

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQU  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE Génie électrique

N° :...../2023



DOMAINE : Génie électrique

FILIERE : Electromécanique

OPTION : Maintenance des  
équipements industriels

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme  
Master Professionnelle

Par: YAHIAOUI SLIMANE

BARKAT FARES

THEME

*Application de l'analyse vibratoire a la maintenance  
préventive conditionnelle de turbine à gaz type 9001systeme  
one*

Soutenu le 21 / 07 /2023 devant le jury composé de

Mabrouk DEFDAF  
Bilal Djamal Eddine CHERIF  
Hilal RAHALI

Université de Msila  
Université de Msila  
Université de Msila

Président  
Rapporteur  
Examineur

Année universitaire : 2022/2023

# ***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 ENCADREUR CHERIF BILAL DJAMAL EDDINE. POUR SON  
DÉVOUEMENT ET SA DISPONIBILITÉ DURANT LA PRÉPARATION DE CE  
MÉMOIRE ET LES CONSEILS QUI NOUS ONT ÉTÉ TRÈS PRÉCIEUX.

NOUS TENONS À EXPRIMER NOS MEILLEURS SENTIMENTS À MONSIEUR DERBAL  
AMIROUCHE , POUR TOUTE SON AIDE, SA CONNAISSANCE, ET SES EXIGENCES,  
DURANT LA PRÉPARATION DE CE TRAVAIL. NOUS VOUDRONS AUSSI REMERCIER  
TOUT LE PERSONNEL DU SERVICE DE MAINTENANCE ET DIAGNOSTIQUE DE  
CENTRALE PRODUCTION ÉLECTRIQUES DE M'SILA, EN PARTICULIER MR SABER  
MOUSSAI ET HEBBAS .Z POUR LEURS AIDES DURANT NOTRE TRAVAIL.

# Liste des figures

<b>Figure I.1 :</b> Différentes amplitudes (vibration sinusoïdale).....	7
<b>Figure I.2 :</b> Nature d'une vibration.....	8
<b>Figure I.3 :</b> Schéma de principe d'un accéléromètre.....	9
<b>Figure I.4 :</b> fixation du capteur sur palier.....	10
<b>Figure I.5 :</b> choix directement pour la prise de mesure.....	10
<b>Figure I.6 :</b> Schéma représentatif de la turbine à gaz.....	11
<b>Figure I.7 :</b> Rotor de la turbine à gaz.....	12
<b>Figure I.8 :</b> Stator de la turbine à gaz.....	13
<b>Figure I.9 :</b> Bougies d'allumage.....	13
<b>Figure II.1:</b> Algorithme de MALLAT unidimensionnel.....	20
<b>Figure II.2:</b> Filtres miroirs en quadrature.....	21
<b>Figure II.3 :</b> Décomposition en multi-niveau du signal $f(n)$ .....	21
<b>Figure II.4:</b> Dépendance de l'échelle à la fréquence des ondelettes.....	22
<b>Figure II.5 :</b> Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux.....	23
<b>Figure III.1:</b> Bently Nevada 3500.....	24
<b>Figure III.2:</b> Carte d'OROS 36.....	25
<b>Figure III.3:</b> Communication PC / Analyseur.....	26
<b>Figure III.4:</b> Schéma global de capteur de Proximité.....	26

<b>Figure III.5:</b> Accéléromètre AC210_1D.....	28
<b>Figure III.6 :</b> Signal vibratoire.....	29
<b>Figure IV.1 :</b> IMF's.....	34
<b>Figure IV.2 :</b> Kurtosis.....	35
<b>Figure IV.3 :</b> Facteur de crête.....	36
<b>Figure IV.4 :</b> Enveloppe spectrale.....	37

# Liste des tableaux

<b>Tableau II.1:</b> Critère de sévérité du kurtosis.....	15
<b>Tableau III.1 :</b> Plaque signalétique TG9001E.....	28
<b>Tableau III.2 :</b> Plaque signalétique d'un compresseur de TG9001E.....	28
<b>Tableau III.3 :</b> Conditions de combustion.....	29
<b>Tableau III.4 :</b> Ensemble paliers.....	29
<b>Tableau IV.1:</b> Critère de sévérité du kurtosis.....	35

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	01
<b>Chapitre I : Généralités sur la maintenance et la surveillance des turbines à gaz par l'analyse vibratoire</b> .....	03
I.1 : Introduction.....	03
I.2 : Défaillances.....	03
I.2.1 : Définition de la défaillance.....	03
I.2.2 : Cause de défaillance.....	03
I.3. Notion sur la maintenance.....	03
I.3.1 : Définition de la maintenance.....	04
I.3.2 : Différents types de maintenance.....	04
I.3.2.1 : Maintenance palliative.....	04
I.3.2.1.1 : Maintenance curative.....	04
I.3.2.1.2 : Maintenance corrective.....	04
I.3.2.2 : Maintenance préventive.....	04
I.3.2.2.1 : Maintenance préventive systématique.....	04
I.3.2.2.2 : Maintenance préventive conditionnelle.....	04
I.3.3 : Objectifs de la maintenance.....	04
I.3.4 : Niveaux de la maintenance.....	05
I.3.4.1 : Maintenance du premier niveau.....	05
I.3.4.2 : Maintenance de deuxième niveau.....	05
I.3.4.3 : Maintenance de troisième niveau.....	05
I.3.4.4 : Maintenance du quatrième niveau.....	05
I.3.4.5 : Maintenance du cinquième niveau.....	05
I.4 : Surveillance.....	06
I.4.1 : Définition de surveillance.....	06
I.4.2 : Différents niveaux de la surveillance.....	06
I.4.3 : Surveillance par analyse vibratoire.....	06
I.4.4 : Caractéristiques d'un signal vibratoire.....	06
I.4.4.1 : Fréquence.....	06
I.4.4.2 : Amplitude.....	07
I.4.4.3 : Nature d'une vibration.....	07
I.5 : Pratique de l'analyse vibratoire.....	08
I.5.1 : Accéléromètre.....	08
I.5.1.1 : Avantages.....	09
I.5.1.2 : Inconvénients.....	09
I.5.1.3 : Problèmes et défauts détectés.....	09
I.5.2 : Choix de l'emplacement de capteurs.....	09
I.5.2.1 : Efforts tournants.....	10
I.5.2.2 : Efforts directionnels.....	10
I.5.2.3 : Conditionnement du signal.....	10
I.6 : Généralités sur les turbines à gaz.....	10
I.6.1 : Constitution de la turbine à gaz.....	11
I.6.2 : Principe du fonctionnement de la turbine à gaz.....	11
I.7 : Défaillances de la Turbine A Gaz.....	12

I.8 : Conclusion.....	13
<b>Chapitre II : Etat de l'art sur les techniques de traitement de signal appliquées à l'analyse vibratoire.....</b>	<b>14</b>
II.1 : Introduction.....	14
II.2 : Analyse temporelle.....	14
II.2.1 : Valeur efficace (RMS).....	14
II.2.2 : Valeur crête.....	14
II.2.3 : Facteur de crête.....	14
II.2.4 : Facteur K.....	15
II.2.5 : Moment d'ordre 3.....	15
II.2.6 : Kurtosis.....	15
II.2.7 : Niveau global.....	15
II.2.8 : Talaf et Thikat.....	16
II.3 : Analyse fréquentielle.....	16
II.3.1 : Analyse spectrale.....	16
II.3.2 : Analyse d'enveloppe.....	16
II.3.3 : Kurtosis spectral.....	17
II.3.4 : Analyse cepstrale.....	18
II.4 : Analyse Temps-Fréquence et Temps-Echelle.....	18
II.4.1 : Méthode basé sur Transformée de Fourier de courte durée (STFT).....	18
II.4.2 : Transformée en Ondelettes.....	20
II.4.3 : Transformée de Hilbert Huang.....	23
II.5 : Conclusion.....	23
<b>Chapitre III: Présentation d'un Banc de Mesure.....</b>	<b>24</b>
III.1 : Introduction.....	24
III.2 : Constituions de la chaine de mesure.....	24
1 : Vibromètre (Bently Nevada 3500).....	24
1.1 : Système de surveillance 3500.....	24
1.2 : Protection des machines.....	25
2. Carte d'OROS 36.....	25
2.1 : Caractéristique de l'appareil.....	25
2.2 : Logiciel d'analyse de diagnostic vibratoire «ORBIGATE».....	26
1 : Capteur Proximité.....	26
1.1 : Fonctionnement du système.....	27
2. Accéléromètre.....	27
2.1 : Caractéristique.....	27
III.3 : Paramètres d'acquisition.....	29
III.4 : Conclusion.....	29
<b>Chapitre IV: Application de la Transformée Hilbert Huang Mode de décomposition CEEMDAN.....</b>	<b>30</b>
IV.1 : Introduction.....	30
IV.2 : Algorithme EMD.....	30
IV.2.1 : Fonction de mode intrinsèque (IMF).....	30
IV.2.2 : Processus de tamisage (Sifting Process).....	30
IV.3 : Algorithme EEMD.....	31
IV.4 : Algorithme CEEMD.....	32
IV.5 : Algorithme CEEMDAN.....	32
IV.6 : Application de l'algorithme CEEMDAN pour le diagnostic de TAG-9001 <sup>E</sup> .....	33
IV.7 : Etude statistique.....	34
IV.7.1 : Kurtosis.....	35

IV.7.2 : Facteur de crête.....	35
IV.8 : Enveloppe spectrale.....	36
IV.9 : Conclusion.....	37
<b>Conclusion générale</b> .....	38
<b>Bibliographie</b> .....	39

# Introduction générale

Les systèmes industriels sont de plus en plus sophistiqués et visent à répondre à la norme de productivité, mais le contrôle ou la supervision de ces processus est encore largement une activité manuelle réalisée par des opérateurs humains. Cependant, les notions de sécurité et de fiabilité des processus technologiques seront l'enjeu principal. Pour éviter la moindre interruption expliquée par l'apparition d'anomalie ou de défaillance en production faire appel à des opérateurs humains pour faire face aux événements anormaux en situation d'urgence est de plus en plus difficile en raison de plusieurs facteurs. Ces anomalies conduiront par la suite à l'échec [1].

