

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2023



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

**Domaine:** Sciences et Technologie

**Filière :** électromécanique

**Spécialité :** électromécanique

**Par:** - belhaoues imen

- madi amdjed

**Thème**

**Amélioration de la sensibilité des indicateurs scalaires pour  
la détection des défauts d'engrenages par application des  
approches temps- fréquence**

Soutenu publiquement, le 18/06 /2023,

Devant le jury composé de:

**Année Universitaire: 2022/2023**

## *Remerciements*

*Nous tenons tout d'abord à remercier le Bon Dieu pour nous avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail, et qui nous a éclairé les chemins par la lumière de son immense savoir.*

*Nous ne pouvons, réellement, trouver les expressions élégantes que mérite nos encadreur Mme., afin de la remercier pour sa sympathie sa patience, ses encouragements ses conseils, son aide, ainsi que pour le temps qu'elle a consacré pour évaluer.*

*Ainsi nous remercions tous les membres de jury d'avoir accepté examiner notre travail.*

*Nous remercions également ensemble des enseignants du département de génie électrotechnique et automatique.*

*Un remerciement spécial aux Etudiants du département de génie électrotechnique et automatique.*

## Dédicace

Je dédie ce travail à :

### **A ma très chère mère**

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder sante, longue vie et bonheur.

### **A mon cher Père**

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que l'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts tournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

A mes grands-parents et tous les membres de ma famille, petits et grands

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.

A mes chers collègues

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail

A tous ceux qui sont proche de moi et dont je ne suis pas cité leur nom.

**Madi Amdjed**

## Dédicace

Je dédie ce travail à :

### **A ma très chère mère**

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder sante, longue vie et bonheur.

### **A mon cher Père**

« Que dieu aie son âme »

Mon frère et mes petites sœurs Sara et Nada

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

A mes grands-parents et tous les membres de ma famille, petits et grands

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.

A mes chers collègues

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail

A tous ceux qui sont proche de moi et dont je ne suis pas cité leur nom.

**Belhaoues Imen**

## Résumé

L'analyse vibratoire est la meilleur approche de maintenance conditionnelle lorsqu'il s'agit d'installations importantes dans le processus de production. Cette approche est basée sur la mesure d'un signal vibratoire sur la machine et l'analyse de ce signal par les techniques de traitement de signal afin d'extraire le maximum d'information sur l'état de la machine. Les indicateurs scalaires permettent d'obtenir un verdict rapide sur l'état de la machine sans avoir recourt à une post-analyse. Néanmoins, leur sensibilité est réduite notamment en présence des effets de masque. L'objectif de ce mémoire est d'utiliser deux approches temps-fréquence pour améliorer la sensibilité de ces indicateurs scalaires et permettre la détection la plus précoce possible. Comme application, les défauts d'engrenages sont considérés dans ce mémoire vu l'importance majeure de ces organes dans la constitution des machines tournantes.

Mots Clés : Diagnostic vibratoire, défauts d'engrenages, indicateurs scalaires, approches temps-fréquence

## Abstract

Vibration analysis is the best approach to condition monitoring when dealing with major installations in the production process. This approach is based on the measurement of a vibration signal on the machine and the analysis of these signal by signal processing techniques in order to extract the maximum amount of information on the state of the machine. Scalar indicators make it possible to obtain a quick verdict on the state of the machine without resorting to a post-analysis. However, their sensitivity is reduced, especially in the presence of masking effects. The objective of this thesis is to use two time-frequency approaches to improve the sensitivity of these scalar indicators and allow the earliest possible detection. As an application, gear faults are considered in this thesis given the major importance of these components in the constitution of rotating machines.

Keywords: vibration diagnostics, gear faults, scalar indicators, time-frequency approaches.

## ملخص

تحليل الاهتزاز هو أفضل نهج لمراقبة الحالة عند التعامل مع التركيبات الرئيسية في عملية الإنتاج. يعتمد هذا النهج على قياس إشارة الاهتزاز على الجهاز وتحليل هذه الإشارة من خلال تقنيات معالجة الإشارة من أجل استخراج أكبر قدر من المعلومات عن حالة الجهاز. تتيح المؤشرات القياسية إمكانية الحصول على حكم سريع على حالة الماكينة دون اللجوء إلى التحليل اللاحق. ومع ذلك ، تقل حساسيتها ، خاصة في ظل وجود تأثيرات اخفاء. الهدف من هذه الأطروحة هو استخدام نهجين للتردد الزمني لتحسين حساسية هذه المؤشرات العددية والسماح بالكشف في أقرب وقت ممكن. كتطبيق ، يتم أخذ أخطاء التروس في الاعتبار في هذه الأطروحة نظرًا للأهمية الكبرى لهذه المكونات في تكوين الآلات الدوارة.

الكلمات المفتاحية: تشخيص الاهتزازات ، أعطال التروس ، المؤشرات العددية ، نهج التردد الزمني

## Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| Introduction générale.....  | 1         |
| <b>Chapitre I :généralités</b>                                    |           |
| <b>I .Introduction.....</b>                                       | <b>4</b>  |
| <b>I.2.Généralités sur les signaux.....</b>                       | <b>4</b>  |
| <b>I.2.1 Définition d'un signal .....</b>                         | <b>4</b>  |
| <b>I.2.2 Types de signaux .....</b>                               | <b>4</b>  |
| <b>I.2.2.1 Signaux déterministes.....</b>                         | <b>5</b>  |
| <b>I.2.2.2 Signaux aléatoire.....</b>                             | <b>6</b>  |
| <b>I.2.3 L'échantillonnage .....</b>                              | <b>6</b>  |
| <b>I.3.définition de la maintenance .....</b>                     | <b>8</b>  |
| <b>I.4. Les types de la maintenance.....</b>                      | <b>8</b>  |
| <b>I.4.1.La maintenance conditionnelle .....</b>                  | <b>8</b>  |
| <b>I.4.2.La maintenance préventive .....</b>                      | <b>8</b>  |
| <b>I.4.3.La maintenance préventive systématique.....</b>          | <b>9</b>  |
| <b>I.4.4.La maintenance corrective.....</b>                       | <b>9</b>  |
| <b>I.4.5.La maintenance curative .....</b>                        | <b>9</b>  |
| <b>I.4.6.La maintenance palliative .....</b>                      | <b>10</b> |
| <b>I.5.Stratégie de détection des défauts des engrenages.....</b> | <b>10</b> |
| <b>I.5.1.La surveillance .....</b>                                | <b>10</b> |
| <b>I.5.2.La détection .....</b>                                   | <b>10</b> |
| <b>I.5.3.Le diagnostic.....</b>                                   | <b>11</b> |
| <b>I.6. Définition d'engrenage .....</b>                          | <b>12</b> |
| <b>I.7. Les types d'engrenages.....</b>                           | <b>12</b> |
| <b>I.8. Les types de défauts d'engrenages .....</b>               | <b>13</b> |
| <b>I.8.1. Défauts répartis.....</b>                               | <b>14</b> |
| <b>I.8.1.1.Usure .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>I.8.1.2.Piqures .....</b>                                      | <b>14</b> |
| <b>I.8.2. Défauts localisés .....</b>                             | <b>15</b> |
| <b>I.8.2.1.Ecaillage.....</b>                                     | <b>15</b> |
| <b>I.8.2.2.Fissure .....</b>                                      | <b>16</b> |
| <b>I.8.2.3.Grippage .....</b>                                     | <b>17</b> |
| <b>I.9.Conclusion .....</b>                                       | <b>18</b> |

## Chapitre II : Méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts d'engrenages

|   |    |
|---|----|
| II.1. Introduction .....  | 20 |
| II.2. Les méthodes d'analyse .....                                  | 20 |
| II.2.1. Les méthodes temporelles.....                               | 20 |
| II.2.1.1 La valeur efficace ou valeur RMS (Rot Mean Square) .....   | 20 |
| II.2.1 .2 Le facteurs de crête .....                                | 21 |
| II.2.1.3.LeKurtosis.....  | 21 |
| II.2.2. Les méthodes fréquentielles .....                           | 22 |
| II.2.2.1. L'analyse en fréquence .....                              | 22 |
| II.2.2.2. L'analyse d'enveloppe (démodulation de l'amplitude) ..... | 23 |
| II.2.2.3. Le cepstre .....  | 24 |
| II.2.3. Méthodes temps-fréquence.....                               | 24 |
| II.2.3.1. Transformée de Fourier à fenêtre glissante STFT .....     | 25 |
| II.2.3.2. Analyse en ondelettes .....                               | 25 |
| II.2.3.3. Décomposition en Mode Empirique(EMD) .....                | 26 |
| II.3. conclusion.....   | 28 |

## Chapitre III: Analyse statistique des défauts d'engrenages

|  |    |
|--|----|
| III.1. Introduction .....                            | 30 |
| III.2. Le banc d'essai d'engrenage CETIM .....       | 30 |
| III.3. Signaux CETIM.....                            | 32 |
| III.3.1. Présentation des signaux .....              | 32 |
| III.3.2. Analyse satistique des signaux mesurés..... | 34 |
| III.3.filtrage des signaux mesurés .....             | 37 |
| III.4. Conclusion .....                              | 41 |

## Chapitre IV: Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

|   |    |
|---|----|
| IV.1.Introducti.....  | 43 |
| IV.2. Analyse d'enveloppe « HFRT » .....                                  | 43 |
| IV.3.Transformée de Hilbert.....  | 43 |
| IV.4.application de la méthode d'enveloppe aux signaux des 12 jours ..... | 44 |
| IV.4.1.jour .....   | 45 |
| IV.4.4 jour .....   | 49 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>IV.4.5 jour .....</b>               | <b>50</b> |
| <b>IV.4.6. jour .....</b>              | <b>51</b> |
| <b>IV.4.7. jour .....</b>              | <b>52</b> |
| <b>IV.4.8.jour .....</b>               | <b>53</b> |
| <b>IV.4.9.jour .....</b>               | <b>54</b> |
| <b>IV.4.10.jour .....</b>              | <b>55</b> |
| <b>IV.4.11.jour .....</b>              | <b>56</b> |
| <b>IV.4.12.jour .....</b>              | <b>57</b> |
| <b>IV.5.Conclusion .....</b>           | <b>58</b> |
| <b>Conclusion générale .....</b>       | <b>60</b> |
| <b>Référence Bibliographique .....</b> | <b>61</b> |

## Table des figure

### Chapitre 1 Généralités

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1 types de signaux vibratoires .....   | 5  |
| Figure I.2 signal périodique .....  | 5  |
| Figure I.3 discrétisation du signal .....   | 7  |
| Figure I.4. Les différentes étapes du diagnostic industriel.....                                    | 11 |
| Figure I.5 : (a) engrenages parallèles, (b) engrenages concourants, (c) engrenages gauches<br>..... | 12 |
| Figure I.6 Défaut d'usure .....   | 14 |
| Figure I.7 Défaut de piquûres.....  | 15 |
| Figure I.8 Défaut d'écaillage.....  | 16 |
| Figure I.9 Défaut de fissure.....   | 17 |
| Figure I.10 Défaut de grippage .....  | 17 |

### Chapitre II : Méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts d'engrenages

|  |    |
|--|----|
| Figure II.1 Transformée de Fourier d'une somme de deux sinusoïdes..... | 24 |
| Figure II.2 Principe et représentation de la STFT .....                | 26 |

### Chapitre III: Analyse statistique des défauts d'engrenages

|   |    |
|---|----|
| Figure III.1 banc de CETIEM.....  | 31 |
| Figure III.2 Signaux temporels du train d'engrenage.....                      | 33 |
| Figure III.3 les variations des indicateurs statistiques avant filtrage       | 36 |
| Figure III.5 : signaux filtré .....   | 37 |
| Figure III.6 Les variations des indicateurs statistiques après filtrage ..... | 40 |

### Chapitre IV: Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

|  |    |
|--|----|
| Figure IV.1 Spectre d'enveloppe du signal $s(t)$ ..... | 44 |
| Figure IV.2 le signal du 1 <sup>er</sup> jour .....    | 46 |
| Figure IV.4 le signal du 2 <sup>ème</sup> jour .....   | 47 |
| Figure IV.5 le signal du 3 <sup>ème</sup> jour.....    | 48 |
| 1Figure IV.5. Le signal du 4 <sup>ème</sup> jour.....  | 49 |
| Figure IV.6 le signal du 5 <sup>ème</sup> jour.....    | 50 |
| Figure IV.7 le signal du 6 <sup>ème</sup> jour .....   | 51 |
| Figure IV.7 le signal du 7 <sup>ème</sup> jour.....    | 52 |
| Figure IV.9 le signal du 8 <sup>ème</sup> jour.....    | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Figure IV.10 le signal du 9 <sup>ème</sup> jour .....  | 54 |
| Figure IV.11 le signal du 10 <sup>ème</sup> jour ..... | 55 |
| Figure IV.12 le signal du 11 <sup>ème</sup> jour ..... | 56 |
| Figure IV.13 le signal du 12 <sup>ème</sup> jour ..... | 57 |

## Table des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau I .1 paramètres permettant de détecter un défaut sur une machine ..... | 11 |
| Tableau II.1 critère de sévérité de kurtosis .....                             | 22 |
| Tableau II.2 Nomenclature entre spectre et cepstre .....                       | 25 |
| Tableau III.1 rapport d'expertise.....   | 34 |
| Tableau III.2 les indicateurs scalaires filtré de 12 jours.....                | 32 |

# **Introduction générale**

### Introduction générale

La maintenance est devenue une fonction intégrée à la vie de l'entreprise, le rôle du maintenicien ne se limite pas désormais à la réparation des avaries et la prévention de leur apparition.

La maintenance est une notion qui existe même dès la conception de la machine.

Les concepteurs tendent toujours à construire des systèmes fiables, maintenables et cherchent toujours des solutions techniques pour leur permettre une disponibilité et une durabilité maximales assurer la sûreté de fonctionnement des installations industriel apparaît donc comme un défi qui nécessite le concours de tous les acteurs du domaine industriel et par ce fait n'est pas forcément limité au maintenicien seul.

Ceci réussit une organisation rigoureuse et une parfaite harmonie entre la production et la maintenance, chose qui n'est pas toujours évidente en pratique.

depuis plusieurs années l'intégration d'outils et de techniques modernes de maintenance a permis une bonne gestion du service et une maîtrise totale du fonctionnement des installations grâce à une surveillance de leur état évitant par conséquent des interventions tardives.

En intervenant plutôt en amont qu'en aval de la défaillance, ceci permet une détection précoce, le maintenicien peut suivre l'évolution de l'avarie dans le temps et choisir le moment qui convient pour intervenir. ceci n'est en fait possible que par l'utilisation correcte de moyens efficaces entrant dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle. bien que coûteuse cette forme de maintenance est la plus utilisée actuellement pour la surveillance et le diagnostic des installations industrielles ayant une importance capitale dans le processus de production.

Le présent travail est structuré en quatre chapitres suivis d'une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un aperçu général sur le diagnostic des machines tournantes en donnant un rappel sur les différents types de signaux et des maintenances qui existent ainsi que quelques types de défauts qui peuvent apparaître sur l'engrenage.

Le second chapitre est consacré à la présentation des fondements mathématiques des méthodes de traitement de signal utilisées dans la détection des défauts des machines

tournantes telles que : la transformée de Fourier les méthodes complémentaire come l'analyse cepstrale est l'analyse d'enveloppe, les méthodes non stationnaire est non linéaire comme la transformée en ondelette et l'EMD et les méthodes statistiques et temporelles qui utilisent les indicateurs statistiques.

Dans le troisième chapitre nous allons tester la robustesse des indicateurs scalaires qui permettent d'obtenir un verdict rapide sur l'état de la machine mais leur sensibilité est réduite notamment en présence des effets de masque.

Dans le dernier chapitre nous avons présenté une méthode temps-fréquence pour améliorer la sensibilité de ces indicateurs scalaires est permettre une détection précoce et précise de ces défauts.

# **Chapitre 1**

## **Généralités**

## I.1.Introduction

assurer la sûreté de fonctionnement des installations et des moyens de production avec un cout global optimum est un challenge pour les industriels .en effet ce compromis et motivé par le fait que les couts de maintenance peuvent représenter jusqu'à 70% du cout de produit fini ces couts comportent une partie non négligeable à une mauvaise maintenance ce qui exige le choix d'une bonne procédure , de garder et de maintenir les machines industrielles en bonne santé de fonctionnement pour augmenter leur durée de vie. Pour cela, la connaissance des organes mécaniques et leurs défauts aide à atteindre ce but.

Ce chapitre sera donc consacré à quelques notions fondamentales du traitement de signal et ces applications dans le domaine des machines tournantes tels que les engrenages ainsi que des différents types de maintenance utilisé dans le domaine de diagnostic.

## I.2.Généralités sur les signaux

### I.2.1 Définition d'un signal

Un signal, harmonique simple déterministe est une grandeur variable dans le temps et qui est définie par trois valeurs qui sont l'amplitude, la fréquence, et la phase. Son allure physique est définie par la relation (I.1) .

$$s(t) = Am \times \sin(2 \times \pi \times f \times t + \varphi) \quad (I.1)$$

***Am*** :amplitude, ***f*** : fréquence, ***φ*** : phase,

### I.2.2 Types de signaux

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

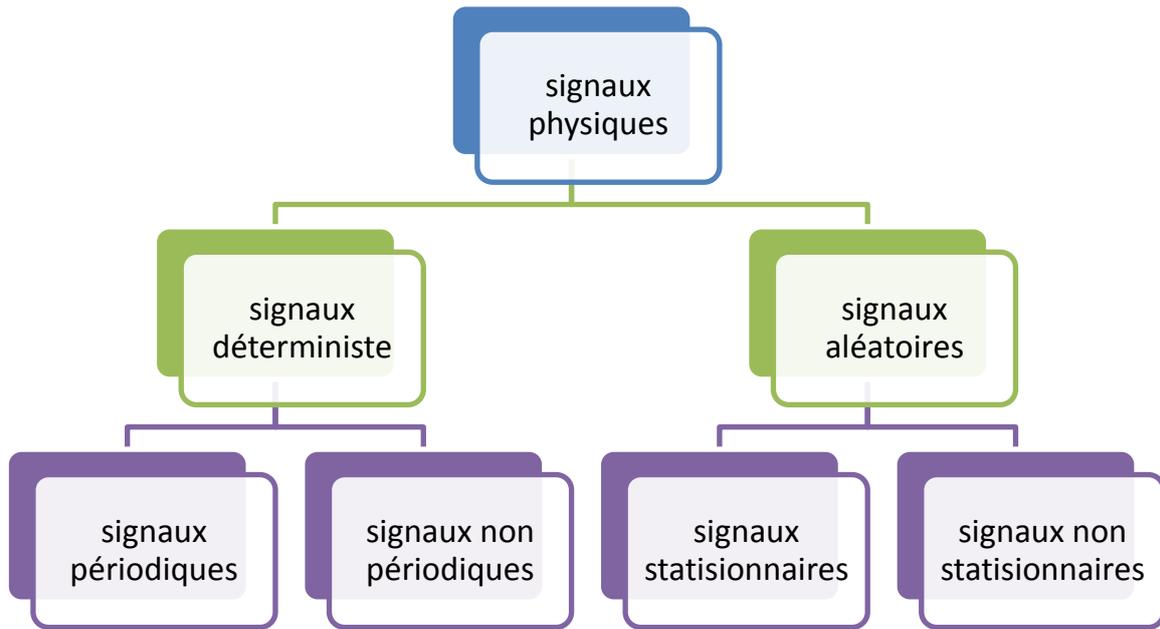


Figure I .1 types de signaux vibratoires

### I.2.2.1 Signaux déterministes : [1]

Un signal est appelé déterministe s'il est possible de déterminer son amplitude pour tout instant « t ». Un tel signal peut être défini par une expression mathématique ou par un graphique. Les signaux déterministes sont déterminés par un ensemble de phénomènes physiques connus ou non [2]. La figure (I.2) illustre ce type de signal. Ils peuvent être périodiques et non périodiques.

