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 utilisé, 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 5.15 montre un exemple spectre sur une machine dont le joint de l'accouplement est utilisé. La fréquence de rotation est de 24,25 Hz. [23] [24]

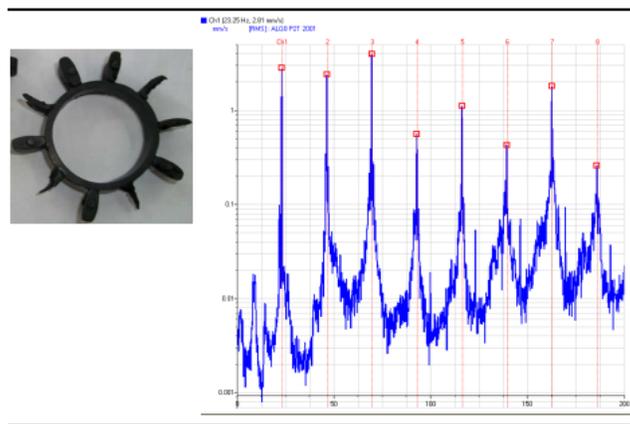


Figure III-16 défaut de serrage

### III.6.10 Défauts de roulements :

Les roulements sont les éléments mécaniques les plus importantes des machines tournantes. Ils sont employés pour guider et soutenir les arbres de machines tournantes. Étant donné leurs grandes sollicitations ils sont la source de panne fréquente. De manière générale, les roulements sont constitués de quatre composants essentiels Une bague extérieure, une bague intérieure, des organes roulants (billes) et un organe de lubrification (cage). [23] [24]

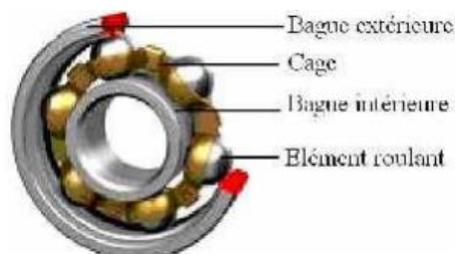


Figure III-17 Constitution d'un roulement

### III.6.10.1 Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement :

Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues [23] [24]

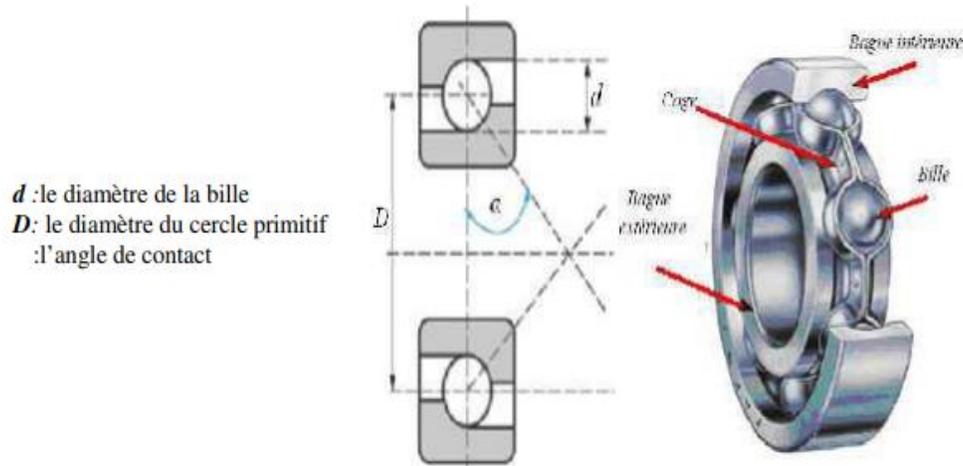


Figure III-18 Caractéristiques d'un roulement

#### 6-10-1-1 Défaut sur la bague extérieure :

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. À chaque composante de ce peigne, est associée une paire de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique importante figure (19)

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation

$$f_{BE} = \frac{n}{2} f_r \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

Où  $f_r$  est la fréquence de rotation,  $d$  le diamètre de la bille,  $D$  le diamètre du cercle primitif,  $n$  le nombre de billes et  $\alpha$  l'angle de contact [23] [24]

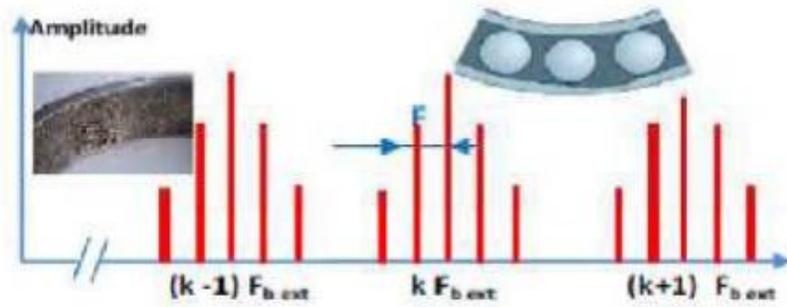


Figure III-19 défaut de bague extérieure

### 6-10-1-2 Défaut sur la bague intérieure :

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation figure (20)

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation.

$$f_{BI} = \frac{n}{2} f_r \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

Où,  $f_r$  est la fréquence de rotation,  $d$  le diamètre de la bille,  $D$  le diamètre du cercle primitif,  $n$  le nombre de billes et  $\alpha$  l'angle de contact. [23] [24]

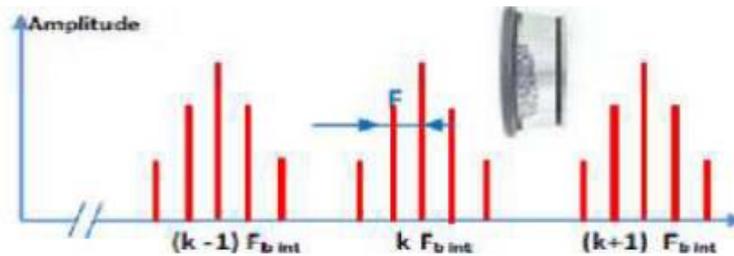


Figure III-20 spectre de défaut de bague intérieure

### 6-10-1-3 Défaut sur l'élément roulant :

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant (bille, rouleau ou aiguille) a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de la cage figure (21)

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation. [23] [24]

$$f_B = \frac{D}{d} f_r \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right]$$

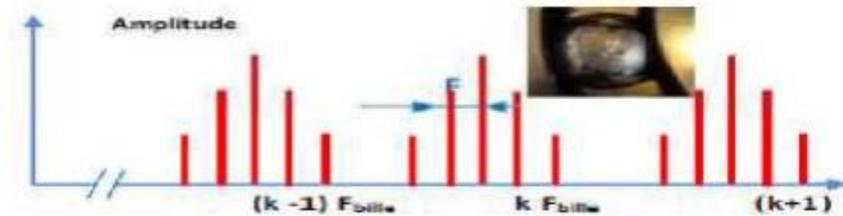


Figure III-21 spectre de défaut de bille

#### 6-10-1-4 Défaut sur la cage

La fréquence de passage d'un défaut de cage est donnée par l'équation : Ce défaut se manifeste par la présence de raies à la fréquence  $f_c$  et ses harmoniques. Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation. [23] [24]

$$f_c = \frac{f_r}{2} \left( 1 \pm \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

#### III.6.11 Défauts des engrenages :

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

$$f_e = Z_1 * f_1 = Z_2 * f_2$$

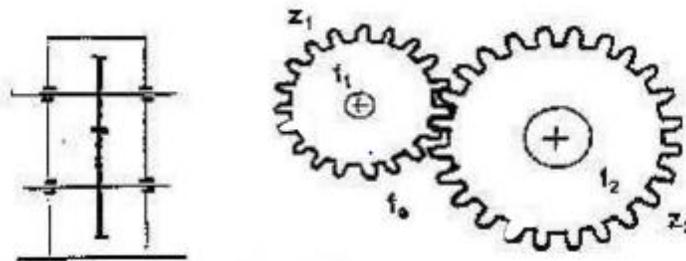


Figure III-22 Schéma simplifié d'un engrenage

Si la denture est correcte, le spectre est constitué de composante dont les fréquences

Correspondent à la fréquence d'engrènement et ses harmoniques.

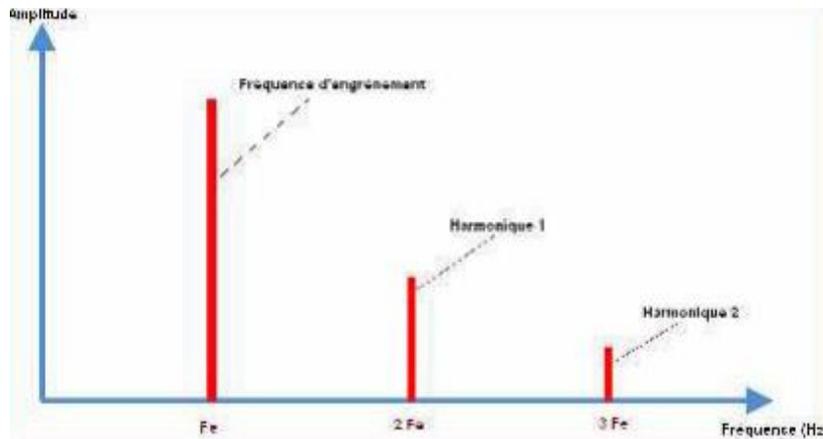


Figure III-23 Spectre d'un engrenage

Le défaut d'engrenage introduit une modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre, ce qui se traduit par l'apparition dans le spectre, de raies à la fréquence de rotation des arbres et des bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement et de ses harmoniques. Ces bandes latérales se composent de plusieurs raies espacées de  $f_1$  et  $f_2$ . La figure II-28 montre le spectre théorique d'un défaut d'engrenage.

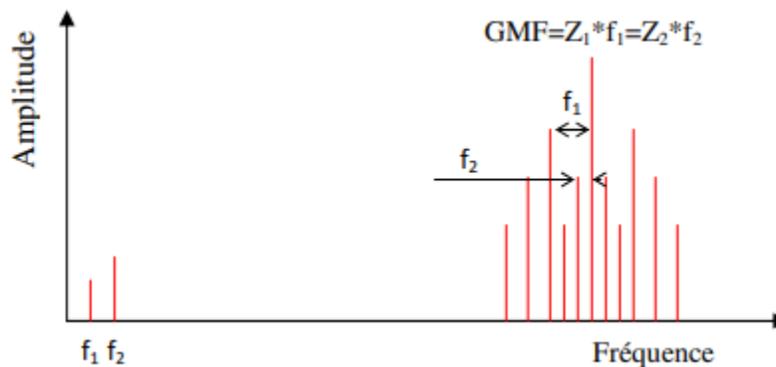


Figure III-24 Représentation du spectre théorique d'un défaut d'engrenage

Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes (voir figure 25) :

- 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) [23]

[24]

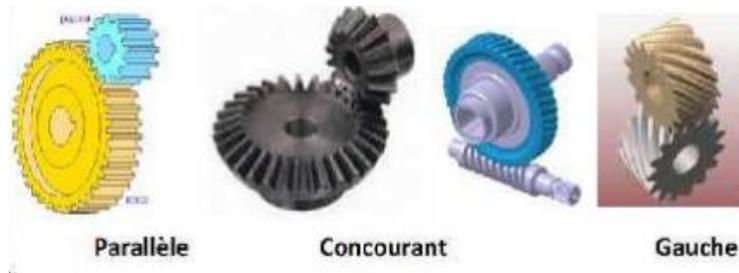


Figure III-25 Différents types d'engrenage

### III.6.11.1 Différent type des défauts d'engrènement :

#### 6-11-1-1 Détérioration d'une dent :

Si l'une des roues présente une dent détériorée, il se produit un choc dur, à chaque tour du pignon. Le spectre correspondant (Figure 26) [23] [24].