La modélisation est la première étape du diagnostic des pannes. Les modèles sont simplement des représentations compressées de connaissances. L'idée de base de ces techniques est de convertir la base de données disponible sur le fonctionnement normal du système en connaissances, c'est-à-dire un modèle de processus implicite [2].

La méthode d'analyse en composantes principales (ACP) est l'une des techniques de traitement de données statistiques les plus populaires dans la littérature. L'analyse en composantes principales (ACP) a été largement utilisée dans le contrôle des processus statistiques. L'ACP est une technologie linéaire éprouvée dans le domaine du traitement des données et dans le domaine du diagnostic des processus industriels. Afin de surmonter certaines limitations de la méthode PCA traditionnelle pour la modélisation et le diagnostic de systèmes légèrement plus complexes, tels que les systèmes variables dans le temps incertains, l'ACP de type intervalle et l'analyse multi-échelle (MS) ou la transformée en ondelettes (TO) sont considérées [2].

Ce travail est divisé en quatre chapitres, où dans le premier chapitre nous avons parlé sur généralité de maintenance, les caractéristiques d'un signal vibratoire et des turbines à gaz en termes de rôle, d'utilisation et de mode de fonctionnement, et dans la deuxième partie nous avons appris à diagnostiquer les erreurs, les types d'erreurs et les systèmes de modélisation.

Dans le deuxième chapitre, nous avons expliqué le principe des méthodes de diagnostic : méthode statistique, méthode fréquentielle et les méthodes temps fréquences.

Dans le troisième chapitre, nous avons expliqué le banc de mesure concernant les capteurs et la chaîne d'acquisition.

Dans le quatrième chapitre, nous avons détecté le défaut à l'aide de Hilbert-Huang mode de décomposition CEEMDAN.

# **Chapitre I : Généralités sur la maintenance et la surveillance des turbines à gaz par l'analyse vibratoire.**

## **I.1 : Introduction**

Dans ce chapitre, la première partie nous avons présenté les différents types de maintenance, les niveaux de maintenance, la surveillance et les caractéristiques d'un signal vibratoire.

Dans la deuxième partie, de ce chapitre nous avons présenté les turbines d'une façon générale et plus spécialement la turbine à gaz. On la décrit, explique son principe de fonctionnement, son rôle et même les défauts qui peuvent arriver pendant leur fonctionnement.

## **I.2 : Défaillances**

Dans cette section, nous avons présente la définition de la défaillance et les cause de défaillance.

### **I.2.1 : Définition de la défaillance**

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques, les défaillances peuvent être classées selon différents critères [3] :

- ✓ Défaillance progressive ou soudaine, selon la rapidité de leur manifestation ;
- ✓ Défaillance partielle ou complété ou intermédiaire, selon l'amplitude ;
- ✓ Défaillance précoce, à taux constant ou d'usure, selon le moment d'apparition dans le cycle de vie du matériel ;
- ✓ Défaillance mineure, significative, critique ou catastrophique, selon leur effet sur les systèmes, l'environnement et l'homme ;
- ✓ Défaillance première, seconde et de commande, selon les causes des défaillances.

### **I.2.2 : Cause de défaillance**

La norme AFNOR NF X60010, définit la cause de défaillance par : " les circonstances liées à la conception, la fabrication ou l'emploi et qui ont entraîné la défaillance ". Cette définition est fondamentale en diagnostic industriel. Une bonne politique de maintenance passe obligatoirement par une maîtrise parfaite des mécanismes de ruine liés à la conception, à la construction et à l'exploitation des matériels. Il est important de connaître et de prévenir les défaillances, d'une manière précoce en suivant l'évolution de dégradation d'un élément [4].

## **I.3. Notion sur la maintenance**

Dans cette partie, nous avons présente la définition de la maintenance, les différents types de maintenance, les objectifs de la maintenance et les niveaux de maintenances.

### **I.3.1 : Définition de la maintenance**

Selon la définition de l'AFNOR, la maintenance vise à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé [5].

La maintenance regroupe ainsi les actions de dépannage et de réparation, de réglage, de révision, de contrôle et de vérification des équipements matériels (machines, véhicules, objets manufacturés, etc.) ou même immatériels (logiciels) [6].

### **I.3.2 : Différents types de maintenance**

#### **I.3.2.1 : Maintenance palliative**

Dépannage (donc provisoire) de l'équipement, permettant à celui-ci d'assurer tout ou partie d'une fonction requise ; elle doit toutefois être suivie d'une action curative dans les plus brefs délais [7].

##### **I.3.2.1.1 : Maintenance curative**

Réparation (donc durable) consistant en une remise en l'état initial [8].

##### **I.3.2.1.2 : Maintenance corrective**

La maintenance «CORRECTIVE», qui correspond à une attitude passive d'attente de la panne ou de l'incident l'action consiste alors à éliminer le défaut, grâce à dépannage ou une réparation [9].

#### **I.3.2.2 : Maintenance préventive**

La maintenance «PREVENTIVE», qui correspond à la volonté de maîtriser la dégradation d'un équipement afin d'éviter d'être pris au dépourvu par la panne [9].

##### **I.3.2.2.1 : Maintenance préventive systématique**

La maintenance «PREVENTIVE SYSTEMATIQUE», qui correspond aux changements ou à la réparation systématique des éléments [9].

##### **I.3.2.2.2 : Maintenance préventive conditionnelle**

La maintenance «PREVENTIVE CONDITIONNELLE», qui correspond aux changements ou à la réparation des éléments en fonction de leur état de dégradation [9].

### **I.3.3 : 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 production et à la qualité. Les objectifs de la maintenance, se greffent sur ceux de la production ou services attendus tel que la qualité, le coût, les délais...etc [10].

De ces points de vue, les objectifs de la maintenance réalisés à travers son organisation, sa gestion et ses interventions, sont nombreux.

- ✚ 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.3.4 : Niveaux de la maintenance**

La norme X60-010 propose un découpage de la maintenance à cinq niveaux, d'une part pour classer les différentes opérations de maintenance en fonction de leur impotence, d'autre part pour déterminer la famille d'intervenants qui va réaliser les opérations en toute sécurité [11].

#### **I.3.4.1 : Maintenance du premier niveau**

1. Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement ;
2. Échange d'éléments consommables, facilement accessible (fusible, voyants...etc.).

#### **I.3.4.2 : Maintenance de deuxième niveau**

1. Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet ;
2. Opérations mineures d'entretien (graissage par exemple) ;
3. Contrôles de bon fonctionnement.

#### **I.3.4.3 : Maintenance de troisième niveau**

1. Identification des pannes ;
2. Réparation au niveau des composants ou par échange d'éléments fonctionnels ;
3. Réparations mécaniques mineures ;
4. Réglage général et réalignement des appareils ;
5. Organisation de la maintenance préventive conformément aux instructions reçues.

#### **I.3.4.4 : Maintenance du quatrième niveau**

1. Tous travaux de maintenance corrective ou préventive à l'exception éventuellement des mises à neuf ;
2. Réglage des appareils de mesure utilisée pour la maintenance ;
3. Vérification par des organismes spécialisés pour la maintenance ;
4. Vérification par des organismes spécialisés des étalons secondaires possédés ;
5. Réception des équipements réparés au cinquième degré ;
6. Contribution à la formation des agents affectés au troisième degré de maintenance ;
7. Participation à la définition de la politique de maintenance ;

#### **I.3.4.5 : Maintenance du cinquième niveau**

1. Exécution des remises à neuf ;
2. Exécution des réparations importantes normalement du ressort du quatrième degré mais confiées pour des raisons économiques ou d'opportunité ;
3. Formation du personnel de maintenance (en principe uniquement celui de quatrième degré).

## I.4 : Surveillance

### I.4.1 : Définition de surveillance

Une tâche continue, réalisée en temps réel, qui permet de déterminer l'état d'un système physique, elle consiste en l'enregistrement des informations ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication des anomalies du comportement [12].

### I.4.2 : Différents niveaux de la surveillance

La surveillance se compose de deux fonctions principales qui sont la détection des défauts s'il existe, et le diagnostic.

