



République Algérienne Démocratique et
Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



Universite Amar Telidji - Laghouat

DEPARTEMENT : Electrotechnique

FACULTE : Technologie

MEMOIRE DE MASTER

PRESENTE PAR : Djoubar Abdelhak

DOMAINE : Sciences et techniques

FILIERE : Electromécanique

OPTION : Electromécanique

Thème

**Diagnostic et maintenance des systèmes tournants
par analyse vibratoire (défaut des roulements)**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Nouar Allal	Professeur	Président
Bessedik Sidahmed	Professeur	Examineur
Hadjadj Abdechafik	Professeur	Encadreur

Promotion: 2023/2024

Dédicace

*Je dédie ce travail à mon cher père et ma chère mère
qui grâce à eux je suis arrivée à ce niveau.*

*A ma famille, mes chères sœurs et mes chers frères.
A toute la famille Djoubar, en particulier oncle Miloud
et mon grand-père Mahmoud je prie Dieu de le guerir.*

*A toutes mes amie surtout : Mohamed , Soufiane ,
Boumedian , Badreddine et Belalmi .*

Remerciement

Le grand remerciement revient à Dieu qui m'a donné la Force et le courage à réaliser et terminer ce modeste travail.

Je tiens à remercier vivement mon encadreur

Dr. Hadjadj Abdechafik pour m'avoir encadré encouragé et conseillé durant la période du mémoire et je remercie également Mr Bensaoucha Saddam qui m'a beaucoup aide dans ce travail.

Je remercie tout le personnel Enseignant du département Electrotechnique. et tous les professeurs d'université qui mont aide dans mon parcours académique, notamment les membres du jury professeur Nouar Allal et Bessedik Sidahmed.

Par la même occasion, je remercie vivement tous mes amie sans exception, ainsi que tous les personnes qui de près ou de loi, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Résumé

Les défauts du roulement est l'une des principales causes de défaillance dans les machines tournantes. La technique la plus utilisée pour la surveillance et le diagnostic des roulements est l'analyse des vibrations. Cette technique connaît un grand succès pour la surveillance des machines tournantes. Toutefois, cette technique permet difficilement une détection précoce à moins d'un traitement sophistiqué du signal vibratoire autour des résonances, et par conséquent détecte plus souvent le défaut à un stade avancé, lorsque les fréquences de roulement se manifestent clairement.

Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale sur l'application des mesures vibratoires du roulement par différentes méthodes : analyse temporelle, spectrale et l'enveloppe.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des paramètres suscités sur la Sensibilité des indicateurs scalaires, qui sont des outils d'aide au diagnostic des défauts simulés sur les roulements, et la mise en œuvre du diagnostic par l'identification des défauts par l'analyse spectrale et l'enveloppe.

Mots - Clés : machines tournantes, vibrations, roulement, défaillance, diagnostic, l'analyse spectrale et l'enveloppe.

Abstract

Bearing wear is a major cause of defect in rotating machinery. The most widely used technique for monitoring and diagnosing bearings is vibration analysis. This technique has been successful for monitoring rotating machinery. Nevertheless, this technique does not allow for early defect detection, except by using advanced signal processing techniques around the natural frequencies, and more often allows for detection when the bearing is an advanced stage of degradation and the bearing frequencies can be easily identified,

This work presents the results of an experimental study on the application of the vibratory measurement of the bearing by different method: time analysis, spectral and envelope analysis.

The aim of this work is to study the influence of above mentioned parameters on the sensitivity of the scalar indicators, which are tools to aid in the implementation of the diagnosis by spectral and envelope analysis.

Keywords: *rotating machinery, vibration, bearing, defect, diagnosing, spectral and envelope analysis.*

ملخص

تآكل المتدحرجات هي واحدة من الأسباب الرئيسية للفشل في آلات الدوارة. التقنية الأكثر استعمالاً لرصد وتشخيص المتدحرجات هي تحليل الاهتزاز. هذه التقنية عرفت نجاحاً كبيراً لرصد عيوب الآلات الدوارة .

ومع ذلك، فإن هذا الأسلوب يجعل من الصعب الكشف المبكر ما لم يكن معالجة متطورة للإشارة الاهتزاز حول الأصداء، وبالتالي عادة ما يكشف خطأ في مرحلة متقدمة، عندما تظهر ترددات المتدحرجات بشكل واضح.

يعرض هذا العمل نتائج الدراسة التجريبية على تطبيق لقياسات اهتزاز المتدحرجات بطرق مختلفة: التحليل الزمني التحليل الطيفي وتحليل الغلاف.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير المتغيرات المدروسة على حساسية المؤشرات السلمية، التي هي أدوات لتشخيص الأعطال التي تمت محاكاتها على المحامل، وإجراء تشخيص من خلال تحديد العيوب عن طريق التحليل الطيفي وتحليل الغلاف.

الكلمات المفتاحية: الآلات الدوارة، الاهتزاز، المتدحرجات ، العيوب، التشخيص، التحليل الطيفي وتحليل الغلاف .

Sommaire

Dédicace	II
Remerciement.....	III
Résumé.....	IV
Abstract.....	V
ملخص.....	VI
Liste des figures.....	X
Liste des tableaux et symboles	XII
Introduction générale	01
<i>Chapitre 01 : Diagnostic et maintenance industrielle</i>	
Introduction	04
1.1 Définitions relatives au diagnostic	05
1.1.1 diagnostic	05
1.1.2 La détection	05
1.1.3 Le défaut	06
1.1.4 Le défaillance	06
1.1.5 La dégradation	06
1.1.6 La panne	06
1.1.7 Les différentes étapes de diagnostic	07
1.1.7.1 Etape d'acquisition de données	07
1.1.7.2 Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts	07
1.1.7.3 Etape de détection.....	07
1.1.7.4 Etape de localisation	08
1.1.7.5 Etape de prise de décision	08
1.1.8 Techniques et méthodes de diagnostic	08
1.1.8.1 Classification des méthodes de diagnostic.....	08
1.1.8.2 Méthodes de diagnostic avec modèles	08
1.1.8.3 Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle	09
1.1.8.4 Les méthodes de diagnostic par modélisation physique	09
1.1.8.5 Méthodes de diagnostic sans modèles	11
1.1.8.6 La reconnaissance des formes	11
1.1.9 Quelques techniques de diagnostic par approche signal	11
1.1.9.1 Analyse temporelle	11
1.1.9.2 Analyse fréquentielle	12
1.2 Définition de la maintenance	12
1.2.1 AFNOR X60-01(décembre1994)	12
1.2.2 CEN projet WI 319-003(1997)	12
1.2.3 Les différentes formes de maintenance	13
1.2.3.1 La maintenance corrective	13
1.2.3.2 La maintenance préventive	13
1.2.3.3 Différents formes de la maintenance préventive	14
a) La maintenance préventive systématique	14
b) La maintenance préventive conditionnelle et prévisionnelle	15
1.2.4 Les fonctions essentielles de la maintenance	15
a) Les fonctions de base	15

b) Les fonctions complémentaires	15
1.2.5 Rôle de la maintenance	16
1.2.6 Objectifs essentiels	16
1.2.7 Domaines d'actions du service maintenance	16
1.2.8 Niveaux maintenance	17
Conclusion.....	18

Chapitre 02 : l'analyse de vibration

Introduction	20
2.1. Définition d'une vibration	20
2.2. Approche intuitive	20
2.2.1. Perception subjective des phénomènes	20
2.2.2. Le bruit	20
2.2.3. Origine du bruit rayonné par une machine	21
2.3. Les vibrations	21
2.3.1. Vibrations d'une machine	21
2.3.2. Origine des phénomènes	21
2.4. Définition théorique d'une vibration	21
2.4.1. Vibrations périodiques	21
2.4.2. Vibrations aléatoires	22
2.4.3 Vibrations d'un système "masse-ressort"	22
2.4.4 Vibration sinusoïdale	23
2.5. Description de la vibration	23
2.5.1. Logarithme	23
2.5.2. Niveau en décibel – DB5	24
2.5.3. Niveau d'accélération	24
2.5.4. Niveau de vitesse	24
2.5.5. Niveau de déplacement	25
2.6.1. Amplitude et fréquence	25
2.6.2 .Intensité et fréquence	25
2.6.3. Définition de l'amplitude, de la période, de la fréquence	25
2.6.4. Amplitude et période	25
2.7. Les analyseurs de fréquence	26
2.7.1. Analyseur analogique	26
2.7.2. Analyseur numérique	26
2.8. Métrologie	27
2.8.1. La mesure du niveau global	27
2.8.2. L'analyse spectrale.....	27
2.8.3. Lespectre	28
Conclusion	28

Chapitre 03 : l'analyse vibratoire des principaux défauts

Introduction	30
3.1. Analyse vibratoire des machines tournantes	31
3.1.1. Origine des vibrations sur les machines tournantes	31
3.1.2. Matériel de mesure	33
3.2. Les principaux défauts	35
3.2.1. Déséquilibre: défaut de balourd.....	35

3.2.1.1. Equilibrage statique.....	35
3.2.1.2. Equilibrage dynamique	36
3.2.1.3. Spectre d'un déséquilibre.....	36
3.2.2. Défaut d'alignement	38
3.2.2.1. Origine du défaut	38
3.2.2.2. Signature du défaut d'alignement.....	39
3.2.3. Défaut de desserrage et de jeu.....	40
3.2.4. Défauts de transmission par courroies.....	41
3.2.5. Défauts de denture d'engrenages	42
3.2.5.1. Généralités.....	42
3.2.5.2. Signature d'un engrenage	43
3.2.5.3. Défaut d'excentricité.....	44
3.2.5.4. Gravité des défauts.....	46
3.2.5.5 Défauts électriques	46
3.2.6. Circuits hydrauliques/ ventilateurs	47
3.2.6.1. Passages d'aubes	47
3.2.6.2. Cavitation	47
3.2.7. Défauts spécifiques aux roulements.....	48
3.2.7.1. Durée de vie des roulements	48
3.2.7.2. Processus de dégradation d'un roulement.....	48
3.2.7.3. Fréquences caractéristiques.....	49
3.2.7.4. Modulation d'amplitude de BPFI	50
3.2.7.5. Modulation de BPFO.....	51
3.2.7.6. Signatures vibratoires des défauts d'écaillage.....	51
3.2.7.7. Rupture de cage.....	53
3.2.7.8. Défaut de billes.....	53
Conclusion.....	54

Chapitre 04 : Application de la méthode d'enveloppe pour le diagnostic des défauts de roulements

Introduction.....	56
4.1. Configuration expérimentale et acquisition de données.....	56
4.2. Analyse spectrale.....	59
4.3. Analyse d'enveloppe.....	61
Conclusion.....	66
Conclusion général.....	67

Liste des figures

Chapitre 01 :

Figure 1.1 : les différentes étapes de processus de diagnostic.

Figure 1.2 : Principe de surveillance avec modèle.

Figure 1.3: Principe de la surveillance par estimation para métrique.

Figure 1.4 : Principe de la surveillance par observateurs.

Figure 1.5: Synoptique des modes de maintenance.

Chapitre 02 :

Figure2.1: Origine du bruit.

Figure 2.2 : Vibrations périodiques.

Figure 2.3 : Vibrations d'un système "masse-ressort"

Figure 2.4 : Vibration sinusoïdale.

Figure 2.5 : Logarithme des vibrations.

Figure2.6 : l'amplitude, de la période, de la fréquence.

Figure2.7: Analyseur numérique.

Figure2.8 : L'amplitude d'une vibration.

Chapitre 03 :

Figure 3.1 : machine tournante.

Figure 3.2 : machine tournante (intérieur).

Figure3.3: machine tournante. Figure 2.4 : Vibration sinusoïdale.

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

Figure 3.6 : mesures des vibrations par un capteur.

Figure3.7 : le capteur.

Figure 3.8 : différentes méthodes de fixation des capteurs.

Figure 3.9 : balourd.

Figure 3.10 : Amplitudes du signal vibratoire de balourd.

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

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

Figure 3.13: schéma du défaut d'alignement.

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

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

Figure 3.16 : désolidarisation de la structure par balourd.

Figure 3.17 : signal temporel et spectrale.

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.

Figure 3.19 : roues courroies.

Figure 3.20: Denture d'engrenages.

Figure 3.21 : Spectre théorique d'un engrenage sain.

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

Figure3.23: Spectre théorique d'un engrenage présentant un défaut d'excentricité.

Figure 3.24: Spectre d'un engrenage.

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

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

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

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

Figure3.29: schéma du début d'endommagement d'un roulement

Figure 3.30 : Modulation d'amplitude de BPFI.

Figure 3.31 : Modulation de BPFO.

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

Figure 3.33: Spectre de bague externe.

Figure3.34: Spectre de bague intérieure.

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

Chapitre 04 :

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

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

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

Figure 4.4 : Signal temporel du défaut de bille

Figure 4.5 : Spectre du défaut de bague intérieure.

Figure 4.6 : Spectre du défaut de bague extérieure.

Figure 4.7 : Spectre du défaut de bille .

Figure 4.8 : Signal filtre du défaut de bague intérieure.

Figure 4.9 : Signal filtre du défaut de bague extérieure.

Figure 4.10 : Signal filtre du défaut de bille.

Figure 4.11 : Enveloppe du défaut de bague intérieure et son spectre.

Figure 4.12 : Enveloppe du défaut de bague extérieure et son spectre.

Figure 4.13 : Enveloppe du défaut de bille et son spectre.

Liste des tableaux

Chapitre 04 :

Tableau (1): Les cinq niveaux de maintenance.

Liste des abréviations et symboles

V : vitesse.

D : déplacement.

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

A : accélération m/s^2 .

T : période.

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

D : déplacement.

F : fréquence.

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

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

Introduction générale :

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

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

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

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

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

Ce travail présente une étude sur la surveillance des défauts des roulements par analyse vibratoire spectrale et l'enveloppe.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres répartis comme suit :

Introduction générale

- Le chapitre 01 : nous présenterons le diagnostic et maintenance dans industriel et les différentes méthodes utilisées pour la détection des défauts qui existent couramment dans l'industrie (traitement signal) et les différents types de maintenance.
- Le chapitre 02 : est introduit à étude théorique sur l'analyse vibratoires, les différentes méthodes et technique utilisée et celle toujours en voie de développement pour l'analyse vibratoire.
- Le chapitre 03 : représente l'analyse vibratoire du les différents types de défauts dans les machines tournants , leurs causes et leurs effets sur les machines.
- Le chapitre 04 : présente l'étude expérimentale des défauts du roulement par l'analyse spectrale et de l'analyse d'enveloppe pour des signaux vibratoires mesurés , sur MATLAB .

Chapitre : 01

Diagnostic et maintenance
industrielle

Introduction :

Le diagnostic est une composante principale du module de supervision. Il consiste à déterminer chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve.

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'information prévenants d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

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

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

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

Elle vise donc moins à remettre en état l'outil de travail qu'à anticiper ses dysfonctionnements. L'arrêt ou le fonctionnement anormal de l'outil de production, et le nonrespect des délais qui s'en suivent, engendrent des surcoûts que les entreprises ne sont plus en état de supporter. L'entreprise ne doit plus subir les événements, elle doit les prévoir et analyser leurs effets sur le long terme.

1.1 Définitions relatives au diagnostic

1.1.1 Diagnostic :

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

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

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

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

La mission pour laquelle le système a été conçu, peut être totalement remplie, partiellement remplie ou non remplie, cela dépend du mode de fonctionnement, un système est dit diagnosticable s'il est susceptible d'être soumis à un diagnostic, il doit alors être muni d'organes d'observation (capteurs) et d'un système d'analyse pour étudier les informations fournies. La diagnosticabilité sera l'aptitude d'un système à être diagnostiqué. [01]

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

- la localisation : permet de déterminer les ou les éléments défaillants.
- l'identification : estime les caractéristiques statiques et dynamiques de défaut : l'instant d'apparition de la panne, sa durée et son importance. [02]

1.1.2 La détection :

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

Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à Considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale. [03]

1.1.3 Défaut :

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

1.1.4 Défaillance :

Événement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement ses fonctions. Il est clair qu'une défaillance implique l'apparition d'un défaut puisqu'il existe un écart entre la caractéristique mesurée et la caractéristique théorique, Par contre, un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance puisque le dispositif peut très bien continuer à assurer sa mission principale. [01]

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonction requise avec les performances définies dans les spécifications techniques,

on peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité par :

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

1.1.5 Dégradation :

Une dégradation représente une perte de performance d'une des fonctions assurées par un équipement, Si les performances sont au-dessous du seuil défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, Il n'y a plus dégradation mais défaillance . [03]

1.1.6 Panne :

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

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

1.1.7 Les différentes étapes de diagnostic :

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

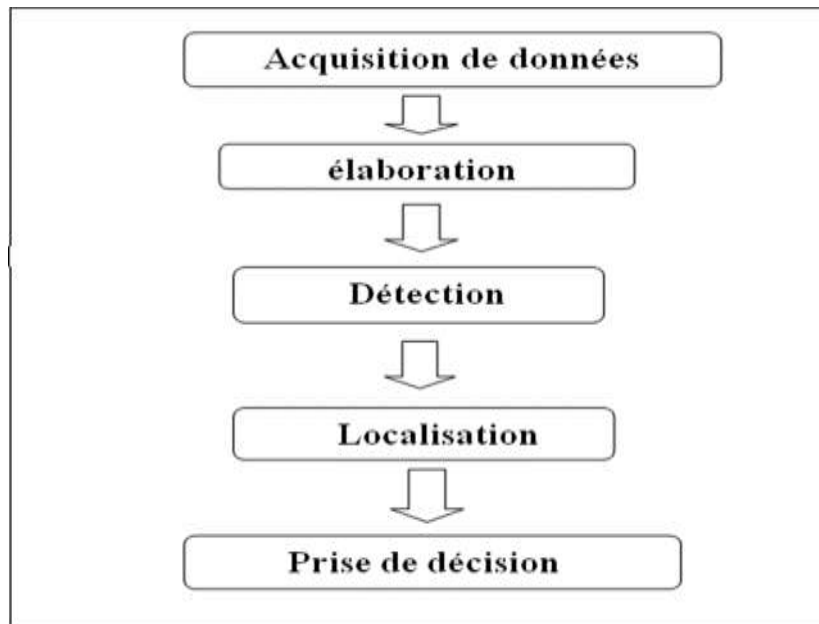


Figure 1.1 : les différentes étapes de processus de diagnostic

1.1.7.1 Etape d'acquisition de données :

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

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

1.1.7.2 Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts :

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

1.1.7.3 Etape de détection :

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

1.1.7.4 Etape de localisation :

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

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

1.1.7.5 Etape de prise de décision :

Il s'agit de décider de la marche à suivre afin de conserver les performances souhaitées, du système sous surveillance. Cette prise de décision doit permettre de générer, éventuellement sous le contrôle d'un opérateur humain, les actions correctrices nécessaires à un retour à la normale du fonctionnement de l'installation. En résumé, quelle que soit la méthode employée, la procédure de diagnostic comprend deux Principales étapes, une étape de génération de résidus et une étape d'évaluation des résidus . [04]

1.1.8. Techniques et méthodes de diagnostic :

1.1.8.1 .Classification des méthodes de diagnostic :

Les méthodes de diagnostic se distinguent selon différents critères :

- la dynamique du procédé (discret, continu ou hybride).
- la complexité du procédé, l'implémentation du diagnostic en ligne et/ou hors ligne.
- la nature de l'information (qualitative et/ou quantitative).
- la profondeur de l'information (structurelle, fonctionnelle et/ou temporelle), sa distribution (centralisée, décentralisée ou distribuée) . [05]

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

Technique basée sur une modélisation fonctionnelle et matérielle, et la technique basée sur une modélisation physique. [06]

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

1.1.8.2 Méthodes de diagnostic avec modèles :

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

1.1.8.3 Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle :

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

1.1.8.4 Les méthodes de diagnostic par modélisation physique :

Les méthodes de surveillance avec modèle physique ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par le modèle [07]. Tout écart est alors synonyme d'une défaillance, les outils de-là théorie de la décision sont ensuite utilisés pour déterminer si cet écart est dû à des aléas normaux, comme par exemple le bruit de mesure ou s'il traduit une défaillance du système.