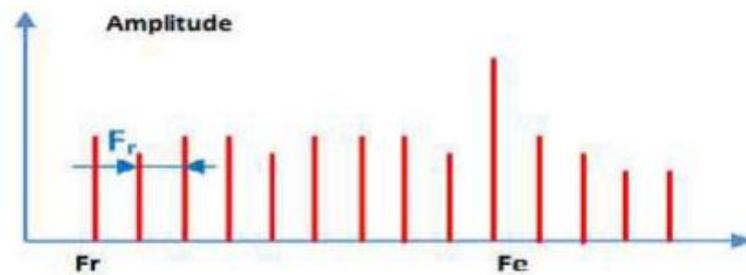


Figure III-26 spectre d'un engrenage présentant une dent détériorée

#### 6-11-1-2 Détérioration de l'ensemble de dentures :

Lorsque l'ensemble de la denture est usé ou détérioré, les chocs se produisent au passage de chacune des dents. Le spectre est constitué d'un peigne de raies dont la fréquence correspond à la fréquence d'engrènement, mais cette fois avec une amplitude beaucoup plus élevée (voir figure 27). Le spectre peut présenter des raies à la fréquence de rotation correspondant à des équilibrages imparfaits. [23] [24]

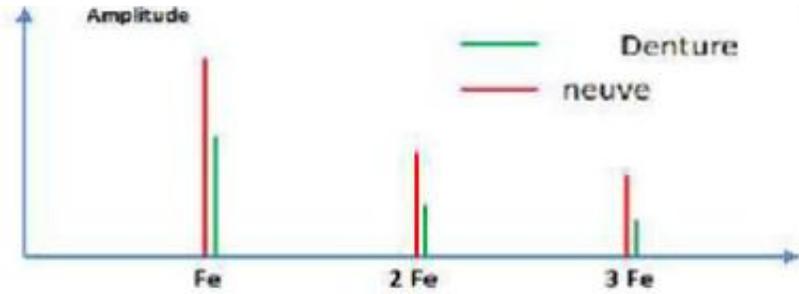


Figure III-27 spectre théorique d'une denture

### 6-11-1-3 Entraxe insuffisant (jeu insuffisant au fond de denture) :

Si l'entraxe des arbres portant les deux roues est insuffisant, il se produit un engrènement en fond de denture. La dent menant force à l'engagement et au déengagement ce qui provoque une usure des deux côtés de la denture. En analyse spectrale ce phénomène se traduit par l'apparition d'une raie d'amplitude prépondérante à deux fois la fréquence d'engrènement et la disparition partielle, voire totale de l'amplitude à cette fréquence (Figure 28). [23] [24]

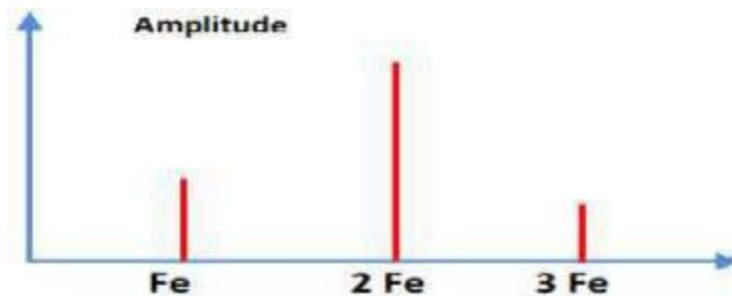


Figure III-28 spectre réel d'un engrènement en fond de denture

### 6-11-1-4 Jeu de fond de denture trop grand :

Un jeu de fond de denture trop grand a pour conséquence un choc dur à chaque passage d'une dent à l'autre ("rattrapage" du jeu). On obtient alors un spectre de choc dur, périodique, à la fréquence d'engrènement (présence de nombreuses harmoniques de niveaux de même ordre de grandeur) (Figure 29). [23] [24]

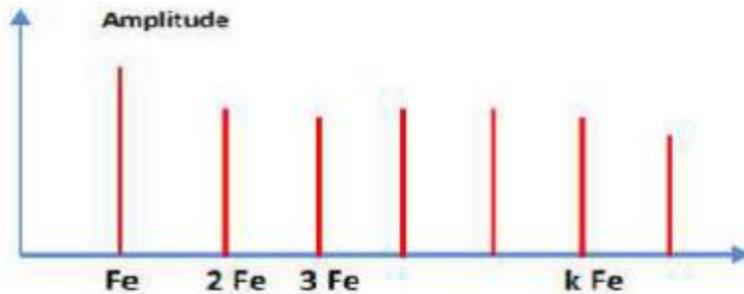


Figure III-29 spectre d'un engrenage présentant une dent détériorée

### 6-11-1-5 Défauts induisant une modulation d'amplitude :

Si l'arbre ou le pignon présente un défaut d'excentricité, ou de faux rond, il va apparaître une modulation d'amplitude du signal vibratoire par la fréquence de rotation due à la modélisation de l'effort d'engrènement (Figure30). [23] [24]

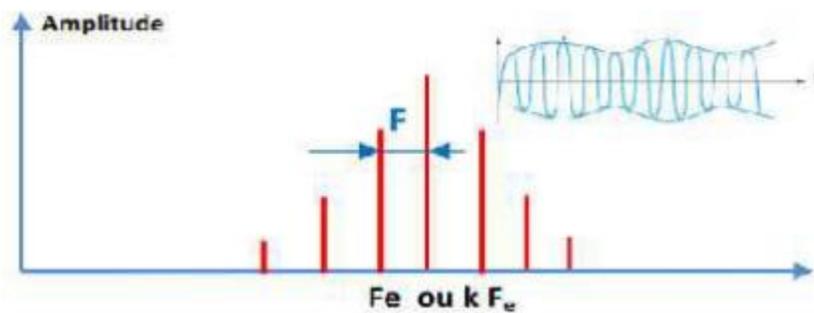


Figure III-30 spectre de la modulation d'amplitude de  $F_e$  par  $F_r$

### III.7 Conclusion :

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

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

Le chapitre suivant sera consacré à la théorie des analyse vibratoires pour détecter et diagnostiquer les défauts dans le four de la cimenterie de Zahana.

### Chapitre IV : Etude d'un cas industrielle

#### IV.1 Introduction :

Ce chapitre traiter un cas réel de vibration détecter au niveau de four de la cimenterait de ZAHANA la machine la plus important dans la production de ciment. Ces vibrations peuvent entrainer des dégâts importants de la chaine cinématique et arrête la production pour éviter ce genre de problème il faut accéder à l'analyse vibratoire comme outil de maintenance en suite trouver des solutions pour assurer la continuité de production.

#### IV.2 Présentation de l'entreprise

##### IV.2.1 Implantation

La société des ciments de Zahana dénommée « S.CI.Z », filiale du groupe ERCO est implantée dans la wilaya de Mascara à proximité de la route nationale N°13 et du réseau ferroviaire reliant les villes d'Oran et de Sidi-bel-abbès. Elle est située au nord de Mascara au Sud Est d'Oran.



Figure IV-1 prototype d'usine

##### IV.2.2 Processus de fabrication du ciment

On comptabilise au total 16 étapes qui peuvent intervenir dans le processus de fabrication du ciment :

1 Carrières (calcaire, marne), 2. Extraction des matières premières, 3. Acheminement, 4. Concassage, 5. Pré-homogénéisation, 6. Broyage du cru, 7. Filtrage, 8. Préchauffage, 9. Cuisson, 10. Refroidissement, 11. Stockage du clinker, 12. Ajouts, 13. Broyage du ciment, 14. Stockage dans des silos à ciment, 15. Expédition, 16. Analyse des prélèvements.

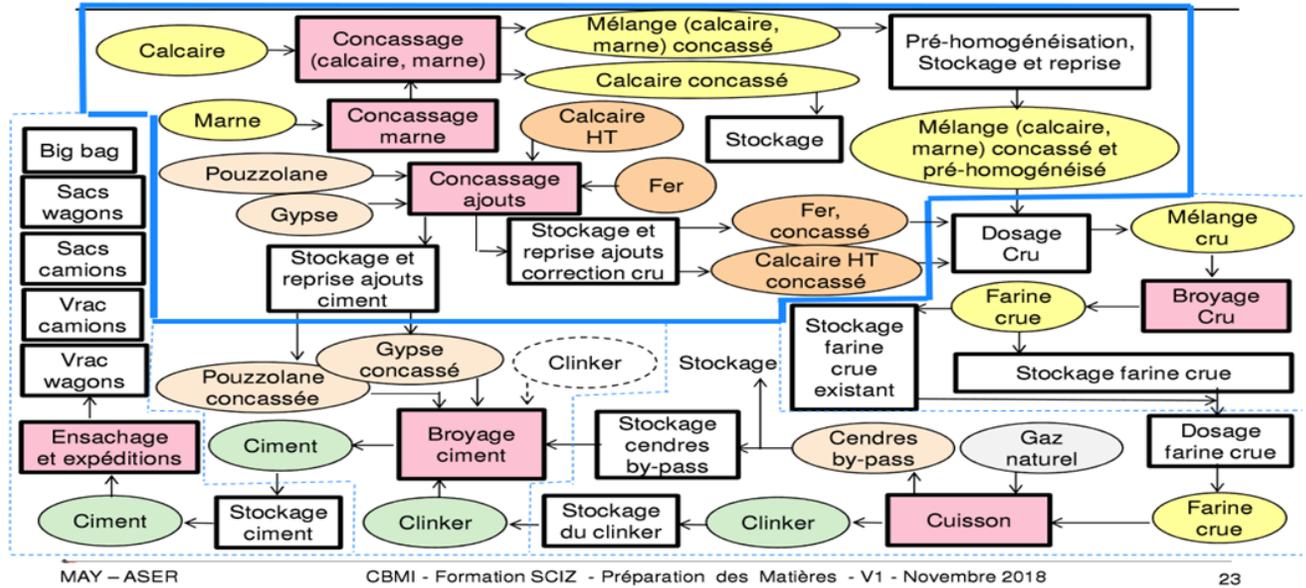


Figure IV-2 schéma de fabrication du ciment

### IV.2.3 Les étapes de fabrication du ciment :

#### IV.2.3.1 Zone carrière :

##### 2-3-1-1 Carrière :

Le calcaire (carbonate de calcium), est extrait par minage du front de taille, aménagé en gradins. A cette fin, on pratique des trous profonds dans le roc que l'on remplit d'explosifs, suivant un plan de tir et d'allumage précis, tendant à obtenir le profil final de la réhabilitation de la carrière.



Figure IV-3 Carrière

### 2-3-1-2 Concassage :

Le concasseur a pour rôle de réduire la taille des rochers jusqu'à un diamètre moyen de (0 à 35mm). Au niveau du concasseur, les matières premières sont mélangées dans des proportions bien déterminées. Il s'agit du calcaire, de la marne, de l'argile, et d'oxyde de fer. Les proportions sont contrôlées par un analyseur, installé sur la ligne de transport vers le stockage de pré homogénéisation.

### IV.2.3.2 Zone Cru :

#### 2-3-2-1 Pré-homogénéisation :

Pour obtenir un produit homogène. L'usine est équipée de deux installations de pré homogénéisation polaires de capacité totale d'environ  $2 \times 18000$  tonnes chacune. Le tas est constitué par des couches des matières premières à l'aide d'un manège tournant avec deux navettes.



Figure IV-4 Stocke polluer

#### 2-3-2-2 Broyage Cru :

Un broyeur à galets réduit la matière première à l'état de farine, ce résultat est obtenu par des galets qui écrasent les morceaux sur une assiette rotative jusqu'à ce que cette matière atteigne la finesse souhaitée.



Figure IV-5 Broyage Cru

### IV.2.3.3 Zone cuisson :

#### 2-3-3-1 Préchauffage :

Transporter la farine verticalement par l'élévateur à gaude vers la tour de préchauffage qui va être chauffé dans les cyclons. Le préchauffage permet essentiellement de préparer la farine du point de vue chimique et thermique. Cette préparation consiste à sécher la matière crue. Dans la tour de préchauffage, la farine crue avance du haut vers le bas et se mélange avec les gaz chauds du four circulant dans le sens inverse. Ce procédé permet de préchauffer la farine crue jusqu'à une température de près 800 °C.

