

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
People's Democratic Republic of Algeria  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministry of Higher Education and Scientific Research

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة  
National Higher School of Technology and Engineering. Annaba

Département Génie Industriel



Polycopié de Cours

Techniques de Maintenance Conditionnelle

Réalisé par : Dr. KEBABSA Tarek

Niveau : Quatrième année

Matière : Techniques de Maintenance Conditionnelle

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance et Fiabilité des Systèmes Industriels



Année 2022

<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Méthodes de maintenance conditionnelle et prévisionnelle .....</b>	<b>2</b>
I.1. Description sur l'évolution d'une dégradation .....	2
I.1.1. Définition de la défaillance (origines de la dégradation) .....	2
I.1.2. Processus de défaillance liée au niveau de dégradation.....	3
I.1.3. Exemples de modèle de dégradation.....	4
I.2. Paramètres caractéristiques d'une dégradation.....	4
I.2.1. Frottement et usure .....	4
I.2.2. Défaillances des machines tournantes .....	5
I.2.2.1 Les défaillances dans un engrenage .....	5
I.2.2.2 Les défaillances dans les Roulements.....	7
I.2.2.3 Dégradation des paliers par usure .....	10
I.3. Critères de choix d'un paramètre de suivi .....	10
I.4. Typologie des techniques de surveillance.....	11
I.4.1. L'analyse vibratoire .....	11
I.4.2. L'analyse des lubrifiants .....	12
I.4.3. La thermographie infrarouge .....	12
I.4.4. L'analyse acoustique.....	13
I.4.5. Le contrôle ultrasonore .....	13
I.5. Intégration dans le plan de maintenance .....	14
<b>Chapitre II : Suivi mécanique par mesure vibratoire .....</b>	<b>15</b>
II.1. Indicateurs de suivi (globaux et spécifique) .....	15
II.1.1. Le niveau global .....	15
II.1.2. Les indicateurs spécifiques .....	16
II.1.2.1 Kurtosis.....	16
II.1.2.2 Facteur de Crête (FC) .....	17
II.1.2.3 Centre de Gravité Spectrale (CGS) .....	17
II.1.2.4 Valeur efficace RMS (Root Mean Square).....	17
II.1.2.5 La valeur crête .....	17
II.1.3. La surveillance permanente .....	17
II.1.4. La surveillance périodique.....	18
II.2. Analyse spectrale .....	19
II.3. Calcul des fréquences de résonance .....	19
II.4. Interprétation du défaut vibratoire .....	21
II.4.1. Pour les moteurs .....	21
II.4.2. Pour les transmissions à courroies .....	21
II.4.3. Pour les réducteurs ou multiplicateurs.....	21
II.4.4. Pour les ventilateurs, pompes centrifuges, sas alvéolaires, cylindres... ..	21
II.4.4.1 Exercice 1 (cas d'un Turbine).....	21
II.4.4.2 Corrections.....	22
II.4.4.3 Interprétation du défaut de la turbine .....	23
II.4.5. Exercice 2 (cas d'un défaut de roulement) .....	24
II.5. Comparaison aux seuils .....	25
II.5.1. Seuil Alarme .....	25
II.5.2. Seuil Danger (ou Déclenchement).....	25
II.5.3. La détermination des seuils à partir d'un état de référence .....	25

<b>Chapitre III : Origine des vibrations .....</b>	<b>33</b>
III.1. Les sources d'excitation .....	33
III.2. Différents types de défauts .....	33
III.2.1. Le balourd mécanique .....	33
III.2.2. Délignage .....	34
III.2.3. Chocs périodiques (chocs à la rotation) .....	34
III.2.4. Principe de l'engrènement.....	35
III.2.5. Arbre support pignon cintré (faux rond) .....	37
III.2.6. Combinaison de défauts .....	38
III.2.7. Les transmissions par courroie .....	39
III.2.8. Les Roulements .....	40
III.2.8.1 Fouettement et tournoiement : Il existe deux types d'instabilités.....	43
III.3. Les phénomènes particuliers aux turbomachines.....	44
III.3.1. Généralités des turbomachines.....	44
III.3.2. Cas de la pompe centrifuge .....	44
III.3.3. Principe de fonctionnement.....	44
III.4. Phénomènes cinématiques.....	45
III.4.1. Passage d'aubes.....	45
III.4.2. Phénomènes non cinématiques.....	45
 <b>Chapitre IV : Analyse des huiles.....</b>	 <b>46</b>
IV.1. L'analyse des lubrifiants pour le suivi des équipements.....	46
IV.1.1. Définition d'une huile .....	46
IV.1.2. Théorie de la lubrification.....	46
IV.1.3. Le rôle d'un lubrifiant .....	47
IV.1.4. Les différents types des huiles de base .....	47
IV.1.5. Propriétés et caractéristiques des huiles.....	48
IV.1.6. Exercices avec Corrections Abrégées .....	49
IV.1.7. Analyse des lubrifiants.....	50
IV.1.8. Les analyses de dégradation.....	51
IV.2. Organisation des prélèvements et des suivis .....	52
IV.2.1. La prise des échantillons .....	52
IV.2.1.1 Fréquence de prélèvement d'huile .....	53
IV.2.1.2 Sur site industriel .....	53
IV.2.1.3 En laboratoire .....	53
 <b>Chapitre V : Contrôle et analyse par ultrason .....</b>	 <b>60</b>
V.1. Principe.....	60
V.1.1. Différents types d'ondes.....	61
V.2. Applications industrielles du contrôle par ultrasons .....	63
V.2.1. Exemples d'applications .....	63
V.2.1.1 Déterminations des défauts internes.....	63
V.2.2. Caractéristiques .....	64
V.3. Type des signaux pour l'interprétation.....	64
V.3.1. Type B : .....	64
V.3.2. Type C : .....	65
V.3.3. Type S : .....	65
V.3.4. Vitesse de propagation .....	65
V.4. Type de mesure.....	67

V.4.1. Examen par réflexion .....	67
V.4.2. Mesure par Transmission .....	68

<b>Chapitre VI : Organisation et conditions de mise en œuvre dans la maintenance industrielle</b> .....	<b>73</b>
VI.1. Comment localiser les équipements critiques ? .....	73
VI.2. Criticité des équipements .....	73
VI.2.1. La fréquence.....	73
VI.2.2. La gravité .....	74
VI.2.3. La non détection.....	74
VI.2.4. Criticité des équipements : Méthode PIEU.....	75
VI.2.5. Proposition d'une méthode pour choix d'une politique de maintenance.....	76
VI.3. Plan de maintenance.....	78
VI.3.1. Définition d'un plan de maintenance.....	78
VI.3.2. VI.3.2 Planification des opérations de maintenance préventive .....	79
VI.3.3. Définir la criticité des machines à maintenir .....	80
VI.3.3.1 Exemple .....	81
VI.3.4. Définir un plan de maintenance préventive .....	81
VI.3.5. Analyser les actions préventives à mener systématiquement .....	82
VI.3.6. Etablir les fiches de visites.....	83
VI.3.7. Objectifs visés d'un plan de maintenance .....	83
VI.3.7.1 Améliorer la fiabilité du matériel.....	83
VI.3.7.2 Garantir la qualité des produits .....	83
VI.3.7.3 Améliorer l'ordonnancement des travaux .....	84
VI.3.7.4 Assurer la sécurité humaine .....	84
VI.3.7.5 Améliorer la gestion des stocks .....	84
VI.3.8. Choix de la méthode maintenance .....	86

## Introduction

Ce cours est destiné aux étudiants quatrième année **Filière** : Génie Industriel, **Spécialité** : Maintenance et Fiabilité des Systèmes Industriels que, il décrit les notions de base de la maintenance préventive conditionnelle ; il permet d'amener les étudiants d'acquérir des compétences qui leur permettent de pouvoir analyser les équipements ou les machines simples et complexes, Une machine en état de fonctionnement exige des opérations de maintenance qui permettent d'éviter des catastrophes et d'augmenter sa disponibilité. Le diagnostic basé sur le comportement vibratoire fait partie des programmes de maintenance préventive conditionnelle et caractérise les états normaux et anormaux des machines.

En effet les défauts les plus dangereux sont générés à partir des éléments tournants (rotors, disques, roulements, engrenages, accouplements, courroies, etc.), et provoquent des efforts localisés ou répartis qui induisent des mouvements vibratoires régis par la fonction de transfert de la machine. La détection de ces défauts pose de nombreux problèmes dont les deux principaux sont :

La complexité et la diversité des formes géométriques des machines réelles, Sur le plan expérimental, la difficulté d'isoler un défaut particulier dont le comportement vibratoire évolue avec le temps par phénomène d'usure.

Le cours technique de maintenance préventive conditionnelle basée sur la surveillance et le diagnostic des défauts de machines à partir de différent type d'analyse tell que l'analyse d'huile, analyse de contrôle par ultrason, et l'analyses vibratoires, intégrant les connaissances nécessaires pour comprendre les phénomènes de bases et les démarches à suivre pour sécuriser leur parc machines. Nous présenterons aussi un cours pratique dans ce domaine qui s'adresse aux étudiants intervenants dans le domaine de la maintenance conditionnelle ou prédictive des machines tournantes pour leur permettre de comprendre et maîtriser les diverses opérations d'analyse et l'interprétation des signaux mesurés.

Maîtriser le comportement des machines est une source certaine d'économies qui permet :

D'éviter, dans la mesure du possible, tout incident entre deux arrêts systématiques ou programmés, D'estimer, par un diagnostic, la nécessité de l'arrêt afin de prolonger les intervalles de temps entre les arrêts

En effet, ce cours adopte une présentation en six chapitres, la première étant consacrée aux méthodes de maintenance conditionnelle et prévisionnelle, la deuxième Analyse des huiles, le troisième Contrôle et analyse par ultrason et la quatrième Suivi mécanique par mesure vibratoire et le cinquième Origine des vibrations et la sixième Organisation et conditions de mise en œuvre.

## Chapitre I : Méthodes de maintenance conditionnelle et prévisionnelle

### Contenu du chapitre :

1. Évolution d'une dégradation
2. Paramètres caractéristiques d'une dégradation
3. Critères de choix d'un paramètre de suivi
4. Typologie des techniques de surveillance
5. Intégration dans le plan de maintenance

### I.1. Description sur l'évolution d'une dégradation

Définition d'une dégradation selon la norme NF X 60 – 0510 << évolutions irréversibles des caractéristiques d'un bien liées au temps ou à la durée d'utilisation >>.

On considère un système se dégradant continuellement. Cette dégradation peut résulter par exemple d'une **fatigue**, d'une **usure** progressive d'une pièce mécanique, de l'érosion graduelle d'un matériau, etc. On suppose que le niveau de dégradation du système est mesurable. Par ailleurs, on suppose que le système est soumis à un stress qui peut être externe au système (température, humidité, etc.), ou une conséquence directe de son mode de fonctionnement (vibrations internes, température interne, etc.). Le mécanisme de **défaillance** d'un tel système peut s'expliquer par **deux** processus différents.

Le **premier** processus résulte d'un niveau excessif de dégradation cumulée qui entraîne alors soit un arrêt complet du système, soit un niveau de performance non acceptable.

Le **second** processus est assimilable à un processus du type "choc" caractérisé par un événement, un stress, dont l'occurrence entraîne la perte immédiate de la fonction principale du système.

#### *1.1.1. Définition de la défaillance (origines de la dégradation)*

Définition de la défaillance selon la norme **NF X 60 – 011** <<Altérations ou cessation d'un bien à accomplir sa fonction requise >>.

**Synonymes usuels non normalisés** : « Failure » (**anglais**), dysfonctionnement, dommages, dégâts, anomalies, avaries, incidents, défauts, pannes, détériorations.

- ❖ **Origines de défaillance** : circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation, à l'utilisation et à la maintenance qui ont conduit à la défaillance ;
- ❖ **Mécanisme de défaillance** : processus physiques, chimiques ou autres qui conduisent ou ont conduit à une défaillance. Mode de défaillance : effet par lequel une défaillance se manifeste ;

La norme NF X 60-011 propose plusieurs mises en famille des défaillances suivant leur cause :

- **Défaillances de causes intrinsèques** : défaillances dues à une mauvaise conception du bien, à une fabrication non conforme du bien ou à une mauvaise installation du bien. Les défaillances par usure (liée à la durée de vie d'utilisation) et par vieillissements (liés au cours du temps) sont des défaillances intrinsèques ;
- **Défaillance de causes extrinsèques** : défaillances de mauvais emploi, par fausses manœuvres, dues à la maintenance, conséquences d'une autre défaillance.
- ✓ Suivant leur degré : défaillance complète, partielle, permanente, fugitive, intermittente, ... etc.
- ✓ Suivant leur vitesse d'apparition : soudaine ou progressive.

**I.1.2. Processus de défaillance liée au niveau de dégradation**

On considère que le système est défaillant, c'est-à-dire n'est plus en mesure de répondre aux exigences de l'utilisateur, dès que son niveau de dégradation est supérieur à un certain seuil **L** donné (figure I.1). On suppose que cette défaillance n'est pas auto-décelable mais nécessite une intervention spécifique pour l'identifier. Nombre de systèmes industriels ou de structures, notamment en génie mécanique, vérifient une telle hypothèse. Par exemple, dans le cas d'un roulement ou d'un engrenage. Le seuil **L** peut alors être vu comme un niveau de dégradation qui ne doit pas être dépassé pour des raisons de sécurité ou des raisons économiques. Une inspection est nécessaire pour détecter si le niveau de dégradation a atteint ce seuil ou non.

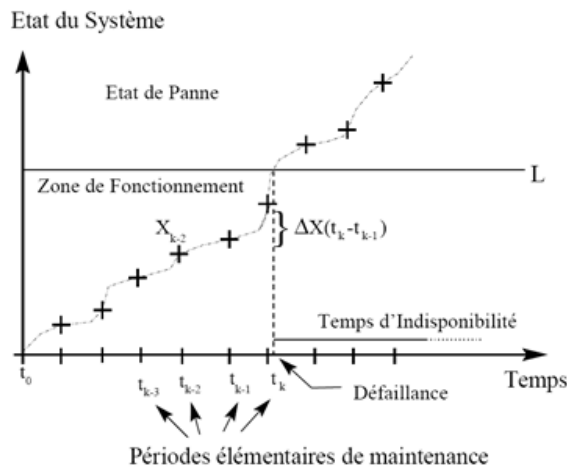


Figure I.1 Schéma du processus de dégradation du système (sans maintenance)

### 1.1.3. Exemples de modèle de dégradation

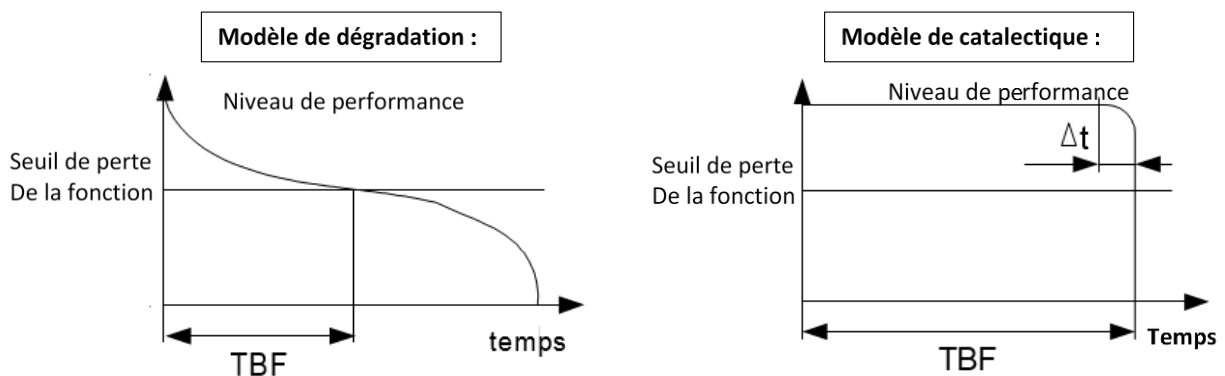


Figure 1.2 Exemples de modèle de dégradation

## I.2. Paramètres caractéristiques d'une dégradation

Ce sont les défaillances mécaniques par détérioration de surface frottement et usure qui sont définies comme suit :

- ❖ **Usure** : enlèvement progressif de matière à la surface des pièces d'un couple cinématique en glissement relatif ;
- ❖ **Corrosion de contact (Fretting-corrosion)** : usure particulière apparaissant au contact de 2 pièces statiques, mais soumises à de petits mouvements oscillants (vibrations). C'est le cas des pièces frettées ou des clavetages ;
- ❖ **L'écailage** : enlèvement de grosses écailles de matière ;
- ❖ **Grippage** : soudure de larges zones de surface de contact, avec arrachement massif de matière ;
- ❖ **Abrasion** : action d'impuretés ou de déchets (poussières, sable, etc) ;
- ❖ **Cavitation** : implosion de microbulles de gaz incondensables sous l'action d'une brutale chute de pression au sein d'un liquide. L'onde de choc génère des cratères dans la zone de cavitation (pompes, hélices, etc) ;
- ❖ **Erosion** : enlèvement de matière par l'impact d'un fluide ou de particules solides en suspension, ou de phénomènes électriques (arcs) ;
- ❖ **Faièncage** : réseau de craquelures superficielles dues à la fatigue thermique ;
- ❖ **Marquage** : enfoncement localisé dû à une charge ponctuelle ;
- ❖ **Rayage** : trace laissée par le passage d'un corps dur ;
- ❖ **Roulement et fatigue de contact** : roulements à billes et à aiguilles se détériorent intrinsèquement par fatigue de contact. La pression d'Hertz au contact bille/chemin de roulement fait apparaître des contraintes de cisaillement sur les bagues entraînant des fissures en surface puis débouchâtes (piqûres).

### 1.2.1. Frottement et usure

Ce mode de défaillance est inexorable dès lors que 2 surfaces en contact ont un mouvement relatif. La tribologie est la science expérimentale qui étudie ces phénomènes.

Dynamique de l'usure des lois de dégradation : à partir de 2 surfaces initiales.

- ❖ **La phase I** : est constituée de l'abrasion des principales aspérités : c'est la période de rodage affectant les ondulations et la rugosité liées au mode d'obtention ;
- ❖ **La phase II** : est constituée d'une usure stable, linéaire dans le temps. L'usure est reportée principalement sur l'une des surfaces de contact ;
- ❖ **La phase III** : dite usure catastrophique, consiste en émissions particulaires ; débris engendrant un labourage de la surface la plus tendre et une dégradation rapide.

L'analyse des lubrifiants met en évidence cette succession de phases en caractérisant le nombre et la taille croissante des particules métalliques libérées (figure I.3).

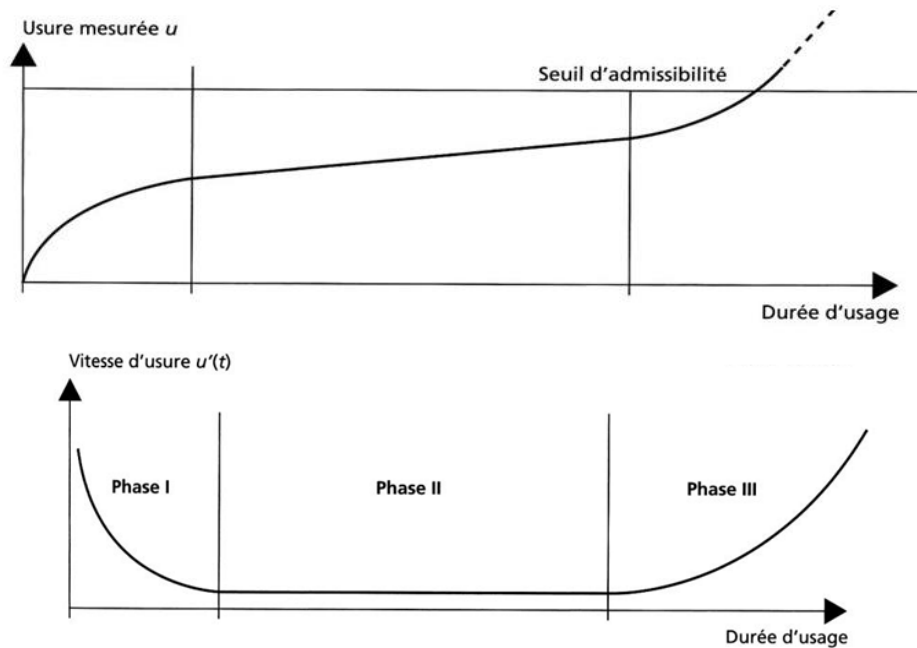


Figure I.3 Frottement et usure par des lois de dégradation

### 1.2.2. Défaillances des machines tournantes

Une machine tournante n'est en fait qu'un jeu de mécanismes mobiles entre eux, et d'organes combinés dans le but d'effectuer une tâche précise, transformer une énergie, transmettre un mouvement ... etc. Une panne dans une machine tournante n'est que la résultante d'une avarie ou d'une suite d'avaries sur l'un ou plusieurs de ses organes. Les statistiques effectuées sur les avaries des machines tournantes expriment les causes de défaillances et les localisations de défauts dans les systèmes de transmission de puissances par engrenage.

Dans ce qui suit nous allons voir quelques-uns des organes les plus importants et les plus courants dans les machines tournantes, ainsi que les plus importantes défaillances qui peuvent les atteindre.

#### 1.2.2.1 Les défaillances dans un engrenage

L'engrenage est un des mécanismes élémentaires les plus utilisés pour transmettre le mouvement, et adapter les vitesses de rotation entre organes moteurs et récepteurs. Il est constitué de deux roues dentées mobiles autour d'axes de rotation, l'une entraîne l'autre par l'action de dents successivement en contact.

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

les causes sont multiples. Mais à part les défauts de fabrication et de montage, on distingue principalement deux catégories de défauts pouvant atteindre un jeu d'engrenage accés aux paramètres généralisés et localisés.

- *Défaillances généralisées*
- **Usure abrasive** : Phénomène présent sur une grande partie de la denture se caractérisant par un enlèvement de matière dû au glissement des deux surfaces en contact. Le développement de cette usure est lié à la charge mécanique à transmettre et à la vitesse de glissement, ainsi qu'à la présence d'éléments abrasifs dans le lubrifiant. Elle peut être normale, inversement proportionnelle à la dureté superficielle de la denture et progressant lentement, ou anormale lorsque le lubrifiant est pollué de particules abrasives ou corrosives. Elle conduit à un mauvais fonctionnement voire à une mise hors service (figure I.4) ;
- **Pitting ou piqûres** : Il s'agit de trous plus ou moins profonds qui affectent toutes les dents. Se produisant surtout sur des engrenages en acier de construction relativement dur. Cette avarie peut apparaître à la suite de légers désalignements d'axes par exemple, à cause de surpressions locales (figure I.5).

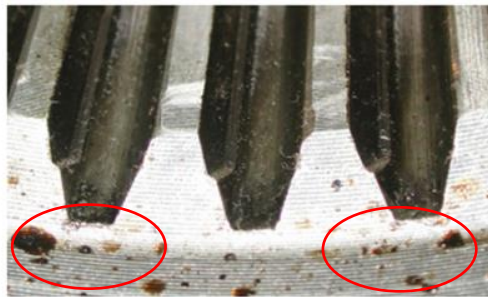


Figure I.4 Usure abrasive



Figure I.5 Pitting ou piqûres

- *Défauts localisés*
- **Écaillage** : Se manifestant par des trous moins nombreux que ceux du pitting, mais plus profonds et plus étendus. Les dégradations sont produites par fatigue en sous-couche, au point de cisaillement maximal. Ce phénomène rencontré le plus souvent dans les engrenages cémentés, évolue très rapidement vers la rupture, sans passer par une phase d'usure (figure I.6) ;
- **Fissuration** : généralement au pied de la dent, elle progresse à chaque mise en charge. Son apparition est due à un dépassement de la limite élastique en contrainte au pied de dent, du côté de la dent en traction (figure I.7) ;

- **Grippage** : Conséquence directe d'une destruction brutale du film d'huile, ou d'un frottement sous charge provoquant des hausses de températures. Le grip- favorisé de gros modules, un faible nombre de dents en contact (figure I.8).

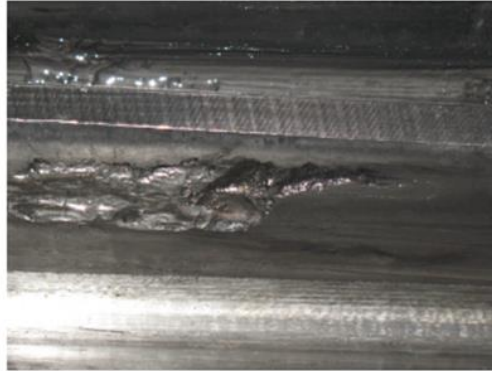


Figure I.6 Écaillage ou Spalling

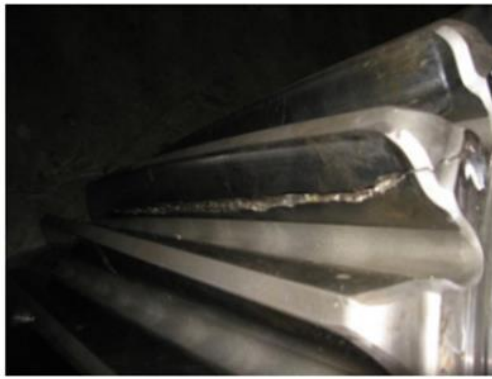


Figure I.7 Fissuration ou cracks



Figure I.8 Grippage

#### 1.2.2.2 Les défaillances dans les Roulements

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

Deux bagues concentriques, une bague intérieure et une bague extérieure, Comportant des chemins de roulement des corps roulants, billes, rouleaux ou aiguilles, permettant la rotation des deux bagues avec un frottement minimal ; une cage séparant et guidant les éléments roulants

en pratique pour chaque application existe un roulement approprié. Le roulement à billes offre un faible frottement grâce au contact ponctuel mais n'est utilisé que pour des charges limitées. Le roulement à rouleaux offre une plus grande capacité de chargement grâce au contact linéaire provoquant aussi un frottement plus important.

Les rouleaux peuvent prendre différentes formes cylindriques, coniques ou sphériques.

Les roulements à aiguilles.

Selon leurs applications, et la criticité des machines sur lesquelles ils sont montés, les roulements nécessitent plus ou moins une surveillance et un entretien préventif. Pour cela le suivi des niveaux de vibration et de température, sont les sources d'information les plus utilisées. Un modèle théorique pour le calcul de la durée de vie des roulements est souvent fourni par les constructeurs. Cependant l'apport de nombreux facteurs, dévie les conditions normales de fonctionnement en provoquant des détériorations prématurées, et altère la durée de fonctionnement prédite. Les aspects de ces détériorations se manifestant dans la plupart des cas par un arrachement de matière plus ou moins important, sont décrits comme suit (figure I.9).

- **Écaillage** : Se caractérise par des traces de fissuration et d'arrachement de fragments de matière ;
- **Grippage** : En plus de l'arrachement de matière, des traces brunes dues à l'échauffement, des déformations de corps roulants, et des micro fusions peuvent apparaître ;
- **Empreintes de corps roulants**
  - ✓ *Par déformation* : Des empreintes des corps roulants apparaissent avec un fond brillant, on y retrouve les traces de la rectification mais sans traces d'usure.
  - ✓ *Par abrasion* : Dans ce cas les empreintes peuvent ne pas correspondre à l'écartement des corps roulants. L'enlèvement de matière cette fois par usure due à la vibration sans rotation du roulement (faux effet Brinell), ce défaut peut apparaître sur des machines jamais mises en marche ;
- **Usure généralisée** : apparaissant sur des corps roulants, des pistes et des cages (teinte grise), due à l'intrusion d'une particule abrasive ;
- **Cratères et cannelures** : Les premiers sont caractérisés par des piqûres à bords nets liées en chapelet et sont propres aux roulements à billes, quant aux cannelures propres aux roulements à rouleaux, sont caractérisées par une succession de plages étroites parallèles ;
- **Coups, fissures, cassures** : Se manifestant avec des traces visibles ruptures des bagues ;
- **Corrosion de contact** : Se manifestant avec des taches d'oxydation sur l'alésage, le diamètre extérieur et les faces d'appui du roulement ;
- **Coloration** : Due à une oxydation localisée ou généralisée elle se manifeste avec une coloration des chemins de roulement et des corps roulants ;
- **Détérioration des cages** : se manifestant sous plusieurs formes : déformation ; usure ou rupture des cages.

