

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**  
**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE  
**MASTER**

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : MAINTENANCE INDUSTRIELLE

PAR :

HAROUNI HAKIM

HAMMI TOUFIK

**Thème**

---

**Détection des défauts de roulement en utilisant**  
**l'analyse de la dérivée d'enveloppe**

---

Soutenu le 21/06/2017 devant le jury composé de :

Mr. B. HAMTACHE

Président

Mr. Y. IMAOUCHEN

Rapporteur

Mme. N. ADJOUADI

Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2016-2017

## *Remerciements*

*Qu'il nous soit d'abord permis de remercier et d'exprimer notre gratitude envers le Bon Dieu, qui nous a donné la patience et le courage pour que nous puissions achever ce travail.*

*Nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements et à exprimer notre profonde gratitude à tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce travail et en particulier notre promoteur Monsieur Alkama Rezak et co-promoteur Imaouchen Yacine pour leur dévouement et leur disponibilité durant la préparation de ce mémoire et les conseils qui été très précieux.*

*Nous sommes aussi très reconnaissants aux membres de jury qui nous feront l'honneur d'accepter de juger ce travail, d'apporter leurs réflexions et critiques scientifiques.*

*Notre reconnaissance s'adresse à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce modeste travail puisse voir le jour.*





## *Dédicaces*

*Pour vous mes très chères parents pour vos encouragements, vos multiples soutiens et votre affection quotidienne, Merci d'être en toutes circonstances. Je prie le tout puissant qu'Allah vous protège, vous donne une longue vie et nous aide à être toujours votre fierté*

*A mes très chères sœurs Saida, Fatima, Souad*

*A mes très chères frères Nassim, Fatah, Youcef*

*A toute ma famille*

*A tous mes amis*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin*

*Ainsi qu'à mon binôme Toufik, je te dédie ce travail.*

*Hakim Harouni*





## *Dédicaces*

*Pour vous mes très chères parents pour vos encouragements, vos multiples soutiens et votre affection quotidienne, Merci d'être en toutes circonstances. Je prie le tout puissant qu'Allah vous protège, vous donne une longue vie et nous aide à être toujours votre fierté*

*A mes très chères sœurs Fatima, Lamia*

*A mon très chère frère Fahem*

*A toute ma famille*

*A tous mes amis*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin*

*Ainsi qu'à mon binôme Hakim je te dédie ce travail.*

*Toufik Hammi*

# **Table des matières**

# Table des matières

Liste des figures

Nomenclature

Introduction générale ..... 1

## **Chapitre I : Surveillance des machines tournantes par analyse des vibrations**

I.1. Introduction ..... 3

I.2. Définition de maintenance ..... 3

I.3. Les objectifs de la maintenance ..... 3

I.4. Différents types de maintenance ..... 3

I.4.1. La maintenance corrective ..... 4

I.4.2. Maintenance préventive ..... 4

I.4.2.1. Maintenance préventive systématique ..... 5

I.4.2.2. Maintenance préventive conditionnelle ..... 6

I.5. Défaillances des machines tournantes ..... 6

I.5.1 Engrenage ..... 6

I.5.1.1. Les types d'engrenage et leurs opérations ..... 7

I.5.1.2. Les défauts des engrenages ..... 9

I.5.1.3. Quelques défauts d'usures ..... 10

I.5.2. Roulement ..... 11

I.5.2.1. Les types de roulement ..... 13

I.5.2.2. Défauts de Roulements ..... 13

I.5.2.3. Quelques défauts d'usures ..... 14

I.5.3. Arbre ..... 15

I.5.4. Accouplement ..... 17

I.5.5. Autre défaillance (Défaillance d'ordre électrique) ..... 18

I.5.5.1. Défaillance des circuits électriques statoriques ..... 19

I.5.5.2. Défaillance des circuits électriques rotoriques ..... 19

I.6. Sources d'information ..... 20

I.6.1. Analyse de lubrifiants « huiles » ..... 20

I.6.1.1. Définition et rôle de lubrification ..... 20

I.6.2. Thermographie infrarouge ..... 21

I.6.2.1. Définition ..... 21

I.6.2.2. Principe de base ..... 21

I.6.3. L'analyse des mesures ultrasonores ..... 22

I.6.4. L'analyse vibratoire .....	23
I.7. Conclusion .....	24
<b>Chapitre II : Méthodes d'analyse des vibrations</b>	
II.1. Introduction .....	25
II.2. Analyse dans le domaine de temps .....	25
II.2.1. Indicateurs classiques .....	25
II.2.1.1. Valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square).....	26
II.2.1.2. Facteur de crête.....	26
II.2.1.3. Kurtosis.....	27
II.3. Analyse dans le domaine de fréquence.....	27
II.3.1. Analyse spectrale.....	28
II.3.2. Analyse d'enveloppe .....	29
II.3.3. Analyse par opérateur TKEO .....	30
II.3.4. Analyse par la dérivée d'enveloppe.....	30
II.4. Analyse temps-fréquence .....	31
II.4.1. Wigner-ville.....	32
II.4.2. Transformée de Fourier à court terme .....	33
II.4.3. La transformée en ondelettes .....	33
II.4.3.1. La transformée en ondelette continue (TOC) .....	34
II.4.3.2. La transformée en ondelette discrète (TOD) .....	35
II.5. Conclusion .....	35
<b>Chapitre III : Simulation des signaux vibratoires</b>	
III.1. Introduction .....	36
III.2. Analyse spectrale.....	36
III.2.1. Signal sinusoïdal d'une seule fréquence .....	36
III.2.2. La somme de plusieurs sinusoïdes .....	37
III.3. Analyse d'enveloppe .....	38
III.3.1. Signal modulé en amplitude .....	38
III.3.2. Signal modulé en fréquence .....	39
III.3.3. Signal modulé en amplitude et en fréquence .....	40
III.4. Analyse par l'opérateur de l'énergie TKEO .....	41
III.4.1. Simulation de signal de roulement .....	41
III.5. Limite de performance des analyses classique (Enveloppe et TKEO) : .....	43
III.6. Analyse spectrale (Enveloppe et TKEO) .....	44
III.7. Conclusion.....	46

**Chapitre IV : Détection de défaut de roulement par l'analyse de dérivation**

IV.1 Introduction .....	47
IV.2 Défaillances des roulements.....	47
IV.3 Introduction sur l'analyse par la dérivée d'enveloppe .....	48
IV.4 Détection de défaut de roulement (cas réel).....	48
IV.4.1 Banc d'essais de l'ÉTS .....	48
IV.4.2 Application sur des signaux réels.....	49
IV.4.2.1 Signal sans défaut t0 .....	50
IV.4.2.2 Signal avec défaut t1 .....	52
IV.4.2.3 Signal avec défaut t2 .....	54
IV.4.2.4 Signal avec défaut t3 .....	56
IV.4.2.5 Signal avec défaut t4 .....	58
IV.4.2.5 Signal avec défaut t5 .....	60
IV.5 Conclusion .....	62
IV.5 Conclusion générale .....	63
Références bibliographique .....	



## **Liste des figures**

## ❖ Liste des figures

N°	Nom	Page
I.1	Les différents types de maintenance	4
I.2	Remplacement des roulements	5
I.3	Schéma représentatif d'un système d'engrenage	7
I.4	Engrenages à axes parallèles (à gauche : denture droite, à droite : denture hélicoïdale)	8
I.5	Exemple des engrenages à axes non-parallèle	8
I.6	Un défaut d'engrenage (à gauche : l'usure de toutes les dents ; à droite : fragment d'une dent).	9
I.7	Casse des dentures d'engrenage et son signal vibratoire	10
I.8	Défauts réels d'engrenage réparti et localisé	11
I.9	Différentes composantes d'un roulement à billes	12
I.10	Les principaux types de roulements	13
I.11	Défauts des roulements à billes. (a) sur la bague interne; (b) sur la cage; (c) sur une bille et (d) sur la bague externe	14
I.12	Quelques défaillances affectant les roulements	15
I.13	Exemple d'un arbre d'une machine tournante	16
I.14	Un accouplement	17
I.15	Un désalignement angulaire d'un accouplement	18
I.16	Un désalignement radial d'un accouplement	18
I.17	Un désalignement axial d'un accouplement	18
I.18	Un rotor et un stator	19
I.19	La caméra infrarouge	21
I.20	Thermogramme et image visible d'une boîte à borne d'un moteur	22
I.21	Mesure par ultrason	23
I.22	Nature d'une vibration	24
II.1	Vibration complexe	26
II.2	Evolution du Kurtosis aux différents stades de dégradation du roulement	27
II.3	Signal périodique complexe $F(t)$	28
II.4	Décomposition en série de Fourier de la fonction $F(t)$	28
II.5	Spectre correspondant à la fonction $F(t)$	29
II.6	Exemple de défaut de de roulement	30
II.7	Exemple d'un spectre résultant de FWE0	31
II.8	Principe de la transformée de Fourier à court terme (TFCT)	33
II.9	Translation (changement de position) des ondelettes	34
II.10	Changement d'échelle (niveau) des ondelettes	34
II.11	Principe de la TO continue	35
III.1	(a) le signal sinusoïdal $x_1(t)$ , (b) son spectre	37
III.2	(a) le signal $x_2(t)$ , et (b) son spectre	38
III.3	(a) signal $x_3(t)$ modulé en amplitude, (b) son spectre, et (c) spectre d'enveloppe	39
III.4	(a) signal $x_4(t)$ modulé en fréquence, (b) son spectre, et (c) spectre d'enveloppe	40
III.5	(a) signal $x_5(t)$ modulé en amplitude et en fréquence, (b) son spectre, et (c) spectre d'enveloppe	41

III.6	(a) signal d'un défaut roulement simulé, (b) même signal avec bruit	42
III.7	(a) le spectre de signal simulé, et (b) son spectre d'enveloppe, et c) son spectre après transformation par l'opérateur TKEO	43
III.8	(a) le signal $s(t)$ mesuré avec défaut, (b) le signal mesuré $s(t)$ avec défaut on ajoute des interférences et de bruit	44
III.9	(a) le spectre de signal simulé $S(t)$ , (b) son spectre d'enveloppe, (c) son spectre de TKEO	45
III.10	Le spectre de EDO pour le signal simulé $S(t)$	46
IV.1	Éclatement d'un roulement à billes	48
IV.2	(A) Banc d'essai ÉTS de Montréal, (B) Défaut de bague extérieure du roulement	49
IV.3	Tailles du défaut de bague externe simulé sur le banc de l'ÉTS	49
IV.4	(a) Le signal mesuré avec roulement sain $t_0$ , (b) son spectre de Fourier	50
IV.5	(c) le spectre d'enveloppe, (d) spectre du signal traité avec TKEO, (e) Le spectre EDO du signal sain	51
IV.6	(a) Le signal mesuré avec un défaut de bague externe $t_1$ , (b) son spectre de fréquence	52
IV.7	(c) le spectre d'enveloppe, (d) le spectre du signal traité par le TKEO, (e) le spectre du signal du défaut $t_1$ transformé par l'opérateur EDO	53
IV.8	(a) Le signal mesuré avec un défaut de bague externe $t_2$ , (b) son spectre de fréquence	54
IV.9	(c) le spectre d'enveloppe, (d) le spectre du signal traité par le TKEO, (e) Le spectre du signal du défaut $t_2$ transformé par l'opérateur EDO	55
IV.10	(a) Le signal mesuré avec un défaut de bague externe $t_3$ , (b) son spectre de fréquence	56
IV.11	(c) le spectre d'enveloppe, (d) le spectre du signal traité par le TKEO, (e) Le spectre du signal du défaut $t_3$ transformé par l'opérateur EDO	57
IV.12	(a) Le signal mesuré avec un défaut de bague externe $t_4$ , (b) son spectre de fréquence	58
IV.13	(c) le spectre d'enveloppe, (d) le spectre du signal traité par le TKEO, (e) Le spectre du signal du défaut $t_4$ transformé par l'opérateur EDO	59
IV.14	(a) Le signal mesuré avec un défaut de bague externe $t_5$ , (b) son spectre de fréquence	60
IV.15	(c) le spectre d'enveloppe, (d) le spectre du signal traité par le TKEO, (e) Le spectre du signal du défaut $t_5$ transformé par l'opérateur EDO	61
IV.16	Amplitude à la fréquence BPFO obtenu par EDO en fonction de la taille du défaut	62



# **Nomenclature**

## Nomenclature

$R_v$  : Rapport de vitesse.

$N$  : nombre de dents.

$f_e$  : Fréquence d'engrènement.

$f_r$  : Fréquence de rotation de l'arbre.

$T$  : Temps (s).

RMS : Valeur efficace ou moyenne quadratique d'un signal

$x(n)$  : Signal temporel mesuré.

$\bar{x}$  : La valeur moyenne des amplitudes.

$N_e$  : représente le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

FC : facteur crête.

ACcrete : Valeur de crête.

Aeff : Valeur efficace.

$M_2$  et  $M_4$  : sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2.

TF : La transformée de Fourier..

$x(t)$  : Signal continue

BPFO : la fréquence caractéristique de défaut de la bague externe ;

BPFI : la fréquence caractéristique de défaut de la bague interne ;

BSF : la fréquence caractéristique de défaut des billes, La vibration se manifeste souvent  
à 2BSF

FTF : la fréquence caractéristique de défaut de la cage

$\Psi[x(t)]$  : Analyse par opérateur TKEO mathématiquement

$\Gamma[x(t)]$  : Analyse par la dérivée d'enveloppe mathématiquement

$y(n) = H[x(n)]$  : Transformée de Hilbert discrète

$W_S(t, \nu)$  : La transformation de Wigner-Ville

$S(t)$  : Signal complexe quelconque.

$h(t)$  fenêtre d'observation déterminant le lissage fréquentiel

$g(t)$  fenêtre de lissage temporel.

$Xg(\tau, f)$  : La TFCT continue d'un signal

$N_p$  : Le nombre de point du signal.

$\psi_{t,a}$  : Ondelette mère

$F_e$  : Fréquence d'échantillonnage

$f_d$  : Fréquence de défaut



# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

La surveillance des machines tournantes par l'analyse vibratoire est un sujet qui a reçu un grand intérêt ces dernières années. Initialement, elle était destinée à protéger les installations afin d'éviter des dégradations et des catastrophes économiques et même humaines causées par des défauts inattendus. La surveillance et le diagnostic des défauts des systèmes d'engrenages sont utilisés pour la prévention d'un défaut sérieux dans les installations mécaniques. Les informations de la surveillance peuvent être utilisées pour les planifications des activités de la maintenance. Cette surveillance devient le fondement d'une nouvelle stratégie de la maintenance qu'est la maintenance prédictive.

Les outils de la maintenance conditionnée, qui permettront une meilleure appréciation de la «santé» des machines et des systèmes, sont nombreux et reposent sur : l'analyse vibratoire, la déformation, le flux de chaleur, le bruit, etc ... Les capteurs, les systèmes de mesure et de traitement de données fournissent des informations précieuses sur les tendances et l'évolution dans le comportement des certains organes. Les outils de surveillance facilitent également l'acte de rationalisation du diagnostic.

Les machines tournantes comme le compresseur, les turbines à vapeur, l'automobile, les ventilateurs industriels, et les moteurs des avions sont largement utilisés dans de nombreux domaines industriels. Comment extraire, caractériser et identifier les défauts à partir des signaux vibratoires sont les étapes clés dans le diagnostic des défauts des machines tournantes.

Les machines tournantes sont massivement présentes dans de nombreuses installations industrielles. Les défaillances que l'on peut rencontrer sur une machine tournante sont nombreuses. Un des moyens de surveillance de l'état mécanique d'une machine tournante est la collecte et l'analyse de ses vibrations. Les vibrations captées, collectées et analysées peuvent renseigner sur l'état d'un système, en particulier sur l'état d'une machine tournante ou de certains éléments de celle-ci. La vibration peut alors être considérée comme un symptôme. Ainsi un traitement des signaux vibratoires captés (ou signatures) permet :

- De définir un état normal ou anormal de la machine ou d'une pièce de la machine.
- De disposer d'une archive permettant la détection ou le diagnostic de la machine.

Il est intéressant de noter que l'acquisition de ces signatures peut se faire sans avoir besoin d'arrêter la machine.

Les techniques de traitement du signal dans le domaine de temps et de fréquence peuvent être utilisées pour identifier et isoler les défauts dans une machine tournante. L'analyse du spectre d'un signal peut nous aider à détecter l'apparition d'un défaut tandis que la décomposition de ce signal dans le temps peut nous fournir la nature et la position de ce défaut.

Dans le cadre de notre travail, nous présentons dans le premier chapitre les principales défaillances des machines tournantes industrielles, particulièrement celles dues à un défaut de roulement, et nous allons ensuite présenter les principales sources d'information pour surveillance et diagnostic des machines tournantes.

Le deuxième chapitre, introductif, présente d'une manière générique les différentes techniques du traitement du signal les plus utilisées dans le domaine temporel et fréquentiel.

Nous étudions au troisième chapitre les modèles de simulation vibratoires, nous décrivons les différentes techniques d'analyse pour le traitement du signal vibratoire destinés à identifier des défauts de roulements, leur analyse par la méthode d'analyse d'enveloppe et analyse par l'opérateur TKEO.

Dans le quatrième chapitre nous présentons une analyse réalisée sur des signaux vibratoires réels dont le but de diagnostic des roulements sans et avec défauts, leur analyse est par l'analyse d'enveloppe et TKEO et une nouvelle technique qu'est l'analyse par la dérivée d'enveloppe EDO.

Un bilan de l'ensemble des résultats est donné en conclusion en soulignant les points des méthodes utilisées dans ce travail. Les points négatifs peuvent être améliorés par d'autres études ultérieures.



# **Chapitre I :**

---

## **Surveillance des machines tournantes par**

---

### **analyse des vibrations**

## I.1. Introduction

Les machines tournantes occupent actuellement une place prépondérante dans les applications faisant intervenir des systèmes de transmission de puissance. La mesure des vibrations sur ces machines revêt une importance toute particulière puisqu'elle joue un rôle capital dans les programmes de maintenance. Lorsque ces vibrations sont trop élevées, elles causent souvent un sentiment d'inquiétude, puisqu'elles annoncent possiblement un arrêt ou un bris imprévu et par conséquent une perte non négligeable de productivité ou une atteinte à la sécurité du personnel.

## I.2. Définition de maintenance

D'après l'Afnor (NF X 60-010) : « La maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans état spécifié ou en mesure d'assurer un service » [01].

Dans une entreprise, maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, réparation, graissage, contrôle, etc.) qui permettent de conserver le potentiel pour assurer la production avec efficacité et qualité [01].

## I.3. Les objectifs de la maintenance

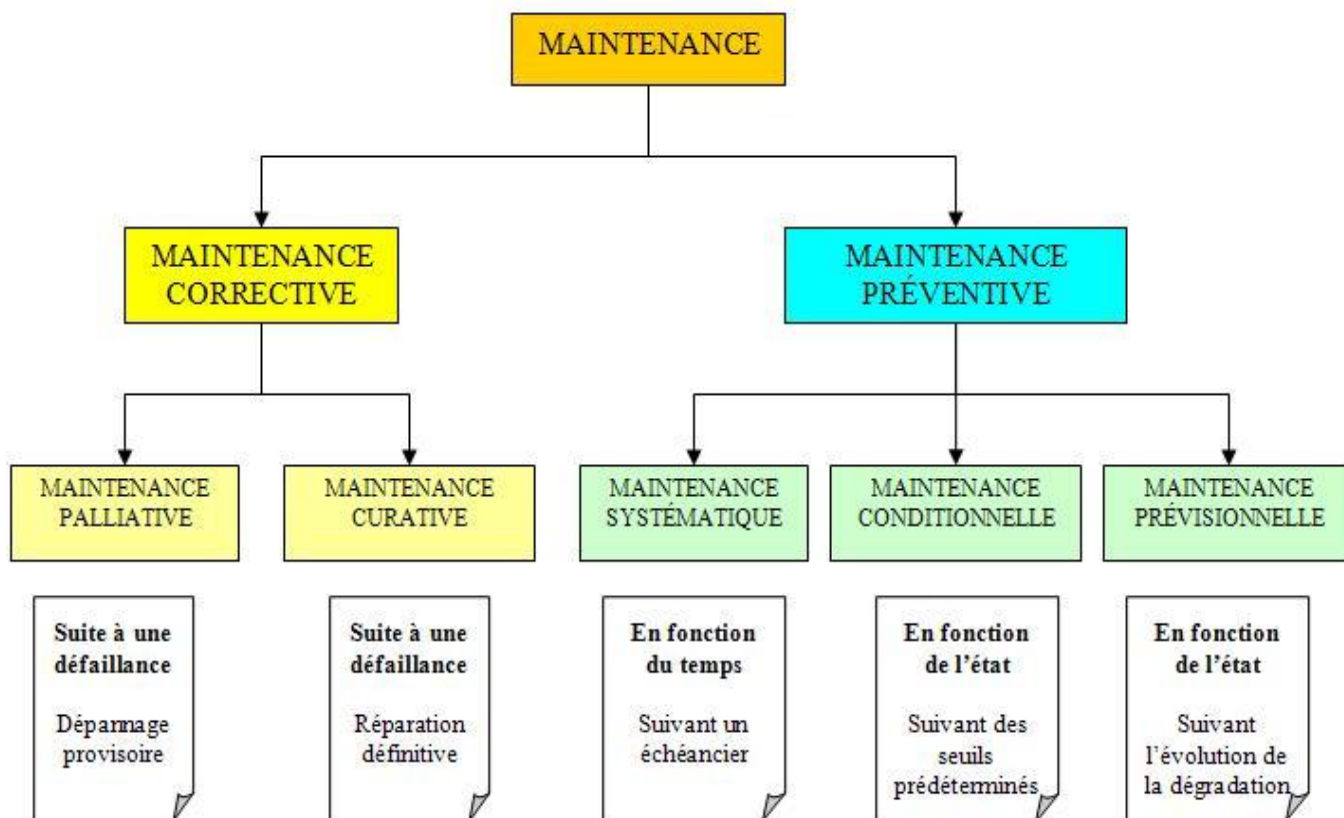
La maintenance doit se faire de telle sorte que l'outil de production soit disponible et en bon état de fonctionnement ; elle est, de ce fait, intime liée à la qualité. Les objectifs de la maintenance, se greffent ceux de la production ou services attendus tel que la qualité, le cout, les délais...etc.

De ce point de vue, les objectifs de la maintenance réalisés à travers son organisation, sa gestion et ses interventions, sont nombreux : [02]

- ✓ Assurer la disponibilité
- ✓ Développer l'économie de l'entreprise
- ✓ Assurer la bonne qualité des produits
- ✓ Assurer la maintenabilité des équipements
- ✓ Assurer la sécurité du personnel et des installations
- ✓ Augmenter la productivité

## I.4. Différents types de maintenance

On distingue deux principaux types de la maintenance :



**Figure I.1 :** Les différents types de maintenance [03].

#### I.4.1. La maintenance corrective

Elle est appelée aussi maintenance fortuite, accidentelle ou curative. L'opérateur de maintenance intervient après défaillance. C'est l'attitude qui consiste à attendre la panne pour procéder à une intervention. Elle peut se décomposer en deux branches : la maintenance palliative et la maintenance curative [03].

- Maintenance palliative : l'action de dépannage permet de remettre provisoirement le matériel à un de performance acceptable mais au niveau optimal.
- Maintenance curative : l'intervention qui suit la défaillance permet le rétablissement du niveau de performance optimal du matériel.

#### I.4.2. Maintenance préventive

Une maintenance subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée des paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et planifier les interventions, il existe deux autres types : [03]

### I.4.2.1. Maintenance préventive systématique

En maintenance systématique, la visite des équipements est dictée par des données statistiques à intervalles réguliers et fixe. Les éléments constitutifs est équipements étant renouvelés avant l'équipement total de leurs vie utile. L'intervention est provoquée avant l'avarie [03].

