

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : science De l'ingénierat  
Département : électromécanique  
Domaine : science et technologie  
Filière : Electromécanique  
Spécialité : maintenance industriel

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

### Thème:

Surveillance et diagnostic des machines tournantes par analyse vibratoire.

Présenté par : *Boughareb Khaled*

Encadrant : BENLALLI Yacine      MCB      UBMA

### Jury de Soutenance :

BOURAS Slimane	Professeur	UBMA	Président
BENLALLI Yacine	MCB	UBMA	Encadrant
DJEMAI Mounira	MCB	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

## ***Dédicace***

***A tout unificateur dans le monde ,A mes chers ;***

***parents que je dois toute ma gratitude ;***

***A mes frères et A mes soeurs ;***

***A la ma famille Boughareb ;***

## ***Remerciement***

***Le grand remerciement revient à Dieu qui m'a donné la force et le courage à réaliser et terminer ce modeste travail, Je tiens à remercier vivement mon encadreur Dr. Yacine BENLALI pour m'avoir encadré encouragé et conseillé durant la période du mémoire, Je remercie tout le personnel Enseignant du département électromécaniques, Par la même occasion, je remercie vivement tous mes amie sans exception, ainsi que tous les personnes qui de près ou de loi, ont contribué à la réalisation de ce travail.***

## Résumé

La diagnostique des défauts mécaniques de la machine tournante par l'analyse des vibrations a considérablement évolué ces dernières années grâce aux techniques avancées de traitement du signal. Ces techniques permettent maintenant de détecter à un stade précoce l'existence d'un défaut, d'identifier sa nature, de déterminer sa gravité et de suivre son évolution. Ce travail s'inscrit dans la thématique de la surveillance et diagnostic des défauts mécaniques et plus particulièrement des défauts de roulements.

L'étude que nous allons faire se base sur l'application d'une technique de traitement de signal qui est une solution efficace pour le diagnostic des défauts de roulements, cette méthode est l'analyse spectrale, qui s'appuie sur la FFT ( Fast Fourier transformer), et on étudier l'influence des paramètres suscités sur la sensibilité des indicateurs scalaires, qui sont des outils d'aide au diagnostic des défauts simulés sur les roulements,

**Mots clés :** diagnostic ,Vibration, analyse spectrale, roulement, , transformé de Fourier, spectre, défaut.

## Abstract

diagnostics thy defects mechanical of rotating machines by vibration analysis has evolved considerably in recent years thanks to advanced signal processing techniques. These techniques now used to detect at an early stage there is a fault, identify its nature, determine its severity and monitor its evolution. This work is part of the theme of monitoring and diagnostics of mechanical defects and particularly bearing defects.

The study we're going to do is based on the application of a signal processing technique is an effective solution for the diagnosis of bearing fault, this method is spectral analysis, which is based on the FFT ( Fast Fourier transform). The aim of this work is to study the influence of above mentioned parameters on the sensitivity of the scalar indicators , which are tools to aid in the implementation of the diagnosis thy defects of bearing

**Keywords:** diagnostics, Vibration ,analysis spectrum, bearing, Fourier transforms, defects. spectrum

### ملخص

تطور تشخيص العيوب الميكانيكية لآلة الدوران، من خلال تحليل الاهتزاز بشكل كبير في السنوات الأخيرة، بفضل تقنيات معالجة الإشارات المتقدمة. تتيح هذه التقنيات الآن اكتشاف وجود عيب في مرحلة مبكرة وتحديد طبيعته، وتحديد شدته ومتابعة تطوره. هذا العمل جزء من موضوع مراقبة وتشخيص العيوب الميكانيكية وخاصةً عيوب المدحرجات. تعتمد الدراسة التي سنقوم بها، على تطبيق تقنية معالجة الإشارات التي تعد حلاً فعالاً لتشخيص عيوب المدحرجات، وهذه الطريقة هي التحليل الطيفي، والذي يعتمد على (التحويل الفوري السريع)، و دراسة كذلك تأثير المتغيرات المدروسة على حساسية المؤشرات السلمية، والتي تعتبر أدوات للمساعدة في تشخيص أخطاء المحاكاة على المدحرجات.

**الكلمات المفتاحية:** تشخيص، اهتزاز، التحويل الفوري السريع، التحليل الطيفي، المدحرجات طيف، خلل.

## *Liste des tableaux*

### *Chapitre II*

<b>Tableau (II-1) : les quatre niveaux de maintenance.....</b>	<b>(26)</b>
--	-------------

## *Liste des figures*

### *Chapitre I*

<b>Figure (I-1) :</b> Origine du bruit .....	(4)
<b>Figure (I-2) :</b> Vibrations périodiques .....	(5)
<b>Figure (I-3) :</b> Vibrations d'un système "masse ressort" .....	(5)
<b>Figure (I-4) :</b> Vibration sinusoïdale .....	(6)
<b>Figure (I-5) :</b> Logarithme des vibrations.....	(7)
<b>Figure (I-6) :</b> l'amplitude, de la période, de la fréquence .....	(8)
<b>Figure (I-7) :</b> les différents types des signaux vibratoires.....	(9)
<b>Figure (I-8) :</b> la chaîne de mesure analogique.....	(11)
<b>Figure (I-9) :</b> la chaîne de mesure numérique .....	(12)

### *Chapitre II*

<b>Figure (II-1) :</b> les différentes étapes de processus de diagnostic .....	(18)
<b>Figure (II-2) :</b> Principe de surveillance avec modèle .....	(21)
<b>Figure (II-3) :</b> Principe de la surveillance par estimation para métrique .....	(22)
<b>Figure (II-4) :</b> Principe de la surveillance par observateurs .....	(22)
<b>Figure (II-5) :</b> types de maintenance .....	(26)
<b>Figure (II-6) :</b> Organisation de la maintenance conditionnelle .....	(27)
<b>Figure (II-7) :</b> Défaut de balourd .....	(29)

<b>Figure ( II-8) : Défauts désalignement</b> .....	(29)
<b>Figure (II-9) : Eléments de roulement</b> .....	(30)
<b>Figure (II-10) : Ecaillage sur la bague intérieure</b> .....	(32)
<b>Figure (II-11):Ecaillage sur la bague extérieure</b> .....	(33)
<b>Figure (II-12) : Ecaillage sur l'élément roulant</b> .....	(33)

## *Sommaire*

Introduction générale.....	(1)
----------------------------	-----

### *Chapitre I:Généralités sur les vibrations*

Introduction.....	(3)
Définition d'une vibration.....	(3)
Approche intuitive.....	(3)
Perception subjective des phénomènes .....	(3)
I.2.1.2 Le. bruit.....	(3)
I.2.1.3.Origine du bruit rayonné par une machine .....	(4)
Les vibrations.....	(4)
Vibrations d une machine.....	(4)
Origine des phénomènes .....	(4)
Définition théorique d'une vibration.....	(4)
Vibrations périodiques.....	(4)
Vibrations aléatoires.....	(5)
Vibrations d'un système "masse-ressort" .....	(5)
Vibration sinusoïdale.....	(6)
Description de la vibration.....	(6)
Logarithme .....	(6)



Niveau en décibel – DB5 .....	(7)
Niveau d'accélération .....	(7)
I.5.. Niveau de déplacement .....	(7)
Amplitude et fréquence .....	(8)
Intensité et fréquence .....	(8)
Définition de l'amplitude, de la période, de la fréquence .....	(8)
Amplitude et période .....	(8)
Type des signaux .....	(8)
Déterministe .....	(8)
Aléatoire .....	(9)
Caractéristiques d'un signal vibratoire .....	(9)
Chaîne de mesure .....	(10)
Capteurs des vibrations .....	(12)
Types des capteurs .....	(13)
Accéléromètre piézo-électrique .....	(13)
Capteurs à courant de Foucault .....	(13)
Le conditionnement du signal .....	(13)
I .10.Les indicateurs scalaires.....	(14)
I .10.1. Le kurtosis.....	(14)
I .10.2. La valeur crête : $V_c$ .....	(14)
I .10.3. La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square).....	(14)
I .10.4. Facteur de crête .....	(15)
I.11 .Conclusion .....	(15)

## *Chapitre II :Diagnostic et maintenances industriel*

II 1. Introduction .....	(16)
Définitions relatives au diagnostic .....	(16)
Le diagnostic .....	(16)
La détection .....	(17)
Le défaut... ..	(17)
Le défaillance.....	(17)
La dégradation... ..	(18)
II.2.6 La panne .....	(18)
Les différentes étapes de diagnostic .....	(18)
Etape d'acquisition de données... ..	(19)
Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts.....	(19)
Etape de d'élaboration d'indicateurs de défauts.....	(19)
Etape de localisation... ..	(19)
II.3.5 .Etape de prise de décision.....	(19)
Techniques et méthodes de diagnostic. ....	(20)
Classification des méthodes de diagnostic.....	(20)
.Méthodes de diagnostic avec modèles.....	(20)
Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle.....	(20)
Les méthodes de diagnostic par modélisation physique... ..	(20)
Méthodes de diagnostic sans modèles... ..	(22)
II.4.2.1.La reconnaissance des formes... ..	(23)
Quelques techniques de diagnostic par approche signal .....	(23)
Analyse temporelle .....	(23)
Analyse fréquentielle .....	(24)

Maintenance.....	(24)
But de la maintenance.....	(24)
Objectifs financiers.....	(24)
Objectifs opérationnels.....	(24)
Types de la maintenance.....	(24)
Maintenance préventive.....	(24)
Maintenance systématique.....	(24)
Maintenance conditionnelle.....	(25)
Maintenance corrective.....	(26)
Niveaux de maintenance.....	(26)
Organisation de la maintenance conditionnelle.....	(27)
5. Classement des machines.....	(27)
Vitales.....	(28)
Importante.....	(28)
Secondaire.....	(28)
II.6.6. La cinématique.....	(28)
Défauts des machines tournantes.....	(28)
Balourd.....	(28)
Désalignement.....	(29)
Mauvais serrage mécanique.....	(29)
Les roulements.....	(29)
Eléments de roulements.....	(30)
défauts des roulements :.....	(32)
Caractéristiques du signal engendré par le roulement endommagé.....	(32)

Défaut de la bague interne .....(32)

Défaut sur la bague externe .....(32)

## ***Introduction générale***

L'activité de maintenance des installations industrielles fait appel depuis une vingtaine d'années à des techniques de diagnostic plus en plus sophistiquées. Plusieurs techniques de détection de défauts sont aujourd'hui à la disposition des ingénieurs de maintenance.

Pour la détection des défauts d'origine électrique ou mécanique, la détection ultrasonore et l'analyse des vibrations mécaniques.

Parmi les outils de la maintenance conditionnelle, l'analyse des vibrations est celui qui connaît aujourd'hui un des développements les plus importants du fait de l'évolution des techniques dans les domaines de l'informatique et du traitement du signal. La finalité de ce type de surveillance est destinée à assurer la sécurité de l'installation en évitant des dégradations importantes par le déclenchement d'alarmes, lorsque le niveau des vibrations atteint des valeurs jugées excessives pour le bon fonctionnement ou l'intégrité de cette dernière. Il existe différentes techniques d'investigations utilisées dans le domaine du suivi vibratoire des machines tournantes.

L'analyse vibratoire est couramment utilisée pour le diagnostic des machines tournantes et fait appel à des outils de traitement du signal qui ont vu leur champ d'application s'élargir d'année en année. Il existe plusieurs techniques pour mettre en œuvre les outils classiques de traitement du signal, tels que la transformée de Fourier (pour le tracé et l'analyse du spectre), ainsi que le calcul d'indicateurs scalaires tels que, le facteur de crête et kurtosis, valeur efficace.

L'un des problèmes les plus importants parmi ceux que pose la maintenance par analyse vibratoire est celui du diagnostic des roulements (les pièces les plus sensibles dans une machine tournante). On retrouve ces composants mécaniques dans de nombreuses machines tournantes compte tenu de leur simplicité et leur capacité à éviter les frottements mécaniques. La détection de pannes de ces roulements se fait en analysant les vibrations enregistrées avec des accéléromètres mis en place pour le diagnostic.

Ce travail a pour but d'appliquer le traitement de signal dans la maintenance industrielle, en faisant un diagnostic pour la détection et la caractérisation des défauts qui peuvent affecter les différents éléments de roulements par la méthode d'analyse spectrale ont appliqué les indicateur scalaire (Kurtosis, Facteur de crête, et Valeur efficace) sur les signaux sains et défaillants .

Ce mémoire est organisé en trois chapitres répartis comme suit :

- **Le chapitre I :**

Est introduit à étude théorique sur l'analyse vibratoires, les différentes méthodes et technique

utilisée et celle toujours en voie de développement pour l'analyse vibratoire.

- **Dans Le chapitre II:**

Nous présenterons le diagnostic et maintenance dans industriel et les différentes méthodes utilisées pour la détection des défauts qui existent couramment dans l'industrie (traitement signal) et on présenter les défauts de roulement et les fréquences des bague externe ,interne ,bille.

Ce mémoire a pour but d'appliquer le traitement de signal dans la maintenance industrielle, en faisant un diagnostic pour la détection et la caractérisation des défauts qui peuvent affecter les différents éléments.

### *1. Introduction:*

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et 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 en rien 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, elle doit 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 préventive 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 **systematique** selon des calendriers prédéfinis. Elles permettaient d'anticiper les pannes, mais au prix d'un alourdissement importants des coûts de maintenance.

## 2. Définition de la maintenance :

### 2.1. AFNOR X60-01 (décembre 1994) : (association française de normalisation) :

La maintenance est « l'ensemble des activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise ,ces activités sont une combinaison d'activités techniques , administratives et management ».

### 2.2. CEN projet WI 319-003 (1997) : (comité européen de normalisation)

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

La fonction requise est ainsi définie : « fonction ou ensemble de fonction d'un bien considérées comme nécessaire pour fournir un service donné ».

## 3. Les différentes formes de maintenance :

Il existe aujourd'hui quelques méthodes de maintenance, dont le choix s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance à installer en accord avec la direction de l'entreprise.

Ce choix, dépend des objectifs de la direction, des moyens de l'entreprise humains et matériels, de la nature des équipements à entretenir et leurs caractéristiques, le rapport entre le coût de maintenance et le coût d'éventuel incident.

### 3.1. La maintenance corrective :

Avant que l'AFNOR ne définisse (norme X60-010) la maintenance corrective comme « opération de maintenance effectuée après défaillance », le terme de maintenance subie, fortuite « pompier » réparatrice , palliatif (correspondant au dépannage ), curatif (réparation ) étaient utilisés , une ambiguïté subsiste aussi bien dans la définition de AFNOR que dans le projet CEN : la correction inclut-elle l'idée d'amélioration ?

Pour les actions palliatives, c'est non .il suffit de retrouver, même provisionnement, la fonction perdue .ce qui n'exclut pas une exploitation ultérieure des données relatives aux dépannages répétitifs pour des améliorations techniques ou organisationnelle.

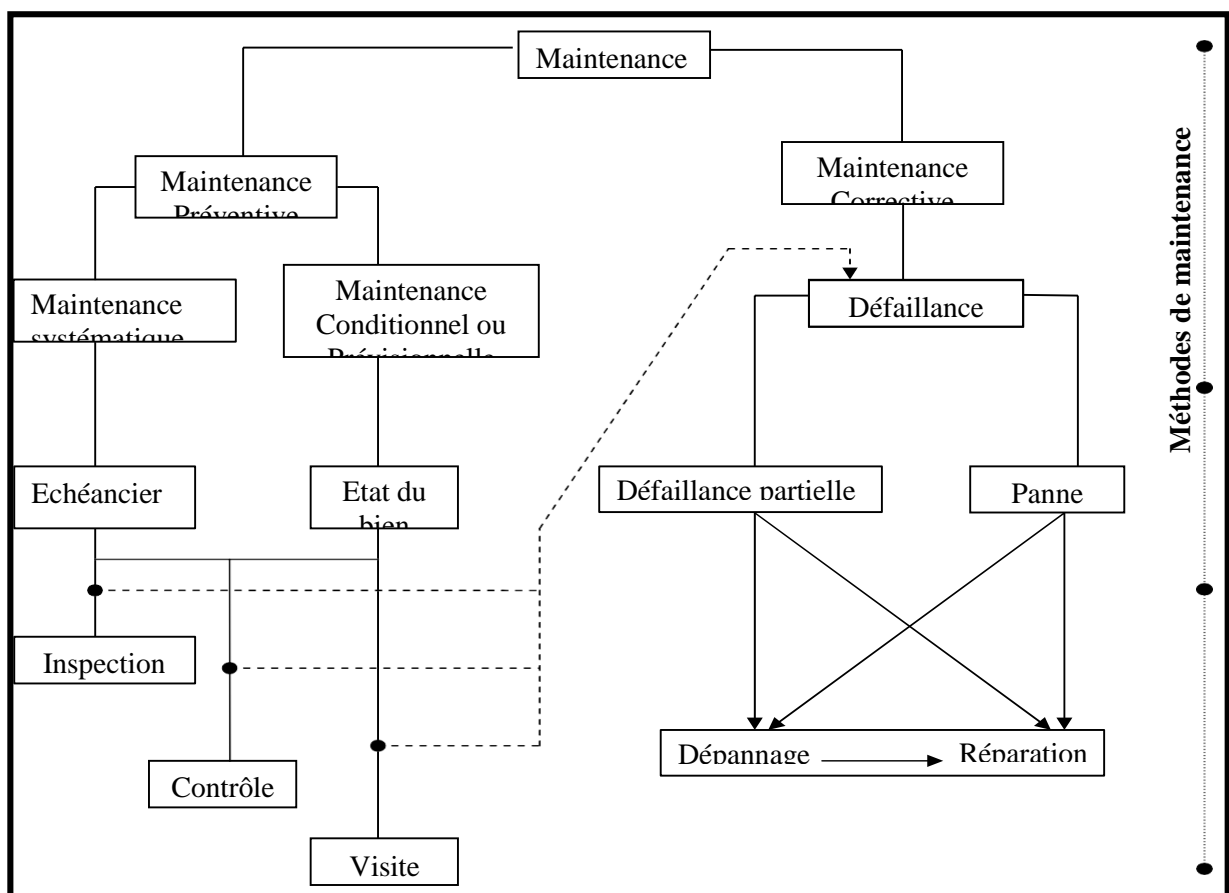
Mais pour les actions curatives, associées à l'idée de guérison, donc au diagnostic ?

