



**LICENCE SCIENCES ET TECHNIQUES**  
**Génie Electrique**

**RAPPORT DE FIN D'ETUDES**

**Intitulé :**

**Diagnostic des défauts de  
roulement**

**Réalisé Par :**

**Bkirej Karima**

**Encadré par :**

**Pr. Ghennioui Hicham (FST FES)**

**Soutenu le 07 Juin 2017 devant le jury**

**Pr. Abdi Farid (FST FES)**

**Pr. Lahbabi Mhammed (FST FES)**

**Pr. Ghennioui Hicham (FST FES)**



## Résumé

L'analyse vibratoire est un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une politique de maintenance prévisionnelle de l'outil de production industrielle.

A partir des vibrations régulièrement recueillies sur une machine tournante, l'analyse vibratoire consiste à détecter le dysfonctionnement et à suivre leur évolution.

Dans ce travail, nous étions menés à faire une étude analytique permettant de distinguer un roulement sain d'un roulement défectueux et de détecter les défauts. Nous avons eu l'occasion de se familiariser avec un banc d'essai dédié à l'analyse des roulements. Nous avons également développé un démonstrateur logiciel Matlab permettant d'acquérir un signal de roulement, de l'analyser et de détecter éventuellement un tel défaut.



## Dédicaces

### *À ma très chère mère*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder sante, bonheur et longue vie.*

### *À la mémoire de mon père*

*Ce travail est dédié à mon père, décédé trop tôt, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études.*

*J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sante miséricorde!*

### *À ma sœur Jihane et mes deux frères Mohammed et Azzeddinne*

*Merci d'être toujours à mes côtés, par votre présence et par votre amour, pour donner du gout et du sens à notre vie de famille. Que ce travail vous témoigne de ma sincère affectation.*

### *À toute ma famille, tous mes ami(e)s et tous ceux qui me sont chers*

*En souvenir des bons moments passés ensemble. À vous tous, je souhaite un avenir plein de joie, de bonheur et de succès.*

### *À tous mes professeurs et maîtres*

*Avec tous mes respects et mon éternelle reconnaissance.*



## Remerciements

J'exprime ma profonde gratitude, mon grand respect et mes sincères remerciements à mon encadrant **Pr. GHENNIoui HICHAM** pour ses directives et les conseils qu'il m'a prodigués lors de mon stage.

Je tiens à remercier également les deux membres du jury: **Pr. ABDI FARID** et **LAHBABI MHAMMED** d'avoir accepté de juger ce travail.

Mes remerciements vont à l'ensemble des Professeurs du département de génie électrique pour la formation qu'ils nous ont offerte.

Je remercie aussi Mr. **BIYOU ABDELILAH**, pour son aide à mettre en place l'environnement du travail et son encouragement.

Je remercie toutes les personnes qui ont pu m'aider de prêt ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.



## Table des matières

<b>CHAPITRE 1 - ENVIRONNEMENT DU STAGE.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 PRESENTATION DU LABORATOIRE SIGNAUX SYSTEMES ET COMPOSANTS (LSSC).....</b>	<b>11</b>
1.1.1 <i>Fiche technique du LSSC .....</i>	<i>11</i>
1.1.2 <i>Présentation du LSSC .....</i>	<i>11</i>
1.1.3 <i>Thèmes de recherche Des équipes du LSSC.....</i>	<i>12</i>
1.1.4 <i>Production scientifique des cinq dernières années .....</i>	<i>14</i>
1.1.5 <i>Collaboration internationale.....</i>	<i>14</i>
<b>1.2 DESCRIPTION ET DEROULEMENT DU PROJET .....</b>	<b>14</b>
1.2.1 <i>Objectifs du projet .....</i>	<i>14</i>
1.2.2 <i>Structure de découpage et étapes du projet .....</i>	<i>15</i>
<b>CHAPITRE 2 – DESCRIPTION DES DEFAUTS DE ROULEMENT .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 DOMMAGES SUR LES PALIERS A ROULEMENT .....</b>	<b>18</b>
2.1.1 <i>Bague extérieure endommagée B .....</i>	<i>18</i>
2.1.2 <i>Bague intérieure endommagée C.....</i>	<i>19</i>
2.1.3 <i>Corps de roulement endommagé D.....</i>	<i>19</i>
2.1.4 <i>Roulement E.....</i>	<i>20</i>
2.1.5 <i>Roulement F .....</i>	<i>20</i>
<b>2.2 ETUDE EXPERIMENTALE : .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 ETUDE THEORIQUE.....</b>	<b>23</b>
<b>CHAPITRE 3 – DESCRIPTION DU BANC D’ESSAI ET DU SIMULATEUR LOGICIEL DEVELOPPE .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 DESCRIPTION DU BANC D’ESSAI .....</b>	<b>25</b>
3.1.1 <i>Description de l'appareil .....</i>	<i>25</i>
3.1.2 <i>Cause de vibration .....</i>	<i>26</i>
3.1.3 <i>Capteurs de mesure .....</i>	<i>27</i>
<b>3.2 RESULTATS OBTENUS .....</b>	<b>27</b>
3.2.1 <i>Interface du démonstrateur logiciel Matlab .....</i>	<i>28</i>
3.2.2 <i>Analyse spectrale .....</i>	<i>28</i>
3.2.3 <i>Analyse d'enveloppe .....</i>	<i>33</i>
<b><u>CONCLUSION.....</u></b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b><u>BIBLIOGRAPHIE.....</u></b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>
<b><u>WEBOGRAPHIE.....</u></b>	<b>ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.</b>



## Liste des figures

FIGURE 1 - EQUIPES DE RECHERCHE DU LABORATOIRE SSC DE LA FST DE FES. ....	12
FIGURE 2 : ROULEMENT B .....	19
FIGURE 3 : ROULEMENT C .....	19
FIGURE 4 - ROULEMENT D .....	20
FIGURE 5 - ROULEMENT E .....	20
FIGURE 6 - ROULEMENT F .....	20
FIGURE 7 - DIMENSIONS DU ROULEMENT.....	22
FIGURE 8 - LES FREQUENCES CARACTERISTIQUES DU ROULEMENT 6004 A PARTIR DU CALCULATEUR SKF .....	23
FIGURE 9 - BANC D'ESSAI.....	26
FIGURE 10 - INTERFACE GRAPHIQUE DU LOGICIEL.....	28
FIGURE 11 - ROULEMENT SAIN.....	30
FIGURE 12 - ROULEMENT B.....	31
FIGURE 13 - ROULEMENT_MILIEU B.....	32
FIGURE 14 - ROULEMENT MILIEU SAIN .....	32
FIGURE 15 - CHRONOLOGIE POUR ETABLIR UN SPECTRE D'ENVELOPPE .....	33
FIGURE 16 - ROULEMENT B.....	34
FIGURE 17 - ROULEMENT C .....	34
FIGURE 18 - ROULEMENT SAIN 1 .....	35
FIGURE 19 - ROULEMENT BC.....	36
FIGURE 20 - ROULEMENT E.....	37
FIGURE 21 - ROULEMENT B.....	37

## Liste des tableaux

TABLEAU 1 - GESTION DE PROJET .....	15
-------------------------------------	----



TABLEAU 2 - LES TACHES DE PROJET .....	16
TABLEAU 3 - DIAGRAMME DE GANTT .....	16
TABLEAU 4 - DIMENSIONS DU ROULEMENT TEST.....	21
TABLEAU 5 - FREQUENCES CARACTERISTIQUES DU ROULEMENT POUR 30 HZ.....	22

## Liste des acronymes



$\alpha$	Angle de contact
$f_{be}$	Fréquence d'un défaut de bague externe
$f_{bi}$	Fréquence d'un défaut de bague interne
$f_c$	Fréquence d'un défaut de cage
$f_{bille}$	Fréquence d'un défaut de bille
$d_b$	Diamètre de la bille
$N_b$	Nombre de bille
$d_p$	Diamètre primitif du roulement
$f_r$	Fréquence de rotation de l'arbre
$f_e$	Fréquence d'échantillonnage
S	Seconde
mm	Millimètre
Hz	Hertz
tr/min	Tour par minute
$f_1, f_2$	Fréquences de défaut d'alignement
D	Diamètre de la bague extérieure
d	Diamètre de la bague intérieure





## Introduction

Vivant dans un monde où les arrêts des installations n'est plus une chose permise, la prévention et la détection anticipée des défauts devient par ailleurs un but à atteindre.

C'est dans cette perspective que s'inscrit ce projet de fin d'études qui a eu lieu au sein du Laboratoire Signaux, Systèmes et Composants (LSSC) de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès (FSTF), et qui a pour objectif la conception et le développement d'un simulateur logiciel permettant d'analyser les signaux acquis à travers un banc d'essai dédié aux roulements.

Ce document est organisé de la façon suivante. Nous présentons dans le premier chapitre le cadre du projet, la problématique et les résultats souhaités. Le deuxième chapitre est dédié à la description des défauts de roulements et le calcul théorique et expérimental des fréquences de ces défauts mécaniques. Tandis que le dernier chapitre est consacré à la description du démonstrateur logiciel développé et qui permet d'analyser des signaux de roulements, extraire la fréquence de rotation du roulement et éventuellement détecter les fréquences de défauts.



UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



# Chapitre 1

## - Environnement du stage -



## CHAPITRE 1 - ENVIRONNEMENT DU STAGE

### **1.1 PRÉSENTATION DU LABORATOIRE SIGNAUX SYSTÈMES ET COMPOSANTS (LSSC)**

#### **1.1.1 FICHE TECHNIQUE DU LSSC**

**Directeur :** Mhammed Lahbabi.

**Adresse :** LSSC, Faculté des Sciences et Techniques de Fès, B.P. 2202, Route d'Imouzzer-Fès.

**Tél :** +212(0)535608014-+212(0)535602953.

**Fax :** +212(0)535608214.

**Effectif :** 17 membres permanent, 10 chercheurs associés et une quarantaine de doctorants.

#### **1.1.2 PRÉSENTATION DU LSSC**

Le **LSSC** est domicilié à la Faculté des Sciences et Techniques (<http://www.fst-usmba.ac.ma/>) de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah (<http://www.usmba.ac.ma/>). Il est accrédité depuis 1994 et composé de quatre équipes couvrant un large spectre de thématiques de recherche. Les plus importantes sont les **énergies renouvelables**, les **Technologie de l'Information et de Communication** et les **Télécommunications**.

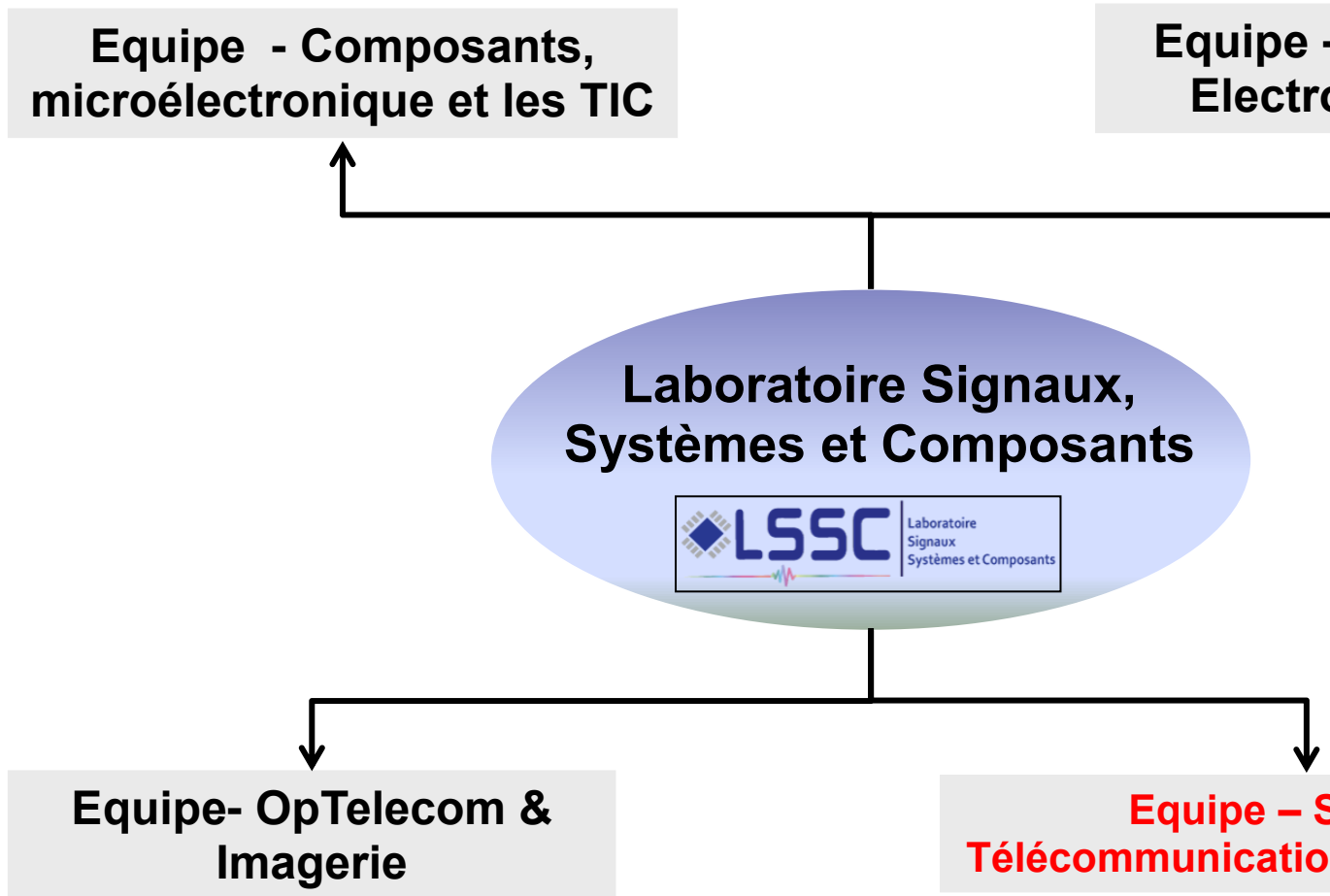


Figure 1 - Equipes de recherche du laboratoire SSC de la FST de Fès.

### 1.1.3 THÈMES DE RECHERCHE DES ÉQUIPES DU LSSC

#### 1.1.3.1 EQUIPE COMPOSANTS MICROELECTRONIQUE ET LES TIC

**Thèmes de recherches :**

- Technologie des composants électroniques, optiques et des capteurs.
- Composants à base de semi-conducteurs, nano structures.
- Modélisation, optimisation, caractérisation physico-chimiques, optiques et électriques des composants et tests de fiabilité.
- Architecture des systèmes informatiques, implémentation et systèmes embarqués.
- Systèmes d'information, sécurité et traitement de données.



- Instrumentation et mesure physique.
- Système de contrôle, de commande et de gestion des énergies renouvelables.

#### 1.1.3.2 EQUIPE OPTTELCOM & IMAGERIE

- Télécommunications optiques,
- Réseaux de télécommunication,
- Composants & routage optiques.
- Synthèse et caractérisation de matériaux pour l'optique et l'électronique, Capteurs.
- Codage et compression de l'information (image et vidéo,..)
- Algorithmes, optimisation et architecture pour traitement de l'information ...

#### 1.1.3.3 EQUIPE COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE

##### *Thèmes de recherches :*

- Circuits et composants hyperfréquences
- Electronique de puissance
- Commande

#### 1.1.3.4 EQUIPE SIGNAUX, TELECOMMUNICATION & SMART-GRID

##### *Thèmes de recherches :*

- Formation à distance : e-learning
- Antennes et réseaux sans fil
- Traitement du signal, Systèmes de télécommunications et Radio cognitive
- Les réseaux électriques intelligents (Smart Grids)



#### 1.1.4 PRODUCTION SCIENTIFIQUE DES CINQ DERNIÈRES ANNÉES

- **Publications :** 80 publications
- **Communications :** 200
- **Thèses soutenues :** 10
- **Habilitations :** 3
- **Mobilité :** 6 doctorants et 3 enseignants chercheurs (Pays Bas, Belgique, Italie, Lituanie, France)
- **Bourses d'excellence :** 6 Doctorants
- **Bourse IRESEN de 36 mois :** 1 Doctorant
- **Bourse de mobilité Al Idrissi de 36 mois :** 1 doctorant
- **Autres :**
  - Livre édité : "Optical Transmission and Networks for Next Generation Internet Traffic Highways, International Publisher of Progressive Academic Research, GI Global
  - Editor Ship : 2 (RAWSN ISBN:9781467380973 & WINCOM ISBN: 9781509039388 )

#### 1.1.5 COLLABORATION INTERNATIONALE

- Laboratoire Analyse des Signaux et des Processus Industriels (LASPI), Université Jean Monnet Saint Etienne France.
- Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS), Université de Marseille France.
- ESIGELEC/IRSEEM et Normandie Université / Université de Rouen France.
- National Institute of Standards and Technology, Semiconductor and Dimensional Metrology Division, Gaithersburg, USA.
- Laboratoire de Microélectronique et de physique des Semi-conducteurs (LaMIPS). Université de Caen Basse- Normandie France.
- Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS), Université de Toulon.
- Laboratoire de Matériaux Optiques Photoniques et Systèmes. (MOPS) Université de Lorraine France.

## **1.2 DESCRIPTION ET DÉROULEMENT DU PROJET**

### 1.2.1 OBJECTIFS DU PROJET

Les objectifs du projet sont:

- Savoir modéliser et analyser un signal de roulement.



- Savoir modéliser un défaut d'un roulement.
- Se familiariser avec le calculateur des fréquences de défauts d'un roulement.
- Se familiariser avec le banc d'essai dédié à l'acquisition d'un signal de roulement.
- Développer un simulateur d'analyse des signaux de roulement.

### 1.2.2 STRUCTURE DE DÉCOUPAGE ET ÉTAPES DU PROJET

La logique de déroulement des travaux proposés dans le cadre de ce projet de fin d'études est présentée au niveau du tableau suivant. Le tableau illustre les enchaînements des activités clés du WBS (Work Breakdown structure), les jalons et fournitures principales associées.

