

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix –Travail-Patrie

-----  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT  
SUPERIEURE

REPUBLIC OF CAMEROON

Peace –Work –Fatherland

-----  
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
UNIVERSITY OF YAOUNDE I



**UNIVERSITE DE YAOUNDE I**

**ECOLE NORMALE SUPERIEURE  
D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE  
(ENSET) D'EBOLOWA**



**THEME : ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN BANC D'ESSAI POUR LE  
DIAGNOSTIC DES ROULEMENTS**

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme des Professeurs des lycées  
d'Enseignement Technique II (DIPET II)

**Département** : GENIE MECANIQUE

**Filière** : FABRICATION MECANIQUE

**Rédigé par :**

**ENAMA TOCKE II Victoire Gaël**

Matricule : 18W380

Sous

**L'encadrement de :**

**M. NDONGUE ESSEME Emmanuel (PLET / CM)**

**La supervision de :**

**Pr. KANAA Thomas (MC)**

**CD/GM**

**Année académique : 2019/2020**



**DEDICACE**

*Je dédie ce travail à mes très chères parents et mes tuteurs pour leur indéfectible soutien tant dans le domaine scolaire et dans ma vie quotidienne*

## AVANT POPOS

L'Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET), créé par Décret Présidentiel N° 2017/586 du 24 Novembre 2017, est un établissement d'Enseignement Supérieur relevant de l'Université de Yaoundé I. Il est situé au campus de **Metykpwale** dans la ville d'Ebolowa et abrite un bloc administratif, des salles de classes, un restaurant et bien d'autres.

L'ENSET a pour mission d'assurer :

- La formation des enseignants de l'Enseignement Secondaire Technique et des Conseillers d'Orientation Scolaire, Universitaire et Professionnelle;
- La promotion de la recherche scientifique, technologique et pédagogique, ainsi que la valorisation de résultats de la recherche dans son implémentation ;
- L'appui au développement ;
- Le recyclage et le perfectionnement du personnel de l'Enseignement Secondaire Technique, des professionnels dans ses domaines de formation.

Le décret N° 17-042 du 9 septembre 1991 portant organisation des enseignements et des évaluations de l'Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET) prévoit en son article 21, l'organisation des stages pédagogiques et / ou industriels pour les élèves à partir de la deuxième année du premier cycle.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la période de soutenance des projets d'étude de fin d'année des élèves-professeurs de 5<sup>ème</sup> année de l'ENSET d'Ebolowa toutes spécialités confondues

## REMERCIEMENTS

*Nous adressons nos remerciements à tous ceux qui ont de prêt ou de loin participés à l'accomplissement de ce projet.*

*De ce fait des distinctions particulières à :*

- *Madame le directeur de l'ENSET d'Ebolowa Prof DJAKOMO Salomé essiane, grâce à qui rien de tout cela n'aurait été possible ;*
- *Monsieur le chef de département du Génie mécanique Prof KANAA Thomas pour tous les conseils et le suivi particulier qu'il nous accorde ;*
  - *M.NDONGUE Emmanuel pour son soutient tant scolaire que moral en tant qu'encadreur pour mener à bien ce projet ;*
  - *M.KOLOTO MPOKO Emmanuel Honoré, vis directeur de la maintenance des équipements mécaniques, enseignant et père qui m'a toujours soutenu sans aucunes retenues car croyant toujours en nous et en nos capacités ;*
- *M.ATANGANA Mesmin chef de département des services de stage, pour son suivi tant dedans et hors du cadre académique ;*
- *M.NGANSOP Guy directeur technique de l'entreprise CASEM, structure dans laquelle nous avons grâce à son accord réalisé notre projet ;*
- *M. Prof BETENE pour son application à toujours maintenir ces étudiants (enfants) au haut niveau de la spécialité Fabrication Mécanique ;*
  - *Tous les enseignants de l'ENSET d'Ebolowa pour leur soutient sans borne ;*

*Tous nos frères, sœurs et amies qui nous soutiennent.*

## RESUME

Dans le cadre de notre projet de fin d'étude, en vue de l'obtention du DIPET II en production mécanique, nous nous sommes mis à l'œuvre pour : **L'étude et la réalisation d'un banc d'essai pour le diagnostic des défauts de roulement**. Ce projet a pour idée centrale de pouvoir dire si un roulement est défectueux ou sain, en concevant une machine dont l'acquisition se fera à moindre cout. Pour parvenir à la réalisation de notre projet, nous avons tout d'abord effectués une étude critique des bancs déjà existants, afin d'y introduire une idée pouvant résoudre le problème posé. Celles-ci ont été évaluées selon plusieurs critères pondérés nous conduisant vers le choix de l'analyse vibratoire pour diagnostiquer l'état des roulements. Dans ce travail, nous avons menés une étude analytique permettant de distinguer un roulement sain d'un roulement défectueux, essayés tant bien que mal de développer un démonstrateur logiciel Matlab permettant d'acquérir un signal de roulement, de l'analyser et de détecter éventuellement sa défaillance. Nous avons par la suite effectués l'analyse conceptuelle en nous appuyant sur le schéma cinématique élaboré par nos soins, afin de déterminer les conditions optimales de fonctionnement puis de dimensionnement de notre projet. Ensuite, l'étude graphique nous a permis d'effectuer une analyse de fabrication de certaines pièces qui par la suite a débouchée à l'estimation du cout de fabrication et à la rédaction d'une notice de maintenance

**ABSTRACT**

As part of our final of final study, for the obtention of DIPET II in mechanical production, we are stake on: *the study and realization of test banche for the diagnostic of bearing*. This project have for central idea to conclude that bearing is health or failing, pushing us in the conception of machine where the acquisition's cost will be not so expensive. To reach the realization of our project, we have firstly done a critical study of benches existing, to in order to introduce an idea whom can resolved a problem putting down, they have been estimated by many Pondera's criterion directing us one's choice: **the analysis vibration** for diagnostic of bearing. In this work, we have done an analytic study permitting us to characterize a healthy bearing and failing one, tried with difficulty to develop one MATLAB software demonstrator permitting to acquire bearing's signal, analyze it and saw an eventually defaillance in it. At the next we have carry out an analytic study model for the cinematic's plan doing by us, to determine an optimal conditions working order, afterward take measurement of our project. Graphic study permitted us to do a fabrication analysis of ones of certain pieces whom next us to the estimation of cost's fabrication and the redaction of an upholding instructions.

# TABLES DES MATIERES

DEDICACE.....	i
AVANT POPOS .....	ii
REMERCIEMENTS .....	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT .....	v
TABLES DES MATIERES .....	vi
LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX .....	ix
INTRODUCTION.....	1
I .1. LES ROULEMENTS .....	2
I.1.1.INTRODUCTION .....	2
I.1.2. CONSTITUTION D'UN ROULEMENT .....	2
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BANC D'ESSAI DU DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES ROULEMENTS .....	2
I.1.3. LES PRINCIPAUX TYPES DE ROULEMENTS.....	3
I.1.4. LES FACTEURS ESSENTIELS POUR LE CHOIX DU TYPE DE ROULEMENT.....	4
I.1.5. CAUSES ET DEFAUTS DES ROULEMENTS.....	4
I.1.6. LES CAUSES PRINCIPALES .....	8
I.2. FREQUENCES CARACTERISTIQUES POUR LES DEFAUTS D'UN ROULEMENT .....	9
I.2.1. fréquence de défaut sur la bague intérieure .....	9
I.2.2. fréquence de défaut sur la bague extérieure .....	9
I.2.3. fréquence de défaut sur la cage.....	9
I.2.4. fréquence de défaut sur l'élément roulant .....	9
I.3. LES METHODES DE DIAGNOSTICS INDUSTRIELS .....	10
I.3.1. Explication De Définitions Relatives Au Diagnostic .....	10
I.3.2. Les Différentes Etapes D'un Diagnostic.....	12
I.3.3. Techniques Et Méthodes De Diagnostic .....	13
I.3.4. La reconnaissance des formes .....	14
I.3.5. Les méthodes de traitement du signal.....	16
I.4. NOTION DE MAINTENANCE.....	18
I.4.1. Définition:.....	18
I.4.2. Les forme de maintenance : .....	18

I.5. LES METHODES EXPLICITES UTILISEES POUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES ROULEMENTS (équipements).....	19
I.5.1. Diagnostic par analyse chimique :.....	19
I.5.2. Diagnostic par mesure de la température : .....	19
I.5.3. Diagnostic par émission acoustique : .....	20
I.5.4. Diagnostic par technique de la pression sonore : .....	20
I.5.5. Diagnostic par mesure par déplacement laser : .....	20
I.5.6. Diagnostic de défaut de roulements par l'analyse vibratoire : .....	21
I.6. DIAGNOSTIC ET ARCHITECTURE DU SYSTEME DE DETECTION DU DEFAUT DES ROULEMENTS PAR L'ANALYSE DU COURANT .....	22
II.1.INTRODUCTION: .....	24
II.2.METHODE APTE (DIAGRAMME PIEUVRE) .....	24
Cette méthode nous permet d'analyser les besoins et identifier les fonctions de service de notre machine. ....	24
CHAPITRE II : REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES BANCS D'ESSAIS.....	24
II.3. LES DIFFERENTS TYPES DE BANC .....	26
II.3.1. BANC 6205-2Z-C3 (25×52×15).....	26
II.3.2. BANC D'ESSAI D'ANALYSE VIBRATOIRE DES ROULEMENTS .....	26
II.3.3. BANC D'ESSAI PT 500.....	27
II.3.4. BANC D'ESSAI DE L'UNIVERSITE DE GUELMA AU MAROC .....	28
II.3.5. BANC D'ESSAI SIMULATEUR DES DEFAUTS DES MACHINES(MFS) :.....	29
II.4. CHOIX DE LA SOLUTION .....	30
III.1. DIAGRAMMES A BOITE POUR ANALYSE DESCENDANTE.....	32
Ces diagrammes décrivent et décortiquent le produit d'un point de vue fonctionnel, en détaillant l'aspect hiérarchique et en classant par niveaux d'importance l'ensemble des fonctions. ....	32
Niveau 1 : Fp du diagnostiqueur de défaillance du roulement : dire si le roulement est en bonne état ou non.....	32
Niveau 2: .....	32
III.2. CONTRAINTES TECHNIQUES .....	32
III.2.1. Contrainte de résistance .....	32
III.2.2. Contrainte d'encombrement.....	32
Cette machine sera facilement transportable d'un atelier de production à un autre. Le volume occupé devra être très réduit : $\leq 1 \times 1 \times 1$ en mètre bien évidemment.....	32
III.2.3.Contraintes fonctionnelle et sécurité.....	32
CHAPITRE III : ANALYSE CONCEPTUELLE ET DE FABRICATION.....	32

III.2.3. Contraintes de réalisation.....	33
III.2.4. Contrainte économique .....	33
III.3. PLANIFICATION DU PROJET.....	33
III.4. PRINCIPE DE LA DETECTION DU DEFAUT SUR LE ROULEMENT .....	36
III.5. EXPERIENCE VIBRATOIRE AVEC CAPTEUR PLACE TOUT A COTE D'UN DES PALIERS A ROULEMENT DEFECTUEUX .....	37
III.5.1. Interprétation :.....	37
III.6. DIMENSIONNEMENT DE L'ARBRE DE TRANSMISSION.....	37
III-4.6) Etude statique de l'arbre moteur : .....	41
III.7.DESSIN D'ENSEMBLE.....	43
DESSIN DE DEFINITION .....	44
DESSIN DE FABRICATION.....	45
III-8) Fabrication Assistée par ordinateur du support moteur .....	54
III-9) Feuille de Programmation :.....	55
IV.1. ALGORITHME DE MAINTENANCE DE LA MACHINE.....	58
CHAPITRE IV:COUT, DEVIS ET MAINTENANCE DE LA MACHINE.....	58
IV.2. ESTIMATION DU COUT ET DEVIS .....	59
CONCLUSION .....	60
BIBLIOGRAPHIE .....	60
ANNEXE .....	60

## LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX

### LISTE DES FIGURS

<b>Figure 1 : Schéma éclaté d'un roulement rigide à bille à une rangée [1]</b> .....	<b>2</b>
<b>Figure 3 : la corrosion des pistes [10]</b> .....	<b>5</b>
<b>Figure 2 : le grippage [10]</b> .....	<b>5</b>
<b>Figure 4 : la bavure [10]</b> .....	<b>5</b>
<b>Figure 5 : l'écaillage [10]</b> .....	<b>6</b>
<b>Figure 6 : raillure [10]</b> .....	<b>6</b>
<b>Figure 7 : usure. [10]</b> .....	<b>6</b>
<b>Figure 8 :usure [10]</b> .....	<b>7</b>
<b>Figure 9 : rupture de la cage des roulements [10]</b> .....	<b>7</b>
<b>Figure 10 : courant électrique à travers un roulement [10]</b> .....	<b>7</b>
<b>Figure 11 : rayures et empreintes [10]</b> .....	<b>8</b>
<b>Figure 12 : rayures et empreintes [10]</b> .....	<b>8</b>
<b>Figure 13 : Diagramme des causes principales Diagramme des causes principales</b> .....	<b>8</b>
<b>Figure 14 : a) Signal chirp, b) Sa représentation temps fréquence</b> .....	<b>18</b>
<b>Figure 15 : Architecture du système de détection de défauts par analyse vibratoire</b> .....	<b>22</b>
<b>Figure 16 : Illustration de la Méthode Apte ou Diagramme pieuvre</b> .....	<b>25</b>
<b>Figure 17 : banc d'essai de fatigue du roulement [3].</b> .....	<b>26</b>
<b>Figure 18 : banc d'essai d'analyse vibratoire des roulements [16]</b> .....	<b>27</b>
<b>Figure 19 : banc d'essai PT 500. [5]</b> .....	<b>28</b>
<b>Figure 20 : banc d'essai [17]</b> .....	<b>29</b>
<b>Figure 21 : photo du simulateur de défaut des machines. Ordinateur équipé du logiciel VibraQuest</b> ..	<b>30</b>
<b>Figure 22 Schéma cinématique de la machine</b> .....	<b>35</b>
<b>Figure 23 : photos des outils d'obtention et d'interprétation des données</b> .....	<b>36</b>
<b>Figure 24 : fichier MATLAB des résultats émis</b> .....	<b>37</b>
<b>Figure 25 : arbre de transmission isolé</b> .....	<b>38</b>

### LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1 : Tableau récapitulatif des différents types de roulement.</b> .....	<b>3</b>
<b>Tableau 2 : de critères de choix de méthodes de diagnostic</b> .....	<b>13</b>
<b>Tableau 3 : critère d'appréciation et les niveaux de fonction complémentaire</b> .....	<b>25</b>
<b>Tableau 4 : tableau récapitulatif des taches</b> .....	<b>34</b>
<b>Tableau 5 : GRAPHE DE GANNTT</b> .....	<b>35</b>
<b>Tableau 6 : annotation schéma cinématique</b> .....	<b>36</b>
<b>Tableau 7 : Dimensions du roulement</b> .....	<b>37</b>
<b>Tableau 8 : cout du matériel</b> .....	<b>59</b>

## INTRODUCTION

Le 19<sup>ème</sup> siècle, époque de l'essor fulgurant des progrès scientifiques et techniques qui, placèrent sur une pyramide géante les pays du monde entier du plus démuné au plus industrialisé les puissances et les puissances au sommet de cette dernière doivent leur place à leur essor prodigieux sur le plan technologique. La formation des enseignants définit clairement les attentes de l'état camerounais : l'émergence sur le plan technologique et industriel de son pays par le biais de la formation d'enseignant aptes et ainsi se frayer une place de choix sur cette pyramide mondiale. A ce titre, tous les étudiants du 2<sup>nd</sup> cycle de l'ENSET se doivent de soutenir un mémoire sur un thème choisi ou proposé, résolvant un problème de la société et permettant ainsi d'asseoir pleinement leur compétence aussi bien sur le plan théorique que pratique qui, par l'approbation d'éminents membres du jury sauront apprécier leurs efforts. Nous élèves professeurs soucieux d'assurer au maximum le poste d'enseignant de lycées techniques..., nous décidons d'orienter nos recherches dans la branche d'activité qu'est la mécanique via : **L'étude et la réalisation d'un banc d'essai pour le diagnostic des défauts de roulements**. La méthodologie adoptée se fera via une approche conceptuelle à laquelle nous énumérons l'ensemble des solutions technologiques qui s'offrent à nous. Pour une bonne compréhension de notre étude, notre travail sera subdivisé en quatre chapitres à savoir :