Ces méthodes utilisent un modèle décrit par des relations mathématiques représentant les différentes relations physiques du procédé. Généralement, ces relations physiques découlent de l'application de lois fondamentales de divers domaines (physique, chimie, électricité, thermodynamique, mécanique, etc.). Ainsi, il est possible de créer une modélisation du système qui, en lui appliquant les entrées similaires au système réel (lois de commande, paramètres du procédé, etc.), fournit une réponse estimée du système. Il est alors possible de calculer l'écart entre la réponse réelle du système et sa réponse estimée, comme indiqué sur la **Figure (1.2)**. Cet écart est usuellement appelé résidu (R).

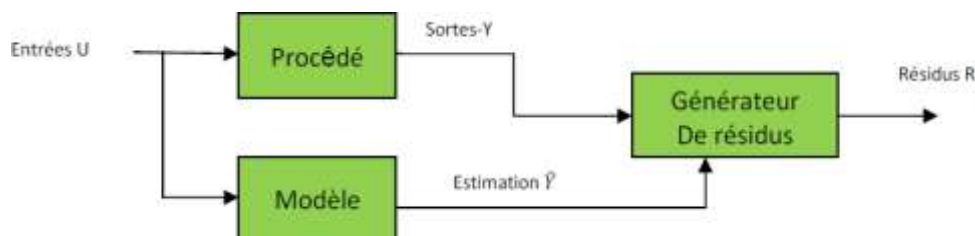


Figure 1.2 : Principe de surveillance avec modèle.

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

Il existe plusieurs approches de génération de résidus, cependant trois sont vraiment essentielles [08] , il s'agit de :

a) Estimation des paramètres :

Les résidus sont la différence entre les paramètres nominaux du modèle et les paramètres estimés du modèle. [09]

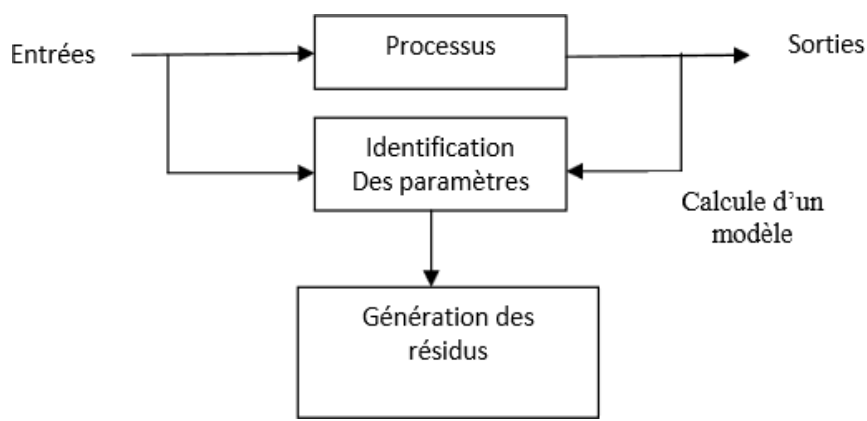


Figure 1.3: Principe de la surveillance par estimation para métrique

b) Observateurs :

Les méthodes à base d'observateurs reconstruisent une estimation de la sortie à partir de toutes ou parties des sorties réelles du système. Les résidus sont alors classiquement la différence entre les sorties mesurées et les sorties estimées . [07]

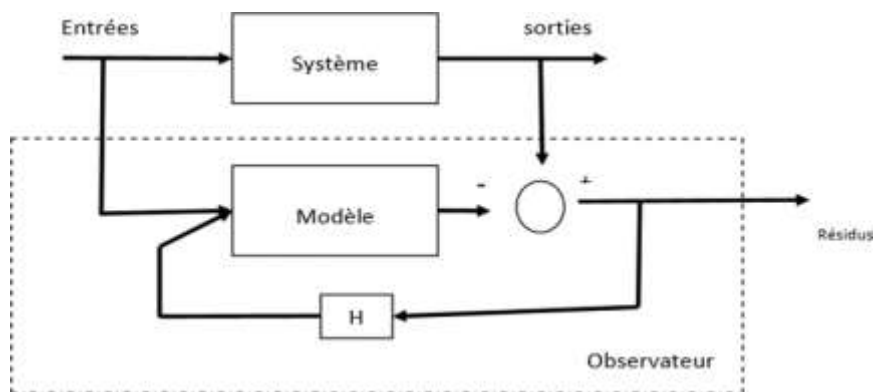


Figure 1.4 : Principe de la surveillance par observateurs.

c) Equations de parité :

Cette méthode consiste à vérifier l'exactitude des équations mathématiques du modèle en se basant sur les sorties du procédé . [10]

1.1.8.5 Méthodes de diagnostic sans modèles :

Nombreuses sont les applications industrielles dont le modèle est difficile, voire impossible à obtenir suite à une complexité accrue ou à de nombreuses reconfigurations intervenantes durant le processus de production. Pour ce type d'applications industrielles, les seules méthodes de diagnostic opérationnelles sont celles sans modèle. Deux techniques existent dans ce cas : technique par les outils de traitement de signal (approche signal) et celle par reconnaissance de formes [11], et la méthode les systèmes experts. Pour des raisons de simplicité le diagnostic par approche signal est la technique la plus utilisée actuellement en diagnostic industriel [12], c'est pour cela on essaiera de le détailler un peu dans ce qui suit.

1.1.8.6 La reconnaissance des formes :

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

- Une phase d'analyse qui consiste à déterminer et à réduire l'espace de représentation des données et à définir l'espace de décision permettant de spécifier l'ensemble des classes possibles.
- Une phase de choix d'une méthode de décision permettant de définir une règle de décision qui a pour fonction de classer les nouvelles observations dans les différentes classes de l'ensemble d'apprentissage.
- Une phase d'exploitation qui détermine, en appliquant la règle de décision, le mode de fonctionnement du système en fonction de chaque nouvelle observation recueillie sur le processus. Ils existent trois techniques de reconnaissance des formes. La première technique est une technique classique de discrimination basée sur les outils de la probabilité. Cette technique peut se montrer insuffisante car elle suppose une connaissance à priori de tous les états de fonctionnement et ne prend pas en compte révolution du système ,[13].Les deux autres techniques reposent sur la théorie de l'intelligence artificielle. Ces techniques ont l'avantage de ne pas se baser sur les connaissances à priori des états de fonctionnement mais plutôt sur une phase d'apprentissage. Ces deux techniques sont la reconnaissance des formes par la logique floue et la reconnaissance des formes par réseaux de neurones.

1.1.9. Quelques techniques de diagnostic par approche signal :**1.1.9.1 Analyse temporelle :**

L'analyse temporelle peut se faire soit à l'échelle du signal, c'est à dire en utilisant des indicateurs obtenus à partir d'une fenêtre glissante sur le signal, cela permet la détection et la localisation du défaut, soit à l'échelle d'un ensemble de signaux, les indicateurs ont une valeur scalaire calculée directement sur la totalité d'un signal. Cette analyse s'applique à des machines simples et consiste à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevée. Cet outil est aisé à employer lorsque le signal est simple (vibration de type sinusoïdal du balourd d'un rotor par exemple), mais devient inexploitable dans le cas de sollicitations multiples et de faible influence sur les défauts . [13]

1.1.9.2 Analyse fréquentiel :

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

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

1.2 Définition de la maintenance :**1.2.1. AFNOR X60-01(décembre1994) : (association française de normalisation) :**

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

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

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

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

1.2.3 Les différentes formes de maintenance :

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

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

1.2.3.1 La maintenance corrective :

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

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

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

C'est oui, dès lors que l'on a identifié la cause de la panne, on est en mesure de la prévenir, ou de la rendre moins pénalisante donc d'améliorer. [14]

1.2.3.2 La maintenance préventive :

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

Le diagramme suivant les diverses option de la maintenance selon (AFNOR) :

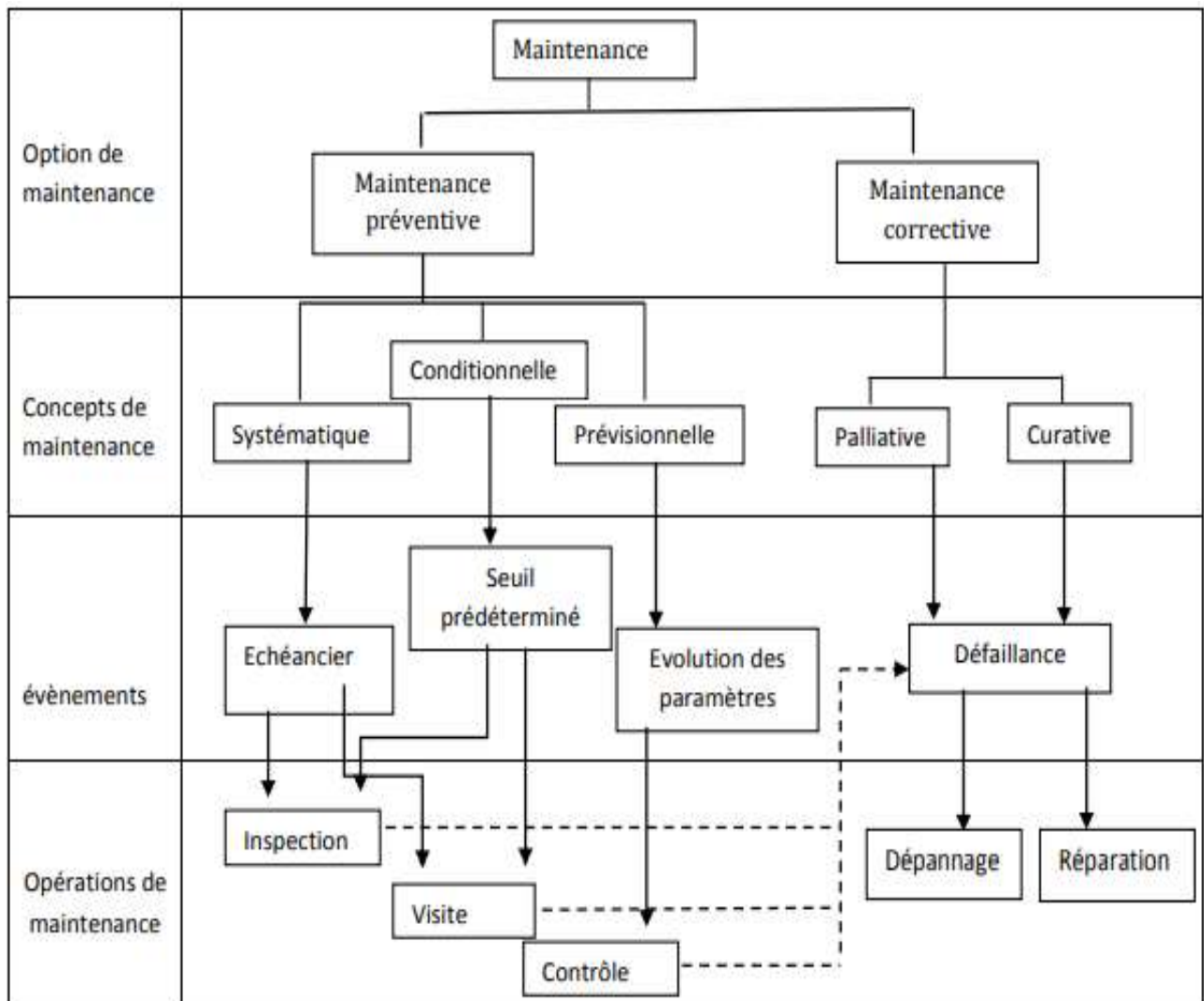


Figure 1.5: Synoptique des modes de maintenance.

1.2.3.3 Différents formes de la maintenance préventive :

a) La maintenance préventive systématique :

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

Cas d'application :

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

- Equipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves : tous les matériels assurant le transport en commune des personnes avions trains etc.
- Equipements ayant un coût de défaillance élevé : éléments d'une chaîne de production automatisée, processus fonctionnant en continu (industries chimique ou métallurgiques).
- Equipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevées au cours de leur temps de service : consommation excessive d'énergie, éclairage par lampes usagées, allumage et carburation déréglés (moteur thermique).

b) La maintenance préventive conditionnelle et prévisionnelle :

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

La surveillance peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue. La maintenance prévisionnelle : maintenance préventive exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien

1.2.4 Les fonctions essentielles de la maintenance :

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

a) Les fonctions de base :

- Programmation des travaux.
- Approvisionnement et distribution des moyens.
- Exécution des travaux.
- Collecte et gestion des informations sur les travaux.
- Collecte et gestion des informations sur les pannes.

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

b) Les fonctions complémentaires :

- amélioration des pièces et des installations.
- amélioration de la planification et des standards.

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

1.2.5 Rôle de la maintenance :

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

1.2.6 Objectifs essentiels :

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

1.2.7 Domaines d'actions du service maintenance :

Les différentes tâches dont un service de maintenance peut avoir la responsabilité, sont :

- La maintenance des équipements ;
- L'amélioration du matériel dans l'optique de la qualité, de la productivité ou de la sécurité ;
- Les travaux neufs, tel que :
 - la participation au choix des équipements nouveaux .
 - l'installation et mise en route des équipements nouveaux.
- Les travaux concernant l'hygiène, la sécurité, l'environnement, la pollution, les conditions de travail et la gestion de l'énergie ;
- Les travaux de reconversion de locaux, d'aménagement et de démolition ;
- Exécution de la réparation des pièces de rechange ;
- Les diverses prestations pour la production (ex : réalisation de montage);
- L'entretien des bâtiments industriels, administratifs, les locaux sociaux, le parc auto,
- les espaces verts, etc...

1.2.8 Niveaux maintenance :

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

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

Tableau (1): Les cinq niveaux de maintenance

Conclusion:

Dans ce chapitre on a été consacré à une présentation de quelques définitions relatives au diagnostic et maintenance dans le domaine industriel, La maintenance acquiert une importance croissante et devient une fonction stratégique dans le management des entreprises, Quant au diagnostic, il constitue le facteur de base pour la maintenance des défauts, c'est pourquoi nous concluons qu'il n'est pas possible d'effectuer la maintenance sans diagnostiquer l'état. Autrement dit, ce sont deux éléments très importants qui se complètent.

Chapitre : 02

L'analyse de vibration

Introduction :

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

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

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

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

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

2.1. 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.

2.2. Approche intuitive :

2.2.1. 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.

2.2.2. Le bruit :

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

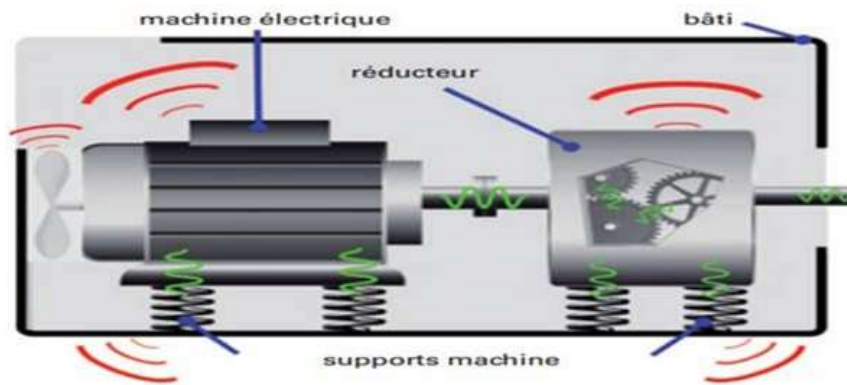


Figure 2.1: Origine du bruit.

2.2.3. 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.

2.3. Les vibrations :

2.3.1. Vibrations d'une machine :

Les vibrations d'une machine sont souvent perceptibles par simple contact de la main sur la structure. [16]

Les vibrations ressenties proviennent des forces internes à la machine.

2.3.2. Origine des phénomènes :

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

2.4. Définition théorique d'une vibration :

2.4.1. 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.

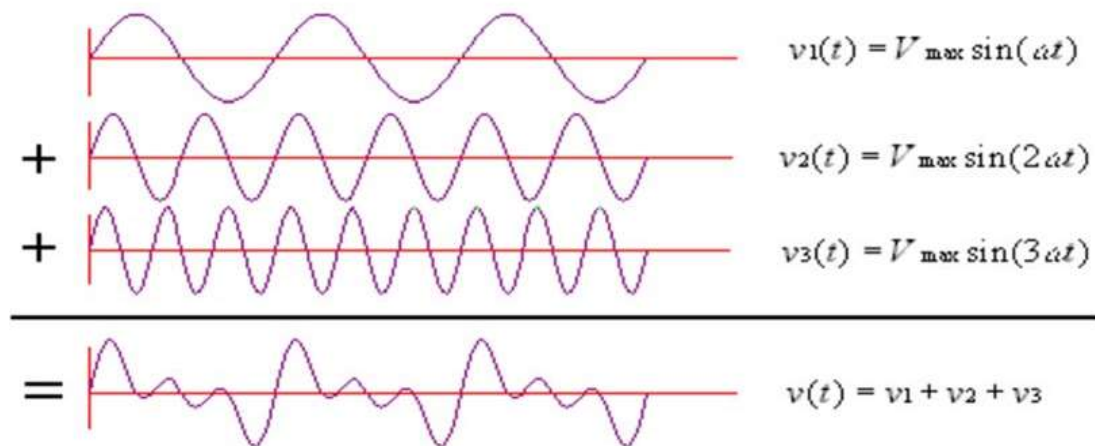


Figure 2.2 : Vibrations périodiques.