<b>WBS</b>	<b>Intitulé</b>	<b>Contenu succinct &amp; sorties associées</b>
00	Gestion de projet	Management projet
11	Partie 1 : état de l'art sur les signaux de roulement	Rapport d'étude
12	Partie 2 : Description du banc d'essai	Rapport d'étude
13	Partie 3 : Acquisition des signaux	Signaux acquis
14	Partie 4 : Développement d'un simulateur d'analyse d'un signal de roulement	- Simulateur logiciel - Résultats obtenus (courbes)
14	Partie 5 : Rédaction	Mémoire du projet de fin d'études

**Tableau 1 - Gestion de projet**

Pour une bonne organisation visant à gérer de bout en bout le déroulement du projet, nous l'avons décomposé en tâches récapitulatifs et sous tâches. Nous présentons dans ce qui suit un tableau des différentes tâches du projet, ses dates de début et de fin prévues ainsi que leurs taux d'accomplissement, ainsi que le diagramme de Gantt qui illustre graphiquement ces tâches.



<b>Tache</b>	<b>Nom</b>	<b>Date début</b>	<b>Date fin</b>	<b>achevé en %</b>
1	La lecture du catalogue du banc d'essai	20_04_2017	23_04_2017	100
2	L'installation du pilote de la carte d'acquisition	24_04_2017	25_04_2017	100
3	L'installation du logiciel matlab_2015a	26_04_2017	30_04_2017	100
4	Faire l'acquisition et enregistrer les signaux	02_05_2017	02_05_2017	100
5	Analyser les signaux acquis et la réalisation d'une interface graphique matlab	03_05_2017	15_05_2017	100
6	Rédaction du rapport de PFE	12_05_2017	30_05_2015	100

**Tableau 2 - Les taches de projet**

Date	20_04 2017	23_04 2017	24_04 2017	25_04 2017	26_04 2017	30_04 2017	02_05 2017	03_05 2017	12_05 2017	15_05 2017	30_05 2017
Tache											
1											
2											
3											
4											
5											
6											

**Tableau 3 - diagramme de Gantt**





UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



**Chapitre 2**  
**- Description des défauts de**  
**roulement -**



## **CHAPITRE 2 – DESCRIPTION DES DÉFAUTS DE ROULEMENT**

### **2.1 DOMMAGES SUR LES PALIERS A ROULEMENT**

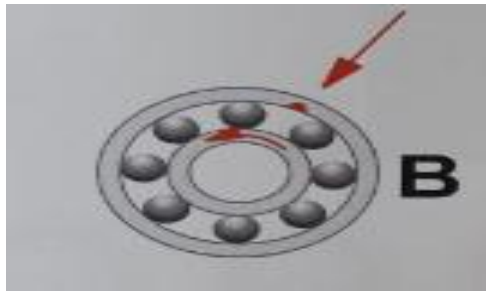
Le banc d'essai PT 500.12 disponible à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès contient un support de palier et six paliers à roulement présentant un dommage différent.

Avant l'essai, il faut insérer au choix un palier à roulement dans le support de palier à l'aide de l'outil fourni. Nous présentons dans la suite, les différents roulements avec défauts qui vont avec le banc d'essai, dans [3].

#### **2.1.1 BAGUE EXTÉRIEURE ENDOMMAGÉE B**

Les dommages sur les voies de roulement de la bague extérieure des paliers à roulement ont pour effet que chaque corps de roulement roule sur ces paliers. Chaque roulement en particulier provoque une impulsion qui incite la structure située dans l'environnement vibratoire.

A la suite de la périodicité de l'excitation par choc due au roulement répété sur le point endommagée, cette excitation peut être détectée de manière fiable dans le spectre d'enveloppe du signal, dans [3].



**Figure 2 : Roulement B**

### **2.1.2 BAGUE INTÉRIEURE ENDOMMAGÉE C**

Les dommages sur les voies de roulement de la bague intérieure des paliers à roulement se manifestent de la même manière que ceux sur les bagues extérieures.

A condition que la bague extérieure soit fixe et la direction de la charge soit fixe.

La seule différence est de que les dommages se situent dans un mouvement relatif par rapport à la zone de charge, ce qui entraîne une excitation par choc modulée en amplitude.

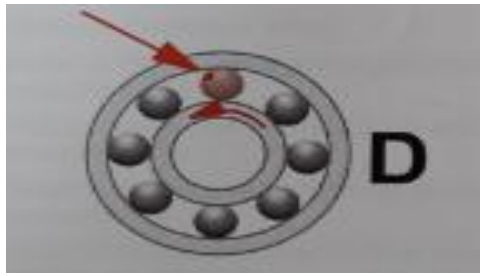
On peut voir dans le spectre d'enveloppe des bandes latérales concernant le dommage à la bague intérieure situées a l'écart de la fréquence de rotation de la bague intérieure, dans [3].



**Figure 3 : Roulement C**

### **2.1.3 CORPS DE ROULEMENT ENDOMMAGÉ D**

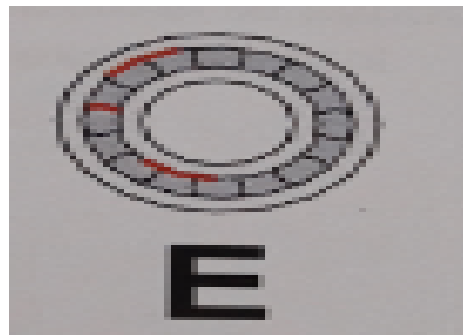
Les dommages sur le corps de roulement font également parties des dommages tournants par rapport à la zone de charge. Leur aspect est identique a celui des dommages sur la bague intérieure, dans [3].



**Figure 4 - Roulement D**

#### **2.1.4 ROULEMENT E**

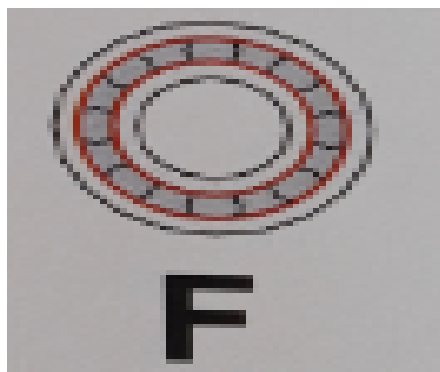
C'est un palier à roulement B, C et D endommagés en même temps, dans [3].



**Figure 5 - Roulement E**

#### **2.1.5 ROULEMENT F**

C'est un palier à roulement avec forte usure.



**Figure 6 - roulement F**

## **2.2**

### **ETUDE EXPERIMENTALE :**



Les roulements sont toujours caractérisés dans le domaine du diagnostic par quatre fréquences:  $f_{bille}$ ,  $f_{bi}$ ,  $f_{be}$  et  $f_c$ . Les équations (de 2.2.1 à 2.2.4) permettent de calculer ces fréquences d'après Boulenger et Pachaud dans [1].

$$f_{bi} = \frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{d_b \cos \alpha}{d_p}\right) \frac{f_r}{60} \quad \text{Eq. 2.2.1}$$

$$f_{be} = \frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{d_b \cos \alpha}{d_p}\right) \frac{f_r}{60} \quad \text{Eq. 2.2.2}$$

$$f_{bille} = \frac{d_p}{2d_b} \left(1 - \left(\frac{d_b \cos \alpha}{d_p}\right)^2\right) \frac{f_r}{60} \quad \text{Eq. 2.2.3}$$

$$f_c = \frac{1}{2} \left(1 - \varepsilon \frac{d_b \cos \alpha}{d_p}\right) \frac{f_r}{60} \quad \text{Eq. 2.2.4}$$

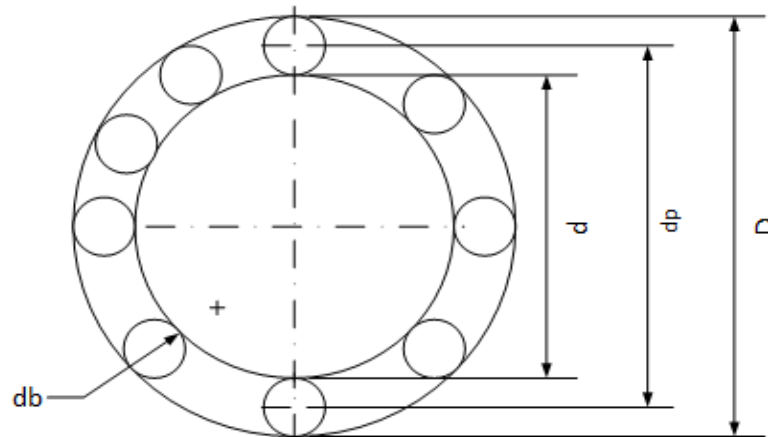
$\varepsilon = 1$  si la bague fixe correspond à la bague externe

$\varepsilon = -1$  si la bague fixe correspond à la bague interne.

Les dimensions des roulements test utilisés lors des essais sont présentées dans le tableau 4 (voir également la figure 7).