- ETAT DE L'ART SUR LES PALIERS A ROULEMENTS ;
- REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES ROULEMENTS ;
- ETUDE CONCEPTUELLE ET ANALYSE DE FABRICATION ;
- ESTIMATION DES COUTS ET MAINTENANCE DE LA MACHINE

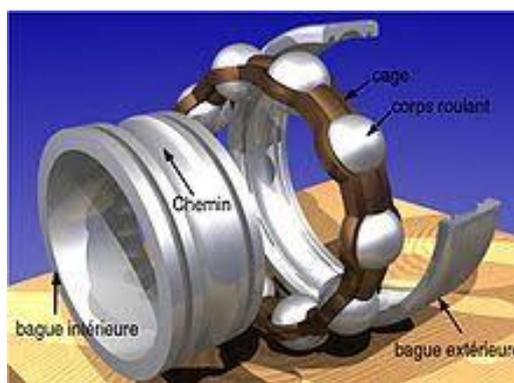
# CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BANC D'ESSAI DU DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES ROULEMENTS

## I.1. LES ROULEMENTS

### I.1.1. INTRODUCTION

Le palier à roulement est défini comme étant un dispositif destiné à guider un assemblage en rotation et de permettre à une pièce de tourner par rapport à une autre selon un axe de rotation défini. Utilisés pour réaliser des guidages en rotation à frottements réduits, dans le cas d'un guidage par roulement on interpose des éléments roulants entre les deux pièces. Cette technique révolutionnaire est une application de la méthode mise au point par les bâtisseurs de l'antiquité qui utilisaient des rondins de bois pour déplacer les blocs de pierres. Nous devons les premiers roulements à billes à Léonard de VINCI, et ceux à rouleaux attribués à John HARRISON au XVIII<sup>e</sup> siècle. Ils sont utilisés pour le guidage des arbres, plus en amont les machines industrielles tournantes. Par rapport aux paliers lisses, le roulement permet d'avoir une très faible résistance au pivotement tout en supportant des efforts importants. Raison pour laquelle on les trouve dans presque tous les mécanismes relevant du domaine de l'aéronautique, de l'automobile de la robotique etc...

### I.1.2. CONSTITUTION D'UN ROULEMENT



**Figure 1 : Schéma éclaté d'un roulement rigide à bille à une rangée [1]**

La figure 1: Il est constitué :

- De corps roulants (ces corps roulants peuvent être sphériques, cylindriques, coniques, ou en forme de tonneau) [4]
- D'une bague intérieure et d'une bague extérieure (qui constituent le chemin de roulement des éléments roulants) ;

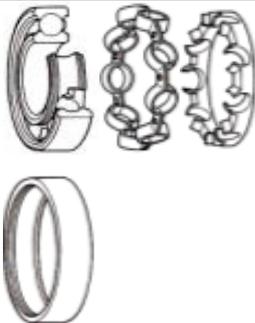
- D'une cage destinée à maintenir les corps roulants à écartement constant ;

De l'application des types de roulements dépendent les matériaux employés, mais ils doivent être généralement très résistants à la compression ; c'est pourquoi on choisit l'acier et la céramique.

### I.1.3. LES PRINCIPAUX TYPES DE ROULEMENTS

Pour des roulements parfaitement lubrifiés, sans dispositif d'étanchéité et selon leur facteur de frottement acier-acier( $\mu$ ), on a comme types de roulements :

**Tableau 1 : Tableau récapitulatif des différents types de roulement.**

Types de roulements		Charges supportées	Valeur du coefficient ( $\mu$ )	Observation
Rlt à billes	à contact oblique	Radiales et axiales	0.0015	
	Rigide à 1 ou 2 rangées	Axiales et radiales	0.0015	Supportent ces charges dans les deux sens
Rlt à rouleaux	Cylindrique	Radiales	0.002	
	Conique	Axiales et radiales	0.002	
Butées	Butée à billes	Axiales	0.0015	
	à rouleaux conique	Axiales et radiales	0.002	

	à rouleaux cylindrique	Axiales	0.008	Supportent aussi des chocs importants
Rlt à aiguilles		Axiale, radiale et combinées	0.004	

### I.1.4. LES FACTEURS ESSENTIELS POUR LE CHOIX DU 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 afin d'assurer un bon fonctionnement à des coûts réduits [7] [8].

Les facteurs qu'il faut tenir en considération sont les suivants :

- connaitre 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 afin de pouvoir fixer le jeu interne du roulement
- Il faut tenir en compte du mode de la lubrification, ainsi que le type du lubrifiant.
- La nature de la machine pour faire le choix du type de roulement
- La matière de l'arbre et du logement qui permettra de calculer le jeu résiduel du roulement.
- L'encombrement (l'espace) réservé au roulement. [5]

### I.1.5. CAUSES ET DEFAUTS DES ROULEMENTS

#### I.1.5.1. LES PRINCIPAUX DEFAUTS

On peut noter deux types d'avaries caractéristiques de la détérioration des roulements :

- Les avaries dites naturelles dues à la fatigue des roulements ;
- Les avaries dues à un mauvais montage ou une mauvaise utilisation du roulement.

Les principaux défauts sont :

##### I.1.5.1.1. 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.



**Figure 2 : le grippage [10]**

#### **I.1.5.1.2. La corrosion**

Elle est due à un mauvais choix du lubrifiant, au mauvais choix d'ajustements entre les bagues, les logements et les arbres.



**Figure 3 : la corrosion des pistes [10]**

#### **I.1.5.1.3. La bavure**

Phénomène de transfert de la matière d'une surface à une autre. Les facteurs peuvent être : le manque de lubrification, pénétration du corps roulant dans la zone chargée, une charge légère par rapport à la vitesse de rotation... le développement de la bavure conduit à la cassure de la bague ou du corps roulant.



**Figure 4 : la bavure [10]**

#### **I.1.5.1.4. L'écaillage**

Il est dû à la fatigue des roulements. C'est un phénomène normal qui conduit à une défaillance et ce quelques 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 couches. L'écaillage

localisé et prématuré résulte d'anomalies caractérisées telles qu'un mauvais montage, une surcharge, un défaut d'alignement, une mauvaise forme de logement.



**Figure 5 : l'écaillage [10]**

#### **I.1.5.1.5. l'usure**

En fonction des causes, on en dénombre trois types :

##### **✓ Usure par pénétration de particules**

S'incrétant entre les corps roulants, les bagues internes et externes à cause d'un manque de propreté lors de l'assemblage du roulement, ou si le lubrifiant est contaminé par ces particules étrangères. Une légère dentelure apparaît alors sur la bague externe, interne et sur le corps roulant.



**Figure 6 : raillure [10]**

##### **✓ Usure due à une lubrification légère ou manquante**

Ici, le lubrifiant n'est pas capable d'atteindre l'intérieur du roulement, ce dernier se voit avoir besoin d'une lubrification fréquente. En conséquence, il voit ses différentes parties usées et de surfaces réfléchissantes comme un miroir.



**Figure 7 : usure. [10]**

Usure due à la réception de vibrations excessives en position d'inertie

L'inertie ici étant le fait que le roulement ne tourne pas, ce type de défaut apparait lors du transport des machines. Cette usure apparait sous forme de creux rectangulaire sur le chemin de la bague interne, circulaire sur celui de la bague externe.



**Figure 8 : usure [10]**

#### **I.1.5.1.6. la détérioration des cages**

Cage déformée, rupture de la cage, rupture des rivets



**Figure 9 : rupture de la cage des roulements [10]**

#### **I.1.5.1.7) Passage de courants électriques à travers le roulement**

Présence de cratères ainsi que de cannelures sur la piste des roulements.



**Figure 10 : courant électrique à travers un roulement [10]**

#### **I.1.5.1.8) Rayures et empreintes**

Eraflures provoquées lors du montage, rayures provoquées par des corps étranglés très dures, enfoncement de la matière du a une manipulation inadaptée.



Figure 11 : rayures et empreintes [10]

#### I.1.5.1.9) Taches et décoloration

Elles s'entrevoyent à travers la disparition du lustre des surfaces du chemin des roulements. Surfaces mates, rugueuses et ou trouée, couvertes de petites bosses.



Figure 12 : rayures et empreintes [10]

### I.1.6. LES CAUSES PRINCIPALES

Les roulements sont les éléments les plus importants des machines tournantes. Souvent, ils sont soumis à des excitations provoquant dans la majorité des cas une défaillance partielle ou totale de la machine. Selon les statistiques (SNR 04), dans 90% des cas les causes sont à chercher dans les éléments extérieurs qu'on peut d'ailleurs résumer dans le diagramme suivant :

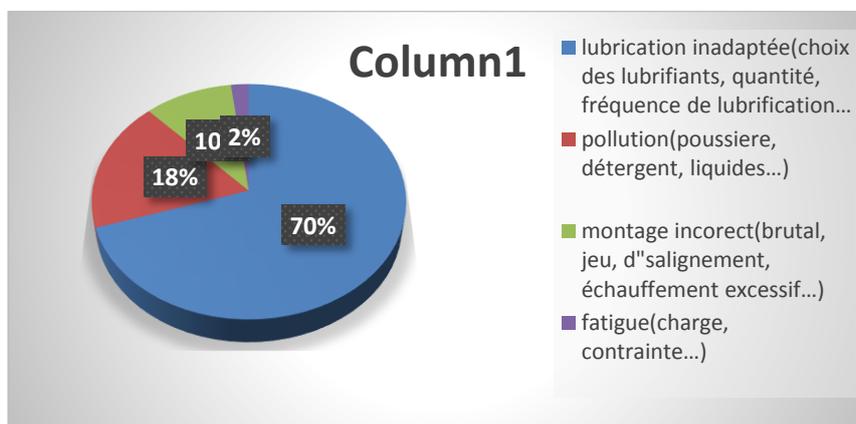


Figure 13 : Diagramme des causes principales Diagramme des causes principales

## I.2. FREQUENCES CARACTERISTIQUES POUR LES DEFAUTS D'UN ROULEMENT

Chaque type de défaut a sa propre signature et est caractérisée par une fréquence fondamentale (I.1)-(I.4), qui peut être calculée à partir de la structure, des dimensions du roulement et de la fréquence de l'arbre. Il est donc possible en analyse vibratoire d'observer certaines bandes de fréquences et d'identifier le type de défaut. Les expressions de ces fréquences caractéristiques sont développées d'après [11]. Nous pouvons les résumer de la manière suivante :

### I.2.1. fréquence de défaut sur la bague intérieure

Sa fréquence caractéristique est donnée par l'équation(Eq1). Cette fréquence modulée par la fréquence de rotation de l'arbre (bandes latérales autour de la raie de défaut).

$$F_{bi} = N/2(1+d_b/d_m \cos(\alpha) (f_{rot}-f_{ext})) \dots\dots\dots (Eq1)[11] \text{ avec :}$$

$f_{bi}$ : fréquence de défaut de la bague intérieure

$f_{rot}$ : fréquence de rotation de la bague intérieure

$f_{ext}$ : 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.

$\alpha$ : Angle de contact.

### I.2.2. 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.

$$f_{be} = N/2(1-d_b/d_m \cos(\alpha) (f_{rot}-f_{ext})) \dots\dots\dots (Eq2) [12]$$

$f_{be}$  : Fréquence de défaut de la bague intérieure

### I.2.3. fréquence 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  $f_{ca}$ , et ses harmoniques.

$$F_{ca} = 1/2(1-d_b/d_m \cos(\alpha)) f_{rot} + 1/2(1-d_b/d_m \cos(\alpha)) f_{ext} \dots\dots\dots (Eq3) [13]$$

### I.2.4. 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

$$F_b = 1/2 d_m / d_b [1 - (d_b / d_m \cos(\alpha))^2] (f_{rot} - f_{ext}) \dots \dots \dots (Eq4) [14]$$

$f_b$  : fréquence de défaut de la bille

De même que des dues à des perturbations extérieures (défaut d'alignement, géométriques, d'efforts, de mauvaises lubrifications...)

### I.3. LES METHODES DE DIAGNOSTICS INDUSTRIELS

Dans cette partie nous présentons les méthodes de diagnostic industriel, ou l'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 de diagnostic utilisées dans l'industrie.

#### I.3.1. Explication De Définitions Relatives Au Diagnostic

##### I.3.1.1. diagnostic:

Dans l'industrie, le diagnostic est défini par l'ensemble comme une action 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, qualification et décision à partir de la reconnaissance du mode de fonctionnement. La mission pour laquelle un système a été conçu, peut être totalement, partiellement remplie ou non, 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. Il permet de déterminer le type, la taille, l'endroit et l'instant de l'apparition du défaut. L'opération de diagnostic inclue la localisation et l'identification d'un défaut. 02 tâches essentielles en diagnostic:

- **La localisation** : permet de déterminer le ou les éléments défaillants.
- **L'identification** : estime les caractéristiques statiques et dynamiques du défaut (l'instant d'apparition de la panne, sa durée et son importance). On ne saurait parler de diagnostic sans détection ;

##### I.3.1.2. la détection

Pour détecter les défaillances d'un système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales. Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification

communément adoptée consiste à Considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale ; par conséquent est considérée comme défaut.

### I.3.1.3. le 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. Qui parle de défaut entrevoit une défaillance du système ;

### I.3.1.4. la défaillance

Événement engendrant une modification du fonctionnement d'un 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. Elle est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonction(s) requise(s) avec les performances définies dans les spécifications techniques. On peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité :

- **Défaillance absorbable** : pouvant être ignorée dans un premier temps ;
- **Défaillance significative** : nécessite un processus de traitement ;
- **Défaillance critique** : nécessite une réparation. Toute défaillance est issue de la dégradation d'un élément machine.

### I.3.1.5. la 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. La conséquence directe n'est autre la panne.

### I.3.1.6. la 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 produite, elle nécessite une action de réparation.
- ✓ **Les pannes intermittentes** : le système peut retrouver son fonctionnement normal après l'occurrence de la panne. Elle est généralement le résultat d'une dégradation partielle et progressive d'un composant du système, pouvant aboutir à une panne permanente.

### **1.3.2. Les Différentes Etapes D'un Diagnostic**

Effectuer un diagnostic nécessite de suivre un certain nombre d'étapes qui s'enchainent :

#### **I.3.2.1. Etape d'acquisition de données**

La procédure de diagnostic nécessite 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.

#### **I.3.2.2. 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 d'éventuels défauts pouvant apparaître au sein du système. Dans le domaine du diagnostic, les Indicateurs de défauts sont couramment dénommés les résidus ou symptômes.

#### **I.3.2.3. 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 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, est réalisée à l'aide d'un seuillage.

#### **I.3.2.4. Etape de localisation**

Il s'agit à partir des résidus non nuls statistiquement, de localiser le défaut, c'est-à-dire déterminer le ou les éléments défaillants. 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.

#### **I.3.2.5. 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

### I.3.3. Techniques Et Méthodes De Diagnostic

#### I.3.3.1. classification des méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic se distinguent selon différents critères :

**Tableau 2 : de critères de choix de méthodes de diagnostic**

<b>CHOIX DES METHODES DE DIAGNOSTIC</b>	
La dynamique du procédé	Discret
	Continue
	Hybride
La complexité du procédé	Implantation du Diagnostic en ligne
	Implantation du diagnostic hors ligne
La nature de l'information	Quantitative
	Qualitative
La profondeur de l'information	Structurelle
	Fonctionnelle
	Temporelle
La distribution	Centralisée
	Décentralisée
	Distribuée

#### I.3.3.2. Méthodes de diagnostic avec modèles

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

Méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle, méthodes de diagnostic par modélisation physique.