- ✓ **Détection :** Elle consiste à observer l'état de fonctionnement de la machine à travers des indicateurs le plus souvent globaux. Une augmentation de ces indicateurs par rapport à des valeurs de référence caractérisée par la signature vibratoire de la machine en bon état permet de déclencher des alertes de dysfonctionnement [13].
- ✓ **Diagnostic :** Le diagnostic permet donc d'isoler le défaut, de le localiser et de le caractériser et identifier la nature du défaut. la fonction de diagnostic se décompose en deux fonctions élémentaires : localisation et identification des causes. La localisation permet de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant tandis que l'identification de la cause consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale [14].

### I.4.3 : Surveillance par analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est la plus largement utilisée car elle est adaptée aux plusieurs composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc...) Et de sa structure.

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence. Une vibration est caractérisée principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature [15].

### I.4.4 : Caractéristiques d'un signal vibratoire

#### I.4.4.1 : Fréquence

##### Définition

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz [Hz] [16].

1 hertz = 1 cycle/seconde. Une vibration qui se produira 10 fois par seconde aura donc une fréquence " $f$ " de 10 hertz.

Si la fréquence " $f$ " d'un phénomène est de 50 hertz, c'est-à-dire 50 cycles par seconde, la durée d'un cycle (ou période  $T$ ) est de  $1/50^{\text{ms}}$  de seconde. La fréquence " $f$ " est l'inverse de la période  $T$  :  $f = 1/T$ .

## ✚ Unités

Si l'unité normalisée de la fréquence est l'hertz [Hz], on rencontre parfois des valeurs exprimées en CPM (cycle par minute) ou RPM (rotation par minute). D'où : 1 hertz = 1 CPM/60 = 1 RPM/60.

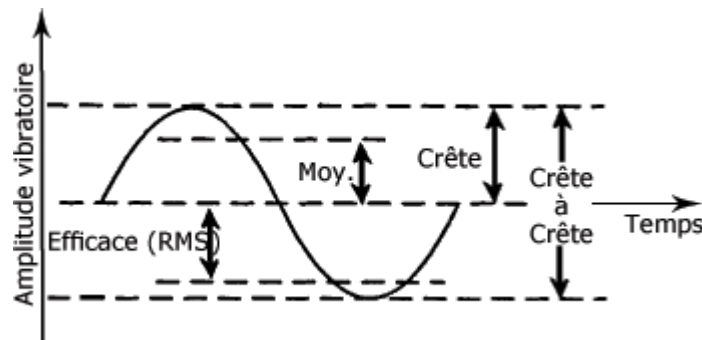
### I.4.4.2 : Amplitude

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre et on peut définir [17] :

- ❖ L'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelé amplitude crête ( $A_c$ ) ou niveau crête.
- ❖ L'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête ( $A_{cc}$ ) (peak to peak, en anglais) ou niveau crête-crête.
- ❖ L'amplitude efficace ( $A_{eff}$ ), aussi appelée RMS (Root Mean Square, en anglais) ou niveau efficace :

$$A_{eff} = \frac{A_c}{\sqrt{2}} = \frac{A_{cc}}{2\sqrt{2}} \quad (I.1)$$

La figure suivante présente les différentes amplitudes.



**Figure I.1 :** Différentes amplitudes (vibration sinusoïdale).

### I.4.4.3 : Nature d'une vibration

Une machine tournante quelconque en fonctionnement génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante :

Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple (figure I.2-a) ou sinusoïdal complexe (figure I.2-b) représentatives du fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques (rotation de lignes d'arbres, engrèvements,) ou d'un certain nombre d'anomalies (déséquilibre, désalignement, déformations, instabilité de paliers fluides, déversement de bagues sur roulements, ...) [18].

L'équation de mouvement de ce type de vibration est donnée par la formule :

$$X(t) = X_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (I.2)$$

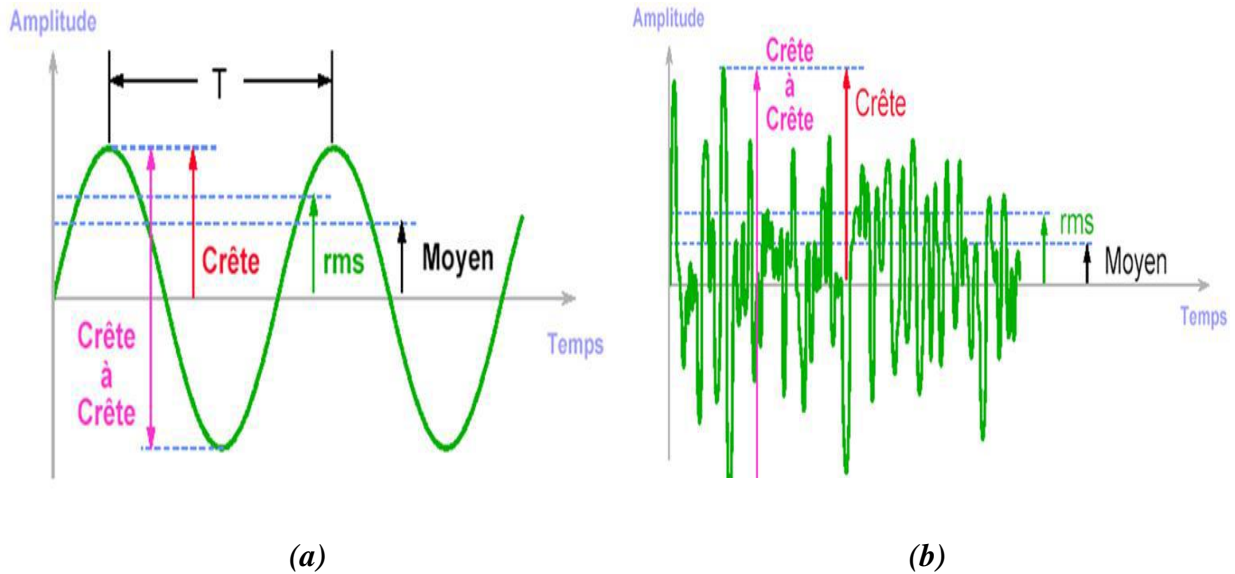
Avec:  $\omega = 2\pi f$  (rad/sec) : la pulsation ( $f$  : la fréquence du mouvement).

$\Phi$  : La phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps.

Les vibrations périodiques de type impulsif sont appelées ainsi par référence aux forces qui les génèrent et à leur caractère brutal, bref et périodique. Ces chocs peuvent être produits par des événements normaux (presses automatiques, broyeurs à marteaux, compresseurs à pistons, ...) ou par des événements anormaux comme l'écaillage de roulements ou un défaut sur des engrenages, un jeu excessif, ... Elle est décrite par l'équation [19] :

$$A(t) = \sum A_i \cdot \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (I.3)$$

Les vibrations aléatoires de type impulsif peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe.



**Figure I.2 :** Nature d'une vibration.

### I.5 : Pratique de l'analyse vibratoire

La qualité de la détection et de la localisation de défaut par l'analyse vibratoire passe par une bonne maîtrise de la chaîne de mesures. On peut distinguer trois grandes étapes pour réaliser l'acquisition [20] :

1. Les vibrations mécaniques sont transformées en signaux électriques grâce aux accéléromètres.
2. Les signaux électriques sont conditionnés pour rendre exploitables les signaux par les appareils d'analyses.
3. Les signaux sont enregistrés par différents matériels tels que les cartes d'acquisitions associées à des logiciels de traitement.

#### I.5.1 : Accéléromètre

Un accéléromètre piézoélectrique (figure I.3) est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte [21].



**Figure I.3 :** Schéma de principe d'un accéléromètre.

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

- ✓ Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.
- ✓ Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique.
- ✓ Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse.
- ✓ Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.

#### **I.5.1.1 : Avantages**

- Facile à installer ;
- Petit, léger ;
- Supporte les hautes températures.

#### **I.5.1.2 : Inconvénients**

- Nécessite une double intégration pour le déplacement ;
- Nécessite une source extérieure ;
- Fournit des informations limitées sur la dynamique d'arbre ;
- Médiocre pour les faibles vitesses.

#### **I.5.1.3 : Problèmes et défauts détectés**

- ✓ Roulements ;
- ✓ Engrenages ;
- ✓ Machine à pâles ;
- ✓ Machine électrique ;
- ✓ Généraux : balourd, désalignement, usure, etc.

#### **I.5.2 : Choix de l'emplacement de capteurs**

Dans le cas des machines tournantes, les principales mesures seront effectuées le plus souvent au droit des paliers qui sont les parties fixes les plus directement en relation avec les efforts appliqués à la partie mobile (figure I.4 et figure I.5) Ces efforts sont de deux types [22]:

### I.5.2.1 : Efforts tournants

Ce sont les efforts liés à la rotation de l'arbre, générés par exemple par un balourd ou un désalignement et dont les amplitudes seront plus grandes dans le cas d'une mesure effectuée dans un plan radial [23].

### I.5.2.2 : Efforts directionnels

Ce sont des efforts liés à une contrainte de l'arbre, générés par exemple par la tension d'une courroie (effort directionnel radial) ou un par le contact d'un engrenage conique (effort directionnel axial) [24].