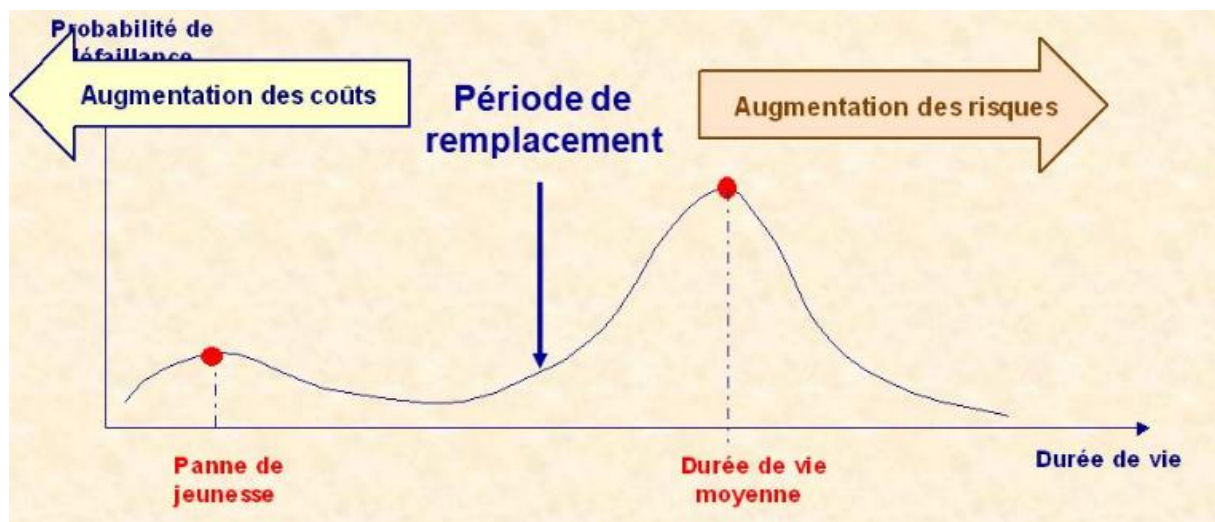
Les avantages se présentent sous la forme :

- ✓ D'une meilleure gestion des coutes et des arrêts ; les arrêts sont programmés en accord avec les utilisateurs.
- ✓ D'une meilleur connaissance du comportement des équipements ; suivi des interventions et l'analyse des défaillances.
- ✓ D'une réduction du correctif résiduel.

Les inconvénients se situent à deux niveaux :

- ✓ Le cout des opérations est élevé.
- ✓ Le taux de défaillance de l'équipement n'est pas toujours amélioré par le remplacement périodique de composants.

La figure ci-dessous montre la limite de la maintenance préventive systématique appliquée à un roulement :



**Figure I.2 : Remplacement des roulements [03].**

#### **I.4.2.2. Maintenance préventive conditionnelle**

La maintenance conditionnelle dite aussi prédictive, elle est subordonnée à un type d'événement prédéterminé par un autodiagnostic, une information d'un capteur, d'une mesure d'une usure ou un autre outil révélateur de l'état de dégradation actuel et de prématuré du bien.

La pratique de ce type de maintenance consiste à ne pas changer l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure mettant en cause à brève échéance ses performances et comporte trois phases :

- ✓ La détection du défaut qui se développe.
- ✓ L'établissement d'un diagnostic.
- ✓ L'analyse de la tendance.

L'efficacité d'une maintenance conditionnelle est subordonnée à l'efficacité et à la fiabilité des paramètres de mesure qui la caractérisent. Elle sera donc réservée aux matériels dont l'évolution d'éventuels défauts est facilement détectable et mesurable.

Le bon choix du type de maintenance devra toujours résulter d'un compromis financier et technique qui nécessite la recherche de plus de fiabilité possible au meilleur cout. Alors il faut quantifier en permanence les charges de la maintenance et n'appliquer la maintenance conditionnelle que lorsque son avantage est supérieur au cout de la maintenance systématique ou corrective [03].

### **I.5. Défaillances des machines tournantes**

Une machine tournante n'est enfaite qu'un jeu de mécanismes mobiles entre eux, et d'organes combinés dans le but d'effectuer une tache précise, transformer une énergie, transmettre un mouvement ... etc. Une panne dans une machine tournante n'est que la résultante d'une avarie ou d'une suite d'avarie sur l'un ou plusieurs de ses organes [04].

Les défaillances des éléments des machines tournantes on trouve :

#### **I.5.1 Engrenage**

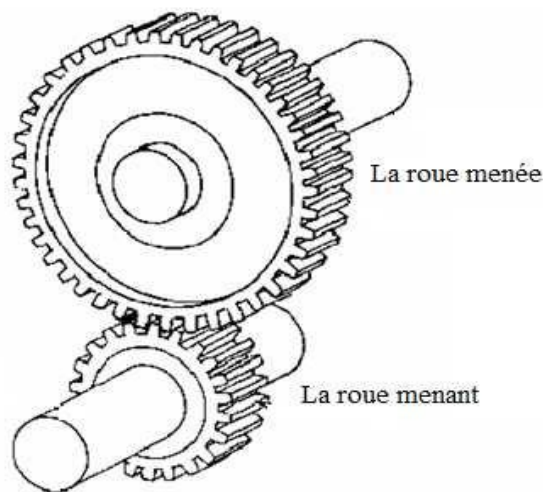
Les systèmes d'engrenage sont des éléments essentiels largement utilisés dans une variété d'applications industrielles. Puisque presque 80% des pannes dans les systèmes de transmission des machines sont causées par la défaillance d'engrenage [05].



Les engrenages sont très utilisés dans les systèmes de transmission de l'énergie, dans la production des hautes vitesses rotationnelles et dans le changement de la direction du mouvement rotationnelle. La nécessité de baisser le coût de la production et de la maintenance conduit la surveillance des engrenages à devenir un très champ important pour la recherche [06].

#### I.5.1.1. Les types d'engrenage et leurs opérations

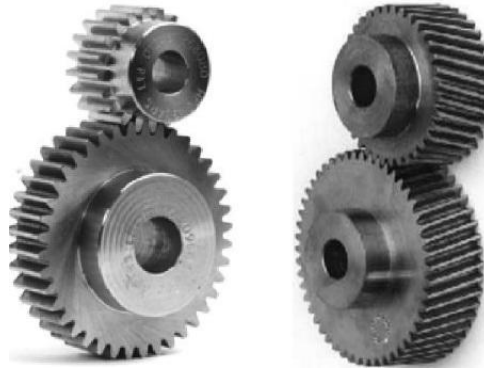
Les engrenages sont des mécanismes composés de deux roues dentées utilisés pour la transmission de l'énergie mécanique entre deux arbres (une roue menée et une autre menant).



**Figure I.3 :** Schéma représentatif d'un système d'engrenage.

Les arbres sont en mode parallèles ou non parallèles, concourants ou non concourants et perpendiculaires ou non perpendiculaires. Donc Selon les positionnements relatifs des arbres, deux grandes classes d'engrenages peuvent être distinguées :

- Les engrenages à axes parallèles : Les deux arbres sont parallèles. Diverses catégories sont distinguées selon la géométrie des dents (On trouve les dentures droites, les dentures hélicoïdales, etc....
- Les engrenages à axes non parallèles : dont les arbres ne sont pas parallèles. Selon la géométrie des dents on distingue : les dentures droites, hélicoïdales, conique, spirales, etc....



**Figure I.4 :** Engrenages à axes parallèles (à gauche : denture droite, à droite : denture hélicoïdale).



**Figure I.5 :** Exemple des engrenages à axes non-parallèle.

Les engrenages peuvent avoir diverses usages comme la réduction (ou la variation) de vitesse de rotation entre deux arbres avec une réduction (ou augmentation) du couple moteur. La vitesse de rotation augmente si la roue menée à un nombre de dents supérieur à la roue menant et diminue si le nombre de dents est inférieur. Le rapport de la vitesse entre les deux roues est donné par l'équation suivante :

$$R_v = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

Où :  $N_1$  et  $N_2$  sont les nombres de dents sur les roues menée et menant respectivement.

Un arbre tournant à une fréquence ( $f_r$ ) sur lequel est monté un pignon ou une roue comptant ( $N$ ) dents sera soumis à ( $N$ ) chocs par tour. La fréquence caractéristique de l'engrènement sera donc :

$$f_e = N \cdot f_r \quad (2)$$

Si nous considérons un engrenage composé de deux roues dentées 1 et 2 et présentant ( $N_1$ ) et ( $N_2$ ) dents et tournant aux fréquences ( $f_1$ ) et ( $f_2$ ) respectivement. A chaque fois qu'une dent de la roue menant s'engage dans la roue menée, il se produit une prise de charge périodique au rythme d'engagement des dents selon une fréquence d'engrènement ( $f_e$ ) égale à la fréquence de rotation de la roue multipliée par son nombre de dents : [07]

$$f_e = N_1 \cdot f_1 = N_2 \cdot f_2 \quad (3)$$

### I.5.1.2. Les défauts des engrenages

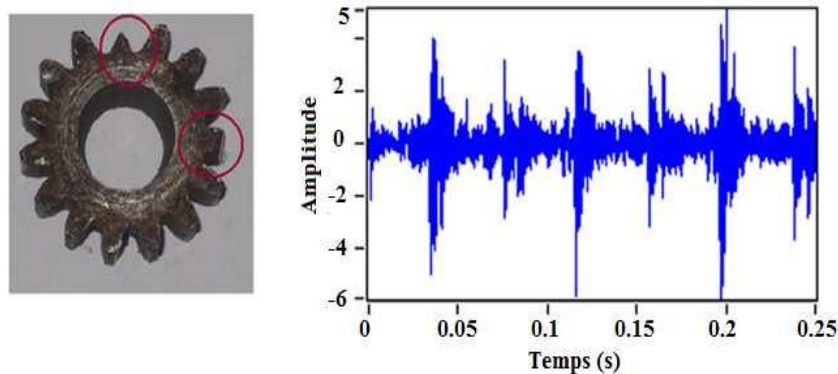
Les engrenages sont généralement soumis à des conditions sévères, d'où la nécessité de les soumettre à la surveillance d'une manière continue en vue de détecter les défaillances. La détection précoce des défauts dans les systèmes mécaniques est de grande importance pour les opérateurs ; comme elle permet de planifier l'arrêt et la réparation du système au lieu d'un défaut catastrophique inattendu [07].

A cet effet, il faut connaître les différents types des défauts des engrenages, il existe trois types de défauts d'engrenages : les défauts de fabrication (l'erreur dans le profil des dents, excentricité de la roue, etc.), les défauts d'installation (alignement, etc.) et les défauts apparus pendant la transmission (usure, fissure, etc.). Au début la fissure des dents n'est pas considéré comme un problème sérieux ; mais comme elle va se propager, le défaut sera accéléré et peut causer un défaut dentaire catastrophique. Si le défaut est détecté, l'engrenage peut être remplacé avant que la denture sera complètement fracturée. A cet effet, plusieurs efforts ont été faits pour le développement des méthodes fiables pour la détection des défauts. [08]



**Figure I.6 :** Un défaut d'engrenage (à gauche : l'usure de toutes les dents ; à droite : fragment d'une dent).

La casse des dentures comme le problème le plus sérieux des engrenages parce qu'elle va conduire à la défaillance complète du système d'engrenage s'ils ne sont pas détectés d'une manière précoce



**Figure I.7 :** Casses des dentures d'engrenage et son signal vibratoire.

### I.5.1.3. Quelques défauts d'usures

**a) Usure abrasive et adhésive :** Enlèvement de matière dû au glissement des deux surfaces de contact. Le développement de cette usure est lié à la charge mécanique à transmettre et à la vitesse de glissement, ainsi qu'à la présence d'éléments abrasifs dans le lubrifiant.

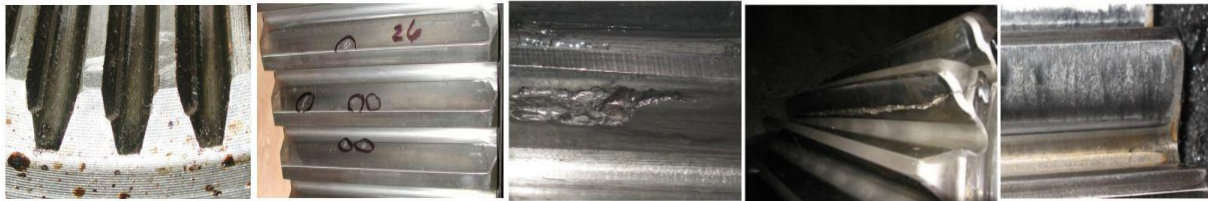
**b) Pitting ou piquûres :** Il s'agit de trous plus ou moins profonds qui affectent toutes les dents, en particulier dans la zone du cercle primitif. Cette avarie se produit surtout sur des engrenages en acier de construction relativement dur, et donc plus fragile,

**c) Ecaillage :** Il s'agit également de trous mais ceux-ci sont moins nombreux, plus profonds et plus étendus que ceux du pitting. Les dégradations sont produites par fatigue en sous-couche, au point de cisaillement maximal. On rencontre ce type d'avarie dans les engrenages cémentés (couche superficielle durcie)

**d) Fissuration :** Elle progresse à chaque mise en charge, et elle est située en pied de dent. Elle apparaît sur des aciers fins et durcis, qui sont sujets aux concentrations de contraintes. Leur apparition est due à un dépassement de la limite élastique en contrainte au pied de dent du côté de la dent en traction.

**e) Grippage :** Conséquence directe d'une destruction brutale du film d'huile, ou d'un frottement sous charge provoquant des hausses de températures. Le grippage est favorisé

essentiellement par des vitesses élevées, de gros modules, un faible nombre de dents en contact [09].



a) Abrasive

b) Pitting

c) Ecaillage

d) Fisuration

e) Grippage

**Figure I.8 :** Défauts réels d'engrenage réparti et localisé.

### I.5.2. Roulement

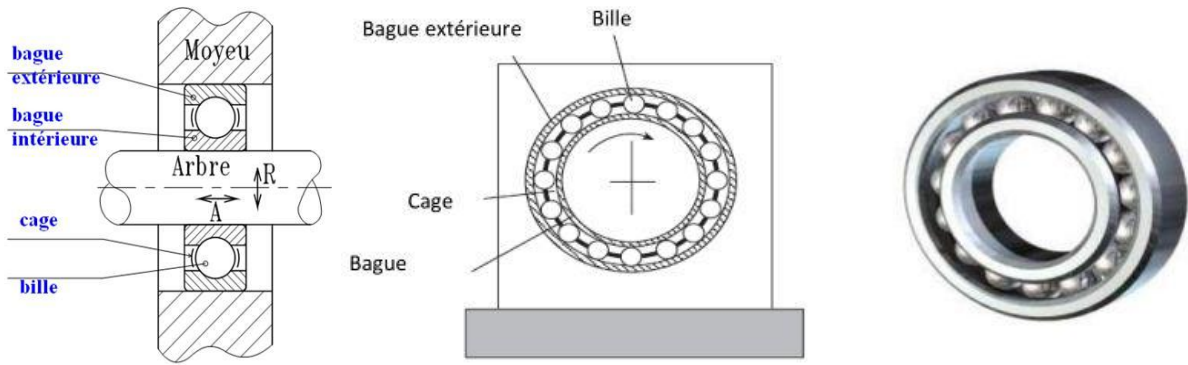
Un roulement est un élément mécanique qui s'interpose entre deux parties d'une machine dont l'une est tournante et l'autre est fixe. Le roulement a été utilisé depuis longtemps, mais sous une forme simpliste. Le premier à avoir établi un dessin pour le roulement à billes est « Léonard De Vinci » (XV<sup>ème</sup> siècle) qui fut ainsi considéré comme l'inventeur du roulement moderne. Aujourd'hui, les roulements prennent des formes plus développées et plus variées et leur utilisation au sein des machines tournantes devient une nécessité absolue. Ceci explique bien l'intérêt actuel qu'on leur accorde, il peut aussi supporter des charges radiales ou axiales plus ou moins importantes.

Le roulement est composé des éléments suivants :

- Deux bagues concentriques, une bague intérieure et une bague extérieure, comportant des chemins de roulement
- Des corps roulants, billes, rouleaux ou aiguilles, permettant la rotation des deux bagues avec un frottement minimal ;
- Une cage séparant et guidant les éléments roulants

[10]





**Figure I.9 :** Différentes composantes d'un roulement à billes.

Les fréquences caractéristiques au roulement :

$$F_{b \text{ ext}} = 0.5 F_r n \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right] \quad (4)$$

$$F_{b \text{ int}} = 0.5 F_r n \left[ 1 + \left( \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right] \quad (5)$$

$$F_{cage} = 0.5 F_r \left[ 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right] \quad \text{Donc} \quad F_{cage} = F_{b \text{ int}}/n \quad (6)$$

$$F_{bille} = 0.5 F_r \frac{D}{d} \left[ 1 - \left( \frac{d \cos \alpha}{D} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Avec

$F_{b \text{ ext}}$  : la fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague extérieure.

$F_{b \text{ int}}$  : la fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague intérieure,

$F_{cage}$  : la fréquence de passage d'un défaut de cage.

$F_{bille}$  : la fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau) sur la bague externe ou sur la bague interne.

$F_r$  : la fréquence de rotation.

D : diamètre moyen du roulement.

d : diamètre de bille.

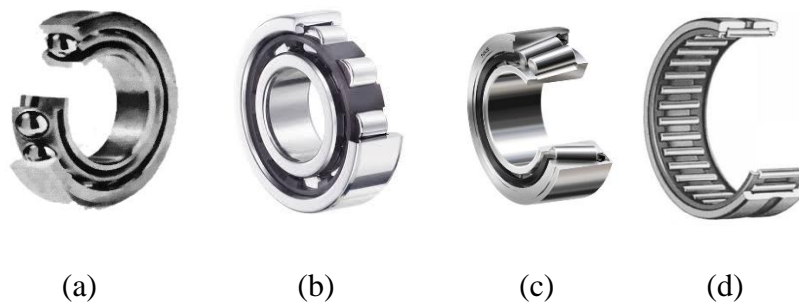
n : le nombre de billes.

$\alpha$  : l'angle de contact.

### I.5.2.1. Les types de roulement

En pratique pour chaque application existe un roulement approprié.

- Le roulement à billes offre un faible frottement grâce au contact ponctuel mais n'est utilisé que pour des charges limitées.
- Le roulement à rouleaux offre une plus grande capacité de chargement grâce au contact linéaire provoquant aussi un frottement plus important. Les rouleaux peuvent prendre différentes formes cylindriques, coniques ou sphériques.
- Les roulements à aiguilles sont quant à eux utilisés lorsqu'un rapport charge/encombrement important est requis [11].
- Les principaux types de roulements sont illustrés dans la figure I.10 :



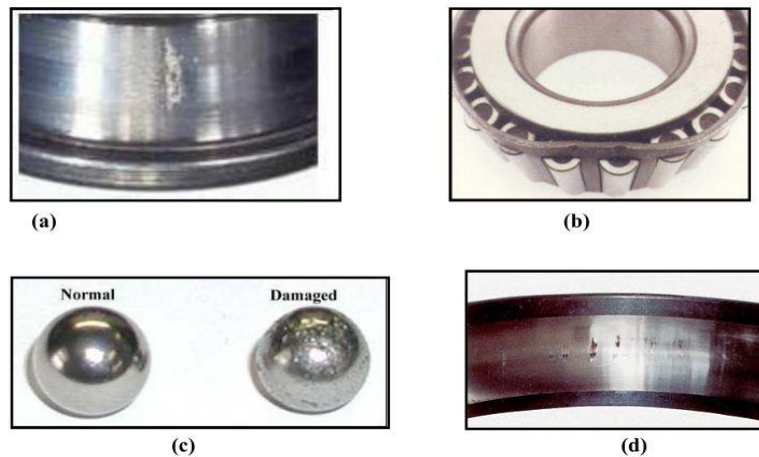
**Figure I.10 :** Les principaux types de roulements.

- (a) Roulement à billes
- (b) Roulement à rouleaux cylindriques
- (c) Roulement à rouleaux coniques
- (d) Roulement à aiguilles

### I.5.2.2. Défauts de Roulements

Des vibrations sont produites quand les conditions de roulement ne sont pas parfaites, et qui peuvent être induites par des dommages extérieurs ou des forces agissant sur les roulements (déséquilibre, désalignement, etc.). Les dommages surfaciques sont dus à la fatigue en présence des efforts élevés aux points de contact. Plus spécifiquement, les vibrations sont produites par les impacts qui se produisent quand la surface d'une composante heurte une autre surface. Comme le roulement tourne, les impulsions résultantes se produisent périodiquement. Les fréquences de ces impulsions sont uniquement déterminées par l'emplacement où le défaut se

produit, soit sur la bague interne, sur la bague externe, ou sur les éléments de billes. La géométrie du roulement est aussi un paramètre très important [10].



**Figure I.11 :** Défauts des roulements à billes. (a) sur la bague interne; (b) sur la cage; (c) sur une bille et (d) sur la bague externe.

### I.5.2.3. Quelques défauts d'usures

**a) Écaillage :** Se caractérise par des traces de fissuration et d'arrachement de fragments de matière.

**b) Grippage :** En plus de l'arrachement de matière, des traces brunes dues à l'échauffement, des déformations de corps roulants, et des micro fusions peuvent apparaître.

**c) Empreintes de corps roulants :**

- **Par déformation :** Des empreintes des corps roulants apparaissent avec un fond brillant, on y retrouve les traces de la rectification mais sans traces d'usure.
- **Par abrasion :** Dans ce cas les empreintes peuvent ne pas correspondre à l'écartement des corps roulants. L'enlèvement de matière cette fois par usure due à la vibration sans rotation du roulement, ce défaut peut apparaître sur des machines jamais mises en marche.

**d) Usure généralisée :** Apparaissant sur des corps roulants, des pistes et des cages (teinte grise), due à l'intrusion d'une particule abrasive.

**e) Cratères et cannelures :** Les premiers sont caractérisés par des piqures à bords nets liées en chapelet et sont propres aux roulements à billes, quant aux cannelures propres aux roulements à rouleaux, sont caractérisées par une succession de plages étroites parallèles.

**f) Coups, fissures, cassures** : Se manifestant avec des traces visibles d'outils, et des ruptures des bagues.

**g) Corrosion de contact** : Se manifestant avec des taches d'oxydation sur l'alésage, le diamètre extérieur et les faces d'appui du roulement.

**h) Coloration** : Due à une oxydation localisée ou généralisée elle se manifeste avec une coloration des chemins de roulement et des corps roulants.

**i) Détérioration des cages** : Se manifestant sous plusieurs formes : déformation; usure ou rupture des cages [11].



**Figure I.12** :Quelques défaillances affectant les roulements.

- (a) Usure généralisée
- (b) Cage détériorée
- (c) Corrosion
- (d) Présence de cratères
- (e) Écaillage
- (f) Fissure et cassure
- (g) Grippage
- (h) Traces d'empreintes

### I.5.3. Arbre

L'arbre dans une machine tournante est un organe de transmission assurant le mouvement de rotation, supporté par un ou plusieurs paliers selon la configuration de la ligne d'arbre.



**Figure I.13 :** Exemple d'un arbre d'une machine tournante.

L'arbre sert de soutien et d'élément de liaison pour les autres organes de la machine. L'ensemble des éléments tournants, assemblés sur l'arbre est appelé rotor. Les défauts d'arbres tournants, et plus globalement de rotors sont assez courants dans les machines tournantes. En réalité, il est pratiquement impossible de réaliser un centrage parfait de tous les éléments d'un rotor, ce qui est en cause d'une des plus récurrentes défaillances sur une machine tournantes, le balourd. Un balourd peut avoir comme initiateur plusieurs origines ; défauts d'usinage, d'assemblage des rotors ou de montage. Les rotors peuvent aussi se déformer sous l'influence d'un échauffement dissymétrique [12].

Quelques phénomènes pouvant causer l'apparition de balourd, sont décrits comme suit :

#### **a) Balourd d'origine mécanique**

Perte de matière « ailette, rupture d'une aube, etc... » Un balourd peut être provoqué par une perte de matière, par exemple par la perte d'une ailette ou la rupture d'une aube. On observe alors une élévation instantanée des niveaux de vibrations.

**1) Fluage :** Un balourd peut être aussi observé suite à un phénomène de fluage créant une déformation permanente de l'arbre et générant des vibrations élevées. Ce phénomène est souvent rencontré après une période d'arrêt prolongée de la machine.

**2) Érosion :** Dépôt de matière L'érosion des aubes conduit, dans la plupart des cas, à la création d'un balourd. Le balourd se manifeste alors avec une évolution lente des vibrations à la fréquence de rotation.

**b) Balourd d'origine thermique**

**1) Déformation des rotors :** Un balourd peut se manifester suite à une déformation dissymétrique du rotor sous l'effet de contraintes thermiques, ceci se produit lorsque les rotors ne sont pas homogènes, ou lorsque la température n'est pas répartie de façon uniforme.

**2) Dissymétrie d'arbres :** La présence d'encoches ou de bobinage crée une dissymétrie de raideur et altère le comportement d'un arbre. La position du centre de gravité dépend de la raideur de l'arbre, or dans le cas d'une dissymétrie, la raideur varie en fonction de la rotation de l'arbre.

**3) Fissuration transverse d'arbre :** Les fissures dans les matériaux sont très dangereuses pour les machines tournantes. Une détection précoce de ces fissures est primordiale avant une rupture totale aux conséquences souvent fatales. De même que pour la dissymétrie d'arbre la présence de fissuration provoque une variation de raideur lors de la rotation. Pour différencier les deux cas, il est recommandé de surveiller l'évolution des amplitudes de vibration dans le temps, mais aussi l'apparition de pics à la moitié ou au tiers des vitesses critiques.

**I.5.4. Accouplement**

Les accouplements sont des dispositifs de liaisons utilisés pour raccorder entre eux deux ou plusieurs rotors tout en transmettant le couple. Les accouplements permettent selon leurs types, des dilatations axiales de la machine, ou des déplacements radiaux. Chaque type possède une gamme de puissances, de températures, et de jeux fonctionnels.