#### I.3.3.3. Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle

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

#### **I.3.3.4. Les méthodes de diagnostic par modélisation physique**

Les méthodes de surveillance avec modèle physique ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par le modèle. 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. 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

#### **I.3.4. 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 modèle 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 de tous les états de fonctionnement et ne prend pas en compte l'évolution du système. 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.

#### **I.3.4.1. 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.

#### **I.3.4.2. 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 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.

#### **I.3.4.3. 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.

### I.3.5. Les méthodes de traitement du signal

Le traitement et l'analyse d'un signal peuvent être parfois utiles dans le domaine du 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 entre autre leur contenu spectral, leur variance, l'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels 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.

#### I.3.5.1. Quelques techniques de diagnostic par approche signal

##### I.3.5.1.1. Analyse temporelle

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

##### I.3.5.1.2. Analyse fréquentiel

Le second type de représentation est la représentation du domaine de fréquence (fréquence, amplitude) appelé spectre ou représentation spectrale. Le signal complexe  $F(t)$  qui est difficile à interpréter, est décomposé en une série de composants élémentaires définis par leurs fréquences et leurs amplitudes. L'outil mathématique utilisé dans ce cas est la décomposition du signal à l'aide de la transformée de Fourier. Si cette décomposition est possible, sa représentation dans le domaine

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

#### I.3.5.1.3 Analyse spectrale

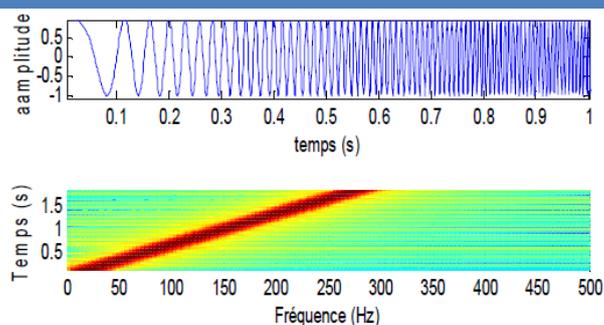
Le spectre se définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier

$$C[S(t)] = TF^{-1} \log TF[S(t)]^2$$

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 spectre 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.

#### I.3.5.1.4 Analyse temps – fréquence

Les méthodes d'analyse temps fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non-stationnaires. 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 que 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. Elle 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.



**Figure 14 :a) Signal chirp, b) Sa représentation temps fréquence**

Les méthodes temps-fréquence permettent alors trois dimensions (amplitude-temps des défauts qui génèrent une faible puissance vibratoire).

## **I.4. NOTION DE MAINTENANCE**

### **I.4.1. Définition:**

D'après la norme AFNOR X60-010, la maintenance est définie comme l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifique ou en mesure d'assurer un service déterminé. Maintenir c'est donc effectuer des opérations de : nettoyage, graissage, visite, réparation, révision... permettant de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de production, ainsi que choisir les moyens de prévenir, corriger ou de rénover suivant l'utilisation du matériel. L'état d'esprit de la maintenance est de maîtriser les interventions [18]

### **I.4.2. Les forme de maintenance :**

#### **I.4.2.1.La maintenance préventive :**

Elle vise à diminuer la probabilité de défaillance d'un système. Pour cela elle s'appuie sur:

#### **I.4.2.2. la maintenance systématique:**

Qui consiste à changer suivant un échéancier établi à l'avance des organes jugés Proches de l'usure. Elle est définie par les lois de la conception par le constructeur et remplie par l'expérience des agents de la maintenance. C'est la plus simple et la plus utilisée jusqu'à présent. Elle consiste donc en des arrêts réguliers de la machine, avec démontage, contrôle des jeux et remplacements systématiques d'organes. La date de l'arrêt est planifiée par expérience. Elle se base sur des données statistiques du dossier historique de l'unité d'intervention ou en fonction d'impératif de sécurité. L'inconvénient d'une telle maintenance est le risque démontage inutile de la machine occasionnant ainsi un manque à gagner certain. De plus, il est toujours délicat de redémarrer un équipement froid dans la quel des réglages parfois longs et complexes. Il se peut aussi qu'on ait des défaillances entre deux interventions systématiques provoquant ainsi des dégâts importants avec arrêt de la production.

**I.4.2.3. La maintenance conditionnelle :**

Qui demande au préalable d'effectuer un diagnostic avant de remplacer l'organe en question. Elle s'applique particulièrement aux machines tournantes.

**I.4.2.4. la maintenance corrective:**

Qui vise à intervenir à la suite de pannes. Cela ne veut pas dire que toutes ces pannes n'ont pas été prévisibles. Ce type de maintenance sera facilité par une bonne maintenabilité (aptitudes à maintenir ou à rétablir un dispositif, dans un état, lui permettant d'accomplir sa fonction). Il pourra permettre d'améliorer la fiabilité globale en analysant les problèmes rencontrés en contrôle techniques ou cercles de qualité ou avec les constructeurs. [1]

## **I.5. LES METHODES EXPLICITES UTILISEES POUR LE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DES ROULEMENTS (équipements)**

Les techniques de diagnostic des défauts de roulements sont nombreuses et diversifiées. On peut citer :

**I.5.1. Diagnostic par analyse chimique :**

Quand l'huile de lubrification est dégradée par la température, il génère un grand nombre de produits sous forme de gaz, liquide et de particules solides. Aussi, l'huile de lubrification ne contient pas que les produits causés par sa propre dégradation, mais aussi ceux dus à l'usure du roulement. Ensuite, l'état du roulement peut être contrôlé par une analyse chimique performante de l'huile de lubrification [18]. Quoique la détection de la dégradation de l'huile puisse fournir des informations utiles sur l'état des roulements, la détection peut être performante seulement quand l'huile de lubrification est disponible. Cependant, l'analyse chimique est applicable seulement pour les grosses machines (supérieure à 50 kW) avec une alimentation continue de l'huile. Pour les machines de petite et moyenne taille, vu que la graisse est ordinairement encapsulée à l'intérieur du roulement, la méthode d'analyse chimique n'est pas pratique.

**I.5.2. Diagnostic par mesure de la température :**

La température du roulement ne doit pas dépasser un certain degré. Par exemple dans l'industrie pétrochimique, l'IEEE spécifie que la remontée de la température du roulement ne doit pas dépasser 45 °C (50 °C pour moteur à deux pôles) [19]. L'élévation de la température du roulement peut être causée par la dégradation de la graisse ou du roulement lui-même. D'autres facteurs peuvent causer l'élévation de la température des roulements, y compris l'augmentation de celle des enroulements, la distribution de la température dans la machine, etc... [20]. Cependant la mesure de la température peut fournir des informations utiles sur l'état de la machine et du roulement. L'inconvénient majeur

de cette technique est qu'elle nécessite l'introduction des capteurs de température à l'intérieur des roulements. Le contrôle de la température n'est pas populaire aujourd'hui, quoiqu'il soit un moyen traditionnel pour surveiller l'état des roulements [21].

### **I.5.3. Diagnostic par émission acoustique :**

L'émission acoustique est définie comme une onde élastique transitoire générée par un dégagement rapide d'une énergie entorse causée par une déformation ou par un endommagement dans ou sur la surface d'un matériel [22]. Dans le cas des défauts de roulement, elle offre l'avantage d'une détection précoce des défauts comparée à l'analyse vibratoire. Dans un environnement bruyant et de grand niveau sonore l'analyse acoustique peut rencontrer des difficultés. Cela parce que la basse fréquence associée aux petits défauts de roulement contribue une énergie négligeable par rapport aux bruits entourés. Cependant dans un tel environnement, le potentiel des ondes émises dans des régions de hautes fréquences (supérieur à 100 kHz) peut encore fournir des indications claires sur le défaut et offre la possibilité de détecter le défaut en début d'apparition. Cependant, les limitations du succès de cette technique pour la surveillance des roulements sont dues principalement aux difficultés dans le traitement, l'interprétation et la classification des données acquises. De plus, cette technique nécessite de l'expertise pour effectuer les mesures.

### **I.5.4. Diagnostic par technique de la pression sonore :**

Depuis que la dégradation des roulements peut affecter le bruit émis par le roulement, la technique de la pression sonore est utilisée pour la surveillance des roulements [23-24]. Les bruits enregistrés dans la recherche sont entre 0 et 20 kHz. Comme dans les vibrations, les fréquences caractéristiques du défaut peuvent être identifiées dans le bruit excité par le roulement défectueux. Le bruit du roulement peut être enregistré en utilisant des microphones et si le roulement est en état de dégradation très avancée, le bruit peut être entendu clairement. La surveillance du niveau sonore paraît comme la technique la moins utilisée en la comparant avec les autres méthodes conventionnelles. Cependant, cette technique doit être protégée des perturbations extérieures et des bruits provenant des autres roulements, car le bruit du roulement à analyser est altéré, ce qui va conduire à des résultats incorrects. Par conséquent, cette technique n'est pas applicable pour un traitement de machines électriques travaillant dans le même espace.

### **I.5.5. Diagnostic par mesure par déplacement laser :**

Les déplacements vibratoires sont ordinairement calculés par les accélérations vibratoires mesurées à travers les accéléromètres. Fort possible que des erreurs apparaissent lors de ce calcul. Pour éliminer ces erreurs, une étude est faite, basée sur l'emploi d'un capteur laser pour lire directement les déplacements du roulement causés par le défaut [25]. Mais, cette technique exige que le capteur de déplacement laser soit placé sur la surface du roulement, généralement pas facile à implanter. Les

défauts d'usure survenant sur les organes mécaniques tels que les engrenages et les roulements produisent essentiellement des phénomènes de modulation sur les signaux.

### **I.5.6. Diagnostic de défaut de roulements par l'analyse vibratoire :**

Le roulement peut être bien surveillé par l'analyse vibratoire, la vibration doit être mesurée par des capteurs de vibration telle que l'accéléromètre et des transducteurs de vitesse. Les mesures doivent être prises sur les roulements ou d'autres pièces de structure qui répondent de manière significative aux forces dynamiques et caractérisent la vibration globale de la machine [26-27]. Il a été reconnu depuis de nombreuses années que l'analyse vibratoire est un indicateur plus fiable pour les défauts de roulement. Cette technique est populaire dans la pratique, et de normes reconnues sont disponibles tels que ISO 10816 [26-27]. Les fréquences de roulement les plus connues dans les machines électriques sont les fréquences caractéristiques de défaut définies dans les équations (I.1) à (I.4). Par la surveillance de ces fréquences, la composante de défaut (bague interne, bague externe, la cage, la bille) peut être spécifiée. Cependant la surveillance de ces fréquence peut être difficile parce que ces fréquences sont de faibles amplitudes et peuvent être noyées dans le bruit. Pour améliorer la performance de détection de défaut, d'autres techniques sont nécessaires. Des recherches ont été réalisées dans le développement de divers algorithmes de détection de défaut par vibrations de la machine, Ces algorithmes peuvent être classifiés dans le domaine temporel ainsi que dans le domaine fréquentielle. L'approche de l'enveloppe est une méthode qui se base sur la recherche de l'information à travers la modulation d'amplitude de cette fréquence de résonance [28] afin de ramener le signal en basses fréquences. Celle-ci s'est avérée très satisfaisante du point de vue pratique où elle a permis de détecter le défaut ou les fréquences caractéristiques qui se manifestent clairement dans le spectre d'enveloppe mieux que dans le signal FFT conventionnel [29] et qui permis de diagnostiquer aisément le défaut de piste interne [30]. Cette méthode est robuste par rapport au bruit, ceci est dû au filtrage autour de la fréquence de résonance. Afin de surmonter les faiblesses de l'analyse traditionnelle de l'enveloppe dans laquelle une fréquence de résonance est nécessaire, une nouvelle approche a été proposée [31] et présente la combinaison de la décomposition de mode empirique (EMD) et l'approche d'enveloppe. Cette approche peut extraire les fréquences caractéristiques liées au défaut de la bande de fréquence de résonance du signal vibratoire [31]. L'approche basée sur la décomposition du mode empirique d'ensemble (EEMD) [32] a été effectuée pour la détection des défauts localisés des roulements. Les techniques sont validées par des expérimentations sur une machine-outil avec un roulement à billes défailant au niveau des bagues internes et externes. Les résultats expérimentaux montrent que l'approche proposée est efficace et fiable pour la détection des défauts localisés des roulements. Une méthode pour la détection de signatures caractéristiques de défauts de roulements par les données de vibrations a été effectuée

utilisant l'approche de réseau de neurone [33]. Une méthode de diagnostic de défauts de roulements basé sur la détection des impulsions du signal de vibrations causées par les défauts [34]. Ces impulsions excitent les fréquences naturelles du roulement. L'algorithme proposé utilise la décomposition de paquet d'ondelettes (WPD) afin de localiser la sous-bande contenant les fréquences de la résonance du système.



**Figure 15** : Architecture du système de détection de défauts par analyse vibratoire

## I.6. DIAGNOSTIC ET ARCHITECTURE DU SYSTEME DE DETECTION DU DEFAUT DES ROULEMENTS PAR L'ANALYSE DU COURANT

Les vibrations créées par les défauts peuvent se traduire dans le courant statorique par des modulations de fréquences de défaut autour de la fréquence électrique fondamentale [37]. Le défaut de roulement entraîne une excentricité qui varie avec la position du rotor et qui se manifeste par des fréquences supplémentaires dans le spectre du courant statorique. Plusieurs études s'intéressent à l'identification des causes de défauts des roulements afin de pouvoir détecter ces défauts. La décomposition en paquet d'ondelettes a été proposée [38] pour détecter les défauts de roulements sur les signaux de courant statorique. Des résultats expérimentaux ont été effectués afin d'étudier l'efficacité de cette technique ou les réseaux de neurone a été appliqué pour améliorer la précision de la détection [39]. Il est noté que l'utilisation des méthodes avancées de traitement de signal tel que le paquet d'ondelette demande un temps de calcul plus long. Une technique de diagnostic basée sur la transformation de Park pour y remédier à ce problème a été proposée en 2009 [40] ou le module de vecteur de Park a été introduit comme un indicateur de défaut. Des études théoriques et expérimentales permettent d'étudier le contenu spectral du courant statorique d'une machine asynchrone dans le cas sain et en présence de défauts de roulements [41-42]. La présence d'un défaut dans le roulement cause un mouvement radial particulier du rotor ; les variations du couple mécanique en sont la conséquence [15]. Le système de détection s'organise comme suit :

Dans un 1<sup>er</sup> temps, les courants et les tensions statoriques sont enregistrés en utilisant le capteur du courant. Puis, pour obtenir des informations sur l'état de santé de notre moteur, des techniques ont été appliquées ; à savoir celle du courant statorique. Le calcul de la transformée de Fourier rapide ainsi que la visualisation des spectres sont assurés en utilisant le programme implémenté sous l'environnement MATLAB.

Dans ce chapitre pour nous il était question de montrer qu'il existe plusieurs types de roulements dans l'industrie, chaque type de roulements présentant des caractéristiques qui dépendent de sa conception

et qui les rendent plus ou moins adaptés à une application donnée. Ensuite, il y est détaillé les différents défauts qui peuvent affecter les roulements et les fréquences caractéristiques des défauts sur les parties essentielles de ceux-ci. Ensuite on présentera les méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts de roulements dans l'industrie, en se basant sur les méthodes par approche signal, qui nous amènera à nous pencher sur le domaine diagnostic des défauts ou l'on présentera quelques définitions relatives, au diagnostic dans le domaine industriel, suivie par les différentes étapes utilisées dans un diagnostic et on terminera 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 par exemple et plus précisément ceux des roulements.