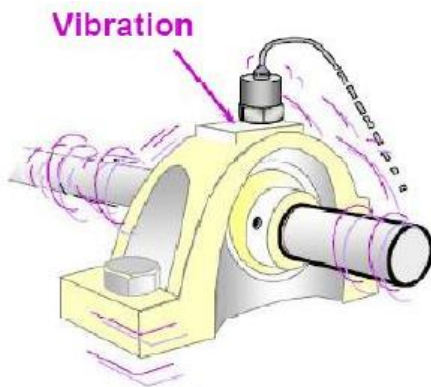


Figure I.4 : fixation du capteur sur palier.

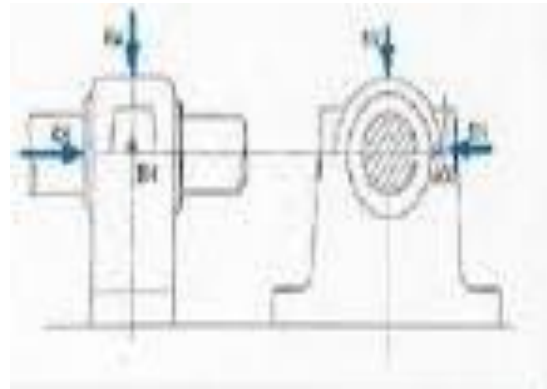


Figure I.5 : choix directement pour la prise de mesure.

### I.5.2.3 : Conditionnement du signal

Le signal électrique doit être conditionné pour être traité par les appareils d'analyse. Le conditionnement est donné par les points suivants [25]:

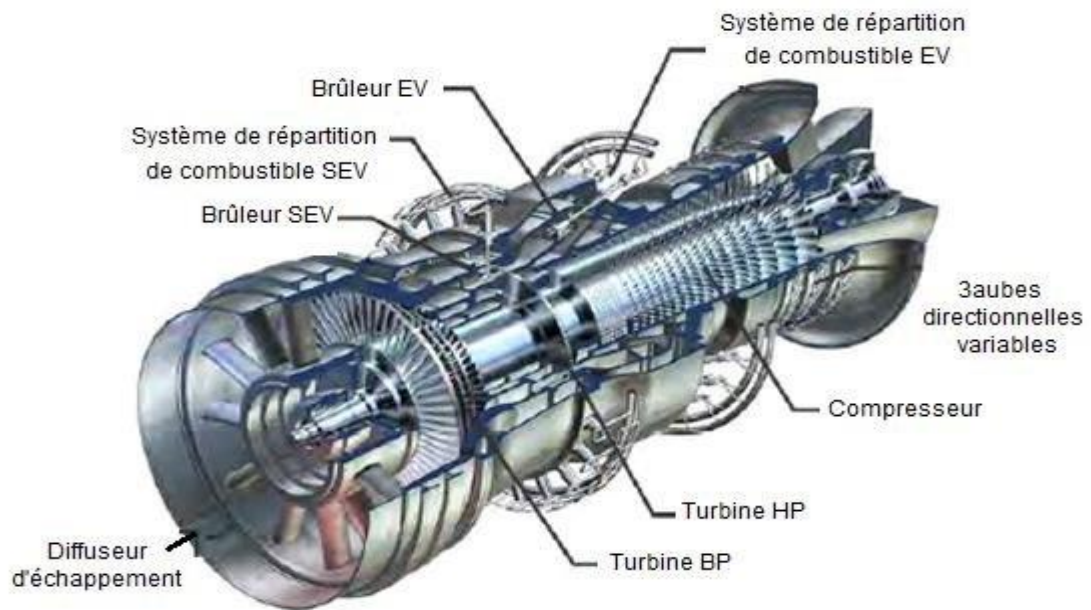
- A. Amplifier le signal issu du capteur pour le rendre exploitable ;
- B. L'intégration du signal pour passer à la vitesse ou au déplacement ;
- C. Filtrer le signal analogique par les filtres passe haut et passe bas ;
- D. Amplification du signal obtenu pour transmettre à l'appareil d'analyse ;
- E. Numériser le signal.

## I.6 : Généralités sur les turbines à gaz

La turbine à gaz est une machine motrice à mouvement rotatif et à combustion interne, munie d'un compresseur d'air et d'une chambre de combustion en mesure de produire un fluide sous pression et à température très élevée [26].

Ce fluide, en se détendant dans les étages de la turbine, libère de l'énergie mécanique pour entraîner une machine réceptrice.

La figure I.6, montre le schéma représentatif de la turbine à gaz.



**Figure I.6 :** Schéma représentatif de la turbine à gaz.

### **I.6.1 : Constitution de la turbine à gaz**

La turbine à gaz est constituée par les éléments suivants :

- a.* Compresseur ;
- b.* 3 aubes directionnelles variables ;
- c.* Turbine HP ;
- d.* Turbine BP ;
- e.* Diffuseur d'échappement ;
- f.* Bruleur EV ;
- g.* Système de répartition de combustible SEV ;
- h.* Bruleur SEV ;
- i.* Système de répartition de combustible EV.

### **I.6.2 : Principe du fonctionnement de la turbine à gaz**

Une fois le système de démarrage turbo activé et l'embrayage engagé, l'air ambiant est aspiré, filtré et comprimé dans 17 étages du compresseur axial. Pour éviter le pompage lors du démarrage du compresseur, la vanne de refoulement du 11ème étage (vanne anti-pompage) est ouverte et l'ailette orientable (IGV) à l'entrée du compresseur est en position "fermée" ( $34^\circ$ ) [27].

Lorsque le relais de vitesse (14 HM) correspond à la vitesse nominale (95%), la vanne d'aspiration du 11ème étage se ferme automatiquement et provoque l'ouverture de la position prédéterminée de l'IGV située à l'entrée du compresseur.

L'air comprimé du compresseur pénètre dans l'espace annulaire autour des 14 chambres de combustion et de là pénètre entre le carter intermédiaire et les tubes à flamme.

Les injecteurs introduisent le combustible dans chacune des 14 chambres de combustion où il se mélange à l'air. L'allumage s'effectue grâce à deux bougies rétractables (mais une seule est suffisante pour effectuer l'opération).

Au moment où l'allumage se produit au niveau d'une des deux bougies équipant ces chambres, la combustion se propage dans les autres chambres à travers des tubes d'interconnexion qui les relient entre elles au niveau de la zone de combustion. A peu près à 50 % de la vitesse nominale de la turbine, la pression régnant à l'intérieur des chambres de combustion est suffisante pour provoquer le retrait des électrodes des bougies afin de le protéger du rayonnement des flammes.

Les gaz chauds issus des chambres de combustion se propagent à travers les pièces de transition emboîtées à l'extrémité arrière de chaque tube de flamme pour traverser ensuite les trois étages turbine où ils se détendent. Chaque étage se compose d'un ensemble d'aubes fixes suivies d'une rangée d'aubes mobiles. Dans chaque rangée d'aubes fixes, l'énergie cinétique du jet de gaz augmente, en même temps que la pression chute. Dans la rangée adjacente d'aubes mobiles, une partie de l'énergie cinétique du jet est convertie en travail utile transmis au rotor de la turbine sous la forme d'un couple mécanique.

Après leur passage dans les aubes du troisième étage, les gaz d'échappement traversent le diffuseur, qui comporte une série de déflecteurs ou aubes de guidage transformant la direction axiale des gaz en direction radiale et diminuant ainsi les pertes à l'échappement. Puis les gaz sont envoyés dans le cadre d'échappement. La rotation résultante de l'arbre entraîne le rotor de l'alternateur et certains auxiliaires.

### **I.7 : Défaillances de la Turbine A Gaz**

Au cours de son fonctionnement, les turbines à gaz sont exposées à de nombreuses erreurs qui affectent l'efficacité de leur production ou les font cesser complètement de fonctionner. Et cela entraîne de nombreuses pertes, Parmi eux [28] :

Un défaut de pression du mélange air et gaz entrant dans le compresseur, qui peut être supérieure ou inférieure à la pression requise, affecte la vitesse de rotation de la turbine, provoquant des dommages au rotor :



**Figure I.7 :** Rotor de la turbine à gaz.

Des défauts dans les diamètres intérieur et extérieur entraînent une perte d'énergie par des fuites qui réduisent l'efficacité de la turbine et nuisent aux travailleurs.

Un défaut dans le support de la structure externe de la turbine provoque la chute de la turbine, provoquant des pertes humaines et des pertes financières importantes.

La température élevée du stator provoque l'arrêt de la turbine et la diminution de la production d'électricité.



**Figure I.8 :** Stator de la turbine à gaz.

Les bougies d'allumage ont cessé de fonctionner, ce qui signifie que le combustible principal de la turbine n'est pas chauffé et qu'aucune électricité n'est produite.



**Figure I.9 :** Bougies d'allumage.

## **I.8 : Conclusion**

La première partie de ce chapitre nous a permis de mieux connaître les différents types de maintenance, les niveaux de maintenance, la surveillance, les caractéristiques d'un signal vibratoire et le choix de l'emplacement des capteurs de vibration.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous a permis de mieux connaître les turbines et plus spécialement la turbine à gaz qui est le sujet de notre étude. On la décrit, explique son principe de fonctionnement et le même les défauts qui peuvent arriver pendant leur fonctionnement.