C'est oui .dès lors que l'on a identifié la cause de la panne, on est en mesure de la prévenir, ou de la rendre moins pénalisante donc d'améliorer.

## La maintenance préventive :

Définition (AFNOR X60-010) : La norme définit la maintenance préventive ainsi : « maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu .les activités correspondantes son déclenchées selon l'échéancier établis à partir d'un nombre prédéterminé d'unité d'usage (maintenance systématique) et /ou de critère prédéterminé significatif de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle).

Le diagramme suivant synthétise selon la norme NF EN 13306 les méthodes de maintenance :



**Organigramme (1) : Les méthodes de maintenance**



## 2. Différents formes de la maintenance préventive :

### a) La maintenance préventive systématique :

Définition (AFNORX60-010) : « Activités déclanchées suivant un échéancier à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage » et aussi « les remplacements des pièces et de fluide ont lieu quel que soit leur état de dégradation, et ce de façon périodique ».

Cas d'application :

-Equipements soumis à une législation en vigueur (sécurité réglementée) : appareils de levage, extincteurs, réservoirs sous pression, convoyeurs, ascenseurs, monte charge,

-Equipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves : tous les matériels assurant le transport en commune des personnes avions trains etc.

-Equipements ayant un coût de défaillance élevé : éléments d'une chaîne de production automatisée, processus fonctionnant en continu (industries chimique ou métallurgiques).

- Equipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevées au cours de leur temps de service : consommation excessive d'énergie, éclairage par lampes usagées, allumage et carburation déréglés (moteur thermique).

### b) La maintenance préventive conditionnelle et prévisionnelle :

Définition (norme CEN) : « maintenance préventive consistant en une surveillance du fonctionnement du bien et de paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent »

La surveillance peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue.

La maintenance prévisionnelle : maintenance préventive exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien

## 3. Les fonctions essentielles de la maintenance :

D'une manière générale on distingue deux catégories de fonctions : les fonctions de base et les fonctions complémentaires

### a) Les fonctions de base :

1. Programmation des travaux.
2. Approvisionnement et distribution des moyens.
3. Exécution des travaux.
4. Collecte et gestion des informations sur les travaux.
5. Collecte et gestion des informations sur les pannes.

Ces fonctions vitales constituent un ensemble à organiser de manière à fonctionner correctement la détection de l'une de ces fonctions compromettra les prestations de maintenu

**b) Les fonctions complémentaires :**

1. amélioration des pièces et des installations.

2. amélioration de la planification et des standards.

Ces fonctions sont dites complémentaires parce qu'elles ne participent pas directement dans le cycle de base de maintenance .par contre leur prise en charge vise les renforcements de ce cycle ainsi que son amélioration continu.

**6. Rôle de la maintenance :**

La maintenance doit assurer la rentabilité des investissements matériels de l'entreprise, en maintenant le potentiel d'activités en tenant compte de la politique de maintenance définis par l'entreprise.

**Objectifs essentiels :**

- Réduire les durées d'immobilisations.
- Réduire les coûts des interventions.
- Elaboration d'un plan de Prévisions des interventions a l'immobilisation des équipements
- Réalisation d'opérations directement liées à la politique générale de l'entreprise fin de minimiser l'ordonnancement :
  - Des charges.
  - Des investissements.
  - Des stocks.

**7. Niveaux maintenance :**

La maintenance est caractérisée par une très grande variabilité des taches, en natures comme en durées. D'ou l'utilité de jeter les bases de son organisation à partir d'une mise en familles à cinq niveaux, suivant la norme AFNOR X 60 – 015.

<b>Niveau</b>	<b>Personnel D'intervention</b>	<b>Nature de L'intervention</b>	<b>Moyens requis</b>
1	Exploitant sur place	Réglage simple d'organes accessibles sans aucun démontage, ou échanges d'éléments accessibles en dans les consignes de toute sécurité conduite.	Outillage léger défini dans les consignes de conduite
2	Technicien habilité (dépanneur) sur place	Dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou opérations mineures de maintenance préventive	Outillage standard et rechanges situés à proximité
3	Technicien spécialisé, sur place ou en atelier de maintenance	Identification et diagnostics de pannes, réparations par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essai, de contrôle.
4	Equipe encadrée par un technicien spécialisé, en atelier central	Travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Révisions	Outillage général et spécialisé
5	Equipe complète polyvalente, en atelier central	Travaux de rénovation, de reconstruction, réparations importantes confiées à un atelier central souvent externalités	Moyens proches de ceux de la fabrication par le Constructeur

**Tableau (1): Les cinq niveaux de maintenance**

## 8. Conclusion:

La maintenance acquiert une importance croissante et devient une fonction stratégique dans le management des entreprises.

# ***Chapitre II:***

# ***Diagnostic et maintenance industrielle***

### Introduction

Le diagnostic est une composante principale du module de supervision. Il consiste à déterminer chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve. Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'information prévenants d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

Le monde industriel et le monde des transports disposent de machine et d'installation de plus en plus performantes et complexes. Les exigences de haute sécurité, la réduction des couts d'exploitation et la maitrise de la disponibilité des équipements donnent à la maintenance des systèmes, un rôle prépondérant. Elle doit permettre de n'intervenir qu'en présence d'éléments défectueux, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements.

Dans ce chapitre, nous introduisons l'approche de diagnostic et maintenance industriel, nous donnons les différents types de maintenance et présentons les causes de défaillances. Un rappel sur les défauts des machines tournantes est également donné.

### Définitions relatives au diagnostic

#### Diagnostic

De nombreuses définitions sont proposées pour le terme de diagnostic, celle du dictionnaire robert est rigoureusement étymologique : « action de déterminer une maladie d'après ses symptômes ». L'origine de ce mot provient de deux mots grecs, «dia » qui signifie « par » et « gnosie » qui signifie « connaissance ».

Dans l'industrie, le diagnostic est défini par l'ensemble d'actions visant à évaluer un procédé (système) et identifier la cause probable des défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test de son fonctionnement.

Le diagnostic est en principe défini comme un processus à trois phases :

- détection du mode de fonctionnement.
- qualification du mode de fonctionnement.
- décision à partir de la reconnaissance du mode de fonctionnement.

La mission pour laquelle le système a été conçu, peut être totalement remplie, partiellement remplie ou non remplie, cela dépend du mode de fonctionnement, un système est dit diagnosticable s'il est susceptible d'être soumis à un diagnostic, il doit alors être muni

d'organes d'observation (capteurs) et d'un système d'analyse pour étudier les informations fournies. La diagnosticabilité sera l'aptitude d'un système à être diagnostiqué. [10]

Le diagnostic permet de déterminer le type, la taille, l'endroit et l'instant de l'apparition de du défaut. L'opération de diagnostic incluse la localisation et l'identification d'un défaut, Deux tâches essentielles en diagnostic :

- ❖ **la localisation** : permet de déterminer les ou les éléments défectueux.
- ❖ **l'identification** : estime les caractéristiques statiques et dynamiques de défaut : l'instant d'apparition de la panne, sa durée et son importance. [11]

### La détection

Pour détecter les défaillances d'un système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales.

Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à Considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale. [12]

#### Défaut

Un défaut est une anomalie de fonctionnement d'un système physique. On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique. Cet écart est idéalement nul en absence de défauts. Les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs ou au niveau du système lui-même.

#### Défaillance

Événement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement ses fonctions. Il est clair qu'une défaillance implique l'apparition d'un défaut puisqu'il existe un écart entre la caractéristique mesurée et la caractéristique théorique, Par contre, un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance puisque le dispositif peut très bien continuer à assurer sa mission principale. [10]

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonction requise avec les performances définies dans les spécifications techniques, on peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité par :

- ❖ Défaillance absorbable : pouvant être ignorée dans un premier temps.
- ❖ Défaillance significative : nécessite un processus de traitement.
- ❖ Défaillance critique : nécessite une intervention d'urgence.

### Dégradation

Une dégradation représente une perte de performance d'une des fonctions assurées par un équipement, Si les performances sont au-dessous du seuil défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, Il n'y a plus dégradation mais défaillance.[12]

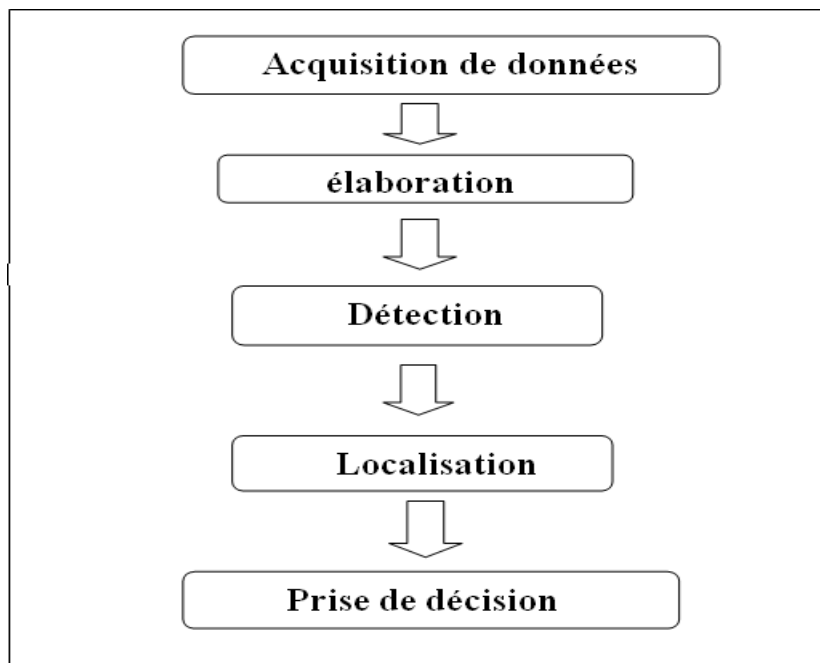
### Panne

C'est la conséquence d'une défaillance affectant le système, aboutissant à une interruption permanente de sa capacité à remplir une fonction requise et pouvant provoquer son arrêt complet .C'est la cause de l'apparition de symptômes. Deux types de pannes peuvent être distingués :

- ❖ Les pannes permanentes : une fois la panne est produite, elle nécessite une action de réparation.
- ❖ Les pannes intermittentes : le système peut retrouver son fonctionnement normal après l'occurrence de la panne. Une panne intermittente est généralement le résultat d'une dégradation partielle et progressive d'un composant du système, pouvant aboutir à une panne permanente .[11]

### Les différentes étapes de diagnostic

Effectuer un diagnostic nécessite un certain nombre d'étapes qui s'enchaînent :



**Figure (II-1) :** les différentes étapes de processus de diagnostic.

### **Etape d'acquisition de données**

La procédure de diagnostic nécessite une disponibilité d'informations sur le fonctionnement du système à surveiller. Ces informations sont recueillies lors d'une phase d'acquisition de données suivie d'une validation.

Cette étape implique l'utilisation de capteurs appropriés permettant de mesurer les différentes variables du processus.

### **Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts**

A partir des mesures réalisées et des observations issues des opérateurs en charge de l'installation, il s'agit de construire des indicateurs permettant de mettre en évidence les éventuels défauts pouvant apparaître au sein du système. Dans le domaine du diagnostic, les indicateurs de défauts sont couramment dénommés les résidus ou symptômes.

### **Etape de détection**

Cette étape doit permettre de décider si le système se trouve ou non dans un état de fonctionnement normal. Il ne suffit pas de tester la non nullité des résidus pour décider de l'apparition d'un défaut car, dans la pratique, les grandeurs mesurées sont toujours entachées de bruits et le système à surveiller est toujours soumis à des perturbations. Par conséquent, cette étape fait le plus souvent appel aux tests statistiques ou, de manière plus simple, est réalisée à l'aide d'un seuillage.

### **Etape de localisation**

Il s'agit à partir des résidus non nuls statistiquement, de localiser le défaut, c'est-à-dire de déterminer le ou les éléments défectueux. La procédure de localisation nécessite l'utilisation d'un ensemble (ou vecteur) de résidus, qui doivent avoir des propriétés permettant de caractériser de manière unique chaque défaut. Pour ce faire, deux méthodes peuvent être utilisées :

- la construction de résidus structurés.
- la construction des résidus directionnels.

### **Etape de prise de décision**

Il s'agit de décider de la marche à suivre afin de conserver les performances souhaitées, du système sous surveillance. Cette prise de décision doit permettre de générer, éventuellement sous le contrôle d'un opérateur humain, les actions correctrices nécessaires à un retour à la normale du fonctionnement de l'installation. En résumé, quelle que soit la méthode employée, la procédure de diagnostic comprend deux principales étapes, une étape de génération de résidus et une étape d'évaluation des résidus .[13]



### **Techniques et méthodes de diagnostic**

#### **Classification des méthodes de diagnostic**

Les méthodes de diagnostic se distinguent selon différents critères :

- la dynamique du procédé (discret, continu ou hybride).
- la complexité du procédé, l'implémentation du diagnostic en ligne et/ou hors ligne.
- la nature de l'information (qualitative et/ou quantitative).
- la profondeur de l'information (structurelle, fonctionnelle et/ou temporelle), sa distribution (centralisée, décentralisée ou distribuée) .[14]

L'existence d'un modèle formel ou mathématique de l'équipement détermine la méthode de surveillance utilisée. Le diagnostic avec modèle se compose essentiellement de deux techniques :

Technique basée sur une modélisation fonctionnelle et matérielle, et la technique basée sur une modélisation physique.

D'un autre cote, les méthodes qui ne se basent pas sur l'existence du modèle se divisent en trois catégories : méthodes utilisant des outils statistiques (méthodes de traitement de signal), et celles utilisant la reconnaissance des formes, et celles qui utilisent les systèmes experts.

#### **Méthodes de diagnostic avec modèles**

Les méthodes de diagnostic avec modèle ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par le modèle. Tout écart est synonyme de défaillance. Ces méthodes peuvent être séparées en deux :

Méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle, Les méthodes de diagnostic par modélisation physique. [15]

#### **Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle**

Le principe de ces méthodes consiste à établir à priori et de la manière la plus complète possible, les liens entre les causes initiales des défaillances et leurs effets mesurables. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) et les ADD.

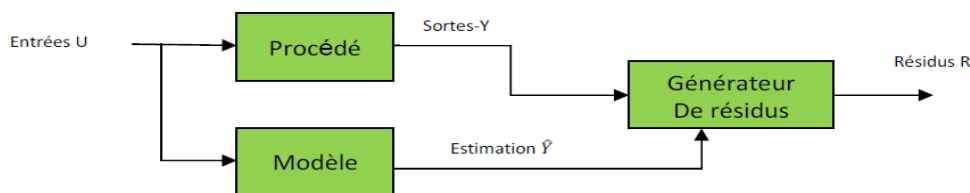
#### **Les méthodes de diagnostic par modélisation physique**

Les méthodes de surveillance avec modèle physique ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par le modèle [16]. Tout écart est alors synonyme d'une défaillance, les outils de-là

## Chapitre II: Diagnostic et maintenance industrielle

théorie de la décision sont ensuite utilisés pour déterminer si cet écart est dû à des aléas normaux, comme par exemple le bruit de mesure ou s'il traduit une défaillance du système.

Ces méthodes utilisent un modèle décrit par des relations mathématiques représentant les différentes relations physiques du procédé. Généralement, ces relations physiques découlent de l'application de lois fondamentales de divers domaines (physique, chimie, électricité, thermodynamique, mécanique, etc.). Ainsi, il est possible de créer une modélisation du système qui, en lui appliquant les entrées similaires au système réel (lois de commande, paramètres du procédé, etc.), fournit une réponse estimée du système. Il est alors possible de calculer l'écart entre la réponse réelle du système et sa réponse estimée, comme indiqué sur la **Figure (II-2)**. Cet écart est usuellement appelé résidu ( $R$ ).



**Figure (II-2) :** *Principe de surveillance avec modèle.*

En d'autres termes, on peut dire que les résidus sont les écarts entre les observations du système et le modèle mathématique. L'objectif de ce type d'approche est de réussir à faire la distinction entre les résidus causés par des défauts et les résidus causés par les autres sources de variation. Les résidus sont relativement élevés lorsqu'un défaut est présenté dans le procédé, et sont plutôt faibles en l'absence du défaut. Dans ce cas, la présence du défaut est détectée en appliquant des seuils adéquats sur les résidus.

