



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEURAT

Département DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTATION EN VUE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULÉ

**DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES ROULEMENTS PAR
L'ANALYSE DE VIBRATION**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : MASTER

SPECIALITE : MECANIQUE AVANCEE

PRESENTATION PAR : DJEBAILI ABDELAZIZ

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Dr. MEKHILEF .S. MCA UBMA ANNABA

CO-DIRECTEUR: Dr. BENDJAMA Hocine MRA URASM-CRTI ANNABA

DEVANT LE JURY

PRESIDENT: BEY K. Pr. UBMA Annaba

EXAMINATEURS :

CHEMAMI A. MCB UBMA Annaba

BENAMIRA M. MCB UBMA Annaba

GOUASMI S. MAA UBMA Annaba

HAIHAHEM A. Pr. UBMA Annaba

Remerciements:

Je remercie Dieu, le tout puissant, pour tout.

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon directeur de thèse : le Docteur **MEKHILF SLIMAN** pour la confiance qu'il m'a accordée, ses encouragements, et ses précieux conseils, je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.*

*Je remercie très sincèrement le prof: **Benjamin Houssine** chef de formation **URASM ANNABA**, d'avoir accepté de la présidence du jury. Mes vifs remerciements aussi pour les membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.*

Table des matières

Dédicaces

Remerciements

Liste des figures

Liste des abréviations et symboles

Introduction général

Chapitre 1 :L'analyse vibratoire.

Introduction générale

1.1. Définition d'une vibration.....	1
1.2. Approche intuitive	1
1.2.1. Perception subjective des phénomènes	1
1.2.2. Le bruit	1
1.2.3. Origine du bruit rayonné par une machine.....	1
1.3. Les vibrations.....	2
1.3.1. Vibrations d'une machine.....	2
1.3.2. Origine des phénomènes	2
1.4. Définition théorique d'une vibration.....	2
1.4.1. Vibrations périodiques.....	2
1.4.2. Vibrations aléatoires.....	3
1.4.3 Vibrations d'un système "masse-ressort".....	3
1.4.4 Vibration sinusoïdale.....	3
1.5. Description de la vibration.....	4
1.5.1. Logarithme	4
1.5.2. Niveau en décibel – DB5.....	5
1.5.3. Niveau d'accélération	5
1.5.4. Niveau de vitesse.....	5
1.5.5. Niveau de déplacement	5
1.6.1. Amplitude et fréquence.....	6
1.6.2 .Intensité et fréquence.....	6
1.6.3. Définition de l'amplitude, de la période, de la fréquence.....	6
1.6.4. Amplitude et période	6
1.7. Les analyseurs de fréquence.....	7
1.7.1. Analyseur analogique	7
1.7.2. Analyseur numérique.....	7

Table des matières

1.8. Métrologie	8
1.8.1. La mesure du niveau global	8
1.8.2. L'analyse spectrale	8
1.8.3. Le spectre.....	9
Chapitre 2 : Maintenances et surveillances	
Introduction.....	11
2.1. La maintenance par analyse vibratoire.....	11
2.1.1. Définition de la maintenance	11
2.1.2. Les différentes formes de maintenance.....	12
2.1.1.2. Les formes de la maintenance	12
2.1.1.3. La maintenance corrective	12
2.1.1.4. La maintenance préventive.....	13
2.1.1.5. La maintenance systématique	13
2.1.1.6. La maintenance conditionnelle	13
2.1.1.7. La maintenance prévisionnelle.....	14
2.1.1.8. La sécurité	15
2.2. Les objectifs de la Maintenance	15
2.2.1. Contribuer à assurer la production prévue.....	15
2.2.2. Contribuer à maintenir la qualité du produit fabriqué	15
2.2.3. Contribuer au respect des délais.....	16
2.2.4. Rechercher des coûts optimaux.....	16
2.2.5. Respecter les objectifs humains	16
2.2.6. Préserver l'environnement	16
2.2.7. Conseiller.....	16
2.2.8. Taches de maintenance.....	16
2.2.9. Inspection.....	17
2.2.10. Essais en exploitation.....	17
2.2.11. Révision.....	17
2.2.12. Modification.....	17
2.3. La surveillance des machines	18
2.3.1. La mesure des vibrations.....	18
2.3.2. Les mesures de vibration absolues.....	18
2.3.3. But de mesure.....	18
2.3.4. Avantages et inconvénients de la MPC.....	18

Table des matières

2.3.4.1. Formation du personnel.....	19
2.3.4.2. Mise en place.....	19
Chapitre 3 : Image vibratoires des principaux défauts	
3.1. Analyse vibratoire des machines tournantes.....	21
3.1.1. Origine des vibrations sur les machines tournantes	21
3.1.2. Matériel de mesure	21
3.2. Les principaux défauts	27
3.2.1. Déséquilibre: défaut de balourd... ..	27
3.2.1.1. Equilibrage statique.....	27
3.2.1.2. Equilibrage dynamique	27
3.2.1.3. Spectre d'un déséquilibre.....	28
3.2.2. Défaut d'alignement	29
3.2.2.1. Origine du défaut	29
3.2.2.2. Signature du défaut d'alignement.....	30
3.2.3. Défaut de desserrage et de jeu	31
3.2.4. Défauts de transmission par courroies.....	33
3.2.5. Défauts de denture d'engrenages	34
3.2.5.1. Généralités.....	34
3.2.5.2. Signature d'un engrenage	34
3.2.5.3. Défaut d'excentricité.....	34
3.2.5.4. Gravité des défauts.....	34
3.2.5.5 Défauts électriques	36
3.2.6. Circuits hydrauliques.....	40
3.2.6.1. Passages d'aubes	40
3.2.6.2. Cavitation	40
3.2.7. Défauts spécifiques aux roulements.....	40
3.2.7.1. Durée de vie des roulements	40
3.2.7.2. Processus de dégradation d'un roulement.....	41
3.2.7.3. Fréquences caractéristiques.....	42
3.2.7.4. Modulation d'amplitude de BPF1	43
3.2.7.5. Modulation de BPF0.....	44
3.2.7.6. Signatures vibratoires des défauts d'écaillage.....	45
3.2.7.7. Rupture de cage.....	46
3.2.7.8. Défaut de billes.....	47

Table des matières

Chapitre 4 : Application de la méthode d'enveloppe pour le diagnostic des défauts de roulements

4.1. Introduction.....	48
4.2. Configuration expérimentale et acquisition de données.....	48
4.3. Analyse spectrale.....	51
4.4. Analyse d'enveloppe.....	52
4.5. Conclusion.....	56
Conclusion générale	57

LISTE DES FIGURES

Liste des figures :

Figure1.1: Origine du bruit.....	1
Figure 1.2 : Vibrations périodiques.....	2
Figure. 1.3 : Vibrations d'un système "masse-ressort"	3
Figure 1.4 : Vibration sinusoïdale.....	4
Figure 1.5 : Logarithme des vibrations.....	5
Figure1.6 : l'amplitude, de la période, de la fréquence.....	6
Figure1.7: Analyseur numérique.....	7
Figure1.8 :L'amplitude d'une vibration.....	8
Figure 2.1 : Les formes de la maintenance.....	12
Figure2.2: phases de la maintenance conditionnelle.....	14
Figure 2.3 : avantages et inconvénients de la MPC.....	20
Figure 3.1 : machine tournante.....	21
Figure 3.2 : machine tournante (intérieur).....	22
Figure3.3: machine tournante.....	22
Figure 3.4 : organigramme de mesure des vibrations d'une machine tournante.....	24
Figure 3.5 : mesures des vibrations par l'expérience humaine.....	25
Figure 3.6 : mesures des vibrations par un capteur.....	25
Figure3.7 le capteur.....	26
Figure 3.8 : différentes méthodes de fixation des capteurs.....	26
Figure 3.9 : balourd.....	27
Figure 3.10 : Amplitudes du signal vibratoire de balourd.....	28
Figure 3.11 : spectre théorique d'un défaut de déséquilibre.....	28
Figure 3.12 : Spectre réel d'un ventilateur tournant à 2955tr/min.....	29
Figure 3.13: schéma du défaut d'alignement.....	30

LISTE DES FIGURES

Figure 3.14 : schéma Le signal temporel d'un défaut de d'alignement.....	31
Figure 3.15 : Spectre théorique d'un défaut d'alignement.....	31
Figure 3.16 désolidarisation de la structure par balourd.....	32
Figure 3.17: signal temporel et spectrale.....	32
Figure 3.18 : schéma montrant la différence entre un spectre de la vitesse vibratoire d'un jeu de Fondation (desserrage) et d'un jeu dans les roulements.....	33
Figure 3.19 : roules courroies.....	34
Figure 3.20 : Denture d'engrenages.....	35
Figure 3.21 : Spectre théorique d'un engrenage sain.....	36
Figure 3.22 : schémas des signaux d'un défaut d'excentricité.....	36
Figure3.23 : Spectre théorique d'un engrenage présentant un défaut d'excentricité.....	37
Figure 3.24: Spectre d'un engrenage.....	37
Figure 3.25 : Spectre d'un engrenage de 825 Hz.....	38
Figure 3.26 : Spectre d'un engrenage de100Hz.....	39
Figure 3.27 : schéma bruits de fond d'un roulement.....	41
Figure 3.28 : schéma du début d'usure d'un roulement.....	41
Figure3.29 : schéma du début d'endommagement d'un roulement.....	42
Figure 3.30 : Modulation d'amplitude de BPFI.....	44
Figure 3.31 : Modulation de BPFO.....	44
Figure 3.32: Spectre théorique d'un défaut d'écaillage d'un roulement.....	45
Figure 3.33 : Spectre de bague externe.....	46
Figure3.34 : Spectre de bague intérieure.....	46
Figure 3.35 : Spectre théorique d'un défaut de bille d'un roulement.....	47
Figure4.1 : a) Banc d'essais et b) son schéma synoptique.....	49
Figure4.2 : Signal temporel du défaut de bague intérieure.....	50

LISTE DES FIGURES

Figure4.3 : Signal temporel du défaut de bague extérieure.....	50
Figure4.4 : Spectre du défaut de bague intérieure.....	51
Figure 4.5 : Spectre du défaut de bague extérieure.....	52
Figure 4.6 :(a) Enveloppe du défaut de bague intérieure et (b) son spectre.....	54
Figure 4.7 :(a) Enveloppe du défaut de bague extérieure et (b) son spectre.....	55

LISTE DES FIGURES

Liste des abréviations et symboles

Liste des abréviations et symboles

V : vitesse.

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

A : accélération m/s^2 .

Aref : accélération de référence qui vaut $1\mu\text{m/s}^2 = 10^{-6}\text{m/s}^2$.

D : déplacement.

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

T : période.

F : fréquence.

Vrms : La valeur efficace.

Fc: Le facteur de crête.

MPC : maintenance préventive conditionnelle.

N : nombre des billes.

Fr : fréquence de rotation vitesse relative en tr/s .

Introduction Générale

Le fonctionnement des machines engendre des efforts (efforts tournants, turbulence, chocs) qui seront souvent la cause des défaillances ultérieures.

Pour établir un diagnostic, il faut s'appuyer sur le fait qu'une machine émet vers l'extérieur de nombreux signaux qui sont symptomatiques de son fonctionnement, tels que la chaleur dégagée, la puissance absorbée, le bruit, les vibrations, etc.

Les vibrations dépendent directement des forces générées par les différents éléments internes en mouvement, pondérées par la fonction de transfert des liaisons (roulement, film d'huile, film d'air, boulons, supports élastiques, ressorts, etc.), présentent des grands avantages en raison de la richesse des informations qu'elles véhiculent, de leur transmission quasi instantanée et de leur rapport direct avec les mouvements de la machine, ainsi les vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour assurer une surveillance efficace du bon état de fonctionnement des machines tournantes, éléments essentiels, au cœur des processus de fabrication. C'est pourquoi la plupart des méthodes modernes de la maintenance des machines font appel à l'analyse du comportement vibration, qui s'est aujourd'hui très fortement répandue dans l'industrie en y trouvant sa place au sein des stratégies de maintenance conditionnelle.

Les mesures réalisées sur les machines en fonctionnement sont faciles à mettre en œuvre et la technique permet une détection précoce de la plupart des défauts rencontrés sur les machines de production. De nombreuses anomalies telles que le déséquilibre des lignes d'arbres, le mauvais lignage des machines accouplées, la dégradation des accouplements, les jeux, l'usure des roulements et même les défauts électriques peuvent être détectés suffisamment tôt pour

Planifier une intervention avant la panne.

L'analyse des vibrations joue un rôle essentiel non seulement dans le diagnostic de l'état des machines à des fins de maintenance, mais aussi dans le cadre de la recette d'un équipement neuf ou venant de faire l'objet d'une révision :

- ❖ Pour un équipement neuf, l'analyse vibratoire permet la détection d'anomalie ou de défauts de montage.
- ❖ Pour un équipement venant de faire l'objet d'une remise en état, elle permet de vérifier si cette opération a bien corrigé les anomalies vibratoires identifiées ayant conduit à la prise de décision d'arrêt.
- ❖ Dans ce chapitre, nous présentons les différents aspects et définitions liés aux vibrations des machines.

Chapitre I

Généralités sur les vibrations

Chapitre : I

Généralités sur les vibrations

1.1. Définition d'une vibration :

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

1.2. Approche intuitive :

1.2.1. Perception subjective des phénomènes :

A proximité d'une machine :

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

1.2.2. Le bruit :

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

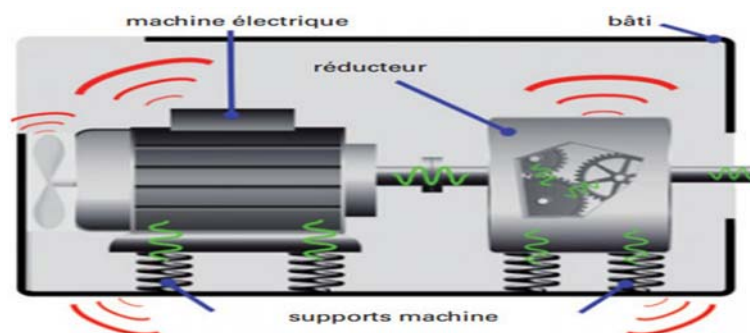


Figure 1.1: Origine du bruit.

1.2.3. Origine du bruit rayonné par une machine :

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

- ❖ Celui des machines ou parties de machines comportant des parties en vibration dont l'énergie est transmise à l'enveloppe extérieure par des liaisons rigides ou par un fluide.

- ❖ Celui des machines ou parties de machines agissant sans intermédiaire sur le milieu environnant en lui transférant de l'énergie directement sous forme de rayonnement acoustique.

1.3. Les vibrations :

1.3.1. Vibrations d'une machine :

Les vibrations d'une machine sont souvent perceptibles par simple contact de la main sur la structure.

Les vibrations ressenties proviennent des forces internes à la machine. [1]

1.3.2. Origine des phénomènes :

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

1.4. Définition théorique d'une vibration :

1.4.1. Vibrations périodiques :

Le motif d'une vibration périodique consiste en la superposition, c'est-à-dire l'addition algébrique d'une vibration pure fondamentale et de vibrations pures harmoniques.

Les fréquences des harmoniques sont des multiples entiers de celle du fondamental.

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

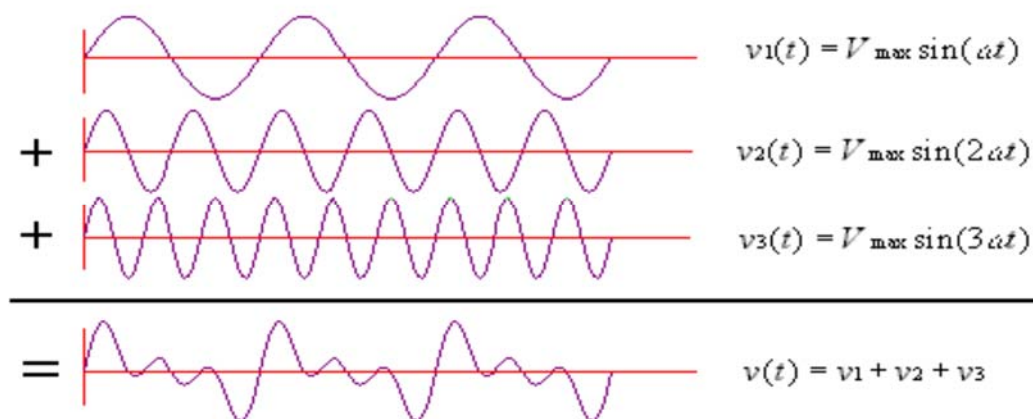


Figure 1.2 : Vibrations périodiques.

1.4.2. Vibrations aléatoires :

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

1.4.3. Vibrations d'un système "masse-ressort" :

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

Système mécanique complexe :

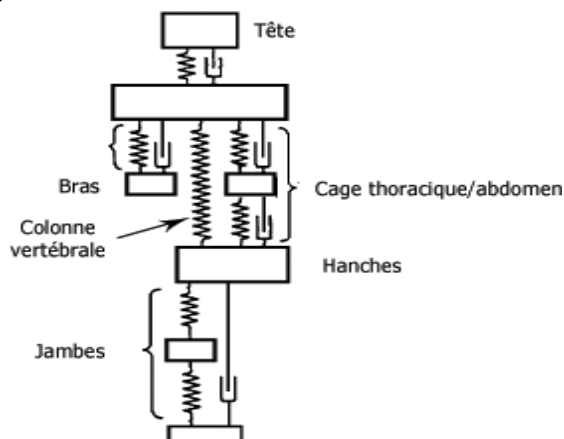


Figure. 1.3 : Vibrations d'un système "masse-ressort".

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

1.4.4. Vibration sinusoïdale :

La sinusoïde : C'est la forme d'onde la plus simple à caractériser. Cette forme d'onde particulière, peut se visualiser comme le mouvement de la projection verticale de l'extrémité d'une aiguille d'une horloge, ou le mouvement de translation d'un système masse – ressort

non amorti. La période T correspond à un tour complet de l'aiguille ou au temps que met la masse pour faire un aller retour.

Une sinusoïde est une courbe alternative, de valeur moyenne nulle, représentée par une fonction mathématique simple.

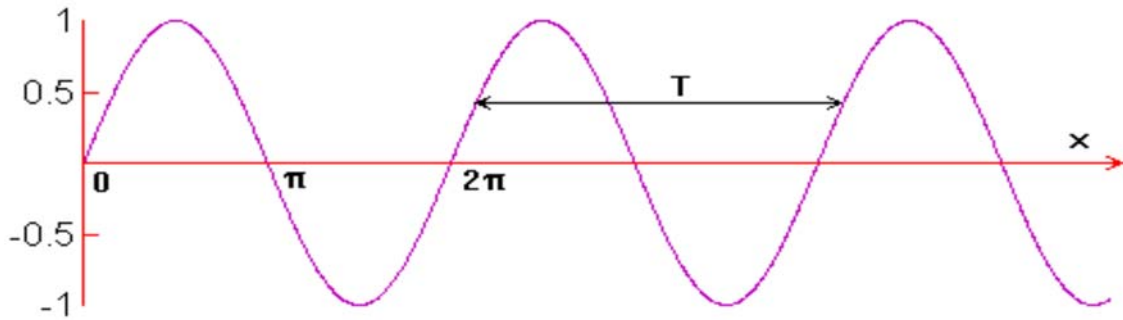


Figure 1.4 : Vibration sinusoïdale.