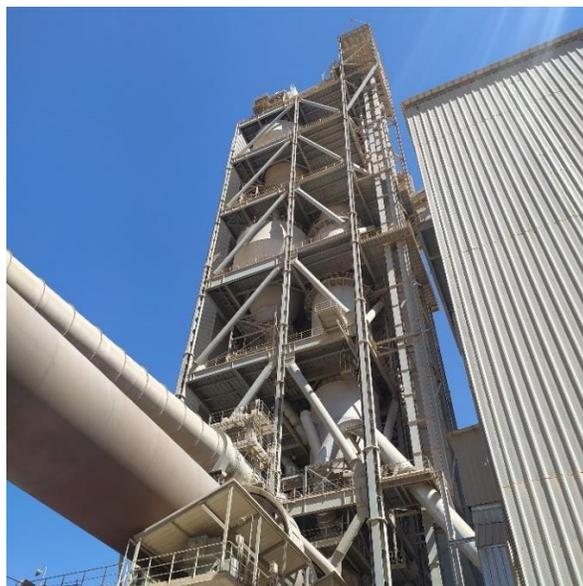


Figure IV-6 Préchauffage

### 2-3-3-2 Four Rotatif :

Le four est décrit comme un cylindre en acier, revêtu à l'intérieur de briques réfractaires et présente une inclinaison de 3,5% par rapport à l'horizontale dans le sens du flux de matière, cette inclinaison combinée à la rotation permet au matériau de progresser de la partie amont du four (en partie supérieure), par gravité, vers la zone de Clinkérisation (environ 1450°C). La longueur du four est de 72 mètres, son diamètre 4.8 mètres, animé par une vitesse de rotation variable pouvant atteindre 4.5 tr/mn.

Cet équipement ce qu'on a choisie comme ligne d'arbre pour faire l'analyse vibratoire.



Figure IV-7 Four Rotatif

### 2-3-3-3 Refroidisseur :

Le clinker sortant du four passe sur la grille vibrante du refroidisseur, où il est trempé rapidement par l'air froid soufflé par le bas de la grille. Ce processus permet la récupération de la chaleur du clinker. L'air chaud généré est réintroduit dans le four pour aider à la combustion.

### 2-3-3-4 Concassage De Clinker :

Le clinker sortant du refroidisseur, est transporté jusqu'au concassage puis au hangar au silo du stockage, surtout ce type de ciment il doit passer de trois silos.

## IV.2.3.4 Zone Ciment :

### 2-3-4-1 Broyage Ciment :

Le clinker reçu après refroidissement et ensuite broyé en additionnant le gypse avec des quantités différentes selon les qualités du ciment désirées. Ce type de Broyeur qui permet le broyage du clinker en ajoutant des ajouts s'appelle BROYEUR CIMENT

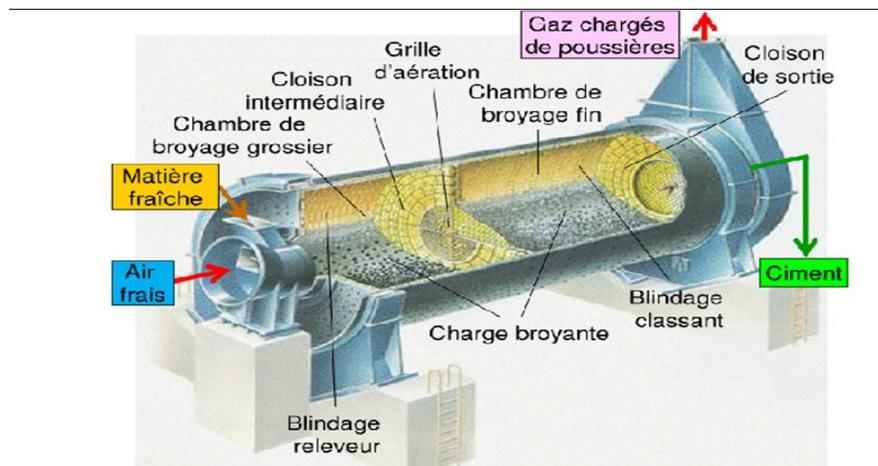


Figure IV-8 broyage ciment

### IV.2.3.5 Zone expédition :

Après la zone de broyage ciment existe Plusieurs silos de stockage ciment de 15000 tonnes soit une capacité de stockage de 60000 tonnes, L'extraction se fais :

- 1-par bouches de remplissage pour vente vrac sur camion-citerne
- 2-par aéroglisseur vers l'atelier de remplissage sac de 50 kg

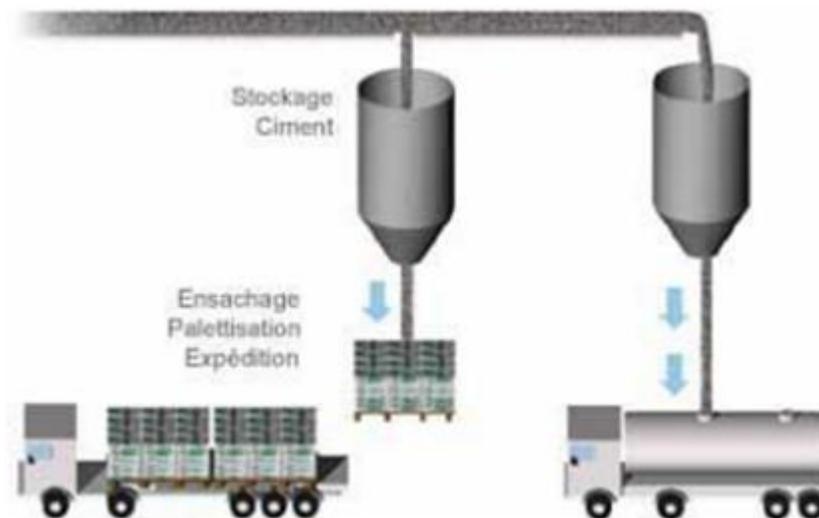


Figure IV-9 remplissage de ciment

IV.3 La chaine cinématique :

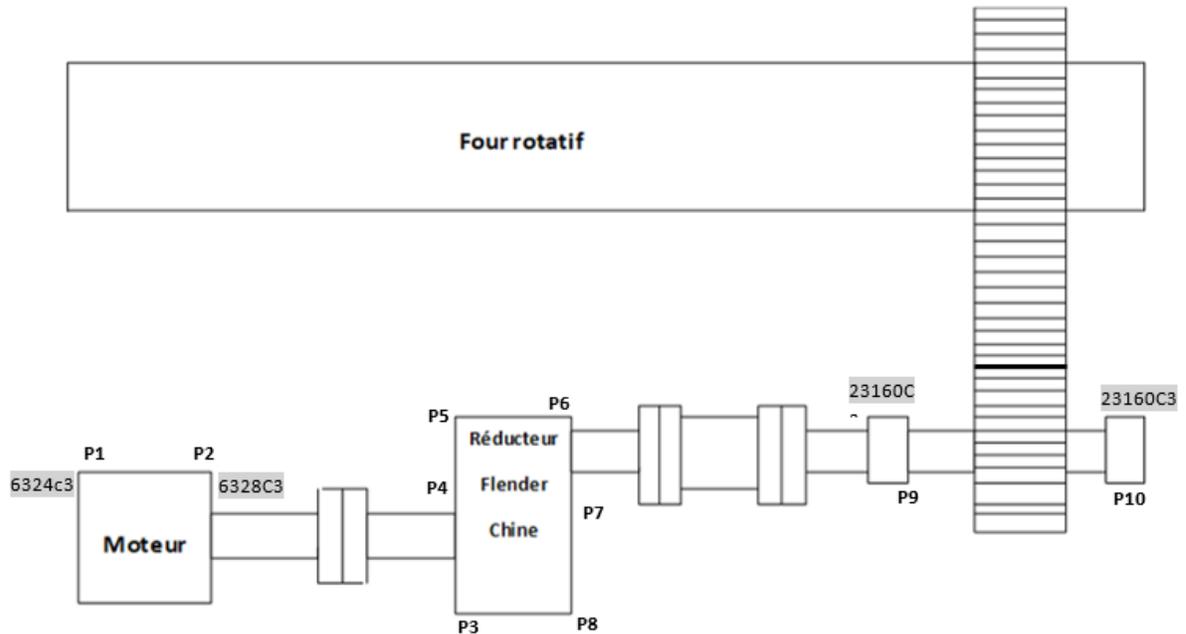


Figure IV-10 la chaine cinématique

<b>FICHE TECHNIQUE DE MOTEUR</b>
<p><b>La marque : MEG</b>  <b>Type : MGL 450</b>  <b>Vitesse en service : 803 tr/min</b>  <b>Puissance : 710 kW</b>  <b>Fréquence de rotation : 13.33 Hz</b></p>
<b>FICHE TECHNIQUE DE REDUCTEUR</b>
<p><b>Type : ML3PSF123-25</b></p>
<b>FICHE TECHNIQUE DE PIGNON ET COURONNE</b>
<p><b>Diamètre <math>D_2</math> : 7.36 m</b>  <b>Diamètre <math>D_1</math> : 0.84 m</b>  <b>Nbr des dents <math>Z_1</math> : 21 / <math>Z_2</math> : 184</b>  <b>Module : 40</b>  <b>Vitesse de rotation <math>N_1</math> : 31.557 tr/min</b>  <b>Fréquence de rotation <math>N_1</math> : 0.525Hz</b>  <b>Vitesse de rotation <math>N_2</math> : 3.597tr/min</b>  <b>Fréquence de rotation <math>N_2</math> : 0.059Hz</b>  <b>Fréquence d'engrènement : 11.004 Hz</b></p>

<b>FICHE TECHNIQUE DE ROULEMENT 6324C32</b>
Diamètre intérieur : 24 mm Diamètre extérieur : 63 mm Fréquence bague ext :41.889Hz Fréquence bague int: 65.176Hz Fréquence elem roul : 58.886Hz Fréquence cage : 5.232 Hz
<b>FICHE TECHNIQUE DE ROULEMENT 6328C3</b>
Diamètre intérieur : 28 mm Diamètre extérieur : 63 mm Fréquence bague int: 65.176Hz Fréquence elem roul : 58.886Hz Fréquence cage : 5.232 Hz
<b>FICHE TECHNIQUE DE ROULEMENT 23160C3</b>
Diamètre intérieur : 60mm Diamètre extérieur : 231mm Fréquence bague ext :5.085Hz Fréquence bague int : 6.469Hz Fréquence elem roul : 4.186Hz Fréquence cage : 0.230 Hz
<b>FICHE TECHNIQUE FOUR ROTATIF</b>
Diamètre : 4.8m Longueur : 72m Vitesse de four en service : 3.601 tr/min Vitesse max de four : 4.5 tr/min Angle d'inclinaison : 2° Inclinaison : 3.5%

**IV.4 L'analyse vibratoire :**

**IV.4.4 Niveau global :**

		ACCELERATION	VITESSE
P1	H	4.72	0.34
	V	4.33	0.29
	A		
P2	H	10.36	0.48
	V	11.22	0.38
	A	7.51	0.40
P3	H	1.35	0.73
	V	1.31	0.63

## CHAPITRE IV : ÉTUDE D'UN CAS INDUSTRIELLE

	A	1.48	0.72
P4	H	0.70	0.38
	V	0.41	0.31
	A	0.50	0.53
P5	H	0.49	0.31
	V	0.58	0.34
	A	0.79	0.57
P6	H	3.25	0.98
	V	2.11	0.91
	A	0.64	0.85
P7	H	0.66	0.40
	V	1.66	0.28
	A	1.37	0.47
P8	H	1.22	1.01
	V	2.55	1.03
	A	0.92	0.85
P9	H	0.06	4.6
	V	0.08	3.06
	A	0.06	5.28
P10	H	0.09	4.56
	V	0.08	4.12
	A	0.07	4.86

Tableau IV-1 les mesures de vibration de niveau globale

D'après les résultats obtenus on distingue que les accélérations des points de 1 à 10 ne dépassent pas le seuil des normes, tandis que les résultats des vitesses dépassent le seuil au niveau de 9 et 10.

