

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

Université d'Oran 2
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Département de Maintenance en électromécanique



Filière : *Maintenance et Fiabilité et Qualité*
Option : *Electromécanique*

Mémoire de Master

Thème:

DETECTION DES DEFAUTS DES ROULEMENTS PAR L'ANALYSE SPECTRALE

Présenté par :

Promoteur : Aouimer Yamina

- Aoued Hamid

- Bahloul Nourddine

IMSI
2020/2021

Année

Dédicaces

Je dédie ce mémoire a

Mes chers parents , que mille dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments,
pour leur patience illimitée, leur encouragement ,contenu leur aide en
t é m o i g n a g e de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifies .

Mes chers frères makki, Majid et Amina pour leur grand amour et leur soutien qu'ils
trouvent ici l'expression de ma haut gratitude ..

Mes chers amis Omar, Hbib ,Samir, et Bilale qui sans leur encouragement ce
travail ne aura jamais vu le jour.

Et à toute ma famille et a ceux que j'aime.

REMERCIEMENT

Ce travail a été réalisé à l'institut de maintenance et sécurité industrielle, Université d'Oran 2 Es-senia département de Electromécanique. Nous remercions tout d'abord « ALLAH » qui m'a donné la force et le courage pour terminer ce travail. Nous tenons de remercier aussi nos parents et toute la famille qui nous ont beaucoup aidé dans notre carrière scolaire.

Nous remercions plus particulièrement mon promoteur D'AOUIMER professeur à l'université d'Oran 2 pour tous ses efforts et ses conseils qui nous a donné et pour sa confiance qui nous a fait.

Nous tenons de remercier aussi mes collègues de groupe signal et communication promotion 2020/2021, sans oublier tous nos amis avec qui j'ai passé des bons et agréables moments : Billel , Nadir Bou3lem, Yacine, Djamel, Fares, Fayçal et tous les gens qui j'ai connu à l'université pendant cinq années que ce soit des professeurs, des agents de sécurité ...

TAB (IV -1) : Les caractéristiques du roulement 8812B.

TAB (IV -2) : Système de coordonnées.

TAB (IV -3) : Constants d'alliage aluminium.

TAB (IV -4): Elasticité isotrope d'alliage aluminium.

TAB (IV -5) : Support fixe (A5).
TAB (IV -6) : les fréquences (A5).
TAB (IV -7) : Pression (B5).
TAB (IV -8) : : informations sur les résultats.
TAB (IV -9) : Constants d'Acier standard.
TAB (IV -10): Elasticité isotrope d'Acier.
TAB (IV -11) : Résultats.
TAB (IV -12) : Vitesse de rotation
TAB (IV -13) : Support fixe.
TAB (IV -14): Force ,Pression

Liste les figures

Figure (I-1) : Différentes composantes d'un roulement à bille.

Figure (I-2) : une variété de roulements.

Figure(I-3) :différentes type de défaillances des roulements.

Figure (I-4) : géométrie et dimensions d'un roulement.

Figure (II-1) : les différentes étapes de processus de diagnostic.

Figure (II-2) : principe de surveillance avec modèle.

Figure (II-3) : principe de la surveillance par estimation paramétrique.

Figure (II-4) : principe de la surveillance par observateurs...

Figure (II-5) : a) Signal chirp, b) Sa représentation temps fréquence.

Figure (III-1) : les différents types des signaux vibratoire .

Figure (III-2) : signal temporel et sa représentation fréquentiel.

Figure (III-3): Ansys Workbench.

Figure (IV -1) : Le roulement 8812B.

Figure(IV -2) : Géométrie de roulemnt 8812B

Figure (IV -3) : Maillage de roulement 8812B.

Figure(IV -4) : Roulement 8812B avec support fixe.

Figure (IV -6) : Solution (A5).

Figure (IV -7) : Réponse en fréquence 1 (Aluminium).

Figure(IV -8) : Réponse en fréquence 2 (Aluminium).

Figure (IV -9) : Réponse en phase (Aluminium).

Figure(IV -10) : Solution (A5) (Acier).

Figure (IV -11) : Réponse en fréquence 1(Acier).

Figure (IV -13) : Réponse en fréquence 2 (Acier).

Figure(IV -14) : Réponse en phase (Acier).

Figure (IV -15) : Réponse en fréquence 1 (fissure)

Figure(IV -16) : Réponse en fréquence 2 (fissure)

Figure (IV -17) : Réponse en phase (fissure)

Résumé

La maintenance des machines tournantes par l'analyse des vibrations a considérablement évolué ces dernières années grâce aux techniques avancées de traitement du signal. Ces techniques permettent maintenant de détecter à un stade précoce l'existence d'un défaut, d'identifier sa nature, de déterminer sa gravité et de suivre son évolution. Ce travail s'inscrit dans la thématique de la surveillance et diagnostic des défauts mécaniques et plus particulièrement des défauts de roulements.

L'étude que nous allons faire se base sur l'application d'une technique de traitement de signal qui est une solution efficace pour le diagnostic des défauts de roulements, cette méthode est l'analyse spectrale, qui s'appuie sur ANSYS 14.00..

Mots clés : analyse spectrale, roulement, diagnostic, transformé de Fourier, spectre, défaut, ANSYS 14.00.

Abstract

Maintenance of rotating machines by vibration analysis has evolved considerably in recent years thanks to advanced signal processing techniques. These techniques now used to detect at an early stage there is a fault, identify its nature, determine its severity and monitor its evolution. This work is part of the theme of monitoring and diagnostics of mechanical defects and particularly bearing defects.

The study we're going to do is based on the application of a signal processing technique is an effective solution for the diagnosis of bearing fault, this method is spectral analysis, which is based on the ANSYS 14.00.

Keywords : analysis spectrum, bearing, diagnostic, Fourier transforms, defects ,ANSYS 14.00.

SOMMAIRE

REMER

CEMEN

TS

DEDICA

CES

RESUM

E

ABSTRA

CT

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : ETUDE THEORIQUE SUR LES ROULEMENTS

- Introduction 5
- Géométrie et constitution d'un roulement..... 5
- Différents types des roulements... 6
- Les facteurs essentiels pour le choix de type de roulement..... 8
- Défauts des roulements... 9
 - Causes principales des défauts..... 9
 - P
 - principales défauts 9
- Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement..... 10
 - D
 - défaut sur la bague intérieur 11
 - D
 - défaut sur la bague extérieure 12
 - D
 - défaut sur la cage 12
- Défaut sur l'élément roulant 12
- Conclusion..... 13

CHAPITRE II : ETAT DE L'ART SUR LES METHODES DE DIAGNOSTIC PAR TRAITEMENT DE SIGNAL

- Introduction 15
- Définitions relatives au diagnostic..... 15
 - Le diagnostic 15
- La détection..... 16

- Le défaut..... 16
 - Le défaillance16
 - La dégradation17
- La panne17
- Les différentes étapes de diagnostic 17
 - Etape d’acquisition de données18
 - Etape d’élaboration d’indicateurs de défauts18
 - Etape de d’élaboration d’indicateurs de défauts18
 - Etape de localisation19
 - Etape de prise de décision19
- Techniques et méthodes de diagnostic.....19
- Classification des méthodes de diagnostic19
 - Méthodes de diagnostic avec modèles20
 - Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle.....20
 - Les méthodes de diagnostic par modélisation physique20
 - Méthodes de diagnostic sans modèles22
 - La reconnaissance des formes...22
 - Les systèmes experts24

- Les méthodes par approche signal24
- Quelques techniques de diagnostic par approche signal25
 - Analyse temporelle25
 - Analyse fréquentielle.....25
- Analyse cepstale26
- Analyse temps – fréquence26
- Conclusion..... 28

CHAPITRE III : VIBRATIONS ET L'ANALYSE SPECTRALE

- Introduction... 30
- Définitions... 31
 - Signal vibratoire.....31
 - Le traitement de signal.....31
 - Les type des signaux.....31
 - Déterministe.....32
 - L'analyse spectrale.....32
 - Ansys32
- Principaux produits33
 - ANSYS mechanical34

ANSYS Electromagnetics et Ansoft	
.....	34
Environnements logiciels	
.....	35
Conclusion.....	
	36

CHAPITRE IV: DETECTION DES DEFAUTS DE ROULEMENTS PAR L'ANALYSE SPECTRALE

Introduction.....	
.....	38
• Présentation et Modélisation de roulement	
8812B.....	39
Definition de roulement	
8812B.....	39
Les caractéristiques de roulement	
8812B.....	39
Maillage	
.....	40
Systèmes des	
coordonnées.....	41
• Etude numérique Sous Ansys Workbench 14.00	
.....	41
IV -1) - Etude 1 :alliage	
aluminium.....	41
• Modèle	
.....	41
• Constant.....	
• Elasticité	
isotropé.....	41
• Modale.....	
.....	42

- Support fixe.....42
- Solution.....42
- Réponse harmonique43
- Pression.....43
- Réponse en fréquence 1.....43
- Réponse en fréquence 2.....44
- Réponse en phase.....44
- Résultat.....45

IV -2) - Etude 2 :Acier standard.....46

- Modèle.....
- Constant.....46
- Elasticité isotropé.....46

2. Modale.....46

- Support fixe.....46
- Réponse Harmonique.....46
- Solution.....46
- Réponse en fréquence 1.....47
- Réponse en fréquence 2.....47

•	Résultat.....	4
	8	
IV -3) - Etude 3 (avec		
defauts)		48
•	Modèle.....	49
•	Gèometrie	48
•	.Modale	49
•	Support	
	fixe.....	49
•	Rèponse	
	Harmonique.....	49
	a). Charge(force-	
	pression).....	49
•	Solution	50
•	Rèponse en fréquence 1.....	50
•	Rèponse en fréquence 2.....	51
•	Rèponse en	
	phase.....	51
•	Rèultats	53
IV -4) - Conclusion...		55

CONCLUSION GENERALE

54

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'activité de maintenance des installations industrielles fait appel depuis une vingtaine d'années à des techniques de diagnostic de plus en plus sophistiquées. Plusieurs techniques de détection de défauts sont aujourd'hui à la disposition des ingénieurs de maintenance .parmi celles-ci on peut citer la thermographie infrarouge, pour la détection de défauts d'origine électrique ou mécanique, l'analyse des huiles pour le suivi de dégradation et la contamination des fluides hydrauliques ainsi que l'évaluation du stade d'usure des pièces mécanique, la détection ultrasonore et l'analyse des vibrations mécaniques.

Parmi les outils de la maintenance conditionnelle, l'analyse des vibrations est celui qui connaît aujourd'hui un des développements les plus importants du

fait de l'évolution des techniques dans les domaines de l'informatique et du traitement du signal. La finalité de ce type de surveillance est destinée à assurer la sécurité de l'installation en évitant des dégradations importantes par le déclenchement d'alarmes, lorsque le niveau des vibrations atteint des valeurs jugées excessives pour le bon fonctionnement ou l'intégrité de cette dernière. Il existe différentes techniques d'investigations utilisées dans le domaine du suivi vibratoire des machines tournantes.

L'analyse vibratoire est couramment utilisée pour le diagnostic des machines tournantes et fait appel à des outils de traitement du signal qui ont vu leur champ d'application s'élargir d'année en année. Il existe plusieurs techniques pour mettre en œuvre les outils classiques de traitement du signal, tels que la transformée de Fourier (pour le tracé et l'analyse du spectre), la transformation de Hilbert [1], (pour la recherche de modulations d'amplitude et/ou de fréquence utilisé souvent pour la détermination du BCU), ainsi que le calcul d'indicateurs scalaires tels que la valeur efficace, le facteur de crête et kurtosis.

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

Ce travail a pour but d'appliquer le traitement de signal dans la maintenance industrielle, en faisant un diagnostic pour la détection et la caractérisation des défauts qui peuvent affecter les différents éléments de roulements par la méthode d'analyse spectrale. Ce mémoire est organisé en trois chapitres répartis comme suit :

Le 1^{er} chapitre on décrira les constituants principaux d'un roulement, on détaillera ses modes de défaillance et les fréquences caractéristiques des défauts, et on le finira par une conclusion.

Dans le 2^{eme} chapitre nous présenterons l'état de l'art sur le diagnostic industriel et les différentes méthodes utilisées pour la détection des défauts qui existent couramment dans l'industrie.

Dans le 3^{eme} chapitre on a défini quelques types de vibrations et signaux et surtout l'analyse spectrale et ensuite on a présenté le logiciel d'étude numérique utilisé (ANSYS 14.00).

Dans le 4^{eme} chapitre nous allons choisir une parmi les méthodes d'analyse par traitement de signal les plus utilisée pour le diagnostic et la détection des défauts, cette méthode est celle de l'analyse spectrale, dans cette partie nous étudierons quelques signaux des roulements à l'état défaillant et on les compare avec celui de l'état sain afin de détecter et identifier les défauts liés aux roulements et suivre l'évolution de ce derniers. Il est à noter que les signaux des roulements qu'on va utiliser ont été pris du banc d'essai Américain

Ce mémoire a pour but d'appliquer le traitement de signal dans la maintenance industrielle, en faisant un diagnostic pour la détection et la caractérisation des défauts qui peuvent affecter les différents éléments de roulements par la méthode d'analyse spectrale.

- **Introduction**

Les roulements sont plus récents par rapport aux paliers lisses, l'apparition des roulements a été conditionnée par le remplacement du frottement de glissement par celui de roulement. Ils sont largement utilisés dans le domaine de la construction mécanique, en particulier dans le domaine des machines tournantes. L'utilisation aussi de ce produit dans le domaine de l'automobile a donnée l'occasion de perfectionnement de la méthode de fabrication, ainsi que l'amélioration de sa qualité.

On appelle roulement, une pièce mécanique composé de plusieurs éléments entre deux organes, un mobile et l'autre immobile, le roulement est destiné à remplir un glissement par roulement afin de réduire le frottement, il est définis deux critères qui sont : le type et les dimensions.

le roulement est un organe mécanique, sa fonction est de permettre la transmission des charges (efforts) entre deux pièces en rotation relative l'une par rapport à l'autre avec un frottement très réduit. Il supporte et assure le guidage d'une charge tournante.

Dans ce chapitre, on va détailler la géométrie et la constitution du roulement, les critères du choix des roulements, les défauts principaux qui peuvent affecter un roulement et finalement les fréquences caractéristiques des défauts.

- **Géométrie et constitution d'un roulement**

La performance des roulements est directement liée à la qualité du matériau utilisé en particulier sa propreté (qualité). En effet les concentrations de contraintes liées à la géométrie du contact sont considérablement amplifiées par la présence de défauts de type inclusions non Métalliques dans la zone mécaniquement sollicitée (zone de charge).

Le roulement sans glissement des éléments roulants sur les chemins (pistes) assure la transmission de la charge (l'énergie) d'une bague à une autre. Afin d'assurer un roulement parfait[2], il faut que les éléments roulants soient complètement séparés par une cage.

De manière générale, les roulements sont constitués de quatre composants

essentiels[3]: 1-La bague extérieure.

2-La

bague

intérieure.

3- La cage.

4- Les éléments roulants.

Figure (I-1) : Différentes composantes d'un roulement [4].

1/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).

2/ 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.

3/ 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.

4/ Les éléments roulants : Ils s'agissent 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.