Dans la figure qui suit, nous constatons des exemples de défaillances sur des roulements :

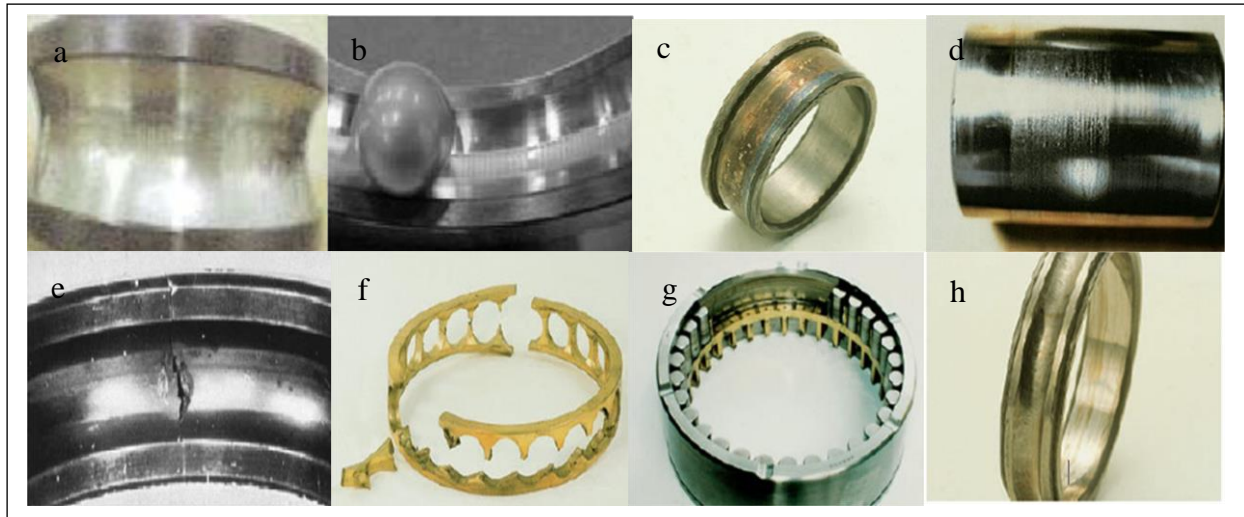


Figure 1.9 Quelques défaillances affectant sur les roulements a- Usure généralisée b- Cage détériorée c- Corrosion d- Présence de cratères e- Écaillage f- Fissure et cassure g- Grippage h- Traces d'empreintes

### 1.2.2.3 Dégradation des paliers par usure

L'usure peut être définie comme la détérioration de la surface active d'un corps par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface. Cette détérioration s'accompagne très souvent par une perte progressive de matière. L'étude de l'usure revêt une importance considérable tant sur le plan économique que sur le plan scientifique.

D'une part, l'usure est l'une des principales causes de la mise hors service des machines et des outils. Une étude systématique des problèmes de contact et de frottement permettrait une amélioration des ensembles mécaniques, qui pourrait une augmentation de leur durée de vie et une économie à l'échelle industrielle.

D'autre part, notre civilisation technologique exige des mécanismes de plus en plus performants par l'augmentation des pressions de contact, des vitesses de glissement et des durées de fonctionnement. Les études et recherches concernant le phénomène d'usure permettent d'améliorer les dispositifs existants ou d'en construire de nouveaux. Dans l'état actuel des connaissances scientifiques il faut s'appuyer constamment sur l'expérience pour pouvoir étudier les mécanismes responsables de la dégradation des surfaces par usure (figure I.10).

- ✓ Dégradation au niveau du palier porteur côté refoulement.



Figure I.10 Dégradation des paliers par l'usure

- ✓ L'état du patin : coulage du régule à cause d'élévation de température.
- ✓ Dégradation de la garniture d'étanchéité côté refoulement.
- ✓ Déplacement de l'anneau de la bague d'étanchéité à cause de naissance de la rainure au niveau du perçage réservé au téton de fixation de l'anneau.

### I.3. Critères de choix d'un paramètre de suivi

Ils sont la résultante de 04 paramètres :

- La matière utilisée pour les composants :

Hétérogénéité due à l'élaboration → ≠ caractéristiques Physiques-chimies.

- Les procédés d'obtention des composants :

Déformation et haute température ( $\sigma$  internes) – usinage.

- La conception du système

Non prise en compte des conditions d'utilisation – TTH inadéquat – sous-évaluation des phénomènes physiques.

- L'utilisation

Dépassement des limites admissibles – Transport ou stockage – non-respect des calendriers (ex : graissage).

## I.4. Typologie des techniques de surveillance

### I.4.1. L'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est la technique d'analyse la plus connue et la plus largement employée (75%). Il faut dire qu'elle permet de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement, un roulement usé ou endommagé..., se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine, et donc à une modification de son comportement vibratoire. En plaçant des accéléromètres aux endroits où se transmettent ces efforts (c'est-à-dire sur les paliers des machines), on peut alors suivre l'état de santé de l'équipement (figure I.11).

L'analyse vibratoire est une technique utilisée pour le suivi des machines tournantes en fonctionnement, cette dernière engendre des efforts qui seront souvent la cause des défaillances ultérieures (turbulence, chocs, instabilité).



Figure I.11 Exemple de suivi d'une machine par analyse vibratoire

#### ❖ Avantages de la méthode

- Détection de défauts à un stade précoce ;
- Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi ;
- Autorise une surveillance continue ;
- Permet de surveiller l'équipement à distance ;

#### ❖ Inconvénients

- Spectres parfois difficiles à interpréter ;
- Dans le cas de surveillance continue, installations relativement coûteuses ;

### 1.4.2. L'analyse des lubrifiants

Cette technique est appliquée à toutes les machines pourvu qu'elles contiennent un fluide (huile ou graisse) que l'on peut prélever, la méthode consiste à détecter les particules d'usure drainées par le lubrifiant afin d'en déduire l'état de l'équipement. L'analyse d'un échantillon de quelques dizaines de millilitres d'huile (Prélevé à l'aide de petites seringues ou lors d'une vidange) voir la (figure I.12), peut alors suffire à révéler l'usure anormale de l'un des composants, le mauvais état d'un filtre, ou encore la dégradation du lubrifiant (suite à une oxydation, à une pollution, à une température d'utilisation trop élevée).



Figure I.12 Exemple de suivi d'une machine par analyse des lubrifiants

#### ❖ Avantages de la méthode

- Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement ;
- Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules ;

#### ❖ Inconvénients

- Ne permet pas de localiser précisément le défaut ;
- Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon ;

### 1.4.3. La thermographie infrarouge

Suscite un intérêt encore récent dans le domaine de la maintenance. Jusqu'alors réservée au contrôle d'installations électriques, elle est depuis peu utilisée dans la surveillance des machines tournantes pour détecter les défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement. La thermographie permet de réaliser des mesures à distance, et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée (figure I.13).

Enfin, il existe d'autres méthodes, moins répandues que les précédentes mais néanmoins intéressantes.

Ce phénomène se retrouve pour des éléments comme :

- ✓ Des pièces tournantes ou de frottement ;
- ✓ Des installations électriques sous tension ;
- ✓ Des circuits imprimés complexes, composants électroniques ;
- ✓ Des éléments réfractaires de fours, isolation d'enceintes thermique ;
- ✓ Des installations de chauffages par le sol ;
- ✓ Des canalisations enterrées.

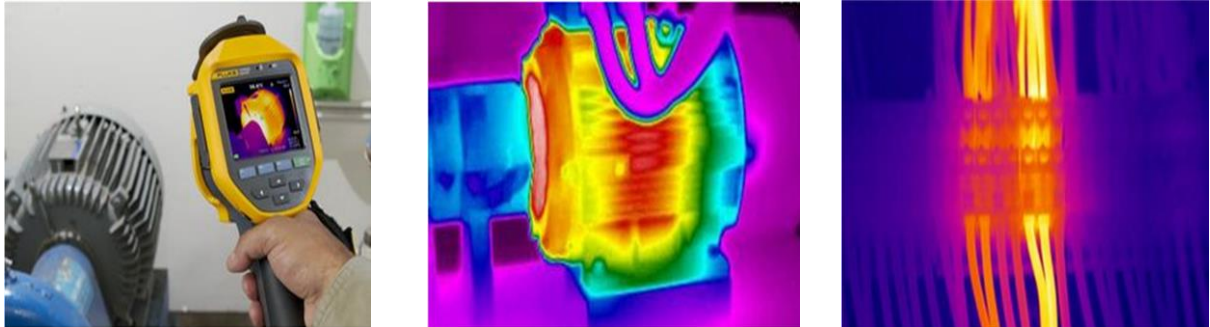


Figure I.13 Exemple de suivi une machine par la thermographie infrarouge

#### ***1.4.4. L'analyse acoustique***

Qui permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés (le plus souvent) à distance de l'équipement (figure I.14).

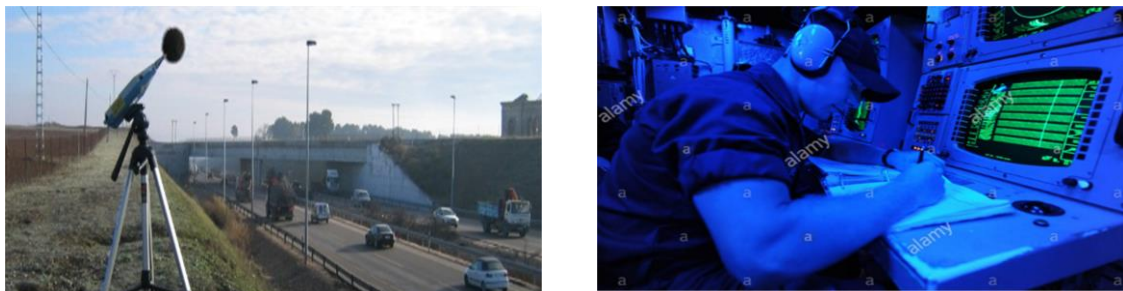


Figure I.14 Exemple de suivi d'une machine par analyse acoustique

#### ***1.4.5. Le contrôle ultrasonore***

Qui permet de détecter des défauts de faible amplitude à haute fréquence telle que l'initiation de la dégradation d'un roulement, par exemple.

##### ***a) Origine des ultra-sons***

- Origine mécanique : Frictions de machines tournantes (roulements, engrenages, paliers).
- Origine pneumatique ou hydraulique : Turbulences dues aux fuites de pression ou de vide.
- Origine électrique : Formations d'arcs, de cheminements électriques, d'effets de couronne, d'interférences radio/TV.

##### ***b) Détection des ultra-sons***

Pour les détecter, il faut un équipement ayant la capacité de recevoir les fréquences ultrasonores et les convertir en son audible (figure I.15).



Figure I.15 Exemple de suivi d'une machine par le contrôle ultrasonore

#### ❖ Remarques

- *L'analyse vibratoire, l'analyse d'huile, la thermographie infrarouge et l'analyse acoustique sont les principales méthodes de surveillance des machines tournantes.*
- *Toutes ne permettent pas de "détecter" les mêmes types de défauts, ni de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine et la gravité.*
- *Avant de choisir une telle méthode d'analyse, il faut bien cerner la criticité de la machine, et définir le type de surveillance qu'elle nécessite.*

### I.5. Intégration dans le plan de maintenance

Le plan de maintenance préventive consistera donc à suivre celui établi par l'opérateur, c'est-à-dire un plan de graissage et nettoyage (plus la surveillance des ventouses, des filtres). Il faut également tenir compte de la documentation pour certains gros équipements de la chaîne qui ne sont pas référencés dans le plan de maintenance.

Tout ce qui a été montré précédemment consiste à définir un plan général de la maintenance, applicable à toutes les machines tournantes dans le parc de l'industrie qui utilise sur des applications critiques, ce plan peut être appliqué même si aucune information n'est fournie par le constructeur

## Chapitre II : Suivi mécanique par mesure vibratoire

### Contenu du chapitre :

1. Indicateurs de suivi (globaux et spécifiques)
2. L'analyse spectrale
3. Calcul des fréquences de résonance
4. Interprétation du défaut vibratoire
5. La comparaison aux seuils

### II.1. Indicateurs de suivi (globaux et spécifique)

Les indicateurs de suivi (globaux et spécifiques) ou les méthodes temporelles sont basés sur l'analyse statistique du signal recueilli. Elles s'appliquent à des machines simples et consistent à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevées.

Le but est de minimiser l'influence des vibrations induites par la rotation des arbres.

Cette méthode utilise des indicateurs de suivi soit par les indicateurs globaux ou spécifiques qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal.

#### II.1.1. Le niveau global

L'avantage de ce type d'indicateur de défaut est sa simplicité d'utilisation car il suffit de traiter des mesures d'accélération et de ne saisir régulièrement qu'une seule valeur. Les niveaux globaux de déplacements et de vitesses calculés par les équations suivantes :

$$NG_{\text{dép}} = \sqrt{\frac{2}{3} \sum_1^{10} (N_i)^2} \quad (\text{II.1})$$

Et

$$NG_{\text{vit}} = \sqrt{\frac{2}{3} \sum_{10}^{1000} (N_i)^2} \quad (\text{II.2})$$

$N_i$  : représente le nombre de point du spectre.

❖ La mesure du niveau global est définie aussi par

$$NG = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + \dots} \quad (\text{II.3})$$

a, b, c, sont les amplitudes efficaces des indicateurs mesurés (caractérisant les défauts). NG est sensible à l'évolution des défauts induisant des vibrations d'amplitude élevé.

❖ **Elaboration à partir du spectre**

Le niveau global peut aussi être calculé à partir du spectre en fréquence (figure II.1).

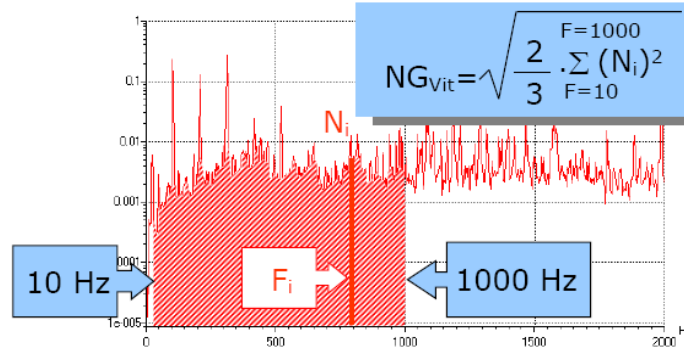


Figure II.1 Calculer le niveau global à partir du spectre

Il correspond alors au calcul d’une énergie sur une plage de fréquences correspondant à la grandeur mesurée.

❖ **Niveau d’énergie dans une bande de fréquences**

Le niveau d’énergie (figure II.2) calculer dans la bande [F<sub>min</sub>, F<sub>Max</sub>] est donné par :

$$E = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \sum_{F_{min}}^{F_{max}} (N_i)^2} \tag{II 4}$$

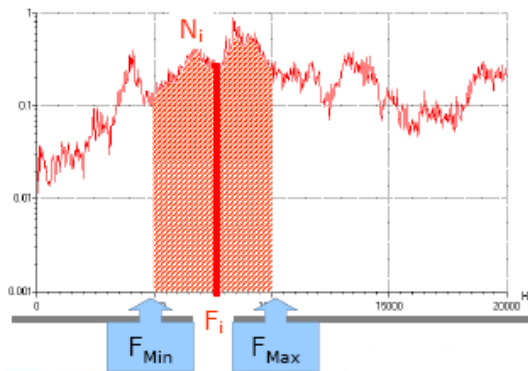


Figure II.2 Calculer le niveau d’énergie à partir du spectre

**II.1.2. Les indicateurs spécifiques**

**II.1.2.1 Kurtosis**

Il définit la distribution d’amplitude d’un signal et est déterminé par le rapport du moment d’ordre 4 sur le carré du moment d’ordre 2 du signal. Certains mathématiciens utilisent le Kurtosis excès qui est égal au Kurtosis moins trois (-3), et de ce fait le Kurtosis excès d’une distribution Gaussienne est égale à zéro. Mathématiquement il est donné par l’équation suivante :

$$Kurtosis = \frac{M_4 S(t)}{M_2^2 S(t)} = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (S(t) - \bar{S})^4}{\left( \frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (S(t) - \bar{S})^2 \right)^2} \tag{II.5}$$

Où  $M_4$  et  $M_2$  représentent respectivement le moment statistique d'ordre quatre et deux (appelé encore écart type).  $\tilde{S}$  La valeur moyenne qui est en soit même un indicateur scalaire.

### II.1.2.2 Facteur de Crête (FC)

Le facteur de crête est le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace du signal. Plus la vibration devient impulsive, plus la valeur de crête augmente, cependant ce facteur présente les mêmes valeurs pour les deux extrêmes de l'état d'une machine.

$$\text{Facteur de crête} = \frac{\text{Sup}|S_k|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} (S_k)^2}} \quad (\text{II.6})$$

Etant donné que le facteur de crête d'un signal dont la distribution des amplitudes est gaussienne, compris entre 3 et 6, cet indicateur n'est apte à la détection de défaut que si sa valeur est supérieure ou égale à 6.

### II.1.2.3 Centre de Gravité Spectrale (CGS)

Par analogie au centre de gravité d'un spectre acoustique, qui généralement correspond à une balance spectrale entre grave et aigu, on peut dire que cet indicateur caractérise l'énergie vibratoire. La répartition de l'énergie vibratoire en fonction du contenu fréquentiel d'une source se traduit par le calcul du Centre de Gravité Spectral.

$$\text{CGS} = \frac{\int f \times L(f) df}{L(f) df} \quad (\text{II.7})$$

$L(f)$  : valeur de l'auto-spectre du signal à cette fréquence.

### II.1.2.4 Valeur efficace RMS (Root Mean Square)

C'est un indicateur scalaire très utilisé, bien qu'il présente des inconvénients. Il est sensible à l'effet de masque, c'est-à-dire qu'il peut s'avérer inefficace à l'apparition de certains défauts. Globalement, la valeur efficace ne détecte pas tous les défauts, ce qui représente un inconvénient majeur dans le cadre de la maintenance conditionnelle. Le RMS a été appliqué avec succès limité pour la détection de défauts localisés. Pour un signal  $S(t)$  le RMS est donné par :

$$V_{\text{efficace}} = V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [S(t)]^2} \quad (\text{II.8})$$

### II.1.2.5 La valeur crête

Représente la valeur maximale du signal. Pour un signal  $S(t)$  la valeur crête est donnée par :

$$\text{Valeur crête} = \text{Sup } |S(t)| \quad (\text{II.9})$$

## II.1.3. La surveillance permanente

Pour ce mode de surveillance, appelé aussi monitoring ou surveillance on line, les capteurs sont installés à demeure sur la machine. Initialement destiné à assurer la sécurité d'un équipement par son arrêt immédiat en cas de dépassement du seuil de danger par la valeur d'un indicateur, ce mode de surveillance, qui nécessite un investissement initial important, était historiquement réservé aux machines stratégiques ou dangereuses (figure II.3)

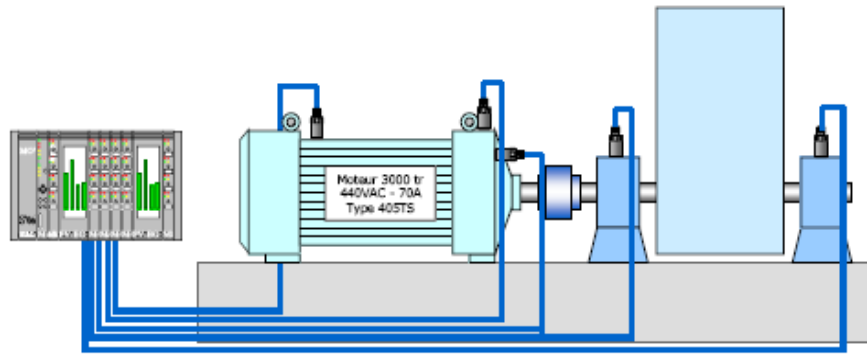


Figure II.3 La surveillance on-line

❖ **Avantages de la surveillance permanente**

- Un suivi permanent des valeurs des indicateurs choisis,
- Une détection possible des défauts à évolution rapide,
- Une association possible et facile avec d'autres paramètres procédés : température, vitesse, charge, intensité absorbée, pression...
- Un arrêt automatique de l'installation, envisageable sur alarme,
- La possibilité de centraliser les données visualisées en salle de contrôle.

❖ **Inconvénients de la surveillance permanente**

- La méconnaissance de l'origine exacte du défaut ayant déclenché une alarme ou l'arrêt si l'indicateur scalaire ou les indicateurs choisis sont des indicateurs larges bandes.
- La génération fréquente de fausses alarmes qui décrédibilisent rapidement le système de surveillance auprès de l'exploitant, qui le met souvent hors service ou élève sensiblement les seuils.

**II.1.4. La surveillance périodique**

Les mesures sont effectuées par un opérateur à échéance programmée, à l'aide d'un appareil portable le plus souvent informatisé appelé « collecteur de données ».

Ce type d'appareil permet de mettre sous surveillance un grand nombre de machines pour un coût initial faible, puisque l'investissement en capteurs, câbles et connecteurs est réduit (un seul capteur et un seul câble suffisent). Les valeurs des indicateurs mesurées ou calculées sont stockées automatiquement dans la mémoire du collecteur, puis transférées à l'issue de chaque collecte dans celle d'un micro-ordinateur, afin d'être analysées (figure II.4)

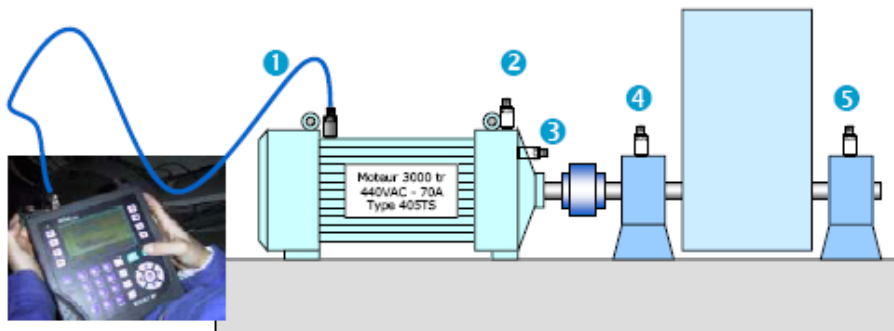


Figure II.4 La surveillance off-line

❖ **Avantages et inconvénients de la surveillance périodique**

Le principal avantage de la surveillance périodique sur la surveillance continue est le faible coût de l’investissement de base au regard du nombre de machines qui peut être surveillées avec un seul appareil et un ou deux capteurs. Les principaux inconvénients sont :

Le risque d’apparition entre deux collectes d’un défaut engageant un processus de dégradation rapide et qui risque d’entraîner une panne avant la collecte suivante.

- Un historique d’évolution d’indicateurs bien moins riche que dans le cas d’une surveillance permanente, et qui est donc beaucoup plus difficile à interpréter lorsqu’un processus de dégradation est engagé,
- Une périodicité et un coût de fonctionnement qui dépendent fortement de la fiabilité recherchée,
- Les charges salariales inhérentes aux collectes périodiques et aux analyses de ces dernières.

**II.2. Analyse spectrale**

Le signal mesuré est considéré comme une combinaison des réponses des composants constituant le système. La plupart des fréquences caractéristiques sont proportionnelles à la fréquence de rotation des arbres. L’analyse spectrale consiste à identifier la fréquence et l’amplitude de ces sinus, ce qui permet de tracer la représentation amplitude/fréquence de s(t). Pour obtenir le spectre S(f) de s(t), on applique la fonction mathématique Transformée de Fourier (figure II.5).

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-2j\pi ft} dt \tag{II.10}$$

Où S (f) est la transformée de Fourier du signal S(t), t est la variable temps, f est la variable fréquence.

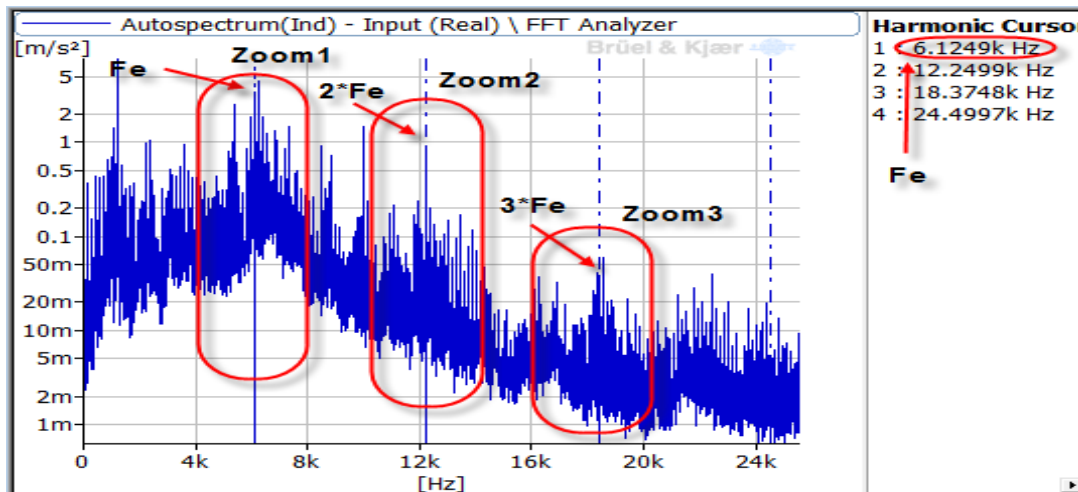


Figure II.5 Spectre du signal d’accélération avec un défaut d’engrenages

**II.3. Calcul des fréquences de résonance**

La résonance est un phénomène selon lequel certains systèmes physiques (électriques, mécaniques...) sont sensibles à certaines fréquences. Un système résonant peut accumuler une énergie, si celle-ci est appliquée sous forme périodique, et proche d’une fréquence dite « fréquence de résonance ».

La résonance se produit lorsqu'une fréquence de force interne coïncide avec la fréquence structurelle naturelle. Ce phénomène peut devenir aigu et entraîner la destruction du système s'il y a peu d'amortissement.

La phase de la vibration s'inverse lorsqu'on franchit la résonance. On recherche la réponse propre d'une structure par analyse « modale » (analyse fréquentielle d'un impact calibré). On peut déplacer la fréquence propre en ajoutant des masses ou des raidisseurs, ou changer l'amortissement structurel. On peut aussi modifier la vitesse afin de décaler la fréquence cinématique ( $\pm 30\%$  de la vitesse critique) (figure II.6)

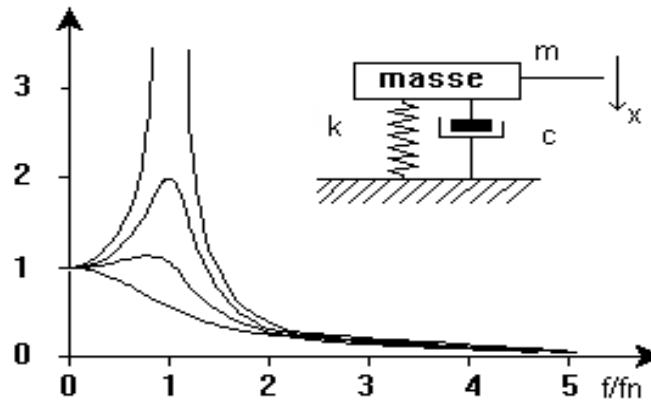


Figure II.6 Courbe présente un phénomène de résonance

**L'équation de mouvement libre prend la forme suivante :**

$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = 0$  Avec  $m$  = masse ;  $c$  = coefficient de frottement visqueux ;  $k$  = raideur et  $x$  le déplacement par rapport à la position d'équilibre.

On définit : La fréquence naturelle ou fréquence propre du système conservatif associé (sans amortissement) :

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Le facteur d'amplification (à la résonance) : pour  $\xi < 0.1$ ;  $Q \cong \frac{1}{2\xi}$

Le facteur d'amortissement :  $\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}}$

Le coefficient d'amortissement :  $\delta = -\xi \sqrt{\frac{k}{m}}$

La fréquence propre amortie :  $f_a = f_0 \sqrt{1 - \xi^2}$

Dans le cas d'une force harmonique appliquée sur la masse, l'équation de mouvement devient :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f(t) = F \sin(\omega t)$$

On définira donc en plus la fréquence de résonance :  $f_r = f_n \sqrt{1 - 2\xi^2}$

Cela correspond à la fréquence pour laquelle le module  $X/F$  (déplacement/force) passe par un maximum.

## II.4. Interprétation du défaut vibratoire

L'interprétation d'un défaut consiste à trouver l'origine cinématique des composantes ou familles de composantes les plus énergétiques. La lecture d'un spectre nécessite donc le maximum de renseignements concernant les conditions de fonctionnement du système : type de roulement, vitesse de fonctionnement, nombre de dents des engrenages, ...