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

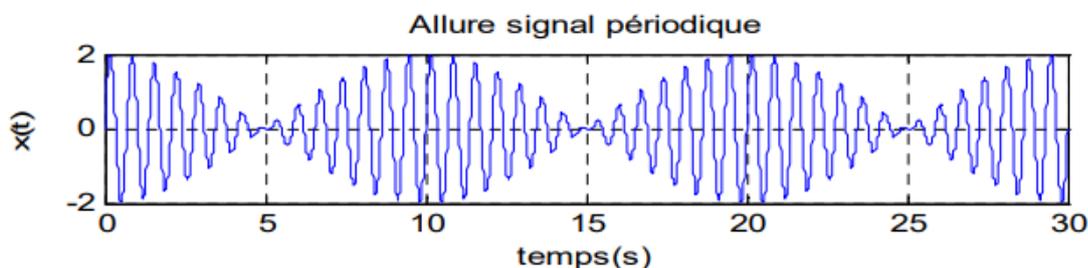


Figure I .2 signal périodique [3]

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

## Chapitre I: généralités

---

Dans le contexte déterministe, on appelle signal non-stationnaire tout signal dont le contenu fréquentiel change dans le temps. Il suffit qu'une seule propriété statistique ou une seule composante fréquentielle soit variable dans le temps pour que l'on puisse parler de signal non-stationnaire [4].

### I.2.2.2 Signaux aléatoire:[1]

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

- **Stationnaires** : ce sont des signaux dont les caractéristiques statistiques sont indépendantes de l'origine du temps.
- **Non stationnaires** : ce sont des signaux qui ont les caractéristiques contraires à celles des stationnaires.

Le signal vibratoire généré par une machine est un signal autant déterministe qu'aléatoire ou transitoire [2].

### I.2.3 L'échantillonnage:

Un échantillon discret est l'ensemble des valeurs d'un signal continu prises aux instants

$t_i = t_0 + i\Delta t$ ,  $i$ : étant un entier positif.

La discrétisation d'un signal induit une perte d'information qui peut être préjudiciable au diagnostic. Cette perte d'information est liée au nombre de composantes des fréquences élevées qu'introduit le processus de discrétisation (théorème de Shannon).

L'opération de discrétisation est effectuée périodiquement sur le signal temporel à une période  $T_e$ . La fréquence d'échantillonnage équivaut alors à  $f_e = \frac{1}{T_e}$  comme le montre la figure (I.3).

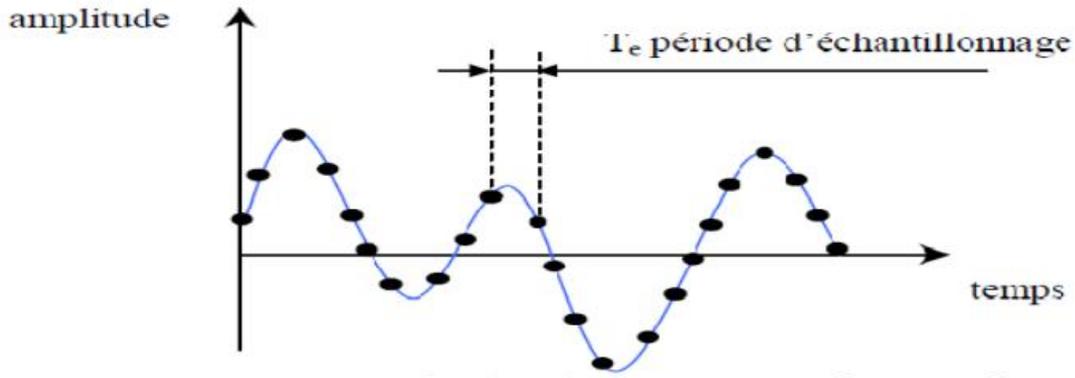


Figure I.3 discrétisation du signal

L'application du théorème de Shannon permet d'éviter le recouvrement spectral mais pour cela il faut choisir : [5]

$$f_e \geq 2 \cdot f_{\max} \quad (I.2)$$

En pratique, la valeur couramment choisie pour la fréquence d'échantillonnage est : [5]

$$f_e = 2,56 f_{\max} \quad (I.3)$$

### I.2.4 Résolution:

Pour réaliser de bonnes mesures, il est nécessaire de choisir une résolution appropriée dans la bande de fréquences de travail. Une résolution est satisfaisante lorsqu'elle permet de dissocier des fréquences voisines. Elle dépend de la fréquence d'échantillonnage et du nombre de points  $N_e$ .

$$\Delta f = \frac{f_e}{N_e} = \frac{1}{N_e \cdot T_e} \quad (I.4)$$

Avec :

$N_e$ : Nombre de points enregistrés.

$T_e$  : Période d'échantillonnage.  $f_e$  : Fréquence d'échantillonnage.

### **I.3.définition de la maintenance**

Selon la norme AFNOR (Association Française de Normalisation) NF-X 60 000, *la maintenance est l'ensemble des activités ayant pour objectif de maintenir ou rétablir un bien dans un état spécifié de fonctionnement pour établir une fonction requise.*

La maintenance rassemble donc l'ensemble des actions techniques (prévention, dépannage, révision et vérification, réparation, contrôle et diagnostic), mais aussi administratives et de management, permettant de conserver le bon fonctionnement des équipements et d'assurer la production.

Les objectifs fixés par la direction permettent de mettre en place une stratégie de maintenance (prise en compte des enjeux humains, techniques, de sécurité, financiers, etc...). De cette stratégie découle ensuite les types de maintenance à déployer. [20]

### **I.4. Les types de la maintenance**

#### **I.4.1.La maintenance conditionnelle**

La maintenance conditionnelle est une forme de maintenance préventive subordonnée à l'état de l'équipement. Elle est donc dépendante de l'expérience et s'appuie sur des informations recueillies en temps réel, ce qui la distingue de la maintenance préventive systématique, effectuée indépendamment de ces informations.

La norme européenne définit la maintenance conditionnelle comme une « maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent ». La maintenance préventive conditionnelle est parfois appelée, maintenance prédictive.[20]

#### **I.4.2.La maintenance préventive**

Ce type de maintenance s'effectue selon des critères prédéterminés, dont l'objectif est de réduire la probabilité de défaillance des matériels en cours d'utilisation, de diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne et de supprimer les causes d'accidents graves. Elle repose sur des vérifications de conformité, une surveillance périodique permettant de relever des anomalies et exécuter des réglages simples sans outillage spécifique, ni arrêt de l'outil de production.

Toute intervention de maintenance inclut un impact financier. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter. C'est

aussi à ce moment que l'entreprise étudie s'il faut décider de passer à l'étape d'une maintenance corrective qui est plus coûteuse.

### **I.4.3.La maintenance préventive systématique**

Elle suit un échéancier généralement établi selon le temps mais aussi selon la quantité de produits fabriqués, la distance parcourue lorsqu'il s'agit d'acheminer des biens, ou encore le nombre de cycles effectués, etc. Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle.

Cette méthode de maintenance nécessite de connaître le comportement du matériel, les modes de dégradation et le temps moyen de bon fonctionnement entre deux avaries. Elle s'applique pour la maintenance des équipements soumis à réglementation comme les appareils de levage, extincteurs, équipements sous pression, convoyeurs, ascenseurs, etc. ; pour les équipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves (avions, trains), les équipements ayant un coût de défaillance élevé. C'est le cas des éléments d'une chaîne de production automatisée, comme les pompes industrielles, dans le secteur de la chimie, l'agroalimentaire, la métallurgie ou la chaudronnerie etc. Les industriels ont également recours à cette méthode pour les matériels dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevées au cours de leur temps de service : consommation excessive d'énergie, éclairage par lampes usagées, allumage et carburateur déréglés, etc.

### **I.4.4.La maintenance corrective**

Les opérations de maintenance corrective ont lieu une fois que la défaillance est repérée. Il s'agit en somme d'un dépannage puisque la maintenance corrective est exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

### **I.4.5.La maintenance curative**

Cette forme de maintenance est appliquée lorsqu'un dysfonctionnement est détecté. Elle a pour objet de réparer cette anomalie. Contrairement au palliatif qui agit dans l'urgence, il s'agit là d'une véritable restauration à long terme, de manière définitive La maintenance curative est un dépannage prioritaire car les arrêts de production provoquent des pertes lourdes pour les entreprises.

### **I.4.6.La maintenance palliative**

Elle a pour objectif de rétablir un bien dans un état spécifié : cela ne signifie pas nécessairement son état initial. Par exemple, si une fuite dans une tuyauterie industrielle ou une cuve de stockage survient, l'opération de maintenance palliative devra faire en sorte que ces outils retrouvent leur fonction requise, sans pour autant qu'ils retrouvent leur aspect d'origine. Il s'agit d'une action destinée à permettre à un bien de fonctionner provisoirement.

La maintenance palliative n'est pas une action prévue et ne fait donc pas partie d'une politique de maintenance. Ces actions de dépannage provisoire sont à distinguer de la réparation qui caractérise la maintenance curative. La maintenance palliative peut être dangereuse. Le technicien doit donc, en accord avec la direction de la société, faire la balance entre le danger que pourrait représenter l'arrêt de la production et celui inhérent à toute maintenance palliative. [21]

### **I.5.Stratégie de détection des défauts des engrenages**

#### **I.5.1.La surveillance**

La surveillance est l'observation «une observation systématique et significative». La surveillance est un dispositif passif informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les premières causes.

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

#### **I.5.2.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.

Le tableau(I.1) suivant résume le changement du niveau vibration d'une machine intervient dans la plupart des défauts :

| Paramètres \ Défaits | Température | Pression | débit | Analyse d'huile | Vibration |
|----------------------|-------------|----------|-------|-----------------|-----------|
| Déséquilibre         |             |          |       |                 | X         |
| Roulement            | X           |          |       | X               | X         |
| Palier               | X           | X        | X     | X               | X         |
| Engrenage            | X           |          |       | X               | X         |
| Frottement           | X           |          |       |                 | X         |

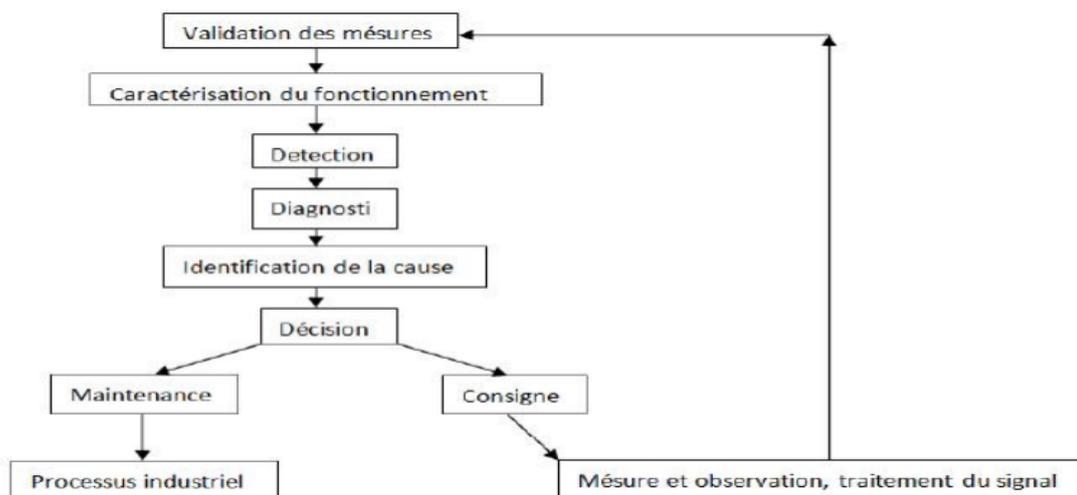
**Tableau I.1** paramètres permettant de détecter un défaut sur une machine[2].

### I.5.3.Le diagnostic

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

Deux tâches essentielles en diagnostic (**figure I.4**):

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



**Figure I.4.** Les différentes étapes du diagnostic industriel

### I.6. Définition d'engrenage

Un engrenage est un mécanisme composé de deux roues dentées mobiles autour d'axes de position fixe et dont l'une entraîne l'autre par l'action de dents successivement en contact et on dit que les deux roues sont conjuguées.

La petite roue se nomme le pignon, la grande roue extérieure s'appelle la roue, la grande roue intérieure s'appelle la couronne. L'une des roues peut avoir un rayon infini, elle s'appelle alors une crémaillère.

### I.7. Les types d'engrenages

Un engrenage est un mécanisme qui contient deux roues dentées s'engrenant l'une avec l'autre, tel qu'il y ait une roue menant et une roue menée. Cette association assure la transmission du mouvement, et donc de l'énergie mécanique, entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse plus ou moins constant [7].

Comme montré dans la figure 5, selon la position relative des deux arbres connectés, il existe trois classes d'engrenages :

- Engrenages parallèles, quand l'alignement des arbres est parallèle. Les engrenages planétaires, par exemple ;
  - Engrenages concourants, s'il y a une intersection des prolongements des arbres ;
- Engrenages gauches, lorsque les arbres sont en position relative quelconque .Les roues et vis sans fin, par exemple.



**Figure I.5 : (a) engrenages parallèles, (b) engrenages concourants, (c) engrenages gauches [8]**

Les dentures des engrenages peuvent être droites, hélicoïdales ou à chevrons. Ainsi, les efforts sont soit uniquement radiaux sur les engrenages parallèles à dentures droites ou à chevrons, soit mixtes (radial et axial) sur les engrenages à dentures hélicoïdales ainsi que sur les engrenages gauches et concourants.

## Chapitre I: généralités

---

Les engrenages ont deux opérations majeures qui sont soit la réduction, soit la multiplication de la vitesse de rotation de transmission et du couple moteur associé. La vitesse de rotation augmente si la roue menée possède un nombre de dents supérieur à la roue menante et elle diminue si le nombre de dents est inférieur. Ainsi, le rapport de vitesse  $R$  entre les deux roues est donné par l'équation (I.5).

$$R = \frac{Z_1}{Z_2} \text{(I.5)}$$

Où  $Z_1$  le nombre de dents de la roue menée et  $Z_2$  le nombre de dents de la roue menant.

Soit un engrenage regroupant deux roues dentées dotées de  $Z_1$  et  $Z_2$  nombre de dents et tournants aux fréquences  $f_1$  et  $f_2$  respectivement. Quand une dent de la roue menante s'engrène dans la roue menée, il se crée une prise de charge périodique au rythme d'engrènement des dents [8].

Ce choc se produit selon la fréquence d'engrènement  $f_e$  qui est égale à la fréquence de rotation de la roue en question multipliée par son nombre de dents, comme le montre l'équation (I.6).

$$f_e = f_1 \cdot Z_1 = f_2 \cdot Z_2 \text{(I.6)}$$

Suite à sa rigidité variable, le processus d'engrènement engendre un glissement des dents qui produit des vibrations et des variations de couple. La majorité des phénomènes naturels sont non-linéaires et la plupart de ces signaux possèdent un contenu fréquentiel variable. Ainsi, un défaut au niveau d'une dent va altérer les modulations d'amplitude et de phase de la dynamique de l'engrenage. Par conséquent, tout changement au niveau de ces signaux peut être spécifiquement analysé pour fournir une indication des défauts possibles.

### I.8. Les types de défauts d'engrenages

Les engrenages sont globalement soumis à des couples élevés et des conditions de fonctionnement sévères provoquant ainsi des défaillances qu'il faut surveiller. A cet effet, il est nécessaire de connaître les différents types de défauts rencontrés qui surviennent au niveau des engrenages d'un réducteur simple sont des défaillances réparties sur toutes les dentures et des défauts localisés sur une partie des dentures. Ce sont des dégradations qui apparaissent principalement lors de la transmission. Les défauts de fabrication tels que l'erreur de profils des dents et l'excentricité de roues ainsi que les défauts d'installation comme les défauts de parallélisme. [9]

### I.8.1. Défauts répartis

#### I.8.1.1. Usure

Comme le montre la figure (I.6), l'usure est le phénomène de perte de matière dû au frottement abrasif de deux surfaces en contact l'une avec l'autre. Ce phénomène est ainsi causé par les contraintes répétées en surface, dont l'importance dépasse l'endurance admissible de la matière. L'évolution de cette usure est associée à la vitesse de glissement et à la charge mécanique entraînée, ainsi qu'à l'influence des éléments abrasifs introduits dans le produit de lubrification. La progression de l'usure naturelle est inversement proportionnelle à la dureté superficielle de la denture et se propage en surface de façon continue. Cette usure survient quand le produit de lubrification est pollué de particules abrasives ou quand il possède un caractère corrosif. Le défaut d'usure peut mener à un fonctionnement défectueux. [10]

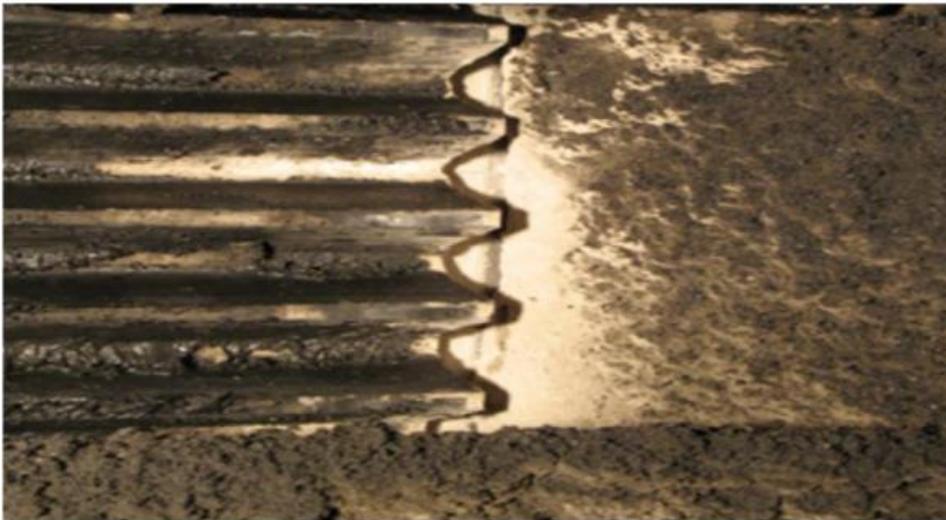
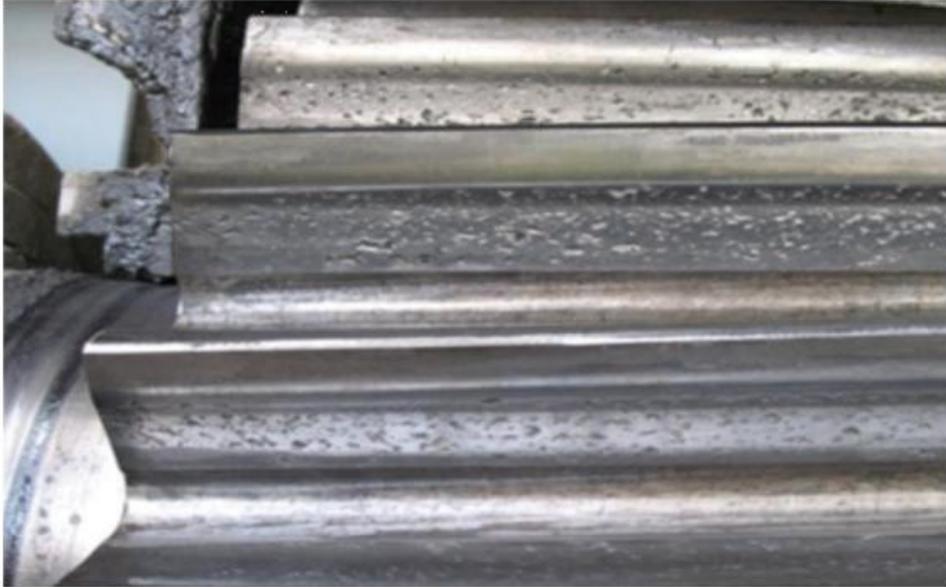


Figure I.6 Défaut d'usure

#### I.8.1.2. Piqûres

Les piqûres, ou putting, représentent des cavités peu profondes, n'excédant pas 0,3 à 0,5 mm de profondeur, qui peuvent affecter toutes les dents de l'engrenage. Ce type de défaut affecte particulièrement les zones du cercle primitif des dentures. Cette dégradation prend généralement naissance au niveau des engrenages en acier de construction relativement peu dur et donc plus sensibles aux effets cumulatifs des surcharges. Quand la viscosité du produit de lubrification est suffisamment importante, le film d'huile qui sépare les surfaces de contact est épais et il y a donc moins de risque d'apparitions de piqûres. Ainsi, l'existence des piqûres est liée à un rapport de l'épaisseur de film de lubrification sur la rugosité composite du

matériau trop insuffisant pour éviter les contacts entre les irrégularités des surfaces. Cette défaillance prend souvent effet à la suite de désalignements et de déviations d'axes ou à cause de suppressions locales.[10]