Il existe plusieurs approches de génération de résidus, cependant trois sont vraiment essentielles [17], il s'agit de :

### a) Estimation des paramètres :

Les résidus sont la différence entre les paramètres nominaux du modèle et les paramètres estimés du modèle.[18]

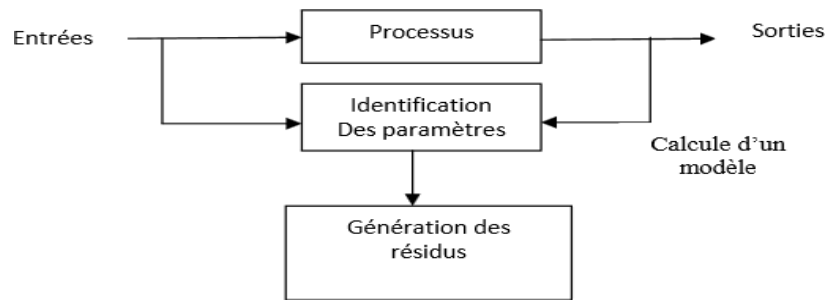


Figure (II-3) : Principe de la surveillance par estimation paramétrique

### b) Observateurs :

Les méthodes à base d'observateurs reconstruisent une estimation de la sortie à partir de toutes ou parties des sorties réelles du système. Les résidus sont alors classiquement la différence entre les sorties mesurées et les sorties estimées .[16]

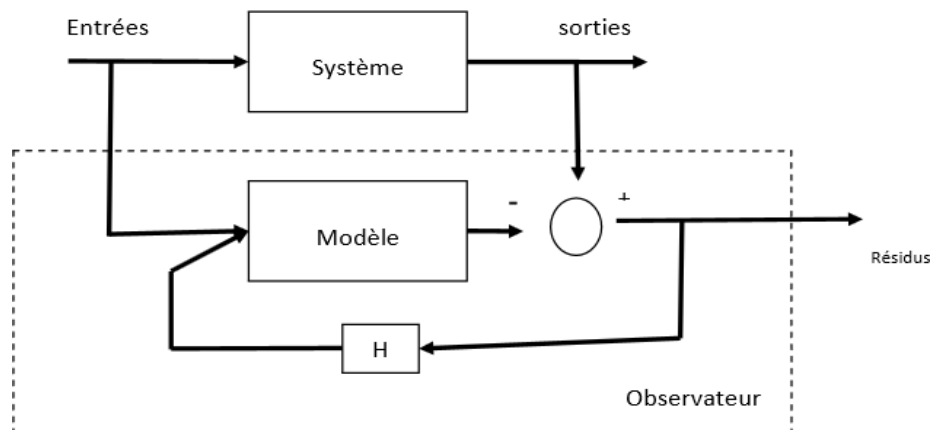


Figure (II-4) : Principe de la surveillance par observateurs.

### c) Equations de parité :

Cette méthode consiste à vérifier l'exactitude des équations mathématiques du modèle en se basant sur les sorties du procédé .[19]

#### Méthodes de diagnostic sans modèles

Nombreuses sont les applications industrielles dont le modèle est difficile, voire impossible à obtenir suite à une complexité accrue ou à de nombreuses reconfigurations intervenantes durant le processus de production. Pour ce type

## **Chapitre II: Diagnostic et maintenance industrielle**

---

d'applications industrielles, les seules méthodes de diagnostic opérationnelles sont celles sans modèle. Deux techniques existent dans ce cas : technique par les outils de traitement de signal (approche signal) et celle par reconnaissance de formes [20], et la méthode des systèmes experts. Pour des raisons de simplicité le diagnostic par approche signal est la technique la plus utilisée actuellement en diagnostic industriel [21], c'est pour cela on essaiera de le détailler un peu dans ce qui suit.

### **La reconnaissance des formes**

Ces méthodes reposent sur l'utilisation des algorithmes de classification des formes et des mesures (continues ou discrètes). Le fonctionnement d'un système de diagnostic par reconnaissance des formes se déroule en trois phases:

- Une phase d'analyse qui consiste à déterminer et à réduire l'espace de représentation des données et à définir l'espace de décision permettant de spécifier l'ensemble des classes possibles.
- Une phase de choix d'une méthode de décision permettant de définir une règle de décision qui a pour fonction de classer les nouvelles observations dans les différentes classes de l'ensemble d'apprentissage.
- Une phase d'exploitation qui détermine, en appliquant la règle de décision, le mode de fonctionnement du système en fonction de chaque nouvelle observation recueillie sur le processus.

Ils existent trois techniques de reconnaissance des formes. La première technique est une technique classique de discrimination basée sur les outils de la probabilité. Cette technique peut se montrer insuffisante car elle suppose une connaissance à priori de tous les états de fonctionnement et ne prend pas en compte l'évolution du système, [20]. Les deux autres techniques reposent sur la théorie de l'intelligence artificielle. Ces techniques ont l'avantage de ne pas se baser sur les connaissances à priori des états de fonctionnement mais plutôt sur une phase d'apprentissage. Ces deux techniques sont la reconnaissance des formes par la logique floue et la reconnaissance des formes par réseaux de neurones.

### Quelques techniques de diagnostic par approche signal

#### Analyse temporelle

L'analyse temporelle peut se faire soit à l'échelle du signal, c'est à dire en utilisant des indicateurs obtenus à partir d'une fenêtre glissante sur le signal, cela permet la détection et la localisation du défaut, soit à l'échelle d'un ensemble de signaux, les indicateurs ont une valeur scalaire calculée directement sur la totalité d'un signal. Cette analyse s'applique à des machines simples et consiste à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevée. Cet outil est aisé à employer lorsque le signal est simple (vibration de type sinusoïdal du balourd d'un rotor par exemple), mais devient inexploitable dans le cas de sollicitations multiples et de faible influence sur les défauts .[22]

#### Analyse fréquentiel

Le second type de représentation est la représentation du domaine de fréquence (fréquence, amplitude) appelé spectre ou représentation spectrale. Le signal complexe  $F(t)$  qui est difficile à interpréter, est décomposé en une série de composants élémentaires définis par leurs fréquences et leurs amplitudes.

## **Chapitre II: Diagnostic et maintenance industrielle**

---

L'outil mathématique utilisé dans ce cas est la décomposition du signal à l'aide de la transformée de Fourier. Si cette décomposition est possible, sa représentation dans le domaine temporel est encore inutilisable. Il consiste à représenter dans un diagramme appelé spectre la fréquence et l'amplitude. Avec ce type de représentation, chaque composante sinusoïdale est définie par son amplitude et sa fréquence. La représentation spectrale devient plus nette et réalisable. Le spectre final contient toutes les fréquences sinusoïdales (lignes discrètes) formant le signal de vibration d'origine. A noter que le spectre d'un choc périodique comporte un peigne de lignes à la fréquence de choc.

### **Maintenance :**

Le terme de maintenance désigne l'ensemble des techniques d'entretien et de la vérification qui sont en œuvre pour permettre une utilisation optimale des machines dans une installation industrielle

#### **But de la maintenance :**

Les objectifs de la maintenance peuvent être classés en deux types :

#### **Objectifs financiers :**

- Réduire au minimum les dépenses de maintenance.
- Assurer le service de maintenance dans les limites d'un budget.

#### **Objectifs opérationnels :**

- Maintenir l'équipement dans les meilleures conditions possibles.
- Assurer la disponibilité maximale de l'équipement à un prix minimum.
- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Entretien des installations avec le minimum d'économie et les remplacer à des périodes prédéterminées.
- Assurer un fonctionnement sûr et efficace à tout moment.

#### **Types de la maintenance :**

Nous distinguons plusieurs types de maintenance (**figure II.5**) :

#### **Maintenance préventive :**

Qui vise à diminuer la probabilité de défaillance d'un système. Pour cela elle s'appuie sur :

### **Maintenance systématique :**

Qui consiste à changer suivant un échéancier établi à l'avance des organes jugés Proches de l'usure. Elle est définie par les lois de la conception par le constructeur et remplie par l'expérience des agents de la maintenance. C'est la plus simple et la plus utilisée jusqu'à présent. Elle consiste donc en des arrêts réguliers de la machine, avec démontage, contrôle des jeux et remplacements systématiques d'organes .La date de l'arrêt est planifié par expérience.

Elle se base sur des données statistiques du dossier historique de l'unité d'intervention ou en fonction d'impératif de sécurité. L'inconvénient d'une telle maintenance est le risque démontage inutile de la machine occasionnant ainsi un manque à gagner certain. De plus, il est toujours délicat de redémarrer un équipement froide dans la quel des réglages parfois longs et complexes. Il se peut aussi qu'on ait des défaillances entre deux interventions systématiques provoquant ainsi des dégâts importants avec arrêt de la production.

### **Maintenance conditionnelle :**

Qui demande au préalable d'effectuer un diagnostic avant de remplacer l'organe en question. Elle s'appliqué particulièrement aux machines tournantes. Elle est basée sur l'analyse :

- Externe des machines (corrosion, ancrages, etc..... )
- Des paramètres de procès (température, pression débit..... )
- Des huiles de lubrification et étanchéité.
- Des températures d'organes des machines
- Des vibrations et des bruits au niveau des organes.

La maintenance conditionnelle permet donc d'éviter les inconvénients de la maintenance systématique. Par le fait qu'elle permet de déterminer quel organe défaillant devra être remplacé et la date à laquelle s'impose l'intervention en se basant uniquement sur les analyses en temps réel de la machine et non sur des données statistiques. Bien évidemment, pour faire de telles prédictions, il est nécessaire d'accéder à une bonne compréhension du rôle de la machine dans les procès et de son fonctionnement interne, car il n'est pas possible de prédire l'avenir d'un équipement sans connaître son état de santé au temps présent.

### **Maintenance corrective :**

Qui vise à intervenir à la suite de pannes. Cela ne veut pas dire que toutes ces pannes n'ont

## Chapitre II: Diagnostic et maintenance industrielle

---

pas été prévisibles. Ce type de maintenance sera facilité par une bonne maintenabilité (aptitudes à maintenir ou à rétablir un dispositif, dans un état, lui permettant d'accomplir sa fonction). Il pourra permettre d'améliorer la fiabilité globale en analysant les problèmes rencontrés en contrôle techniques ou cercles de qualité ou avec les constructeurs .[23]

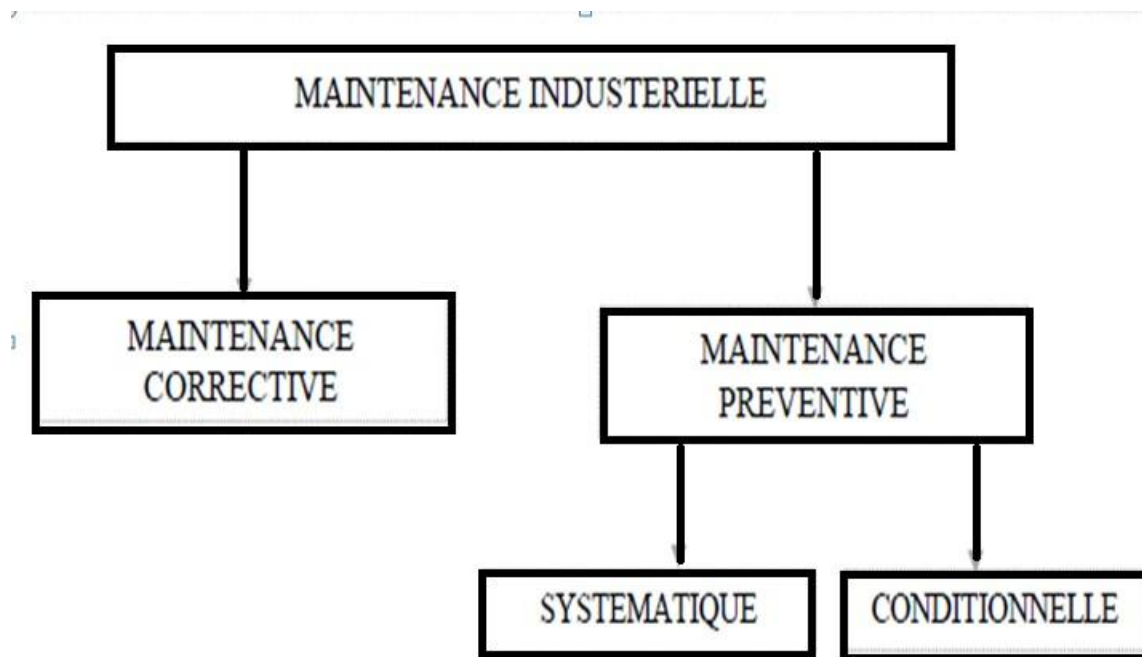


Figure (II-5) : types de maintenance.



### Niveaux de maintenance :

La norme NF X 60-010 définit, à titre indicatif, quatre niveaux de maintenance

(Tableau II.1) :

	niveau 1	niveau 2	Niveau3	niveau 4
travaux	- réglages simples - pas de démontage ni ouverture	opérations mineures de maintenance préventive	identification et diagnostic de pannes	travaux importants de maintenance corrective ou préventive
lieu	sur place	sur place	sur place ou dans atelier de maintenance	atelier spécialisé avec outillage général
personnel	exploitant du bien	technicien habilité	technicien spécialisé	équipe avec encadrement technique spécialisé
exemple	remise à zéro d'un automate après arrêt d'urgence	changement d'un relais	identification de l'élément défaillant	intervention sur matériel dont la remise en service est soumise à qualification

**Tableau (II-1)** : les quatre niveaux de maintenance.

### Organisation de la maintenance conditionnelle :

Dans la référence [24] on définit l'organisation de la maintenance conditionnelle par l'organigramme suivant (**figure II.6**) :

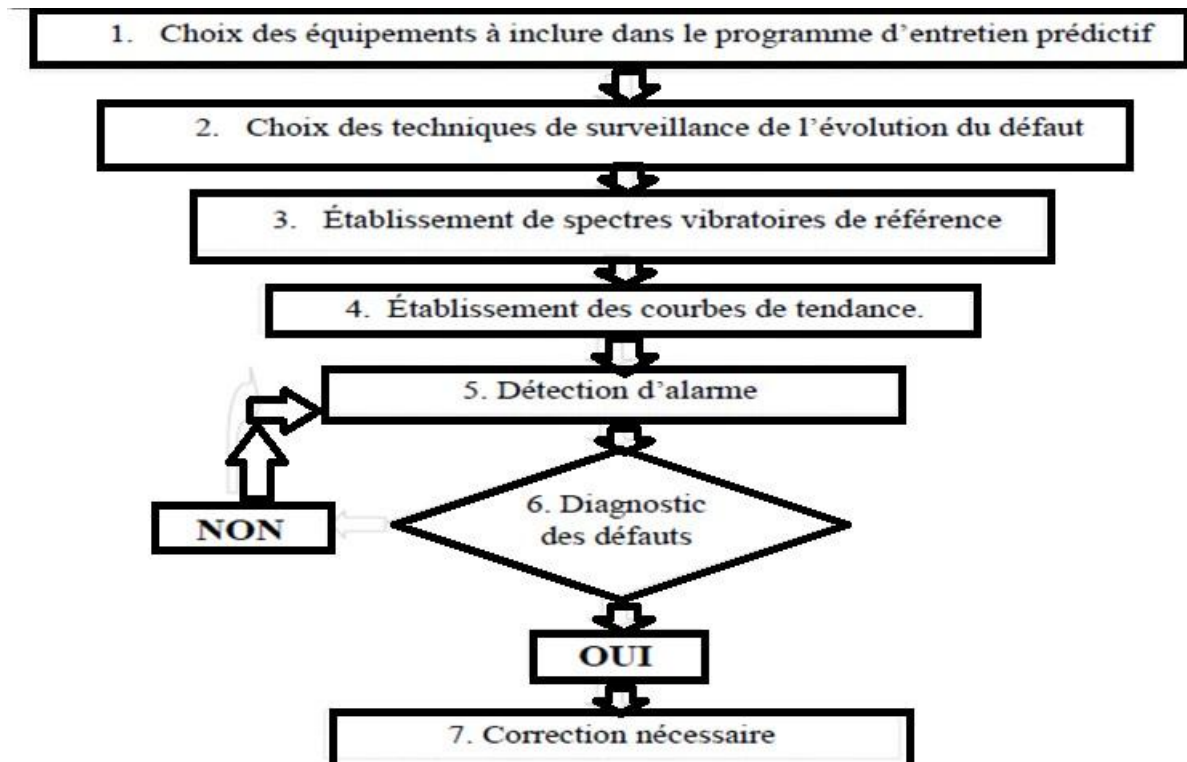


Figure (II-6) : Organisation de la maintenance conditionnelle.[24]

1. Cette étape comprend la codification des équipements, l'inventaire et la sélection du type d'entretien appliqué à chaque équipement
2. Cette étape comprend le choix de la technique de mesure, leur périodicité, leur endroit et repérage, la création d'une route et des dossiers de suivi
3. Cette étape s'occupe de la détermination des alarmes
4. Cette étape comprend la prise de mesure, l'enregistrement et la gestion des données vibratoires.
5. vérification du seuil d'alarme
6. déterminer l'élément défaillant
7. Changer ou corriger l'élément défaillant.

### 5. Classement des machines :

Afin de ne pas surveiller inutilement des machines qui n'ont pas une importance capitale, les industriels établissent souvent le classement suivant :

**Vitales** : machines non doublées dont la panne entraîne l'arrêt de la production. Les frais et

## **Chapitre II: Diagnostic et maintenance industrielle**

---

les délais de remise en état sont importants. Les pertes de production sont inacceptables.