Le chapitre qui suit sera consacré à l'état de l'art de l'utilisation des outils de traitement de signal pour la détection des défauts.

# Chapitre II : Etat de l'art sur les techniques de traitement de signal appliquées à l'analyse vibratoire.

## II.1 : Introduction

Nous présentons dans ce chapitre un état de l'art sur les méthodes de traitement du signal les plus fréquemment utilisées dans l'analyse des signaux vibratoires. Une synthèse bibliographique sur l'application de chaque outil de traitement du signal dans le domaine de la détection des défauts par l'analyse vibratoire.

## II.2 : Analyse temporelle

Plusieurs techniques d'analyses des signaux vibratoires dans le domaine temporel existent et sont basées sur l'analyse statistique du signal recueilli à travers des indicateurs dits globaux. Ces indicateurs évaluent l'état de fonctionnement global des équipements mais ne localisent pas le défaut, ce sont des méthodes utiles à la surveillance.

### II.2.1 : Valeur efficace (RMS)

C'est une valeur très caractéristique du signal, vu qu'elle a une relation directe avec l'énergie contenue dans celui-ci [29] :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t x^2(t) dt} \quad (II.1)$$

Où :  $x(t)$  est la fonction représentative du signal et « t » le temps d'analyse.

L'avantage d'un tel indicateur est son extrême facilité de mise en œuvre. Cependant, il est peu sensible, on l'utilise en général quand la puissance du signal vibratoire en fonctionnement sain est faible par rapport à la puissance du défaut.

Cet indicateur est traditionnellement utilisé pour des signaux de type accélérations et sur une large bande de fréquences entre 0 et 20kHz. Cependant, il n'est pas rare de voir des valeurs RMS calculées sur des bandes de fréquences correspondant à des résonances de structure pour augmenter la sensibilité de l'indicateur.

### II.2.2 : Valeur crête

Sont les valeurs maximales du signal temporel mesuré [30] :

$$V_{crête} = \max |x(i)| \quad i = 1, \dots, N \quad (II.2)$$

Où :  $N$  est le nombre de points du signal.

### II.2.3 : Facteur de crête

C'est un indicateur de surveillance simple à calculer, car c'est le rapport entre la valeur de crête du signal et sa valeur efficace (RMS), comme il peut se calculer par le rapport entre la valeur maximale du signal et son écart type [31].

$$F_c = \frac{V_{crête}}{RMS} \quad (II.3)$$

Cet indicateur est utilisé pour la détection spécifique d'impulsions ou de choc présents dans le signal vibratoire.

En rappelant que cet indicateur vaut  $\sqrt{2}$  pour une vibration de type sinusoïdale.

#### II.2.4 : Facteur K

Le facteur K d'un signal est défini comme étant le produit entre la valeur crête et la valeur efficace [32] :

$$F_K = V_{crête} RMS \quad (II.4)$$

L'interprétation du facteur crête se fait au travers de son évolution au fur et à mesure de la dégradation des éléments de l'entraînement, la valeur du facteur  $K$  augmente avec l'usure.

#### II.2.5 : Moment d'ordre 3

Couramment appelé « Skewness », représente le taux de dissymétrie de la distribution d'amplitudes du signal par rapport à la valeur moyenne [33] :

$$M_3 = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^3 p(x) dx \quad (II.5)$$

C'est une quantité sans dimension, Elle sera positive ou négative selon l'étalement de la courbe à droite ou à gauche, respectivement, de la valeur moyenne.

#### II.2.6 : Kurtosis

Qui, mathématiquement est le moment d'ordre 4, est couramment nommé en traitement de signal par « *Kurtosis* ». Il représente le taux d'aplatissement de la distribution, il donne une évaluation de l'importance du pic du sommet de la courbe, il est défini par [34] :

$$K_u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right]^4 \quad (II.6)$$

Ce moment est utilisé pour détecter la présence de chocs dans le signal vibratoire. En effet, pour un signal de distribution gaussienne, le kurtosis est égal à 3.

<b>Kurtosis</b>	<b>Sévérité</b>
1.5	Bon : signal harmonique
2.8 à 3.2	Passable : signal aléatoire
3.2 à 4	Elevé
>4	Critique

**Tableau II.1:** Critère de sévérité du kurtosis.

#### II.2.7 : Niveau global

Le suivi par le niveau global consiste à mesurer la valeur efficace des composantes vibratoires constituant le signal [35] :

$$NG = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2} \quad (\text{II.7})$$

Avec  $a_1, a_2, \dots, a_n$  sont des composantes vibratoire constituant le signal et n le nombre de composantes.

### II.2.8 : Talaf et Thikat

Talaf et Thikat propose des nouveaux indicateurs temporels, qui permettent de distinguer les quatre étapes de dégradation [36] :

**1<sup>ère</sup> étape** : Période de maturité (aucun défaut significatif) ;

**2<sup>ème</sup> étape** : Initiation du défaut (le défaut prend naissance et une légère augmentation de la vibration peut être remarquée) ;

**3<sup>ème</sup> étape** : Propagation de la dégradation (les vibrations sont importantes et les défauts sont visibles dans le signal vibratoire) ;

**4<sup>ème</sup> étape** : Fin de vie (la vibration apparait du type large bande).

Talaf et Thikat sont donnés par les équations suivantes :

$$Talaf = \log \left| K_u + \frac{RMS}{RMS_0} \right| \quad (\text{II.8})$$

$$Thikat = \log \left[ (K_u)^{FC} + \left( \frac{RMS}{RMS_0} \right)^{V_{crête}} \right] \quad (\text{II.9})$$

Ou  $RMS_0$  est la valeur efficace de signal vibratoire d'un équipement sans défaut.

## II.3 : Analyse fréquentielle

### II.3.1 : Analyse spectrale

Elle s'appuie sur la transformé de Fourier du signal vibratoire, cet outil de connaitre le contenu spectral du signal et de localiser les fréquences caractéristiques des défauts des composants mécanique (roulement, engrenage, turbine....etc). Chaque élément est caractérisé par une ou plusieurs fréquences caractéristiques de défaut. Ces fréquences fondamentales dépendent de la géométrie du composant et de sa vitesse de rotation. La transformée de Fourier est définie par l'équation suivante [37] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{II.10})$$

Ou  $X(f)$  est la transformée de Fourier, t est le variable de temps, f est la variable de fréquence.

### II.3.2 : Analyse d'enveloppe

Un défaut localisé dans un entrainement électrique se traduit par la présence d'une impulsion périodique dans le signal temporel pouvant servir pour le diagnostic. L'analyse d'enveloppe est une technique de détection précoce des défauts du type choc. Elle est basée sur la transformée d'Hilbert qui est un outil très utilisé pour le diagnostic des entrainements électriques. La transformée d'Hilbert d'un signal  $x(t)$  est définie par la formule suivante [38] :

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = x(t) \quad (\text{II.11})$$

Où :  $x(t)$  est la partie imaginaire du signal analytique  $z(t)$  qui est défini comme suit :

$$z(t) = x(t) + jx(t) = x(t) + j[x(t)] = A(t)e^{j\varphi(t)} \quad (\text{II.12})$$

L'enveloppe du signal  $A(t)$  est représentée par le module du signal analytique  $A(t) = |x(t)|$ . La phase et la fréquence instantanée du signal sont données par les équations suivantes :

$$\varphi(t) = \arctg \left[ \frac{\hat{x}(t)}{x(t)} \right] \quad (\text{II.13})$$

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (\text{II.14})$$

En pratique, la méthode d'enveloppe demande une série de traitement du signal temporel brut avant d'obtenir le résultat. Ces étapes sont résumées comme suit :

**Etape 1 :** Filtrage du signal brut afin d'éliminer les composantes indésirables ;

**Etape 2 :** Nous appliquons la transformée d'Hilbert pour calculer l'enveloppe ;

**Etape 3 :** Le spectre d'enveloppe est calculé et à partir duquel on peut extraire les informations sur le défaut.

### II.3.3 : Kurtosis spectral

Le Kurtosis spectral est de plus en plus utilisé pour la détection de défaut des machines électriques, en raison de la simplicité de l'algorithme, et de sa capacité à détecter des événements non stationnaires. Cette technique consiste à calculer le Kurtosis du signal analysé à chaque fréquence afin de discerner les structures non stationnaires et d'indiquer dans quelle bande de fréquences celles-ci se réalisent. Cette manière de faire s'avère relativement robuste par rapport au bruit additif stationnaire, contrairement au Kurtosis global. Le Kurtosis spectral (KS) d'un processus non stationnaire  $x(i)$  se formule [39]:

$$K_x = \frac{|H(i,f)|^4}{\langle |H(i,f)|^2 \rangle^2} - 2 \quad (\text{II.15})$$

Cette définition jouit de nombreuses propriétés dont les plus importantes sont:

- a) Le Kurtosis spectral des processus stationnaires réguliers est une fonction constante de la fréquence ;
- b) Le Kurtosis spectral des processus stationnaires gaussiens est une fonction identiquement nulle ;
- c) En présence du bruit stationnaire additif  $\eta(i)$ , le KS d'un processus non stationnaire  $X(i)$  s'exprime par :

$$K_{(x+\eta)}(f) = K_x(f) / |1 + \rho(f)| \quad (\text{II.16})$$

Où  $\rho(f)$  est le rapport bruit à signal en fonction de la fréquence.