Les paramètres étant définis, la surveillance consiste à :

- Collecter périodiquement les mesures permettant l'extraction des paramètres.
- Comparer les valeurs à des seuils prédéfinis.
- Suivre l'évolution dans le temps des valeurs atteintes pour chacun d'eux (historiques d'évolution).
- Interpréter les évolutions et dépassements de seuils (élaboration du diagnostic).
- Analyser les spectres et signaux temporels acquis pour affiner ou confirmer le diagnostic.
- L'analyse cinématique

### II.4.1. Pour les moteurs

- Le type du moteur (synchrone, asynchrone, à cage, à fréquence variable...).
- La vitesse de rotation au moment de la prise de mesures.
- Le type et la marque des roulements (deux roulements de même référence mais de marque différente n'ont pas forcément le même nombre d'éléments roulants).
- Le nombre d'encoches.
- Le nombre de pales de l'éventuel ventilateur de refroidissement.

### II.4.2. Pour les transmissions à courroies

- Le diamètre des poulies.
- La longueur, le nombre et le type de courroies.

### II.4.3. Pour les réducteurs ou multiplicateurs

- Le nombre de trains et la vitesse de chacun (arbre d'entrée et sortie).
- Le type de denture.
- Le nombre de dents de chaque couronne ou pignon.

### II.4.4. Pour les ventilateurs, pompes centrifuges, sas alvéolaires, cylindres...

- Le type et la vitesse de rotation au moment de la prise de mesures.
- Le type et la marque des roulements et la position des butées.
- Le nombre de pales, aubes, alvéoles ou autres éléments tournants.

#### II.4.4.1 Exercice 1 (cas d'un Turbine)

Le principe de fonctionnement de cette machine consiste à introduire de la vapeur surchauffée à une pression élevée appelée vapeur d'admission via des conduites de la turbine qui comporte un ou plusieurs étages à 16 **roues**, composés chacun d'un nombre d'aubes, dont

l'un est fixe et l'autre mobile, où chaque roue est composée d'un ensemble de 8 ailettes (aubes), (figure II.7).

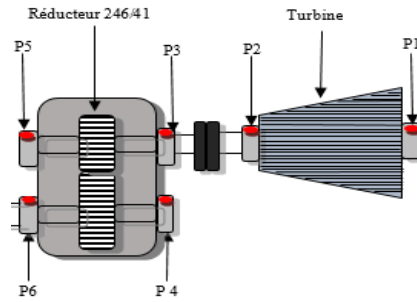


Figure II.7 Schéma cinématique du turbo machine (GZI164)

Tableau II.1 Caractéristiques techniques de la turbine à vapeur.

Type	G400.2
Série	10MVA (GMX1164.1)
Nombre d'étages	16
Nature de fluide	Vapeur
Fournisseur	SIMENS
Pression admission nominale	350 bars
Pression admission max	800 bars
Vitesse maxi	9000 tr/min
Vitesse nominale	6650 tr/min
Vitesse mini	4500 tr/min
Température max	399 C°
Température normale	323C°
Nombre de roue	16 roues
Diamètre moyen	470 mm
Longueur des ailettes	32 mm
Dernier étage diamètre moyen	253 mm
Longueur des ailettes	70 mm
Nombre des ailettes	(40-48-48-56-64-88-88-88-88-88-88-88-88-80-112)
La fréquence de rotation	$F_1 = N_1/60 = 9000/60 = 150$ Hz

#### II.4.4.2 Corrections

##### Calcul de la fréquence de passage des aubes

La fréquence de passage des aubes de chaque roue de la turbine, qui possède 16 roues sur chacune sont montées plusieurs ensembles de 8 aubes.

$$F_{PA} = F_1 * N_p = \dots * (\dots \text{ à } \dots) = \dots \text{ à } \dots \text{ Hz.}$$

$$F_{PEA} = F_1 * N_{aubes} = \dots * \dots = \dots \text{ Hz.}$$

$N_p$  : Le nombre d'aubes dans chaque roue.

$F_{PA}$ : Fréquence de passage des aubes.

$N_{aubes}$  : Le nombre d'aubes fixes dans chaque ensemble de la roue.

$F_{PEA}$  : La fréquence de passage du nombre des aubes fixe par ensemble.

Le tableau II.2 regroupe les caractéristiques fréquentielles des défauts de passage des aubes.

*Tableau II.2 Caractéristiques Fréquences de passage des aubes.*

Nombre de roue	Nombre d'aube ( $N_P$ )	Fréquence de défaut ( $F_{PA}$ )
1	40	5976 Hz
2	48	7171,2 Hz
3	48	7171,2 Hz
4	56	8366,4 Hz
5	64	9561,6 Hz
6	88	13147,2 Hz
7	88	13147,2 Hz
8	88	13147,2 Hz
9	88	13147,2 Hz
10	88	13147,2 Hz
11	88	13147,2 Hz
12	88	13147,2 Hz
13	88	13147,2 Hz
14	88	13147,2 Hz
15	80	11952 Hz
16	112	16732,8 Hz

#### II.4.4.3 Interprétation du défaut de la turbine

La (figure II.8) présentent le spectre calculé dans la bande de fréquence [0-25600 Hz]. On constate l'apparition d'un pic correspondant à la fréquence de passage des ensembles fixes d'aubes  $F_{PEFA} = 1196$  Hz, modulé par la fréquence de rotation de la turbine de 149.5 Hz et ses 7ème et 14ème harmonique correspondant aussi aux fréquences de passage des aubes  $F_{PA}$  du 4ème et 16ème roue (voir tableau II.2).

Toutes les fréquences de passage d'aubes sont modulées par la fréquence de rotation de la turbine  $F_{r1}$ , ce qui nous laisse penser à un défaut dans les aubes des roues du 4ème et du 16ème étage.

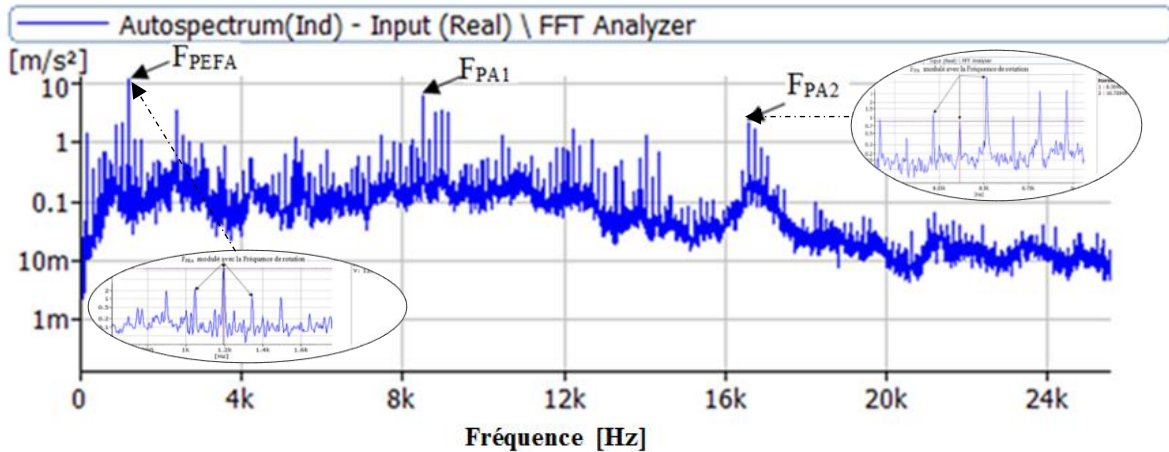


Figure II.8 Spectre du signal d'accélération mesuré sur le palier 2

**II.4.5. Exercice 2 (cas d'un défaut de roulement)**

Un arbre porté par un roulement à billes type 6205 tournant à la vitesse 500 tr/min. On a mesuré sur le palier du roulement le spectre, le signal et le cepstre pour différentes bandes de fréquences, voir figures ci-dessous.

Données :

- Le diamètre moyen  $D_{moy}=39$  mm
- Le nombre de billes  $z=9$
- Le diamètre de la bille  $d=7,94$  mm

Identifier le défaut existant sur ce roulement sur la base des spectres, des signaux et des cepstres des figures ci-dessous et tirez les conclusions nécessaires pour une bonne détection des défauts dans les machines tournantes.

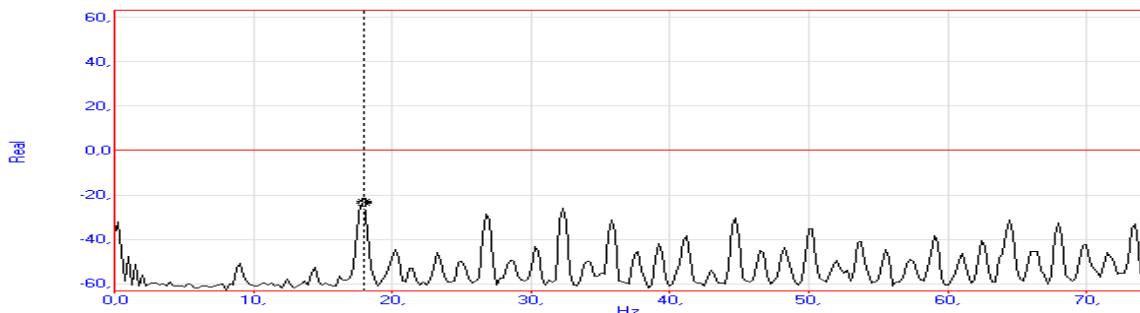


Figure II.9 Spectre fréquentiel mesuré entre 0 et 200 Hz

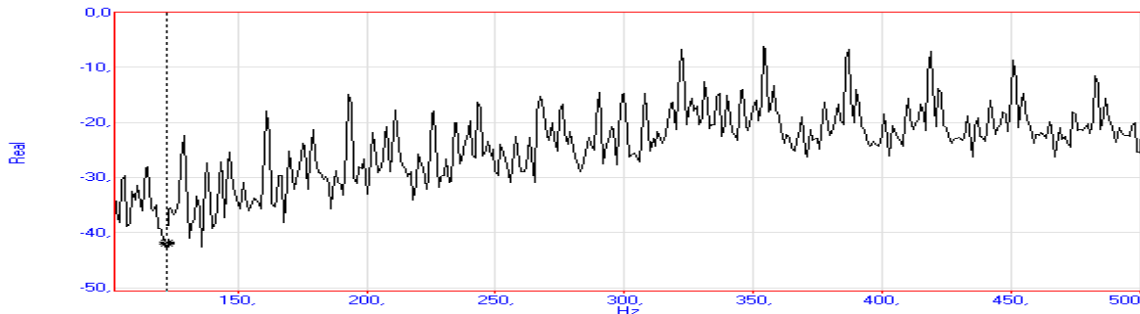


Figure II.10 Spectre fréquentiel mesuré entre 0 et 800 Hz

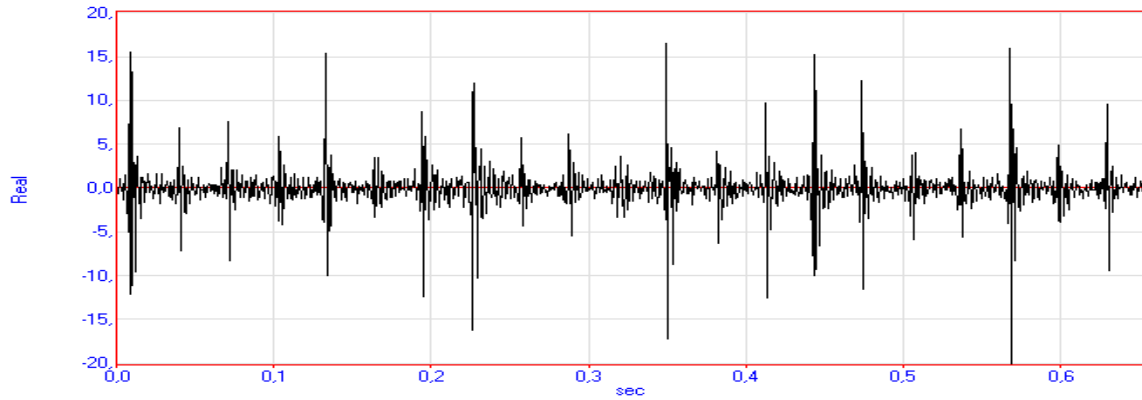


Figure II.11 Signal mesuré sur une période de 1 s

### II.5. Comparaison aux seuils

Les seuils prédéfinis sont généralement au nombre de deux :

#### II.5.1. Seuil Alarme

Indique qu'un changement significatif est intervenu. La machine peut généralement continuer de fonctionner durant la phase d'analyse du problème.

#### II.5.2. Seuil Danger (ou Déclenchement)

Niveau au-delà duquel la poursuite du fonctionnement de la machine peut provoquer une avarie. Une intervention pour réduire les vibrations ou arrêter la machine est requise.

La norme ISO 2372 présenté dans la (figure II.12).

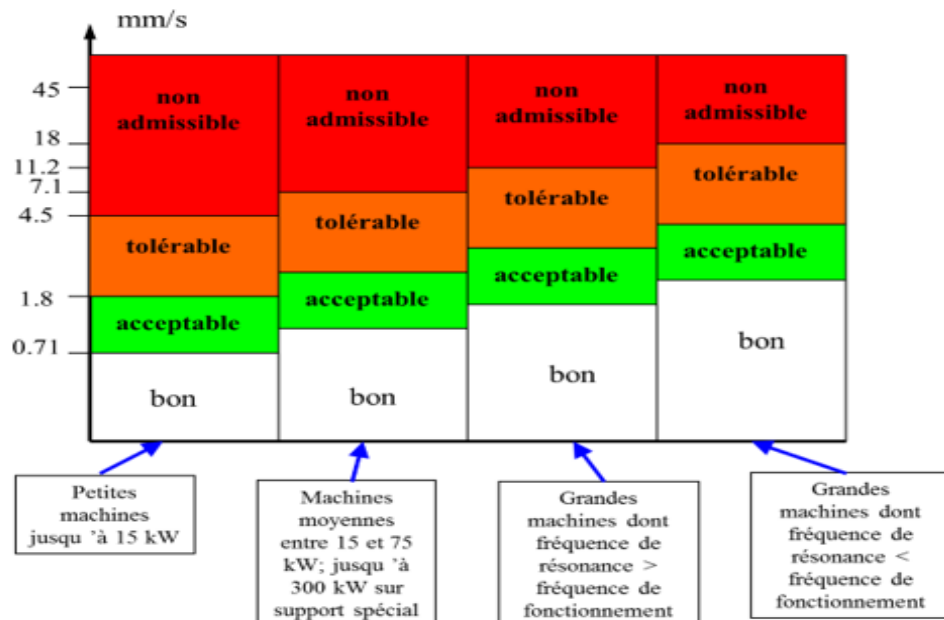


Figure II.12 La norme iso 2372

#### II.5.3. La détermination des seuils à partir d'un état de référence

Sur une machine en bon état, fonctionnant en régime stabilisé à sa charge nominale :

- Faire un relevé IO du paramètre dans les conditions de mesurages qui seront celles de la surveillance Direction, fixation du capteur...
- Positionner la valeur du seuil Alarme SAL à la valeur la plus faible entre 2. IO et la valeur « Non Acceptable » donnée par la norme.
- Positionner la valeur du seuil Danger SDG à la valeur 2, 5 x SAL.

## TP N°1 : Génération des signaux dans Matlab

**But du TP :** Ce TP a pour objet de se **familiariser** avec des notions de Matlab indispensables pour le reste des TP, notamment ceux concernant la **simulation** des signaux, l'échantillonnage, le nombre de points, ...etc. Plusieurs exemples théoriques seront traités ainsi que la **génération** et le traçage des signaux d'accélération de différents échantillonnages mesurés sur banc d'essai.

### 1. Génération de signaux dans Matlab

Dans ce TP on sera le plus souvent appelé à générer des signaux, or le signal vibratoire est une représentation temporelle d'une grandeur mesurée telle que le déplacement, la vitesse ou l'accélération. Cette section sera donc consacrée à la génération du vecteur temps d'où l'introduction de la notion d'échantillonnage.

On a vu antérieurement qu'un vecteur quelconque peut être généré dans Matlab comme suit :

```
» t = ..... ;
```

C'est l'équivalent d'un vecteur (**t**) dont les valeurs sont de 0 à 100 avec un pas **égal à 1**.

Pour connaître la taille de ce vecteur on utilise la commande length :

```
» length(t)
ans = .....
```

Donc notre vecteur (**t**) a 101 valeurs qu'on notera plus tard nombre de points (**Ne**).

Générer un vecteur temps de 0 à 100 avec un pas égal à 0,5, c'est facile :

```
» t = 0 : 0.5 : 100 ;
» length(t)
ans = .....
```

Le pas 0,5 est appelé échantillonnage souvent noté (**te**), c'est l'intervalle de temps entre deux points successifs. L'échantillonnage est lié à la fréquence d'échantillonnage (**Fe**) par : **te=1/Fe**, cette même fréquence étant liée à la fréquence maximale par la relation :  $F_e = 2.56 F_{\max}$  (théorème de Shannon).

Comme exemple on va générer un vecteur temps pour un signal d'accélération de 512 points sachant que la fréquence d'échantillonnage  $F_e = 400$  Hz.

```
» Fe = ..... ;
» te = .....
te = .....
» Ne = ..... ;
» t = 0 : te : (Ne-1)*te ; % Si on met 512 au lieu de 511 on aura un vecteur temps de 513 points,
et
% ce n'est pas ce qu'on demande.
» length(t)
ans = .....
```

### 2. Génération de signaux sinusoïdaux

Pour le même vecteur (**t**) on va générer un signal sinusoïdal (**s**) d'une fréquence de 25 Hz.

```
» s = sin(2*pi*25*t);
» length(s)
ans = .....
```

Pour tracer le signal on utilise la commande plot :

```
» plot (... ,...)
```

Générons maintenant la somme de trois signaux s, s1 et s2 de 25 Hz, 40 Hz et 80 Hz :

```
s1 =.....(...*.....*.....*.....);
» s2 =.....(...*.....*.....*.....);
» ss=s+s1+s2;
» length(ss)
ans = .....
» plot (... ,...)
```

### 3. Application sur des signaux mesurés

Le fichier **xx.mat** contient le signal d'accélération (x) mesuré sur un roulement défectueux monté sur un banc d'essai. La fréquence d'échantillonnage est égale à **Fe=65536 Hz**, tracer ce signal en fonction du temps.

```
» xx; % .....
» x; % .....
» length(x) % .....
ans = .....
» Fe=.....;
» te=.....
» t=.....; % générer le vecteur temps
» plot(.....,.....)
» xlabel ('.....') % nommer l'axe des x
» ylabel ('.....') % nommer l'axe des y
```

Refaire le même travail avec le fichier **yy.mat** qui contient le signal d'accélération (y) d'un roulement défectueux, **Fe=16384 Hz**.

## TP N°2 : Analyse spectrale d'un signal vibratoire et application à la détection d'un défaut de roulement

**But du TP :** L'objectif de ce TP est d'apprendre la méthodologie de procéder à une **analyse spectrale** d'un signal vibratoire dans Matlab. Cette analyse fait intervenir éventuellement la **transformée de Fourier** dont les fondements théoriques ont été vus au cours. Le TP portera donc sur la transformée de Fourier de signaux théoriques simulés (déjà vus au TP 1), suivie de **l'analyse spectrale** de signaux d'accélération mesurés sur un banc d'essai et sur une machine de production.

### 1. Transformée de Fourier

La transformée de Fourier permet le passage du domaine temporel, représenté par le signal, au domaine fréquentiel représenté par le spectre. Les fondements théoriques de cette transformée remontent aux travaux du célèbre physicien Français Jean Batiste Joseph Fourier. Une version rapide de cette transformée a été réalisée par les Américains Cooley et Tukey aux années 50, elle est nommée FFT : Fast Fourier Transform qu'on trouve dans la boîte à outils Signal processing de Matlab. Cette transformée est utilisée dans plusieurs domaines, notamment dans l'analyse spectrale des signaux vibratoires pour le diagnostic d'éventuels défauts dans les machines. En effet, si un défaut se manifeste il va automatiquement induire une composante fréquentielle caractéristique qu'on peut détecter sur le spectre. C'est le cas du balourd qui induit une composante fréquentielle égale à la fréquence de rotation, ou le mésalignement qu'on peut détecter à deux fois la fréquence de rotation ou encore les défauts de roulements dont les fréquences caractéristiques peuvent être calculées par les formules cinématiques déjà vues au cours.

### 2. Transformée de Fourier d'un signal sinusoïdal

Comme nous l'avons vu au TP 3 on va générer un signal sinusoïdal d'une fréquence de 25 Hz, le nombre de points est pris égal à 512 points, la fréquence d'échantillonnage étant égale à 400 Hz.

```

» Fe=.....;
» te=.....
te =
.....
» Ne=.....;
» t=.....;
» s1=.....;
» plot (..., ...)

```

Pour calculer la transformée de Fourier de ce signal dans Matlab on utilise la commande FFT, puis on doit générer l'axe des fréquences pour pouvoir tracer le spectre.

```

» TF=.....; % Génération de la transformée de Fourier rapide
» TFA=.....; % Ne garder que la partie réelle de la transformée
» Ne1=..... ;
» F=.....; % Générer l'axe des fréquences
» plot (.....) % Tracer le spectre sur la moitié du nombre de points

```

Le spectre montre bien une composante fréquentielle égale à .... Hz.

Essayons maintenant de calculer la FFT d'un signal somme de trois sinusoïdes : 25 Hz, 80 Hz et 150 Hz.

```

» s2= .....(.....);
» s3=.....(.....);
» ss=.....;
» plot(.....,.....)
» TF2=.....(...);
» TFA2=.....(.....);
» plot (....., .....(..... :.....))

```

On voit bien les trois composantes correspondant aux trois fréquences simulées : ... Hz, .... Hz et ..... Hz.

### 3. Analyse spectrale de signaux mesurés

Le fichier ge2000400.mat est un signal d'accélération mesuré sur un roulement à rouleaux cylindriques du type Nu205 tournant à 2070 tr/min soit 34,5 Hz. La fréquence d'échantillonnage est égale à 1024 Hz. On vous demande de procéder à l'analyse spectrale de ce signal et donner un verdict sur son état.

```

» ..... ; % Charger le fichier
» .....; % Charger le vecteur
» length (.....)
ans =
    .....
» Fe=.....;
» te=.....
te =
    .....
» t=.....;
» plot(.....,.....)
» xlabel ('.....')
» ylabel ('.....')
» TF=fft (.....);
» TFA=.....;
» plot(.....(.....))
» xlabel('.....')
» ylabel('.....')

```

## TP N°3 : Analyse cepstrale d'un signal vibratoire : Application à la détection des défauts d'engrenages

**But du TP :** Ce TP est une suite logique au TP 2 dans lequel nous avons appris l'analyse spectrale d'un signal vibratoire. Nous allons comprendre l'efficacité de l'analyse **cepstrale** dans le domaine de la détection des défauts dans les machines tournantes par des applications sur des signaux mesurés sur des roulements et des engrenages défectueux.

### 1. Analyse cepstrale

Cette technique, bien qu'elle soit utilisée beaucoup plus pour la détection des défauts d'engrenages, a été aussi utilisée pour les roulements. Fondée sur les travaux de Randall, elle consiste à calculer un vecteur appelé *cepstre*, verlan du mot spectre, qui représente la transformée de Fourier inverse du logarithme du spectre.

$$C(\tau) = TF^{-1}[\log(S(f))]$$

$\tau$  Est la variable définissant les périodicités dans le domaine pseudo-temps que représente le cepstre, appelée *quéfrence* suivie de ses *rhamoniques*.

Alors que le spectre permet de visualiser les différentes périodicités contenues dans un signal, le cepstre permet lui de retrouver d'éventuelles périodicités dans un spectre. Cette technique a été très utilisée pour les défauts de type chocs périodiques notamment ceux des engrenages, car elle permet de mettre en évidence les pas séparant les harmoniques d'un peigne de raies aussi bien pour les hautes vitesses de rotation que pour les plus basses.

### 2. Cepstre d'un signal vibratoire

Le cepstre d'un signal est directement calculé par Matlab par la commande **rceps**. Soit  $s(t)$  un signal quelconque de  $N_e$  points, le calcul du cepstre de  $s(t)$  s'effectue de la manière suivante :

```
» c=.....
» Ne1=.....
» c1=c(.....)
» t1=t(.....)
» plot(.....)
```

On constate bien que le traçage du cepstre s'effectue sur la moitié du vecteur temps sinon on aura un phénomène de miroir comme nous allons le constater sur les exemples qui suivent.

### 3. Analyse cepstrale d'un signal vibratoire

Le fichier G1D2532.mat est un signal d'accélération mesuré sur un engrenage défectueux. On va utiliser l'analyse cepstrale pour détecter le défaut. La fréquence d'échantillonnage est égale à 8192 Hz.

```
» .....; % Chargement du fichier
» .....; % Chargement du vecteur
» length(x) % Nombre de points du signal
ans = .....
» Fe=.....;
» te=.....
```

```

te = ..... ;
» t=..... ;
» plot(.....)
» xlabel ('.....')
» ylabel ('.....')
» TF=.....(.....) % Calcul de la transformée de Fourier du signal
» TFA=.....(.....)
» F=(.....)/.....*(.....) % Génération de l'axe des fréquences
» plot(.....(.....(.....))) % Traçage de l'FFT
» xlabel('.....')
» ylabel('.....')
    
```

Le spectre ne donne **aucune** information sur l'existence du défaut.

```

» C=.....;
» plot (.....)
» axis ([.....])
» xlabel ('.....')
» ylabel('.....')
    
```

On constate qu'il y a un effet de **miroir**, donc on trace la moitié du vecteur calculé sur la moitié du vecteur temps.

```

» C1=C(... :...)
» t1=t(... :.....)
» plot(.....)
» axis([.....])
» xlabel ('.....')
» ylabel('.....')
    
```

Sur le cepstre on constate une composante correspondant à 0.0415 s soit (1/0.0415 = 24.09 Hz) et l'une de ses rhamoniques. Cette composante correspond parfaitement à la fréquence de rotation d'une des roues (24 Hz) ce qui confirme qu'elle est défectueuse. En temps normal, cette composante n'aurait pas dû être observée sur le cepstre.

#### 4. Travail demandé

Analyse cepstrale d'un signal d'un roulement défectueux du type 6200 monté sur un banc d'essais figure II.13.

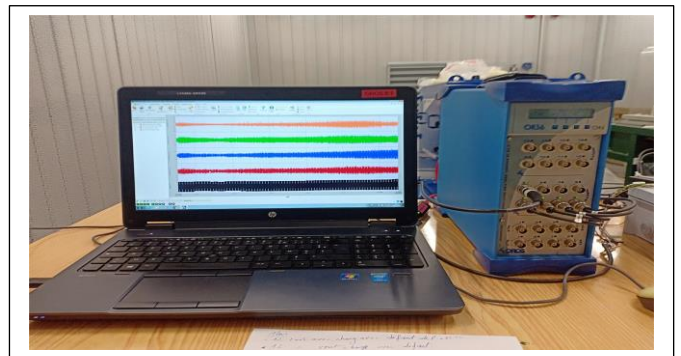
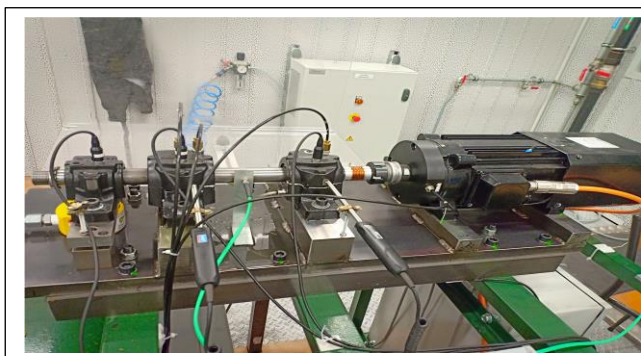


Figure II.13 Banc d'essais avec l'analyseur ORSO

## Chapitre III : Origine des vibrations

### Contenu du chapitre

1. Sources d'excitation
2. Différents types de défauts
3. Phénomènes particuliers aux turbomachines
4. Phénomènes cinématique

### III.1. Les sources d'excitation

Les sources d'excitation vibratoires dans les machines tournantes peuvent être classées en différentes catégories :

- Forces périodiques (balourd)
- Forces transitoires (variations de charge)
- Forces impulsionnelles (chocs)
- Forces aléatoires (frottements)

Les phénomènes à l'origine des vibrations dépendent de la constitution de la machine et de ses paramètres de fonctionnement. Les plus courants sont présentés dans ce chapitre ainsi que leurs manifestations typologiques afin de permettre leur identification et leur suivi dans le cadre d'un programme de maintenance conditionnelle.

### III.2. Différents types de défauts

#### III.2.1. Le balourd mécanique

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 (figure III.1) :

- **Balourd statique** : L'axe d'inertie de l'arbre est parallèle à l'axe de rotation (fig. A).
- **Balourd de couple** : L'axe d'inertie n'est plus colinéaire à l'axe de rotation, les deux axes formant un angle (fig. B).
- **Balourd dynamique** : IL s'agit d'une combinaison des deux premiers et correspond au cas le plus courant (fig. C).

