

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

Influence de couple et la gravité du défaut sur Les indicateurs scalaires

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : MECATRONIQUE

PRESENTE PAR : BOUMAZA FAOUZI

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Dr. Younes R.

DEVANT LE JURY

Pr. BOUCHELAGHEM ABDELAZIZ

Pr

U. Badji Mokhtar Annaba

Pr. LAOUAR LAKHDAR

Pr

U. Badji Mokhtar Annaba

Dr. BENGHERSALLAH MOHIEDDINE

MCA

U. Badji Mokhtar Annaba

Dr. MEKHILEF SLIMANE

MCA

U. Badji Mokhtar Annaba

Mr. MANSOURI MOHAMED

MAA

U. Badji Mokhtar Annaba

Année: 2015/2016



Remerciement

Au nom de Dieu et après grande merci à notre dieu:

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein de l'université de Badji Mokhtar Annaba, Département de Génie MEACANIQUE, option MECATRONIQUE.

Je voudrais d'abord remercier tous les enseignants dans le département pour nous avoir donné la connaissance nécessaire au cours des dernières années.

Je tiens aussi à remercier exceptionnellement mon directeur de mémoire Dr. Younes Ramdan, pour accomplir ce travail.

Je souhaite associer ces remerciements à mes collègues, mes amis de l'université et d'ailleurs et tous qui sont dans mon cœur, et plus particulièrement mon chers parent, pour ses sacrifices.



Dédicace

Je dédie ce travail :

A ma très chère Mère et à mon cher père

A mes chers frères

Badri, Tarek, Abdelfateh, Abdelaziz,

Mohammed, sa femme M. et leur fille Nourhanne

R. et son mari Naim, et leur fils Khaled

Et à tous famille Boumaza

Et mon très cher Amies

Amirouch, Adel, Nazim, Alaeddine, Anis, Hamza, Ilyes, Houssine,

A tous qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail

Et sur tout mon encadreur

Dr. Younes Ramdane

Résumé

Le travail présenté dans cette mémoire entre dans le cadre de l'optimisation de méthodes pour la détection des défauts induisant des chocs.

L'étude est consacrée à l'identification des défauts dans les machines tournantes par analyse vibratoire, avec les méthodes temporelle basée sur les indicateurs scalaires pour le suivie et la localisation des défauts qui peuvent être générés sur les composantes de roulement (la bille, la bague extérieur et la bague intérieur), pour différentes conditions d'essai (diamètre de défauts, différentes charges et différentes fréquence de rotation).

Le but 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.

ملخص

العمل المقدم في هذه المذكرة هو جزء من الاستفادة المثلى من وسائل الكشف عن العيوب التي تحدث صدمات.

خصت هذه الدراسة للتعرف على العيوب في الآلات الدوارة باستعمال التحليل الاهتزازي الذي يعتمد على الطرق الزمنية بناء على المؤشرات العددية للكشف وتحديد مكان الأعطاب التي يمكن أن تتولد على عناصر أو مكونات المدحرجات المتداولة (الكرة، وحلقة الطوق الخارجي والداخلي)، في مختلف الحالات (قطر العطب، حمولات مختلفة وسرعات دوران مختلفة) الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير هذه المتغيرات على حساسية المؤشرات العددية، التي هي أدوات لتشخيص الأعطال التي تمت محاكاتها على المدحرجات.

Abstract

The work presented in this memory is part of methods optimization for the detection of defects inducing shocks.

The study is devoted to the identification of defects in rotating machinery using vibration analysis, with temporal methods based on the scalar indicators for the detection and localization of defects that can be generated on the bearing elements (ball, the outer ring and inner ring), for different test conditions (defects diameter, different loads and different rotation frequency).

The aim of this work is to study the influence of raised parameters on the sensitivity of scalar indicators, which are support tools for simulated fault diagnosis on bearings.

Listes des figures

Chapitre 1

Figure 1.1. Optimisation de la politique de maintenance.....	4
Figure 1.2. Taux de défaillance en fonction du temps (Courbe de baignoire).....	5
Figure 1.3. Les différents types de maintenance.....	6
Figure 1.4. Exemple de la thermographie infrarouge.....	9
Figure 1.5. Composition d'une machine tournante.....	13
Figure 1.6. Balourd statique.....	13
Figure 1.7. Balourd dynamique.....	14
Figure 1.8. Délignage angulaire.....	14
Figure 1.9. Délignage axial (Radial).....	15
Figure 1.10. Types d'engrenages.....	15
Figure 1.11. Eléments d'un roulement.....	17

Chapitre 2

Figure 2.1. vibration harmonique.....	26
Figure 2.2. vibration périodique.....	27
Figure 2.3. vibration aperiodique.....	28
Figure 2.4. Les paramètres caractéristiques des vibrations.....	29
Figure 2.5. Grandeurs d'une vibration.....	30
Figure 2.6. Accéléromètre (capteur piézo-électrique).....	32
Figure 2.7. Vélocimétrie (capteur électrodynamique).....	33
Figure 2.8. Capteur de déplacement.....	34
Figure 2.9. Schéma d'une chaîne de mesure à courants de Foucault.....	35
Figure 2.10. Signal temporel modélisé, son spectre.....	37
Figure 2.11. Signal vibratoire réel, son spectre.....	38
Figure 2.12. Types de signaux vibratoires.....	38

Chapitre 3

Figure 3.1. Fenêtres du logiciel de Matlab pour calculé les indicateurs scalaires.....	46
Figure 3.2. Le banc d'essai.....	47
Figure 3.3. Coupe d'un moteur.....	47
Figure 3.4. Evolution du facteur crête et le kurtosis en fonction de diamètre de défaut sur la bille.....	50
Figure 3.5. Evolution de la valeur crête et le RMS en fonction de diamètre de défaut sur la bille.....	50
Figure 3.6. Evolution des indicateurs scalaires en fonction de diamètre de défaut sur la bague intérieure.....	52
Figure 3.7. Evolution du facteur crête et le kurtosis en fonction de la charge.....	52
Figure 3.8. Evolution de la valeur crête et le RMS en fonction de la charge.....	53
Figure 3.9. Evolution du facteur crête et le kurtosis en fonction de la charge.....	53
Figure 3.10. Evolution de la valeur crête et le RMS en fonction de la charge.....	53

Liste des tableaux

Chapitre 3

Tableau 3.1. Les valeurs des indicateurs scalaires pour différents diamètre du défaut et différentes charges.....	49
Tableau 3.2. Les valeurs des indicateurs scalaires pour différents diamètre du défaut et différents charges.....	51

Table des matières

Dédicace.....	iii
Remerciements.....	iv
Résumé.....	v
Abstract.....	vii
ملخص.....	viii
Listes des figures.....	ix
Listes des tableaux.....	xii
Introduction générale.....	1
CHAPITRE 1 : Notion fondamentale sur la maintenance	
I. Introduction.....	3
II. Notions sur la maintenance.....	4
II.1. La maintenance préventive.....	6
II.1.1. La maintenance conditionnelle.....	6
II.1.2. Maintenance systématique.....	7
II.2. La maintenance corrective.....	7
II.2.1. La maintenance palliative.....	7
II.2.2. La maintenance curative.....	8
II.3. Principe de la maintenance préventive conditionnelle.....	8
II.3.1. Pratique de la maintenance conditionnelle.....	8
II.4. Les techniques d'analyse.....	8
II.4.1. L'analyse vibratoire.....	8
II.4.2. Thermographie infrarouge.....	9
II.4.3. L'analyses d'huiles.....	10
II.4.4. L'analyse acoustique.....	10
II.4.5. Le contrôle ultrasonore.....	10
II.5. Niveaux de la maintenance.....	10
II.6. Généralité sur les machines tournantes.....	12
II.6.1. Les machines tournantes.....	12
II.6.2. Composition d'une machine tournante.....	12
II.7. Les défauts dans les machines.....	13
II.7.1. Défauts liés aux arbres.....	13
II.7.1.1. Le balourd.....	13
II.7.1.2. Le désalignement.....	14
II.7.2. Les défauts des engrenages.....	15
II.7.2.1. Définition.....	15
II.7.2.2. Types de défauts.....	16
II.7.3. défauts des roulements.....	16
II.7.3.1. Définition.....	16
II.7.3.2. Causes des défauts.....	17
II.7.3.3. Principaux défauts.....	18

II.8. La surveillance	18
II.8.1. La détection	19
II.8.2. Le diagnostic	19
III. Synthèse bibliographique	19
VI. Conclusion	22

CHAPITRE 2 : Analyse vibratoire

I. Introduction	23
I.1. Avantages et Inconvénients de l'analyse vibratoire	24
I.1.1. Avantage	24
I.1.2. Inconvénients	24
II. Définition d'une vibration	24
II.1. Nature des vibrations	25
II.2. Caractéristiques des vibrations	25
II.3. Différents formes de vibration	25
II.3.1. Vibrations harmoniques	25
II.3.2. Vibration périodique	26
II.3.3. Vibrations apériodique.....	27
II.4. Grandeurs utilisée pour la mesure vibratoire	28
II.4.1. Déplacements vibratoire $s(t)$	29
II.4.2. Vitesse vibratoire $v(t)$	29
II.4.3. Accélération vibratoire $a(t)$	29
II.5. Mesure des vibrations.....	30
II.5.1. Capteur de vibration.....	31
II.5.1.1. Les caractéristiques d'un capteur.....	31
II.5.1.2. Le rôle d'un capteur.....	31
a- Accéléromètre	32
b- Vélocimétrie	33
c- Capteur de déplacement	34
II.5.2. Collecteur de donnée portable	35
II.5.3. Logiciel de traitement	36
II.5.4. Point de mesure	36
II.6. Signal vibratoire	36
II.6.1. Généralité sur les Signaux.....	36
II.6.2. Types de Signaux.....	38
II.6.2.1. Signaux déterministes	38
II.6.2.2. Signaux aléatoire.....	39
II.7. Surveillance vibratoire.....	39
II.7.1. Le suivi périodique (off line)	39
II.7.2. Le suivi continu (on line)	39
II.8. Les méthodes d'analyse.....	39
II.8.1. Les méthodes temporelles.....	39
II.8.2. Les méthodes fréquentielles.....	40
II.8.3. La méthode de l'enveloppe.....	40

II.9. Outil de surveillance	40
III. Conclusion	41

CHAPITRE 3 : Etude de sensibilité des indicateurs scalaires

I. Introduction.....	42
II. Les indicateurs scalaires	43
II.1.Définition	43
II.1.1.La valeur efficace (RMS).....	43
II.1.2.La valeur crête (VC).....	43
II.1.3.Le facteur de crête	44
II.1.4.Le kurtosis	44
III. Présentation de Matlab.....	45
III.1.Définition de Matlab	45
III.2. Calculs des indicateurs scalaires sous Matlab.....	45
IV. Présentation du projet	47
IV.1. Le fichier de données.....	48
V. Etude de la sensibilité des indicateurs scalaires	49
V.1. Influence de la gravité du défaut	49
V.1.1. Cas d'un défaut sur la bille	49
V.1.2. Cas d'un défaut sur la bague intérieur	51
V.2. Influence de la charge	52
V.2.1. Cas d'un défaut sur la bille	52
V.2.2. Cas d'un défaut sur la bague intérieur	53
VI. Conclusion	55

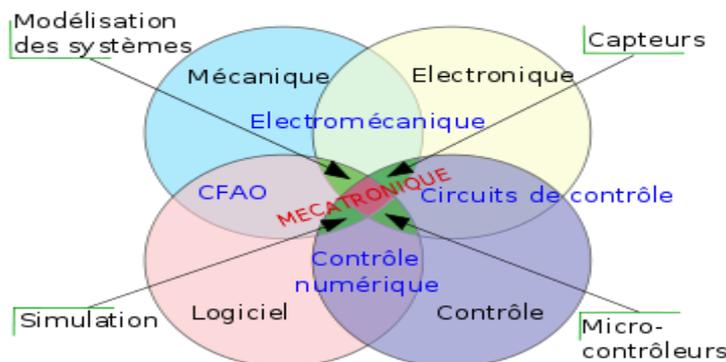
Introduction générale

La mécatronique est la convergence de la mécanique et de l'électronique. Elle associe à ces deux éléments les notions d'informatiques nécessaires au contrôle et au traitement des informations provenant des différents capteurs.

Les trois principales composantes de la mécatronique étant :

- La partie opérative (l'ensemble cinématique avec ses actionneurs et ses capteurs - Mécanique et Électronique).
- La partie commande (l'intelligence du système - Électronique et Informatique temps réel).
- La partie IHM Interface Homme/Machine (le pilotage du système - Informatique et communication).

La mécatronique est en pleine expansion, aussi bien au niveau des équipements industriels, que des composants et des processus de production.



Puisque la plupart des usines se composent des systèmes mécatronique, la surveillance vibratoire est l'outil préventif primaire de maintenance. Les différentes méthodes de surveillance sont : l'analyse d'huile, l'analyse de température et L'analyse vibratoire,... L'analyse vibratoire est la technique la plus utilisée pour réaliser une surveillance et un diagnostic fiable et pour détecter l'apparition et l'évolution de la plupart des défauts mécaniques.

Le principe de l'analyse vibratoire est basé sur l'idée que les machines tournantes en fonctionnement engendrent des défauts tels que : un balourd, un désalignement, un défaut de roulement, un écaillage de dents d'engrenage,... qui donnent des signaux vibratoires très compliqués. Ces signaux sont captés par des accéléromètres piézoélectriques placés sur les paliers de la machine. A ce propos plusieurs indicateurs de détection ont été proposés et

utilisés comme mesure globale du niveau vibratoire tels que la valeur crête, le kurtosis, le RMS, le facteur de crête. Pour étudier la variance de la sensibilité de ces indicateurs.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre est dédié à une étude bibliographique sur la maintenance des installations et des machines, une rappelle sur les notions fondamentales de la maintenance et les techniques de maintenance préventive conditionnelle, Nous présentons aussi les différents types de défauts qui accrurent sur les machines tournantes.

Le deuxième chapitre présente un bref théorique sur l'analyse vibratoire, les différentes méthodes et technique utilisée et celles toujours en voie de développement pour l'analyse vibratoire, seront présentées.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de l'influence des différents paramètres tels que la gravité du défaut et la charge appliqué sur la sensibilité des indicateurs scalaires.

Chapitre 1

Notion fondamentale sur la maintenance

I. Introduction

Pour être et demeurer compétitive, une entreprise doit produire toujours mieux (qualité) et au coût le plus bas. Pour minimiser ce coût, on fabrique plus vite et sans interruption des produits sans défaut afin d'atteindre la production maximale par unité de temps.

L'automatisation et l'informatique ont permis d'accroître considérablement cette rapidité de production. Cependant, les limitations technologiques des moyens de production ne permettent pas d'augmenter continuellement les cadences.

De plus, produire plus sous-entend produire sans ralentissements, ni arrêts. Pour cela, le système de production ne doit subir qu'un nombre minimum de temps de non production. Exceptés les arrêts inévitables dus à la production elle-même (changements de production, montées en température, etc.), les machines ne doivent jamais (ou presque) connaître de défaillances tout en en fonctionnant à un régime permettant le rendement maximal.

Cet objectif est un des buts de la fonction maintenance d'une entreprise. Il s'agit de maintenir un bien dans un état lui permettant de répondre de façon optimale à sa fonction.

Ce chapitre est dédié à une étude bibliographique sur la maintenance des installations et des machines tournantes.

II. Notions sur la maintenance

Avec le développement de l'industrie, les solutions de maintenir le bon fonctionnement des machines tournantes dans les usines sont aussi devenues indispensables, car le rendement de ces dernières est attaché à la bonne méthode de maintien et de maintenance.

La maintenance a un coût et il importe de trouver le niveau optimum qui maintiendra au moindre coût l'installation à niveau sans mettre en danger la sécurité des personnes. Comme illustré par la **figure 1.1** si l'on ne maintient pas l'installation, on aura trop d'incidents et leur coût va croître. Au contraire, si l'on fait trop de maintenance préventive, le coût total va augmenter [1].

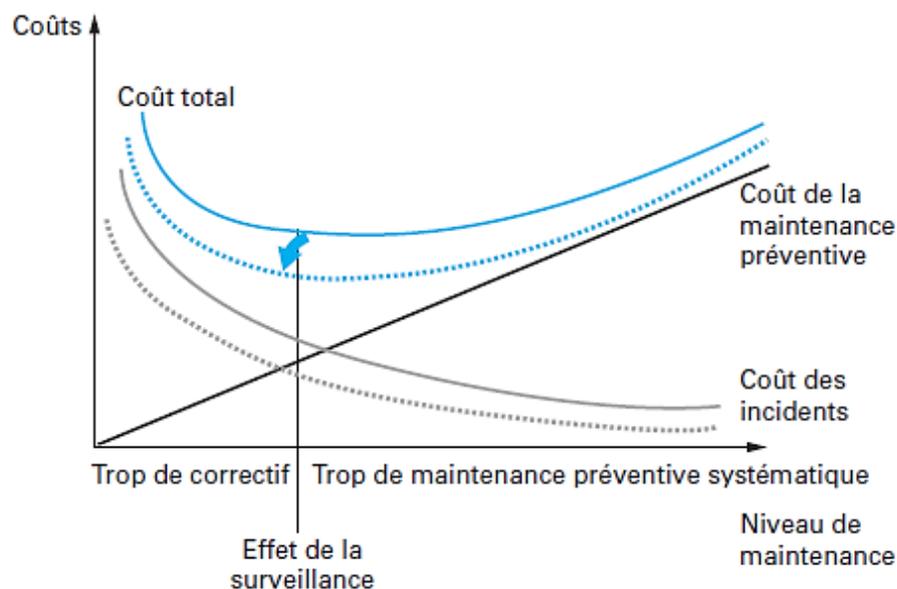


Figure 1.1. Optimisation de la politique de maintenance.