Dimensions	SKF6004 (mm)
D	52
d	25
L	15
$N_b$	9
$d_p$	38,5
$d_b$	7,9
$\alpha$	0°

**Tableau 4 - dimensions du roulement test**



**Figure 7 - dimensions du roulement**

A l'aide du tableau 4 et les quatre équations (de 2.2.1 à 2.2.4) et avec une fréquence de rotation de 1800 tr/min nous avons calculé les quatre fréquences  $f_{bille}$ ,  $f_{bi}$ ,  $f_{be}$  et  $f_c$ , qui sont présentées dans le tableau 5.

Fréquence	Valeur théorique
$f_{bi}$	162,7
$f_{be}$	107,3
$f_{bille}$	70,02
$f_c$	11,92

**Tableau 5 - fréquences caractéristiques du roulement pour 30 Hz**



## 2.3

## ETUDE THÉORIQUE

Nous avons calculé les fréquences caractéristiques tout en utilisant, cette fois-ci, le calculateur Skf disponible à partir du lien http suivant:

<http://webtools3.skf.com/BearingCalc/submitCalculation.action?null&ni=1800&ne=0>.

Nous avons obtenu les résultats qui sont présentés dans la figure suivante:

### Input parameters

$n_i$ Rotational speed of the inner ring	1800 r/min
$n_e$ Rotational speed of the outer ring (only used to calculate the bearing frequencies)	0 r/min

### Result

$f_i$ Rotational frequency of the inner ring	30 Hz
$f_e$ Rotational frequency of the outer ring	0 Hz
$f_c$ Rotational frequency of the rolling element and cage assembly	11.9 Hz
$f_r$ Rotational frequency of a rolling element about its own axis	70.2 Hz
$f_{ip}$ Over-rolling frequency of one point on the inner ring	162.7 Hz
$f_{ep}$ Over-rolling frequency of one point on the outer ring	107.3 Hz

**Figure 8 - les fréquences caractéristiques du roulement 6004 à partir du calculateur**

**SKF**



**Chapitre 3**  
**- Description du banc d'essai et**  
**du démonstrateur logiciel**  
**développé -**





## CHAPITRE 3 – DESCRIPTION DU BANC D’ESSAI ET DU SIMULATEUR LOGICIEL DÉVELOPPÉ

### **3.1 DESCRIPTION DU BANC D’ESSAI**

#### **3.1.1 DESCRIPTION DE L'APPAREIL**

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.

##### **A. Groupe moteur**

Le banc d'essai est composé d'un moteur triphasé avec encodeur, il est monté sur la deuxième extrémité de l'arbre, il est monté sur une plaque de base dispositif d'alignement qui permet d'aligner horizontalement l'axe du moteur.

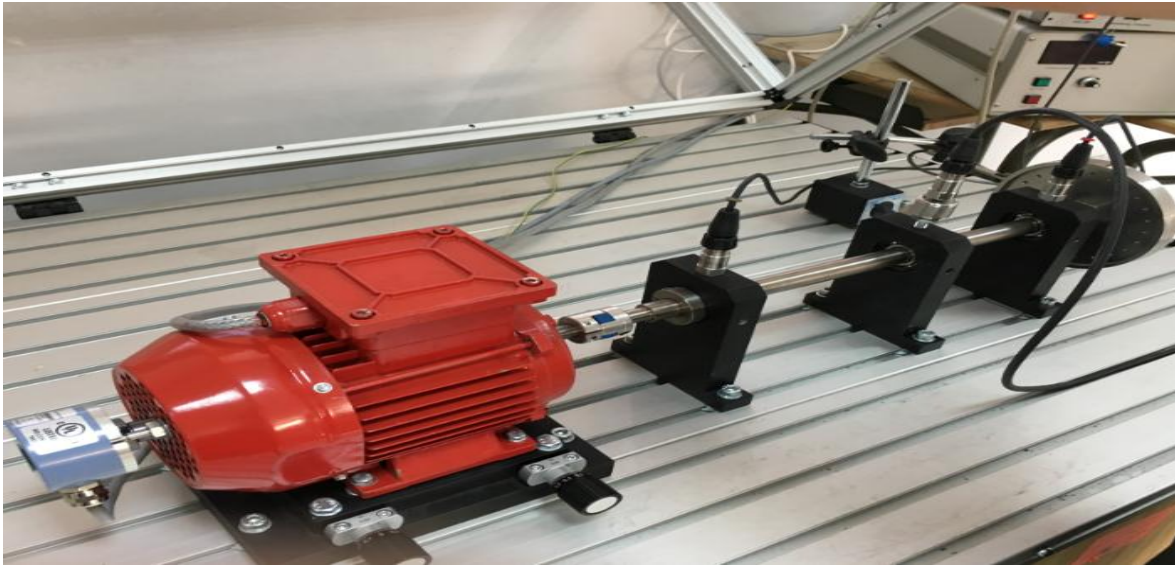
##### **B. Appareil de commande**

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 absorbée du moteur.

Afin de pouvoir simuler des vibrations avec l'appareil de base et de réaliser des essais en rapport avec le thème " équilibrage et alignement", les pièces suivantes figurent dans les éléments du banc d'essai:

- 1 accouplement élastique à griffes,
- 1 accouplement élastique à bras,
- 1 arbre long,
- 1 arbre court,
- 2 supports de palier couplets avec palier,
- 2 disques de masse avec kits de serrage,
- Des petites pièces sous forme de pièces de masse pour l'équilibrage.



**Figure 9 - banc d'essai**

les acquisitions sont faites à l'aide d'une carte qui nous a permet de relier le banc d'essai avec l'ordinateur d'une part, et prendre les mesures d'autre part pour visualiser les signaux acquis.

### **3.1.2 CAUSE DE VIBRATION**

Une machine idéale ne doit créer aucune vibration, puisque les vibrations sont toujours synonymes de perte d'énergie.

-Lorsque la structure est bonne, seules de faibles vibrations se produisent. Avec l'âge de la machine qui augmente, les pièces de la machine se déforment et les propriétés dynamiques de la machine changent.

-Des erreurs d'alignement et des balourds apparaissent, les pièces s'usent et le jeu de palier devient plus grand.

=> Ces processus se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui se transmet à la machine.

En raison de l'énergie vibratoire, les fréquences de résonance des différentes machines sont excitées.

Nous notons que les vibrations apparaissent:

- au niveau des paliers,
- au niveau des courroies dentées dans l'engrenage,
- au niveau des arbres gauchis ou en cas d'erreur d'alignement,
- en cas de balourds sur des pièces en rotation,
- en cas de jeu dans les paliers lisses,



- au niveau des courroies d'entraînement,
- au niveau des systèmes bielle manivelle,
- et au niveau des accouplements.

Les causes des vibrations sont:

- Forces massiques (balourd) en rotation et oscillantes,
- Chocs,
- Efforts exercés par les gaz,
- Forces d'écoulement,
- Forces électromagnétiques.

En général, la cause du dommage ne peut pas être mesurée directement, seul l'effet le peut, à savoir, les vibrations.

Les vibrations peuvent être transmises sous forme de bruit de structure ou bien générées sous forme de bruit aérien.

### **3.1.3** CAPTEURS DE MESURE

Pour mesurer le déplacement, on utilise la plupart du temps des capteurs à courant de Foucault, dans [2], sans contact. Ces derniers mesurent l'entrefer entre la tête du capteur et la surface mesurée.

Puisque le principe des courants de Foucault nécessite une fréquence porteuse devant se situer largement au-dessus de la fréquence de signal maximale, la fréquence limite supérieure de la mesure, se situe à maximum quelques kHz. Mais étant donné que les déplacements de vibration à mesurer des machines deviennent simultanément très petits dans le domaine fréquentiel supérieur, on utilise une plage allant jusqu'à environ 250 Hz.

La fréquence limite inférieure se situe à 0. Dès lors, des mesures statiques peuvent être également effectuées.

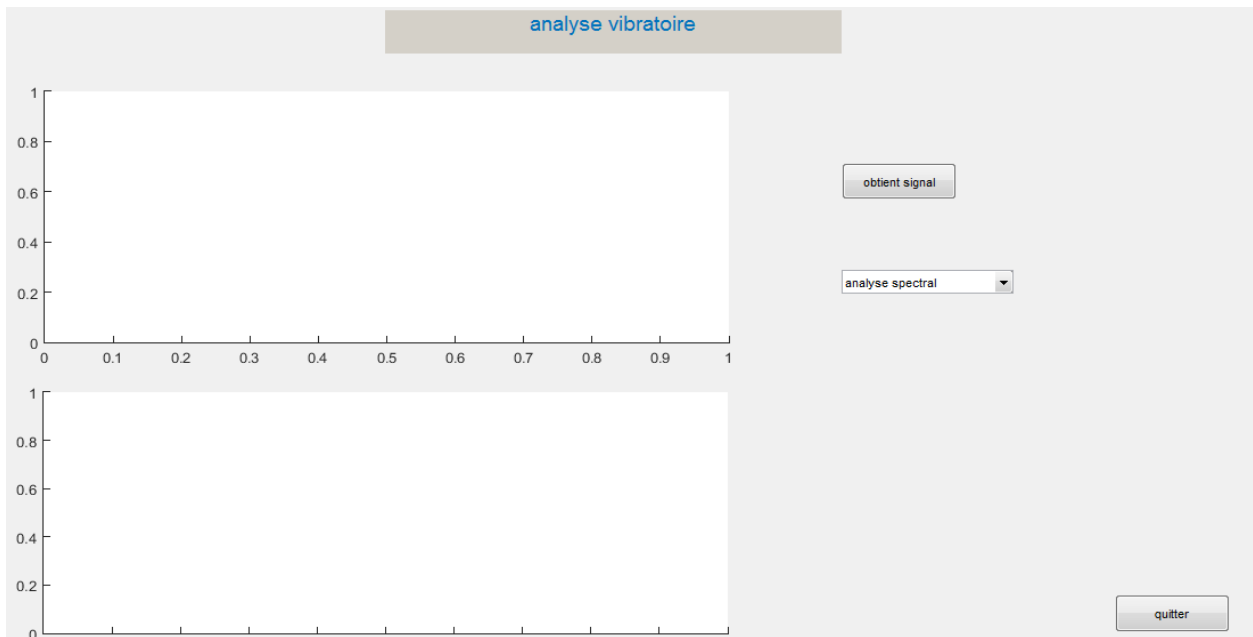
La distance de mesure dépend du diamètre du capteur se situant entre quelques dixièmes de mm et 5 mm. La mesure s'effectue de manière relative entre le capteur de déplacement et la surface.