**Importante :** machines doublées ou non dont la panne entraîne une baisse sensible de la production. Les frais et délais de remise en état sont importants, les pertes de production aussi.

**Secondaire :** machines doublées ou dont une panne ne remet pas en cause les capacités de production.

### **II.6.6. La cinématique :**

On ne peut surveiller correctement une machine que l'on ne connaît pas. Avant de recueillir un signal vibratoire, il faut prendre connaissance de la cinématique de l'installation à surveiller. Parmi les indications les plus importants, le technicien doit connaître :

- la vitesse de rotation de chaque ligne d'arbre ;
- le nombre de pales ou d'aubages sur les ventilateurs et les pompes ;
- le nombre de dents des engrenages ;
- le diamètre des poulies et la longueur des courroies ;
- le type des roulements ;
- le nombre de barres de la cage d'écureuil du moteur, etc.

Tous ces renseignements sont indispensables pour déterminer les outils adéquats à une surveillance efficace. Ils permettent de calculer les fréquences caractéristiques des défauts susceptibles d'apparaître sur les machines .[25]

### **Défauts des machines tournantes :**

#### **Balourd :**

Le balourd (**figure II.7**) est la cause de vibrations la plus commune et la plus fréquemment rencontrée. En dépit du soin apporté à la construction des rotors, il est donc impossible de les équilibrer parfaitement et il existe donc toujours une vibration à la fréquence de rotation dont l'amplitude est directement proportionnelle à l'importance du balourd et au carré de vitesse de rotation. Une modification brusque de l'amplitude correspond systématiquement à une modification du balourd dont l'origine peut-être une rupture ou la déformation d'une partie du rotor (ailettes de turbine par exemple). Si cette modification d'amplitude est plus lente, il peut s'agir d'une usure ou d'un encrassement de la partie tournante (suie, dépôt, etc.). Le phénomène se caractérise par une vibration radiale importante à la fréquence de rotation.

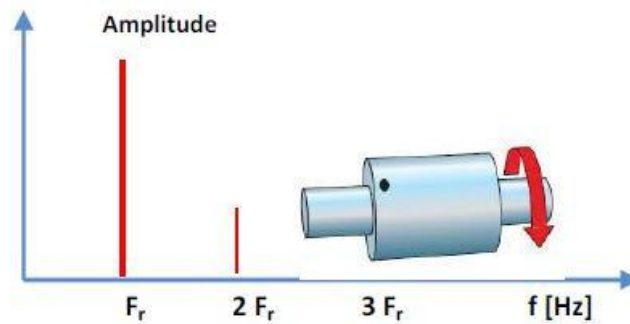


Figure (II-7) : Défaut de balourd. [26]

### Désalignement :

Un désalignement (**Figure II-8**) provoque des vibrations à la fréquence de rotation ainsi qu'aux harmoniques d'ordre 2, 3 et parfois 4 (double, triple, quadruple de la fréquence de rotation et parfois même davantage en particulier pour les accouplements à denture où l'on rencontre les harmoniques liés au nombre de dents et à la fréquence de rotation). La composante axiale de la vibration est particulièrement importante pour l'harmonique d'ordre 2.

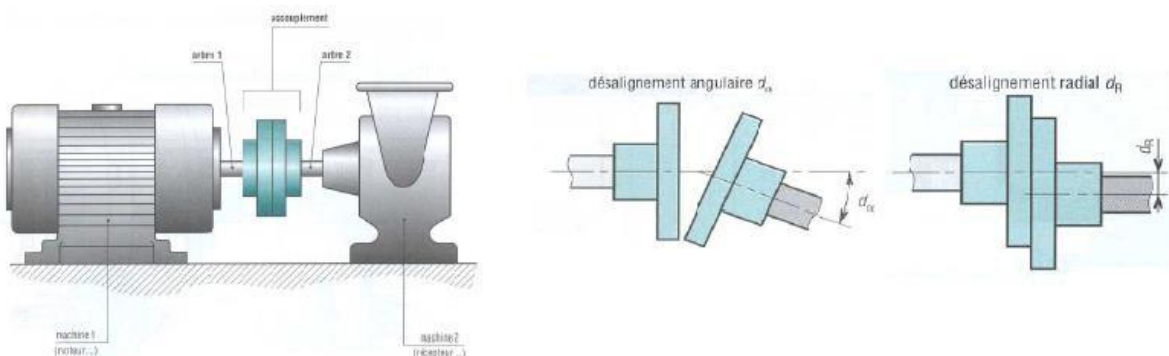


Figure (II-8) : Défauts désalignement. [26]

### Mauvais serrage mécanique :

Lorsqu'un palier est desserré ou présente une possibilité de mouvement partiel dans le plan radial, il apparaît une vibration radiale à une fréquence égale à deux fois la vitesse de rotation. Cette vibration se produit sous l'effet du balourd initial et elle peut prendre une amplitude élevée en fonction du degré de desserrage du palier.

### Les roulements :

Des roulements, il y en a partout... des pédales de vélos au ventilateur des PC en passant par les compresseurs ou les roues de véhicules, un très grand nombre de systèmes en rotation en sont équipés. Et dans l'industrie, ce sont des composants stratégiques des machines

## Chapitre II: Diagnostic et maintenance industrielle

tournantes : situés entre les parties fixes et les parties mobiles de la structure, ils assurent la transmission des efforts et la rotation de l'arbre.

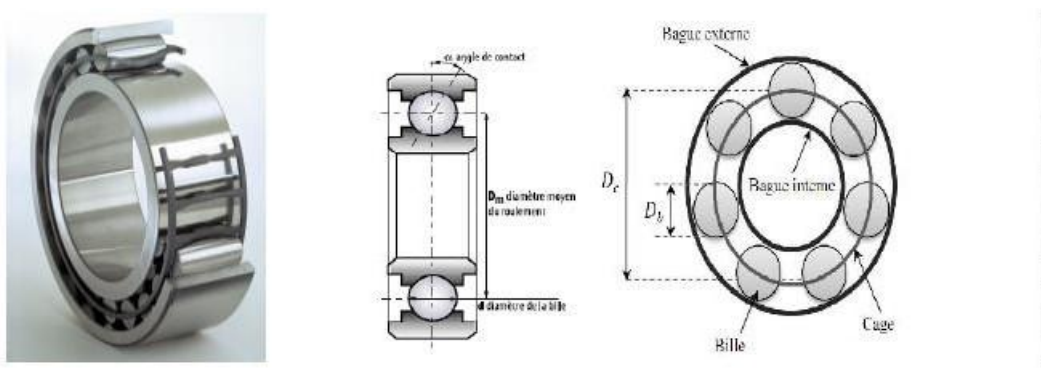
Mais, s'ils sont les plus courants, ces composants sont aussi les plus fragiles. Il faut dire que les différents éléments qui les constituent (les billes, la cage et les bagues) sont en permanence sollicités. Le passage répétitif des billes sur les pistes engendre de fortes contraintes mécaniques qui entraînent peu à peu une dégradation du métal par fatigue, et finissent par provoquer l'apparition de défauts ponctuels (des fissures, un écaillage des surfaces, etc.). Autre cause d'avarie, les défauts de montage et de conception. Ils provoquent en effet des surcharges qui entraînent, à terme, l'usure prématurée du roulement. Enfin, comme tout système de précision, le roulement est sensible à la pollution extérieure.

Un environnement poussiéreux, la présence de copeaux ou d'impuretés dans le corps du système, des lubrifiants pollués ou une atmosphère humide... sont autant d'agents extérieurs susceptibles de causer d'importants dégâts. Pour éviter des arrêts de production imprévus et coûteux, il faut alors surveiller en permanence l'état des roulements, et "traquer" tous les signes précurseurs des défauts : un bruit inhabituel, des vibrations anormales, une élévation de température, etc. [27]

### Eléments de roulements :

Le roulement est composé des éléments **Figure (II-9)** suivants :

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



(Figure II-9): Eléments de roulement.

### **défauts des roulements :**

#### **a. Causes des défauts :**

Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme:

- contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, ...
- corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, ...
- lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement,
- mauvais alignement du rotor,
- courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques, [28]

#### **b. Principales défauts :**

On peut noter deux types d'avaries caractéristiques de la détérioration des roulements :

Les avaries dites naturelles dues à la fatigue des roulements et les avaries dues à un mauvais montage ou une mauvaise utilisation du roulement.

On qualifie les principaux défauts :

- ❖ Le grippage, dû à l'absence de lubrification, à une vitesse excessive ou un mauvais choix du type de roulement. Ceci se manifeste par un transfert de matière arrachée sur les surfaces et redéposée par microsoudure.
- ❖ Les empreintes par déformation, dues à des traces de coups, des fissures ou des cassures.
- ❖ L'incrustation de particules étrangères, due à un manque de propreté au montage ou de l'entrée accidentelle d'impuretés.
- ❖ La corrosion, due à un mauvais choix du lubrifiant, surtout quand les roulements viennent d'être nettoyés et sont contaminés par la transpiration des mains.
- ❖ La corrosion de contact, due au mauvais choix d'ajustements entre les bagues et les logements ou les arbres.
- ❖ Les criques, fissures étroites ou autres amorces de cassures dues aux contraintes exagérées au montage ou au démontage.
- ❖ L'usure par abrasion, due à une mauvaise lubrification. L'usure par abrasion donne aux roulements un aspect gris, givré.
- ❖ Le cas le plus rencontré est un défaut d'écaillage dû à la fatigue des roulements. L'écaillage de fatigue, est un phénomène normal qui conduit à une défaillance et ce, quel que soit les conditions d'utilisation et de fonctionnement. Ce défaut survient sous l'effet de la fatigue due aux contraintes de cisaillement alternées qui sévissent en sous couche.

L'écaillage localisé et prématuré résulte d'anomalies caractérisées telles qu'un mauvais

## Chapitre II: Diagnostic et maintenance industrielle

montage, une surcharge, un défaut d'alignement, une mauvaise forme de logement. Ces défauts donnent naissance à des vibrations qui les caractérisent. C'est pourquoi l'analyse vibratoire s'avère intéressante et s'est montrée très puissante d'une part pour surveiller l'état de fonctionnement et d'autre part pour diagnostiquer le défaut et suivre son évolution. [7]

### Caractéristiques du signal engendré par le roulement endommagé :

#### Défaut de la bague interne :

Il est caractérisé par la présence d'une raie à la fréquence caractéristique du défaut ( $f_{dbi}$ ). Cette fréquence est modulée par la fréquence de rotation (bandes latérales autour de la raie de défaut).

$$f_{dbi} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} (1 + \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha)) \dots\dots\dots (II.1)$$

Avec:

$f_r$  : fréquence de rotation

$\alpha$  : angle de contact

L'image théorique de ce défaut (charge radial et charge axial) est donnée dans les figures suivantes:

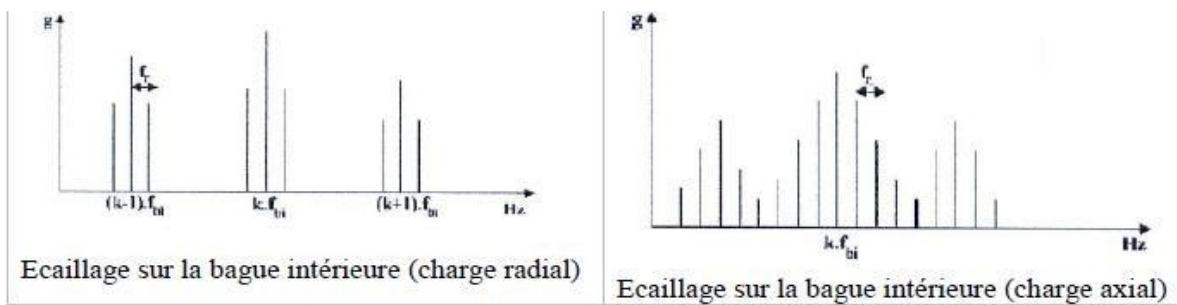


Figure (II-10) : Ecaillage sur la bague intérieure. [9]

#### Défaut sur la bague externe :

Ce défaut est caractérisé par la présence d'une raie à la fréquence ( $f_{dbe}$ ). Bien que la charge appliquée sur la bague externe soit constante, on peut remarquer une modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre autour de la fréquence de défaut.

$$f_{d_{be}} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} (1 - \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha)) \dots \dots \dots (II.2)$$

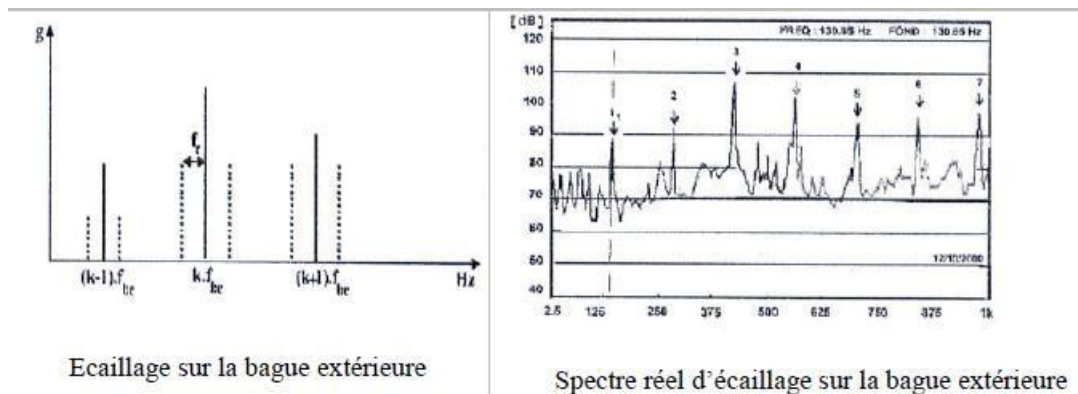


Figure (II-11): Ecaillage sur la bague extérieure. [9]

Défaut de l'élément roulant :

La première fréquence caractéristique de défaut correspond à la fréquence de rotation de l'élément roulant sur lui-même. de plus, cet élément roulant rencontre une fois la bague interne et une fois la bague externe par tour, il génère donc des chocs à 2 fois cette fréquence.

$$f_{bille} = \frac{f_r \cdot D_m}{2 \cdot D_b} (1 - (\frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha))^2) \dots \dots \dots (II.3)$$

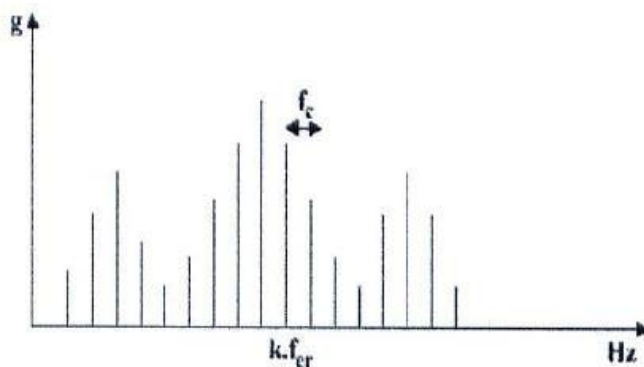


Figure (II-12): Ecaillage sur l'élément roulant.



## **Conclusion**

Dans ce chapitre on a été consacré à une présentation de quelques définitions relatives au diagnostic et maintenance dans le domaine industriel,

Le choix des méthodes d'analyse des signaux accélérométriques issus de machines tournantes est normalement conditionné par la nature de la machine, mais aussi par la nature du défaut à déceler dans le signal.

# ***Chapitre III:***

## ***Généralités sur v les ibrations***

## Introduction :

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations, images des efforts dynamiques engendrent par les pièces en mouvement, ainsi une machine neuve en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibrations.

La détérioration du fonctionnement conduit le plus souvent à un accroissement du niveau des vibrations, en observant l'évolution de ce niveau, il est par conséquent possible d'obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine.

Ces vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour effectuer un diagnostic, la modification de la vibration d'une machine constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradations, voire de pannes.

Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse des vibrations, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puis qu'elle permet, par un dépistage ou un diagnostic approprié des défauts, d'éviter la casse et de n'intervenir sur une machine qu'au bon moment et pendant des arrêts programmés de production.

Dans ce chapitre on présente une étude théorique sur l'analyse vibratoire, les différentes méthodes et technique utilisées et celle toujours en voie de développement.

### 1. Définition d'une vibration :

Une vibration est un mouvement d'oscillation mécanique autour d'une position d'équilibre stable ou d'une trajectoire moyenne. La vibration d'un système peut être libre ou forcée.

#### 1.1 Approche intuitive :

##### Perception subjective des phénomènes :

A proximité d'une machine :

- On peut entendre le bruit et sentir les vibrations de la machine.
- Ces deux indicateurs peuvent fournir des indications sur un changement de comportement de la machine.
- La quantification et la qualification des vibrations sont des moyens privilégiés pour la maintenance conditionnelle.

##### Le bruit :

Le bruit rayonné dans l'air par une machine résulte de l'action de plusieurs sources.