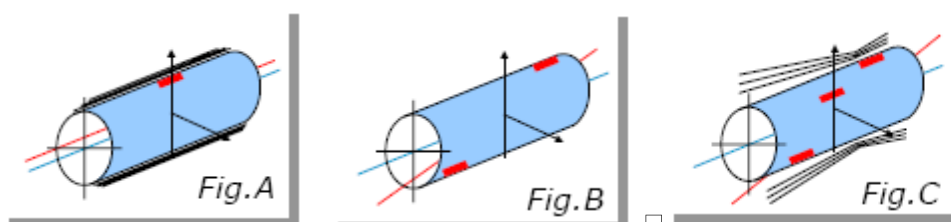


Figure III.1 Différents types de balourd

#### ➤ Typologie du balourd

Le balourd se manifeste par une énergie vibratoire localisée (figure III.2):

- A la fréquence de rotation  $F_0$

- Aux fréquences des harmoniques  $2F_0, 3F_0...$
- Il existe toujours un balourd résiduel sur une machine tournante.

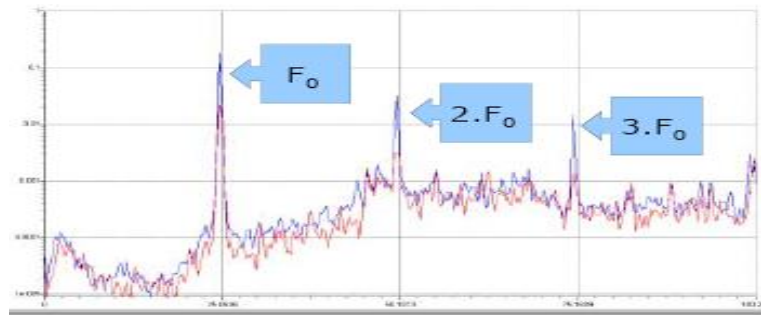


Figure III.2 spectre typologique de balourd

### III.2.2. Délignage

Le défaut de lignage est dû aux non-coïncidences des axes de rotation de 2 machines accouplées. Selon les positions géométriques des deux axes, on distingue 3 types de délignage (figure III.3).

- **Délignage parallèle** : Défaut de concentricité des deux arbres
- **Délignage angulaire** : Défaut de parallélisme des deux arbres
- **Délignage angulaire et parallèle** : Combinaison des deux précédents



Figure III.3 Différents types de délignage

- **Typologie du délignage**

Il se manifeste par une énergie vibratoire localisée à  $2.F_0, 3.F_0$  ou  $4.F_0$  dans toutes les directions de mesurages (figure III.4). L'évolution du défaut de lignage entraîne l'augmentation des raies caractéristiques.

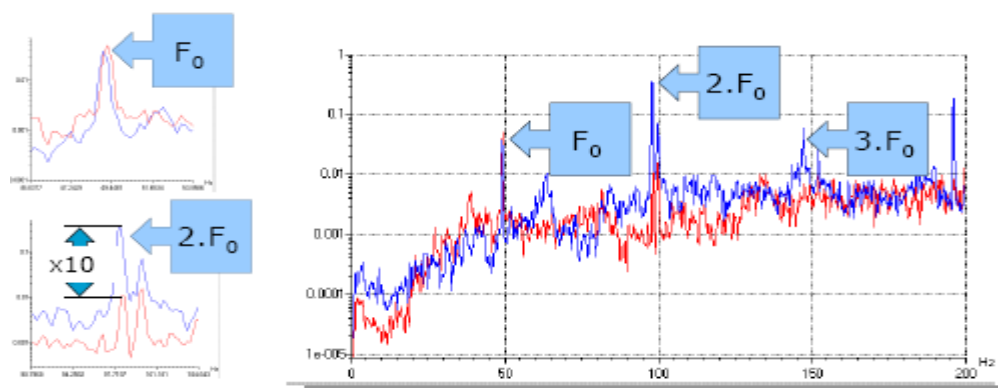


Figure III.4 spectre typologique de délignage

### III.2.3. Chocs périodiques (chocs à la rotation)

Les chocs périodiques peuvent être internes ou externes à la machine :

- ❖ Origine des chocs périodiques externes :
  - Défaut de fixation.

- D'une autre machine (alternative, presse...).
- ❖ Origine des chocs périodiques internes
  - Dégradation de roulement.
  - Dégradation d'engrèvements.
  - Jeux excessifs.
  - **Typologie des chocs périodiques**

La manifestation spectrale d'un phénomène de chocs périodiques est un peigne de raies (figure III.5).

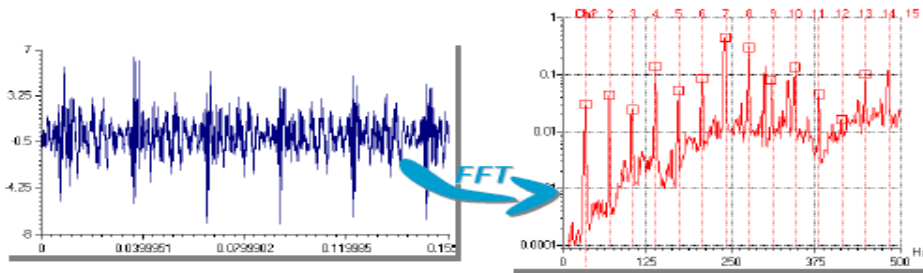


Figure III.5 spectre typologique des chocs périodiques

### III.2.4. Principe de l'engrènement

Un engrenage est un système mécanique composé de deux roues dentées ou plus engrénées servant :

- ✓ Soit à la transmission du mouvement de rotation entre elles.
- ✓ Soit à la propulsion d'un fluide (on parle alors de pompe à engrenages).

Dans le cas de la transmission de mouvement, les deux roues dentées sont en contact l'une avec l'autre et se transmettent de la puissance par obstacle. Un engrenage est composé d'un pignon, c'est ainsi que l'on nomme la seule roue ou la roue la plus petite, et d'une roue, d'une crémaillère, d'une couronne ou d'une vis. Quand plus de deux roues dentées sont présentes, on parle de train d'engrenages (figure III.6).

Le rapport des vitesses des deux arbres est lié au nombre de dents de chacun des pignons en contact :

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{N_1}{N_2} \tag{III.1}$$

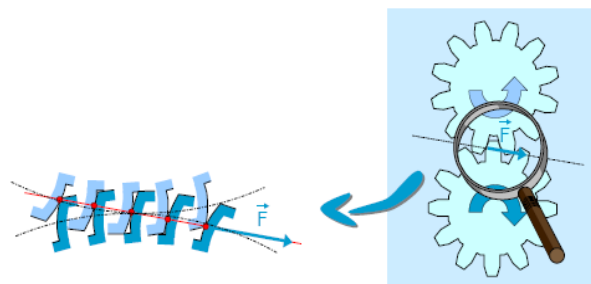


Figure III.6 Principe de l'engrènement

#### ➤ Fréquence d'engrènement

La fréquence d'engrènement de denture  $F_E$  est égale à :  $F_E = N_1 * F_1 = N_2 * F_2$

**Remarque** : L'amplitude vibratoire de la raie d'engrènement  $F_E$  est très dépendante de la charge de la machine puisque l'engrènement assure la transmission du couple.

➤ **Spectre typologique initial**

En l'absence de défaut, on retrouve dans le spectre vibratoire la fréquence d'engrènement  $F_E$  et ses harmoniques  $2.F_E$ ,  $3.F_E$  (figure III.7).

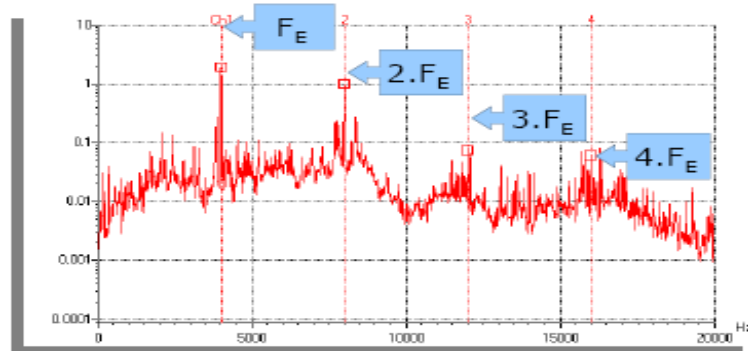


Figure III.7 Spectre typologique initial de l'engrènement

➤ **Usure généralisée de la denture**

L'usure générale de la denture se traduit par un matage du profil des dents. On obtient un choc périodique « mou » à la fréquence d'engrènement, qui génère un peigne de raies d'amplitudes décroissantes (figure III.8).

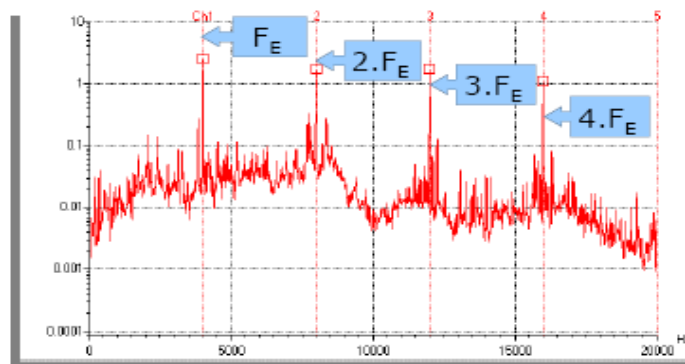


Figure III.8 Spectre typologique usure généralisée de la denture

➤ **Jeu de denture insuffisant**

Si le jeu de fond de denture est insuffisant, il se produit un effort à l'engagement et au déengagement des dents : La raie à  $2.F_E$  augmente et devient parfois prépondérante (figure III.9).

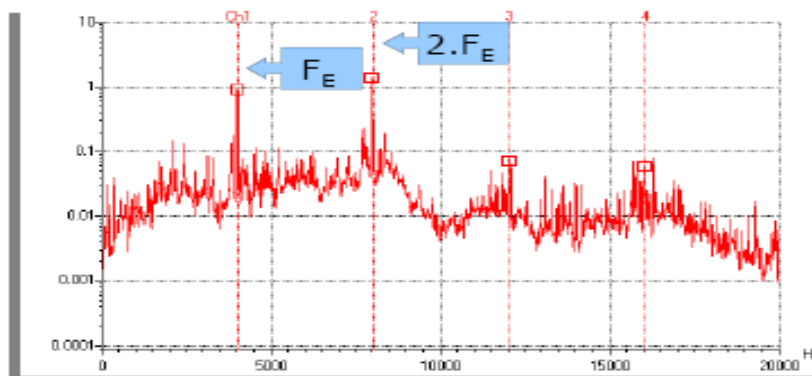


Figure III.9 Spectre typologique jeu de denture insuffisant

➤ **Jeu de denture excessif**

Un jeu de fond de denture trop important génère un choc périodique « dur » à la fréquence d’engrènement (rattrapage du jeu), qui produit un peigne de raies d’amplitudes proches (figure III.10).

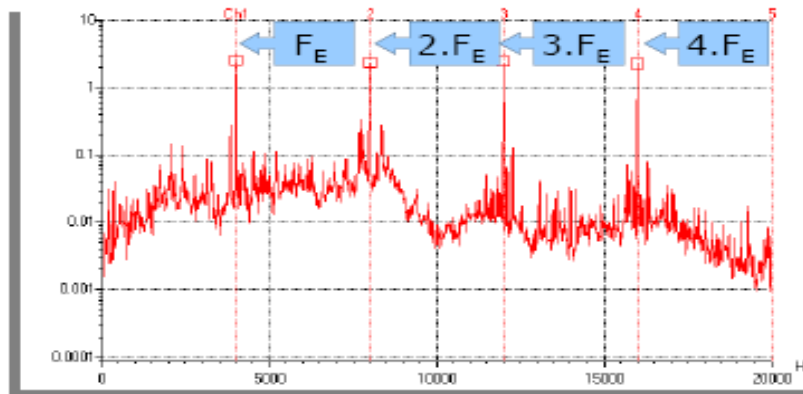
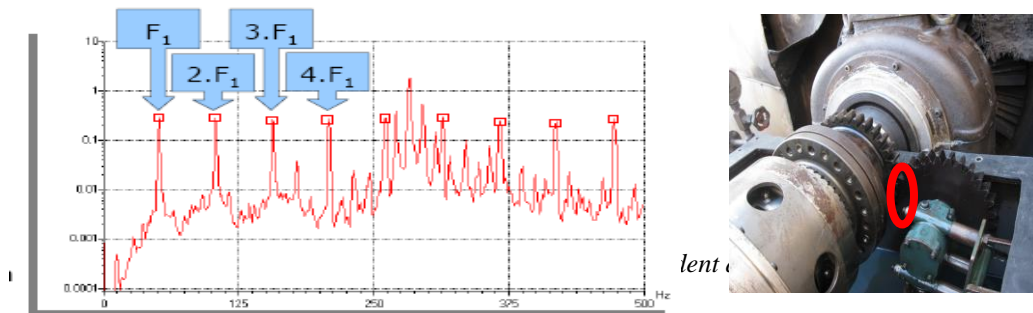


Figure III.10 Spectre typologique jeu de denture excessif

➤ **Une dent détériorée sur un pignon**

Le passage de la dent détériorée provoque un choc « dur » à chaque tour. Le spectre résultant est un peigne de raies harmoniques de la fréquence de rotation F<sub>1</sub> du pignon incriminé (figure III.11).



➤ **Une dent détériorée sur chaque pignon**

Le spectre résultant est composé d’un peigne de raies harmoniques de la fréquence de :

- Rotation F<sub>1</sub>
- Rotation F<sub>2</sub>
- Coïncidence F<sub>C</sub> définie par :

$$F_c = \frac{F_E}{N_C} \tag{III.2}$$

- Avec N<sub>C</sub>=PPCM de N<sub>1</sub> et N<sub>2</sub>

**III.2.5. Arbre support pignon cintré (faux rond)**

La pression au niveau de la denture est modulée à la fréquence F<sub>1</sub> de rotation de l’arbre cintré. Le spectre correspondant présente des bandes latérales autour de F<sub>E</sub> espacé de F<sub>1</sub> (figure III.12).

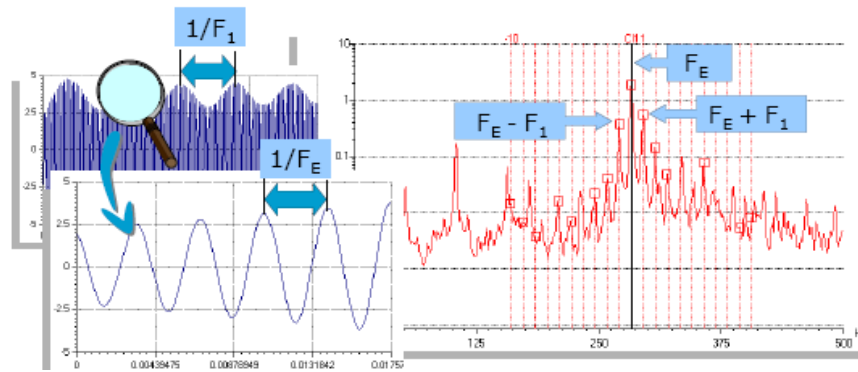


Figure III.12 Spectre typologique des bandes latérales autour de  $F_E$  espacé de  $F_1$

➤ **Déformation complexe de l'arbre**

- Si la déformation de l'arbre est plus complexe qu'un simple cintrage, le nombre de bandes latérales de modulation augmente.
- Plus la déformation de l'arbre est importante, plus les amplitudes des bandes latérales sont élevées (figure III.13).

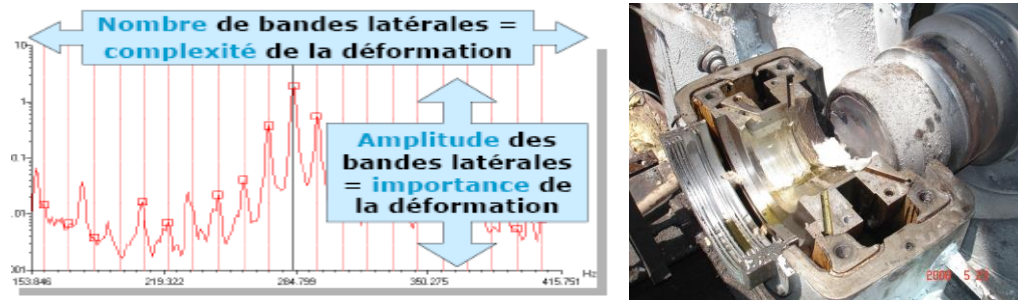


Figure III.13 Spectre typologique de déformation complexe de l'arbre

**III.2.6. Combinaison de défauts**

- L'addition de différents défauts (denture détériorée et cintrage d'arbre par exemple) est fréquente dans la pratique et conduit à des spectres combinant les typologies des défauts **élémentaires** correspondants (figure III.14).

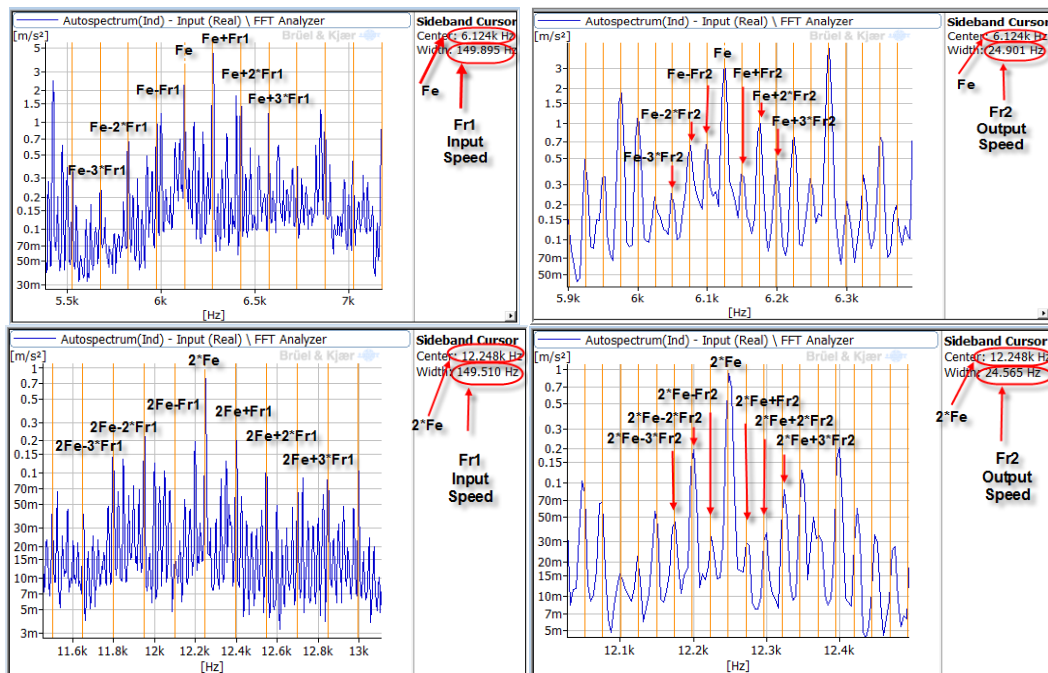


Figure III.14 Spectre typologique de combinaison de défauts (roue et pignon)

### III.2.7. Les transmissions par courroie

#### ➤ Courroies trapézoïdales

La tension de la courroie est perceptible sur les niveaux de bruit des paliers équipés de roulements.

La quantification du bruit de roulement aide à régler la tension de courroie.

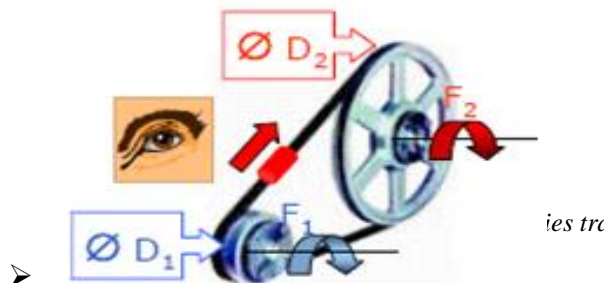
La principale cause d'usure de courroie est le délignage entre deux poulies (figure III.15).

Le glissement mécanique de la courroie sur la poulie est de l'ordre de 2% à 5%. Si le glissement est plus important, une usure prématurée peut survenir.

Un excentrement de poulie peut induire un phénomène vibratoire à la fréquence de rotation. Fréquence de passage de la courroie  $F_p$

$$F_p = \frac{\pi D_1}{\pi \frac{(D_2 + D_1)}{2} + 2 * E + \frac{(D_2 - D_1)}{4 * E}} * F_1 \tag{III.3}$$

$$F_p = \frac{\pi * D_1}{L} * F_1 = \frac{\pi * D_2}{L} * F_2 \tag{III.4}$$



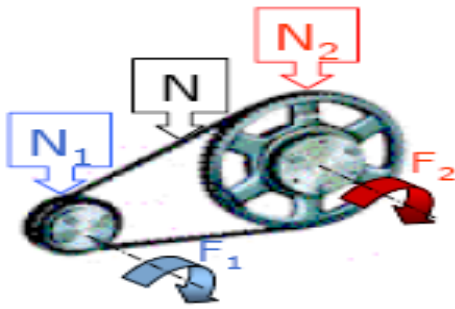
Avec :

L = longueur courroie.

E = entraxe des poulies.

Fréquence de passage  $F_p$  : Les problèmes de courroies (déformation, point dur, crevasse) génèrent des vibrations à la fréquence de passage (figure III.16)

$$\tag{III.5}$$



$$F_p = \frac{F_E}{N} = \frac{N_1 * F_1}{N} = \frac{N_2 * F_2}{N}$$

N<sub>1</sub> = Nbre dents poulie 1  
 N<sub>2</sub> = Nbre dents poulie 2  
 N = Nbre dents courroie

Figure III.16 Courroies crantées

### III.2.8. Les Roulements

#### ➤ Généralités et constitution

Les roulements réalisent le positionnement de l'arbre dans les paliers en assurant la transmission des efforts vers la structure (figure III.17).

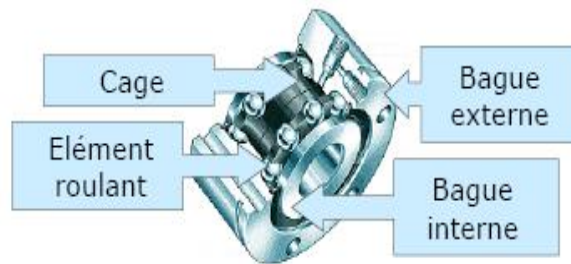


Figure III.17 composants d'un roulement

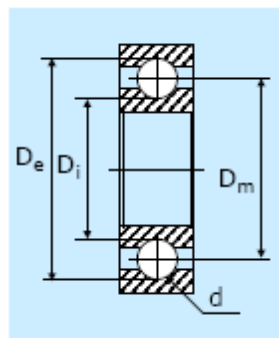
#### ➤ Fréquences cinématiques des roulements

d = diamètre des éléments roulants

Z = nombre d'éléments roulants

D<sub>e</sub> = diamètre du chemin de roulement de la bague externe

D<sub>i</sub> = diamètre du chemin de roulement de la bague interne (figure III.18).



$$D_m = \frac{D_e + D_i}{2}$$

Figure III.18 cinématiques d'un roulement

D<sub>m</sub> = diamètre primitif du roulement

α = angle de contact (roulement à contact oblique)

F<sub>0</sub> = fréquence de rotation de l'arbre (la bague externe est supposée fixe)

➤ **Fréquences des défauts des roulements**

Fréquence de rotation de la cage	$F_c = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{d}{D_m} * \cos \alpha \right) F_0$
Fréquence de défaut bague externe	$F_{BE} = \frac{Z}{2} \left( 1 - \frac{d}{D_m} * \cos \alpha \right) F_0$
Fréquence de défaut bague interne	$F_{BI} = \frac{Z}{2} \left( 1 + \frac{d}{D_m} * \cos \alpha \right) F_0$
Fréquence de rotation des éléments roulants	$F_{BI} = \frac{1}{2} * \frac{D_m}{d} \left( 1 - \frac{d^2}{D_m^2} * \cos^2 \alpha \right) F_0$

**Remarque :** Quel que soit le roulement,  $F_{be} + F_{bi} = Z.F_0$

➤ **Les dégradations**

Les causes de dégradation de roulements sont nombreuses :

- Usure normale
- Charge
- Défaut de graissage
- Défaut de montage
- Agents extérieurs...

La dégradation d'un roulement se traduit généralement par un écaillage des surfaces en contact (bagues et éléments roulants) qui s'étend et évolue dans le temps. La dégradation peut être localisée ou généralisée (figure III.19).



Figure III.19 défaut de bagues et éléments roulants

➤ **Les dégradations localisées**

Un défaut localisé sur l'un des éléments, se manifestera par un choc dur à la fréquence de contact de la détérioration :

- |                            |                 |
|----------------------------|-----------------|
| Défaut sur bague externe   | choc à $F_{BE}$ |
| Défaut sur bague interne   | choc à $F_{BI}$ |
| Défaut sur élément roulant | choc à $2.F_B$  |

❖ **Remarques**

Le défaut de bague interne (tournante) est souvent modulé par la fréquence de rotation.

Le spectre associé est un spectre de raies à la fréquence du choc (figure III.20).

L'amplitude du choc étant faible, les raies ne seront discernables qu'autour des résonances de structure ou au moyen d'outils spécifiques.

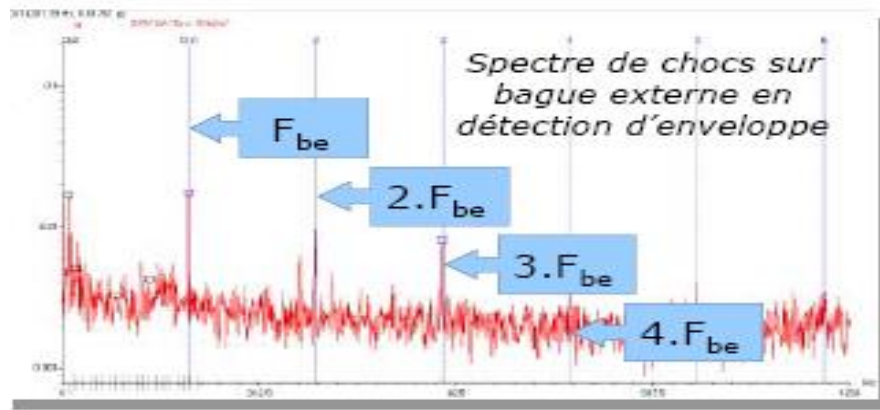


Figure III.20 Spectre typologique de chocs sur bague externe en détection d'enveloppe

❖ **Remarque**

L'analyse du signal temporel peut aussi être pertinente dans ce contexte.

➤ **Problèmes relatifs au rotor**

La fréquence de passage des barres du rotor (RBPF) et/ou ses harmoniques (RBPF = Nombre de barres du rotor x RPM). Souvent ceci donne des niveaux très hauts à la 2xRBPF, et seulement de petites amplitudes à la fréquence 1x RBPF (figure III.21).

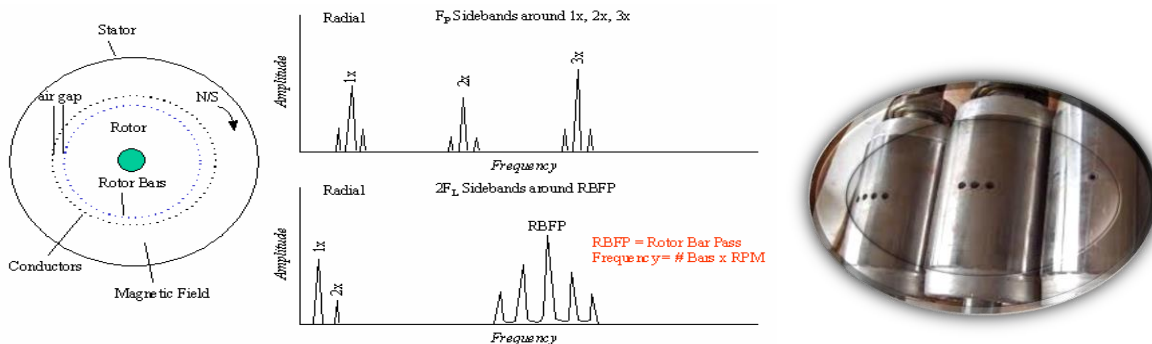


Figure III.21 Spectre typologique de fréquence de passage des barres du rotor

➤ **Passage des pales et des aubes**

La fréquence de passage des ailettes (BPF) = Nombres des ailettes (ou turbines) x RPM. Cette fréquence existe dans les pompes, ventilateurs et les compresseurs et normalement ne pose aucun problème. Toutefois, une large amplitude de la BPF et ses harmoniques, (figure III.22).