- **Différents types des roulements**

Quel que soit la taille, la qualité et la matière utilisée pour la fabrication du roulement, les roulements sont classés de plusieurs manières .En premier lieu, ils sont classés d'après la

forme des éléments roulant utilisés (roulements à billes ou à rouleaux), et ce d'après

l'importance de la charge appliquée au roulement (si la charge est importante, il faut choisir le roulement à rouleaux, ce type de roulement est très proche de celui à billes, la cage contenant des rouleaux au lieu de billes. Selon la forme des rouleaux il peut être possible de séparer les bagues. Le problème d'assemblage du roulement n'est alors plus le même.

Le roulement à rouleaux supporte un effort radial supérieur par rapport au roulement à billes, car le contact des éléments roulants avec les bagues est linéaire. On utilise le roulement à rouleaux pour augmenter la surface de contact afin de minimiser les contraintes ou les pressions sur les pistes. En deuxième lieu, ils sont classés d'après la direction d'application de ces charges, à cet effet, il existe les roulements radiaux s'il s'agit d'une charge radiale et des roulements axiaux (butées) dans le cas d'une charge axiale importante.

- **Les roulements rigides à billes (à rouleaux cylindriques)** : ce sont les roulements les plus répandus, ils sont conçus pour des charges radiales, mais peuvent supporter une petite charge axiale. Les roulements à rouleaux peuvent supporter des charges plus élevées.

- **Les roulements à aiguilles** : ils possèdent une forme cylindrique, et sont suffisamment fin pour résoudre le problème où l'espace radial est fin.
- **Roulements à billes à contact oblique** : l'architecture de ces roulements les rend capable de supporter des charges axiales et radiales à la fois.
- **Roulements à rotules sur billes (de même sur rouleaux)** : Ce type de roulement est célèbre, inventé en 1907 par le fondateur de SKF Sven Wingquist, a permis de résoudre l'un des problèmes industriels les plus épineux de l'époque, celui des arrêts de production récurrents dus à des défaillances de roulements. Comme l'alignement des arbres n'était pas suffisamment précis pour permettre une utilisation normale des roulements rigides à billes, les pannes étaient fréquentes. Les roulements à rotule sur billes à deux rangées, qui tolèrent un défaut d'alignement pour une durée de service identique, ont permis de résoudre le problème[5].



Figure(I-2) : Une variété de roulements[6].

- **Les facteurs essentiels pour le choix de type de roulement**

Le choix du type et

de la taille d'un roulement est basé sur

les conditions de

fonctionnement et les caractéristiques de construction à fin d'assurer un bon fonctionnement à des coûts réduits [7] [8].

Les facteurs qu'il faut tenir en considération pour réaliser un choix optimal de roulement sont les suivants :

- (l'espace) réservé au roulement Savoir la nature, la direction ainsi que l'intensité de la charge que doit supporter le roulement.
- La vitesse de rotation du roulement.
- La durée de vie souhaitée (demandée).
- La température à laquelle le roulement va travailler.
- La précision de fonctionnement à fin de permettre fixé le jeu roulement.
- Il faut tenir en compte le mode de la lubrification, ainsi que le type du lubrifiant.
- La nature de la machine pour faire le choix du type de montage du roulement.
- La matière de l'arbre et du logement qui permettent de calculer le jeu résiduel (fonctionnel) du roulement.
- L'encombrement.

- **Défauts des roulements**

- **Causes principales 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[9].

- **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,
- 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
- 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.

L'écaillage de fatigue, est un phénomène normal qui conduit à une défaillance et ce, quel que soit les conditions d'utilisation et de fonctionnement. Ce défaut survient sous l'effet de la fatigue due aux contraintes de cisaillement alternées qui sévissent en sous couche.

L'écaillage localisé et prématuré résulte d'anomalies caractérisées telles qu'un mauvais montage, une surcharge, un défauts donnent naissance à

défaut d'alignement, une mauvaise forme de logement. Ces des vibrations qui les caractérisent. C'est pourquoi l'analyse

vibratoire s'avère intéressante et s'est montrée très puissante d'un epart pour surveiller l'état de fonctionnement et d'autre part pour diagnostiquer le défaut et suivre son évolution [10].

Figure (I-3) :différentes type de défaillances des roulements.

- **Fréquences caractéristiques pour les défauts d'un roulement**

Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion

(qui entraîne l'écaillage)...etc. Les roulements défectueux génèrent des vibrations de

fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent notamment à la rotation des billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues.

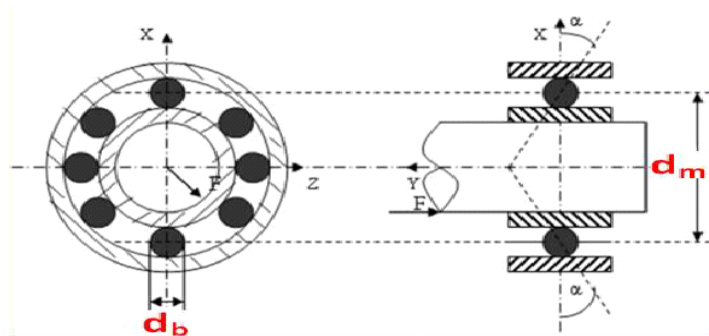


Figure (I-4) : géométrie et dimensions d'un roulement.

- Le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).
- Le diamètre primitif.
- Le diamètre des éléments roulants.
- Angle de contact.

Pour chaque type de roulement, et en fonction de ses cotes de fabrication, on peut considérer les fréquences caractéristiques données par les équations suivant :

VI.1 Fréquence de défaut sur la bague intérieure

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (Eq.1).

Cette fréquence est

modulée par sa fréquence de rotation de l'arbre (bandes latérales autour de la raie de défaut).

Avec :

Fréquence de défaut de la bague intérieur

Fréquence de rotation de la bague intérieure

Fréquence de rotation de la bague extérieure.

N Le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).

d_m Le diamètre primitif.

d_b Le diamètre des éléments roulants

Angle de contact.

VI.2 Fréquence de défaut sur la bague extérieure

Sa fréquence caractéristique est donnée dans l'équation (Eq.2). Bien que la charge appliquée sur la bague externe soit constante, on peut remarquer une

modulation d'amplitude à la fréquence de rotation de l'arbre autour de la fréquence de défaut.

Avec :

Fréquence de défaut de la bague extérieure.

- **3Fréquence de défaut sur la cage**

La fréquence de passage d'un défaut de cage est donnée par l'équation (Eq.3) Ce défaut se manifeste par la présence de raies à la fréquence et ses harmoniques.

$\cos(\dots)$

□□

Avec:

Fréquence de défaut de la cage.

VI.4 Fréquence de défaut sur l'élément roulant

La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau), sur la bague externe ou sur la première fréquence caractéristique de défaut correspond à la fréquence de rotation de l'élément roulant sur lui-même. De plus, cet élément roulant rencontre une fois la bague intérieure et une fois la bague extérieure par tour, il génère donc des chocs à 2 fois cette fréquence.

Avec :

Fréquence de défaut de la bille [11] [12] [13] [14].

- **Conclusion**

Dans ce chapitre Nous avons vu qu'il existe plusieurs types de roulements dans l'industrie, chaque type de roulements présente des caractéristiques qui dépendent de sa conception et qui la rendent plus ou moins adapté à une application donnée.

Ensuite, on a détaillé les différents défauts qui peuvent affecter les roulements, et on a mentionné les fréquences caractéristiques du chaque défaut.

Dans le chapitre suivant on verra l'état de l'art sur les méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts de roulements dans l'industrie, en se basant sur les méthodes par approche signal.

- **Introduction**

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

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

Le diagnostic de défaillance des systèmes industriels, s'il est réalisé avec efficacité ou s'il permet de détecter de façon précoce une dégradation, représente un des moyens pour contribuer à gagner des points de productivité, à cause de l'importance de diagnostic dans la maintenance corrective, de sa pertinence et de sa rapidité dépend l'efficacité de l'intervention au sein de l'entreprise. Pour cela, des recherches ont été effectuées autour du problème du diagnostic, que ce soit pour des systèmes dynamiques, des réseaux de distribution ou des réseaux de télécommunications

Dans ce chapitre nous présentons l'état de l'art sur les méthodes de diagnostic industriel, ou on va définir quelques concepts relatifs au diagnostic et à la défaillance industrielle, puis on cite les étapes essentielles de diagnostic et on finira par les méthodes utilisées dans le diagnostic industriel.

- **Définitions relatives au diagnostic**

II.1 Diagnostic

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

Dans l'industrie, le diagnostic est défini par l'ensemble d'actions visant à évaluer un procédé (système) et identifier la cause probable des défaillances à

l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test de son fonctionnement.

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

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

La mission pour laquelle le système a été conçu, peut être totalement remplie, partiellement remplie ou non remplie, cela dépend du mode de fonctionnement.

Un système est dit diagnosticable s'il est susceptible d'être soumis à un diagnostic, il doit alors être muni d'organes d'observation (capteurs) et d'un système d'analyse pour étudier les informations fournies. La diagnosticabilité sera l'aptitude d'un système à être diagnostiqué[15].

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

Deux tâches essentielles en diagnostic :

- **la localisation** : permet de déterminer les ou les éléments défailants.
- **l'identification** : estime les caractéristiques statiques et dynamiques de défaut : l'instant d'apparition de la panne, sa durée et son importance[16].

II.2 La détection

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

Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à Considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale [17].

II.3 Défaut

Un défaut est une anomalie de fonctionnement d'un système physique. On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique.

Cet écart est idéalement nul en absence de défauts. Les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs ou au niveau du système lui-même.

II.4 Défaillance

Événement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement ses fonctions. Il est clair qu'une défaillance implique l'apparition d'un défaut puisqu'il existe un écart entre la caractéristique mesurée et la caractéristique théorique. Par

contre, un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance puisque le dispositif peut très bien continuer à assurer sa mission principale [15].

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonction requise avec les performances définies dans les spécifications techniques, on peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité par :

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

II.5 Dégradation

Une dégradation représente une perte de performance d'une des fonctions assurées par un équipement, Si les performances sont au-dessous du seuil défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, Il n'y a plus dégradation mais défaillance [17].

- **6 Panne**

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

Deux types de pannes peuvent être distingués :

- **Les pannes permanentes** : une fois la panne est produite, elle nécessite une action de réparation.

Les pannes intermittentes : le système peut retrouver son fonctionnement normal

après l'occurrence de la panne. Une panne intermittente est généralement le résultat d'une dégradation partielle et progressive d'un composant du système, pouvant aboutir à une panne permanente [16].

- **Les différentes étapes de diagnostic**

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

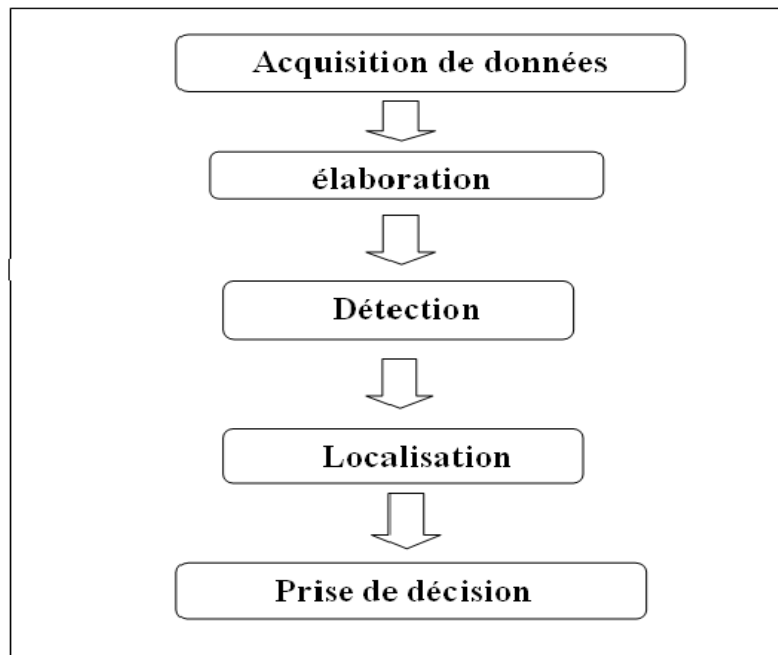


Figure (II-1) : les différentes étapes de processus de diagnostic.

III.1 Etape d'acquisition de données

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

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

III.2 Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts

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

III.3 Etape de détection

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

cette étape fait le plus souvent appel aux tests statistiques ou, de manière plus simple, est réalisée à l'aide d'un seuillage.

- **Etape de localisation**

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

- la construction de résidus structurés.
 - la construction des résidus directionnels.
- **5 Etape de prise de décision**

Il s'agit de décider de la marche à suivre afin de conserver les performances souhaitées, du système sous surveillance. Cette prise de décision doit permettre de générer, éventuellement sous le control d'un opérateur humain, les actions correctrices nécessaires à un retour à la normale du fonctionnement de l'installation.

En résumé, quelle que soit la méthode employée, la procédure de diagnostic comprend deux Principales étapes, une étape de génération de résidus et une étape d'évaluation des résidus [14].

- **Techniques et méthodes de diagnostic**

- **1 Classification des méthodes de diagnostic**

Les méthodes de diagnostic se distinguent selon différents critères :

- la dynamique du procédé (discret, continu ou hybride).
- la complexité du procédé, l'implémentation du diagnostic en ligne et/ou hors ligne.
- la nature de l'information (qualitative et/ou quantitative).
- la profondeur de l'information (structurelle, fonctionnelle et/ou temporelle), sa distribution (centralisée, décentralisée ou distribuée)[18].

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

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

D'un autre côté, les méthodes qui ne se basent pas sur l'existence du modèle se divisent en trois catégories : méthodes utilisant des outils statistiques (méthodes de

traitement de signal), et celles utilisant la reconnaissance des formes, et celles qui utilisent les systèmes experts.

- **Méthodes de diagnostic avec modèles**

Les méthodes de diagnostic avec modèle ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par le modèle. Tout écart est synonyme de défaillance. Ces méthodes peuvent être séparées en deux : Méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle, Les méthodes de diagnostic par modélisation physique[19].

IV.1.1.1 Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle

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

IV.1.1.2 Les méthodes de diagnostic par modélisation physique

Les méthodes de surveillance avec modèle physique ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par le modèle [20]. Tout écart est alors synonyme d'une défaillance. Les outils de la théorie de la décision sont ensuite utilisés pour déterminer si cet écart est dû à des aléas normaux, comme par exemple le bruit de mesure ou s'il traduit une défaillance du système.

Ces méthodes utilisent un modèle décrit par des relations mathématiques représentant les différentes relations physiques du procédé. Généralement, ces relations physiques découlent de l'application de lois fondamentales de divers domaines (physique, chimie, électricité, thermodynamique, mécanique, etc.). Ainsi, il est possible de créer une modélisation du système qui, en lui appliquant les entrées similaires au système réel (lois de commande, paramètres du procédé, etc.), fournit une réponse estimée du système. Il est alors possible de calculer l'écart

entre la réponse réelle du système et sa réponse estimée, comme indiqué sur la Figure (II-2). Cet écart est usuellement appelé résidu (R).