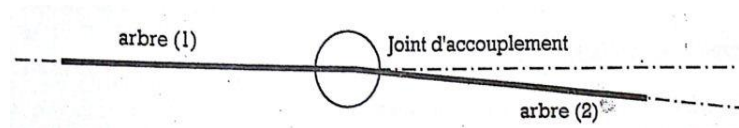
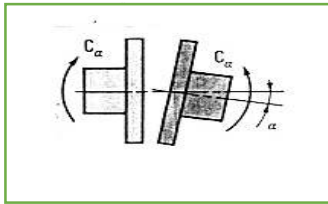


**Figure I.14 :** Un accouplement.



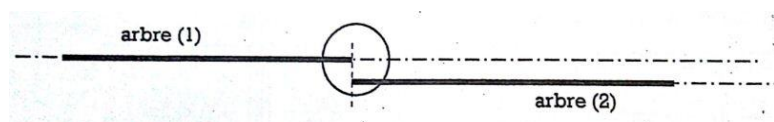
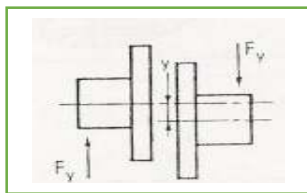
Quelques défauts susceptibles de les atteindre :

- Un désalignement angulaire : défaut de parallélisme entre les arbres.



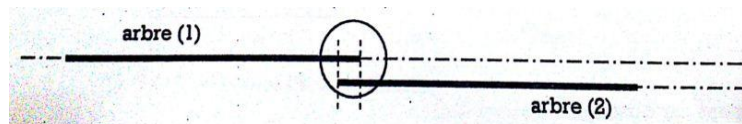
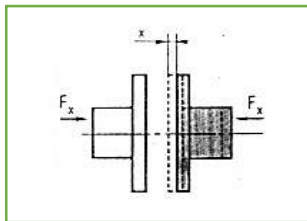
**Figure I.15 :** Un désalignement angulaire d'un accouplement.

- Un désalignement radial : défaut de coaxialité entre les arbres.



**Figure I.16 :** Un désalignement radial d'un accouplement.

- Un désalignement axial : défaut d'alignement des extrémités des arbres.



**Figure I.17 :** Un désalignement axial d'un accouplement.

### I.5.5. Autre défaillance (Défaillance d'ordre électrique)

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certain cas, être la cause d'un arrêt de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances se séparent en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défaillances qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celle qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques [13].



**Figure I.18 :** Un rotor et un stator.

#### **I.5.5.1. Défaillance des circuits électriques statoriques**

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, par exemple, les défauts de types courts-circuits inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défaut peut être causé par une dégradation des isolants des spires des bobinages statoriques. Nous pouvons citer aussi les courts-circuits apparaissant entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou encore entre deux phases statoriques. Ces défauts ont le plus souvent une origine mécanique.

#### **I.5.5.2. Défaillance des circuits électriques rotoriques**

Deux types de défaillance peuvent apparaître au rotor d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. La cage étant composée de barres et d'anneaux et de court-circuit d'aluminium ou de cuivre, une rupture partielle ou totale d'un de ces composants peut être considérée comme un défaut électrique rotorique. L'apparition de ce type de défaut peut être d'origine diverse. En effet, la rupture d'une barre ou d'un segment d'anneau de court-circuit peut être due à plusieurs phénomènes qui sont souvent indépendante les uns des autres. Nous pouvons citer par exemple une mauvaise utilisation de la machine asynchrone [14].

Parmi les causes premières, nous pouvons énumérer :

- Dés contraintes mécaniques causées par des forces électromagnétiques ou des vibrations mécaniques excessives.

- Dés démarrages trop fréquents induisant des courants élevés dans les barres ou dans les segments d'anneaux.
- Des contraintes environnementales causées par une contamination ou une abrasion de la cage rotorique (industrie chimique par exemple).

## **I.6. Sources d'information**

Pour le cas des machines tournantes les sources d'information représentatives de leurs modes de fonctionnement sont nombreuses, et leurs techniques d'exploitation encore plus. Le choix d'une bonne source d'information ainsi que d'une technique d'exploitation adéquate est un facteur de premier plan afin de construire un système de surveillance et de diagnostic efficace. Ce choix est fait en fonction de plusieurs paramètres tel que : les paramètres de cout d'installation les paramètres relatifs à la dynamique et la cinématique de la machine ; les paramètres environnementaux et d'encombrement ; et le niveau de criticité de l'application. Les principales sources d'information pour la surveillance et le diagnostic des machines tournantes tel que :

- L'analyse du lubrifiant
- La thermographie infrarouge
- L'analyse avec ultrasonores
- L'analyse vibratoire

### **I.6.1. Analyse de lubrifiants « huiles »**

#### **I.6.1.1. Définition et rôle de lubrification**

Le Lubrifiant est comparable au sang de la machine. Il reflète le comportement et l'état du système dans lequel il circule. Le suivi de ses caractéristiques physico-chimiques permet d'apprécier l'état de dégradation de l'huile ainsi que l'usure de certains organes, ceci permet de connaître son aptitude à remplir totalement ses fonctions initiales de lubrification [1].

Le rôle d'un lubrifiant est tout d'abord la diminution du frottement, cause principale de l'usure.

Il permet la formation d'un film qui sépare les éléments glissants l'un sur l'autre. Par ses propriétés physiques, il assure également d'autres fonctions :

- Refroidissement : évacuation de la chaleur produite par le frottement ou par une source extérieure.

- Protection contre la rouille et d'autre type de corrosion.
- Filtration : mise en suspension des particules et piégeage sur un filtre.
- Etanchéité : matelas visqueux entre les pièces mécaniques.
- Transmission de l'énergie : dans les circuits hydrauliques et les transmissions automatiques de véhicules.

## I.6.2. Thermographie infrarouge

### I.6.2.1. Définition

La thermographie infrarouge (TIR) est la science de l'acquisition et de l'analyse d'informations thermiques à l'aide de dispositifs d'imagerie thermique à distance. La norme française A 09-400 définit la Thermographie Infrarouge comme « Technique permettant d'obtenir au moyen d'un appareillage approprié l'image thermique d'une scène thermique dans un domaine spectral de l'infrarouge ».

La thermographie infrarouge est utilisée dans le domaine de la surveillance conditionnelle de fonctionnement pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le flux de production, et réduire au maximum les coûts d'entretien.



**Figure I.19 :** La caméra infrarouge.

### I.6.2.2. Principe de base

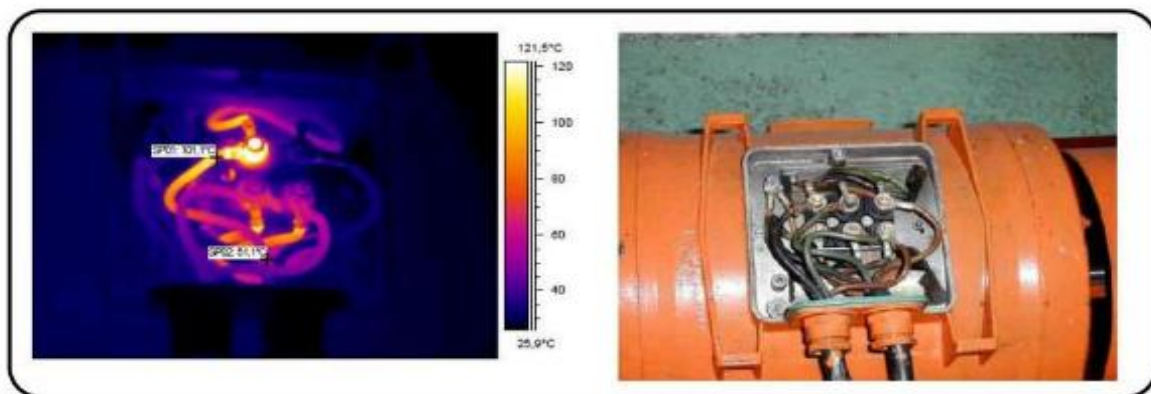
Tout corps dont la température est supérieure à zéro degré absolu émet un rayonnement électromagnétique. Et on est capable de détecter ce rayonnement sous la forme de sensation de chaleur.

La thermographie infrarouge est la technique permettant de mesurer, par l'intermédiaire d'un détecteur, la puissance du rayonnement électromagnétique dans le spectre des infrarouges, émis par chaque point d'une scène ou d'un objet observé.

Le détecteur de la caméra infrarouge reçoit un rayonnement, le convertit en signal électrique et reconstitue sur un écran une image thermique visible de l'objet émetteur. Cette image est la thermographie.

Le thermogramme est constitué par l'ensemble des points de valeurs de mesures thermiques.

Ces valeurs thermiques en (°C) sont obtenues par inscription des valeurs radiométrique données par la caméra infrarouge. (Figure I.20) [15].

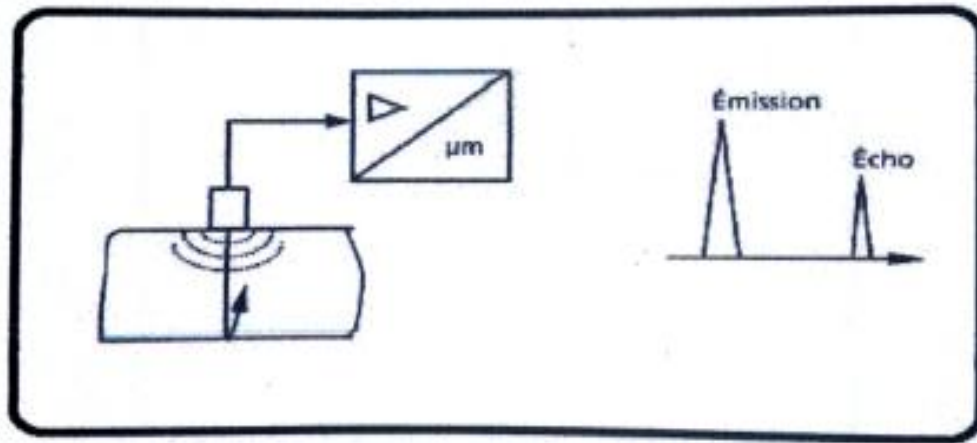


**Figure I.20 :** Thermogramme et image visible d'une boîte à borne d'un moteur.

Cette technique est utilisée depuis longtemps dans le domaine militaire et médical. Le deuxième concept apporte des applications très intéressantes pour la maintenance dans les domaines industriels.

### **I.6.3. L'analyse des mesures ultrasonores**

Les signaux ultrasoniques sont envoyées par un palpeur placé sur la surface de la pièce, en traversant les différentes couches, les ondes ultrasoniques sont réverbérées aux couches limites et renvoyées au palpeur. Connaissant la vitesse de propagation des ultrasons dans le matériau, l'intervalle du temps qui s'écoule entre l'émission et la réception des signaux est exploitée par un microprocesseur pour définir l'épaisseur totale et celle des couches individuelles (figure I.21). En générale pour le contrôle d'épaisseur, les fréquences sont comprises entre 1 et 10 MHz. Cette technique est aussi employée pour déterminer la profondeur des internes d'un matériau.



**Figure I.21 :** Mesure par ultrason

#### **I.6.4. L'analyse vibratoire**

Toutes les machines, et particulièrement les machines tournantes, vibrent et l'image vibratoire de leurs vibrations a un profil très particulier lorsqu'elles sont en état de bon fonctionnement, dès que des phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement, de désalignement, de balourd, etc... apparaissent, l'allure de cette image change, ce qui permet de quantifier l'intervention [16].

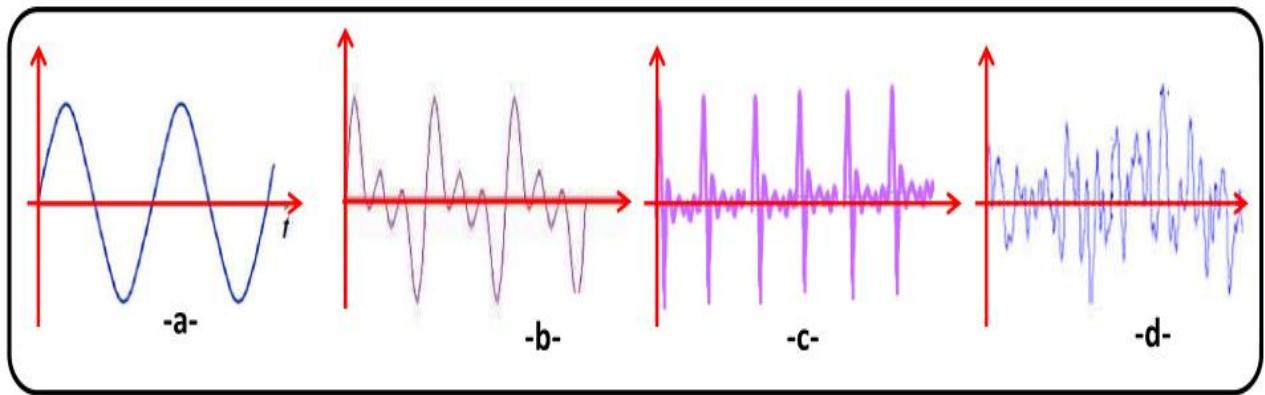
Une machine tournante en fonctionnement engendre forcément l'apparition d'efforts plus ou moins variables. Ces efforts peuvent être cause par défaillances ultérieures comme ils peuvent être conséquence de défaillances antérieures [12].

Les vibrations des machines sont considérées comme la réponse de la fonction de transfert de leurs structures aux différents efforts auxquels elles sont sollicitées.

La surveillance des vibrations de ces structures peut permettre donc de déceler l'apparition d'efforts perturbateurs à un stade précoce, permettant par la même occasion, de détecter ou d'avorter l'apparition de défaillances. En plus de son efficacité, la facilité relative de son installation rend l'analyse des signaux vibratoires une des techniques les plus utilisées pour la surveillance et le diagnostic des défauts des machines tournantes.

Lors de l'acquisition de l'information vibratoire, le choix des éléments constitutifs de la chaîne de mesure ne doit pas être négligé, et ce afin de pouvoir enregistrer des signaux englobant l'information vibratoire la plus complète. Les techniques d'exploitation et de traitement des signaux vibratoires diffèrent d'un cas à l'autre en fonction de la dynamique et de la cinématique

de la machine surveillée ainsi que de la nature des défauts soupçonnés. Dans les sections suivantes, seront décrites dans cet ordre la chaîne de mesure des signaux vibratoires ainsi que les principales techniques de leurs exploitations.



**Figure I.22 :** Nature d'une vibration.

- a) Les vibrations périodiques de type sinusoïdale simple
- b) Les vibrations périodiques de type sinusoïdale complexe
- c) Les vibrations périodiques de type impulsionnel
- d) Les vibrations aléatoires de type impulsionnel

## I.7. Conclusion

Dans cette recherche nous avons commencé par présenter de manière générique le domaine des machines tournantes, et apprécier leur importance et la criticité de leurs applications. Nous avons aussi vu de près un nombre important et non exhaustif de défaillances pouvant altérer leurs fonctionnements. Pour l'exploitation optimale de ces machines, une surveillance accrue de leurs conditions de fonctionnement est souvent nécessaire, pour cela, plusieurs techniques existent, dont un bon nombre a été décrit, avec une attention particulière donnée aux techniques à base d'analyse vibratoire.



# **Chapitre II :**

---

## **Méthodes d'analyse des vibrations**

---

## II.1. Introduction

L'analyse vibratoire est un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement. Toutes les machines tournantes produisent des vibrations qui sont fonction de la dynamique de ces machines, certains défauts dans les machines tournantes sont caractérisés par des chocs se traduisant par des non-stationnarités locales sur les signaux vibratoires, c'est le cas dans les roulements et les engrenages ou l'écaillage et la fissuration des surfaces en contact produisent des chocs localisés lors de fonctionnement. Ces chocs peuvent être de faibles amplitudes lorsque le défaut est naissant. Ce type de défauts évolue rapidement vers la rupture, donc il est nécessaire de les détecter de façon précoce, pour pouvoir planifier une maintenance efficace d'une part, et pour des raisons de sécurité d'autre part, d'où le recours aux techniques de détection des non-stationnarités qui ont montré de meilleures performances que les techniques classiques fondées sur l'analyse de Fourier.

## II.2. Analyse dans le domaine de temps

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 classiques et des indicateurs modernes :

### II.2.1. Indicateurs classiques

Dans le cadre d'une surveillance par indicateurs statistiques, il est possible d'utiliser les grandeurs de déplacement, de vitesse ou d'accélération de la vibration. Pour cela, des paramètres comme le RMS (Root Mean Square ou Valeur Efficace), la valeur crête et l'énergie du signal vibratoire ont été largement utilisés, mais ils ne renseignent pas sur l'état de dégradation du système. De ce fait, d'autres indicateurs sont apparus à partir du RMS et de la valeur crête. Il s'agit du facteur crête, kurtosis, qui est actuellement l'indicateur scalaire le plus fréquent dans les applications industrielles. Il fournisse d'assez bon résultat pour la détection des défauts induisant des forces impulsionnelles périodiques à savoir ceux des roulements et d'engrenages [13].

### II.2.1.1. Valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square)

Le RMS nommée aussi valeur efficace ou moyenne quadratique d'un signal, correspond à la racine carré du moment d'ordre deux et est calculé comme montré par l'équation :

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

Où  $x(n)$  est le signal temporel mesuré,  $(Ne)$  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 la maintenance prédictive.

### II.2.1.2. Facteur de crête

Contrairement à la valeur efficace de l'amplitude d'un signal, les indicateurs spécifiques comme le facteur de crête ou le kurtosis sont mieux adaptés pour représenter un signal induit par des forces impulsionnelles tels que les écaillages de roulements. Ces indicateurs sont issus des valeurs crêtes du signal temporel mesuré [14].

Le facteur crête, défini comme étant le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace.

$$F_c = \frac{AC_{crete}}{A_{eff}} = \frac{\sup|x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{Ne} \sum_{n=1}^{Ne} [x(n)]^2}} \quad (II.2)$$

Le facteur crête a l'avantage de détecter avant la valeur efficace. Ceci provient du fait que pour un roulement sans défaut, le rapport reste sensiblement constant et augmente lorsqu'une dégradation apparaît alors que la valeur crête croît pendant que la valeur efficace reste à peu près constante.

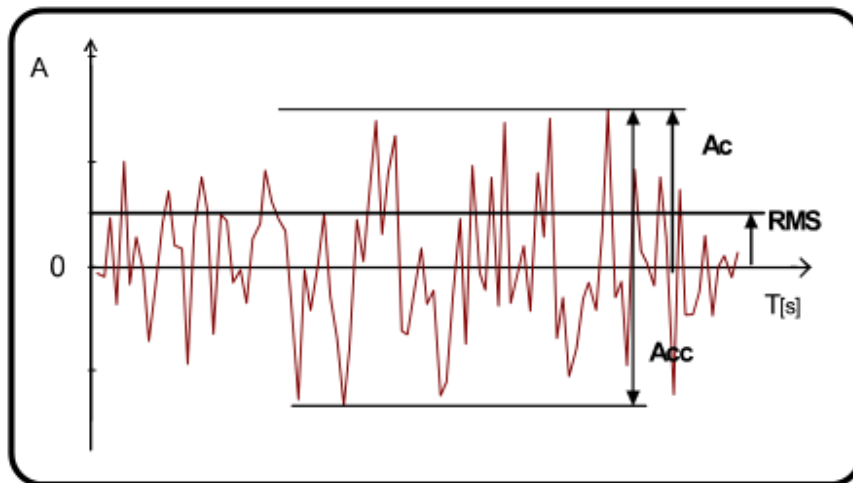


Figure II.1 : Vibration complexe.

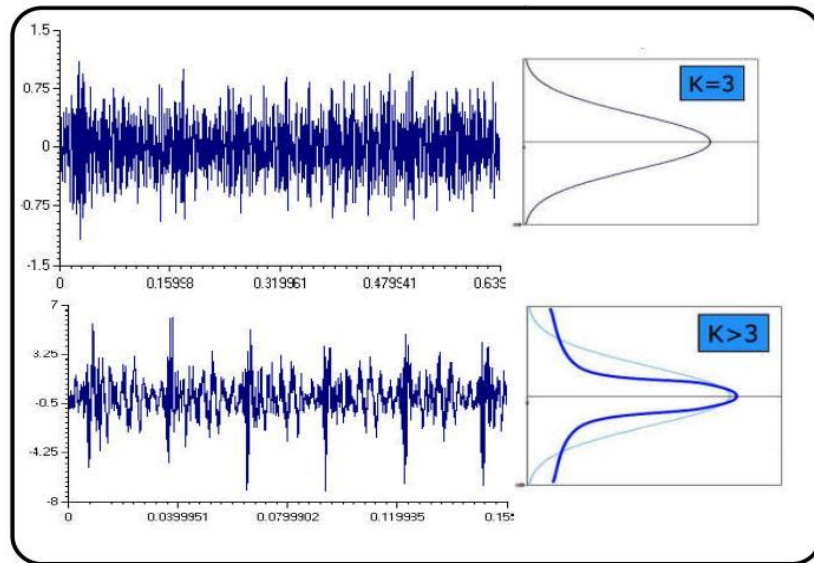
### II.2.1.3. Kurtosis

C'est un indicateur permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut de roulement. Dans le cas d'un roulement sans écaillage, la distribution des amplitudes contenues dans le signal recueilli est gaussienne ce qui entraîne une valeur de kurtosis proche de 3. Lorsqu'un défaut est détecté, sa valeur devient supérieure à 3 [14].

L'analyse des défauts de roulement par le kurtosis peut également être réalisée dans différentes bandes de fréquences liées aux résonances de la structure.

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

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



**Figure II.2 :** Evolution du Kurtosis aux différents stades de dégradation du roulement.

### II.3. Analyse dans le domaine de fréquence

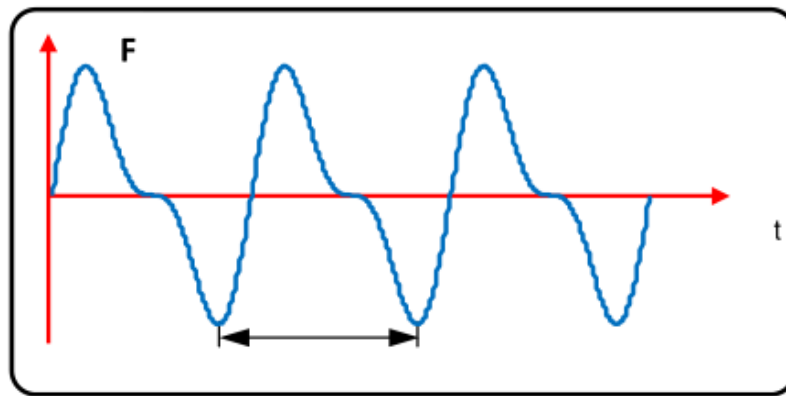
Toute anomalie affectant une machine tournante se traduit par des vibrations dont les fréquences correspondent aux fréquences d'apparition des forces les induisant et de leurs harmoniques. C'est pourquoi, pour le diagnostic, il est intéressant de décomposer le signal

vibratoire mesuré en ses sinusoïdes élémentaires dont les amplitudes et les fréquences peuvent être lues [17].

### II.3.1. Analyse spectrale

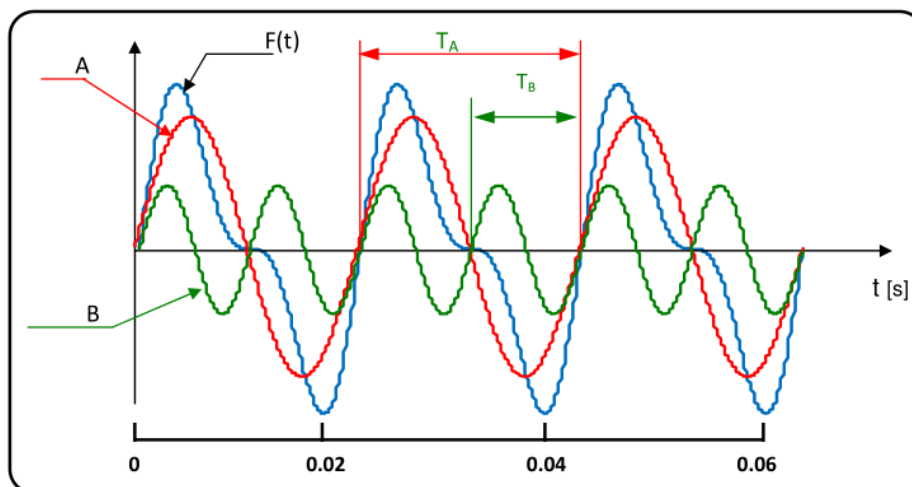
Le diagnostic vibratoire est basé sur l'identification de la fréquence de la vibration générée par un phénomène mécanique. La méthode mathématique permet de représenter, en effectuant la transformée de Fourier, le signal complexe de la vibration par un spectre fréquentiel.