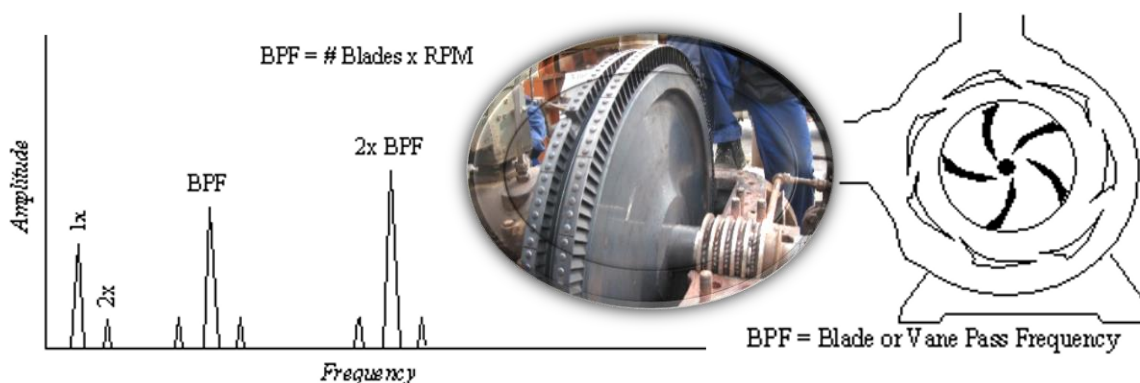


Figure III.22 Spectre typologique de fréquence de passage des pales et des aubes

➤ **Lubrification déficiente (effet de foin)**

Il arrive des fois que le roulement n’atteint pas sa durée de vie calculée. Il existe plusieurs raisons pour cela, une charge plus importante que prévue, une lubrification inadéquate, mauvaise manipulation, étanchéité insuffisante et un ajustement serré des éléments du roulement. Chacun de ces facteurs produit un effet spécifique sur le palier.

L’étude historique de ce cas sert à démontrer la possibilité de détecter l’effet d’une lubrification inadéquate sur les éléments roulants (figure III.23).

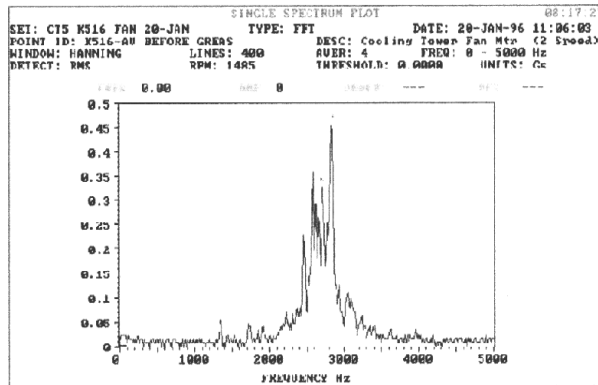


Figure III.23 Effet de foin

➤ **Instabilités de paliers**

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

- Charge appliquée au rotor.
- Vitesse de rotation.
- Viscosité de l’huile.

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

$$0.23 * F_0 < F_{instabilité} < 0.63F_0 \text{ Selon la technique du palier (figure III.24).}$$

III.2.8.1 Fouettement et tournoisement : Il existe deux types d’instabilités

- Le fouettement d’huile (Oil Whip) : Instabilité dont la fréquence varie avec la fréquence de rotation du rotor (figure III.25).
- Le tournoisement d’huile (Oil Whirl) : Instabilité dont la fréquence coïncide avec la vitesse critique correspondant à la première pulsation propre du rotor (rotor en état flexible)

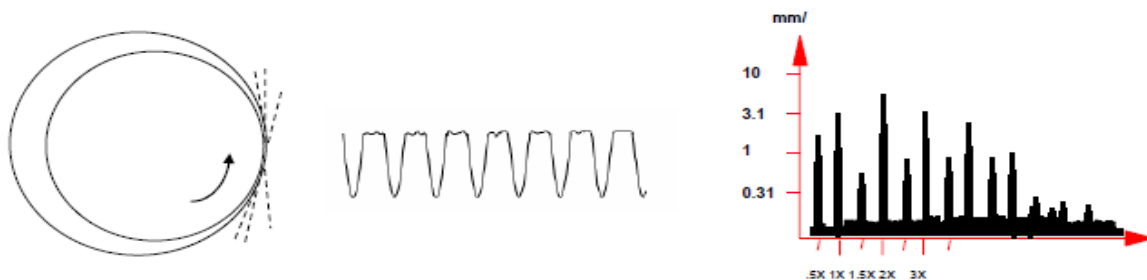


Figure III.24 Spectre typologique [Brüel & Kjaer Vibro]

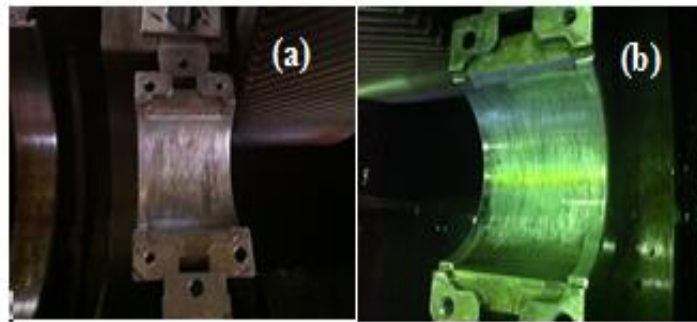


Figure III.25 Usure dans un palier

### III.3. Les phénomènes particuliers aux turbomachines

#### III.3.1. Généralités des turbomachines

Une turbomachine est un équipement dont le rôle est d'assurer un échange d'énergie mécanique entre un débit permanent de fluide et un rotor tournant autour de son axe. On distingue :

- a) Les turbomachines génératrices ou de compression
  - Pompes
  - Ventilateurs
  - Soufflantes
  - Compresseurs
- b) Les turbomachines réceptrices ou de détente
  - Turbines

#### III.3.2. Cas de la pompe centrifuge

Les pompes centrifuges sont très répandues dans l'industrie en raison de leur très large domaine d'application (figure III.26).

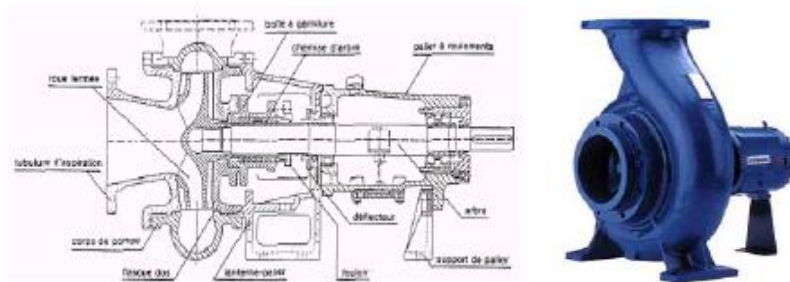


Figure III.26 pompe centrifuge

#### III.3.3. Principe de fonctionnement

Le fluide pompé entre dans la roue pour l'impulser, ce qui lui apporte de l'énergie en vitesse et en pression (figure III.27).

À la sortie de l'impulser, la volute canalise le fluide en réduisant sa vitesse d'écoulement, transformant en pression l'énergie cinétique acquise. Certains modèles sont équipés d'un diffuseur à ailettes fixes. Ceci permet d'équilibrer la pression autour de la roue.

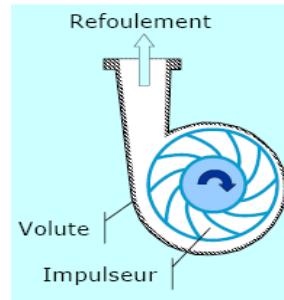


Figure III.27 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge

### III.4. Phénomènes cinématiques

#### III.4.1. Passage d'aubes

Soient :

$F_0$  la fréquence de rotation de la roue,

$N_1$  le nombre d'aubes de la roue

$N_2$  le nombre d'ailettes fixes du diffuseur

Les fréquences suivantes sont susceptibles d'apparaître  $N_1.F_0$ ,  $N_2.F_0$  et leurs harmoniques

$N_1.N_2.F_0$  Le suivi de toutes ces fréquences présente peu d'intérêt mais permet d'interpréter le spectre.

**Remarque :** Toutes les turbomachines sont susceptibles de présenter des phénomènes analogues (turbine, compresseur,...)

#### III.4.2. Phénomènes non cinématiques

##### ➤ Les turbulences

- Les turbulences d'écoulement des fluides produisent des variations de vitesse locales du fluide transporté.
- Lorsque la vitesse d'un liquide augmente, sa pression diminue.
- Les variations de vitesse d'écoulement dues aux turbulences créent des variations de pression aléatoires qui excitent les structures et les tuyauteries.
- Il en résulte une image vibratoire dont l'aspect est un bruit large bande, analogue à celui produit par la dégradation d'un roulement.

## Chapitre IV : Analyse des huiles

### Contenu du chapitre :

1. L'analyse des lubrifiants pour le suivi des équipements
2. Organisation des prélèvements et des suivis

### IV.1. L'analyse des lubrifiants pour le suivi des équipements

#### IV.1.1. Définition d'une huile

Toute substance d'origine minérale, végétale ou synthétique et animale et graisses végétales qui est généralement glissante, combustible, visqueuse, liquide ou liquéfiable à température ambiante, soluble dans une variété de solvants organiques comme l'éther mais pas dans l'eau et utilisée dans une grande variété de produits spécialement les lubrifiants et les fuels (figure IV.1).

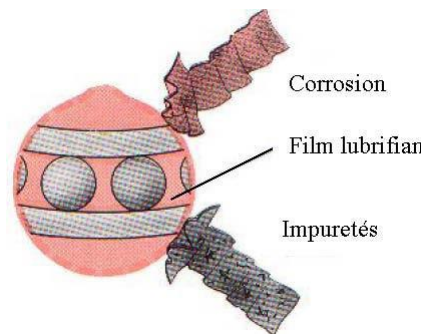


Figure IV.1 But de la lubrification

#### IV.1.2. Théorie de la lubrification

Théoriquement une pièce correctement lubrifiée, fonctionnant dans des conditions idéales durera indéfiniment. En réalité ce n'est pas le cas, mais une pièce bien lubrifiée a le plus de chance d'atteindre sa durée de service maximale.

En effet le lubrifiant forme un film entre les pièces en mouvement. Il adhère fortement aux surfaces qui doivent être séparées. Lorsque les pièces se déplacent l'une par rapport à l'autre, le film est soumis à des contraintes internes de cisaillement. Il en résulte un glissement entre les différentes couches du film avec L'épaisseur du film lubrifiant est déterminé principalement par la vitesse des pièces à lubrifier, la température de fonctionnement et les caractéristiques du lubrifiant (figure IV.2).

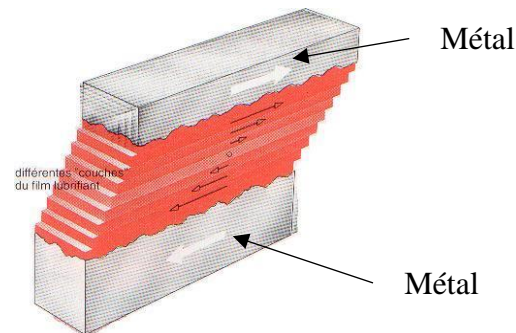


Figure IV.2 Frottement entre les couches de lubrifiant

### IV.1.3. Le rôle d'un lubrifiant

Un lubrifiant circule dans toutes les machines et tous les moteurs. Il joue de nombreux rôles :

- *Diminuer les frottements et les résistances passives dans les machines, améliorer leur rendement et économiser l'énergie.*
  - *Protéger les organes lubrifiés contre les diverses formes de corrosion et d'usure, donc contribuer à leur longévité.*
  - *Évacuer la chaleur produite dans les moteurs ou lors de l'usinage, favoriser l'équilibre thermique des machines.*
  - *Améliorer l'étanchéité vis-à-vis des gaz, des liquides ou des poussières.*
  - *Éliminer les impuretés et les débris d'usure.*
  - *Transmettre de l'énergie ou de la chaleur.*
1. *Assurer l'isolation électrique.*
- *Améliorer l'état de surface des pièces usinées.*

Chacune de ces fonctions peut être plus ou moins développée selon l'application. De tous les lubrifiants, enrichis ou non, les huiles et les graisses minérales à base de pétrole sont les plus utilisés.

### IV.1.4. Les différents types des huiles de base

#### ❖ Les huiles minérales

Les huiles minérales proviennent de la distillation du pétrole brut (raffinage). D'un prix peu élevé, elles présentent des performances "moyennes" les huiles minérales sont les plus utilisées aussi bien dans les applications automobiles qu'industrielles.

#### ❖ Les huiles de synthèse

Les huiles de synthèse sont des produits obtenus par réaction chimique de plusieurs composants. Elles ne sont utilisées que pour des applications spéciales à des températures de fonctionnement supérieures à 90°C, ou à de très basses températures. Ces huiles, obtenues par des procédés chimiques complexes sont plus chères mais elles offrent des performances supérieures : indice de viscosité plus élevé, meilleure tenue thermique, meilleure résistance à l'oxydation, une stabilité thermique exceptionnelle.

### IV.1.5. Propriétés et caractéristiques des huiles

**a) Couleur :** On distingue la couleur par transparence et la couleur par réflexion. C'est une indication du degré de raffinage et de pureté.

**b) Masse volumique :** Pour un liquide, c'est la masse de l'unité de volume à une température donnée (15°C) en kg/m<sup>3</sup>

**c) La viscosité**

La viscosité est la propriété la plus connue des huiles lubrifiantes. Elle est la référence pour le frottement interne d'une huile lors de l'écoulement. La viscosité est une grandeur dépendante de la température. Lorsque la température est faible et que l'huile est donc froide, le frottement intérieur est important et la viscosité élevée. Plus l'huile est chaude, plus le frottement interne est réduit et la viscosité faible.

On fait une distinction entre la viscosité cinématique et la viscosité dynamique. La conversion s'effectue au moyen de la densité de l'huile et selon la formule indiquée ci-dessous :

$$\text{Viscosité cinématique} = \text{viscosité dynamique} / \text{densité}$$

La dimension (unité) pour la viscosité cinématique est mm<sup>2</sup>/s, autre fois Cst (centistoke) ; celle de la viscosité dynamique est MPa s, autre fois CP (Centi Poise).

La viscosité cinématique est mesurée dans des viscosimètres à tube capillaire, tandis que la viscosité dynamique est mesurée généralement dans des viscosimètres à rotation (notamment pour la viscosité des basses températures).

**d) Tenue viscosité-température (indices de viscosité)**

La variation de la viscosité due à l'augmentation ou à la baisse de la température peut être différente d'une huile à l'autre. Une huile, dont la viscosité varie le moins possible en cas de fluctuations de la température, est appropriée pour la pratique. De ce fait, on garantit un parfait démarrage à froid et une force portante suffisante pour le film lubrifiant à température élevée. Pour la tenue viscosité-température, il existe un indice sans dimension, l'indice de viscosité. Plus l'indice de viscosité est élevé, plus la baisse de viscosité est faible en cas d'augmentation de la température. Les huiles mono grades ont un indice de viscosité proche de 100, et il peut aller jusqu'à 180 pour les huiles multigrades des moteurs.

**e) L'indice de viscosité**

L'indice de viscosité donne la relation entre la viscosité et la température. Une huile moins sensible à la température a un indice de viscosité élevé, tandis qu'une huile plus sensible à la température a un indice de viscosité faible (figure IV.3).

Les huiles ont été classées pour chaque viscosité à 100°C par rapport à deux huiles de base :

- Une dont la viscosité varie le plus avec la température et à laquelle on a donné l'indice 0.
- L'autre dont la viscosité varie le moins avec la température et à laquelle on a donné l'indice 100.
- L'indice de viscosité est un nombre sans dimension caractérisant la variation de viscosité en fonction de la température. Plus cette variation est faible, plus l'indice de viscosité peut être mis en évidence sur un graphe température/viscosité (elle est représentée par une droite, voir graphe ci-dessous)

Détermination de l'indice de viscosité ( $V_i$ ) : Deux cas se présentent :

❖ Cas où  $0 < V_i < 100$

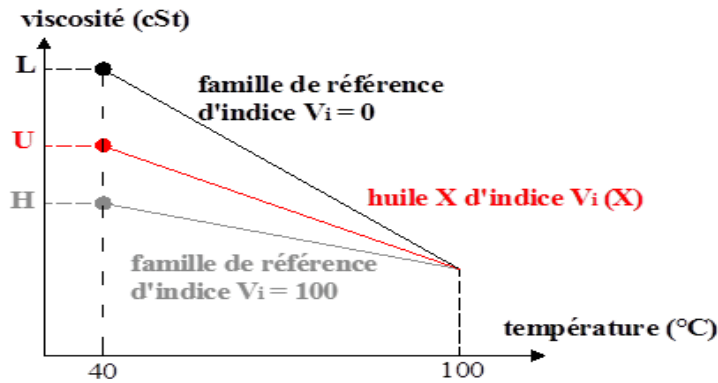


Figure IV.3 Courbe de variation de la viscosité en fonction de la température (cas de  $V_i \in [0 ; 100]$ )

Dans ce cas, l'indice de viscosité de l'huile X est déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$V_i(X) = \frac{L-U}{L-H} * 100 \tag{IV.1}$$

Où :

L est la viscosité cinématique à 40°C de la famille de référence d'indice  $V_i = 0$ .

H est la viscosité cinématique à 40°C de la famille de référence d'indice  $V_i = 100$ .

U est la viscosité cinématique à 40°C de l'huile X d'indice  $V_i(X)$  à déterminer (figure IV.4).

**IV.1.6. Exercices avec Corrections Abrégées**

Déterminer l'indice de viscosité d'une huile X dont la viscosité à 40°C est égale à 180 Cst. Les viscosités à 40°C des familles de référence d'indices de viscosité 0 et 100 sont respectivement 552 Cst et 249 Cst. On suppose que les viscosités à 100°C des différentes huiles sont égales à 20 Cst.

Soient U la viscosité à 40°C de l'huile X, H la viscosité à 40°C de la famille de référence d'indice de viscosité 100. W la viscosité à 100°C des différentes huiles. On a  $U < H$  donc l'indice de viscosité de l'huile X ( $V_i(X) > 100$ ).

d'après le cours on a:  $V_i = \frac{10^N - 1}{0.0075} + 100$  avec  $N = \frac{\log(H) - \log(U)}{\log(W)}$

On a  $N = 0,108$ , on trouve pour cette valeur  $V_i(X) = 137,76$ .

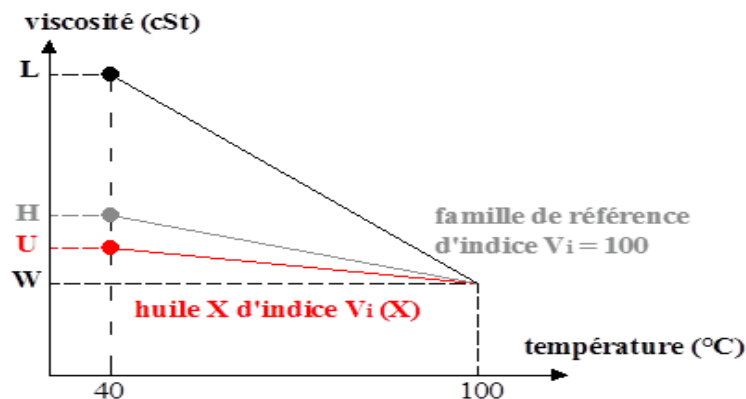


Figure IV.4 Courbe de variation de la viscosité en fonction de la température (cas de  $V_i > 100$ )

Où : W est la viscosité cinématique à 100°C des différentes huiles (on suppose que les

différentes droites sont concourantes au niveau de 100°C).

#### ❖ **Remarques**

- ✓ Les huiles industrielles courantes ont un indice de viscosité  $V_i$  égale à 80.
- ✓ Les huiles industrielles de haute qualité ont un indice de viscosité  $V_i \equiv [90, 100]$ .
- ✓ Les huiles pour les circuits hydrauliques d'aéronautique ont un indice de viscosité  $V_i \equiv [120, 160]$ .

#### **IV.1.7. Analyse des lubrifiants**

Deux paramètres importants conditionnent la lubrification correcte des machines tournantes l'état du lubrifiant et l'état des surfaces lubrifiées. Les analyses d'échantillons du fluide permettent de déterminer d'une part les caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant et d'identifier une usure des éléments mécaniques.

#### ❖ **INTERETS**

On peut utiliser l'analyse des huiles pour :

- La surveillance des machines (gain sur la durée de vie des composants, gain sur l'indisponibilité des équipements, rentabilité si la machine possède un coût d'indisponibilité important...).
- La surveillance des lubrifiants (gain sur le lubrifiant et sur les opérations de remplacement d'huile, rentabilité si la quantité d'huile utilisée est importante.)

Deux facteurs prépondérants interviennent pour modifier les caractéristiques d'un lubrifiant : la dégradation, la contamination.

- La dégradation d'un lubrifiant se produit en général sous les actions combinées de l'oxygène de l'air et des températures élevées. Cette oxydation entraîne une dégradation de la qualité du lubrifiant et parfois un dépôt capable de gêner le fonctionnement normal des machines. Le suivi des propriétés du lubrifiant est utile, principalement pour ajuster les périodes de changement ou d'appoint, sans permettre la prédiction d'usure des pièces mécaniques.
- La contamination du lubrifiant provient de particules d'usure des pièces internes, mais aussi de l'eau et des particules solides en provenance de l'extérieur du système lubrifié. Ces particules solides ou ces fluides étrangers sont souvent à l'origine d'usures anormales.

#### ❖ **Contamination des lubrifiants**

Elle se manifeste essentiellement sous deux formes :

- ✓ Liquide (eau, hydrocarbures (gas oil ; essence), liquides antigel,
- ✓ Solide : (particules issues des usures, et autre particule : matière carbonneuse provenant de la décomposition des lubrifiants ; poussière, silice.

#### ❖ **Cette pollution peut être**

- ✓ Générée (usure, décomposition des lubrifiants) ;
- ✓ Ingérée (durant l'entretien : démontage, pleins, vidange..., ou par l'environnement, manque d'étanchéité, reniflard inefficace...)
- ✓ Due à la construction (usinage, soudure, peinture...)
- ✓ Il s'agit de pollution :
- ✓ De construction (usinages, soudages, assemblages...)
- ✓ Générée (composant en mouvement, oxydation et décomposition du lubrifiant...)
- ✓ Ingérée lors de l'entretien (démontage, remontage, pleins, appoints, mesures...)

- ✓ Ingérée issue de l'environnement (manque d'étanchéité vis-à-vis de l'atmosphère, ouvertures de réservoirs, reniflards inefficaces...).

❖ **La contamination peut se chiffrer**

- ✓ Pour les liquides : en % ou en PPM (particules pour mille) ;
- ✓ Pour les particules solides : en nombre de particules ou en teneur en particules en mg/ml (milligramme /millilitre d'huile).

#### IV.1.8. Les analyses de dégradation

Les analyses de dégradation s'intéressent aux propriétés des caractéristiques physico-chimiques et moléculaires du lubrifiant. Les principales caractéristiques physico-chimiques d'un lubrifiant concernent :

- ✓ La mesure de viscosité dynamique.
- ✓ La mesure de viscosité cinématique.
- ✓ L'indice de viscosité.
- ✓ Le point d'éclair.
- ✓ L'indice d'acidité ou d'alcalinité.

##### a) Techniques Utilisées

Avant de décrire les différentes techniques de détermination du taux de dégradation et du degré de contamination des lubrifiants, il faut présenter tout d'abord les règles à suivre dans la préparation d'un échantillon en vue d'une analyse.

##### b) Échantillonnage

Il existe deux conditions primordiales pour obtenir un échantillon de lubrifiant représentatif :

- L'échantillon doit être extrait d'un volume de lubrifiant en mouvement. Si cette condition est respectée, l'échantillon sera un portrait de la condition du lubrifiant et de la machine, à l'instant même où il a été pris.
- L'échantillon doit être extrait "à chaud", c'est-à-dire que la machine aura été en opérations depuis au moins une heure lors de l'échantillonnage (figure IV.5).

❖ **Pour un système à lubrification sous pression**

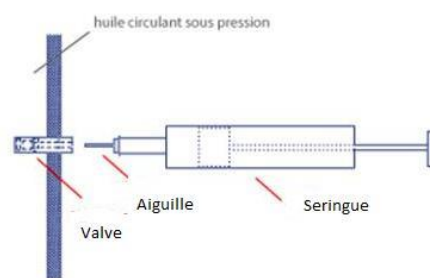


Figure IV.5 Échantillonnage depuis une seringue

Pour un système non pressurisé, une prise d'échantillon représentatif est plus difficile ; il existe plusieurs techniques d'échantillonnage (figure IV.6,7,8).

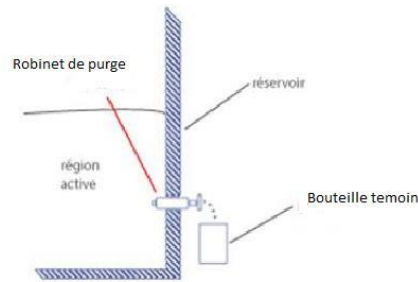


Figure IV.6 Échantillonnage depuis un robinet de drainage fixé au réservoir

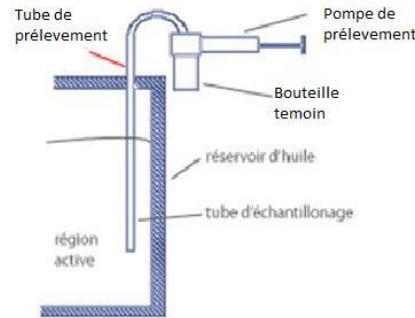


Figure IV.7 Échantillonnage par tube et pompe à vide

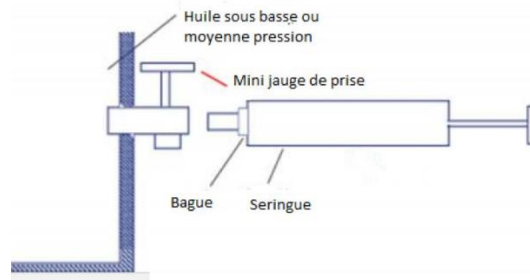


Figure IV.8 Echantillonnage avec seringue et mini connexion

## IV.2. Organisation des prélèvements et des suivis

L'échantillonnage est une étape essentielle lors du contrôle d'un circuit. En effet, celui-ci doit être effectué en respectant des règles strictes de manipulation pour éviter toute contamination étrangère.

### IV.2.1. La prise des échantillons

#### ➤ Règles de prélèvement

L'application de quelques règles simples permet d'avoir un échantillon approprié, quelle que soit l'analyse :

- Effectuer le prélèvement par la prise de contrôle où mieux par une vanne spéciale en un point dont le régime d'écoulement est turbulent. Éviter de recueillir les volumes d'huile piégés dans la zone morte.
- Prélever l'échantillon lorsque le matériel est en cours de fonctionnement ou immédiatement après son arrêt.
- Ne pas recueillir le premier soutirage à la purge, ni à la fin de vidange laisser couler de 0,5l environ avant de remplir le flacon.
- Le flacon d'échantillon doit être propre et sec (fourni par le laboratoire) et ouvert seulement au moment de son remplissage.

- Éviter le prélèvement dans la bache à l'arrêt.

Il est important de joindre à l'emballage partant au laboratoire quelques éléments :

- Références de la machine ;
- Référence de l'huile ;
- Nombre d'heures d'utilisation d'huile depuis son remplacement ;
- Nombre d'heures de fonctionnement de la machine ;
- Intervention importante effectuée depuis les derniers prélèvements.

#### IV.2.1.1 Fréquence de prélèvement d'huile

La fréquence de prélèvement doit fixer en fonction de la criticité du matériel concerné et éléments suivants :

- La charge permanente appliquée au matériel ;
- La pollution éventuelle du lubrifiant par l'environnement ;
- La pollution éventuelle du lubrifiant par le processus ;
- Le rapport cout/efficacité ;
- Le dysfonctionnement de l'organe, décelé par le personnel d'entretien ou de production.

##### ➤ **Techniques de prélèvement**

Échantillons prélevés dans des flacons (soit par prise spécifique ou pompe) Échantillonnage en ligne (directement sur canalisation avec filtration)

##### ➤ **Choix de la méthode de surveillance**

#### IV.2.1.2 Sur site industriel

Par prélèvement d'échantillons et examens visuels (transparence, couleur, dépôts) des lubrifiants en service.

Par un suivi continu de l'évolution des paramètres techniques (température, débit, pression de fonctionnement...), des historiques des vidanges et appoints d'huile, des opérations en maintenance corrective et des anomalies de fonctionnement pour chaque machine.