**Figure I.7 Défaut de piqûres**

### **I.8.2. Défauts localisés**

#### **I.8.2.1. Ecaillage**

L'écaillage est un phénomène qui apparaît sous forme de trous plus profonds et plus larges mais moins nombreux par rapport au défaut de piqûres. La progression de cette défaillance survient sous l'effet de la fatigue en sous-couche, en particulier au niveau du point de cisaillement maximal de l'engrenage. L'écaillage est le plus souvent causé par l'effet de la pression superficielle du contact quand celle-ci dépasse le seuil de tolérance admissible du matériau. Ce dépassement est souvent attribué à une mauvaise distribution de charge mécanique. L'écaillage prend généralement naissance au sein des engrenages cimentés qui possèdent une couche superficielle durcie à la surface et qui ne sont donc quasiment pas affectés par le phénomène d'usure. Il s'agit d'engrenages relativement très utilisés aux vues de leur capacité à transmettre des couples mécaniques considérables tout en étant caractérisés par des dimensions réduites. La propagation de l'écaillage peut rapidement provoquer la rupture des dents, qui est considérée comme la conséquence de ce phénomène plutôt qu'un défaut à part entière. Ces dégradations entraînent ainsi la mise hors service de l'opération d'engrènement.[10]



**Figure I.8 Défaut d'écaillage**

### **I.8.2.2.Fissure**

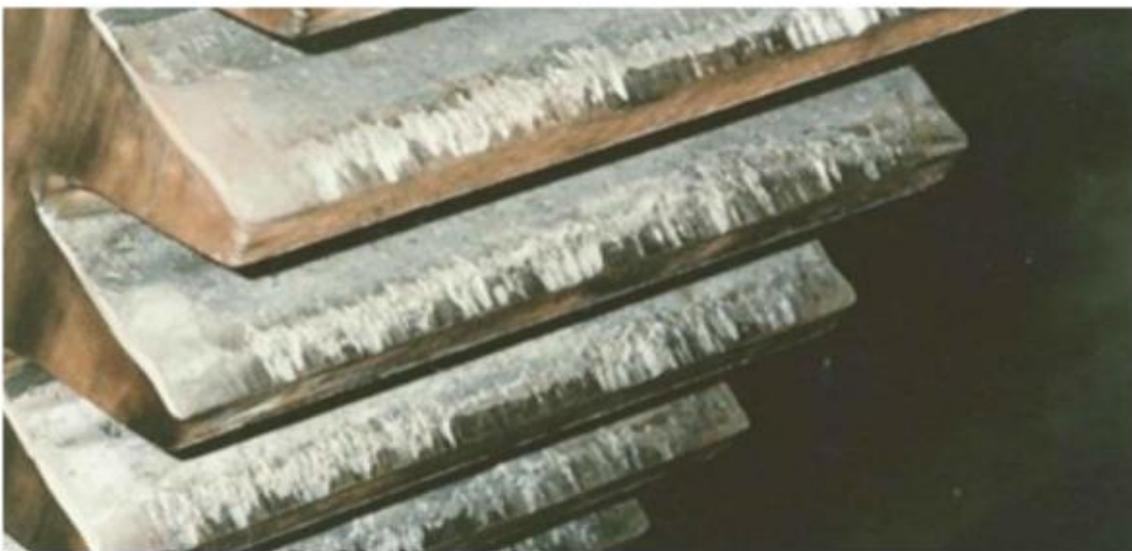
La fissuration se produit sous l'effet de la fatigue principalement à chaque mise en charge et elle est localisée dans les zones où les contraintes sont importantes, comme dans les arrondis des pieds des dents ou encore les bords des dents sollicités en traction. La manifestation de ce phénomène est causée par le dépassement des contraintes appliquées aux pieds des dents par rapport à la limite de fatigue et les limites élastiques des engrenages. La fissuration provoquée fragilise la dent et diminue la rigidité du matériau, favorisant ainsi la propagation des fissures sur toute sa surface. Cette dégradation survient généralement au niveau des aciers fins et durcis qui s'avèrent être particulièrement sensibles aux concentrations des contraintes de traction au niveau des dentures.[10]



**Figure I.9 Défaut de fissure**

### **I.8.2.3. Grippage**

Le grippage est la conséquence de la destruction du film protecteur du produit lubrifiant sous l'effet du frottement sous charge et cette dégradation est donc générée par l'élévation de la température. Cette avarie est liée au contact métal qui se produit lors de l'engrènement et entraîne l'enlèvement de la matière métallique par plaques. La probabilité du phénomène de grippage dépend principalement de l'état du lubrifiant, ainsi que des conditions de service. Le grippage est localisé dans les zones de glissement et provoque généralement l'amplification de la déformation des profils des dents. Cette déformation induit des variations anormales des vitesses angulaires et des angles de pression.[10]



**Figure I.10 Défaut de grippage**

### **I.9.Conclusion**

Ce chapitre rappelle les généralités sur les signaux ainsi que les différents types de maintenances.

Dans le but de maintenir les machines industrielles en bonne santé de fonctionnement pour augmenter leurs durées de vie.

Cela implique la connaissance des organes mécaniques et leurs défauts, dans le chapitre suivant nous allons aborder les méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts d'engrenage.

## **Chapitre II**

# **Méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts d'engrenages**

### **II.1. Introduction**

L'analyse vibratoire est très importante dans le domaine de la surveillance et du diagnostic des organes mécanique elle extrait les informations concernant l'état de fonctionnement de ce dernier en utilisant des méthodes du traitement du signal.

L'analyse et le diagnostic des défauts d'engrenages sont essentiels pour assurer le bon fonctionnement des systèmes mécaniques et éviter les défaillances.

Les méthodes de diagnostic des défauts d'engrenages sont basées sur la détection et l'interprétation des signaux caractéristiques émis par les défauts, tels que les vibrations, les bruits, les températures anormales ou les vibrations de courant.

Donc, l'analyse vibratoire est une technique essentielle pour assurer la fiabilité et la performance des machines et des équipements industriels.

Elle permet de prévenir les pannes, de réduire les couts de maintenance et d'optimiser la disponibilité des machines.

En tant qu'outil de diagnostic puissant, elle joue un rôle clé dans la gestion de la maintenance préventive et la maximisation de la productivité des installations industrielles.

Dans ce chapitre nous allons faire un aperçu général sur les techniques de la surveillance les plus utilisés dans le domaine de traitement des signaux vibratoires.

### **II.2. Les méthodes d'analyse**

Il existe différents outils d'analyse vibratoire permettant de détecter et de diagnostiquer l'apparition des défauts dans les engrenages.

De nombreuses publications synthétisent ces différentes méthodes ou outils. Elles sont généralement classées en trois grandes familles.[11]

#### **II.2.1. Les méthodes temporelles**

Les méthodes temporelles sont basées sur l'analyse statistique du signal recueilli, elles s'appliquent à des machines simples et consistent à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevées. Le but est de minimiser l'influence des vibrations induites par la rotation des arbres. Cette méthode utilise des indicateurs scalaires qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal. Sa valeur peut ne pas

## Chapitre II : méthode d'utilisé pour le diagnostic des défauts d'engrenages

avoir de signification intrinsèque, mais c'est son évolution dans le temps qui est significative du défaut.

### II.2.1.1 La valeur efficace ou valeur RMS (Rot Mean Square)

C'est un indicateur scalaire « large bande » très utilisé bien qu'il présente des inconvénients. Il est

Facile et rapide, mais une variation excessive du niveau RMS signifie en général un changement de l'état de fonctionnement et donc une éventuelle défaillance. Il s'écrit sous forme discrétisée:

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

Où :

$x(n)$  est le signal temporel mesuré,  $N_e$  représente le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Globalement, la valeur efficace ne détecte pas tous les défauts et donne une alarme tardive, ce qui représente un inconvénient majeur dans le cadre de la maintenance conditionnelle. Aussi si difficile de déterminer des seuils, sa valeur isolée ne peut être significative d'un défaut, sensible à l'énergie du signal et pas à sa forme.

### II.2.1 .2 Le facteurs de crête

Contrairement à la valeur efficace de l'amplitude d'un signal, des indicateurs spécifiques comme le facteur crête ou le kurtosis sont mieux adaptés pour représenter un signal induit par des forces impulsionnelles. Ces indicateurs sont issus des valeurs crêtes du signal temporel mesuré. Il s'écrit sous la forme :

$$\text{facteur crête} = \frac{\text{valeur crête}}{\text{valeur efficace}} = \frac{\sup|x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2}} \quad (\text{II.2})$$

Cet indicateur est sensible aux défauts de type choc et son seuil de détection généralement au-delà de 6. mais l'inconvénient de ce facteur et sa sensibilisation au bruit (plus efficace sur les signaux filtrés).

### II.2.1.3. Le Kurtosis

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

$$\mathit{kurtosis} = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{X})^4}{\left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{X})^2 \right]^2} \quad (\text{II.3})$$

Où  $M_4$  et  $M_2$  sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2 ;

$x(n)$  est le signal temporel,  $\bar{X}$  est la valeur moyenne des amplitudes ;

$N$  est le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Le principale avantage du kurtosis réside dans le fait qu'il ne tient pas compte de l'historique, et qu'il donne une valeur intrinsèque de l'état de l'engrenage. Le kurtosis doit cependant être utilisé avec beaucoup de précaution, car il est très sensible aux chocs, ce qui oblige un emploi du kurtosis dans un environnement peu complexe afin de ne pas commettre d'erreurs de diagnostic.

Pour un signal de distribution gaussienne, le kurtosis est égale à 3.

Le tableau (II.1) suivant résume les états critère de sévérité de kurtosis:

| Kurtosis  | Sévérité                    |
|-----------|-----------------------------|
| 1.5       | Bon : signal harmonique     |
| 2.8 à 3.2 | Passable : signal aléatoire |
| 3.2 à 4   | Elevé                       |
| >4        | Critique                    |

Tableau II.1 critère de sévérité de kurtosis [12]

### II.2.2. Les méthodes fréquentielles

Les méthodes fréquentielles sont basées sur la transformée de Fourier. La connaissance des fréquences caractéristiques permet d'identifier et de localiser les défauts issus des composants

## Chapitre II : méthode d'utilisé pour le diagnostic des défauts d'engrenages

mécaniques en analysant leur spectre. Elles sont souvent utilisées pour les machines complexes comportant beaucoup de composants mécaniques.

### II.2.2.1. L'analyse en fréquence

L'analyse en fréquence est devenue l'outil fondamental pour le traitement des signaux vibratoires. Elle s'appuie sur la transformée de Fourier qui permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître le contenu spectral d'énergie ou de puissance, présent dans le signal à la fréquence  $f$ , et donc de détecter la présence d'un défaut générant un choc périodique à une fréquence de défaut. La comparaison de cette fréquence avec celle des défauts théoriques potentiels (fréquences caractéristiques) sur l'engrenage permet sa localisation.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi f t} dt \quad (\text{II.3})$$

Où  $X(f)$  est la transformée de Fourier,  $t$  est la variable temps,  $f$  est la variable fréquence. Dans la pratique, on utilise la transformée de Fourier discrète rapide (FFT) sur des signaux numérisés :

$$X(k\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nt_e) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \quad (\text{II.4})$$

Où :

$X(k\Delta f)$  est la transformée de Fourier discrète rapide,

$t_e$  est la période d'échantillonnage du signal temporel,

$n$  est le numéro de l'échantillon,  $k$  est le numéro de la ligne fréquentielle,  $\Delta f$  est l'intervalle entre deux raies fréquentielles,  $N$  est le nombre d'échantillons prélevés.

Sur la figure (II.1) il est possible de visualiser la transformée de Fourier de la somme de deux signaux sinusoïdaux de fréquences respectives 140Hz et 250Hz. Elle présente un lobe principal par fréquence et plusieurs lobes secondaires.

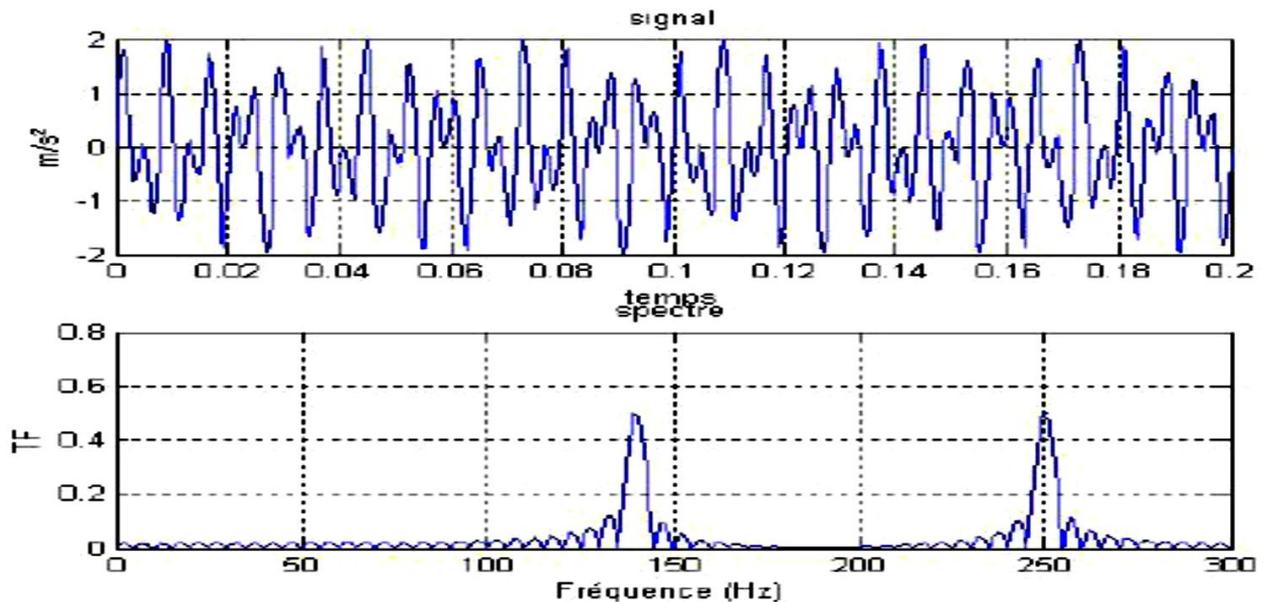


Figure II.1 Transformée de Fourier d'une somme de deux sinusoïdes

### II.2.2.2. L'analyse d'enveloppe (démodulation de l'amplitude)

L'analyse d'enveloppe est une méthode qui permet de détecter des chocs périodiques à partir des résonances de structure.

Cette technique repose sur l'étude du signal enveloppe obtenu grâce à la transformée de Hilbert après filtrage dans une bande de fréquence centrée sur une ou plusieurs résonances de structure. En effet lors de l'occurrence d'un défaut d'engrenage, la fréquence de résonance du système est modulée par la fréquence caractéristique du défaut. Pour extraire cette fréquence il faut avoir recours à un filtrage passe-bande du signal autour d'une des résonances significatives du système, procéder à la démodulation par la transformée de Hilbert, calculer une enveloppe et enfin calculer un spectre d'enveloppe. Celui-ci peut alors être analysé comme n'importe quel spectre FFT classique.

### II.2.2.3. Le cepstre

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

$$C[s(t)] = TF^{-1} \log|[s(t)]|^2 \quad (II.5)$$

Il a pour but d'identifier et de quantifier toutes les structures périodiques contenues dans le spectre. Il permet de définir des indicateurs adaptés à la détection précoce des défauts induisant, à des stades plus ou moins avancés, des énergies vibratoires que les indicateurs issus de techniques traditionnelles mettraient difficilement en évidence. Le cepstre et ses

## **Chapitre II : méthode d'utilisé pour le diagnostic des défauts d'engrenages**

dérivées représentent les amplitudes des composantes dont les quéfrence 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. Le tableau (II.2) montre la similitude/différence entre spectre et cepstre .

| <b>Analyse spectrale</b> | <b>Analyse cepstrale</b> |
|--------------------------|--------------------------|
| Spectre                  | Cepstre                  |
| Fréquence                | Quéfrence                |
| Harmonique               | Rahmonique               |
| Phase                    | Saphe                    |
| Filtre                   | Lifre                    |

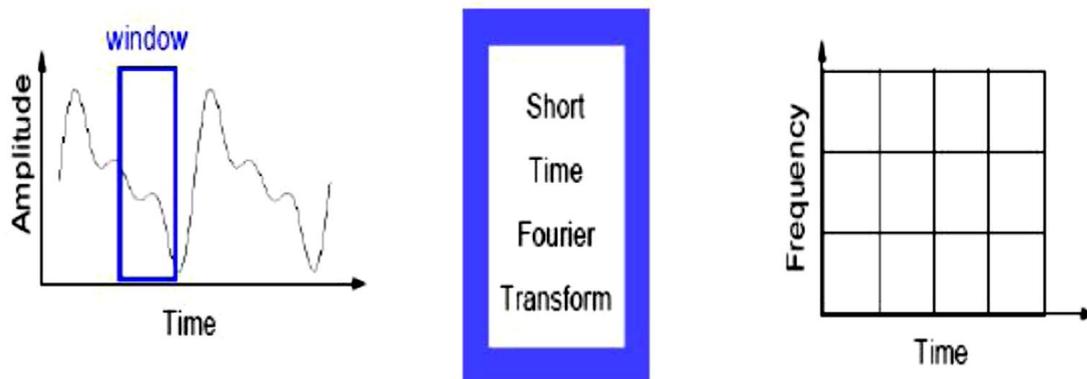
**Tableau II.2 Nomenclature entre spectre et cepstre [12]**

### **II.2.3. Méthodes temps-fréquence**

#### **II.2.3.1. Transformée de Fourier à fenêtre glissante STFT**

Pour réaliser une analyse spectrale locale d'un signal  $f(t)$  autour d'un instant arbitraire  $t_0$ , il faudrait calculer une transformée de Fourier (TF) du voisinage immédiat de ce point. L'intégrale de Fourier nécessitant un temps d'intégration infini, cela suppose que l'aspect local soit introduit en n'observant le signal que dans un certain intervalle  $T$  proche de  $t_0$ , dans lequel on le considère comme stationnaire. Les fonctions sinusoïdales qui servent à décomposer le signal dépendent à la fois du temps et de la fréquence. L'un des premiers à avoir appliqué ce principe aux transformées de Fourier est le physicien Dennis Gabor en 1940. On parle alors de transformées de Fourier à fenêtre glissante.[11]

L'idée de base consiste à découper le signal en plages temporelles finies. On réalise sur chaque plage, une analyse de Fourier. Cette analyse est donc dépendante de la localisation de la plage, qui donne un aperçu sur ce concept.



**Figure II.2 Principe et représentation de la STFT**

### II.2.3.2. Analyse en ondelettes

L'analyse en ondelettes est sans doute le pilier de l'analyse temps-fréquence moderne des signaux vibratoire.

Elle se distingue par l'utilisation de fonctions analysantes appelées ondelettes, ayant la capacité de dilatation et de translation contrairement aux filtres et ou fenêtres glissantes utilisées précédemment.

La transformée en ondelettes remplace les sinusoïdes de la transformée de fourrier par une famille de translations et de dilatation d'une même fonction appelée ondelette mathématiquement la famille d'ondelettes se met sous la forme :

$$\psi(a, b)(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{II.6})$$

Avec :

**a** Paramètre d'échelle ou de dilatation et **b** paramètre de translation.

En mottant  $\psi^*$  la conjuguée de  $\psi$ , la transformée continue en ondelettes *CWT* d'un signal  $s(t)$  est donnée par :

$$CWT = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (\text{II.7})$$

### II.2.3.3. Décomposition en Mode Empirique(EMD)

Le point faible de l'analyse en ondelettes est le fait que le résultat dépend uniquement du type d'ondelettes utilisées. L'EMD est une auto-décomposition du signal sans utiliser ni filtres, ni fenêtre, ni ondelettes, c'est donc une analyse adaptive. Dans l'EMD chaque signal complexe est décomposé en un certain nombre de Fonctions de Mode Intrinsèque (IMF) qui

## **Chapitre II : méthode d'utilisé pour le diagnostic des défauts d'engrenages**

représentent les modes oscillatoires naturels contenus dans le signal. Un IMF doit impérativement satisfaire un certain nombre de conditions.