Suite aux relevés des vibrations dans la direction horizontale, verticale et axiale des points de P1 à P2 (moteur), de P3 à P8 (réducteur) et de P9 à P10 (engrenage) mesure globale faites à la date du 06/07/2021, et après le transfert de ces données, pour faire la mise à jour de la base de données principale de ces points, on obtient les courbes de tendance des différents descripteurs des points P9 et P10 dans les figures

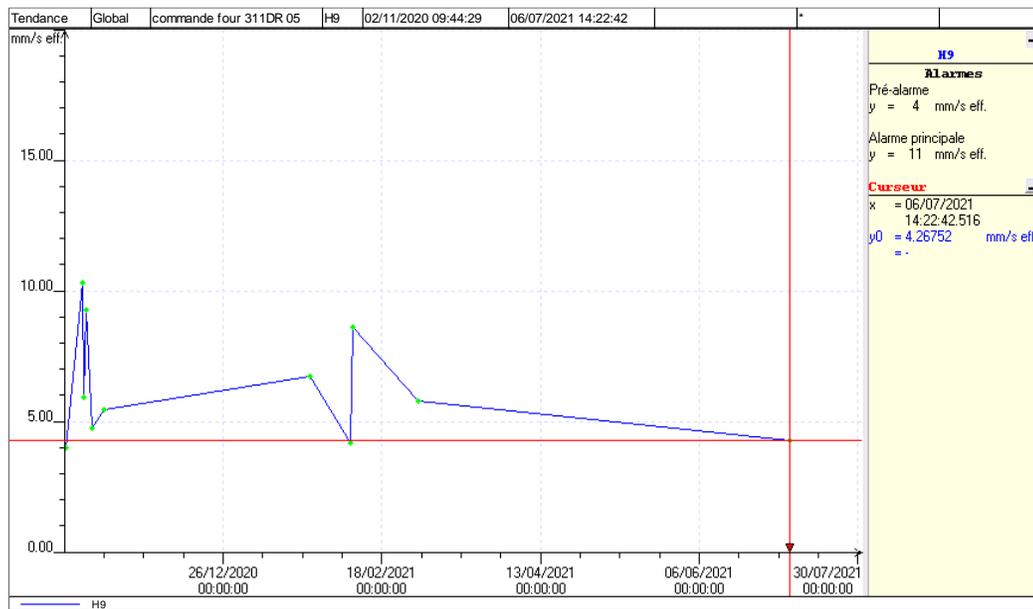


Figure IV-11 Tendence du point N°9 de vitesse en mm/s

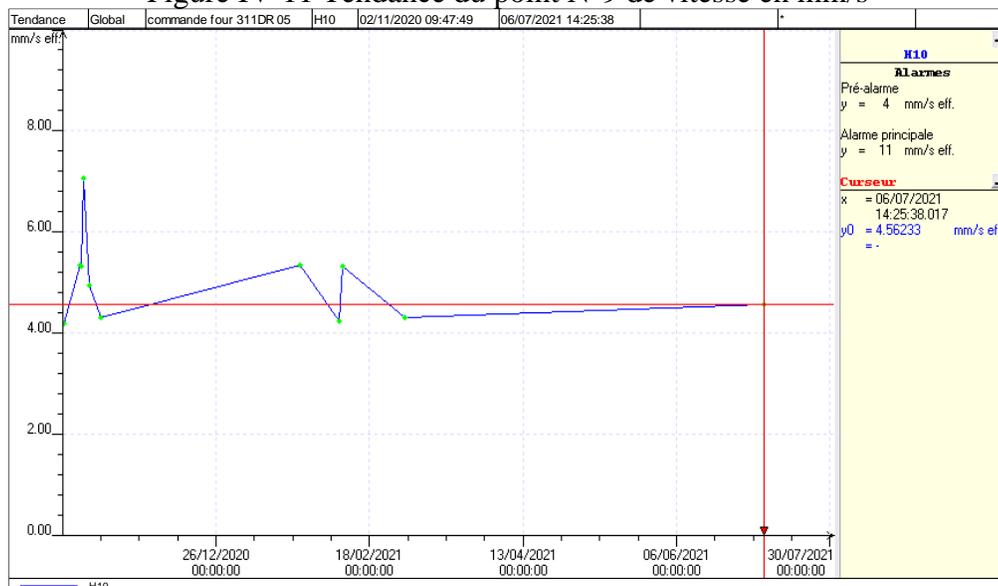


Figure IV-12 Tendence du point N°10 de vitesse en mm/s sur la direction horizontale

### IV.4.4.1 Analyse :

D'après les courbes de tendances des mesures globales des vibrations des points P9 et P10, des vibrations considérables (niveau global élevé), qui dépasse le seuil d'alarme, ont été remarquées pour les mesures du 06/07/2021 sur les engrenages, il faut noter que ces valeurs de mesure globale dépassent le seuil d'alarme.

Ces deux mesures nous obligent à procéder à une analyse spectrale (fréquentielle), afin de mieux détecter les problèmes mécaniques qui reflètent ces valeurs constatées.

IV.4.5 Analyse spectrale :

IV.4.5.1 Moteur :

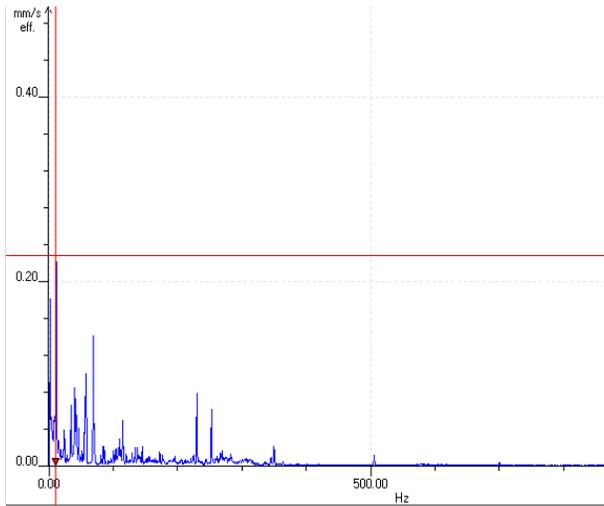


Figure IV-13 Spectre de vitesse P1 horizontal

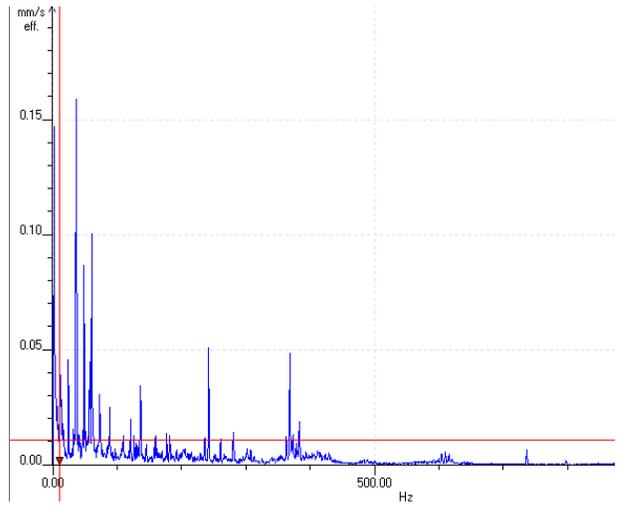


Figure IV-14 Spectre de vitesse P1 vertical

➤ Spectre de point 1 :

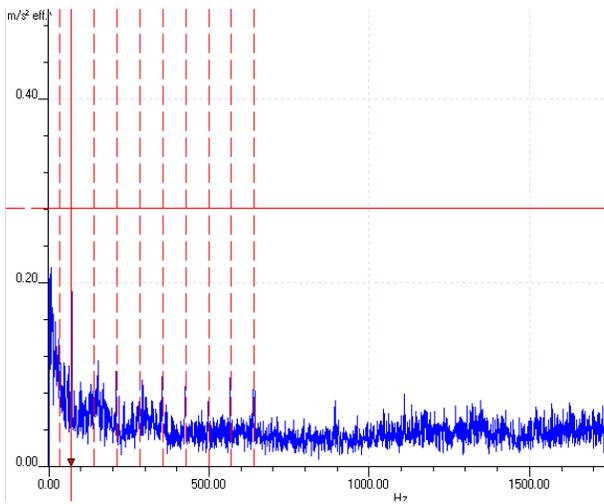


Figure IV-15 Spectre d'accélération P1 horizontal

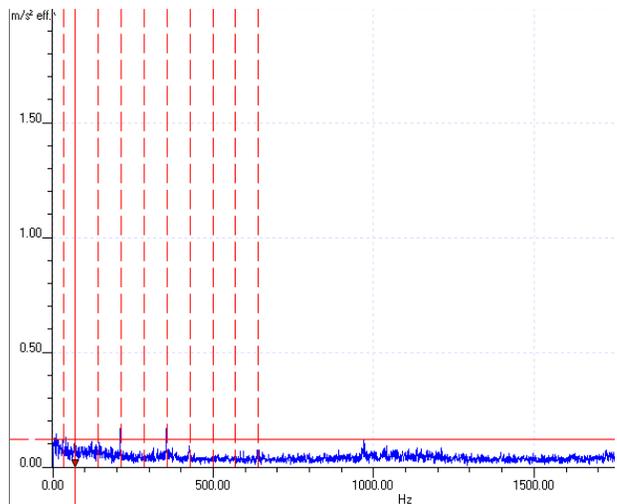


Figure IV-16 Spectre d'accélération P1 vertical

# CHAPITRE IV : ÉTUDE D'UN CAS INDUSTRIELLE

## ➤ Spectre de point 2 :

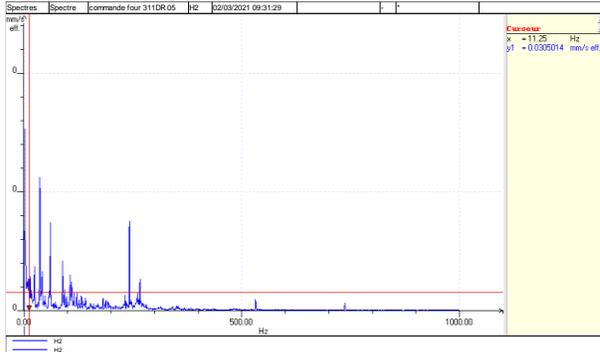


Figure IV-17 Spectre de vitesse P2 horizontal

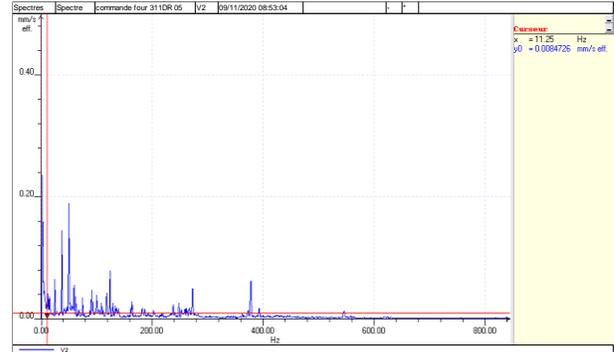


Figure IV-18 Spectre de vitesse P2 vertical

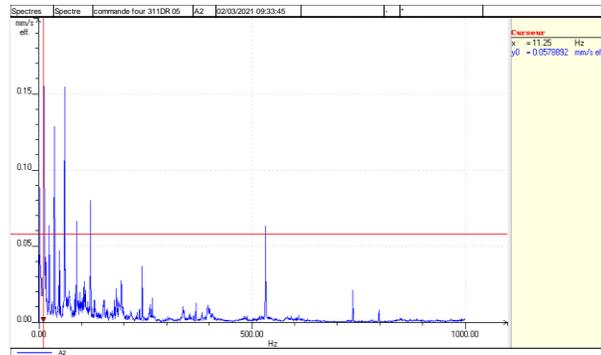


Figure IV-19 Spectre de vitesse P2 axial

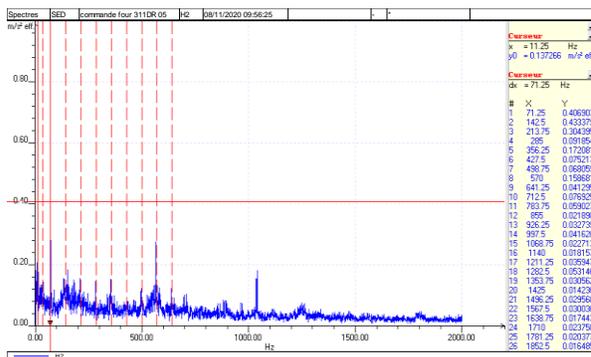


Figure IV-20 Spectre d'accélération P2 horizontal

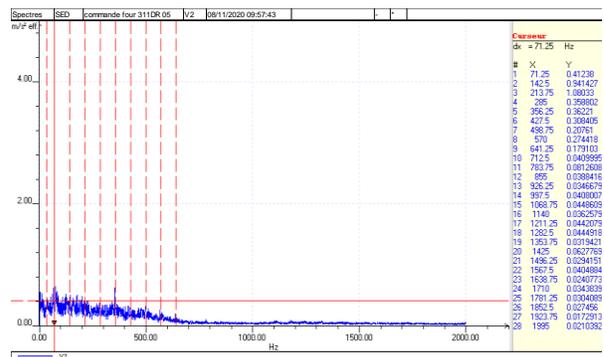


Figure IV-21 Spectre d'accélération P2 vertical

➤ **L'analyse du moteur :**

En analysant les spectres de vitesse et d'accélération dans le P1 et P2 liés aux moteurs on remarque l'absence de pic on des vibrations.