2.4.2. 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.

2.4.3. 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 :

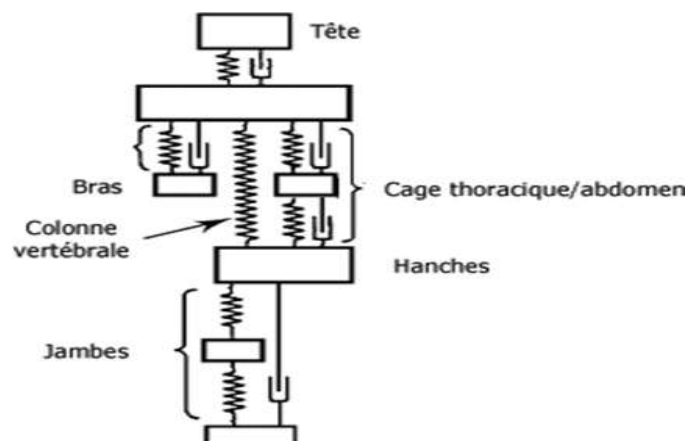


Figure. 2.3 : Vibrations d'un système "masse-ressort"

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.

2.4.4. 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.

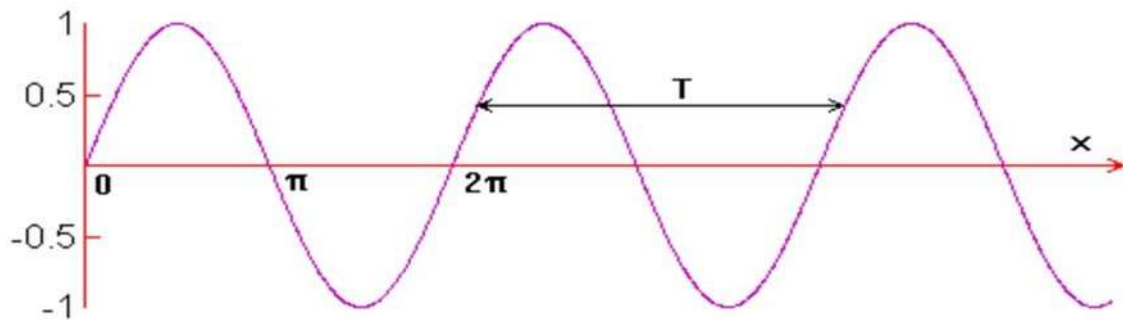


Figure 2.4 : Vibration sinusoïdale.

2.5. 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.

2.5.1. 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 graphe de très fortes valeurs et de très faibles.

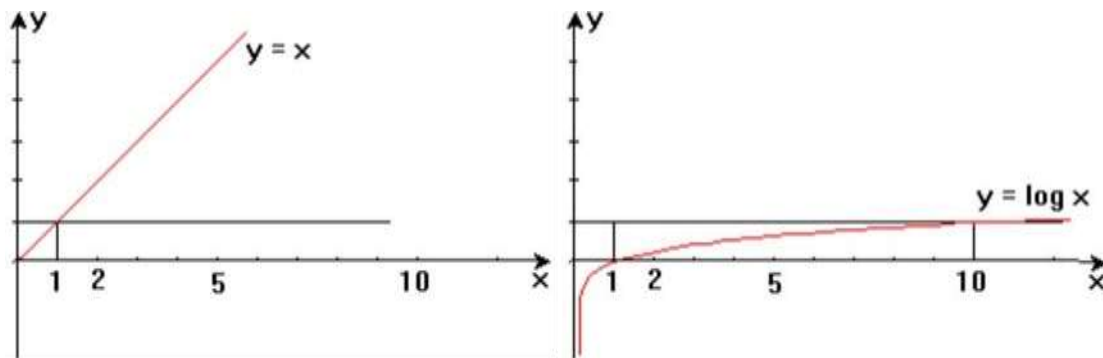


Figure 2.5 : Logarithme des vibrations.

2.5.2. 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 Vref : $L_v = 10 \log_{10} V / V_{ref}$ [17]

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.

2.5.3. Niveau d'accélération :

Le niveau d'accélération en log se définit par :

$$L_a = 10 \log_{10} A / A_{ref} \quad [17]$$

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

2.5.4. Niveau de vitesse :

Le niveau de vitesse en log se définit par :

$$L_v = 10 \log_{10} V / V_{ref} \quad [17]$$

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

2.5.5 Niveau de déplacement :

Le niveau déplacement en log se définit par : $L_d = 10 \log_{10} D / D_{ref}$ [17]

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

2.6.1 Amplitude et fréquence:

En vous reportant à la figure (2.5) 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.

2.6.2. 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.

2.6.3. 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.

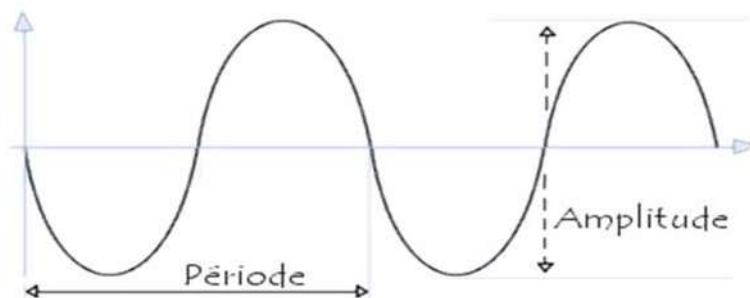


Figure 2.6 : l'amplitude, de la période, de la fréquence.

2.6.4. Amplitude et période :

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

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

La période est l'inverse de la fréquence. On note : $T = 1/f$. [17]

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.

2.7.2. 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.

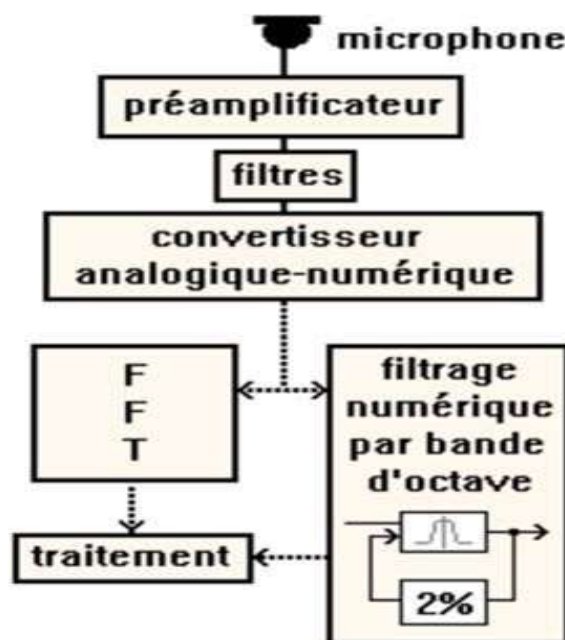


Figure 2.7: Analyseur numérique.

2.8. Métrologie :

2.8.1. 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.

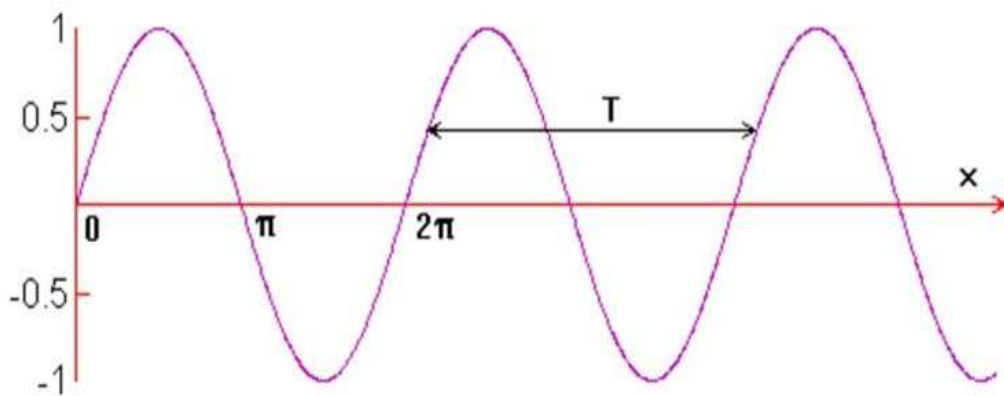


Figure 2.8 : L'amplitude d'une vibration.

La valeur efficace se détermine par la formule suivante :

$$V_{rms} = \sqrt{1/T \int x^2(t) dt} \quad [17]$$

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.

2.8.2. 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.

2.8.3. 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. [18]

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.

Conclusion :

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

Chapitre : 03

Analyse vibratoires des principaux défauts.

Introduction

Le diagnostic de l'état d'une machine n'est possible que si l'on connaît les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible d'affecter la machine considérée, c'est à dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts. La connaissance de ces images vibratoires et de la cinématique de la machine permet de formuler un diagnostic de l'état de la machine.

Malheureusement, une même image vibratoire peut correspondre à plusieurs défauts. Il faut donc établir la liste de tous les défauts correspondant à chaque image et, par déduction, entreprendre les analyses complémentaires et rechercher d'autres symptômes pour se diriger progressivement vers l'hypothèse la plus probable. On se propose dans ce chapitre d'étudier les images 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. [19]

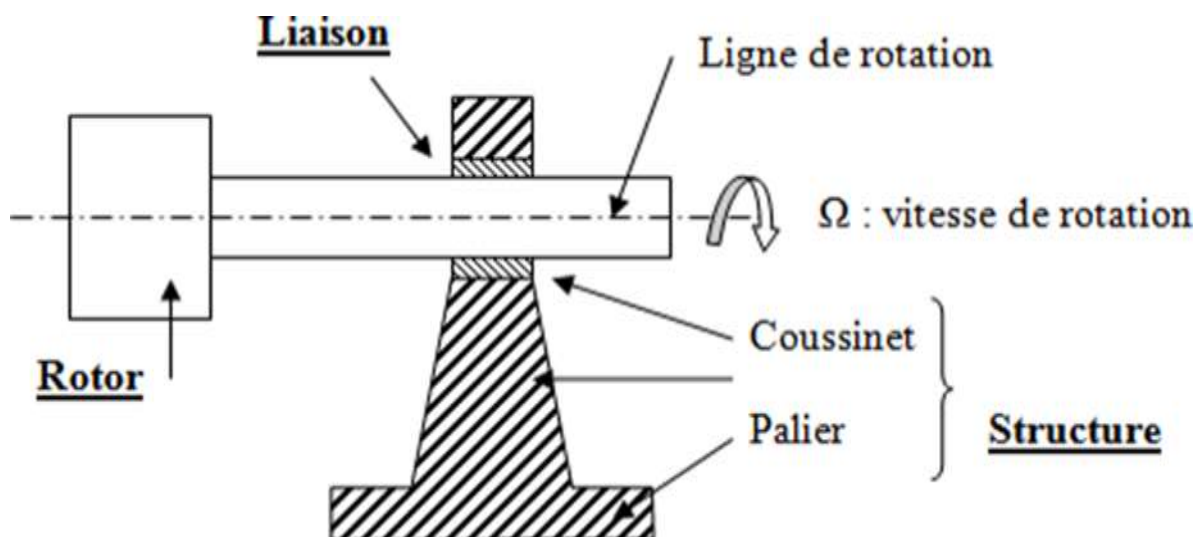


Figure 3.1 : machine tournante.

Chapitre III : l'analyse vibratoire des principaux défauts

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.

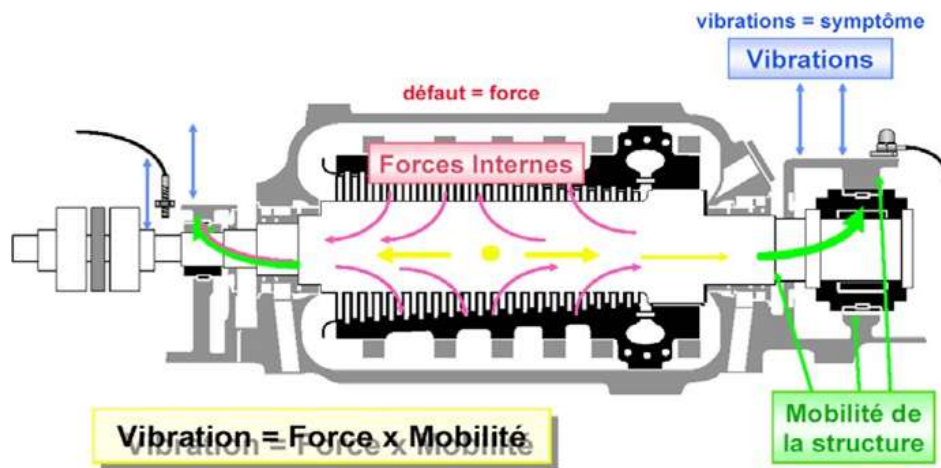


Figure 3.2 : machine tournante (intérieur).

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. [20]

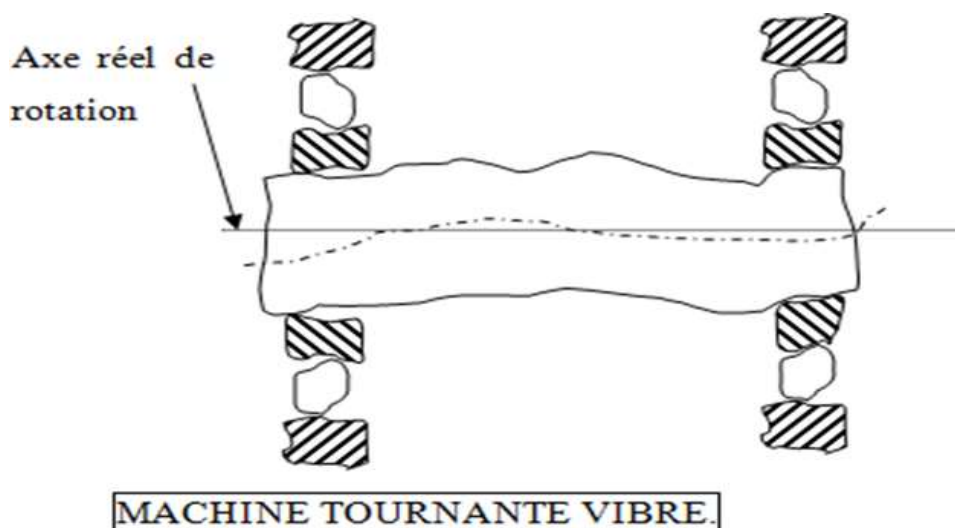


Figure 3.3: machine tournante.

Chapitre III : L'analyse vibratoire des principaux défauts

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.

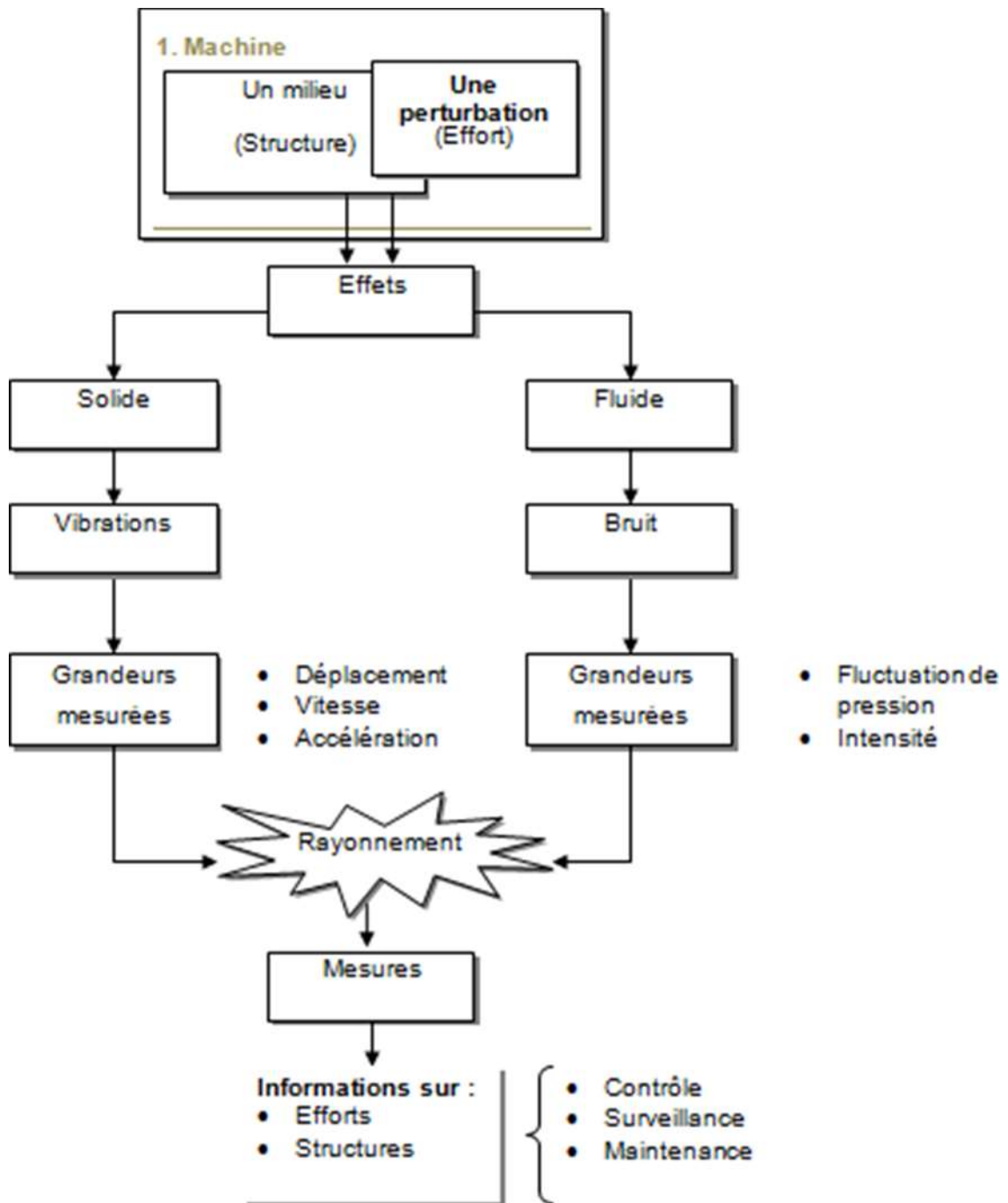


Figure 3.4 : organigramme de mesure des vibrations d'une machine tournante.