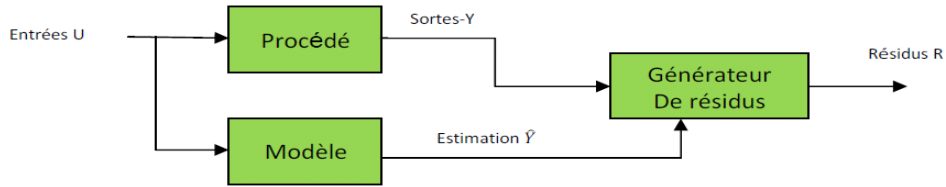


Figure (II-2) : *Principe de surveillance avec modèle*

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

Il existe plusieurs approches de génération de résidus, cependant trois sont vraiment essentielles [21], il s'agit de :

- **Estimation des paramètres :**

Les résidus sont la différence entre les paramètres nominaux du modèle et les paramètres estimés du modèle [22].

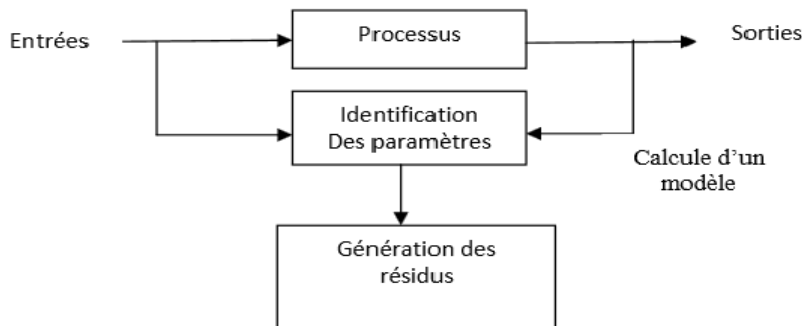


Figure (II-3) : *Principe de la surveillance par estimation paramétrique.*

- **Observateurs :**

Les méthodes à base d'observateurs reconstruisent une estimation de la sortie à partir de toutes ou parties des sorties réelles du système. Les résidus sont alors classiquement la différence entre les sorties mesurées et les sorties estimées [23].

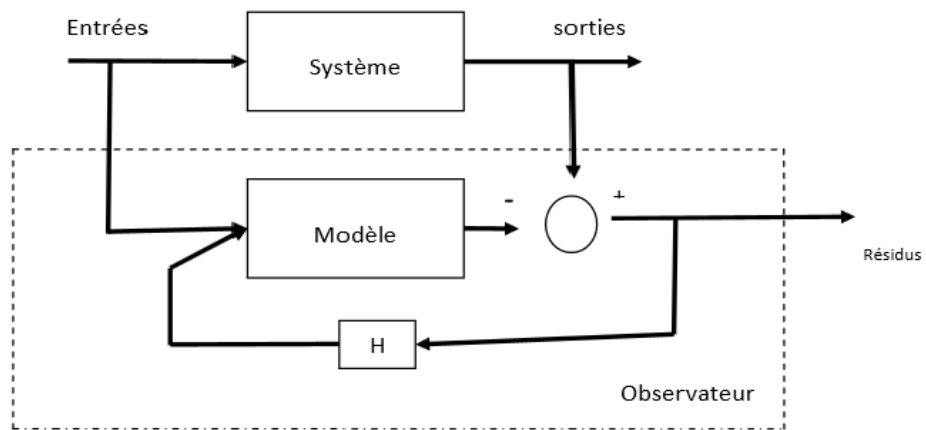


Figure (II-4) : *Principe de la surveillance par observateurs*

- **Equations de parité :**

Cette méthode consiste à vérifier l'exactitude des équations mathématiques du modèle en se basant sur les sorties du procédé [24].

- **Méthodes de diagnostic sans modèles**

Nombreuses sont les applications industrielles dont le modèle est difficile,

voire impossible à obtenir

suite à une complexité accrue ou

à de nombreuses

reconfigurations intervenantes durant le processus de production. Pour ce type d'applications industrielles, les seules méthodes de diagnostic opérationnelles sont celles sans modèle. Deux techniques existent dans ce cas : technique par les outils de traitement de signal (approche signal) et celle par reconnaissance de formes [25], et la méthode les systèmes experts. Pour des raisons de simplicité le diagnostic par approche signal est la technique la plus utilisée actuellement en diagnostic industriel [26], c'est pour cela on essaiera de le détailler un peu dans ce qui suit.

- **La reconnaissance des formes**

Ces méthodes reposent sur l'utilisation des algorithmes de classification des formes et

des mesures (continues ou

discrètes). Le fonctionnement d'un système

de diagnostic par

reconnaissance des formes se déroule en trois phases:

_ Une phase d'analyse qui consiste à déterminer et à réduire l'espace de représentation des données et à définir l'espace de décision permettant de spécifier l'ensemble des classes possibles.

_ Une phase de choix d'une méthode de décision permettant de définir une règle de décision qui a pour fonction de classer les nouvelles observations dans les différentes classes de l'ensemble d'apprentissage.

_ Une phase d'exploitation qui détermine, en appliquant la règle de décision, le mode de fonctionnement du système en fonction de chaque nouvelle observation recueillie sur le processus.

Ils existent trois techniques de reconnaissance des formes. La première technique est une technique classique de discrimination basée sur les outils de la probabilité. Cette technique peut se montrer insuffisante car elle suppose une connaissance à priori de tous les états de fonctionnement et ne prend pas en compte révolution du système [26]. Les deux autres techniques reposent sur la théorie de l'intelligence artificielle. Ces techniques ont l'avantage de ne pas se baser sur les connaissances à priori des états de fonctionnement mais plutôt sur une phase d'apprentissage. Ces deux techniques sont la reconnaissance des formes par la logique floue et la reconnaissance des formes par réseaux de neurones.

- **Les réseaux de neurones artificiels**

Imitent la structure neuronale d'un cerveau humain : ils sont formés par un réseau complexe de blocs arithmétiques simples. Ils peuvent facilement représenter les systèmes non linéaires multi-entrées/multi-sorties. Cette technique a largement été utilisée dans le domaine du diagnostic des machines électriques. Selon plusieurs démarches et techniques :

- apprentissage à partir de signaux temporels ou fréquentiels issus de simulation ou d'expérimentation.
- diagnostic en temps réel et autonome.
- mise à jour dynamique de la structure du réseau.
- filtrage des transitoires, des perturbations et du bruit.
- détection des défauts dès leur naissance.

- **La logique floue**

Traduit la perception humaine des valeurs. Elle ne se limite pas à des valeurs «vrai. Faux» comme la logique traditionnelle. Elle offre une large fourchette de valeurs intermédiaires. Les systèmes flous sont capables de traiter des variables naturelles via

Des conditions floues «si-alors». Les systèmes flous adaptatifs exploitent les facultés d'apprentissage des réseaux de neurones ou la robustesse des algorithmes génétiques dans le domaine de l'optimisation des paramètres du système à étudié. Afin de prendre en considération les connaissances à priori et l'expertise humaine

dans le domaine. Nous pouvons trouver dans la littérature [27] [28], plusieurs articles exploitant cette technique dans le domaine du diagnostic et de la surveillance des machines électriques. Avec des objectifs variés :

- détection d'un fonctionnement anormal et localisation de la défaillance.
 - évaluation des indices de performance.
 - construction de bases des données issues de l'expertise humaine. et formulation sous forme de règles conditionnelles «si-alors».
 - conception de systèmes adaptatifs pour le diagnostic.
-
- **Les systèmes experts :**

Les systèmes experts utilisent une information heuristique pour lier les symptômes aux défauts .Ce sont des systèmes à base de règles qui établissent des associations empiriques entre effets et causes.

Ces associations sont généralement fondées sur l'expérience de l'expert plutôt que sur une connaissance de la structure et/ou du comportement du système. Leur fonctionnalité est de trouver la cause de ce qui a été observé en parcourant les règles par un raisonnement inductif par chaînage avant ou arrière.

- **Les méthodes par approche signal**

Le traitement et l'analyse d'un signal peuvent être parfois utiles dans le domaine de diagnostic, en effet, La mesure d'un signal indique des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. La variation de ces signaux peut être reliée aux défauts.

Ainsi, d'une manière générale, on peut déterminer les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut en déterminant par exemple son amplitude. Il existe toutefois d'autres possibilités qui consistent à déterminer les fonctions d'auto corrélation, les transformées de Fourier ou la densité spectrale .

La première étape dans cette approche concerne l'acquisition des signaux en les caractérisant dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu

spectral, leur variance... etc.[29].L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que l'échauffement, les vibrations,...etc. ces symptômes sont la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques.

Cette étape est basée sur la connaissance du système sain (par mesure ou par modèles numériques). La deuxième étape consiste ensuite en une création(artificielle) de défauts (à nouveau sur maquettes physiques ou par modèle numérique). La signature du défaut, c'est-à-dire sa répercussion sur certaines grandeurs, est alors identifiée.

Une observation est ensuite réalisée sur un convertisseur réel. Une analyse est portée sur les grandeurs consistant en la reconnaissance de signatures de défaut déjà connues.

- **2Quelques techniques de diagnostic par approche signal**

- **Analyse temporelle**

L'analyse temporelle peut se faire soit à l'échelle du signal, c'est à dire en utilisant des indicateurs obtenus à partir d'une fenêtre glissante sur le signal, cela permet la détection et la localisation du défaut, soit à l'échelle d'un ensemble de signaux, les indicateurs ont une valeur scalaire calculée directement sur la totalité d'un signal. Cette analyse s'applique à des machines simples et consiste à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevée.

Cet outil est aisé à employer lorsque le signal est simple (vibration de type sinusoïdal du balourd d'un rotor par exemple), mais devient inexploitable dans le cas de sollicitations multiples et de faible influence sur les défauts [30].

- **Analyse fréquentiel**

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

L'outil mathématique utilisé dans ce cas est la décomposition du signal à l'aide de la transformée de Fourier. Si cette décomposition est possible, sa représentation dans le domaine temporel est encore inutilisable. Il consiste à représenter dans un diagramme appelé spectre la

fréquence et l'amplitude. Avec ce type de représentation, chaque composante sinusoïdale est définie par son amplitude et sa fréquence. La représentation spectrale devient plus nette et réalisable. Le spectre final contient toutes les fréquences sinusoïdales (lignes discrètes) formant le signal de vibration d'origine. A noter que le spectre d'un choc périodique comporte un peigne de lignes à la fréquence de choc.

- **Analyse cepstale :**

Le cepstre se définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier [31]

$$C[s(t)] = T F^{-1} \log^{-2} \dots \dots \dots \text{Eq(II-5)}$$

Il a pour but d'identifier et de quantifier toutes les structures périodiques contenues dans le spectre. Il permet de définir des indicateurs adaptés à la détection précoce des défauts induisant, à des stades plus ou moins avancés, des énergies vibratoires que les indicateurs issus de techniques traditionnelles mettraient difficilement en évidence. Le cepstre et ses dérivées représentent les amplitudes des composantes dont les fréquences correspondent aux périodes de répétition des chocs induits par les défauts de la machine surveillée. Il est largement utilisé pour la détection de défauts d'engrenage et dans une moindre mesure pour les défauts de roulements [32].

- **Analyse temps – fréquence**

Les méthodes d'analyse temps fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non-stationnaires [33] [34] [35]. Cette notion de non stationnarité peut s'appliquer aussi bien à des signaux aléatoires qu'à des signaux certains. Plus généralement, elles s'appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques évoluent au cours du temps, Elle permet une localisation des périodicités dans le temps et indiquera aussi la période varie d'une façon continue, si elle disparaît puis réapparaît par la suite, etc.

L'analyse temps-fréquence concilie les avantages de l'analyse spectrale et de l'analyse temporelle, en caractérisant le signal vibratoire à la fois en temps et en fréquence. C'est une Analyse fine qui permet de détecter des changements anormaux dans la répartition fréquentielle d'une signature vibratoire à un instant précis dans le cycle. Elle apporte par

ailleurs une solution pour séparer des signatures vibratoires proches qui se recouvrent en temps et/ou en fréquence.

L'analyse temps- fréquence traditionnelle utilise des distributions qui représentent l'énergie ou puissance des signaux en deux dimensions de temps et de fréquence pour révéler les meilleurs modèles de diagnostic.

La Figure (II-5) montre un signal chirp et sa représentation temps fréquence, on peut voir que sa fréquence est variable dans le temps. Uniquement cette présentation donne une bonne localisation pour les fréquences [36].

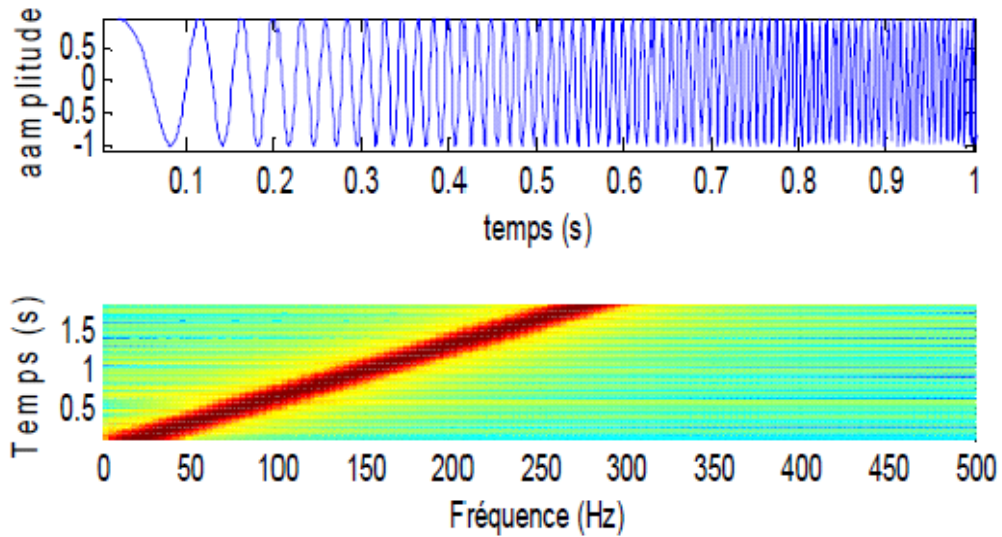


Figure (II-5) : a) *Signal chirp*, b) *Sa représentation temps fréquence.*

Les méthodes temps-fréquence permettent alors de fournir une représentation du signal en trois dimensions (amplitude-temps-fréquence), et de détecter et de suivre le développement des défauts qui génèrent une faible puissance vibratoire.

• Conclusion

Dans ce chapitre on a été consacré à une présentation de quelques définitions relatives au diagnostic dans le domaine industriel, suivie par les différentes étapes utilisées dans un diagnostic et on a terminé par les méthodes d'analyses utilisées pour la détection et le diagnostic des défauts.

Le choix d'une méthode d'analyse s'effectue suivant des critères par exemple la nature des signaux acquis de la machine, l'environnement industriel etc....

Grâce à sa simplicité et sa rapidité d'extraire les résultats, la méthode par approche signal est parmi les méthodes les plus utilisées pour la détection et le diagnostic des défauts, surtout les défauts des engrenages, les défauts de roulements par exemple...

Dans le chapitre qui suit on s'intéressera à la détection des défauts de roulements en appliquant la méthode de l'analyse spectrale sur des signaux réels.

- **Introduction**

L'analyse vibratoire cherche à identifier l'origine des vibrations engendrées par un mécanisme (moteur thermique, groupe électrique, roulements ...) soit parce que celles-ci sont la traduction d'une dégradation et annonciatrices d'une future panne ou défaillance.

ou on va donner quelques définitions sur le signal vibratoire et ses caractéristiques, le principe de détection des défauts par l'analyse spectrale, et on finira par l'application de cette méthode sur quelques signaux et ensuite on va définir et présenter le logiciel de simulation numérique ANSYS 14.00.