1.5. Descriptions des vibrations :

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

1.5.1. Logarithme :

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

Le logarithme d'une valeur positive peut être négatif; le logarithme de la somme n'est pas égal à la somme des logarithmes.

La fonction logarithme transforme l'ECHELLE LINEAIRE en ECHELLE LOGARITHMIQUE, souvent plus pratique.

L'opérateur « logarithme » transforme une multiplication en addition et permet de représenter sur un même graphique de très fortes valeurs et de très faibles. [2]

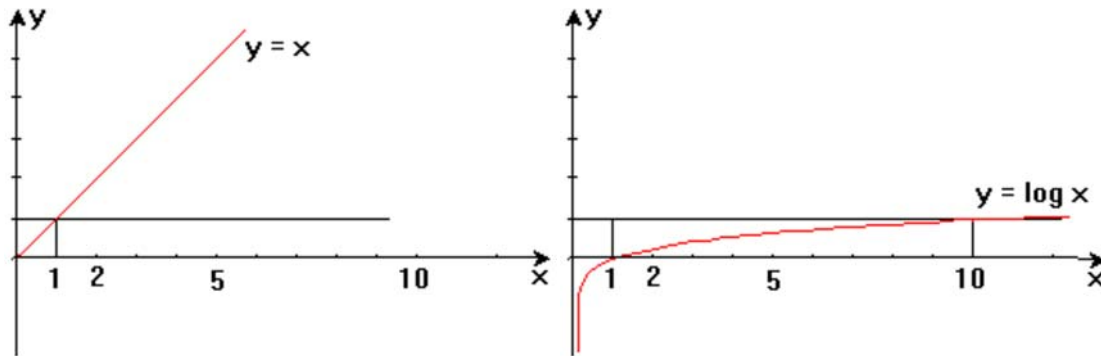


Figure 1.5 : Logarithme des vibrations.

1.5.2. Niveau en décibel – dB :

De manière générale, le niveau L en décibels (noté dB, dixième du Bel,) d'une vibration V , est par définition dix fois le logarithme décimal du rapport de V à une valeur de référence V_{ref} :

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

Cette définition s'applique à toutes les grandeurs physiques proportionnelles à la puissance.

La notation L , le plus souvent utilisée pour désigner un niveau, provient de l'anglais "level", traduction du mot "niveau". En France, on utilise aussi quelquefois la notation N .

1.5.3. Niveau d'accélération :

Le niveau d'accélération en log se définit par :

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

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

1.5.4. Niveau de vitesse :

Le niveau de vitesse en log se définit par :

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

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

1.5.5. Niveau de déplacement :

Le niveau déplacement en log se définit par :

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

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

1.6.1. Amplitude et fréquence:

En vous reportant à la figure (1.5) suivante, remarquez l'axe t (temps) qui représente la droite que la plume tracerait si la masse était immobile. L'axe d (déplacement) représente, quant à lui, la position de la masse en un temps donné.

1.6.2. Intensité et fréquence :

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

1.6.3. Définition de l'amplitude, de la période, de la fréquence :

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

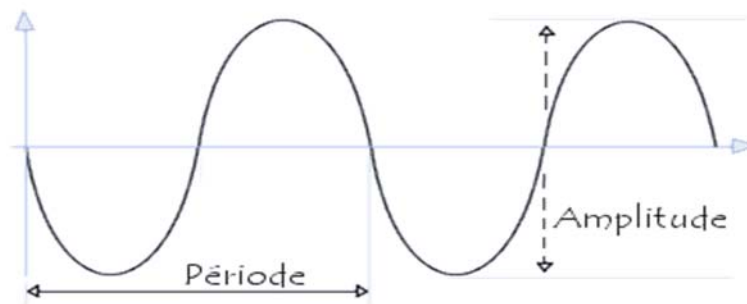


Figure 1.6 : l'amplitude, de la période, de la fréquence.

1.6.4. Amplitude et période :

Un phénomène est dit périodique s'il se reproduit avec les mêmes caractéristiques.

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène va être observé durant une unité de temps fixée.

La période est l'inverse de la fréquence. On note : $T = 1/f$. [2]

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

1.7. Les analyseurs de fréquence :

1.7.1. Analyseur analogique :

En vibration appliquée, un analyseur ou chaîne de mesure analogique comprend les organes suivants : un accéléromètre de mesure avec son préamplificateur d'adaptation d'impédance ; un amplificateur calibré - incluant un atténuateur par pas de 10 dB pour adapter la sensibilité ; un spectromètre; un second amplificateur calibré

Également avec atténuateur -; un détecteur de valeur efficace, c'est-à-dire un dispositif électronique effectuant le calcul de cette valeur selon sa définition; un dispositif d'affichage des résultats d'analyse.

1.7.2. Analyseur numérique :

Un analyseur numérique comprend toujours un accéléromètre et un amplificateur analogique, mais le signal en sortie de ce dernier est converti sous forme numérique et toutes les opérations d'analyse se font numériquement. On dispose ainsi d'analyseurs de Fourier, dont les résultats sont comparables à un ensemble de filtres à bande étroite étagés régulièrement en fréquence. Le plus souvent, on applique un algorithme dit Transformée Rapide de Fourier. On dispose aussi de filtres numériques récurrents normalisés permettant l'analyse par fraction d'octave.

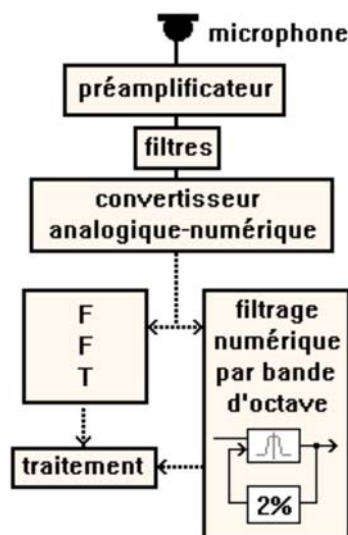


Figure 1.7: Analyseur numérique.

1.8. Métrologie :

1.8.1. La mesure du niveau global :

L'amplitude d'une vibration qui est le paramètre décrivant l'importance de la vibration peut être évaluée de différentes façons. Sur le graphe ci-après, sont indiquées les relations entre la valeur crête à crête, la valeur crête, les valeurs moyenne et efficace pour une vibration pure.

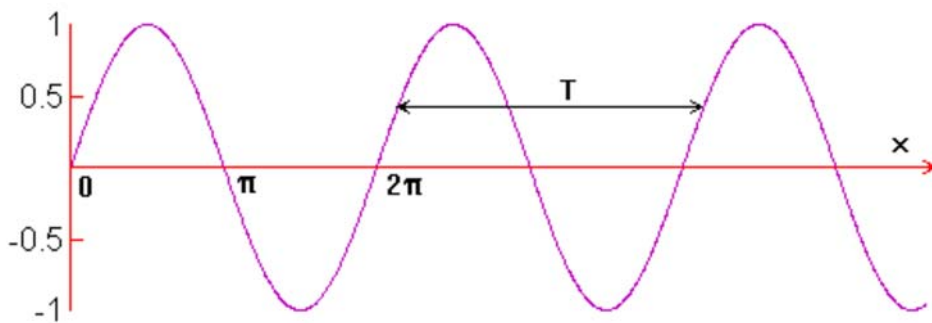


Figure 1.8 : L'amplitude d'une vibration.

La valeur efficace se détermine par la formule suivante :

$$V_{rms} = \sqrt{1/T \int x^2(t) dt} \quad [2]$$

Elle correspond à une moyenne énergétique.

Pour un signal sinusoïdal, les relations entre les différents paramètres sont les suivants :

- ❖ $V_{rms} = 0.707 V_c$
- ❖ $V_{rms} = 1.11 V_m$
- ❖ $V_{cc} = 2 V_c$

Avec V_c comme vibration crête et V_{cc} comme vibration crête à crête.

Il est évident que pour une vibration aléatoire ou harmonique ces relations ne sont plus aussi évidentes. Le rôle des détecteurs dans un système de mesure est alors important car il doit qualifier tout type de signal.

Le facteur de crête est défini par la relation : $F_c = V_c/V_{rms}$ [2]

C'est un indicateur sans dimension. Il peut s'exprimer en dB.

1.8.2. L'analyse spectrale :

Une vibration harmonique est composée d'une composante fondamentale et d'un cortège d'harmoniques. Pour décrire complètement une telle vibration, il faut spécifier le niveau et la

fréquence de chaque composante. L'analyse spectrale est la technique de détermination de ces valeurs, par calculs ou mesures. On doit à Fourier une méthode analytique de décomposition d'une vibration périodique en ses composantes : c'est la série de Fourier. Plus généralement,

On peut démontrer que tout phénomène périodique, par exemple une vibration, est décomposable en vibrations pures. Ainsi une vibration non périodique est considérée comme une vibration périodique dont la période devient infiniment grande. Il peut être alors décrit sous forme d'une somme infinie de composantes fréquentielles infiniment proches. C'est la transformation de Fourier qui permet ce calcul. Les travaux mathématiques de Fourier (1768-1830) ont permis le développement des sciences, en particulier du traitement de signal.

1.8.3. Le spectre :

Le spectre d'une vibration est l'ensemble des données de niveaux et de fréquences des vibrations pures le composant. Il est habituellement représenté sous la forme d'un graphique. Un spectre est obtenu par analyse spectrale, par exemple en utilisant les algorithmes de Fourier. [3]

Pourquoi le spectre d'une vibration pure ne comporte-t-il qu'une raie ? Quelle est l'allure caractéristique d'un spectre d'une vibration harmonique ?

Par définition une vibration pure ne comporte qu'une seule fréquence, donc une seule raie.

Une vibration harmonique est une somme de vibrations pures, donc l'allure du spectre associé est un ensemble de raies, celles des vibrations pures sommées.

Chapitre II

Maintenances et surveillances

Chapitre : II

Maintenances et surveillances

Introduction:

A partir du moment de sa mise en route, la machine peut être prédisposée à l'usure, bien sur, cette usure sera plus ou moins rapide en fonction de plusieurs paramètres, tels que la qualité des éléments la constituant, sa conception, son utilisation et entretien.

Aujourd'hui, la gestion de la maintenance est considérablement développée. Les énormes sommes engagées dans la maintenance des installations ont imposé de nouvelles approches.

Il a été aussi démontré que la durée de vie des équipements et leur taux de disponibilité dépendent essentiellement des programmes de maintenances appliqués.

2.1. La maintenance par analyse vibratoire :

2.1.1. Définition de la maintenance :

D'après la norme AFNOR X60-010, la maintenance est définie comme " L'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ".

Maintenir c'est donc effectuer des opérations (de nettoyage, graissage, visite, réparation, révision, amélioration...etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de production, ainsi que choisir les moyens de prévenir, de corriger ou de rénover suivant l'utilisation du matériel. L'état d'esprit de la maintenance est de maîtriser les interventions.

La maintenance a pour but :

- ❖ Le maintien du capital machine.

- ❖ La suppression des arrêts et des chutes de production (garantir la capacité de livraison).

- ❖ L'amélioration de la sécurité et la protection du personnel et de l'environnement.

2.1.2. Les différentes formes de maintenance :

2.1.1.2. Les formes de la maintenance :

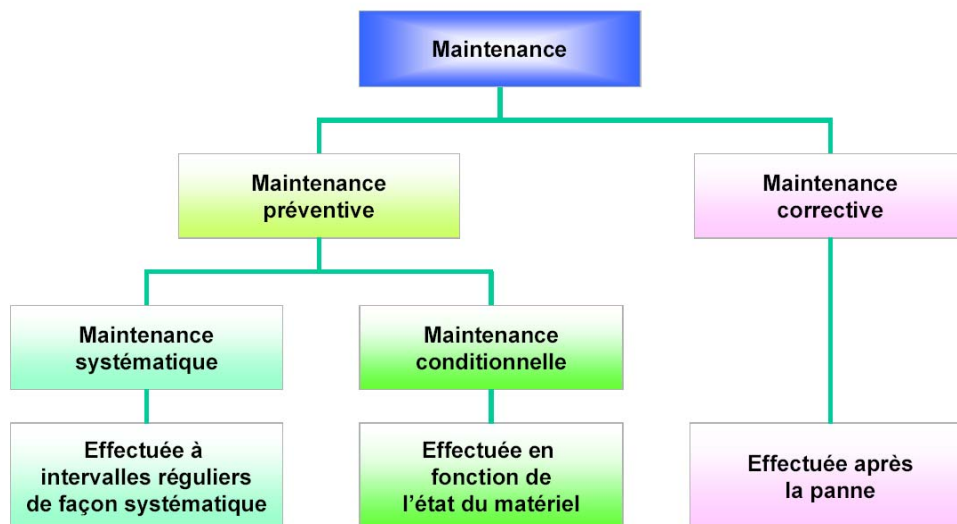


Figure 2.1 : Les formes de la maintenance.

On distingue dans le milieu industriel deux types de maintenance:

- ❖ La maintenance corrective.
- ❖ La maintenance préventive.

2.1.1.3. La maintenance corrective :

D'après la norme AFNOR X60-010, la maintenance corrective se définit comme "une maintenance effectuée après défaillance".

Dans cette approche, les machines fonctionnent sans dépenses particulières pour l'entretien ni la surveillance, jusqu'à l'incident.

Dans la maintenance corrective, tout incident sur la machine a une influence sur l'exploitation, et puisque les arrêts sont aléatoires, la planification dans la production est difficile. Il est donc nécessaire d'effectuer une réparation le plus tôt possible.

Le dépannage : action sur un système défaillant dans le but de le remettre provisoirement en état de fonctionnement avant réparation.

La réparation : opération définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance.

2.1.1.4. La maintenance préventive:

La maintenance préventive est effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu (norme AFNOR X 60010). Les interventions sont prévues, préparées et programmées avant la date probable d'apparition d'une défaillance.

Dans la maintenance préventive, on trouve dans une première phase des visites périodiques permettant de suivre l'état du matériel et de connaître les lois de dégradation et les seuils d'admissibilité. Dans une deuxième phase, lorsque le comportement du matériel sera connu, on évoluera vers la maintenance systématique. [4]

2.1.1.5. La maintenance systématique :

En s'appuyant sur une gestion rigoureuse, et sur une connaissance statistique de la vie des composants de chaque machine, on programme l'arrêt du matériel pour une révision systématique avant usure ou panne.

La maintenance préventive systématique, c'est l'ensemble des visites systématiques effectuées préventivement, préparées et programmées avant la date probable d'apparition d'une défaillance. Attendre que la machine tombe en panne pour la réparer semble être à priori.

La solution la plus mauvaise, c'est pourquoi certains utilisateurs choisissent la maintenance systématique périodique.

Dans la maintenance préventive systématique les éléments sont remplacés alors qu'ils seraient encore utilisables ou des composants endommagés sont remis en état trop tardivement.

2.1.1.6. La maintenance conditionnelle :

D'après la norme AFNOR X60-010, la maintenance conditionnelle se définit comme " une maintenance préventive subordonnée à un type d'évènement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure) révélateur de l'état de dégradation du bien".

La maintenance conditionnelle est synonyme de la maintenance en condition "selon l'état" ou prédictive, terme réservé à l'usage aux machines tournantes.

Cette forme de la maintenance permet d'assurer le suivi continu du matériel en service dans le but de prévenir les défaillances attendues.

La maintenance conditionnelle est liée à l'état de la machine:

Composant à changer uniquement si les tolérances sont atteintes...etc.

Arrêt de la machine uniquement si son état le nécessite.

Rotor à équilibrer si les tolérances sont atteintes.

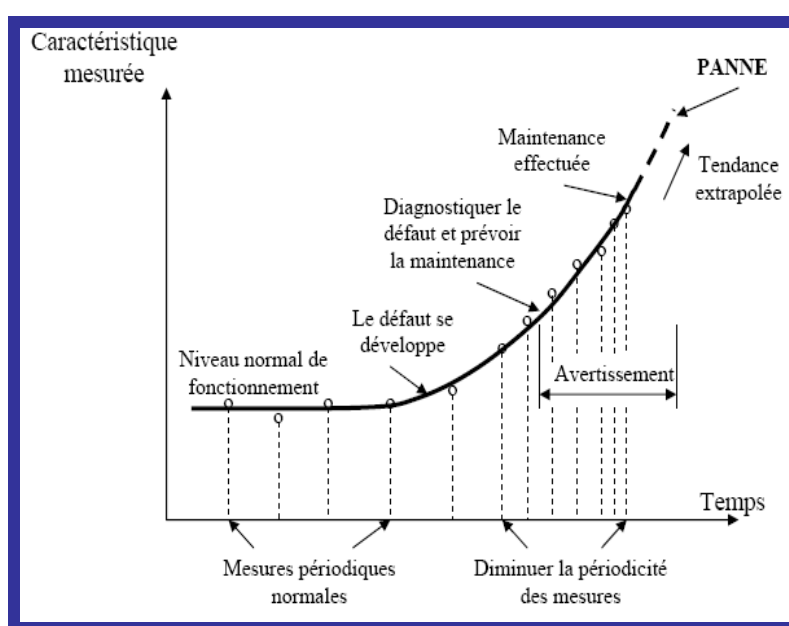


Figure2.2: phases de la maintenance conditionnelle.

2.1.1.7. La maintenance prévisionnelle:

C'est un type de maintenance conditionnelle permettant de réajuster les prévisions d'opérations de maintenance à effectuer, en estimant la tendance évolutive du dysfonctionnement éventuel détecté sur un appareil et le temps pendant lequel il est possible de continuer à l'utiliser avant la panne.

Ces estimations se font à partir des analyses périodiques de l'état de chaque équipement obtenues par les méthodes de la maintenance conditionnelle et l'utilisation de modèles d'usure.

2.1.1.8. La sécurité :

La sécurité reste un terme très générale, il n'existe pas actuellement de consensus pour normalisation. Les définitions probables associée reste donc dépendantes des approches.

Une définition est donnée par la référence [AFNO 88] : « aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques ».

L'évaluation de la sécurité est actuellement n'est pas limitée et effectuée pour les installations mécanique, chimique, ..., elle est basée sur les études statistiques d'impacts des accidents (réels, expérimentés ou simulés) sur l'homme et l'environnement (notion de gravité) [4]

2.2. Les objectifs de la maintenance:

D'une manière générale, la maintenance a pour but d'assurer la disponibilité maximale des équipements de production à un coût optimal dans de bonnes conditions de qualité et de sécurité.

Les principaux objectifs que doit se fixer la fonction maintenance sont :

2.2.1. Contribuer à assurer la production prévue :

Les programmes et les quantités à fabriquer doivent être étudiés conjointement par la fabrication et la maintenance, en tenant compte des arrêts planifiés pour les interventions de maintenance.

Pendant les périodes de marche, la disponibilité des outils de production doit être maximale en minimisant les arrêts imprévus.