### II.3.4 : Analyse cepstrale

Le Cepstre (anagramme du mot spectre) est un opérateur mathématique qui permet d'identifier et de quantifier immédiatement toutes les structures périodiques ou de type écho [40].

La première application du cepstre a été faite par Bogert en 1963 pour la détection des échos. Le cepstre se définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme du spectre, il est donné par l'équation suivante :

$$C(\tau) = C[x(t)] = TF^{-1}[\log\{TF(x(t))\}] \quad (\text{II.17})$$

La variable  $\tau$  est appelée quéfrences (anagramme du mot fréquence), qui représente la dimension d'un temps, une petite quéfrence représente des espacements grands entre les fluctuations dans le spectre et une haute quéfrence des espacements petits. Alors que le spectre permet de visualiser les différentes périodicités contenues dans un signal, le cepstre permet lui de retrouver d'éventuelles périodicités dans un spectre. Cette technique a été très utilisée dans la détection des défauts du types chocs périodiques notamment ceux des engrenages, car elle permet de mettre en évidence les pas séparant les harmoniques d'un peigne de raies aussi bien pour les hautes vitesses de rotation que pour les plus basses.

## II.4 : Analyse Temps-Fréquence et Temps-Echelle

### II.4.1 : Méthode basé sur Transformée de Fourier de courte durée (STFT)

La transformée de Fourier est exprimée par l'équation suivante [41]:

$$FT_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{II.18})$$

Nous définissons la densité spectrale de puissance ou PSD comme le module carré de la transformée de Fourier, qui est donc indépendante de la phase du signal. Par conséquent, toute information sur les changements de fréquence avec variation de temps est perdue dans le PSD. La distribution temps-fréquence, connue sous le nom de Transformée de Fourier à Temps Court ou STFT est définie par :

$$STFT_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (\text{II.19})$$

$$STFT_x(t, f) = \int x(\theta + f)H(\theta)e^{-j2\pi\theta t} d\theta_R \quad (\text{II.20})$$

Seconde expression du  $STFT_x$  est obtenue à partir des propriétés classiques du FT: conservation du produit scalaire, propriétés de décalage et transformation d'un produit normal en un produit de convolution. STFT est constitué par le FT de  $x(\tau)h(\tau-t)$  obtenu en pondérant  $x(\tau)$  par la fenêtre  $h(\tau-t)$  qui est une fenêtre d'analyse courte localisée autour de  $t$  et qui se décale en faisant varier paramètre  $t$ . Rejoindre  $h(\tau)$ , la famille de fonctions dépendant de deux paramètres  $t$  et  $f$ , définis par:

$$h_{t,f}(\tau) = h(\tau - t)e^{j2\pi ft}, \quad (t, f) \in \mathcal{R}^2 \quad (\text{II.21})$$

Les nombres  $STFT_x(t, f)$ , sont communément appelés projections de  $x(\tau)$  sur le système de la fonction  $h_{t,f}$ . Si  $h$  est la fenêtre rectangle du support  $T$ , la STFT consiste à prendre le FT d'une suite de signaux égale à  $x$  sur le support et nulle ailleurs. Nous commençons par le signal discret [ $x_n = x(nT)$ ],  $T > 0$ . Soit  $h_n = h(nT)$  et  $N$  le nombre d'échantillons dans la fenêtre d'analyse. Enfin, nous introduisons une discrétisation de variable de fréquence  $f$ . Le STFT est alors défini par les nombres entiers  $X_{k,n}$  calculés comme suit:

$$X_{k,n} = \sum_{\ell}^{N-1} x_{\ell+k} h_{\ell} e^{-j2\pi\ell\tau\frac{n}{N}}, \quad k \in n = 1, 2, 3 \dots \dots \quad (II.22)$$

Comme pour le FT, la technique du (zéro-padding) permet d'améliorer la résolution en fréquence. Le principe de cette méthode est de compléter par  $M$  zéros un ensemble de  $N$  échantillons de sorte que  $M + N$  soit une puissance de 2 et puisse ensuite effectuer des calculs en utilisant l'algorithme Faste FT en utilisant les points  $N + M$ . Lorsque  $M = N$ , la méthode utilise les algorithmes Discrète FT qui sont en cours de calcul pour calculer des points  $2N$  à partir du spectre, à partir de seulement  $N$  points du signal.

▪ **Principe d'incertitude de Heisenberg-Gabor**

Le principe d'incertitude, également appelé inégalité temps-fréquence, est basé sur les relations d'incertitude établies par Werner Heisenberg en mécanique quantique. L'analogie avec le travail de Heisenberg pour la transformée de Fourier a été faite par Dennis Gabor en 1946. Considérons le signal d'énergie finie  $x(t)$ , centré dans le temps et la fréquence autour de zéro. Gabor définit la durée  $\Delta t$  et la bande spectrale  $\Delta f$  comme suit:

$$\Delta t = \frac{1}{E_x} \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \quad (II.23)$$

$$\Delta f = \frac{1}{E_x} \int_{-\infty}^{\infty} f^2 |x(f)|^2 df \quad (II.24)$$

$E_x$  : est l'énergie du signal donné par la relation Parseval:

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |x(f)|^2 df \quad (II.25)$$

Therefore, the time-frequency inequality is defined by:

$$\Delta t. \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \quad (II.26)$$

Il exprime le fait que le produit de la bande de durée d'un signal est borné pour une durée  $\Delta t$  et une bande spectrale  $\Delta f$ . En d'autres termes, plus la précision de la localisation des fréquences est grande, plus la précision de la localisation temporelle est faible et vice versa. Le spectrogramme est soumis au principe d'incertitude dû à l'utilisation de la transformée de Fourier. Ce problème nécessite la recherche du bon compromis temps-fréquence adapté au cas considéré pour déterminer la largeur de fenêtre correcte. La fenêtre gaussienne a la meilleure localisation temps-fréquence. En effet, il vérifie l'égalité suivante:

$$\Delta t. \Delta f = \frac{1}{4\pi} \quad (II.27)$$

Enfin, le choix de la fenêtre est important car il représente un autre compromis (comparable au compromis temps-fréquence) entre la largeur du lobe principal et l'amplitude de la bande latérale dans le domaine fréquentiel.

## II.4.2 : Transformée en Ondelettes

La transformée en ondelettes discrète est issue de la version continue, à la différence de cette dernière, la TOD utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. On appelle transformée en ondelettes discrète toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur d'échelle  $a = 2^i$ . Il est clair que la transformée en ondelettes discrète est pratique en implémentation sur tout système numérique [42].

L'analyse en multi-résolution permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue de la plus fine à la plus grossière. Soit  $\varphi$  la fonction échelle. Elle doit être dans  $L^2$  et ayant une moyenne non nulle.

On forme une base de fonctions d'échelle pour tout  $i \in \mathbb{Z}$  comme suit :

$$\varphi_{i,j}(t) = 2^{-i/2} \varphi(2^{-i}t - j) \quad (\text{II.28})$$

Et de la même manière la base d'ondelette :

$$\Psi_{i,j} = 2^{-i/2} \Psi(2^{-i}t - j) \quad (\text{II.29})$$

Le facteur d'échelle dyadique mène à :

$$\varphi(t) = \sum_j 2h(j)\varphi(2t - j) \quad (\text{II.30})$$

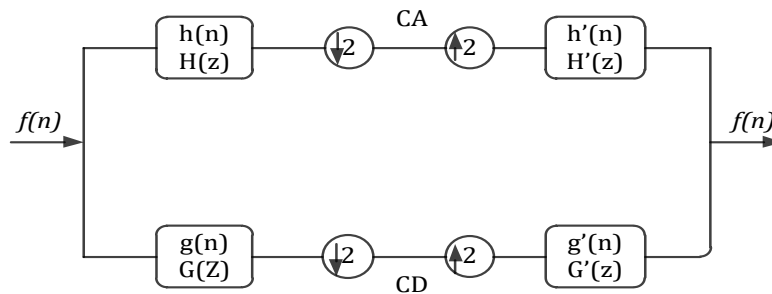
$$\Psi(t) = \sum_j 2g(j)\varphi(2t - j) \quad (\text{II.31})$$

Les équations (II.30) et (II.31), représentent la décomposition de la fonction échelle et de l'ondelette en combinaisons linéaires de la fonction échelle à la résolution haute directement.

On note que  $h(j)$  et  $g(j)$  sont les filtres passe bas et passe haut respectivement lors d'une décomposition par ondelettes.

- **Algorithme de MALLAT**

Cet algorithme est schématisé par la structure suivante :



**Figure II.1:** Algorithme de MALLAT unidimensionnel.

$H(z)$ ,  $G(z)$ ,  $H'(z)$  et  $G'(z)$  représentent respectivement la transformée en  $z$  de  $h(n)$ ,  $g(n)$ ,  $h'(n)$  et  $g'(n)$ .