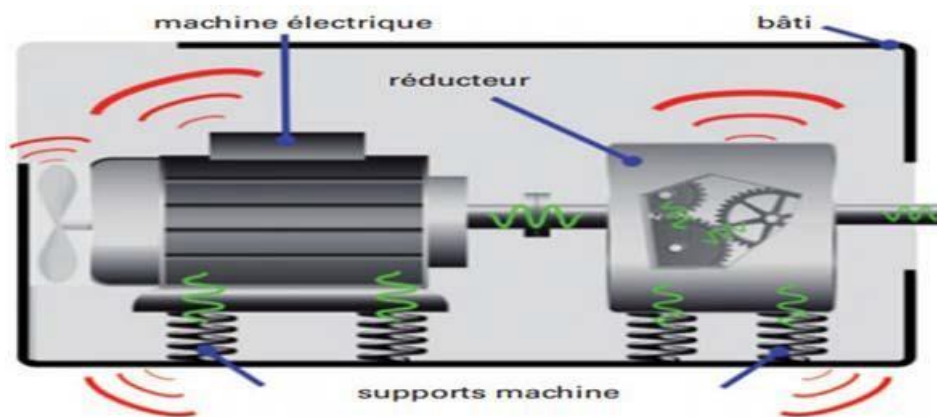


Figure (III-1) : Origine du bruit

### Origine du bruit rayonné par une machine :

Le bruit rayonné dans l'air par une machine résulte de l'action de plusieurs sources que l'on peut répartir en 2 groupes :

- Celui des machines ou parties de machines comportant des parties en vibration dont l'énergie est transmise à l'enveloppe extérieure par des liaisons rigides ou par un fluide.
- Celui des machines ou parties de machines agissant sans intermédiaire sur le milieu environnant en lui transférant de l'énergie directement sous forme de rayonnement acoustique.

### Les vibrations :

#### Vibrations d'une machine :

Les vibrations d'une machine sont souvent perceptibles par simple contact de la main sur la Structure, les vibrations ressenties proviennent des forces internes à la machine. [1]

#### Origine des phénomènes :

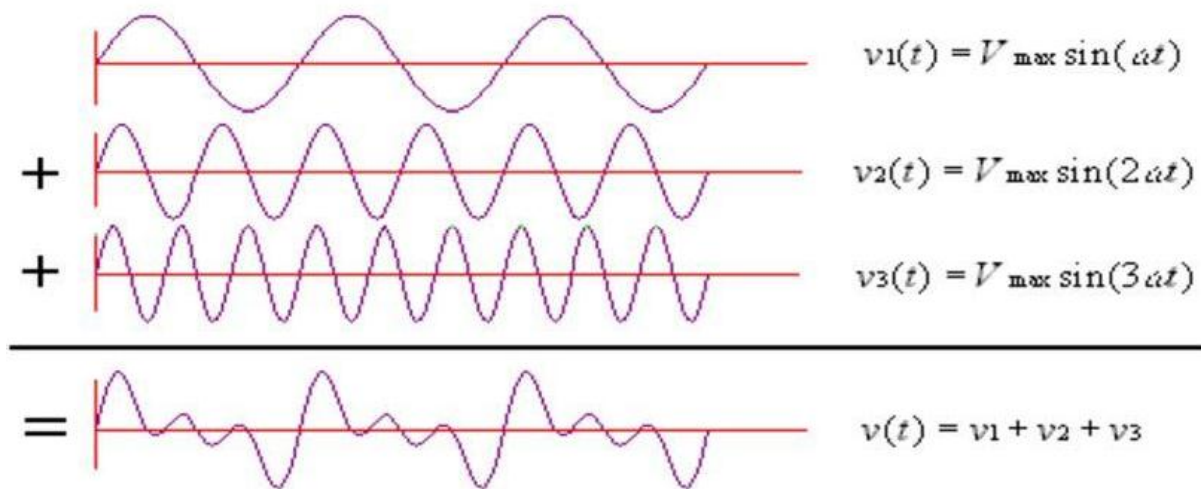
Il est rarement possible de faire la distinction entre les différentes origines des vibrations perçues.

#### Définition théorique d'une vibration :

#### Vibrations périodiques :

Le motif d'une vibration périodique consiste en la superposition, c'est-à-dire l'addition algébrique d'une vibration pure fondamentale et de vibrations pures harmoniques. Les fréquences des harmoniques sont des multiples entiers de celle du fondamental. Par exemple,

le mouvement d'un piston d'un moteur à combustion interne génère des oscillations harmoniques.



**Figure (III-2):** Vibrations périodiques.

La vibration appliquée à l'homme sort du cadre de ce guide. Par contre, comprendre le phénomène vibratoire associé au système "masse-ressort" constitue une excellente entrée en matière. Pourquoi ? Parce que celui-ci représente le système mécanique le plus simple qui existe. Vous allez apprendre à le décrire en termes d'amplitude, de fréquence et de phase.

#### **Vibration sinusoïdale :**

La sinusoïde : C'est la forme d'onde la plus simple à caractériser. Cette forme d'onde particulière, peut se visualiser comme le mouvement de la projection verticale de l'extrémité d'une aiguille d'une horloge, ou le mouvement de translation d'un système masse – ressort non amorti. La période  $T$  correspond à un tour complet de l'aiguille ou au temps que met la masse pour faire un aller retour. Une sinusoïde est une courbe alternative, de valeur moyenne nulle, représentée par une fonction mathématique simple.

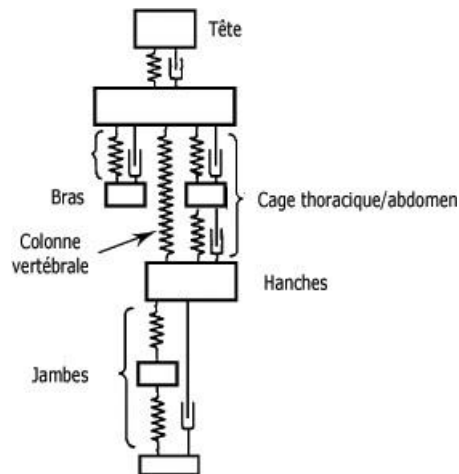
#### **Vibrations aléatoires :**

La forme d'onde des vibrations n'a pas toujours une structure aussi simple que celle des vibrations pures et des vibrations harmoniques. Très souvent, on ne peut plus y distinguer la répétition d'un motif. La forme du signal vibratoire évolue au contraire constamment de manière anarchique. Ce sont les vibrations aléatoires.

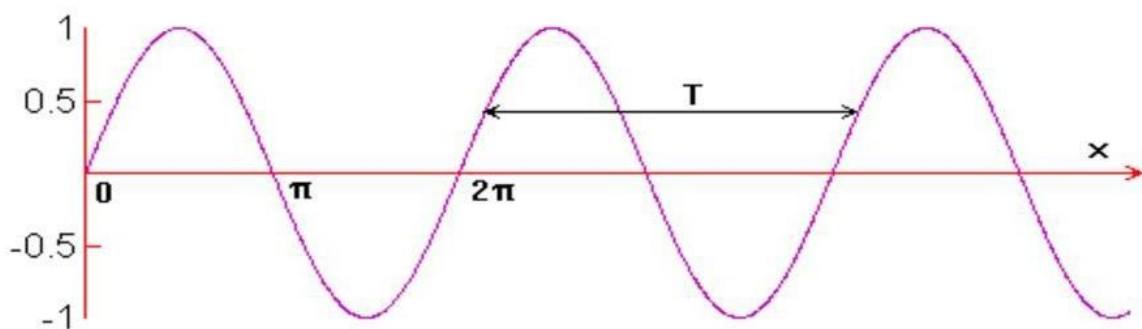
#### **Vibrations d'un système "masse-ressort" :**

Tout système mécanique, incluant les machines industrielles les plus complexes, peut être représenté par un ou plusieurs systèmes composés d'un ressort, d'un amortisseur et d'une masse. Le corps humain, souvent qualifié de "belle mécanique", est décomposé à la figure suivante en plusieurs sous-systèmes "masse-ressort-amortisseur" représentant la tête, les épaules, la cage thoracique, etc.

Système mécanique complexe :



**Figure (III-3) :** Vibrations d'un système "masse-ressort".



**Figure (III-4):** Vibration sinusoïdale.

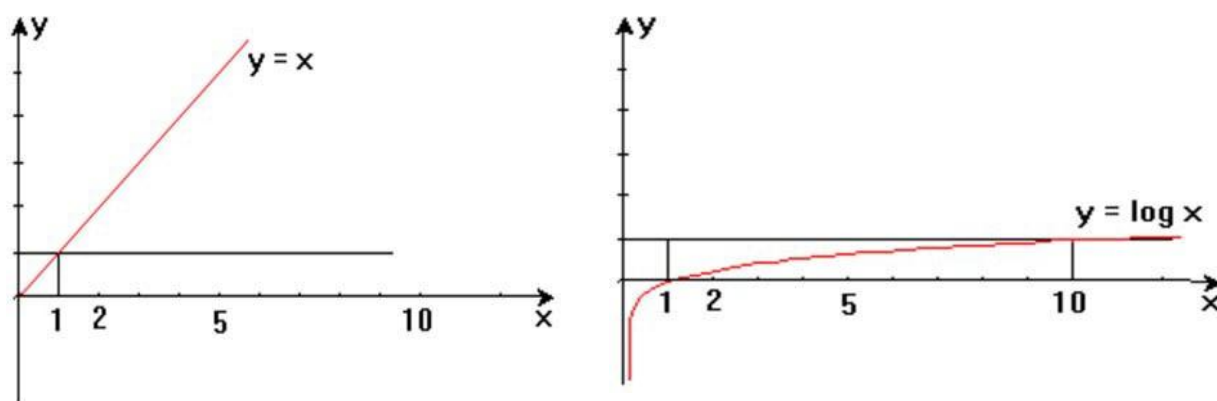
### Descriptions des vibrations :

Décrire les vibrations, c'est donner les valeurs d'un certain nombre de paramètres caractéristiques amplitude, fréquence, ...etc. L'important domaine de valeurs que peuvent prendre les grandeurs vibratoires justifie l'utilisation d'échelles et de grandeurs logarithmiques. Ces grandeurs logarithmiques correspondent au logarithme du rapport des valeurs de deux grandeurs de même espèce.

**Logarithme :**

L'échelle logarithmique permet de compresser une gamme de valeurs souvent trop large pour que ces valeurs soient discernées entre elles ; ainsi elle peut être assimilée à une balance capable de peser avec la même échelle une mouche et un dinosaure ! Parmi les propriétés de la fonction logarithme, on peut noter que :

- Le logarithme d'une valeur positive peut être négatif; le logarithme de la somme n'est pas égal à la somme des logarithmes.
- La fonction logarithme transforme l'ECHELLE LINEAIRE en ECHELLE LOGARITHMIQUE, souvent plus pratique.
- L'opérateur « logarithme » transforme une multiplication en addition et permet de représenter sur un même graphe de très fortes valeurs et de très faibles. [2]



**Figure (III-5):** *Logarithme des vibrations.*

**Niveau en décibel – dB :**

De manière générale, le niveau  $L$  en décibels (noté dB, dixième du Bel,) d'une vibration  $V$ , est par définition dix fois le logarithme décimal du rapport de  $V$  à une valeur de référence  $V_{ref}$  :  $L_v = 10 \log_{10} V / V_{ref}$ . [2]

Cette définition s'applique à toutes les grandeurs physiques proportionnelles à la puissance. La notation  $L$ , le plus souvent utilisée pour désigner un niveau, provient de l'anglais " level", traduction du mot "niveau". En France, on utilise aussi quelquefois la notation  $N$ .

**Niveau d'accélération :**

Le niveau d'accélération en log se définit par :

$$L_a = 10 \log_{10} A / A_{\text{ref}} [2]$$

Où  $A_{\text{ref}}$  est une accélération de référence qui vaut  $1 \mu\text{m/s}^2 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$ .

#### Niveau de vitesse :

Le niveau de vitesse en log se définit par :

$$L_v = 10 \log_{10} V / V_{\text{ref}} [2]$$

Où  $V_{\text{ref}}$  est une vitesse de référence qui vaut  $1 \text{ nm/s} = 10^{-9} \text{ m/s}$ .

#### Niveau de déplacement :

Le niveau déplacement en log se définit par :

$$L_d = 10 \log_{10} D / D_{\text{ref}} [2]$$

Où  $D_{\text{ref}}$  est un déplacement de référence qui vaut  $1 \text{ pm} = 10^{-6} \mu$ .

### Amplitude et fréquence:

En vous reportant à la **figure (I-6)**: suivante, remarquez l'axe  $t$  (temps) qui représente la droite que la plume tracerait si la masse était immobile. L'axe  $d$  (déplacement) représente, quant à lui, la position de la masse en un temps donné.

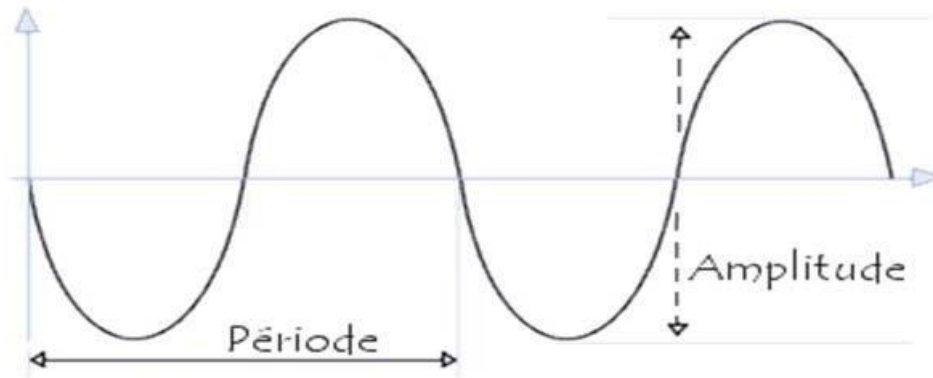
#### Intensité et fréquence :

Selon le type et la nature de vibration, et selon le moyen de mesure, elle peut être mesurée en amplitude (distance linéaire ou angulaire), puissance ou valeur efficace par rapport à une référence (décibel), fréquence (Hertz), etc.

#### Définition de l'amplitude, de la période, de la fréquence :

Maintenant, à partir d'une même courbe, définir l'amplitude d'un signal, puis sa période et enfin en déduire sa fréquence.





**Figure (III-6):** l'amplitude, de la période, de la fréquence.

### Amplitude et période :

Un phénomène est dit périodique s'il se reproduit avec les mêmes caractéristiques. La fréquence est le nombre de fois où un phénomène va être observé durant une unité de temps fixée. La période est l'inverse de la fréquence. On note :  $T = 1/f$ . [2]

Si l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence sera mesurée en hertz (Hz).

**Type des signaux :** (Figure (I-7)): représente les différents types des signaux)

### Déterministe

Des signaux (périodique ou non périodique) dont l'évolution en fonction du temps peut être parfaitement décrite par un modèle mathématique. Ces signaux proviennent de phénomènes pour lesquels on connaît les lois physiques correspondantes et les conditions initiales, permettant ainsi de prévoir le résultat. Les signaux non périodiques se composent d'une part des signaux pseudopériodiques formés d'une somme de sinusoïdes de périodes différentes et d'autre part des signaux transitoires dont l'existence est limitée dans le temps.

Ces signaux "certains" peuvent en principe être reproduits rigoureusement identiques à eux-mêmes. [3]

### Aléatoire :

Le signal aléatoire fait intervenir deux notions :

- La notion de signal c'est à dire une mesure qui dépend d'un ou plusieurs paramètres d'espace, le plus souvent le temps.
- La notion d'aléatoire qui fait que, à un instant  $t$  donné, la mesure n'est pas certaine mais

dépend du hasard. Cet aspect est appelé l'aspect stochastique et on parle indifféremment de signal aléatoire ou de signal stochastique.

Ce sont les signaux qui ont caractère non reproductible et imprévisible. [4]

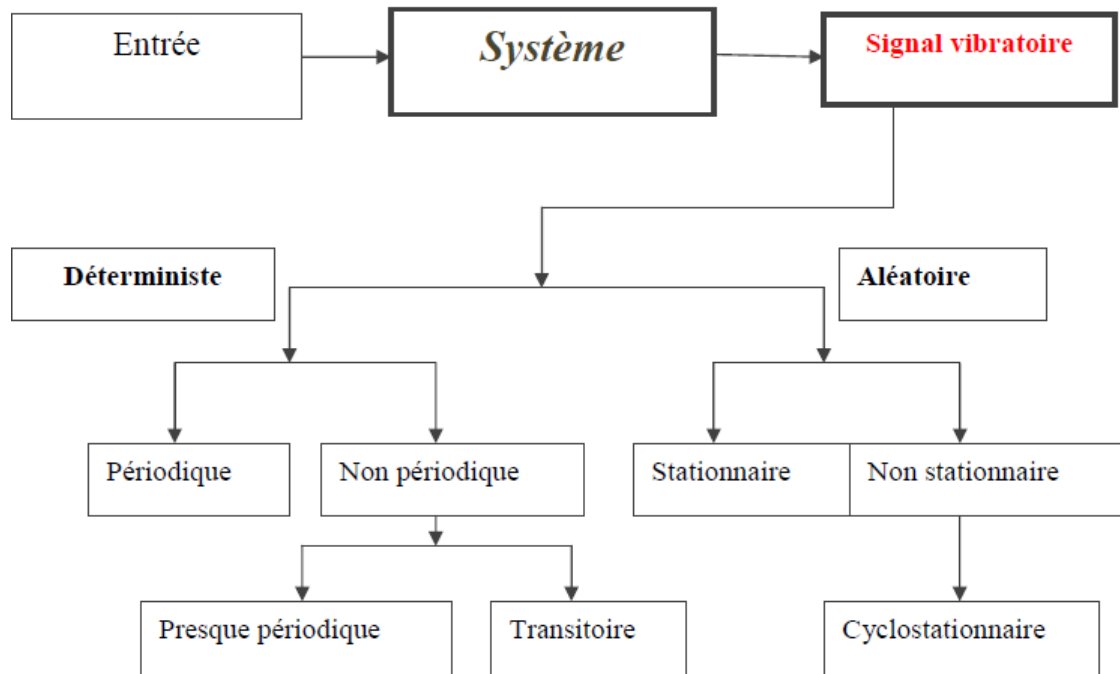


Figure (III-7): les différents types des signaux vibratoires.