- **Définitions**

- **1Signal vibratoire**

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.

Les signaux vibratoires ont une structure complexe, et sont constitués de différentes composantes :

- une partie du signal provient des phénomènes cycliques (déterministes ou non) se produisant dans le système, comme la rotation des arbres, les chocs des engrenements, les mouvements existants au sein d'un roulement...

- une partie aléatoire, due aux phénomènes parasites générés lors du fonctionnement d'un système (jeu, frottement, ...) Ces signaux ne sont globalement pas stationnaires. En effet, ils ne sont pas indépendants du temps même si la vitesse de fonctionnement reste constante. Cette non-stationnarité a plusieurs origines :
- vieillissement du système.
- excitation du système en vibration due aux chocs internes successifs voire chaotiques.
- non-stationnarité des efforts transmis à travers le système,
- imperfection des surfaces de contact, et contact variable entre dentures.

II.2 Le traitement de signal

Le traitement du signal est la théorie permettant d'effectuer une description (une modélisation) et une analyse des signaux et des systèmes. Le traitement du signal a pour objectif la réalisation et l'interprétation des signaux porteurs d'information. Le but du traitement du signal est en effet d'extraire le maximum d'information utile sur un signal perturbé par le bruit [37].

II.3 Type des signaux

La figure (III-1) représente les différents types des signaux:

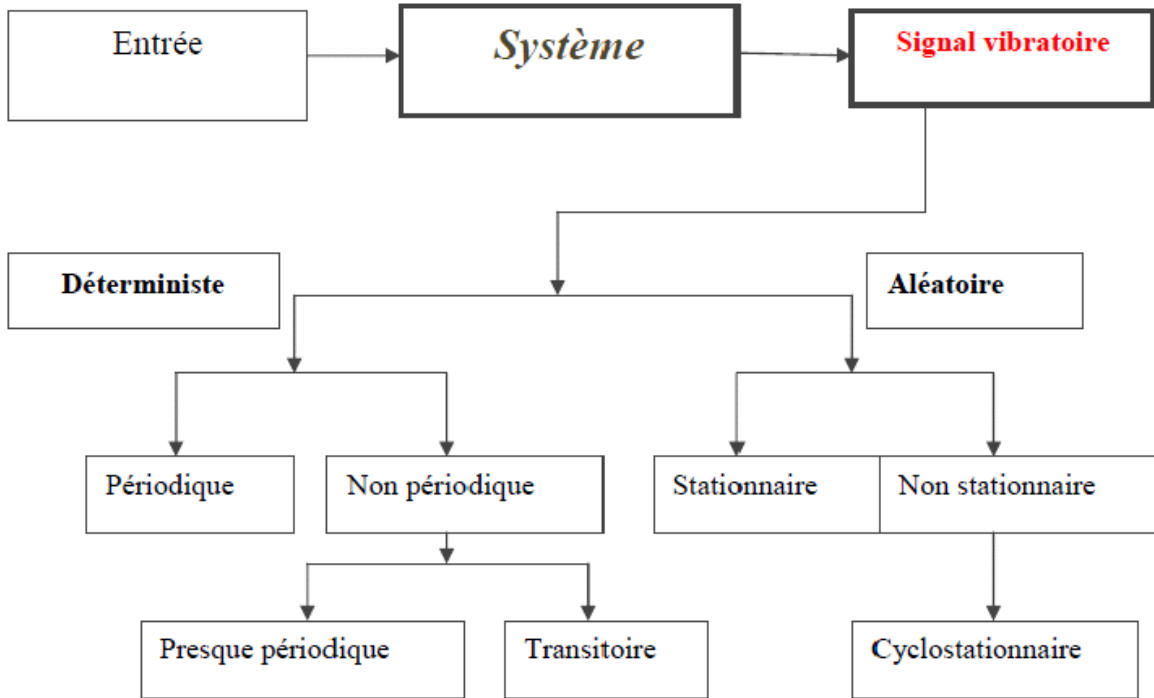


Figure (III-1) : les différents types des signaux vibratoire [38].

- **Déterministe**

Des signaux (périodique ou non périodique) dont l'évolution en fonction du temps peut être parfaitement décrite par un modèle mathématique. Ces signaux proviennent de phénomènes pour lesquels on connaît les lois physiques correspondantes et les conditions initiales, permettant ainsi de prévoir le résultat. Les signaux non périodiques se composent d'une part des signaux pseudopériodiques formés d'une somme de sinusoïdes de périodes différentes et d'autre part des signaux transitoires dont l'existence est limitée dans le temps. Ces signaux "certains" peuvent en principe être reproduits rigoureusement identiques à eux-mêmes [39].

- **Aléatoire**

Le signal aléatoire fait intervenir deux notions :

- La notion de signal c'est à dire une mesure qui dépend d'un ou plusieurs paramètres d'espace, le plus souvent le temps.
- La notion d'aléatoire qui fait que, à un instant t donné, la mesure n'est pas certaine mais dépend du hasard. Cet aspect est appelé l'aspect stochastique et on parle indifféremment de signal aléatoire ou de signal stochastique.

Ce sont les signaux qui ont caractère non reproductible et imprévisible

II.4 L'analyse spectrale

- L'analyse « en fréquence » est devenue l'outil fondamental pour le traitement des sig Vibratoires. Elle s'appuie sur la transformée de Fourier, qui permet le passage du domaine tem au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître l puissance, présent dans le signal à la fréquence un choc périodique à une fréquence de défaut. La comparaison de cette fréquence avec celle défauts théoriques potentiels (fréquences caractéristiques localisation [41]).
- Exemple : Si on prend un signal sinusoïdal périodique simple avec une fréquence de 120 Hz. L'analyse spectrale permet d'extraire la fréquence fondamentale qui existe dans ce signal.

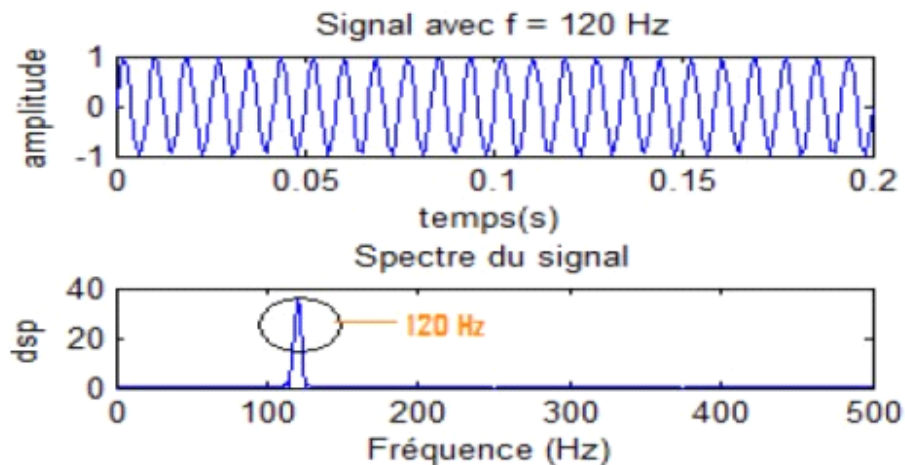


Figure (III-2) :

II.5 Définition ANSYS :

ANSYS : est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. ANSYS développe, promeut et assure le support de ses logiciels de simulation servant à prédire le comportement d'un produit dans son environnement. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des

éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales 3 à travers le monde, notamment en Europe et en Asie. Aspects techniques

Principaux produits :

ANSYS Structural : ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- l'analyse statique
- l'analyse modale
- l'analyse harmonique (réponse forcée)
- l'analyse temporelle
- la gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

ANSYS Mechanical : ce produit dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec modélisation du rayonnement.

ANSYS CFX et Fluent : ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides. Ils portent le nom des compagnies qui les ont développés, rachetées par ANSYS.Inc respectivement en février 2003 et en février 2006. Fluent est un solveur : il ne comporte pas de maillage (le maillage doit être réalisé avec un logiciel de maillage, Gambit par exemple, qui est également édité par ANSYS). Fluent est un solveur très utilisé dans l'industrie et la R&D à travers le monde. Il est souvent considéré comme une référence dans le domaine de la modélisation fluide. Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, Kw, SA, Reynolds stress...), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres. Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence. Fluent est parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dualcore, plateforme multi-CPU). Gambit : Un logiciel de maillage édité par la société ANSYS depuis 2006 (l'éditeur historique du logiciel était la société Fluent). Ce maillage permet de créer géométries et maillages avec un

grand degré de liberté et une grande précision. Le domaine géométrique peut aussi être importé depuis un fichier CAO. Il assure également le maillage automatique de surfaces et de volumes en parallèle de l'introduction de conditions aux limites. Gambit est souvent considéré comme un maillage de référence par les modélisateurs utilisant Fluent.

ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA : ces logiciels possèdent des solveurs utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités. Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.

ANSYS Electromagnetics et Ansoft : ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.

ANSYS Multiphysics : ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

Environnements logiciels :

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

a)-ANSYS classic : première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language). ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

b)- ANSYS Workbench : cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en ré-utilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plate forme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution.

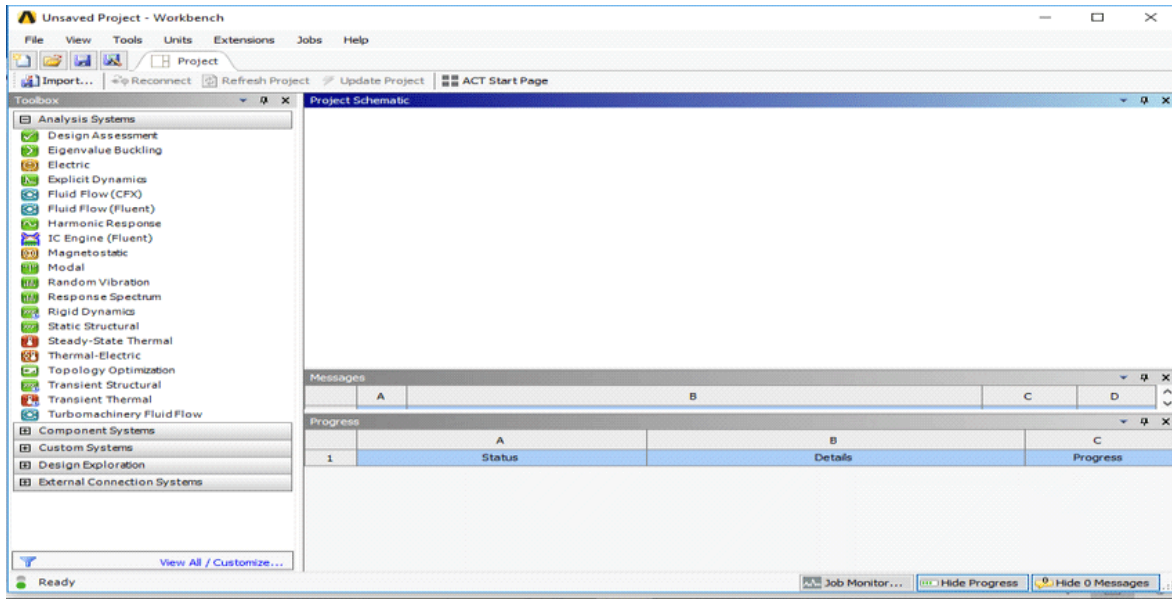


Figure (III-3) : Ansys Workbench.

Conclusion:

Dans ce chapitre c'était un rappel relatif au traitement de signal , puis on avait parlé suffisamment sur l'analyse spectrale en indiquant le principe de détection des défauts des roulements par cette analyse , et on avait aussi parlé sur le logiciel qu'on va l'utiliser dans le chapitre suivant ,c' est l' ANSYS 14.00.

Dans le chapitre suivant on va faire quelques études numériques sur ANSYS WORKBENCH pour identifier et détecter des défauts du roulement 8812B avec différents essais.

- **Introduction**

Le traitement du signal est une discipline indispensable de nos jours. Il a pour objet l'élaboration ou l'interprétation des signaux porteurs d'informations. Son but est donc de réussir à extraire un maximum d'information utile sur un signal perturbé par du bruit en s'appuyant sur les ressources de l'électronique et de l'informatique.

Le diagnostic industriel basé sur le traitement de signal est parmi les méthodes les plus efficaces et les plus utilisées dans l'industrie, surtout ce qui concerne la détection des défauts affectant les machines tournantes (les défauts des roulements, les défauts des engrenages...etc.)

Le diagnostic par approche signal consiste à étudier les contenus des signaux relevés afin d'extraire leurs propriétés temporels, fréquentiels ou bien leurs amplitudes, ça dépend la méthode d'analyse à suivre.

Dans ce qui suit nous nous intéressons par la détection des défauts des roulements à billes par la méthode d'analyse spectrale, on va faire quelque études numérique sur ANSYS WORKBENCH pour détecter les défauts de roulement 8812B avec des graphes fréquentiel.

-Presentation de la géométrie du roulement 8812B :

- **Definition de roulement 8812B :** Le roulement utilisé est un roulement de type roulement a billes,il est composé du (7 rivets, 8 billes, 2 Cage, Bague intérieur, Bague extérieur) .

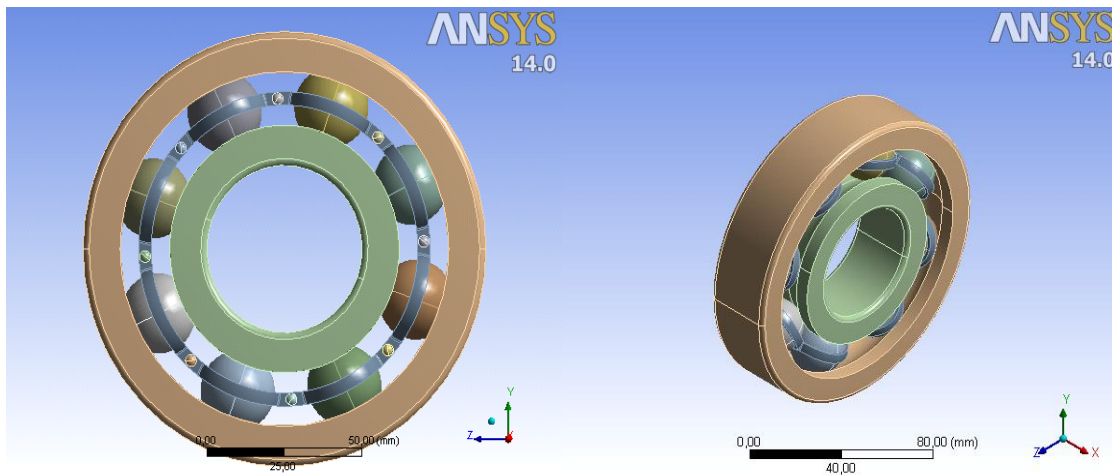
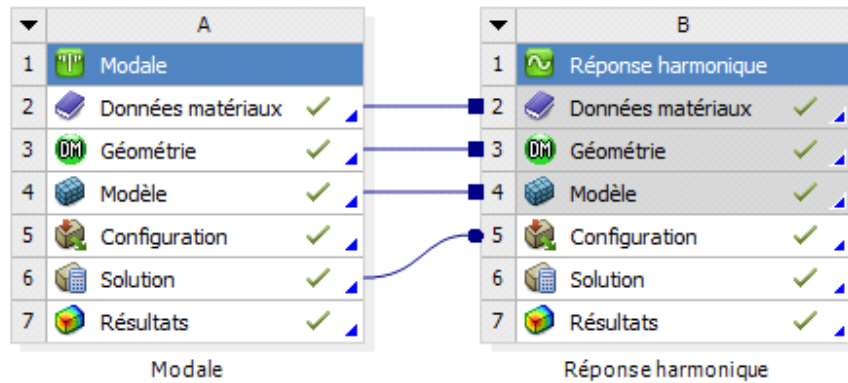


Figure (IV -1) :Le roulement 8812B

- **Les caractéristiques du roulement 8812B :**

Statistiques	
Corps	20
Corps actifs	20
Noeuds	23285
Eléments	10914
Unité de longueur	Mètres
Contrôle des éléments	Contrôlé par le programme
Style d'affichage	Couleur du corps
Volume	2,4213e+005 mm ³
Masse	1,9007 kg

Définition	
Désignation	Roulement 8812B
Type	Roulement a billes
Dimension	
Longueur suivant X	31, mm
Longueur suivant	130, mm

Y	
Longueur suivant Z	130, mm

Tableau(IV -1) : Les caractéristiques du roulement 8812B .

