

Université des Frères Mentouri Constantine  
Institut des Sciences et Techniques Appliquées

Cours de :

## Meca 06- MÉCANIQUE DE VIBRATION

Université des Frères Mentouri Constantine  
Institut des Sciences et Techniques Appliquées

## TABLE DES MATIERES

- Objectif
- Compétences visées
- Pré requis
- Résumé

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>5</b>
<b>2. LA MAINTENANCE CORRECTIVE OU ACCIDENTELLE.....</b>	<b>6</b>
2.1 La maintenance corrective palliative.....	7
2.2 La maintenance corrective curative.....	7
<b>3. LA MAINTENANCE PRÉVENTIVE.....</b>	<b>7</b>
3.1 La maintenance préventive systématique.....	8
3.2 La maintenance préventive conditionnelle.....	9
3.3 La maintenance préventive prévisionnelle ou prédictive.....	10
<b>4. LES TECHNIQUES DE LA MAINTENANCE PREDICTIVE.....</b>	<b>11</b>
4.1 Surveillance des vibrations.....	11
4.2 Thermographie.....	12
4.3 Tribologie.....	12
4.4 Inspections visuelles.....	13
<b>5. LA SURVEILLANCE PAR ANALYSE VIBRATOIRE. ....</b>	<b>13</b>
<b>6. DÉFINITION D'UNE VIBRATION.....</b>	<b>14</b>
<b>7. CARACTÉRISTIQUES D'UNE VIBRATION.....</b>	<b>14</b>
2.7.1 L'Amplitude.....	14
2.7.2 La fréquence.....	15
<b>8. LES DIFFÉRENTS DÉFAUTS D'UNE MACHINE TOURNANTE.....</b>	<b>15</b>
8.1 Le balourd.....	16

Université des Frères Mentouri Constantine  
Institut des Sciences et Techniques Appliquées

8.2 Le désalignement .....	17
8.3 Les défauts de roulements .....	17
8.4 Les défauts d'engrenages .....	19
9. SOURCE D'EXPLOITATION DES DONNÉES .....	20
9.1 Le domaine temporel .....	20
9.2 Domaine fréquentiel.....	21
9.3 Le cepstre.....	23
9.4 Ondelettes .....	23
9.5 Analyse d'enveloppe .....	23
9.6 Les indicateurs scalaires.....	24
9.6.1 RMS.....	24
9.6.2 Facteur crête.....	25
9.6.3 Kurtosis.....	25
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>26</b>
<b><u>QUESTIONS/REPNSES</u> .....</b>	<b>29</b>
<b><u>Problème 1</u> .....</b>	<b>34</b>
<b><u>Problème 2</u> .....</b>	<b>34</b>
<b><u>Exemple du 1<sup>er</sup> TP</u> .....</b>	<b>36</b>

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

**Objectif**

- Sensibilisation aux phénomènes vibratoires
  - Acquisition des méthodes d'analyse et de suivi vibratoire.
- 

**Compétences visées :**

- Être capable de caractériser des modes vibratoires d'un système en vue de son isolation.
- Pouvoir faire une analyse spectrale et/ou acoustique. Savoir mettre en place et paramétrer un suivi vibratoire

**Pré requis :**

Statique du solide, cinématique, cinétique, dynamique, mathématiques.

**Résumé**

Ce document a été destiné aux étudiants de Troisième année des filières scientifiques techniques des universités et écoles d'ingénieurs d'Algérie. Il répond au programme officiel du module « Analyse Vibratoire ».

Ce manuel contient une série de problèmes liés aux phénomènes de vibrations pour la maintenance conditionnelle qui **a pour buts :**

- La détection des défauts
- Le suivi de ces défauts (tendances)
- L'utilisation de la machine jusqu'à l'arrêt avant rupture.

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

## **1 INTRODUCTION**

Les méthodes de maintenance ont souvent recours à une information basée sur l'expérience pour prédire les performances futures. Elles sont formalisées en une discipline systématique qui se base sur une évaluation technique complète des événements survenus pendant les phases expérimentales ou d'exploitation. Les méthodes de maintenance apportent, à la conception de produit, des méthodes et des informations qui permettent de faire mieux qu'avant et surtout, de prévoir le comportement futur d'un matériel nouveau. [1].

Une première définition normative de la maintenance fut donnée par l'AFNOR en 1994 (norme NFX 60-010), à savoir : « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ». Depuis 2001, elle a été remplacée par une nouvelle définition, désormais européenne (NF EN 13306 X 60-319) : « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». La Fédération européenne des sociétés nationales de maintenance (European Federation of National Maintenance Societies ou EFNMS) propose une définition similaire en anglais: « All actions which have the objective of retaining or restoring an item in or to a state in which it can perform its required function. The actions include the combination of all technical and corresponding administrative,

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

managerial and supervision actions », c'est à dire : Toutes les actions qui ont pour objectif de garder ou de remettre une chose en état de remplir la fonction qu'on exige d'elle.

Les activités de maintenance se traduisent par des interventions sur des équipements pluri technologiques. Ces interventions supposent des connaissances scientifiques et techniques relatives tant aux systèmes, produits, processus, matériels et logiciels mis en œuvre qu'à leur fonctionnement et aux principes qui régissent leurs interactions [2].

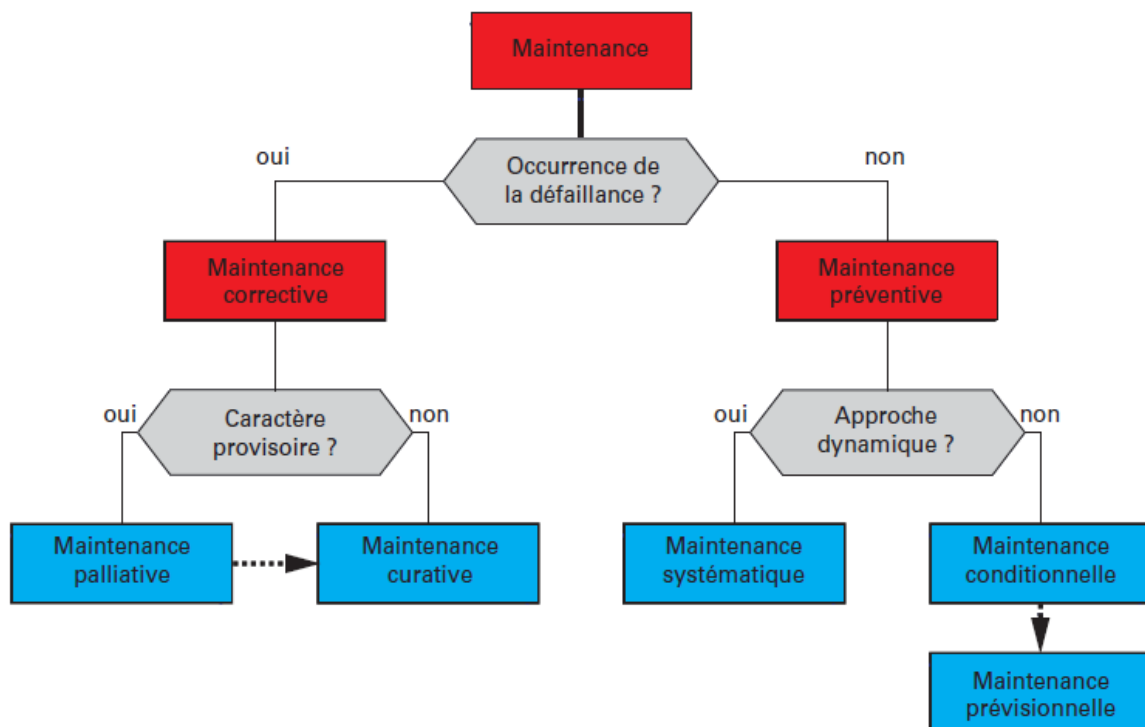


Figure 1. Formes de maintenance selon la norme NF EN 13306 (2010)

**2 LA MAINTENANCE CORRECTIVE OU ACCIDENTELLE**

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

C'est pour ça qu'on définit la maintenance corrective comme une maintenance effectuée après défaillance, la norme NF EN 13306 (2010) la définit comme une maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise [2].

La maintenance corrective est caractérisée par son caractère aléatoire et requiert des ressources humaines compétentes et des ressources matérielles à savoir : pièces de rechange et outillage, disponibles sur place. Ce type de maintenance est généralement adapté pour les équipements pour lesquels :

- Les conséquences de la panne ne sont pas critiques ;
- La réparation est facile et ne nécessite pas beaucoup de temps ;
- Les coûts d'investissements sont faibles.
- Deux formes de maintenance corrective peuvent être distinguées

### **2.1 La maintenance corrective palliative**

Elle est basée sur l'action de dépannage qui permet de remettre provisoirement le matériel à un niveau de performance acceptable qui peut être inférieur au niveau optimal, l'intervention est donc à caractère provisoire, la norme AFNOR [3] la décrit comme : « Action de maintenance corrective destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou une partie d'une fonction requise, appelée couramment dépannage ». La maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui doivent être suivies d'actions curatives.

### **2.2 La maintenance corrective curative**

Par opposition à ce qu'on appelle la maintenance corrective palliative, les interventions dans ce type de maintenance corrective sont de caractère définitif, l'intervention qui suit la défaillance permet le rétablissement du niveau de performance optimal du matériel, la norme AFNOR X60-319/NF EN 13306 2010 AFNOR Terminologie de la maintenance la définit comme : « une action de maintenance

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié pour lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des actions réalisées doit présenter un caractère permanent ».