La représentation en fonction de la fréquence dans un diagramme amplitude-fréquence appelé spectre (représentation spectrale). Le signal complexe  $F(t)$  [figure II.3], difficile à interpréter, est décomposé en une série de composantes sinusoïdales élémentaires définies par leurs amplitudes et leurs fréquences.



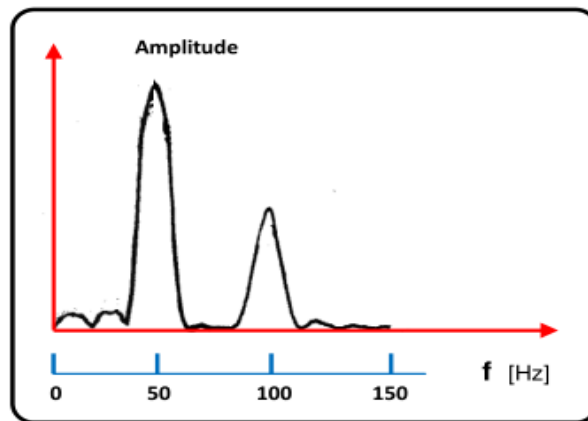
**Figure II.3 :** Signal périodique complexe  $F(t)$ .

L'outil mathématique utilisé est la décomposition en série de Fourier [figure II.4]



**Figure II.4 :** Décomposition en série de Fourier de la fonction  $F(t)$ .

Si cette décomposition est possible, sa représentation dans le domaine temporel est encore inexploitable. On cherche à la représentation dans un diagramme amplitude-fréquence appelé spectre [figure II.5]. Avec ce type de représentation, chaque composante sinusoïdale est définie par son amplitude et sa fréquence. La représentation spectrale devient ainsi plus claire et exploitable. Les ordinateurs utilisent un algorithme qui permet de réaliser rapidement cette transformation sur des données numériques, c'est la Fast Fourier Transformation (FFT).



**Figure II.5 :** Spectre correspondant à la fonction  $F(t)$ .

### II.3.2. Analyse d'enveloppe

Cette technique, appelée aussi démodulation d'amplitude, est très utilisée pour la détection des défauts se manifestant dans les hautes fréquences. La modulation d'amplitude d'une fréquence est la variation périodique de l'amplitude du signal au cours du temps.

L'impact généré par l'élément roulant sur le défaut de piste interne produit une vibration à la fréquence de résonance dans le cas d'un roulement par exemple.

L'impact est un phénomène périodique, se produisant à une fréquence caractéristique du défaut. A chaque fois que ce phénomène se produit, il génère une vibration à la fréquence de résonance. Ainsi, l'amplitude de la vibration à la fréquence de résonance varie avec une période égale à la période de répétition de l'impact, caractéristique du défaut : l'amplitude est modulée.

Grace à la méthode de l'enveloppe, cette modulation d'amplitude peut être extraite du signal original. En effet, l'enveloppe d'un signal modulé en amplitude par un autre signal périodique est une fonction périodique de période égale à celle du signal modulant. Il suffira alors d'interpréter le spectre fréquentiel (obtenu par la Transformée de Fourier) de cette enveloppe afin d'en retirer la fréquence des impacts, propre au défaut [18].

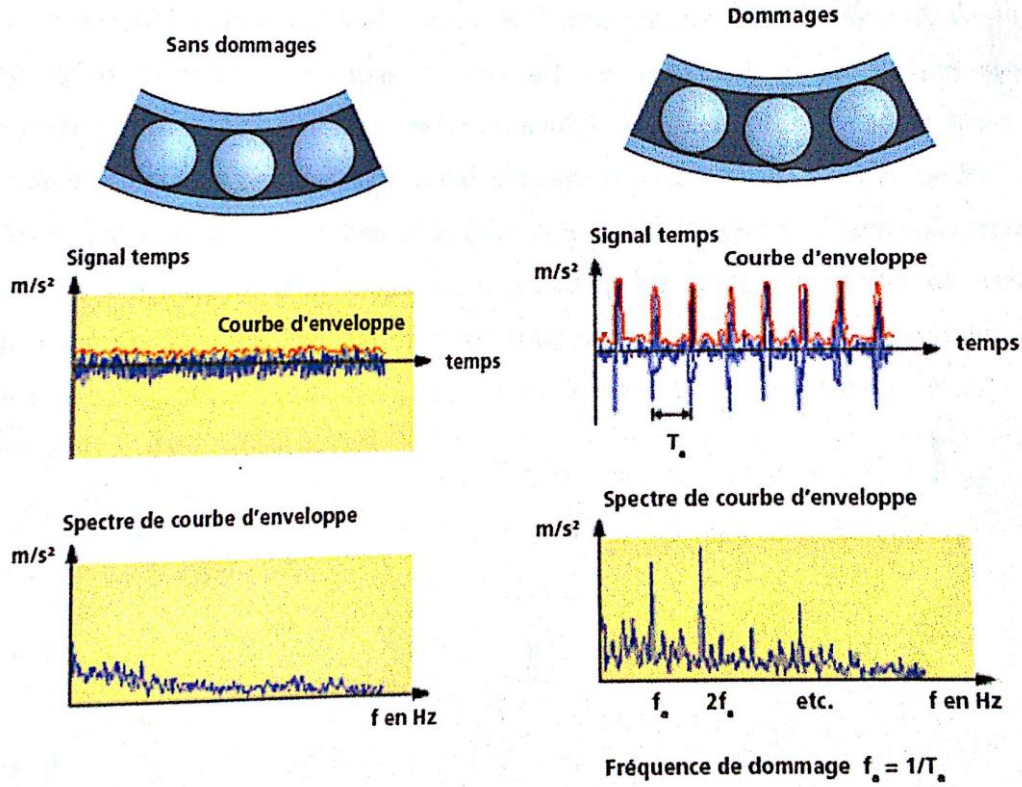


Figure II.6 : Exemple de défaut de de roulement [19].

### II.3.3. Analyse par opérateur TKEO

L'opérateur TKEO (Teager-Kaiser Energy Operator) est initialement proposé pour le traitement des signaux de la parole qui sont non-linéaires.

Pour un signal continue  $x(t)$ , le TKEO est donné par :

$$\Psi[x(t)] = \left( \frac{dx(t)}{dt} \right)^2 - x(t) \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (\text{II.10})$$

Donc, le TKEO est définie dans sa forme discrète par :

$$\Psi[x(t)] = [x(t)]^2 - x(t+1)x(t-1) \quad (\text{II.11})$$

Cet opérateur traque les modulations d'énergie et identifie à la fois l'amplitude et la fréquence instantanées. Par exemple  $\Psi[A\cos(\omega t + \varphi)] = A^2\omega^2$ .

### II.3.4. Analyse par la dérivée d'enveloppe

Pour conserver la similitude avec le TKEO, (Tool et al) proposent d'inclure l'information sur la fréquence dans l'enveloppe par la fonction dérivation en tant que filtre en utilisant la



propriété que la transformée de Fourier de  $\dot{x}(t)$  est  $j\omega X(\omega)$ , où  $X(\omega)$  est la transformée de Fourier de  $x(t)$ . L'opérateur est désormais nommé Frequency-Weighted Energy Operator (FWEO) ou Envelope-Derivative Operator (EDO) il est donnée par :

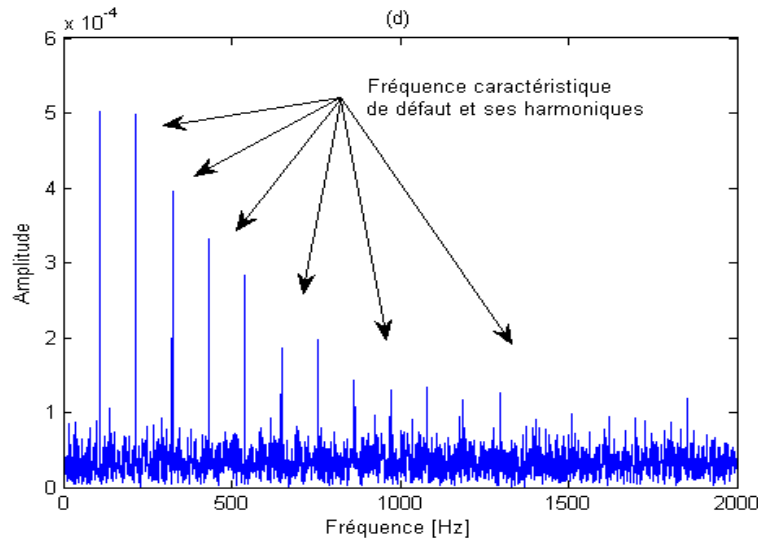
$$\Gamma[x(t)] = |\dot{x}(t) + jH[\dot{x}(t)]|^2 = \dot{x}^2(t) + H[\dot{x}(t)]^2 \quad (\text{II.13})$$

Pour un signal discret  $x(n)$ , le EDO est définie par :

$$\Gamma[x(n)] = \frac{1}{4} [x^2(n+1) + x^2(n-1) + y^2(n+1) + y^2(n-1)] + \frac{1}{2} [x(n+1) + x(n-1) + y(n+1) + y(n-1)] \quad (\text{II.14})$$

où  $y(n)$  est la transformée de Hilbert discrète et définie par  $y(n) = H[x(n)]$

Lorsqu'un signal est transformé par le nouvel opérateur EDO, il a engendré le spectre illustré sur la Figure. La fréquence de défaut et plusieurs de ses harmoniques peuvent être clairement identifiés mais les interférences ne peuvent être distingués. Cela est dû à leur faible force d'apparition causée par l'opération de dérivation. L'EDO est plus performant que les autres méthodes classiques, avec sa capacité à cerner la présence de multiples interférences par l'amélioration de sa fonction de différenciation.



**Figure II.7 :** Exemple d'un spectre résultant de EDO.

## II.4. Analyse temps-fréquence

Les méthodes d'analyse temps fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non-stationnaires. Cette notion de non stationnarité peut s'appliquer aussi bien à des signaux

aléatoires qu'à des signaux certains. Plus généralement, elles s'appliquent à des signaux dont le contenu fréquentiel ou les propriétés statistiques évoluent au cours du temps [16].

### II.4.1. Wigner-ville

La transformation de Wigner-Ville est une technique d'analyse temps fréquence qui permet des diagnostics précis, dans des cas où souvent les méthodes classiques échouent, spécialement lorsqu'elles sont appliquées aux signaux non-stationnaires [20].

La transformation de Wigner-Ville est définie par :

$$W_S(t, v) = \int_{-\infty}^{\infty} S\left(t + \frac{\tau}{2}\right) S^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-2\pi j v \tau} d\tau \quad (\text{II.4})$$

avec  $s(t)$  signal complexe quelconque.

C'est une fonction réelle qui définit une distribution d'énergie dans le plan temps- fréquence. Elle peut être interprétée comme la TF d'une autocorrélation instantanée, donc comme une densité spectrale instantanée. Cependant, cette analogie est tempérée par l'existence de valeurs négatives qui en rendent délicate l'interprétation. La structure bilinéaire de cette transformation crée des termes d'interférences liés aux différentes composantes fréquentielles du signal. Des procédures de lissage (fréquentiel et temporel) par fenêtrage permettent de réduire les interférences entre les différentes composantes fréquentielles du signal [21].

En pratique des versions lissées de Wigner-Ville calculées sur le signal analytique apparaissent nécessaires pour améliorer la lisibilité des images temps-fréquence associées à des signaux multifréquences comme les signaux vibratoires issus de machines tournantes. La transformation de Wigner-Ville lissée est définie part :

$$W_L(t, v) = \int_{-\infty}^{\infty} |h(\tau)|^2 \left[ \int_{-\infty}^{\infty} g(t - u) S_a\left(u + \frac{\tau}{2}\right) S_a^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) du \right] e^{-2\pi j v \tau} d\tau \quad (\text{II.5})$$

$h(t)$  fenêtre d'observation déterminant le lissage fréquentiel

$g(t)$  fenêtre de lissage temporel.

Le compromis auquel est confrontée la transformation de Wigner-Ville n'est pas entre résolution temporelle et fréquentielle (comme pour la transformation de Fourier à court terme) mais entre la finesse de description des composantes fréquentielles et l'importance des structures interférentielles [21].

## II.4.2. Transformée de Fourier à court terme

Afin de remédier aux problèmes de la TF, en 1946 Gabor a proposé d'utiliser la transformée de Fourier à fenêtre glissante (TFCT pour la transformée de Fourier à courte terme). Cette transformée consiste à calculer la TF sur une partie du signal sélectionnée à l'aide d'une fenêtre bien localisée en temps [13].

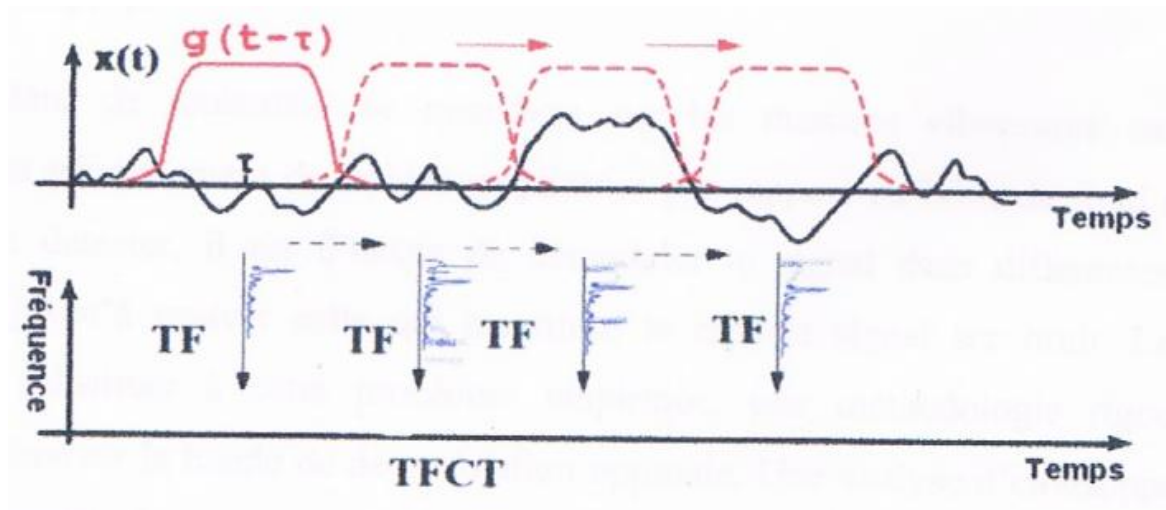
La TFCT continue d'un signal  $x(t)$  est définie par :

$$Xg(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)g(t - \tau) e^{-2i\pi f t} dt \quad (\text{II.6})$$

La TFCT discrète est donnée par :

$$Xg(\tau, f) = \sum_{n=1}^{N_p-1} x(n)g(n - k)e^{-\frac{i2\pi mk}{N_p}} \quad \text{où } k, n, m \in \mathbb{Z} \quad (\text{II.7})$$

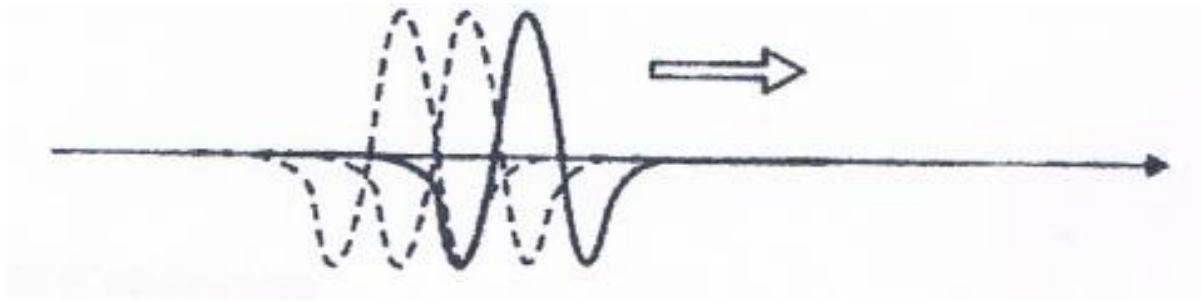
$N_p$  est le nombre de point du signal.



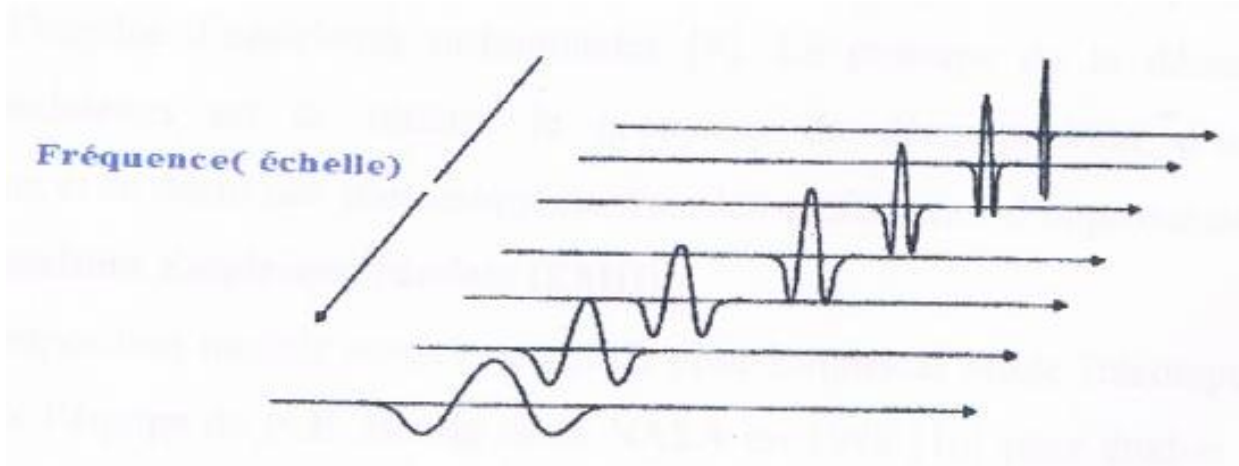
**Figure II.8 :** Principe de la transformée de Fourier à court terme (TFCT).

## II.4.3. La transformée en ondelettes

La transformée en ondelette (TO) est apparue dans les années 1980 à partir du travail de Jean Morlet effectué en vue d'applications sismiques. Ensuite, la TO a connu de nombreux développements mathématiques.



**Figure II.9 :** Translation (changement de position) des ondelettes [17].



**Figure II.10 :** Changement d'échelle (niveau) des ondelettes [17].

#### II.4.3.1. La transformée en ondelette continue (TOC)

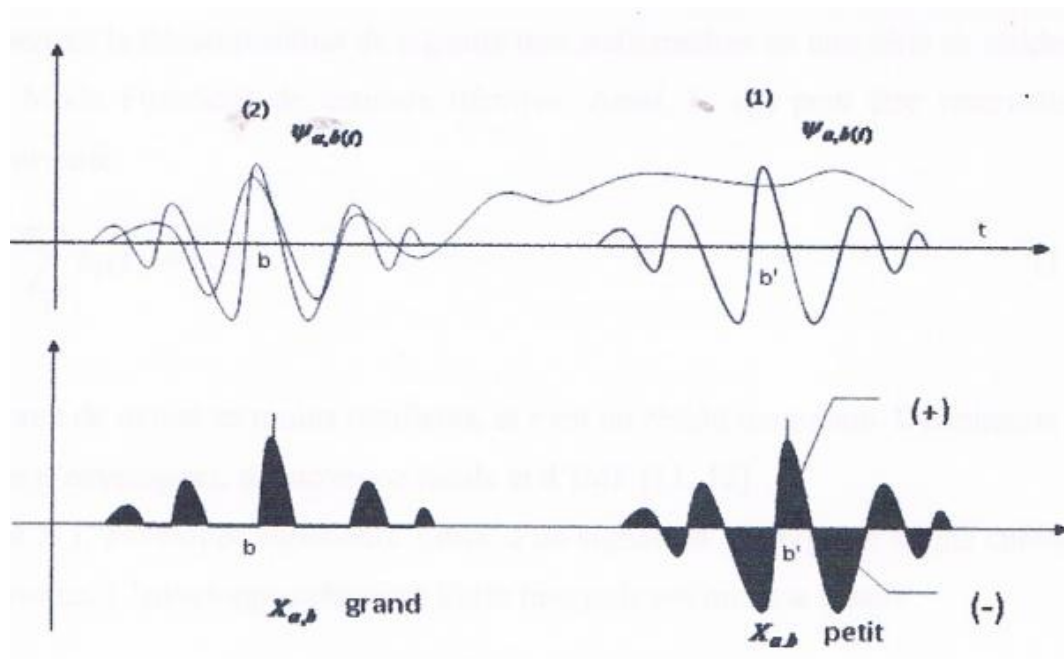
La (TOC) utilise, comme base, des fonctions ondelettes, à la place des fonctions sinusoïdales. Elle rajoute une variable d'échelle dans son calcul tout en gardant la variable du temps. Partant d'une fonction oscillante  $\psi$  appelée ondelette mère, on construit les atomes temps-fréquence par translations temporelles et dilatations : [17]

$$\psi_{t,a}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{\tau-t}{a}\right) \quad (\text{II.8})$$

Avec  $a > 0$  le paramètre d'échelle et  $t$  le paramètre du temps.

Sa transformée de Fourier  $\psi(\xi) = 0$  lorsque la fréquence  $\xi < 0$ . En sa forme continue, la TOC d'un signal  $(t)$  s'exprime par :

$$W_x(t, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \psi^*\left(\frac{\tau-t}{a}\right) d\tau \quad (\text{II.9})$$



**Figure II.11 : Principe de la TO continue [17].**

#### II.4.3.2. La transformée en ondelette discrète (TOD)

Du point de vue fonctionnel, il s'agit de remplacer une représentation continue  $(a,b)$  par une représentation discrète. Cela se fait en échantillonnant les coefficients de l'ondelette sur une grille hyperbolique qui permet d'avoir une représentation non redondante et de numériser le traitement par ondelettes [17].

### II.5. Conclusion

Les différentes méthodes d'analyse d'un signal vibratoire peuvent être classées en deux catégories différentes. La première regroupe les méthodes dites classiques, permettant surtout d'analyser des signaux stationnaires. Dans le domaine temporel, on retrouve par exemple l'analyse par indicateurs, tels que l'amplitude maximale du signal, ou son facteur de crête. Dans le domaine fréquentiel, la méthode la plus employée actuellement reste l'analyse spectrale, elle permet de calculer les fonctions de transfert fréquentielles éventuelles reliant différents signaux vibratoires. Les méthodes classées dans la deuxième catégorie peuvent être qualifiées de modernes, et permettent l'analyse des signaux non-stationnaires, les principales sont les transformées temps-fréquence, elles ont été utilisées plus tardivement que les précédentes du fait de leur complexité théorique, et de la puissance de calcul qu'elles nécessitent.

# **Chapitre III :**

---

## **Simulation des signaux de vibratoires**

### III.1. Introduction

Le diagnostic de l'état d'une machine n'est possible que si l'on connaît les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible d'affecter la machine considérée, c'est-à-dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts. La connaissance de ces images vibratoires et de la chaîne cinématique qui permet de formuler un diagnostic de l'état de la machine, malheureusement, une même image vibratoire peut correspondre à plusieurs défauts. Il faut donc établir la liste de tous les défauts correspondant à chaque image et par déduction, entreprendre les analyses complémentaires et rechercher d'autres symptômes pour se diriger progressivement vers l'hypothèse la plus probable.

Dans la première partie de ce chapitre, des signaux simulés qui reflètent le mouvement vibratoire de quelques éléments mécaniques sains ou défectueux sont étudiés pour illustrer le contenu spectral comme les modulations en amplitude et en fréquence ainsi que la comparaison entre l'analyse spectrale et l'analyse d'enveloppe, et dans l'autre partie nous allons étudier le cas d'un signal simulé de roulement défectueux sans et avec bruit, pour ce signal simulé de défaut de roulement nous proposons l'analyse par la méthode d'enveloppe et par l'opérateur TKE (Teager-Kaiser energy).