2.2.2. Contribuer à maintenir la qualité du produit fabriqué :

La qualité relève, à la fois, de la responsabilité de la production et de la maintenance. Par exemple, une erreur de conduite ou un mauvais entretien d'une machine peut conduire à une altération de la qualité du produit fabriqué. Il est donc indispensable de préciser les responsabilités de la production et de la maintenance.

En particulier, après une intervention de maintenance, la réception du matériel sera faite conjointement par les responsables de maintenance et de fabrication (réglage de démarrage, mise au point du matériel, etc.).

2.2.3. Contribuer au respect des délais :

Il s'agit à la fois des délais de fabrication des produits et des délais des interventions de maintenance. Il incombe à la maintenance qu'ils soient respectés.

Pour atteindre cet objectif, il faut que la maintenance estime correctement la disponibilité opérationnelle du matériel.

2.2.4. Rechercher des coûts optimaux:

En plus des trois objectifs précédents, la maintenance doit assurer la disponibilité des équipements de production à des coûts optimaux, d'où intervention de la notion de rentabilité.

Cet objectif ne peut être atteint qu'en planifiant correctement les interventions de maintenance : préparation et ordonnancement des travaux, désignation du personnel qualifié pour ces travaux, préparation des outillages et des pièces de rechange, etc.

2.2.5. Respecter les objectifs humains : formation, conditions de travail et de sécurité:

La formation du personnel dans les spécialités spécifiques de la maintenance, l'amélioration des conditions de travail du personnel et le respect des consignes de sécurité doivent être parmi les priorités de la maintenance.

2.2.6. Préserver l'environnement et économiser l'énergie:

La maintenance doit lutter contre les pollutions et nuisances, et entreprendre des actions pour réduire la consommation d'énergie. [4]

2.2.7. Conseiller:

La direction pour le renouvellement du matériel ;

Les responsables de fabrication pour une meilleure utilisation des équipements.

2.2.8. Taches de maintenance:

La classification et Le contenu des tâches DC maintenance doivent être définis clairement pour identifier les compétences des différents intervenants amenés à réaliser la maintenance des équipements.

Ces éléments d'information sont indispensables pour constituer les équipes DC maintenance avec toutes les qualifications nécessaires pour des interventions de qualité.

2.2.9. Inspection:

Activité de surveillance s'exerce dans le cadre d'une mission définie. Elle n'est pas obligatoirement limitée à la comparaison avec des données préétablies.

Examen visuel ou recourant à des moyens non destructifs.

2.2.10. Essais en exploitation:

Tâche qui mesure l'aptitude du matériel à assurer ses fonctions, ou son niveau de performance, dans des conditions d'exploitation normales ou incidentelles.

Opération de maintenance préventive consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments 36 Diagnostic des défaillances.

Du bien et pouvant impliquer des opérations de premier niveau (réglage simples...).

2.2.11. Révision:

Ensemble des actions d'examens de contrôle et des interventions effectuées en vue d'assurer le bon fonctionnement d'un bien contre une défaillance majeure ou critique pendant un temps (tonnage ou pour nombre d'unités d'usage donné).

2.2.12. Modification:

Opération de caractère définitif effectuée sur un bien en vue de son fonctionnement ou d'en changer les caractéristiques d'emploi.

Ce concept est souvent associé aux cliquettements, dans les procédures de conduite ou l'initiation de l'unité. Cependant, c'est également une technique disponible pour corriger ou prévenir les défaillances des matériels, notamment dans le cas où l'origine du problème est une fiabilité intrinsèque insuffisante.

Dans ses applications à la maintenance, la modification consiste la plupart du temps en une correction locale de la conception ou du procédé de construction, pour éviter le retour d'un mode de défaillance dans un emplacement donné.

2.3. La surveillance des machines :**2.3.1. La mesure des vibrations :**

Introduction :

Les vibrations d'une machine tournante sont l'image des forces internes à celle-ci.

Ces forces, représentatives du comportement mécanique de la machine, se transmettent du rotor à la structure au travers des paliers.

2.3.2. Les mesures de vibration absolues :

Le type de capteur utilisé pour la mesure des vibrations dépend directement du type de palier rencontré.

Les accéléromètres permettent la mesure des vibrations absolues. Ils sont utilisés pour l'instrumentation des paliers à roulement.

Les sondes de déplacement permettent la mesure des déplacements relatifs de l'arbre dans le palier. Elles sont utilisées pour l'instrumentation des paliers fluides.

Les sondes de déplacement permettent la mesure des déplacements des arbres dans le palier lisse.

Elles permettent notamment la visualisation de l'arbre lorsqu'elles sont utilisées par paire dans une direction radiale.

2.3.3. But de mesure :

Le but essentiel de la mesure est d'obtenir le spectre des fréquences (FFT), pour déterminer à quelles fréquences correspondent les plus grandes amplitudes. Grâce à la connaissance de ces différentes fréquences, on pourra reconnaître les sources qui génèrent les vibrations.

2.3.4. Avantages et inconvénients de la MPC :

Le principal avantage de la MPC est qu'elle permet d'éviter les arrêts machines dus aux pannes. Pour minimiser encore ces arrêts machines, il faut utiliser des techniques permettant de mesurer l'état de la machine sans l'arrêter. Les 3 principales techniques utilisées en MPC sont :

La thermographie infrarouge : cette technique permet de mesurer la température de composants sans contact. Tout défaut se traduisant souvent par une élévation de la température, on peut ainsi en mesurer les conséquences.

L'analyse des huiles : cette technique permet à la fois de surveiller l'huile d'une machine afin de ne la changer que lorsqu'elle est dégradée (surveillance de lubrifiant) mais également, à l'instar d'une analyse de sang pour un être humain, de mesurer l'état de santé de la machine.

L'analyse vibratoire : cette technique est principalement utilisée pour la surveillance des machines tournantes. Toute machine tournante vibre. Ces vibrations sont les conséquences de défaut de la machine. Plus la machine vibre et plus les défauts ne sont importants

Le principal inconvénient de la MPC réside dans la mise en place de ces techniques. Elles sont lourdes à mettre en œuvre sur plusieurs points :

2.3.4.1. Formation du personnel :

Selon le matériel acheté et le niveau d'exigence désiré, ces techniques exigent un haut niveau de formation du personnel. Cela implique donc de libérer du temps de formation et de trouver du personnel compétent, capable de s'adapter aux évolutions rapides de ces techniques.

2.3.4.2. Mise en place :

La difficulté principale de ces techniques est la définition des seuils d'alarme et de danger. Ces seuils nécessitent un temps de mise en place pendant lequel la MPC n'est pas forcément rentable. Ce délai peut aller de 1 à 3 ans. En effet, si on surestime les seuils, on risque la panne bien avant de l'atteindre. De même, si on les sous-estime, on risque de détecter de fausses alarmes, c'est-à-dire d'atteindre les niveaux d'alarme bien avant la panne. Cela aura pour conséquence de déclencher des actions de MPC non justifiées.

Ces avantages et ces inconvénients sont résumés dans le schéma suivant. Le choix de la mise en place de la MPC dans une entreprise doit se faire en pesant les contraintes et les avantages. [5]

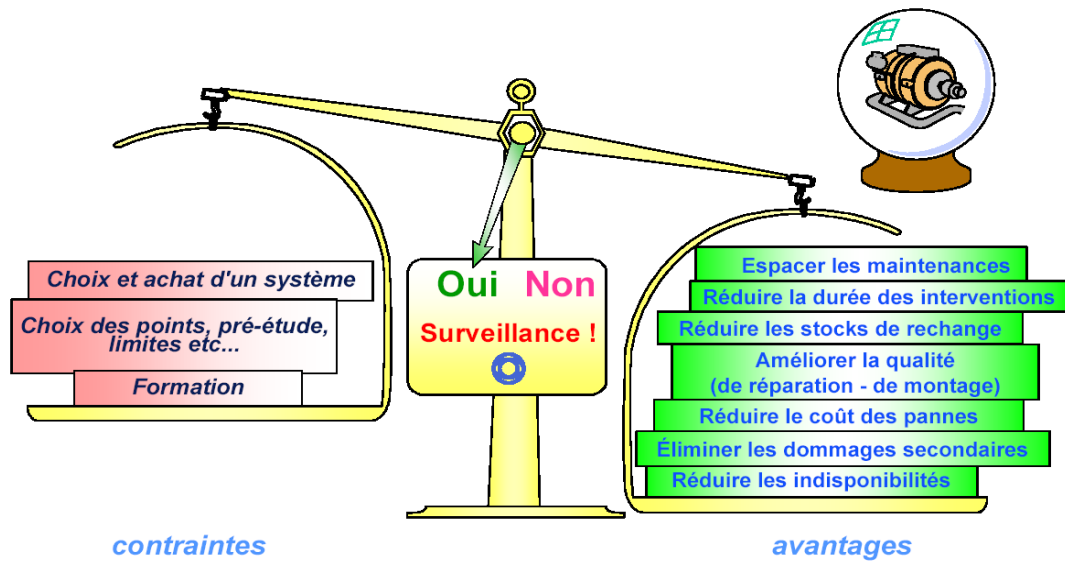


Figure 2.3 : avantages et inconvénients de la MPC.

Chapitre III

**Analyse vibratoires des principaux
défauts.**

Chapitre III

Analyse vibratoires des principaux défauts.

3.1. Analyse vibratoire des machines tournantes :

3.1.1. Origine des vibrations sur les machines tournantes :

L'analyse vibratoire est utilisée en MPC pour la surveillance des machines tournantes. Les machines tournantes sont des systèmes dans lesquels peut se distinguer :

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

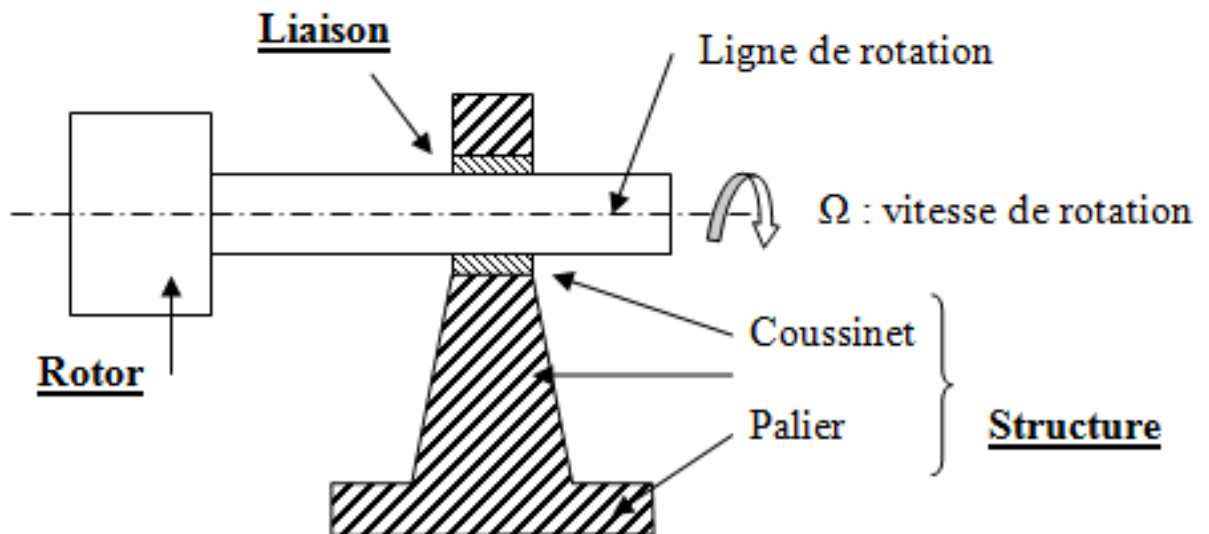


Figure 3.1 : machine tournante.

Le rotor tourne autour d'une ligne de rotation par l'intermédiaire de liaisons ayant pour support la structure de la machine. La rotation du rotor engendre des forces qui dépendent de l'état des machines. Ces efforts vont se répercuter sur tous les éléments de la machine.

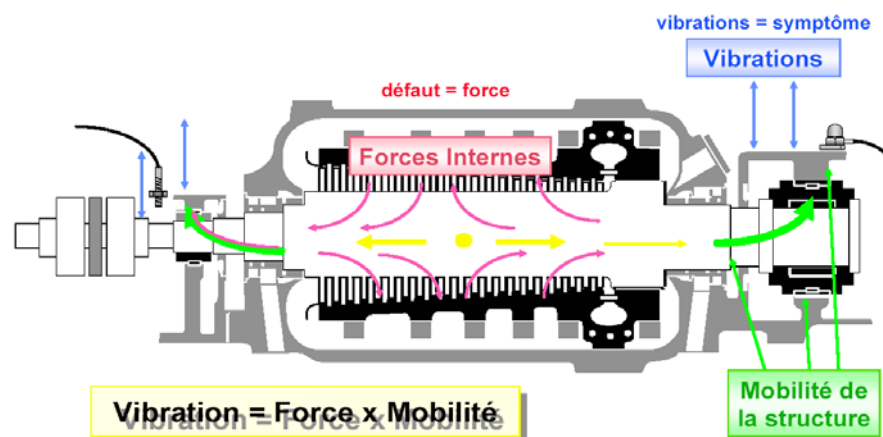


Figure 3.2 : machine tournante (intérieur).

Des vibrations vont être créées si ces efforts rencontrent une mobilité (un jeu ou un élément peu rigide). Une vibration peut donc être vue comme :

Les machines réelles ne sont jamais parfaites :

Défauts de fabrication, jeux de fonctionnement, paramètres de fonctionnement (température, vitesses de rotation,...).

Une machine réelle peut être décrite par le schéma ci-contre où les défauts ont été exagérés. La vibration dépend des conditions de fonctionnement.

Le signal vibratoire contient des informations sur les efforts engendrés par le fonctionnement de la machine, mais aussi sur l'état mécanique des structures.

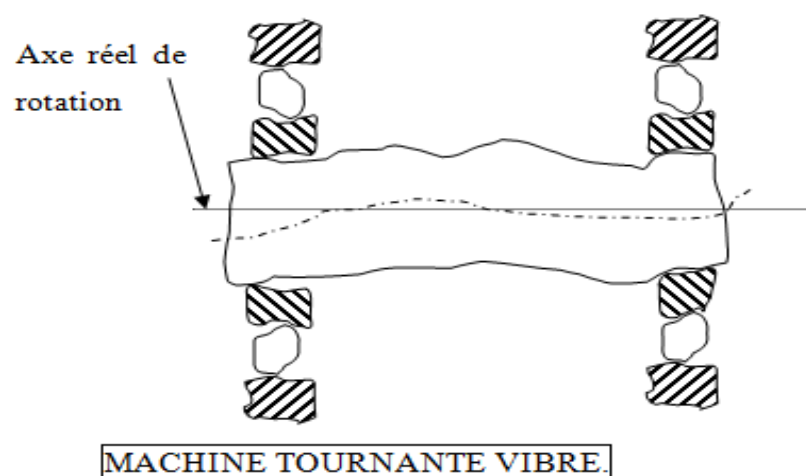


Figure3.3: machine tournante.

Il permet par conséquent d'avoir une image des contraintes internes et de diagnostiquer un certain nombre de défauts de fonctionnement.

Mais en raison même de la richesse des renseignements qu'il peut apporter, il n'est en général pas directement utilisable. Il contient trop d'informations qu'il faut traiter et trier.

Le matériel de mesure enregistre le signal vibratoire. En fonction des besoins de l'analyse, on définit ensuite des indicateurs calculés à partir de ce signal. L'évolution de ces indicateurs renseigne sur l'usure de la machine.

C'est ce qui montre la figure de la page suivante. En conclusion, les vibrations et les bruits sont des indicateurs objectifs de l'état de santé des matériels comportant au moins une pièce en mouvement.

Ces indicateurs sont en étroite corrélation avec les balourds, les désalignements, les défauts d'engrènement, les usures, les déformations, etc.

Ainsi, le suivi vibratoire apporte la connaissance de l'état réel de la machine. A tout moment, il permet de suivre son évolution donc de programmer l'arrêt du système en tenant compte :

- ❖ De la production
- ❖ De la disponibilité de l'équipe d'intervention
- ❖ De l'approvisionnement des pièces de rechange.

En outre, ce suivi permet :

- ❖ De supprimer les arrêts pour inspections et visites
- ❖ De détecter précocement les risques de défaillance
- ❖ De mieux planifier les interventions
- ❖ De réduire la durée et l'importance des interventions donc l'indisponibilité de l'outil de production.
- ❖ Donc par conséquent de réduire les coûts directs et indirects de maintenance.

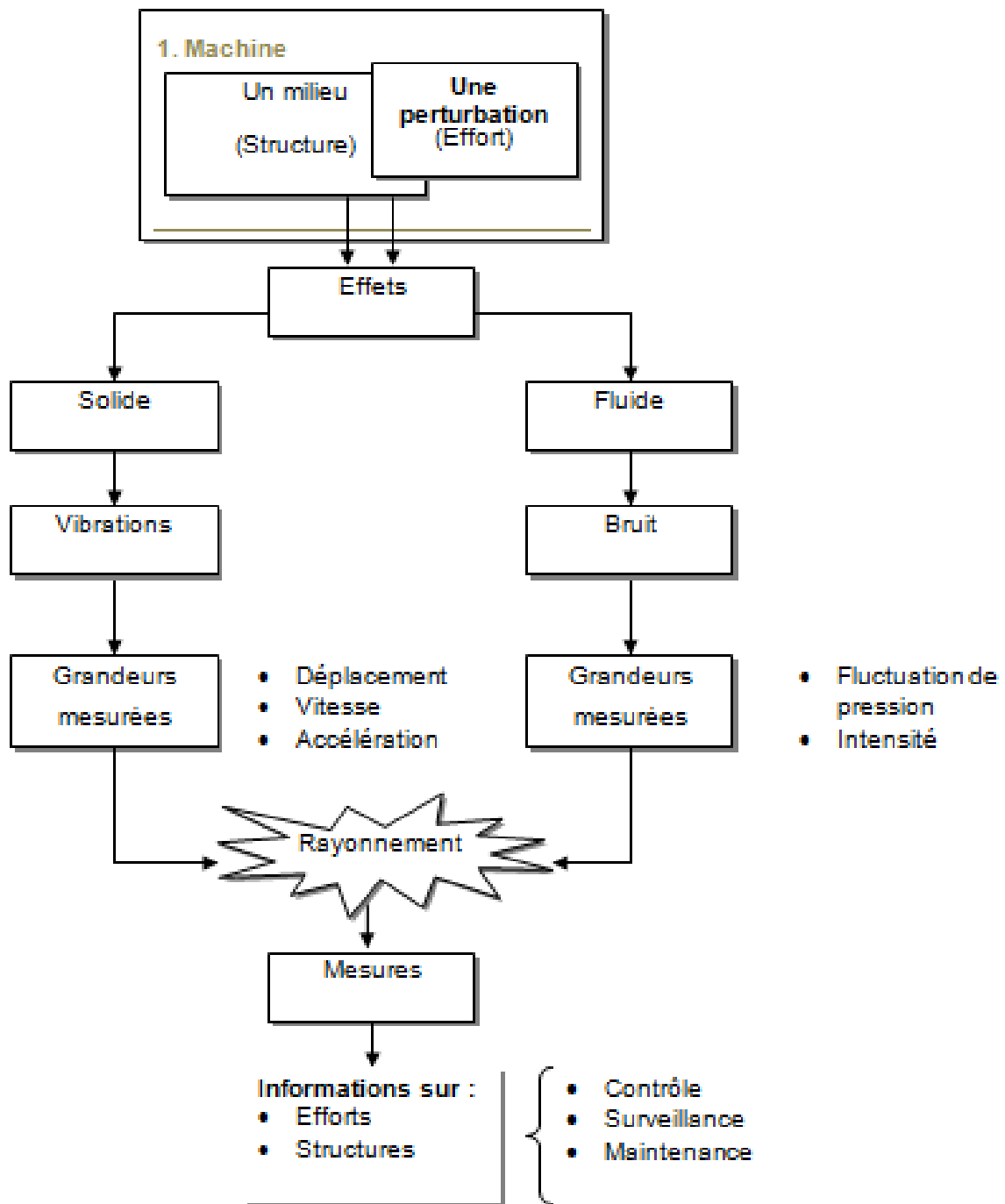


Figure 3.4 : organigramme de mesure des vibrations d'une machine tournante.