3.1.2. Matériel de mesure :

La première méthode de mesure des vibrations est l'homme. [20]

Cette méthode a ses limites dues à la précision de mesure de nos sens. C'est pourquoi on préférera utiliser un capteur.

Chapitre III : l'analyse vibratoire des principaux défauts



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

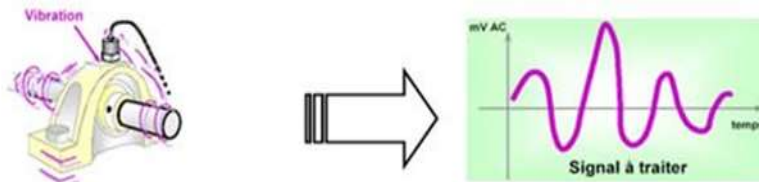


Figure 3.6 : mesures des vibrations par un capteur.

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. [21]

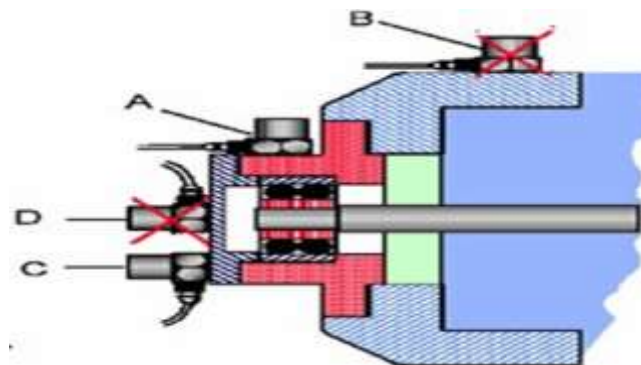


Figure 3.7 : le capteur.

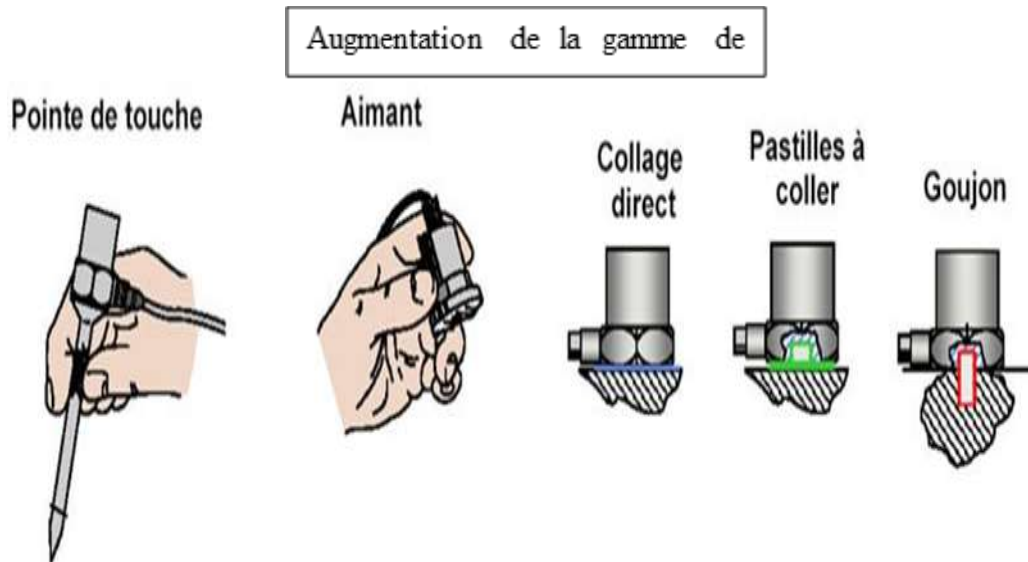


Figure 3.8 : différentes méthodes de fixation des capteurs.

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 dès l'origine du balourd, du désalignement, des moteurs imparfaits, des pics d'engrènement, etc. [22]

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 $F=M.r.\omega^2$. [23]

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

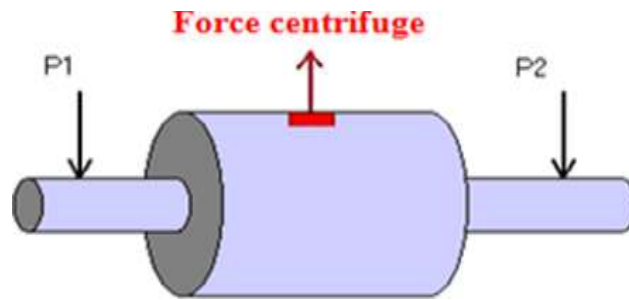


Figure 3.9 : balourd.

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°.

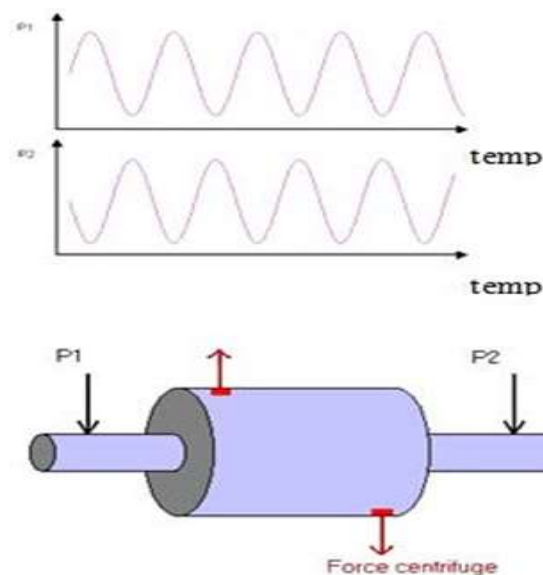


Figure 3.10 : Amplitudes du signal vibratoire de balourd.

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.

Chapitre III : l'analyse vibratoire des principaux défauts

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 :

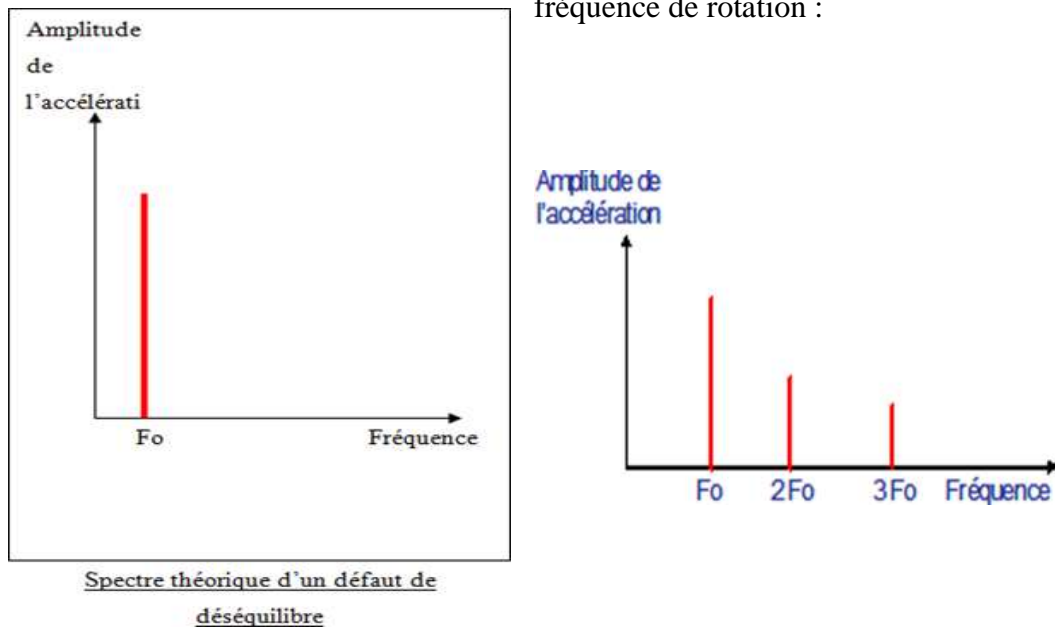
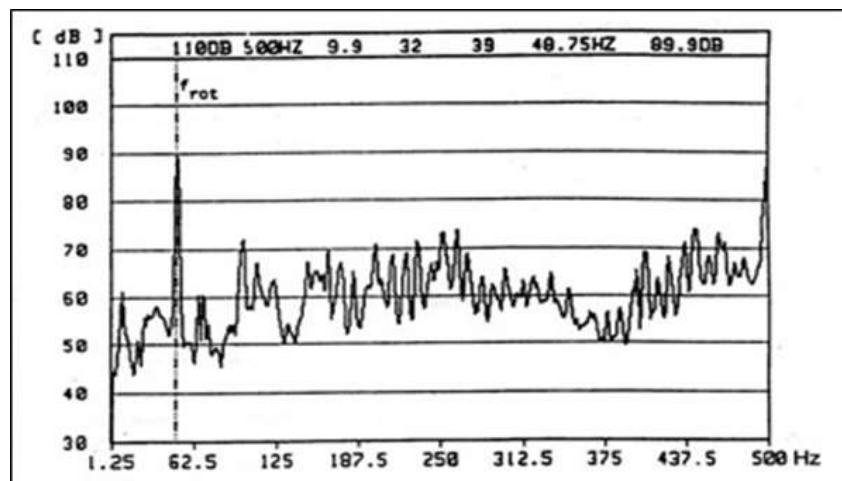


Figure 3.11 : spectre théorique d'un défaut de déséquilibre.

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.

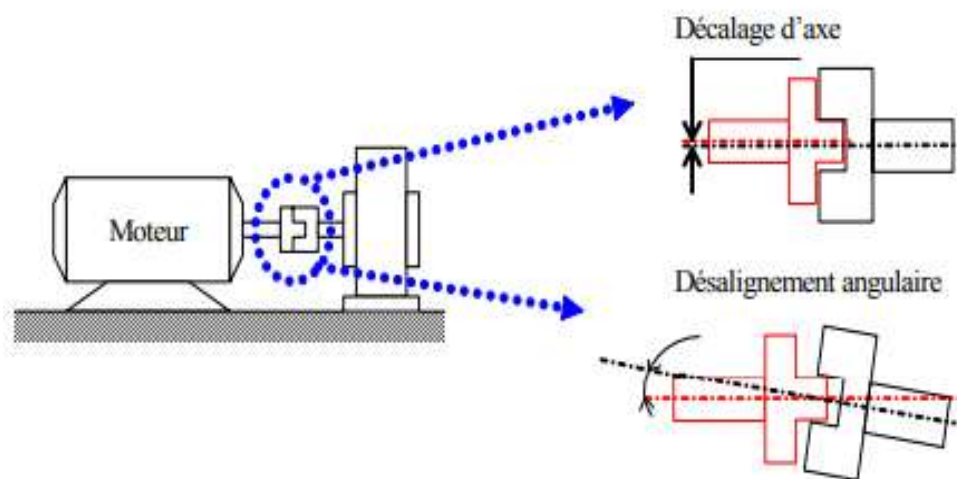


Figure 3.13: schéma du défaut d'alignement.

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 :

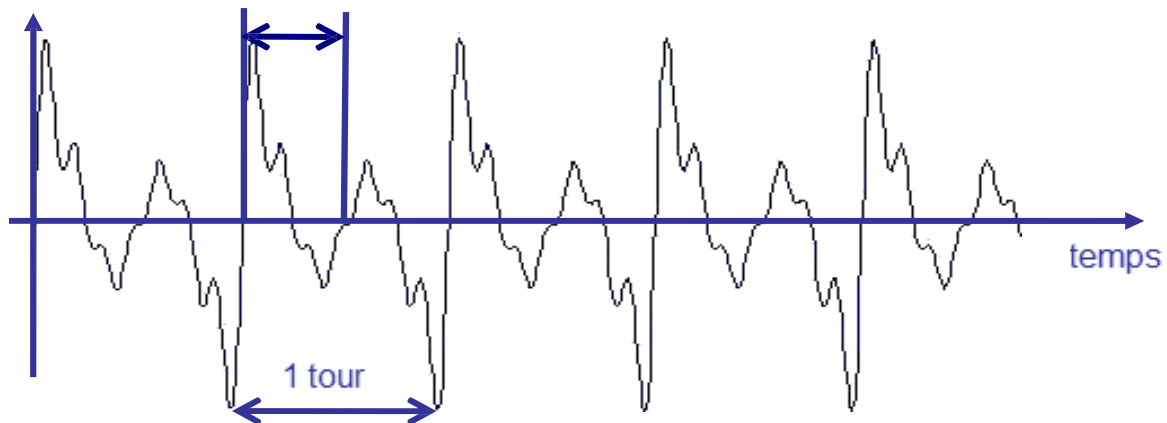


Figure 3.14 : schéma Le signal temporel d'un défaut de d'alignement

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).

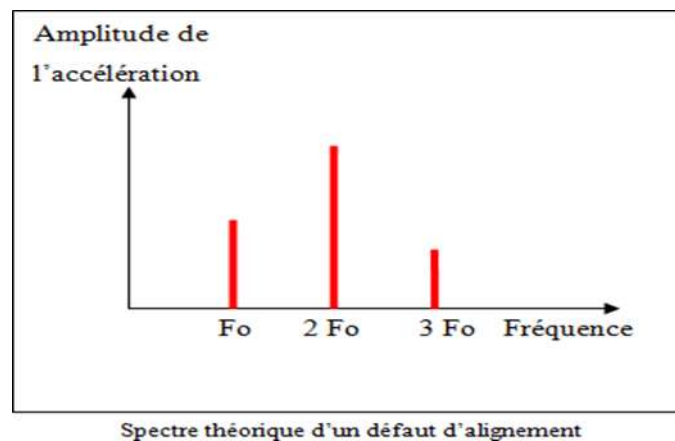


Figure 3.15 : Spectre théorique d'un défaut d'alignement.

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.

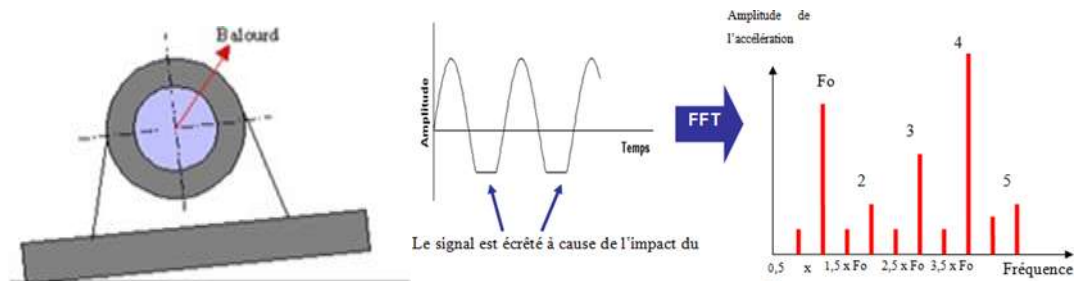
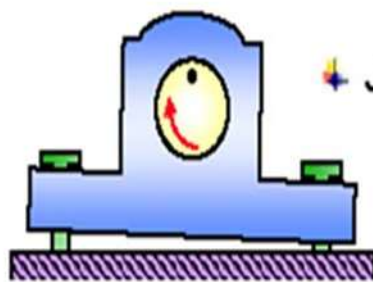


Fig3.16 désolidarisation de la structure par balourd. **Fig3.17** signal temporel et spectrale.

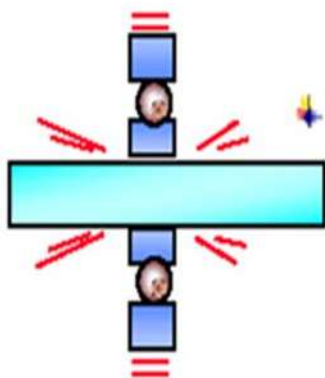
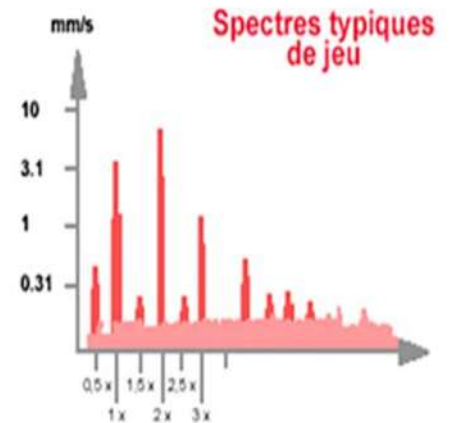
Le spectre fait apparaître des harmoniques de la fréquence de rotation, comme les autres défauts, mais également des sous-harmoniques à $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$ de la fréquence de rotation.

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.



Jeu de fondation :
 ✖ souvent de nombreuses harmoniques
 ✖ parfois des sous-harmoniques



Jeu d'arbre :
 ✖ souvent des séries de composantes sous-harmoniques $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots, 1 / \text{rpm}$

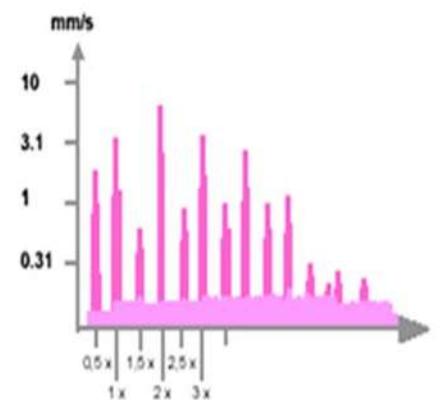


Figure 3.18 : schéma montrant la différence entre un spectre de la vitesse vibratoire d'un jeu de Fondation (desserrage) et d'un jeu dans les roulements.

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.