## **3.2 RÉSULTATS OBTENUS**



### 3.2.1 INTERFACE DU DÉMONSTRATEUR LOGICIEL MATLAB

Afin de pouvoir analyser les signaux acquis et obtenir les résultats souhaités, nous avons développé un démonstrateur logiciel Matlab dont l'interface graphique utilisateur est présentée au niveau de la figure 10.



**Figure 10 - interface graphique du logiciel**

Nous pouvons dans un premier temps à l'aide de ce démonstrateur faire des acquisitions des signaux en temps réel ou bien de charger des signaux déjà acquis. Nous analysons dans un second temps le signal au moyen des méthodes : la première est l'analyse spectrale permettant d'extraire en particulier la fréquence de rotation du moteur tandis que la seconde méthode est utilisée pour détecter les fréquences d'un tel défaut. Nous présentons dans la suite ces deux méthodes.

### 3.2.2 ANALYSE SPECTRALE

L'analyse spectrale est une méthode utilisée pour déterminer les caractéristiques d'un phénomène observé en fonction du temps sous forme d'un signal. Cette méthode que nous avons utilisée a pour but de détecter les pics de la fréquence de rotation et de défauts.

Nous avons fixé une vitesse de 1800 tr/min pour faire les acquisitions nécessaire à notre étude. Nous avons pris des diverses mesures que nous allons présenter á l'aide des figures suivantes:



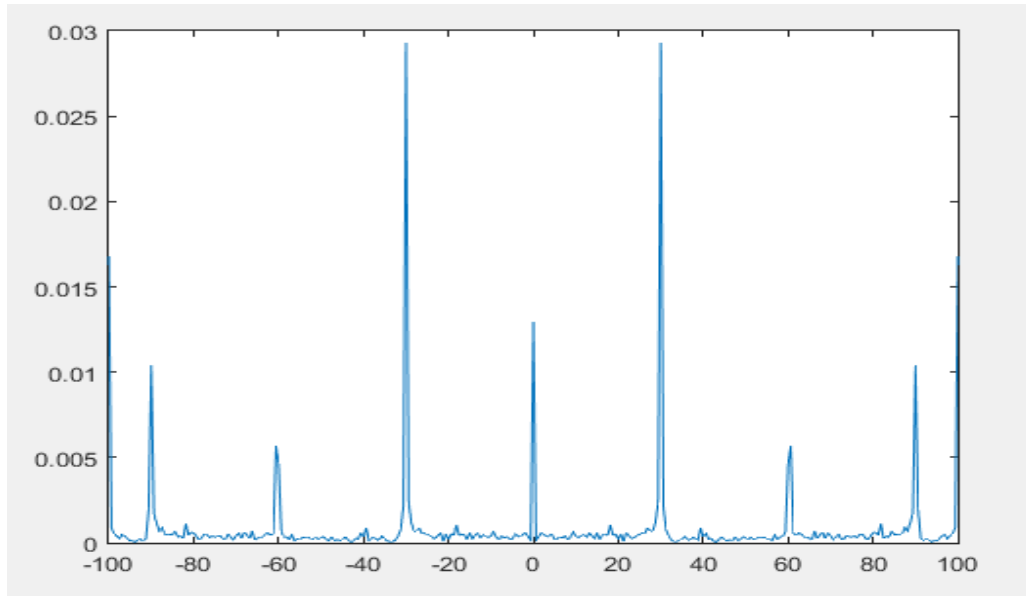
UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



**Remarque:** dans un premier temps nous avons pris toutes les mesures avec un défaut d'alignement.



- ✓ mesure 1:
- roulement sain\_ voie 1:



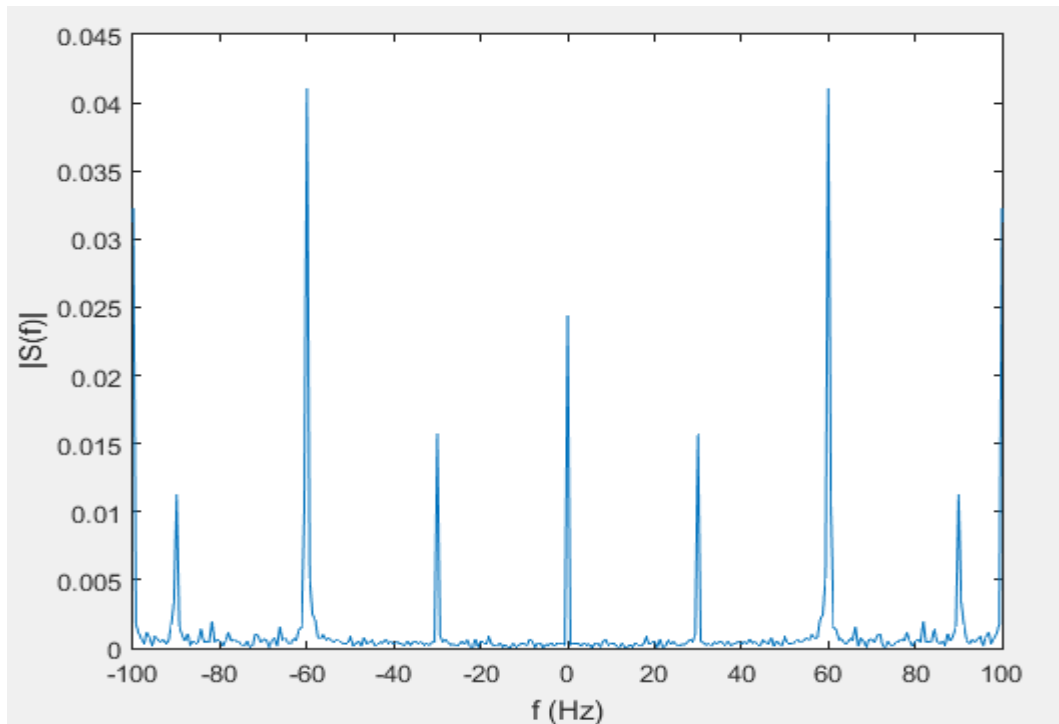
**Figure 11 - roulement sain**

A partir de cette figure, nous constatons qu'il y a une raie à la fréquence de rotation:  $f_r=30\text{Hz}$ .

Nous constatons également qu'il y a des raies présentes aux multiples de la fréquence de rotation;

$f_1 = 60 \text{ Hz}$  et  $f_2 = 90 \text{ Hz}$ . Ceci indique qu'il y a effectivement un défaut d'alignement qu'il faut corriger avant d'analyser les roulements.