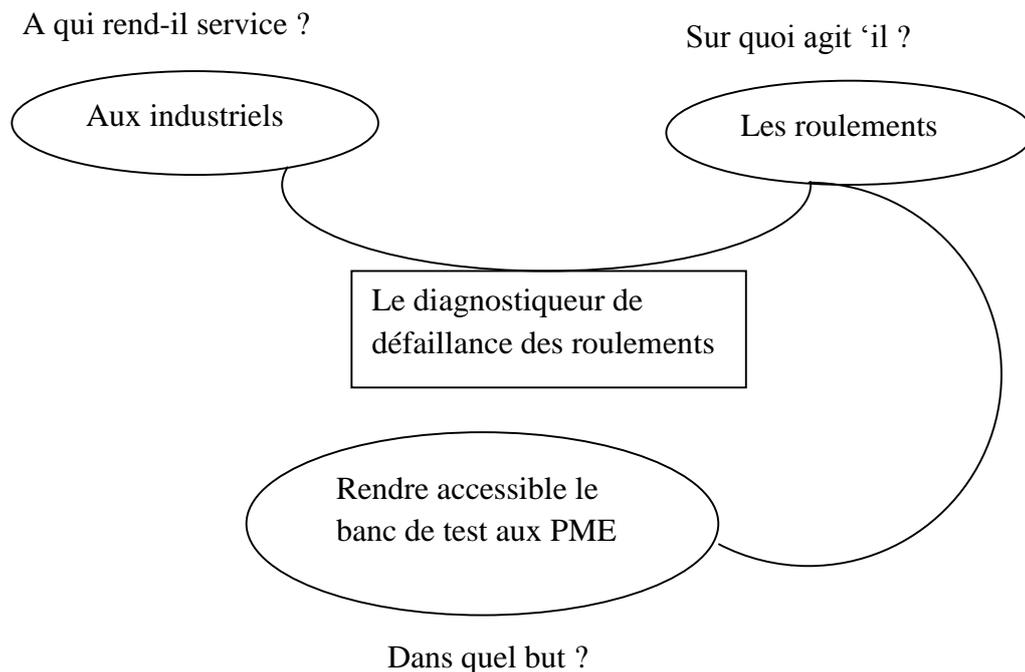
## CHAPITRE II : REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES BANCS D'ESSAIS

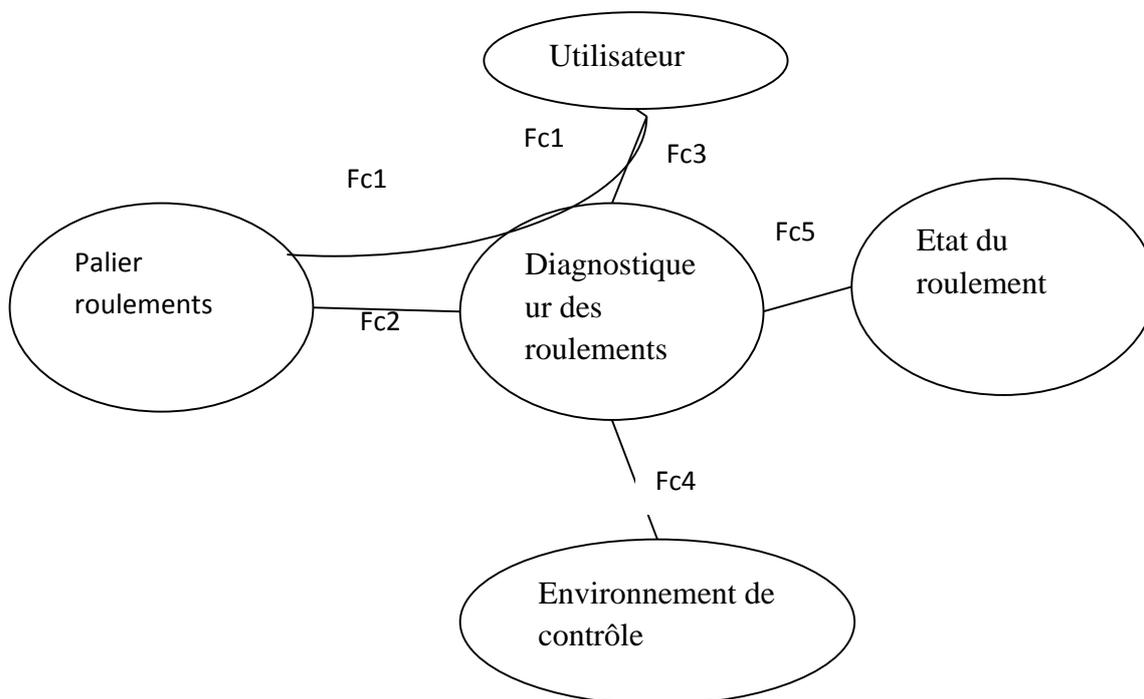
### II.1.INTRODUCTION:

Largement utilisés dans l'industrie les bancs d'essais ou de test, systèmes physiques, m'ont de réelle utilité que la mise en condition d'utilisation d'un bien afin d'observer et de mesurer son comportement. Destinés à vérifier la fonctionnalité d'un produit à l'état de carte électronique mais aussi sous forme définitive, ils représentent une part importante du budget de développement de ce dernier. Outils à caractère prédictif sur les performances du produit, leur importance dans la minimisation des accidents fait l'unanimité dans le secteur industriel.

### II.2.METHODE APTE (DIAGRAMME PIEUVRE)

Cette méthode nous permet d'analyser les besoins et identifier les fonctions de service de notre machine.





**Figure 16 : Illustration de la Méthode Apte ou Diagramme pieuvre**

F1, F2, F3, F4, F5 (fonction complémentaires ou contraintes)

F1 : méthodes de diagnostic

F2 : prise en compte seule des vibrations des roulements

F3 : satisfaire l’envie de l’utilisateur

F4 : êtres adaptable à tous types d’atelier

F5 : dire si oui ou non le roulement est défaillant

**Tableau 3 : critère d’appréciation et les niveaux de fonction complémentaire**

	Fonctions complémentaire	critère	niveau
F1	méthodes de diagnostic	Nombre d’approche	0 à 3
F2	prise en compte seule des vibrations des roulements	Forte adhérence du bâti	2 à 4 calles de serrage
F3	satisfaire l’envie de l’utilisateur	Lecture direct du défaut en langage usuels	/
F4	êtres adaptable à tous types d’atelier	Alimentation local	220V/50Hz
F5	dire si oui ou non le roulement est défaillant	Fiabilité élevée	+ ou – 1%

## II.3. LES DIFFERENTS TYPES DE BANC

### II.3.1. BANC 6205-2Z-C3 (25×52×15)

#### II.3.1.1. Description:

Ce banc d'essai se compose principalement d'une structure portante, elle-même étant une tôle profilée et soudée en acier. Il reproduit la fatigue accélérée ( $\leq 10$  heures) d'un roulement soumis à une forte charge et a une grande vitesse. Il est constitué de deux paliers à roulements, trois capteurs piézoélectriques, d'un vérin hydraulique, des sondes de température et précisément d'un roulement fatigué.

#### II.3.1.2. Fonctionnement :

L'opérateur effectue la mise en marche du moteur qui, tourne à une vitesse de rotation de 10000 pm. Une charge de 100kN est appliquée par le vérin hydraulique sur l'arbre inséré dans les paliers

- **Roulement utilisé** : roulement à une rangée de bille de type **SKF**
- **Défaut détecté** : défaut de fatigue
- **Méthodes d'analyses** : Vibratoire et de température

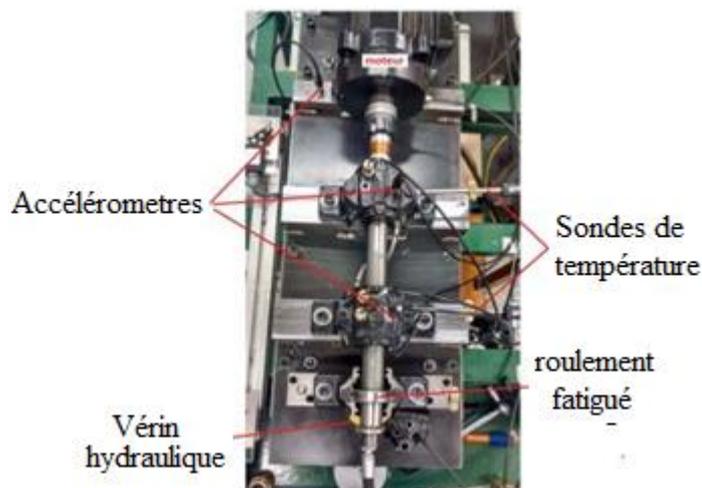


Figure 17 : banc d'essai de fatigue du roulement [3].

### II.3.2. BANC D'ESSAI D'ANALYSE VIBRATOIRE DES ROULEMENTS

#### - Description

Ce dernier (le banc d'essai) fabriqué par les Instituts CARNOT de l'automobile et de la mobilité, est constitué d'une plaque en acier soudée sur un support. Sur cette plaque sont fixés deux paliers à roulements dont un avec une imperfection, un arbre de poids non négligeable en liaison avec un moteur électrique grâce à un accouplement, arbre lui aussi en liaison avec une boîte de vitesses via un système poulie-courroie.

#### - Fonctionnement :

Le moteur électrique branché, l'opérateur met ce dernier en marche tout en sélectionnant la vitesse d'étude. Grâce à des capteurs de vibrations installés sur la plaque en acier ces dernières seront analysées (diagnostic sur la corrélation spectrale) puis via une carte d'acquisition de données elles seront traitées (les vibrations) et transformées en signaux (courbes) qui s'afficheront sur un écran.

- **Roulement utilisé :** roulement rigide à une rangée de bille
- **Défaut détecté :** fissure sur la bague extérieure
- **Méthode d'analyse :** analyse vibration

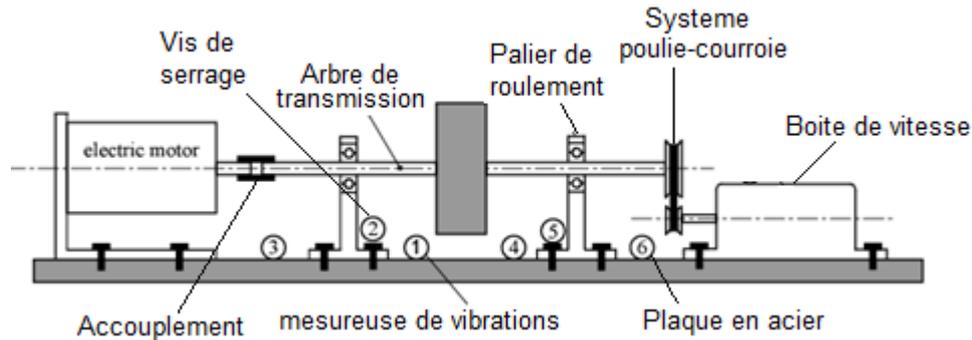


Figure 18 : banc d'essai d'analyse vibratoire des roulements [16]

### II.3.3. BANC D'ESSAI PT 500

- **Description:**

L'appareil de base PT 500 système de diagnostic de machines est une plaque de fixation en aluminium avec rainures en T. Les différents montages expérimentaux peuvent être facilement assemblés sur cette plaque de fixation. Le banc d'essai est composé d'un moteur triphasé avec encodeur, il est monté sur la 2<sup>ème</sup> extrémité de l'arbre, monté sur une plaque de base dispositif d'alignement qui permet d'aligner horizontalement l'axe du moteur. La commande du moteur s'effectue à l'aide de l'appareil de commande qui renferme un convertisseur de fréquence destiné à régler progressivement la vitesse de rotation. L'appareil de commande contient l'indicateur de vitesse de rotation et un indicateur pour la puissance pour la puissance absorbée par le moteur. Afin de pouvoir simuler des vibrations avec l'appareil de base et de réaliser des essais, les pièces suivantes figurent dans les éléments du banc d'essai:

- **1 accouplement élastique à griffes et à bras ;**
- **1 arbre long et 1 court ;**
- **2 supports palier coupés avec palier ;**
- **2 disques de masse avec kit de serrage ;**
- **Des petites pièces sous formes de pièces masses pour l'équilibrage ;**
- **Le logiciel d'acquisition de données MATLAB.**

- **Roulement utilisé :** roulement à billes de type UC204

- **Défaut détecté** : défaut d'alignement et d'équilibrage
- **Méthode d'analyse** : Analyse des courants de Foucault.



**Figure 19 : banc d'essai PT 500. [5]**

### **II.3.4. BANC D'ESSAI DE L'UNIVERSITE DE GUELMA AU MAROC**

Description :

Le banc d'essai utilisé dans cette étude se compose :

- ✓ d'un moteur électrique triphasé(1) ;
- ✓ Un système de transmission de puissance à axes parallèles, les roues sont à denture droite (2) ;
- ✓ Un frein permettant d'appliquer une charge sur les engrenages, il est commandé par une génératrice permettant la diminution de la fréquence de rotation (3) ;
- ✓ Une commande de variation de la charge du frein(4) ;
- ✓ Six paliers à roulements à billes (5) de type UC204, permettant le guidage en rotation des arbres du système;
- ✓ La transmission du couple de rotation est assurée par l'intermédiaire d'un accouplement élastique;
- ✓ Accéléromètre piézo-électrique (6).

Fonctionnement : il est quasi identique à celui du banc d'essai d'utilisation d'analyse vibratoire

Roulement utilisé : roulement à billes de type UC204

Défaut détecté : usure de la bague extérieure

Méthode d'analyse : analyse vibratoire.



Figure 20 : banc d'essai [17].

### II.3.5. BANC D'ESSAI SIMULATEUR DES DEFAUTS DES MACHINES(MFS) :

#### - Description :

Le simulateur de défaut de machines équipé du logiciel **VibraQuest** est un outil innovateur pour étudier des signatures des défauts de mécanismes communs. Le système reflète une conception modulaire qui fournit la simplicité opérationnelle et la robustesse. Chaque composant du simulateur est usiné aux tolérances élevées ainsi il peut être actionné sans n'importe quelle vibration contradictoire significative. Puis, selon la situation il peut analyser divers défauts individuellement ou conjointement dans un environnement totalement commandé. Sa composition est la suivante:

- Un variateur de vitesse avec le commutateur marche/arrêt et la commande de vitesse (1) ;
- Un moteur (2) ;
- Accouplement (3) ;
- Axe (4) ;
- Logement des roulements horizontal avec le chapeau démontable (5) ;
- Disque de rotor avec les trous taraudés (6) ;
- Le collier pour fermer le rotor à clef d'axe (7) ;
- Vis(8) ;
- Roulement (9) ;
- Petite poulie double (10) ;
- Grande poulie et double courroie (11) ;
- Rouleau d'attente de ceinture (12) ;
- Pieds en caoutchouc d'isolement (13) ;

- **Fonctionnement et défauts détectés** : Le simulateur des défauts de machine peut être utilisé pour les applications mécaniques suivantes: alignement, déséquilibre, mesure de phase, rotor excentrique, déviation d'alignement de poulie, roulement censuré, résonance

- **Méthode d'analyse** : analyse vibratoire.



Figure 21 : photo du simulateur de défaut des machines. Ordinateur équipé du logiciel VibraQuest

Au regard des différents bancs sur lesquels nous avons basé notre étude ; il serait judicieux de s'intéresser aux conséquences résultants d'un ou des différents défauts rencontrés dans un palier à roulement (désalignement, bonne rotation de l'arbre de transmission monté dans les paliers d'étude...) pour Pouvoir réaliser un banc pouvant satisfaire les PME concernant sa faible acquisition, tout en effectuant la tâche qui lui sera allouée.

## II.4. CHOIX DE LA SOLUTION

Sur une échelle d'appréciation de 1 à 3 on n'a :

- 1- Faible
- 2- Moyen
- 3- élevée

Types de banc d'essai	caractéristiques				
	encombr ement	défauts	Méthodes d'analyse	Marge d'erreur	cout
De fatigue des roulements	2	USURE	2	1	3
D'analyse vibratoire	3	FISSURE	2	3	3
PT500	2	ALIGNEME NT	2	2	2
De l'université de GUELMA	3	USURE	3	1	3
MFS	2	ALIGNEME NT, DESEQUILI BRE(...)	3	1	3
American bearing	3	USURE CAGE	1	3	3

Ainsi au regard des critères d'appréciation énumérés ci-dessus, le choix de la méthode de détection adéquate pour notre banc d'essai n'est autre que **l'analyse vibratoire par approche signal**.