### **3 LA MAINTENANCE PREVENTIVE**

Contrairement à la maintenance corrective qui attend l'occurrence de la panne pour intervenir en causant l'augmentation des coûts indirects liés à l'interruption de la production, la maintenance préventive consiste à intervenir sur un équipement avant que celui-ci ne soit défaillant, les interventions sont donc déclenchées avant les défaillances en fonction d'un ou plusieurs paramètres déterminés après la surveillance du comportement de la machine. On cherche alors à tendre vers un taux de défaillance nul en effectuant le maintien du niveau de performance requis avant l'apparition du défaut, la définition donnée par l'AFNOR [3] est la suivante : « Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien », elle a comme buts :

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

Trois formes de maintenance Préventive peuvent être distinguées :

#### **3.1 La maintenance préventive systématique**



**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

Lorsque l'intervention de maintenance est exécutée à intervalles fixes et prédéfinis, on parle de maintenance préventive systématique. Ce type de maintenance est déclenché suivant un échancier qui peut être : heures de travail, kilomètres effectués, etc.... et se traduit par le remplacement périodique de pièces, sans contrôle préalable et quel que soit l'état de dégradation des biens, la définition donnée par la norme européenne [3] est : « Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien ».

La périodicité des remplacements est déterminée selon deux méthodes : la première est de type bloc et la seconde, de type âge. La politique de remplacement de type âge suggère de remplacer l'équipement après T unités de temps de bon fonctionnement. La politique de type bloc suggère de remplacer l'équipement après une période prédéterminée de temps T, 2T, etc. indépendamment de l'âge et de l'état du composant.

La maintenance systématique nécessite donc de connaître le comportement du matériel ; les usures ; les modes de dégradations ; le temps moyen de bon fonctionnement entre deux avaries (MTBF) afin de déterminer les périodes d'interventions.

### **3.2 La maintenance préventive conditionnelle**

La maintenance préventive systématique peut conduire à un excès d'interventions inutiles, et donc à des gaspillages financiers pour l'entreprise. Pour pallier cela, d'autres formes de maintenance préventive, fondées sur la surveillance de l'état réel des biens sont apparues : les maintenances conditionnelle et prévisionnelle.

La maintenance conditionnelle est définie comme une : « Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent » [3]. C'est une maintenance subordonnée à un type d'événement prédéterminé. Divers outils comme l'analyse de la vibration et l'analyse d'huile, permettent de détecter les signes d'usure ou de dégradation de l'équipement. Ceci s'effectue en mesurant, à chaque inspection, la valeur d'un paramètre de contrôle tel que l'amplitude de déplacement, de vitesse ou d'accélération des vibrations, le degré d'acidité, ou la teneur de particules solides dans l'huile. Dans certains cas où des équipements de mesure ou des capteurs sont intégrés dans le système suivi, l'inspection ne se fait qu'après l'obtention d'un signal. D'une manière générale, l'action ne se déclenche que lorsque le paramètre de contrôle dépasse un seuil déterminé empiriquement, fixé par le constructeur ou par les normes de santé et de sécurité au travail.

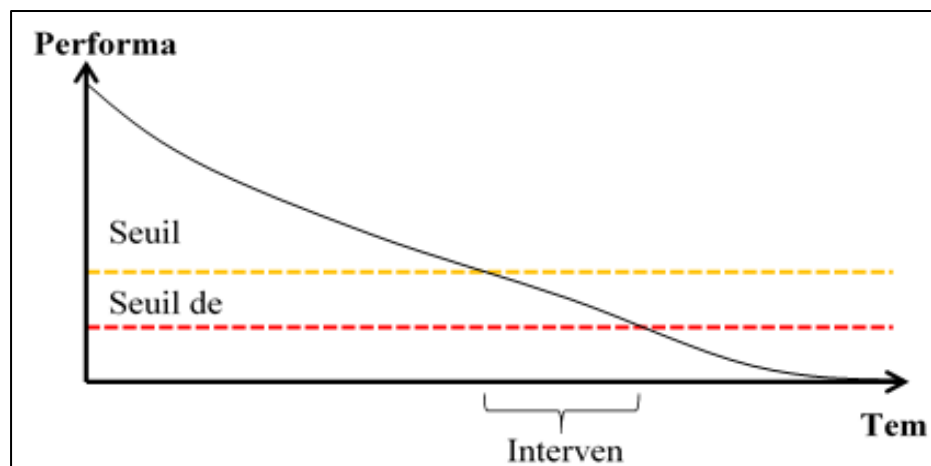


Figure 2. Principe du suivi en maintenance Conditionnelle

### 3.3 La maintenance préventive prévisionnelle ou prédictive

Comme la maintenance préventive, la maintenance prédictive a de nombreuses définitions. Pour certains travailleurs, la maintenance prédictive surveille la vibration des machines tournantes dans le but de détecter les problèmes naissants et d'éviter une défaillance catastrophique. Pour d'autres, elle surveille l'image infrarouge de l'appareillage électrique, des moteurs et d'autres équipements

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

électriques pour détecter les problèmes de développement. Le principe commun de la maintenance prédictive est qu'une surveillance régulière de l'état mécanique réel, de l'efficacité de fonctionnement et d'autres indicateurs des conditions de fonctionnement des trains de machines et des systèmes de traitement fournira les données nécessaires pour assurer l'intervalle maximal entre les réparations des pannes imprévues [4].

La maintenance préventive (PM) est un moyen efficace pour l'amélioration de la fiabilité [5]. En ce qui concerne la maintenance prédictive avancée, le principal défi est la prédiction de défaillance précise qui pourrait éviter une perte de fonctionnement importante au stade initial [6].

#### **4 LES TECHNIQUES DE LA MAINTENANCE PREDICTIVE**

Diverses technologies peuvent et doivent être utilisées dans le cadre d'un programme global de maintenance prédictive. Parce que les systèmes mécaniques ou les machines représentent la plupart des équipements de l'usine, la surveillance des vibrations est généralement l'élément clé de la plupart des programmes de maintenance prédictive.

Par conséquent, un programme complet de maintenance prédictive doit inclure d'autres techniques de surveillance et de diagnostic. Ces techniques comprennent la surveillance des vibrations, la thermographie, la tribologie, les paramètres de processus, l'inspection visuelle, les ultrasons et d'autres techniques d'essais non destructifs [4].

##### **4.1 Surveillance des vibrations**

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

Parce que la plupart des installations sont constituées de systèmes électromécaniques, la surveillance des vibrations est le principal outil de maintenance prédictive. Au cours des 20 dernières années, la plupart de ces programmes ont adopté des collecteurs de données monocanaux à microprocesseur et des logiciels Windows® pour acquérir, gérer, suivre et évaluer l'énergie vibratoire créée par ces systèmes électromécaniques. Bien que cette approche soit une méthodologie de maintenance prédictive précieuse, les limites de ces systèmes peuvent limiter les avantages potentiels [4].

La surveillance des installations concourt à limiter le niveau d'entretien préventif. L'analyse vibratoire constitue un outil de détection puis de diagnostic de défauts de fonctionnement des installations.

#### **4.2 Thermographie**

Définition AFNOR : « la thermographie est la technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène observée dans un domaine spectral de l'infrarouge ».

Thermographie signifie « écrire avec la chaleur » tout comme photographie signifie « écrire avec la lumière ». Ce cliché ainsi généré est appelé thermo gramme ou image thermique.

La démarche consiste donc à produire des images à partir de radiations thermiques invisibles. De ce fait, la thermographie infrarouge est un moyen instantané de détection des zones à problèmes, elle met en évidence des défauts que les méthodes plus conventionnelles ne peuvent déceler.

La thermographie est une technique de maintenance prédictive qui peut être utilisée pour surveiller l'état de la machinerie, des structures et des systèmes de l'usine, et non seulement de l'équipement électrique. Il utilise une instrumentation conçue pour surveiller l'émission d'énergie infrarouge (c'est-à-dire la température de surface) pour déterminer les conditions de fonctionnement. En détectant des

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

anomalies thermiques (c'est-à-dire, des zones qui sont plus chaudes ou plus froides qu'elles ne devraient l'être), un technicien expérimenté peut localiser et définir une multitude de problèmes naissants dans l'installation.

### **4.3 Tribologie**

Tribologie est le terme général qui se réfère à la dynamique de conception et de fonctionnement de la structure de support de palier-lubrification-rotor des machines. Deux techniques principales sont utilisées pour la maintenance prédictive: l'analyse de l'huile de graissage et l'analyse des particules d'usure.

### **4.4 Inspections visuelles**

L'inspection visuelle était la première méthode utilisée pour la maintenance prédictive. Presque depuis le début de la révolution industrielle, les techniciens de maintenance effectuaient quotidiennement des «walkdowns» des systèmes critiques de production et de fabrication afin d'identifier les défaillances potentielles ou les problèmes de maintenance susceptibles d'affecter la fiabilité, la qualité des produits et les coûts de production. Une inspection visuelle est toujours un outil de maintenance prédictive viable et devrait être incluse dans tous les programmes de gestion de la maintenance de l'installation totale [4].

D'autres techniques pouvant soutenir la maintenance prédictive comprennent les émissions acoustiques, les courants de Foucault, les particules magnétiques, les contraintes résiduelles et la plupart des méthodes non destructives traditionnelles.

## **5 LA SURVEILLANCE PAR ANALYSE VIBRATOIRE**

Tout l'équipement mécanique en mouvement génère un profil de vibration, ou signature, qui reflète son état de fonctionnement. Ceci est vrai indépendamment de la vitesse ou si le mode de fonctionnement est la rotation, le mouvement alternatif ou le mouvement linéaire. L'analyse des vibrations est applicable à tous les équipements

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

mécaniques, bien qu'une hypothèse courante, mais non valide, soit qu'elle soit limitée à de simples machines tournantes dont les vitesses de fonctionnement dépassent 600 tours par minute (tr / min). L'analyse de profil de vibration est un outil utile pour la maintenance prédictive, les diagnostics et bien d'autres utilisations.