## **Chapitre II : méthode d'utilisé pour le diagnostic des défauts d'engrenages**

### **II.3. conclusion**

Ce chapitre a été consacré à donner un aperçu général sur les méthodes utilisées pour la surveillance et l'analyse des signaux vibratoires telles que les indicateurs scalaires et la transformée en enveloppes et la décomposition en modes empiriques (EMD), leurs application dans le domaine de diagnostic des défauts.

# **Chapitre III: Analyse statistique des défauts d'engrenages**

## **Chapitre III : analyse statistique des défauts d'engrenages**

---

### **III.1. Introduction**

Etudier les défauts des engrenages est très important dans le but de maintenir le bon fonctionnement des machines tournantes et de les détecter de façon précoce avant que cette machine ne tombe en panne. Ces constituants jouent respectivement un grand rôle dans la transmission de puissance et dans le guidage. Ce qui implique que le savoir des signes ou des symptômes d'existence d'un ou plusieurs défauts aidera à augmenter la durée de vie des machines, donc maintenir leur bon fonctionnement.

La méthode d'ondelette couplée avec la transformée de Hilbert sont appliquées sur ces signaux mesurés pour voir s'il y a une amélioration ou non dans la sensibilité de ces indicateurs, et voir la capacité de ces méthodes d'extraire les fréquences caractéristiques dans les différents cas.

Dans ce chapitre, nous allons comparer entre les indicateurs scalaires avant et après l'utilisation du pour détecter la présence de défaut sur les engrenages de façon précoce.

Les signaux de vibrations que nous proposons d'étudier ont été fournis par le CETIM « Centre des technologies industriel mécanique -France- » à plusieurs laboratoires de traitement du signal et des images. Au cours de cette campagne d'essai, l'engrenage passe de l'état de bon fonctionnement à celui d'engrenage détérioré.

### **III.2. Le banc d'essai d'engrenage CETIM**

Les tests ont été effectués sur un banc d'essai de grandeur industrielle fonctionnant 24h/24h. Le dimensionnement des roues de l'engrenage cémenté trempé, ainsi que les conditions de fonctionnement (vitesse, couple) sont fixés de façon à obtenir un écaillage sur toute la largeur d'une dent (qui fixe la fin de l'essai, la rupture étant imminente) en environs 12 jours. Tous les jours après l'acquisition des signaux vibratoires, le banc est arrêté pour observer l'état des dents de roues. Un rapport d'expertise est ainsi rédigé (tableau III .1).

Le système relativement simple nous permettra d'effectuer les différents calculs et d'extraire les différents indicateurs sur les signaux enregistrés.

Le système est composé d'un moteur, d'un réducteur de bouclage de rapport 40/42 et du réducteur testé, de rapport 20/21. La figure (III.1) montre le montage du système.

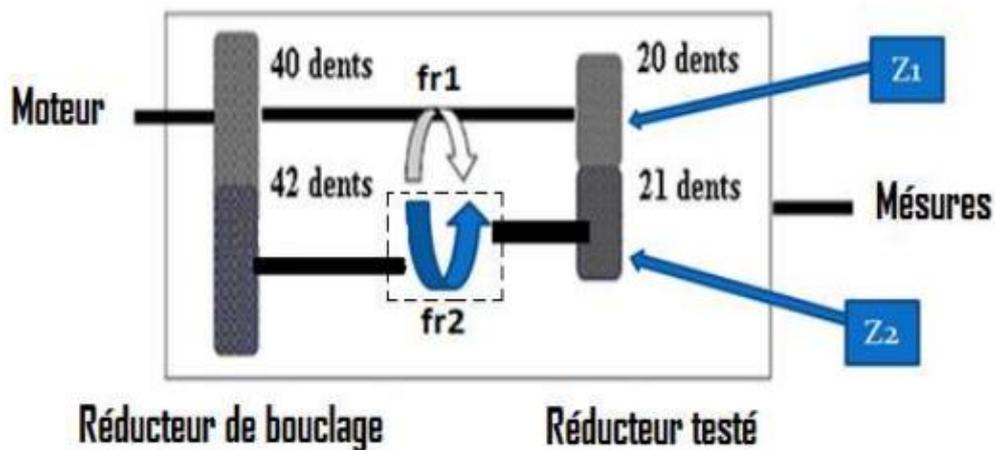


Figure III.1 banc de CETIEM

Le réducteur testé a pour vitesse de rotation 1000 tr/min, soit donc une fréquence de rotation 16,67 Hz. Or, les deux roues composant ce réducteur ont un nombre de dents quasiment identique. Leurs fréquences de rotation sont donc très proches l'une de l'autre. Nous avons en effet :

$$\omega = 1000 \text{ tr/min} \Rightarrow fr1 = \frac{1000}{60} = 16,67 \text{ Hz} \quad (\text{III.1})$$

$$fr2 = \frac{20}{21} \cdot fr1 = 15,88 \text{ Hz} \quad (\text{III.2})$$

La fréquence d'engrènement des deux roues sera :

$$feng = fr2 \cdot 21 = fr1 \cdot 20 = 333,48 \text{ Hz} \quad (\text{III.3})$$

Le nombre de points N par période (par tour) de la roue 1 est :

$$fr1 = 1000 \text{ tr/min} = \frac{100}{6} \text{ tr/s} \quad (\text{III.4})$$

$$N = \frac{T1}{\Delta t} = \frac{fe}{fr1} = \frac{20000}{16.67} = 1200 \text{ pts} \quad (\text{III.5})$$

## Chapitre III : analyse statistique des défauts d'engrenages

---

La période T est :

$$T = \frac{1}{fr1} = \frac{6}{100} = 0,06s$$

**(III.6)**

Fréquence d'échantillonnage : **fe = 20kHz = 20000Hz**

La période d'échantillonnage :

$$\Delta t = \frac{1}{fe} = 5.10^{-5}s$$

**(III.7)**

La fréquence d'engrènement du réducteur testé est 333.48Hz. Un enregistrement a été fait tous les jours de la seconde journée à la treizième. Nous disposons donc d'un ensemble de douze signaux de 60160 points, échantillonnés à 20kHz, représentant chacun 3.08 secondes soit à peu près 50 périodes de rotation.

Au cours de cette campagne de test, l'engrenage passe de l'état de bon fonctionnement à celui d'engrenage détérioré sur une durée de 13 jours.

### III.3. Signaux CETIM

#### III.3.1. Présentation des signaux

L'analyse des signaux temporels nous permet de visualiser l'apparition d'un défaut très marqué le onzième jour. Toutefois, comme nous pouvons le remarquer sur les figures (III.1)et (III.2) il n'est pas possible de détecter de façon précoce l'apparition d'un défaut à l'aide des signaux temporels.

# Chapitre III : analyse statistique des défauts d'engrenages

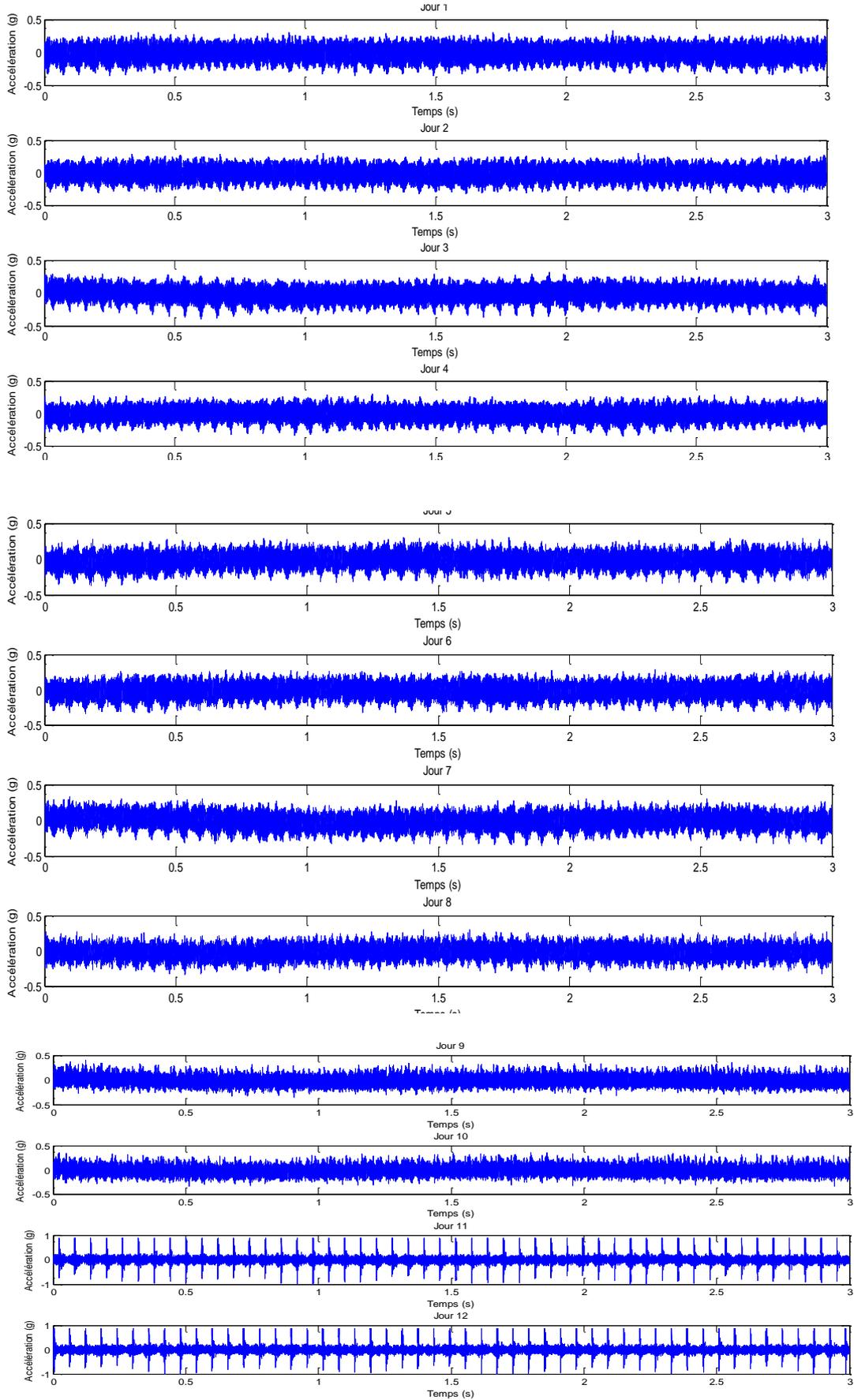


Figure III.2 Signaux temporels du train d'engrenage

## Chapitre III : analyse statistique des défauts d'engrenages

Le rapport d'expertise est détaillé dans le tableau(III .1)

| Jour | Observation                                      |
|------|--|
| 2    | Premier jour d'acquisition,pas d'anomalie        |
| 3    | Pas d'anomalie                                   |
| 4    | // //  |
| 5    | // //  |
| 6    | // //  |
| 7    | Ecaillage sur le profil de la dent ½             |
| 8    | Pas d'évolution                                  |
| 9    | Dent½pas d'évolution,dent15 /16début d'écaillage |
| 10   | Evolution de l'écaillage dent15 /16              |
| 11   | // //  |
| 12   | // //  |
| 13   | Ecaillage sur toute la largeur de la dent 15 /16 |

**Tableau III.1 rapport d'expertise**

### III.3.2. Analyse satistique des signaux mesurés

Avant de faire l'application de la méthode d'ondelettes sur les signaux bruts de CETIM, les indicateurs scalaires statistiques comme la valeur efficace,le kurtosis,le facteur de creteet le skewness sont calculés pour les douze jours.

|        | RMS     | kurtosis | Valeur crete | Facteur crete | Skewness |
|--------|---------|----------|--------------|---------------|----------|
| Jour1  | 0 ,0997 | 2,6660   | 0,3555       | 3 ,5647       | -0 ,1535 |
| Jour2  | 0,0951  | 2,6446   | 0,3311       | 3,4795        | -0 ,1321 |
| Jour3  | 0,0936  | 2,8575   | 0 ,4028      | 4,3036        | -0,2016  |
| Jour4  | 0,0888  | 2,8846   | 0,3511       | 3,9527        | -0 ,1175 |
| Jour5  | 0,0916  | 2,9737   | 0,3833       | 4,1864        | -0,1646  |
| Jour6  | 0 ,0906 | 2,9244   | 0,3550       | 3,9177        | -0,1784  |
| Jour7  | 0,0909  | 2 ,9896  | 0,3628       | 3,9915        | -0,1584  |
| Jour8  | 0,0860  | 2,9231   | 0,3359       | 3,9084        | -0,1075  |
| Jour9  | 0,0918  | 3,0296   | 0 ,4014      | 4 ,3702       | 0,1145   |
| Jour10 | 0,0911  | 3,0246   | 0,3550       | 3,8949        | 0,1210   |
| Jour11 | 0,1464  | 13,6194  | 1            | 6,8307        | 0 ,8013  |
| Jour12 | 0,1467  | 13,9443  | 1            | 6,8187        | 0,8128   |

**Tableau III.3 Valeurs des indicateurs dans les deuze jours**

Les figures (III.4.a) (III.4.b) (III.4.c) illustrent clairement que les valeurs du kurtosis et du facteur de crête indiquent que le défaut est apparu à partir du jour 11. Jusqu'au 10<sup>ème</sup> jour,

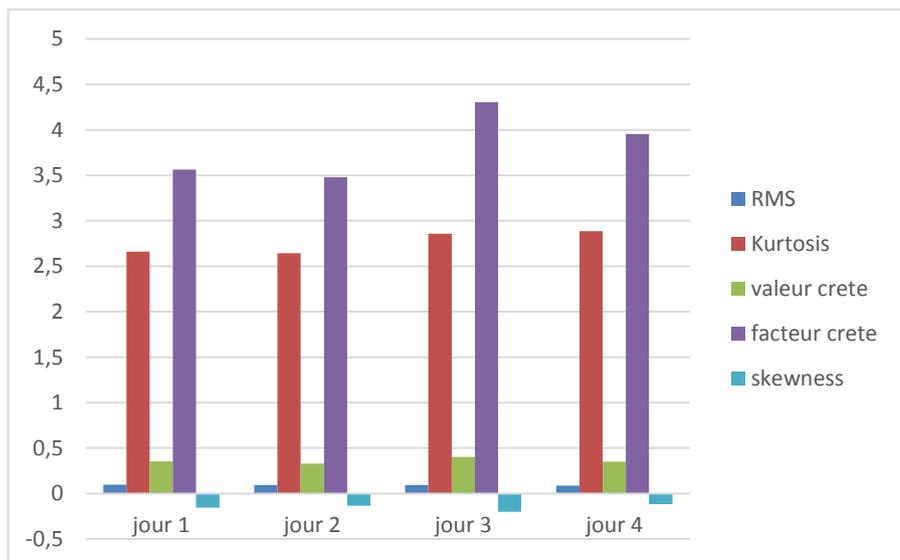
### Chapitre III : analyse statistique des défauts d'engrenages

les valeurs de ces deux indicateurs sont inférieures à leurs seuils respectifs, soit 6 pour le facteur de crête et 3 pour le kurtosis. Ces valeurs confirment parfaitement la présence d'un défaut de choc, dans notre cas il s'agit d'un défaut d'engrenage comme le mentionne le rapport d'expertise d'auparavant.

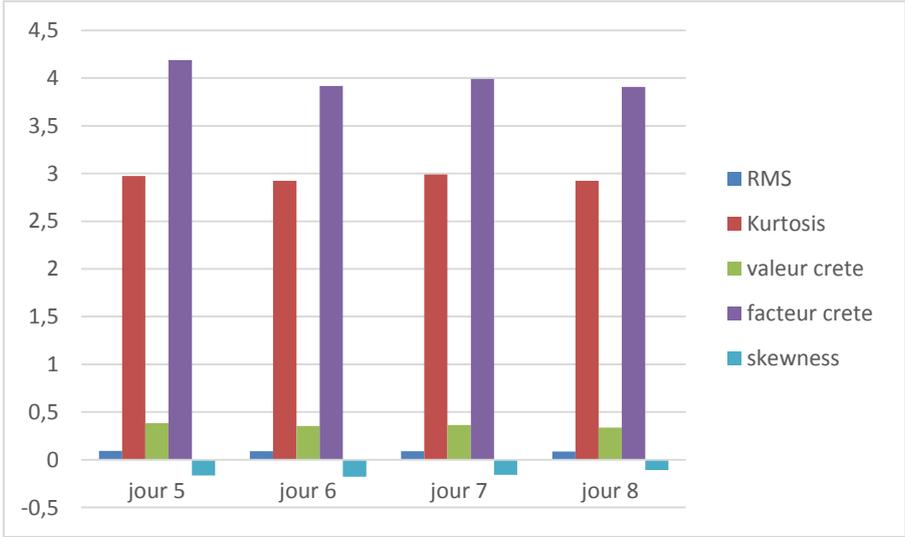
Pour la valeur efficace, le RMS et le skewness, les valeurs étant presque constantes jusqu'au 10<sup>ème</sup> jour, elles augmentent considérablement à partir du 11<sup>ème</sup> jour indiquant une augmentation significative du niveau vibratoire. Malheureusement ces indicateurs indiquent bel et bien une augmentation du niveau vibratoire due à la présence d'un défaut mais ne donnent aucune information sur son origine.

En conclusion le kurtosis et le facteur de crête sont des indicateurs sensibles à la forme du signal, ils sont par conséquent très sensibles aux chocs qui apparaissent dans le signal et qui sont générés par le défaut. Les autres indicateurs sont sensibles à l'énergie du signal et pas à sa forme, ceci explique l'augmentation de leurs valeurs le 11<sup>ème</sup> et le 12<sup>ème</sup> jour car dans les signaux de ces deux jours le niveau vibratoire augmente considérablement. Comme ils n'ont pas un seuil de détection comme le kurtosis et le facteur de crête, les valeurs du RMS, de la valeur crête et du skewness n'ont pas une signification proprement dite, mais leur évolution dans le temps peut donner une information intéressante sur l'évolution du défaut.