#### IV.2.1.3 En laboratoire

Par analyses physico-chimiques évaluant la qualité lubrifiante de l'huile, par la détermination de la teneur en produits d'usure, par examen microscopique et comptage de particules en suspension dans l'huile. L'interprétation de certains résultats de mesures est souvent délicate notamment parce que l'évolution, jugée anormale, d'un élément de l'analyse peut avoir plusieurs causes, mais, grâce à une meilleure connaissance des phénomènes d'usure et de dégradation des matériaux ainsi qu'au développement de nouvelles technologies assistées par l'informatique, la maintenance conditionnelle par l'analyse des huiles représentera un outil de progrès pour les responsables de maintenance.

##### **a) Le suivi de la contamination permet**

- De situer l'organe défectueux, d'apprécier l'évolution et le type d'usure dans le cas d'une pollution par des particules internes ;
- D'apprécier la nature et l'origine des agents extérieurs.

On prend comme référence les caractéristiques de l'huile neuve et on compare les résultats obtenus à chaque analyse. Si l'on constate une évolution brutale des caractéristiques ou si non atteint des

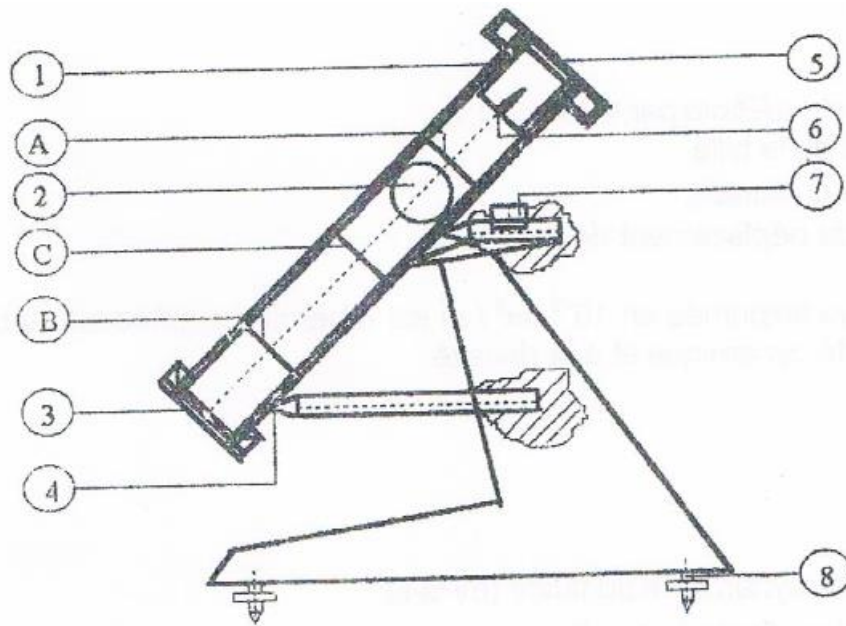
valeurs trop éloignées des valeurs initiales, faut soit intervenir au niveau du matériel, soit remplacer l'huile.

**b) Réalisé par les ingénieurs mécaniciens**

En fonction des informations données par le Client

- ✓ Type d'équipement ;
- ✓ Caractéristiques techniques ;
- ✓ Les résultats font l'objet d'une comparaison par rapport au dernier résultat et à notre Base de données (Système Expert) ;
- ✓ Les diagnostiqueurs travaillent en étroite collaboration avec le client (échanges Téléphoniques...);
- ✓ Le diagnostic fait un bilan non seulement de l'état de l'huile mais aussi de l'équipement.

## TP N°4 : Viscosimètre à chute de bille



- 1- Tube de chute avec les marques A, B et C
- 2- Bille
- 3- Bouchon
- 4- Cheville de blocage

- 5- Capillaire
- 6- Bouchon évidé
- 7- Niveau
- 8- Vis calante

### 1. INTRODUCTION

Un viscosimètre à chute de bille sert à la mesure de la viscosité des liquides newtoniens transparents. Le temps de déplacement d'une bille pour une distance de chute donnée est utilisé comme grandeur de mesure. Le résultat est la viscosité dynamique exprimée en millipascals-seconde.

### 2. But de la manipulation

L'utilisation de l'appareillage permettra outre l'apprentissage d'une méthode de mesure de viscosité des fluides, d'avoir une idée de l'influence de la température sur ce paramètre. La viscosité d'un fluide est la propriété qui exprime sa résistance à une force tangentielle. Elle est due principalement à l'interaction entre les molécules du fluide.

Sa détermination se fait en mesurant la valeur de la vitesse limite atteinte par une bille tombant en chute libre dans un récipient contenant un liquide. La viscosité d'un fluide appelée viscosité absolue (ou dynamique) dépend de la température et s'exprime en Pa. s (Pascal. Seconde).

### 3. Etude théorique

Les viscosimètres à chute de bille utilisent la mesure de la vitesse limite de chute  $v$  d'une sphère de diamètre  $r$  et de masse volumique  $\rho_{\text{bille}}$  dans un liquide de masse volumique  $\rho_{\text{liquide}}$  suffisamment visqueux pour que cette vitesse soit faible et soit dans le domaine d'application de la

loi de Stokes. En effet, la bille, tout d'abord animée d'un mouvement uniformément accéléré, est vite freinée (la résistance est égale et opposée au poids) le mouvement devient rectiligne et uniforme. La **viscosité dynamique** telle que définie par la relation ci-dessous s'exprime en **Millipascal/seconde** (centipoises) :

$$\mu = k(\rho_1 - \rho_2) * t$$

Où :

K : Constante (définie par le tableau 1)

$\rho_1$  : Densité de la bille.

$\rho_2$  : Densité du liquide.

t : temps de déplacement de la bille,

Une bille de rayon  $r$  chute dans fluide. Les forces qui agissent sont alors :

➤ Le poids de la bille  $\vec{P} = m * \vec{g} = \rho_{bille} * V_{bille} * \vec{g}$

m : masse de la bille

$\rho_{bille}$  : masse volumique de la bille.

$V_{bille}$  : volume de la bille

➤ La poussée d'Archimède  $\vec{F}_A = \rho_{liquide} * V_{bille} * \vec{g}$

➤ La force de frottement visqueuse, donnée par la formule de Stokes :  $\vec{F} = k\vec{v}$  (Pour une bille homogène de rayon  $r$ ,  $k = 6 * \pi * \mu * r$ )

r : rayon de la bille

v : vitesse de chute

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide.

La viscosité cinématique (exprimée en  $10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$ ) est déterminée grâce au rapport qui la définit relativement à la viscosité dynamique et à la densité

$$\nu(nu) = \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Où.

$\mu$  : est la viscosité dynamique du fluide (mPa/s),

$\rho$  : est la densité du fluide ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

❖ **Calcul de l'erreur**

$$\frac{\text{valeur calculé} - \text{valeur expérimental}}{\text{valeur expérimental}}$$

#### 4. DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE

Le système de mesure illustré sur la figure de la page précédente comprend un tube de chute en verre (1) et une bille (2) Le tube porte deux marques annulaires A et a espacées de 100 mm et limitant la distance de mesure (la marque annulaire C'est à mi-distance entre A et B). LE système de mesure est fixé sur son support de telle façon qu'au moment de la mesure, l'angle du tube de chute forme un angle de 1 par rapport à la verticale

La bille revient à son emplacement de départ en retournant l'ensemble de 180°. Le tube de chute est fermé par deux bouchons L'un (6) comprend un capillaire débouchant dans une petite chambre. Cette fermeture élimine les variations de pression indésirables et l'infiltration d'air lors des changements de température. La substance pour laquelle la viscosité est mesurée étant entièrement

enfermée, le support est équipé de vis calantes (8) et d'un niveau à bulle (7). Un thermomètre interchangeable permet un contrôle précis de la température.

## 5. MANIPULATION

### 5.1 Préparation des mesures

Le viscosimètre à chute de bille permet la détermination de la viscosité en fonction de la température. À cet effet, l'échantillon pourrait être stabilisé à la température d'essai grâce à l'intégration d'une chambre de thermostatisation qui ne devrait pas contenir des bulles d'air.

### 5.2 Mise en place de l'échantillon

La mise en place de l'échantillon (fluide dont on veut déterminer la viscosité) devrait se faire en trois étapes élémentaires :

- 1- Remplir le tube de chute (1) jusqu'à environ 20 mm de son extrémité avec à peu près 40 cl de liquide et introduire la bille (2),
- 2- Mettre en place le bouchon évidé (6) et fermer le tube. Le niveau du liquide devrait se situer un peu au-dessus du capillaire (5). Le liquide ne doit pas contenir de bulles d'air.
- 3- Avant chaque série de mesures, faire parcourir à la bille une fois le tube de chute (1) pour assurer le mélange de l'échantillon, ce n'est qu'après cela que les mesures pourront commencer.

### 5.3 choix de la bille

Un jeu de six billes est disponible (voir tableau IV.1). Les domaines de viscosité qui y sont indiqués se réfèrent à des temps de chute de 25 et 300 secondes pour différencier les billes, celle-ci sont accompagnées d'un calibre, La bille 1 ne passe dans le calibre tandis que la bille 2 passe. Les autres billes se distinguent à l'œil par leur taille et leur matériau.

### 5.4 Nettoyage du tube

Le nettoyage du tube et ses accessoires se fait généralement avec un solvant approprié. Néanmoins, les liquides de viscosité élevée (colles, huiles lourdes etc.) seront préalablement enlevées en les poussant lentement hors du tube à l'aide du piston de nettoyage (disponible).

### 5.5 Mise en place de l'échantillon et manipulation

Après avoir rempli le tube de fluide, avoir mis en place le bouchon évidé et fermé le tube (**Voir paragraphe 5.2**), il faudra procéder comme suit :

- 1- Mettre la bille en position de départ en retournant l'ensemble de mesure après avoir fait parcourir à la bille une fois le tube de chute (1) afin d'assurer le mélange de l'échantillon.
- 2- Déterminer le temps de chute de la bille entre les marques **A** et **B** grâce à un chronomètre. Le départ du temps de mesure devra commencer au moment où la périphérie inférieure de la bille atteint la marque annulaire supérieure **A** qui doit apparaître comme un trait "observateur Le chronomètre doit être arrêté quand la périphérie inférieure de la bille atteint la marque annulaire supérieure **B** qui doit également apparaître comme un trait.
- 3- Pour plus de précision, essayer d'effectuer cette mesure plusieurs fois pour le même fluide à la même température et en faire la moyenne.

### 5.6 Travail à faire

Suivre les étapes du paragraphe 5.5 afin de mettre l'appareillage en place, Réaliser les expérimentations pour'

- L'eau à la température ambiante pour toutes les billes (06),

- L'eau à la température d'ébullition en choisissant la bille appropriée,
- Une huile à la température ambiante en choisissant la bille appropriée,
- Calculez les viscosités pour tous les cas ci-dessus (lire et suivre la section 3 du (paragraphe 5.5).
- Faire un calcul d'erreurs pour le cas des manipulations avec l'eau en utilisant les six (06) billes.

❖ **Répondre aux questions suivantes :**

1. Quelles ont été vos raisons de choix de la bille pour chaque manipulation ?
2. Justifiez les différences trouvées lors du calcul d'erreurs demandé,
3. D'après les résultats obtenus avec les manipulations avec l'eau à deux températures différentes, Quelle est à votre avis l'influence de la température sur la viscosité ?
4. Que pouvez-vous conclure de cette manipulation ?

*Tableau IV.1 Caractéristiques des billes*

Bille	Matériau	Masse V $\rho(g/cm^3)$	Diamètre de la Bille	Constante K (MPa.s.cm <sup>3</sup> /g.s)	Domaine de mesure (mPa.s)
1	Verre borosilicate	2.2	15.81	0.007	0.2à 2.5
2	Verre borosilicaté	2.2	15.66	0.05	2 à 20
3	Vacodil 42	8.1	15.62	0.07	15 à 200
4	Vacodil 42	8.1	15.25	0.5	100 à 1200
5	W. No 4034	7.7	14.29	4.5	800 à 10000
6	W. No 4034	7.7	11.11	33	6000 à 75000

*Tableau IV.2 variations de la densité et de la viscosité de l'eau en fonction de la température*

Température (C°)	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	Viscosité dynamique (Kg/m. s)
0	999.9	1.792.10 <sup>-3</sup>
10	999.7	1.308. 10 <sup>-3</sup>
20	998.2	1.005. 10 <sup>-3</sup>
30	995.7	0.801. 10 <sup>-3</sup>
40	992.2	0.656. 10 <sup>-3</sup>
50	988.1	0.549. 10 <sup>-3</sup>
60	983.2	0.469. 10 <sup>-3</sup>
70	977.8	0.353. 10 <sup>-3</sup>
90	965.3	0.317. 10 <sup>-3</sup>
100	958.4	0.284. 10 <sup>-3</sup>

*Tableau IV.3 Résultats des mesures*

Liquide	Fluide	Bille	$\rho$ fluide	K	$\rho$ bille	Temps (s)	$v$	$\mu$	Erreur	
1	EAU (T=20 C° ambiante)									
2	EAU (T=80 C° ambiante)									
3	HUILE (T=40 C° ambiante)									
4	HUILE (T=80 C° ambiante)									

## Chapitre V : Contrôle et analyse par ultrason

### Contenu du chapitre :

1. Principe
2. Types des Signaux pour l'interprétation
  - a. Type B
  - b. Type C
  - c. Type S (sectoriel)
3. Type de mesure

### V.1. Principe

Une onde ultrasonore est émise par un transducteur placé sur la surface du matériau à contrôler et se propage dans le matériau. Il existe deux méthodes par contact (le palpeur est en contact avec la pièce), ou par immersion (la pièce et le palpeur sont immergés dans de l'eau).

Dans le cas de la méthode par contact, il est nécessaire d'ajouter un couplant (eau ou gel) entre le palpeur et la pièce pour assurer la transmission des ondes. Lorsque ces ultrasons rencontrent une interface délimitant deux milieux ayant des Impédances acoustiques différentes, il y a réflexion.

Les ultrasons réfléchis sont captés par un palpeur (qui peut être le même que l'émetteur). Il y a création d'un « écho ».

Dans le cas d'une pièce comportant deux surfaces, la détection de défaut se fait en comparant le temps mis pour faire un aller-retour dans l'épaisseur de la pièce et le temps mis pour la réflexion sur un défaut (figure V.1).

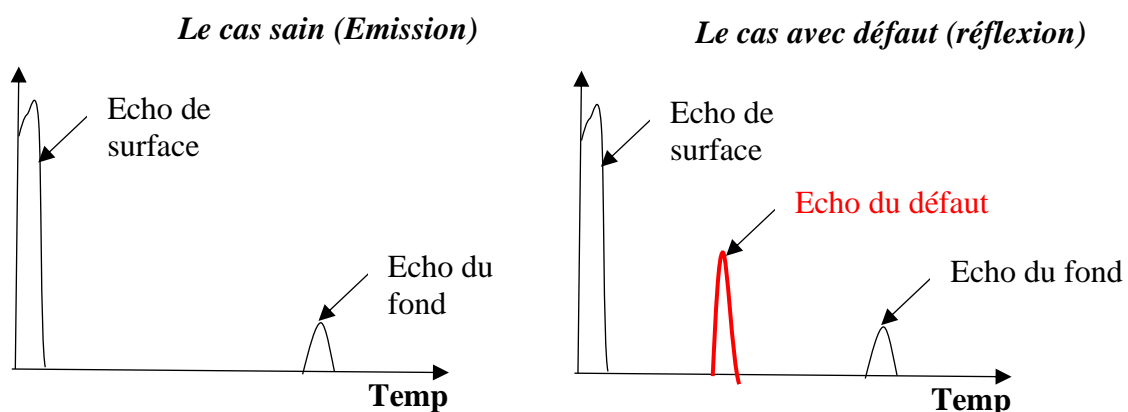


Figure V.1 Principe du contrôle par ultrasons le cas sain et avec défaut

D'un point de vue pratique, on utilise un écran d'oscilloscope. Les échos sont représentés par des pics sur l'écran (figure V.2).

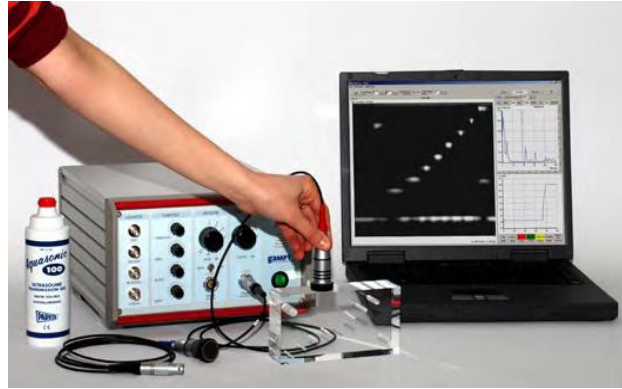


Figure V.2 Image présente l'écran d'oscilloscope

On parle généralement d'onde lorsqu'il s'agit d'un phénomène qui se répète après un certain temps (T) appelé période (figure. V.3)

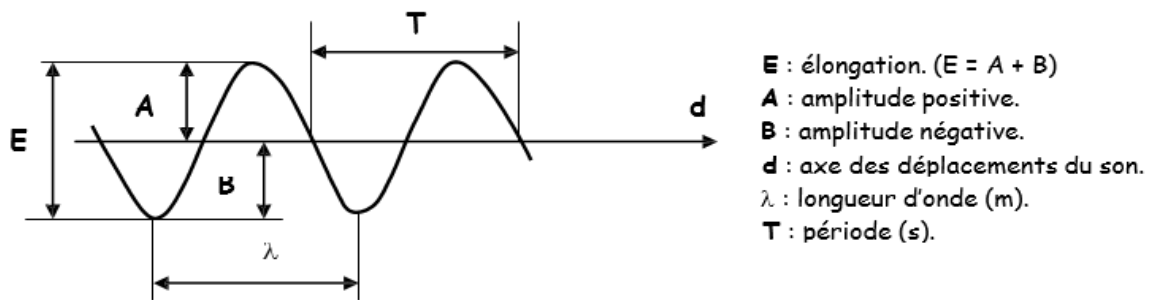


Figure V.3 Représentation des vibrations du son (sinusoïde)

La fréquence  $f$  (nombre de cycles par seconde) de réapparition du phénomène est donc donnée par l'inverse du temps :

$$f = 1/T \quad (\text{f en Hz et T en s}) \quad (V.1)$$

L'espace parcourue par l'onde pendant un cycle ou une période est dit longueur d'onde :

$$\lambda = v T = v / f \quad (\lambda \text{ en m, } v \text{ en m/s et } f \text{ en Hz}) \quad (V.2)$$

### V.1.1. Différents types d'ondes

Les ondes ultrasonores, vibrations élastiques de la matière, ont des propriétés liées aux caractéristiques élastiques du support matériel. Ainsi, dans les liquides et les gaz, qui sont des milieux n'offrant aucune résistance au cisaillement, les ondes ultrasonores sont essentiellement des vibrations longitudinales, les particules matérielles se déplaçant, par rapport à leur position d'équilibre, parallèlement à la direction de propagation de l'onde, engendrant des fronts de compression-décompression, eux-mêmes perpendiculaires à cette direction (figure V.4). Ce type d'onde se retrouve dans les solides et d'ailleurs le plus utilisé en pratique.

Toutefois, un autre mode, utilisant le cisaillement, peut exister : mode d'onde transversale pour lequel les vibrations des particules s'exercent perpendiculairement à la direction de propagation.

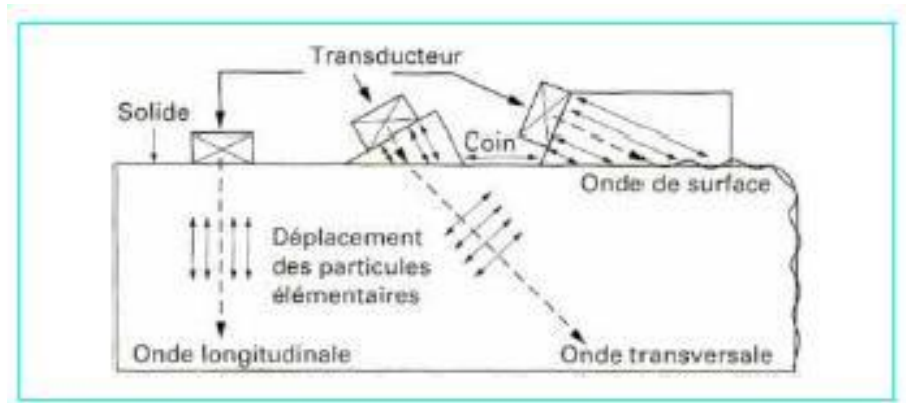


Figure V.4 Type d'ondes et modes de propagation des ultrasons dans un solide

Ces deux types d'ondes, les plus couramment rencontrés en contrôle non destructif, sont des ondes de volume ; il est possible aussi de générer d'autres types d'ondes dont l'existence dépend en particulier de la configuration du support de propagation.

Il y a tout d'abord les ondes de surface, ondes composites constituées à la fois par des déplacements longitudinaux et transversaux, et dont les plus connues et utilisées sont les ondes de Rayleigh ; d'autres modes sont possibles et connus : ondes rampantes de Love, ondes de Bleustein – Gulyaev.

Lorsque le support a des dimensions du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, cela génère des modes vibratoires particuliers : ondes de Lamb dans les tôles, il s'agit d'ondes dispersives avec mode de vibration symétrique ou antisymétrique ; ondes guidées dans les tiges et barres. Les ondes de Lamb sont utilisées industriellement pour le contrôle des tôles minces métalliques et de certains composites.

➤ **Onde longitudinale ou de compression**

La direction des vibrations des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde (figure V.5)

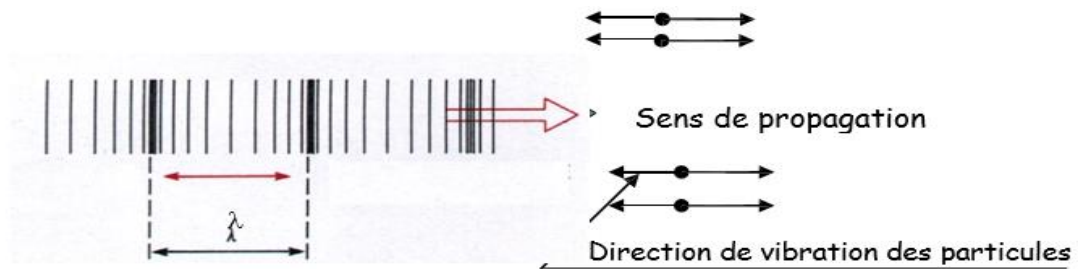


Figure V.5 Onde longitudinale ou de compression

➤ **Onde transversale ou de cisaillement**

La direction des vibrations des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.

Ces ondes ne peuvent exister que dans les solides car leur existence est liée à une résistance au cisaillement que ne possèdent ni les liquides ni les gaz (figure V.6)

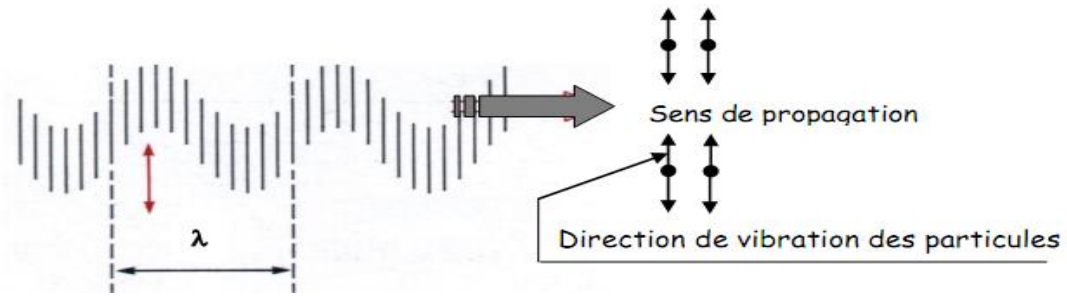


Figure. V.6 Onde transversale ou de cisaillement

➤ *Onde de surface*

Les ondes obtenues par superposition des deux ondes longitudinale et transversale parallèles à la surface du solide (figure V.7)

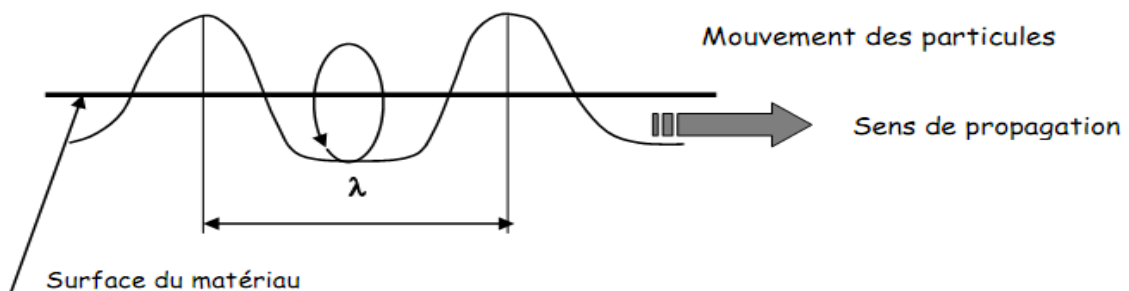


Figure V.7 Onde de surface

## V.2. Applications industrielles du contrôle par ultrasons

Les ultrasons sont utilisés dans de très nombreux domaines de l'industrie métallurgique. Leur emploi est plus récent dans les secteurs des matériaux plastiques et composites.

Les ultrasons sont mis en œuvre :

- Lors des contrôles de fabrication,
- Lors des contrôles périodiques d'installation ou de pièces en service (contrôles de maintenance). L'exploitation de la méthode de contrôle par réflexion d'impulsions d'ondes longitudinales ou transversales ne nécessitant l'accès du traducteur que sur l'une des faces d'une paroi, le contrôle par ultrasons peut, dans de nombreux cas, être exécuté sur des appareils en fonctionnement.

### V.2.1. Exemples d'applications

#### V.2.1.1 Déterminations des défauts internes

- ✓ Défaut de soudage : porosité, manque de fusion, défaut de pénétration, inclusions de laitier, fissures sur les bords, fissures en racines.
- ✓ Contrôle des pièces moulées.
- ✓ Mesures d'épaisseurs...
- ✓ Recherche de fissures sur les installations en service.

### V.2.2. Caractéristiques

#### ❖ Avantages

- ✓ La méthode se prête bien à la détection des défauts localisés dans le volume de la pièce et elle présente une grande sensibilité, notamment pour la recherche de défauts plans.
- ✓ Contrôle sur métaux, plastiques, matériaux divers.
- ✓ Epaisseurs contrôlables trop importantes.
- ✓ Elle peut être utilisée indifféremment sur chantier ou en atelier et se prête bien à l'automatisation.

#### ❖ Inconvénients

- ✓ La sensibilité de la méthode est fortement influencée par l'orientation de la surface du défaut vis-à-vis de la direction principale du faisceau acoustique (figure V.8).

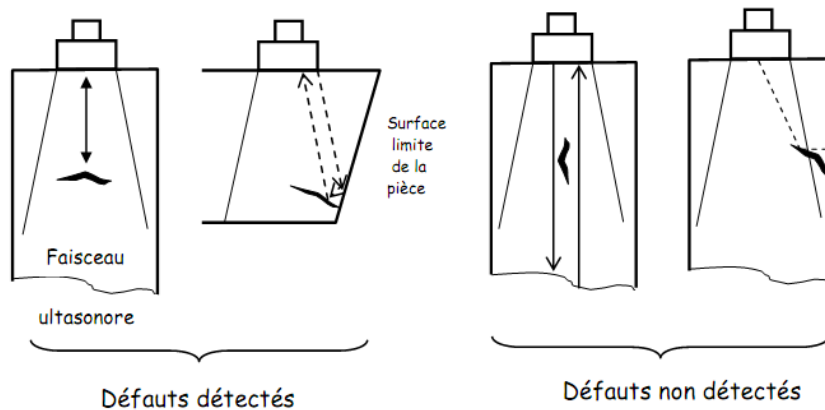


Figure V.8 montre la sensibilité de position du palpeur

### V.3. Type des signaux pour l'interprétation

Le contrôle par ultrasons peut faire appel à 3 types des signaux :

- Type B (selon 2 dimensions) ;
- Type C (selon 3 dimensions) ;
- Type S sectoriel (type B suivant un secteur angulaire).

#### V.3.1. Type B :

Le principe des signaux du type B est de balayer le transducteur suivant une direction sur la pièce. On adjoint la position du transducteur et le signal du type A reçu à cette position et on obtient une image représentant la structure interne de la pièce suit un plan de coupe (figure V.9).