La maintenance prédictive est devenue synonyme de surveillance des caractéristiques vibratoires des machines tournantes pour détecter les problèmes de bourgeonnement et prévenir les pannes catastrophiques. Il a été constaté que la surveillance des vibrations est un élément essentiel de tout bon programme de maintenance prédictive pour toute machine de l'usine [7].

Cependant, l'analyse des vibrations ne fournit pas les données nécessaires pour analyser l'équipement électrique, les zones de perte de chaleur, l'état de l'huile de graissage ou d'autres paramètres généralement évalués dans un programme de gestion de la maintenance. Par conséquent, un programme de maintenance prédictive de l'installation totale doit inclure plusieurs techniques, chacune conçue pour fournir des informations spécifiques sur l'équipement de l'usine.

## **6 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. Une vibration est généralement traduite par :

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

## **7 CARACTÉRISTIQUES D'UNE VIBRATION**

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

### 7.1 L'Amplitude

On appelle amplitude d'un mouvement vibratoire la valeur de ses écarts par rapport à sa position d'équilibre. De cette définition générale, la complexité d'un signal vibratoire réel conduit à définir plusieurs grandeurs d'amplitude :

L'Amplitude crête ( $A_c$ ) : Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.

L'Amplitude crête à crête ( $A_{cc}$ ) : Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné. Dans le cas d'une vibration sinusoïdale, elle est parfois appelée amplitude double. Il est noté que :

$$A_{cc} = 2A_c \quad (1)$$

L'Amplitude efficace ( $A_{eff}$ ) ou RMS (Root Mean Square) : Elle indique l'énergie donnée par le mouvement vibratoire.

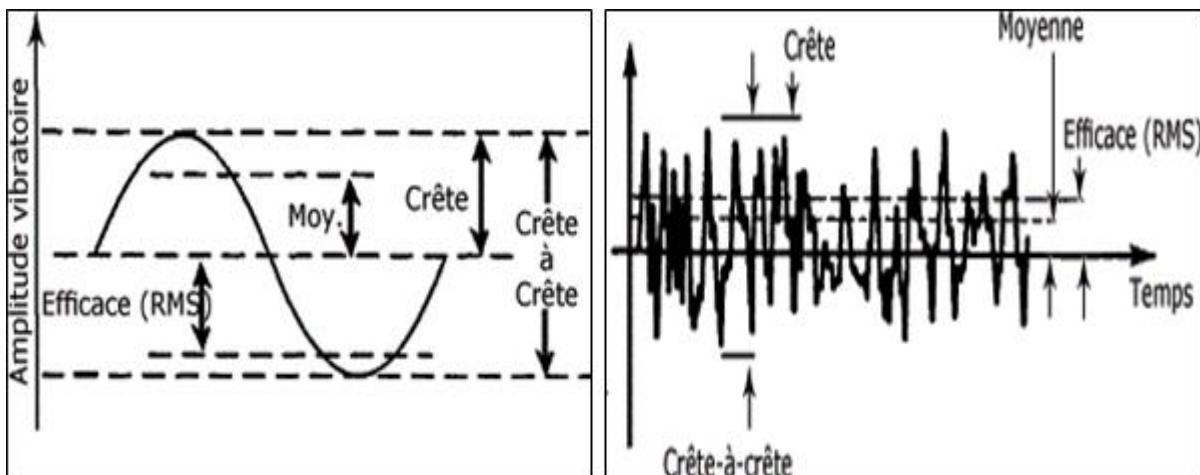


Figure 3. Caractéristiques d'une vibration Sinusoïdale ou quelconque

### 7.2 La fréquence

La fréquence représente la cadence de répétition d'un phénomène ou le nombre de fois qu'il se reproduit en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisi est la seconde, la fréquence s'exprime en Hertz (Hz). Une vibration qui se produira 50 fois/seconde aura donc une fréquence de 50 Hz. La fréquence  $f$  est l'inverse de la période  $T$  qui est la durée d'un cycle.

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

## **8 LES DIFFÉRENTS DÉFAUTS D'UNE MACHINE TOURNANTE**

Le déséquilibre de masse, le frottement du rotor, le désalignement de l'arbre, les défaillances des engrenages et les défauts de palier sont des exemples de défauts pouvant conduire à la panne de la machine [8].

Outre la détection de l'apparition précoce et la gravité d'un défaut, il existe des systèmes qui peuvent également être conçus pour identifier les composants qui se détériorent et estimer l'intervalle de temps pendant lequel l'équipement surveillé peut encore fonctionner avant la défaillance [9]. Ces systèmes mesurent et interprètent en continu des signaux (par exemple, vibration, émission acoustique, thermographie infrarouge, etc.), qui fournissent des informations utiles pour identifier la présence de symptômes défectueux [10].

### **8.1 Le balourd**

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor, ce qui caractérise le balourd. Il en résulte que l'arbre en rotation est soumis à des efforts centrifuges qui le déforment. Ces efforts se traduisent par des vibrations liées à la fréquence de rotation.

Les vibrations induites par le déséquilibre sont la cause d'erreurs fondamentales dans des systèmes en mouvement et peuvent induire des surcharges considérables sur les outils de coupe lors d'opérations d'usinage [11].

Les déséquilibres proviennent en général de défauts d'usinage, d'assemblage des rotors ou de montage. En fonctionnement, les rotors peuvent aussi se déformer sous l'effet d'échauffements dissymétriques causant le balourd. Le balourd se



Université des Frères Mentouri Constantine  
Institut des Sciences et Techniques Appliquées

manifeste généralement dans les spectres vibratoires par un pique qui a une fréquence égale à la fréquence de rotation  $F_0$ .

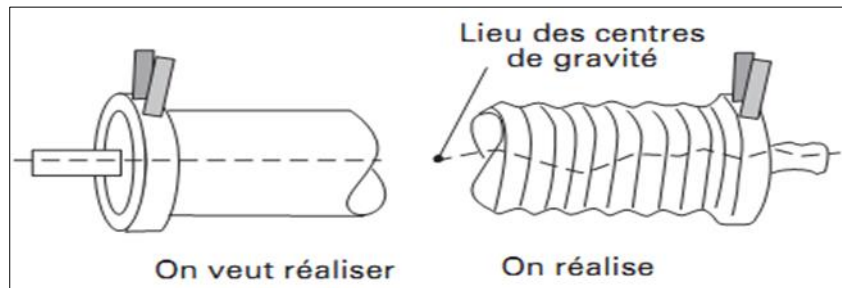


Figure 4. Défauts d'usinage causant le balourd

## 8.2 Le désalignement

Un arbre est une partie essentielle de la machine tournante ; il est utilisé pour transmettre la puissance et le mouvement [12].

Le désalignement de l'arbre est un problème commun dans les machines tournantes qui cause plus de 70% des problèmes de vibration [13]. Il se produit lorsque les axes de rotation de deux (ou plus) arbres de machines ne sont pas alignés. Cela augmente les forces axiales et radiales sur les roulements, joints et accouplements, en induisant ainsi l'usure de ces composants et une flexion de l'arbre en réduisant la quantité de puissance transmise [14].

Même si initialement, ou après ajustement, l'arbre est aligné, pendant le fonctionnement, divers facteurs tels que la croissance thermique, la pression de la tuyauterie et les mouvements de fondation modifieront l'alignement [15]. Le désalignement se manifeste généralement dans les spectres vibratoires par un pique qui a une fréquence égale à 2 fois la fréquence de rotation ( $2F_0$ ).

Université des Frères Mentouri Constantine  
Institut des Sciences et Techniques Appliquées

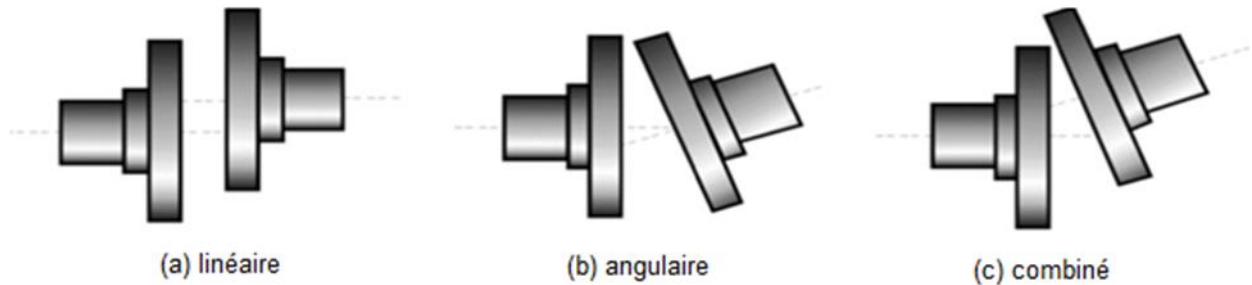


Figure 5. Les types de mauvais alignements

### 8.3 Les défauts de roulements

Les paliers sont des composants critiques des machines tournantes et la surveillance de leur état est importante pour éviter les défaillances catastrophiques et réduire les temps d'arrêt des machines [16].

Douze avaries principales peuvent être retenues et proviennent de quatre familles de causes :

Avaries liées à la charge et à la vitesse appliquée : écaillage, grippage, coloration et détérioration des cages.

Avaries liées à la lubrification : grippage, rupture des bagues par contraintes thermiques, coloration, détérioration des cages et écaillage,

Avaries liées au montage : empreintes des corps roulants par déformation plastique, traces de coups, certaines détériorations des cages, corrosion par contact, certains écaillages provenant des défauts d'alignement et de circularité.

Avaries liées à l'environnement : usure, empreintes, corrosion, cratères, cannelures créés par le passage d'un courant électrique.