3.1.2. Matériel de mesure :

La première méthode de mesure des vibrations est l'homme.

Cette méthode a ses limites dues à la précision de mesure de nos sens.

C'est pourquoi on préférera utiliser un capteur.

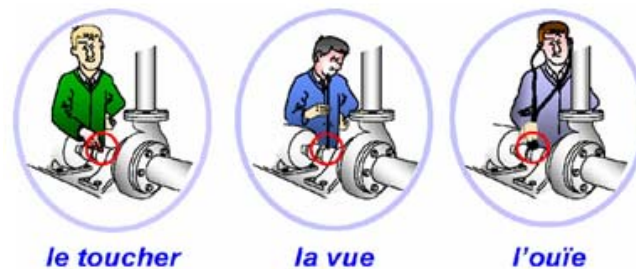


Figure 3.5 : mesures des vibrations par l'expérience humaine.

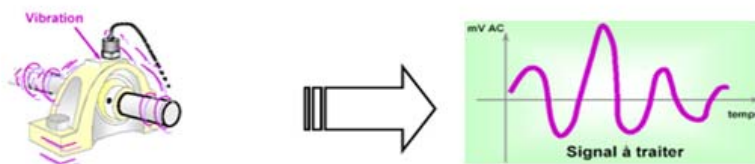


Figure 3.6 : mesures des vibrations par un capteur.

Les 3 grandeurs que l'on est amené à mesurer en technique vibratoire sont le déplacement, la vitesse et l'accélération.

En analyse vibratoire des machines tournantes, on utilise principalement des accéléromètres que l'on dispose au niveau des paliers comme indiqué sur la figure suivante.

Les capteurs correctement positionnés sont les capteurs A (position « radial ») et C (position « axial »).

Le capteur B est trop loin du palier.

Le palier D n'est pas sur une structure rigide.

Les vibrations dépendant des mobilités des structures (jeu, manque de rigidité), il faut les positionner au plus près des paliers sur des structures rigides.

Les capteurs peuvent être fixés de différentes façons sur les structures. La solution donnant le résultat le plus fidèle à la réalité est la fixation par goujon. C'est en effet la solution de montage la plus rigide donc provoquant le moins de pertes du signal de départ.

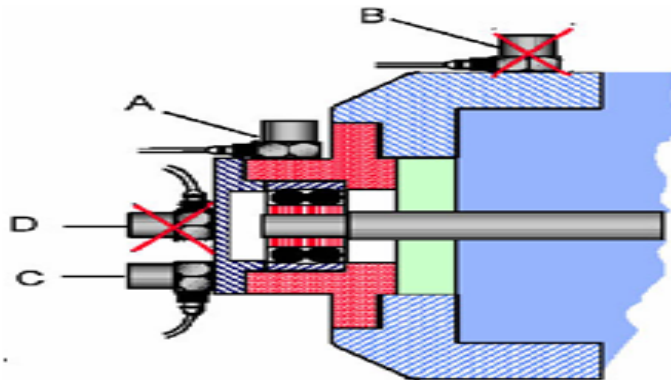
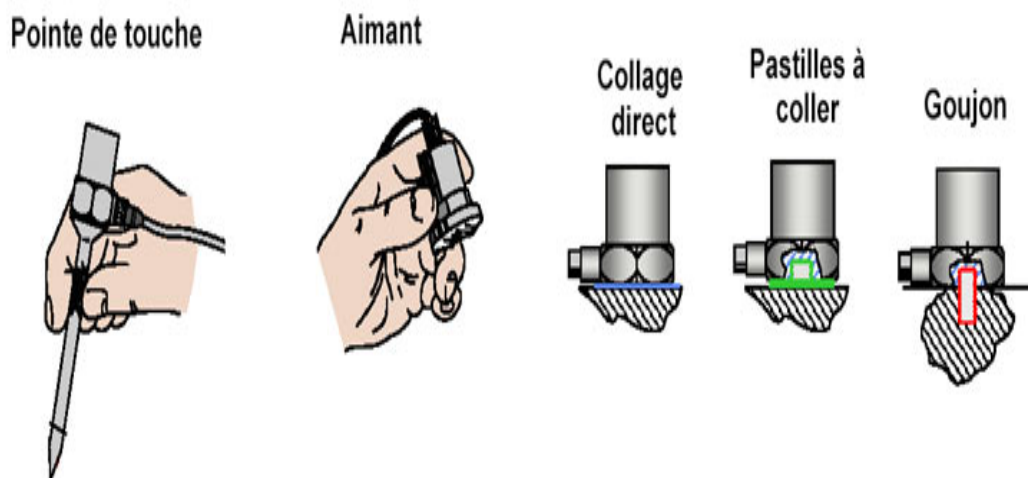


Figure 3.7 le capteur.



Augmentation de la gamme de

Figure 3.8 : différentes méthodes de fixation des capteurs.

Les signaux sortant des capteurs doivent être enregistrés et traité par un collecteur et un analyseur de vibrations. On distingue alors 2 types de surveillance :

La surveillance On Line et la surveillance Off line.

En « On Line », la machine est surveillée en permanence par un moniteur de vibrations.

3.2. Les principaux défauts :

Les pics observés sur les spectres ne sont pas tous des défauts. Sur les systèmes, il existe des l'origine du balourd, du désalignement, des moteurs imparfaits, des pics d'engrènement, etc.

3.2.1. Déséquilibre : défaut de « balourd » :

3.2.1.1. Equilibrage statique :

Imaginons un rotor parfaitement en équilibre. Ajoutons en un endroit de ce rotor une masse M . Le rotor présentera un déséquilibre. Même à l'arrêt, le rotor reviendra à une position d'équilibre. Il s'agit d'un déséquilibre statique.

Dès que le rotor sera en rotation, la masse M exercera une force radiale proportionnelle à la vitesse de rotation selon la relation $F=M.r.\omega^2$. [6]

On mesure l'amplitude de l'accélération du signal vibratoire au point P1 et P2.

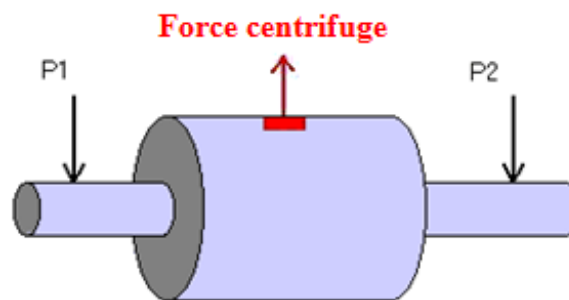


Figure 3.9 : balourd.

3.2.1.2. Equilibrage dynamique :

Reprenons l'exemple précédent en remplaçant la masse M par 2 masses identiques mais décalées de 180° et placées à chaque extrémité du rotor.

L'analyse temporelle des amplitudes du signal vibratoire montre que les signaux en P1 et P2 sont déphasés.

En effet, les deux paliers supportant le rotor vont subir des efforts centrifuges de façon alternée. Le déphasage est en théorie de 180° .

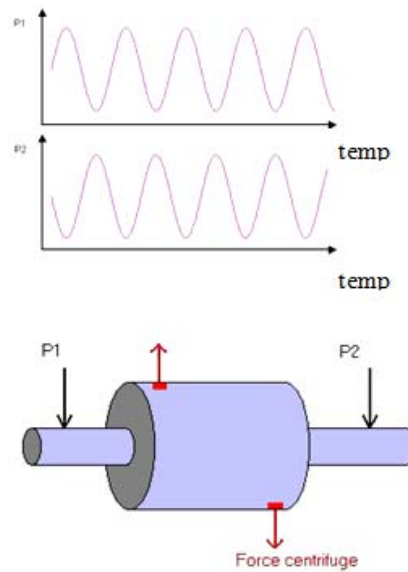


Figure 3.10 : Amplitudes du signal vibratoire de balourd.

3.2.1.3. Spectre d'un déséquilibre pur :

Un déséquilibre va donc induire une vibration dont la fréquence principale est celle de la vitesse de rotation du rotor.

Le spectre de ce signal va donc avoir une composante prépondérante à la fréquence de rotation du rotor.

Dans le cadre d'un spectre réel, le spectre aura une composante à la fréquence prépondérante ainsi que des « harmoniques » à 2 fois et 3 fois la fréquence de rotation :

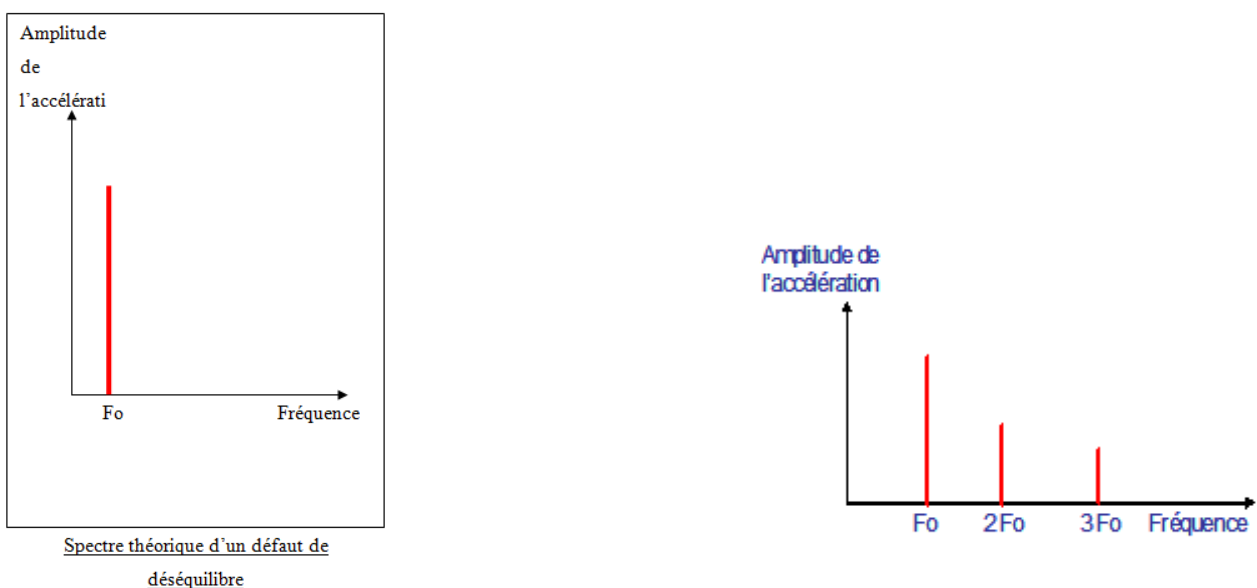
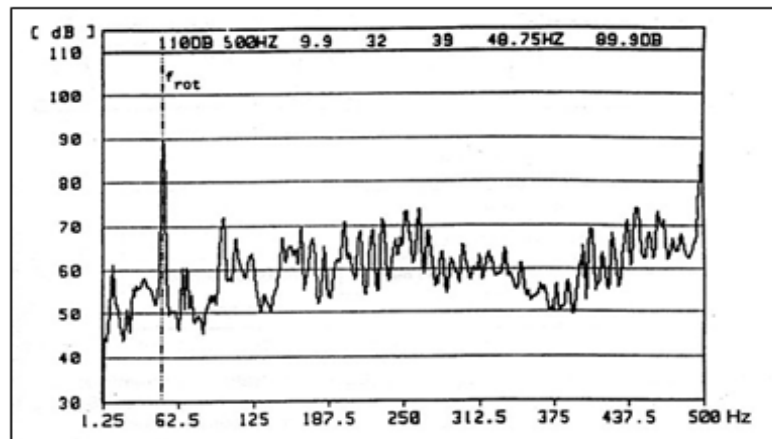


Figure 3.11 : spectre théorique d'un défaut de déséquilibre.

La figure ci-contre montre le spectre réel de l'amplitude de l'accélération (exprimée en dB) mesurée sur un ventilateur tournant à 2925 tr/min.

2925 tr/min correspond à $2925/60 = 48,75$ Hz

On observe sur le spectre un pic à la fréquence de 48,75 Hz traduisant donc la présence d'un balourd.



Spectre réel d'un ventilateur tournant à 2925 tr/min

Figure 3.12 : Spectre réel d'un ventilateur tournant à 2955tr/min.

3.2.2. Défaut d'alignement :

3.2.2.1. Origine du défaut :

- ❖ Un défaut d'alignement peut apparaître lorsqu'un arbre doit entraîner un autre arbre, souvent par l'intermédiaire d'un accouplement. Il y a 2 types de désalignements :
 - ❖ le décalage d'axe : les axes sont parallèles mais non concentriques ;
 - ❖ le désalignement angulaire : les axes ne sont pas parallèles.

Dans la réalité, les défauts d'alignement sont une combinaison du décalage d'axe et du désalignement angulaire.

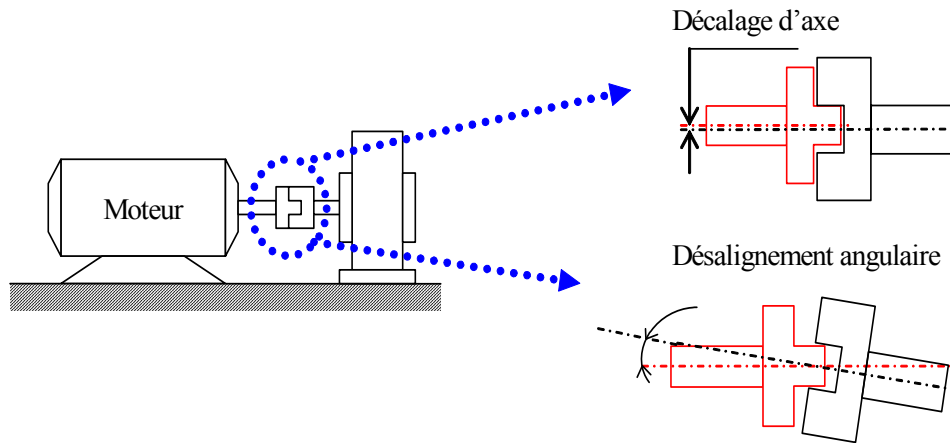


Figure 3.13: schéma du défaut d'alignement.

Un désalignement peut également être la conséquence :

D'un défaut de montage d'un palier

D'un mauvais calage des pattes de fixation

D'une déformation du châssis (par exemple à la suite de contraintes thermiques) qui se traduit par une flexion de l'arbre du rotor. Dans ce cas, les deux paliers ne sont pas concentriques.

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il crée des efforts importants qui vont entraîner la dégradation rapide du système d'accouplement et des paliers.

Dans la plupart des cas, on peut y remédier facilement par un lignage. Ce genre de prestation est réalisé à l'aide de matériels utilisant la technologie laser. Pour la plupart des applications, un lignage effectué par du personnel qualifié et expérimenté n'immobilise la machine que quelques heures.

3.2.2.2. Signature du défaut d'alignement :

Le signal temporel d'un défaut de d'alignement aura l'allure suivante :

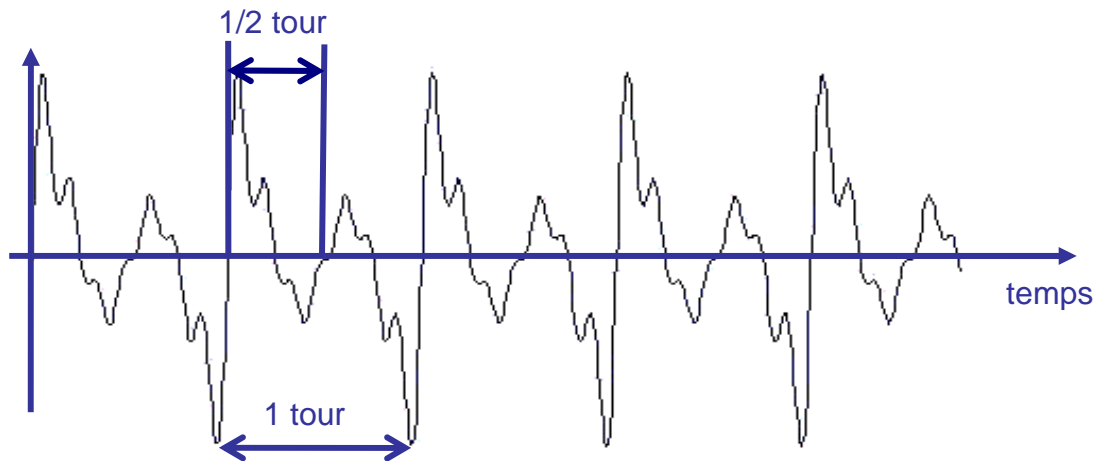


Figure 3.14 : schéma Le signal temporel d'un défaut de d'alignement

On retrouve un phénomène périodique à la fréquence de rotation (période = temps pour faire 1 tour) mais également des phénomènes se répétant chaque $\frac{1}{2}$ tours et $\frac{1}{3}$ tour.

Cela se traduira le plus souvent par la présence de composantes d'ordre 2, 3 ou même 4 de la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles de la composante d'ordre 1. Les composantes multiples d'une fréquence dans un spectre sont appelées les harmoniques de cette fréquence.

Un défaut d'alignement est donc révélé par un pic d'amplitude prépondérant à généralement 2 fois la fréquence de rotation (parfois 3 ou 4 fois).

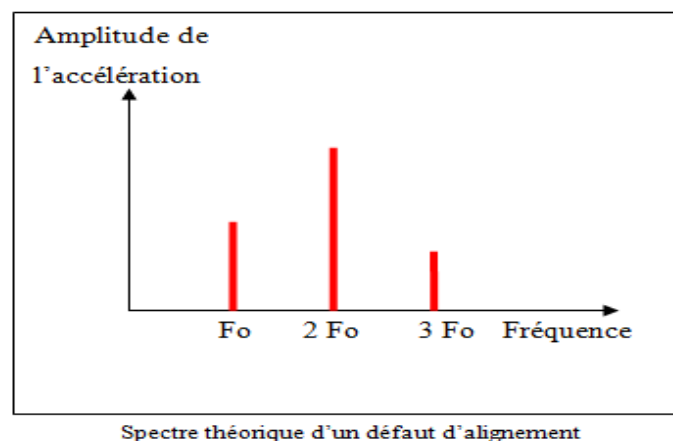


Figure 3.15 : Spectre théorique d'un défaut d'alignement.