Le signal  $f(n)$  est décomposé par les deux filtres d'analyse  $h(n)$  (filtre basses fréquences) et  $g(n)$  (filtre hautes fréquences) pour donner deux vecteurs respectivement CA (Coefficients ondelette d'approximation) et CD (Coefficients ondelette de détails). Tous deux sont de taille

approximativement égale à la moitié du vecteur d'origine. Ceci est dû au fait de l'opération de décimation par 2.

La reconstruction parfaite est théoriquement possible. Les deux vecteurs CA et CD, en les faisant passer par un sur-échantillonnage (up sampling) puis un filtrage en utilisant respectivement les filtres  $h'(n)$  (filtre passe bas de reconstruction) et  $g'(n)$  (filtres passe haut de reconstruction) donnent en somme le vecteur d'origine  $f(n)$ .

Cette «décomposition/reconstruction», est appelée décomposition/reconstruction en banc de filtres. Elle est caractéristique aux signaux unidimensionnels. Le quadruple  $(h(n), g(n), h'(n)$  et  $g'(n))$  forme un banc de filtres miroirs en quadrature.

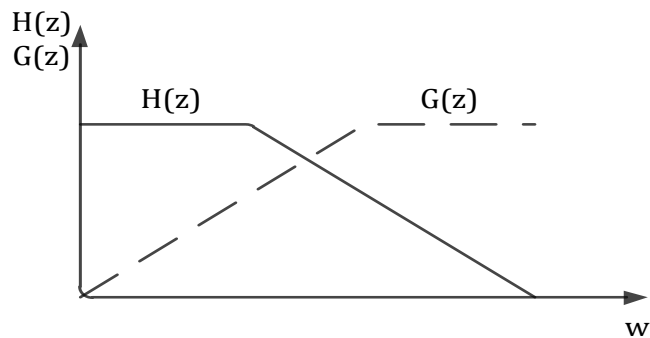


Figure II.2: Filtrés miroirs en quadrature.

- **Décomposition en multi-niveau du signal**

L'algorithme de Mallat permet de décomposer le signal  $f(n)$  en plusieurs niveaux comme illustré à la Figure II.3.

$$\begin{cases} F_{TOD}(0, k) = D_{k,0} = D_0 \\ F_{TOD}(1, k) = D_{k,1} = D_1 \\ F_{TOD}(2, k) = D_{k,2} = D_2 \end{cases} \quad (II.32)$$

Figure (II.3), présenté la décomposition en multi-niveau du signal.

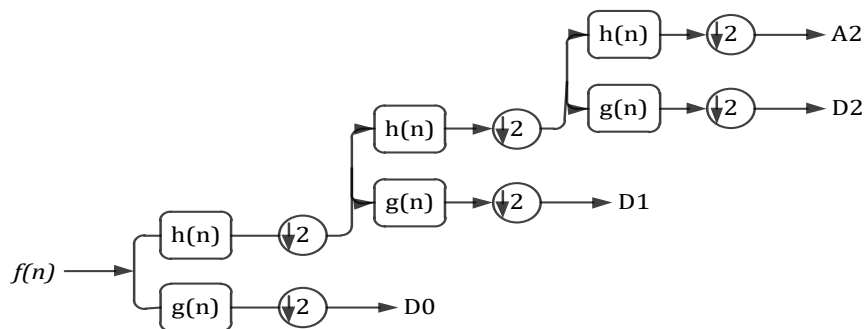


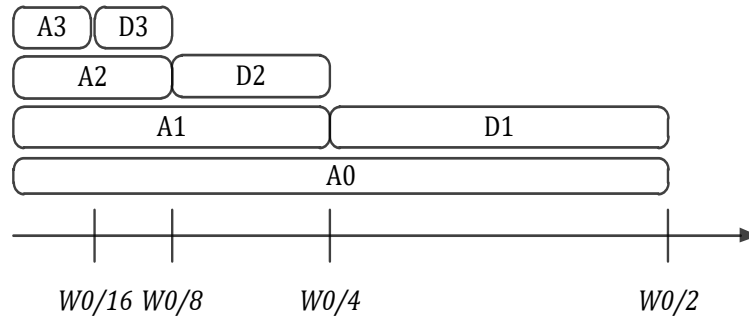
Figure II.3 : Décomposition en multi-niveau du signal  $f(n)$ .

Le processus de décomposition peut être réitéré, avec des approximations successives étant décomposées alternativement, de sorte qu'un signal soit décomposé en beaucoup de composants de hautes résolutions. Ceci s'appelle l'arbre de décomposition en ondelettes. Puisque le processus d'analyse est itératif, dans la théorie il peut être continué indéfiniment. En réalité, la décomposition peut procéder seulement jusqu'à ce que les différents détails se

composent d'un échantillon ou d'un Pixel simple. Dans la pratique, on choisira un nombre approprié de niveaux basés sur la nature du signal à décomposer, ou sur un critère approprié tel que l'entropie.

Le signal  $f(n)$  est un signal de temps discret pour être décomposé en ses versions approximatives et détaillées en utilisant l'analyse multi-résolutionnel.

Les premiers coefficients de décomposition sont  $A_1$  et  $D_1$ , où  $A_1$  est la version approximative du signal original  $f(n)$  et  $D_1$  est la représentation détaillée du signal original  $f(n)$  qui est défini dans la Figure (II.4).



**Figure II.4:** Dépendance de l'échelle à la fréquence des ondelettes.

Lorsque  $h(n)$  et  $g(n)$  sont les filtres de décomposition de  $f(n)$  dans  $D_1$  et  $A_1$  respectivement. Le prochain (en second lieu) niveau de décomposition est basé sur  $A_1$  et les coefficients sont exprimés comme suit:

$$A_2 = \sum_k h(k - 2n)A_1(k) \quad (\text{II.33})$$

$$D_2 = \sum_k g(k - 2n)A_1(k) \quad (\text{II.34})$$

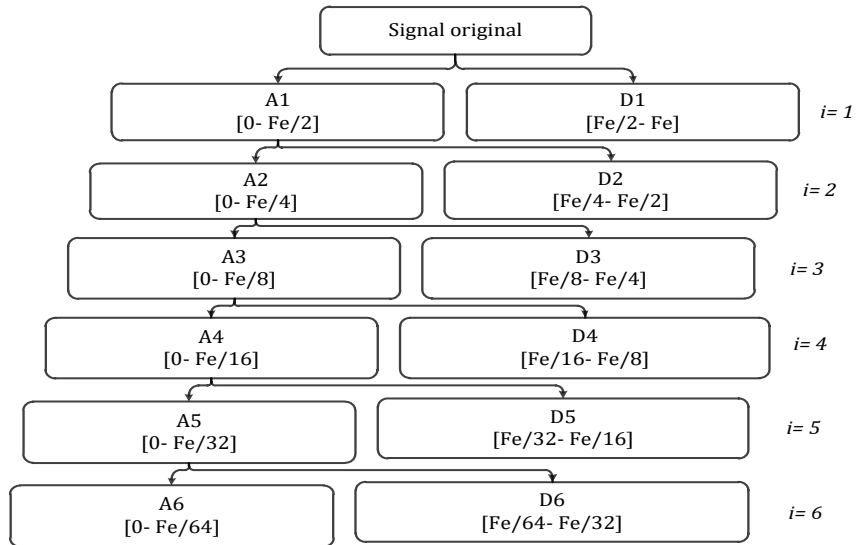
Des décompositions de niveau supérieur peuvent être obtenues d'un mode semblable. Les coefficients  $A_j$  et  $D_j$  sont calculés en utilisant l'algorithme de décomposition d'arbre laissant stockée l'information de base du signal fréquence aussi bien que les discontinuités.

Pour décomposer un signal dans la bande de fréquence entière, une décomposition en ondelettes peut être utilisée. Après la décomposition par périodes, nous obtiendrons  $2^i$  bandes de fréquence chacune avec la même largeur de bande :

$$\left[ (i-1)f_n/2, if_n/2 \right], i=1, 2, \dots, 2^i \quad (\text{II.35})$$

Telle que  $f_n$  est la fréquence de Nyquist dans la bande  $i$  de fréquence. D'après la relation (II.35), on peut présenter les différents niveaux de décomposition avec leurs bandes de fréquences Figure (II.5).

D'après l'arbre de décomposition (Fig. II.5), on peut estimer le signal original à n'importe quel niveau par la somme des signaux approximation et de détail. Pour une décomposition en quatre niveaux, le signal original est reconstruit en chaque niveau comme suit :



**Figure II. 5 :** Arbre de décomposition d'un signal en quatre niveaux.

$$i = 1, f(n) = A_1(n) + D_1(n) \quad (\text{II.36})$$

$$i = 2, f(n) = A_2(n) + D_2(n) + D_1(n) \quad (\text{II.37})$$

$$i = k, f(n) = A_k(n) + D_k(n) + D_{k-1}(n) \quad (\text{II.38})$$

### II.4.3 : Transformée de Hilbert Huang

La transformée d'Hilbert Huang est une méthode d'analyse Temps-Fréquence introduite pour la première fois en 1998 par Huang. Le principe de cette technique consiste à décomposer de façon adaptative un signal en une somme de composantes oscillantes qui possède une seule fréquence à chaque échantillon, cette opération est appelée la décomposition en mode empirique (EMD) (acronyme Empirical Mode Decomposition). Elle calcule ensuite la fréquence et l'amplitude instantanée de ses composantes en utilisant la transformée d'Hilbert [43].