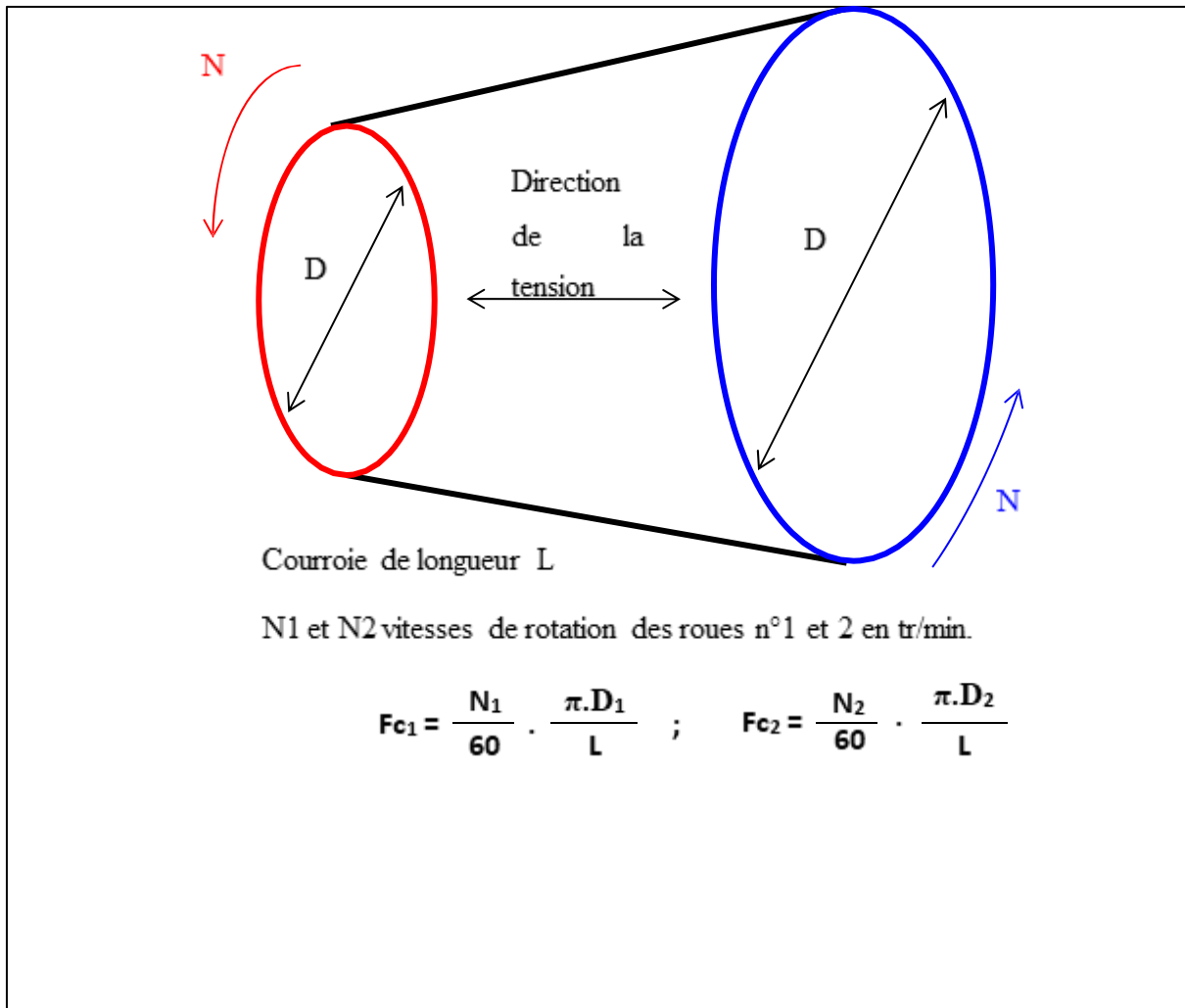


Figure 3.19 : roues courroies.

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.

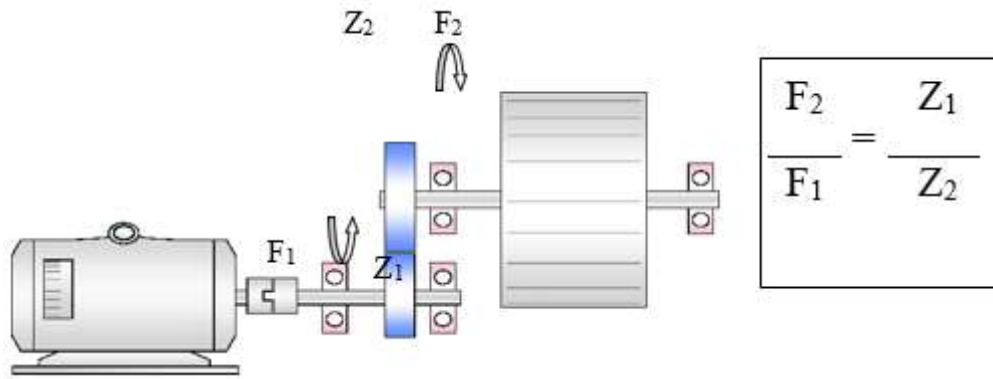


Figure 3.20 : Denture d'engrenages.

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

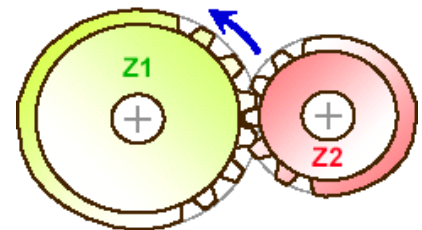
L'arbre n°2 tourne à la fréquence de rotation F_2 . Donc $F_{e2} = Z_2 \times F_2$.

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

$$F_{e2} = Z_2 \cdot (Z_1 \cdot F_1) / Z_1 = Z_1 \cdot F_1 = F_{e1}$$

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

[23]



$$F_e = Z_2 \cdot F_2 = Z_1 \cdot F_1$$

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.

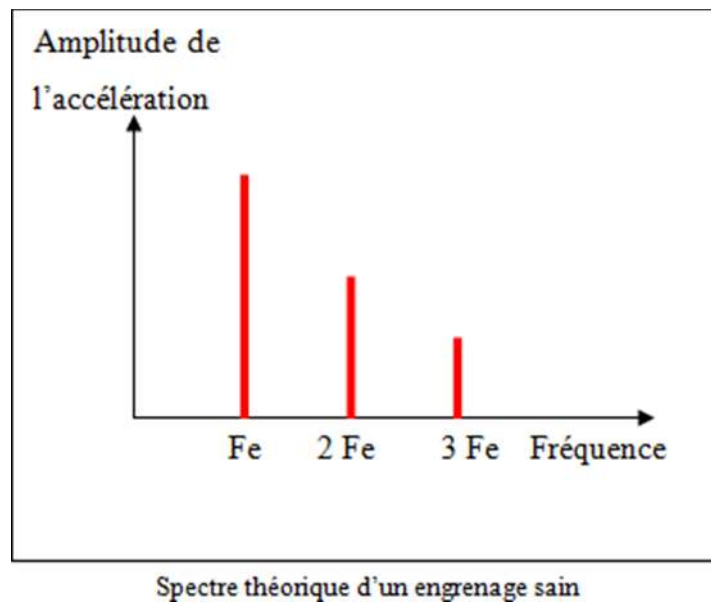


Figure 3.21 : Spectre théorique d'un engrenage sain.

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.

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

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.

Chapitre III : l'analyse vibratoire des principaux défauts

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.

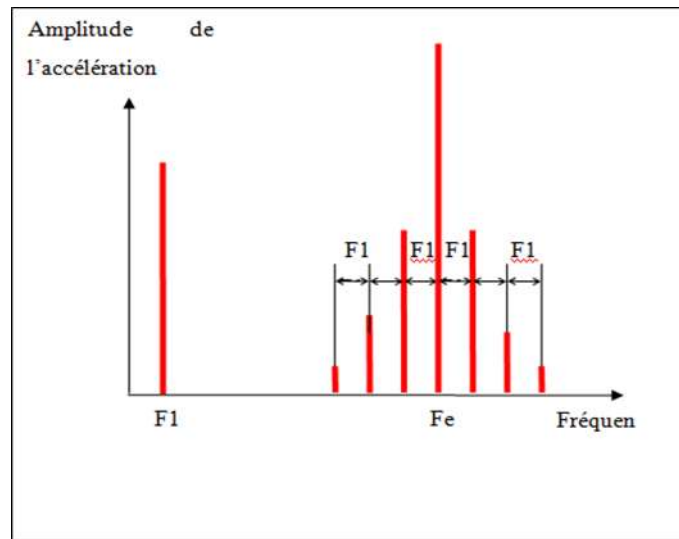


Figure 3.23 : Spectre théorique d'un engrenage présentant un défaut d'excentricité.

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.

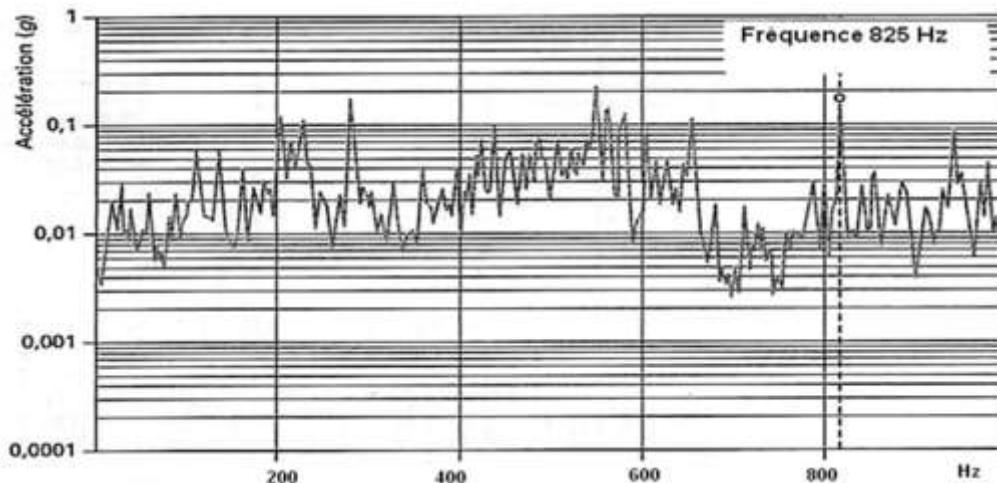


Figure 3.24: Spectre d'un engrenage.

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.

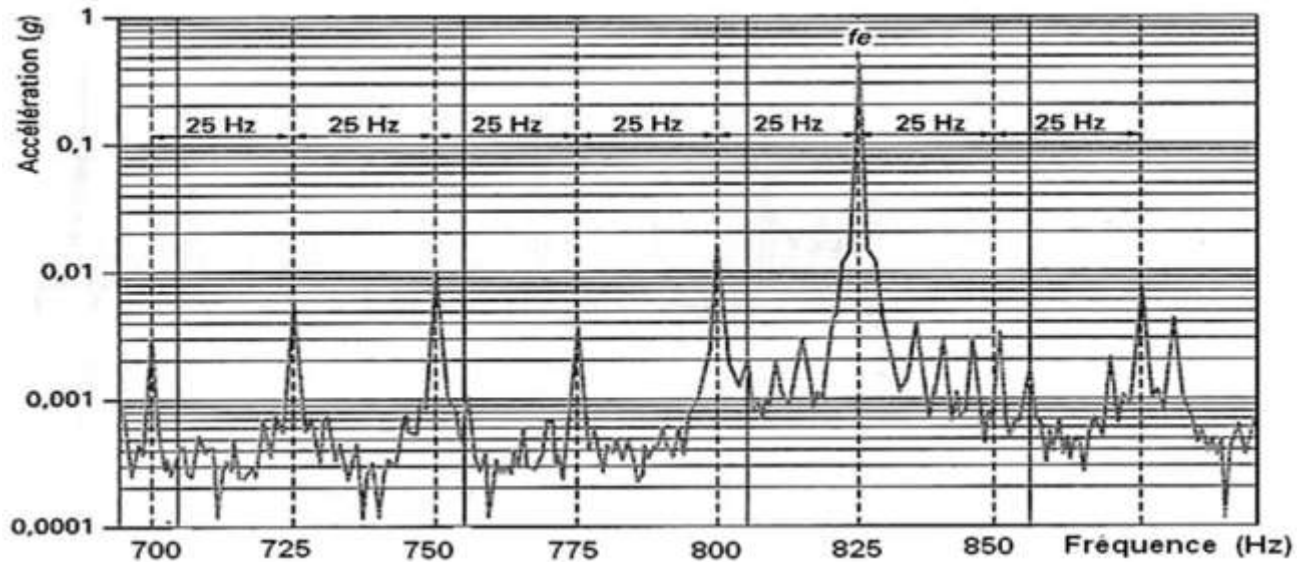


Figure 3.25 : Spectre d'un engrenage de 825 Hz.

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 engrenages, 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).

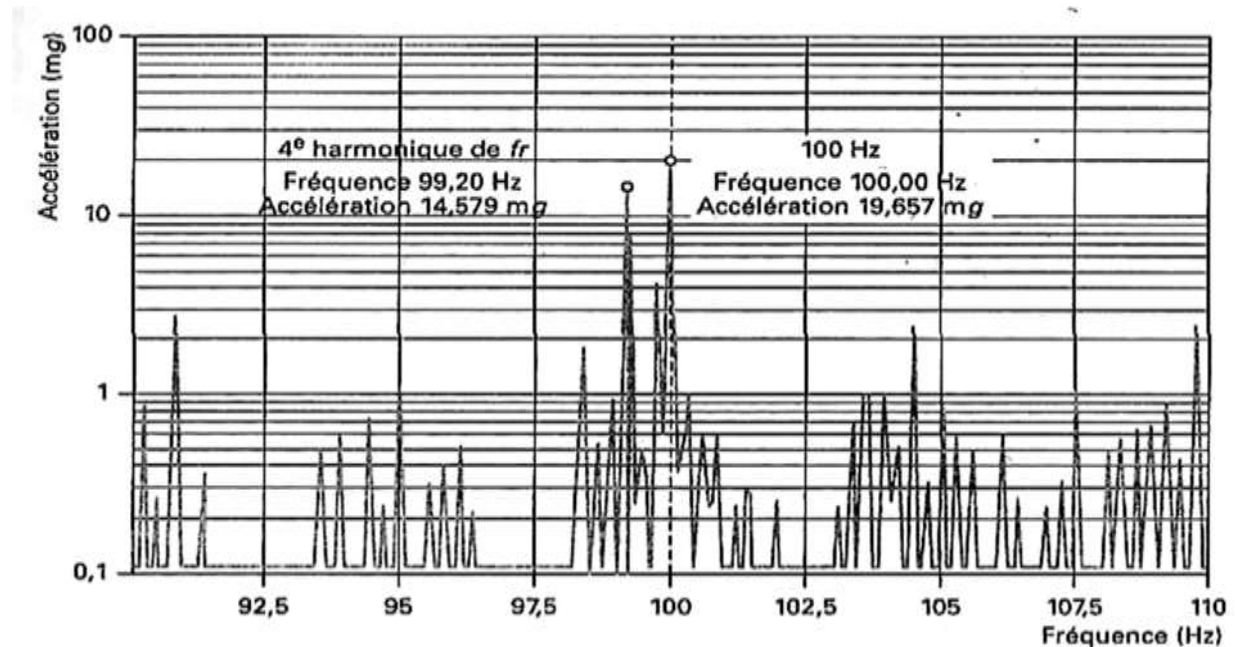


Figure 3.26 : Spectre d'un engrenage de 100 Hz.

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 100 Hz traduisant un défaut d'origine électromagnétique.

L'apparition d'un pic à 100 Hz 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'impulseur 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.

Chapitre III : l'analyse vibratoire des principaux défauts

Celles-ci, lorsqu'elles se retrouvent sur les rotors des pompes ou sur les aubages des turbines, peuvent implorer 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} = durée de vie en 10^6 tours

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

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. [23]

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.

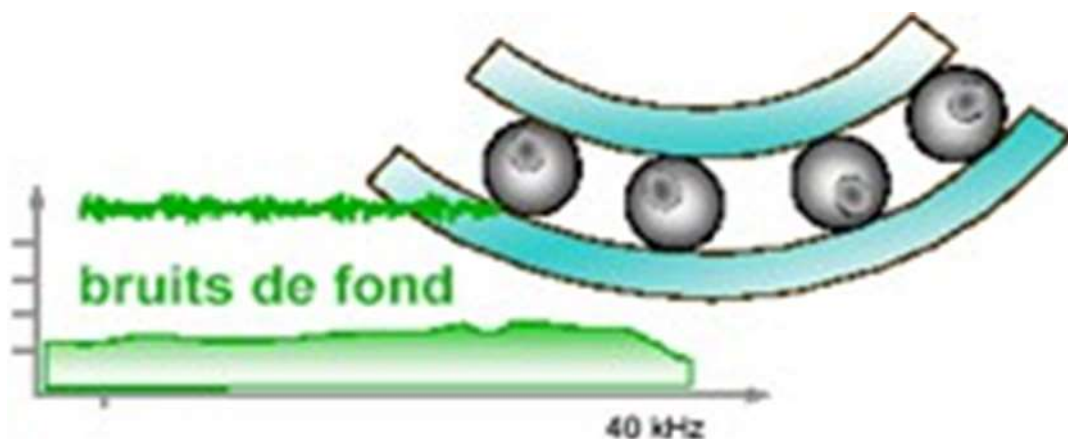


Figure 3.27 : schéma bruits de fond d'un roulement.

Chapitre III : l'analyse vibratoire des principaux défauts

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.

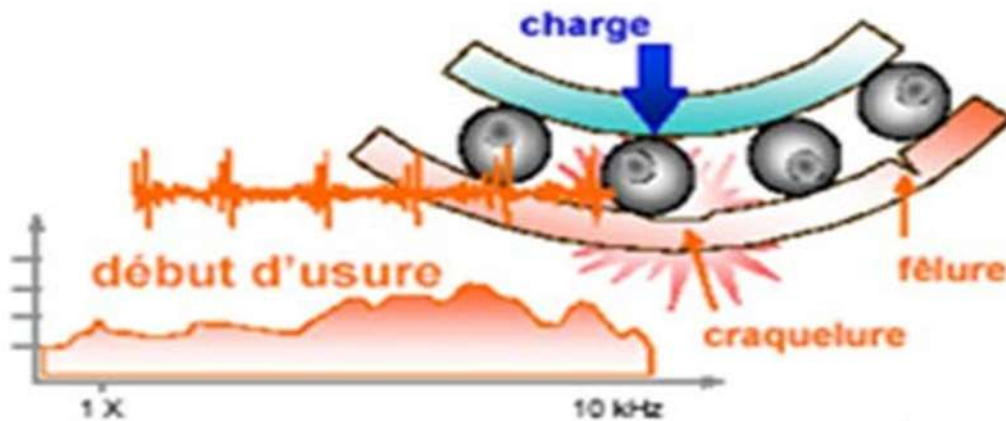


Figure 3.28 : schéma du début d'usure d'un roulement.