### III.2. Analyse spectrale

#### III.2.1. Signal sinusoïdal d'une seule fréquence

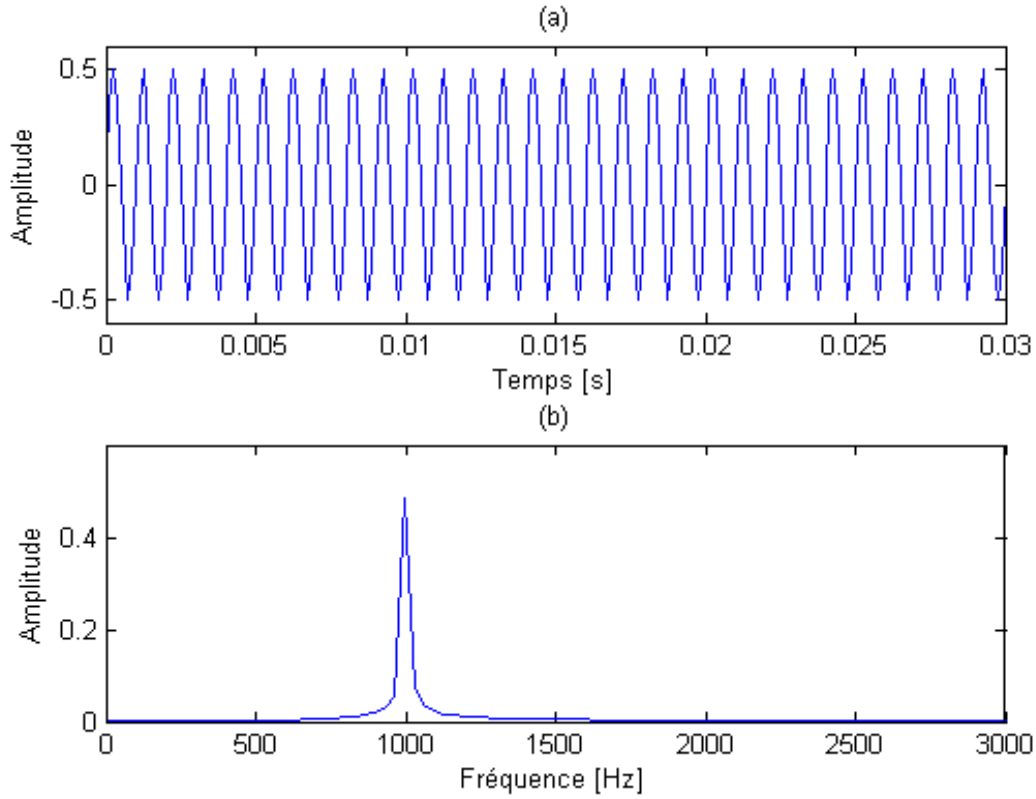
Soit le signal sinusoïdal  $x_1(t)$  composé d'une cosinusoïde de fréquence fondamentale 1000 Hz donné par :

$$x_1(t) = 0.5\sin(2\pi \times 1000t) \quad (\text{III.1})$$

Ce signal est échantillonné à la fréquence d'échantillonnage  $F_e=80000\text{Hz}$ .

Dans la figure III.1 (a) le signal est périodique de type sinusoïdal simple et son spectre est représenté dans la figure III.1 (b) comme un seul pique qui a une amplitude maximale de 0.5 et une fréquence de 1000Hz.





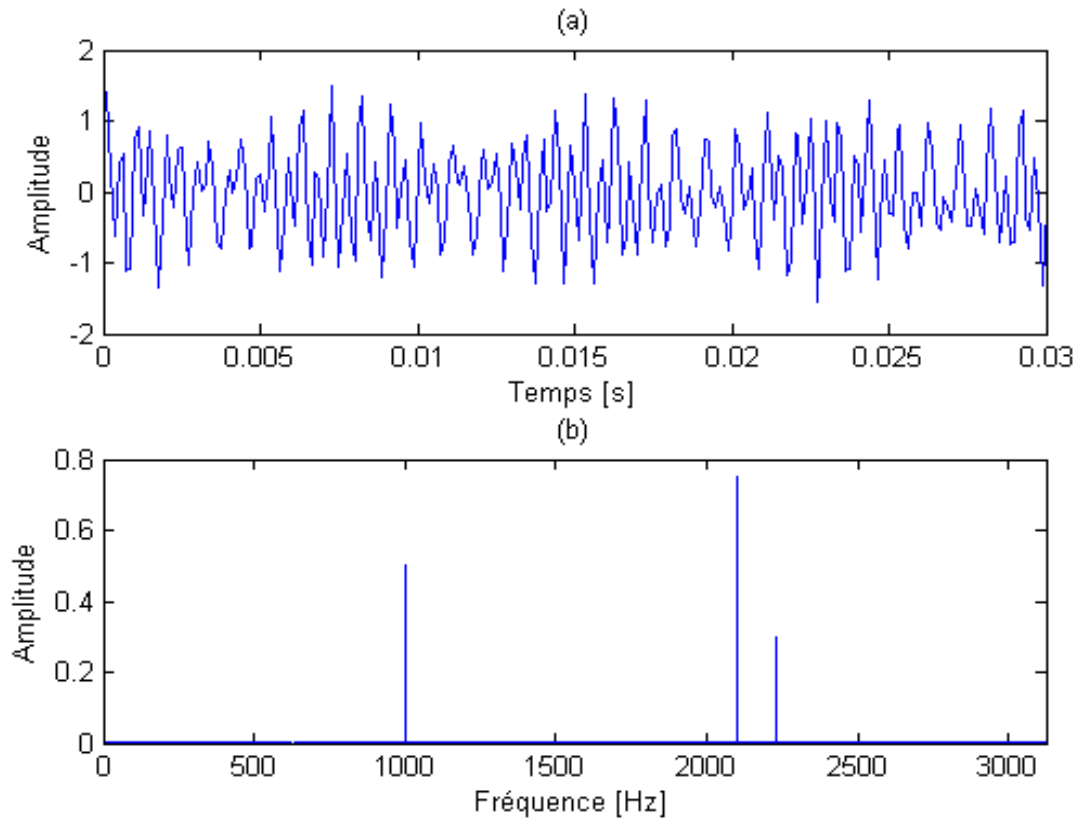
**Figure III.1 :** (a) le signal sinusoïdal  $x_1(t)$  , (b) son spectre.

### III.2.2. La somme de plusieurs sinusoïdes

Soit le signal  $x_2(t)$  composé de trois sinusoïdes de fréquences fondamentales  $1000\text{Hz}$ ,  $2100\text{Hz}$  et  $2230\text{Hz}$ . La fréquence d'échantillonnage est  $F_e=8000\text{Hz}$ .

$$x_2(t) = 0.5 \sin(2\pi \times 1000t) + 0.75 \sin(2\pi \times 2100t) + 0.3 \sin(2\pi \times 2230t) \quad (\text{III.2})$$

Ces sinusoïdes sont représentées par des raies ou piques d'amplitudes aux fréquences correspondantes à chaque sinusoïde. La représentation temporelle du signal composé est rapportée sur la figure III.2 (a), et la représentation des trois piques (ou raies spectrales) sont données par la figure III.2 (b).



**Figure III.2 :** (a) le signal  $x_2(t)$ , et (b) son spectre.

### III.3. Analyse d'enveloppe

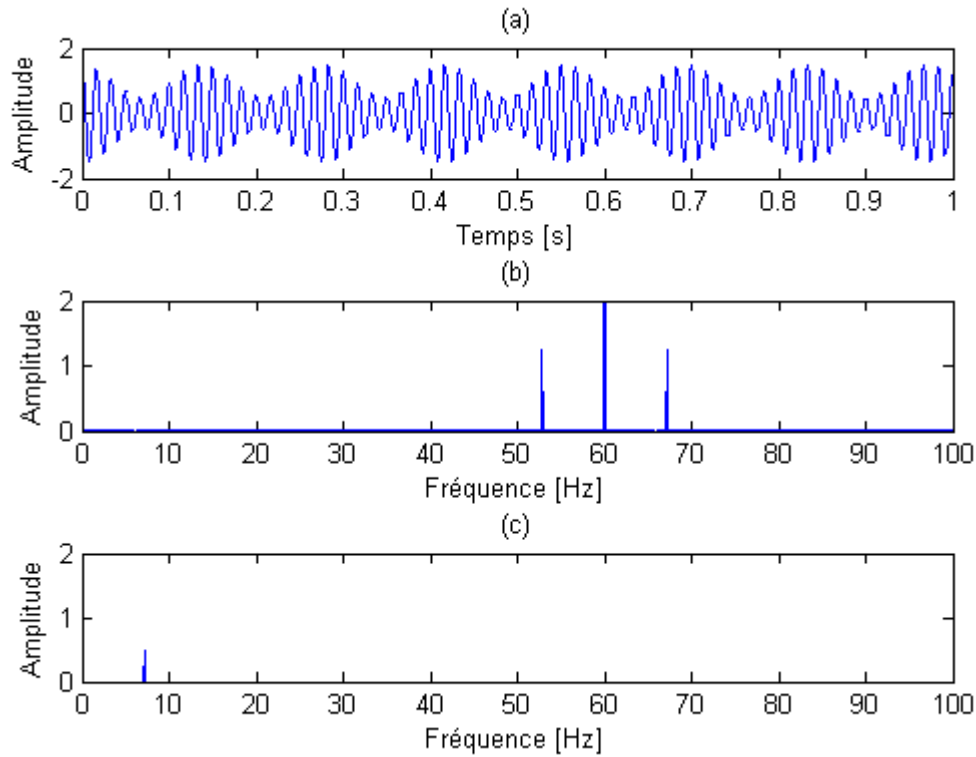
#### III.3.1. Signal modulé en amplitude

Un Signal sinusoïdal modulé en amplitude représente la manifestation vibration de l'engrènement d'un train d'engrenages dont un des arbres présente une forte excentricité.

Ce signal peut être décrit par la formule suivante :

$$x_3(t) = \cos(2\pi \times 60t)(1 + 0.5 \cos(2\pi \times 7.2t)) \quad (\text{III.3})$$

La figure III.3 (a) montre le signal modulé en amplitude ou la fréquence de la porteuse est égale à 60  $Hz$  et la fréquence du modulant est de 7.2  $Hz$ . Le spectre du signal modulé montre la fréquence porteuse et deux piques d'amplitude à gauche et à droite qui constitue ce qu'on appelle une bande latérale de fréquence (voir Figure III.3 (b).). L'application de l'analyse d'enveloppe démodule le signal (Figure III.3 (c).), enlève cette bande latérale de fréquence et donne la fréquence du signal modulant 7.2  $Hz$ .



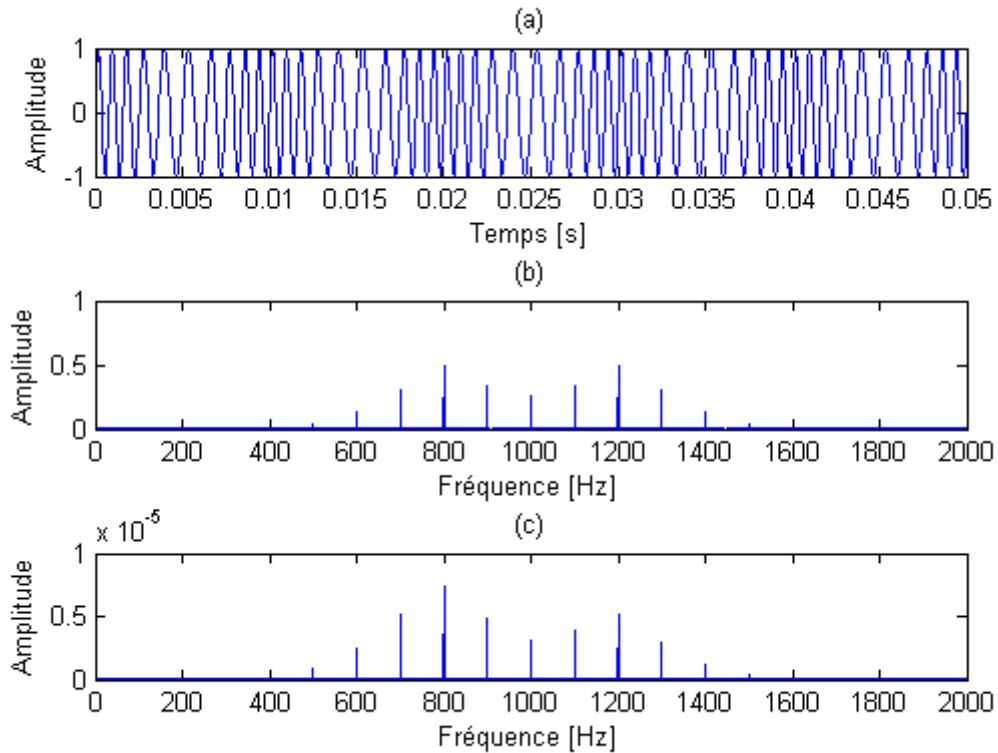
**Figure III.3 :** (a) signal  $x_3(t)$  modulé en amplitude, (b) son spectre, et (c) spectre d'enveloppe.

### III.3.2. Signal modulé en fréquence

La variation de la vitesse d'une machine peut être simulée par un signal pseudopériodique modulé en fréquence autour d'une fréquence porteuse.

$$\text{Soit : } x_4(t) = \sin[(2000\pi \times t) + 3 \sin(200\pi \times t)] \quad (\text{III.4})$$

La figure III.4 (a) montre le signal  $x_4(t)$  et son spectre sur la figure III.4 (b), avec une bande latérale de fréquences ou la fréquence de la porteuse est  $1000 \text{ Hz}$  et la fréquence du signal modulant qui est égale à  $100 \text{ Hz}$ . Le spectre d'enveloppe (voir Figure III.4 (c)) n'a aucun effet sur le signal et reste incapable de démoduler le signal.



**Figure III.4 :** (a) signal  $x_4(t)$  modulé en fréquence, (b) son spectre, et (c) spectre d'enveloppe.

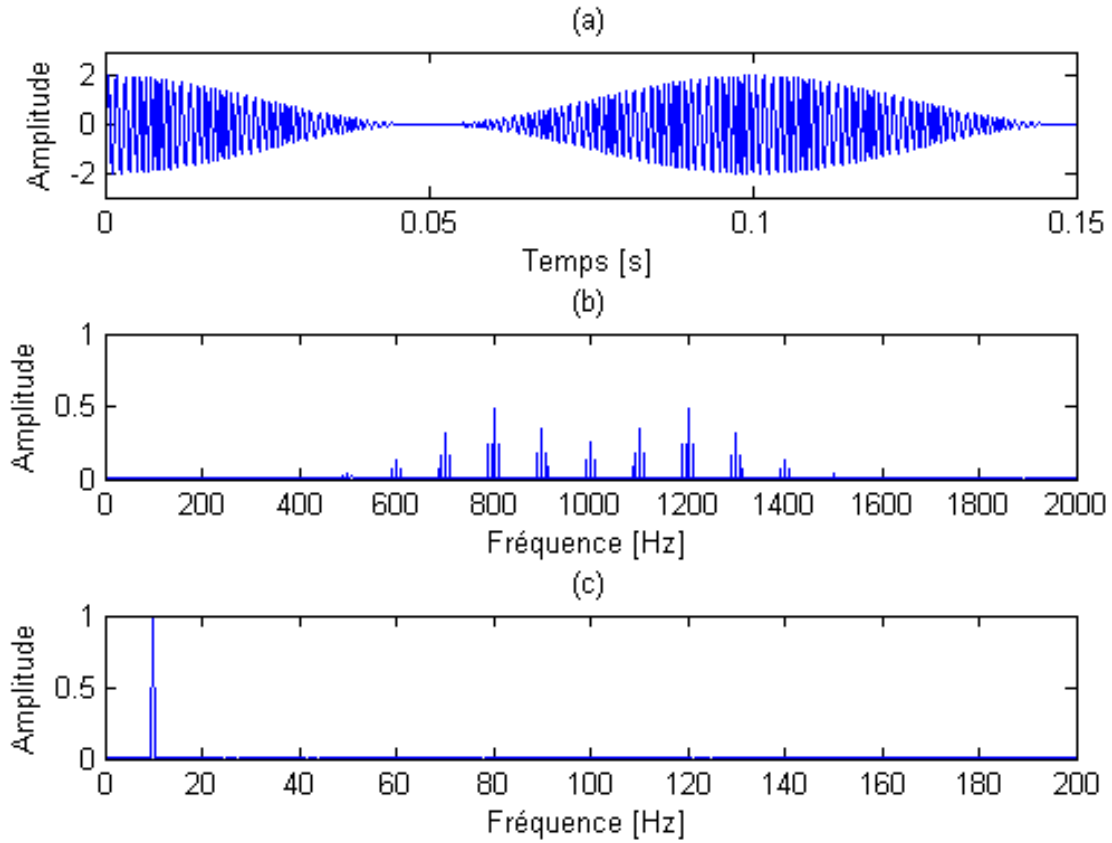
### III.3.3. Signal modulé en amplitude et en fréquence

Un signal modulé en amplitude et en fréquence représente généralement un défaut de denture des engrenages. Ce signal peut être décrit par la formule :

$$x_5(t) = \cos (2\pi \times 1000 t + 3 \cos (2\pi \times 100 t)) [1 + \cos (2\pi \times 10 t)] \quad (\text{III.5})$$

Les fréquences des signaux modulateurs d'amplitude et de fréquence sont respectivement 10 Hz et 100 Hz. Le signal, et son spectre et son spectre d'enveloppe est représenté sur la figure III.5.

L'analyse d'enveloppe a pu démoduler la fréquence du signal modulé en amplitude qui est de 10 Hz.



**Figure III.5 :** (a) signal  $x_5(t)$  modulé en amplitude et en fréquence, (b) son spectre, et (c) spectre d'enveloppe.

## III.4. Analyse par l'opérateur de l'énergie TKEO

### III.4.1. Simulation de signal de roulement

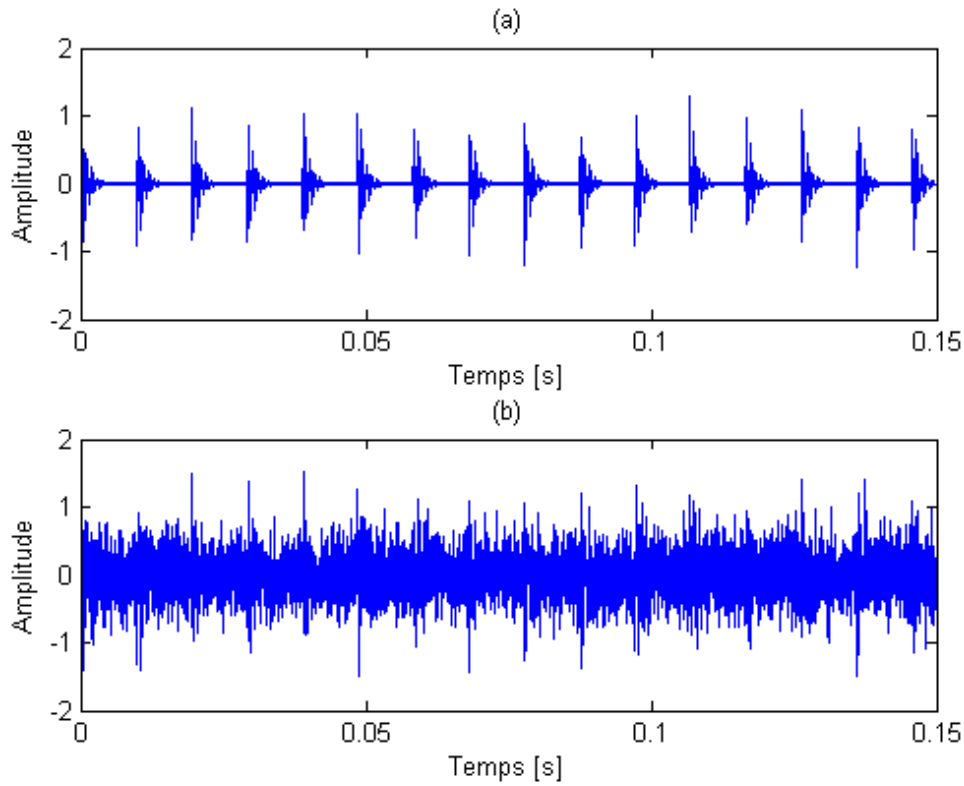
Nous avons un signal  $y(t)$  simulé de roulement avec un défaut auquel on a rajouté un bruit  $b(t)$ . Ce signal est décrit par :

$$y(t) = (0.5 \sin(2\pi \times 1800t) + 0.8 \sin(2\pi \times 4000t))e^{-\alpha\tau} + b(t) \quad (\text{III.6})$$

Avec  $\tau = \text{mod}\left(t, \frac{1}{f_d}\right)$  qui est le reste de division de  $t$  sur  $\frac{1}{f_d}$  avec  $f_d = 103 \text{ Hz}$  et  $\alpha = 900$ .

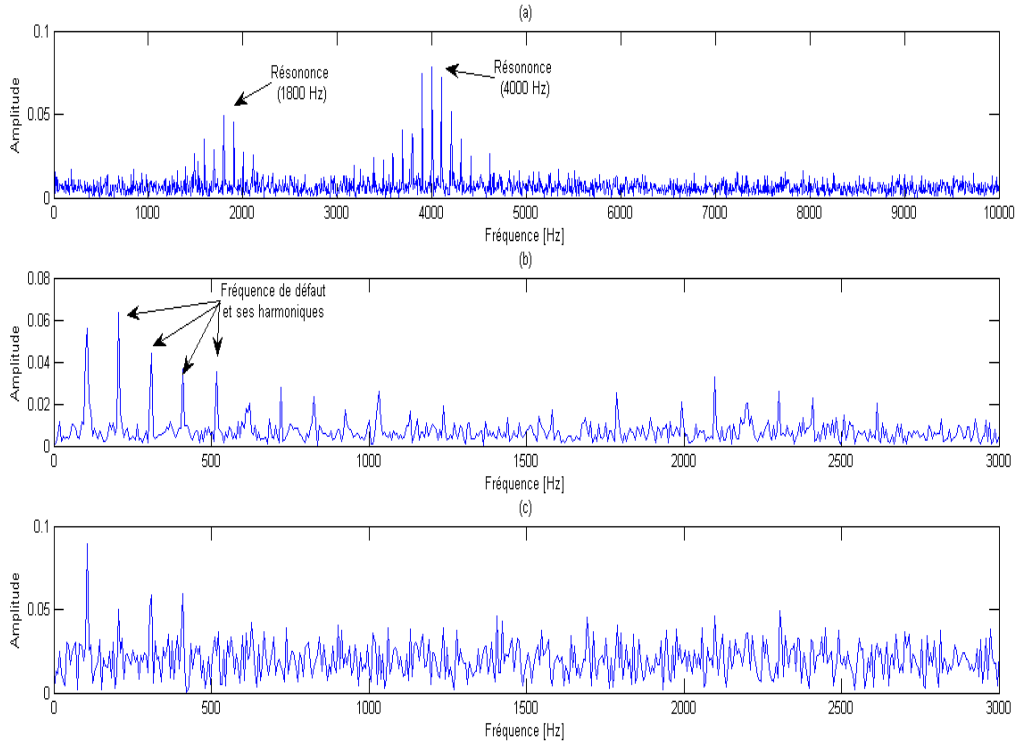
Cette fonction représente les chocs répétitifs induits par les défauts de roulement. Et les fréquences de modulation,  $f_1 = 1800 \text{ Hz}$  et  $f_2 = 4000 \text{ Hz}$ , représentent les fréquences de résonance (l'excitation des fréquences propres du système mécanique par le défaut). La fréquence d'échantillonnage est  $f_e = 48000 \text{ Hz}$ .

La figure III.6 (a) rapporte la représentation temporelle du signal  $y(t)$  sans bruit qui montre des chocs d'espacés respecter ce qui correspond au défaut, et dans la figure III.6 (b) donne le même signal avec le bruit.



**Figure III.6 :** (a) signal d'un défaut roulement simulé, (b) même signal avec bruit.

La figure III.7 (a) montre le spectre de deux fréquences de résonances ( $f_1 = 1800 \text{ Hz}$  et  $f_2 = 4000 \text{ Hz}$ ) entourées par des raies latérales qui occupent deux bandes de fréquences, et la figure III.7 (b) représente le spectre d'enveloppe qui donne la fréquence caractéristique de défaut 103 Hz et ses harmoniques, et la figure III.7 (c) représente l'analyse par opérateur TKEO qu'est prédominé et susceptible au bruit avec défaut et ses harmoniques.



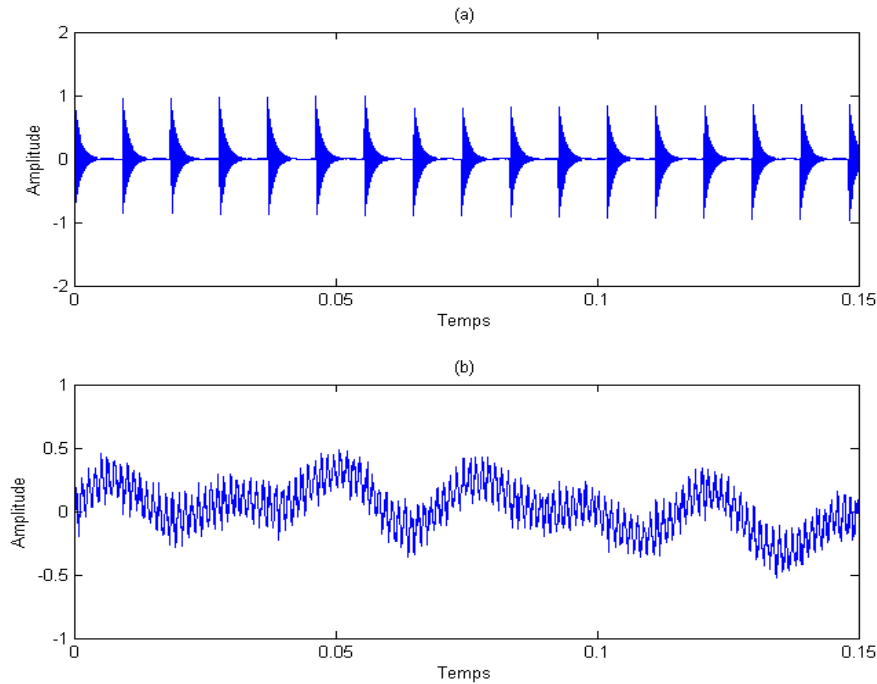
**Figure III.7 :** (a) le spectre de signal simulé, et (b) son spectre d'enveloppe, et c) son spectre après transformation par l'opérateur TKEO.