La solution de maintenance corrective, n'intervenant qu'en cas de panne, est abandonnée dès que les exigences de coûts, de qualité et de sécurité deviennent primordiales. La maintenance devient alors préventive, et peut être systématique ou conditionnelle. Dès que le taux de défaillance $\lambda(t)$ peut être obtenu pour des composants, et pour des systèmes, à partir du retour d'expérience, la maintenance préventive systématique est tout à fait satisfaisante. La courbe issue de la fonction $\lambda(t)$ en relation avec le temps est appelée la courbe en baignoire [2].

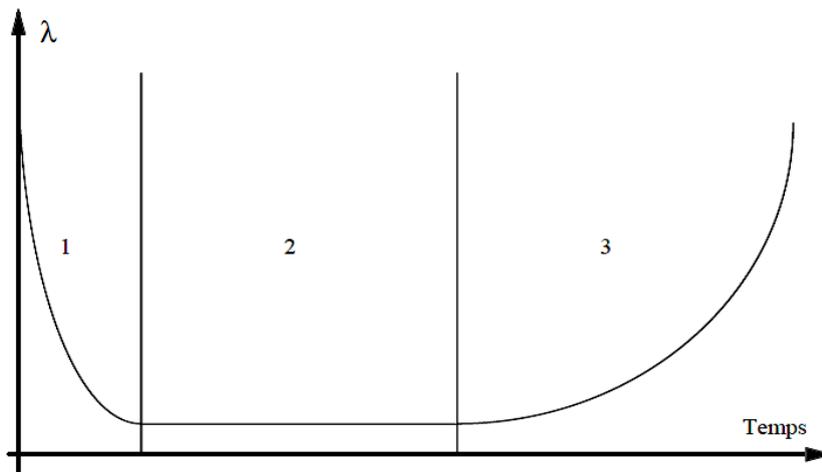


Figure 1.2. Taux de défaillance en fonction du temps (Courbe de baignoire).

*** La courbe en baignoire :**

La courbe dite "en baignoire", représente L'évolution du taux de panne d'un équipement durant son cycle de vie. Divisée en 3 périodes :

- La première période dite de "jeunesse" ou encore de "mortalité infantile"(des composants), se caractérise par un taux de panne relativement important, mais en décroissance, correspondant à l'élimination des défauts de jeunesse et au rodage (1).
- La deuxième période de " vie utile " se caractérise par un taux de panne faible et constant. Les différents composants ont prouvés leur robustesse aux défauts de jeunesse, l'équipement est dans sa phase de maturité (2).
- La dernière période est celle du vieillissement et/ou d'usure dans laquelle le taux de panne augmente rapidement en fonction du temps (3).

Pour cela, les types de la maintenance sont répartis suivant le schéma de la **figure 1.3**.

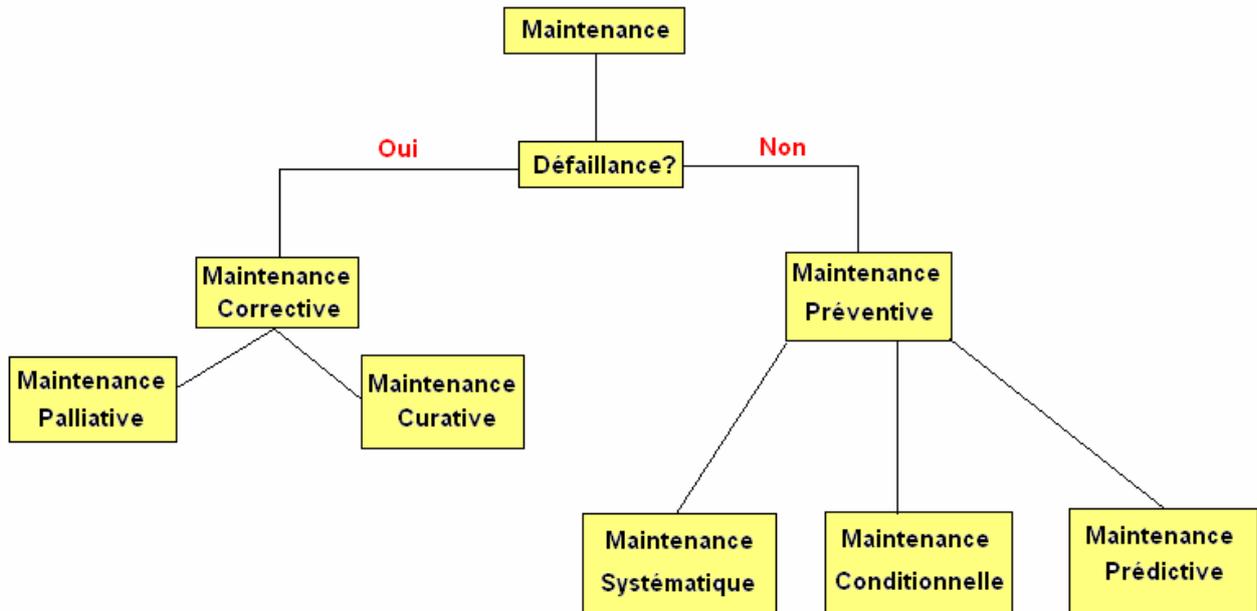


Figure 1.3. Les différents types de maintenance.

Selon la norme AFNOR [3], « la maintenance est définie comme étant un ensemble d'activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise».

II.1. La maintenance préventive :

C'est la maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu [3]. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'usages (maintenance systématique) et des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle).

Elle répond aux exigences d'un échéancier entraînant des actions d'inspection et de contrôle puis des réparations si nécessaire.

II.1.1. La maintenance conditionnelle:

D'après la norme AFNOR X 60-100 [3], la maintenance conditionnelle se définit comme une maintenance préventive subordonnée à un type d'évènement prédéterminé (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure), révélateur de l'état de dégradation du bien. Ce type de maintenance comprend toutes les tâches de restauration de matériels ou de composants non défaillants, entreprise en application d'une évaluation d'état et de la comparaison avec un critère d'acceptation préétabli (défaillance potentielle).

Elle est liée à la surveillance et au diagnostic du système et n'entraîne l'action de réparation que si une panne (présente ou future) est détectée.

II.1.2. Maintenance systématique :

D'après la norme AFNOR X 60-100 [3], la maintenance systématique se définit comme « une maintenance effectuée selon des critères prédéterminés dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ».

Ce type de maintenance comprend l'ensemble des actions destinées à restaurer, en totalité ou partiellement, la marge de résistance des matériels non défaillants, lorsque ces tâches sont décidées en fonction du temps ou de la production, sans considération de l'état des matériels à cet instant.

La maintenance systématique a été la première à s'imposer, parce qu'elle ne demande pas de moyen d'analyse. Elle se traduit par des arrêts réguliers de la machine, avec démontage, contrôle et remplacement systématique d'organes. La date de l'arrêt est planifiée par l'expérience ou en fonction d'impératifs de sécurité. Ce mode de maintenance est essentiellement basé sur la statistique. Bien que simpliste, il reste encore le plus utilisé à l'heure actuelle, souvent, parce qu'il ne demande pas d'analyse du comportement.

II.2. La maintenance corrective:

La maintenance corrective, encore appelée "fonctionnement jusqu'à la rupture" ou "arrêt sur panne", est une méthode de maintenance qui demande peu d'engagement. C'est l'ensemble des activités réalisées après la défaillance ou dégradation d'un élément actif. La norme NF EN 13306[4], définit ainsi la maintenance corrective : « Exécutée après détection d'une panne est destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».

Dans le contexte actuel, cette approche se révèle souvent la plus chère et la plus dangereuse. En théorie, elle ne devrait plus exister, même pour des industries qui possèdent de nombreuses machines peu coûteuses, et qui peuvent les doubler systématiquement. Elle est effectuée en cas de panne du système.

II.2.1. La maintenance palliative:

« Activité de maintenance corrective destinées à permettre de bien d'accomplir provisoirement tout ou une partie d'une fonction requise. Appelée couramment dépannage, cette maintenance palliative est principalement constituée d'action à caractère provisoire qui devront être suivies d'action curative » [5].

II.2.2. La maintenance curative:

C'est une activité ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou aménagement ayant pour objet de supprimer la ou les défaillances [5].

La maintenance optimale est donc un mélange harmonieux d'entretien préventif systématique et d'entretien correctif.

II.3. Principe de la maintenance préventive conditionnelle :

Le principe de la maintenance conditionnelle consiste à estimer l'état des composants mécaniques en effectuant différents types de mesure. La nature de ces mesures dépend de la machine à suivre. Cela peut être des mesures de vibration, des analyses d'huile, des thermographies infrarouges... . Lorsque le seuil admissible de ces défauts est dépassé, il devient nécessaire de programmer l'arrêt de la machine. Ceci doit être fait en perturbant au minimum le cycle de production, c'est à dire entre deux séries ou lors d'un arrêt programmé. Ce type de maintenance se caractérise par :

- ✚ l'emplacement et le nombre de points de mesure.
- ✚ la collecte et le traitement des informations.
- ✚ la nécessité d'obtenir un diagnostic précis.
- ✚ un investissement important.

II.3.1. Pratique de la maintenance conditionnelle :

Son principe consiste, à partir de différentes technique basées sur la mesure de paramètres physique (les vibrations, analyse d'huile,...etc.), à suivre l'état de marche (et son évolution) du matériel en fonctionnement, de manière à diagnostique et programmer à l'avance les interventions de maintenance.

II.4. Les techniques d'analyse :

Les différentes techniques utilisées dans la maintenance conditionnelle sont les suivantes :

II.4.1. L'analyse vibratoire :

Parmi les méthodes utilisées en maintenance conditionnelle l'analyse vibratoire est une des plus utilisée pour le suivi des machines tournantes. En effet, un ensemble de pièces en

mouvement, quel que soit la forme de la structure porteuse, génère des vibrations, et ce, même si les machines analysées sont en bon état de fonctionnement. Les vibrations dans les bâtis de machine peuvent avoir plusieurs origines telles que des arbres mal équilibrés, mais aussi des roulements, des engrenages ou des courroies en parfait état de marche qui viennent exciter les bâtis. Le comportement non linéaire de certains composants modifie les raideurs de Ces organes et donc par voie de conséquence, les efforts induits.

II.4.2. Thermographie infrarouge:

Le contrôle par thermographie a pour objet de détecter et de localiser les variations de température en surface. Une caméra infrarouge associée à un logiciel de traitement d'image, permet d'obtenir une image en 2 dimensions, appelée thermo-gramme, de la zone contrôlée. La couleur de chaque pixel de l'image peut être reliée à la température en chaque point de l'objet, en faisant des hypothèses sur la valeur d'émissivité de la surface. La thermographie est utilisée lors des opérations de maintenance sur site pétrochimique notamment pour le contrôle:

- de l'état des calorifuges et frigorifuges d'équipement fonctionnant hors température normale.
- de l'état des matériaux réfractaires utilisés sur les fours, cheminés et le gunitage de réacteurs.
- de niveaux dans les réservoirs.

La thermographie est bien adaptée à la détection des points chauds (surchauffe, température anormale) sur les machines tournantes et les armoires électriques. Il est également envisageable de surveiller un processus comme le soudage, le remplissage d'un moule.

Exemple : la **figure 1.4** présente un exemple de la thermographie infrarouge pour détecter un défaut D'engrenage.



Figure 1.4. Exemple de la thermographie infrarouge.

II.4.3. L'analyses d'huiles:

Le lubrifiant (huile) est comparable au sang de la machine, il reflète le comportement et l'état du système dans lequel il circule.

Le suivie de ces caractéristiques physico-chimique permet d'apprécier l'état de dégradation de l'huile et de connaître son aptitude à remplir totalement ses fonctions initiales de lubrification. L'évolution de cette dégradation peut être un indicateur de condition d'exploitation de l'équipement. Elle va permettre d'optimiser les fréquences de vidanges dans cas de quantité importante, le suivie de la contamination permet:

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

On prend comme référence les caractéristiques de l'huile neuve et on compare les résultats obtenue à chaque analyse, si l'on constate une évolution brutale des caractéristiques ou si l'on atteint des valeurs très éloignées des valeurs initiales, il faut soit intervenir au niveau du matériel ou remplacer l'huile.

II.4.4. L'analyse acoustique:

Permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés(le plus souvent) à distance de l'équipement.

II.4.5. Le contrôle ultrasonore :

Permet de détecter des défauts de faible amplitude à haute fréquence tel que l'initiation de la dégradation d'un roulement.

L'analyse vibratoire, l'analyse d'huiles, la thermographie infrarouge et l'analyse acoustique sont les principales méthodes de surveillance des machines tournantes. Toutes ne permettent pas de détecter les mêmes types de défauts, ni de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine et la gravité.

Avant de choisir une telle méthode d'analyse, il faut bien cerner la criticité de la machine, et définir le type de surveillance qu'elle nécessite.

II.5. Niveaux de la maintenance :

Les interventions de maintenance peuvent être classées par ordre croissant de complexité (selon norme X60-000 de 2002) :

1er niveau de maintenance :

Actions simples nécessaires à l'exploitation et réalisées sur des éléments facilement accessibles en toute sécurité à l'aide d'équipements de soutien intégrés au bien. Ce type d'opération peut être effectué par l'utilisateur du bien avec, le cas échéant, les équipements de soutien intégrés au bien et à l'aide des instructions d'utilisation.

2ème niveau de maintenance :

Actions qui nécessitent des procédures simples et/ou des équipements de soutien (intégrés au bien ou extérieurs) d'utilisation ou de mise en œuvre simple. Ce type d'actions de maintenance est effectué par un personnel qualifié avec les procédures détaillées et les équipements de soutien définis dans les instructions de maintenance. Un personnel est qualifié lorsqu'il a reçu une formation lui permettant de travailler en sécurité sur un bien présentant certains risques potentiels, et est reconnu apte pour l'exécution des travaux qui lui sont confiés, compte tenu de ses connaissances et de ses aptitudes.

3ème niveau de maintenance :

Opérations qui nécessitent des procédures complexes et/ou des équipements de soutien portatifs, d'utilisation ou de mise en œuvre complexes. Ce type d'opération de maintenance peut être effectué par un technicien qualifié, à l'aide de procédures détaillées et des équipements de soutien prévus dans les instructions de maintenance.

4ème niveau de maintenance :

Opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technique ou technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés. Ce type d'opération de maintenance est effectué par un technicien ou une équipe spécialisée à l'aide de toutes instructions de maintenance générales ou particulières.

5ème niveau de maintenance :

Opérations dont les procédures impliquent un savoir-faire, faisant appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et/ou des équipements de soutien industriels. Par définition, ce type d'opérations de maintenance (rénovation, reconstruction, etc.) est effectué

par le constructeur ou par un service ou société spécialisée avec des équipements de soutien définis par le constructeur et donc proches de la fabrication du bien concerné.

II.6. Généralité sur les machines tournantes :

II.6.1. Les machines tournantes :

Les machines tournantes sont destinées, dans la majorité des cas, pour accomplir une fonction de production d'un bien industrielle. Les machines tournantes sont donc le nerf principale et vital dans toutes les industrielle d'où la nécessité d'innover et de rénover ces machines. La maintenance en état de fonctionnement de ses machines nécessite, également, le concoure de plusieurs disciplines pour assurer dans les meilleures conditions leur disponibilité.

Enfin, les machines tournantes facilitent le travail quotidien des entreprises.

II.6.2. Composition d'une machine tournante :

Les machines tournantes se généralement de trois éléments principaux sont **figure 1.5** :

➤ Machines d'entraînement :

Moteurs électrique.

Moteurs : diesel, gaz.

Turbines à vapeur, gaz, hydraulique, aire.

➤ Transmissions :

Accouplement : flexibilité, rigide, cardan.

Engrenages : hélicoïdal, droit, planétaire.

Courroies.

➤ Machines entraînées :

Pompe.

Compresseurs.

Générateurs.

Transport : machines à papier, rouleaux de transport, rouleaux.

Autres : rouleaux de laminoirs, hélices de bateau,

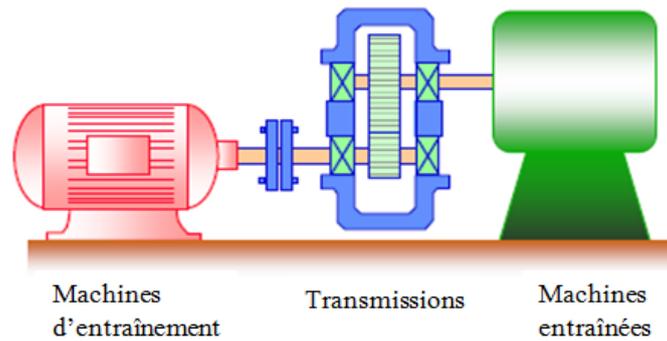


Figure 1.5. Composition d'une machine tournante.