En effet, les méthodes telles par ultrason, pression sonore... nécessitent non seulement d'énormes fonds pour leur application, mais en termes de fiabilité des résultats leur réputation dans le sens appréciatif ne fait pas l'unanimité.

## CHAPITRE III : ANALYSE CONCEPTUELLE ET DE FABRICATION

### III.1. DIAGRAMMES A BOITE POUR ANALYSE DESCENDANTE

Ces diagrammes décrivent et décortiquent le produit d'un point de vue fonctionnel, en détaillant l'aspect hiérarchique et en classant par niveaux d'importance l'ensemble des fonctions.

**Niveau 1** : Fp du diagnostiqueur de défaillance du roulement : dire si le roulement est en bonne état ou non

**Niveau 2:**

- Moteur : production de l'énergie mécanique ;
- Palier : support des roulements dont l'un est étudié ;
- Système poulie-courroie : transmission par adhérence, à l'aide d'un lien flexible (courroie), un mouvement de rotation continu entre deux arbre éloignés ;
- Capteur piézoélectrique : Convertir une vibration en un signal électrique grâce à la piézoélectricité ;
- Carte de type UNO : microcontrôleur enregistrant les vibrations envoyées par le capteur.

**Niveau 3:**

- Ecran d'ordinateur effectuant le traitement des données reçues et interprétation des résultats

### III.2. CONTRAINTES TECHNIQUES

#### III.2.1. Contrainte de résistance

Notre machine devra être fiable, bonne qualité et effectivement dire si un roulement est défaillant ou non.

#### III.2.2. Contrainte d'encombrement

Cette machine sera facilement transportable d'un atelier de production à un autre. Le volume occupé devra être très réduit :  $\leq 1 \times 1 \times 1$  en mètre bien évidemment.

#### III.2.3. Contraintes fonctionnelle et sécurité

Tout en respectant la réglementation en vigueur en milieu industriel, sa réalisation prendra en compte la sécurité des opérateurs et fonctionnera en toutes saisons et en tout temps.

### III.2.3. Contraintes de réalisation

Il sera question pour nous de réaliser un banc de test fonctionnel dans un atelier de mécanique de fabrication classique.

### III.2.4. Contrainte économique

Le prix de vente de ce banc devra être le moins onéreux possible, afin de faciliter son acquisition aux industries et particuliers (PME) ( $\geq 2.000.000$ )

## III.3. PLANIFICATION DU PROJET

Nous avons :

- **Tache A de planification** (2jours)
- **Taches de conception :**
  - ✚ Elaboration du cahier de charge (8jours) tache B
  - ✚ Etude statique de la machine (16jours) tache C
  - ✚ Etude dimensionnelle (8jours) tache D
  - ✚ Elaboration du dessin d'ensemble (12jours) tache E
  - ✚ Elaboration de l'analyse de fabrication d'une pièce de la machine (8jours) tache F
  - ✚ Elaboration de la FAO d'une des pièces de la machine (4jours) tache G
  - ✚ Elaboration du programme de détection de défaillance (20jours) tache H
  - ✚ Elaboration du plan de montage de la machine (4jours) tache I
  - ✚ Elaboration d'un plan de maintenance de la machine (8jours) tache J
- **Taches de réalisation :**
  - ✚ Fabrication du bâti (2jour) tache K
  - ✚ Fabrication de l'arbre principal (2jour) tache L
  - ✚ Fabrication du support moteur (2jour) tache M
  - ✚ Assemblage (4jours) tache N
  - ✚ Test de la machine (2jours) tache O
  - ✚ Ajustage final (2jours) tache P
- **Taches de finition :**
  - ✚ Leçons tirées pour la réalisation de projets futurs (2jours) tache Q
  - ✚ Evaluation des couts et devis (2jours) tache R
  - ✚ Elaboration des activités relatives au projet (2jour) tache S

Tableau 4 : tableau récapitulatif des taches

TACHES	ANTECEDENT	DUREE
A	/	2
B	/	8
C	A, B	16
D	A, C	8
E	C, D	12
F	D	8
G	D, F	4
H	A, D, G	20
I	B, C, H	4
J	I	8
K	J	2
L	G, K	2
M	A, H, L	2
N	M	4
O	N	2
P	O	2
Q	M, N	2
R	M, N	2
S	R	2

Détermination de la durée totale du projet et sa date de fin au plus tard avec la méthode de GANTT, en considérant que cette date de fin au plus tard du projet est le 1<sup>er</sup> juillet.

Tableau 5 : GRAPHE DE GANNTT

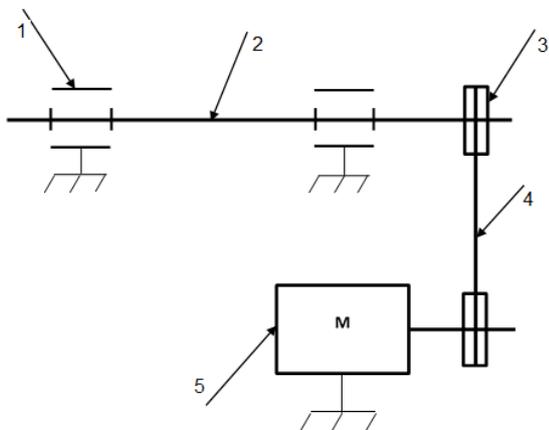
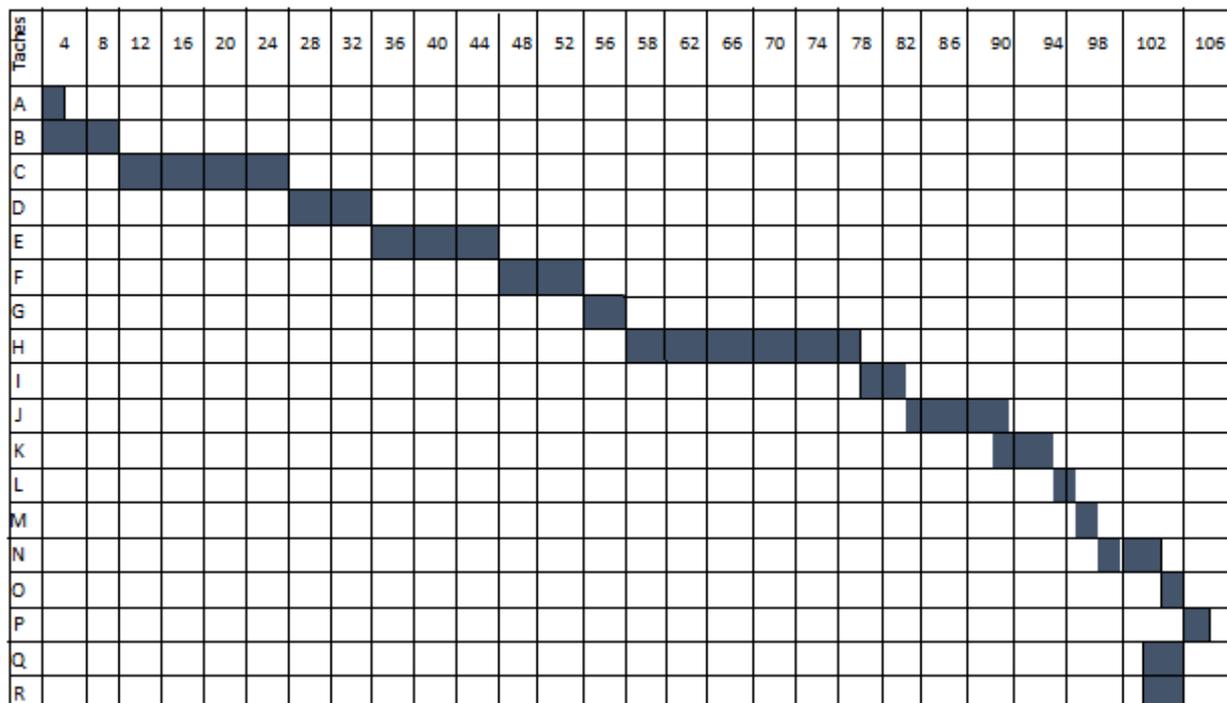


Figure 22 Schéma cinématique de la machine

**Tableau 6 : annotation schéma cinématique**

1	02	Palier de roulement
2	01	Arbre principal
3	02	Poulie
4	01	Courroie plate
5	01	Moteur

### III.4. PRINCIPE DE LA DETECTION DU DEFAUT SUR LE ROULEMENT

La méthode consiste à étudier les vibrations électriques émises par l'arbre de transmission caractérisant sa fréquence de base pour des paliers de roulements à une rangée bille **SFK**. Parfaitement équilibrés, puis effectuer une comparaison avec un roulement défectueux monté dans l'un des paliers. Pour ce faire, notre banc d'essai simulera la prédisposition d'une machine tournante sur lequel les paliers à roulement sont incorporés et sur l'un d'entre eux sera fixé un capteur piézoélectrique ou accéléromètre qui captera ces vibrations, enverra l'information qui sera traitée via une carte de traitement de données de type **UNO (microcontrôleur)** et ensuite transféré vers un ordinateur pour interprétation via le logiciel d'acquisition et de traitement de données.

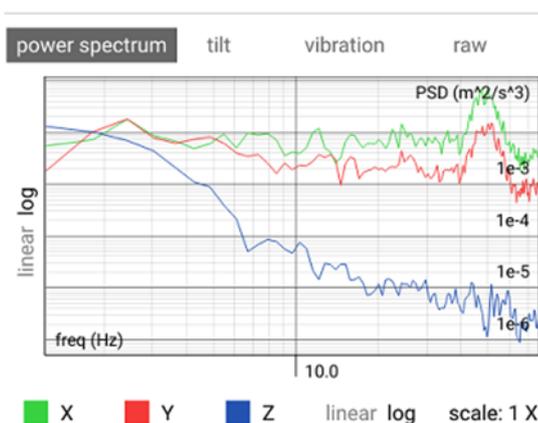
**Figure 23 : photos des outils d'obtention et d'interprétation des données**

### III.5. EXPERIENCE VIBRATOIRE AVEC CAPTEUR PLACE TOUT A COTE D'UN DES PALIERS A ROULEMENT DEFECTUEUX

Nous avons effectués dans un 1<sup>er</sup> temps pour posséder quelques données expérimentales ou comme échantillons, un test en atelier sur l'acquisition des vibrations de l'axe montée dans 2 paliers de roulement à une rangée de bille de type **SKF 6400** parfaitement sains (les roulements) via le logiciel **Vibsensor**. Les dimensions des roulements test utilisés sont classées dans le tableau suivant :

**Tableau 7 : Dimensions du roulement**

Dimensions du roulement	D	D	L	N <sub>b</sub>	d <sub>p</sub>	d <sub>b</sub>	A
SNK 6400	52	22	15	9	38,5	7,9	0°



**Figure 24 : fichier MATLAB des résultats émis**

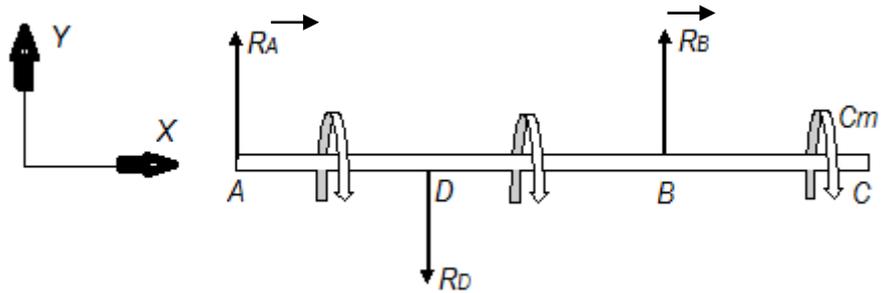
#### III.5.1. Interprétation :

En fonction de la vitesse de rotation du moteur, on entrevoit un pic brut à partir d'une fréquence  $\geq 15\text{Hz}$  dans les trois axes (X, Y, Z). Pour un débit de données de 155.2Hz l'image nous renvoie le spectre de puissance des vibrations dans les différents axes. Devant un concentré de données nous décidâmes de prendre ces résultats visuels comme référence pour notre diagnostic.

### III.6. DIMENSIONNEMENT DE L'ARBRE DE TRANSMISSION



Figure 25 : arbre de transmission isolé.



Zone AD:  $0 \leq G < 1.1m$  on a:

$$\begin{cases} N_G + R_{AX} = 0 \\ T_{yG} + R_{AY} = 0 \\ T_{zG} + R_{AZ} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} M_{tG} + 0 = 0 \\ M_{fyG} - R_{AZ} x = 0 \\ M_{fzG} - R_{AY} x = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} N = 0 \\ T_{yG} = -4019, 2 \\ T_{zG} = 1607, 69 \end{cases} \quad \begin{cases} M_t = 0 \\ M_{fyG} = R_{AZ} x \\ M_{fzG} = -R_{AY} x \end{cases}$$

Zone DB:

$$\begin{cases} N_G + R_{AX} + R_{Dx} = 0 \\ T_{yG} + R_{AY} + R_{Dy} = 0 \\ T_{zG} + R_{AZ} + R_{Dz} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} M_{tG} + 0 + R_{Dz} \times R_m = 0 \\ M_{fyG} - R_{AZ} x + R_{Dz}(x-1.1) = 0 \\ M_{fzG} + R_{AY} \times x - R_{Dy}(x-1.1) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} N_G = 0 \\ T_{yG} = 4019, 2 \text{ N} \\ T_{zG} = 1607, 69 \text{ N} \end{cases} \quad \begin{cases} M_{tG} = 511 \text{ N.m} \\ M_{fyG} = 1768, 459 \text{ N.m} \\ M_{fzG} = 4421, 12 \text{ N.m} \end{cases}$$

Le moment recherché est donc :  $M_f = \sqrt{M_{fy}^2 + M_{fz}^2}$ ;

AN :  $M_f = \sqrt{(4421.12)^2 + (1768.459)^2}$  D'où  $M_f = 4761.7 \text{ N}$

Pour des raisons de grande résistance mécanique et de bonne usinabilité, nous porterons notre choix sur le matériau de désignation spécifique : **25CrMo4** de résistance  $R_e = 7000 \text{ N/mm}^2$ .

Adoptons un coefficient de sécurité égale à : **S = 3**

La résistance pratique au glissement est donnée par la formule :

$$R_{pg} = RE/2S$$

D'où  $R_{pg} = 175 \text{ N.mm}^{-2}$

- **Détermination du diamètre de l'arbre(D) :**

$$D = \left( \frac{16}{\pi R_{pg}} \sqrt{Mt^2 + Mfi^2} \right)^{1/3}$$

D'où  $D \geq 30\text{mm}$

- **Détermination du diamètre de la vis de fixation du moteur**

Sur le bâti de la machine le moteur possède une vitesse de rotation  $N = 1500\text{tr/min}$ . Un arbre dont le poids est de  $Pa = 50\text{N}$ , un jeu de rotation de l'arbre par rapport au corps de la machine  $e = 0.03 \text{ mm}$ , la détermination de la force résultante  $R$  est la suivante :

$$R = \frac{Pa \cdot E \cdot Rpg}{g}$$

$R = (50 \cdot 0,03 \cdot 175) / 10$

**$R = 3697,35\text{N}$**

- 1<sup>er</sup> cas

On a  $Rpg \geq R1/\pi R^2$

On aura  $R = \sqrt{R1 / \pi} \times Rpg$

L'acier choisi pour la vis est le XC18 avec une résistance élastique égale à :

$RE = 400\text{N/mm}^2$  et avec un coefficient de sécurité  $S=3$ .

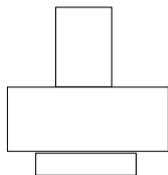
$Rpg = \frac{RE}{2S}$

AN:  $R = \sqrt{3697,35 / 3.14 \times 66.6}$  **D'où  $R \geq 4.2\text{mm}$**

- 2<sup>eme</sup> cas :

Supposons que le trou de passage de la vis ne soit pas précis, ce qui une certaines flexion sur la vis. L'épaisseur du pied de moteur est  $L = 50\text{mm}$ .