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**



Figure 6. Défauts de roulements

Les pistes des roulements et les billes sont chargées cycliquement, ce qui engendre à la surface une dégradation par fatigue qui se présente sous la forme de fissures qui conduisent à l'écaillage et puis à la ruine du roulement. Ces fissures peuvent être d'origine superficielle ou provenir de la dégradation de la sous couche du matériau. Cette ruine peut être détectée sur un spectre à partir de l'identification des fréquences caractéristiques du roulement. Celles-ci correspondent aux fréquences des impacts lorsqu'un élément roulant rencontre un défaut. Elles sont données en écrivant que les vitesses aux points de contact entre billes et bagues sont nulles. Elles dépendent du diamètre des éléments roulants ( $d$ ), du diamètre moyen du roulement ( $D$ ), du nombre d'éléments roulants ( $N$ ), de l'angle de contact ( $\phi$ ) et de la fréquence de rotation ( $f_r$ ). Elles sont données par les formules :

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

Tableau 1. Les fréquences caractéristiques des défauts de roulements

Défaut	Fréquence
Un défaut localisé sur la bague externe	$f_{be} = \frac{N}{2} f_r \left[ 1 - \frac{d}{D} \cos \varphi \right]$ (3)
Un défaut localisé sur la bague interne	$f_{bi} = \frac{N}{2} f_r \left[ 1 + \frac{d}{D} \cos \varphi \right]$ (4)
Un défaut localisé sur un élément roulant	$f_{er} = \frac{D}{d} f_r \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \varphi \right)^2 \right]$ (5)
Un défaut localisé sur la cage	$f_c = \frac{1}{2} f_r \left[ 1 - \frac{d}{D} \cos \varphi \right]$ (6)

#### 8.4 Les défauts d'engrenages

Les engrenages sont des composants importants de presque toutes les machines utilisées dans l'environnement industriel. Par conséquent, la détection d'un défaut dans ces organes doit être détectée à l'avance pour éviter une défaillance catastrophique [17].

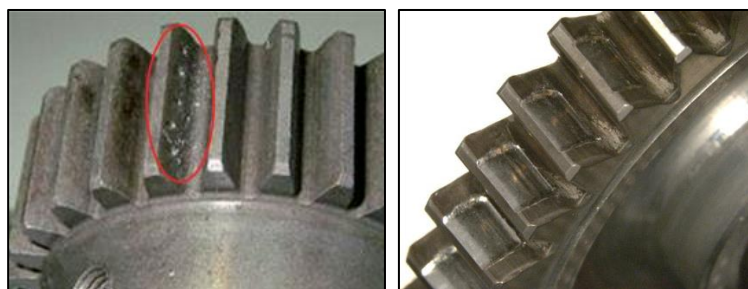


Figure 7 défauts d'engrenages

Le défaut d'engrenage se manifeste généralement dans les spectres vibratoires par un pic qui a une fréquence égale à :

$$f = z \cdot f_0 \quad (7)$$

Après avoir décrit les principales manifestations vibratoires des défauts de fonctionnement des machines, cet article examine les stratégies de détection, de

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

surveillance et la démarche de diagnostic s'appuyant sur l'analyse vibratoire et permettant de déduire une politique et des gestes de maintenance. [6]

## **9 SOURCE D'EXPLOITATION DES DONNEES**

Le processus d'analyse des vibrations nécessite de rassembler des données machine complexes et de les déchiffrer. Contrairement aux courbes de vibrations théoriques simples, le profil d'un équipement est extrêmement complexe car il existe généralement de nombreuses sources de vibrations. Chaque source génère sa propre courbe, mais celles-ci sont essentiellement additionnées et affichées sous la forme d'un profil composite. Ces profils peuvent être affichés sous deux formats : domaine temporel et domaine fréquentiel [4].

### **9.1 Le domaine temporel**

Les données de vibration tracées en fonction de l'amplitude et du temps sont appelées un profil de données dans le domaine temporel (figure 2.9). Les diagrammes temporels doivent être utilisés pour toutes les machines linéaires et à mouvement alternatif. Ils sont utiles dans l'analyse globale des trains de machines pour étudier les changements dans les conditions de fonctionnement ; Cependant, les données dans le domaine temporel sont difficiles à utiliser. Parce que toutes les données de vibration dans ce type de tracé sont additionnées pour représenter le déplacement total à un moment donné, il est difficile de voir directement la contribution d'une source de vibration particulière.

Université des Frères Mentouri Constantine  
Institut des Sciences et Techniques Appliquées

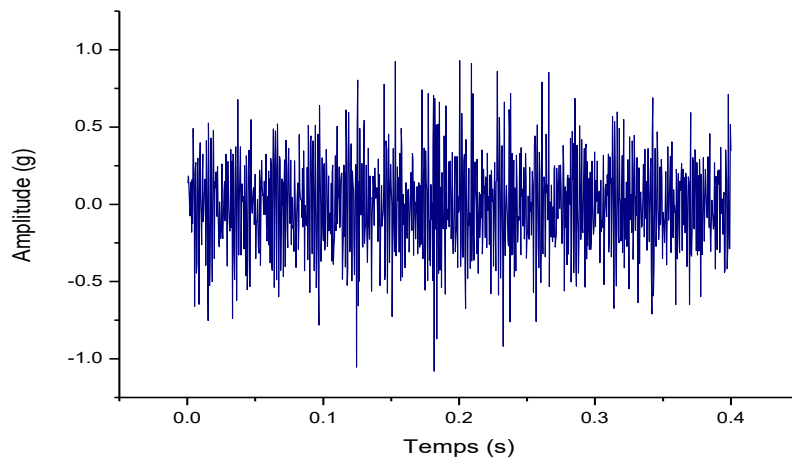


Figure 8. Spectre temporel

## 9.2 Domaine fréquentiel

D'un point de vue pratique, les fonctions simples de vibration harmonique sont liées aux fréquences circulaires des composants rotatifs ou mobiles. Par conséquent, ces fréquences représentent un multiple de la vitesse de fonctionnement de base de la chaîne cinématique (Figure 10). La détermination de ces fréquences est la première étape fondamentale dans l'analyse de l'état de fonctionnement de la machine.

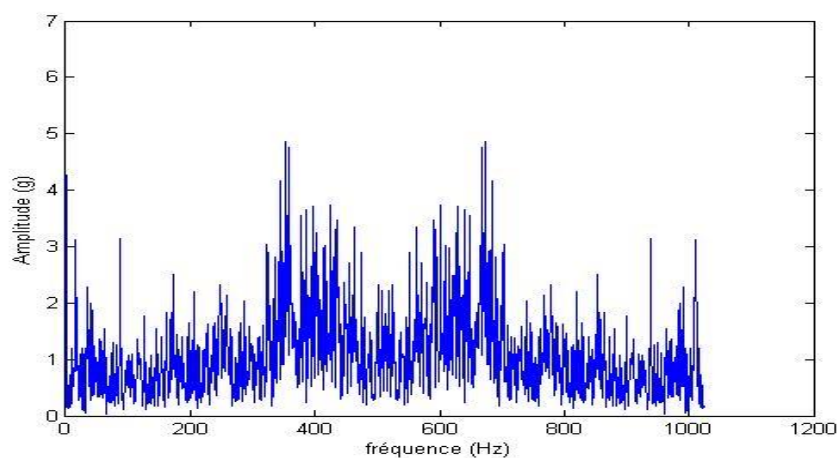


Figure 9. Spectre fréquentiel

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

Les données de domaine de fréquence sont obtenues en convertissant des données de domaine temporel en utilisant une technique mathématique appelée Transformée de Fourier Rapide (FFT). La FFT permet à chaque composante de vibration d'un spectre machine-train complexe d'être représentée comme un pic de fréquence discrète. L'amplitude du domaine fréquentiel peut être le déplacement par unité de temps lié à une fréquence particulière, qui est représentée par l'axe Y en fonction de la fréquence en tant qu'axe X. Ceci est opposé aux spectres du domaine temporel qui additionnent les vitesses de toutes les fréquences et trace la somme en tant qu'axe Y en fonction du temps en tant qu'axe X.

Les formules (8) et (9) représentent respectivement la transformée de Fourier et sa variante discrète.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (8)$$

$$X(f) = \sum_{k=0}^{N_e-1} x(k).e^{-2i\pi f \frac{k}{N}} \quad (9)$$

Le théorème de PARCEVAL exprime que l'énergie contenue dans le signal temporel est égale à celle dans sa représentation fréquentielle. A partir de là nous pouvons parallèlement construire sur les signaux de puissance finie des spectres de puissance (Densité spectrale de puissance DSP), représentatifs du carré du module de la transformée de Fourier, rapportée au temps d'observation [18].

### 9.3 Le cepstre

L'analyse cepstrale est une technique complémentaire d'analyse, développée sur plusieurs variantes, dont les plus utilisées sont le cepstre complexe ; définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier,

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

s'exprime selon une variable uniforme au temps, et est représentée par la formule (10) [19].

$$C = TF^{-1} [Ln|X(f)|] \quad (10)$$

Le cepstre de puissance définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal du module de la transformée de Fourier du signal, représenté sur l'équation (2.11)

$$C = TF^{-1} [Ln|X(f)|]^2 \quad (11)$$

#### 9.4 Ondelettes

Contrairement à la STFT, La transformée d'ondelette est une méthode de traitement de signaux possédant une résolution adaptative à la taille de l'objet ou du détail analysé.

#### 9.5 Analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est une technique de détection précoce des défauts de type choc. Pour ce faire, le signal vibratoire est relevé dans une bande fréquentielle large, et filtré autour d'une fréquence de résonance. Le signal est ensuite redressé « en mettant au positive toutes les valeurs négatives », et la transformée d'Hilbert est appliquée afin de relever son enveloppe et ainsi dissocier, le signal modulé (fréquences de résonance) du signal modulant correspondant au défaut recherché. Le diagnostic final pourra par la suite être rendu après analyse spectrale de l'enveloppe [20].