II.7. Les défauts dans les machines :

II.7.1. Défauts liés aux arbres:

II.7.1.1. Le balourd:

Un balourd est caractérisé par un déséquilibre massique autour de l'axe de rotation qui produit des forces d'inertie. Ces forces agissent sur les corps en rotation et surtout sur les roulements et excitent les paliers.

Si on considère seulement les rotors rigides autour d'axes fixes, on peut distinguer deux types de balourds:

a. Balourd statique : il apparaît dans le cas où le centre de la masse (centre de gravité) du rotor ne coïncide pas avec l'axe de rotation **figure 1.6.**

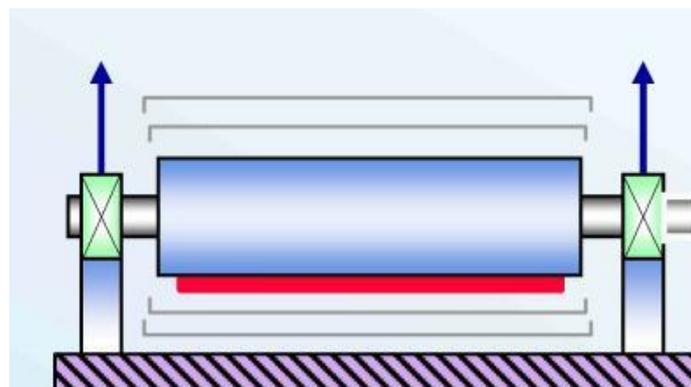


Figure 1.6. Balourd statique.

b. Balourd dynamique : dans un rotor flexible, même si le centre de celui-ci coïncide avec l'axe de rotation (on dit que le rotor est statiquement équilibré), on peut avoir dans certain cas les deux parties du rotor (suivant l'axe de rotation) statiquement déséquilibrées avec la même

quantité. Les centres de gravité des deux parties se trouvent de part et d'autre de l'axe de rotation. Il s'agit d'un balourd dynamique **figure 1.7**.

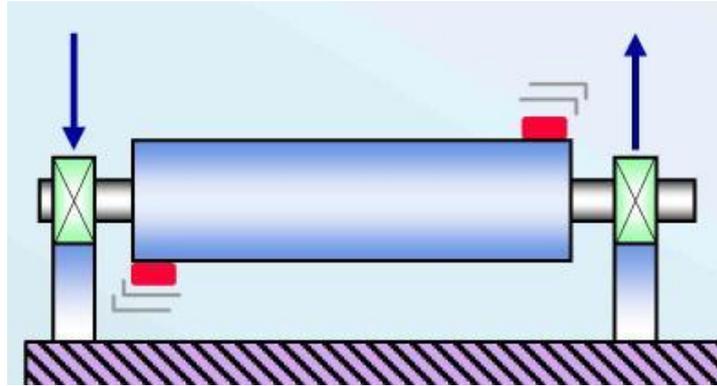


Figure 1.7. Balourd dynamique.

II.7.1.2. Le désalignement:

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe.

*Le Délignage:

Le délignage est un défaut commun dans les machines tournantes. En pratique, la puissance mécanique est généralement transmise par des arbres couplés qui sont nominalement alignés. Mais, l'alignement parfait ne peut être réalisé et ceci pour différentes raisons.

Le délignage est dû au fait que l'arbre menant et l'arbre mené ne soient pas axialement alignés. Alors on distingue deux types de délignage :

a. Délignage angulaire : il est observé lorsque les axes des arbres sont dans le même plan mais pas parallèles.

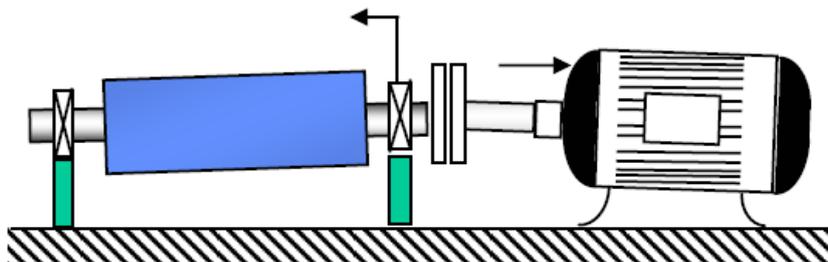


Figure 1.8. Délignage angulaire.

b. Délignage axial : il se produit lorsque les axes des arbres sont parallèles mais ne coïncident pas.

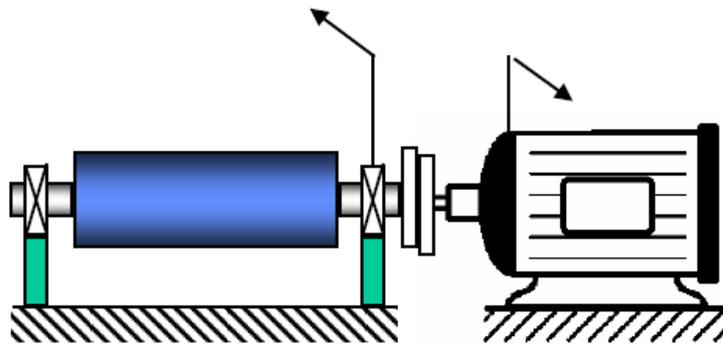


Figure 1.9. Délignage axial (Radial).

II.7.2. Les défauts des engrenages:

II.7.2.1. Définition :

Un engrenage est composé d'un ensemble de deux roues dentées engrenant l'une avec l'autre, permettant de transmettre de la puissance entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse constant.

Il y a plusieurs types d'engrenages, et on distingue :

- Les engrenages parallèles (les deux arbres sont parallèles).
- Les engrenages concourants (les deux arbres sont tels que leurs prolongements se coupent).
- Les engrenages gauches (les deux arbres occupent une position relative quelconque).



Figure 1.10. Types d'engrenages.

Dans le phénomène d'engrènement, il se produit un choc chaque fois qu'une dent menant est en contact avec une dent menée. Ceci génère une vibration dont la fréquence est égale à la de rotation du pignon multipliée par son nombre de dents. S'il y a déformation du profil de la

denture, la fluctuation de la charge sur la ou les dents donne naissance à des fluctuations de vitesse et aboutit aussi à une modulation de fréquence.

II.7.2.2. Types de défauts:

Plusieurs types de défauts peuvent affecter les dentures d'engrenage. On peut citer les défauts répartis sur toutes les dents :

A) L'usure : L'usure est un phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière dû au glissement de deux surfaces l'une contre l'autre. Le développement de l'usure est lié à la charge et à la vitesse de glissement en chaque point des surfaces de contact, ainsi qu'à la présence plus ou moins grande d'éléments abrasifs dans le lubrifiant. L'usure normale, progresse lentement, elle est inversement proportionnelle à la dureté superficielle de la denture. L'usure anormale se produit lorsque le lubrifiant est souillé de particules abrasives ou lorsque le lubrifiant est corrosif. Elle conduit à un mauvais fonctionnement de l'engrenage, voire à sa mise hors service.

B) Le putting : Il s'agit de trous peu profonds, qui affectent toutes les dents. Le putting est une avarie qui se produit surtout sur des engrenages en acier de construction relativement peu dur. Il est moins à craindre si la viscosité du lubrifiant est élevée. L'apparition des piqûres est associée aussi à un rapport épaisseur de film lubrifiant sur rugosité composite insuffisant pour éviter des contacts entre aspérités.

C) La fissuration : généralement par fatigue, elle progresse à chaque mise en charge, à partir d'un point initial situé presque toujours au pied de la dent. Elle apparaît surtout sur des aciers fins, durcis par traitement thermique, qui sont très sensibles aux concentrations de contraintes. L'apparition de ces fissures est la conséquence d'une contrainte au pied de la dent qui dépasse la limite de fatigue du matériau, et est en général située du côté de la dent sollicitée en traction.

D) L'écaillage : Il se manifeste aussi sous forme de trous, mais ceux-ci sont beaucoup moins nombreux, plus profonds et plus étendus que ceux des piqûres. L'écaillage se trouve dans les engrenages cimentés, qui sont les plus répandus à l'heure actuelle car ils de passer des couples importants avec des dimensions faibles.

II.7.3. défauts des roulements:

II.7.3.1. Définition:

Des roulements, il y en a partout... des pédales de vélos au ventilateur des PC en passant par les compresseurs ou les roues de véhicules, un très grand nombre de systèmes en rotation

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

Les roulements sont parmi les composants les plus sollicités des machines et représentent une source de panne fréquente.

Quel que soit le type, un roulement est constitué (composé) de quatre éléments fondamentaux, et qui sont les suivants :

- 1-La bague extérieure.
- 2-La bague intérieure.
- 3- La cage.
- 4-Les éléments roulants.

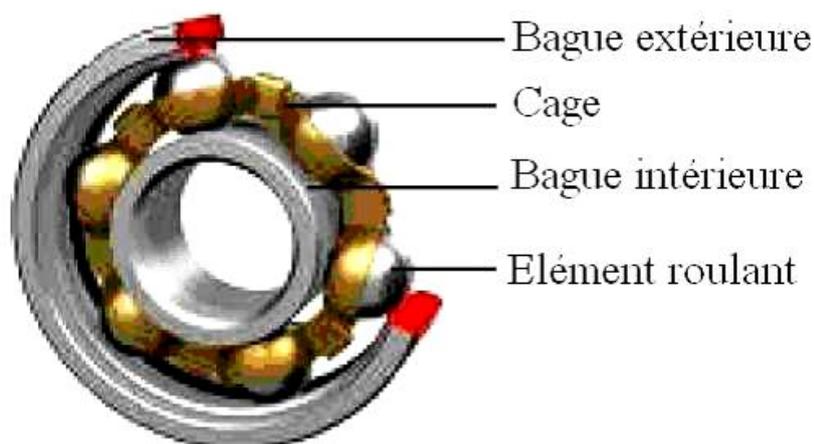


Figure 1.11. Eléments d'un roulement.

a. La bague extérieure : C'est l'élément qui limite les dimensions extérieures du roulement, Elle sera montée dans un logement fixe (bague extérieure fixe) ou dans un moyeu tournant (bague extérieure tournante).

b. La bague intérieure : Elle est montée sur un arbre fixe ou mobile. C'est-à-dire, elle est fixe si la bague extérieure est mobile, et le contraire.

c. La cage : elle a pour rôle de maintenir le même écartement entre les éléments roulants, à fin de préserver la même zone de charge du roulement, elle ne supporte aucune charge.

d. Les éléments roulants : Il s'agit des billes, rouleaux et des aiguilles. Ce sont les éléments des roulements qui assurent la transmission de la charge entre les deux bagues du roulement, ils sont responsables de la rotation relative d'une bague par rapport à l'autre.

II.7.3.2. Causes des défauts:

Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme:

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

– courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques.

II.7.3.3. Principaux défauts :

On peut noter deux types d'avaries caractéristiques de la détérioration des roulements : Les avaries dites naturelles dues à la fatigue des roulements et les avaries dues à un mauvais montage ou une mauvaise utilisation du roulement.

On qualifie les principaux défauts:

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

II.8. La surveillance :

La surveillance : c'est l'observation « une observation systématique et significative ». La surveillance est un dispositif passif, informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs.

La surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières.

La surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont la détection et le diagnostic.

II.8.1. 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.

II.8.2. Le diagnostic :

Le diagnostic est un outil particulièrement utile dans le cadre de la mise en place d'un concept de maintenance prévisionnelle. La démarche du diagnostic repose sur l'analyse systématique du signal vibratoire et le suivi de son évolution dans le temps en analysant son allure temporelle et spectrale afin d'identifier l'existence de défaut ou non.

Deux tâches essentielles en diagnostic :

- Observer les symptômes de défaillance.
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur des observations.

III. Synthèse bibliographique :

Dans cette partie, nous présentons une synthèse de quelques travaux de recherches sur les différentes méthodes utilisées et les résultats du diagnostic vibratoire des défauts détectés soit sur les engrenages soit sur les roulements.

L'analyse vibratoire, vu son efficacité, prend actuellement une place très importante dans le cadre de la mise en place d'une maintenance conditionnelle [6-7]. Elle permet de suivre l'état de la machine tournante en fonctionnement afin d'éviter les arrêts indésirables. À ce propos plusieurs indicateurs de détection ont été proposés et utilisés comme mesure globale du niveau vibratoire tels que la valeur crête, l'énergie, le RMS, la valeur moyenne, et autres. Des indicateurs plus spécifiques aux défauts induisant des chocs, à l'image de ceux des roulements et des engrenages, sont également utilisés, notamment le kurtosis et le facteur de crête. Ces indicateurs, étant sensibles à la forme du signal, peuvent détecter la présence du défaut car ils augmentent avec la propagation de la longueur de la fissure [8-11]. Néanmoins, le kurtosis s'est montré plus sensible que le facteur de crête et permet donc une détection plus précoce. En réalité les applications du kurtosis pour la détection des défauts d'engrenages sont multiples. Dans une étude la réciproque du kurtosis de la distribution bêta des signaux vibratoires segmentés a été utilisée, cet indicateur a permis de suivre la progression d'une

fissure jusqu'à une certaine longueur [12]. Dans la référence [13], l'auteur montre que la valeur du kurtosis augmente avec l'augmentation de la taille du défaut (piqûres) et pourrait par ce fait être un bon indicateur de son évolution, voire de sa gravité. J. P. Dron et al. [8], faisant une étude théorique et expérimentale pour l'élimination du bruit de fond contenue dans un signal temporel prélevé sur un roulement en présence d'un écaillage. Le but est d'améliorer la sensibilité des indicateurs scalaires utilisés comme indicateurs pour la détection des défauts de roulement. Pour cela, ils ont appliqué la méthode de la soustraction spectrale réalisée avec une analyse par transformation de Fourier à court terme avec un faible nombre d'échantillons ($M=256$). Les résultats montrent que cette méthode permet d'éliminer le bruit stationnaire ou lentement variable et semble bien adaptée dans le cadre de la détection précoce des défauts de roulement (les défauts induisant des impulsions périodiques), utilisant l'analyse vibratoire à l'aide des indicateurs scalaires (le kurtosis, Facteur de crête). Ils ont montré que le kurtosis est un meilleur indicateur de détection de défaut que le facteur de crête.

Djebala A. et al. [14], ont proposé une méthodologie pour l'optimisation de l'utilisation des indicateurs scalaires dans le cadre de la surveillance vibratoire des machines tournantes, pouvant détecter d'éventuels défauts induisant des forces impulsives, notamment ceux des roulements et des engrenages. L'objectif de ce travail est avant tout un choix optimal d'un indicateur sensible aux défauts induisant des chocs ainsi que l'optimisation des différents paramètres intervenants rendant ainsi aux indicateurs scalaires toute leur fiabilité de détection. La validation expérimentale est réalisée sur des signaux de roulements défectueux mesurés sur un banc d'essais adéquat. En effet à partir d'un modèle théorique, ils ont montré qu'un mauvais choix de certains paramètres peut réduire considérablement la sensibilité du kurtosis, or un bon choix permet par contre de lui rendre toute sa fiabilité. Les résultats expérimentaux, obtenus à partir de signaux d'accélération mesurés sur des roulements endommagés, valident les fondements théoriques. Une vitesse de rotation faible, une bande de fréquence large et un filtrage passe-bande aux hautes fréquences semble la combinaison idéale pour avoir un kurtosis maximal et par suite permettre la détection la plus précoce possible.

Benchaabane. C, et al [15]. Ont proposé une méthodologie numérique et expérimentale qui aide à la détection et au suivie vibratoire des défauts d'écaillage sur les dentures d'engrenage. Pour cela, ils ont utilisé des points de mesures situés sur les paliers de roulements du banc d'essai permettant de réaliser une surveillance vibratoire efficace. L'analyse des signaux permettra de sélectionner les moyens de mesures et de traitement nécessaires à la définition

d'indicateurs d'avaries, tels que l'analyse spectrale et les indicateurs scalaires (Kurtosis, RMS, facteur de crête,...etc.)

Nabti. M^{ed}T [16], ont fait une étude sur l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques. Le but de ce travail est de maîtriser les techniques : l'analyse spectrale, l'analyse cepstrale, l'analyse d'enveloppe et le kurtosis spectrale. Et de confirmer les différents résultats sur des signaux qui sont : les signaux de roulements ; "*the Case Western Reserve University- Bearing Data Center* " Cleveland USA ; base de données des essais de roulements à billes normaux ou défectueux, et Les signaux d'une boîte de vitesse d'un hélicoptère de la NAVY -Université de Pennsylvanie. Dans cette étude plusieurs méthodes de traitement du signal utilisables pour la surveillance et le diagnostic de systèmes à l'aide de mesures vibratoires sont présentées. Ces méthodes ont été classées en : analyse temporelle, analyse de Fourier, analyse cepstrale, analyse d'enveloppe, analyse temps-fréquence et le kurtosis spectral. Dans cette étude, l'analyse cepstrale qui permet d'améliorer les performances de l'analyse spectrale dans la détection des défauts de type (choc) sur les réducteurs à engrenages a été évaluée. L'analyse de cepstre permet dans ce cas de détecter la présence d'un défaut et de déterminer quelle est la roue abîmée. Le kurtosis spectral(KS) est une nouvelle technique dans le diagnostic des défauts de roulement. Le KS est également employé pour indiquer la meilleure bande de démodulation pour l'analyse d'enveloppe. Également le Kurtosis spectral est très sensible aux différents diamètres de défaut.