### III.5. Limite de performance des analyses classique (Enveloppe et TKEO) :

Dans le but d'évaluer la performance de cette nouvelle technique, un test sur un signal de simulation de défaut de roulement auquel est ajouté du bruit et des interférences vibratoires. Cette investigation est établie afin de comparer ses aptitudes à identifier les caractéristiques du défaut avec les méthodes classiques (le TKEO et l'analyse d'enveloppe). Le modèle de simulation est défini par :

$$S(t) = \sin(2\pi \cdot 4000t) \cdot e^{-900 \cdot \text{mod}(t, \frac{1}{108})}$$



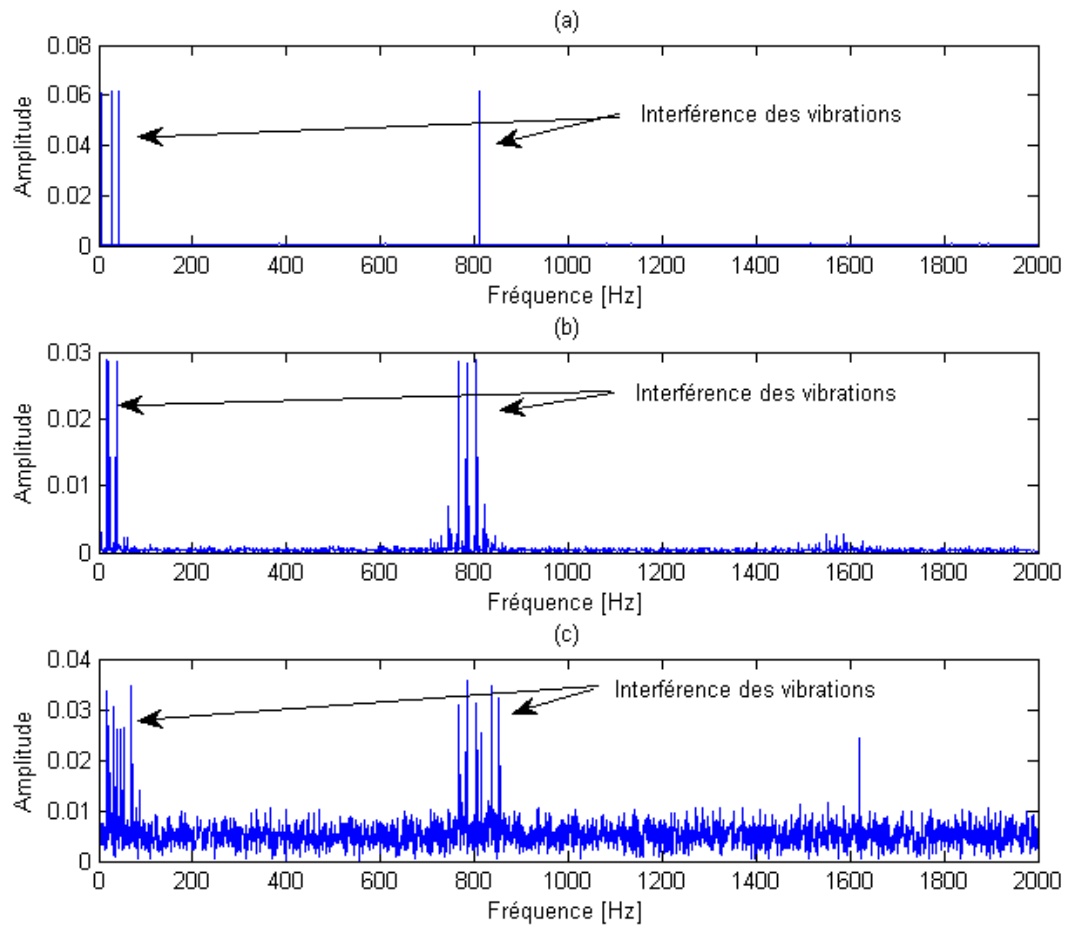


**Figure III.8 :** (a) le signal  $s(t)$  mesuré avec défaut, (b) le signal mesuré  $s(t)$  avec défaut on ajoute des interférences et de bruit.

### III.6. Analyse spectrale (Enveloppe et TKEO)

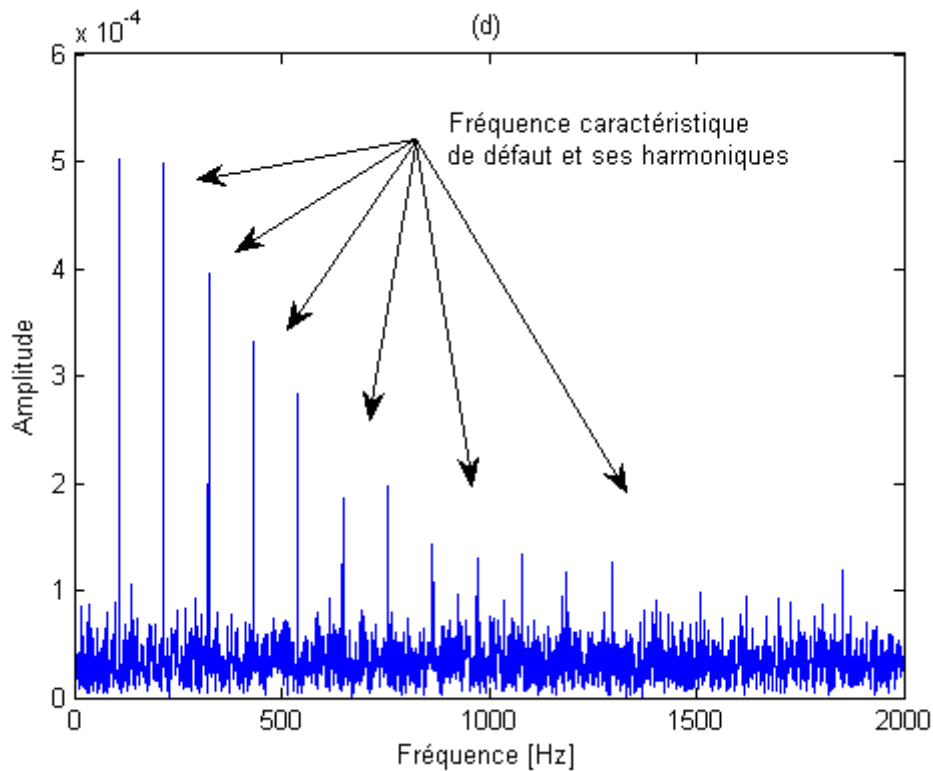
Le spectre du signal sur la Figure III.9 (a) est dominé par les composantes d'interférence et le défaut ne peut être identifié. Les résultats de l'analyse d'enveloppe et de l'opérateur TKEO sont reproduits sur la Figure III.9 (b) et (c).

Le spectre d'enveloppe ne montre que des pics d'amplitude reliés aux fréquences d'interférence, tandis que le spectre de TKEO est prédominé par le bruit avec quelques artéfacts des fréquences d'interférence. Cela était attendu puisqu'il est connu que l'analyse d'enveloppe devient non efficace en présence des interférences et l'opérateur énergétique classique est susceptible au bruit.



**Figure III.9 :** (a) le spectre de signal simulé  $S(t)$ , (b) son spectre d'enveloppe, (c) son spectre de TKEO.

Lorsque le signal simulé est transformé par le nouvel opérateur EDO, il a engendré le spectre illustré sur la Figure III.10. La fréquence de défaut et plusieurs de ses harmoniques peuvent être clairement identifiés mais les interférences ne peuvent être distingués. Cela est dû à leur faible force d'apparition causée par l'opération de dérivation. Le EDO est plus performant que les deux autres méthodes classiques, avec sa capacité à cerner la présence de multiples interférences par l'amélioration de sa fonction de différenciation.



**Figure III.10 :** Le spectre de EDO pour le signal simulé  $S(t)$ .

### III.7. Conclusion

Cette étude menée sur des exemples de simulation a permis d'exposer clairement les avantages et les limitations de chaque méthode considérée dans ce travail. Pour les roulements nous avons appliqué la méthode d'analyse d'enveloppe de Hilbert pour caractériser les fréquences de défaut en cas de présence et par la méthode TKEO qu'est prédominé et susceptible au bruit. Nous avons montré que les résultats obtenus avec la méthode TKEO est très efficace que celle donné par l'analyse d'enveloppe.

Dans le chapitre suivant, nous allons appliquer la nouvelle méthode d'analyse pour la détection des défauts de roulement qu'est l'analyse de la dérivée d'enveloppe (EDO).

# **Chapitre IV :**

---

## **Détection de défaut de roulement par**

---

### **l'analyse de dérivation**

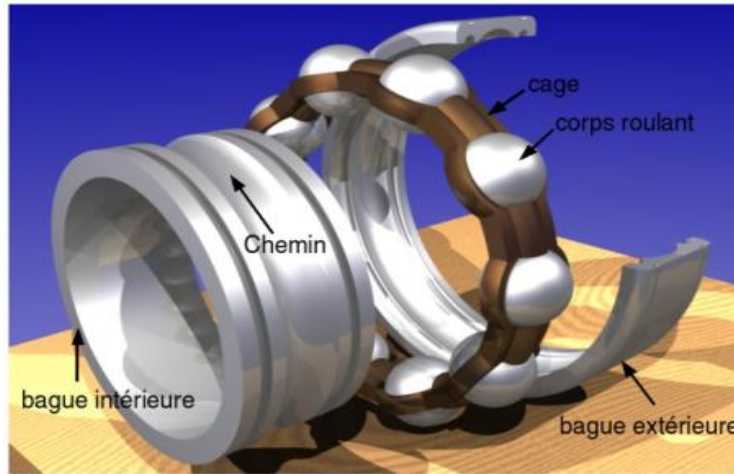
## IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude des défaillances des roulements, nous avons vu qu'il existe de nombreuses causes de pannes dans les machines tournante, le roulement à billes présente aussi un vieillissement relativement rapide. De nombreuses études statistiques ont montré que les pannes liées aux roulements représentent de 40 à 60% des pannes totales des machines asynchrones. D'un point de vue industriel et scientifique, il est donc logique de concentrer les efforts de détection des pannes et de diagnostic de la machine asynchrone sur les roulements à billes, d'ailleurs, plusieurs outils de traitement du signal ont été développés pour l'analyse acoustique et l'analyse des vibrations engendrées par les défaillances des roulements.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter les différentes défaillances des roulements à billes et nous intéresser à l'identification de leurs caractéristiques, ensuite, nous présentons un banc d'essai avec les conditions et les paramètres utilisés pour construire une base de signaux vibratoires dédiées à la détection des défauts de roulement, nous établissons une étude sur ces signaux, à l'aide des analyses classiques (Spectre d'enveloppe et TKEO) et une nouvelle analyse qu'est l'analyse par la dérivée d'enveloppe (EDO).

## IV.2 Défaillances des roulements

D'une manière générale, les roulements sont composés de quatre éléments essentiels. Un organe externe, un organe interne, des organes roulants et un organe de lubrification. En fonction de l'application envisagée, les organes de roulement peuvent être des billes, des rouleaux ou des aiguilles. Chaque type de roulement possède des caractéristiques spécifiques en termes de charges radiales et axiales supportées, de vitesse limite ou encore de défaut d'alignement admissible. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance-prix. On peut noter deux types d'avaries caractéristiques de la détérioration des roulements : les avaries dites naturelles dues à la fatigue des roulements et les avaries dues à un mauvais montage ou une mauvaise utilisation du roulement, le cas le plus rencontré est un défaut d'écaillage dû à la fatigue des roulements, classiquement ce type de défaut est diagnostiqué à partir du spectre d'une mesure acoustique ou vibratoire mais d'abord, nous rappelons qu'il existe quatre types de défauts de roulement à savoir un défaut de bague externe, défaut de bague interne, défaut de bille ou défaut de la cage reliant les éléments roulants. En analyse vibratoire chaque type de défaut a sa propre signature et est caractérisé par une fréquence fondamentale, il est donc possible d'observer certaines bandes de fréquences et d'identifier. Les expressions de ces fréquences caractéristiques, sont données par :



**Figure IV.1 :** Eclatement d'un roulement à billes.

$$\underline{BPFO} = 0.5 F_r n \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right], \underline{BPFI} = 0.5 F_r n \left[ 1 + \left( \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right]$$

$$\underline{FTF} = 0.5 F_r \left[ 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right], \underline{BSF} = 0.5 F_r \frac{D}{d} \left[ 1 - \left( \frac{d \cos \alpha}{D} \right)^2 \right]$$

### IV.3 Introduction sur l'analyse par la dérivée d'enveloppe

En 2014, Tool et al ont proposé un nouvel opérateur d'énergie appelé L'opérateur dérivé de l'enveloppe (EDO), qui est capable De suivi de l'amplitude et de la fréquence instantanées est similaire à TKEO, mais plus robuste que TKEO, même sans l'aide de méthodes de prétraitement comme EMD, EEMD ou VMD. Ainsi, il faut moins de temps pour effectuer EDO pour analyser les données longues [23].

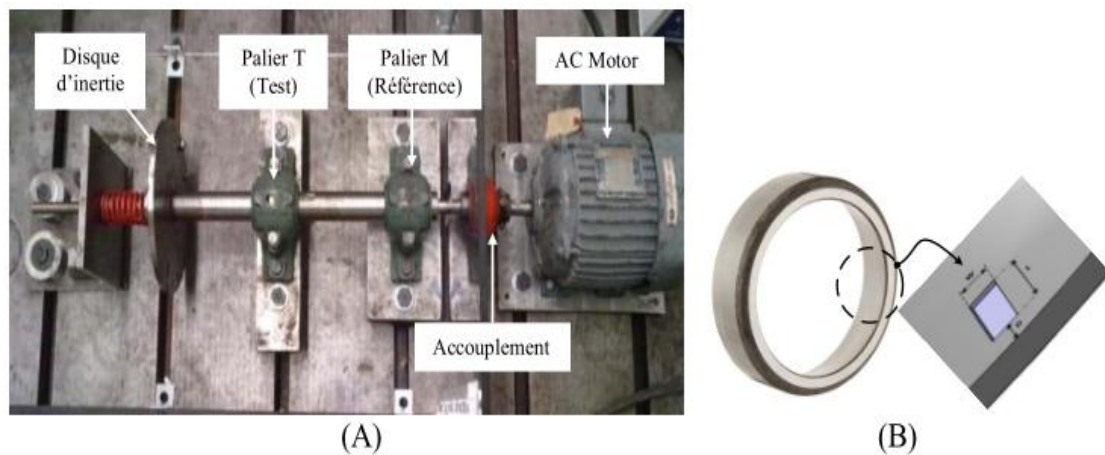
Dans la suite de notre travail, nous appliquons d'abord EDO à la faute de roulement Diagnostic de l'écran vibratoire. Enfin, nous comparons EDO avec HT et TKEO au sujet de leurs performances en La simulation et les expériences réelles de diagnostic des fautes, respectivement.

## IV.4 Détection de défaut de roulement (cas réel)

### IV.4.1 Banc d'essais de l'ÉTS

La première base de données est constituée de signaux vibratoires et électriques enregistrés sur le banc d'essai de l'ÉTS représenté sur la Figure IV.2 : (A) Banc d'essai ÉTS de Montréal, (B) Défaut de bague extérieure du roulement [22]. L'arbre est porté sur deux paliers à roulement et accouplé à un moteur électrique. Un disque comprenant un balourd est placé à l'autre extrémité de l'arbre comme charge radiale avec un ressort comme charge axiale. Les roulements utilisés sont à double rangée de billes (SKF, 1210 EKTN9). Les mesures ont été effectuées avec

différents cas du roulement du palier T (test), normal ou avec un défaut de bague extérieure de différentes tailles. Tous les tests ont été déroulés avec une vitesse de rotation de l'ordre de 900 tr/min. Le système de collecte de données est composé par un accéléromètre référencé (352C34) qui est relié à l'analyseur PRO THOR (DT9837-13310) avec une fréquence d'échantillonnage de 48 000 Hz [22]. Les données de vibration ont été recueillies après par le collecteur BetaVib.



**Figure IV.2 :** (A) Banc d'essai ÉTS de Montréal, (B) Défaut de bague extérieure du roulement [22].

Les tailles des défauts simulés sur ce banc d'essai sont données dans le Tableau IV.1.

Type de défaut	Tailles (mm)	Indice
Bague externe	Sain	t0
	0.05	t1
	0.10	t2
	0.15	t3
	0.20	t4
	0.25	t5

**Tableau IV.3 :** Tailles du défaut de bague externe simulé sur le banc de l'ÉTS.

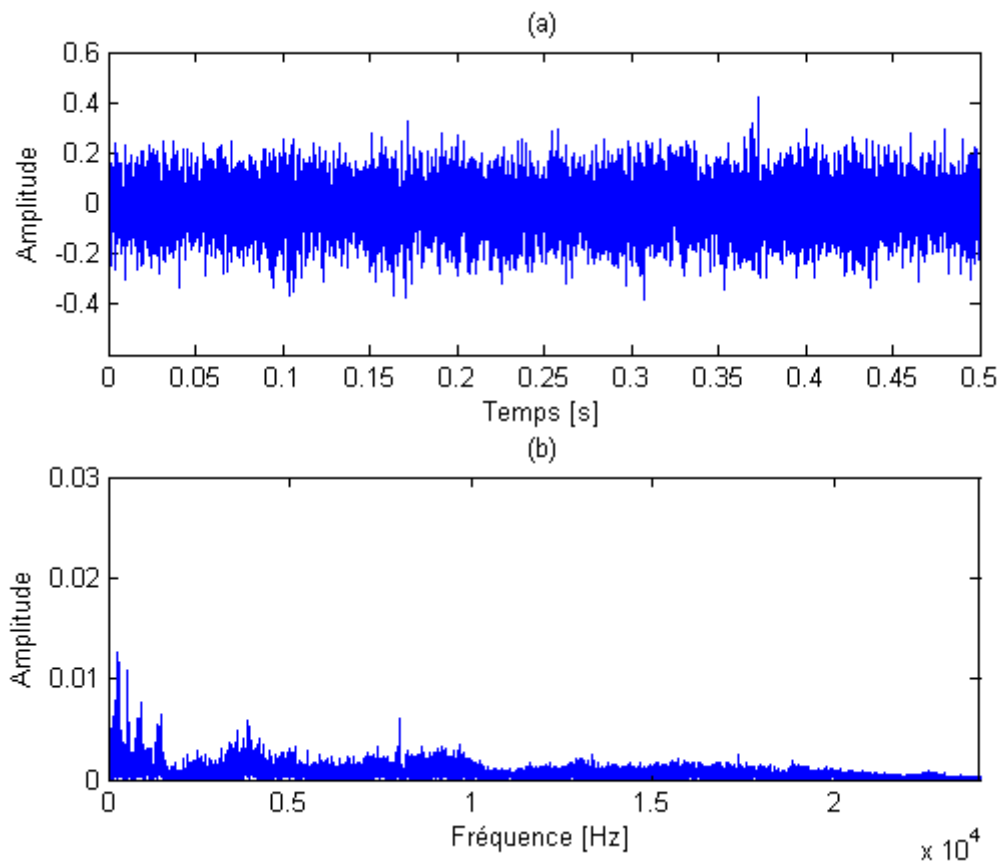
#### IV.4.2 Application sur des signaux réels

Dans cette étude expérimentale, la méthode proposée ci-dessus est appliquée sur les signaux de roulements enregistrés sur le banc d'essai de l'ÉTS, afin de montrer la performance de l'approche proposée et son aboutissement automatique à la détection précoce des défauts de roulements.



#### IV.4.2.1 Signal sans défaut t0

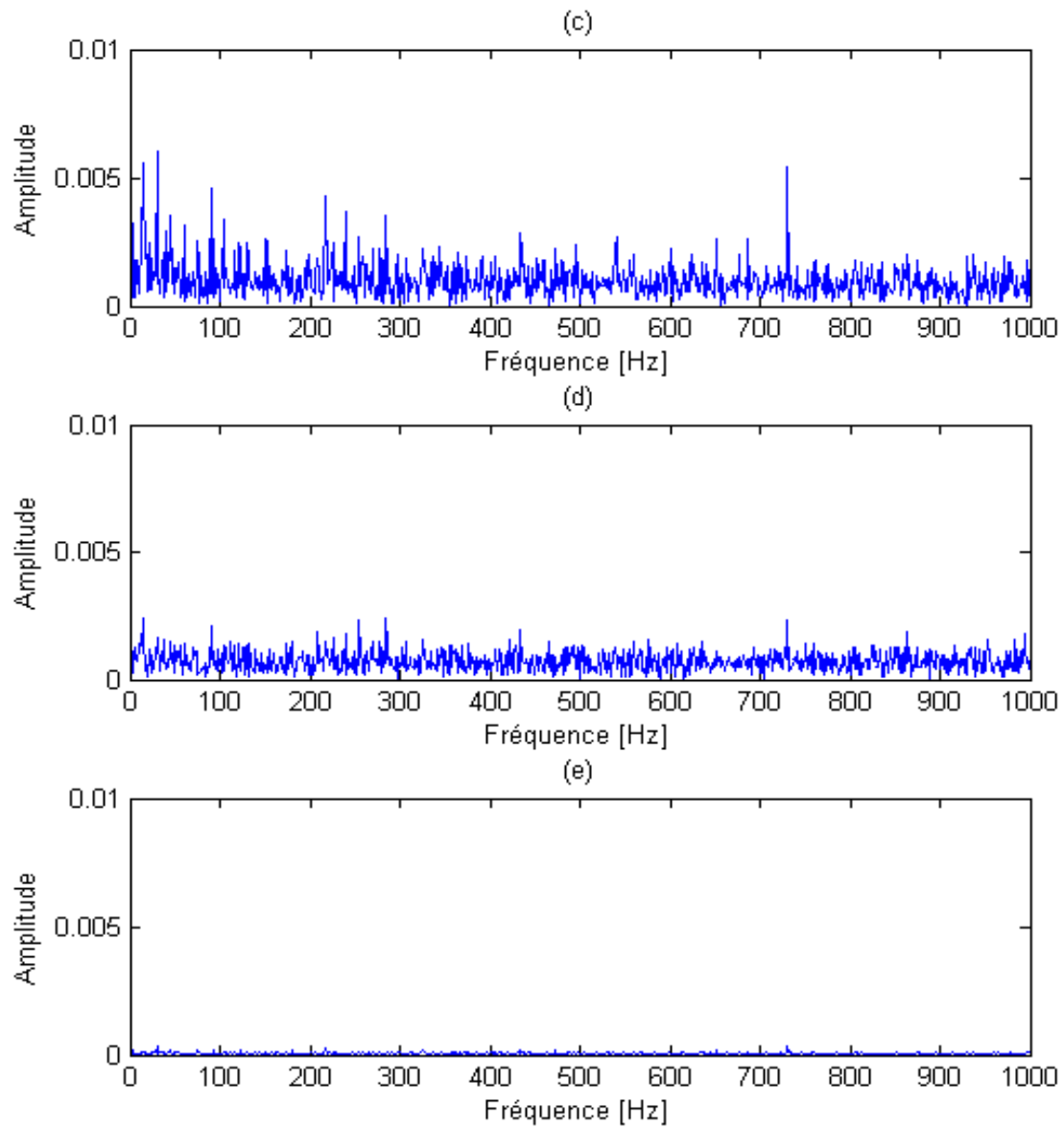
Dans ce test, le signal t0 mesuré sur le roulement de test qui est en bon état est traité par les trois méthodes classiques. Le signal et son spectre sont affichés sur la Figure IV.4 (a) et (b), respectivement.



**Figure IV.4 :** (a) Le signal mesuré avec roulement sain t0, (b) son spectre de Fourier

. La Figure IV.5 (c) et (d) montrent respectivement le spectre de l'enveloppe et le spectre du même signal traité avec TKEO. Comme prévu, aucun des harmoniques de la fréquence caractéristique du défaut (BPFO = 108,6 Hz) n'est détecté.