**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

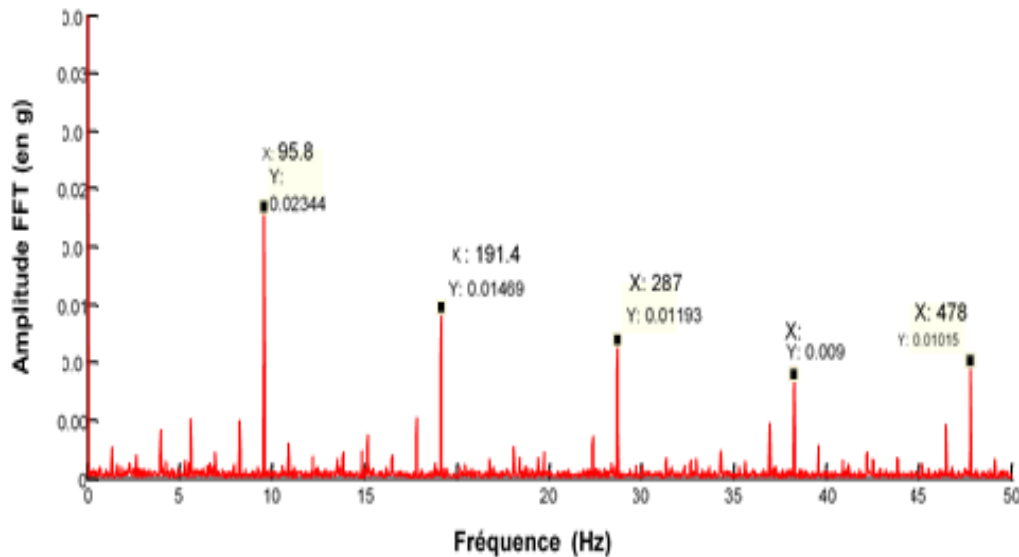


Figure 10. FFT de l'enveloppe du signal temporel (avec filtre + hanning) (g)

### 9.6 Les indicateurs scalaires

Un signal brut ou ayant fait l'objet d'un traitement préalable (filtrage, démodulation...), est caractérisé par les grandeurs suivantes :

- L'amplitude (valeur efficace, amplitude crête, taux de modulation...);
- La distribution d'amplitude (facteur de crête, Kurtosis);
- La composition spectrale (amplitude d'une composante spectrale, valeur efficace d'une famille de composantes, taux d'harmoniques...)

#### 9.6.1 RMS

Le RMS, nommé aussi valeur efficace ou moyenne quadratique d'un signal, correspond à la racine carrée du moment d'ordre deux et est calculé comme montré par l'équation (12).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [s(t)]^2} \quad (12)$$

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

Le RMS est l'un des premiers indicateurs utilisé en industrie. Cela est dû notamment à sa simplicité et à sa rapidité d'exécution. Une variation excessive du niveau RMS signifie en général un changement de l'état de fonctionnement et donc une défaillance. L'un des inconvénients majeurs de l'utilisation du RMS c'est qu'il donne généralement une alarme assez tardive, notamment pour le cas des défauts de roulements, où la variation du signal due à l'apparition du défaut est masquée par d'autres composantes d'amplitudes plus élevées.

### 9.6.2 Facteur crête

Le facteur crête FC est un indicateur plus spécifique, qui permet d'observer plus près le signal vibratoire. Le suivi du facteur crête permet un dépistage plus précoce des défauts en mesurant le rapport entre la valeur maximale du module du signal (valeur crête) sur la valeur efficace, comme montré par l'équation (13)

$$FC = \frac{\text{Valeur crête}}{\text{RMS}} = \frac{\text{Sup } |s(t)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [s(t)]^2}} \quad (13)$$

### 9.6.3 Kurtosis

Plus spécifique au dépistage des défauts de roulements, le Kurtosis est une grandeur statistique permettant d'analyser le caractère « pointu » ou « plat » d'une distribution, et donc d'observer la forme du signal. Dérivé du moment statistique d'ordre quatre, il est défini comme le rapport de la valeur moyenne du signal élevée à la puissance 4 sur le carré de son énergie. Il est donné par la formule (14)

$$Kurtosis = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (S(t) - \bar{S})^4}{\left[ \frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (S(t) - \bar{S})^2 \right]^2} \quad (14)$$

Université des Frères Mentouri Constantine  
Institut des Sciences et Techniques Appliquées

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] D.J. Jagannath and A. I. Selvakumar, " Superior foetal electrocardiogram signal elicitation using a novel artificial intelligent Bayesian methodology", *Applied Soft Computing*, Vol. 37, pp. 1002-1017, 2015.  
DOI: 10.1016/j.asoc.2015.03.010
- [2] Y. Debbah, A. Cherfia, A. Saadi, « Application de la méthode des réseaux de neurones pour la prédiction des vibrations induites par des défauts combinés (désalignement et balourd) », *The Second International Conference of Mechanics (ICM'15)*. Constantine, Algérie., pp. 320-327, 25-26 Novembre 2015.
- [3] R. GOURIVEAU, K. MEDJAHER, E. RAMASSO et N. ZERHOUNI, « PHM - Prognostics and health management - De la surveillance au pronostic de défaillances de systèmes complexes », *Éditions Techniques de l'Ingénieur*, mt9570 (16 pages). 2013.
- [4] X60-319/NF EN 13306 2010 AFNOR Terminologie de la maintenance.
- [5] R. Keith Mobley, " AN INTRODUCTION TO PREDICTIVE MAINTENANCE", Second Edition- ISBN: 978-0-7506-7531-4- A volume in Plant Engineering.
- [6] S. K. Yang, "A Condition-Based Failure-Prediction and Processing-Scheme for Preventive Maintenance", *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY*, Vol. 52 (3), pp. 373 – 383, 2003. DOI: 10.1109/TR.2003.816402.
- [7] Z. Cai, S. Sun, S. Si, N. Wang, "Research of Failure Prediction Bayesian Network Model", *-IEEE, IE&EM '09*. 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2009.  
DOI: 10.1109/ICIEEM.2009.5344265.
- [8] R.O. Saied, M.S. Mostafa, and H.A. Hussein, "Predictive Maintenance Program Based on Vibration Monitoring" *Design and Modeling of Mechanical Systems*, II- Springer, pp. 651-660, 2015.  
DOI: 10.1007/978-3-319-17527-0\_65.
- [9] B. Samanta, K. Al-Balushi, and S. Al-Araimi, "Bearing fault detection using artificial neural networks and genetic algorithm", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, pp. 366–377, 2004.  
DOI: 10.1155/S1110865704310085.
- [10] B. Lazzerini and S. Volpi, "Classifier ensembles to improve the robustness to noise of bearing fault diagnosis", *Pattern Analysis and Applications*, Vol. 16 (2), pp. 235–251, 2013.  
DOI: 10.1007/s10044-011-0209-y.
- [11] L. Batista, B. Badri, R. Sabourin and M. Thomas, "A classifier fusion system for bearing fault diagnosis", *Expert Systems with Applications*, Vol. 40 (17), pp. 6788–6797, 2013.

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

- DOI: 10.1016/j.eswa.2013.06.033.
- [12] H. Caoa, T. Dörgelohb, O. Riemerb and E. Brinksmeierb, "Adaptive separation of unbalance vibration in air bearing spindles", *Procedia CIRP*, Volume 62, pp. 357-362, 2017.  
DOI: 10.1016/j.procir.2016.06.069.
- [13] A. Simm, Q. Wanga, S. Huan and W. Zhao, "Laser based measurement for the monitoring of shaft misalignment", *Measurement*, Vol. 87, pp. 104–116, 2016.  
DOI: 10.1016/j.measurement.2016.02.034.
- [14] T.H. Patel and A.K. Darpe, "Experimental investigations on vibration response of misaligned rotors", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23 (7), pp. 2236-2252, 2009.  
DOI: 10.1016/j.ymsp.2009.04.004.
- [15] Y. Fang, H. Cho and M. Jeong, "Health monitoring of a shaft transmission system via hybrid models of PCR and PLS", *Sixth SIAM International Conference on Data Mining*, p. 554-558, 2006.  
DOI: 10.1137/1.9781611972764.59.
- [16] A. Kr Jalan and A.R. Mohanty, "Model based fault diagnosis of a rotor bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 327 (3–5), pp. 604-622, 2009.  
DOI: 10.1016/j.jsv.2009.07.014.
- [17] J.L.F. Chacon, V. Kappatos, W. Balachandran and TH. Gan, "A novel approach for incipient defect detection in rolling bearings using acoustic emission technique", *Applied Acoustics*, Vol. 89, pp. 88-100, 2015.  
DOI: 10.1016/j.apacoust.2014.09.002.
- [18] L.S. Dhamandea and M.B. Chaudharib, "Detection of Combined Gear Bearing Fault in Single Stage Spur Gear Box Using Artificial Neural Network", *Procedia Engineering*, Vol. 144, pp. 759-766, 2016.  
DOI: 10.1016/j.proeng.2016.05.082
- [19] Ilyés KHELFI, « DIAGNOSTIC DES MACHINES TOURNANTES PAR LES TECHNIQUES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE », thèse de doctorat- UNIVERSITE BADI MOKHTAR – ANNABA-2014.
- [20] R.B. Randall. "Vibration-based Condition Monitoring INDUSTRIAL, AEROSPACE AND AUTOMOTIVE APPLICATIONS". John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2011.  
DOI: 10.1002/9780470977668.

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

## QUESTIONS/REPOSES

Répondez brièvement aux questions ci-dessous.