3.2.3. Défaut de desserrage et de jeu :

Par desserrage, on entend par exemple un manque de rigidité de montage sur une structure. Cela peut être du effectivement à un desserrage des vis de fixation de la structure mais également à une fissuration d'ancrage ou de bâti.

Des défauts comme le balourd vont entraîner le bâti à se désolidariser de la structure. Cela entraîne un signal temporel écrêté.

Défaut de desserrage et de jeu :

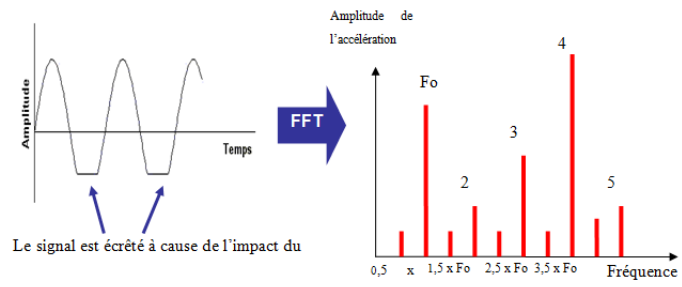
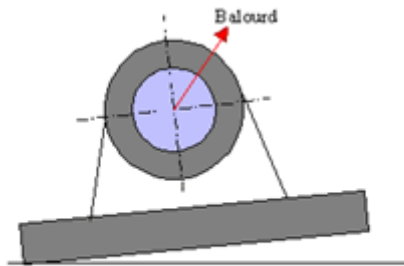


Fig3.16 désolidarisation de la structure par balourd.

Fig3.17: signal temporel et spectrale.

Le spectre fait apparaître des harmoniques de la fréquence de rotation, comme les autres défauts, mais également des sous-harmoniques à $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ de la fréquence de rotation.

Le phénomène de jeu va avoir pratiquement la même signature vibratoire. Le jeu se retrouve en général dans le roulement. Il peut s'agir de jeu entre la bague extérieure et le palier, entre la bague intérieure et l'arbre ou un jeu excessif entre les billes/galets et les cages interne et externe. Pour les paliers lisses, le jeu signifie un espace trop important entre l'arbre et le palier.

La figure ci-dessous montre la différence entre un spectre de la vitesse vibratoire d'un jeu de fondation (desserrage) et d'un jeu dans les roulements.

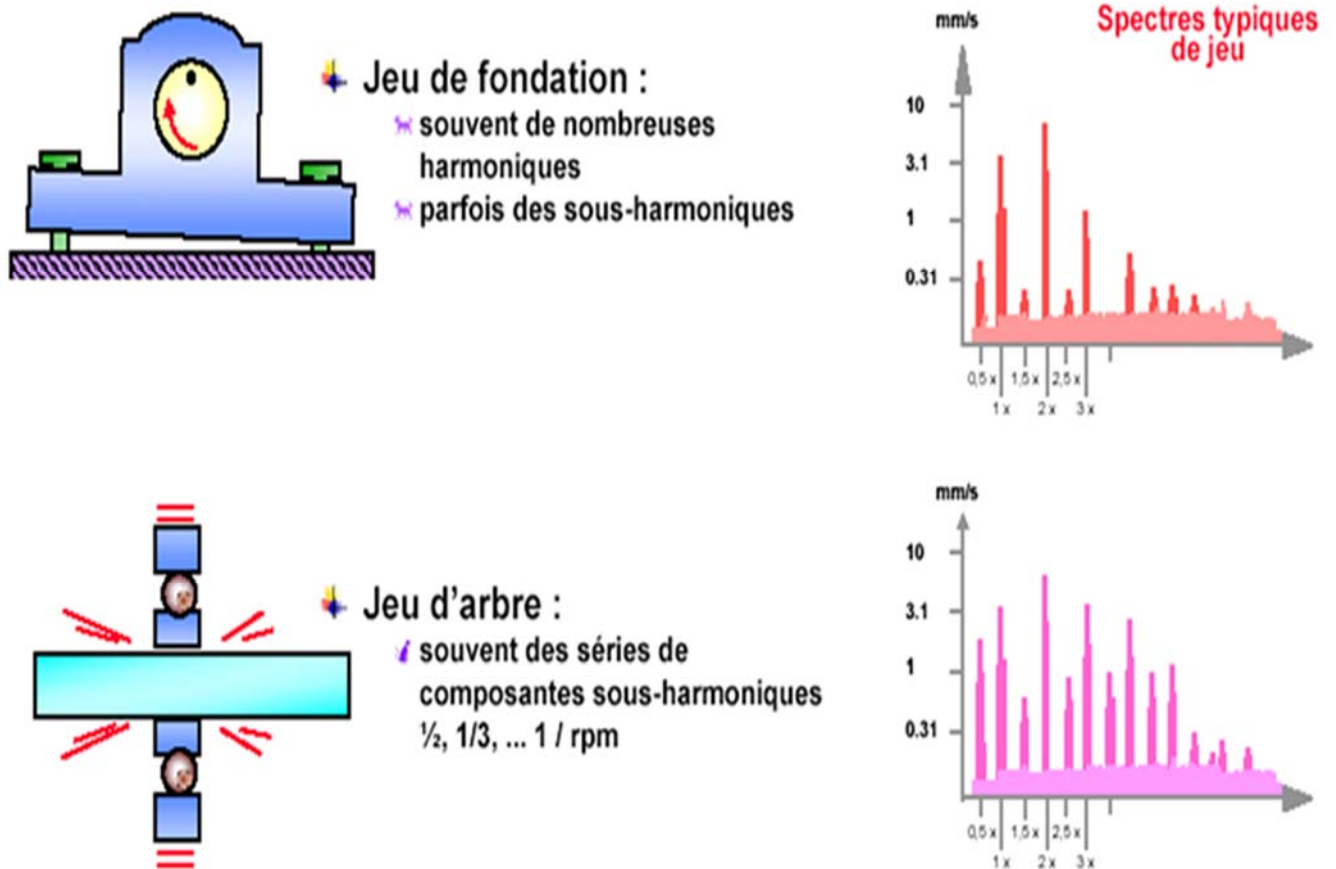


Figure 3.18 : schéma montrant la différence entre un spectre de la vitesse vibratoire d'un jeu de Fondation (desserrage) et d'un jeu dans les roulements.

3.2.4. Défauts de transmission par courroies :

C'est un défaut peu évident à localiser et seule l'expérience acquise permet une bonne analyse de ce type de défauts.

Le principal défaut rencontré dans ce type de transmission est lié à une détérioration localisée de la courroie (partie arrachée, défaut de jointure,...) impliquant un effort ou un choc particulier à la fréquence de passage de ce défaut (F_c).

Le calcul de F_c ci-dessous n'inclue pas d'éventuels glissements.

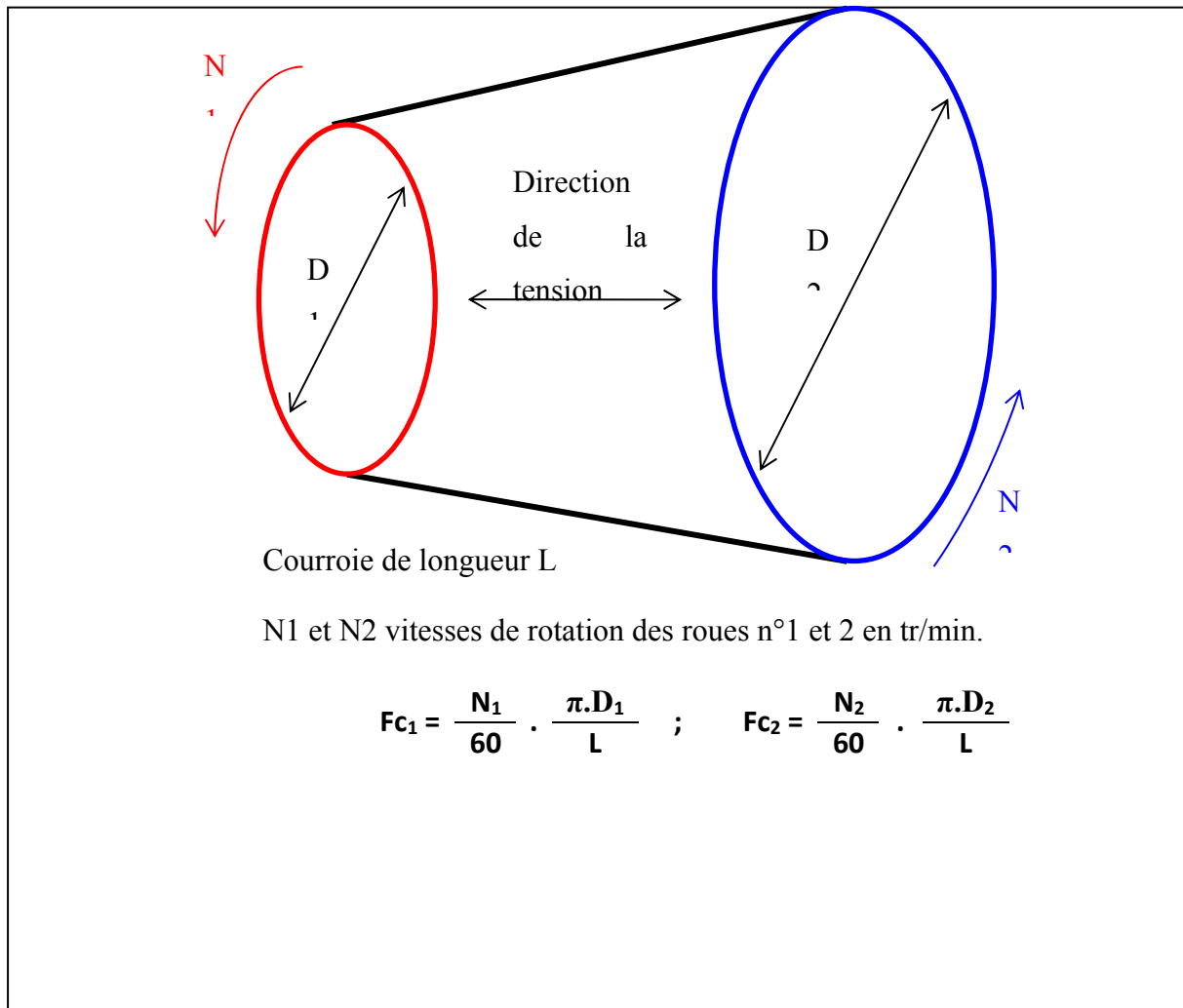


Figure 3.19 : roues courroies.

L'image vibratoire donne un pic d'amplitude importante à la fréquence de passage des courroies, ou de ses harmoniques.

3.2.5. Défauts de denture d'engrenages :

3.2.5.1. Généralités :

Un engrenage est composé de deux roues dentées possédant un certain nombre de dents (noté Z) tournant à des vitesses différentes.

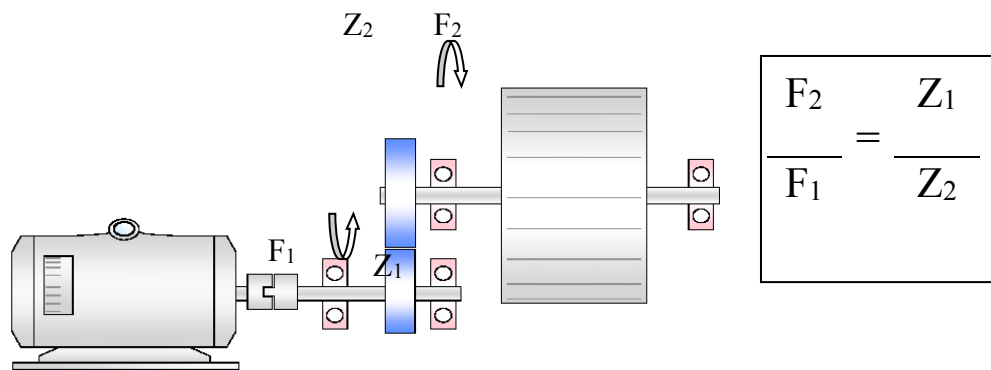


Figure 3.20 : Denture d'engrenages.

Un réducteur ou un multiplicateur peut être composé de plusieurs engrenages. L'engrènement se fait au rythme d'engagement des dents selon une fréquence d'engrènement F_e égale à la fréquence de rotation multipliée par le nombre de dents :

$$F_e = Z \times F_{rot}$$

Ici, l'arbre n°1 tourne à la fréquence de rotation F_1 . Donc

$$F_{e1} = Z_1 \times F_1.$$

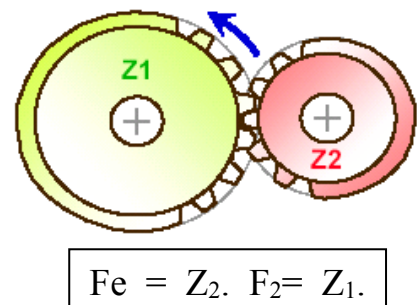
L'arbre n°2 tourne à la fréquence de rotation F_2 . Donc

$$F_{e2} = Z_2 \times F_2.$$

Or F_2 et F_1 sont lié par le nombre de dent. Donc :

$$F_{e_2} = Z_2 \cdot \frac{Z_1 \cdot F_1}{Z_2} = Z_1 \cdot F_1 = F_{e_1} \quad [6]$$

$F_{e2} = F_{e1}$. Il n'y a qu'une seule fréquence d'engrènement pour un engrenage.



3.2.5.2. Signature d'un engrenage :

Si la denture est correcte et si aucun phénomène parasite ne vient perturber l'engrènement, le spectre vibratoire est constitué de composantes dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement F_e et ses harmoniques.

Les défauts pouvant apparaître dans les engrenages sont de 2 sortes :

- ❖ Détérioration d'une dent.
- ❖ Excentricité d'un pignon.

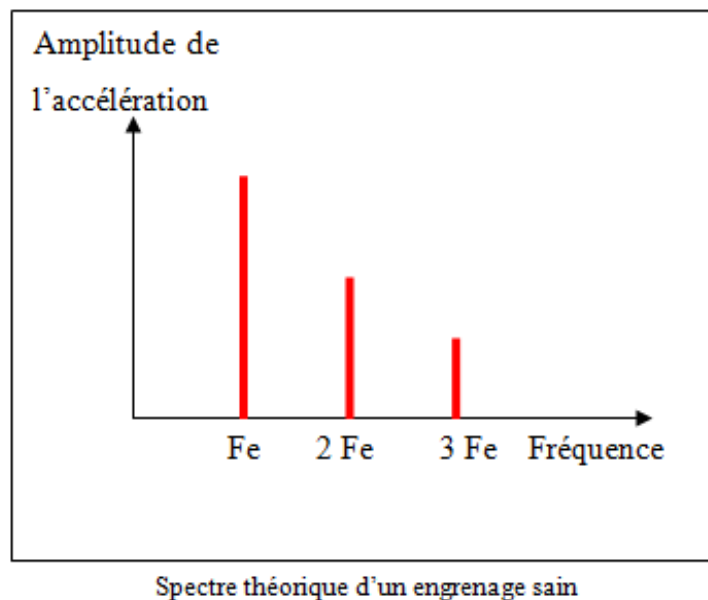


Figure 3.21 : Spectre théorique d'un engrenage sain.

3.2.5.3. Défaut d'excentricité :

Si l'arbre ou le pignon présente un défaut d'excentricité, ou de faux rond, il va apparaître une modulation d'amplitude du signal par la fréquence de rotation due à la modulation de l'effort d'engrènement.

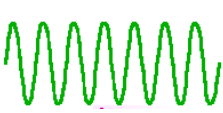
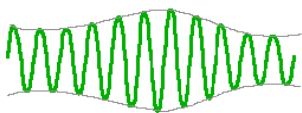
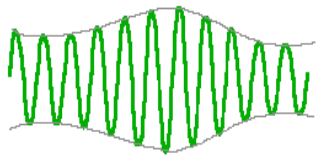
		
Signal d'un engrenage sain	Signal d'un engrenage traduisant une modulation en amplitude.	Augmentation de la modulation d'amplitude qui traduit une évolution du défaut d'excentricité.

Figure 3.22 : schémas des signaux d'un défaut d'excentricité.

L'image vibratoire théorique de ce type de défaut présente autour de la fréquence d'engrènement ou de ses harmoniques, des raies latérales dont le « pas » correspond à la fréquence de rotation de l'arbre qui porte le défaut.

C'est ce qu'on appelle des bandes latérales de modulation d'amplitude. Les amplitudes des bandes latérales sont généralement très faibles devant l'amplitude de la fréquence d'engrènement.

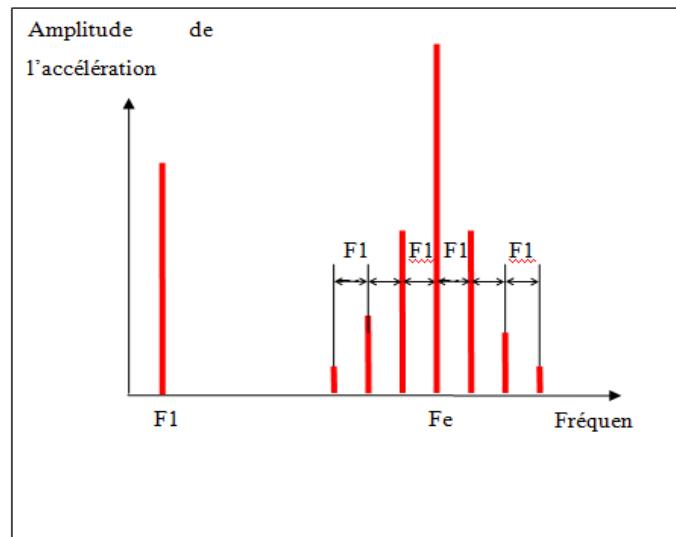


Figure 3.23 : Spectre théorique d'un engrenage présentant un défaut d'excentricité.

Le spectre ci-dessous a été mesuré sur un engrenage au niveau d'un pignon tournant à 1500 tr/min et comportant 33 dents.

Le spectre ci-dessous a été mesuré sur un engrenage au niveau d'un pignon tournant à 1500 tr/min et comportant 33 dents.

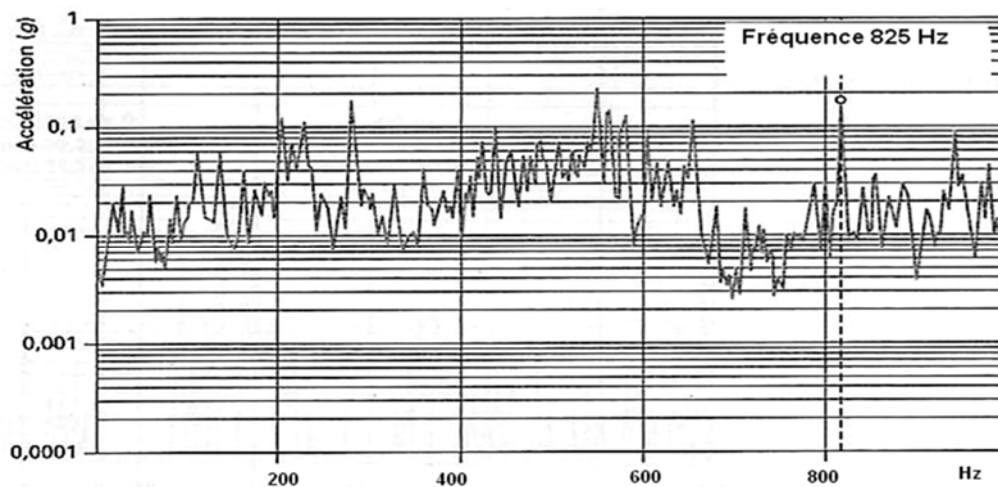


Figure 3.24: Spectre d'un engrenage.