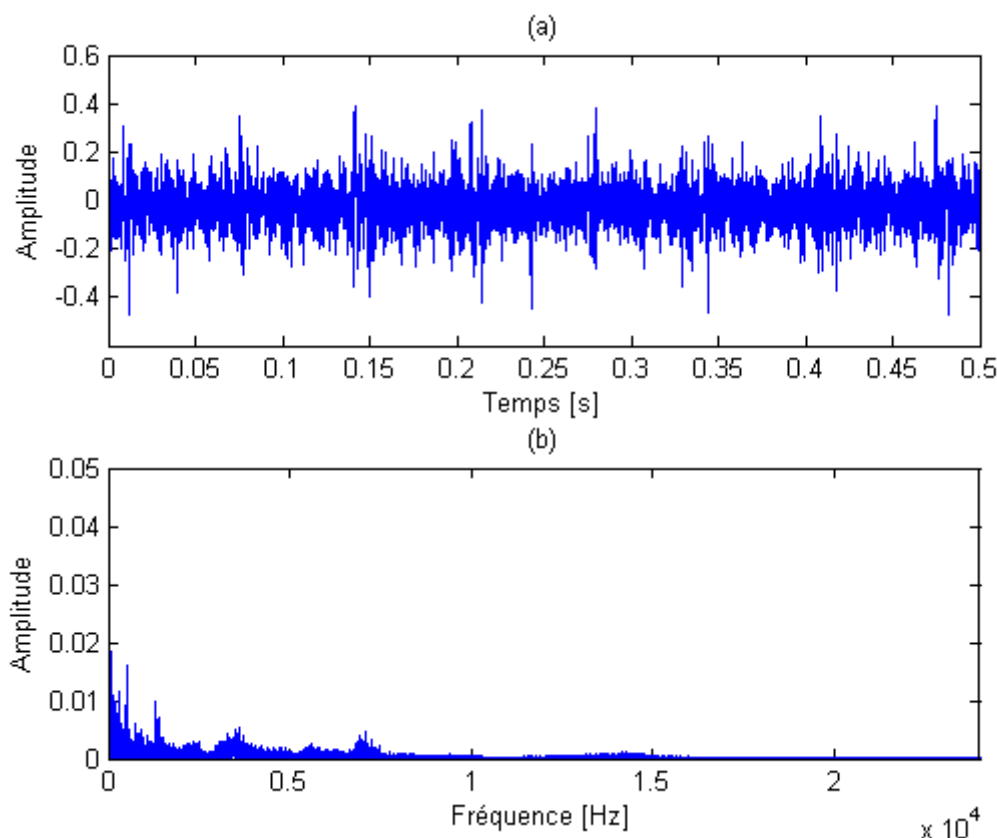
Le signal est ensuite transformé par l'opérateur EDO et le spectre obtenu est représenté dans la Figure IV.5 (e) comme prévisible, aucun défaut n'est détecté.



**Figure IV.5 :** (c) le spectre d'enveloppe, (d) spectre du signal traité avec TKEO, (e) Le spectre EDO du signal sain

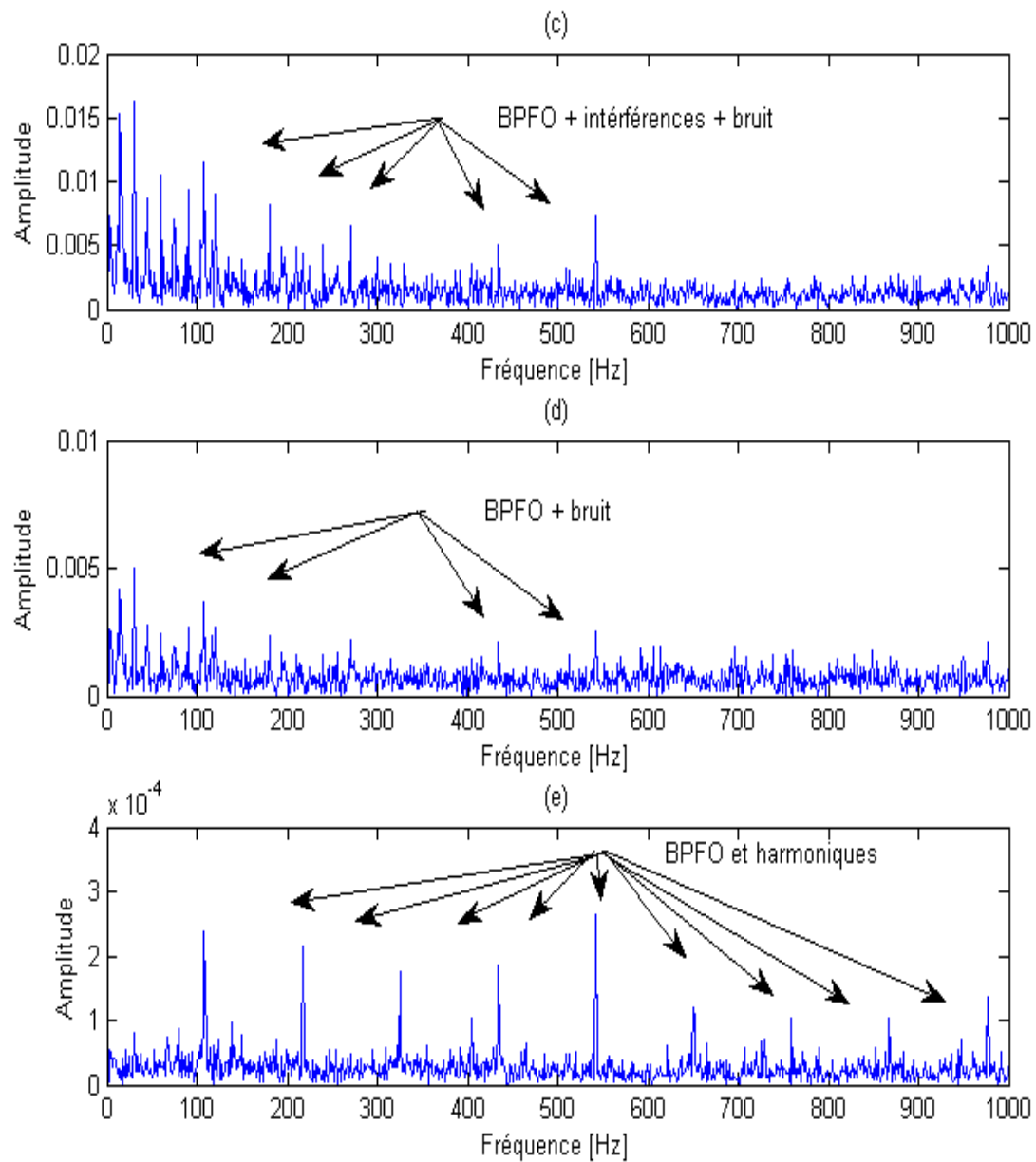
#### IV.4.2.2 Signal avec défaut t1

Dans ce test, le roulement sain dans le palier test est remplacé par un roulement ayant un défaut de bague externe t1. Le signal enregistré et son spectre de fréquence sont respectivement montrés sur la Figure IV.6 (a) et (b). Tandis que le spectre d'enveloppe du signal et le spectre issu de l'opérateur TKEO sont respectivement présentés la Figure IV.7 (c) et (d). Ces trois spectres sont dominés par les interférences de vibrations et le bruit. Toutefois, nous pouvons distinguer des harmoniques de la fréquence caractéristique défaut BPFO sur le spectre de l'enveloppe et quelques harmoniques sur le spectre du TKEO. Ainsi, la signature du défaut peut être à peine détectée par les deux méthodes.



**Figure IV.6 :** (a) Le signal mesuré avec un défaut de bague externe t1, (b) son spectre de fréquence.

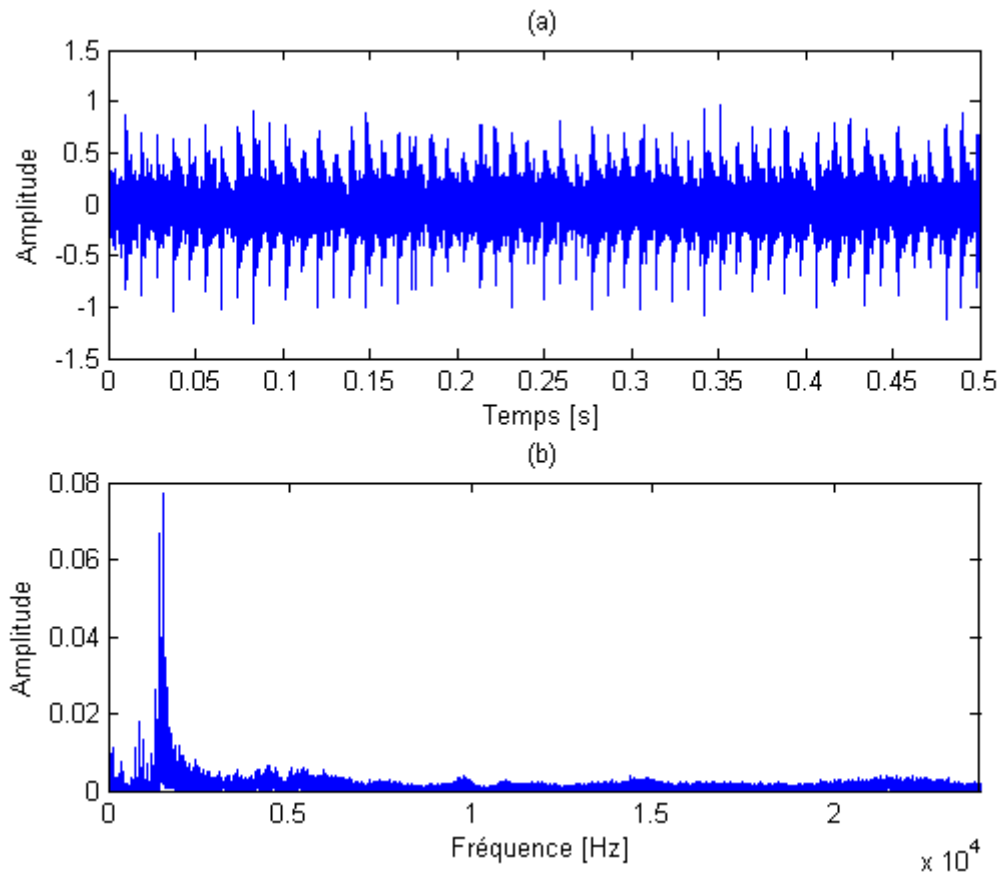
Le signal est ensuite transformé en utilisant l'opérateur proposé qui offre le spectre illustré sur la Figure IV.7 (e). Plusieurs harmoniques de la fréquence caractéristique du défaut BPFO peuvent désormais être clairement détectées à partir de ce spectre. Cela montre la puissance de la méthode proposée à extraire les caractéristiques du défaut à un stade précoce et en présence du bruit et d'interférences.



**Figure IV.7 :** (c) le spectre d'enveloppe, (d) le spectre du signal traité par le TKEO, (e) le spectre du signal du défaut t1 transformé par l'opérateur EDO.

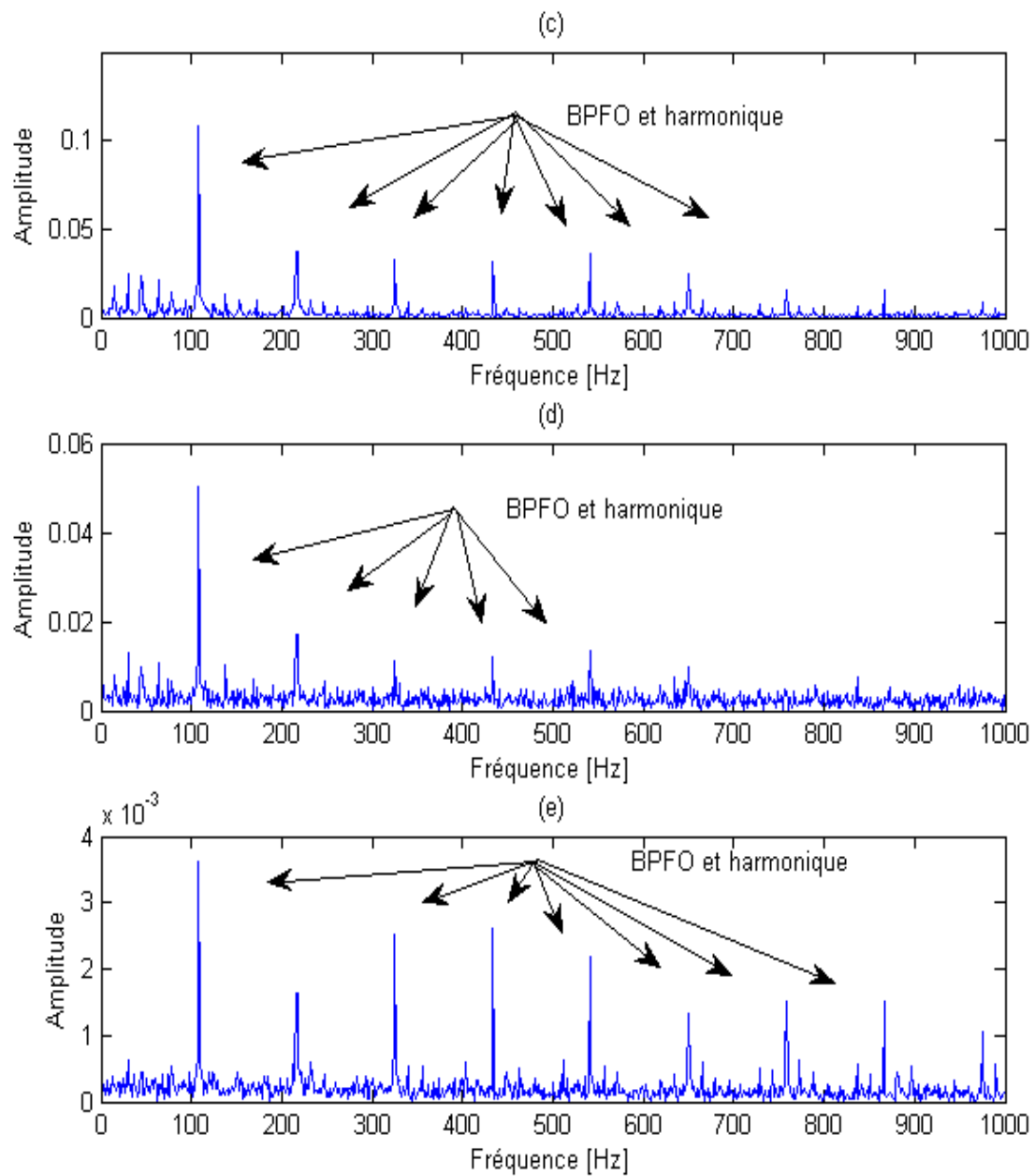
### IV.4.2.3 Signal avec défaut t2

Ici, le roulement palier test est remplacé par un autre avec un défaut de bague externe t2. Le signal enregistré et son spectre de fréquence sont affichés dans la Figure IV.8 (a) et (b), respectivement. Son spectre d'enveloppe et le spectre de l'opérateur d'énergie TKEO sont aussi présentés dans la Figure IV.9 (c) et (d), respectivement. La signature du défaut est détectée par la méthode de l'enveloppe, mais ne peut pas être si facilement observée dans le cas de TKEO.



**Figure IV.8 :** (a) Le signal mesuré avec un défaut de bague externe t2, (b) son spectre de fréquence.

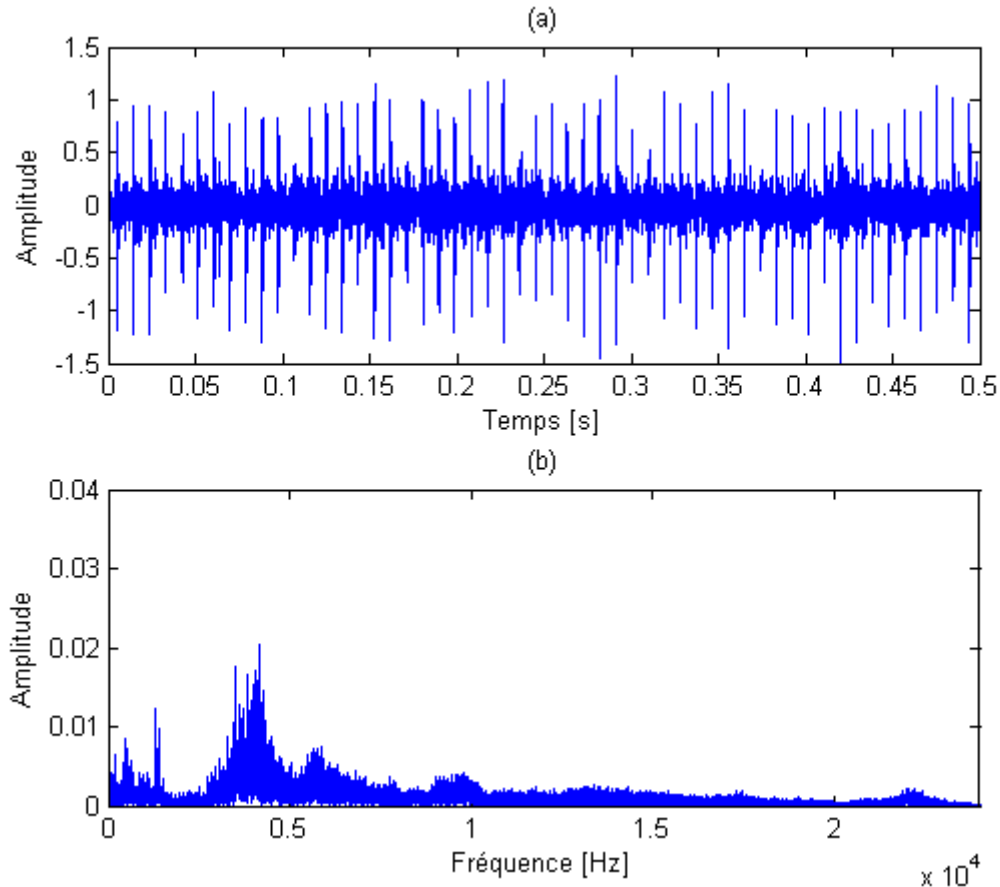
Lorsqu'il est appliqué sur le signal du défaut t2, le nouveau opérateur EDO peut facilement identifier la fréquence caractéristique  $108,6 \text{ Hz} = \text{BPFO}$  ainsi que ses harmoniques (voir Figure IV.9 (e)).



**Figure IV.9 :** (c) le spectre d'enveloppe, (d) le spectre du signal traité par le TKEO, (e) Le spectre du signal du défaut t2 transformé par l'opérateur EDO.

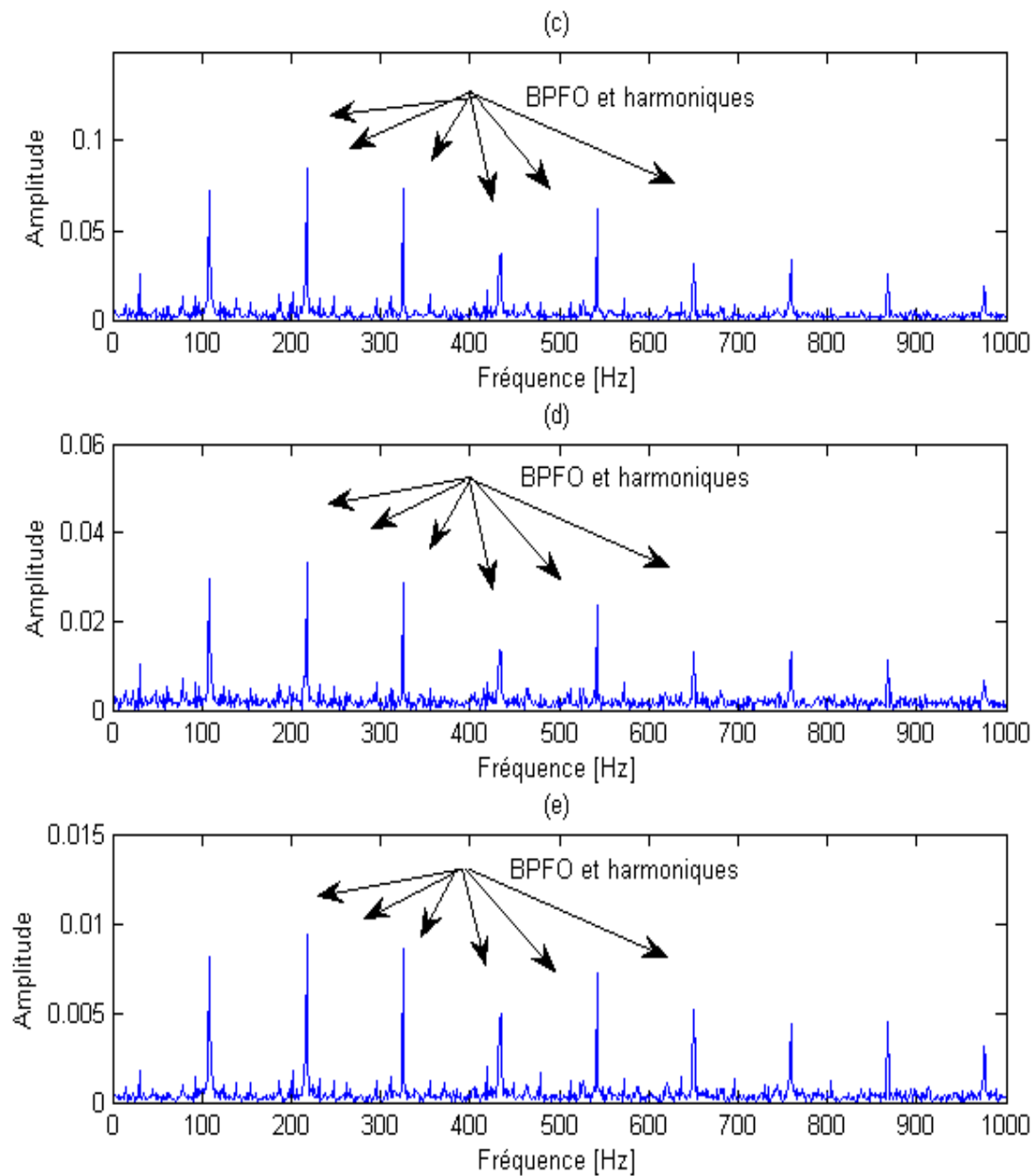
#### IV.4.2.4 Signal avec défaut t3

Le signal mesuré en présence du défaut de bague externe t3 du roulement ainsi que son spectre de fréquence sont représentés sur la Figure IV.10 (a) et (b), respectivement.



**Figure IV.10 :** (a) Le signal mesuré avec un défaut de bague externe t3, (b) son spectre de fréquence,

La Figure IV.11 (c) et (d) présentent respectivement le spectre d'enveloppe et le spectre de l'opérateur TKEO où la fréquence caractéristique 108,6 Hz ainsi que ses harmoniques associés peuvent être clairement détectés. Le nouvel opérateur est aussi employé pour transformer le signal du défaut t3. Le spectre obtenu est présenté sur la Figure IV.11 (e). La fréquence caractéristique du défaut et ses harmoniques associés peuvent également être facilement reconnus.

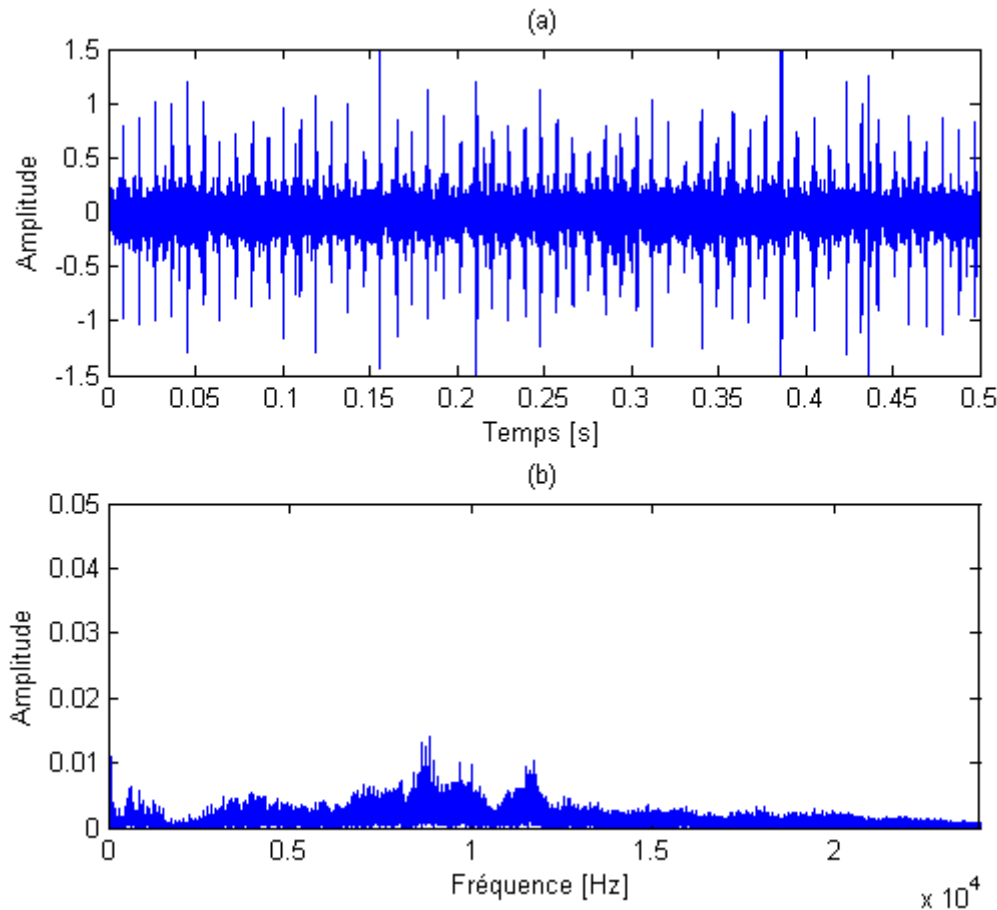


. **Figure IV.11 :** (c) le spectre d'enveloppe, (d) le spectre du signal traité par le TKEO, (e) Le spectre du signal du défaut t3 transformé par l'opérateur EDO.