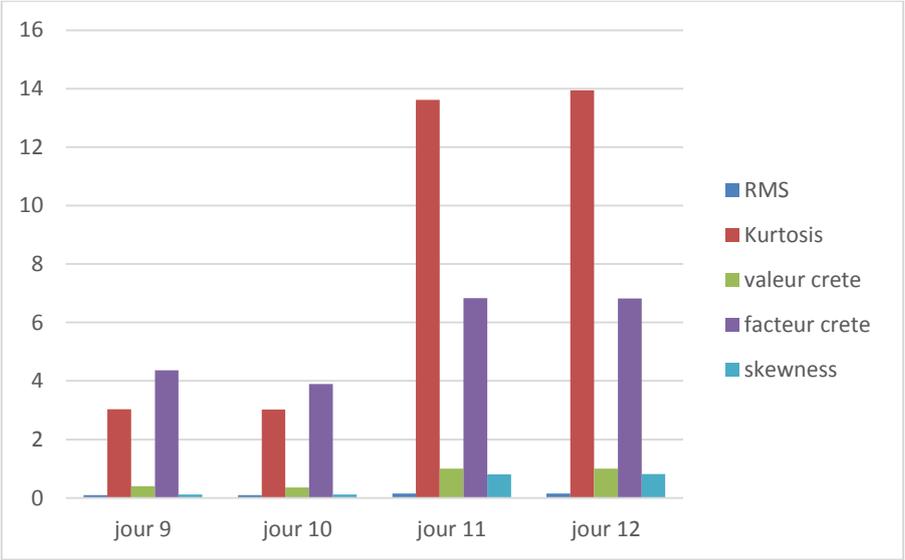
(a)



(b)



(c)



**Figure III.3 les variations des indicateurs statistiques avant filtrage**

III.3.filtrage des signaux mesurés :

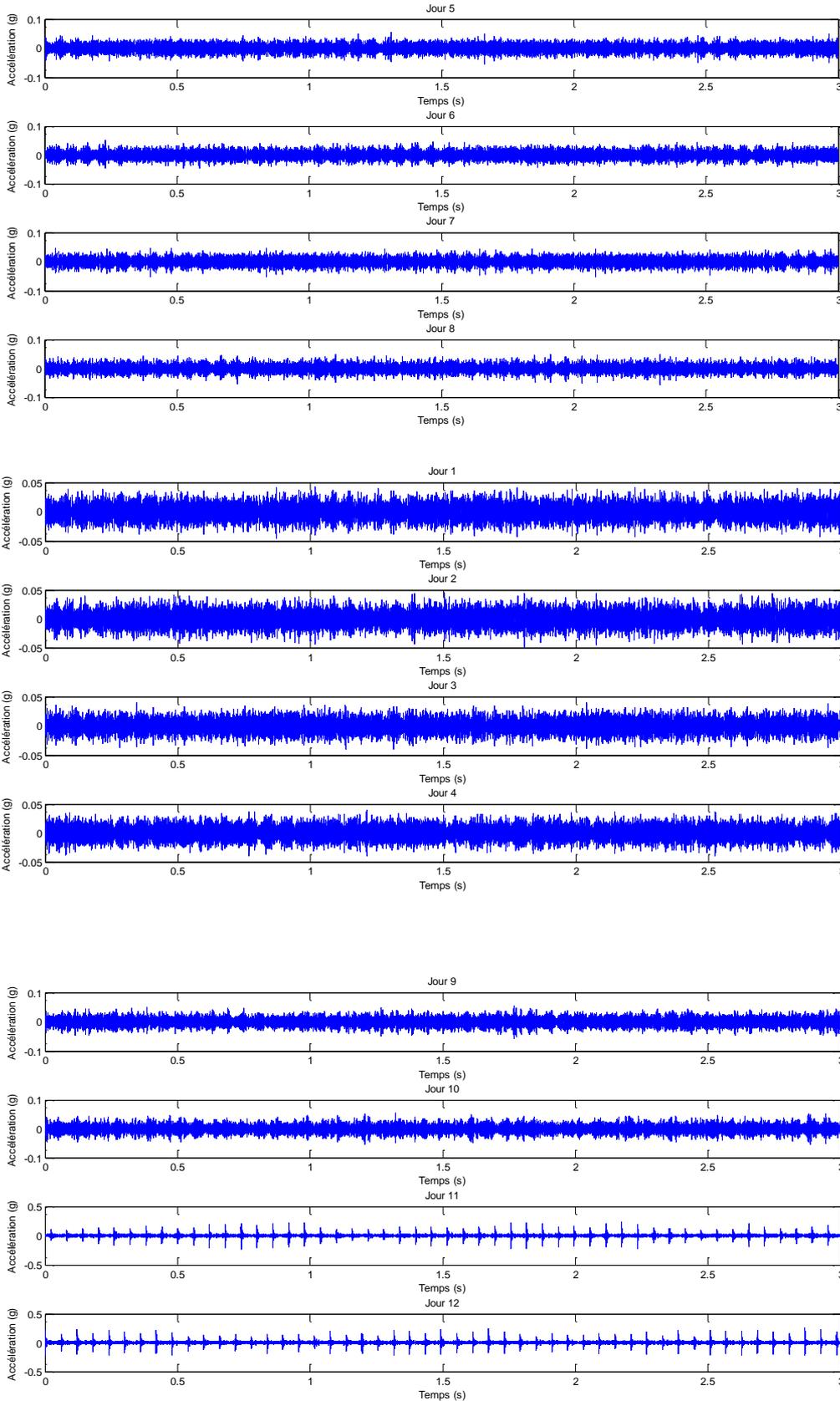


Figure III.5 : signaux filtré

## Chapitre III : analyse statistique des défauts d'engrenages

|         | RMS    | Kurtosis | Valeur crête | Facteur crête | Skewness |
|---------|--------|----------|--------------|---------------|----------|
| Jour 1  | 0,0096 | 3,7229   | 0,0448       | 4,6761        | 0,0034   |
| Jour 2  | 0,0098 | 3,7496   | 0,0491       | 5,0057        | -0,0040  |
| Jour 3  | 0,0083 | 3,9096   | 0,0401       | 4,8447        | -0,0078  |
| Jour 4  | 0,0086 | 3,7792   | 0,0396       | 4,6061        | 0,0048   |
| Jour 5  | 0,0098 | 3,8341   | 0,0560       | 5,7235        | 0,0059   |
| Jour 6  | 0,0098 | 3,8263   | 0,0513       | 5,2584        | -0,0039  |
| Jour 7  | 0,0095 | 3,9711   | 0,0521       | 5,4722        | 0,0026   |
| Jour 8  | 0,0097 | 4,0533   | 0,0565       | 5,8124        | -0,0096  |
| Jour 9  | 0,0100 | 4,1491   | 0,0574       | 5,7211        | -0,0029  |
| Jour 10 | 0,0099 | 4,3359   | 0,0552       | 5,5781        | -0,0042  |
| Jour 11 | 0,0171 | 31,3893  | 0,2265       | 13,2633       | -0,0019  |
| Jour 12 | 0,0180 | 33,4740  | 0,2530       | 14,0215       | -0,0141  |

**Tableau III.5 les indicateurs scalaires filtré de 12 jours**

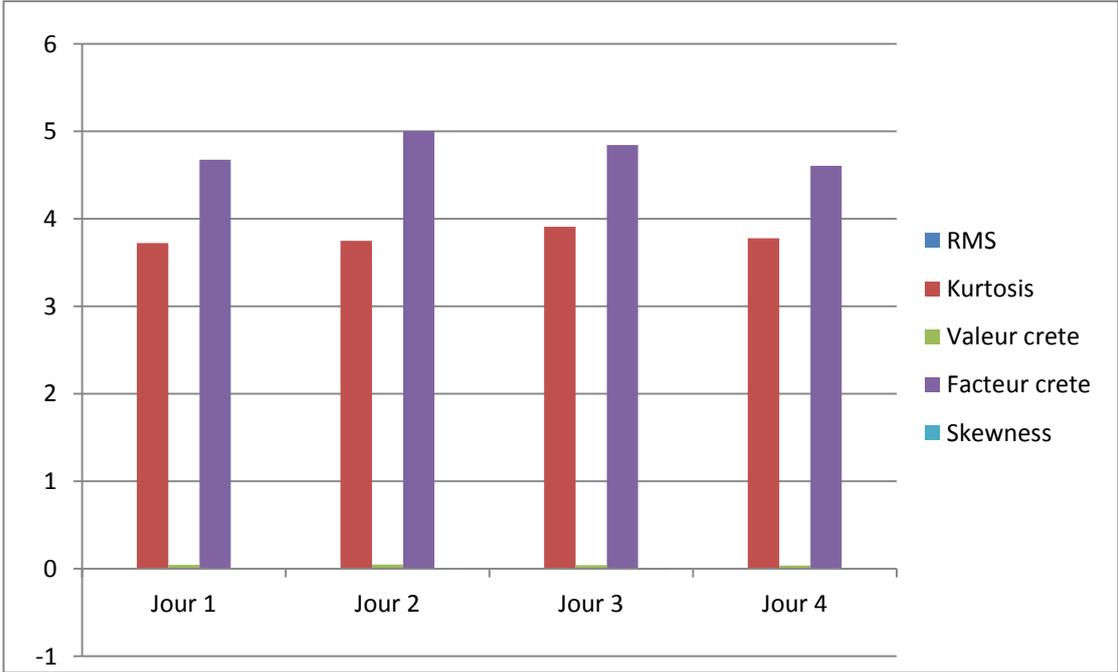
Les figures (III.5.a),(III.5b) et (III.5.c) présentent les valeurs des indicateurs statistiques des signaux des douze jours après l'opération de filtrage. Pour le kurtosis et le facteur de crête, le filtrage permet d'améliorer sensiblement leurs valeurs, le kurtosis étant plus sensible affiche une valeur supérieure à trois dès le premier jour. Ceci dit, il ne faut pas se fier directement à cette valeur en affirmant l'existence d'un défaut le premier jour, car une transmission à engrenage peut engendrer des chocs même à l'état sain, et nous pouvons avoir un kurtosis supérieur à trois tout en ayant un engrenage sain. Toutefois le kurtosis dépasse la valeur 4 à partir du 8<sup>ème</sup> jour ce qui ne laisse aucun doute sur l'existence du défaut. Bien évidemment le kurtosis atteint des valeurs flagrantes le jour 11 et 12 indiquant un état de dégradation très avancé de l'engrenage.

Contrairement au kurtosis, le facteur de crête ne permet de détecter le défaut qu'à partir du 11<sup>ème</sup> jour. Même après filtrage, sa sensibilité n'est pas améliorée comme pour le kurtosis, même si ses valeurs augmentent par rapport à ceux des signaux bruts.

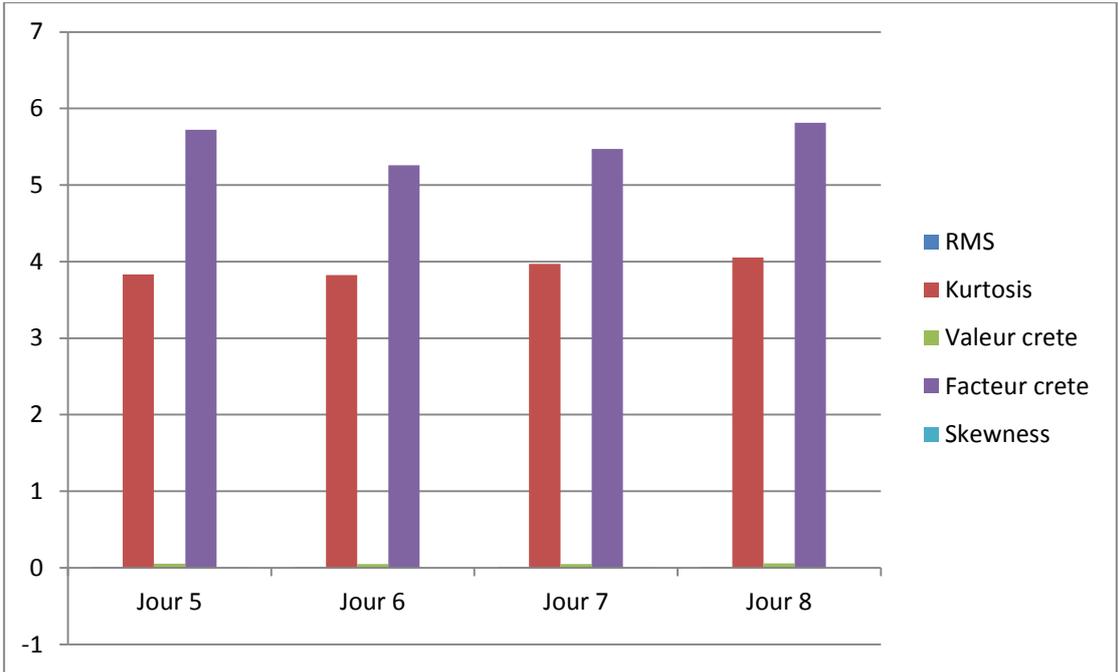
Pour les trois autres indicateurs, leurs valeurs diminuent par rapport à celles enregistrées pour les signaux bruts. En effet, ces indicateurs sont sensibles à l'énergie du signal, celle-ci diminue après l'opération de filtrage, ce qui explique leur diminution. Bien évidemment ils évoluent dans les mêmes proportions que pour le cas des signaux bruts en évoluant avec l'augmentation progressive du défaut, même si leurs valeurs restent relativement inférieures.

**Chapitre III : analyse statistique des défauts d'engrenages**

(a)



(b)



(c)

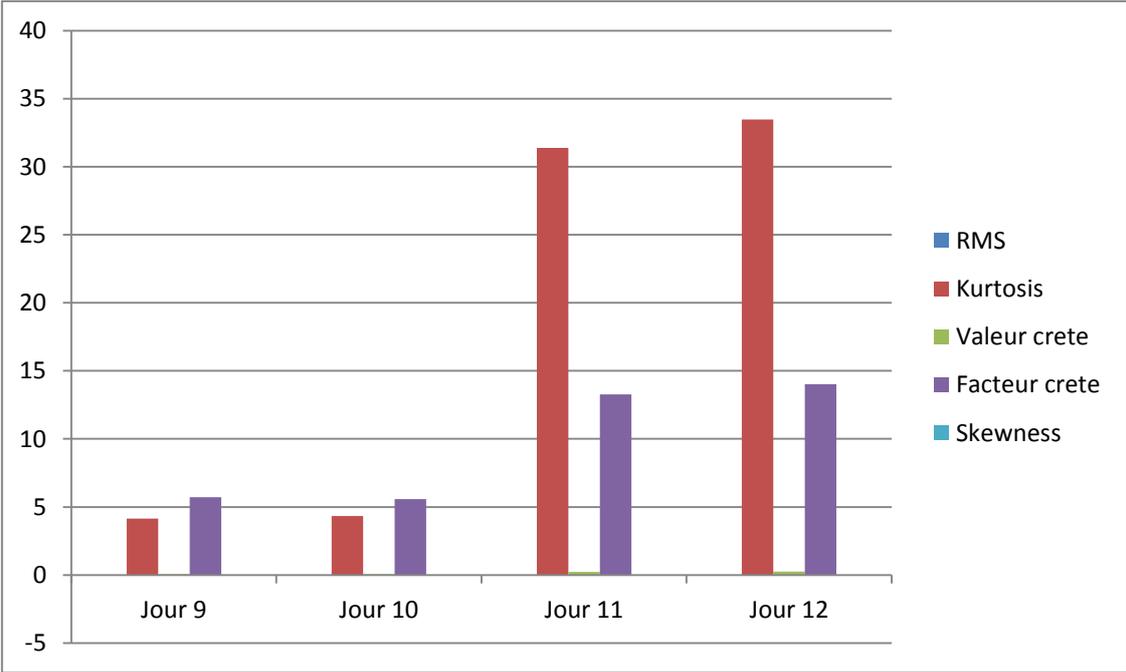


Figure III.6 Les variations des indicateurs statistiques après filtrage

### III.4. Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à une étude statistique des signaux d'engrenage collectés sur un banc d'essais pendant douze jours. Ces signaux correspondent à une évolution progressive d'un défaut d'engrenage jusqu'à rupture complète d'une dent le onzième jour. L'objectif étant d'entamer une étude comparative entre cinq indicateurs scalaires bien connus dans la littérature. Deux d'entre eux sont des indicateurs de forme, sensibles aux chocs ; le kurtosis et le facteur de crête. Les trois autres sont sensibles à l'énergie du signal ; le RMS, la valeur crête et le skewness.

La variation de ces indicateurs scalaires a premièrement été étudiée pour les signaux des douze jours bruts, c'est-à-dire directement mesurés sans aucun traitement. Les résultats ont montrés la grande sensibilité du kurtosis et du facteur de crête qui indiquent des valeurs très importantes à partir du 11<sup>ème</sup> jour. Les trois autres indicateurs n'ont pas une signification particulière mais évoluent avec l'augmentation du défaut. Ils ne constituent pas des indicateurs de détection proprement dit, mais leur évolution dans le temps peut avoir une signification sur l'évolution du défaut.

Après filtrage, le kurtosis apparait comme l'indicateur le plus sensible, il a pu détecter le défaut sans aucune ambiguïté à partir du 8<sup>ème</sup> jour où sa valeur dépasse 4. Il indique même des valeurs dépassant largement 3 biens avant le 8<sup>ème</sup> jour, mais comme une transmission à engrenage peut engendrer des chocs, nous n'avons considéré le défaut présent qu'à partir de la valeur 4. Le facteur de crête apparait insensible au filtrage, même si ses valeurs sont relativement plus importantes que pour les signaux bruts, du fait qu'il n'est toujours pas capable de détecter le défaut avant le 11<sup>ème</sup> jour.

Les trois autres indicateurs affichent une tendance analogue au cas avant filtrage, c'est-à-dire qu'ils augmentent avec l'augmentation du défaut. Néanmoins, leurs valeurs sont inférieures à cause de l'opération de filtrage qui diminue considérablement les amplitudes du signal.

**Chapitre IV:**  
**Analyse fréquentielle du**  
**défaut d'engrenage par**  
**application de la méthode**  
**d'enveloppe**

### IV.1.Introduction

Dans ce chapitre nous allons appliquer la méthode d'enveloppe sur les signaux mesurés fournis par le CETIM « centre des technologies industriel mécanique-France -» au cours de cette campagne d'essai, l'engrenage passe de l'état de bon fonctionnement à celui d'engrenage détérioré pendant les 12 jours d'essai.

Le but est de montrer l'efficacité du spectre d'enveloppe et les valeurs du kurtosis après filtrage pour la détection précoce et l'intervention avant l'application complète du défaut.

En contrepartie, ce bassons sur le spectre FFT, le kurtosis avant filtrage ainsi que la constatation visuelle permet une détection bien tardive du défaut.

### IV.2. Analyse d'enveloppe « HFRT »

L'analyse d'enveloppe ou la HFRT (High frequency Resonance Technique) s'avère une technique complémentaire à celle du cepstre qui est pénalisée par sa grande sensibilité au bruit et aux fluctuations aléatoires de la vitesse de rotation, comme le cepstre, la HFRT permet d'assurer la détection et le suivi d'évolution de défauts induisant des forces impulsionnelles périodiques mais dans une plage fréquentielle considérablement plus étendue [15]. La HFRT repose sur l'étude du signal enveloppe obtenu grâce à la transformée de Hilbert après filtrage dans une bande de fréquence centrée sur une ou plusieurs résonances de structure. En général, les composantes fréquentielles les plus énergétiques dans le spectre du signal. Ainsi, il devient alors possible d'extraire des informations basses fréquences difficiles à détecter sur une porteuse haute fréquence. Puisque le filtrage passe-bande nécessite la connaissance au préalable des fréquences de résonance du système, ce qui n'est pas toujours évident à déterminer à partir du spectre large bande. Le problème de la HFRT réside dans le choix du type du filtre (passe-bande, Chebychev, Butterworth, ...etc.) [16]. La première étape est le filtrage du signal brut afin d'éliminer les composantes indésirables (bruit). Ensuite, l'enveloppe est calculée : il s'agit en quelque sorte d'un redressement du signal. A ce moment, nous disposons d'une information temporelle. Enfin, en ayant recourt à la transformée de Fourier, on obtient le spectre de l'enveloppe qui est un graphe d'amplitude de vibration en fonction de la fréquence. C'est à partir de ce spectre que les conclusions vont être tirées [17]. Elle s'est avérée être un excellent outil de détection des anomalies de fonctionnement de systèmes mécaniques, et sert surtout à dépister et à diagnostiquer les

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

défauts naissants dans les engrenages et les boîtes de transmission des puissances dans les machines tournantes considérées vitales pour la production [18]

La figure (IV.1) montre le spectre d'enveloppe du signal  $s(t)$ , il apparait clairement sur le spectre les fréquences de rotation  $fr1$  et  $fr2$  et plusieurs de leurs harmoniques, ce qui confirme la présence de défaut sur la roue et le pignon.

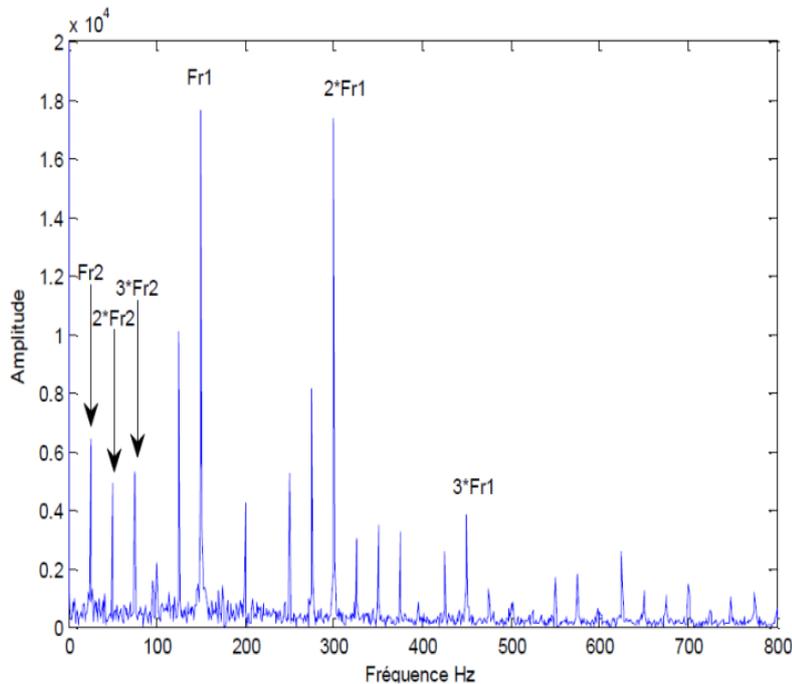


Figure IV.1 Spectre d'enveloppe du signal  $s(t)$ .