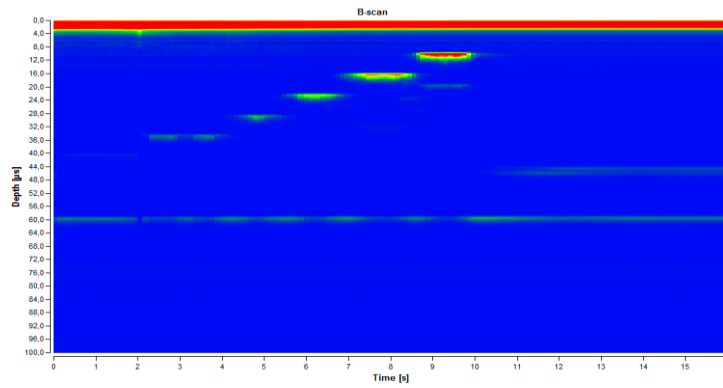


Figure V.9 spectre ultrasonique échographie (B-scan)

### V.3.2. Type C :

Pour les signaux du type C, on utilise le même principe que pour les signaux du type B mais on réalise plusieurs plans de coupes. On obtient ainsi une représentation en voxel de la structure de la pièce.

### V.3.3. Type S :

Le signal du type sectoriel est le signal utilisé pour réaliser l'échographie de fœtus. Comme pour le type B, on effectue un balayage, mais cette fois-ci suivant un angle et non pas une direction (figure V.10).

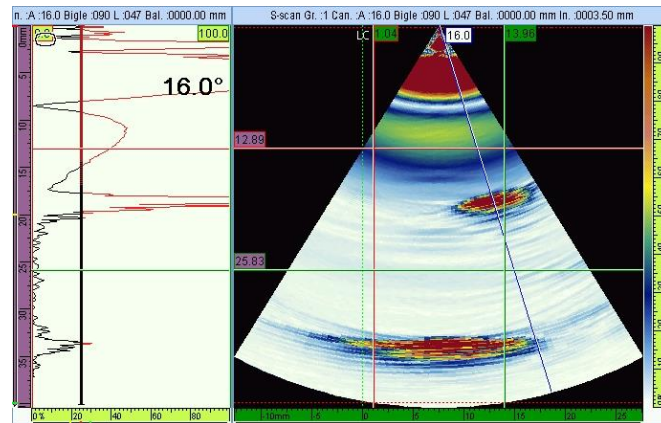


Figure V.10 spectre ultrasonique échographie (S-scan)

### V.3.4. Vitesse de propagation

Une bonne connaissance des phénomènes liés à la propagation des ultrasons est donc une base indispensable à la pratique de ce type de contrôle.

Les principes fondamentaux du contrôle non destructif par ultrasons résident dans l'analyse de l'influence des défauts, du type d'hétérogénéités de structure, sur la propagation des ondes vibratoires dans le matériau : réflexion, réfraction et transmission sur les interfaces, atténuation dans la matrice liée aux phénomènes d'absorption et de diffusion, vitesses de propagation variables selon les directions.

La vitesse de l'onde dépend de la nature des matériaux qui la transportent et du type d'onde :

- ❖ **Onde longitudinale**

(V.3)

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

E : Module d'Young du matériau N/m<sup>2</sup> ;

ρ: masse spécifique du matériau (Kg/m<sup>3</sup>) ;

ν : coefficient de Poisson (sans dimension).

❖ **Onde transversale**

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \tag{V.4}$$

❖ **Onde de surface**

$$V_R = 0.9 V_T \tag{V.5}$$

Le tableau V.1 donne quelques exemples de vitesses moyennes V<sub>L</sub> et V<sub>T</sub> pour les matériaux couramment utilisés en CND.

La longueur d'onde λ d'un train d'onde ultrasonore se déduit de la vitesse de propagation par la relation simple suivante :

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{V.6}$$

Où f est la fréquence de la vibration.

*Tableau V.1 Vitesse et impédance acoustique (valeur moyennes arrondies)*

MATERIAU	MASSE VOLUMIQUE (10 <sup>3</sup> KG/M <sup>3</sup> )	VITESSE DES ONDES LONGITUDINALES (M/s)	VITESSE DES ONDES TRANSVERSALES (M/S)	IMPEDANCE ACOUSTIQUE (10 <sup>6</sup> KG*M <sup>-2</sup> *S <sup>-1</sup> )
<b>Aciers</b>	7.8	5900	3250	46
<b>Fonte</b>	7.2	4600	2150	33
<b>Aluminium</b>	2.7	6300	3100	17
<b>Cuivre</b>	8.9	4700	2250	42
<b>Laiton</b>	8.5	4500	2100	38
<b>Béton</b>	2.5	4500		11
<b>Muscle</b>	1.0	1600		1.6
<b>Araldite</b>	1.2	2500	1050	3
<b>Plexiglas</b>	1.2	2700	1100	3.2
<b>Verre</b>	2.5	5650	3400	14
<b>Huile</b>	0.8	1500		1.2
<b>Glycérine</b>	1.3	1900		2.5
<b>Eau</b>	1.0	1480		1.5
<b>Mercure</b>	13.6	1450		20
<b>Quartz</b>	2.7	5750		15
<b>Titanate de Baryum</b>	5.7	4400		35
<b>Air</b>	1.3 10 <sup>-3</sup>	330		4.10 <sup>-4</sup>

Cette longueur d'onde λ est à prendre en considération dans la propagation des ondes, en particulier vis-à-vis de l'étalement du faisceau ultrasonore (directivité) et de l'atténuation de l'onde

par le milieu. Nous avons vu que les ultrasons utilisés en CND se situent dans la gamme des fréquences 1 à 10 MHz, ce qui correspond, dans l'acier par exemple, à des longueurs d'onde de 0,6 à 6 mm en mode longitudinal.

#### V.4. Type de mesure

Les manières de réaliser les mesures peuvent être classées en deux catégories :

- Mesure par réflexion ;
- Mesure par transmission.

De manière générale, la mesure par réflexion utilise le même transducteur pour l'émission et la réception du signal (méthode présentée dans la section "principe"), alors que la mesure par transmission possède un émetteur et un récepteur de signal qui sont distincts. La difficulté de cette dernière méthode est due au fait que le récepteur doit se trouver exactement là où le signal "sort" de la pièce.

##### V.4.1. Examen par réflexion

Le traducteur n'émet qu'une impulsion ultrasonore de durée très brève (très inférieure au temps de parcours de l'onde), l'énergie réfléchi sera alors convertie en impulsions électriques par le traducteur qui jouera alors le rôle de récepteur.

Il est à noter que la position du signal de réception sur la base de temps de l'écran, appelée également « échelle de profondeur  $v_a$  », comme d'ailleurs pour la méthode par transparence, peut donner une information sur l'épaisseur (**L** ou **e**) du matériau.

Comme précédemment, l'amplitude **h** du signal réfléchi appelé généralement "écho de fond" va dépendre de la quantité d'énergie réfléchi  $E_r$  qui atteint le traducteur.

Si un défaut affecte la pièce et n'occulte qu'une partie du faisceau (figure V.11), on observera simultanément la présence de trois signaux sur l'écran de l'appareil de contrôle :

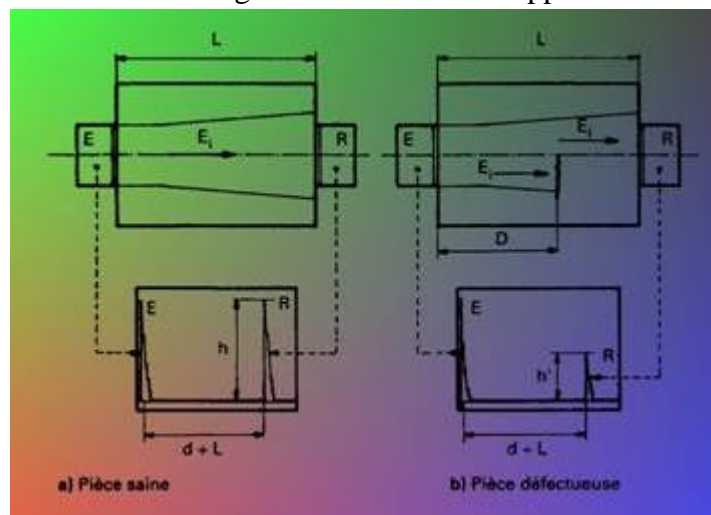


Figure V.11 Principe de l'examen par réflexion

- Le signal d'émission **E**,
- Un signal de défaut **R** situé à une distance **d** sur l'échelle de profondeur égale ou proportionnelle (à l'échelle utilisée) à deux fois la profondeur **D** du défaut dans la pièce,

- Un signal de réception ou écho de fonds **R** toujours situé à une distance **d** égale ou proportionnelle à **2L**.
- ❖ **Cette méthode est intéressante car**
- La présence d'un défaut est caractérisée par la présence d'un signal spécifique (écho de défaut) dont l'amplitude fournit une information sur l'importance de ce défaut et la position de ce signal sur l'écran indique la profondeur de ce défaut dans la pièce.
- Elle ne nécessite que l'utilisation d'un seul transducteur, ce qui est beaucoup plus pratique et capital dans les mesures d'épaisseur de parois dont la face interne est inaccessible.

#### V.4.2. Mesure par Transmission

Cette méthode nécessite l'utilisation de deux transducteurs de caractéristiques identiques, c'est-à-dire de mêmes fréquences nominales et du même type d'ondes ultrasonores (**longitudinales** ou **transversales**) l'un étant **émetteur** et l'autre **récepteur**.

Ces transducteurs sont disposés de part et d'autre du matériau à contrôler et de telle sorte que leurs axes soient confondus.

Ces phénomènes sont visualisés (figure V.12) sur l'écran d'un tube cathodique (appareils analogiques) ou sur un écran à cristaux liquides (appareils numériques) où apparaissent un signal d'émission **E** et à une distance **d** de celui-ci (égales ou proportionnelles à la distance **L**) le signal de réception **R** dont la hauteur, appelée amplitude **h**, est proportionnelle à l'énergie acoustique reçue.

Si un défaut est présent dans la pièce et qu'il intercepte tout ou uniquement une partie du faisceau, le récepteur ne recevra au mieux qu'une partie de l'énergie incidente **E<sub>i</sub>** et on constatera alors sur l'écran de l'appareil de contrôle une diminution plus ou moins importante de l'amplitude **h** du signal de réception, voire une disparition de celui-ci si le défaut intercepte entièrement le faisceau.

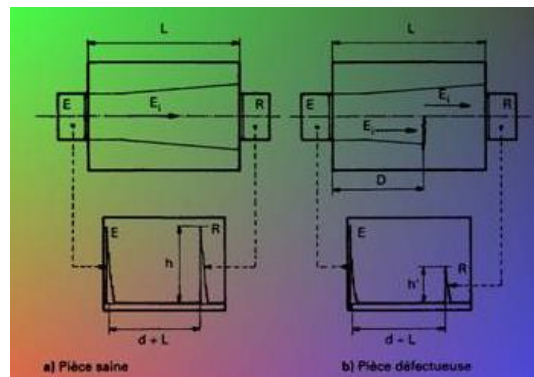
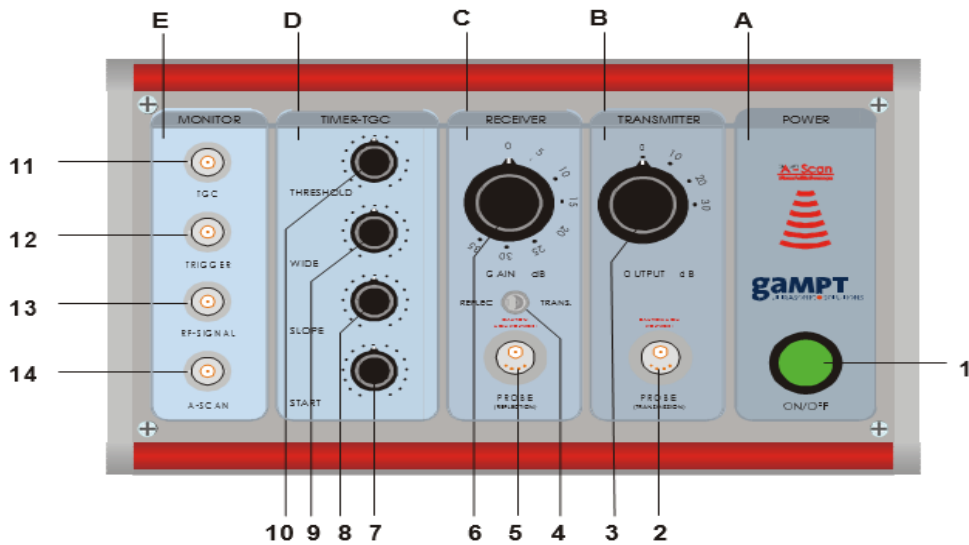


Figure V.12 Principe de l'examen par Transmission

Enfin, il est à noter que cette méthode d'examen est peu utilisée car elle présente plusieurs **inconvenients** qui sont :

- La difficulté de maintenir parfaitement alignés deux transducteurs de part et d'autre d'une pièce plus ou moins longue, tout défaut d'alignement pouvant provoquer une variation de l'amplitude du signal de réception,
- L'impossibilité de connaître la distance à laquelle se trouve le défaut des faces d'examen puisqu'une translation de ce défaut de l'émetteur vers le récepteur provoquera toujours le même phénomène d'ombre portée.

## TP N° 5 : Contrôle et analyse par ultrason



### Ultrasonique échographie (A et B-Scan)

#### A source de courant

1. on/off

#### B Émetteur B

2. transmission du connecteur de sonde
3. puissance d'émission

#### C Récepteur C

4. réflexion / transmission de l'interrupteur à bascule
5. mode de réflexion du connecteur de sonde ou récepteur en mode transmission
6. amplificateur récepteur

#### D Contrôle du temps Gain (TGC)

7. Point de départ
8. Pente
9. Largeur
10. Seuil

#### E Oscilloscope à sorties

11. Signal TGC
12. Signal de déclenchement du signal la
13. Signal A-San HF
14. Signal A-San NF

## 1. INTRODUCTION

Le GAMPT -Scan est un appareil A-scan à ultrasons avec une sortie pour le fonctionnement en écho des impulsions (mode réflexion) et une sortie supplémentaire et un interrupteur à bascule pour le fonctionnement avec deux sondes en mode transmission. L'appareil est disponible en version « autonome » avec une interface parallèle pour le transfert de données vers le PC. En option, il existe également un adaptateur USB.

Pour mieux comprendre les principes de l'appareil, les différents composants sont optiquement éliminés. (A : alimentation, B : émetteur, C : récepteur, D : contrôle du gain de temps (TGC), E : sorties BNC à l'oscilloscope).

## 2. Sondes ultrasoniques

Les sondes à 2 MHz codées en rouge conviennent aux applications à large spectre (figure V.1). En raison de la fréquence plus élevée, la puissance de résolution axiale et latérale est évidemment meilleure que la Sondes 1 MHz. Par contre l'amortissement de 2 MHz, le son

dans la plupart des matériaux n'est pas encore trop grand, de sorte que les recherches en profondeur peuvent être facilement obtenues.



Figure V.1 Sondes à 2 MHz

### 3. But de la manipulation

La relation entre le temps de vol des échos ultrasoniques, la vitesse du son et la distance entre le transducteur ultrasonore et le défaut (réflecteur) pour différentes tailles de défauts est déterminée. Ainsi, la vitesse du son traversant l'échantillon est calculé et la position et la taille du défaut sont mesurées.

Les photos au-dessus montre un appareil échographique comportant (figure V.2) :

1. Des sondes de fréquences (2 MHz) ;
2. Un gel échographique ;
3. Appareil de réglage (console) ;
4. Un écran.

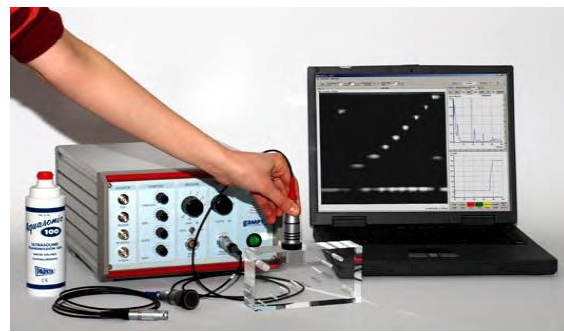
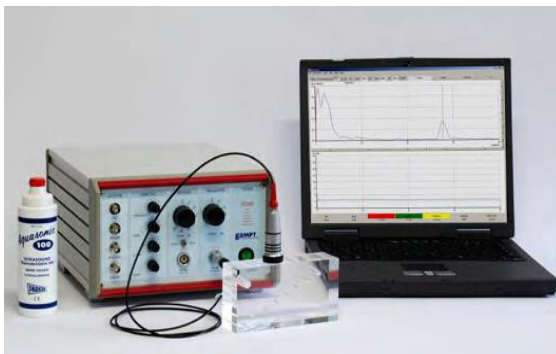


Figure V.2 Ultrasonique échographie (A-Scan) et (B-Scan)

### 4. Etude théorique

A l'aide de l'échoscopie à ultrasons, une sonde à ultrasons couplée au milieu étudié est excitée par une courte impulsion. L'onde ultrasonore émise est réfléchiée à des inhomogénéités de l'impédance sonore et cette réflexion est détectée par le même transducteur. Le temps de vol (t) entre le début de l'impulsion à l'émetteur et l'apparition de l'écho est lié à la vitesse du son (c) du milieu avec la distance (s)

$$S = c \cdot t / 2 \tag{V.1}$$

Pour calculer la taille du trou utilisée cette formule

$$d_1 = S_T - (S_1 + S_2) \tag{V.2}$$

$d_1$ : diamètre du trou;

$S_T$ : surface de la hauteur total;

$S_1$ : surface de la hauteur vue de dessus;

$S_2$ : surface de la hauteur vue de dessous;

En connaissant la vitesse du son du matériau étudié (figure V.3), la distance d'un défaut peut être déterminée directement à partir du moment du vol. L'amplitude de l'écho ultrasonore dépend de l'amortissement du matériau entre la sonde et le défaut, de la différence d'impédance du matériau et du défaut ainsi que de la forme géométrique et de l'orientation du défaut.

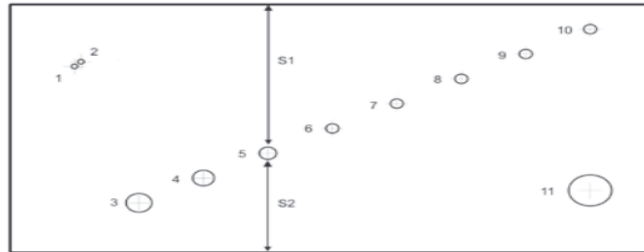


Figure V.3 Schéma et photo du dispositif expérimental

## 5. MANIPULATION

Le côté le plus long de l'échantillon (GAMPT-10201) est mesuré par un étrier ou une règle. Ensuite, le transducteur à ultrasons est couplé par un gel de couplage à l'échantillon et l'échoscopie est ajusté en faisant varier la puissance de l'émetteur, l'amplification de base et le TGC de sorte que l'écho du dos soit clairement visible. Le temps de vol jusqu'à l'écho est mesuré et en utilisant la longueur du bord après (1) la vitesse du son du matériau est déterminée.

Ceci est introduit dans le logiciel et l'affichage passe en "profondeur". Maintenant, la distance au défaut peut être mesurée directement.

Tous les défauts de l'échantillon sont mesurés soit par rapport aux deux côtés longs (donc l'extension du défaut peut être déterminée), soit mesurés de deux côtés perpendiculaires l'un à l'autre afin de trouver la position précise du défaut.

L'écran principal est montré dans l'image ci-dessous (figure V.4). La partie supérieure de l'écran affiche le signal A-scan, la fréquence du transducteur connecté, le mode (réflexion / transmission) et la position réelle des curseurs (ligne rouge et verte). Les curseurs peuvent être positionnés par la souris (déplacez la souris vers le curseur, le pointeur de la souris change) ou par le clavier (touches fléchées : curseur gauche + droite, curseur haut / bas).

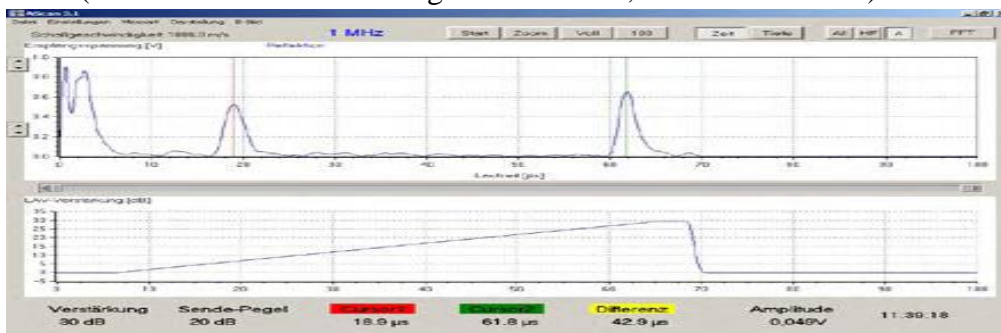


Figure V.4 Images d'un spectre

**6. Résultats**

Mesuré

Longueur s = .....mm,

Temps de vol t = .....  $\mu$ s,

Vitesse calculée du son c = .....m/s

À partir de distances déterminées, calculer la taille des trous par rapport aux dimensions réelles des trous (toutes données en mm). Les trous 1 et 2 ne peuvent pas être séparés par la sonde 1 MHz. Le trou 10 peut être mesuré seulement d'un côté (ombre acoustique du trou 11).

**TABLEAU V.1 DES MESURES ET CALCUL**

Trou nr.	1/2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temps de vol 1 ( $\mu$ s)										
Temps de vol 2 ( $\mu$ s)										
S <sub>1</sub> calculée (mm)										
S <sub>2</sub> calculée (mm)										
Taille du trou (mm)										
S <sub>1</sub> réel (mm)										
S <sub>2</sub> réel (mm)										

## Chapitre VI : Organisation et conditions de mise en œuvre dans la maintenance industrielle

### *Contenu du chapitre*

1. Comment localiser les équipements critiques ?
2. Criticité des équipements
3. Plan de maintenance

### VI.1. Comment localiser les équipements critiques ?

La notion d'équipement ou de biens critiques est primordiale dans l'activité de maintenance, il s'agit d'un critère puissant qui sera utilisé très souvent. Une attention toute particulière sera accordée à ces équipements.

Pour déterminer la criticité d'un équipement ou d'un bien un certain nombre de méthodes et d'outils sont à disposition. Tous partent de l'exploitation de l'historique de maintenance, tels que : MBF et le Benchmarking pour les méthodes et AMDEC ; Pareto ; Pieu pour les outils. Toute criticité doit être réduite, par un moyen à définir (reprise de conception, plan de maintenance, action de surveillance, plan d'investissement pluriannuel).

### VI.2. Criticité des équipements

La criticité des équipements peut être définie précisément par notation. La méthode est longue puisqu'il faut énumérer chaque équipement. Elle peut s'avérer nécessaire quand les historiques de panne ne sont pas disponibles. La criticité est donc :

$$C = F * G * D \quad (VI.1)$$

L'analyse des modes de défaillance et leur évaluation seront menées sur la base de trois critères:

- Fréquence (**F**)
- Gravité (**G**)
- Non détection (**D**)

#### VI.2.1. La fréquence

La fréquence est le reflet de l'exposition de l'équipement au danger et donc de la probabilité des défaillances. Elle dépend de la fréquence de l'activité et des circonstances de l'activité. L'appréciation de la fréquence tient compte :

- ✓ De la fréquence de l'exposition des machines au danger du (l'une peut s'avérer plus dangereuse que l'autre, donc sa note sera plus sévère)
- ✓ Des mesures de prévention déjà existantes.

Quatre niveaux de fréquence sont présents dans le tableau VI.1.

Tableau VI.1 Grille de cotation des fréquences de défaillances

Valeur de F	Fréquence d'apparition de la défaillance
1	Défaillance pratiquement inexistante Fréquence du défaut est supérieure à un an ( <b>rare : &lt; 25% du temps d'exposition</b> )
2	Défaillance rarement apparue sur un matériel Fréquence du défaut est comprise entre 6 mois et 1 an ( <b>peu fréquent : 25% &lt; Temps exposition &lt; 50%</b> )
3	Défaillance occasionnellement apparue sur le matériel Fréquence du défaut est comprise entre 1 mois et 6 mois ( <b>fréquent : 50% &lt; Temps exposition &lt; 75%</b> )
4	Défaillance fréquemment apparue sur un composant ou sur le matériel Fréquence du défaut est inférieure à 1 mois ( <b>très fréquent : &gt; 75% du temps d'exposition</b> )

### VI.2.2. La gravité

La gravité reflète l'importance des conséquences de la défaillance si celui-ci se produit. cinq niveaux de gravité sont présents dans le tableau VI.2

Tableau VI.2 Grille de cotation des gravités de défaillances

Valeur de G	Gravité de la défaillance : TI, Sécurité
1	Défaillance mineure aucune dégradation notable du matériel Temps d'intervention $TI \leq 1h$
2	Défaillance moyenne nécessitant une remise en courte durée Temps d'intervention $1h < TI \leq 4h$
3	Défaillance majeure nécessitant une intervention de longue durée Temps d'intervention $4h < TI \leq 8h$
4	Défaillance catastrophique très critique nécessitant une grande intervention Temps d'intervention $TI > 8h$
5	Accident pouvant provoquer des problèmes de sécurité des personnes

### VI.2.3. La non détection

C'est la probabilité que la cause ou le mode de défaillance supposés apparus provoquent l'effet le plus grave, sans que la défaillance ne soit détectée au préalable. Niveaux de non détection sont présents dans le tableau VI.3

Tableau VI.3 Grille de cotation des non détections de défaillances

Valeur de ND	Détection de la défaillance
1	Détection totale de la cause initiale ou du mode de défaillance assuré par des dispositions permettant ainsi d'éviter l'effet le plus grave provoqué par la défaillance. (Facile)

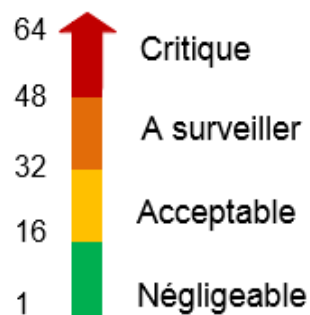
2	Il existe un signe avant-coureur de la défaillance mais il y a risque que ce signe ne soit pas perçu par l'opérateur. La détection est exploitable. (Possible)
3	La cause et/ou le mode de défaillance sont difficilement décelables ou les éléments de détection sont peu exploitables. La détection est faible. (Difficile)
4	Rien ne permet de détecter la défaillance avant que l'effet ne se produise : il s'agit du cas sans détection. (Très difficile)

L'évaluation qualitative des défaillances a été menée avec un groupe de travail qui permet d'identifier les défauts, leurs causes et leurs effets, ce qui a permis de remplir les grilles d'AMDEC.

Selon le degré de la criticité, nous avons défini la périodicité du plan de maintenance préventive.

Une échelle a été mise en place afin de déterminer quels sont les éléments et causes critiques qui seront à surveiller et les moins critiques qui nécessiteront moins d'entretien.

La plupart des équipements ont un niveau de criticité négligeable et au pire le niveau reste acceptable. Ce constat est dû au contrôle de la station par la supervision et à l'avertissement par alarmes des défaillances. En effet la supervision permet de voir les données relatives aux débits, caractéristiques de l'eau ... et si ces données ne suivent pas des courbes types, une défaillance est pressentie. Les alarmes par téléphones, quant à elles, peuvent envoyer des informations quand la station fonctionne en mode dégradé ou quand un équipement se met en sécurité.



#### VI.2.4. Criticité des équipements : Méthode PIEU

Toutes les machines devraient normalement avoir un plan de maintenance minimal à réaliser à intervalles fixes. Chaque machine n'a cependant pas la même importance critique, ou criticité, sur le plan de la maintenance. Pour estimer ce niveau d'importance, il est pratique d'utiliser la méthode PEMSEQ (Production, Équipement, Maintenance, Sécurité, Environnement et Qualité) basée sur la grille de criticité présentée ci-dessous.

Quatre critères retenus : P- Incidence de la panne/I- Importance de l'équipement/E- Etat de l'équipement/U- Taux d'utilisation de l'équipement sont présents dans le tableau VI.4

$$C = P * I * E * U \quad (VI.2)$$

- ✓  $C < 1$  alors les équipements sont critiques
- ✓  $1 < C < 10$  alors les équipements sont moyennement critiques et à surveiller

- ✓  $C > 10$  alors les équipements sont ordinaires ou non critiques

*Tableau VI.4 échelles de criticité des équipements.*

Échelle de criticité	
$C < 16$	Ne pas tenir compte
$16 < C \leq 32$	Mise sous préventif à fréquence faible
$32 < C \leq 36$	Mise sous préventif à fréquence élevée
$36 < C \leq 48$	Recherche d'amélioration
$48 < C \leq 64$	Fréquence de préventif très élevée
$C > 64$	A rénover

#### ❖ Exemple

Définir laquelle de ces deux machines est la plus critique :

- La première est une chaîne de montage dont l'arrêt provoque immédiatement l'arrêt de la production, mais sans risque majeur pour la sécurité du personnel avoisinant et de faibles conséquences pour l'environnement. Le personnel de maintenance a une bonne maîtrise de la technologie de cette machine dont les pièces de rechange sont disponibles en stock. La machine n'est pas neuve mais reste globalement en bon état de fonctionnement, néanmoins son impact sur la qualité du produit fini demeure importante.
- La deuxième est un groupe turboalternateur dont l'arrêt n'a absolument aucun risque sur la cadence de la production et la qualité du produit, sur la sécurité du personnel, sur l'environnement. Le personnel de maintenance maîtrise moyennement la technologie de cette machine qui, à cause de ses arrêts fréquents, demande d'être rénovée.