### **IV.4.5.2 Réducteur :**

➤ **Spectre de point 3 :**

## CHAPITRE IV : ÉTUDE D'UN CAS INDUSTRIELLE

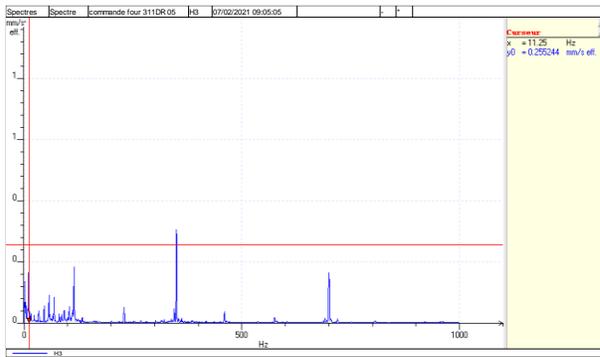


Figure IV-22 Spectre de vitesse P3 horizontal

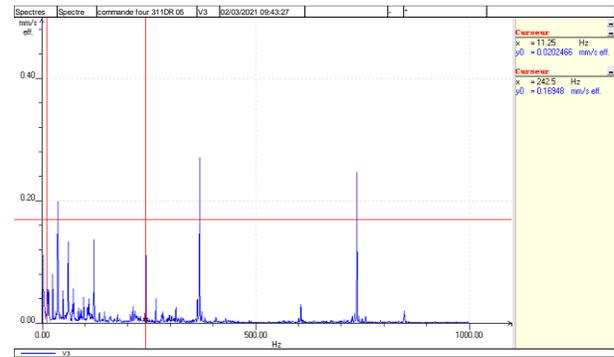


Figure IV-23 Spectre de vitesse P3 vertical

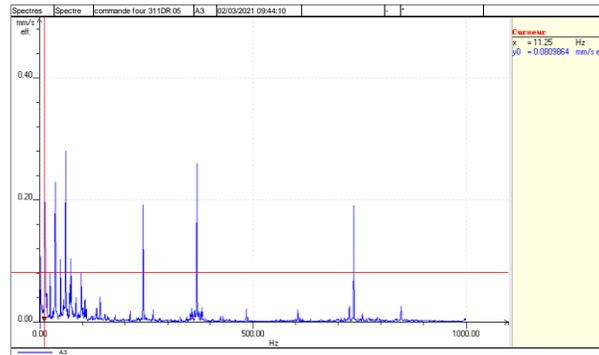


Figure IV-24 Spectre de vitesse P3 axial

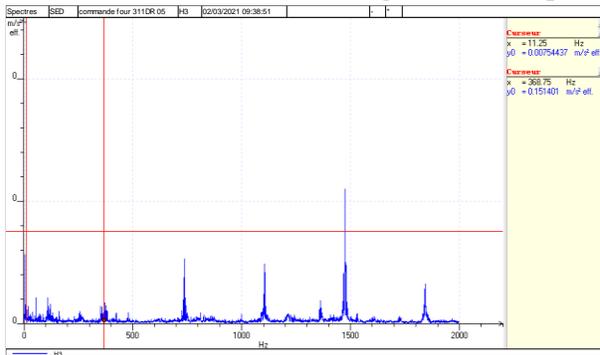


Figure IV-25 Spectre d'accélération P3 horizontal

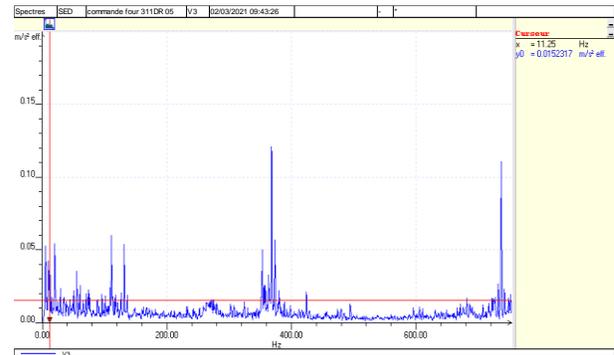


Figure IV-26 Spectre d'accélération P3 vertical

➤ Spectre de point 4 :

## CHAPITRE IV : ÉTUDE D'UN CAS INDUSTRIELLE

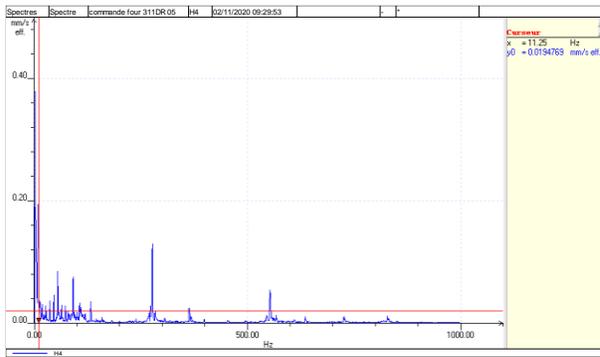


Figure IV-27 Spectre de vitesse P4 horizontal

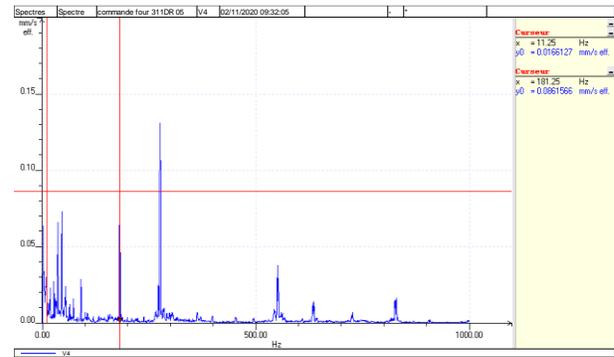


Figure IV-28 Spectre de vitesse P4 vertical

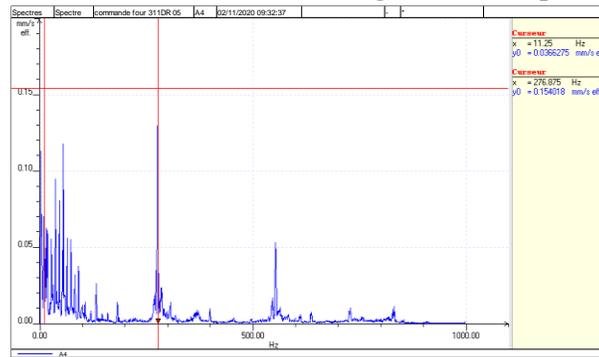


Figure IV-29 Spectre de vitesse P4 axial

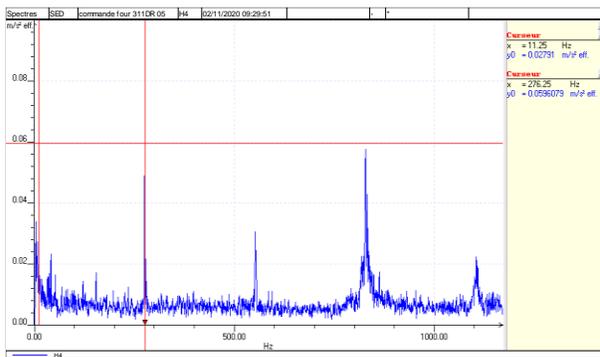


Figure IV-30 Spectre d'accélération P4 horizontal

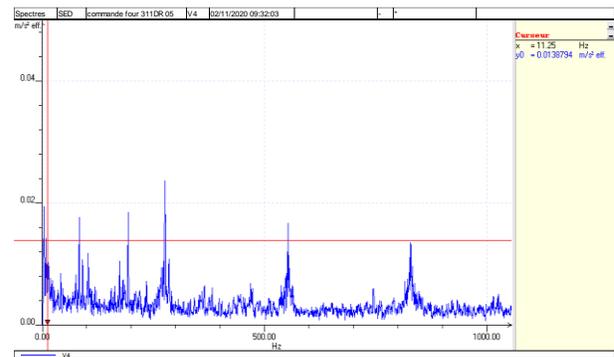


Figure IV-31 Spectre d'accélération P4 vertical

➤ Spectre de point 5 :

## CHAPITRE IV : ÉTUDE D'UN CAS INDUSTRIELLE

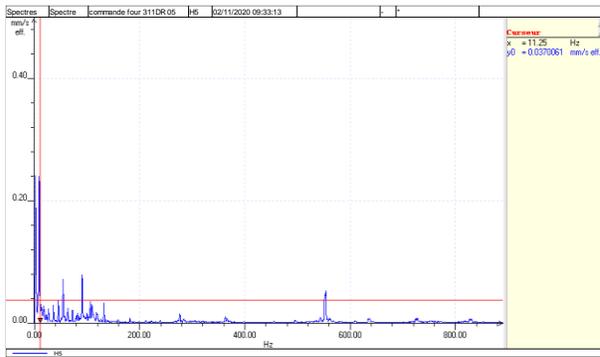


Figure IV-32 Spectre de vitesse P5 horizontal

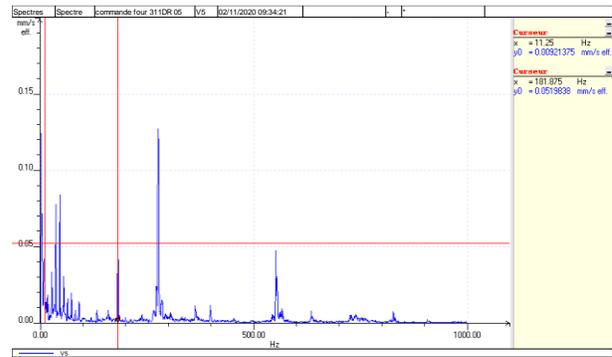


Figure IV-33 Spectre de vitesse P5 vertical

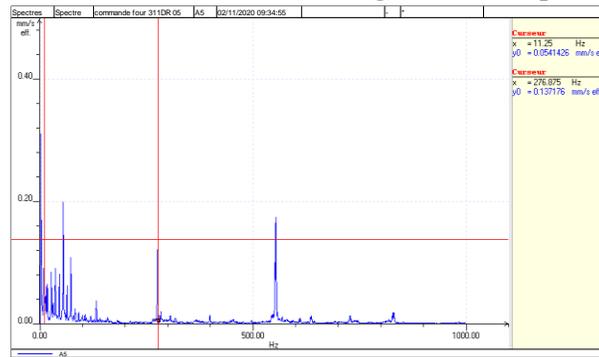


Figure IV-34 Spectre de vitesse P5 axial

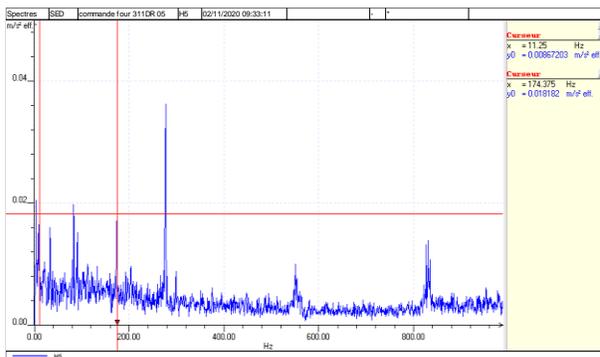


Figure IV-35 Spectre d'accélération P5 horizontal

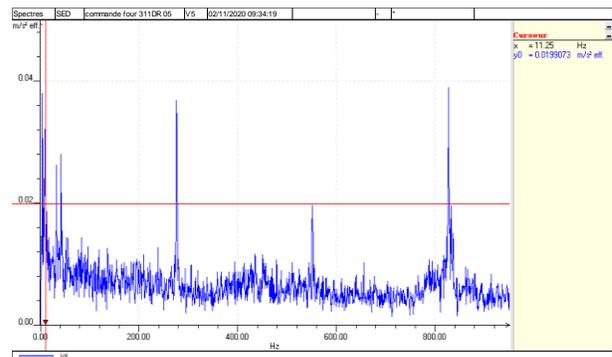


Figure IV-36 Spectre d'accélération P5 vertical

➤ Spectre de point 6 :