Touafek. I. [17], ont fait une étude sur Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques, Dans ce travail, les auteurs sont intéressés au calcul des indicateurs statistiques tels que le kurtosis, le facteur de crête, la valeur efficace et des indicateurs spectraux tels que l'analyse de Fourier, l'analyse d'enveloppe. Afin d'étudier la variance de la sensibilité de ces indicateurs, les méthodes d'ondelettes et la décomposition en mode empirique (EMD) sont utilisées comme des outils de prétraitement pour voir l'amélioration ou non et l'apport de chacune d'elles. Cette étude a un double objectif premièrement étudier la robustesse c'est-à-dire la capacité des indicateurs à ne pas être modifiés par une petite modification (dus au bruit) dans les données choisies pour l'estimation et à rester performants malgré des conditions externes présentant de larges variations de (charge, de vitesse, de température ...etc. est deuxièmement appliquer des méthodes de prétraitement pour améliorer la sensibilité des indicateurs. Les résultats obtenus dans ce travail montrent que : les indicateurs statistiques calculés dans cette étude tels que le kurtosis et le facteur de crête sont plus sensibles que la valeur efficace pour détecter la présence de défaut. La valeur

efficace est un indicateur global, ne se permette pas de faire une bonne surveillance. Le kurtosis est plus sensible que le facteur de crête.

Adbi. Z. [18], a proposé une étude sur le problème majeur de la consommation excessive des roulements, qui sont d'actualité au niveau des entreprises industrielles. Ce travail présente une étude sur la surveillance des roulements par analyse vibratoire. 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).

En fin de cette étude l'auteur a vu que le paramètre le plus important à suivre dans un roulement est la durée de vie réelle, pour le calcul de cette dernière, la durée de vie nominale est souvent le seul facteur à retenir. Le bon choix de l'indicateur de vibration joue un rôle très important pour réaliser un diagnostic et par conséquent la détection de n'importe quel défaut de roulement, par exemple pour la détection d'un défaut de roulement, elle a trouvé qu'il est utile d'utiliser l'analyse spectrale (résonance à des hautes fréquences, le spectre d'enveloppe), le facteur de défaut de roulement est aussi exigé la complémentarité de plusieurs indicateurs (facteur crête et valeur efficace).

IV. Conclusion :

L'analyse vibratoire est beaucoup plus pratiquée en maintenance conditionnelle qui est une maintenance basée sur l'anticipation des pannes et qui consiste à réparer la machine avant sa panne.

Parmi les techniques de maintenance préventive conditionnelle, l'analyse vibratoire est une technique de contrôle non destructif couramment utilisée pour diagnostiquer des défauts sur les machines tournantes. Elle s'applique, plus particulièrement, au contrôle des composants fragiles ou stratégiques d'un système, par exemple les roulements à billes, les engrenages ou les rotors.

Chapitre 2

Analyse vibratoire

I. Introduction :

L'analyse vibratoire est un outil très important dans le suivi des machines nécessitant une maintenance préventive conditionnelle en plus de sa viabilité scientifique, l'analyse vibratoire est devenue une discipline indispensable pour l'amélioration, aussi, des conditions de travail dans les milieux industrielle les plus pénible et de suivre l'évolution des machines travaillant dans les zones les plus dangereuse.

L'analyse vibratoire apporte une solution relativement facile pour résoudre des problèmes complexe de maintenance, mais en contrepartie, elle exige un personnel bien formé et qualifier.

Dans ce chapitre on présente en premier lieu un bref théorique sur l'analyse vibratoire, les différentes méthodes et technique utilisée et celles toujours en voie de développement pour l'analyse vibratoire, seront présentées en deuxième lieu.

I.1. Avantages et Inconvénients de l'analyse vibratoire :

I.1.1. Avantage :

- Détection à un stade précoce des défauts.
- Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi (connaitre l'origine de défaut).
- Autoriser une surveillance continue (machine critique).
- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Améliorer la disponibilité des équipements.
- Eviter les arrêts de production non programmés.
- Eviter la casse des machines.
- Augmenter la sécurité dans les secteurs d'activités.
- Assurer un contrôle qualité permanent des réparations, du montage et graissage.
- Eviter les erreurs humaines, lors des arrêts et de remise en état.
- Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance).

I.1.2. Inconvénients :

- Spectre parfois difficile à interpréter.
- Installation couteuse dans le cas de surveillance continue.

II. Définition d'une vibration :

La norme ISO 2041[19], « Vibrations et chocs - Vocabulaire (Août 1990) » définit la notion de vibration : Variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence. En fait, un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence. Les textes de normalisation AFNOR relatifs aux vibrations sont : NF E 90-001, NF E 90 002.

Les vibrations sont des mouvements oscillant autour d'une position moyenne d'équilibre. Le mouvement vibratoire (ou mouvement oscillatoire) est fondamental en physique, et peut être trouvé sous les formes les plus variées : mouvement d'un pendule ou d'un poids suspendu à un ressort, mouvement des atomes à l'intérieur d'un solide ou d'une molécule, ou encore déplacement des électrons dans une antenne émettrice ou réceptrice d'ondes électromagnétiques.

II.1. Nature des vibrations:

Les vibrations mécaniques sont des mouvements oscillant autour d'une position moyenne d'équilibre. Ces mouvements oscillants caractéristiques de l'effort qui les génère, peuvent être, soit périodiques, soit apériodiques (transitoires ou aléatoires) selon qu'ils se répètent ou non, identiquement à eux-mêmes après une durée déterminée.

II.2. Caractéristiques des vibrations:

-Amplitude:

L'amplitude (A) est le déplacement maximal par rapport à la position d'équilibre, ou encore la vitesse ou l'accélération maximale, selon le capteur de vibrations utilisé. Pour simplifier, nous ne tiendrons compte que du déplacement. Dans ce cas, l'unité utilisée habituellement pour mesurer l'amplitude des vibrations est le micromètre ($1\mu\text{m}$): $1\mu\text{m} = 10^{-6}$ m.

-Fréquence:

La fréquence (f) est le nombre de cycles de vibration par unité de temps. L'unité de fréquence est l'hertz (Hz), soit un cycle par seconde. Comme la vitesse de rotation des machines tournantes est exprimée en tours par minute (T/mn), la fréquence des vibrations auxquelles celles-ci sont soumises est communément exprimée en cycles par minute (C/mn). Comme une minute compte 60 secondes, $1\text{ Hz} = 60\text{ C/M}$.

II.3. Différents formes de vibration :

On classe les vibrations d'après l'évolution de la variable considérée dans le temps (périodicité). On distingue ainsi les vibrations :

- Harmoniques.
- Périodiques.
- Apériodiques.

II.3.1. Vibrations harmoniques :

Une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme amplitude –temps est représenté par une sinusoïde.

La **figure 2.1** présente une vibration sinusoïdale simulée sous Matlab.

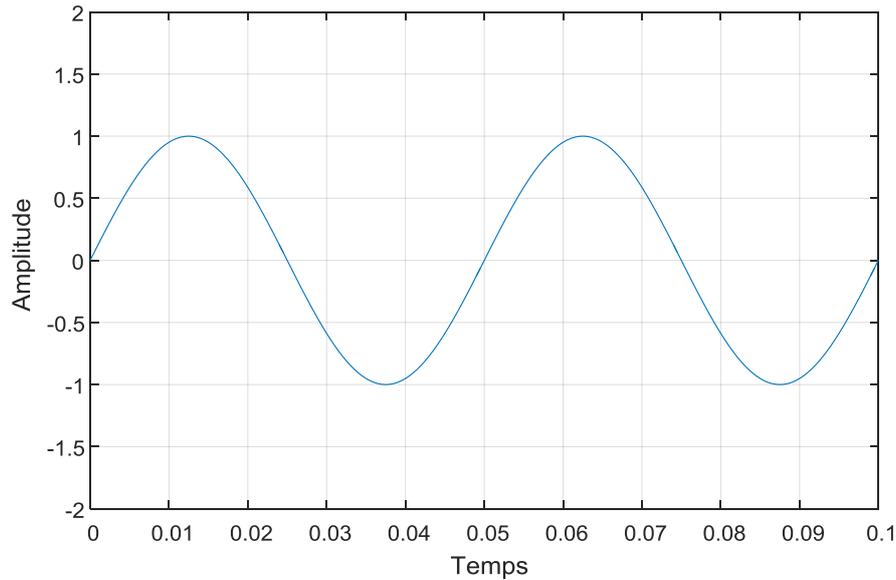


Figure 2.1. vibration harmonique.

Elle est décrite par l'équation 1 :

$$x(t) = x_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

Avec :

ω = vitesse angulaire ou pulsation du mouvement ($2\pi f$).

f = fréquence du mouvement.

φ = phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps.

II.3.2. Vibration périodique :

Une vibration périodique est telle que se reproduit exactement après un certain temps appelé période. Une telle vibration est créée par une excitation elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines.

Une vibration périodique est la composée de plusieurs vibrations harmoniques.

La **figure 2.2** présente un signal périodique somme de trois sinusoïde $f_1=50$ Hz, $f_2=100$ Hz, $f_3=150$ Hz simulé sous Matlab.

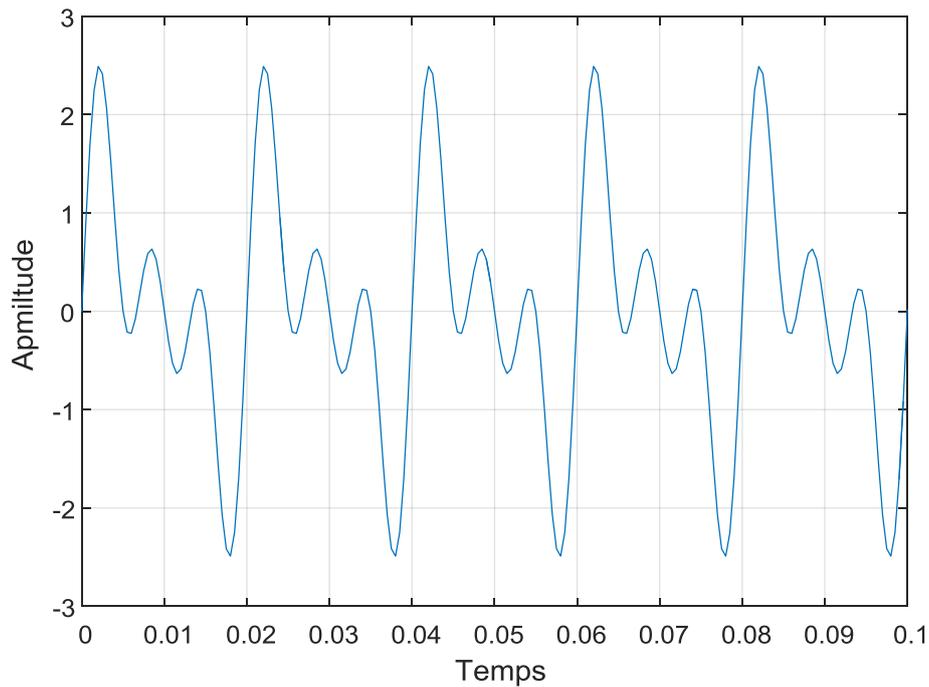


Figure 2.2. vibration périodique

Elle est décrite par l'équation 2 :

$$x(t) = \sum_{i=1}^n [X_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \varphi_i)] \quad (2)$$

II.3.3. Vibrations apériodique:

Une vibration apériodique est telle que son comportement temporel est quelconque, c'est-à-dire que l'on n'observe jamais de reproductibilité dans le temps. C'est le cas des chocs que l'on enregistre sur un broyeur.

On présente sur la **figure 2.3** un signal aléatoire généré par Matlab.

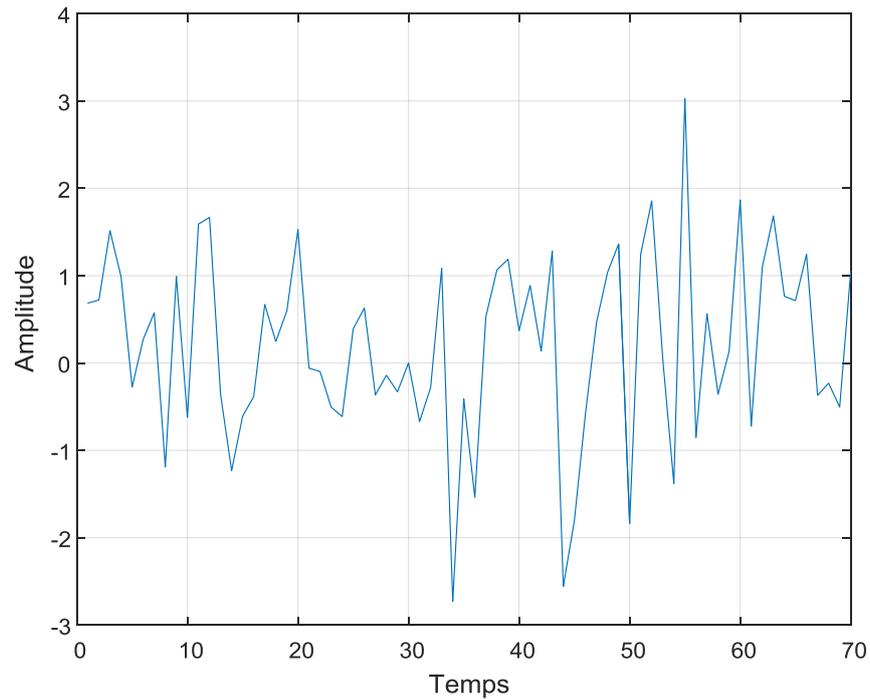


Figure 2.3. vibration aperiodique.

Elle est décrite par l'équation :

$$x(t) = \sum_{i=1}^{\infty} [X_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \phi_i)] \quad (3)$$

II.4. Grandeurs utilisées pour la mesure vibratoire :

Comme tout mouvement, une vibration peut être étudiée selon les trois grandeurs suivantes :

- Déplacement.
- Vitesse.
- Accélération.

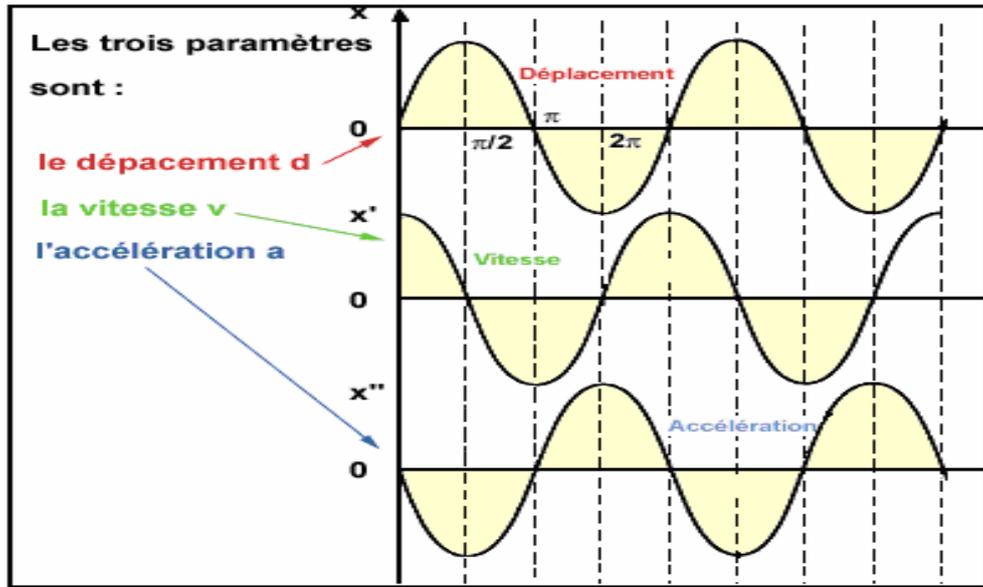


Figure 2.4. Les paramètres caractéristiques des vibrations.

II.4.1. Déplacement vibratoire $s(t)$:

On constate que le déplacement $s(t)$ est inversement proportionnel au carré de la fréquence, c'est-à-dire plus la fréquence augmente plus le déplacement du mouvement vibratoire augmente, ce qui confirme que son utilisation est réservée pour des vibrations de très basse fréquence [$0 \text{ Hz} \leq f \leq 100 \text{ Hz}$].

II.4.2. Vitesse vibratoire $v(t)$:

La vitesse d'un objet vibrant passe de zéro à une valeur maximale pendant chaque cycle de vibration. Elle est maximale lorsque l'objet passe par la position fixe qu'il occuperait en l'absence de vibration, en déplacement vers une position extrême, l'objet vibrant ralentit à mesure qu'il s'approche de sa position extrême, où il s'arrête, pour repartir ensuite dans le sens contraire vers la position fixe et l'autre position extrême. La vitesse s'exprime en mètres par seconde (m/s). L'amplitude de la vitesse d'une vibration $v(t)$ est aussi inversement proportionnelle à la fréquence, c'est-à-dire plus la fréquence augmente plus la vitesse diminue, elle est généralement utilisée dans le cas des phénomènes vibratoires à moyenne fréquence [$100 \text{ Hz} \leq f \leq 1000 \text{ Hz}$].