On aura alors :



**$MF_{max} = R \times L$**

Détermination des dimensions de la clavette

Soit F la force de cisaillement appliquée à la clavette. On a:  $F = \frac{cm}{r}$ . AN:  $F = 511.24 \div 0.0253 = 20207, 11N$

Le matériau choisi pour la réalisation de la clavette est de désignation 16CrNi6 avec  $RE = 650N/mm^2$

Pour le coefficient de sécurité on aura,  $R_{pg} \geq F/S$  donc,  $S = F/R_{pg}$ . AN:  $S \geq 187mm^2$

➤ Si notre choix est poussé sur l'utilisation d'une clavette rectangulaire, avec des cotes a et b on prendra  $a \geq 18mm$  et  $b \geq 11mm$

➤ Si elle est de section carrée on aura :  $C = \sqrt{187}$

**D'où  $C \geq 13,6mm$**

• **Détermination du nombre de courroies**

➤ Pour une puissance motrice supposons de 28kw, une vitesse de rotation du moteur de 1800tr/min et travaillant de 16 à 24h par jour, on aura comme coefficient de sécurité  $k_s = 1,4$  et la puissance de service est de  **$P_s = k_s \times p$**  AN:  $P_s = 1,4 \times 28,04$  donc  **$P_s = 39,256kw$**

➤ Au vue de cette puissance de service le type de courroie à utiliser est de type **B**. le diamètre de la petite poulie est imposé à 200mm.

$$\frac{dp}{Dp} = \frac{400}{1500}$$

$$Dp = \frac{1500.200}{400}$$

**$Dp = 750mm$**

➤ Calcul de l'entraxe

$Dp/dp > 3$  ;  $a \geq 750mm$  et la limite supérieur est strictement inférieur à :  **$a < 3 (Dp+dp)$**

D'où  **$a < 2820mm$**

On sait que

$$L_p = 2a + 1,57 (Dp+dp) + (Dp-dp)^2 / 4a$$

On aura :  $L_p = 3567,125mm$ . Donc le type de courroie B qu'on va choisir aura pour valeur de  $L_p = 3593mm$

➤ Calcul de la vitesse linéaire de la courroie

Cette dernière est illustrée via la formule suivante :

$$V = \frac{\pi N d}{60}$$

D'où  **$V = 15,7 m/s$**

La puissance de base est de  $P_b = 6,42kw$ , ceci en fonction de la vitesse linéaire.

Sachant que :  $P_a = P_b \times k_L \times k_\theta$  avec ;  $k_L = 1.1$  pour  $L = 3593mm$ ,

Déterminons  $\Theta$

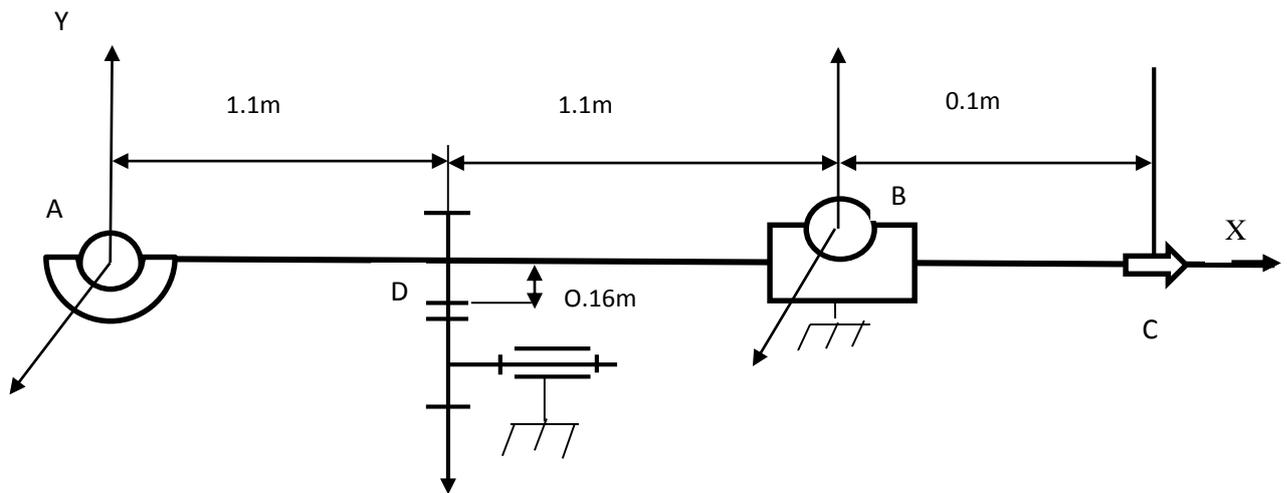
$\Theta = 180^\circ - 2\sin^{-1}(D_p - d_p / 2a)$ . Prenons:  $a = 1000\text{mm}$  on aura  $\Theta = 144.5^\circ$  et  $k\Theta = 0.9$  qui est déterminé en fonction de  $L = 3593\text{mm}$ .

AN :  $P_a = 6.42 \times 1.1 \times 0.9 = 6.3556\text{kw}$

Le nombre de courroie est :  $N_c = 29 / 6.3556$

D'où  $N_c = 5$  courroies

**III-4.6) Etude statique de l'arbre moteur :**



**Détermination des torseurs à chaque point**

$$\left\{ \begin{matrix} X_A & 0 \\ Y_A & 0 \\ Z_A & 0 \end{matrix} \right\}_{T_{A1/0}} \quad \left\{ \begin{matrix} 0 & 0 \\ Y_B & 0 \\ Z_B & 0 \end{matrix} \right\}_{T_{B1/0}} \quad \left\{ \begin{matrix} 0 & CM \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} \right\}_{T_{C\text{moteur}/0}} \quad \left\{ \begin{matrix} 0 & 0 \\ Y_D & 0 \\ Z_D & 0 \end{matrix} \right\}_{T_{D1/0}}$$

On aura:  $Y_D = -8038.4$   $Z_D = -32150.38$  et  $cm = 511\text{N.m}^{-1}$

Appliquons le PFD (Principe Fondamentale de la Dynamique) pour déterminer les inconnues restantes ;

Réduction des torseurs de toutes les forces au point A. On a :

$$\begin{aligned} \vec{-R}_A + \vec{R}_B + \vec{R}_D &= \vec{0} \quad (1) \\ \vec{AD} \wedge \vec{R}_D + \vec{AB} \wedge \vec{R}_B + \vec{Cm} &= \vec{0} \quad (2) \end{aligned}$$

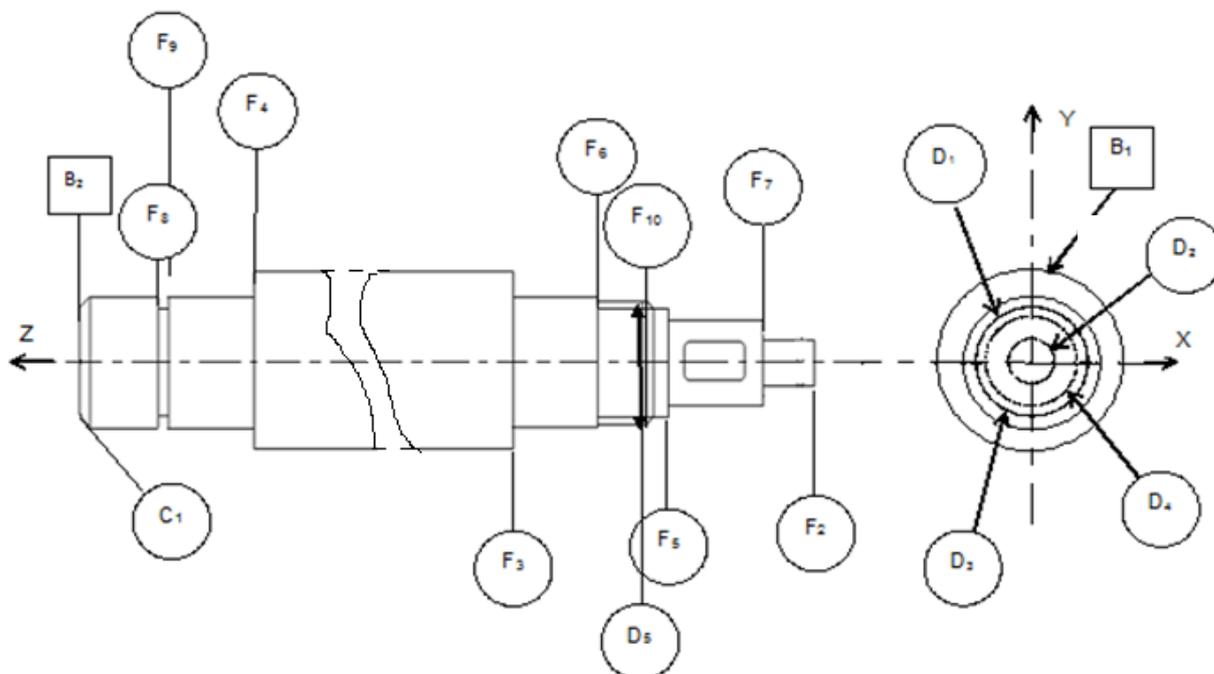
$$\vec{AD} \begin{pmatrix} 1.1 \\ -0.16 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{AB} \begin{pmatrix} 2.2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1.1 \\ -0.16 \\ 0 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ -8038.4 \\ -3215.38 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2.2 & 0 \\ 0 & R_{By} \\ 0 & R_{Bz} \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} Cm \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Après calculs on aura : **Cm= -511N.m<sup>-1</sup> R<sub>By</sub>= 4019.2N et R<sub>Bz</sub>=1607.69**

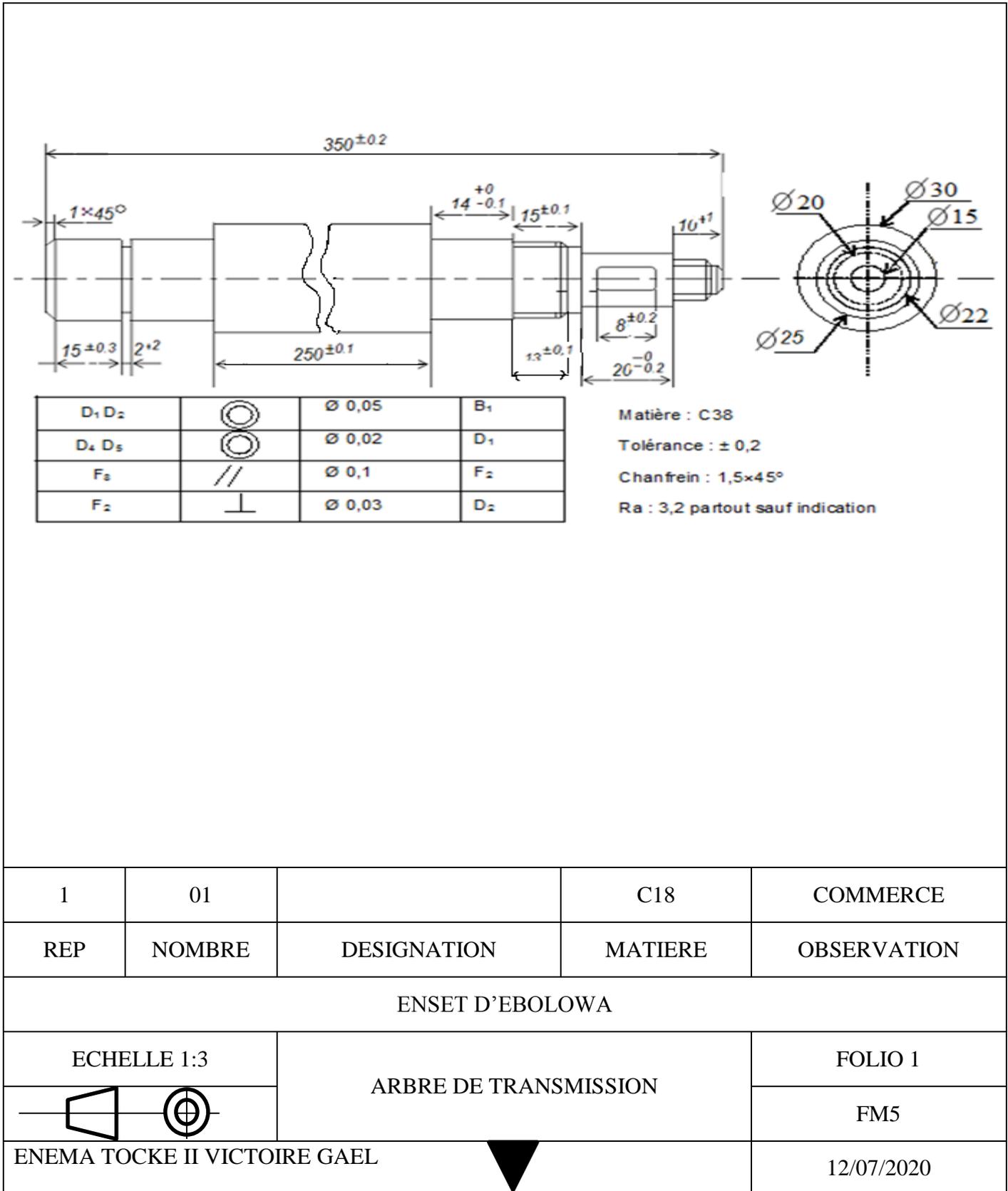
## **III.7.DESSIN D'ENSEMBLE**

## DESSIN DEFABRICATION



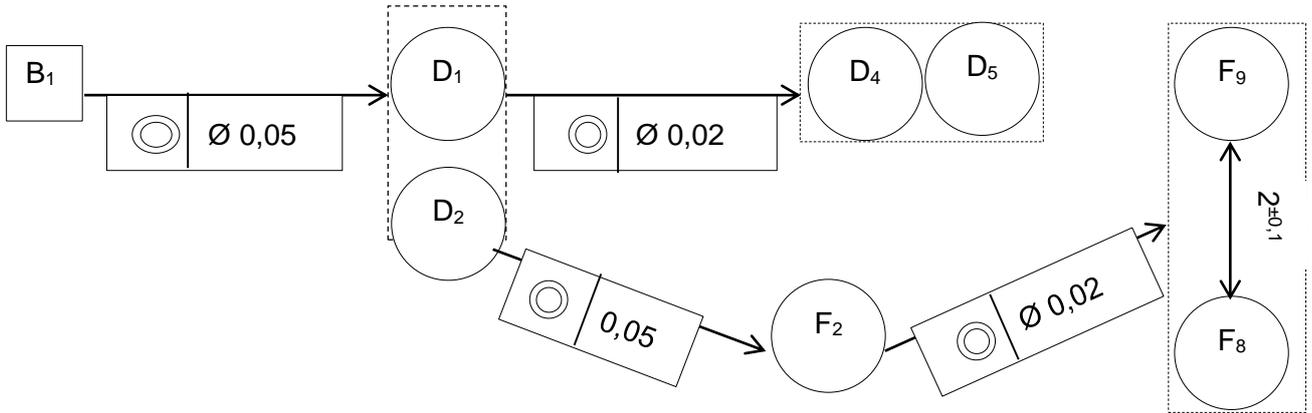
1	01		C18	COMMERCE
REP	NOMBRE	DESIGNATION	MATIERE	OBSERVATION
ENSET D'EBOWA				
ECHELLE 1:3		ARBRE DE TRANSMISSION		FOLIO 1
				FM5
ENEMA TOCKE II VICTOIRE GAEL				12/07/2020