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.

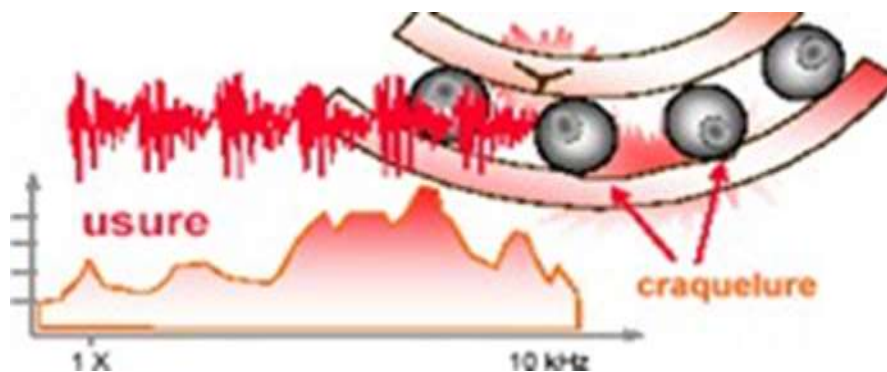
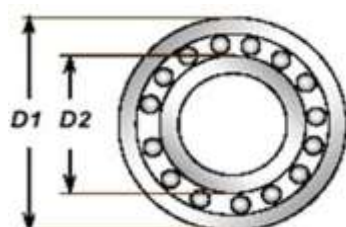


Figure 3.29 : schéma du début d'endommagement d'un roulement.

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.

Fréquences des impacts : f (Hz)

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

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

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

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

Angle de contact β

\varnothing de bille DB

\varnothing roulement DR

\varnothing primitif

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 :

$$FTF = 0,5 \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{DB}{DR} \cdot \cos \beta \right) \quad [23]$$

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.

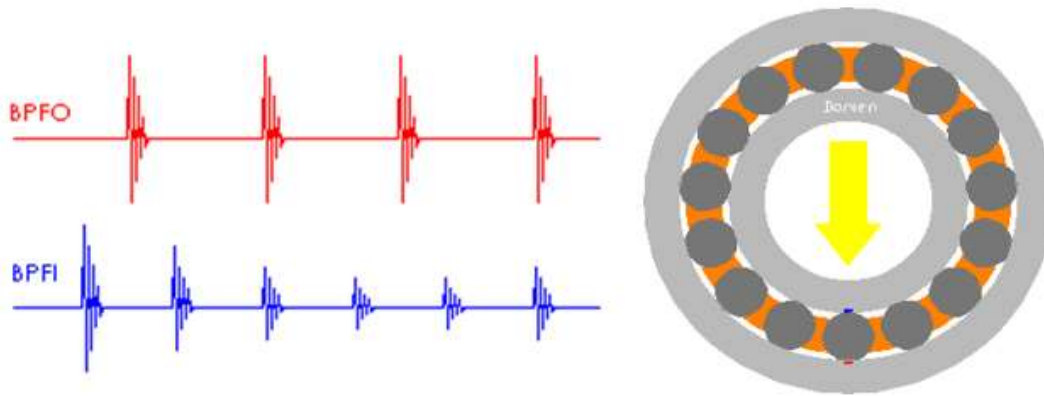


Figure 3.30 : Modulation d'amplitude de BPF1.

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.

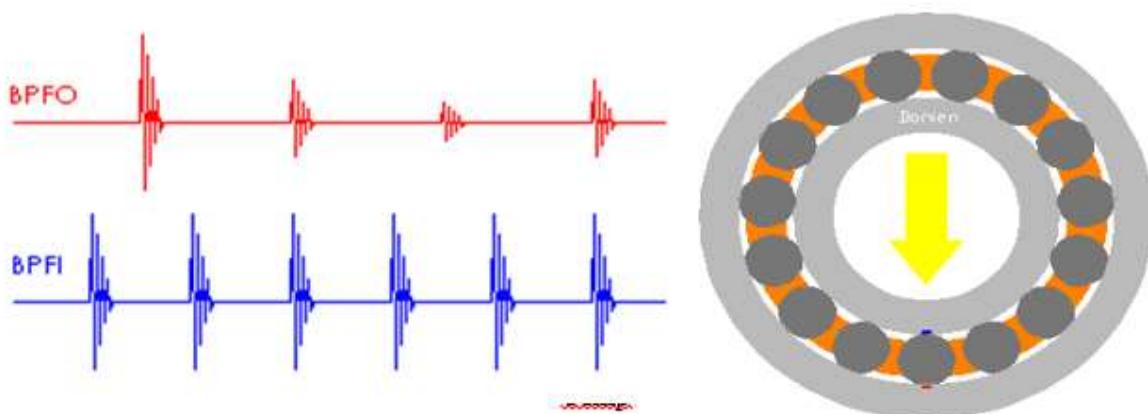


Figure 3.31 : Modulation de BPFO.

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 (Défaut = BPF1 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 (Défaut = BPF1 ou BPFO ou FTF ou BSF).

Chapitre III : l'analyse vibratoire des principaux défauts

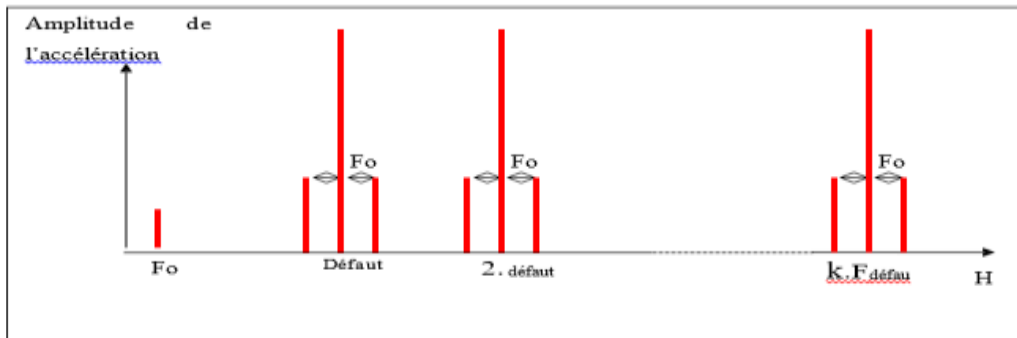


Figure 3.32: Spectre théorique d'un défaut d'écaillage d'un roulement.

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.

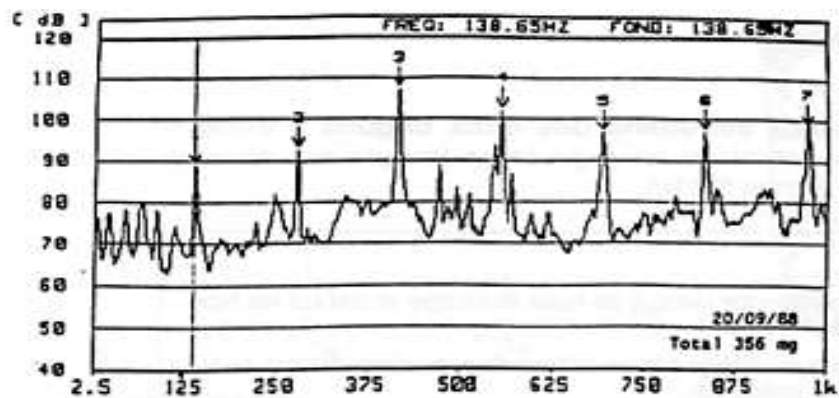


Figure 3.33 : Spectre de bague externe.

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.

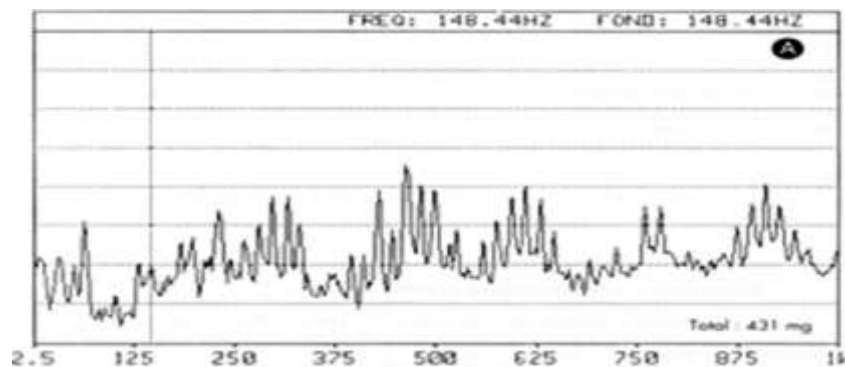


Figure 3.34 : Spectre de bague intérieure.

Chapitre III : l'analyse vibratoire des principaux défauts

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. [23]

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.

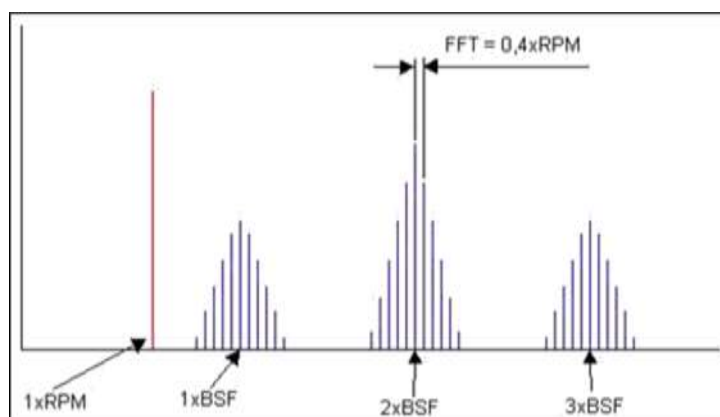


Figure 3.35 : Spectre théorique d'un défaut de bille d'un roulement.

Conclusion :

La connaissance des images vibratoires et la cinétique des machines tournantes permettent de définir les indicateurs de suivi. A cet effet, il existe certaines techniques de traitement de signal nécessaires au calcul de ces indicateurs, ainsi que la mise en évidence de ces images, et enfin de formuler un diagnostic sur l'état de l'équipement.

Chapitre 04 :

**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

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 développées, 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. [24] [25] [26]

4.1. 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 [27]. 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

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

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, extérieure et le bille. Ont été utilisés. Les données originales ont été divisées en segments de 4096 points (voir, figures 4.2 , 4.3 et 4.4).

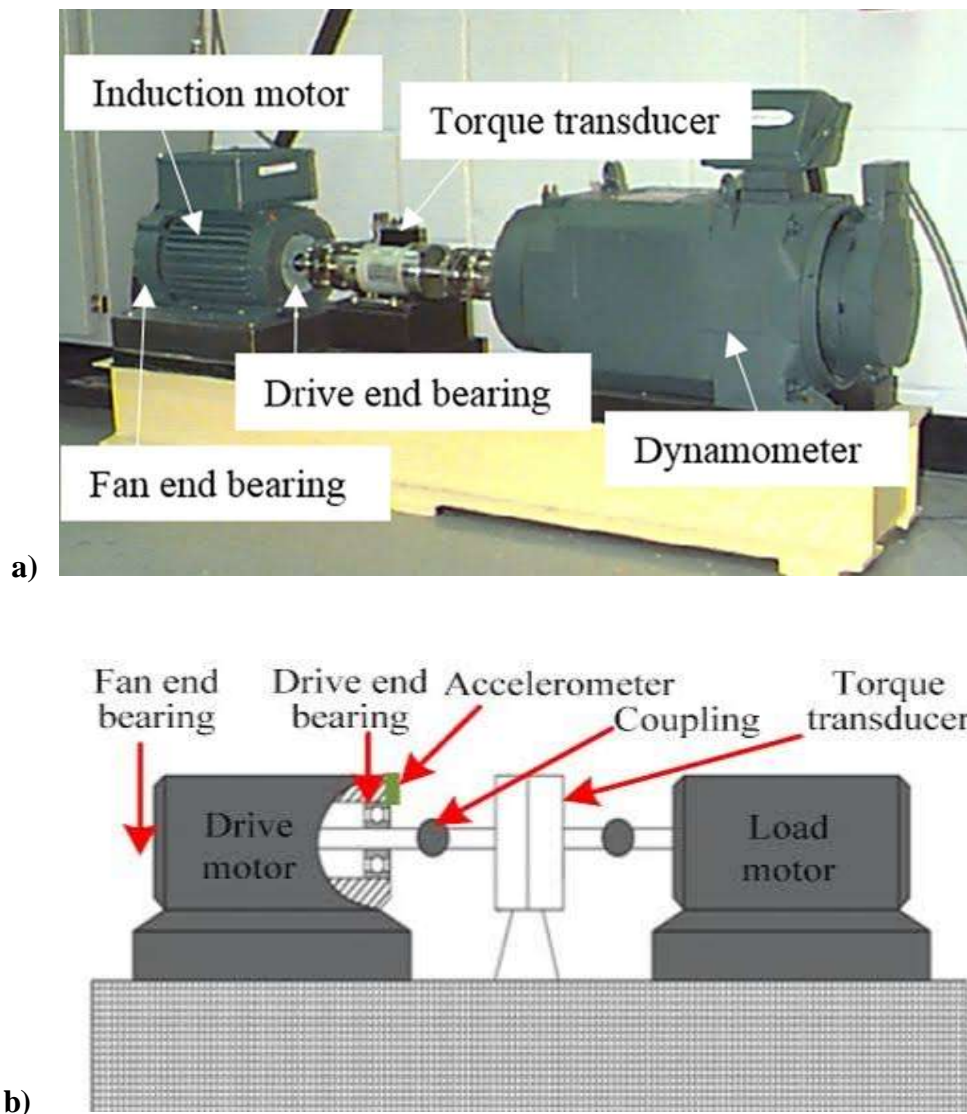


Figure 4.1 : a) Banc d'essais et b) son schéma synoptique.

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

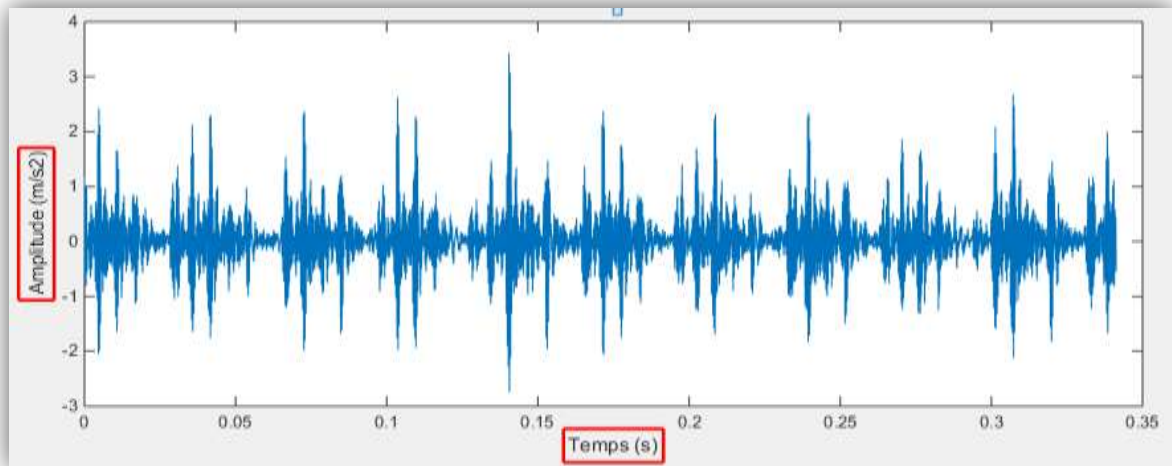


Figure 4.2 : Signal temporel du défaut de bague intérieure.

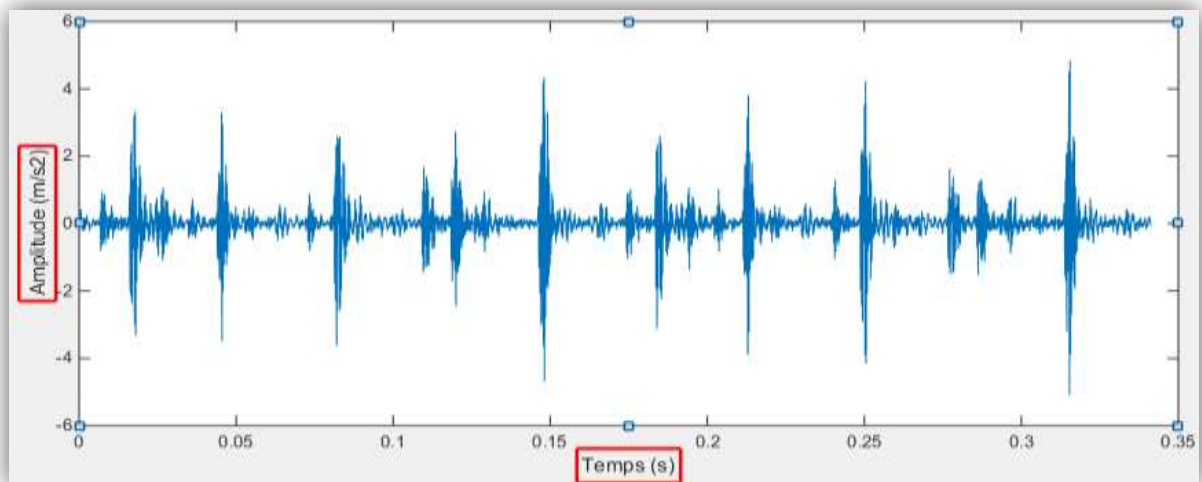


Figure 4.3 : Signal temporel du défaut de bague extérieure.