II.4.3. Accélération vibratoire $a(t)$:

L'accélération est une grandeur qui indique dans quelle mesure la vitesse varie en fonction du temps et elle s'exprime par conséquent en unités de vitesse (mètre par seconde) ou en mètre par seconde carrée (m/s^2). L'accélération passe de zéro à une valeur maximale pendant chaque

cycle de vibration .Elle augmente à mesure que l'objet s'approche de la position fixe qu'il occuperait en l'absence de vibration L'accélération $a(t)$ c'est la grandeur représentative des forces dynamiques qui ne dépend pas de la fréquence, c'est le paramètre privilégié en analyse vibratoire sur une large bande de fréquence [$1000 \text{ Hz} \leq f \leq 10000 \text{ Hz}$].

*Relation entre s, v, et a:

Il faut également noter qu'il existe une relation mathématique entre déplacement, vitesse et accélération.

La vitesse n'étant que l'expression d'une distance parcourue en temps donnés, et l'accélération n'étant que l'expression d'une variation de vitesse par unité de temps, il s'ensuit que, mathématiquement, la vitesse est définie comme étant la dérivée du déplacement et l'accélération comme le dérivé de la vitesse.

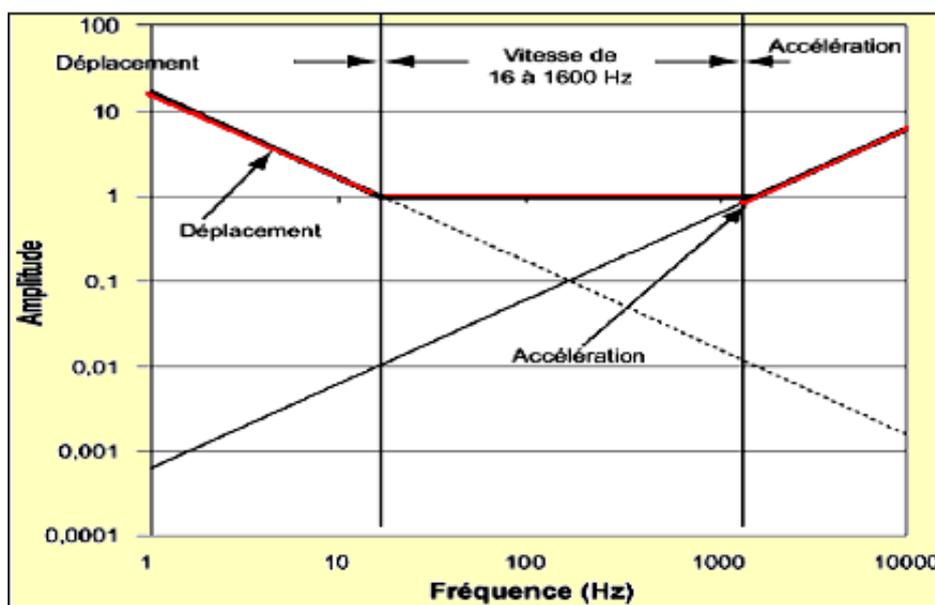


Figure 2.5. Grandeurs d'une vibration.

II.5. Mesure des vibrations:

Les trois grandeurs que l'on est amenée à mesurer en technique vibratoire : le déplacement, la vitesse et l'accélération peuvent être appréhendées par des systèmes très différents les uns des autres.

On distingue trois principes plus particulièrement utilisés :

- Déplacement: Principe des courants de Foucault.
- Vitesse: Principe électrodynamique.
- Accélération: Principe piézo-électrique.

L'ensemble complet de mesure et d'analyse comporte

- Un capteur.
- Un collecteur de donnée.
- Un calculateur ou un micro-ordinateur avec un logiciel d'exploitation.

II.5.1. Capteur de vibration:

Pour collecter les données nécessaires à la mesure et l'analyse, on fait appel aux capteurs dont le rôle est de transformer l'énergie mécanique dispensée par la machine en un signal électrique proportionnel mesurable de manière reproductible.

Il existe plusieurs types de capteurs pour apprécier les mouvements vibratoires. La sensibilité des capteurs représente la proportionnalité de la sortie électrique exploitable (tension, charge, courant) par rapport au paramètre de vibration (accélération, vitesse, déplacement). Elle s'exprime en terme de : sortie électrique / Paramètre de vibration.

II.5.1.1. Les caractéristiques d'un capteur :

Un capteur de vibration est caractérisé par :

a- La bande passante (plage d'utilisation) : plage de fréquence à l'intérieur de laquelle l'amplitude mesurée par le capteur ne dépasse pas une marge d'erreur fixée par le constructeur.

b- La gamme dynamique (gamme de mesure d'amplitude) : gamme comprise entre la plus petite et la plus grande amplitude acceptée par le capteur.

c- La sensibilité : relation entre la grandeur électrique délivrée à la sortie du capteur et l'amplitude du mouvement mécanique qui lui donne naissance. Elle est donnée par le constructeur du capteur, généralement sous forme de courbe d'étalonnage qui devra faire l'objet d'une vérification périodique.

II.5.1.2. Le rôle d'un capteur :

Le rôle du capteur est de transformer l'énergie mécanique dispensée par la machine en un signal électrique proportionnel mesurable de manière reproductible. Selon le type mesure de vibration il existe deux grandes familles de capteurs :

- Les absolus : accéléromètre, vélocimétries (capteur de vitesse).
- Les relatifs : proximètres ou sonde de déplacement ou de proximité.

Les capteurs les plus couramment utilisés sont :

- L'accéléromètre : mesure d'accélération.
- Vélocimétrie : mesure de vitesse.
- Prosimètres (la sonde de déplacement) : mesure de déplacement.

a- Accéléromètre :

Il est constitué principalement d'un matériau piézo-électrique (habituellement une céramique Ferro- électrique artificiellement polarisé). Lorsque ce matériau subit une contrainte mécanique, en extension, compression ou cisaillement il engendre une charge électrique proportionnelle à la force appliquée. Le capteur piézo-électrique ou l'accéléromètre sont les plus utilisés en raison de leur large gamme de fréquence d'utilisation.



Figure 2.6. Accéléromètre (capteur piézo-électrique).

Les différents types d'accéléromètre sont destinés :

- aux mesures axiales
- à la surveillance continue
- à l'utilisation à haute température
- à la mesure de chocs de fortes intensités...

***Principe de fonctionnement :**

L'élément piézo-électrique délivre une charge électrique, convertie en tension, proportionnelle aux contraintes qu'il subit, et donc à l'accélération locale au point de mesure. La bande passante correspond au domaine de fréquence pour lequel la sensibilité du capteur demeure pratiquement continue. Elle est souvent définie à 10 ou à 3dB.

b- Vélocimétrie :

C'est un capteur électrodynamique, auto génératrice d'une tension proportionnelle à la vitesse de déplacement de la bobine.

Les vélocimétries sont constitués d'une masse sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée, reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté.

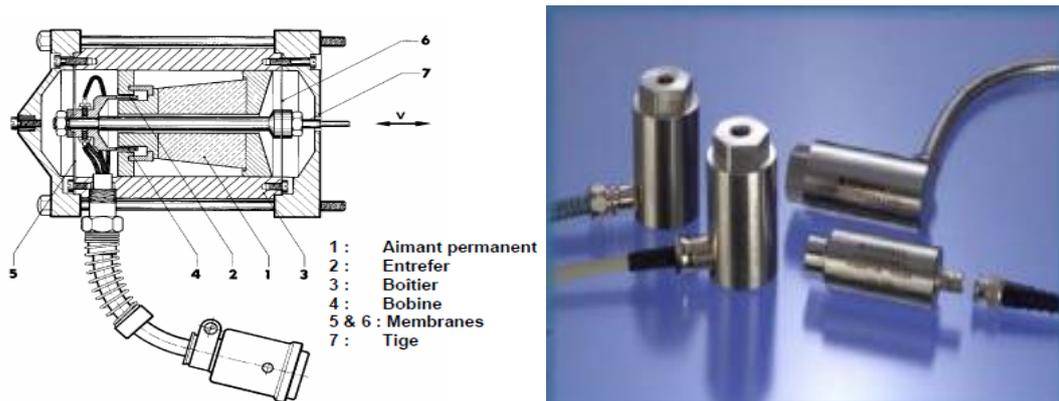


Figure 2.7. Vélocimétrie (capteur électrodynamique).

*Principe de fonctionnement :

La vibration du palier sur lequel est fixée le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse de mouvement de la bobine.

Le mouvement de la pièce métallique dans les spires provoque une variation du flux. Donc une induction de courant dans la bobine.

*Avantage:

- pas d'amplificateur à haute impédance, ni d'électronique d'excitation,
- signal de sortie de haut niveau et de faible impédance.

* Inconvénients :

- pièce métallique en mouvement (usure).
- sensibilité latérale.
- faible bande passante (10-1000hz).

c- Capteur de déplacement :

Le proximètre est un capteur de déplacement qui est utilisé pour toutes les applications ou la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers.

C'est un capteur sans contact qui produit un signal électrique directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor.



Figure 2.8. Capteur de déplacement.

*Principe de fonctionnement :

- Une bobine située dans la tête de sonde produit un champ électromagnétique.
- Une surface métallique placée dans ce champ est le siège de courants induits (courants de Foucault) qui modifient son intensité.
- La variation du champ électromagnétique correspondante est mesurée par le driver qui fournit une tension proportionnelle à la distance sonde-cible.
- C'est un capteur sans contact.

La bande passante de ce type de capteur est de l'ordre de [0-10kHz]. Néanmoins, la fréquence maximale des phénomènes vibratoires observables en déplacement n'excède pas 1kHz

*Avantage:

- mesure sans contact.
- mesure en continu (il existe un signal pour une fréquence nulle).
- mesure réelle du déplacement de l'axe dans son logement.

*Inconvénients:

- sensible aux hautes fréquences.
- qualité de mesure dépendant de la qualité de la surface.
- phase relative des vibrations de l'arbre et du palier influençant la mesure.
- implantation difficile.

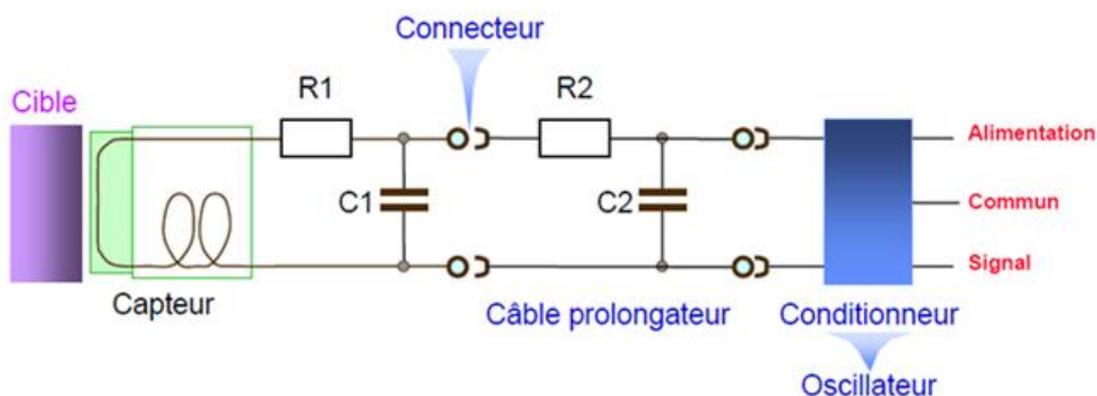


Figure 2.9. Schéma d'une chaîne de mesure à courants de Foucault.

La bobine et le conditionneur forment ensemble un circuit électronique oscillant. La figure montre clairement que le câble du capteur aussi bien que le câble prolongateur sont des composants forcés du circuit oscillant.

Le circuit oscillant crée un champ magnétique alternatif dans la bobine du capteur. D'après le principe d'induction, il se crée alors des courants de Foucault dans un corps conducteur que l'on approche du capteur. Ces courants de Foucault agissent à leur tour sur la bobine par l'intermédiaire du champ magnétique et consomment ainsi de l'énergie électrique. Cette transformation d'énergie est d'autant plus importante que le corps métallique est proche de la bobine et que sa susceptibilité magnétique est élevée. Elle se traduit alors dans le conditionneur par une diminution de la tension. Cet effet est démodulé dans le conditionneur et transformé en un signal de mesure proportionnel à la distance objet/bobine.

II.5.2. Collecteur de donnée portable :

Ces appareils présentent l'ensemble des mesures : déplacement, vitesse et accélération. Ils contiennent une mémoire interne importante pour stocker les données et permettent une communication facile avec un ordinateur.

Les paramètres de choix sont essentiellement les fonctions de gestion des circuits de mesure, le dialogue avec l'opérateur, l'ergonomie et le poids.

Certains appareils proposent des fonctions correctives supplémentaires comme l'équilibrage sur site le lignage d'arbre au laser.

II.5.3. Logiciel de traitement :

Les logiciels associés aux électroniques de mesure assurent le stockage des données, la mise à jour des historiques, la configuration des appareils, l'établissement des courbes de tendance, l'élaboration de rapports, la gestion des alarmes et aident aux diagnostics.

Par ailleurs, ils possèdent aussi les fonctions nécessaires à leur intégration dans le système de communication existant.

II.5.4. Point de mesure :

L'implantation de l'accéléromètre sur les machines est, elle aussi, très importante.

Chaque campagne de mesure doit être effectuée en des points précis et toujours les mêmes. En effet, un phénomène mécanique peut donner des images vibratoires sensiblement différentes en fonction des points de mesure.

On essaiera toujours de rapprocher le plus possible les points des paliers. Cela permet d'obtenir les images les plus fidèles des défauts mécaniques (bande passante de la chaîne d'acquisition maximale, amortissement minimisé).

Pour avoir une image complète des vibrations (en trois dimensions), il faut prendre les selon trois directions perpendiculaire sur chaque palier de la machine surveillée : deux directions radiales (horizontale et verticale) et une direction axiale.

II.6. Signal vibratoire:

II.6.1. Généralité sur les Signaux:

Un signal est la représentation physique de l'information, qu'il convoie de sa source à son destinataire. La description mathématique des signaux est l'objectif de la théorie du signal. Elle offre les moyens d'analyser, de concevoir et de caractériser des systèmes de traitement de l'information.

La **figure 2.10**, présentent un signal simulé avec Matlab d'une sinusoïde de $f=50$ Hz et son spectre.

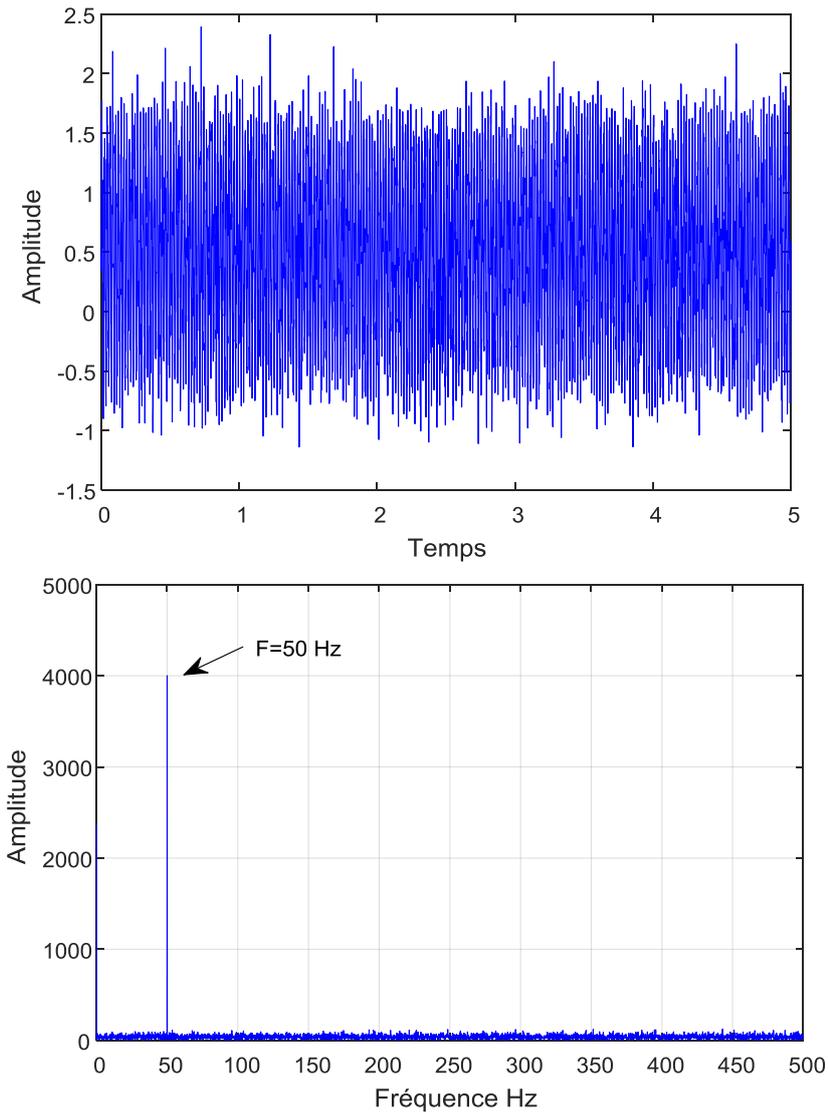
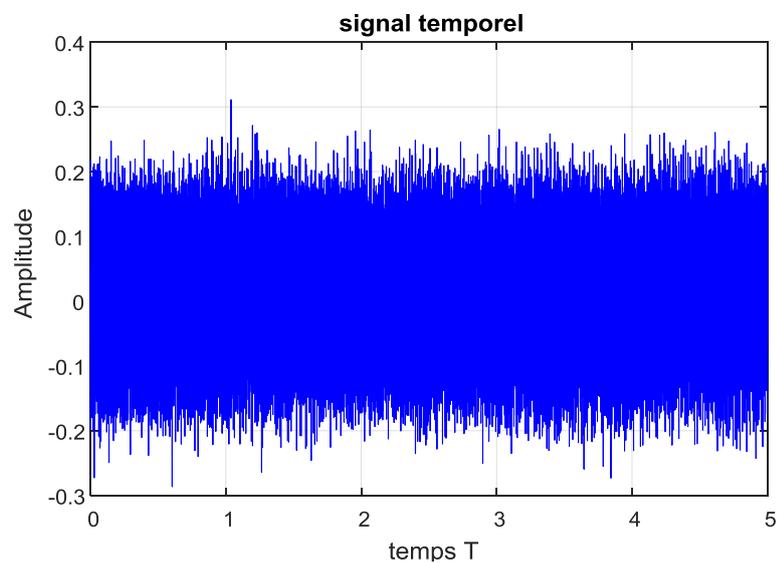


Figure 2.10. Signal temporel modélisé, son spectre.