Retrouve un pic à la fréquence d'engrènement de $25\text{Hz} \times 33 = 825\text{ Hz}$. Pour distinguer les bandes latérales, il faut faire un zoom du spectre précédent autour de la fréquence d'engrènement.

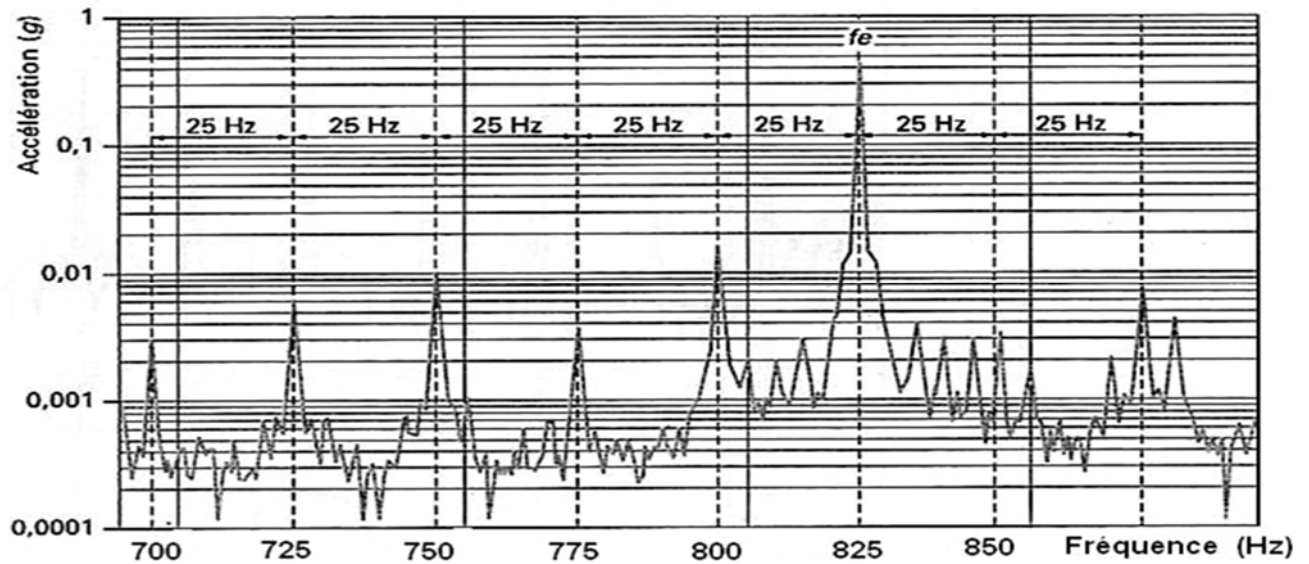


Figure 3.25 : Spectre d'un engrènement de 825 Hz.

On aperçoit ici les bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement traduisant un défaut engendrant une modulation d'amplitude.

3.2.5.4. Gravité des défauts :

La difficulté, concernant les engrènements, est de juger de la gravité des défauts. En effet, même sur une machine en bon état, on obtient ce type d'images.

Seule l'augmentation des amplitudes des raies décrites ci-dessus permet de diagnostiquer une dégradation de l'engrènement.

On peut néanmoins retenir 2 règles toujours vérifiées :

Si les amplitudes du peigne de raies ne dépassent pas celle de la fréquence d'engrènement, l'engrènement peut être considéré comme en bon état ;

Un zoom présentant une image dissymétrique des modulations autour de la fréquence d'engrènement est caractéristique d'un engrènement dégradé.

3.2.5.5. Défauts électriques :

Pour bien des machines électriques, les fréquences significatives d'une anomalie électromagnétique seront des multiples de la fréquence du courant d'alimentation F_a .

Pour ce type de moteur, la plupart des défauts se traduiront par un pic important à 2 fois la fréquence du courant d'alimentation ($2 \times 50 = 100\text{Hz}$).

Afin de bien l'identifier, il est parfois nécessaire de faire un zoom sur cette fréquence pour la différencier d'une harmonique de la fréquence de rotation (1500tr/min correspond à 25Hz ; la 4^{ème} harmonique est alors égale à 100Hz).

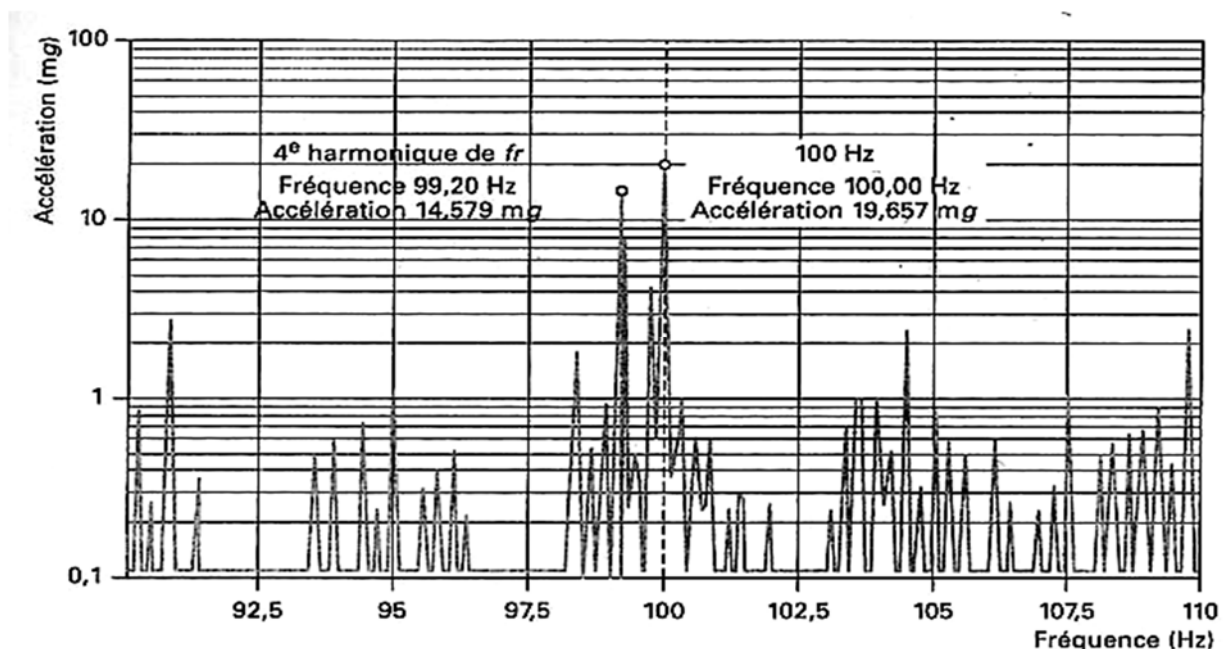


Figure 3.26 : Spectre d'un engrenage de 100Hz.

Sur le spectre ci-dessus, le rotor a une fréquence de 24,8 Hz. La 4^{ème} harmonique est donc à $4 \times 24,8 = 99,20$ Hz. Il faut donc faire un zoom pour la différencier du pic à 100Hz traduisant un défaut d'origine électromagnétique.

L'apparition d'un pic à 100Hz déclenchera alors une étude plus approfondie des fréquences caractéristiques du moteur afin de diagnostiquer l'origine du défaut. Cette étude ne sera pas développée dans ce cours. Il est à noter que le pic à $2F_a$ existe tout le temps.

3.2.6. Circuits hydrauliques/ ventilateurs :

3.2.6.1. Passages d'aubes :

Le passage des aubes devant le bec de la volute d'une pompe ou le passage des pales d'un ventilateur provoque un pic à la fréquence « f aubes » : $f_{\text{aubes}} = n \cdot Fr$.

Ce défaut n'est pas directionnel, il se repère aussi bien en radial qu'en axial.

L'origine peut être :

- ❖ Mécanique : mauvais calage axial de l'impulser ou jeu de bec de volute insuffisant ;
- ❖ Hydraulique : débit trop bas ;
- ❖ Encrassement des aubes ou des pales qui peut aussi provoquer du balourd.

3.2.6.2. Cavitation :

Dans les circuits hydrauliques contenant des machines (pompes, turbines hydrauliques, ...) on cherche à éviter le phénomène de cavitation qui se manifeste par l'apparition de bulles de vapeur dans l'écoulement du liquide.

Celles-ci, lorsqu'elles se retrouvent sur les rotors des pompes ou sur les aubages des turbines, peuvent imploser entraînant alors l'érosion des pièces en métal. Les dégâts créés peuvent être assez importants, voire dangereux.

Le phénomène de cavitation se traduit par une augmentation générale du bruit de fond. Il n'y a pas de raie caractéristique. Toutes les fréquences sont excitées de manière aléatoire

3.2.7. Défauts spécifiques aux roulements :

3.2.7.1. Durée de vie des roulements :

La durée de vie théorique des roulements est donnée par la formule suivante :

$$L_{10} = (C / P)^p$$

L_{10} = durée de vie en 10^6 tours
 C: charge nominale (donnée constructeur)
 P: charge dynamique appliquée au roulement
 $p = 3$ pour les roulements à billes, 3.33 pour les roulements à rouleaux. [6]

La durée de vie d'un roulement sera fortement réduite en fonction des efforts dynamiques auxquels il sera soumis. C'est pour cette raison qu'il est important de corriger les problèmes tels

que le délignage, le balourd, le serrage, etc. qui conduisent à une augmentation très forte des efforts dynamiques.

3.2.7.2. Processus de dégradation d'un roulement :

Lorsqu'un roulement tourne, les contacts métalliques entre les éléments roulants et les cages émettent des bruits de fond aléatoires.

Ce bruit de fond créé un spectre plat.

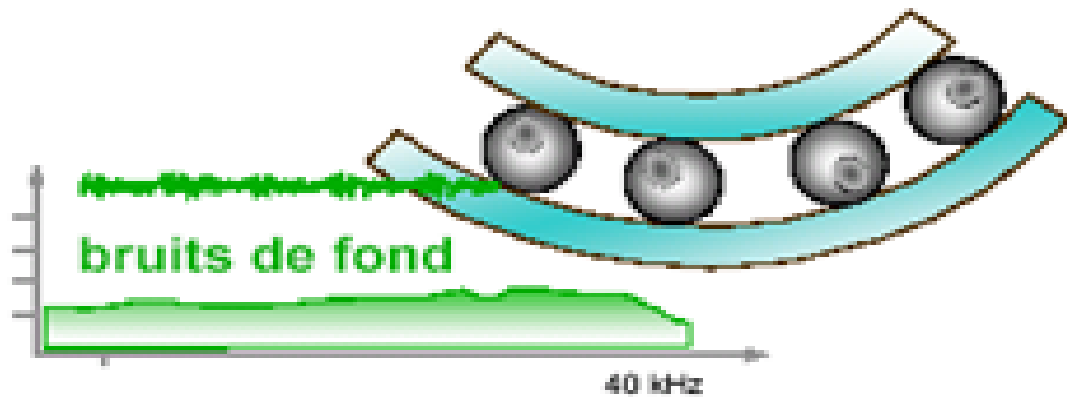


Figure 3.27 : schéma bruits de fond d'un roulement.

La plupart des usures de roulements débutent par une fêlure qui se transforme en craquelure. La craquelure va produire des impacts énergétiques en haute fréquence.

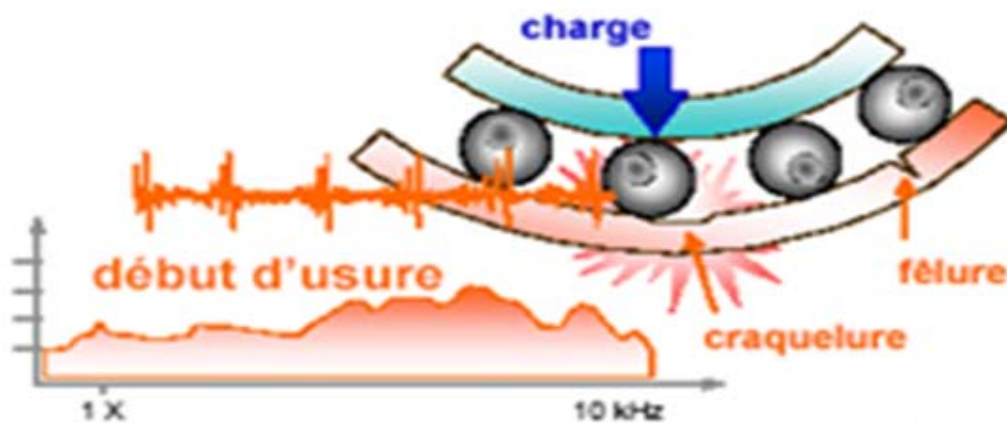


Figure 3.28 : schéma du début d'usure d'un roulement.

Au fur et à mesure que l'usure progresse:

- ❖ Les défauts tendent à se lisser
- ❖ Il y a moins d'impacts;
- ❖ Le bruit de fond de la bonne piste devient modulé;

Dès que le défaut est significatif, les billes vont éroder la cage interne en sautant.

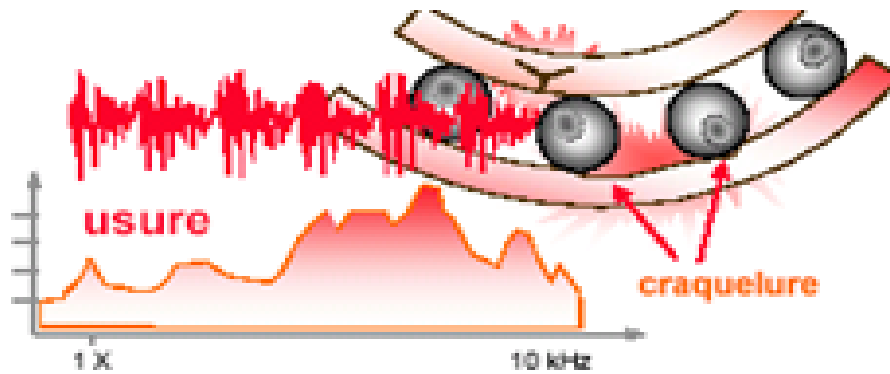
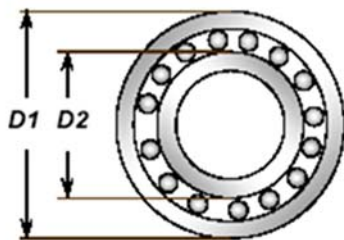


Figure 3.29 : schéma du début d'endommagement d'un roulement.

3.2.7.3. Fréquences caractéristiques :

Pour chaque type de roulement, et en fonction de ses cotes de fabrication, on peut considérer 4 fréquences caractéristiques.



$$DR = \frac{D1 + D2}{2}$$

n = nombre de billes ou de rouleaux
 f_r = fréquence de rotation
 vitesse relative en tr/s entre les
 pistes intérieures et extérieures.

[6]

Fréquences des impacts : f (Hz)

$$\text{Défaut piste externe} = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{DB}{DR} \cos \beta \right)$$

BPFO

$$\text{Défaut piste interne} = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{DB}{DR} \cos \beta \right)$$

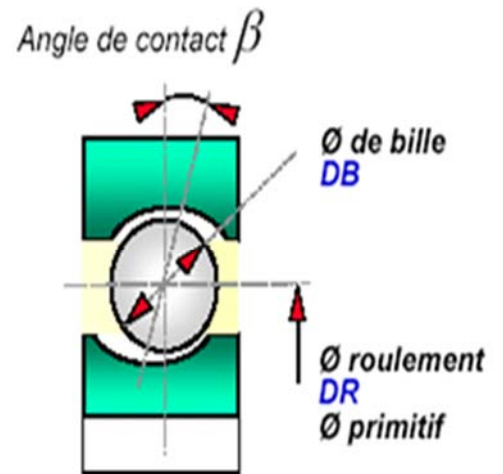
BPFI

$$\text{Défaut bille} = f_r \frac{DR}{DB} \left[1 - \left(\frac{DB}{DR} \cos \beta \right)^2 \right]$$

BSF

$$\text{Défaut cage} = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{DB}{DR} \cos \beta \right)$$

FTF



BPFO = Ball Pas Fréquence Outre Race = fréquence de passage d'une bille sur un défaut de piste externe.

BPFI = Ball Pas Fréquence Inné Race = fréquence de passage d'une bille sur un défaut de piste interne.

FTF = Fondamental 1 train Fréquence = fréquence de passage d'un défaut de cage.

BSF = Ball Spin fréquence = fréquence de passage d'un défaut de bille sur la bague interne ou externe.

Remarque :

FTF dépend du montage des roulements. Si la bague externe est fixe et que la bague interne tourne, la formule de FTF est celle vue précédemment.

Si la bague interne est fixe et la bague externe tourne, la fréquence de rotation de la cage est :

$$FTF = 0,5 \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{DB}{DR} \cdot \cos \beta \right) \quad [6]$$

3.2.7.4. Modulation d'amplitude de BPFI :

Principalement pour les défauts de bagues internes et externes, les vibrations du défaut sont modulées par les efforts appliqués au système, notamment par leur direction.

Nous n'étudierons que le cas de la bague interne montée serrée donc solidaire de l'arbre.

Considérons le cas d'une charge dont la direction est constante. Le défaut sur la bague interne tourne à la vitesse de rotation. La charge appliquée sur le roulement reste toujours dans la même direction.

Ceci provoque une augmentation de l'amplitude de la force agissant sur le défaut de la bague interne et de la vibration lorsque le défaut passe dans la zone la plus chargée.

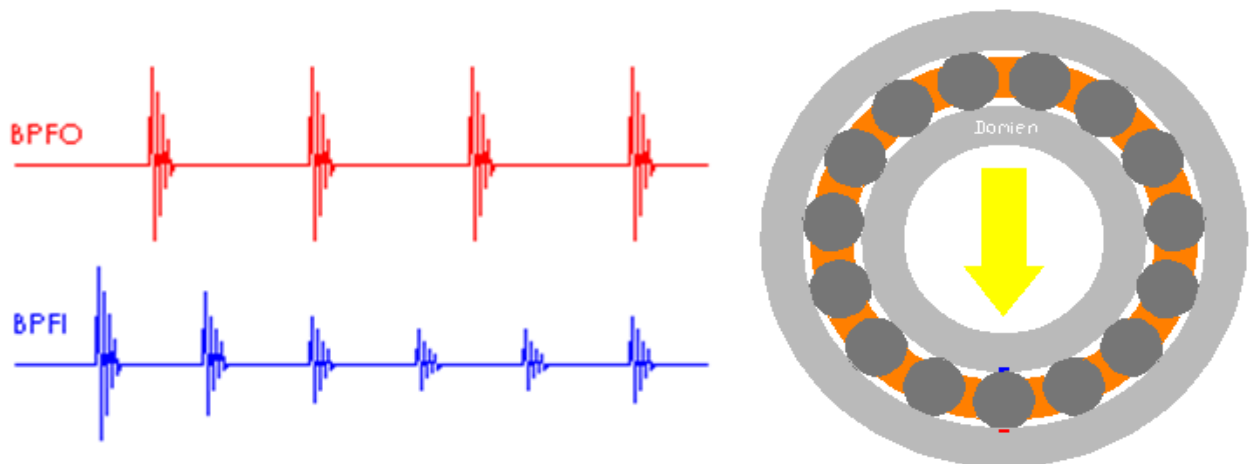


Figure 3.30 : Modulation d'amplitude de BPFI.