- roulement B\_voie 0:



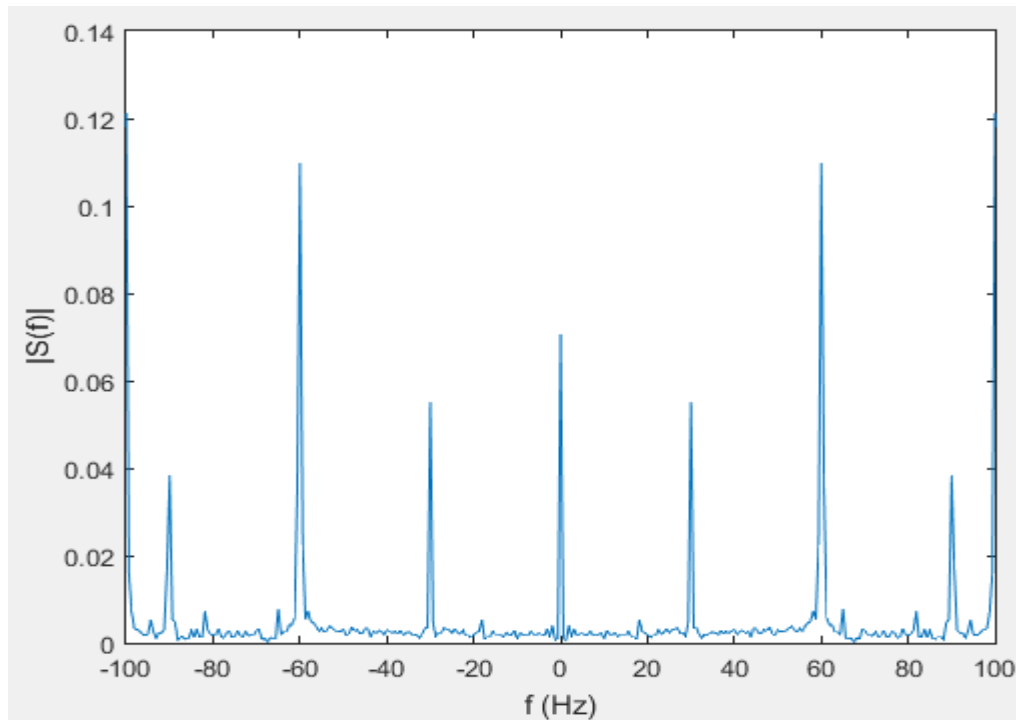
**Figure 12 - roulement B**

Comme le scénario précédent, nous pouvons extraire les valeurs suivantes:

Fréquence de rotation:  $f_r = 30$  Hz

Fréquences du défaut:  $f_1 = 60$  Hz et  $f_2 = 90$  Hz.

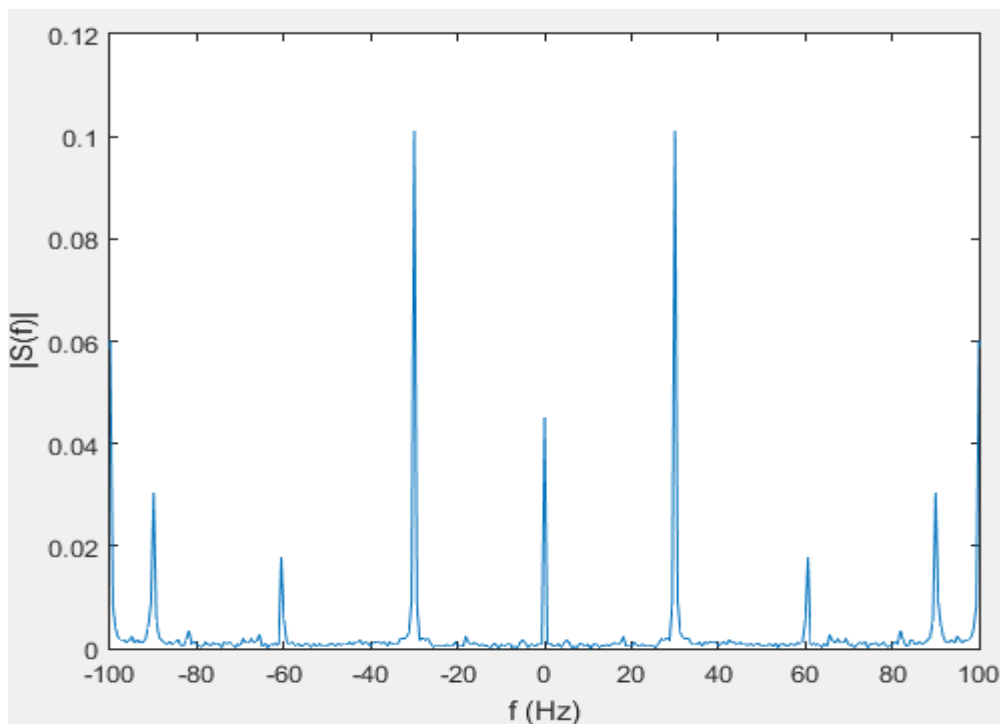
- ✓ mesure 2: palier au milieu
  - roulement B\_voie 0:



**Figure 13 - roulement milieu B**

Cette fois ci, nous avons mis le palier au milieu. Nous constatons qu'il y a les mêmes raies que précédemment  $f_r=30\text{Hz}$  qui exprime la fréquence de rotation et  $f_1=60\text{ Hz}$ ,  $f_2=90\text{ Hz}$  qui correspondent au défaut d'alignement

- roulement sain\_voie 1 :



**Figure 14 - roulement milieu sain**





Comme le scénario précédent, nous pouvons extraire les valeurs suivantes,

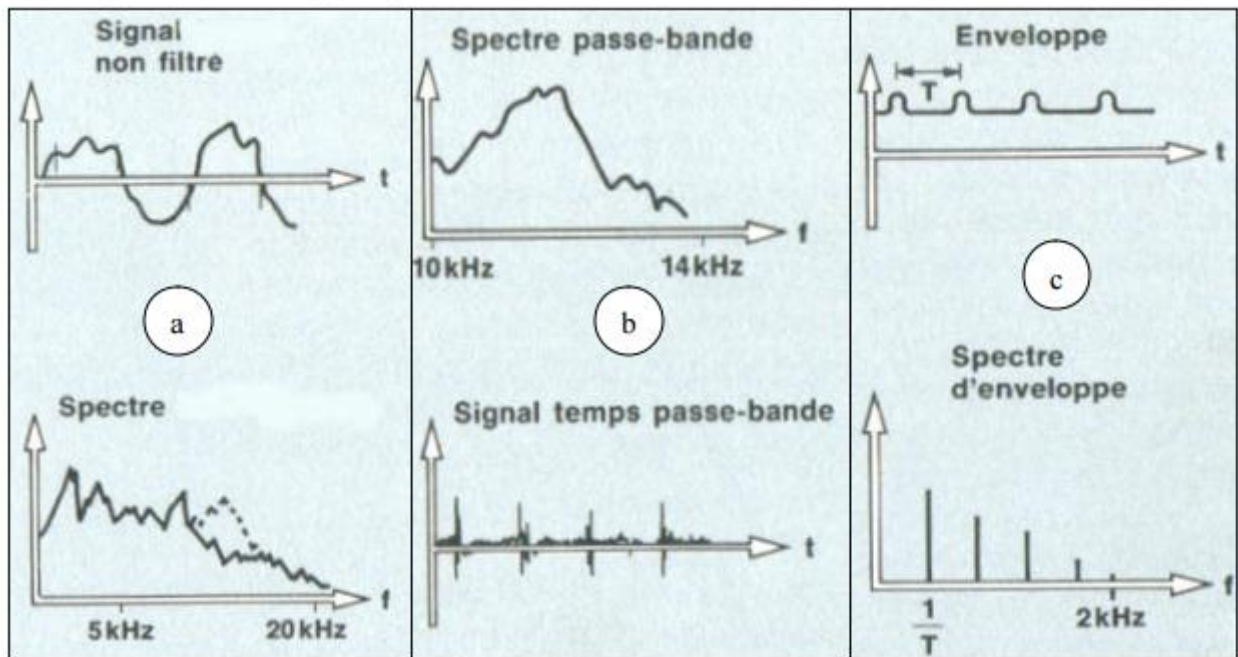
Fréquence de rotation:  $f_r = 30 \text{ Hz}$

Fréquences du défaut :  $f_1 = 60 \text{ Hz}$  et  $f_2 = 90 \text{ Hz}$ .

### 3.2.3 ANALYSE D'ENVELOPPE

L'analyse d'enveloppe est un type particulier de la représentation dans le domaine fréquentiel. Elle convient parfaitement à l'identification des chocs dans la machine. Cette analyse consiste dans une première étape à choisir la bande passante plate qui est généralement dans les hautes fréquences, ensuite il faut appliquer un filtre passe bande, après il suffit d'élever le signal au carré et d'étudier son spectre d'amplitude pour pouvoir relever les fréquences cycliques présentes dans le signal, pour finalement trouver l'apparition des chocs nettes. Elle est aussi une méthode pour détecter les pics de la fréquence de rotation et des défauts.

la figure suivante présente le principe de cette méthode:

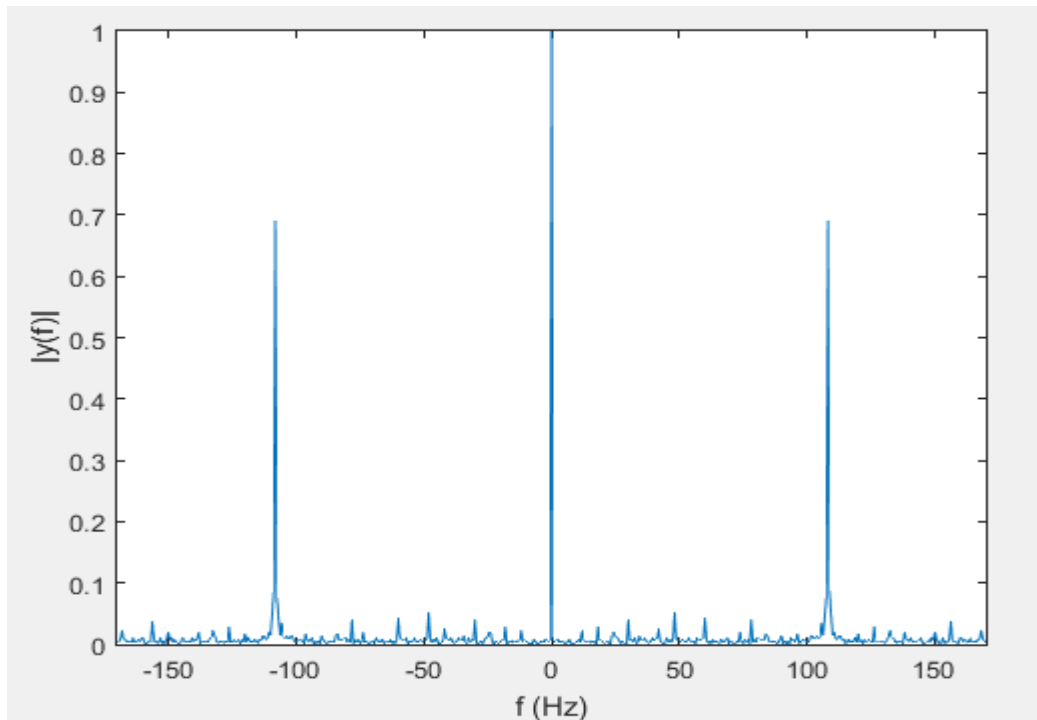


**Figure 15 - Chronologie pour établir un spectre d'enveloppe**

L'acquisition est faite avec une vitesse constante 1800 tr/min, nous avons pris des diverses mesures que nous allons présenter dans la suite.

✓ mesure 1:

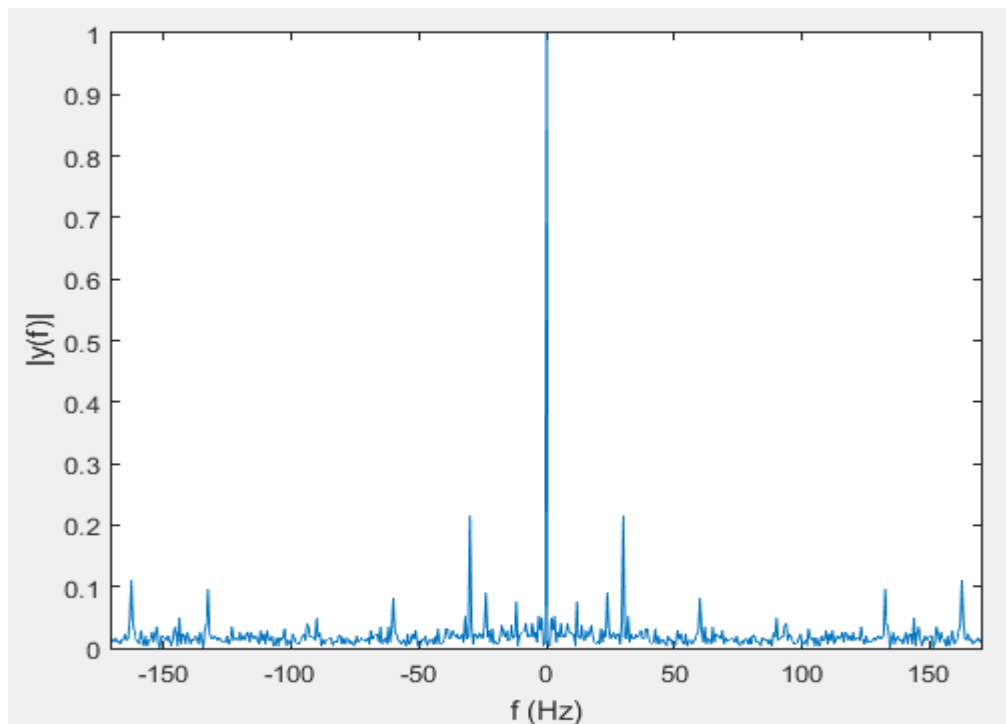
- roulement B\_voie 0:



**Figure 16 - roulement B**

Nous observons dans cette figure le pic de fréquence  $f=107\text{Hz}$ , qui indique le défaut B.

- roulement C\_voie 1:



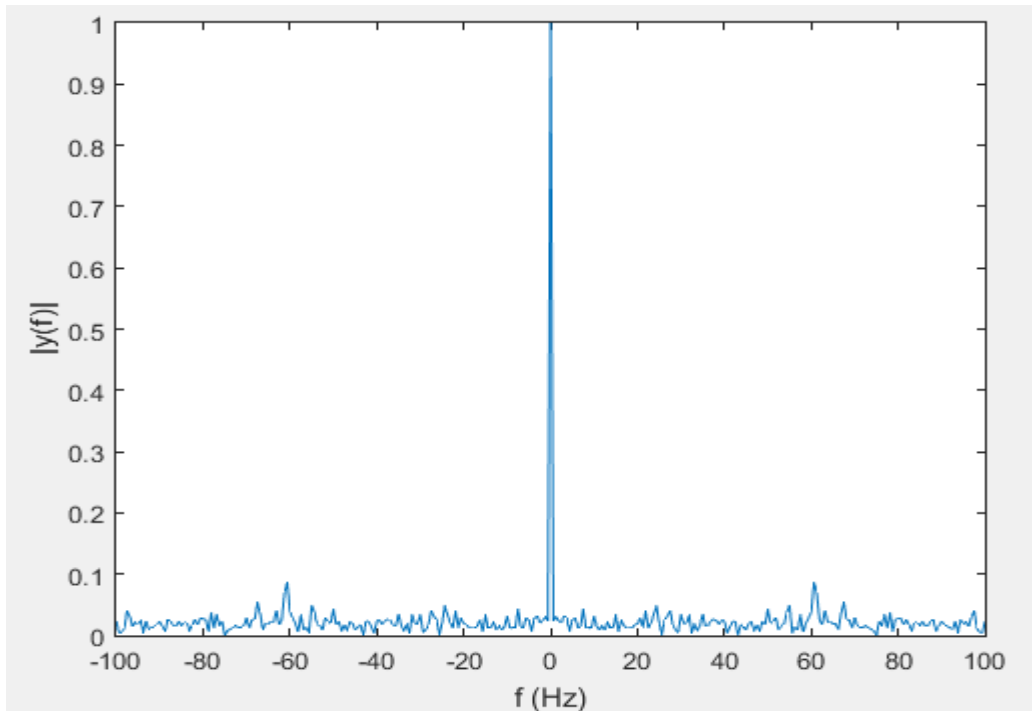
**Figure 17 - roulement C**



Même scénario que précédemment, nous avons constaté le pic de fréquence de rotation  $f_r=30\text{Hz}$  et le pic qui indique le défaut C, et qui est de fréquence  $f=160\text{Hz}$ , nous observons aussi un pic de fréquence entre 100 et 150 qui exprime le défaut d'alignement.

✓ mesure 2:

- roulement sain1\_voie 0:

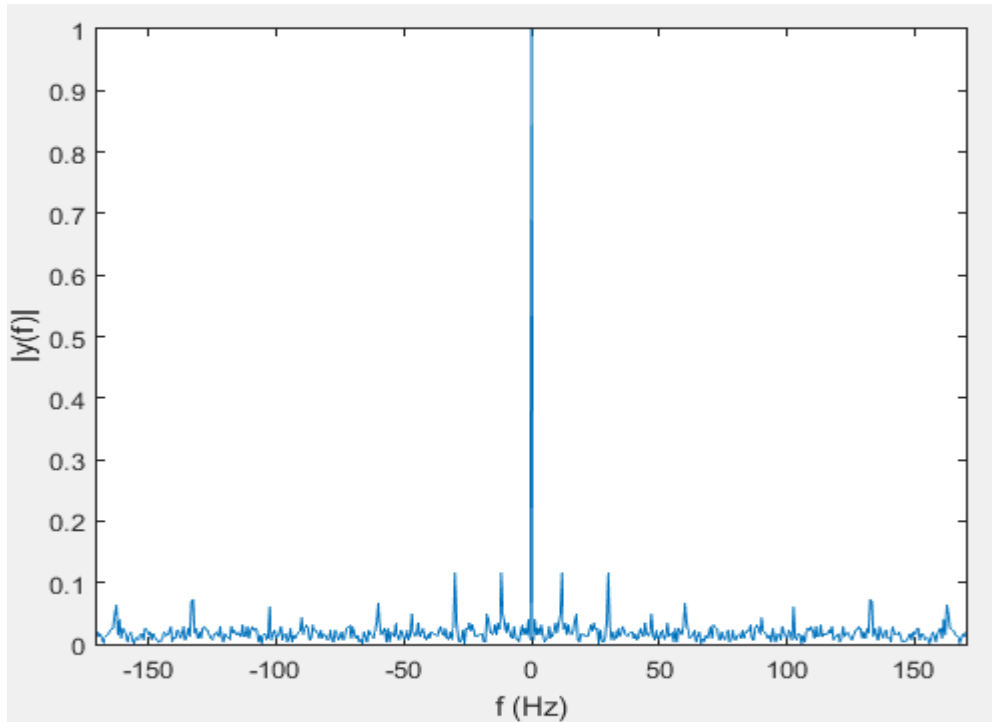


**Figure 18 - roulement sain 1**

Dans cette figure, nous avons un roulement sain, nous constatons un pic de fréquence  $f_1=60\text{Hz}$  qui est de défaut d'alignement.