On présente sur la **figure 2.11** un signal temporel réel d'une machine avec son spectre.



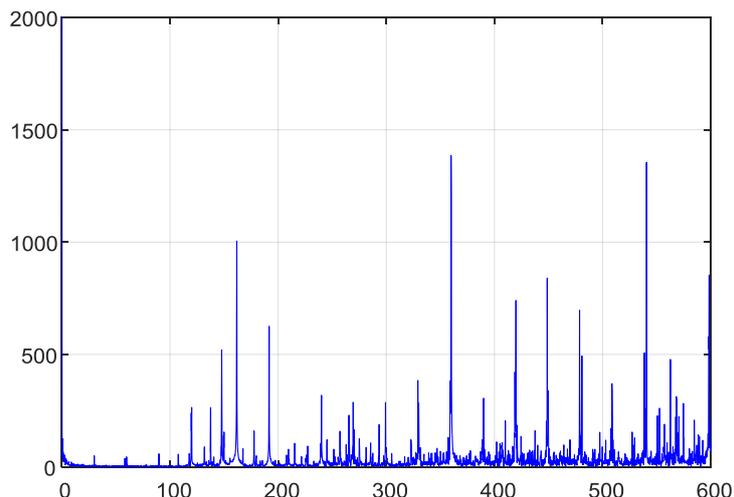


Figure 2.11. Signal vibratoire réel, son spectre.

II.6.2. Types de Signaux:

On compte plusieurs types de signaux, comme les signaux périodiques, stationnaires, non stationnaires, non linéaires, déterministes,....etc.

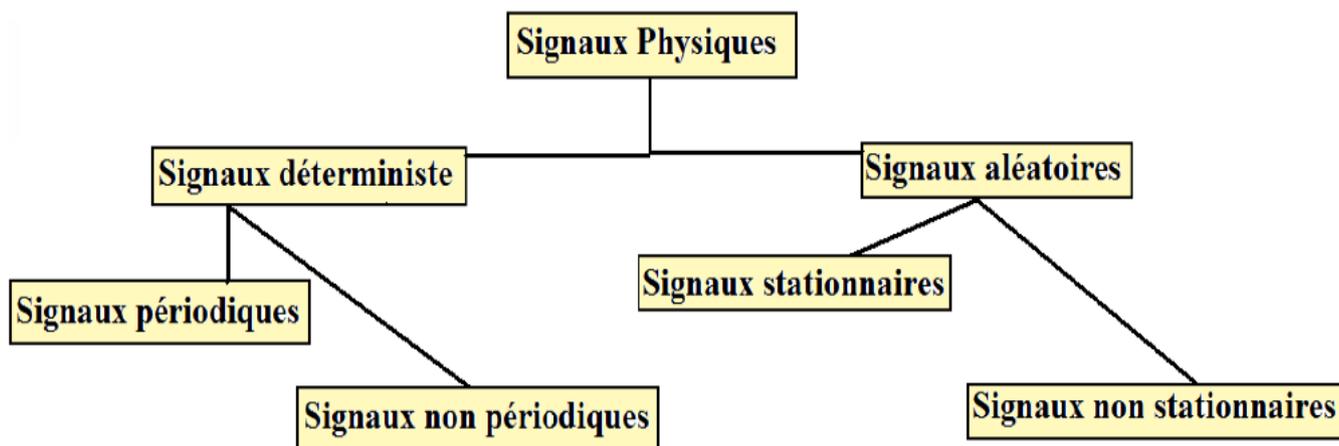


Figure 2.12. Types de signaux vibratoires.

II.6.2.1. Signaux déterministes :

Un signal est appelé déterministe s'il est possible de déterminer son amplitude pour tout instant « t ». Un tel signal peut être défini par une expression mathématique ou par un graphique. Les signaux déterministes sont déterminés par un ensemble de phénomènes physiques connus ou non. Ce type de signal Ils peuvent être périodiques et non périodiques.

-Périodiques: Si la propriété suivante est vérifiée: $x(t+nT) = x(t)$ pour toute valeur de n. « n » étant un entier.

-Non périodiques : un signal est dit non périodique s'il n'est pas périodique, mais, existe à tout instant « t ».

II.6.2.2. Signaux aléatoire :

Les signaux aléatoires sont caractérisés par le fait qu'il n'est pas possible de prédire leur amplitude à un instant donné. Ils sont classés en deux types qui sont :

-Stationnaires: Ce sont des signaux dont les caractéristiques statistiques sont indépendantes de l'origine du temps.

-Non stationnaires: Ce sont des signaux qui ont les caractéristiques contraires à celles des stationnaires.

II.7. Surveillance vibratoire :

Il existe deux types de suivi vibratoire qui sont [20] :

II.7.1. Le suivi périodique (off line) : il concerne l'évolution des paramètres vibratoires, souvent accompagné, dans le même temps, de la surveillance d'autres paramètres (analyse de lubrifiants, performances, appréciations sensorielles,...etc.). Ceci permet de détecter l'apparition de défauts à évolution lente. La périodicité des relevés est variable (entre 2 semaines et 6 mois suivant l'importance et le coût des machines en cause). La fréquence peut être accélérée si les symptômes précoces le justifient.

II.7.2. Le suivi continu (on line) : il permet de suivre l'évolution de l'ensemble des paramètres. Il présente l'avantage de détecter des défauts à évolution rapide et d'assurer la sécurité des installations par déclenchement de la machine à l'approche d'un seuil réputé dangereux. Seules les défaillances de type explosif (perte brutale d'aubages de turbine ou de compresseur axial, par exemple) ne sont pas détectables de manière précoce, mais le déclenchement de la machine dès leur apparition peut limiter les dégâts consécutifs à ces défaillances.

II.8. Les méthodes d'analyse:

Il existe différents outils d'analyse vibratoire permettant de détecter et de diagnostiquer l'apparition des défauts :

II.8.1. Les méthodes temporelles:

Les méthodes temporelles sont basées sur l'analyse statistique du signal recueilli, elles s'appliquent à des machines simples et consistent à effectuer des mesures de vitesse dans des

gamme de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevées. Le but est de minimiser l'influence des vibrations induites par la rotation des arbres. Cette méthode utilise des indicateurs scalaires qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal. Sa valeur peut ne pas avoir de signification intrinsèque, mais c'est son évolution dans le temps qui est significative du défaut.

II.8.2. Les méthodes fréquentielles:

Les méthodes fréquentielles sont basées sur la transformée de Fourier. La connaissance des fréquences caractéristiques permet d'identifier et de localiser les défauts issus des composants mécaniques en analysant leur spectre. Elles sont souvent utilisées pour les machines complexes comportant beaucoup de composants mécaniques.

II.8.3. La méthode de l'enveloppe:

La méthode de l'enveloppe est une technique utilisant la résonance haute fréquence du roulement (ou du capteur). Pour ce faire, elle utilise la fréquence de résonance du roulement. Pour extraire l'information nécessaire à la détermination de la présence du défaut et mettre en évidence cette information dans une plage fréquentielle normalement observée en analyse vibratoire (0 – 1500 Hz). Plus précisément, la méthode de l'enveloppe utilise la modulation de l'amplitude de la fréquence de résonance du roulement, par la fréquence du défaut.

II.9. Outil de surveillance :

On peut définir globalement trois modes de surveillance de fiabilité croissante et de finalité différente

- Surveillance par indicateur scalaire énergétique «globaux» ou «large bande».
- Surveillance par indicateurs spectraux.
- Surveillance par indicateurs typologiques ou comportementaux.

III. Conclusion :

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

Le bon choix de l'indicateur de vibration joue un rôle très important pour réaliser un diagnostic et par conséquent la détection de n'importe quel défaut de roulement, par exemple pour la détection d'un défaut de roulement, on trouve qu'il est utile d'utiliser l'analyse spectrale (résonance à des hautes fréquences, le spectre d'enveloppe BCU), le facteur de défaut de roulement est aussi exigé la complémentarité de plusieurs indicateurs (facteur crête et valeur efficace...).

Chapitre 3

Etude de la sensibilité des indicateurs scalaires

I. Introduction

Cette étude est consacrée à la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire, domaine d'activité qui constitue une part toujours plus importante des dispositions permettant de rentabiliser l'instrument de production industriel. Elle propose une méthodologie numérique et expérimentale d'aide à la détection et au suivi vibratoire des défauts sur les roulements. L'objectif de ce travail est d'utiliser des points de mesures situés sur les roulements du banc d'essais permettant de réaliser une surveillance vibratoire efficace.

Les indicateurs scalaires, étant des paramètres très intéressants dans le cadre de la détection des défauts, sont à notre avis mal exploités. Leur fiabilité, simplicité et rapidité de jugement sur l'état du roulement sont souvent masquées par leurs limites tant évoquées dans beaucoup de travaux.

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'influence de certains paramètres, tels que la gravité du défaut et la charge appliqué, sur la sensibilité des indicateurs scalaires. Les signaux de vibrations que nous proposons d'étudier ont été fournis par ;"the Case Western Reserve University-Bearing Data Center "[21], base de données des essais de roulements à billes normaux ou défectueux, recueillis sur un banc d'essai très simple, composé d'un moteur, un accouplement et une génératrice. De simples défauts sous forme de points « de différent diamètres et profondeurs » ont été créés sur les différents organes composants les roulements d'essais.

II. Les indicateurs scalaires :

II.1. Définition :

Les indicateurs scalaires associent à un signal vibratoire, observé le plus souvent sous sa forme temporelle sur une durée déterminée en relation avec la cinématique de l'installation, un nombre ou scalaire. Divers indicateurs sont utilisés dans le suivie vibratoire des machines tournantes, on peut citer à cet effet ; la valeur efficace, la valeur crête ou une combinaison de ces deux grandeurs représentée par le kurtosis et le facteur de crête [22].

II.1.1. La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square) :

C'est un indicateur scalaire « large bande » très utilisé bien qu'il présente des inconvénients. Il est sensible à l'effet de masque, c'est à dire qu'il peut s'avérer inefficace l'apparition de certains défauts et il s'écrit sous forme discrétisée :

$$V_{\text{efficace}}(\text{RMS}) = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{a=1}^{N_e} [x(n)]^2} \quad (1)$$

Où $x(n)$ est le signal temporel mesuré, N_e représente le nombre d'échantillons prélevés dans le Signal. Permet de contrôler rapidement l'état de la machine et d'indiquer si les conditions de fonctionnement ont évoluées de manière inquiétante depuis la dernière mesure. Ce critère n'évolue pas de manière significative au cours de la 1ère phase de dégradation, il ne commence à croître que pendant la 2^{ème} phase de dégradation. Ceci est un point faible pour la maintenance conditionnelle et rend la détection précoce impossible.

Globalement, la valeur efficace ne détecte pas tous les défauts et donne une alarme tardive, ce qui représente un inconvénient majeur dans le cadre de la maintenance conditionnelle. Son efficacité dépend de son bon paramétrage en termes de bandes de Fréquences d'analyse liées à la structure même des machines [23].

II.1.2. La valeur crête : V_C

Représente la valeur maximale du signal. Pour un signal $\mathcal{X}(n)$ la valeur crête est donnée par :

$$\text{Valeur crête} = \text{Sup } |x(n)| \quad (2)$$

Est un indicateur qui caractérise l'amplitude maximale des chocs. Il se manifeste dès l'apparition de la première écaillage et donne une information très précoce de la prédiction. Malheureusement, c'est un mauvais indicateur une fois que la dégradation s'accroît [23].

Il faut remarquer aussi, que ces deux indicateurs (V_{RMS} , V_c) dépendent de la vitesse de rotation, des charges de la machine et des dimensions des roulements. Ceci est un inconvénient pour la surveillance des roulements (seuil de la surveillance).

II.1.3. Le facteur de crête :

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

$$\text{Facteur de crête} = \frac{\sup|x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2}} \quad (3)$$

Etant donné que le facteur crête d'un signal dont la distribution des amplitudes est gaussienne, est compris entre 3 et 6, cet indicateur n'est apte à la détection de défaut que si sa valeur est supérieure ou égale à 6 [23].

II.1.4. Le kurtosis :

Le Kurtosis est le moment d'ordre 4 normé de la distribution statistique du signal. C'est un indicateur permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut de roulement. Dans le cas d'un roulement sans écaillage, la distribution des amplitudes contenues dans le signal recueilli est gaussienne ce qui entraîne une valeur de Kurtosis proche de 3 (Moment d'ordre 4 d'un signal gaussien égale à 3). Lorsqu'un défaut est détecté, sa valeur devient supérieure à 3. L'analyse des défauts de roulement par le Kurtosis peut également être réalisée dans différentes bandes de fréquences liées aux résonances de la structure.

$$\text{Kurtosis} = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (4)$$

Où M_4 et M_2 sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2, $x(n)$ est le signal temporel, \bar{x} est la valeur moyenne des amplitudes, N est le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Le principale avantage du Kurtosis réside dans le fait qu'il ne tient pas compte de l'historique, et qu'il donne une valeur intrinsèque de l'état du roulement [24].

Le Kurtosis doit cependant être utilisé avec beaucoup de précaution, car il est très sensible aux chocs ce qui oblige un emploi du Kurtosis dans un environnement peu complexe afin de ne pas commettre d'erreurs de diagnostic.

III. Présentation de Matlab:

III.1. Définition de Matlab :

Le logiciel Matlab est un logiciel de manipulation de données numériques et de programmation dont le champ d'application est essentiellement les sciences appliquées. Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique.

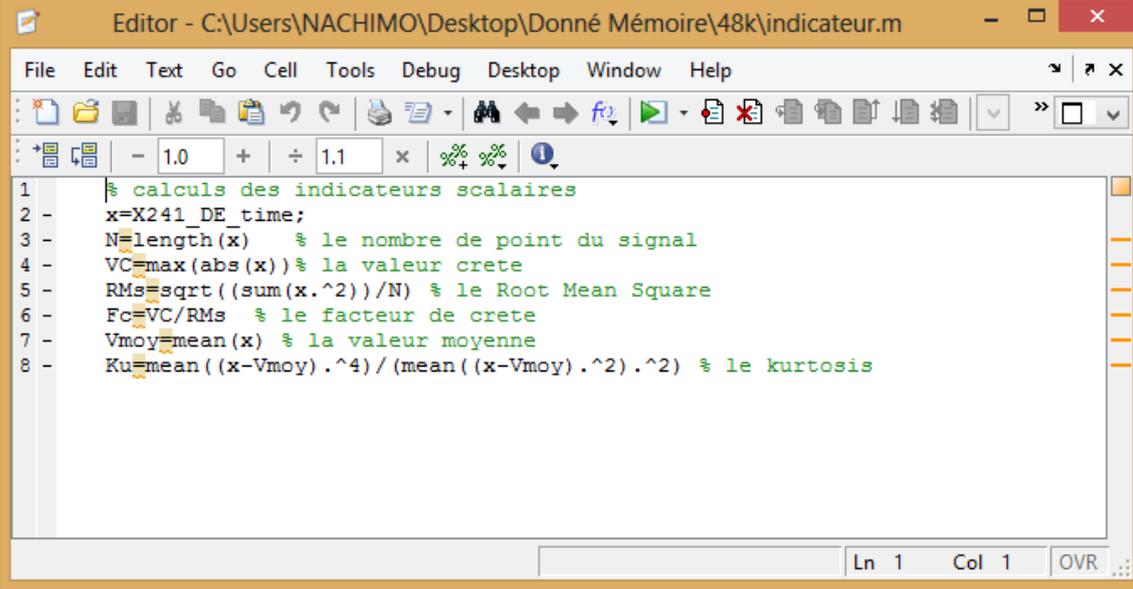
MATLAB est un langage de développement informatique particulièrement dédié aux applications scientifiques. Matlab est utilisé pour développer des solutions nécessitant une très grande puissance de calcul.

MATLAB est un environnement puissant, complet et facile à utiliser destiné au calcul scientifique. Il apporte aux ingénieurs, chercheurs et à tout scientifique un système interactif intégrant calcul numérique et visualisation. C'est un environnement performant, ouvert et programmable qui permet de remarquables gains de productivité et de créativité.

MATLAB est un environnement complet, ouvert et extensible pour le calcul et la visualisation. Il dispose de plusieurs centaines (voire milliers, selon les versions et les modules optionnels autour du noyau Matlab) de fonctions mathématiques, scientifiques et techniques. L'approche matricielle de MATLAB permet de traiter les données sans aucune limitation de taille et de réaliser des calculs numériques et symboliques de façon fiable et rapide. Grâce aux fonctions graphiques de MATLAB, il devient très facile de modifier interactivement les différents paramètres des graphiques pour les adapter selon nos souhaits.