## DESSIN DE DEFINITION

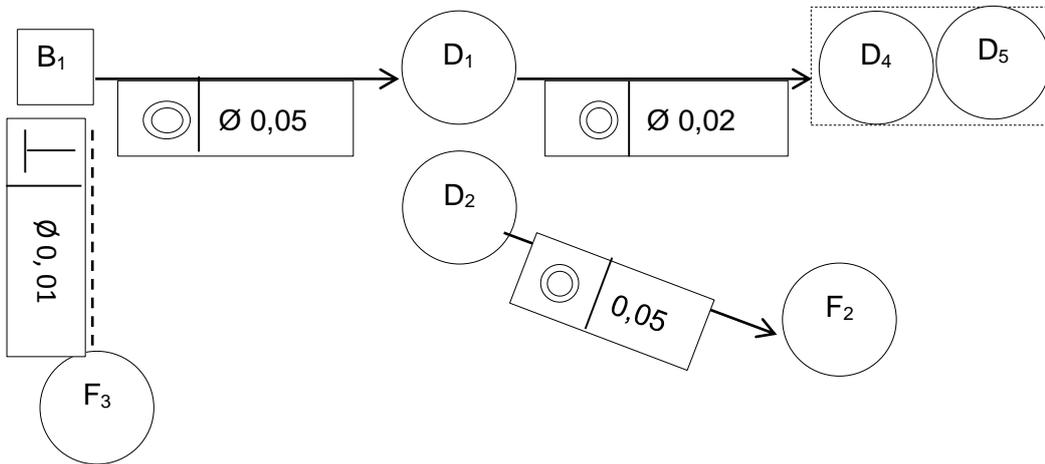


GRAPHE DE LIAISONS DES COTES FONCTIONNELLES

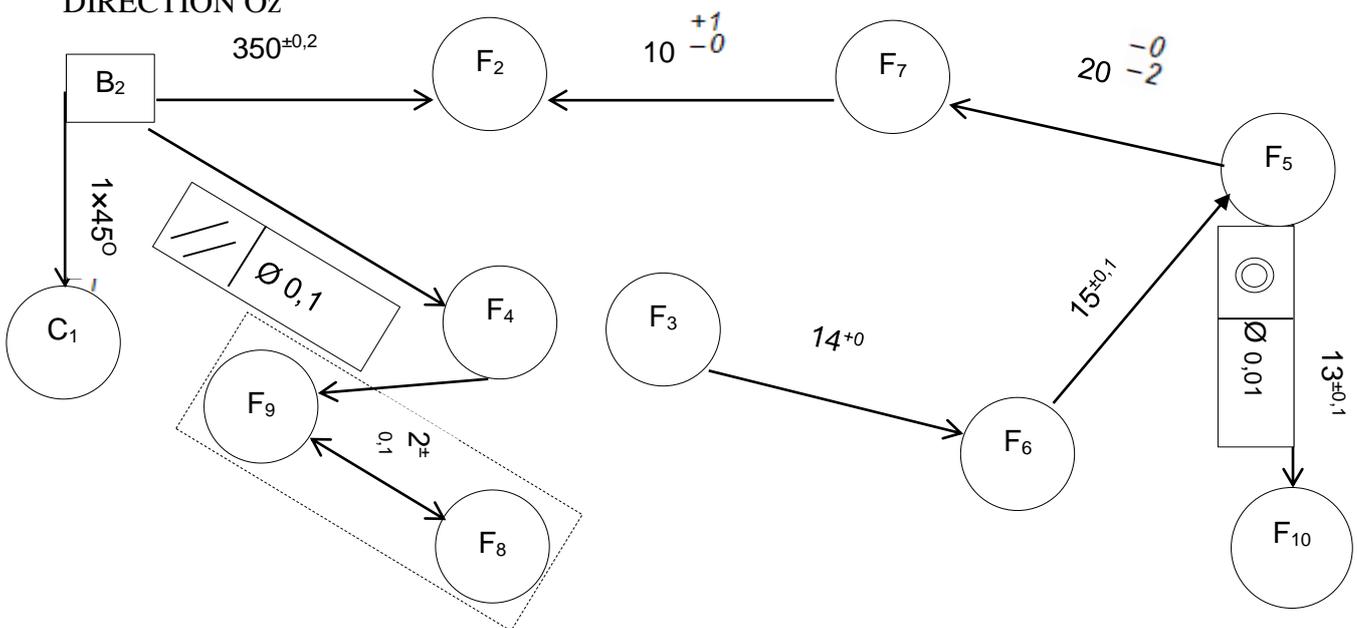
DIRECTION OX:



DIRECTION OY



DIRECTION Oz



DETERMINATION DES OPERATIONS ELEMENTAIRES ET ASSOCIATION DES SURFACES

REPERE DES SURFACES ELEMENTAIRES	EXIGENCES FONCTIONNELLES			EXIGENCES TECHNOLOGIQUES	TYPES D'OPERATIONS	NATURE DES OPERATIONS (Symboles)	ASSOCIATION DES SURFACES		
	I.T	Ra	Particuliers				Nouvelles désignations	Surfaces élémentaires associées	Justifications (Nature des outils, Outillage, etc...)
<b>C<sub>1</sub></b>		1.6	–	I.T + Ra	Chanfreinage	C <sub>1</sub> F	<b>G<sub>1</sub></b>	D <sub>1</sub> F, F <sub>3</sub> F, F <sub>4</sub> F	Train de 2 outils couteau
<b>D<sub>1</sub></b>	0.05	1.6	–	I.T + Ra	Chariotage	D <sub>1</sub> E, D <sub>1</sub> F	<b>G<sub>2</sub></b>	D <sub>3</sub> F, F <sub>7</sub> F, F <sub>2</sub> F	Train de 2 outils couteau
<b>D<sub>2</sub></b>	0.05	1.6	–	I.T + Ra	Chariotage	D <sub>2</sub> E, D <sub>2</sub> F	<b>G<sub>3</sub></b>	D <sub>4</sub> F, F <sub>5</sub> F	Outil couteau
<b>D<sub>3</sub></b>	0.2	1.6	–	Faible copeau	Chariotage	D <sub>3</sub> F	<b>G<sub>4</sub></b>	D <sub>2</sub> F, F <sub>6</sub> F	Outil couteau
<b>D<sub>4</sub></b>	0.02	1.6	–	I.T + Ra	Chariotage	D <sub>4</sub> E, D <sub>4</sub> F	<b>G<sub>5</sub></b>	F <sub>11</sub> , F <sub>12</sub> , F <sub>13</sub> F	Fraise à rainurer
<b>D<sub>5</sub></b>	0.02	1.6	–	I.T + Ra	Filetage	D <sub>5</sub> F	<b>G<sub>6</sub></b>	F <sub>8</sub> F, F <sub>9</sub> F	Outil à tronçonner

ETUDE ET REALISATION D'UN BANC D'ESSAI POUR LE DIACNOSTIQUE DES ROULEMENTS

<b>F<sub>2</sub></b>	0.4	6.3	–	I.T + Ra	Dressage	F <sub>2</sub> F			
<b>F<sub>3</sub></b>	0.2	6.3	–	I.T + Ra	Chariotage	F <sub>3</sub> F			
<b>F<sub>4</sub></b>	0.1	6.3	–	I.T + Ra	Chariotage	F <sub>4</sub> F			
<b>F<sub>5</sub></b>	0.2	6.3	–	I.T + Ra	Chariotage	F <sub>5</sub> F			
<b>F<sub>6</sub></b>	0.6	6.3	–	I.T + Ra	Chariotage	F <sub>6</sub> F			
<b>F<sub>7</sub></b>	1	6.3	–	I.T + Ra	Chariotage	F <sub>7</sub> F			
<b>F<sub>8</sub></b>	0.2	6.3	–	I.T + Ra	Tronçonnage	F <sub>8</sub> F			
<b>F<sub>9</sub></b>	0.2	6.3	–	I.T + Ra	Tronçonnage	F <sub>9</sub> F			
<b>F<sub>10</sub></b>	0.01	6.3	–	I.T + Ra	Dressage	F <sub>10</sub> F			
<b>F<sub>11</sub></b>		1.6	H9	Particularité	Rainurage	F <sub>11</sub> F			

<b>F12</b>		1.6	H9	Particularité	Rainurage	F12F			
<b>F13</b>		1.6	H9	Particularité	Rainurage	F13F			

**ANALYSE DES CONTRAINTES D'ANTERIORITE**

	<b>CONTRAINTES</b>
--	--------------------

<i>Surfaces élémentaires</i>	<i>DIMENSIONNELLES</i>	<b>GEOMETRIQUES</b>						<b>TECHNOLOGIQUES</b>			<b>ECONOMIQUES</b>		
								<b>Autres</b>	Reprises	Opérations	Bavures	Moindre usage	Outil de finition
<b>G<sub>1</sub>F</b>	B <sub>1</sub> , B <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>											
<b>G<sub>2</sub>F</b>	B <sub>2</sub> , F <sub>7</sub> F		G <sub>4</sub> F	G <sub>4</sub> F					G <sub>3</sub> F	G <sub>4</sub> F			
<b>G<sub>3</sub>F</b>	F <sub>6</sub> F, F <sub>3</sub> F		B <sub>1</sub>	G <sub>1</sub> F					G <sub>1</sub> F				
<b>G<sub>4</sub>F</b>	F <sub>3</sub> F,			B <sub>1</sub>						G <sub>1</sub> F			
<b>G<sub>5</sub>F</b>									G <sub>3</sub> F				
<b>G<sub>6</sub>F</b>	F <sub>4</sub> F			G <sub>2</sub> F					G <sub>1</sub> F				
<b>D<sub>1</sub>E</b>				B <sub>1</sub>									
<b>D<sub>2</sub>E</b>									G <sub>1</sub> F	D <sub>1</sub> E			
<b>D<sub>5</sub>F</b>				G <sub>1</sub> F					G <sub>4</sub> F	G <sub>1</sub> F			
<b>F<sub>10</sub>F</b>				G <sub>3</sub> F					D <sub>5</sub> F	G <sub>4</sub> F			

TABLEAU DES NIVEAUX

NIVEAUX														TOTAL																
	B	G <sub>1</sub> F	G <sub>2</sub> F	G <sub>3</sub> F	G <sub>4</sub> F	G <sub>5</sub> F	G <sub>6</sub> F	D <sub>1</sub> E	D <sub>2</sub> E	D <sub>5</sub> F	F <sub>10</sub> F	C <sub>1</sub> F				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
B														0																
G <sub>1</sub> F	1													1	0															
G <sub>2</sub> F				1	1									2	2	2	1	0												
G <sub>3</sub> F	1	1			1									3	2	1	0													
G <sub>4</sub> F	1	1												2	1	0														
G <sub>5</sub> F				1										1	1	1	1	0												
G <sub>6</sub> F		1	1											2	1	1	1	1	0											
D <sub>1</sub> E	1													1	0															
D <sub>2</sub> E		1												2	1	0														
D <sub>5</sub> F		1			1									2	1	0														
F <sub>10</sub> F				1	1									2	2	2	1	0												
C <sub>1</sub> F		1	1											2	2	1	1		0											

**TABLEAU DE GROUPEMENT EN PHASE**

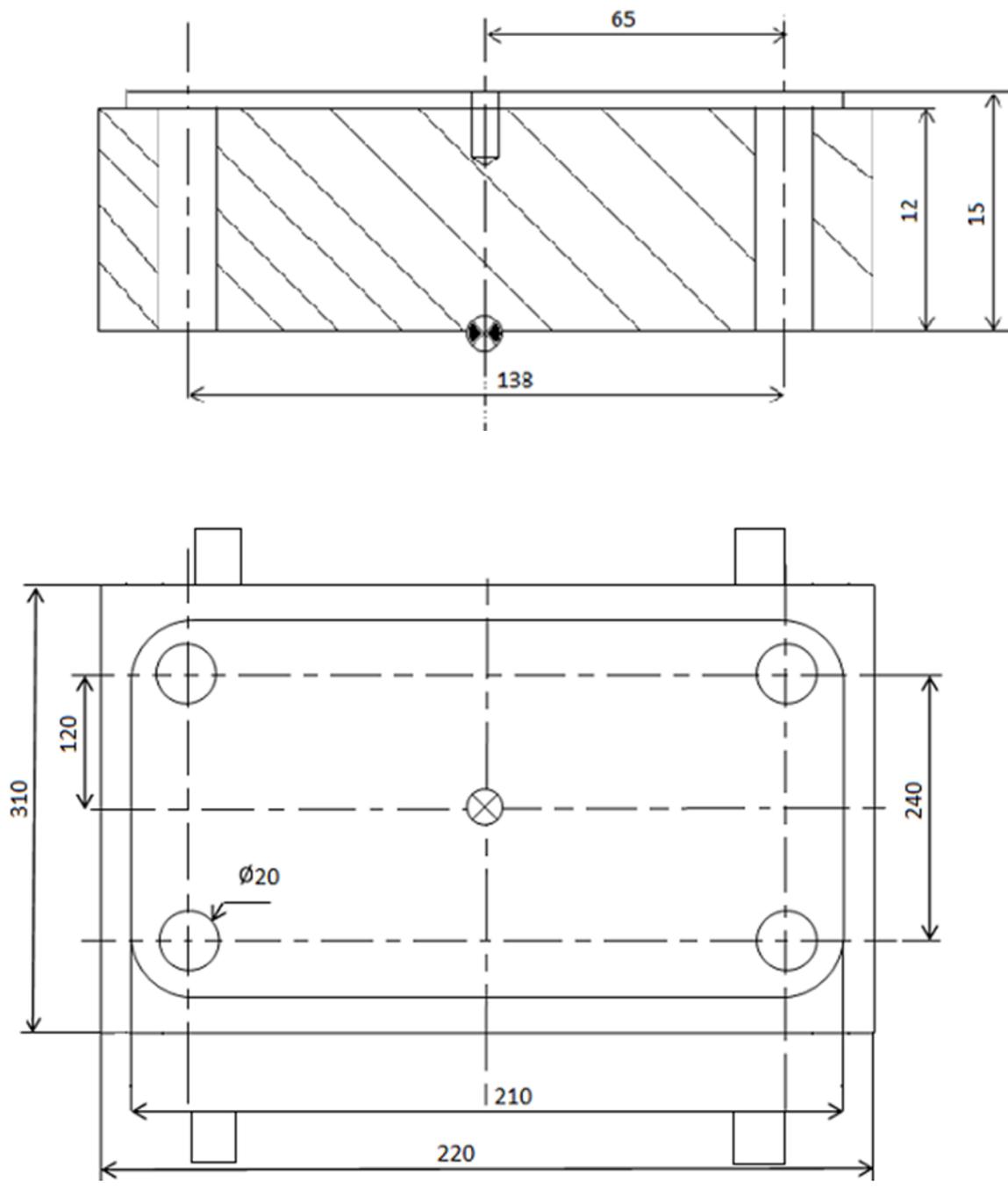
NIVEAUX D'USINAGE	OPERATIONS ELEMENTAIRES						
	1	G <sub>1</sub> F	D <sub>1</sub> E				
2	G <sub>4</sub> F	D <sub>2</sub> E	D <sub>5</sub> F				
3	G <sub>3</sub> F						
4	G <sub>2</sub> F	G <sub>5</sub> F	F <sub>10</sub> F				
5	G <sub>6</sub> F	C <sub>1</sub> F					
6							
7							

**AVANT-PROJET D'ETUDE DE FABRICATION**

N° DE PHASE	DESIGNATION	SURFACES USINEES
10	CONTROLE DU BRUT	POSTE DE CONTROLE
20	TOURNAGE 1	D <sub>1</sub> E, F <sub>3</sub> F, F <sub>4</sub> F, F <sub>2</sub> F, F <sub>8</sub> F, F <sub>9</sub> F
30	TOURNAGE 2	D <sub>2</sub> E, D <sub>2</sub> F, F <sub>6</sub> F, D <sub>5</sub> F, D <sub>3</sub> F, F <sub>7</sub> F, C <sub>1</sub> F
40	FRAISAGE	F <sub>11</sub> F, F <sub>12</sub> F, F <sub>13</sub> F
50	CONTROLE FINAL	POSTE DE CONTROLE

Nbre de piece:1		<b>CONTRAT DE PHASE</b>				<i>Brut étiré</i>		
Cadence:.....		<i>Désignation:</i> TOURNAGE				X18		
<i>Phase</i> 20		<i>M.O utilisée:</i> TOUR PARALELLE						
OPERATIONS D'USINAGE		OUTILLAGE		ELEMENTS DE COUPE				
Rép	Désignation	Outils de coupe	Vérificateurs	Vc m/mm	N tr/mn	f mm/tr	a <sub>p</sub> mm	Lc mm
1	<i>Cf1=5mm</i> <i>Cf2=10mm</i>	Outil couteau	Pc au 1/50 <sup>e</sup>	:	265	0,2		