- **Géométrie :**

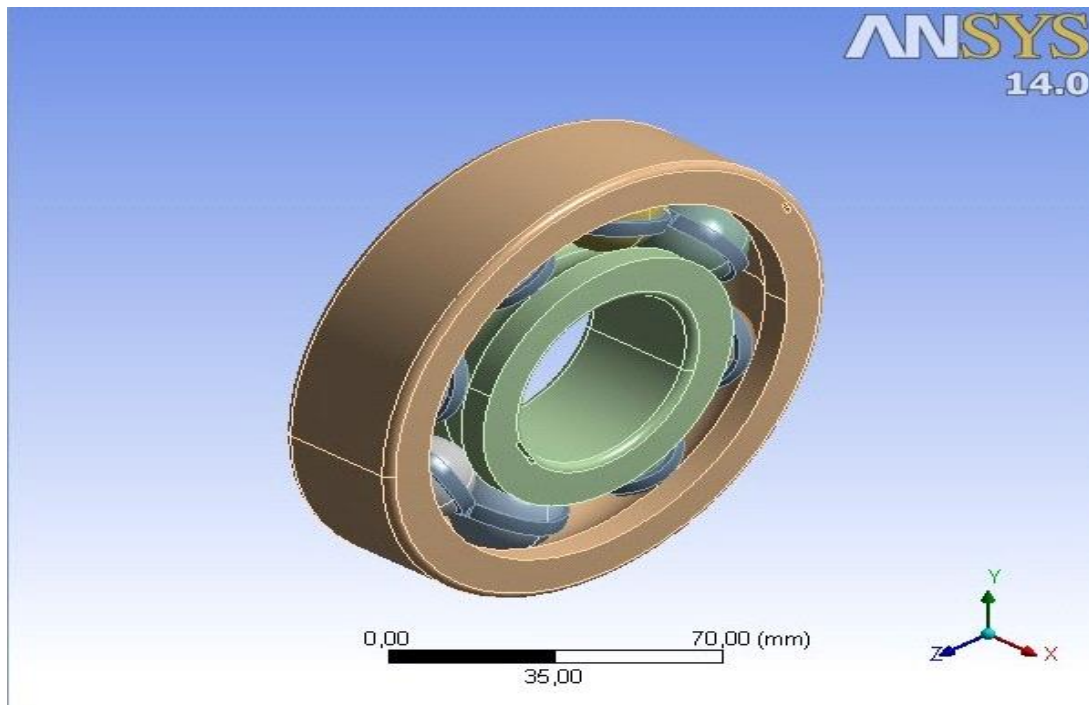


Figure (IV -2) : Géométrie de roulement 8812B.

- **Maillage :**

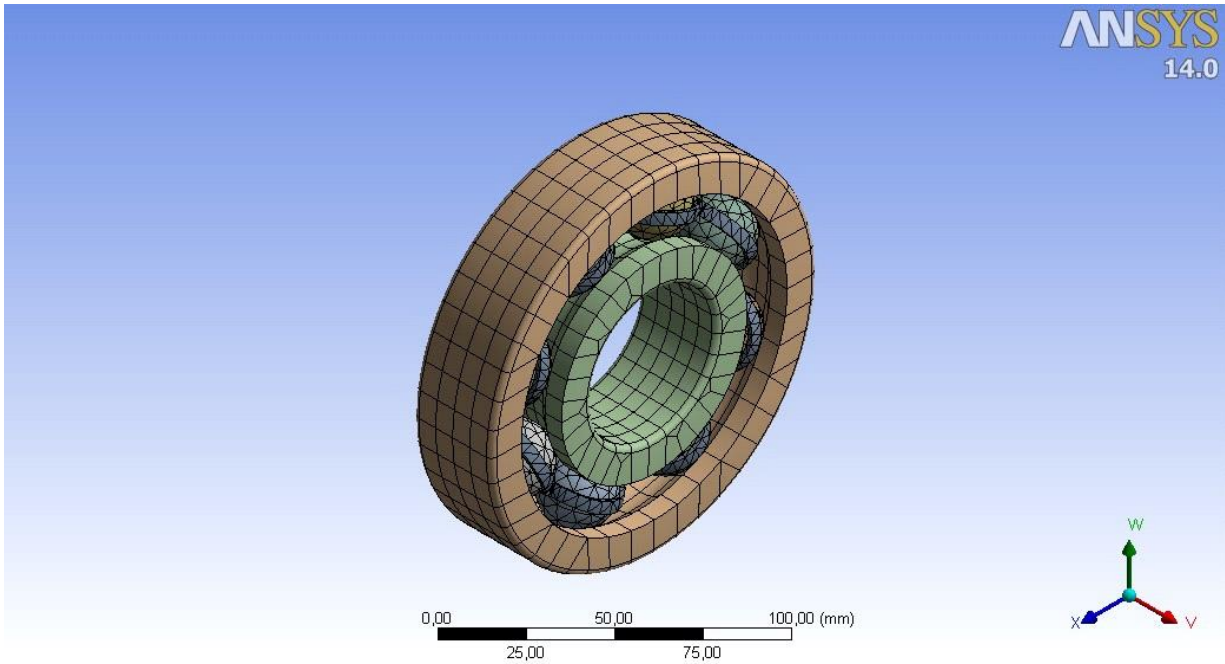


Figure (IV -3): Maillage du roulement 8812B

- **Système de coordonnées :**

Nom de l'objet	<i>Système de coordonnées global</i>
Etat	Totalement contraint
Définition	
Type	Cartésien
Numéro de système	0,
Origine	
Coord. X de l'origine	0, mm
Coord. Y de l'origine	0, mm
Coord. Z de l'origine	0, mm
Vecteurs directionnels	
Données de l'axe X	[1, 0, 0,]
Données de l'axe Y	[0, 1, 0,]
Données de l'axe Z	[0, 0, 1,]

Tableau(IV -2) :Système de coordonnées.

IV -1) - Essai 1 : Alliage Aluminium :

- **Modèle :**

- **Constants :**

Densité	2,77e-006 kg mm ⁻³
Coefficient de dilatation thermique	2,3e-005 C ⁻¹
Limite à la rupture en compression MPa	0
Chaleur spécifique	8,75e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹
Limite d'élasticité en compression MPa	280
Limite d'élasticité en traction MPa	280
Limite à la rupture en traction MPa	310
Température de référence C	22

Tableau(IV -3) :Constants d'alliage aluminium.

- **Elasticité isotrope :**

Température C	Module de Young MPa	Coefficient de Poisson	Module de compressibilité MPa	Module de cisaillement MPa
	71000	0,33	69608	26692

Tableau(IV -4) : Elasticité isotrope d'alliage aluminium.

- **Modale :**

- **Support fixe :**

Nom de l'objet	<i>Support fixe</i>
Etat	Totalement contraint
Champ d'application	
Méthode de champ d'application	Sélection de géométrie
Géométrie	14 Faces
Définition	
Type	Support fixe
Désactivé	Non

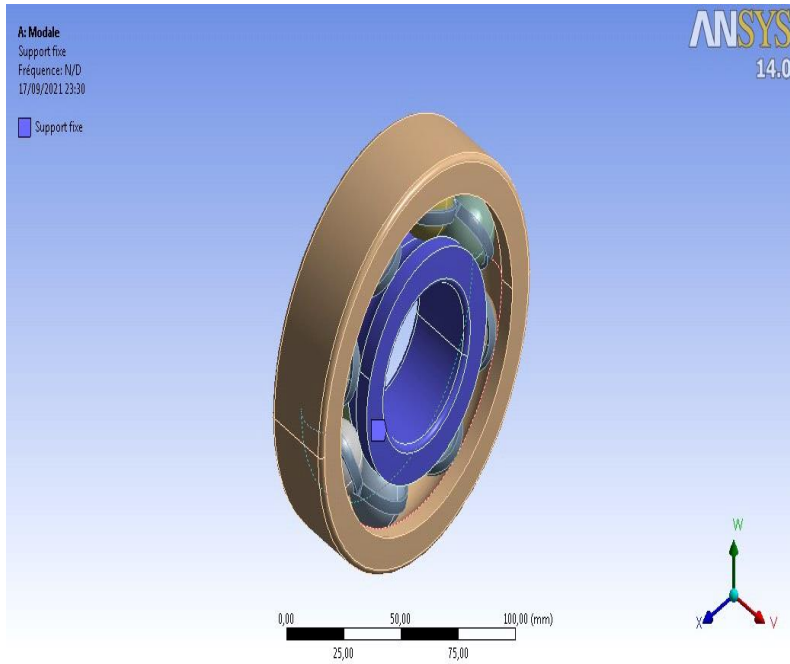


Figure (IV -4) : Roulement avec support fixe.
5) : Support fixe.

Tableau (IV -

- Solution :**

Mode	Fréquence [Hz]
1,	6029,7
2,	7262,4
3,	7312,4
4,	7857,9
5,	7981,1
6,	8162,
7,	11228
8,	11531
9,	11992
10,	12025
11,	15674
12,	15885
13,	16763
14,	16837
15,	16993
16,	17836
17,	18462
18,	22380
19,	22971
20,	23150

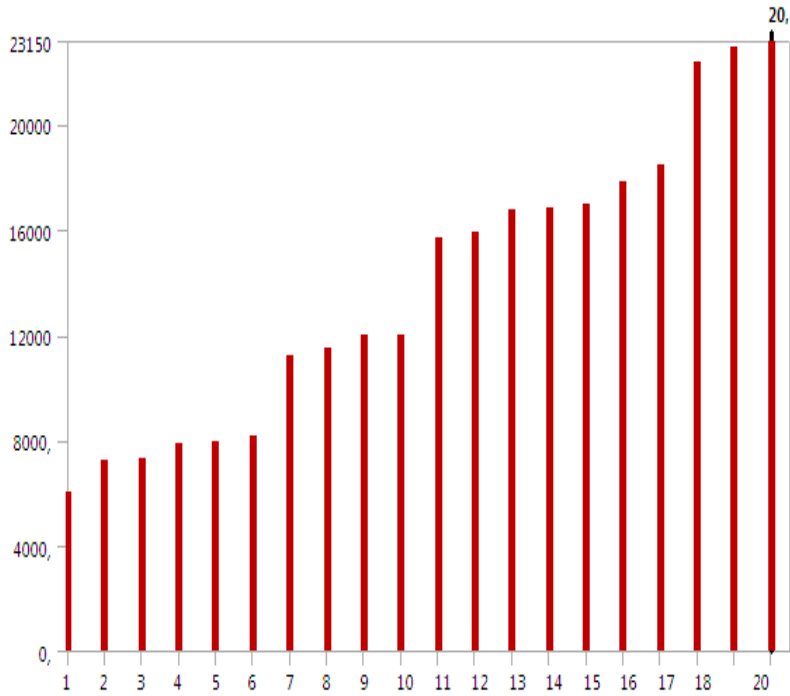


Figure (IV -5) : Solution.

Tableau (IV -6) : les fréquences

- **Réponse harmonique :**
 - pression

Nom de l'objet	<i>Pression</i>
Etat	Totalement contraint
Champ d'application	
Méthode de champ d'application	Sélection de géométrie
Géométrie	286 Faces
Définition	
Type	Pression
Défini par	Normale
Intensité	50000 MPa sous forme d'échelon
Angle de phase	0, °
Désactivé	Non

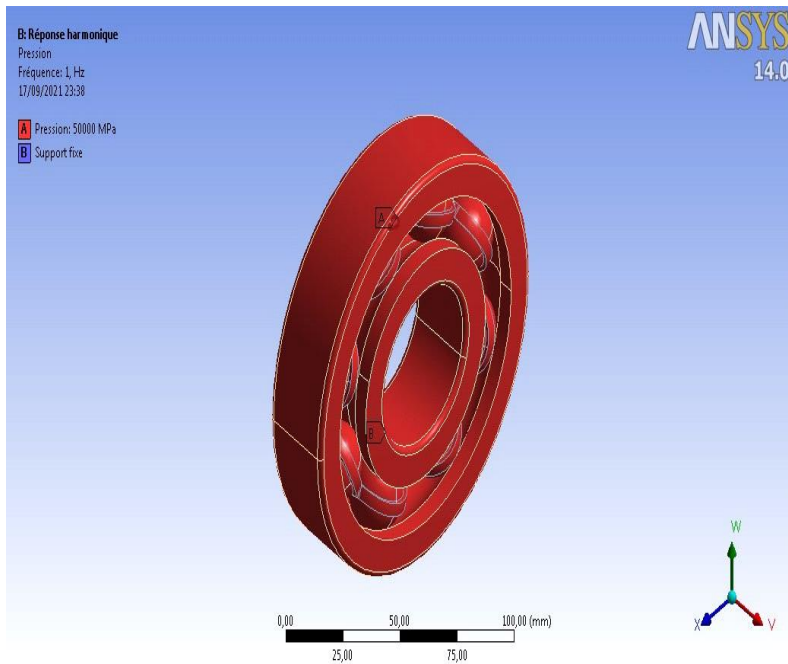


Figure (IV -6) : Roulement sous pression.

Tableau (IV -7) : Pression.