3.2.7.5. Modulation de BPFO :

Considérons maintenant le cas où la direction de la charge tourne avec la bague intérieure.

Le défaut sur la bague externe est fixe. Le balourd tourne à la vitesse de rotation. Ceci provoque une augmentation de l'amplitude de la force agissant sur le défaut et de la vibration lorsque le défaut passe dans la zone la plus chargée.

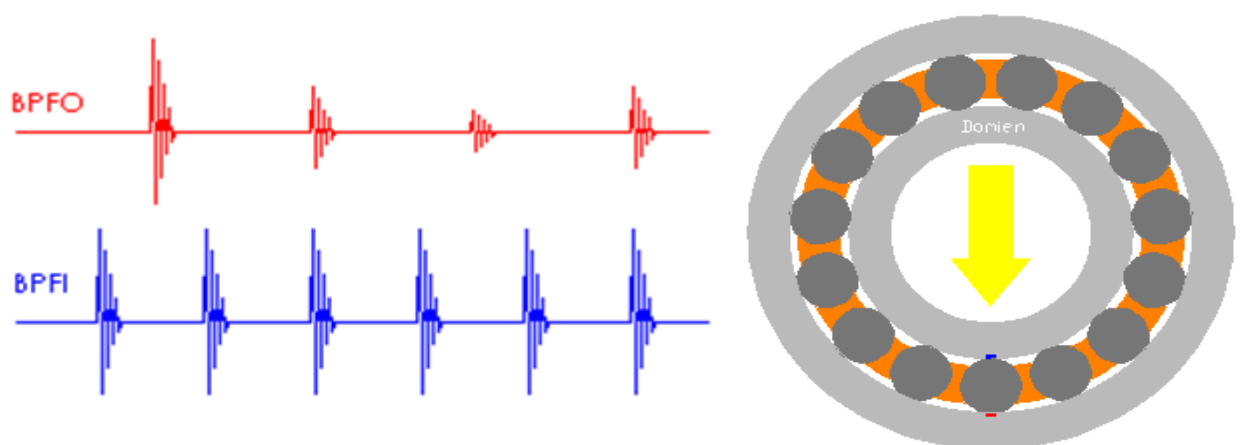


Figure 3.31 : Modulation de BPFO.

3.2.7.6. Signatures vibratoires des défauts d'écaillage :

Les défauts de type écaillages vont être modulés en amplitude par la vitesse de rotation.

Cela se traduira sur le spectre par un pic à la fréquence du défaut ($D_{\text{défaut}} = \text{BPFI}$ ou BPFO ou FTF ou BSF) et des bandes latérales à la fréquence de rotation de l'arbre.

De plus, les défauts d'écaillage se traduisent par des chocs. Le spectre va donc faire apparaître un peigne de raie à la fréquence du défaut ($D_{\text{défaut}} = \text{BPFI}$ ou BPFO ou FTF ou BSF).

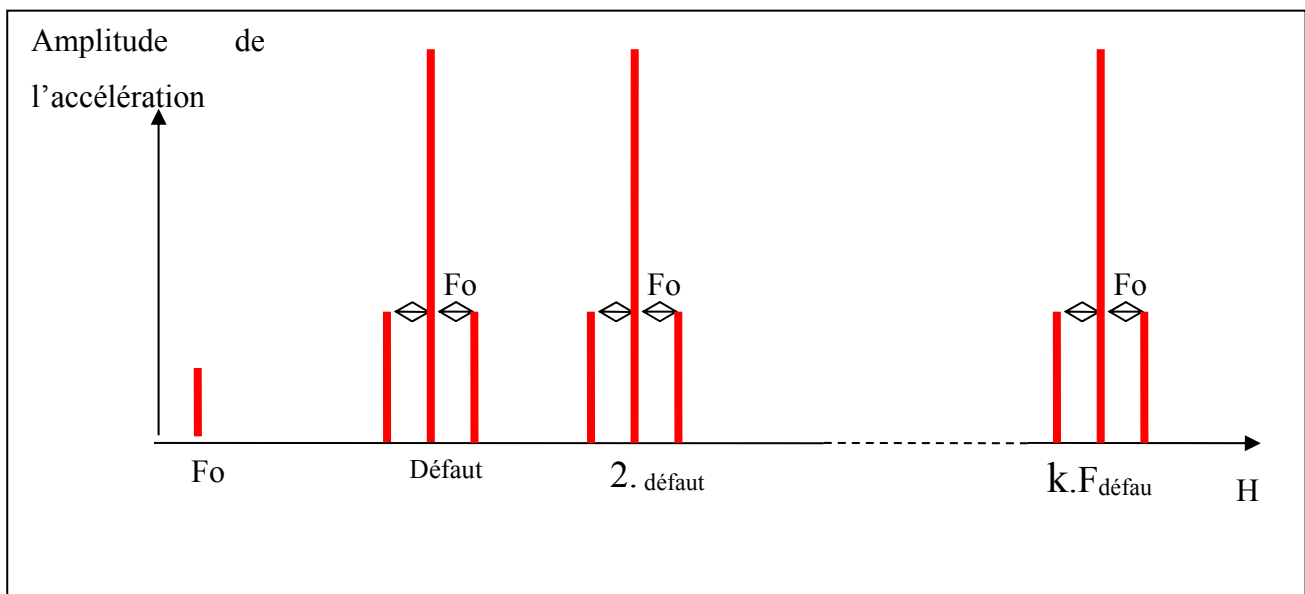


Figure 3.32: Spectre théorique d'un défaut d'écaillage d'un roulement.

Le spectre de la figure ci-contre est pris sur un roulement dont la fréquence de bague externe est de 138,80 Hz.

On observe bien sur ce spectre un peigne de raies à la fréquence du défaut (1, 2, 3, 4, ...) traduisant les chocs périodiques.

Le spectre est extrêmement étendu et présente un peigne de raies dont l'amplitude est faible.

De ce fait, le peigne de raie est souvent noyé dans le bruit de fond, donc non identifiable par une analyse spectrale classique.

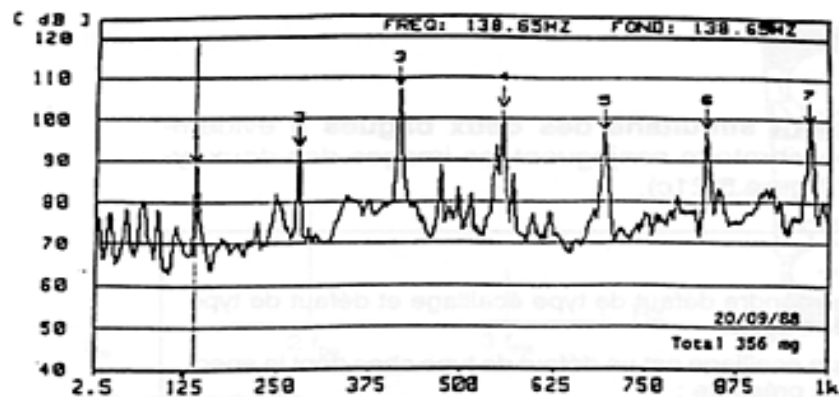


Figure 3.33 : Spectre de bague externe.

Le spectre de la figure suivante est pris sur un roulement dont la fréquence de bague intérieure est égale à 148,5 Hz.

On observe bien un pic à cette fréquence mais il est noyé dans le bruit de fond.

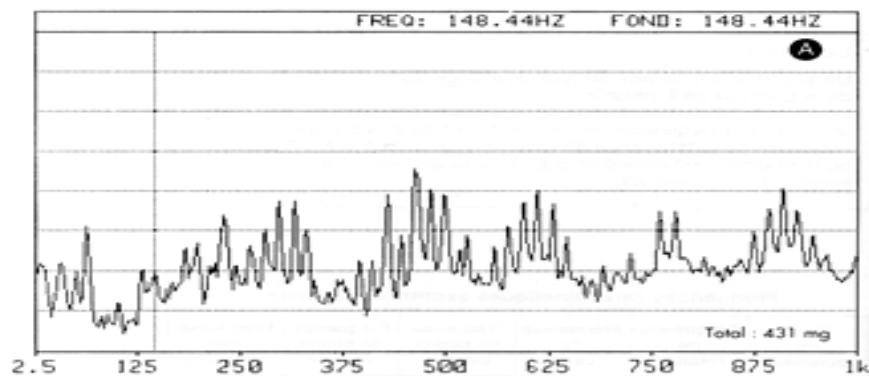


Figure 3.34 : Spectre de bague intérieure.

Des outils plus performants que la simple analyse spectrale peuvent être utilisés pour établir un diagnostic et faire ressortir du spectre les fréquences qui nous intéressent.

3.2.7.7. Rupture de cage :

Lorsque la cage d'un roulement casse, les billes ne sont plus maintenues à une distance égale les unes des autres et elles vont se regrouper.

Cela entraîne une excentricité de l'arbre et un balourd tournant à la vitesse de rotation de la cage.

Ce type de défaut apparaît donc sur le spectre par une raie unique à la fréquence de la cage FTF.

En général, FTF est égale à $0,4 \times$ la vitesse de rotation. [6]

En réalité, une rupture de cage est très difficilement détectable car un roulement dont la cage est rompue se détériore très rapidement.

3.2.7.8. Défaut de billes :

Un défaut de billes génère une image typique dans le spectre.

Il y aura plusieurs groupes de pics qui apparaissent composés d'un pic central et de modulations autour de ce pic central.

Dans la grande majorité des cas, ce pic central correspond au défaut de billes et la modulation correspond au défaut de cage.

La fréquence à laquelle les billes tournent autour de leur propre axe dans la cage est BSF.

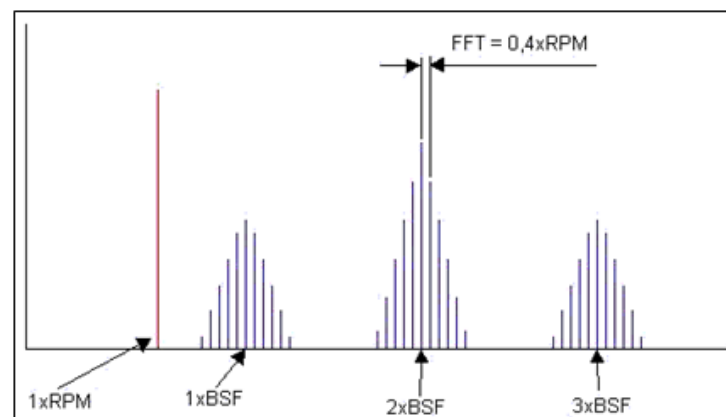


Figure 3.35 : Spectre théorique d'un défaut de bille d'un roulement.

Chapitre IV

Application de la méthode d'enveloppe pour le diagnostic des défauts de roulements

Chapitre IV

Application de la méthode d'enveloppe pour le diagnostic des défauts de roulements

4.1. INTRODUCTION :

Le diagnostic de défauts est une tâche extrêmement importante dans la surveillance. Il fournit aux opérateurs l'information sur le processus. Le diagnostic précoce peut aider à éviter une progression anormale des événements et à réduire la perte de productivité. Différentes techniques de surveillance ont été développés, tels que la dynamique, les vibrations, la tribologie et la non-destruction les techniques.

L'analyse du signal de vibration est l'une des plus importantes méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts des machines tournantes, car le signal vibratoire porte des informations dynamiques sur les systèmes. Les vibrations causées par les roulements défectueux représentent la grande majorité des problèmes des machines. Chaque élément tel que la bague intérieure ou la bague extérieure a une fréquence de rotation caractéristique. Avec un défaut sur un élément particulier, une augmentation du niveau de vibration à cette fréquence peut se produire. La surveillance de ces éléments a une priorité importante pour le bon fonctionnement de la machine.

L'analyse des signaux de vibration dépend de l'efficacité de la technique de traitement. Plusieurs techniques ont été utilisées telles que: l'analyse temporelle et l'analyse fréquentielle, malheureusement, ces techniques ne sont pas capable de révéler les informations inhérentes du signal due à la non stationnarité. Pour résoudre ce problème, l'analyse d'enveloppe, a été proposé. L'analyse d'enveloppe est efficace et bien adaptée aux signaux induisant des chocs périodiques ou modulation en amplitude [7], [8], [9].

4.2. CONFIGURATION EXPÉRIMENTALE ET ACQUISITION DE DONNÉES :

Les mesures expérimentales présentées dans ce travail sont entièrement basé sur les données de vibration obtenues à partir de la base de données de l'université de Western Reserve [10]. Comme il montre la figure 1, le système est composé d'un moteur asynchrone connecté à un dynamomètre et un capteur de couple, par un couplage auto-aligné. Les données ont été recueillies à partir d'un

accéléromètre monté sur l'extrémité de l'entraînement du moteur. Le roulement utilisé dans ce travail est de type SKF. Les données ont été obtenues dans les quatre modes suivants :

- 1- Etat normal;
- 2- Défaut de bague intérieure;
- 3- Défaut de bague extérieure
- 4- Défaut de bille.

Les données sont échantillonnées à une fréquence de 12 kHz et la durée de chaque signal de vibration est de 10 secondes. Les défauts ont été introduits sur le roulement à l'aide d'une méthode d'usinage électro-décharge. Les diamètres de défauts réalisés sont : 0,018, 0,036 et 0,053 mm. Les vitesses du moteur pendant les tests expérimentaux sont de 1720 à 1797 tr / min. Chaque mesure est réalisée sous les quatre charges différentes: puissance 0, 1, 2 et 3 HP.

Afin d'évaluer la méthode de l'enveloppe, les données mesuré sous 0 HP et une vitesse de rotation de 1797 tr / min (30 Hz) comprenant un défaut de 0,053 mm sur les bagues intérieure et extérieure, ont été utilisés. Les données originales ont été divisées en segments de 4096 points (voir, figures 4.2 et 4.3).

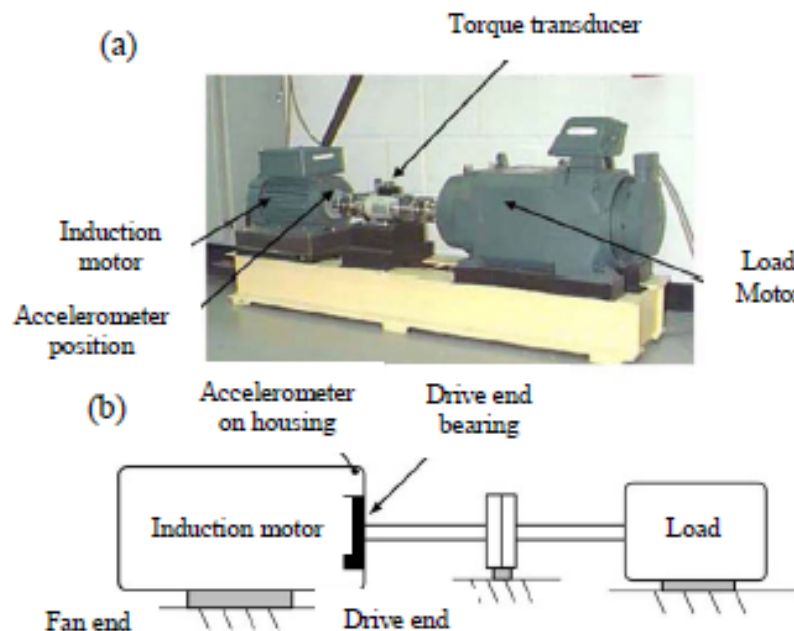


Figure4.1 : a) Banc d'essais et b) son schéma synoptique.

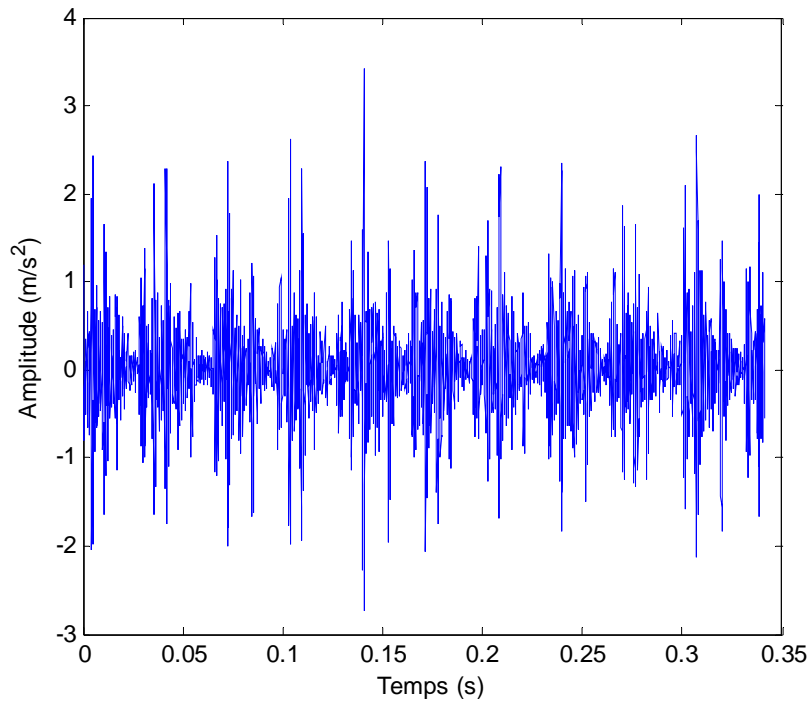


Figure4.2 : Signal temporel du défaut de bague intérieure.

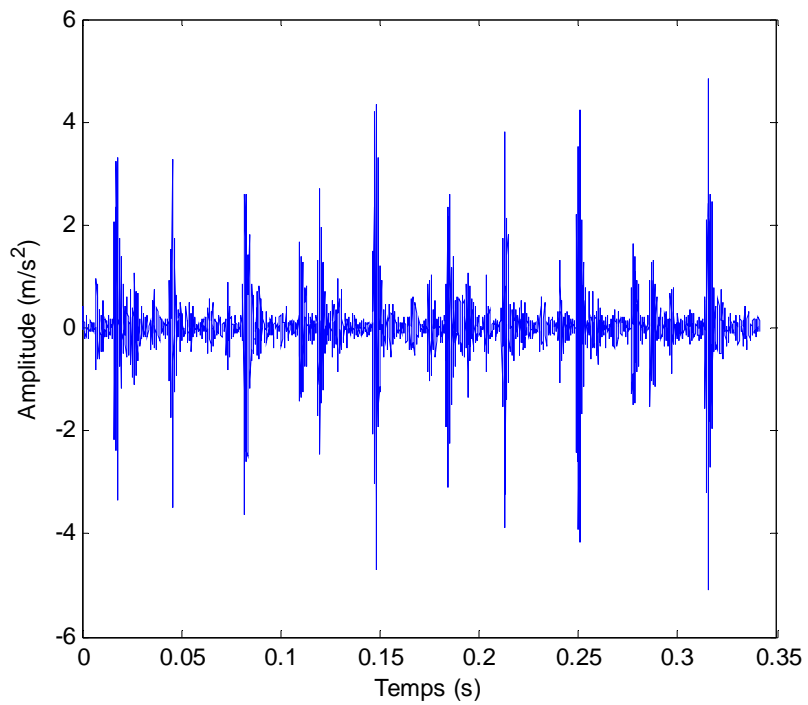


Figure4.3 : Signal temporel du défaut de bague extérieure.