## CHAPITRE IV : ÉTUDE D'UN CAS INDUSTRIELLE

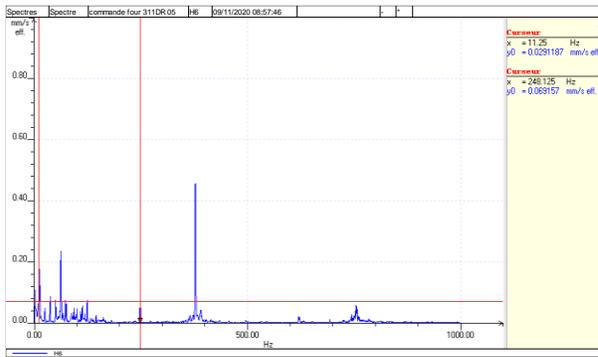


Figure IV-37 Spectre de vitesse P6 horizontal

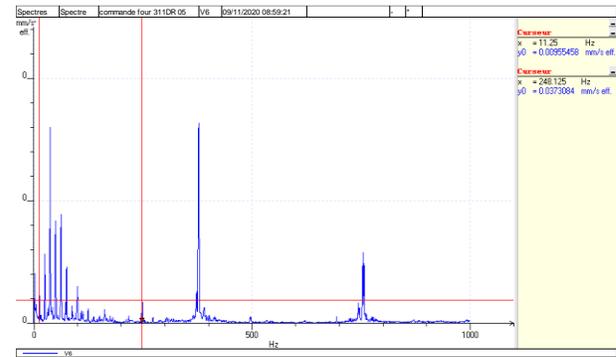


Figure IV-38 Spectre de vitesse P6 vertical

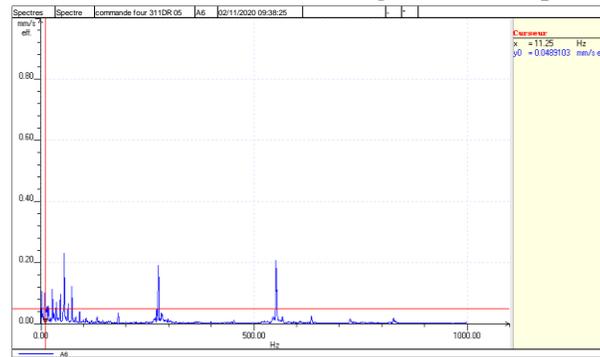


Figure IV-39 Spectre de vitesse P6 axial

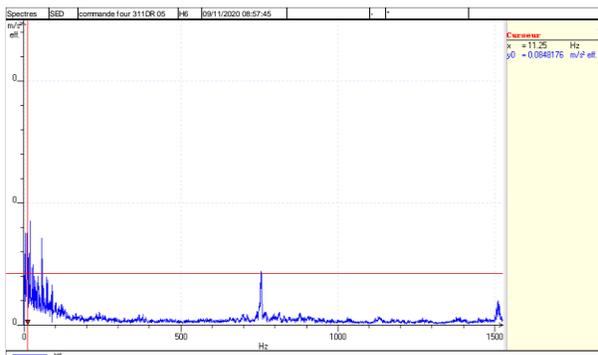


Figure IV-40 Spectre d'accélération P6 horizontal

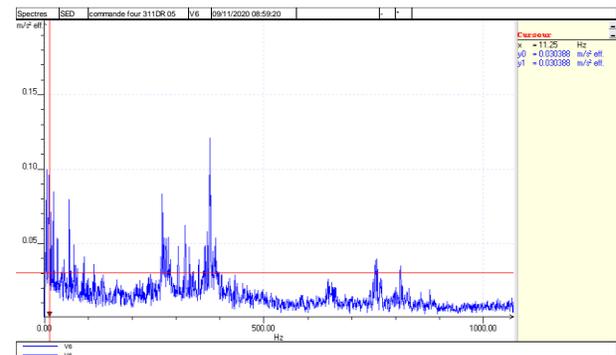


Figure IV-41 Spectre d'accélération P6 vertical

➤ Spectre de point 7 :

## CHAPITRE IV : ÉTUDE D'UN CAS INDUSTRIELLE

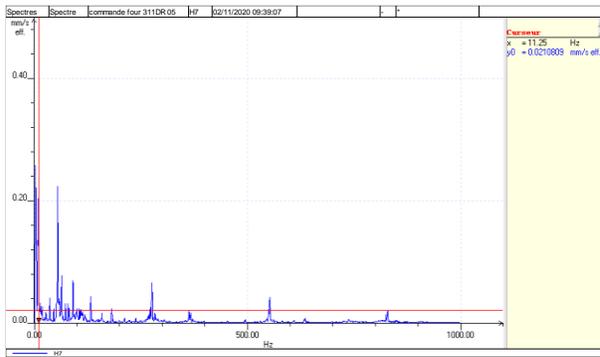


Figure IV-42 Spectre de vitesse P7 horizontal

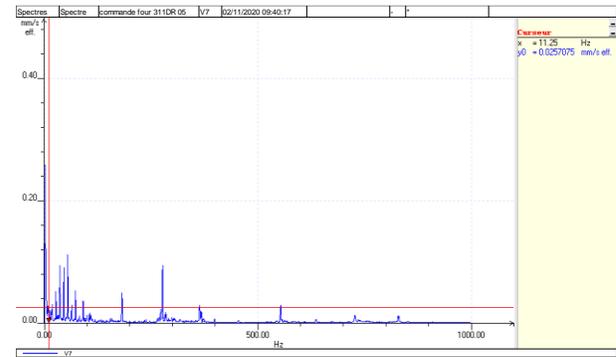


Figure IV-43 Spectre de vitesse P7 vertical

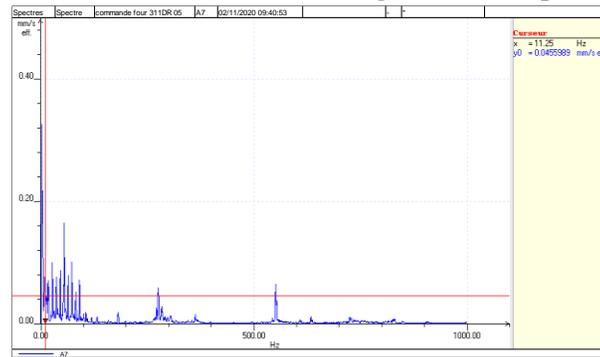


Figure IV-44 Spectre de vitesse P7 axial

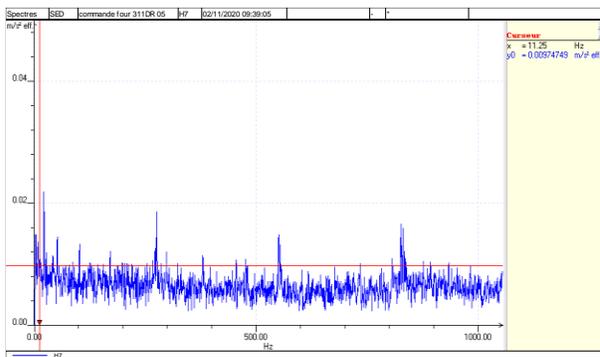


Figure IV-45 Spectre d'accélération P7  
horizontal

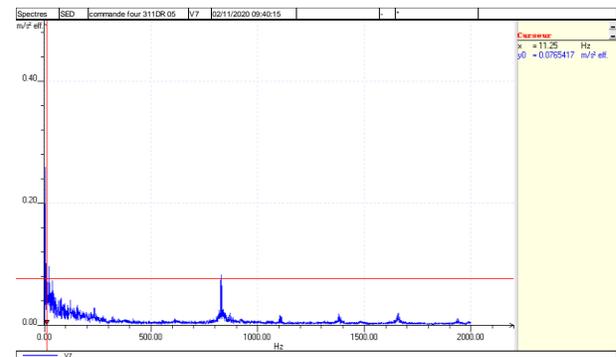


Figure IV-46 Spectre d'accélération P7  
vertical

➤ Spectre de point 8 :

## CHAPITRE IV : ÉTUDE D'UN CAS INDUSTRIELLE

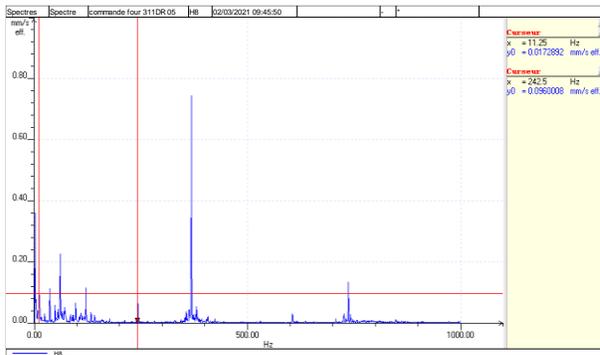


Figure IV-47 Spectre de vitesse P8 horizontal

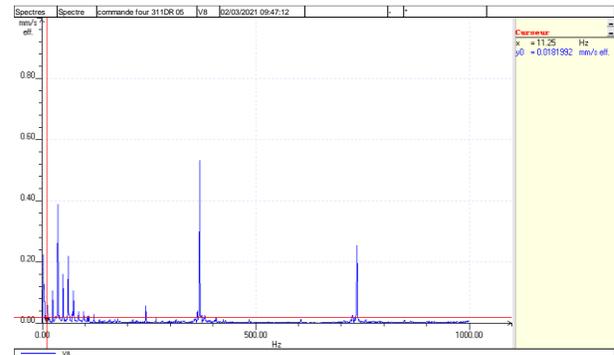


Figure IV-48 Spectre de vitesse P8 vertical

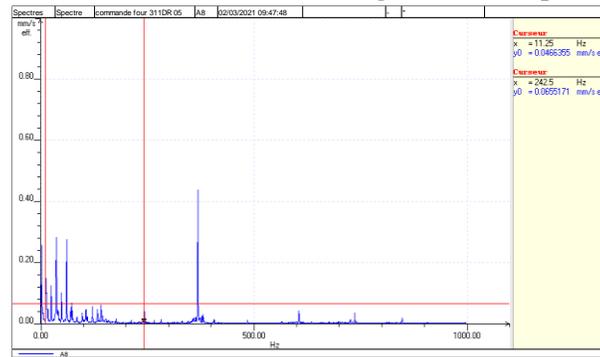


Figure IV-49 Spectre de vitesse P8 axial

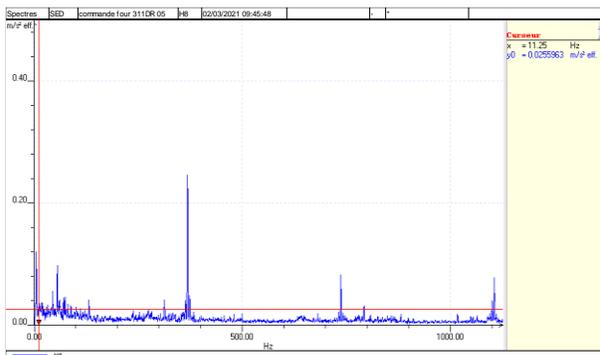


Figure IV-50 Spectre d'accélération P8 horizontal

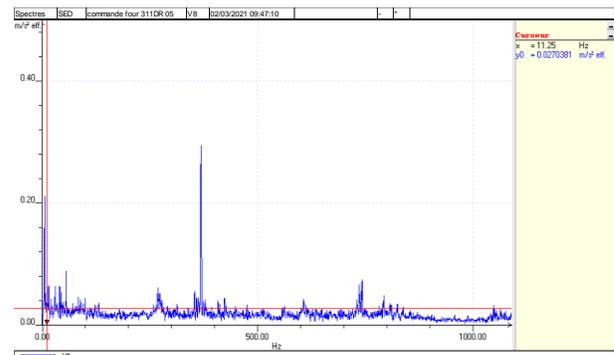


Figure IV-51 Spectre d'accélération P8 vertical

### ➤ L'analyse de réducteur :

Les spectres des points liés aux réducteur (de P3 à P8) représente de pic avec des faibles amplitude ces valeurs représente les vibrations normales du mouvant dites les amplitudes de référence.