- **Réponse en fréquence :**

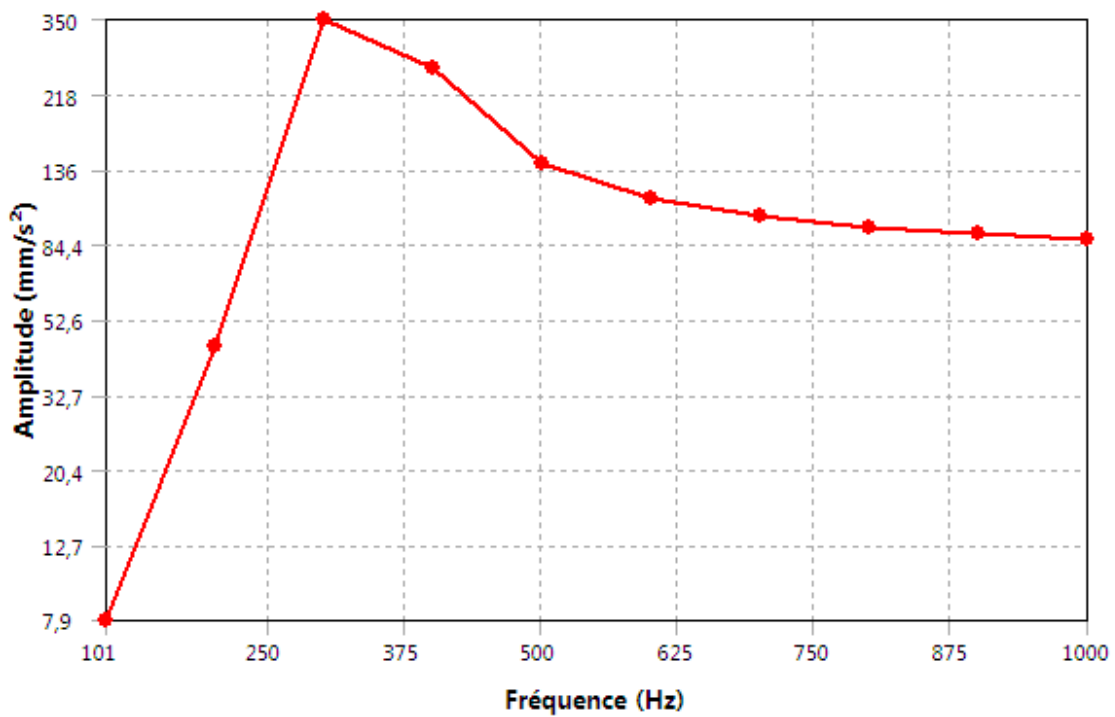


Figure (IV -7) : Réponse en fréquence (Aluminium) .

• Réponse en fréquence 2 :

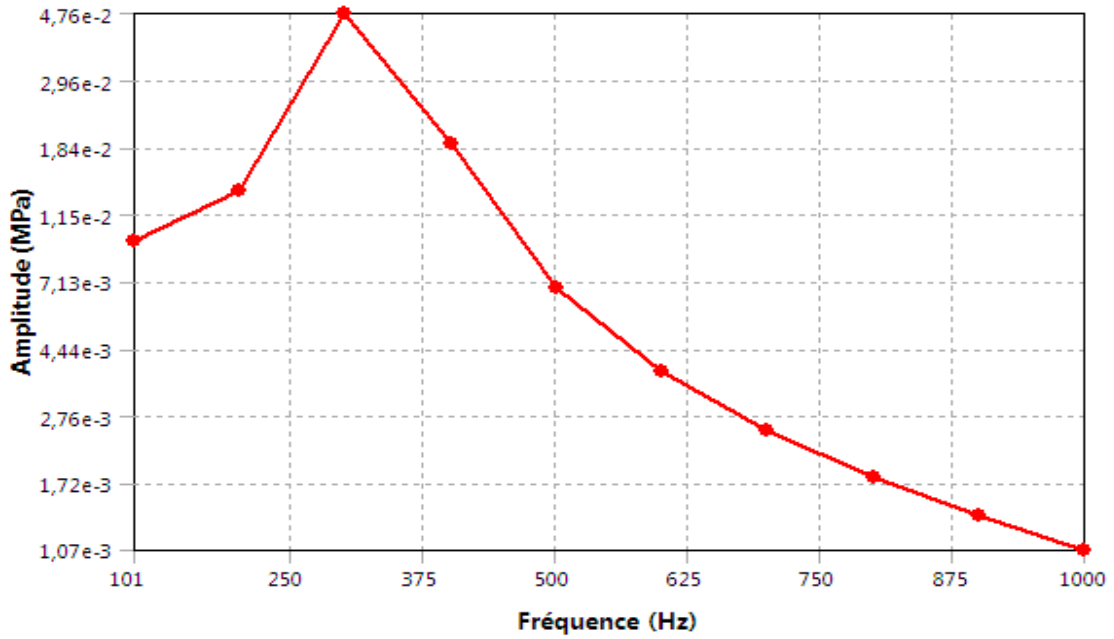


Figure (IV -8) : Réponse en fréquence 2 (Aluminium).

d) Réponse en phase :

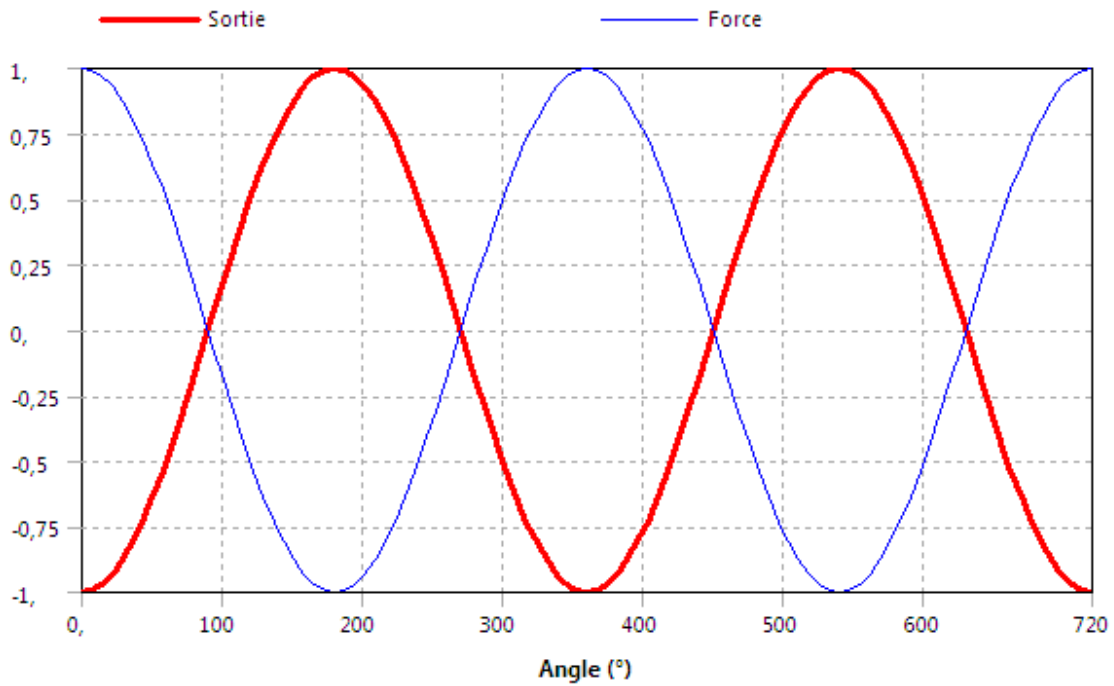


Figure (IV -9) : Réponse en phase (Aluminium).

- **Resultats :**

Nom de l'objet	Réponse en fréquence	Réponse en fréquence 2	Réponse en fréquence 3
Etat	Résolu		
Champ d'application			
Géométrie	286 Faces		
Résolution spatiale	Utiliser la moyenne		
Définition			
Type	Accélération directionnelle	Contrainte normale	Déplacement directionnel
Orientation	Axe X		
Désactivé	Non		
Options			
Plage de fréquences	Utiliser parent		
Fréquence minimale	1, Hz		
Fréquence maximale	1000, Hz		
Affichage	Bode		
Résultats			
Amplitude maximale	349,94 mm/s ²	4,758e-002 MPa	9,8031e-005 mm
Fréquence	300,7 Hz		
Angle de phase	180, °		0, °
Réel	-349,94 mm/s ²	4,758e-002 MPa	9,8031e-005 mm
Imaginaire	0, mm/s ²	0, MPa	0, mm
Champ d'application			
Géométrie			286 Faces
Résolution spatiale			Utiliser la moyenne
Champ d'application			
Géométrie			286 Faces
Résolution spatiale			Utiliser la moyenne

Tableau(IV -8) : Informations sur les résultats.

IV -2)- Etude 2 : Acier standard :

- **Modèle :**
- **Constantes :**

Densité	7,85e-006 kg mm ⁻³
Coefficient de dilatation thermique	1,2e-005 C ⁻¹
Limite à la rupture en compression MPa	0
Chaleur spécifique	4,34e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹
Conductivité thermique	6,05e-002 W mm ⁻¹ C ⁻¹
Résistivité	1,7e-004 ohm mm
Limite d'élasticité en compression MPa	250
Limite d'élasticité en traction MPa	250
Limite à la rupture en traction MPa	460

Tableau (IV -9) : Constantes d'Acier standard.

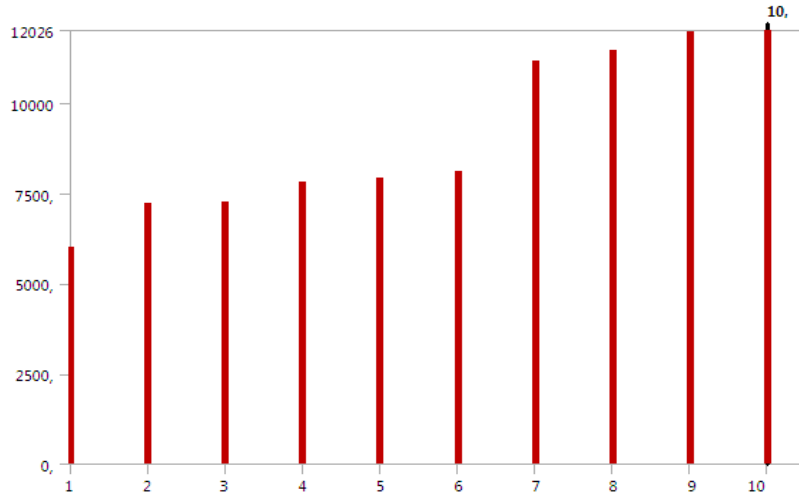
- **Elasticité isotrope:**

Coefficient de résistance MPa	Exposant de résistance	Coefficient de ductilité	Exposant de ductilité	Coefficient de résistance cyclique MPa	Coefficient d'écroissage de déformation cyclique
920,	-0,106	0,213	-0,47	1000,	0,2

Tableau (IV -10): Elasticité isotrope.

- **Modale :**
- Support fixe : (comme Etude 1).
- **Rèponse Harmonique :**

Mode	Fréquence [Hz]
1,	6001,4
2,	7218,8
3,	7269,8
4,	7828,9
5,	7947,3
6,	8122,7
7,	11171
8,	11472
9,	11993
10,	12026



- **Solution**

Figure (IV -10) : Les fréquences des 10 premier modes.

b) Réponse en fréquence

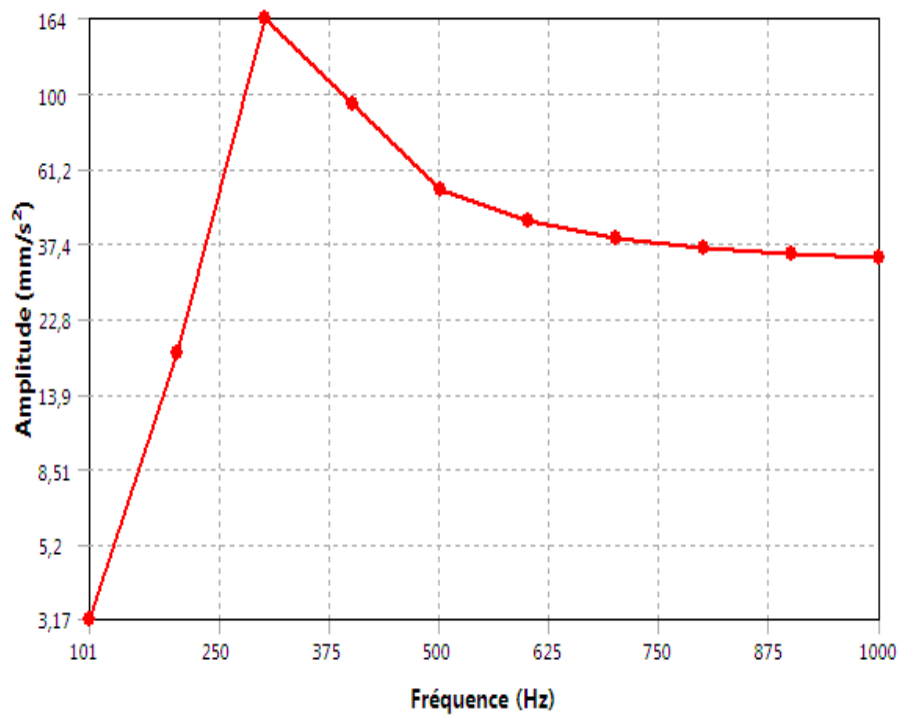


Figure (IV -11) : Réponse en fréquence1(Acier)

- **Réponse en fréquence 2 :**

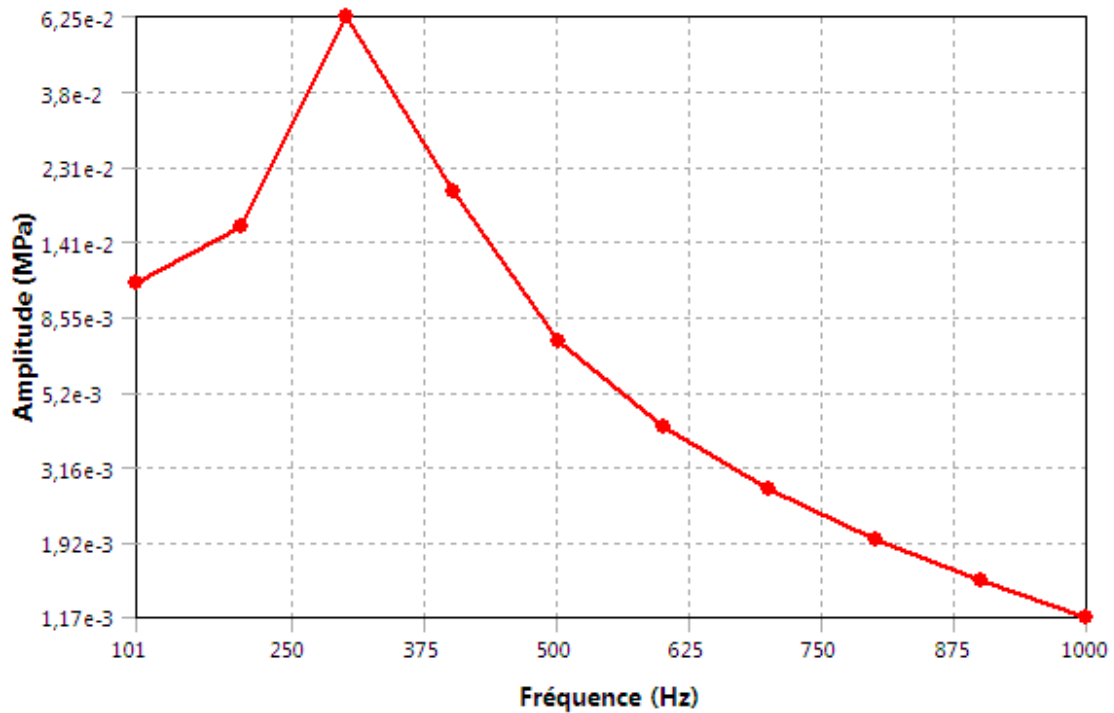


Figure (IV -12) : Réponse en fréquence 2 (Acier).

Comme on peut le voir sur les graphiques, les pics correspondent aux conditions de résonance. Mais les fréquences de fonctionnement du roulement sont bien inférieures aux conditions de résonance, par conséquent les conditions de résonance sont facilement évitées.