### Caractéristiques d'un signal vibratoire :

Les signaux vibratoires ont une structure complexe, et sont constitués de différentes composantes :

- une partie du signal provient des phénomènes cycliques (déterministes ou non) se produisant dans le système, comme la rotation des arbres, les chocs des engrènements, les mouvements existants au sein d'un roulement...
- une partie aléatoire, due aux phénomènes parasites générés lors du fonctionnement d'un système (jeu, frottement, ...)

Ces signaux ne sont globalement pas stationnaires. En effet, ils ne sont pas indépendants du temps même si la vitesse de fonctionnement reste constante. Cette non-stationnarité a plusieurs origines: [5]

- vieillissement du système.
- excitation du système en vibration due aux chocs internes successifs voire chaotiques

(engrenages, roulements...),

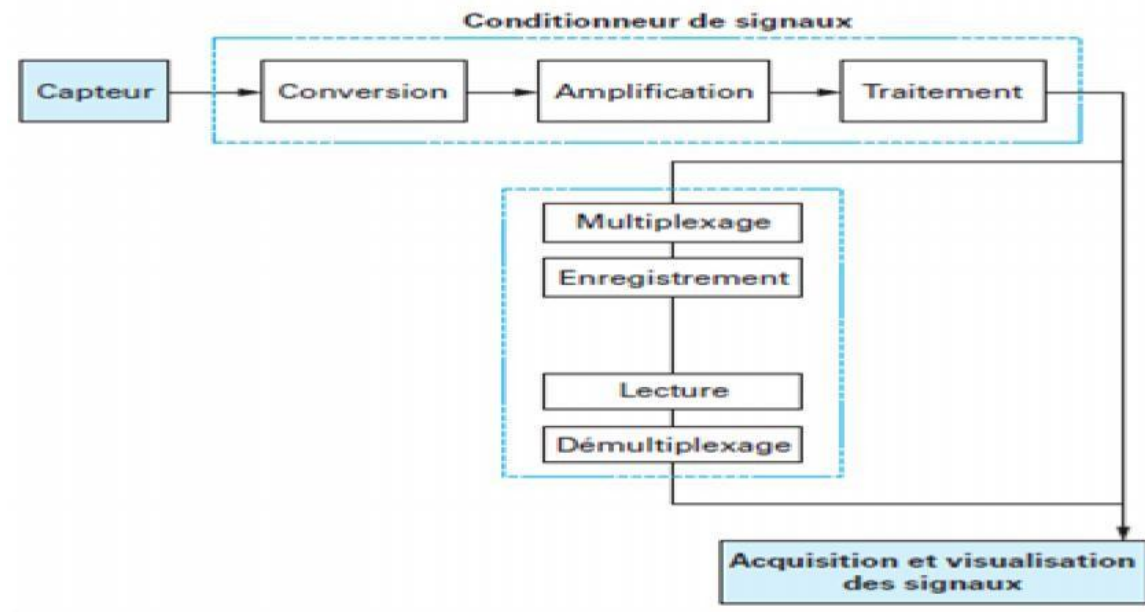
- non-stationnarité des efforts transmis à travers le système,
- imperfection des surfaces de contact, et contact variable entre dentures.

### Chaîne de mesure :

Le but de la mesure est de faire correspondre, à une grandeur physique que l'on désire connaître, une grandeur compréhensible par le système d'acquisition. De nos jours, il s'agit presque uniquement de signaux électriques qui ont remplacé les systèmes mécaniques et optiques d'autrefois. Ainsi le capteur délivre un signal qui est amplifié et converti généralement en tension par un conditionneur. Le système d'acquisition n'a plus alors à traiter qu'un courant électrique dont l'intensité est directement reliée à l'amplitude du phénomène vu par le capteur et cela quel que soit le type de ce capteur.

Prenons l'exemple d'une chaîne d'acquisition analogique **Figure (I-8)**: Le mot analogique veut dire que la loi liant l'information issue du capteur à la grandeur mesurée est continue. Le signal issu du capteur est transformé par un conditionneur de signaux qui comprend généralement les éléments suivants :

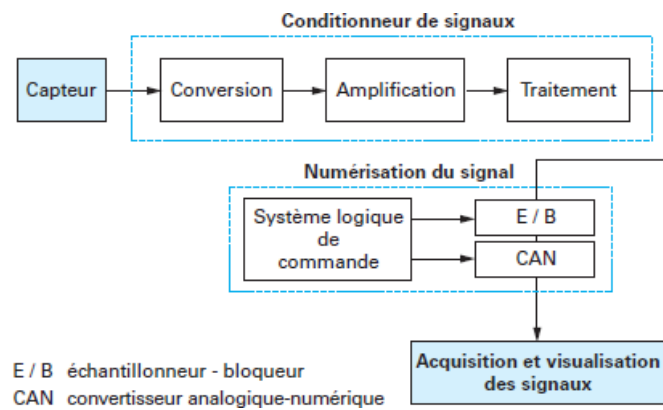
- le convertisseur de mesure, qui transforme généralement le signal en un courant électrique aisément transportable et qui est en entrée de la plupart des stations d'acquisition modernes.
- l'amplificateur, qui a pour but d'augmenter l'intensité du signal et de le rendre en cela moins sensible au bruit de fond ambiant.
- un ou plusieurs dispositifs de traitement du signal qui sont dédiés à la chaîne d'acquisition et varient en fonction des objectifs fixés par l'utilisateur. Ces dispositifs mettent en œuvre des fonctions très variées allant des filtres aux corrélations entre signaux en passant par la conversion en valeur efficace ou la linéarisation. Dans certains cas, il est possible de trouver, dans la chaîne d'acquisition, un multiplexeur : par exemple, si la station d'acquisition est éloignée du lieu de mesure ou si l'opérateur désire enregistrer un certain nombre de voies sur une bande magnétique. l'opération consiste à faire passer plusieurs signaux par une seule voie.



**Figure (III-8):** la chaîne de mesure analogique. [6]

La chaîne de mesure numérique, dont un exemple est donné **Figure (I-9)**: utilise au départ les mêmes dispositifs que la chaîne de mesure analogique. En sortie du conditionneur de signaux, le signal est échantillonné et numérisé par les éléments suivants :

- l'échantillonneur-bloqueur (E/B) a pour mission, au moment indiqué par le système logique de commande, de figer la valeur instantanée du signal au moins le temps que le convertisseur analogique-numérique effectue sa conversion.
- le convertisseur analogique-numérique (CAN) a pour rôle de coder la valeur instantanée du signal en entrée en un nombre. Son fonctionnement est géré par le système logique de commande qui peut être un microprocesseur. De la même manière que pour la chaîne analogique, dans le cas de plusieurs voies d'acquisition, un multiplexeur peut venir s'intercaler dans la chaîne numérique soit entre le conditionneur et l'échantillonneur-bloqueur, soit entre ce dernier et le convertisseur analogique-numérique. [6]



**Figure (III-9):** la chaîne de mesure numérique. [6]

### Capteurs des vibrations :

Le capteur de vibrations est le premier maillon de la chaîne de mesure. Le plus largement utilisé est l'accéléromètre ou capteur piézoélectrique. Le principe de tous ces accéléromètres est de générer un signal électrique proportionnel au niveau de vibration. Ces accéléromètres sont très appréciés car ils possèdent une large bande de fréquence présentant une excellente linéarité, permettent l'intégration du signal pour obtenir la réponse en vitesse ou en déplacement et sont d'une excellente précision et fiabilité.

La façon d'utiliser l'accéléromètre joue un rôle primordial dans la prise de mesure. En effet, le mode de fixation et l'emplacement du capteur influent sur les résultats. La fixation sur la structure doit être réalisée à partir d'une liaison parfaite. Il existe plusieurs modes de fixation tels que le goujon vissé, l'embase collée, l'embase magnétique, la pointe touche. Ces différents modes jouent un rôle considérable sur la bande de fréquence et surtout sur la répétitivité des mesures. Le choix de l'emplacement du capteur se veut important étant donné la conception de celui-ci. En effet, la prise de mesure est fournie pour une direction donnée; c'est pourquoi l'accéléromètre doit être placé à un endroit où la mobilité est maximale.

Actuellement, le capteur est placé au plus près du défaut potentiel pour éviter les contributions extérieures.

Les signaux enregistrés par les capteurs sont souvent le résultat d'un mélange de nombreuses sources vibratoires qui peuvent perturber l'interprétation des niveaux d'analyse introduit dans la section précédente. Et ceci est d'autant plus vrai si le capteur n'est pas placé au plus près du défaut potentiel dû à un manque d'accessibilité. La surveillance d'un composant particulier peut être perturbée par la présence d'autres sources vibratoires. De même, le diagnostic peut s'avérer difficile si des composants identiques sont intégrés à l'équipement étudié. [7]

**Types des capteurs :****Accéléromètre piézo-électrique :**

Le capteur et le conditionneur de signal qui lui est associée sont les deux maillons de base communs à toute chaîne de mesure et tout système de surveillance ou de diagnostic par analyse de vibrations. Sa dynamique de mesure et sa bande passante très étendue font de l'accéléromètre piézo-électrique le capteur le mieux adapté pour l'analyse des vibrations absolues de palier.

Le choix d'un accéléromètre et du conditionneur de signal sera guidé par la spécialité et l'environnement des équipements à surveiller (vitesse, température des paliers, distance entre capteur et unité de traitement...). Les éléments déterminants dans le choix d'un accéléromètre et de son conditionneur, outre la sensibilité et les facteurs d'influences, sont la fréquence de coupure inférieure de la fréquence de résonance. En l'absence de contraintes particulières d'utilisation (température de palier très élevée [ $>120^{\circ}\text{C}$ ] ou vitesse de rotation très basse [ $<120\text{tr/min}$ ]) l'accéléromètre à électronique incorporée (ICP) est de plus en plus utilisé au détriment de l'association accéléromètre/amplificateur de charge.

**Capteurs à courant de Foucault :**

Le capteur de proximité le mieux adapté à la mesure et à l'analyse du déplacement relatif d'un arbre dans son palier est le capteur à courant de Foucault. Sa bande passante est très étendue mais sa dynamique est faible à cause du bruit élevé induit par les imperfections d'usinage de l'arbre et la non homogénéité magnétique des matériaux le constituant. Ces imperfections géométriques et magnétiques se traduisent dans le domaine spectral par la présence d'un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de rotation. Ce peigne de raies parasite le spectre de signal utile et peut induire de graves erreurs d'interprétation. La réduction de ce bruit nécessite un traitement spécifique de l'arbre au niveau des zones de visée des sondes. [8]

**Le conditionnement du signal :**

Le signal électrique doit être conditionné pour être traité par les appareils d'analyse. Ce conditionnement est donné par les différents points suivants :

- 1) L'amplification du signal de sortie du capteur pour le rendre exploitable, réalisée par le préamplificateur.
- 2) L'intégration du signal pour passer à la vitesse ou au déplacement réalisée par l'intégrateur.
- 3) La limitation de la plage de fréquences du signal, réalisée par les filtres passe-haut et passe-bas.

### I .10.Les indicateurs scalaires :

Les indicateurs scalaires associent à un signal vibratoire, observé le plus souvent sous sa forme temporelle sur une durée déterminée en relation avec la cinématique de l'installation, un nombre ou scalaire. Divers indicateurs sont utilisés dans le suivi vibratoire des machines tournantes, on peut citer à cet effet ; la valeur efficace, la valeur crête ou une combinaison de ces deux grandeurs représentée par le ( kurtosis , facteur et valeur de crête ,et valeur efficace(RMS))

#### Le kurtosis :

$$k = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^4 p(x) dx \quad (\text{III.1})$$

Le kurtosis de la distribution normal est égale à 3, il est supérieur à 3 si la distribution devienne plus centrée ce qui indique la présence d'un défaut et il est inférieur à 3 si la distribution est aplatis. [9]

#### La valeur crête : $V_c$

Représente la valeur maximale du signal. Pour un signal  $X(n)$  la valeur crête est donné par :

$$\text{Valeur de crête} = \sup |X(n)| \quad (\text{III.2})$$

Est un indicateur qui caractérise l'amplitude maximale des chocs. Il se manifeste dès l'apparition de la première écaillage et donne une information très précoce de la prédiction. Malheureusement, c'est un mauvais indicateur une fois que la dégradation s'accroît. Il faut remarquer aussi, que ces deux indicateurs ( $V_{RMS}$ ,  $V_c$ ) dépendent de la vitesse de rotation, des charges de la machine et des dimensions des roulements. Ceci est un inconvénient pour la surveillance des roulements (seuil de la surveillance).

#### I .10.3. La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square) :

c'est une valeur très caractéristique du signal, vu qu'elle a une relation directe avec l'énergie contenue dans celui-ci :

$$RMS = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}}{1} \quad (\text{III.3})$$

Ce paramètre est le plus couramment utilisé en analyse vibratoire, mais il est beaucoup imprécis dans le cas des roulements, car il ne varie de façon significative que lorsque le défaut devient très sévères mais il est encore utilisable et très efficace mais pas tout seul. Donc il convient de lui associer un autre indicateur par exemple le skew pour en savoir plus de l'état d'un roulement avec une certaine certitude

I .10.4. Facteur de crête : c'est le rapport entre la valeur de crête et la valeur efficace (RMS).

$$F_{\text{crête}} = \frac{V_{\text{crête}}}{RMS}$$

(III.4)

Il faut rappeler qu'une vibration de type sinusoïdale aura un facteur de crête voisin de 2, alors qu'une vibration de type impulsionnel aura un facteur de crête plus important. Lorsqu'il n'y a pas de défaut le  $F_c$  reste proche de trois (3) et il faut rappeler que l'apparition d'un défaut entraîne l'augmentation du facteur de crête.

.Conclusion :

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

Le défaut de roulement est aussi exigé la complémentarité de plusieurs indicateurs : (kurtosis, facteur et valeur de crête, et valeur efficace(RMS))



**PARTIE IV**  
**SURVEILLANCE DES MACHINES PAR**  
**ANALYSE VIBRATOIRE**

# LES VIBRATIONS DES MACHINES TOURNANTES

## ***I. Introduction***

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations, images des efforts dynamiques engendrés par les pièces en mouvement. Ainsi, une machine neuve en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibrations. La détérioration du fonctionnement conduit le plus souvent à un accroissement du niveau des vibrations. En observant l'évolution de ce niveau, il est par conséquent possible d'obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine. Ces vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour effectuer un diagnostic. La modification de la vibration d'une machine constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradations, voire de pannes.

Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse des vibrations, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet, par un dépistage ou un diagnostic approprié des défauts, d'éviter la casse et de n'intervenir sur une machine qu'au bon moment et pendant des arrêts programmés de production.

## **II. Définition d'une vibration**

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va-et-vient autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre. Si l'on observe le mouvement d'une masse suspendue à un ressort [figure 2 .1], on constate qu'il se traduit par :

- Un déplacement : la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre ;
- Une vitesse de déplacement : variation du déplacement par rapport au temps ;
- une accélération : variation de la vitesse par rapport au temps.

□

La vibration d'une machine soumise à une force périodique peut être décrite en termes de **déplacement**, de **vitesse** ou **d'accélération**. La vitesse du mouvement vibratoire correspond à la variation de son déplacement pour une unité de temps. L'accélération représente une variation de la vitesse par unité de temps.

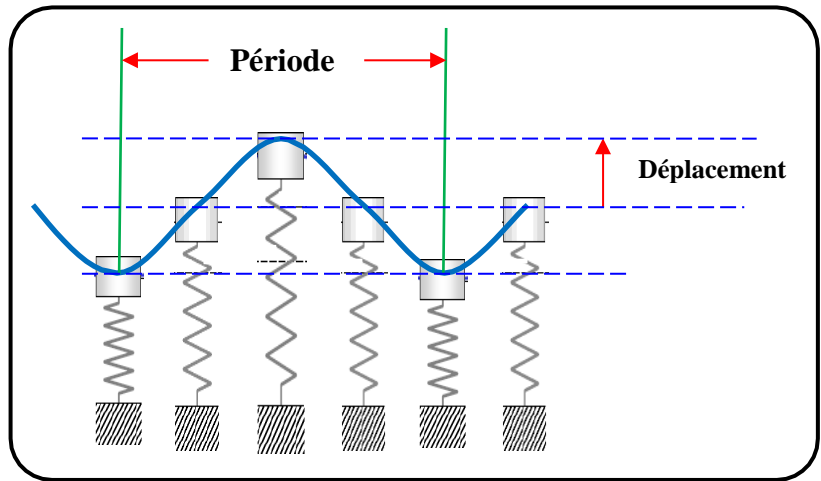


Figure 2.1 : Mouvement d'une masse suspendue à un ressort

### III. Caractéristiques d'une vibration

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

#### 1. Fréquence

##### a. Définition

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

Si la fréquence  $f$  d'un phénomène est de 50 hertz, c'est-à-dire 50 cycles par seconde, la durée d'un cycle (ou **période  $T$** ) est de  $1/50^{\text{ème}}$  de seconde. La fréquence  $f$  est l'inverse de la période  $T$  :  $f = 1/T$ .