1<sup>ère</sup> partie

1) Citez les différents défauts d'une machine tournante ?

Réponse (1) :

- Balourd : (Balourd statique, Balourd de couple et Balourd dynamique)
  - Désalignement (parallèle, Angulaire et mixte)
  - Roulements (bague interne, bague externe, élément roulent et la cage)
  - Engrenage
  - Courroie
  - Chocs périodiques
  - Phénomènes magnétiques (électrique)
  - Paliers lisses hydrodynamiques
  - Les phénomènes particuliers aux turbomachines
- 

2) Expliquez le phénomène de balourd ?

Réponse (2) :

Le phénomène de balourd mécanique est lié à une répartition non homogène de la masse autour de l'axe de rotation : L'axe d'inertie de l'arbre n'est pas confondu avec l'axe de rotation. Différents types de balourd peuvent être identifiés : Balourd statique, Balourd de couple et Balourd dynamique

---

3) Comment diagnostiquer une machine tournante par analyse vibratoire ?

Réponse (3) :

Programmer la machine et les paramètres associés dans la base de données

- Création des machines et des voies de mesure
  - Définition des paramètres d'acquisition (périodicité, type de mesures, gammes d'analyse,...)
  - Définition des paramètres vibratoires
- 

4) Quand est-ce qu'on peut dire qu'on a diagnostiqué un problème d'une machine tournante par analyse vibratoire ?

Réponse (4) :

Après la création des voies de mesures dans la base de données et définir les paramètres d'acquisitions et les paramètres de mesures on doit :

- Réalisation des signatures vibratoires initiales

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

- Détermination des seuils des paramètres vibratoires
  - Suivre les machines en créant un historique et déterminer détecter les défauts et leurs gravité
  - Diagnostiquer et déterminer les défauts par leurs fréquences.
- 5) Quelles sont les informations dont nous avons besoin pour déterminer l'origine et la criticité (la gravité) d'un défaut ?

**Réponse (5) :**

- Calculer la fréquence de chaque défaut
  - S'assurer du bon serrage et le graissage des parties nécessaires
  - Choix du bon nombre d'échantillonnage ainsi que la fréquence d'échantillonnage
  - S'assurer des seuils d'alarme et de danger selon les valeurs normalisées
- 

- 6) Quand est-ce qu'on peut établir un spectre de référence ?

**Réponse (6) :**

On peut établir un spectre de référence lorsque la machine est neuve ou après une nouvelle opération de maintenance

---

- 7) A quoi ça sert le spectre de référence ?

**Réponse (7) :**

Le spectre de référence sert à :

- Comparer l'état de machine après fonctionnement
  - Déterminer les seuils d'alarme et de danger des défauts
- 

- 8) La position du capteur est pertinente pour diagnostiquer une machine tournante. Citez les différentes positions du capteur ? quels sont les critères à prendre en considération pour avoir une meilleure information sur un défaut ?

**Réponse (8) :**

Les positions du capteur sont :

1. Radiale Horizontale
2. Radiale Verticale
3. Radiale Oblique
4. Axiale

Pour avoir une meilleure information sur le défaut on doit s'assurer du:

- bon serrage des vis et des écrous
  - bon graissage
  - bon choix du capteur
  - bon choix de la fréquence et du nombre d'échantillonnage
  - bonne fixation du capteur
- 

- 9) Comment interpréter un spectre ?

**Réponse (9) :**

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

Pour interpréter un spectre vibratoire on doit s'assurer d'une bonne prise de spectre ensuite utiliser le spectre fréquentiel pour déterminer le défaut, si on trouve une difficulté de traitement, on utilise le spectre temporel. D'autres techniques utilisées comme la détection d'Enveloppe et Le Zoom

**2<sup>ème</sup> partie**

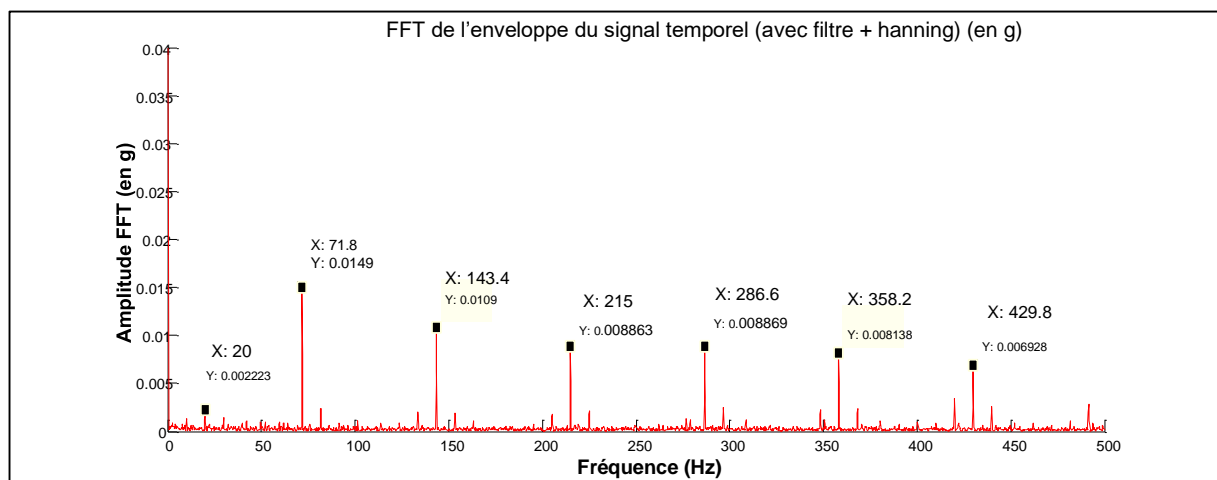
Une machine tournante est composée d'un moteur électrique, un accouplement, deux paliers à roulement, un arbre et un disque. A l'aide d'un capteur de vibration (accéléromètre) posé sur l'un des paliers, on a enregistré les spectres représentés ci-dessous.

Déterminez à quels défauts potentiels correspondent les fréquences du spectre montrées dans chaque figure ?

**Spectre 1 :**

La machine tourne à 600 tr/min.

Fréquence de rotation	Défaut bague externe	Défaut bague interne
Ordre 10	Ordre 72.4	Ordre 97.6



- Ce spectre présente un défaut de la **bague externe** de roulement, ce défaut est caractérisé par une fréquence de l'ordre 71.8 Hz et d'amplitude de 0.015 g qui est répété en harmonique 143.4 Hz, 215 Hz, 286.6 Hz.... ( $F_e$ ,  $2F_e$ ,  $3F_e$ ,  $4F_e$ ...)

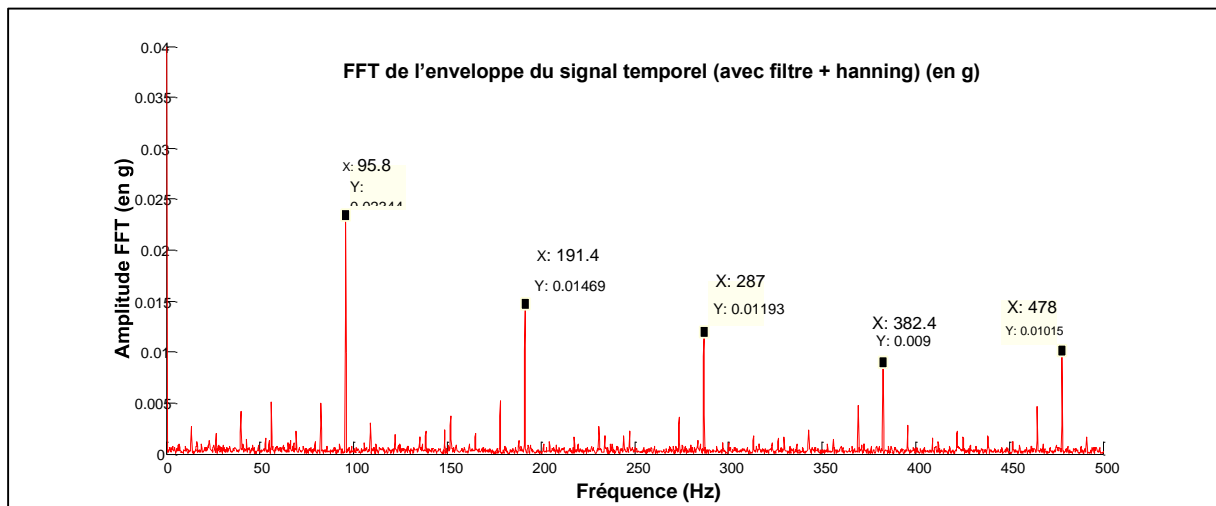
**Spectre 2 :**

Machine tourne à 800 tr/min

Fréquence de rotation	Défaut bague externe	Défaut bague interne
-----------------------	----------------------	----------------------