#### IV.4.2.5 Signal avec défaut t4

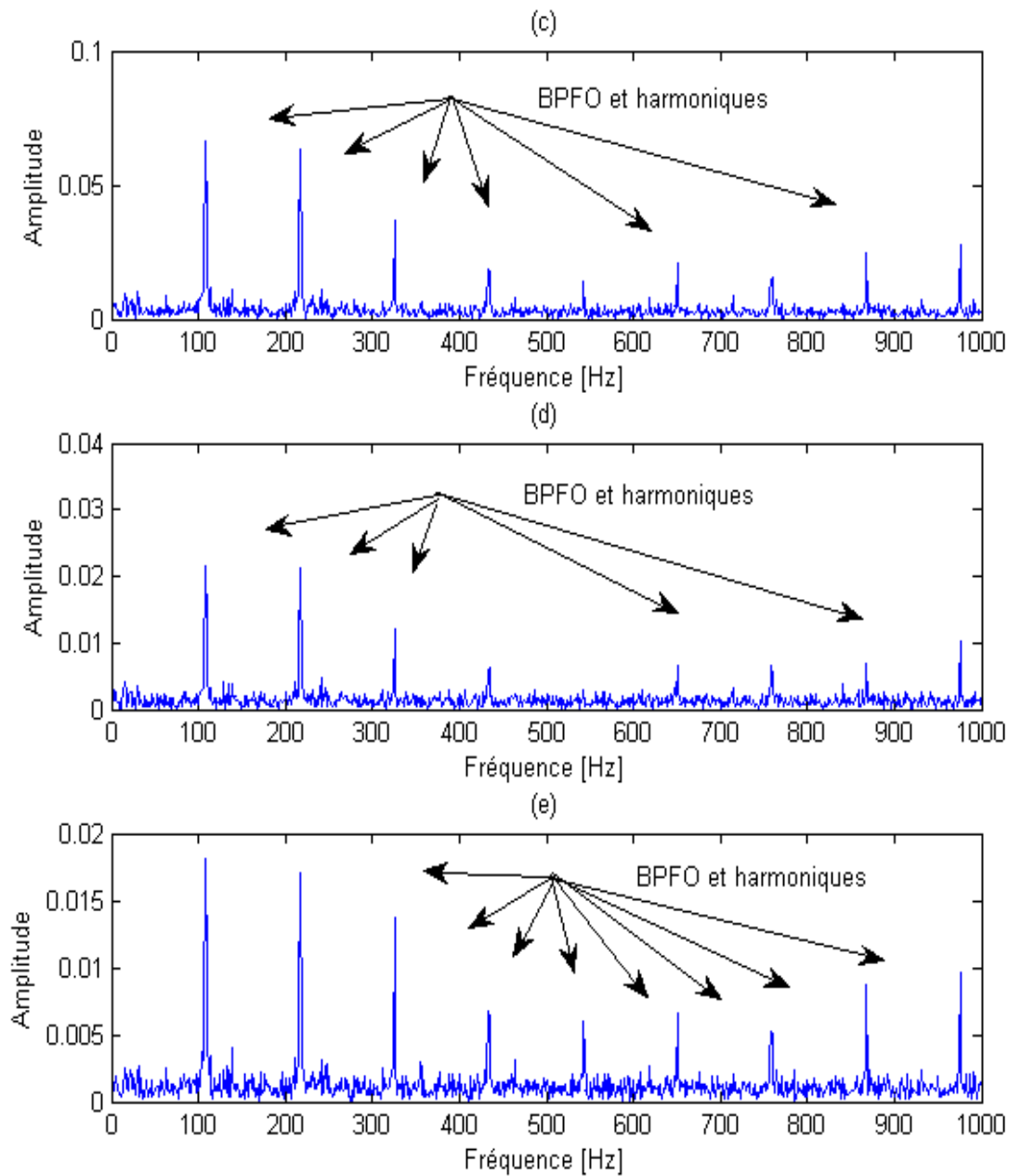
Le signal mesuré en présence du défaut de bague externe t4 du roulement ainsi que son spectre de fréquence sont représentés sur la Figure IV.12 (a) et (b), respectivement.



**Figure IV.12 :** (a) Le signal mesuré avec un défaut de bague externe t4, (b) son spectre de fréquence,

La Figure IV.13 (c) et (d) présentent respectivement le spectre d'enveloppe et le spectre de l'opérateur TKEO où la fréquence caractéristique 108,6 Hz ainsi que ses harmoniques associés peuvent être clairement détectés.

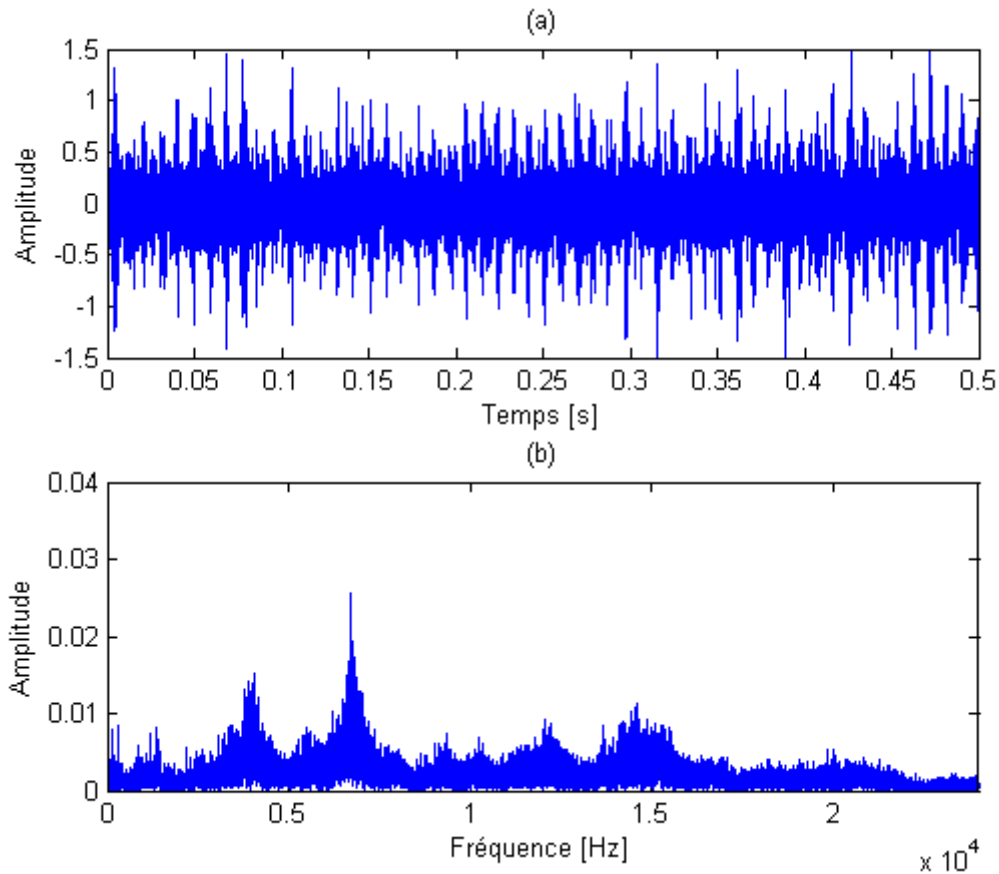
Le nouvel opérateur est aussi employé pour transformer le signal du défaut t4. Le spectre obtenu est présenté sur la Figure IV.13 (e). La fréquence caractéristique du défaut et ses harmoniques associés augmentent et sont facilement reconnus.



**Figure IV.13 :** (c) le spectre d'enveloppe, (d) le spectre du signal traité par le TKEO, (e) Le spectre du signal du défaut t4 transformé par l'opérateur EDO.

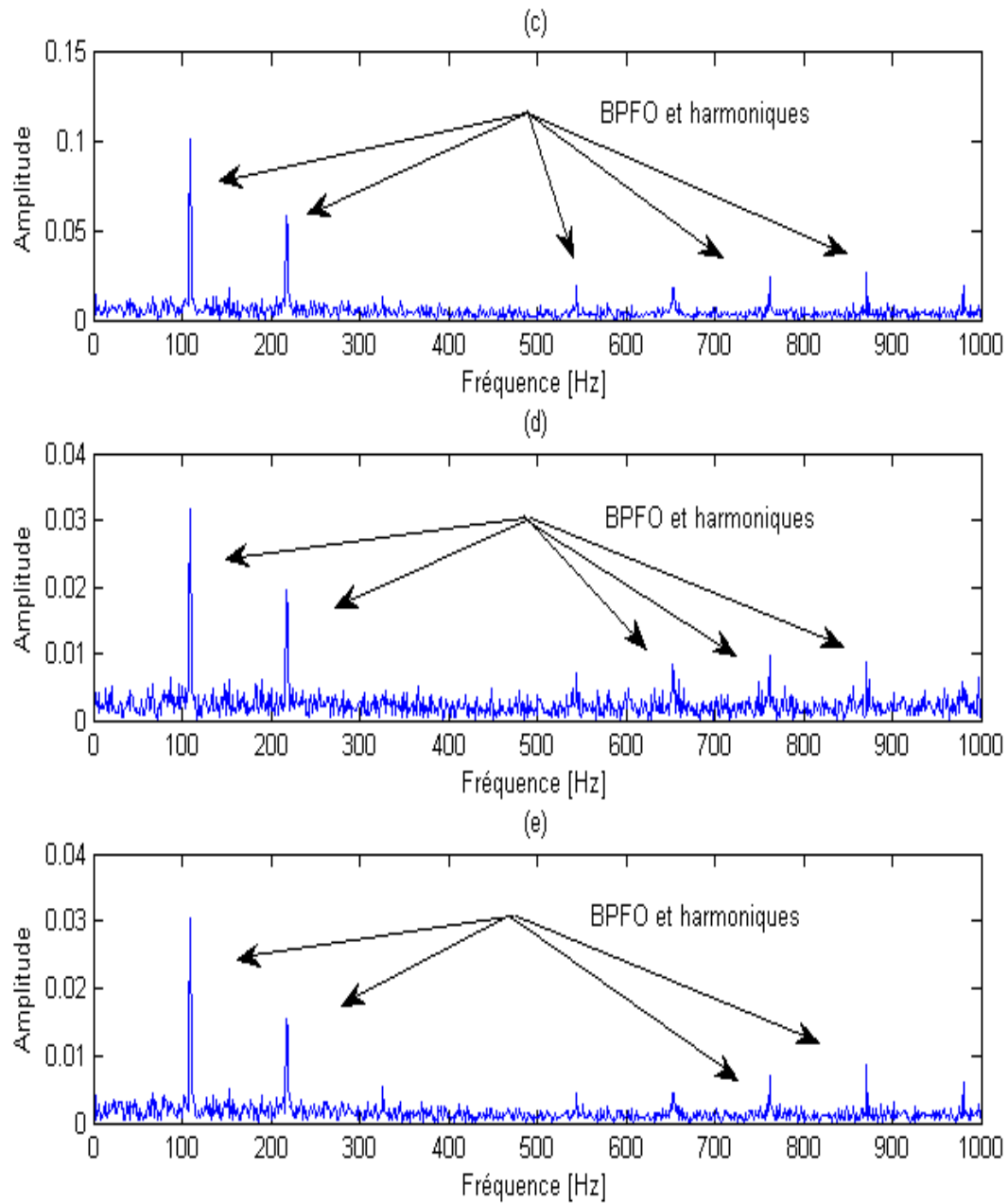
#### IV.4.2.5 Signal avec défaut t5

Le signal avec défaut t5 ainsi que son spectre représenté sur la Figure IV.14.



**Figure IV.14 :** (a) Le signal mesuré avec un défaut de bague externe t5, (b) son spectre de fréquence,

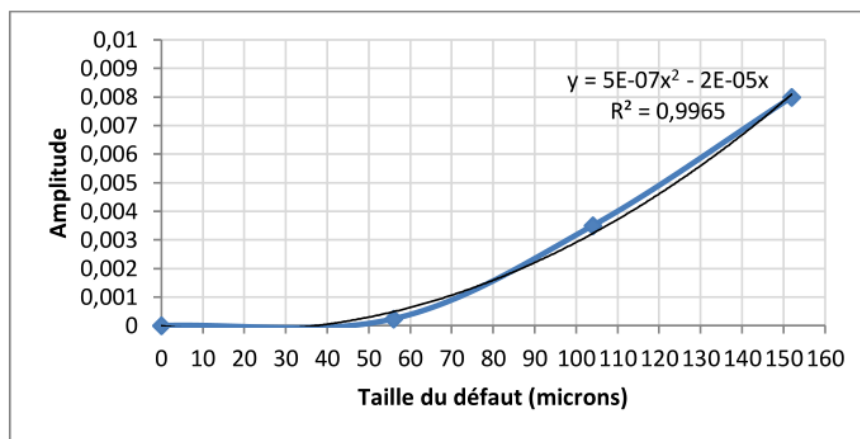
La Figure IV.15 (c) et (d) présentent respectivement le spectre d'enveloppe et le spectre de l'opérateur TKEO, le nouvel opérateur EDO est aussi employé pour transformer le signal du défaut t5. Le spectre obtenu est présenté sur la Figure IV.15 (e). La fréquence caractéristique du défaut et ses harmoniques associés augmentent et sont facilement reconnus aussi.



**Figure IV.15 :** (c) le spectre d'enveloppe, (d) le spectre du signal traité par le TKEO, (e) Le spectre du signal du défaut t5 transformé par l'opérateur EDO.

En considérant les deux méthodes classiques (Enveloppe et TKEO), il convient de souligner que les pics d'amplitudes augmentent avec la gravité du défaut ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  et  $t_5$ ), et seule la méthode de l'EDO distingue clairement la fréquence caractéristique à un stade précoce de la dégradation.

La Figure IV.16 montre la variation de l'amplitude correspondant à la fréquence BPFO obtenu par l'opérateur EDO recueillies à partir des Figures IV 5, 7, 9, 11, 13 et 15 en fonction de la taille du défaut, l'allure obtenue peut être ainsi exprimée sous la forme d'une équation parabolique.



**Figure IV.16 :** Amplitude à la fréquence BPFO obtenu par EDO en fonction de la taille du défaut.

## IV.5 Conclusion

On conclut d'après tous ce que nous avons vu que le spectre du signal est dominé par les composantes d'interférence et le défaut ne peut être identifié. Les résultats de l'analyse d'enveloppe et de l'opérateur TKEO qu'on a obtenu que le spectre d'enveloppe ne montre que des pics d'amplitude reliés aux fréquences d'interférence, tandis que le spectre de TKEO est prédominé par le bruit avec quelques artéfacts des fréquences d'interférence, cela était attendu puisqu'il est connu que l'analyse d'enveloppe devient non efficace en présence des interférences et l'opérateur classique TKEO est susceptible au bruit.

Lorsque le signal simulé est transformé par le nouvel opérateur EDO (la dérivée d'enveloppe) sa fréquence de défaut et plusieurs de ses harmoniques peuvent être clairement identifiés mais les interférences ne peuvent être distingués, cela est dû à leur faible force d'apparition causée par l'opération de dérivation. L'EDO est plus performant que les deux autres méthodes classiques, avec sa capacité à cerner la présence de multiples interférences par l'amélioration de sa fonction de différenciation.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion Générale**

La détection précoce des défauts de roulements reste un domaine de recherche d'actualité visant essentiellement le développement de méthodes fiables et pratiques. Dans cet esprit, l'objectif de ce mémoire est d'optimiser une technique, qui est l'analyse par la dérivée d'enveloppe sur un roulement. En général, les méthodes proposées utilisent un seuil de référence déterminé à partir d'un essai avec une machine saine afin d'établir la présence d'une défaillance électrique et/ou mécanique. Nous avons souhaité orienter notre travail de recherche de façon à se passer de cette information et cela permettrait de diagnostiquer un défaut sans avoir recours à une quelconque base de données. Nous nous sommes intéressés à modéliser le défaut de roulement pour comprendre son effet sur le fonctionnement de la machine et pour expliquer les phénomènes physiques mis en jeu lors de l'apparition de ce type de défauts.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les éléments de constitution de la machine afin de préciser les différents défauts pouvant survenir sur ceux-ci, nous avons ensuite présenté les principales sources d'information pour la surveillance et le diagnostic des machines tournantes tel que, l'analyse du lubrifiant ou l'analyse d'huile, la thermographie infrarouge, l'analyse des ultrasonores et l'analyse vibratoire qu'est le but de notre recherche.

Pour le deuxième chapitre nous avons présenté divers outils issus des techniques de traitements de signal permettant l'analyse des signaux révélateurs d'un défaut électrique et/ou mécanique dans le domaine temporel et fréquentiel. Dans le domaine temporel cette méthode utilise des indicateurs classiques comme le RMS ou valeur efficace, Facteur de crête et Kurtosis, dans le domaine fréquentiel nous avons parlé sur les analyses spectrales comme celle de transformé de Fourier et celle de Hlibert et l'opérateur TKE et la dérivée d'enveloppe EDO, après ça nous avons passé aux analyses temps-fréquence qu'ont été développées pour l'étude des signaux non-stationnaires comme Wigner-ville, Transformée de Fourier à court terme TFCT et La transformée en ondelettes.

Le troisième chapitre notre méthodologie de travail était dans un premier temps d'utiliser les modèles de simulation afin de les analyser par des méthodes d'analyse spectrales classiques. Plusieurs signaux, sinusoïdale, sommes de sinusoïdale, modulation d'amplitude, modulation de fréquence ainsi que des signaux simulant au défaut d'un roulement qui a été traité par des méthodes classiques, il s'agit de l'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier et l'analyse d'enveloppe basée sur la transformée de Hilbert ainsi que l'analyse par opérateur

énergétique TKEO et à la fin une simulation de défaut de roulement auquel est ajouté du bruit et des interférences vibratoires.

Dans le dernier chapitre, nous avons d'abord présenté la base de données de vibrations enregistrées sur un banc d'essais de l'ÉTS de Montréal, Canada, lors de simulation de défaut de bague externe d'un roulement. Ensuite, nous avons basé l'étude sur ces signaux en comparant les signaux enregistrés avec des fissures de différentes tailles. Nous avons traité ces signaux avec les techniques d'analyse présentées en troisième chapitre : l'analyse spectrale, l'analyse d'enveloppe, l'analyse de l'opérateur TKEO ainsi que la nouvelle technique basée sur la dérivée d'enveloppe (EDO). Une comparaison est faite entre ces méthodes, et les résultats obtenus montrent que l'analyse par opérateur EDO n'est pas sensible ni au bruit, ni aux interférences comme les autres méthodes ce qui fait d'elle une technique précoce et très efficace que les autres.

On espère que ce travail servira de base pour les futures promotions et un diagnostic complet de toutes les machines qui se trouvent au niveau du hall et au niveau de l'université sera établi. Cela permettra de faire un suivi et d'avoir un historique pour les machines, ces données serviront à améliorer le programme de maintenance existant et prévoir les pièces de rechange.



# **Références bibliographiques**

---

## Références bibliographiques

- [01] Hégny Jean, « Pratique de la maintenance préventive ». Edition Dunod 2002.
- [02] Ch. Abdelali, et A. Elamarty. PFE : « Maintenance des Machines Tournantes par Analyse vibratoire ». Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de FES (Maroc), 2007.
- [03] F. Champavier, « Analyse Vibratoire des machines Tournantes », la maintenance Edition METRZ VIB, janvier 1990.
- [04] K.O. Farag, A.M. Gaouda, “Dynamic wavelet-based tool for gearbox diagnosis”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 26, pp. 190–204, 2012.
- [05] G.F. Bin, J.J. Gao, X.J. Li, B.S. Dhillon, “Early fault diagnosis of rotating machinery based on wavelet packets-Empirical mode decomposition feature extraction and neural network”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 27, pp 696–711, 2012.
- [06] Z. Li, X.Yan, C. Yuan, Z. Peng, L. Li, “Virtual prototype and experimental research on gear multi-fault diagnosis using wavelet-autoregressive model and principal component analysis method”, Mechanical Systems and Signal Processing, 25, pp. 2589– 2607, 2011.
- [07] Y. Lei, J. Lin, M. J. Zuo, Z. He, “Condition monitoring and fault diagnosis of planetary gearboxes: A review”, Measurement, 48, pp. 292–305, 2014.
- [08] T. Fakhfakh, F. Chaari, and M. Haddar, “Numerical and experimental analysis of a gear system with teeth defects”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 25 (5), pp. 542-550, 2005.
- [09] [ALATTASS M.] – Maintenance des machines tournantes : signature de défauts d’engrenages droits et hélicoïdaux - Thèse mécanique, Lyon, INSA LYON, 198 p.
- [10] Q. Meng, L. Qu, Rotating machinery fault diagnosis using Wigner distribution, Mechanical Systems and Signal Processing, pp 155-166, 1991.
- [11] Trajin. Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones Application à la surveillance des roulements à billes. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse 2009.

- [12] Xiaohong Yuan, LilongCai, Variable amplitude Fourier series with its application in gearbox diagnosis, Part I : Principle and simulation, *Mechanical Systems and Signal Processing* 1 (2005) 1055-1066.
- [13] Imaouchen Y., Alkama R. et Thomas M., Considération des Indicateurs statistiques, Kurtogram et Enveloppe de Hilbert pour la détection précoce d'un défaut de bague Références bibliographiques 144 extérieure d'un roulement", 2ème Conférence CIMGLE, Novembre 2012, Oran –Algérie.
- [14] Morel. Surveillance vibratoire et maintenance prédictive. Techniques de l'ingénieur Comportement en service des systèmes et composants mécaniques, base docum (ref. article : bm5148) :0–21, 2005
- [15] Alain Boulenger, et Christian Pachaud, « Analyse Vibratoire en maintenance », 3<sup>ème</sup> édition, Dunod, Paris, 2007.
- [16] Ville J., « Théorie et applications de la notion de signal analytique », Câbles et transm., 2<sup>ème</sup> A., N°1, 1948, pp. 61-74.
- [17] Grossmann A. et Morlet J., Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM journal on mathematical analysis*, 15(4) (1984) 723–736.
- [18] MILISEN X et LENAERTS V «comparaison de différentes méthodes de détection de défauts dans les roulements», *Revue Scientifique des ISILF* n°20, 2006.
- [19] Luft M. «Comprendre la vibration de moteur par l'analyse FFT », Nr. de Cde. VIB 9.619F. Edition PRUFTECHNIK AG. Mars 1998.
- [20] Flandrin P., « Méthodes temps-fréquence et temps-échelle pour l'analyse des signaux de vibrations et de chocs », *Progrès récents des méthodes de surveillance acoustiques et vibratoires*, Senlis 27-29 octobre 1992, pp.69-72
- [21] Flandrin P., « Temps-fréquence », traité des nouvelles technologies, coll. Hermes 1993.
- [22] Kedadouche M., Thomas M. et Tahan A., Monitoring Machines by Using a Hybrid Method Combining MED, EMD and TKEO, *Advances in Acoustics and Vibration*, vol. 2014, ID592080, 2014.
- [23] Imaouchen et al, *Journal of Vibration and Control* (2016).

## **Résumé**

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

L'objectif de ce travail est le diagnostic provenant des défauts mécaniques tels que les défauts de roulements. Pour atteindre cet objectif, plusieurs méthodes basées sur l'analyse d'enveloppe et TKEO et par l'opérateur EDO ont été appliquées à l'analyse des signaux vibratoires simulés et réels de roulements sains et défectueux.

## **Abstract**

Vibration analysis is one of the means used to monitor the health of rotating machines in operation. This is part of the conditional preventive maintenance of the industrial production tool.

The objective of this work is the diagnosis of mechanical defects such as bearing defects. To achieve this objective, several methods based on envelope analysis and TKEO and the EDO operator have been applied to the analysis of simulated and real vibratory signals of healthy and defective bearings.