##### b. Remarque

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

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

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

### c. Exemple

Un ventilateur tournant à 1500 tr/min possède 16 pales. Ce ventilateur présente un phénomène de balourd (déséquilibre), dû à l'encrassement des pales, se produisant à chaque rotation. L'axe du rotor est décentré par rapport à l'ouïe de refoulement, ce qui induit des phénomènes vibratoires qui se produiront au passage de chaque pale.

Calculer la fréquence de rotation du ventilateur :

.....

Calculer la fréquence de la vibration due au balourd :

.....

Calculer la fréquence du phénomène vibratoire dû au décentrement :

.....

## 2. Amplitude

### a. Définition

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

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

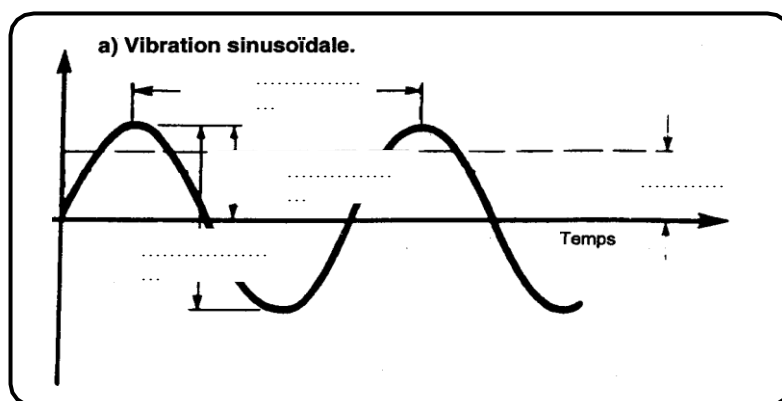
### b. Exemples

#### Cas d'une vibration sinusoïdale

Dans le cas d'une vibration de type sinusoïdal [figure 2.2], l'amplitude efficace s'exprime en fonction de l'amplitude crête de la façon suivante:

$$A_{\text{eff}} = \frac{A_c}{\sqrt{2}}$$

$$A_{\text{eff}} = \frac{A_c}{\sqrt{2}} = 0.707 A_c$$

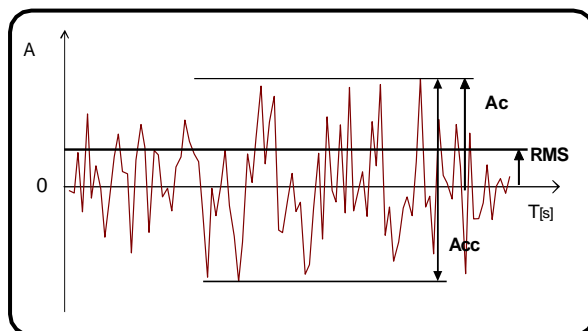


#### Cas d'une vibration quelconque

**Figure 2.2** : vibration sinusoïdale

Dans le cas d'une vibration complexe quelconque [figure 2.3], il n'existe pas de relation simple entre la valeur crête de l'amplitude ( $A_c$ ) et la valeur efficace de l'amplitude ( $A_{eff}$ ) qui se définit mathématiquement par la relation:

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



**Figure 2.3** : vibration complexe

$T$  : durée d'analyse du signal ,  $X(t)$  : amplitude instantanée .

**c. Grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration**

Une vibration est caractérisée par les trois grandeurs fondamentales : le **déplacement**  $x$ , la **vitesse**  $v$  et l'**accélération**  $\gamma$ . Les unités de ces grandeurs en SI et celles utilisées en mesures vibratoires sont données au tableau 2.1

PARAMETRES	UNITES S.I.	UNITES VIB.	CORRESPONDANCES
X	.....	.....	..... ....
v	.....	.....	..... ....
	.....	.....	1g = 9.80665 m/s <sup>2</sup>

**Tableau 2.1 :** Unités utilisées pour , v et x en SI et en mesure vibratoire.

**d. Remarque**

La valeur de crête à crête indique la différence entre les amplitudes maximale et minimale du mouvement. C'est une quantité utile pour déterminer le déplacement d'un composant, déplacement qui peut être critique pour des considérations de contrainte maximale ou de jeu mécanique. La valeur de crête donne l'amplitude maximale et s'avère utile dans les mesures concernant les phénomènes de courte durée; les chocs en sont un exemple. Cependant, elle ne tient pas compte de l'évolution de la vibration dans le temps.

La valeur efficace est la mesure la plus intéressante des amplitudes de vibration. En plus de tenir compte de l'évolution du signal dans le temps, le calcul de la valeur efficace est lié à l'énergie vibratoire et donc au « potentiel de détérioration » de la vibration.

Le facteur de crête définit le rapport de la valeur de crête d'un signal à sa valeur efficace. D'après la définition du niveau efficace, le facteur de crête du mouvement sinusoïdal est environ 1,4. Plus la vibration devient impulsive, plus la valeur de crête augmente.

**3. Nature d'une vibration**

Une machine tournante quelconque en fonctionnement génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante:

- Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple [figure 2.4 a] ou sinusoïdal complexe [figure 2.4 b] représentatives du fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques (rotation de lignes d'arbres, engrènements,...) ou d'un certain nombre

d'anomalies (déséquilibre, désalignement, déformations, instabilité de paliers fluides, déversement de bagues sur roulements, ...).

- Les vibrations périodiques de type impulsional [figure 2.4 c] sont appelées ainsi par référence aux forces qui les génèrent et à leur caractère brutal, bref et périodique. Ces chocs peuvent être produits par des événements normaux (presses automatiques, broyeurs à marteaux, compresseurs à pistons, ...) ou par des événements anormaux comme l'écaillage de roulements ou un défaut sur des engrenages, un jeu excessif, ...
- Les vibrations aléatoires de type impulsional [figure 2.4 d] peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe, ...

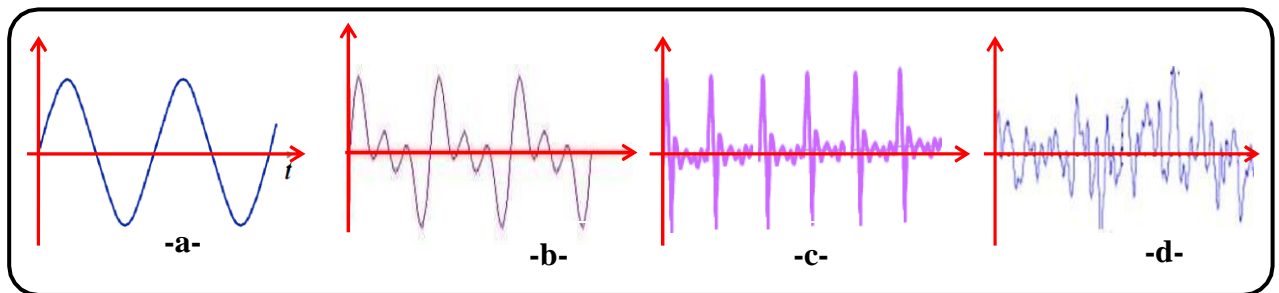


Figure 2.4 : Nature d'une vibration

#### IV. Les capteurs de vibration

##### 1. Types et caractéristiques des capteurs

La première étape conduisant à l'obtention d'une lecture de vibration consiste à convertir la vibration mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent. Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations. On retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés le proximètre (mesure de déplacement), le vélocimètre (mesure de vitesse) et l'accéléromètre (mesure d'accélération).

Un capteur de vibration est caractérisé principalement par :

- sa **bande passante** (plage d'utilisation) : plage de fréquences à l'intérieur de laquelle l'amplitude mesurée par le capteur ne dépasse pas une marge d'erreur fixée par le constructeur (par exemple  $\pm 3\%$  ou  $\pm 3$  dB de [3–8000] Hz).
- sa **gamme dynamique** (gamme de mesure d'amplitude) : gamme comprise entre la plus petite et la plus grande amplitude acceptée par le capteur.
- sa **sensibilité** : relation entre la grandeur électrique délivrée à la sortie du capteur et l'amplitude du mouvement mécanique qui lui donne naissance (par exemple 8 mV par  $\mu\text{m}$ ). Elle est donnée par le constructeur du capteur, généralement sous forme de courbe

d'étalonnage qui devra faire l'objet d'une vérification périodique.

## 2. Les proximités

Le proximité, ou sonde de proximité [figure 2.5], est un capteur de déplacement sans contact qui produit un signal électrique directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor. Il est monté en permanence à l'intérieur du palier [figure 2.6]. Les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence. Ces mesures seront limitées aux basses fréquences ( $< 100$  Hz).



Figure 2.5 : proximités et leur driver

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 terme de déplacement qu'en terme de vitesse ou d'accélération.

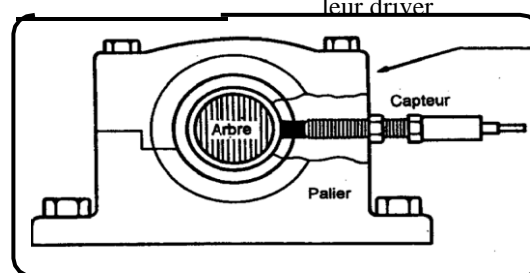


Figure 2.6 : proximité monté sur un palier

Un exemple de fiche technique de proximité est illustré en annexe 1.

## 3. Vélocimètres

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

Les vélocimètres les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté [figure 2.7]. La vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse de mouvement de la bobine.

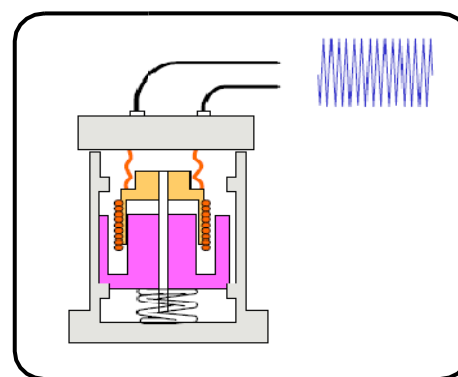


Figure 2.7 : schéma de principe d'un vélocimètre.



La fréquence de résonance de ce type de capteurs se situe généralement entre 8 et 15 Hz et la gamme dynamique s'étend de 10-20 Hz à 2000 Hz environ.

Un exemple de fiche technique de Vélocimètre proximètre est illustré en annexe 2.

#### 4. Les accéléromètres

##### a. Principe

Un accéléromètre piézoélectrique [figure 2.8], est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), 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 des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération. Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les

plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB).
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.

Les accéléromètres à électronique intégrée sont semblables aux accéléromètres piézoélectriques à la différence qu'ils possèdent de manière intégrée un conditionnement de charge pour délivrer une tension proportionnelle à l'accélération.

Un exemple de fiche technique d'accéléromètre est illustré en annexe 3.

##### b. Réponse d'un accéléromètre

L'examen de la courbe de réponse d'un accéléromètre piézoélectrique,

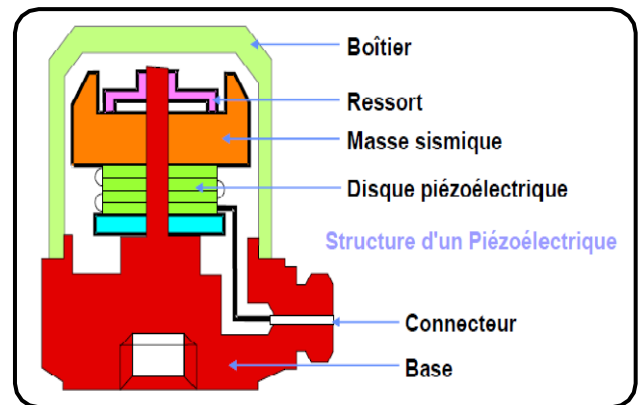
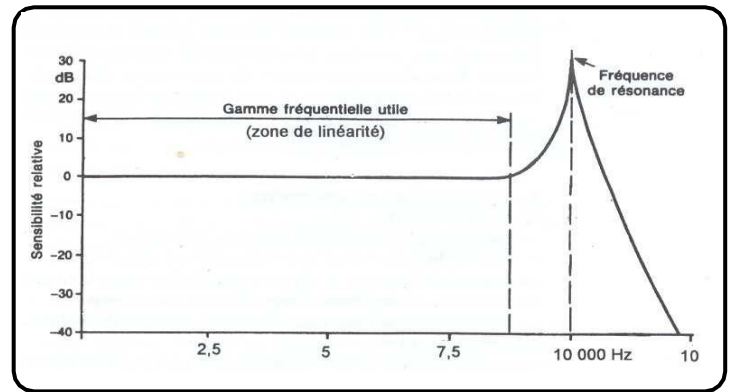


Figure 2.8 : schéma de principe d'un accéléromètre.

illustrée sur la figure 2.9, montre l'existence de deux zones :

- une zone de linéarité du capteur : c'est la plage de fréquences à l'intérieur de laquelle la réponse du capteur correspond à l'amplitude du signal mesurée



avec une bonne sensibilité. Cette zone définit la plage de

fréquences pour une bonne utilisation du capteur.

- Une zone englobant la résonance du capteur à l'intérieur de laquelle les mesures d'amplitude sont amplifiées, de façon non contrôlée. Cette zone sera évitée puisque la mesure est faussée.

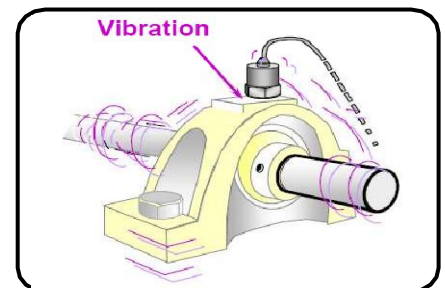
## V. Choix de l'emplacement de capteurs

### 1. Emplacement

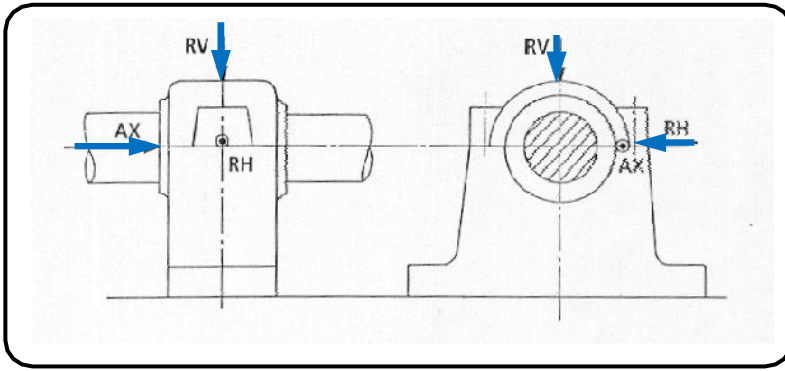
Dans le cas des machines tournantes, les principales mesures seront effectuées le plus souvent au droit des paliers qui sont les parties fixes les plus directement en relation avec les efforts appliqués à la partie mobile [figures 2.10 et 2.11] . Ces

efforts sont de deux types :

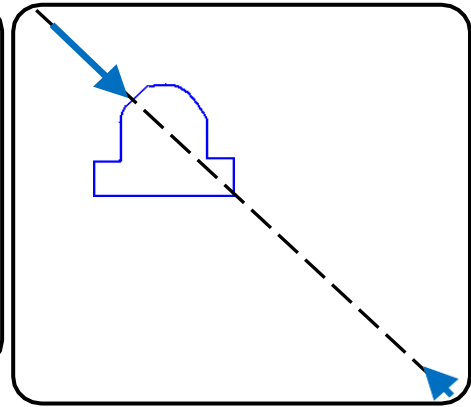
- **Efforts tournants** : ce sont les efforts liés à la rotation de l'arbre, générés par exemple par un balourd ou un désalignement, et dont les amplitudes seront plus grandes dans le cas d'une mesure effectuée dans un plan radial ;
- **Efforts directionnels** : ce sont des efforts liés à une contrainte de l'arbre, générés par exemple par la tension d'une courroie (effort directionnel radial [figure 2.12]), ou un par le contact d'un engrenage conique (effort directionnel axial).



**Figure 2.10** : Fixation du capteur sur palier



**Figure 2.11 :** Choix directionnel pour la prise de mesure



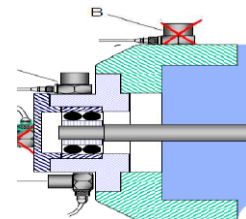
**Figure 2.12 :** direction favorisée pour transmission par poulies courroies.

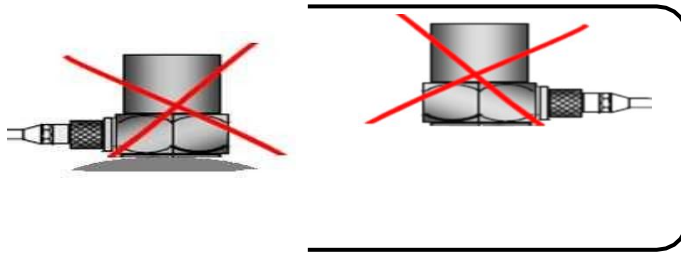
## 2. Remarques

- Bien que l'effort soit constant dans toutes les directions du plan radial, une mesure dans la direction radiale horizontale donne une valeur d'amplitude plus forte.
- La lecture des valeurs d'amplitude doit tenir compte du temps nécessaire à la prise d'une mesure correcte et de l'estimation des fluctuations de niveaux éventuelles.
- Toute remarque au cours de cette évaluation peut être importante et significative d'un défaut.