### IV.3. Transformée de Hilbert

La HFRT repose sur l'étude du signal enveloppe obtenu grâce à la transformée de Hilbert, Mathématiquement est donnée par [19] :

$$H[S(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (\text{VI.1})$$

Avec  $H[S(t)]$  la transformée de Hilbert du signal  $S(t)$ .

L'analyse d'enveloppe a pour principaux champs d'application :

Démodulation d'amplitude (détection par représentation spectrale et temporelle du signal de modulation).

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

---

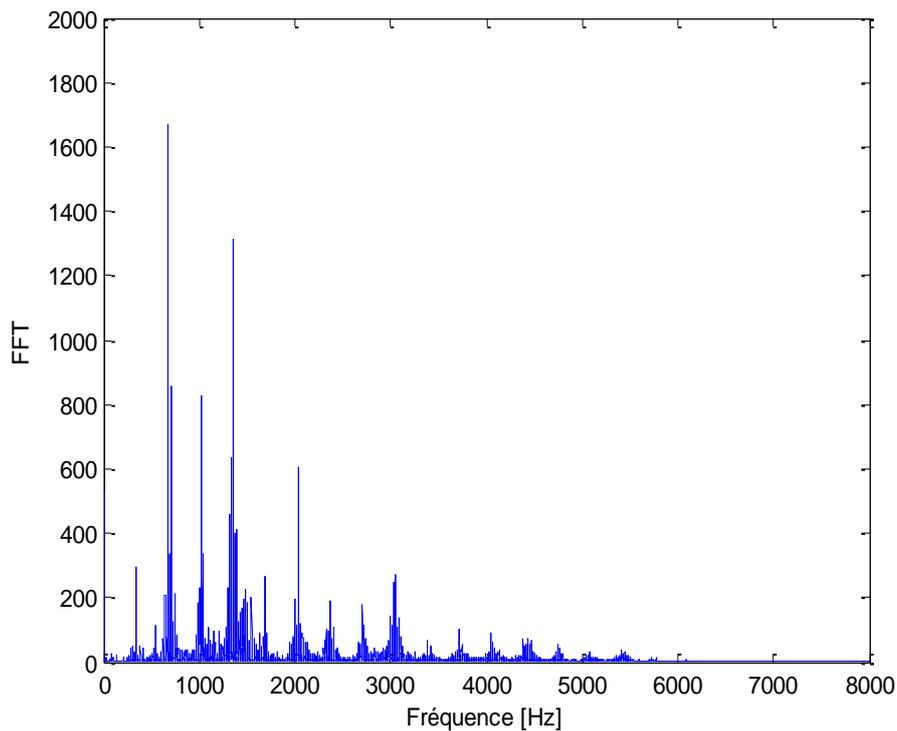
Identification spectrale (fréquence d'apparition) et temporelle (à quel endroit du cycle) des impulsions associées à des défauts mécaniques en développement dans les machines tournantes [20].

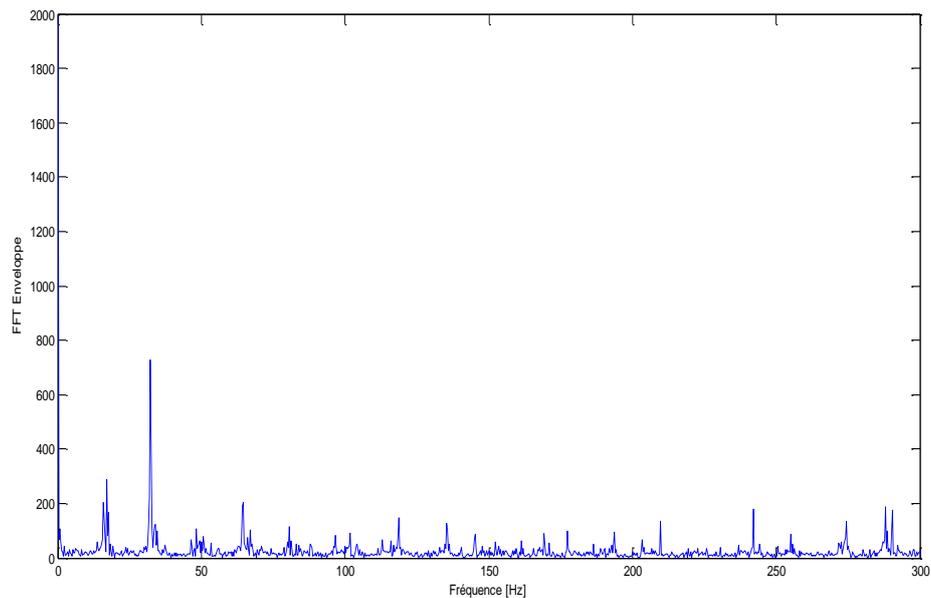
### IV.4.application de la méthode d'enveloppe aux signaux des 12 jours

Dans ce qui suit nous allons appliquer la méthode d'enveloppe aux signaux des 12 jours.

Pour l'opération de filtrage nous avons utilisé la décomposition en ondelette afin d'extraire le détail ayant le plus grand kurtosis et qui est considéré comme un signal filtré puis nous avons utilisé la démodulation par transformée de Hilbert comme déjà mentionné dans la section 2. nous allons présenter le spectre FFT de chaque jour suivi par son spectre d'enveloppe.

#### IV.4.1.jour 1





**Figure IV.2 le signal du 1<sup>er</sup> jour**

La figure (IV.2) représente le spectre du 1<sup>er</sup> jour de fonctionnement et le spectre d'enveloppe :

Sur le spectre on constate des composantes fréquentielles dominantes correspondant à la fréquence d'engrènement et ses harmoniques ce qui est parfaitement normale. Les fréquences de rotation des deux roues sont à peine visibles en base fréquence.

Sur le spectre d'enveloppe on aperçoit une composante correspondant à la fréquence de rotation de l'arbre d'entrée (17 Hz) et quelque une de ces harmoniques.

Il est difficile dans ce cas d'affirmer la présence d'un défaut sur cette roue car la valeur du kurtosis de ce premier jour n'est pas trop alarmant (2,66 avant filtrage et 3,72 après filtrage). En plus le rapport d'expertise ne mentionne aucun défaut le 1<sup>er</sup> jour.

À notre avis la présence de cette composante fréquentielle peut être expliquée par un défaut de fabrication de la roue.

IV.4.2. jour 2

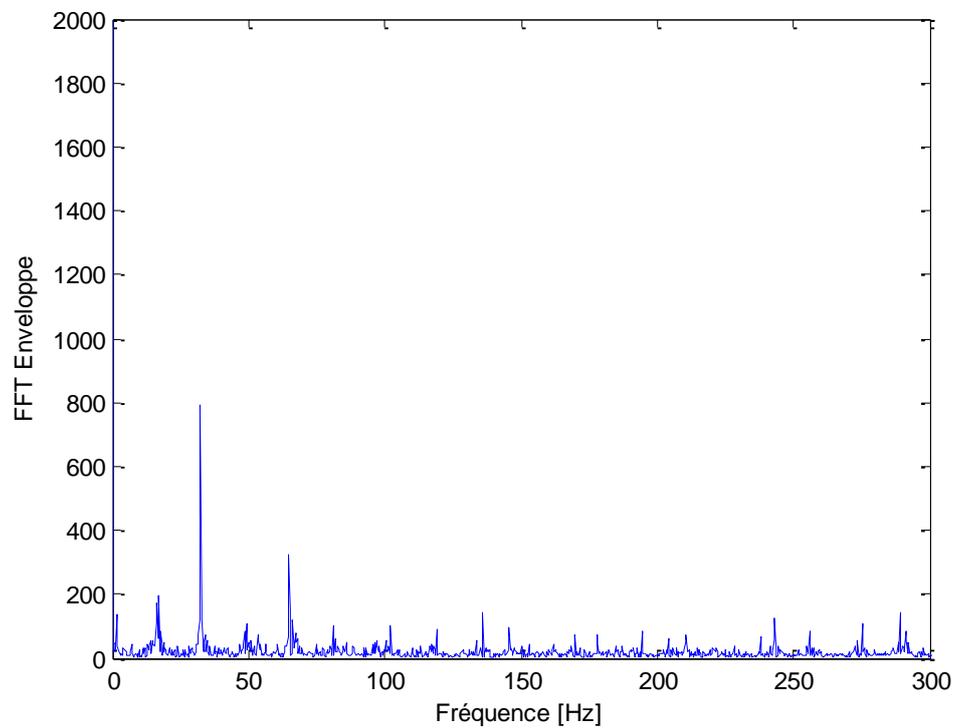
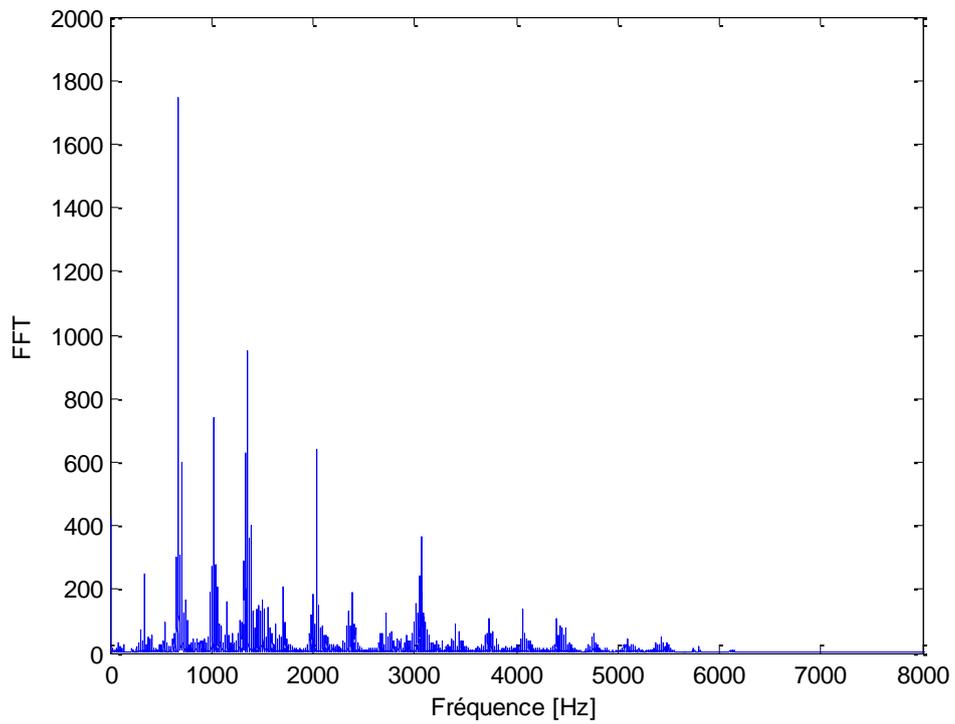


Figure IV.4 le signal du 2<sup>ème</sup> jour

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

La même constatation du 1<sup>er</sup> jour son valable pour le 2<sup>ème</sup> jour, ceci est confirmé par les valeurs du kurtosis du 2<sup>ème</sup> jour qui sont très proche du 1<sup>er</sup> jour (2,64 avant filtrage et 3,74 après filtrage).

### IV.4.3. jour 3

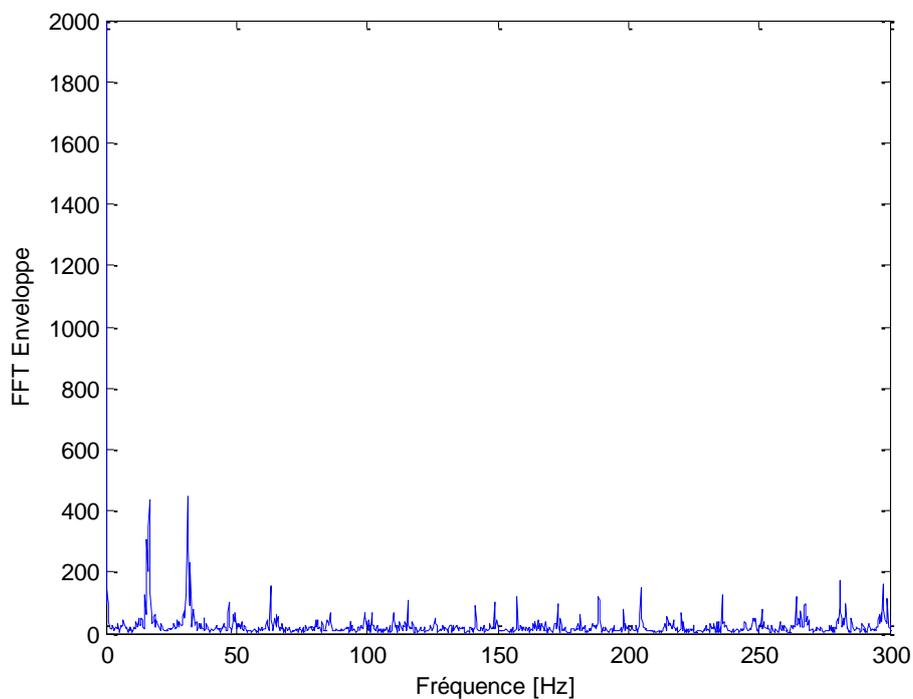
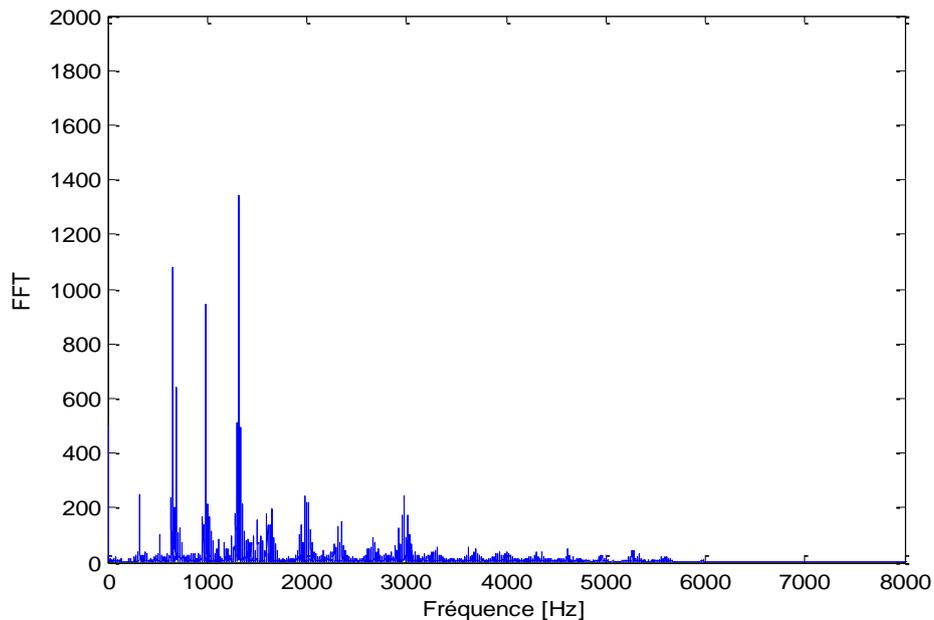
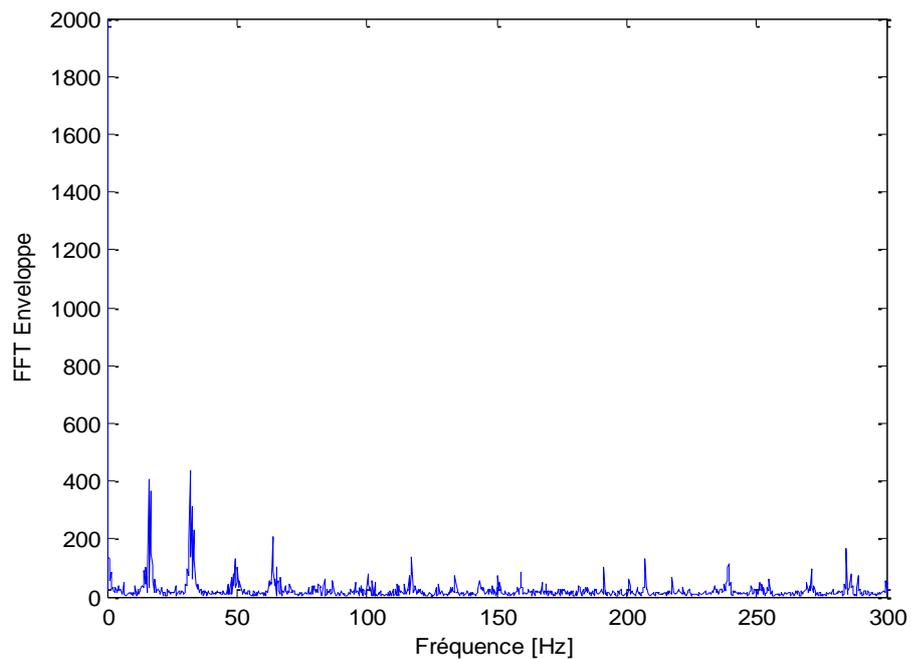
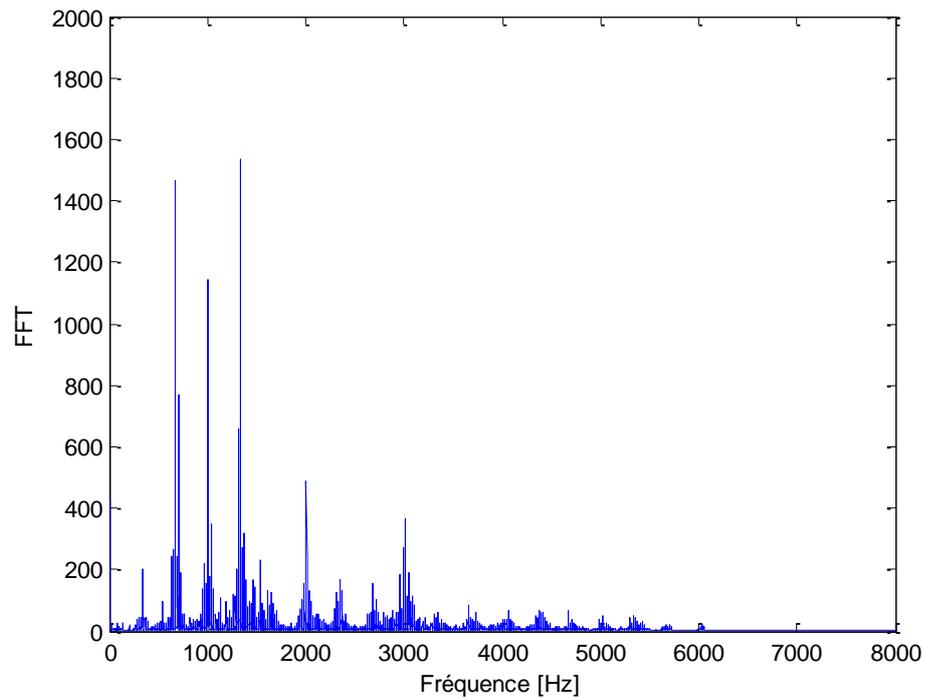


Figure IV.5 le signal du 3<sup>ème</sup> jour

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

Pour le 3<sup>ème</sup> jour, on remarque les mêmes constatations sauf peut-être l'augmentation de l'amplitude du pic correspondant à la fréquence de rotation de roue d'entrée (16,67 Hz). Rappelons que dans ce cas le kurtosis affiche une légère augmentation par rapport aux deux jours précédant (2,85 avant filtrage et 3,90 après filtrage).

### IV.4.4 jour 4



2Figure IV.5. Le signal du 4<sup>ème</sup> jour

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

Pratiquement semblable au 3<sup>ème</sup> jour sauf l'augmentation de l'amplitude de la fréquence d'engrènement et ces harmoniques qui peuvent signifier l'apparition d'un défaut, le rapport d'expertise du jour 4 n'indique aucune anomalie.