### IV.4.5.3 Engrenage :

#### ➤ Spectre de point 9 :

# CHAPITRE IV : ÉTUDE D'UN CAS INDUSTRIELLE

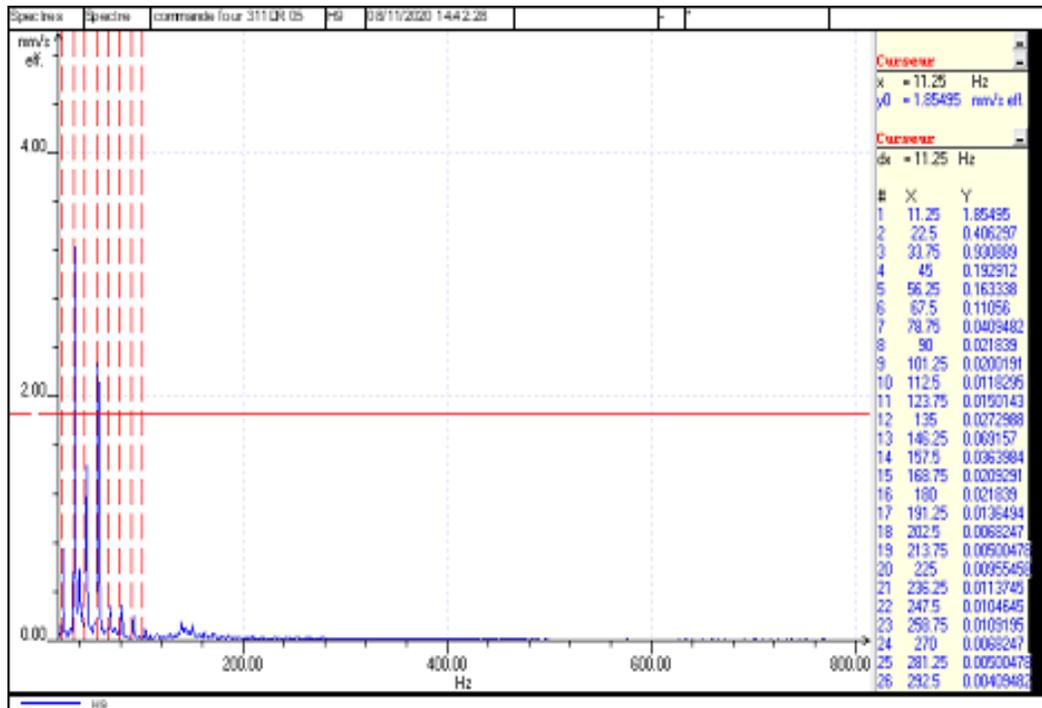


Figure IV-52 Spectre de vitesse P9 horizontal

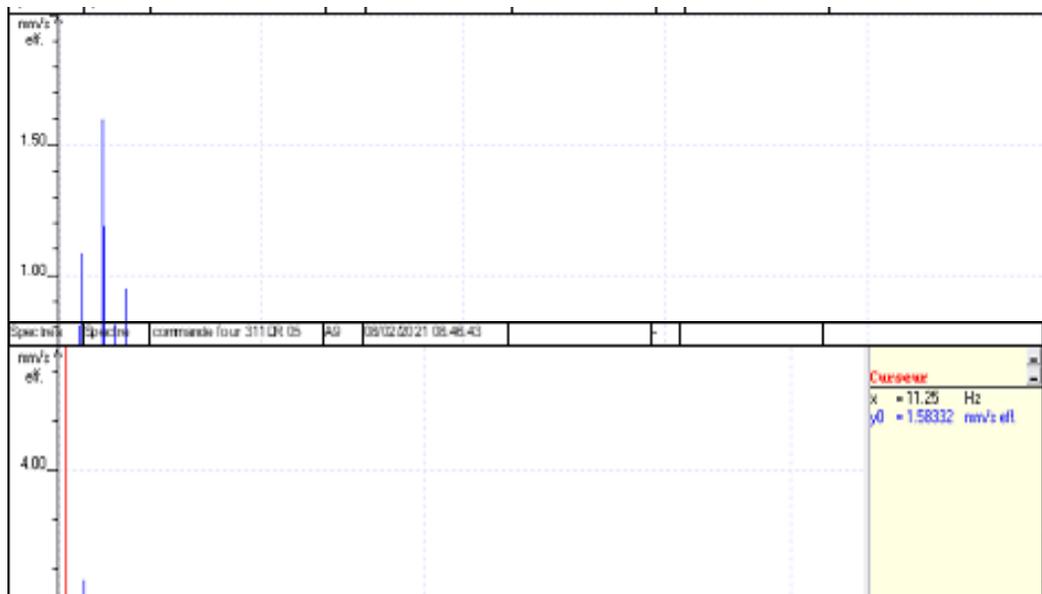


Figure IV-53 Spectre de vitesse P9 vertical

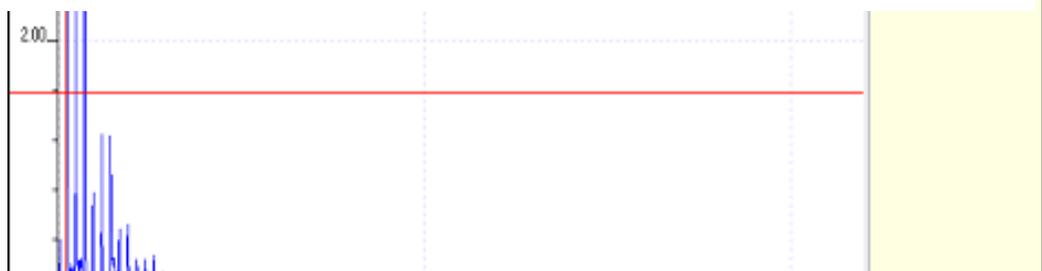


Figure IV-54 Spectre de vitesse P9 axial

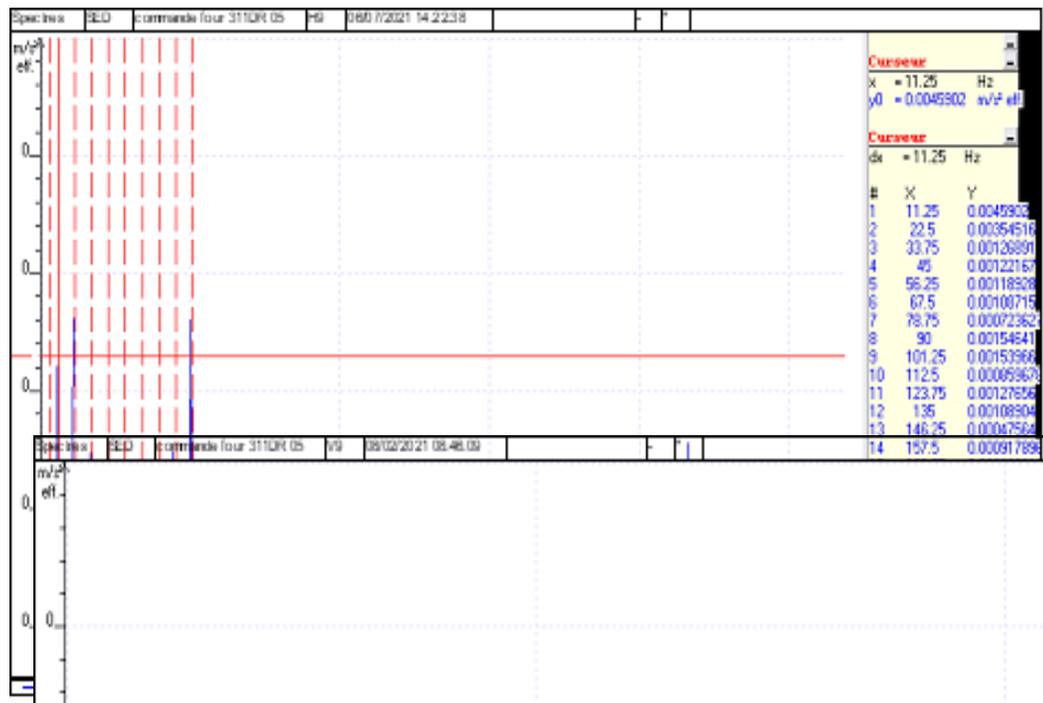


Figure IV-55 Spectre d'accélération P9 horizontal

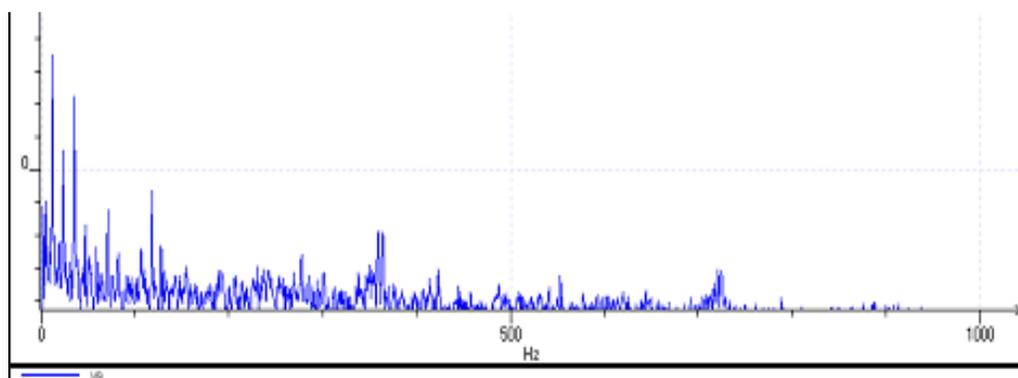


Figure IV-56 Spectre d'accélération P9 vertical

➤ Spectre de point 10 :