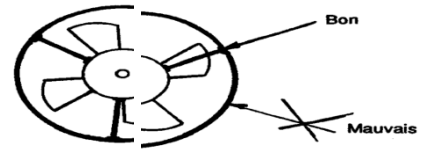
## 3. Consignes pour la fixation des capteurs

- Les capteurs doivent être placés en liaison aussi directe que possible avec les paliers, en limitant au strict minimum le nombre de pièces assurant l'interface entre l'élément mobile et le capteur [figure 2.13].
- L'emplacement des points de mesure doit être propre (pas de traces de graisse ou de peinture) et les surfaces de contact avec les capteurs lisses, planes et perpendiculaires à la direction de mesure [figure 2.14].
- Lorsque le palier est difficilement accessible de façon directe, la prise de la mesure est effectuée par un capteur au point judicieusement choisi en fonction des raideurs [figure 2.15].
- Les mesures sont effectuées toujours au même endroit sur la machine. Les points de mesure sont repérés, soit par la peinture, soit par la mise en place de goujons.





**Figure 2.14** : Les surfaces de contact avec les capteurs doivent être lisses et planes

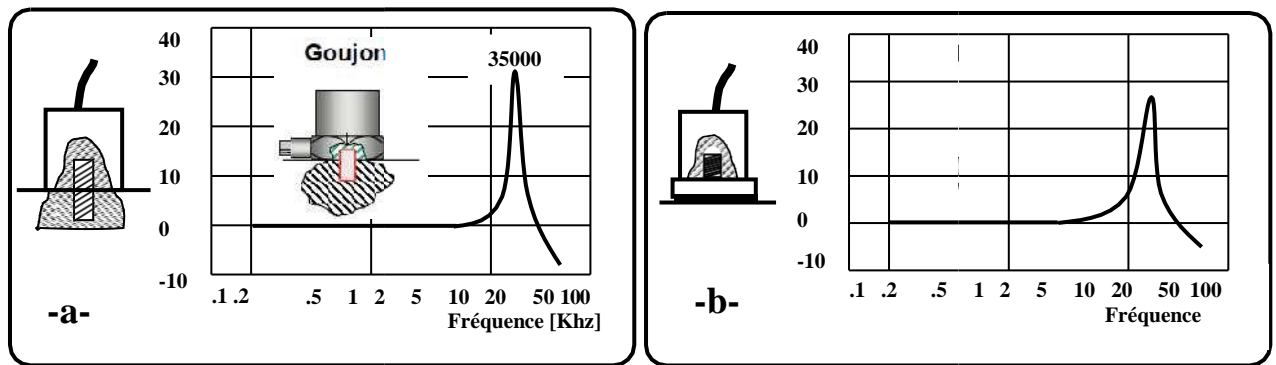


**Figure 2.15** : emplacement du capteur sur un palier inaccessible directement

### 1. Modes de fixation

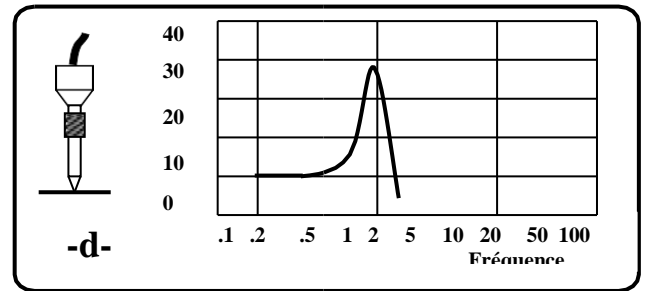
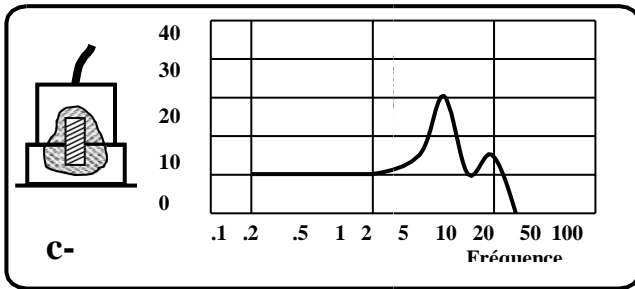
Les accéléromètres possèdent une réponse linéaire sur une large gamme de fréquences, mais cette gamme de fréquences peut être considérablement diminuée selon leur mode de fixation [figure 2.16 ].

Pour que les mesures soient fiables, il faut qu'elles soient faites dans une gamme de fréquences nettement inférieures à la fréquence de résonance du capteur



**Figure 2.16**: réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode de fixation

**-a-** fixation par goujon    **-b-** fixation par embase collée    **-c-** fixation par aimant    **-d-** fixation par pointe de touche



## VI. Stratégies de surveillance vibratoire

### 1. 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.

### 2. Analyse temporelle

Cette stratégie consiste à suivre, au cours du temps, le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ces paramètres de fonctionnement (étude de la vibration d'une turbine lors de son accélération ou sa décélération). Ce type de suivi est simple à exploiter lorsque le signal est simple mais il devient inexploitable lorsque le signal a pour origine des sollicitations multiples.

### 3. 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.

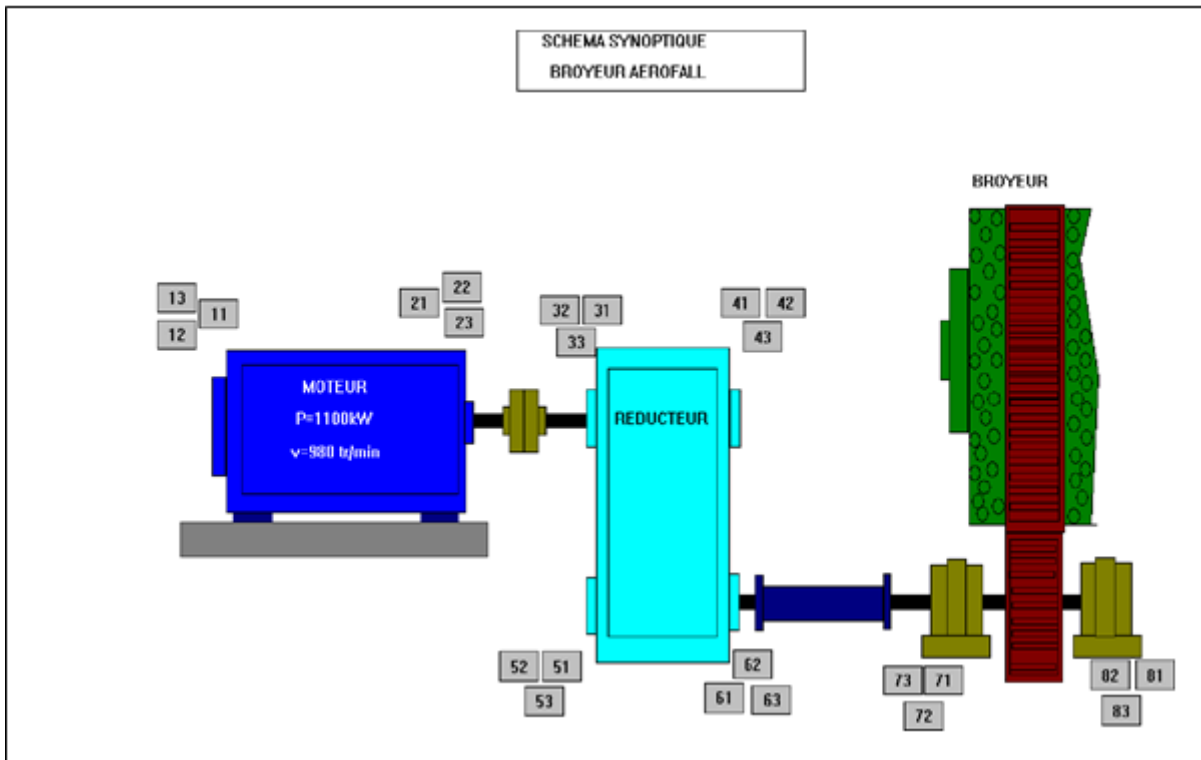
# parti pratique

**SUVEILLANCE – DU BROYEUR CRU  
AERO-FALL  
CIMENTERIE –SCHS**



## Schémas synoptique

- |                                 |   |          |
|---------------------------------|---|----------|
| ➤ Fréquence fondamentale moteur | : | 24.75 Hz |
| ➤ Fréquence Ventilateur         | : | 24.75 Hz |



## MOTEUR

### Analyse globale

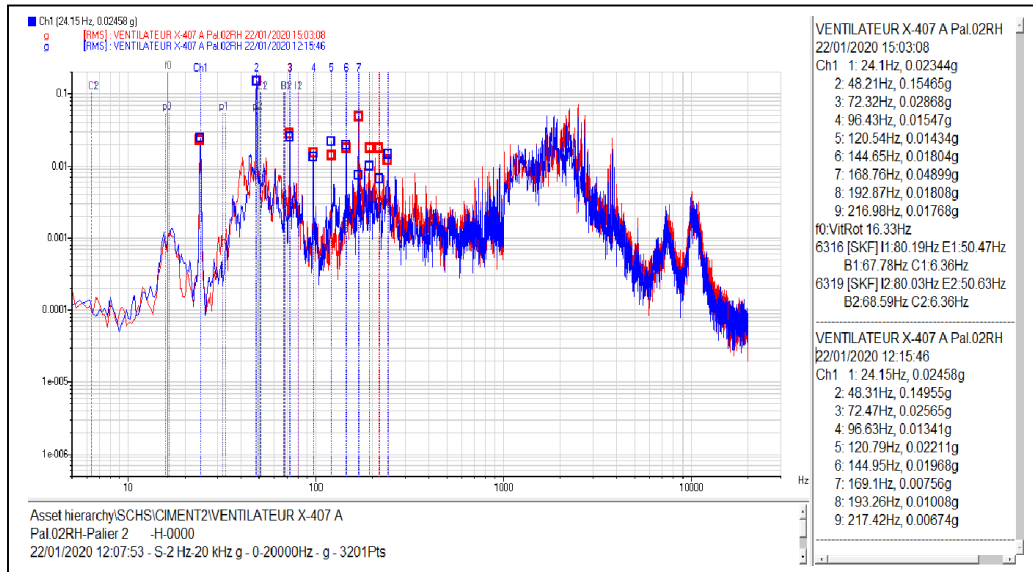
- Les niveaux vibratoires globaux relevés en vitesse sont élevés.
- Facteur défaut de roulement acceptable.

PALIER	1AX	1RH	1RV	2AX	2RH	2RV
NG Accel (G)	0,17	0,31	0,30	0,33	0,34	0,28
NG Vit (mm/s)	3,91	3,33	4,38	7,50	5,67	5,70



DEF	2,23	2,17	2,18	2,24	2,49	2,50
-----	------	------	------	------	------	------

- Amplitudes des premières harmoniques de la fréquence de rotation du moteur sont élevés 0.15g.



### **ACTIONS PRECONISEES :**

Prévoir le changement des paliers et des roulements

## **Conclusion générale**

La détermination de la loi de la détérioration des roulements revêt grande importance dans le domaine des machines tournantes, pour la maintenance. Au cours de cette étude, nous avons montré l'influence des conditions d'exploitation d'un roulement sur la durée de vie, et de donner la méthode de la maintenance réelle à suivre pour l'évaluation de la durée restante de survie pour bien approvisionner, et prévoir les arrêts de chaque machine tournante à l'avance et ce avec l'application de l'analyse vibratoire comme outil à fin de statuer sur l'état réel de notre roulement.

De manière générale, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers. Cette procédure nous permet d'avoir des informations sur l'apparition d'un défaut et sur sa provenance le plus rapidement possible, les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70.

En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses

approches et techniques répondant à la diversité des applications.

Dans ce mémoire nous avons intéressé au diagnostic des défauts lié aux roulements. Le roulement est l'un des éléments essentiels dans presque chaque machine tournante. Son intérêt réside sur le fait que cet élément forme un support de lien entre deux structures tout en facilitant leur mouvement en réduisant les forces de frottements entre eux. Le roulement dont on ne peut jamais négliger l'importance est l'élément le plus susceptible de tomber en panne dans une machine tournante, ce qui oblige une détection et un diagnostic précoce de ces pannes. Les défauts essentiels qui peuvent affecter un roulement sont : Le grippage dû à l'absence de lubrification, La corrosion due à un mauvais choix du lubrifiant, La corrosion de contact due au mauvais choix d'ajustements entre les bagues etc... l'analyse vibratoire qui a donné des bonnes résultats depuis des années. Cette méthode est basée essentiellement sur le traitement des signaux vibratoires.

Le 1<sup>er</sup> chapitre rappelle sur généralités du vibration les principes de base de l'analyse vibratoire appliquée à la maintenance conditionnelle, les notions de base de dynamique appliquée aux milieux continus. Leurs applications à des systèmes réels sont brièvement exposées.

Le 2<sup>ème</sup> chapitre a été consacré à un état de l'art sur le diagnostic et maintenance dans l'industrie, on a vu les étapes essentielles à suivre pour faire un diagnostic, puis on avait

présenté les différentes techniques de diagnostic, ou on a basé sur la technique qui utilise les outils de traitement de signal.

### *Références bibliographiques*

[1] Augeix D Technique de l'ingénieur (traité génie mécanique – analyse vibratoire.

[2] Document réalisé par : Jacky DUMAS (01dB-STELL (Groupe MVI technologies Version Février 2001.

[3]: Serge Dos Santos «COURS DE TRAITEMENT DU SIGNAL»

École Nationale d'Ingénieurs du Val de Loire Année 2008-2009.

[4] : Université de Caen « signaux aléatoire »

[5 ]: Claire BRENEUR, «éléments de maintenance préventive des machine tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements», thèse de l'université de l'INSA de Lyon, année 2002.

[6]: Technique de l'ingénieur « Essais de vibrations, Mesures et exploitation des résultats »

[7] CHIEMENTIN Xavier thèse de doctorat en mécanique « Localisation et

quantification des sources vibratoires dans le cadre d'une maintenance préventive conditionnelle en vue de fiabiliser le diagnostic et le suivi de l'endommagement des composants mécaniques tournants

: application aux roulements à billes » octobre 2007.

[8] Alain Boulenger, Christian Pachaud «Analyse vibratoire en maintenance».

[9] Amar Chiter «Détection et diagnostic des défauts de roulement : contribution à la maintenance des machines tournantes». Thèse de Magistère en optique et mécanique de précision UFAS 2001

[10]:Venkatasubramanian V, Rengaswamy R. Yin K., Kavuri S., "a review of process fault detection and diagnosis part quantitative model-based methods", Computer and Chemical Engineering, 2003.

[11] : Zwingelstein, G., (1995).Diagnostic des défaillances : Théorie et pratique pour les systèmes industriels, Editions Hermès.

[12] : BOUTICHE hamza(2015) « modélisation et diagnostic d'un réducteur de vitesse à un seul étage par analyse cepstrale »Thèse de master présenté à UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES

[13]: Boulenger A, Pachaud C : « Aide mémoire : Surveillance des machines par analyse des vibrations ». Edition Dunod, Paris 2009.

[14] :M. ZEMOURI, « contribution a la surveillance des systèmes de production a l'aide des réseaux de neurones dynamiques : application a la maintenance »,Thèse de doctorat présenté à l'université de Franche-Comte, France.2003.

[15] :DrRAHMOUNE Chemseddine (2011), « Analyse et traitement du courant statorique pour la détection des défauts dans les systèmes électromécaniques ».Mémoire de magister présenté UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES.

[16] : Frank, P.M., (1990).Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge Based Redundancy – A survey and New Results, Automatica, Vol. 26, pp. 459 474.

[17] :Leo H. Chiang, Evan L. Russell, et Richard D. Braatz (2001). Fault

[18] :R. Isermann (1993). Fault diagnosis of machines via parameter

estimation and knowledge processing - tutorial paper. *Automatica*, 29(4) :813-835, 1993.

[19] : J. Gertler (1997). Fault detection and isolation using parity relations. *Control Engineering Practice*, 5(5) :653–661, 1997.

[20] : Dubuisson, B., E. Boutleux, P. Dague, T. Denoeux, E. Didelet, Y. Gandvalet et M. Masson (2001). *Diagnostic, Intelligence Artificielle et reconnaissance de formes*, Ed. Hermes.

[21] : buivietphuong (2007). « Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite. Application à l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide ». Thèse de doctorat l'INPGRENOBLE .

[22] : Mr. TOUAFEK Ishak « Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L'EMD et des ondelettes (WT) » Mémoire de magister présenté à l'UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF UFAS (ALGERIE).

[23] Drouiche K., « Quelques techniques du traitement du signal pour la maintenance prédictive », Thèse de l'ENST de Paris, 1993.

[24] : Fran François Lafleur « L'organisation d'un programme de maintenance prédictive » 2003 [25] : BM 5 145 Technique de l'ingénieur « Analyse vibratoire des machines tournantes »

[26] Landolsi Foued « COURS DE TECHNIQUES DE SURVEILLANCE »

[27] : Tendence revue mesures 754 avril 2003 « les roulements, des composants à surveiller de près »

[28] Ali IBRAHIM « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée ». Thèse de Doctorat 10 Mars 2009.

[29] : Schenk S A « vibrations équilibrage sur le site : Application à la maintenance industrielle ». Edition Schenk S A. 1994.