### IV.4.5 jour 5

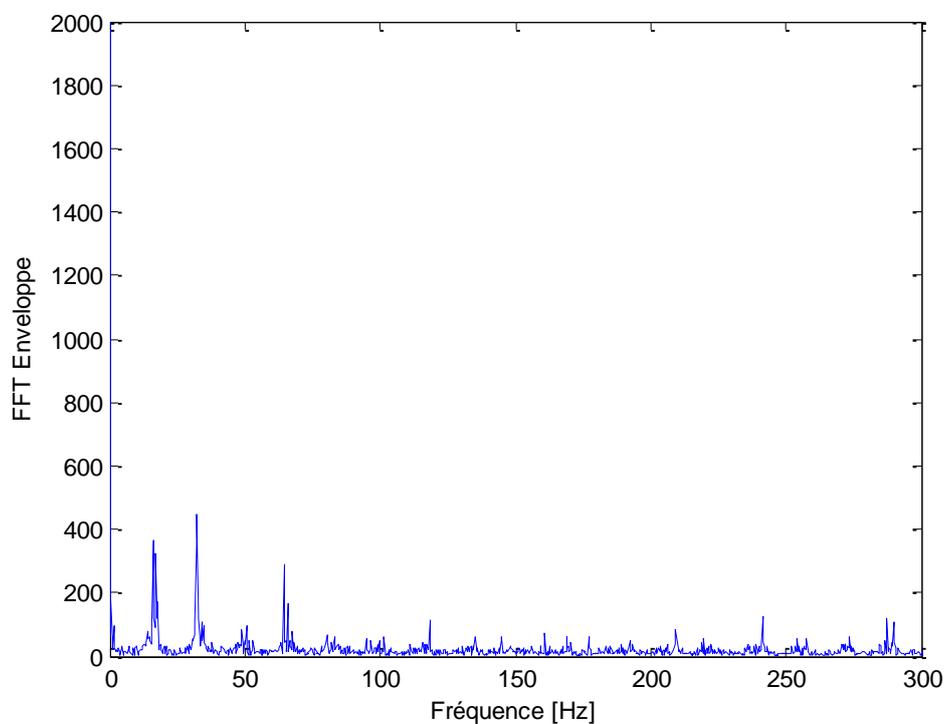
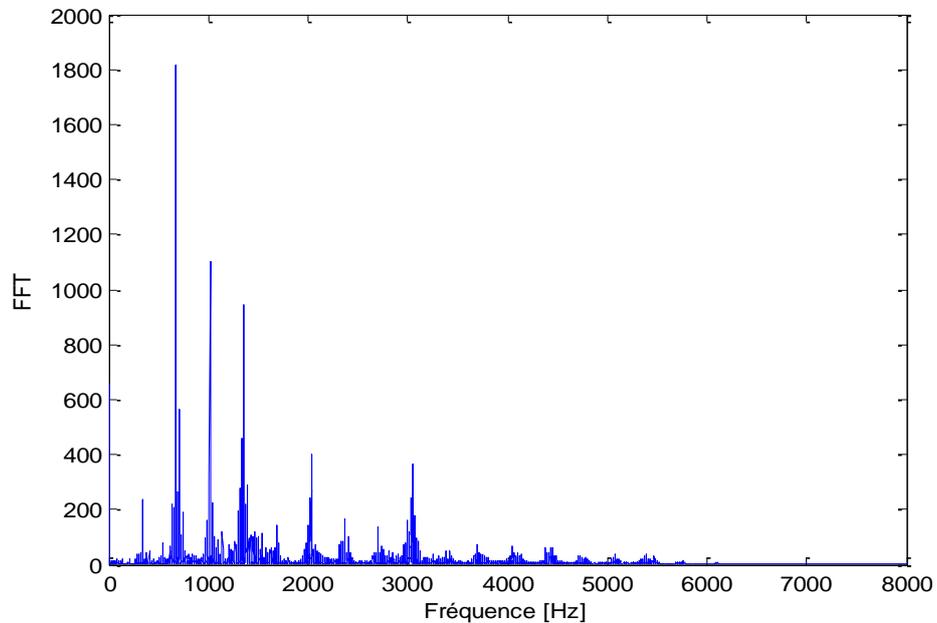


Figure IV.6 le signal du 5ème jour

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

---

Augmentation de l'amplitude de la fréquence d'engrènement et ses harmonique, spectre d'enveloppe identique à celui du jour 4.

### IV.4.6. jour 6

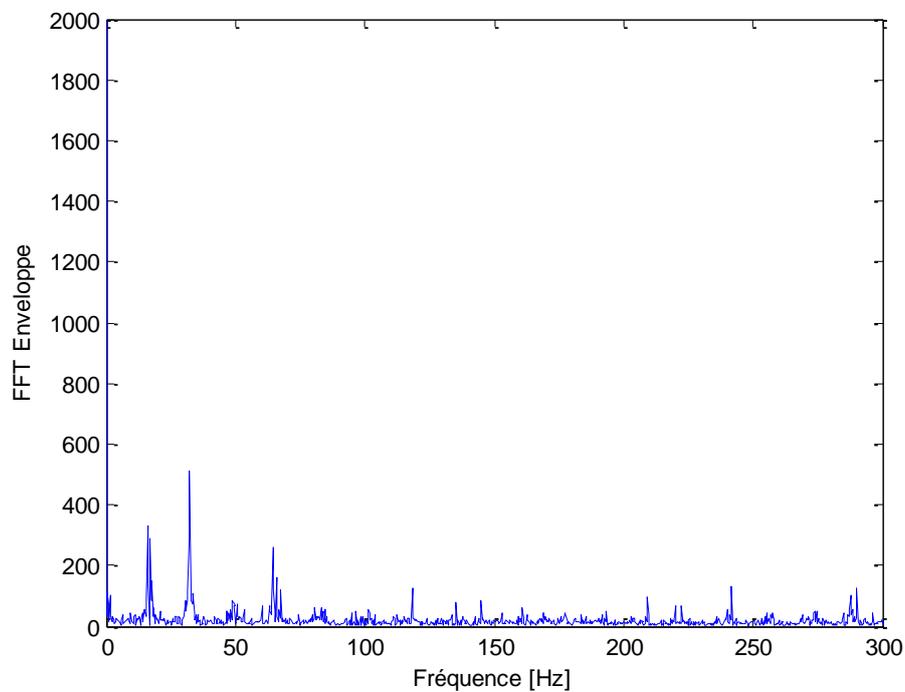
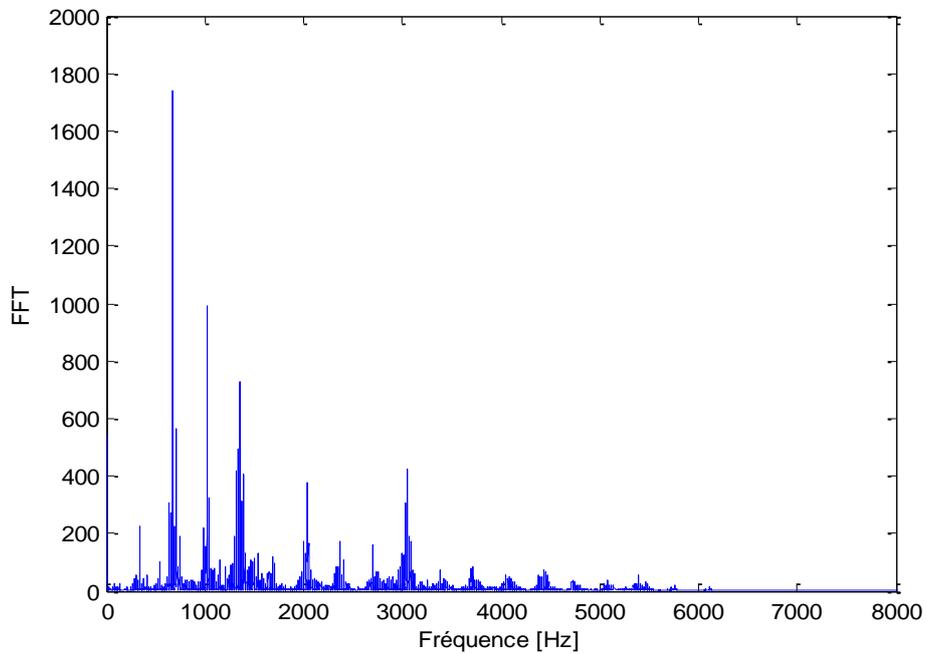


Figure IV.7 le signal du 6<sup>ème</sup> jour

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

Identique au spectre et spectre d'enveloppe du 5<sup>ème</sup> jour. Valeur du kurtosis : 2,92 avant filtrage et 3,82 après filtrage.

### IV.4.7. jour 7

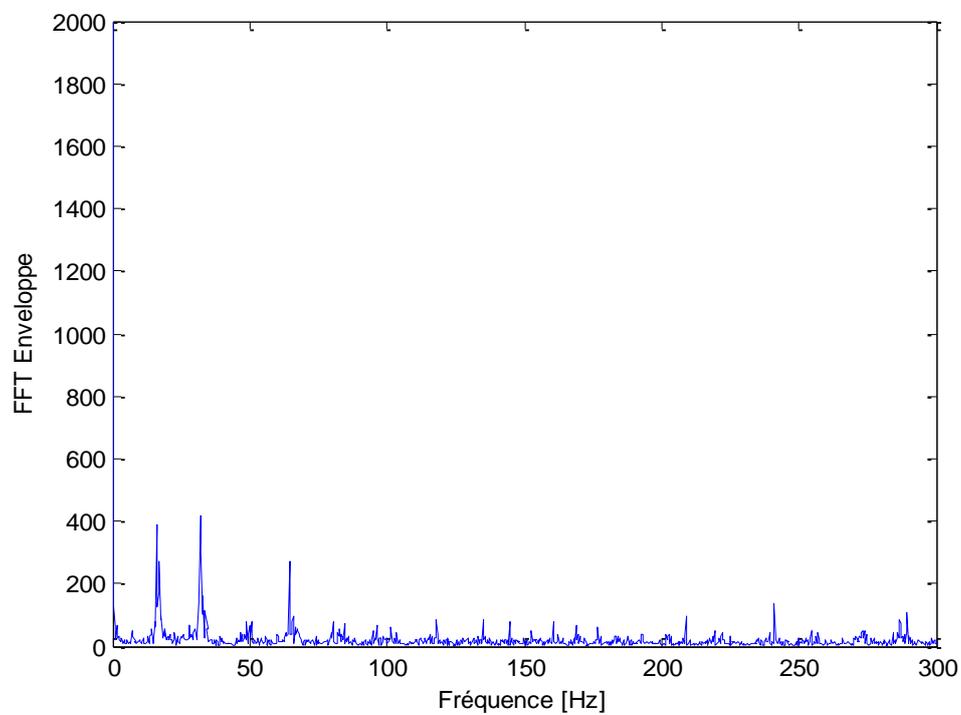
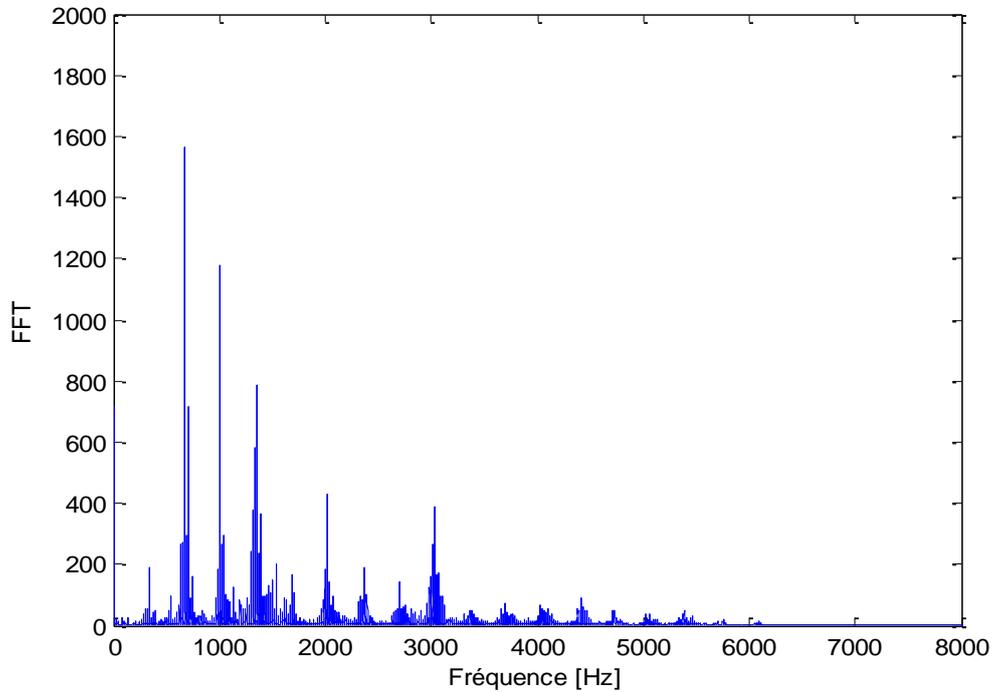


Figure IV.7 le signal du 7<sup>ème</sup> jour

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

Même constatation que pour le jour 6 .le rapport d'expertise indique un début d'écaillage sur la dent ½ chose que nous avons déjà constaté dès le premier jour.

### IV.4.8.jour 8

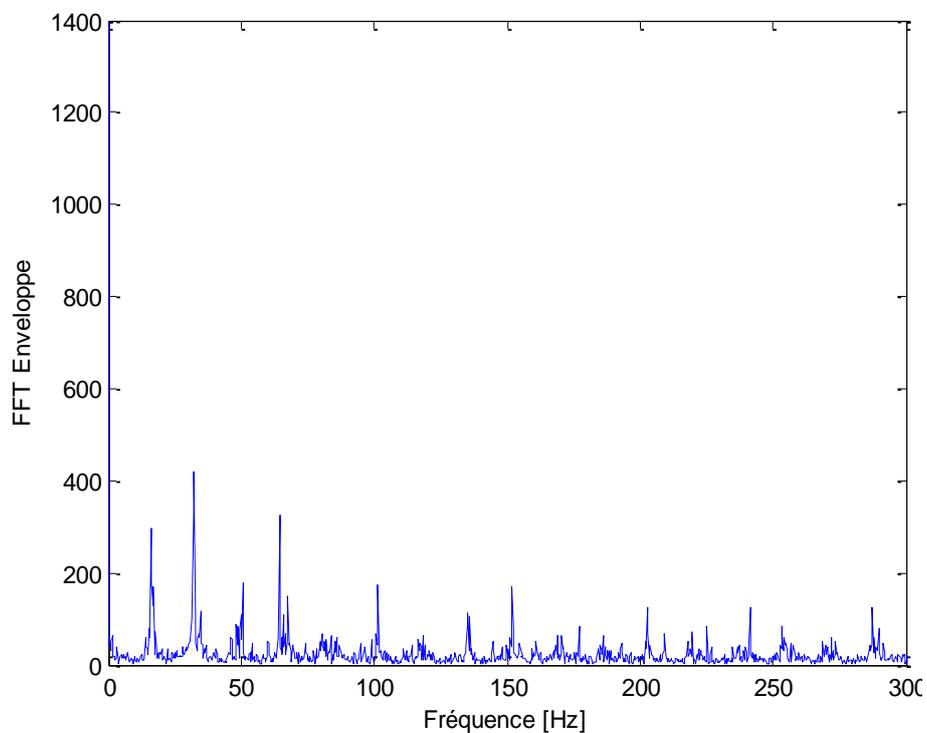
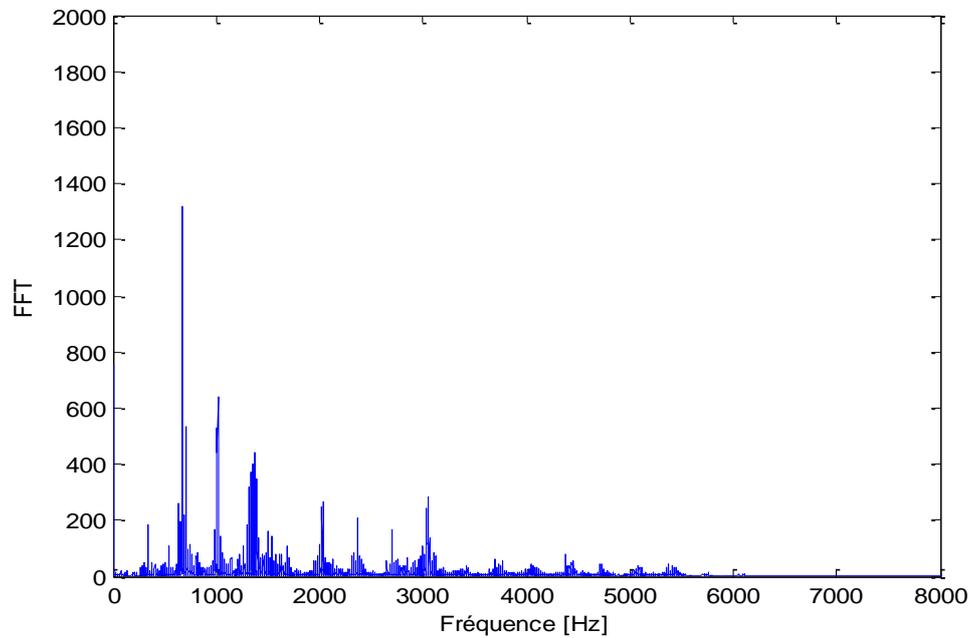


Figure IV.9 le signal du 8<sup>ème</sup> jour

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

La particularité de ce jour si que le spectre d'enveloppe est plus riche en composantes correspondant à la roue d'entrée et ces harmoniques .on a référént au kurtosis après filtrage de ce jour « égale à 4,05 un défaut sur la roue d'entrée est présent ».

### IV.4.9.jour 9

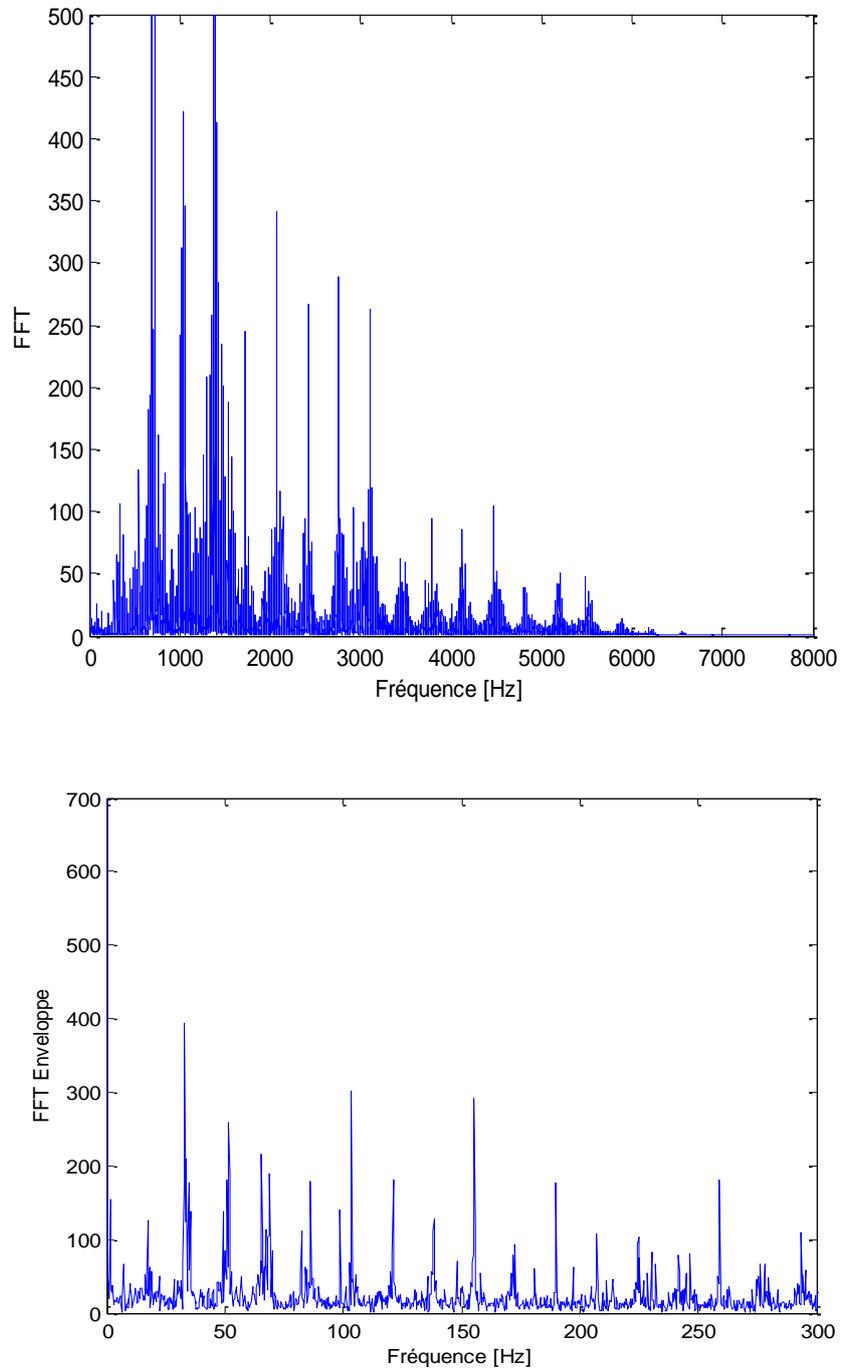


Figure IV.10 le signal du 9<sup>ème</sup> jour

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

Le spectre d'enveloppe très riche en harmonique de la fréquence de rotation de la roue d'entrée 16,77 Hz.