- Résultats :**

Nom de l'objet	Réponse en fréquence	Réponse en fréquence 2	Réponse en fréquence 3
Etat	Résolu		
Champ d'application			
Géométrie	286 Faces		
Résolution spatiale	Utiliser la moyenne		
Définition			
Type	Accélération directionnelle	Contrainte normale	Déplacement directionnel
Orientation	Axe X		
Désactivé	Non		
Options			
Plage de fréquences	Utiliser parent		
Fréquence minimale	1, Hz		
Fréquence maximale	1000, Hz		
Affichage	Bode		

Résultats			
Amplitude maximale	164,09 mm/s ²	6,2515e-002 MPa	4,5969e-005 mm
Fréquence	300,7 Hz		
Angle de phase	180, °	0, °	
Réel	-164,09 mm/s ²	6,2515e-002 MPa	4,5969e-005 mm
Imaginaire	0, mm/s ²	0, MPa	0, mm
Champ d'application			
Géométrie		286 Faces	
Résolution spatiale		Utiliser la moyenne	
Champ d'application			
Géométrie			286 Faces
Résolution spatiale			Utiliser la moyenne

Tableau (IV -11): Résultats.

• **Discussion des résultats :**

Matériau	Amplitude de l'accélération (mm/s ²)	Contrainte (MPa)
Aluminium	350	4,75 x 10 ⁻²
Acier	164	6,25 x 10 ⁻²

Tableau (IV -12): Tableaux comparative

Les deux matériaux sont dans des limites considérables, néanmoins l'acier présente une amplitude d'accélération ainsi qu'une contrainte moins que l'aluminium comme le montre les figures (IV-7) et (IV-11).

IV -3) - Etude 3 (Acier standard avec défauts) :

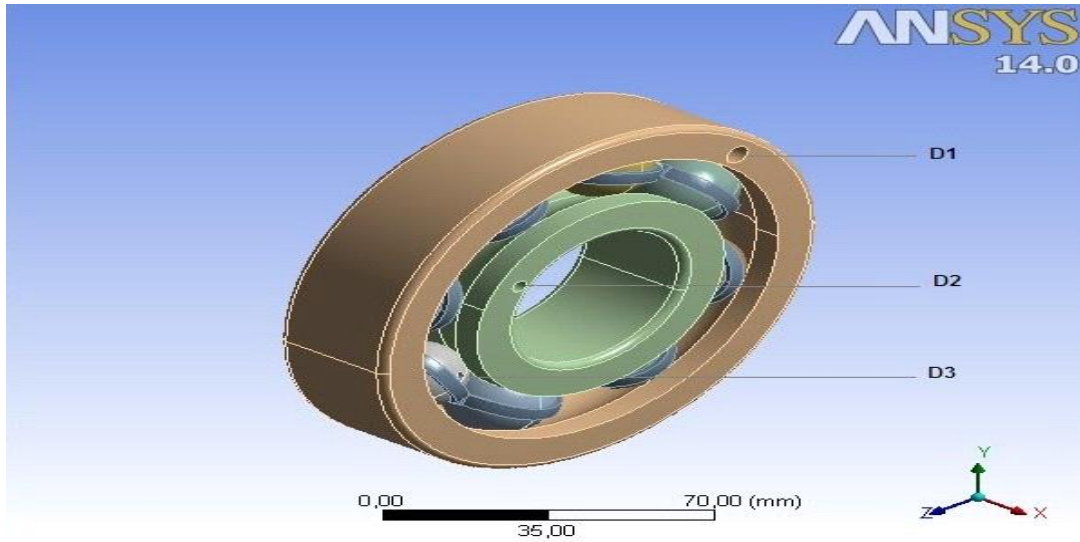
• **Modèle :**

• **Géométrie 2 (avec Défauts) :**

D1=0.0064 m

D2=0.0042 m

D3= 0.0029 m

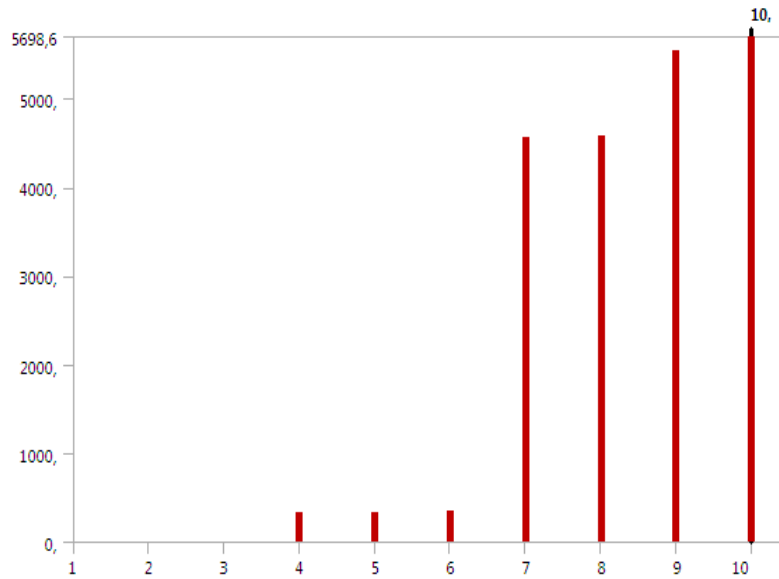


Figure(IV -13): EE Géométrie 2.

- **Modale :**

- **Solution :**

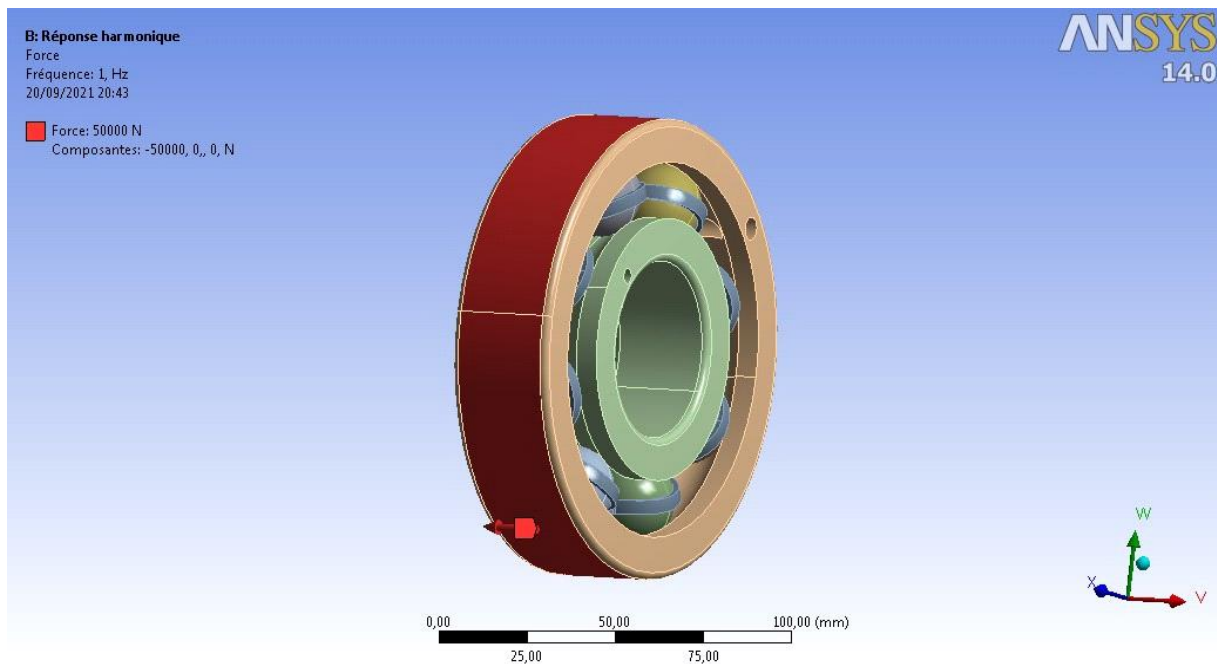
Mode	Fréquence [Hz]
1,	0,
2,	
3,	1,3235e-002
4,	323,82
5,	329,14
6,	356,79
7,	4567,5
8,	4587,5
9,	5536,1
10,	5698,6



Figure(IV -13): solution modale.

3. EE Réponse harmonique :

- Charges (Force) :



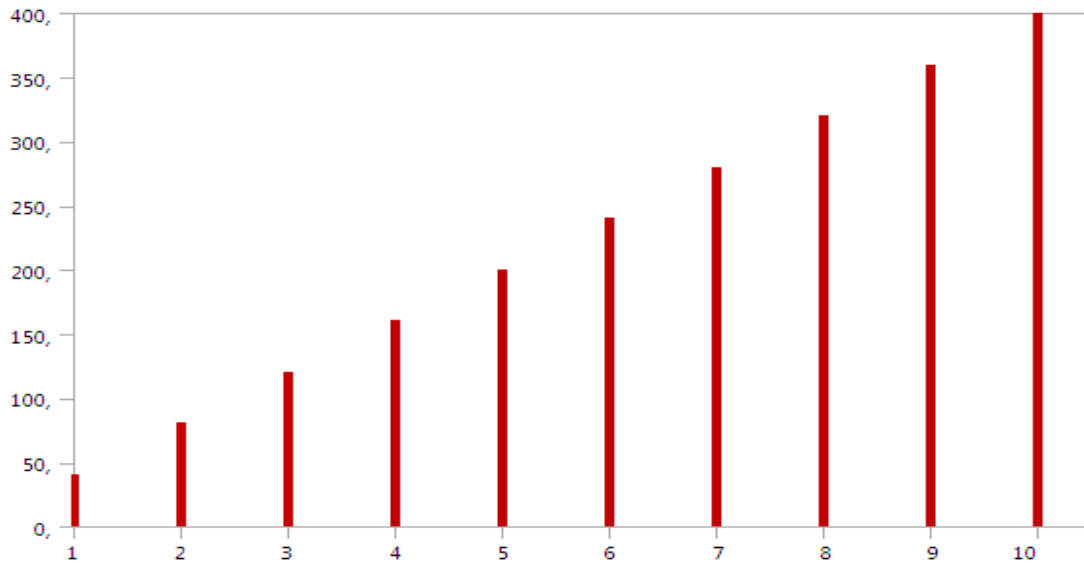
Figure(IV -14):Force.

Nom de l'objet	Force
Etat	Totalement contraint
Champ d'application	

Méthode de champ d'application	Sélection de géométrie
Géométrie	2 Faces
Définition	
Type	Force
Défini par	Vecteur
Intensité	50000 N
Angle de phase	0, °
Direction	Défini(e)
Désactivé	Non

Tableau (IV -14) : Force.

- **Solution:**



Figure(IV -14):solution.

- **Réponse en fréquence :**

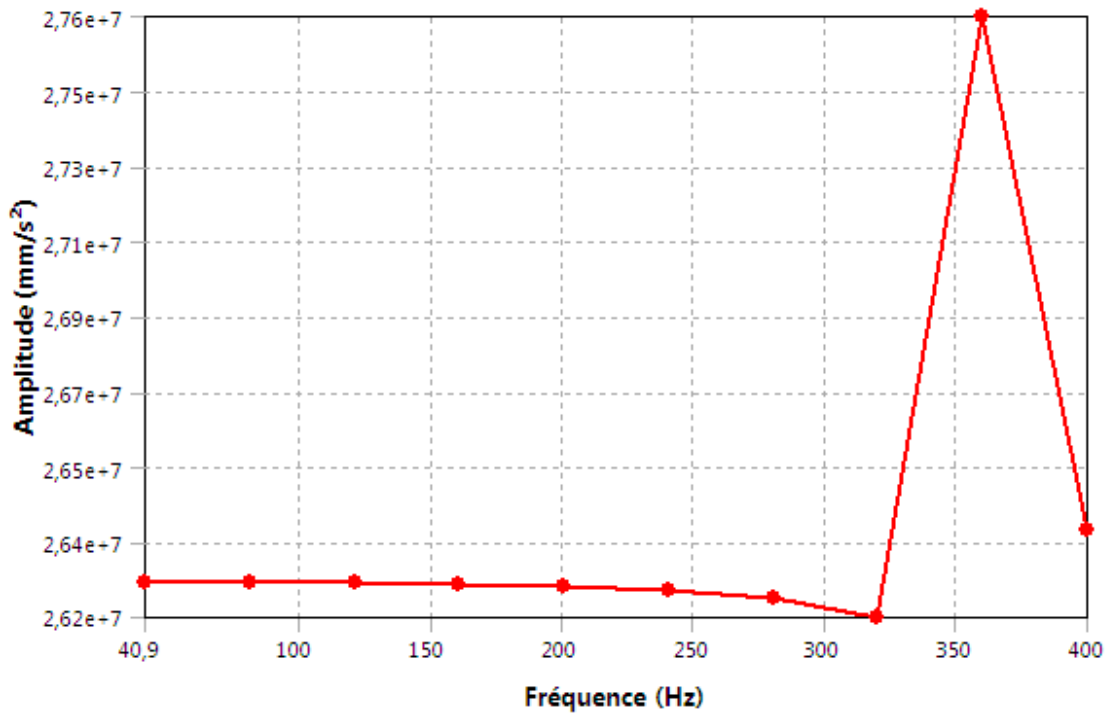


Figure (IV -15) : Réponse en fréquence 1.

- Réponse en fréquence 2 :

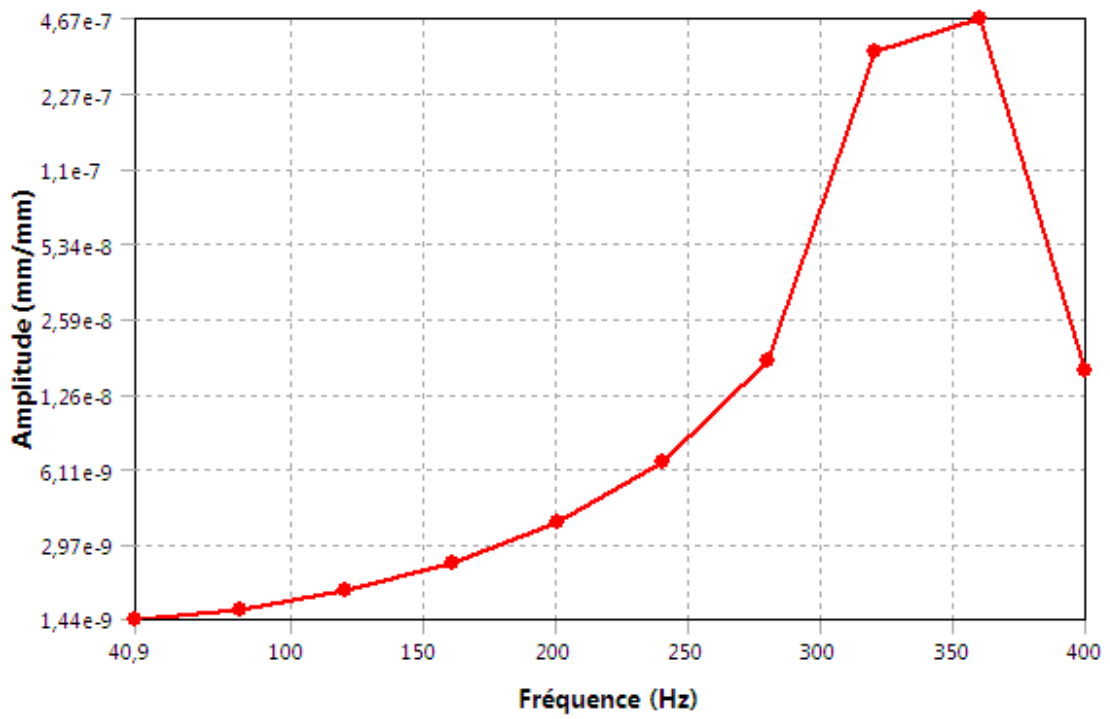


Figure (IV -16) : Réponse en fréquence 2.