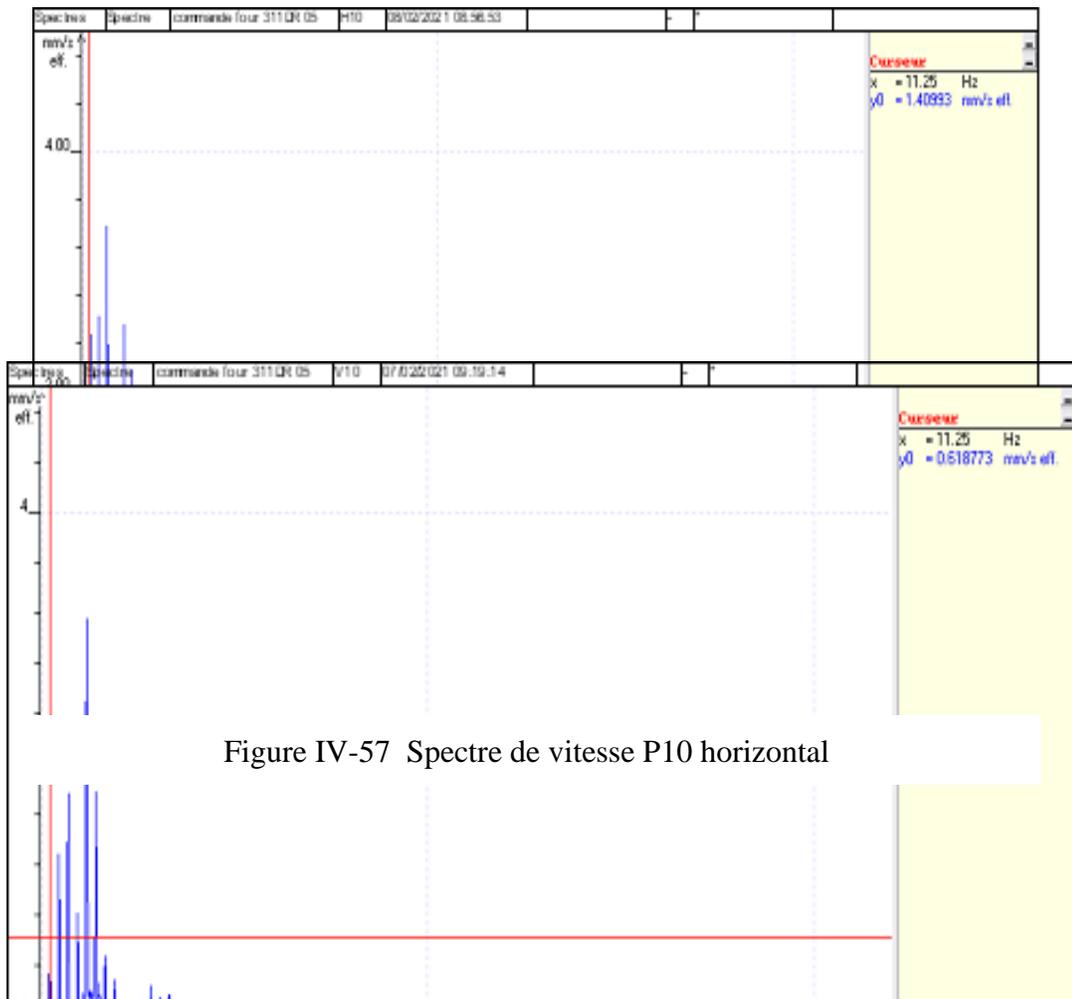


Figure IV-57 Spectre de vitesse P10 horizontal

Figure IV-58 Spectre de vitesse P10 vertical



Figure IV-59 Spectre de vitesse P10 axial

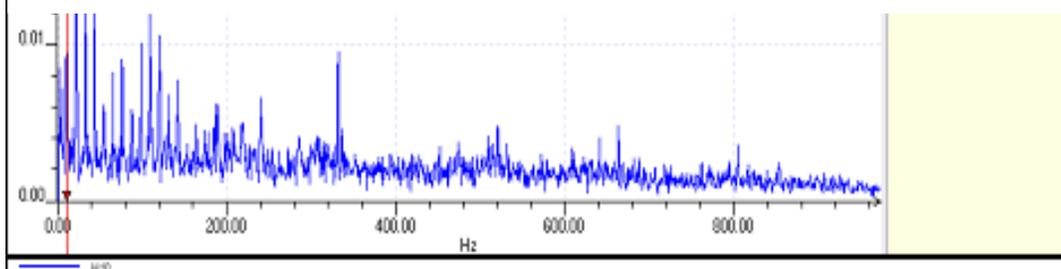


Figure IV-60 Spectre d'accélération P10 horizontal

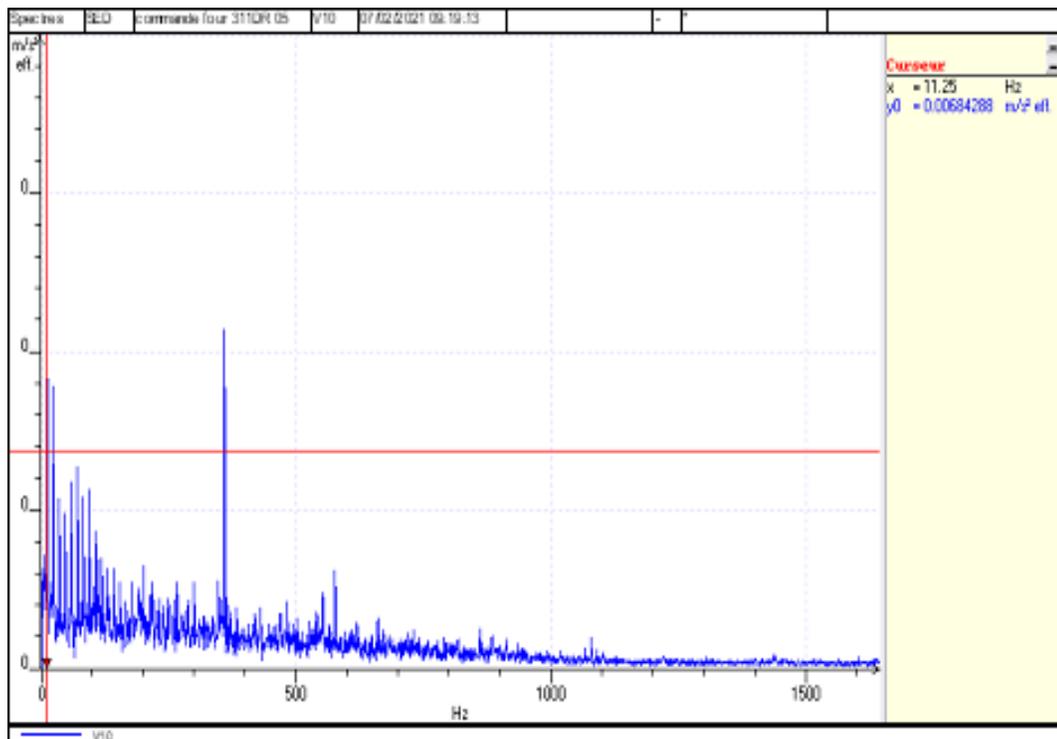


Figure IV-61 Spectre d'accélération P10 vertical



'analyse d'engrenage :

D'après l'analyse des spectres des points 9 et 10 on remarque la présence d'un pic dans le spectre de vitesse dans la base fréquence [0, 200 Hz] avec une amplitude de 3mm /s.

➤ **Diagnostic**

D'après la théorie les pics dans la base fréquence sont dues aux défauts dans les organes mécaniques suivant : engrenage alignement ou serrage mais entre les points P9 et P10 ont mentionné l'absence de serrage et d'alignement donc le défaut se trouve automatiquement dans l'engrenage.

Ce Défaut peut être due à : défaut de montage, défaut exploitation et défaut de fabrication.

➤ **Recommandation :**

Après le diagnostic on doit trouver des solutions provisoires pour diminuer la vibration et assurer la production dans l'attente de faire changer la pièce.

Pour cela ont proposé de diminuer la vitesse de rotation de four, augmenter le débit et la viscosité de lubrification et augmenter taux de surveillance.

### **IV.5 Conclusion :**

Pour que la maintenance prédictive soit efficace, il faut des mesures précises et fiables de l'état des machines.

L'analyse vibratoire est un moyen utilisé pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement.

L'analyse des caractéristiques de vibration de la machine permet d'identifier les défauts et leurs causes. On peut ensuite déduire les solutions.

---

## Conclusion générale

La production industrielle évolue dans un contexte de plus en plus sévère, surtout en ce qui concerne la qualité, la sécurité et les nuisances. Par conséquent, l'outil de production doit faire l'objet d'une maintenance efficace. De plus, dans le contexte concurrentiel actuel économique, la réduction des coûts de production est devenue la clé du développement et de la survie de l'entreprise. Hormis, la réduction des coûts de maintenance et l'augmentation des taux de disponibilité des équipements constituent un enjeu vital pour toute entreprise. Des pannes catastrophiques inattendues entraînent à la fois des pertes de production et des factures de réparations très élevées, compte tenu des erreurs humaines inévitables lors des arrêts et remises en service. C'est pourquoi les pannes et les incidents des systèmes de production sont devenus l'un des fléaux majeurs de l'industrie. L'indisponibilité des machines vient amputer lourdement la capacité de production et donc accroître le prix de revient.

L'expérience que nous avons passé en traitant cette problématique, nous a permis à :

- ✓ D'exploiter les connaissances acquises durant notre formation théorique et d'apprendre les connaissances du milieu industriel.
- ✓ La connaissance des dysfonctionnements des machines tournantes et leurs évolutions dans le temps.
- ✓ D'apprendre une méthode de surveillance et diagnostic de ces défauts sur le bas de l'analyse vibratoire et la mise en marche des appareils de diagnostic.

L'analyse des spectres et leur suivi dans le temps permettent d'optimiser le temps de fonctionnement de chaque organe de la machine et de déceler les défauts et leur évolution.

Ce type de maintenance devra s'étendre à la plupart des entreprises de production et d'exploitation. Les exemples de succès sont nombreux et l'intérêt de pouvoir détecter rapidement les anomalies, sans même devoir ausculter l'équipement. Ainsi, que de pouvoir prévenir la panne et en prévoir la réparation en temps opportun, tout en tenant compte des impératifs de production, de la pièce de rechange et de l'équipage d'intervention.

## Bibliographie

- [1] *Terminologie de la maintenance.*, Norme NF EN 13306 : AFNOR, NF-EN-13306-X-60-319, 2001.
- [2] Heng, J., *Pratique de la Maintenance préventive* », édition" Dunod., (2002).
- [3] Lyonnet, P., « *Optimisation d'une politique de maintenance* », Edition Tech. & Doc.
- [4] ENIET-CAMEROUN, (*cour de stratégie de maintenance*) *Conforme au programme du Niveau 1 ; 2 et 3.*
- [5] Vernier, François Monchy Jean-Pierre, *MAINTENANCE Méthodes et organisations.*, 3ème édition, l'USINE NOUVELLE DUNOD..
- [6] Belmadh, D. Khaled, , « *Technic of maintenance* » ,, 2 ème édition, Université Pierre and Marie Curie- Paris VI, 2006.
- [7] Rachid, Dr Nourddine, *chapitre 01 maintenance et diagnostic*, univ-oran2 département de maintenance en électromécanique.
- [8] –D.feliachi, S. bensaada, *la maintenance industrielle*, office des publication.
- [9] DUCHEMIN, Gilles, « *Maintenance des machines et des moteurs* » ,, *Technique de l'ingénieur*BM 4 188, 10 janvier 2006..
- [10] Auberville, Jean-Marie, « *Maintenance industrielle* », édition ELLIPSES., 2004.
- [11] Maaroufi, G, . *Stratégies optimales de maintenance de systèmes multi-composants sujets à des défaillances aléatoires*, Lorraine: (Doctoral dissertation, Université de), (2013)..
- [12] Guiras, Z, .. *Contribution à l'optimisation des politiques de maintenance et l'analyse de risque dans la planification des opérations d'assemblage-désassemblage à deux niveaux*, Lorraine: (Doctoral dissertation, Université de), (2019).
- [13] H. DJABRE, *Théorie de vibrations et ondes mécaniques*, Edition (o p u) benne aknonne algie, 1993.
- [14] T. BEECHERRAWY, , *Vibration – Ondes et optique – (Vibrations mécaniques et électromagnétiques)*, Volume1 ., Paris : Edition Lavoisier, 2008.
- [15] F.M, *Les vibrations en régime transitoire*, ,, Paris: Edition Bordas, 1981.

- [16] formation vibration, mobius institute, 2017.
- [17] adel, boudiaf, «contribution au diagnostic des defauts dans les machines tournant par analyse multiresolution,» universite 08 mai 1945 faculte des sciences et de la technologie, guelma, 2016.
- [18] fouad, landolsi, *cour techniques de surveillance*.
- [19] A, hachemi mohamed -hamza cherif -guenifed, «application de l'ods à l'analyse des problèmes de vibration de machines tournantes,» departement de génie mécanique, telemcane, 2012.
- [20] MOREL, Jacques, Surveillance vibratoire et maintenance prédictive, technique de l'ingenieur, 10 janvier 2005.
- [21] AUGÉIX, David, Analyse vibratoire des machines tournantes, technique de l'ingenieur, 10 janvier 2001.
- [22] J, MOREL, Traité Mesures et Contrôle Surveillance vibratoire et maintenance prédictive..., Techniques de l'Ingénieur, 1999.
- [23] bensana, T., «diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une turbine à vapeur,» universite badji mokhtar, annaba, 2008.
- [24] H.Cherif, «détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'anlyse par FFT et ondelettes,» university mohamed khider, biskra, 2014.