Le spectre contient également des modulations espacées de cette même fréquence .ce qui confirme sans aucun doute la présence d'un défaut .le kurtosis après filtrage est très significatif d'un défaut de choc (4 ,14) alors que ce lui avant filtrage indique une valeur totalement normal (3,02).

Dans le rapport d'expertise est indiqué un début d'écaillage sur la dent 15/16.

### IV.4.10.jour 10

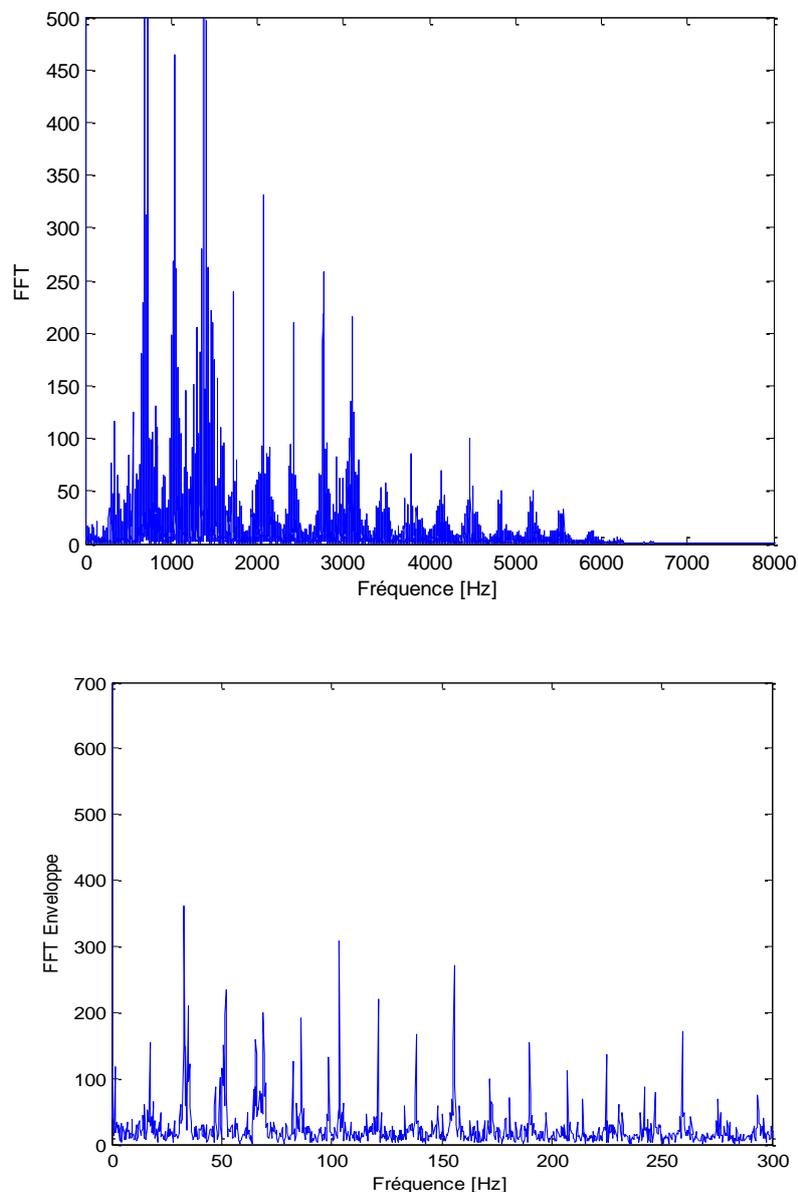


Figure IV.11 le signal du 10<sup>ème</sup> jour

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

Identique au jour 9 avec l'augmentation du kurtosis après filtrage (4 ,33) qui indique une évolution dans le défaut .le rapport d'expertise confirme l'évolution de l'écaillage de la dent 15 /16.

### IV.4.11.jour 11

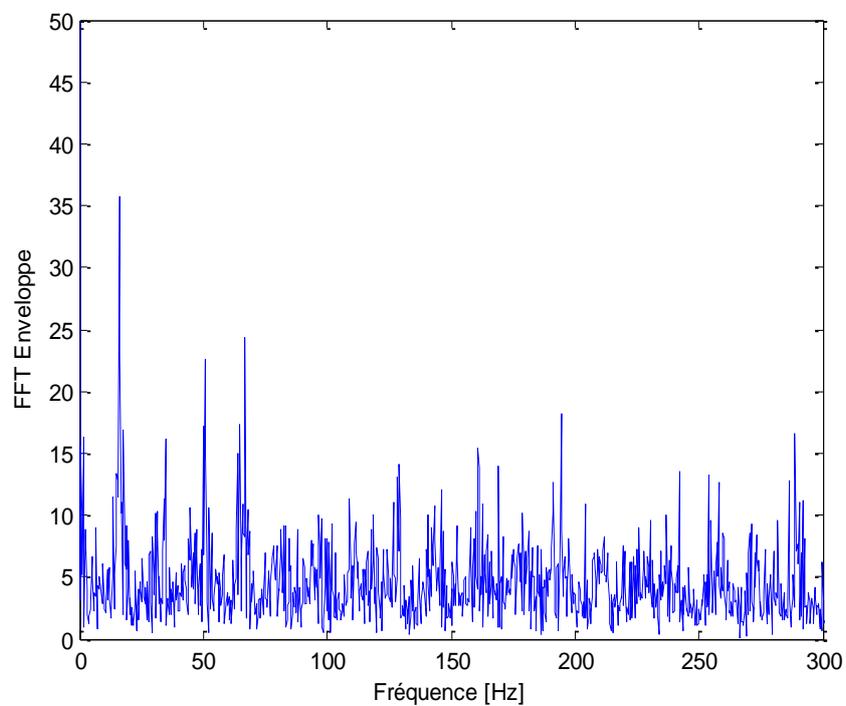
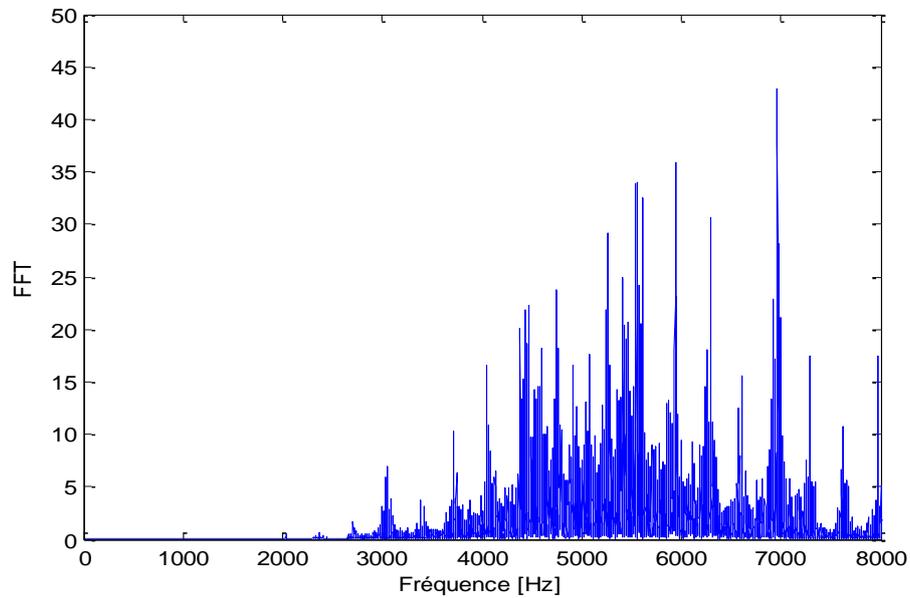


Figure IV.12 le signal du 11<sup>ème</sup> jour

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

Augmentation considérable de l'amplitude du pic de la fréquence de rotation de la roue d'entrée sur le spectre d'enveloppe ce qui indique un état de dégradation avancé de la roue d'entrée .rappelons que dans ce cas le kurtosis avant filtrage est égale à 13,61 et qui attient la valeur important de 31,38 après filtrage .confirmation par le rapport d'expertise.

### IV.4.12.jour 12

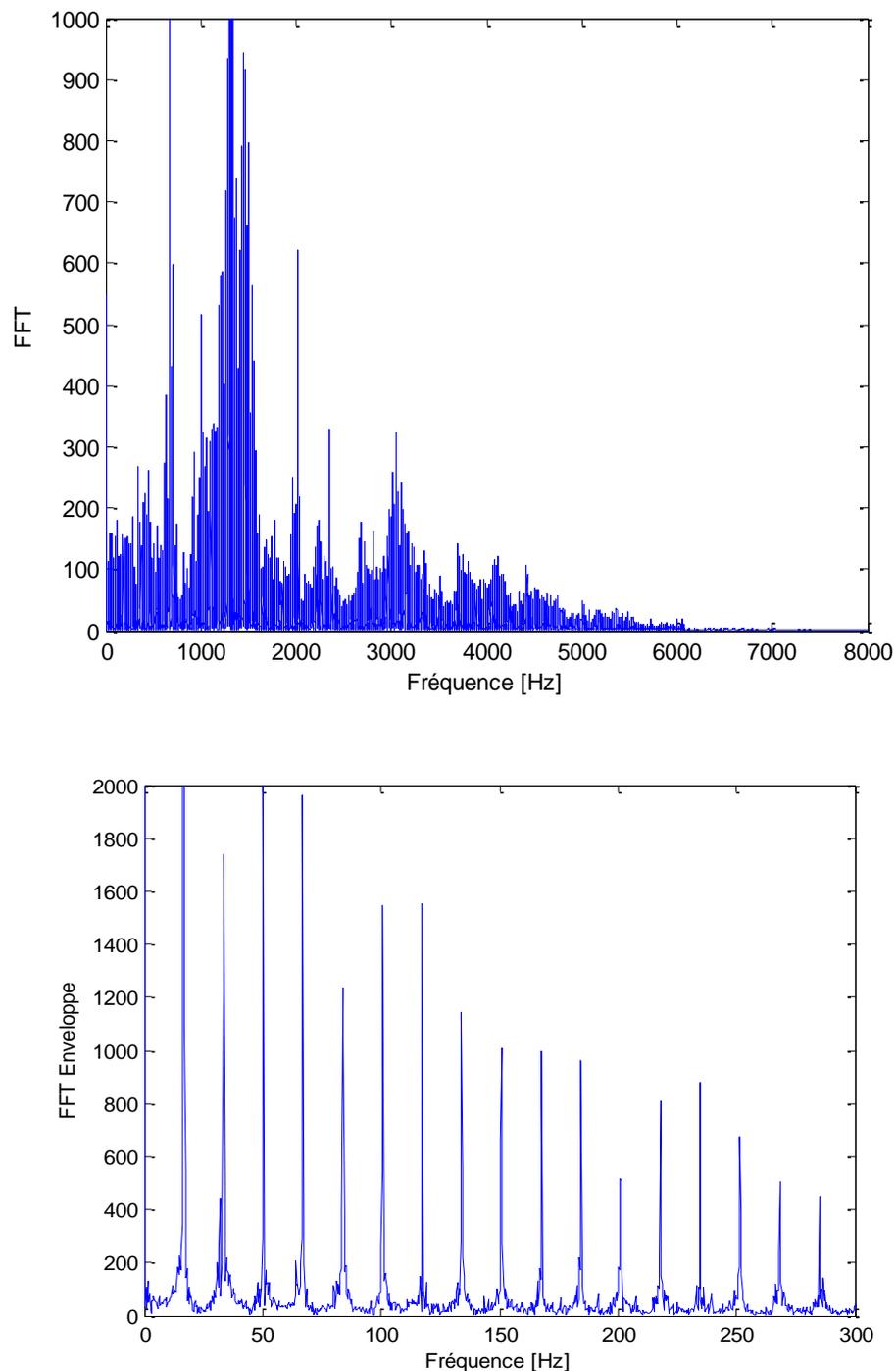


Figure IV.13 le signal du 12<sup>ème</sup> jour

## Chapitre IV : Analyse fréquentielle du défaut d'engrenage par application de la méthode d'enveloppe

---

Spectre d'enveloppe indique au jour 11, modulations très significative d'un choc sur le spectre, valeur du kurtosis très importante après filtrage (33,47) indiquent une évolution importante du défaut sur la roue d'entrée. le rapport expertise confirme un écaillage sur toute la longueur de la dent 15/16. le teste a été achevée se même jour.

### IV.5.Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif l'application de la méthode d'enveloppe sur les signaux des 12 jours les résultats obtenue, notamment le spectre d'enveloppe est comparé au rapport d'expertise et aux valeurs du kurtosis avant et après filtrage.

On se basant sur le spectre d'enveloppe, un défaut sur la roue d'entrée est détecté dès le premier jour et que nous avons attribué à un défaut de fabrication. L'évolution de l'amplitude du pic correspondant à la fréquence de rotation de la roue d'entrée et l'augmentation des valeurs du kurtosis après filtrage indiquent la progressions dans ce défaut.

Le rapport d'expertise n'indique un écaillage sur le profil de la dent 1/2 que le 7<sup>ème</sup> jour le spectre d'enveloppe et le kurtosis après filtrage se concorde parfaitement en indiquant une dégradation importante à partir du 9<sup>ème</sup> jour jusqu'à l'écaillage complet le 12<sup>ème</sup> jour cette remarque est confirmée par le rapport d'expertise qui indique un débit d'écaillage de la dent 15/16.

En conclusion, le spectre d'enveloppe constitue avec les valeurs du kurtosis après filtrage un moyen efficace d'une détection précoce permettant d'intervenir avant l'apparition complète du défaut.

En contrepartie ce bassons sur le spectre FFT, le kurtosis avant filtrage ainsi que la constations visuelle permet une détection bien tardive du défaut.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

---

### **Conclusion générale**

la maintenance préventive des machines tournantes reste un domaine de recherche d'actualité visant essentiellement le développement d'outils de diagnostic fiables. Depuis longtemps l'engrenage et le roulement ont suscité l'intérêt des chercheurs dans ce domaine du fait de leur importance en tant d'organes qui intéressent, mais les accidents de fonctionnement graves qu'ils peuvent provoquer en cas de défaillance détectée tardivement. Sans de méthodes ont été développées tout au long de ces dernières années ayant pour but commun la détection précoce du défaut d'engrenage et de roulement dès leur application. Évitant ainsi des pertes onéreuses, des arrêts inattendus et surtout des dépenses souvent considérables.

Dans ce travail nous avons étudié la sensibilité des indicateurs scalaires pour la détection précoce des défauts d'engrenages, et que cette sensibilité augmente par l'application des méthodes de détection telle que la méthode d'enveloppe. Le spectre d'enveloppe constitue avec les valeurs du kurtosis après filtrage un moyen efficace d'une détection précoce permettant d'intervenir avant l'apparition complète du défaut.

En contrepartie ce bassons sur le spectre FFT, le kurtosis avant filtrage ainsi que la constatation visuelle permet une détection bien tardive du défaut.

Comme perspectives pour ce travail, nous proposons de faire :

Une adaptation des méthodes de détection des défauts d'engrenages et même ceux des autres organes au régime variable ou de développer de nouvelles

### Référence Bibliographique

[1] Zwingelstein G : « Diagnostic des défaillances. Théorie et pratique pour les systèmes industriels ». Traité des Nouvelles Technologies - Série Diagnostic et Maintenance. Editions Hermès, Paris 1995.

[2] Arquès Philippe, « Diagnostic prédictif de l'état des machines », Edition Masson, Paris 1996.

[3] Joseph Hammond: « Fundamentals of signal processing: For sound and vibrations engineers ».Edition Wiley. West Sussex PO19 8SQ, England. 2008. Pp 416.

[4] Belhour Samira : « Contribution à l'optimisation de la maintenance predictive par l'utilisation du logiciel OMNITREND (Système on line) cas : Cimenterie HAMMA BOUZIANE ». Thèse de l'université de Mentouri CONSTANTINE. 2008.

[5] Schenk S A « vibrations équilibrage sur le site : Application à la maintenance industrielle ». Edition Schenk S A. 1994.

[6] SalhiNedjma « Surveillance et diagnostic d'une chaîne de production par les réseaux de neurones artificiels. ». Thèse magister. UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES. 2008 .

[7] P.D. McFadden et J.D. Smith, "Model for the vibration produced by multiple point defects in a rolling element bearing", Journal of Sound and Vibration, vol. 98, pages 263-273, 1985.

[8] D. Augeix, "Analyse vibratoire des machines tournantes", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, pages 1-22, 2002.

[9] M.E. Badaoui, "Contribution au Diagnostic Vibratoire des Réducteurs Complexes à Engrenages par l'Analyse Cepstrale", Phd. Thesis, 1999.

[10] S. H. Kia, H. Henao et G.A. Capolino, "Trends in gear fault detection using electrical signature analysis in induction machine-based systems", IEEE Workshop on Electrical Machines Diagnosis, pages 297-303, 2015.

[11] mémoire application de la méthode EMD (Empirical Mode Decomposition ) pour la detection des défauts de roulements

[12] Palaise\_David « Simulation numérique du comportement vibratoire d'engrenage endommages ». Thèse de l'école de technologie supérieure de MONTRÉAL. 2011.

[13] Thèse conception d'un système expert pour le diagnostic des roulements dans les machines tournantes fonctionnant en régime variable

[14] B. Bouzouane, A. Miloudi, N. Hamzaoui et A. Benchaala, Détection de défauts de machines tournantes par la méthode des ondelettes, 16ème Congrès Français de Mécanique, Nice, 1-5 Septembre 2003

## Référence bibliographique

---

[15]. A. Djebala, Application de la transformée par ondelettes à l'étude et l'analyse vibratoire des systèmes mécaniques, Thèse, Université Badji Mokhtar, 2008.

[16] X. Chiementin, L. Rasolofondraibe, F. Bolaers et B. Pottier, J. P. Dron, Détection précoce de défaut de roulement par adaptation d'ondelette aux signaux de type choc, 12ème colloque National de la Recherche en IUT, Brest, 1-2 juin 2006.

[17] F. Bolaers, J.P. Dron et L. Rasolofondraibe, Prédiction et suivi de l'évolution d'un écaillage de fatigue de roulement par analyse vibratoire, XVIème Congrès Français de mécanique, Nice, 649, (2003).

[18] X. Fan, M. J. Zuo, Gearbox fault detection using Hilbert and wavelet packet transform, Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2006), 966-982.

[19] Brüel&Kjær, Brüel&Kjær magazine, PredictionPartnership, partenariat pour la cartographie et la prévision du bruit, Bruit et vibration, le bulletin international de Brüel&Kjær, No .1. 2002.

[20] site web <https://www.tribofilm.fr/les-differents-types-de-maintenance/#:~:text=D%C3%A9finition%20de%20la%20maintenance,%C3%A9tablir%20une%20fonction%20requis.%20%C2%BB>.

[21] site web <https://www.legarrec.com/entreprise/type-maintenance-industrielle/>