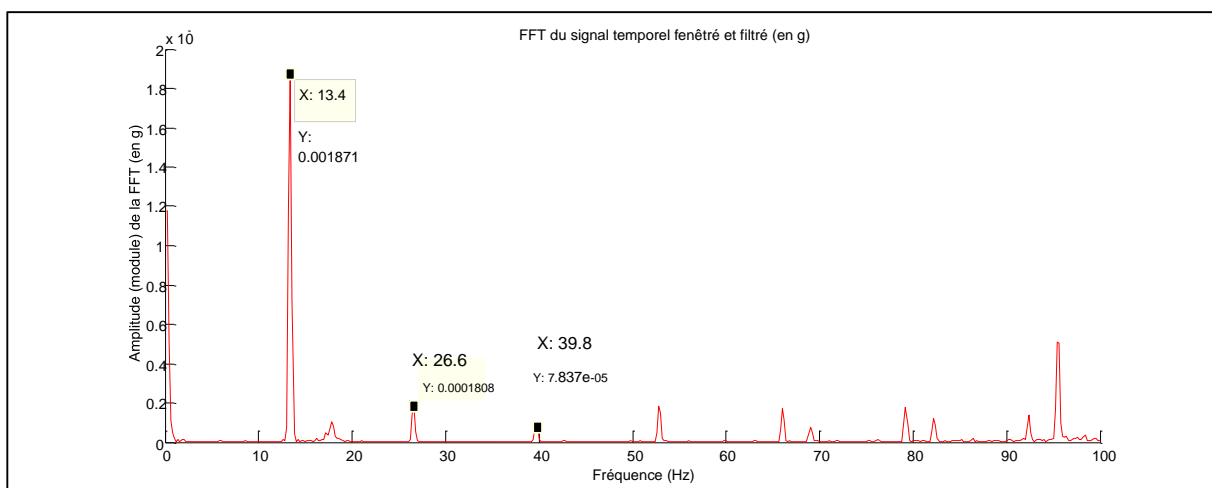
**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

Ordre 13.33	Ordre 72.4	Ordre 97.6
-------------	------------	------------



- Ce spectre présente un défaut de la **bague interne** de roulement, ce défaut est caractérisé par une fréquence de l'ordre 95.8 Hz et d'amplitude de 0.023 g qui est répété en harmonique 191.4 Hz, 287Hz, 382.4 Hz.... ( $F_i, 2F_i, 3F_i, 4F_i, \dots$ )

Une machine tourne à 800 tr/min.



**Spectre 3 :**

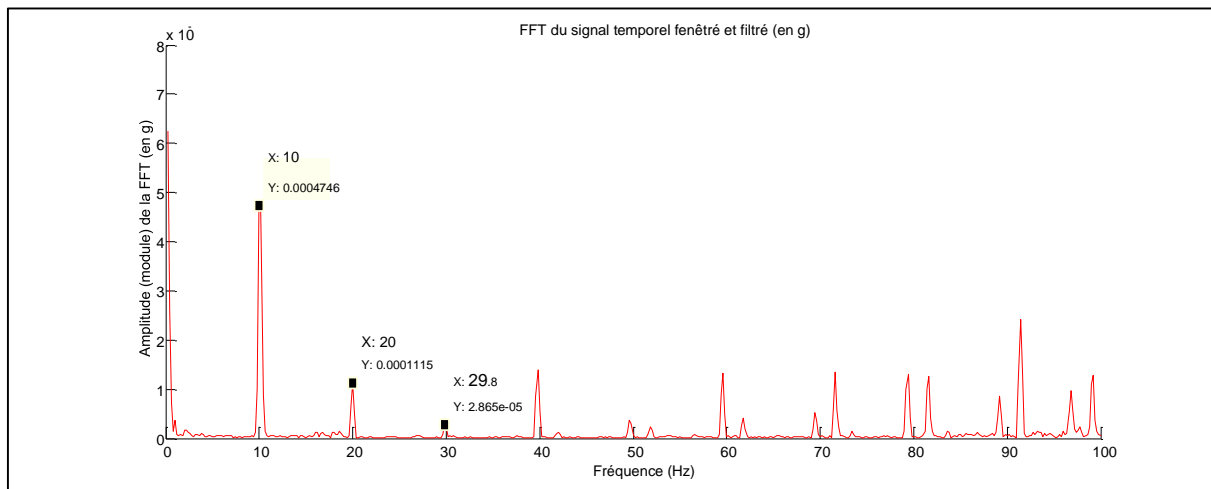


Université des Frères Mentouri Constantine  
 Institut des Sciences et Techniques Appliquées

- Ce spectre présente un défaut de **balourd**, ce défaut est caractérisé par une fréquence de l'ordre 13.4Hz et d'amplitude de 1.8 g qui est répété en harmonique 26.6 Hz, 39.8Hz, .... (F, 2F, 3F, 4F.....)

**Spectre 4 :**

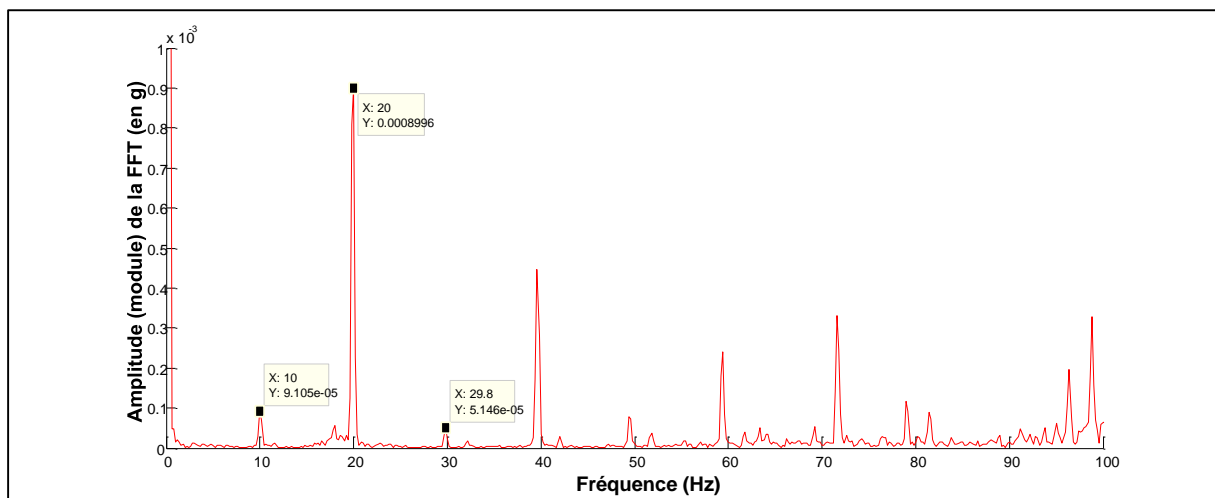
Une machine tourne à 600 tr/min.



- Ce spectre présente un défaut de **balourd**, ce défaut est caractérisé par une fréquence de l'ordre 10Hz et d'amplitude de 5 g qui est répété en harmonique 20Hz, 29.8Hz, .... (F, 2F, 3F, 4F.....)

**Spectre 5 :**

La machine tourne à 600 tr/min



Université des Frères Mentouri Constantine  
Institut des Sciences et Techniques Appliquées

- Ce spectre présente un défaut de **balourd**, ce défaut est caractérisé par une fréquence de l'ordre 13.4Hz et d'amplitude de 0.9 g qui est répété en harmonique 26.6 Hz, 39.8Hz, .... (F, 2F, 3F, 4F.....)

**PROBLEME 1 :**

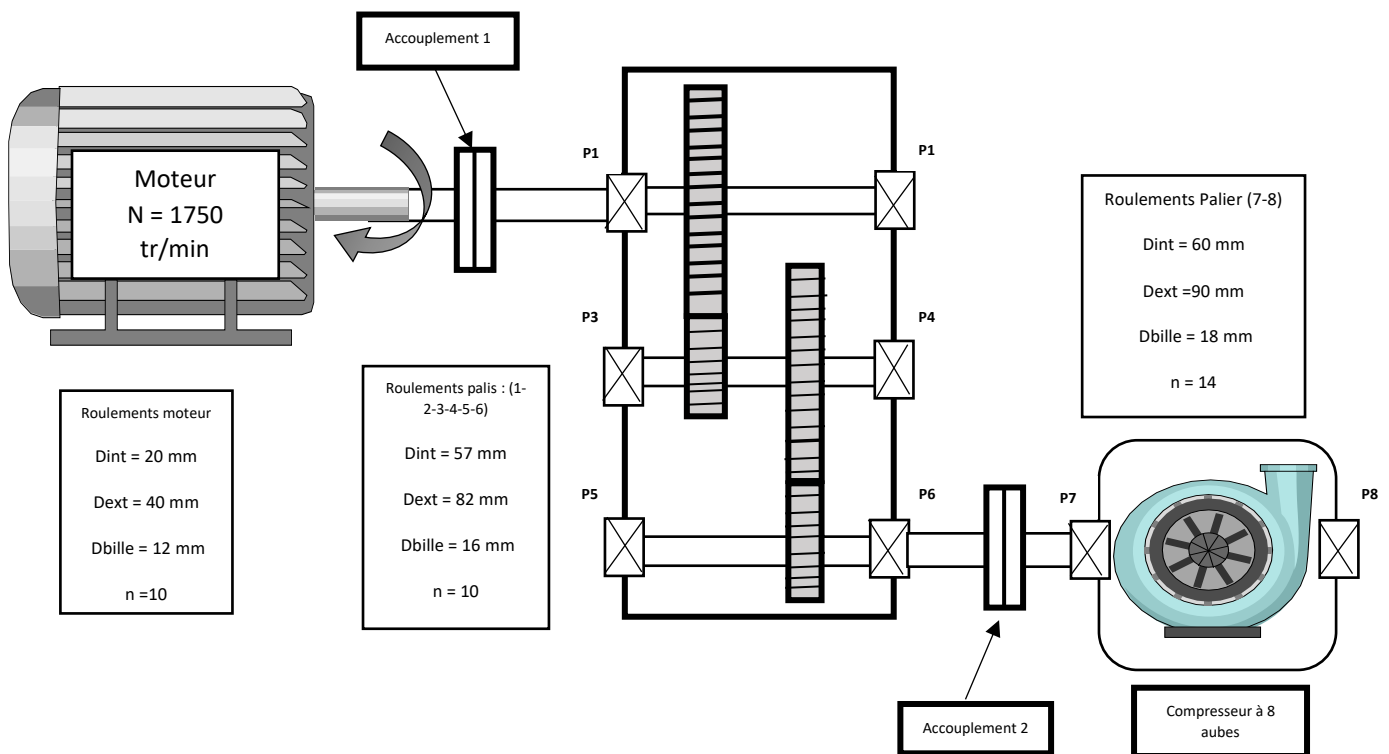
Soit un mécanisme (Figure1) composé d'un moteur tournant à 1750 « RPM » (tr/min) monté sur roulements, d'un double train d'engrenages monté sur roulements et d'un compresseur de 8 aubes monté sur des roulements.