4.3. Analyse spectrale :

Les fréquences caractéristiques des roulements sont proportionnelles à la fréquence de rotation. L'analyse spectrale permet d'identifier les différentes fréquences du signal original $s(t)$. Pour obtenir le spectre $S(w)$ de $s(t)$, nous appliquons la transformée de Fourier (FT):

$$S(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-iwt} dt \quad [10]$$

Où, w est la fréquence.

Le spectre des défauts des bagues intérieure et extérieure est représenté sur les Figures 4.4 et 4.5. La composante dominante sur ces spectres est la fréquence de résonance (2880Hz). Évidemment, c'est difficile d'extraire l'information utile sur les défauts, c'est-à-dire, les fréquences caractéristiques des défauts ne sont pas claires sur les spectres.

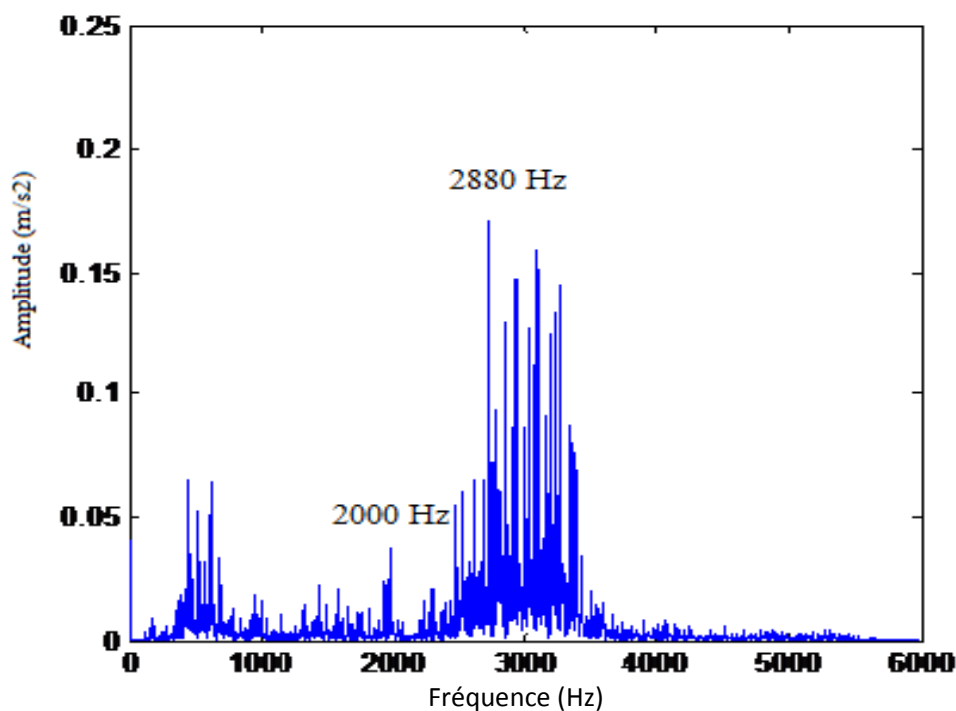


Figure4.4 : Spectre du défaut de bague intérieure.

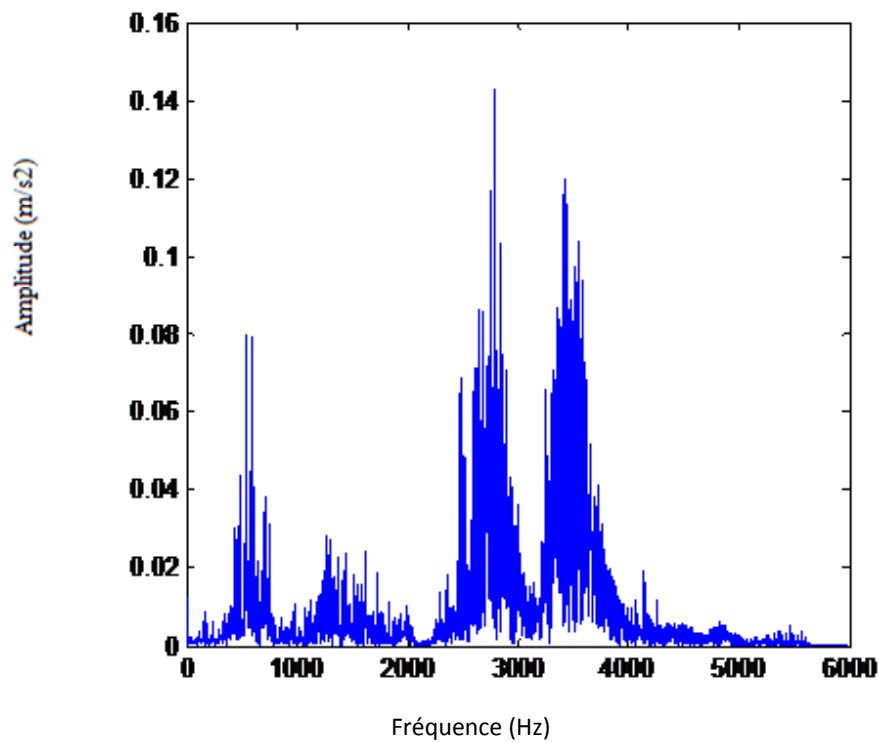


Figure 4.5 : Spectre du défaut de bague extérieure.

L'identification des défauts de roulement par l'analyse spectrale est difficile, en raison de la non-stationnarité. Afin de réaliser un diagnostic correct, il est utile de pousser les investigations vers des techniques plus appropriées.

4.4. Analyse d'enveloppe :

L'analyse d'enveloppe est particulièrement bien adaptée au diagnostic des défauts générant des chocs périodiques ou des modulations en amplitude tels que les engrenages et les roulements. Elle consiste à filtrer le signal de vibration par un filtre passe-bande. Le signal résultant est ensuite traité par la transformée de Hilbert (HT) afin d'obtenir l'enveloppe et son spectre [11]. Pour un signal donné $s(t)$, le HT dans le domaine temporel est défini comme :

$$\tilde{s}(t) = \frac{1}{\pi} \int \left(\frac{s(\tau)}{t-\tau} \right) dt \quad [11]$$

Le signal analytique $\hat{s}(t)$ du signal $s(t)$ peut être constitué à travers $s(t)$ et son HT $\tilde{s}(t)$:

$$\hat{s}(t) = s(t) + j\tilde{s}(t) \quad [11]$$

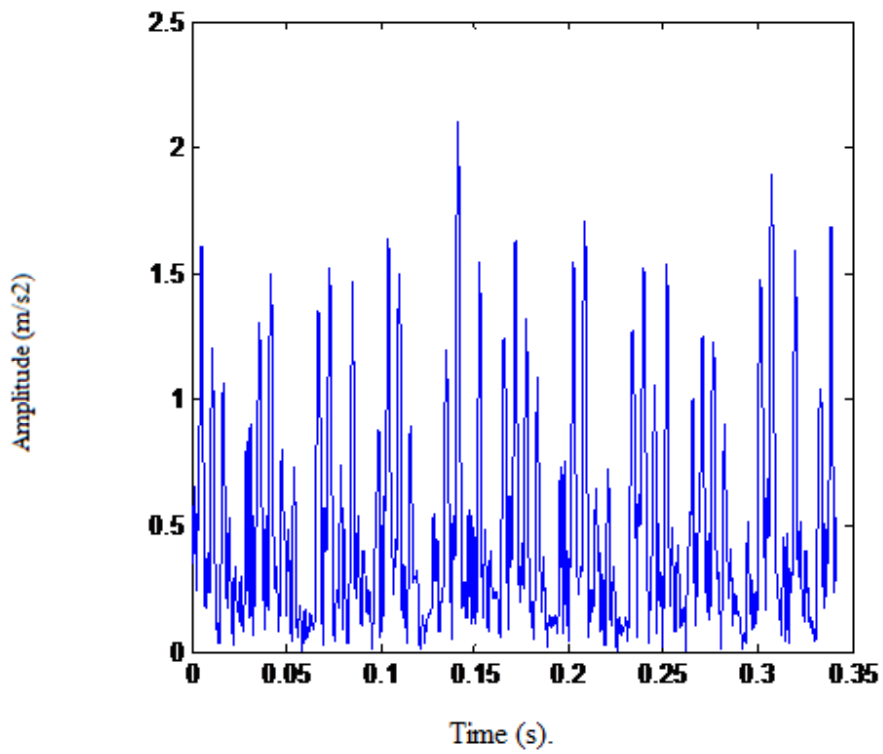
Le processus peut être suivi en prenant la valeur absolue du signal analytique pour générer l'enveloppe :

$$|\hat{s}(t)| = \sqrt{s(t)^2 + \tilde{s}^2} \quad [11]$$

Généralement, les défauts générant des chocs provoquent une modulation du signal. En utilisant l'analyse de l'enveloppe, le pic présent dans le spectre correspond à la fréquence caractéristique du défaut. Afin d'identifier les anomalies à l'aide de cette technique, nous utilisons les mêmes signaux de vibration utilisés précédemment.

Les figs. 4.6 a, 4.7 a, 4.6 b et 4.7 b représentent respectivement les enveloppes et leurs spectres. Le filtre utilisé est sélectionné en fonction de la fréquence de la résonance, après avoir filtré les signaux autour de la bande passante de : [2400-3200] Hz, les spectres représentent de nombreuses composantes fréquentielles, à la fréquence de rotation (30 Hz), également aux fréquences caractéristiques (162 et 107 Hz) et leurs harmoniques. Ces fréquences indiquent clairement des défauts des bagues intérieure et extérieure.

a)



b)

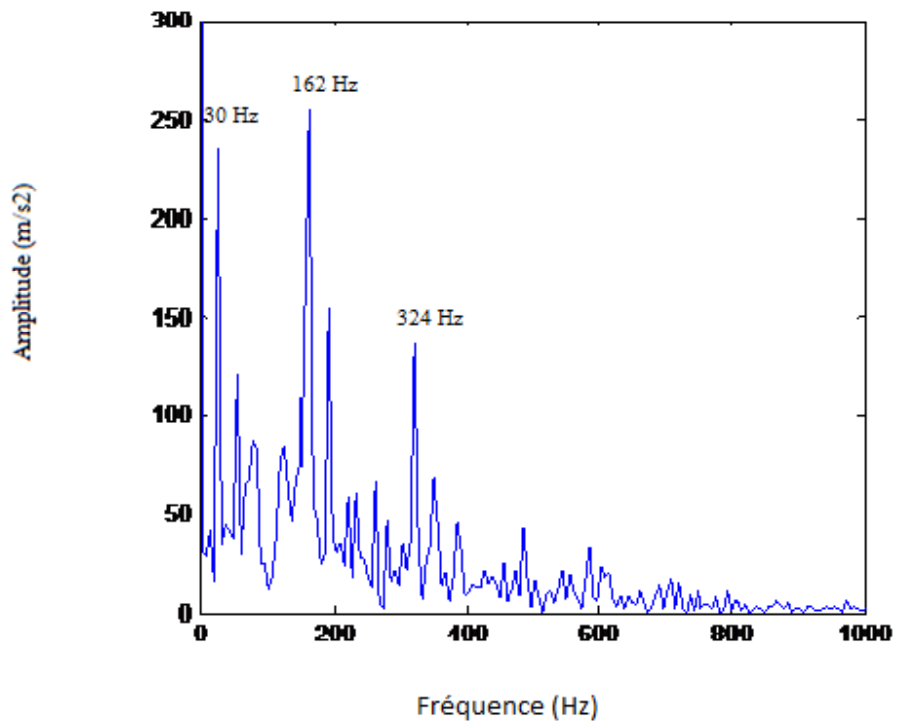
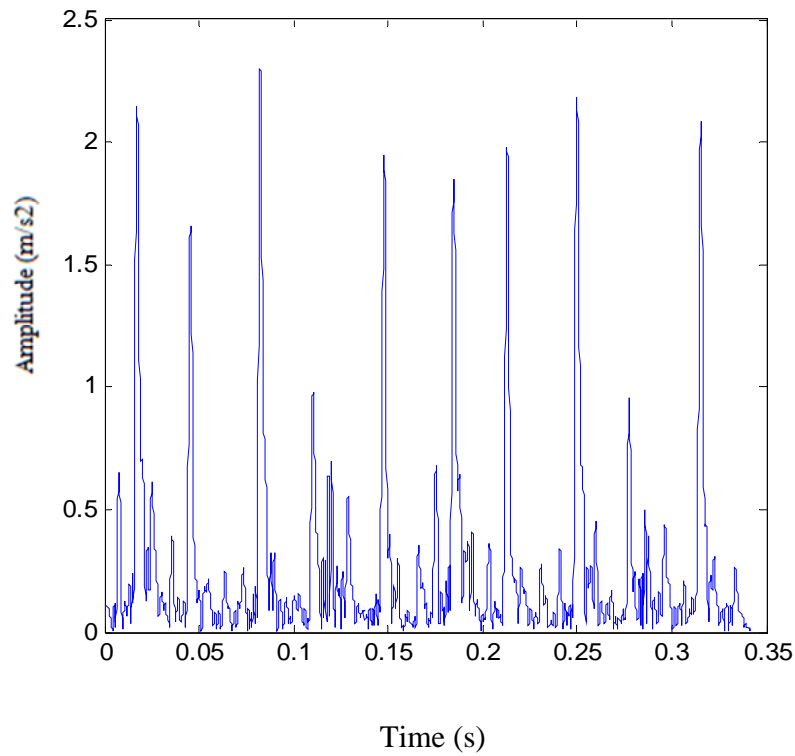


Figure 4.6 : (a) Enveloppe du défaut de bague intérieure et (b) son spectre.

a)



b)

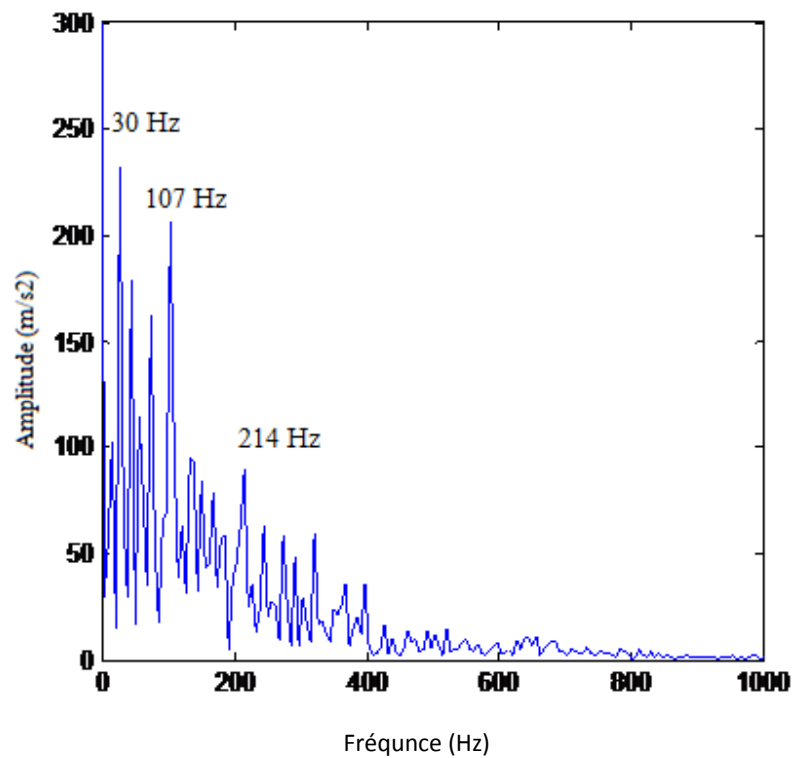


Figure 4.7 : (a) Enveloppe du défaut de bague extérieure et (b) son spectre.

4.5. Conclusion :

Dans ce travail, nous avons appliqué l'analyse d'enveloppe sur des signaux réels obtenus à partir d'un accéléromètre placé sur un banc d'essais. Les signaux mesurés reflètent deux défauts séparés sur les bagues intérieure et extérieure d'un roulement de type SKF. En utilisant la transformée de Fourier, le spectre ne montre aucune fréquence caractéristique du roulement. En revanche, avec l'analyse d'enveloppe les résultats sont certainement meilleurs, car la fréquence de rotation du moteur et les fréquences caractéristiques ainsi que leurs harmoniques sont clairs sur le spectre.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le présent document de synthèse présente un bref sur les techniques de détection des défauts des machines tournantes. Depuis la révolution industrielle, la maximisation de la production a été l'intérêt majeur de l'industrie, aussi des scientifiques et des chercheurs ont été engagés dans la conceptualisation de systèmes de surveillance de la machine. Des techniques d'analyse du signal de vibration ont été présentées et discutées en même temps que leurs applications sur un roulement de type SKF avec deux défauts séparés en l'occurrence ; défaut de bague intérieure et défaut de bague extérieure. Ce document a tenté de présenter le signal de vibration et son analyse pour une bonne surveillance du roulement.

Références bibliographiques :

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

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

[3] <http://www.spectraquest.com/products/abvtbing.html>.

[4] Alain Bouleger – Christian Pachaud : ANALYSE VIBRATOIRE EN
MAINTENANCE surveillance et diagnostic des machines 2^{ème} édition AFNOR 2003
DUNOD.

[5] Claire BRENEUR _ 2002, Eléments de maintenance préventive de machines
tournantes.

[6] Cours des principaux défauts.

[7] D. Baillie and J. Mathew, “Diagnosing rolling element bearing faults with
artificial neural networks”, Acoustics Australia, vol. 22, pp. 79-84, 1994.

[8] J. Altmann, “Application of discrete wavelet packet analysis for the detection and
diagnosis of low speed rolling-element bearing faults”, Ph.D thesis, Monash
University, Melbourne, Australia, 1999.

[9] H. Yang, “Automatic fault diagnosis of rolling element bearings using wavelet
based pursuit features”, Ph.D thesis, Queensland University of Technology, Australia,
2004.

Références bibliographiques

[10].K.A. Loparo, Bearings vibration data set, Case Western Reserve University, (<http://www.eecs.cwru.edu>), 2003.

[11] Bruel and Kjaer, “Détection des défauts de roulement par calcul du Facteur de crête et analyse d’enveloppe”, Notes d’applications, BO 0367- 11–Copenhague, 11 p, 1994.