III.2. Calculs des indicateurs scalaires sous Matlab :

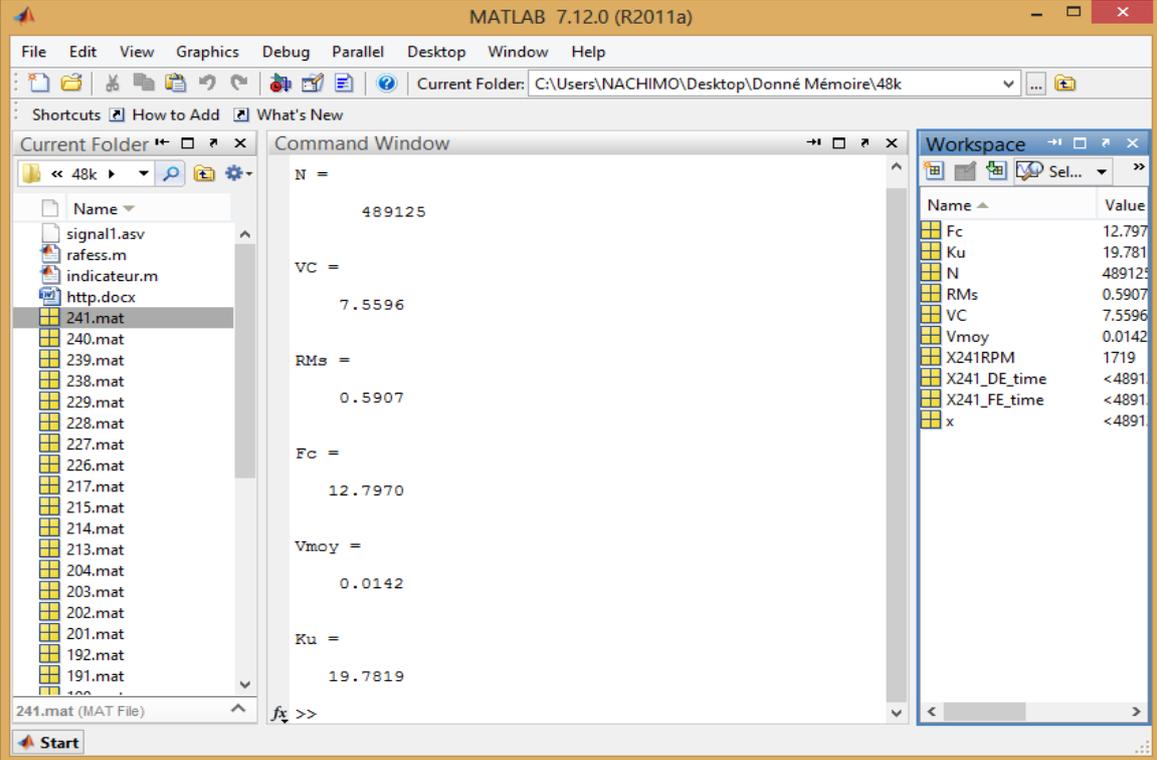
On présente sur la **figure 3.1** le code de calculs des indicateurs scalaires programmé sous Matlab:



```

1  % calculs des indicateurs scalaires
2  x=X241_DE_time;
3  N=length(x) % le nombre de point du signal
4  VC=max(abs(x)) % la valeur crete
5  RMs=sqrt((sum(x.^2))/N) % le Root Mean Square
6  Fc=VC/RMs % le facteur de crete
7  Vmoy=mean(x) % la valeur moyenne
8  Ku=mean((x-Vmoy).^4)/(mean((x-Vmoy).^2).^2) % le kurtosis

```



The screenshot shows the MATLAB 7.12.0 (R2011a) interface. The Command Window displays the results of the script execution, and the Workspace window shows the variables and their values.

Variable	Value
N	489125
VC	7.5596
RMs	0.5907
Fc	12.7970
Vmoy	0.0142
Ku	19.7819
Fc	12.797
Ku	19.781
N	489125
RMs	0.5907
VC	7.5596
Vmoy	0.0142
X241RPM	1719
X241_DE_time	<4891
X241_FE_time	<4891
x	<4891

Figure 3.1. Fenêtres du logiciel de Matlab pour calculé les indicateurs scalaires.

IV. Présentation du projet :

Le site Web "csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/welcome-case-western-reserve-university-bearing-data-center-website" [21], permet d'accéder à la base de données des essais de roulements à billes, soit les roulements normaux et défectueux.

Comme représenté sur la **figure 3.2**, le banc d'essai se compose principalement d'un moteur (à gauche), d'un accouplement « transducteur/encodeur » (au centre), d'un dynamomètre (à droite) et des circuits de commande (non montrés).

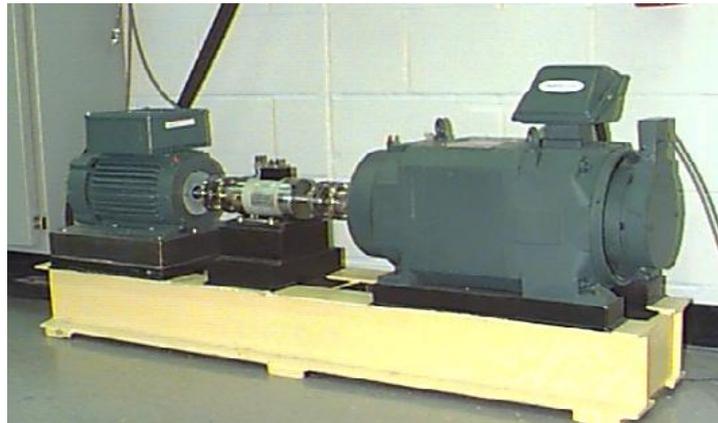


Figure 3.2. Le banc d'essai.

Les roulements testés soutiennent l'arbre du moteur des deux côtés (coté entraînement et coté ventilateur). La **figure 3.3** représente une coupe d'un moteur.

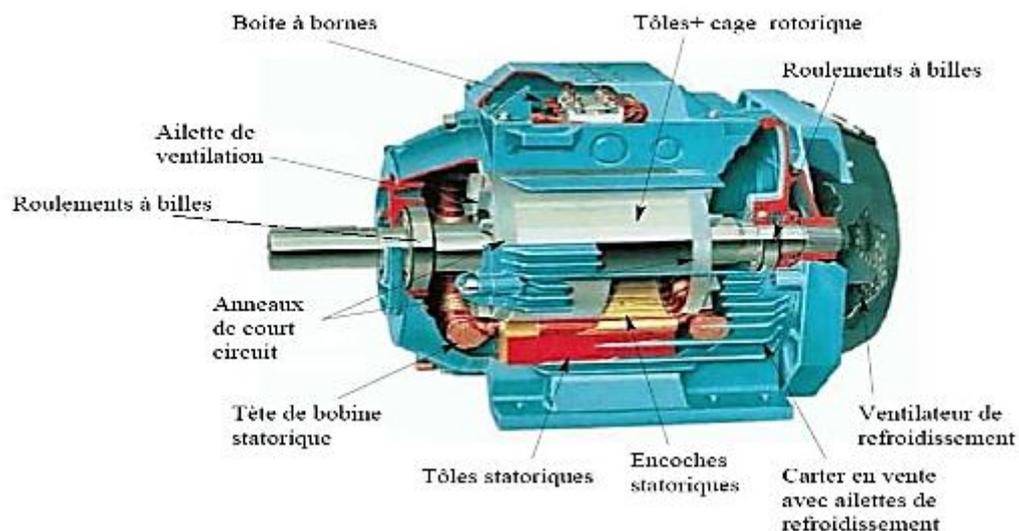


Figure 3.3. Coupe d'un moteur.

Les signaux ont été enregistrés à l'aide des accéléromètres, qui ont été fixés à la cage du moteur par aimant, pour différents couples résistants (donc différentes vitesses de rotations).

Les couples sont respectivement 0, 1, 2, 3 HP dont des vitesses respectives sont 29.95 Hz, 29.53 Hz, 29.17 Hz et 28.83 Hz.

Les capteurs ont été placés à la position 12 heures « verticale », des deux côtés accouplement et ventilateur de la cage du moteur.

IV.1. Le fichier de données :

La fréquence d'échantillonnage est $f_e=12$ KHz, et le nombre de point totale est de $N=243938$ pts

Les données ont été enregistrées pour :

- Les roulements sans défaut.
- Les défauts uniques du cotés accouplement (12.000 et 48.000 points/second).
- Les défauts uniques du cotés ventilateur (12.000 points/second.)

La vitesse [Hz] et la puissance [HP] pour chaque essai ont été enregistrées manuellement en utilisant le couple transducteur/encodeur

Dans ce travail, les roulements que nous avons considérés, sont les roulements de côté accouplement

V. Etude de la sensibilité des indicateurs scalaires :

Pour voir la sensibilité des indicateurs scalaires une étude statistique a été faite, l'évolution de ces indicateurs dans le temps peut avoir une signification sur l'aggravation du défaut.

On présente sur le **tableau 3.1**, les valeurs des indicateurs scalaires calculées à partir des différents signaux temporels.

V.1. Influence de la gravité du défaut :

V.1.1. Cas d'un défaut sur la bille :

On présente sur le **tableau 3.1** les valeurs des indicateurs scalaires pour un défaut de bille en fonction de la charge et pour différents diamètre du défaut.

Couple HP	0			Couple HP	1		
Diamètre du défaut (mm)	0,1778	0,3556	0,5334	Diamètre du défaut (mm)	0,1778	0,3556	0,5334
Fc	4,9279	9,6437	5,5706	Fc	4,7771	17,5384	13,2183
K	3,149	10,2349	3,2173	K	3,0722	18,0633	9,9425
Vc	0,7364	1,3172	2,3796	Vc	0,6755	2,5954	2,8211
RMS	0,1494	0,1366	0,4272	RMS	0,1414	0,148	0,2134
Couple HP	2			Couple HP	3		
Diamètre du défaut (mm)	0,1778	0,3556	0,5334	Diamètre du défaut (mm)	0,1778	0,3556	0,5334
Fc	5,154	19,9966	10,2423	Fc	4,6406	18,302	10,5943
K	3,087	37,6678	16,7608	K	3,0414	17,0811	18,5929
Vc	0,7402	3,418	3,418	Vc	0,6646	3,0264	3,418
RMS	0,1436	0,1709	0,3337	RMS	0,1432	0,1654	0,3226

Tableau 3.1. Les valeurs des indicateurs scalaires pour différents diamètre du défaut et différentes charges.

Nous avons tracé sur les histogrammes des **figures 3.4** et **3.5** les valeurs des indicateurs scalaires le kurtosis K, le facteur de crête FC, la valeur crête VC et la valeur efficace RMS, pour différentes charges et différentes gravités de défauts dans le but de voir l'influence de ces deniers sur la sensibilité des indicateurs scalaires.

- Kurtosis et facteur de crête

Un suivi rigoureux des niveaux des indicateurs scalaires peut donner des indications claires sur l'évolution du défaut. Certains indicateurs sont très sensible aux présences de chocs dans les signaux tels que : le Kurtosis, le Facteur Crête voir **la figure 3.4**, où on constate que leurs niveaux augmentent avec l'aggravation du défaut du 0.1778 mm à 0.3556 mm. Pour un défaut avec une gravité importante 0.5334mm les chocs prennent plus de temps pour s'amortir, ce qui masque les impacts présents dans le signal et rend les indicateurs moins sensible aux chocs et leurs valeur diminues.

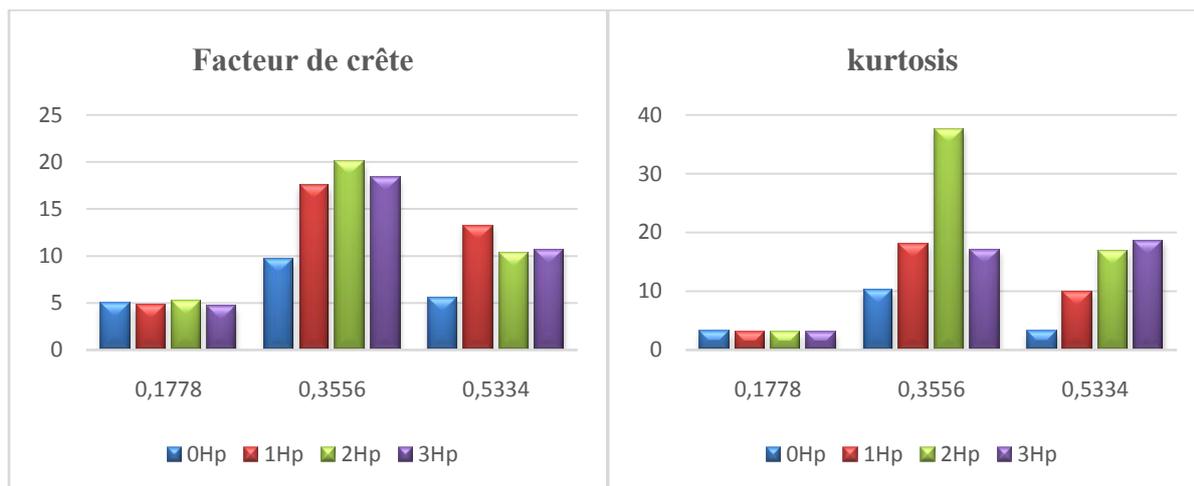


Figure 3.4. Evolution du facteur de crête et le kurtosis en fonction de diamètre de défaut sur la bille.

- **RMS et valeur crête**

Le RMS et la valeur crête sont des indicateurs sensibles à l'énergie du signal, d'après les histogrammes des **figures 3.5**, on remarque une augmentation des valeurs de ces indicateurs avec l'augmentation de la gravité du défaut.

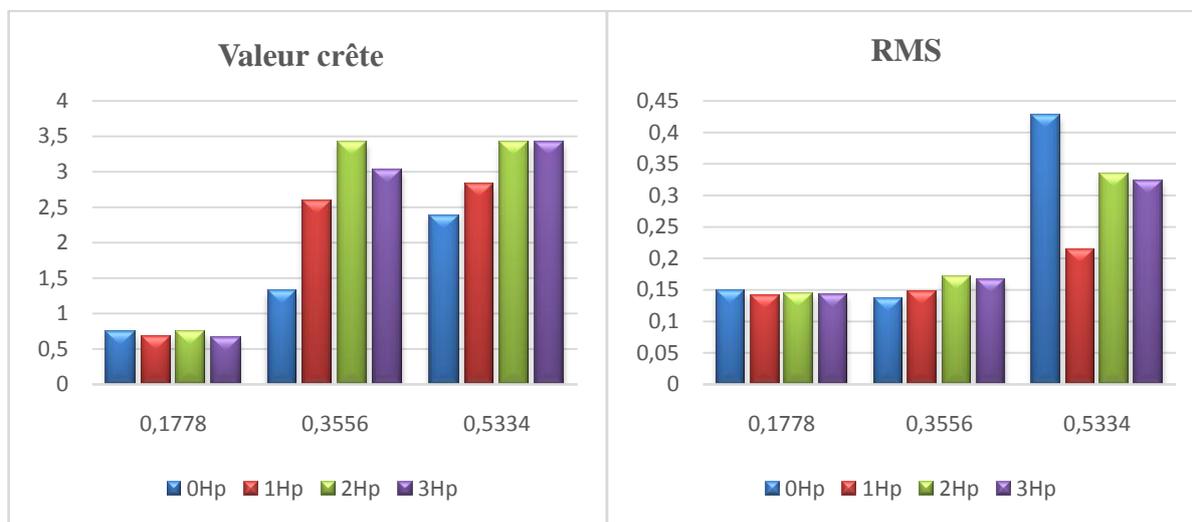


Figure 3.5. Evolution de la valeur crête et le RMS en fonction de diamètre de défaut.

V.1.2. Cas d'un défaut sur la bague intérieure :

On présente sur le **tableau 3.2** les valeurs des indicateurs scalaires pour un défaut de bille en fonction de la charge et pour différents diamètre du défaut.

Couple HP	0			Couple HP	1		
Diamètre du défaut (mm)	0,1778	0,3556	0,5334	Diamètre du défaut (mm)	0,1778	0,3556	0,5334
Fc	6,0705	7,9621	5,2557	Fc	5,9263	11,1814	5,6169
K	6,0272	11,6693	4,1681	K	7,3687	19,3065	3,9373
Vc	3,5695	1,4498	3,075	Vc	1,6516	2,9243	3,4177
RMS	0,588	0,1821	0,5851	RMS	0,2787	0,2615	0,6085
Couple HP	2			Couple HP	3		
Diamètre du défaut (mm)	0,1778	0,3556	0,5334	Diamètre du défaut (mm)	0,1778	0,3556	0,5334
Fc	6,044	11,2226	4,4796	Fc	5,937	9,9203	5,1271
K	7,5105	20,1512	3,6519	K	6,8278	14,9401	3,6457
Vc	1,6965	2,6693	3,418	Vc	1,6606	2,6634	2,1231
RMS	0,2807	0,2378	0,763	RMS	0,2797	0,2685	0,4141

Tableau 3.2. Les valeurs des indicateurs scalaires pour différents diamètre du défaut et différentes charges.