Le premier train d'engrenages a « Z1 = 60 » dents et « Z2 = 20 » dents.

Le deuxième train a « Z3 = 54 » dents et « Z4 = 36 » dents.

**Questions :**

1. Calculez sur ce système toutes les fréquences des défauts probables :  
[Paliers (1-2-3-4-5-6) sont identiques – متشابهة – ainsi que et les paliers (7-8) ]



(Figure1) - système mécanique

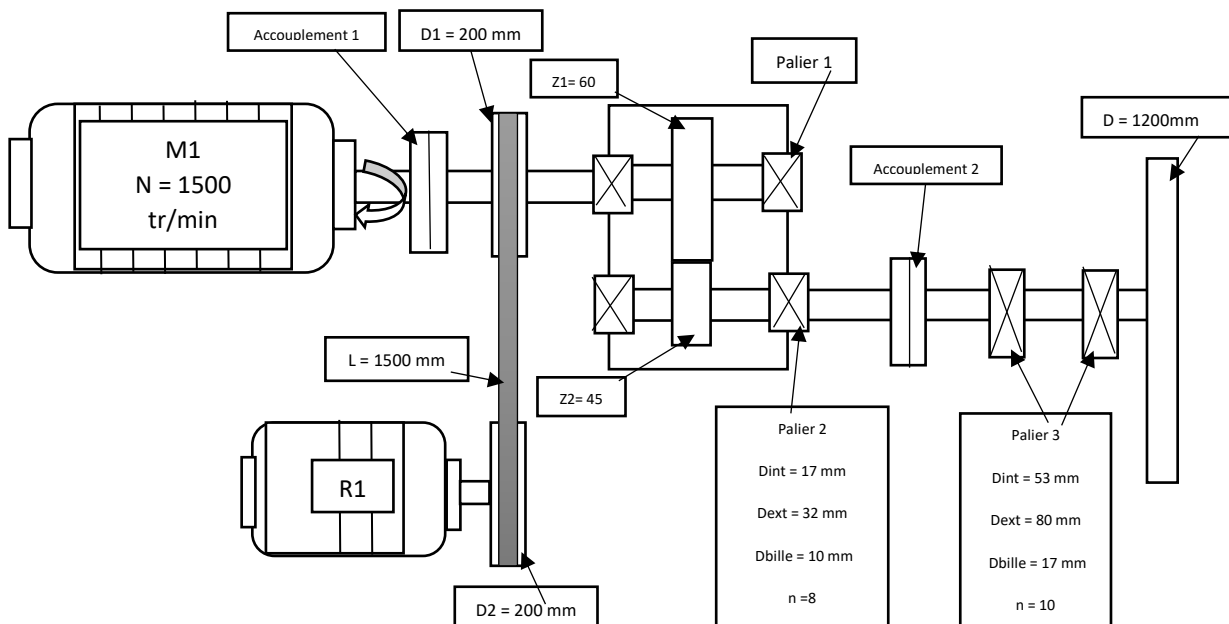
**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

**PROBLEME 2 :**

Sur le système ci-dessous, un moteur électrique, M1 est relié à un réducteur de renvoi d'angle R1 par courroie dont la longueur est 750 mm. Le moteur M1 entraîne un arbre sur lequel est monté un système de réduction. À la sortie de ce dernier ; deux paliers qui portent un disque de 500g.

Questions

2. Calculez les fréquences des éléments suivants :
  - Palier 1 ( $f_{int}$ ,  $f_{ext}$ ,  $f_{frotant}$ ,  $F_{cage}$ )
  - Palier 2 ( $f_{int}$ ,  $f_{ext}$ ) ..... (Palier 1 et palier 2 sont similaires)
  - Palier 3 ( $f_{int}$ ,  $f_{ext}$ )
  - Fréquence d'engrenage
  - Fréquence de balourd
  - Fréquence de courroie



3. Un défaut sur le disque qui a engendré une excentricité de  $200\mu\text{m}$ .
  - Calculez le balourd B
  - Calculez la masse de correction sur le rayon de ce disque
  - Calculez la force centrifuge engendrée par cette masse de correction
  - Calculez sa vitesse orbitale
  - Le disque atteint son régime de rotation d'entraînement en période de 20 secondes.

Université des Frères Mentouri Constantine  
Institut des Sciences et Techniques Appliquées

- Calculez son accélération tangentielle sur un point situé au rayon.

## EXEMPLE DU 1<sup>er</sup> TP

PMI et GIM – 3<sup>ème</sup> Année –  
Année universitaire (20xx-20xx)

Enseignant : Debbah Younes

---

### TP1 : Vibration (Expérience de Melde)

#### Objectif :

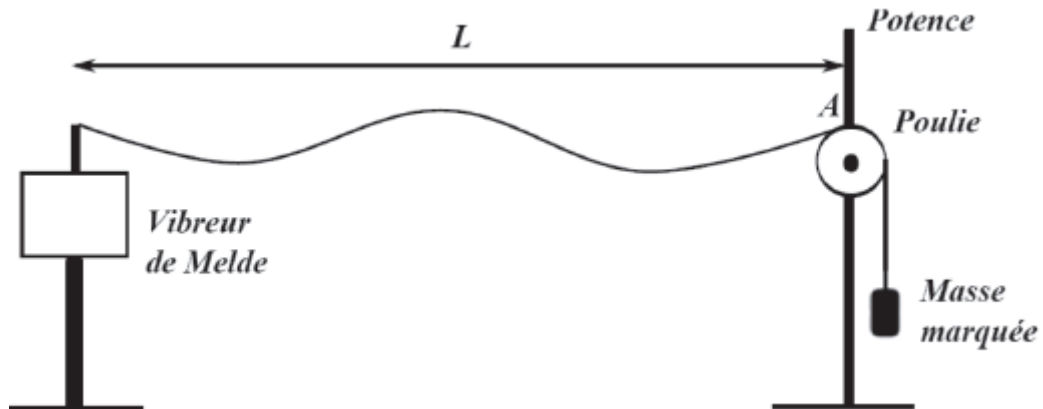
- Visualiser différents modes propres de vibration transversale de la corde.
- Estimer la masse linéique de la corde à partir de résultats concernant les phénomènes ondulatoires.

#### Dispositif expérimental

La corde de Melde est une corde sans raideur de longueur  $L \approx 1,5$  m aux extrémités de laquelle sont fixés un excitateur sinusoïdal (vibreur de Melde) et une masse réglable d'autre part. Le vibreur est commandé par un G.B.F. de puissance.

On peut également suspendre d'autres masses à la masse suspendue à la corde de façon à faire varier la tension  $FT = mg$  de la corde.

Université des Frères Mentouri Constantine  
Institut des Sciences et Techniques Appliquées



### Aspect théorique

Le point A de la corde en contact avec la poulie constitue un nœud de vibration. Une onde transversale incidente donnera naissance à une onde réfléchie en A.

Lorsqu'on excite de manière sinusoïdale l'extrémité gauche d'une telle corde, il apparaît pour certaines fréquences particulières  $f_n$  un phénomène de résonance pour lequel l'onde incidente et réfléchie interfèrent de manière constructive.

On visualise alors un mode propre d'oscillation de la corde ; des fuseaux plus ou moins nombreux selon la fréquence  $f_n$  sont clairement visibles.

Rappel :

La longueur d'onde associée au mode propre  $n$  est telle que :  $L = n \frac{\lambda_n}{2}$  où  $n$  est le nombre de fuseaux.

Longueur d'onde  $\lambda_n$  et fréquence  $f_n$  sont reliées par la relation :  $\lambda_n f_n = c$

Célérité des ondes transversales se propageant le long d'une corde de masse linéique  $\mu$  tendue sous la tension  $F_T$  :

$$c = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}}$$

### Manipulations

#### Montage

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

Une corde de longueur est fixée à une extrémité à un vibreur et passe sur une poulie à l'autre extrémité. La corde est tendue à l'aide d'une masse  $m$  suspendue à la corde. Le vibreur est relié à un générateur qui permet de régler la fréquence et l'amplitude.

- Pour  $m = 125g, 250g, 500g$  et une distance de 1.5m, déterminez les fréquences  $f$  pour lesquelles on observe un nombre  $n$  de fuseaux, avec  $1 \leq n \leq 5$ .
- Répétez la manipulation pour des distances de 1m et 0.5m.
- Trouver les 5 premières fréquences donnant lieu à une onde stationnaire

- **Pour  $m=500g$**

n	1	2	3	4	5
L=1.5m	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =
L=1m	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =
L=0.5m	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =

- **Pour  $m=250g$**

n	1	2	3	4	5
L=1.5m	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =
L=1m	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =
L=0.5m	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =

- **Pour  $m=125g$**

n	1	2	3	4	5
L=1.5m	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =
L=1m	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =
L=0.5m	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =	F <sub>n</sub> =

### Exploitation des résultats

- Représentez sur un même graphique la fréquence  $f$  en fonction du nombre de fuseaux  $n$  pour les différentes distances et les différentes masses.
- Calculer  $\lambda_n$ .
- calculer la célérité théorique  $c$ .

### Question Directs :

**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Institut des Sciences et Techniques Appliquées**

Qu'elle est l'Influence du nombre de fuseaux  $n$   
Qu'elle est l'Influence de la longueur de la corde  
Qu'elle est l'Influence de la tension  $F$ .  
Qu'est-ce que vous avez conclu