III-8) Fabrication Assistée par ordinateur du support moteur



**III-9) FEUILLE DE PROGRAMMATION**

Calculs et schéma	points	outils	x	y	z
	PDS	T7	-165	155	15
	PS1	T7	-165	-155	15
	PS2	T7	-55	-155	15
	PS3	T7	-55	155	15
	PS4	T7	165	155	15
	PS5	T7	55	-155	15
	PS6	T7	165	-155	15
	PFS	T7	165	155	15
	1	T3	-99	-155	0
	2		99	-155	0
	3		99	155	0
	4		-99	155	0
	5	T10	-65	120	-5
6		65	-120	-5	
7		65	-120	-5	
8		-65	120	-5	
9	T9	0	0	6	

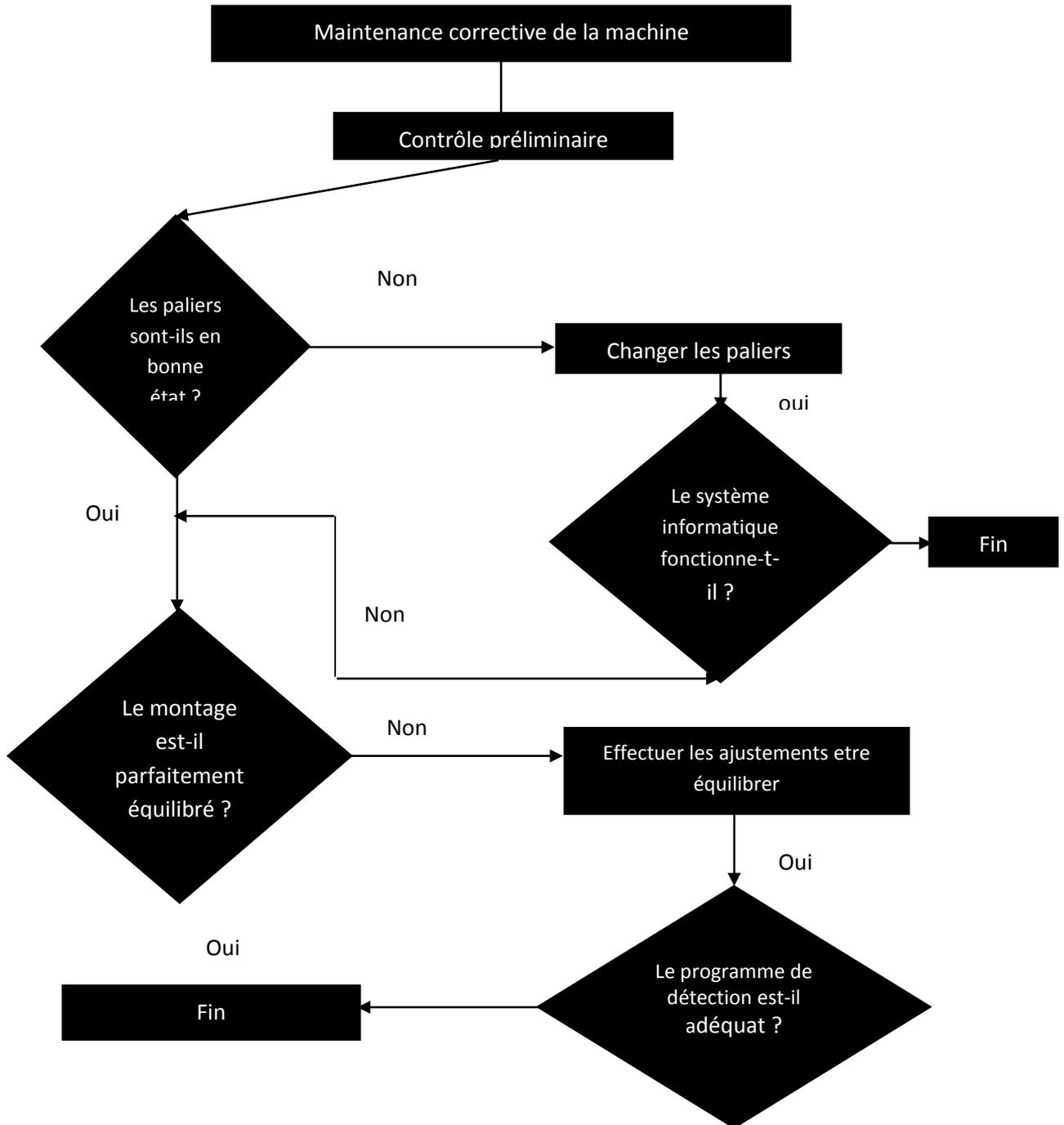
N <sup>o</sup> BLOC	PROGRAMME	COMMENTAIRE
N5	G17 G40 G71 G80 G90 M41	Initialisation de la machine
N10	G0 G52	Programmation absolue par rapport à om
N15	T7D7M6 (fraise cloche)	Choix de l'outil
N20	G94 S142 G97 F50 M3 M8	Vitesse de rotation et d'avance, arrosage
N25	X-165 Y-155 Z20	Outil au-dessus de la pièce
N30	G1 Z12	Outil au point PDS
N35	Y-155	PS1
N40	G X-55 Y-155	PS2
N45	G1 Y155	PS3
N50	G X55	PS4
N55	G1 Y-155	PS5
N60	G X165	PS6
N65	G1 Y155	PFS
N70	G Z20	outil au-dessus de la pièce
N75	G52Z M5 M9	Arrosage et broche arrêtés
N80	T3 D3 M6 (fraise 2 tailles)	Changement d'outil pour contournage
N85	G94 S1194 G97 F76 M3 M8	V d'avance, de rotation, broche et arrosage
N90	G X-190 Y-160 Z20	Outil au-dessus de la pièce
N95	G1 G42 X-99 Y-150 Z0	Outil en 1
	X99	Outil en 2
N100	G3 X-105 Y144 I-105 J6 F'65	Interpolation circulaire en 3
N105	G1 Y144	Outil en 4
N110	G3 X Y I J F'	Outil en 5
N115	G1 X-99	Outil en 6
N120	G3 X Y I J F'	Outil en 7
N125	G1 Y-144	
N130	G3 X-99 -150 I-99 F'65	
N135	G52Z M5 M9	

ETUDE ET REALISATION D'UN BANC D'ESSAI POUR LE DIACNOSTIQUE DES ROULEMENTS

N140	T1 D1 M6 (foret HSS 4)	Changement d'outil à centrer
...	.....	.....
N305	M2	Fin du programme
	XOFF	

# CHAPITRE IV: COUT, DEVIS ET MAINTENANCE DE LA MACHINE

## V.1. ALGORITHME DE MAINTENANCE DE LA MACHINE



## IV.2. ESTIMATION DU COUT ET DEVIS

**Tableau 8 : cout du matériel**

REP	NBRE	DESIGNATION	PRIX UNITAIRE
0	01	Bâti	100000
1	01	Arbre de transmission	40000
2	16	Vis CHC	1000
3	02	Roulement à une rangée de billes	10000
4	02	Paliers à roulement	30000
5	01	Moteur	1000000
6	16	Rondelles plates	1000
8	02	Capteur piézoélectrique	30000
9	01	Carte de données	20000
10	01	Câble USB	1000
11	02	Poulie à 5 gorges	30000
12	05	Courroie	15000
13	02	Cavette	10000
14	04	Vis H	2500
15	02	Galet	10000
16	01	Logiciel	45000
17	01	Programme	20000
18	01	Boite de graisse	5000
		Total	500000Fcfa

Cout total de réalisation = 216800Fcfa

Cout de la main d'œuvre : 40% du cout total. AN : MO=867200Fcfa

TVA = 19,25% on aura AN :  $19,25 \times 867200 / 100 = 166936$ Fcfa

D'où le prix final est de:  $PF = CT \times TVA \times MO$

**PF= 3.202.136 FCFA**

## CONCLUSION

Parvenu au terme de nos efforts sur notre étude intitulée : *Etude et réalisation d'un banc d'essai pour le diagnostic des roulements*, qui au demeurant consistait tout d'abord à présenter l'historique des bancs de test déjà existants avec les méthodes de détection utilisées, mener une étude critique des solutions proposées, une fois le choix de la solution fait procéder à une étude à la fois conceptuelle, dimensionnement et analyse de fabrication, FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) d'une pièce importante et enfin gestion du projet. Force est de constater que théorie sans pratique certes n'est point optimale pour une bonne assimilation des technologies innovantes, car les difficultés rencontrées étaient de l'ordre des 2 en même temps. En effet, l'étude ou du moins l'interprétation des données vibratoires n'est point aisée comme nos prédécesseurs dans leurs études nous l'ont si gentiment stipulés, faisant ainsi de cette solution la moins bonne que nous ayons eu à choisir.

Les travaux de cette étude ont été élaborés à partir d'expérimentations réalisées sur notre banc d'essai, le traitement des signaux mesuré par la méthode d'analyse vibratoire via l'analyse temporelle (kurtosis, RMS, facteur de crête et Valeur de crête) spectrale. Dans le domaine fréquentiel, on peut constater sur les différents zooms des spectres réalisés dans les basses fréquences, correspondant au cas sans défaut, tous les autres l'existence de plusieurs pics correspond aux fréquences des défauts de roulement et ses harmoniques. Le bon choix de l'indicateur de vibration

Nous pouvons sans risque de nous tromper qu'à 85% nos objectifs ont été atteints à travers les résultats ci-dessous :

- Rendement important ;
- Manipulation aisée ;
- Encombrement très réduit ;
- Mise en pratique des concepts enseignés par nos encadreurs.

Nous sommes néanmoins conscient des limites et lacunes de ce travail, c'est ainsi qu'il est souhaitable que les travaux d'amélioration des limites sus évoquées soient envisagées. La perfection n'étant du ressort de l'être humain, nous accueillons avec humilité et plaisir toutes critiques et suggestions objectives.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Trajin, B. (2009). "Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones. Application à la surveillance des roulements à billes", Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT
- [2] M. Peltola, "slip of ac induction motors and how to minimize it" drives mag., Aug. 19, 2002, <http://www.drivesurvey.com>
- [3]: AFNOR. Norme AFNOR X 60 - 010. Paris AFNOR (1990). + REDJIL KHAOULA
- [4]: Q. Meng, L. Quay, Rotating machinery fault diagnosis using Wigner distribution, Mechanical Systems and Signal Processing, pp. 155-166, 1991.
- [5] : 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/>.
- [6] : ISO Norme "Vibrations m mécaniques- Evaluation des vibrations des machines par mesurages sur les parties non tournantes".
- [7] Gilles DUDRAGNE, Daniel GIRODIN'S application of a new model for calculating the fatigue life of rolling bearings.SNR-roulement.1999.
- [8]-[www.skf.com/skf/support/html/dictionary](http://www.skf.com/skf/support/html/dictionary). 27 Mars 2020.
- [9] : «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».
- [10] : 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.
- [11] : Brenner 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.
- [12]: Erickson Stefan, NiklasGripa, Elin Johansson, Lars-Erik Persona, and Ronny Sjobergb, Jan-OlovStr .ombergc: (Towards automatic detection of local bearing defects in rotating machines). Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) p 509–535
- [13]: KiralZeki, Hira Karagulle :( Vibration analysis of rolling element bearings with various defects under the action of an unbalanced force).Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2006) 1967–1991.
- [14]: Boulenger A, Pachaud C : « Aide-mémoire : Surveillance des machines par analyse des vibrations ». Edition Dunod Paris 2009.

- [16]: Djebala, A. (2008). Application de la transformée par ondelettes à l'étude et l'analyse vibratoire des systèmes mécaniques (Thèse de doctorat, Université de Annaba, Algérie).
- [17]: Université de GUELMA. Thèse de doctorat en Génie Mécanique
- [18] :M. ZEMOURI, « contribution à la surveillance des systèmes de production a l'aide des réseaux de neurones dynamiques : application a la maintenance », Thèse de doctorat présenté à l'université de Franche-Comté, France.2003.
- [19] : Dr.RAHMOUNE Chemseddine (2011), « Analyse et traitement du courant statorique pour la détection des défauts dans les systèmes électromécaniques ».Mémoire de magister présenté UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES.
- [20]: 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.
- [21]: Leo H. Chiang, Evan L. Russell, ET Richard D. Braatz (2001). Fault detection and diagnosis in industrial systems. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [22]:R. Isermann (1993). Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing - tutorial paper. Automatica, 29(4): pp. 813-835, 1993.
- [23]: 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.
- [24]: J. Gertler (1997).Fault detection and isolation using parity relations. Control Engineering Practice, 5(5):653–661, 1997.
- [25] : Dubuisson, B., E. Boutleux, P. Dague, T. Denoeux, E. Didelet, Y. Gand valet et M. Masson (2001).Diagnostic, Intelligence Artificielle et reconnaissance de formes, Ed. Hermès.
- [26] : buivietphuong (2007). « Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite. Application à l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide ». Thèse de doctorat l'INP GRENOBLE.
- [27]: 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.
- [28]: Zidani F., Diallo D., Benbouzid M. E. H., Nait-SaidR.(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.
- [29]: babakvaseghi, (2009), contribution l'étude des machines électriques en présence des défauts entre-spires, modélisation – réduction du courant du défaut. Thèse de doctorat présenté à l'institut national polytechnique de lorraine.
- [30]: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).

- [31] : Boulenger, A., &Pachaud, C. "Diagnostic vibratoire en maintenance préventive", Dunod (1998).
- [32] : 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).
- [33]: Ville J., « Théorie et applications de la notion de signal analytique », Câbles et transm. 2èmeA, N°1, 1948, pp. 61-74.
- [34] : Flandrin P., « Temps-fréquence », traité des nouvelles technologies, coll. Hermes 1993.
- [35]: 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 », tribology international, vol. 29 N°1 1996, pp.77.
- [36]: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.
- [37] : James I. Crowley, «TRAITEMENT DU SIGNAL» ,8 octobre 2001.
- [38]: ADBI ZOHRA (2010), « étude des effets vibratoires sur la durée de vie de roulement à rouleaux » Mémoire de magister présenté à BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA.
- [39]: Serge Dos Santos «COURS DE TRAITEMENT DU SIGNAL» École Nationale d'Ingénieurs du Val de Loire Année 2008-2009.
- [40] : Schenk S A « vibrations équilibrage sur le site : Application à la maintenance industrielle ». Edition Schenk S A. 1994.
- [41] : Dron J.P., " Elaboration et adaptation d'outils pour l'étude et le suivi de L'endommagement de composants mécaniques par analyse vibratoire ", Thèse de Doctorat de l'Université de Reims (1995).
- [42] : <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/home>.

# ANNEXE

```

programme.m x +
1  %signal
2  x: % le signal
3  fmax=6400;
4  Fe=fmax*2.56;    % fréquence d'échantionnage
5  Te=1/Fe;
6  %temps d'échantionnage
7  N=length(x);    % Nombre de points dans le signal
8  NN=N/2;
9  t = 0:Te:(N-1)*Te; % axe du temps
10 plot(t,x);      % pour tracer le signal temporel
11 xlabel('temps T')
12 ylabel('Amplitude')
13 title('signal temporel')
14 %spectre
15 f=(0:(NN-1))/NN*(Fe/2); %axe de fréquence
16 tf=fft(x);
17 tfa=abs(tf);
18 pause
19 figure
20 plot(f,tfa(1:NN))
    
```

Programme MATLAB pour le signal et le spectre

```

Editor - D:\Mon travail\experimental\indcateur.m
indcateur.m x +
1  Ne=length(x); % nombre de point dans x
2  Somme=sum(x.*x); % somme de x carée
3  RMS=sqrt(Somme/Ne) %
4  FC=max(x)/RMS
5  Vc=max(abs(x))
6  xmoy=mean(x);
7  K=kurtosis(x)
    
```

Programme pour les indicateurs scalaires des vibrations



Banc d'essai achevé