- Réponse en phase :

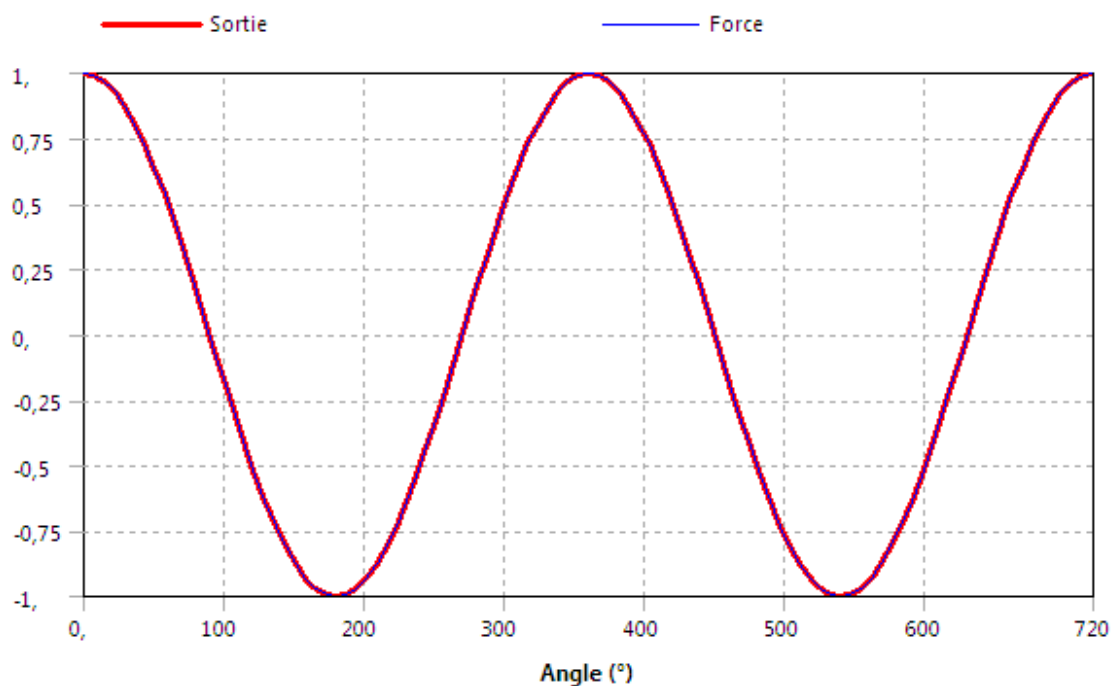


Figure (IV -17) : Réponse en phase.

• **Resultat :**

Nom de l'objet	Réponse en fréquence	Réponse en fréquence 2	Réponse en phase
Etat	Résolu		
Champ d'application			
Géométrie	1 Face		
Résolution spatiale	Utiliser la moyenne		
Définition			
Type	Accélération directionnelle	Déformation élastique normale	Déplacement directionnel
Orientation	Axe X		
Désactivé	Non		
Options			
Plage de fréquences	Utiliser parent		
Fréquence minimale	1, Hz		
Fréquence maximale	400, Hz		
Affichage	Bode		
Fréquence			1, Hz
Durée			720, °
Résultats			
Amplitude maximale	2,7644e+007 mm/s ²	4,6698e-007 mm/mm	
Fréquence	360,1 Hz		
Angle de phase	180, °	0, °	
Réel	-2,7644e+007 mm/s ²	4,6698e-007 mm/mm	397,75 mm

Imaginaire	0, mm/s ²	0, mm/mm	0, mm
Amplitude			397,75 mm
Fréquence représentée			40,9 Hz
Champ d'application			
Géométrie		286 Faces	
Résolution spatiale		Utiliser la moyenne	
Champ d'application			
Géométrie			286 Faces
Résolution spatiale			Utiliser la moyenne

IV -5) - Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthode de traitement du signal utilisable pour la surveillance et le diagnostic de systèmes, pour la détection des défauts des roulements, cette méthode est l'analyse spectrale.

Dans cette partie on a analysé quelques signaux vibratoires des roulements à l'état sain et à l'état défaillant, afin de détecter et caractériser les défauts, ces signaux ont été étudiés dans un environnement ANSYS WORKBENCH ou on a suivi l'évolution des défauts en fonction de son diamètre.

Cette dernière est très efficace dans le diagnostic et la maintenance, car non seulement elle permet de détecter qu'il existe un défaut, mais elle permet aussi de définir et de caractériser le type de défaut, cette méthode est très adaptée à la détection des défauts qui génèrent un choc périodique.

CONCLUSION GENERALE

Avec les progrès technologiques considérables l'être humain est entouré d'outils, de machines et de systèmes de plus en plus sophistiqués. Cette complexité croissante des systèmes rend la tâche de diagnostic plus difficile et son accomplissement implique une grande perte de temps.

Le diagnostic des défaillances dans l'industrie est une solution qui avant tout, garde les employés loin des risques qui surviennent lors de l'apparition d'un défaut mécanique sévère et qui peuvent être dangereux, De même elle réduit les pertes en matières premières qui peuvent être endommagées à cause de la panne, et augmente la productivité de la chaîne de production.

Le diagnostic des procédés industriels a pour objet de trouver la cause d'une défaillance ou d'un défaut, il est défini par les instances internationales de normalisation comme étant un processus d'identification de la cause probable des défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

De manière générale, lorsqu'on parle de diagnostic des défauts, on se réfère à la procédure de détection et d'isolation de ces derniers. Cette procédure nous permet d'avoir des informations sur l'apparition d'un défaut et sur sa provenance le plus rapidement possible. Les méthodes de détection et de localisation des défauts ont connu un essor considérable depuis le début des années 70 .

En effet, de nombreux chercheurs ont investi dans ce domaine proposant alors diverses approches et techniques répondant à la diversité des applications.

Dans ce mémoire nous nous sommes intéressés au diagnostic des défauts liés aux roulements. Le roulement est l'un des éléments essentiels dans presque chaque machine

tournante. Son intérêt réside sur le fait que cet élément forme un support de lien entre deux structures tout en facilitant leur mouvement en réduisant les forces de frottements entre eux. Le roulement dont on ne peut jamais négliger l'importance est l'élément le plus susceptible de tomber en panne dans une machine tournante, ce qui oblige une détection et un diagnostic précoce de ces pannes. Les défauts essentiels qui peuvent affecter un roulement sont : Le grippage dû à l'absence de lubrification, La corrosion due à un mauvais choix du lubrifiant, La corrosion de contact due au l'analyse vibratoire qui a donné des bonnes résultats depuis des années. Cette méthode est basée essentiellement sur le traitement des signaux vibratoires.

Le 1^{er} chapitre de notre travail a permis de donner une idée générale sur la constitution et la conception des roulements, on avait aussi cité les différents types des roulements et les défauts qui peuvent les affecter en indiquant les de chaque défaut.

Le 2^{ème} chapitre a été consacré à un état de l'art sur le diagnostic dans l'industrie, on a vu les étapes essentielles à suivre pour faire un diagnostic, puis on avait présenté les différentes techniques de diagnostic, ou on s'est basé sur la technique qui utilise les outils de traitement de signal.

Le 3^{ème} chapitre c'était un rappel relatif au traitement de signal, puis on avait parlé suffisamment sur l'analyse spectrale en indiquant le principe de détection des défauts des roulements par cette analyse.

Dans la 4^{ème} partie on avait fait une simulation sous ANSYS WORKBENCH dans le but d'extraire des signatures spectrales d'un roulement à l'état sain (fonctionnement normal), et à l'état défaillant. Une comparaison a été faite entre le spectre de référence et les spectres des états défaillants afin de suivre l'évolution de chaque défaut d'un élément de roulement en fonction de son diamètre.

La méthode d'analyse spectrale est très efficace pour le diagnostic des panne surtout lorsque on parle des défauts liés aux éléments des machines tournantes qui produisent des chocs périodiques comme les roulements, les engrenages...

Cette méthodes est rapide car il suffit juste d'avoir le signal vibratoire en lui caractérisant dans le domaine fréquentiel afin d'obtenir son spectre, puis on le compare avec celui de référence, s'il y a des apparitions des nouvelles fréquences des défauts ou bien des modifications des

l'amplitude en fonction des fréquences des défauts, cela signifiera qu'un défaut est apparu au niveau de roulement.

BIBLIOGRAPHIE

- :ISO Norme "Vibrations m mécaniques-Evaluation des vibrations des machines par mesurages sur les parties non tournantes".
- : SKF -<<catalogue technique France >>1981 .
- : AFNOR. Norme AFNOR X 60 - 010. Paris Afnor(1990).
- :Q. Meng, L. Qu, Rotating machinery fault diagnosis using Wigner distribution, Mechanical Systems and Signal Processing, pp 155-166, 1991.
- : SKF : fournisseur de produits et de solutions sur les marchés des roulements, des systèmes de lubrification, de la mécatronique, de l'étanchéité et des services. <http://www.skf.com/>.
- :ISO Norme "Vibrations m mécaniques- Evaluation des vibrations des machines par mesurages sur les parties non tournantes".
- : Gilles DUDRAGNE, Daniel GIRODIN'application of a new model for calculating the fatigue life of rollig bearings.SNR-roulement.1999.
- : www.skf.com/skf/support/html/dictionary.
- : «Contribution au diagnostic de machines électromécaniques exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée». Thèse de Doctorat 10 Mars 2009. [Alain Boulenger, Christian Pachaud] «Analyse vibratoire en maintenance».
- : CHIEMENTIN Xavier thèse de doctorat en mécanique «Localisation et quantification des sources vibratoires dans le cadre d'une maintenance préventive conditionnelle en vue de fiabiliser le diagnostic et le suivi de l'endommagement des composants mécaniques tournants : application aux roulements à billes»octobre 2007.

- :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.
- :Ericssona Stefan, NiklasGripa, ElinJohanssona, Lars-Erik Perssona, Ronny Sjobergb, Jan-OlovStr .ombergc : (Towards automatic detection of local bearing defects in rotating machines). Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) 509–535
- :KiralZeki, HiraKaragulle :(Vibration analysis of rolling element bearings with various defects under the action of an unbalanced force).MechanicalSystems and Signal Processing 20 (2006) 1967–1991.
- : Boulenger A, Pachaud C : « Aide mémoire : Surveillance des machines par analyse des vibrations ». Edition Dunod, Paris 2009.
- :Venkatasubramanian V, Rengaswamy R. Yin K., Kavuri S., "a review of process fault detection and diagnosis part quantitative model-based methods", Computer and Chemical Engineering, 2003.
- : Zwingelstein, G., (1995).Diagnostic des défaillances : Théorie et pratique pour les systèmes industriels, Editions Hermès.
- : BOUTICHE hamza(2015) « modélisation et diagnostic d'un réducteur de vitesse à un seul étage par analyse cepstrale »Thèse de master présenté à UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES
- :M. ZEMOURI, « contribution a la surveillance des systèmes de production a l'aide desréseaux de neurones dynamiques : application a la maintenance »,Thèse de doctorat présenté à l'université de Franche-Comte, France.2003.
- :D'RAHMOUNEChemseddine (2011), « Analyse et traitement du courant statoriquepour ladétection des défauts dans les systèmes électromécaniques ».Mémoire de magister présentéUNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES.
- : Frank, P.M., (1990).Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge Based Redundancy – A survey and New Results, Automatica, Vol. 26, pp. 459-474.

- :Leo H. Chiang, Evan L. Russell, et Richard D. Braatz (2001). Fault detection and diagnosis in industrial systems. New York : Springer-Verlag, 2001.
- :R. Isermann (1993). Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing - tutorial paper. Automatica, 29(4) :813-835, 1993.
- : Frank, P.M., (1990).Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge Based Redundancy – A survey and New Results, Automatica, Vol. 26, pp. 459-474.
- : J. Gertler (1997).Fault detection and isolation using parity relations. Control Engineering Practice, 5(5) :653–661, 1997.
- :Dubuisson, B., E. Boutleux, P. Dague, T. Denoeux, E. Didelet, Y. Gandvalet et M. Masson (2001).Diagnostic, Intelligence Artificielle et reconnaissance de formes, Ed. Hermes.
- : buivietphuong (2007).« Diagnostic des machines électriques par l’analyse du champ magnétique de fuite. Application a l’identification de défauts rotoriques d’un alternateur a vide ». Thèse de doctorat l’INPGRENOBLE .
- : Ballal M. S., Khan Z. J., Suryawanshi H. M., Sonolika R. L.(2007),« Adaptive neural fuzzy inference system for the detection of inter-turn insulation and bearing wear faults in induction motor », IEEE Transaction on Industry Electronics, vol. 54, n°1, p. 250-258, 2007.
- : Zidani F., Diallo D., Benbouzid M. E. H., Nait-Said R.(2008), « A fuzzy based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage-fed PWM inverter induction motor drive », IEEE Transaction on Industry Electronics, vol. 55, n°2, p. 586-593, Feb. 2008.
- : babakvaseghi, (2009), contribution a l’étude des machines électriques en présence des défauts entre-spores, modélisation – réduction du courant du défaut. Thèse de doctorat présentée a l’institut national polytechnique de lorraine.
- :Mr. TOUAFEK Ishak « Extraction d’indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L’EMD et des ondelettes (WT) »Mémoire de magister présenté à l’UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF UFAS (ALGERIE).
- : Boullenger, A., &Pachaud, C. "Diagnostic vibratoire en maintenance préventive", Dunod (1998).

- :Cousinard O. " Contribution à l'étude et au développement d'un système intégré de suivi de l'endommagement des composants mécaniques sur machines tournantes : Application au développement et au choix des outils d'analyse et de mesure vibratoire " Thèse de doctorat de l'Université de Reims (2002).
- : Ville J., « Théorie et applications de la notion de signal analytique », Câbles et transm., 2èmeA., N°1, 1948, pp. 61-74.
- : Flandrin P., « Temps-fréquence », traité des nouvelles technologies, coll.Hermes 1993.
- :Choy F.K, Polyshchuk V., Zakrajsek J. J. et al., « Analysis of the effects of surface pitting and wear on the vibration of a gear transmission system », tribologyinternational, vol. 29 N°1 1996, pp.77.
- :Djouada Mohamed : « Etude des performances de la classification par couplage réseaux de neurones artificiels (RNA) – algorithmes génétiques (AG) : application au diagnostic vibratoire ». Thèse magister UFAS. 2008. : james l. crowley, «TRAITEMENT DU SIGNAL» ,8 octobre 2001.
- : ADBI ZOHRA (2010), « étude des effet vibratoires sur la durée de vie de roulement a rouleaux » Mémoire de magister présenté à BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA.
- : Serge Dos Santos «COURS DE TRAITEMENT DU SIGNAL» École Nationale d'Ingénieurs du Val de Loire Année 2008-2009.