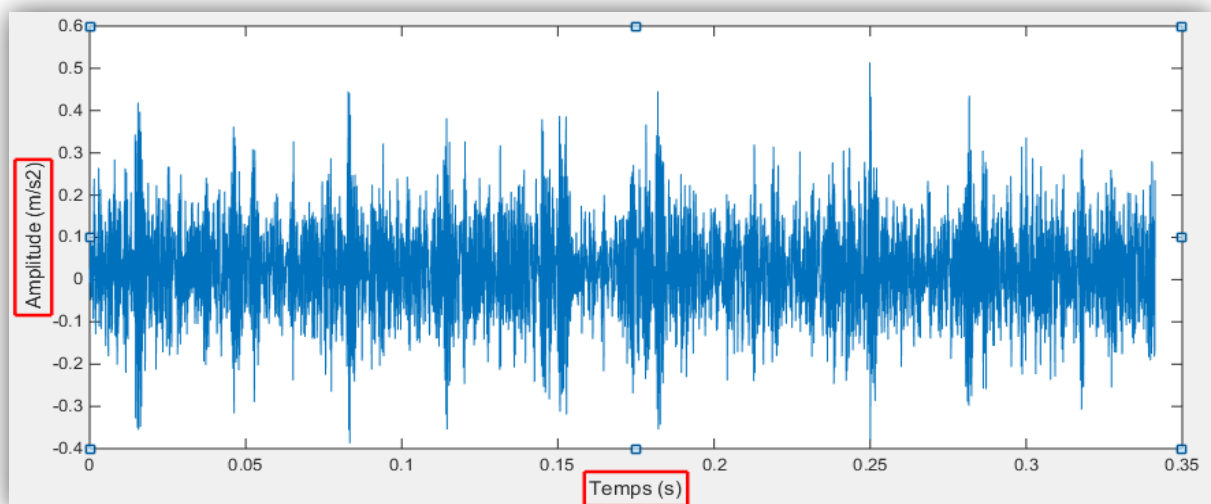


Figure 4.4 : Signal temporel du défaut de bille

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

4.2. 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):

$$S(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-i\omega t} dt$$

[27]

Où, w est la fréquence.

Le spectre des défauts des bagues intérieure et extérieure est représenté sur les Figures 4.5 , 4.6 et 4.7. La composante dominante sur ces spectres et la fréquence de résonance (2880Hz) pour les bagues intérieure et extérieure, et fréquence de résonance (3210Hz) pour le bille. 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.

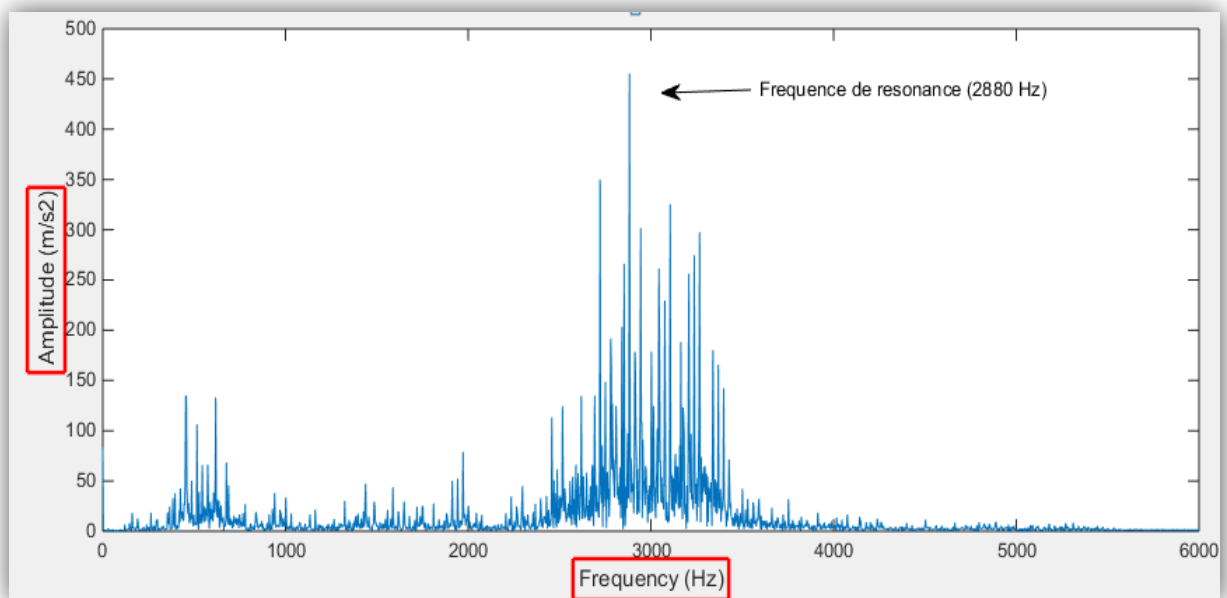


Figure 4.5 : Spectre du défaut de bague intérieure.

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

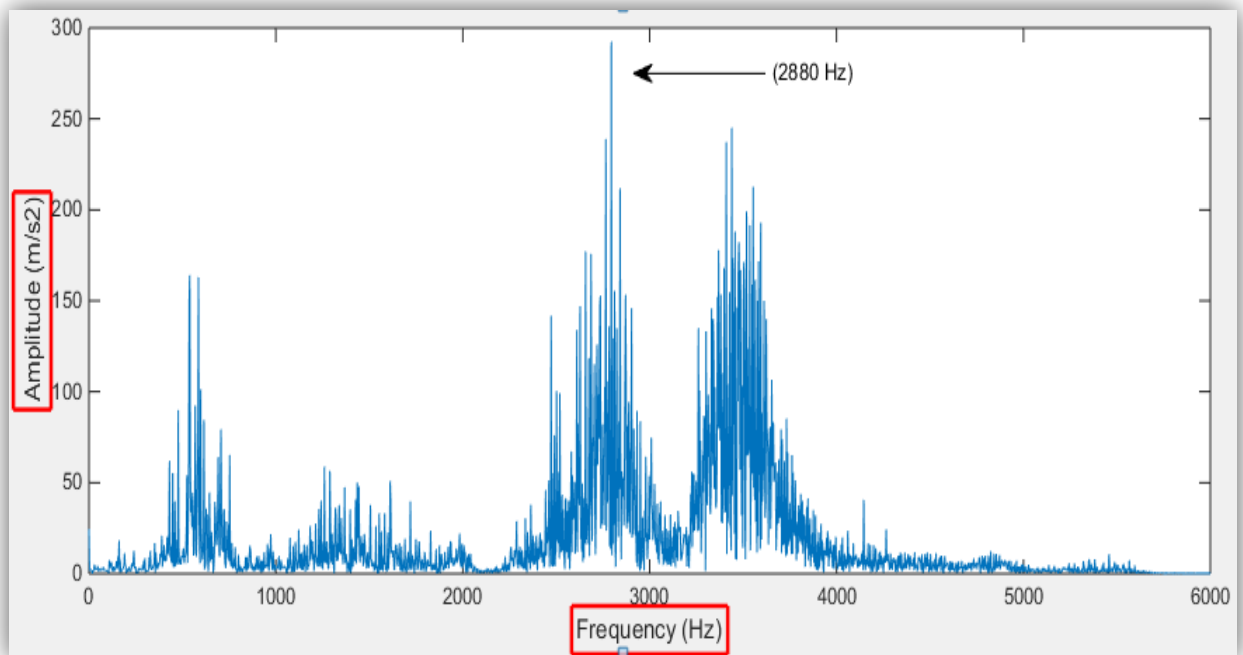


Figure 4.6 : Spectre du défaut de bague extérieure.

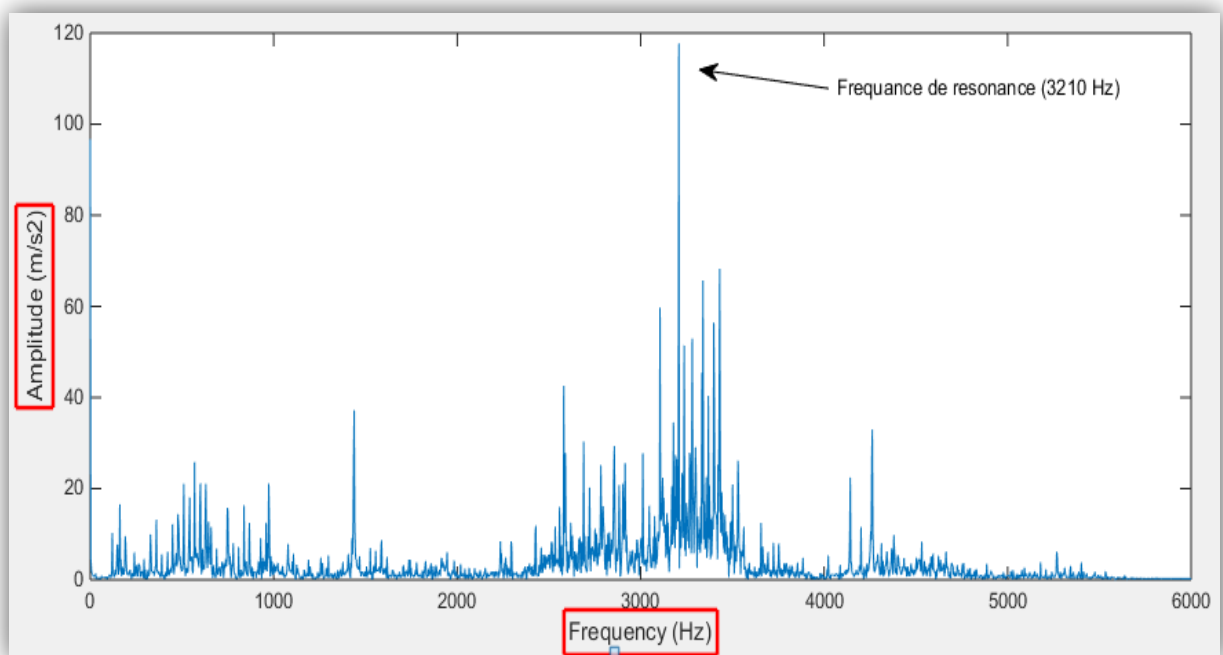


Figure 4.7 : Spectre du défaut de bille.

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

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.

4.3. 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 :

$$\tilde{s}(t) = \frac{1}{\pi} \int \left(\frac{s(\tau)}{t-\tau} \right) dt \quad [28]$$

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

$$\hat{s}(t) = s(t) + j\tilde{s}(t) \quad [28]$$

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

$$|\hat{s}(t)| = \sqrt{s(t)^2 + \tilde{s}^2} \quad [28]$$

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 figures. 4.10 A, 4.11 a, 4.12 a et 4.10 b, 4.11 b, 4.12 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 pour les bagues intérieur et extérieur et le filtre [3000_3500] pour filtre signal temporel de bille, les spectres représentent de nombreuses composantes fréquentielles, à la fréquence de rotation (30 Hz), également aux fréquences caractéristiques (161, 107 et 132 Hz) et leurs harmoniques. Ces fréquences indiquent clairement des défauts des bagues intérieure et extérieure.

Les figures. 4.8, 4.09, 4.10 représentent respectivement les signaux filtrés des défauts intérieurs, extérieur et la bille.

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

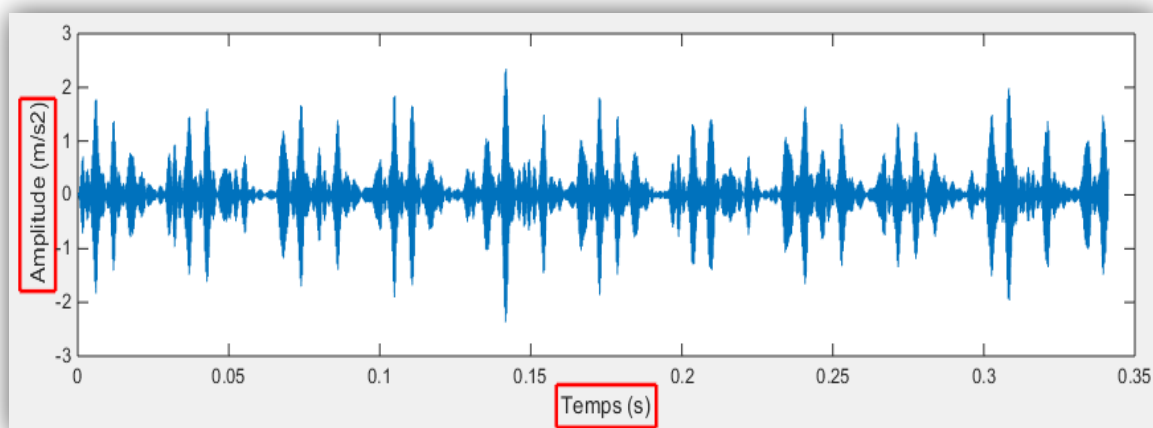


Figure 4.8 : Signal filtre du défaut de bague intérieure.

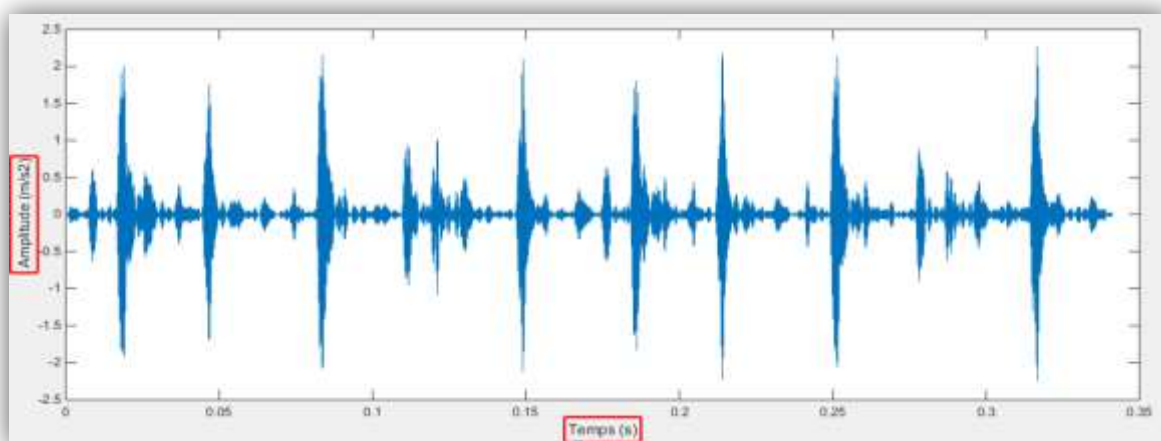


Figure 4.9 : Signal filtre du défaut de bague extérieure.

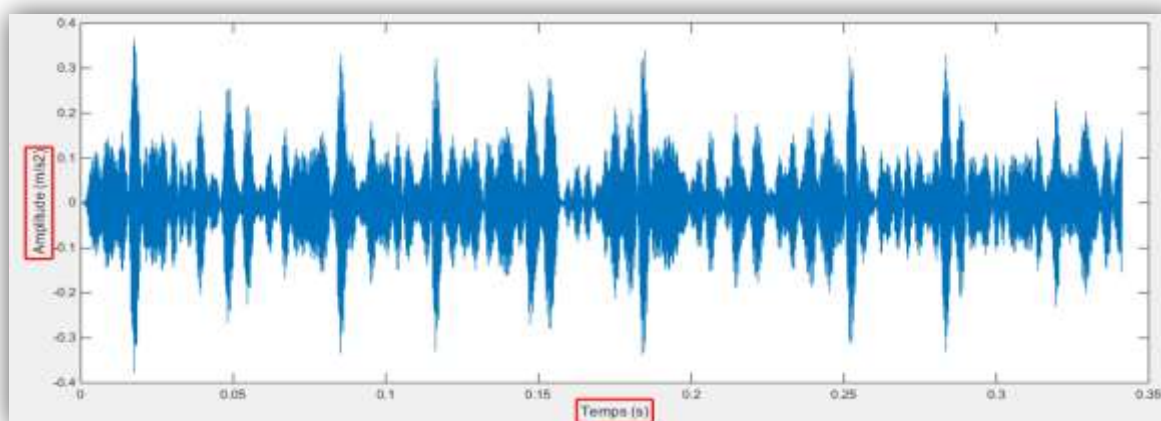
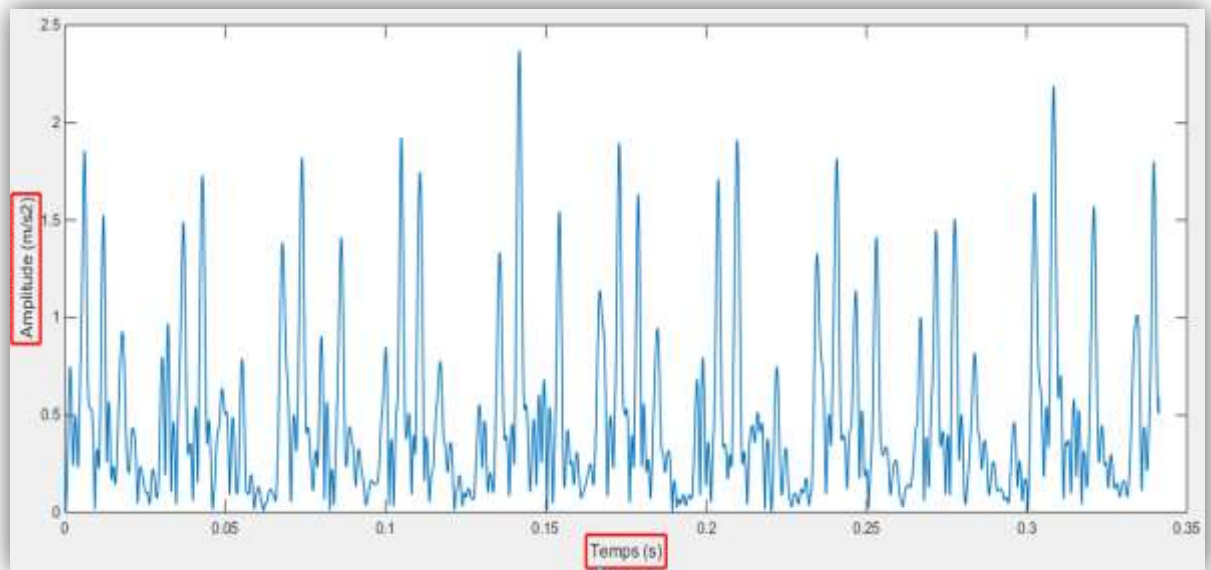


Figure 4.10 : Signal filtre du défaut de bille.