### VI.2.5. Proposition d'une méthode pour choix d'une politique de maintenance

#### ➤ Choix des machines

Recourir à des critères objectifs pour classer les machines

- Critères influant sur le Risque de Panne (RP)
- Technologie
- ✓ Durée de vie calculée, qualité de fabrication ;
- ✓ Éléments de variations d'utilisation ;
- ✓ Conditions d'utilisation ;
- ✓ Environnement, possibilité de maintenance.
  - **Critères influant sur les conséquences de panne (CP)**
  - Coût indirect sur la production
  - Coût direct sur le matériel
  - Sécurité

La classe de maintenance (CM) est définie par le produit des deux types de critères

$$CM = RP * CP \tag{VI.3}$$

$$RP = \sum RPi / \text{Nombre de critères qualifiés}$$

$$CP = \sum CPi / \text{Nombre de critères qualifiés}$$

❖ **Différents critères influant sur le risque de panne (RP)**

(a) L’aspect technologique, (b) La durée de vie calculée, (c) La qualité de fabrication, (d) Les variations d’utilisation, (e) Les conditions d’utilisation, (f) L’environnement, (g) La possibilité de maintenance

❖ **Critères influant sur les conséquences de panne (CP)**

(a) Le coût indirect sur la production, (b) Le coût direct sur le matériel, (c) La sécurité  
tableau VI.5.

Tableau VI.5 Critères influant sur les conséquences de panne

Evaluation du risque de panne	R <sub>Pi</sub>
<b>1.Nature de la machine</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Standard</li> <li>➤ Petite série</li> <li>➤ Rares exemplaires, nouvelle technique</li> <li>➤ Prototype</li> </ul>	<p><b>1</b></p> <p><b>2</b></p> <p><b>3</b></p> <p><b>4</b></p>
<b>2.Complexité de la machine</b> Nombre d’éléments (ex. moteurs, coupleurs, réducteurs, etc) N = 1 N = 2 N = 3 N ≥ 4	<p>1</p> <p><b>2</b></p> <p><b>3</b></p> <p><b>4</b></p>
<b>3. Complexité des techniques employées</b> Ce critère qualifie : <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Les technologies intégrées (mécaniques, électriques...)</li> <li>➤ Les matériaux utilisés (acier, composites...)</li> <li>➤ Les techniques d’assemblage (collage...)</li> </ul> - faible - moyenne - élevée - très élevée	<p><b>1</b></p> <p><b>2</b></p> <p><b>3</b></p> <p><b>4</b></p>
<b>4. Régime moteur</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Constant</li> <li>➤ Variations par plages (max / min)</li> </ul> < 50 % ≥ 50 % <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Variations continues</li> </ul>	<p>1</p> <p>2</p> <p>3</p> <p>4</p>
<b>5. Vitesse maximale</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ f &lt; 600 tr/min</li> <li>➤ 600 à 1200 tr/mn</li> <li>➤ 1200 à 3 000</li> <li>➤ &gt; 3 000 tr/min</li> </ul>	<p>1</p> <p>2</p> <p>3</p> <p>4</p>

<b>6. Fréquences des démarrages (f)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <math>f &lt; 1/\text{jour}</math></li> <li>➤ <math>1/\text{jour} \leq f &lt; 1/\text{heure}</math></li> <li>➤ <math>1/\text{heure} \leq f &lt; 5/\text{heure}</math></li> <li>➤ <math>f \geq 5/\text{heure}</math></li> </ul>	<b>1</b> <b>2</b> <b>3</b> <b>4</b>
<b>7. Atmosphère ambiante</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Neutre, filtrée</li> <li>➤ Peu chargée</li> <li>➤ Chargée</li> <li>➤ Très chargée</li> </ul>	1 2 3 4

Tableau VI.6 Critères influant sur les conséquences de panne

<b>1. Conséquences sur la production</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Aucune influence directe sur le produit, réparation possible en marche</li> <li>➤ Machine doublée, circuits de dépannage</li> <li>➤ Machine possible en cadence et productivité réduite</li> <li>➤ Arrêt de production total</li> </ul>	<b>2</b> <b>4</b> <b>6</b> <b>8</b>
<b>2. Temps de maintenance</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Moins de 1 poste</li> <li>➤ De 1 à 2 postes</li> <li>➤ De 2 à 3 postes</li> <li>➤ Plus de 3 postes</li> </ul>	<b>1</b> <b>2</b> <b>3</b> <b>4</b>
<b>3. Conséquences sur les machines voisines</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Aucune</li> <li>➤ Faibles</li> <li>➤ Importantes</li> <li>➤ Très importantes</li> </ul>	<b>1</b> <b>2</b> <b>3</b> <b>4</b>
<b>4. Tension mise en œuvre</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Basse (&lt;48V)</li> <li>➤ Moyenne (48 à 380 V)</li> <li>➤ Haute (380 V à 1KV)</li> <li>➤ Très haute (&gt; 1KV)</li> </ul>	1 2 3 4
<b>5. Toxicité, dangers liés aux produit utilisés</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nulle</li> <li>➤ Faible</li> <li>➤ Élevée</li> <li>➤ Très élevée</li> </ul>	2 4 6 8

### VI.3. Plan de maintenance

#### VI.3.1. Définition d'un plan de maintenance

L'élaboration d'un plan de maintenance se fait au niveau d'une unité de maintenance. Elaborer un plan de maintenance, c'est décrire toutes les opérations de maintenance qui devront

être effectuées sur chaque organe.

La réflexion sur l'affectation des opérations de maintenance se fait en balayant tous les organes de la décomposition fonctionnelle et en tenant compte de leur technologie, de leur environnement (sec, humide, poussiéreux, chaud, non ouvert, etc.), de leur utilisation, de leur probabilité de défaillance et de leur impact sur la production et sur la sécurité (humaine et matérielle).

L'affectation des opérations de visite ou de contrôle a comme objectif de détecter les effets des dysfonctionnements qui peuvent arriver sur chacun de ces organes. Il faut donc avoir connaissance de la nature, de la gravité et de la probabilité d'apparition des défaillances.

Pour chaque organe, lors de l'affectation des opérations et de la définition des périodicités, on se pose la question « Est-ce nécessaire et suffisant ? » afin de conforter la réflexion.

Lorsque la fréquence des contrôles est élevée, en raison de la probabilité importante de l'apparition de défaillances, on devra tenter de trouver la solution pour éliminer complètement ce dysfonctionnement.

### ***VI.3.2. Planification des opérations de maintenance préventive***

Une organisation claire et détaillée des opérations de maintenance préventive à entreprendre s'avère indispensable pour une bonne gestion de la fonction dans le service maintenance. La figure (VI.1) montre la démarche à suivre pour la préparation d'un plan de maintenance préventive.

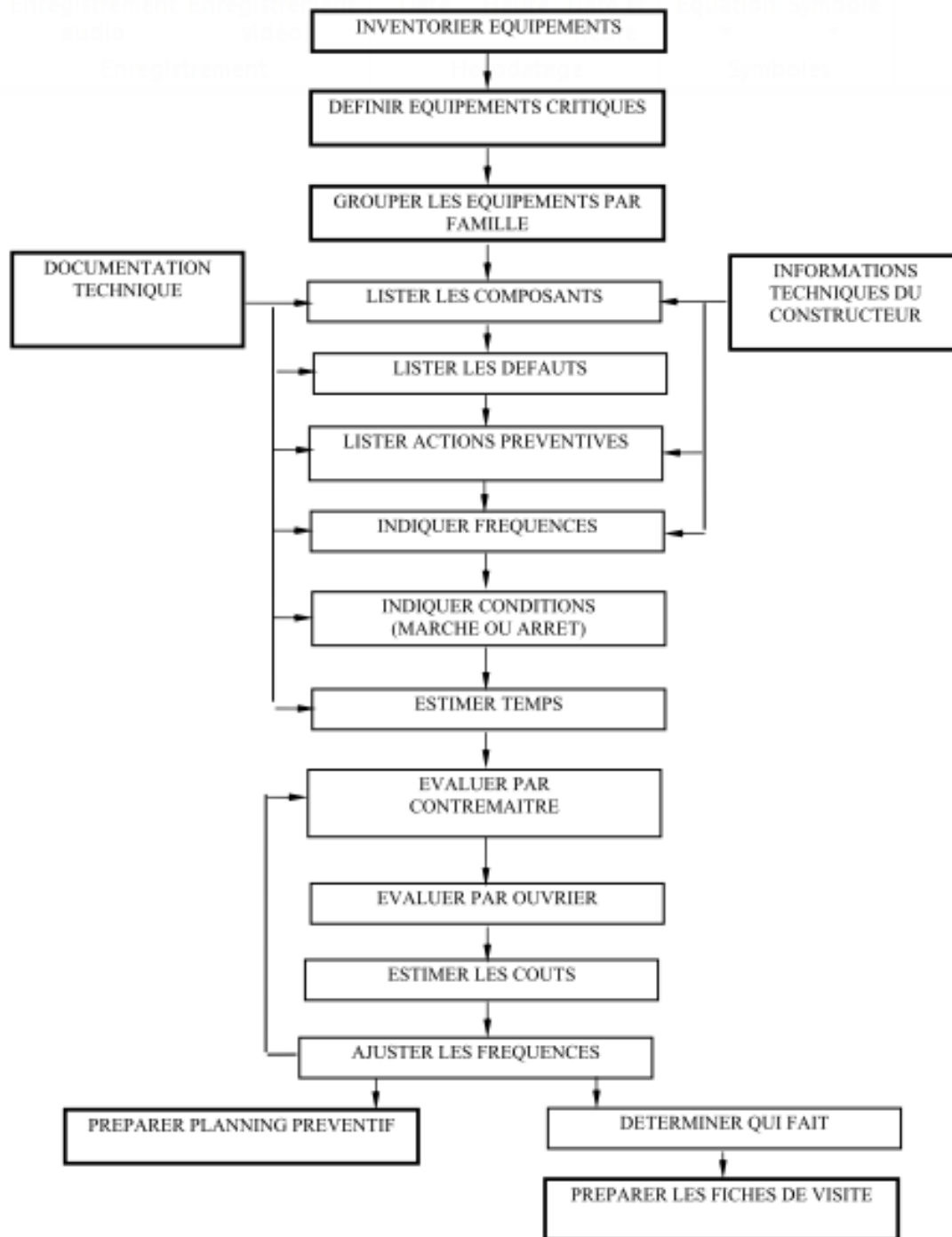


Figure VI.1 Processus de préparation d'un plan de maintenance préventive

### VI.3.3. Définir la criticité des machines à maintenir

Toutes les machines devraient normalement avoir un plan de maintenance minimal à réaliser à intervalles fixes. Chaque machine n'a cependant pas la même importance critique, ou criticité, sur le plan de la maintenance. Pour estimer ce niveau d'importance, il est pratique d'utiliser la méthode PEMSEQ (Production, Équipement, Maintenance, Sécurité, Environnement et Qualité) basée sur la grille de criticité présentée dans le tableau VI.7 ci-dessous.

Tableau VI.7 Critères influant sur les conséquences de panne

Grille de criticité PEMSEQ					
Critères	Note	4	3	2	1
Impact sur la production (P)		Stratégique : Arrêt rapide de la production, sans délestage possible	Important : Délestage acceptable à court terme	Tolérable : Délestage possible	Négligeable : Arrêt sans risque pour la production
État de l'équipement (E)		À rénover	Mauvais état	Bon état	Neuf et/ou sous garantie
Logistique de maintenance (M)		Dépendance externe élevée ; maîtrise nulle ou faible de la technologie ; pas de pièces ni de documentation	Dépendance externe moyenne ; maîtrise moyenne de la technologie ; manque de pièces et de documentation	Dépendance externe faible ; bonne maîtrise de la technologie ; pièces disponibles	Dépendance externe nulle ; très bonne maîtrise de la technologie ; pièces en stock
Impact sur la sécurité (S)		Grave	Moyen	Faible	Nul
Impact sur l'environnement (E)		Grave	Moyen	Faible	Nul
Impact sur la qualité du produit (Q)		Stratégique : Problème non détectable	Important : Problème difficile à détecter et/ou équipement à calibrer	Tolérable : Problème détectable ; rejet ou modification possible	Négligeable : Conséquences mineures

VI.3.3.1 Exemple

Définir laquelle de ces deux machines est la plus critique :

- La première est une chaîne de montage dont l'arrêt provoque immédiatement l'arrêt de la production, mais sans risque majeur pour la sécurité du personnel avoisinant et de faibles conséquences pour l'environnement. Le personnel de maintenance a une bonne maîtrise de la technologie de cette machine dont les pièces de rechange sont disponibles en stock. La machine n'est pas neuve mais reste globalement en bon état de fonctionnement, néanmoins son impact sur la qualité du produit fini demeure importante.
- La deuxième est un groupe turboalternateur dont l'arrêt n'a absolument aucun risque sur la cadence de la production et la qualité du produit, sur la sécurité du personnel, sur l'environnement. Le personnel de maintenance maîtrise moyennement la technologie de cette machine qui, à cause de ses arrêts fréquents, demande d'être renouvelée.

VI.3.4. Définir un plan de maintenance préventive

Une fois identifiés les équipements les plus critiques, on définit le plan de maintenance préventive. En consultant la documentation technique et l'historique de la machine, on peut déterminer quels éléments seraient les plus susceptibles d'être à l'origine d'une panne ou d'une anomalie. À l'aide de ces données, on détermine le programme de maintenance et la fréquence

des entretiens préventifs. Certains logiciels permettent de gérer les tâches de maintenance de parcs d'équipements complexes. Mais un formulaire de suivi et un calendrier visuel de planification peuvent souvent faire l'affaire.

Afin de réaliser un plan de maintenance préventive, il faut disposer de ressources humaines adéquatement formées pour effectuer les tests et identifier les problèmes potentiels. Il est recommandé d'inclure des employés dans cette démarche, en plus des spécialistes. Ainsi, les employés comprendront mieux leur machine et s'assureront de la faire fonctionner dans les meilleures conditions. Au minimum, chaque opérateur devrait être formé aux techniques de diagnostic menant à la détection et à l'élimination d'anomalies mineures.

L'établissement d'un plan de maintenance préventive systématique permet une programmation facile des travaux (essentiellement lorsqu'il s'agit de périodicité calendaire).

Les actions préventives systématiques comprennent :

- Le nettoyage,
- La lubrification,
- Les inspections ou activités de surveillance du fonctionnement des équipements,
- Les contrôles ou vérification de la conformité à des données préétablies,
- Les visites ou opérations de maintenance préventive consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) d'un équipement et pouvant impliquer des réglages, des échanges d'éléments consommables,
- Les remplacements de pièces ou échange standard.

Généralement les travaux de maintenance systématique combineront ces différents types d'action en une seule action appelée visite. L'observation au travers de ces divers travaux de l'état de l'équipement déclenchera le moment opportun d'une révision partielle ou générale.

#### ***VI.3.5. Analyser les actions préventives à mener systématiquement***

Pour effectuer cette analyse, le technicien a recours à une fiche d'analyse similaire à celle présentée pages suivantes. Il décompose l'équipement en organes ou composants qu'il examine successivement tant au point de vue des origines des pannes susceptibles de se produire (ou s'étant produites) que des symptômes annonciateurs. Cet examen se fait au vu de la documentation technique. Il se rend ensuite sur place successivement auprès de chaque machine (de la famille analysée) pour noter :

- La liste des opérations à faire,
- Les points à surveiller,
- Les questions auxquelles le visiteur doit répondre,
- La fréquence envisagée.

Pour ne rien oublier, il prend les organes ou composants un à un et peut utiliser une liste des opérations clés identiques à celle présentée pages suivantes. Il relève en même temps les outillages ou pièces nécessaires. Il complète alors la fiche d'analyse en indiquant :

- Les conditions d'exécution de l'opération (en marche ou à l'arrêt),
- Le corps de métier impliqué,
- Le temps moyen d'opération par organe ou composant avec l'indication de variabilité (V) selon la machine ou l'équipement concerné.

### ***VI.3.6. Etablir les fiches de visites***

Nous distinguerons deux types de visite :

- Les visites courtes et fréquentes sans outillage particulier seront généralement intégrées dans des tournées de visite. Une fiche de tournée sera établie, éventuellement intégrée dans un guide. Le temps de déplacement prime sur celui d'exécution, (recherche d'optimisation du parcours du visiteur).
- Les visites longues et espacées feront l'objet d'une fiche par point d'intervention et par périodicité. Le visiteur aura l'initiative du parcours en fonction de la nature des visites à faire, (recherche d'optimisation de la fréquence des visites).

Le fiche de visite, canevas guide ou check-list des opérations à faire se justifie pour plusieurs raisons :

- ✓ Elle permet de guider le visiteur dans les opérations qu'il a à exécuter et d'éviter les oublis.
- ✓ Elle assure une certaine homogénéité d'une visite à l'autre, d'un visiteur à l'autre.
- ✓ Elle facilite le rapprochement des actions préventives aux dysfonctionnements relevés sur la fiche historique.
- ✓ Elle constitue la mémoire écrite du plan d'actions préventives, l'absence d'un visiteur ne perturbera pas le fonctionnement du service.
- ✓ Elle rend plus aisée la transmission des instructions au visiteur.
- ✓ Elle constitue le document support au rapport de visite où seront consignés tous les résultats.

### ***VI.3.7. Objectifs visés d'un plan de maintenance***

#### ***VI.3.7.1 Améliorer la fiabilité du matériel***

La mise en œuvre de la maintenance préventive nécessite les analyses techniques du comportement du matériel. Cela permet à la fois de pratiquer une maintenance préventive optimale et de supprimer complètement certaines défaillances.

#### ***VI.3.7.2 Garantir la qualité des produits***

La surveillance quotidienne est pratiquée pour détecter les symptômes de défaillance et veiller à ce que les paramètres de réglages et de fonctionnement soient respectés. Le contrôle des jeux et de la géométrie de la machine permet d'éviter les aléas de fonctionnement. La qualité des produits est ainsi assurée avec l'absence des rebuts.

### VI.3.7.3 Améliorer l'ordonnancement des travaux

La planification des interventions de la maintenance préventive, correspondant au planning d'arrêt machine, devra être validée par la production. Cela implique la collaboration de ce service, ce qui facilite la tâche de la maintenance.

Les techniciens de maintenance sont souvent mécontents lorsque le responsable de fabrication ne permet pas l'arrêt de l'installation alors qu'ils ont reçu un bon de travail pour l'intervention. Une bonne coordination prévoit un arrêt selon un planning défini à l'avance et prend en compte les impossibilités en fonction des impératifs de production.

### VI.3.7.4 Assurer la sécurité humaine

La préparation des interventions de maintenance préventive ne consiste pas seulement à respecter le planning. Elle doit également tenir compte des critères de sécurité pour éviter les imprévus dangereux.

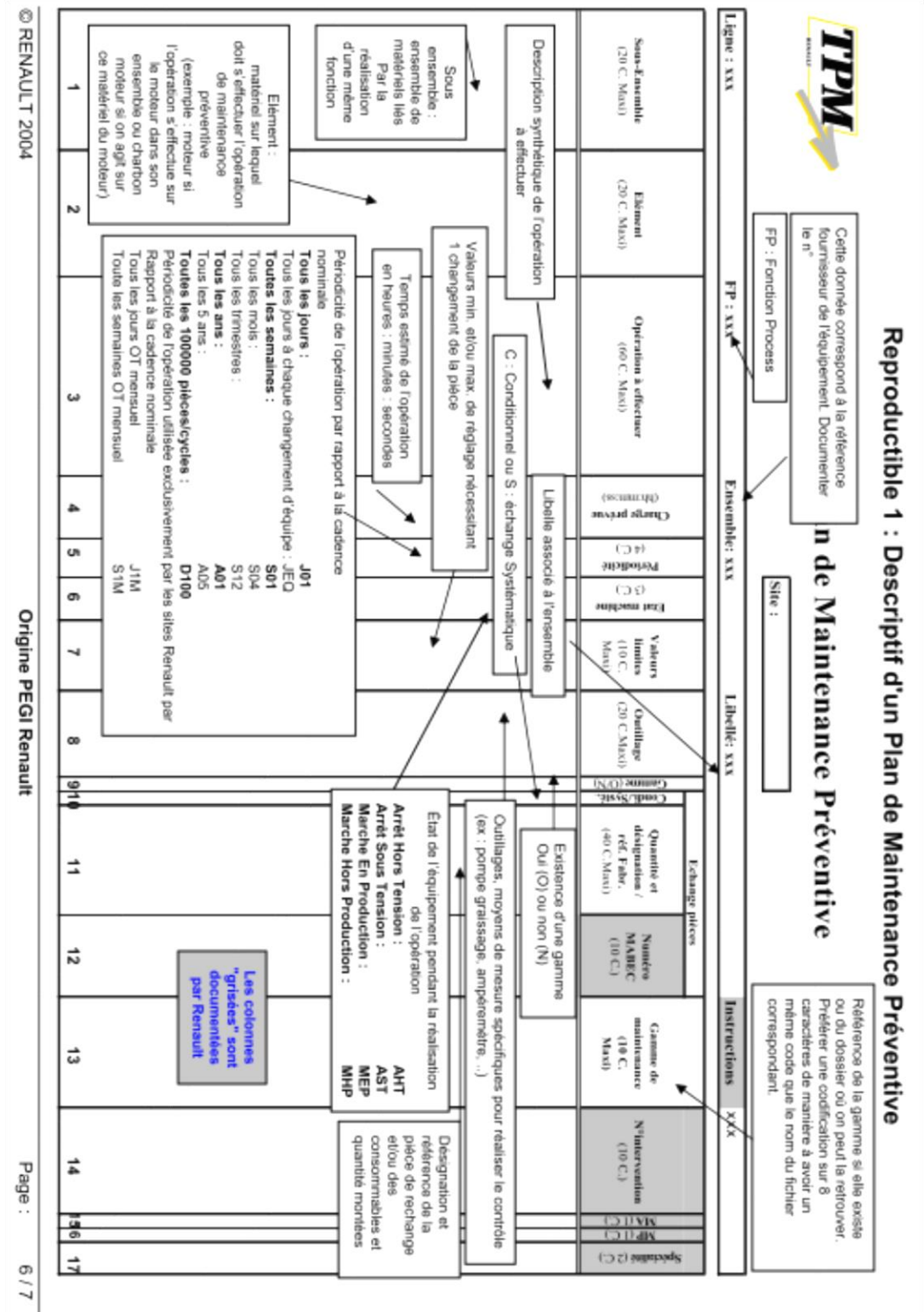
Par ailleurs, le programme de maintenance doit prendre en considération les visites règlementaires.

### VI.3.7.5 Améliorer la gestion des stocks

La maintenance préventive est planifiable. Elle maîtrise les échéances de remplacement des organes ou pièces, ce qui facilite la tâche de gestion des stocks. On pourra aussi éviter de mettre en stock certaines pièces et ne les commander que le moment venu.

La figure (VI.2) montre l'exemple d'un plan de maintenance utilisé par la firme Renault.

La figure (VI.3) montre l'exemple d'une fiche de visite préventive systématique.



Figures VI.2 Plan de maintenance Renault

Fichiers      Entrées      Histoires      Symboles

**FICHE DE VISITE SYSTEMATIQUE**

N° et Identification équipement		Visite systématique			Temps	Page
GEL_5 Groupe électrogène diesel énergie 413FS		Annuelle	Mécanique		2h	1/1
		Périodicité	Corps de métier	Marche X	Arrêt X	
Consignes de sécurité <i>Placer le commutateur de sélection « mode de fonctionnement » sur manuel puis commander manuellement le débit du secteur</i>		Outils nécessaires <i>Jeu de cales d'épaisseur</i>				
		Résultat de visite				
Rép.	Opération à exécuter	Bon	Fait	Relevé	Observations	
1	RESERVOIR A COMBUSTIBLE -vidanger et rincer au gasoil -nettoyer le filtre de remplissage		X X			
2	PREFILTRE COMBUSTIBLE -nettoyer tamis filtrant		X			
3	MOTEUR -déposer et nettoyer bol du filtre centrifuge -vérifier jeu des culbuteurs (ADM : 0,2 ; ECH : 0,3) -bien nettoyer buse d'air, ailettes de refroidissement culasses et refroidisseur	X	X X		encrassement des orifices d'aspiration et de refoulement (alternateur)	
4	FILTRE A HUILE -remplacer la cartouche filtrante		X			
5	FILTRE A AIR -nettoyer le filtre à air complètement et remplir d'huile SAE 30		X		Ne pas dépasser repère niveau	
6	COURROIES -vérifier l'état et la tension des courroies (10 à 15 mm de flèches)	X				
7	FAIRE TOURNER LE MOTEUR EN CHARGE PENDANT 15 MN -vérifier l'absence de fuites gasoil et huile -contrôler l'absence de fuites cartouche filtrante -graisser palier de l'alternateur	X X		X	ALVANIA N°3, 40g par palier	
8	CARTER MOTEUR -vidanger et faire le plein moteur/réducteur		X		RIMULAX 25 litres; ne pas dép. Max	
9	ENSEMBLE -vérifier serrage de toute la boulonnerie	X	X		boulons desserrés	
Observations générales :						

Figures VI.3 Exemple d'une fiche de visite préventive

**VI.3.8. Choix de la méthode maintenance**

Choix des Machines CM	1	2	2	4	4	8	8	16
Méthode de Maintenance	MC	MS	MS	MC	MC		<b>MC</b>	
Conséquences	Faibles		Modérées		Élevées		<b>Très élevées</b>	

## Références & Bibliographie

- **Jean-Claude Francastel**, La fonction maintenance : De l'expression à la satisfaction du besoin, Editeur AFNOR, 2007.
- **Pascal Denis, Pierre Boyé, André Bianciotto**, Guide de la maintenance industrielle, Eds DELAGRAVE, 2008.
- **Dunod**, Pratique de la maintenance industrielle en 5 volumes - Méthodes, Outils, Applications : CDROM, Eds Dunod, 2006.
- **A. Boulenger, C. Pachaud** : surveillance des machines par analyse des vibrations, Paris, Dunod 2009, ISBN 978-2-10-054190-4.
- **Maintenance industrielle** : de l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté ISBN 2729820116, cotes 530/ AUB.
- **A. Boulenger**, Analyse vibratoire en maintenance : surveillance et diagnostic des machines ISBN 9782100596959, cotes 530/ BOU.
- **Ben Saada, S.** La maintenance industrielle ISBN 9789961005651, cotes 600/ BEN.
- **T. Mohamed.** Maintenance industrielle : réparation et montage des machines et des équipements du pétrole, du gaz et de la pétrochimie, ISBN 9961009622, cotes 600/ TAI.
- **A. Boulenger.** Maintenance conditionnelle par analyse des vibrations, traité de maintenance, Techniques de l'Ingénieur MT 9285, version 2005.
- **Boulenger et C. Pachaud.** Surveillance des machines par analyse des vibrations, Du dépistage au diagnostic, Afnor, 1998.
- **Projet National de Recherche N° 13/u24/3112** intitulé, Etude et installation d'une politique de maintenance et de sécurité industrielle pour la surveillance des machines tournantes, (2013).
- **J. Morel.** Surveillance vibratoire et maintenance prédictive, traité mesure et contrôle, Techniques de L'Ingénieur R6100, version 2005.
- **kebabsa.T. Ouelaa.N et al.** Experimental study of a turbo-alternator in industrial environment using cyclostationarity analysis. J. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, V81, p 537-552, 2015/10/1.
- **Présentation de la norme ISO 2372.** Norme Internationale ISO 10816 (1995) remplace la norme ISO 2372. 1974.
- **Djebala, A. Ouelaa, N. Hamzaoui Et S. Guenfoud.** Optimisation de l'utilisation des indicateurs scalaires dans le cadre de la maintenance prédictive des paliers à roulements. Congrès algérien de mécanique de construction, Alger, 29-30 avril 2007.
- **Kebabsa.T** Eude des aspects de défaillances et techniques de maintenance préventive conditionnelle appliquées aux turbomachines, thèse doctorale, département génie mécanique, fiabilité mécanique, bibliothèque UBMA, université badji mokhtar Annaba.
- **Boulenger, C. Pachaud.** Diagnostic vibratoire par la maintenance préventive, Dunod, Paris 1998.