Les mêmes analyses présentées pour le cas de défaut sur la bille, sont valables pour le cas de défaut sur la bague intérieure.

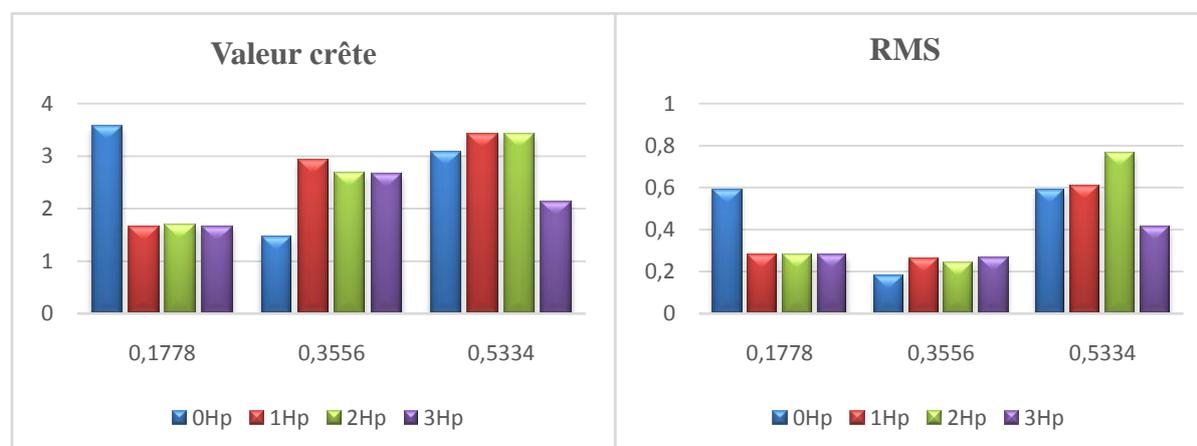




Figure 3.6. Evolution des indicateurs scalaires en fonction de diamètre de défaut sur la bague intérieure.

V.2. Influence de la charge :

V.2.1. Cas d'un défaut sur la bille :

De la même manière que précédemment on trace les valeurs des indicateurs scalaires mais dans ce cas en fonction de la charge appliqué par le frein (sans charge, 1 Hp, 2 Hp et 3 Hp). Pour les indicateurs tels que le kurtosis et le facteur de crête leurs valeurs augmentent avec l'augmentation de la charge et la gravité du défaut, aussi une charge importante rend ces indicateurs moins sensibles et leurs valeurs diminuent. **Figure 3.7.**

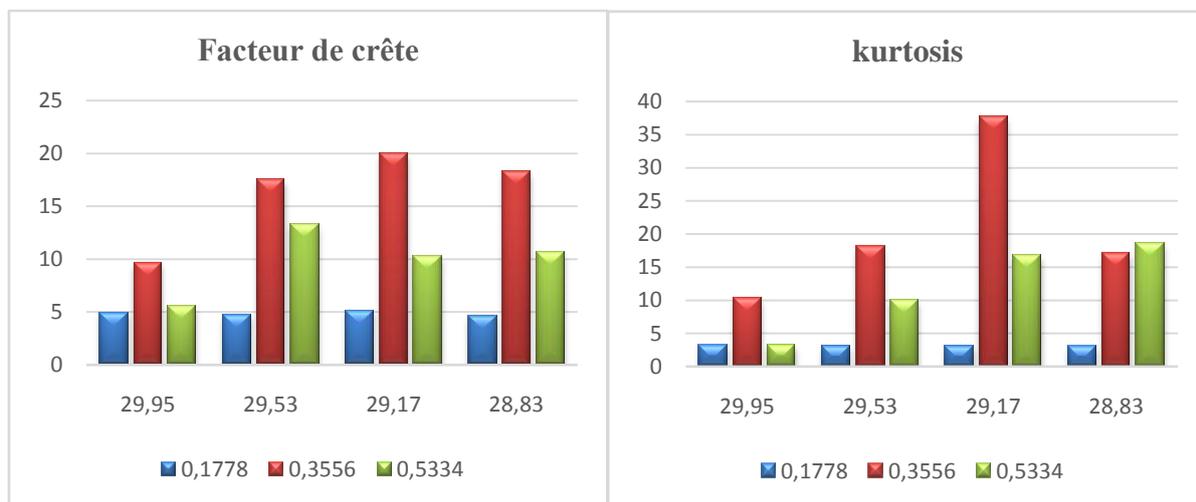


Figure 3.7. Evolution du facteur de crête et le kurtosis en fonction de la charge.

Les valeurs du RMS et la valeur crête augmentent avec l'augmentations de la charges cela confirme aussi que se sont des indicateurs sensibles à l'énergie du signal, comme il a été mentionné dans la référence [11] **figure 3.8.**

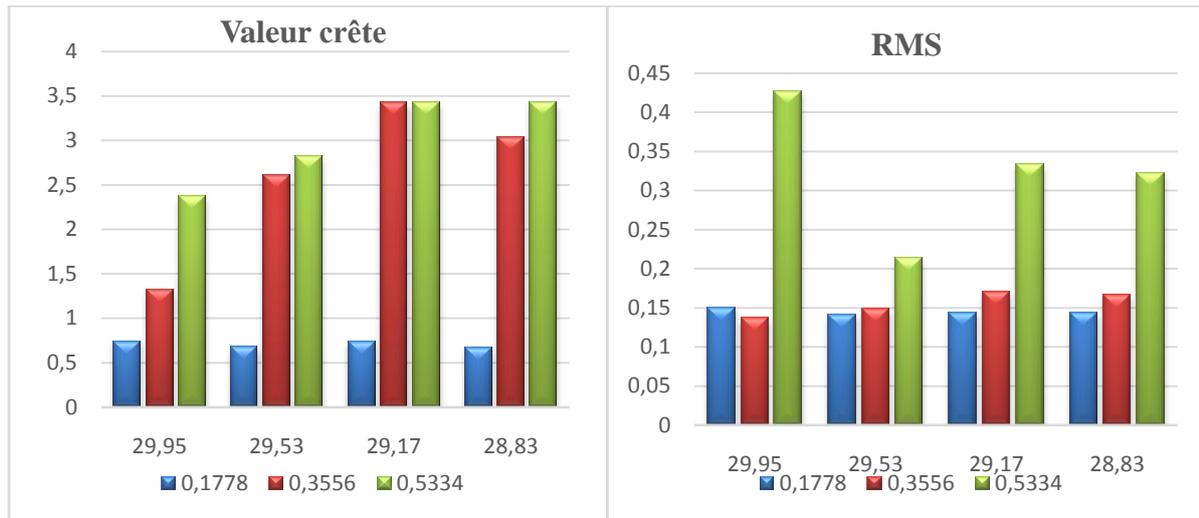


Figure 3.8. Evolution de la valeur crête et le RMS en fonction de la charge.

V.2.2. Cas d'un défaut sur la bague intérieur :

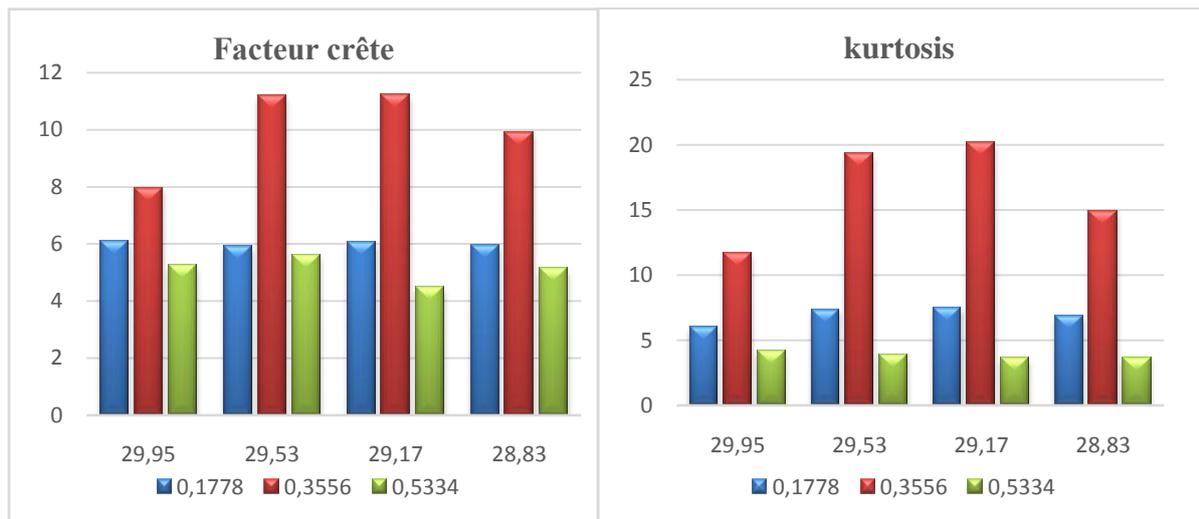


Figure 3.9. Evolution du facteur crête et le kurtosis en fonction de la charge.

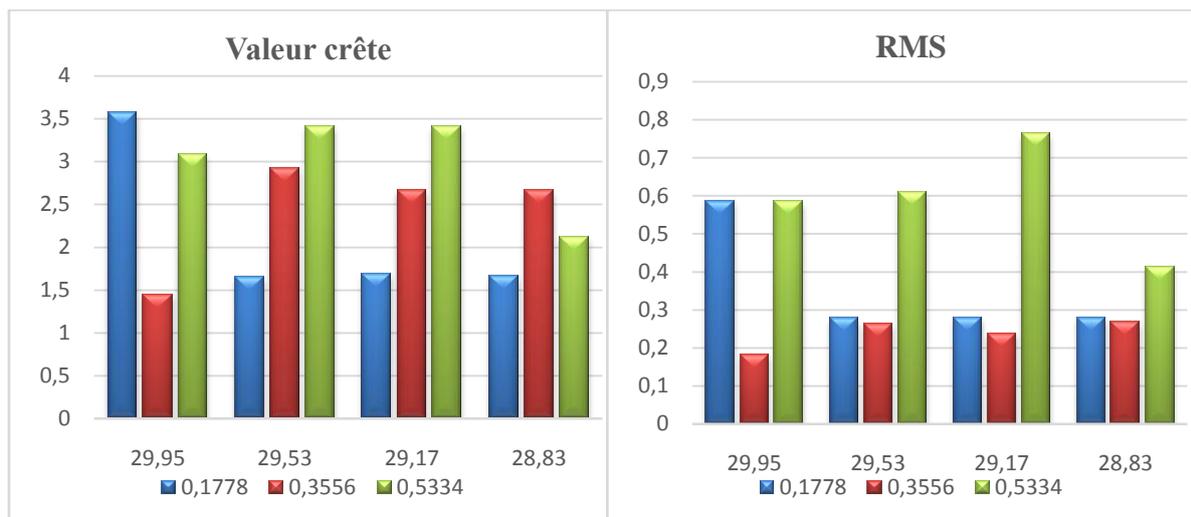


Figure 3.10. Evolution de la valeur crête et le RMS en fonction de la charge.

VI. Conclusion :

Le présent chapitre a été consacré pour étudier la sensibilité des indicateurs scalaires sur les signaux de roulement de DATA BEARING CENTER.

D'après les résultats obtenus dans ce travail on montre que :

- Pour la charge et la gravité du défaut, les indicateurs scalaires la valeur crête et RMS qui sont des indicateurs tient compte de l'énergie du signal, se sont montrés très sensibles et augmentent dès que les valeurs de ces derniers augmentent. Pour le kurtosis et le facteur de crête qui sont des indicateurs de forme, se sont montrés aussi très sensibles aux chocs, et ils perdent leurs sensibilités dans le cas d'un défaut avec une gravité importante et une charge élevé.
- le kurtosis et le facteur de crête sont plus sensibles pour détecter la présence de défaut.
- Le facteur de crête est moins sensible que le kurtosis, pas autant que la valeur crête et le RMS qui se montrent d'autant plus sensibles aux amplitudes du signal et pas à sa forme.
- Les résultats obtenus de la sensibilité des indicateurs scalaires sont confirmés par plusieurs chercheurs dans le domaine.

Conclusion générale :

Le travail de ce mémoire entre dans le cadre de la maintenance préventive des machines tournantes par analyse vibratoire. Cette dernière est devenue un outil puissant pour surveiller l'état de fonctionnement d'une machine à tout moment grâce à des indicateurs scalaires que l'on peut calculer à partir des signaux vibratoires que produisent ces machines. En effet, les indicateurs scalaires ont été présentés comme étant un outil fiable et pratique pour la détection des défauts.

A ce propos plusieurs indicateurs de détection ont été proposés et utilisés comme mesure globale du niveau vibratoire tels que la valeur crête, le kurtosis, le RMS, le facteur de crête. Des indicateurs plus spécifiques aux défauts induisant des chocs, à l'image de ceux des roulements et des engrenages.....

Le but de cette étude est de définir des indicateurs temporels sensibles et capables de détecter un défaut dans différentes paramètres tels que le défaut de diamètre, la charge, la fréquence de rotation. Ces indicateurs, étant sensibles à la forme du signal, le kurtosis s'est montré plus sensible que le facteur de crête et permet donc une détection plus précoce, Le RMS et la valeur crête sont des indicateurs sensibles à l'énergie du signal.

Enfin, le Diamètre, la Vitesse de rotation et la charge, sont très influents sur les indicateurs scalaires et même les outils fréquentiels, les indicateurs scalaires se sont montrés très sensibles et augmentent dès que le couple.

Références bibliographiques :

- [1] Jaques Morel : « Surveillance vibratoire et maintenance prédictive ». Technique de l'ingénieur R6100.
- [2] Breneur Claire « Éléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenage et de roulements », Thèse de l'INSA de Lyon, Décembre 2002.
- [3] (AFNOR X 60-010-1994) : Association française de Normalisation.
- [4] «norme NF EN 13306» Association française de Normalisation (AFNOR), Terminologie de la maintenance : Norme européenne, 2001.
- [5] Zwingelstein G : « Diagnostic des défaillances. Théorie et pratique pour les systèmes industriels ». Traité des Nouvelles Technologies - Série Diagnostic et Maintenance. Editions Hermès, Paris 1995.
- [6] R. Bigret, J.L.Feron ; Diagnostic, maintenance, disponibilité des machines tournantes, Masson 1998.
- [7] R. Roger, L'analyse des vibrations, outil de maintenance conditionnelle des machines tournantes. Dossiers ES-Siyana N°9, 1991.
- [8] J.P. Dron, F. Bolaers, L. Rasolofondraibe, Optimization of the detection of rolling bearing defects using spectral subtraction de-noising of the signal, Mécanique & Industries 4 (2003) 213–219.
- [9] A. Boulenger, C. Pachaud, Diagnostic vibratoire en maintenance préventive, Dunod 1998.
- [10] D. Guillaume, Détection précoce de la propagation de fissures dans les engrenages droits par analyse vibratoire. Thèse Université Laval Canada 2000.
- [11] A.Djebala, N.Ouelaa, N. Hamzaouiet, S.Guenfoud, Optimisation de utilisation des indicateurs scalaires dans le cadre de la maintenance prédictive des paliers à roulement, CAMC 2007, Alger 29-30 Avril 2007.
- [12] F. M.Ismail, R. Hugh et O.Farag, A statistical index for monitoring tooth cracks in a gearbox ASME. Design Engineering Technical Conferences, 3(1995), 1413- 1418.

- [13] P. D. Mcfadden, Detection of gear faults by decomposition of matched differences of vibration signals, department of Engineering Science. University of Oxford, Oxford OX1 3PJ, UK.
- [14] Djebala A, Ouelaa N, Hamzaoui N et Guenfoud S, Optimisation de l'utilisation des indicateurs scalaires dans le cadre de la maintenance prédictive des paliers à roulements, *Congrès Algérien de Mécanique de Construction Alger, 29-30 avril 2007*.
- [15] Benchaabane. C, A. Djebala, N. Ouelaa et S. Guenfoud, Diagnostic vibratoire des défauts d'engrenages basé sur les indicateurs scalaires, congrès Algérien de Mécanique CAM 2009 Biskra, novembre 2009.
- [16] Nabti. M^{ed} T, Etude de l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques, Université Ferhat Abbas, Setif.
- [17] Touafek. I, Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L'EMD et des ondelettes (WT), Université Ferhat Abbas, Setif.
- [18] Adbi Zohra, étude des effets vibratoires sur la durée de vie des roulements à rouleaux, mémoire de magister, université Badji Mokhtar Annaba, 2010.
- [19] La norme ISO 2041, Organisation Internationale de normalisation « Vibrations et chocs - Vocabulaire (Août 1990) ».
- [20] Olivier Riou, cours : aides au diagnostic, analyse vibratoire, choix de la méthode de surveillance.
- [21] Le site Web "csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/welcome-case-western-reserve-university-bearing-data-center-website" base de données des essais de roulements à billes normaux ou défectueux.
- [22] A. Boulenger et C. Pachaud, Diagnostic vibratoire en maintenance préventive, Dunod, 1998.
- [23] Jean Catalifaud. Acoustique industrielle, analyse. METRAVIB RDS.
- [24] Philippe Estocq, Chevalier Luc, Marche Pierre. Thèse ; une approche méthodologique numérique et expérimentale d'aide à la détection et au suivi vibratoire de défauts d'écaillage de roulements à billes, Université de Reims Champagne Ardenne décembre (2004).