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

a)



b)

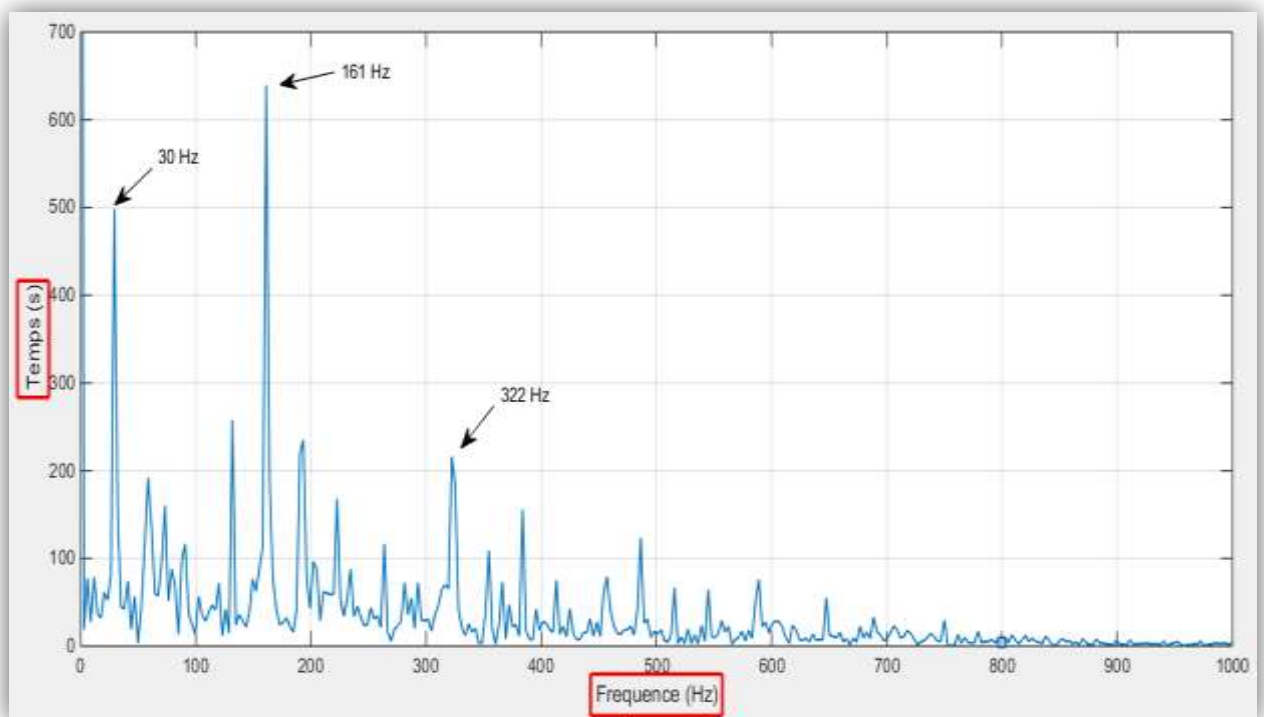
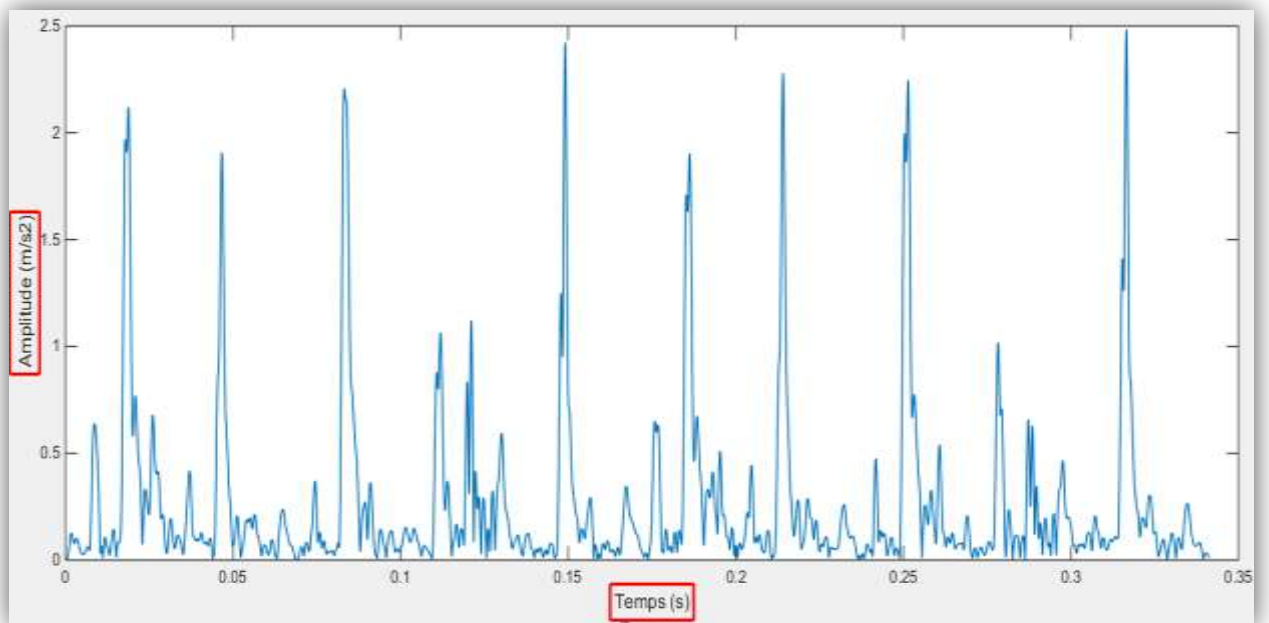


Figure 4.11 : (a) Enveloppe du défaut de bague intérieure et (b) son spectre.

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

a)



b)

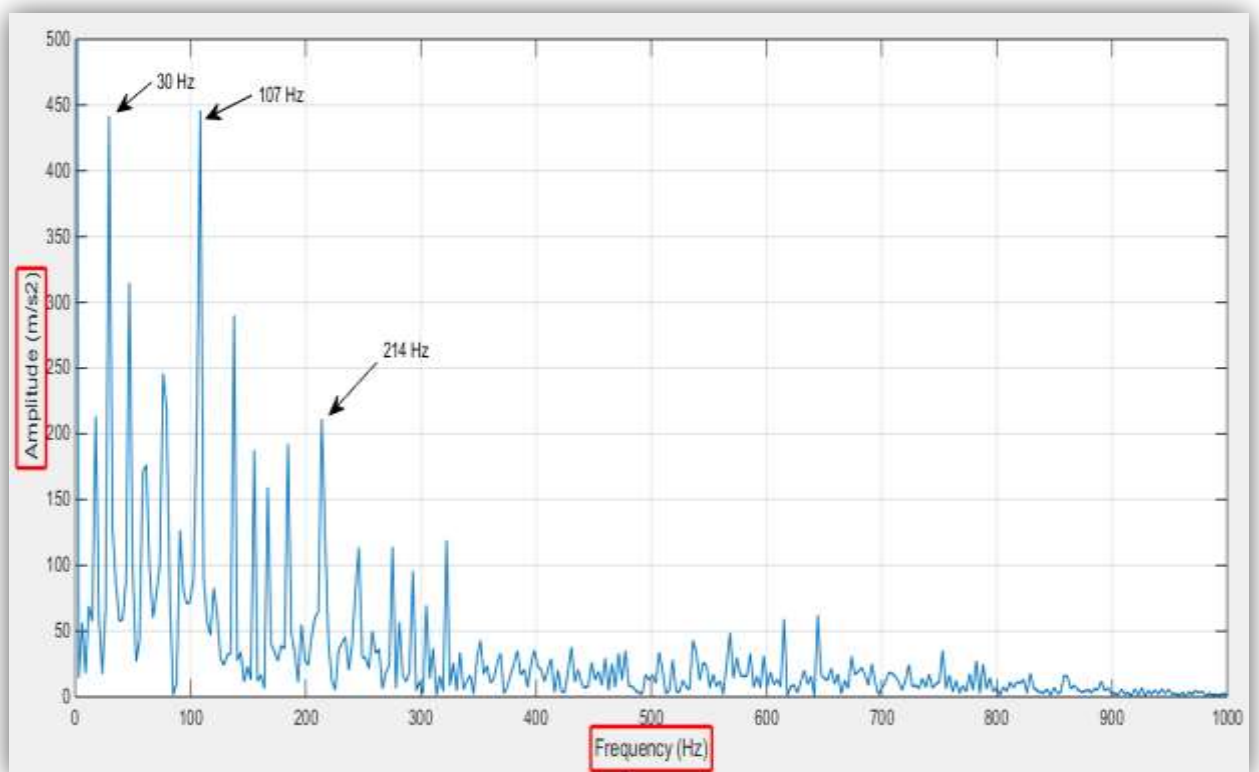
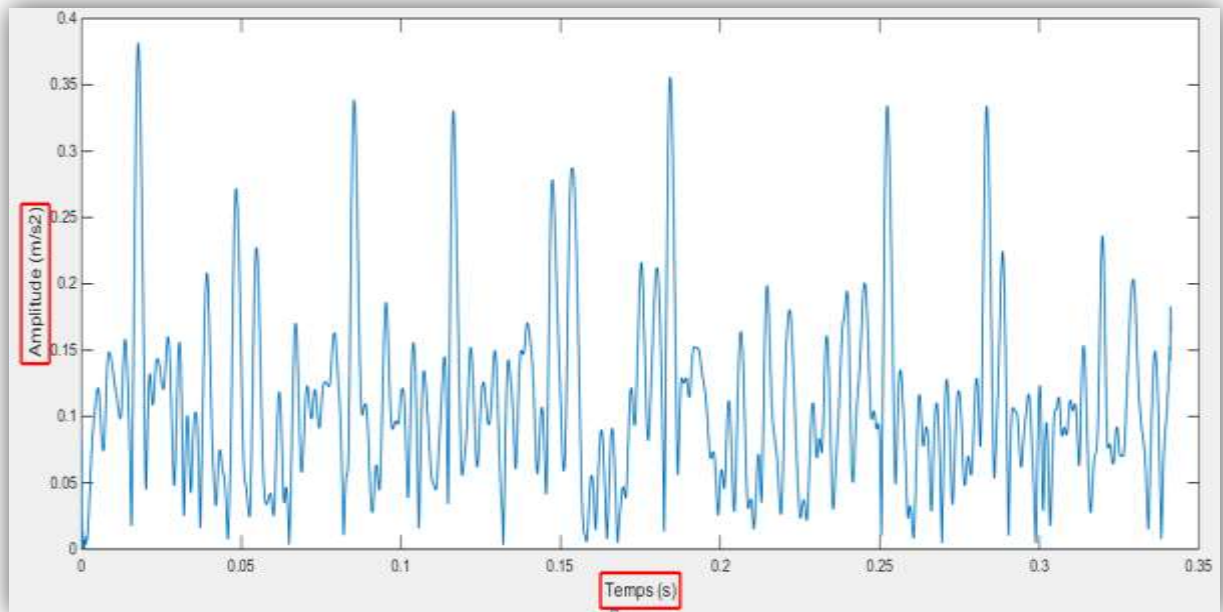


Figure 4.12 : (a) Enveloppe du défaut de bague extérieure et (b) son spectre.

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

a)



B)

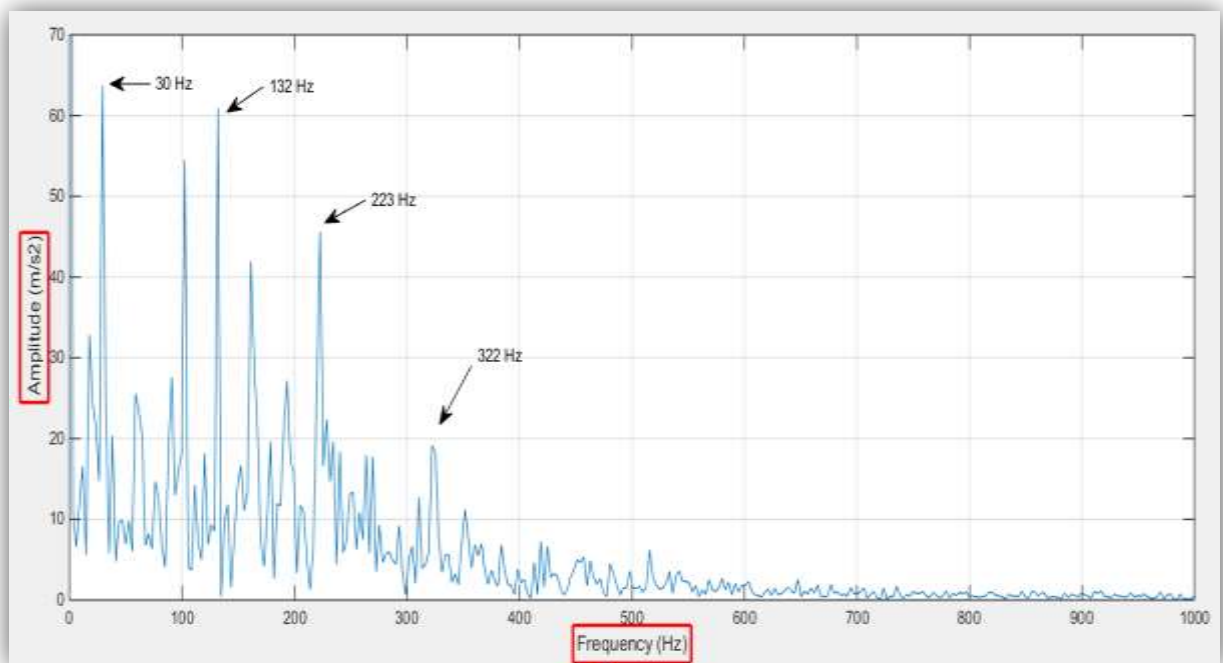


Figure 4.13 :(a) Enveloppe du défaut de bille et (b) son spectre.

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

Conclusion :

Dans ce partie , 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 trois défauts séparés sur les bagues intérieure , extérieure et la bille 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 clair sur le spectre.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Au cours de ce travail, nous avons mené une étude 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 trois défauts séparés en l'occurrence ; défaut de bague intérieure, bague extérieure et le bille.

Ce mémoire a tenté de présenter le signal de vibration et son analyse pour une bonne surveillance du roulement.

La détermination de la loi de la détérioration des roulements revêt grande importance dans le domaine des machines tournantes, pour la maintenance.

La première partie a été consacrée à l'étude théorique de notion fondamentale sur la maintenance et aussi étude consiste à faire en revue bibliographique liée au domaine du diagnostic des machines tournantes.

La deuxième partie rappelle les principes de base de l'analyse vibratoire appliquée à la maintenance conditionnelle, les notions de base de dynamique appliquée aux milieux continus. Leurs applications à des systèmes réels sont brièvement exposées.

La troisième partie de notre travail a permis de donner une idée sur la conception et les différents types des défauts du roulement,

La quatrième partie constitue la fin de ce travail, représente l'étude des défauts des roulements par analyse spectrale et l'enveloppe.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [01] :Venkatasubramanian V, Rengaswamy R. Yin K., Kavuri S., "a review of process fault detection and diagnosis part quantitative model-based methods", Computer and Chemical Engineering, 2003.
- [02] : Zwingelstein, G., (1995).Diagnostic des défaillances : Théorie et pratique pour les systèmes industriels, Editions Hermès.
- [03] : BOUTICHE hamza(2015) « modélisation et diagnostic d'un réducteur de vitesse à un seul étage par analyse cepstrale »Thèse de master présenté à UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES
- [04] : Boulenger A, Pachaud C : « Aide mémoire : Surveillance des machines par analyse des vibrations ». Edition Dunod, Paris 2009.
- [05] :M. ZEMOURI, « contribution a la surveillance des systèmes de production a l'aide desréseaux de neurones dynamiques : application a la maintenance »,Thèse de doctorat présenté à l'université de Franche-Comte, France.2003.
- [06] :DrRAHMOUNEChemseddine (2011), « Analyse et traitement du courant statoriquepour ladétection des défauts dans les systèmes électromécaniques ».Mémoire de magister présentéUNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES.
- [07] : Frank, P.M., (1990).Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge Based Redundancy – A survey and New Results, Automatica, Vol. 26, pp. 459 474.
- [08] :Leo H. Chiang, Evan L. Russell, et Richard D. Braatz (2001). Fault
- [09] :R. Isermann (1993). Fault diagnosis of machines via parameter 76 estimation and knowledge processing - tutorial paper. Autornatica, 29(4) :813-835, 1993.
- [10] : J. Gertler (1997).Fault detection and isolation using parity relations. Control Engineering Practice, 5(5) :653–661, 1997.
- [11] :Dubuisson, B., E. Boutleux, P. Dague, T. Denoeux, E. Didelet, Y. Gandvalet et M. Masson (2001).Diagnostic, Intelligence Artificielle et reconnaissance de formes, Ed. Hermes.
- [12] : buvietphuong (2007).« Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite. Application a l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur a vide ». Thèse de doctorat l'INPGRENOBLE .
- [13] :Mr. TOUAFEK Ishak « Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L'EMD et des ondelettes (WT) »Mémoire de magister présenté à l'UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF UFAS (ALGERIE). [23] Drouiche K., « Quelques techniques du traitement du signal pour la maintenance prédictive », Thèse de l'ENST de Paris, 1993.

Références bibliographiques

- [14] :fran François Lafleur «L'organisation d'un programme de maintenance prédictive»2003
- [15]:BM 5 145 Technique de l'ingénieur «Analyse vibratoire des machines tournantes»
- [16] Augeix D Technique de l'ingénieur (traité génie mécanique – analyse vibratoire.
- [17] Document réalisé par : Jacky DUMAS (01dB-STELL (Groupe MVI technologies Version Février 2001.
- [18]: Serge Dos Santos «COURS DE TRAITEMENT DU SIGNAL» École Nationale d'Ingénieurs du Val de Loire Année 2008-2009.
- [19] : Université de Caen « signaux aléatoire »
- [20]: Claire BRENEUR, «éléments de maintenance préventive des machine tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements», thèse de l'université de l'INSA de Lyon, année 2002.
- [21]: Technique de l'ingénieur « Essais de vibrations, Mesures et exploitation des résultats »
- [22] CHIEMENTIN Xavier thèse de doctorat en mécanique « Localisation et 75 quantification des sources vibratoires dans le cadre d'une maintenance préventive conditionnelle en vue de fiabiliser le diagnostic et le suivi de l'endommagement des composants mécaniques tournants : application aux roulements à billes » octobre 2007.
- [23] Cours des principaux défauts.
- [24] D. Baillie and J. Mathew, “Diagnosing rolling element bearing faults with artificial neural networks”, Acoustics Australia, vol. 22, pp. 79-84, 1994.
- [25] 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.
- [26] H. Yang, “Automatic fault diagnosis of rolling element bearings using wavelet based pursuit features”, Ph.D thesis, Queensland University of Technology, Australia, 2004.
- [27].K.A. Loparo, Bearings vibration data set, Case Western Reserve University, (<http://www.eecs.cwru.edu>), 2003.
- [28] 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.