✓ mesure 3:

- roulement B et C \_melange\_voie 0:

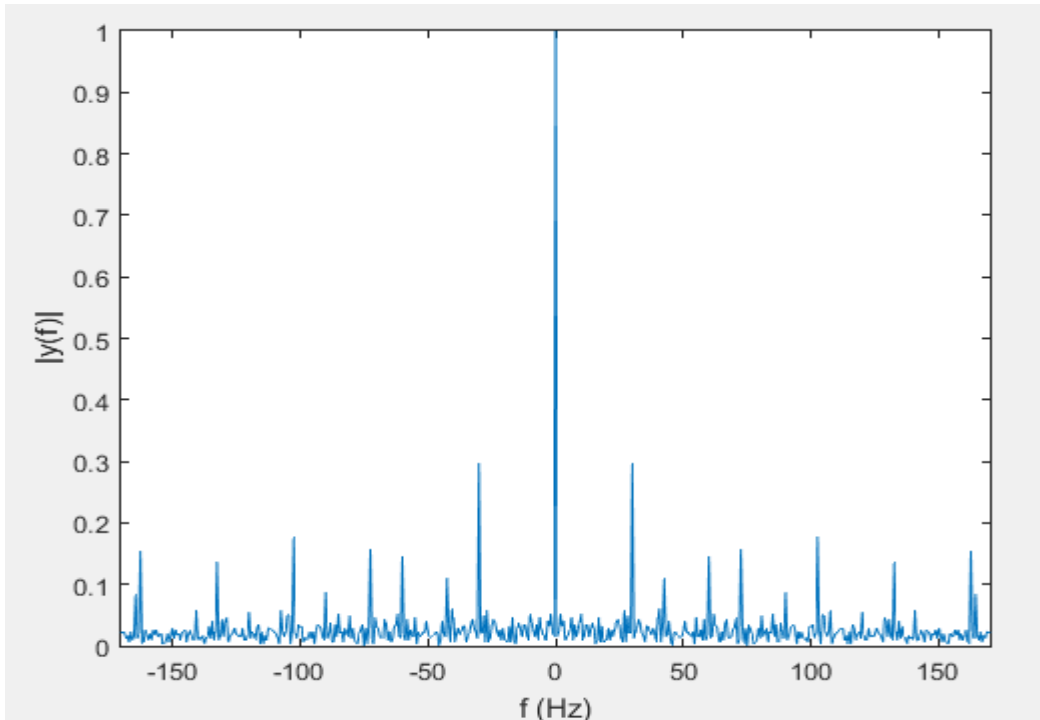


**Figure 19 - roulement BC**

Cette figure présente les roulement B et C en même temps, nous constatons la fréquence de rotation  $f_r=30\text{Hz}$ , la fréquence de cage  $f=10\text{Hz}$ ,  $f=107\text{Hz}$  et  $f=160$  qui expriment respectivement les défauts B et C, nous observons aussi un pic de fréquence entre 100 et 150 qui exprime le défaut d'alignement.

✓ mesure 4:

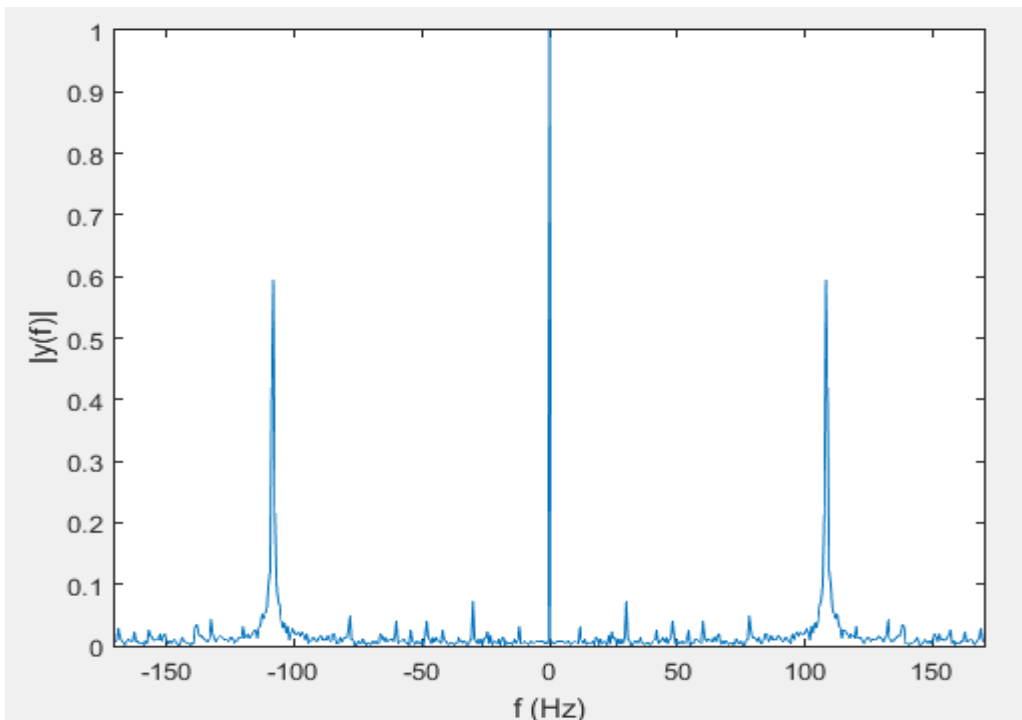
- roulement E\_voie 0 :



**Figure 20 - roulement E**

Cette figure présente le roulement E, nous constatons un pic de fréquence de rotation  $f_r=30\text{Hz}$ , et des pics de fréquences  $f_1=107\text{ Hz}$ ,  $f_2=160\text{Hz}$  qui expriment les défauts B et C.

**Remarque:** après le réglage du défaut d'alignement, nous avons pris une mesure qui sera présentée par la figure suivante:



**Figure 21 - roulement B**



Nous constatons dans cette figure le pic qui exprime la fréquence de rotation  $f_r=30\text{Hz}$  et le pic de fréquence  $f=107\text{ Hz}$  qui indique le défaut B.

En raison de la sensibilité élevée, l'analyse d'enveloppe convient parfaitement à la détection des dommages sur la surface de roulement dans les paliers à roulement. C'est un outil très sensible pour les effets de choc qui apparaissent notamment en cas de dommages au niveau de la roue dentée, au niveau du palier ou en cas de jeu de palier très grand.



## Conclusion

Ce stage réalisé au sein du Laboratoire Signaux, Systèmes et Composants (LSSC) de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès (FSTF), et qui s'est étalé sur une période de deux mois, nous a permis de détecter les différents défauts de roulements dans le banc d'essai à l'aide d'un démonstrateur logiciel Matlab. Nous avons analysé les signaux acquis en utilisant deux types d'analyse: analyse spectrale qui nous a permis que d'observer les pics de défaut d'alignement et l'analyse d'enveloppe qui nous a permis d'observer la fréquence qui caractérisant chaque défaut.

nous n'avons pas pu réaliser assez de mesure pour observer le comportement des pics des défauts D et F et cela revient au manque de temps.

Pour aller donc plus loin dans cette étude d'autre faire points pourront être traités:

- Une étude comparative du capteurs de déplacement et de l'accéléromètre. Et ce dans le but de diagnostiquer des défauts de roulements.
- Faire une étude sur la détection de roulement à basse vitesse.



**UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**







## Bibliographie

- [1] Boulenger et Pachaud, Alain Boulenger and Christian Pachaud. Surveillance des machines par analyse des vibrations. Afnor Paris, 1998.
- [2] Foucault, Michel Foucault était philosophe français, historien d'idées, théoricien social et critique littéraire.
- [3] Manuelle PT 500 - Système de diagnostic de machines ,G.U.N.T, Geratebau GmbH, Barsbuttel,Allemagne 2010.



## Webographie

- |    |                                                                                                                                                                                                                                                       |           |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| [1 | <a href="http://webtools3.skf.com/bearingCalc/submitCalculation.action?null&amp;ni=1800&amp;ne">http://webtools3.skf.com/bearingCalc/submitCalculation.action?null&amp;ni=1800&amp;ne</a>                                                             | 01_05_201 |
| ]  | =0.                                                                                                                                                                                                                                                   | 7         |
| [2 | <a href="http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/vibrations-en-milieu-industriel-mesures-srveillance-et-contrrole-42424210">http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-</a>  | 25_04_201 |
| ]  | <a href="http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/vibrations-en-milieu-industriel-mesures-srveillance-et-contrrole-42424210">th5/vibrations-en-milieu-industriel-mesures-srveillance-et-contrrole-42424210</a> | 7         |
| [3 | <a href="http://www.gantt.com/fr">http://www.gantt.com/fr</a>                                                                                                                                                                                         | 15_05_201 |
| ]  |                                                                                                                                                                                                                                                       | 7         |
| [4 | <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/MATLAB">https://fr.wikipedia.org/wiki/MATLAB</a>                                                                                                                                                               | 16_05_201 |
| ]  |                                                                                                                                                                                                                                                       | 7         |