La méthode d'EMD et leur version (EEMD, CEEMD, CEEMDAN) seront expliqués en détail dans le chapitre IV.

### II.5 : Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude de l'état de l'art sur les techniques de traitement de signal appliquées dans le diagnostic de défaut des entraînements électriques. Dans la littérature, on trouve plusieurs applications et méthodes sur le thème de l'analyse des signaux vibratoires dans le but de résoudre les problèmes de diagnostic des défauts des entraînements électriques. Nous avons présenté le principe de quelques méthodes, leur efficacité et leurs limites dans le diagnostic et la détection des défauts. Ces outils peuvent être regroupés en quatre types d'analyse : L'analyse temporelle, l'analyse fréquentielle, l'analyse Temps-Fréquence et l'analyse Temps-Echelle.

# Chapitre III: Présentation d'un Banc de Mesure

## III.1 : Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté le banc de mesure. On va discuter aussi sur chaque partie du mesure (les capteurs de vibration; paramètre de la turbine; système d'acquisition).

## III.2 : Constituions de la chaine de mesure

La chaine de mesure, comporte trois parties:

*1<sup>ère</sup> partie: L'acquisition.*

Consiste deux équipement du mesure :

### 1 : Vibromètre (Bently Nevada 3500)

#### 1.1 : Système de surveillance 3500

Le 3500 est un système de surveillance complet qui favorise :

- ✚ L'augmentation de la sécurité de la turbine;
- ✚ La réduction des coûts d'exploitation de la turbine;
- ✚ L'amélioration de la qualité des produits électricité;
- ✚ L'optimisation de la disponibilité de la turbine.

La figure III.1, montre la carte Bently Nevada 3500.



**Figure III.1:** Bently Nevada 3500.

Le système 3500 fournit un niveau de gestion et surveillance des machines. Par les différents transducteurs et capteurs, qui convertissent les paramètres mesurables d'états des machines et du procédé en signaux électriques.

Ces signaux sont accessibles et s'affichent à l'aide des modules du système de surveillance 3500. Le système peut faire bien plus que simplement acquérir et afficher les données.

Il peut aussi assurer un rôle de protection en comparant les états des machines et du procédé avec des niveaux d'alarmes prédéterminés.

Un signalement des conditions susceptibles de dépasser les niveaux d'alarmes peut faire passer une machine en mode appelle déclencher, ou arrêter la machine, en fournissant des signaux ou des variations de signal aux appareils de contrôle des machines.

## 1.2 : Protection des machines

Les voies relais du 3500 ne sont pas câblées en dur jusqu'au rack mais elles fonctionnent selon des énoncés logiques. Ces énoncés sont des combinaisons logiques de signaux de déclenchement d'alarmes produits par des dépassements de seuils.

La configuration du signal de déclenchement d'alarme Le système de surveillance 3500 peut déclencher un changement d'état des relais suite à n'importe quelle combinaison d'états d'alarmes des machines. D'autres combinaisons de données du procédé, comme vibratoires.

## 2. Carte d'OROS 36

L'OROS 36 est un analyseur en temps réel qui intègre toutes les fonctionnalités nécessaires pour le bruit standard et essais de vibration dans l'enseignement, la R&D et la production environnements.

La figure III.2, montre la Carte d'OROS 36.

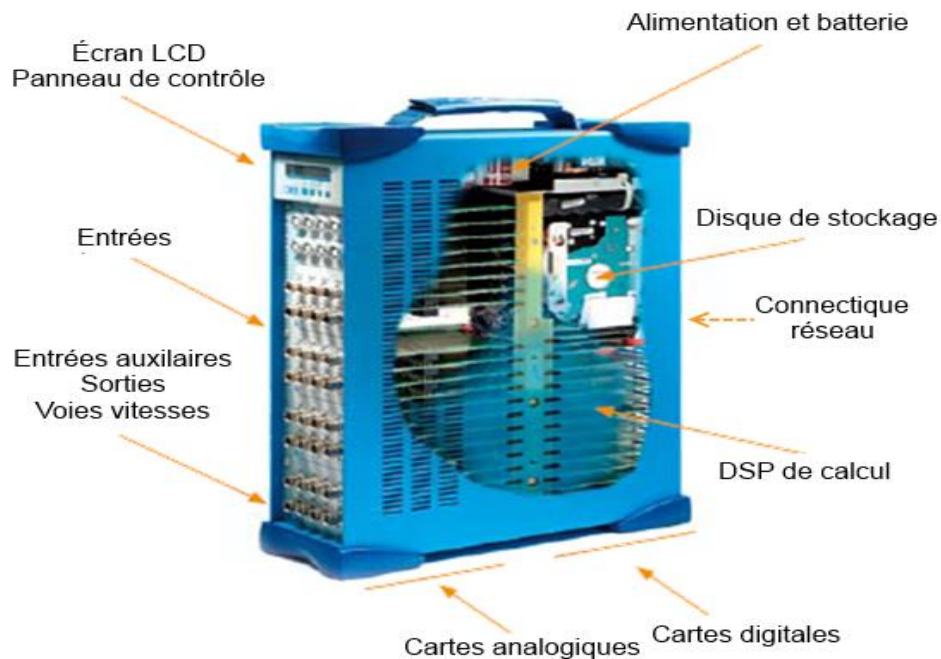


Figure III.2: Carte d'OROS 36.

### 2.1 : Caractéristique de l'appareil

1. Permet de stocker du signal localement et assurer ainsi des enregistrements en temps réels ;
2. Stockage Volume = 60 Go ;
3. Téléchargement des données Par liaison Ethernet ;
4. Branché en USB sur le PC.

## 2.2 : Logiciel d'analyse de diagnostic vibratoire «ORBIGATE»

ORBIGATE est un élément du système l'OROS. Ce système est un logiciel tournant sur Plateforme WINDOWS conçu pour traiter les données de vibration recueillies sur les machines tournantes ou les structures. Il permet la comparaison des spectres ainsi qu'une meilleure visualisation des signaux dynamiques. Plusieurs analyseurs mono et multivoies sont supportés par OROS. Parmi les caractéristiques intéressantes du logiciel figurent l'archivage des fonctions multivoies (réponse en fréquence, cohérence, spectre croisé), le post-traitement des données (balourd, profils de rouleaux et d'engrenages) et la possibilité d'écouter les signaux sur le haut par leur du PC.

La figure III.3, montre communication logiciel sur Pc avec L'analyseur OROS.



Figure III.3: Communication PC / Analyseur.

### 2<sup>ème</sup> partie: Capteurs de vibration

Il est l'interface entre le monde physique et le monde électrique. Il va délivrer un signal électrique image du phénomène.

#### 1 : Capteur Proximité

Est un capteur de déplacement (figure III.4) sans contact qui produit un signal électrique directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor.

La figure III.4 montre Schéma global de capteur de Proximité.

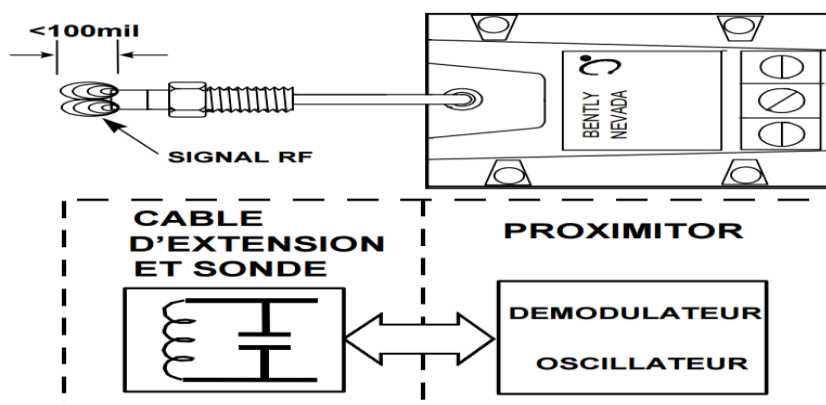


Figure III.4: Schéma global de capteur de Proximité.

## 1.1 : Fonctionnement du système

Le Proximité est un dispositif électronique avec deux fonctions de base :

- ❖ Génération d'un signal de radiofréquence (RF) à l'aide d'un circuit oscillateur ;
- ❖ Conditionnement du signal RF pour extraire des données utilisables à l'aide d'un circuit démodulateur.

Pour réaliser ces fonctions le Proximité doit avoir une tension d'alimentation entre  $-17,5$  et  $-26$  VCC reliée à ses bornes VT et COM.

Lorsque l'oscillateur du Proximité est alimenté, il génère un signal RF à une fréquence spécifique. Cette fréquence dépend de la valeur d'inductance (L) de la bobine des capteurs.

Capacitance (C) des câbles d'extension et de la sonde.

Le signal RF est transmis à partir de la bobine du capteur qui crée un champ RF autour de l'extrémité du capteur. Le champ RF se propage à une distance supérieure à  $2,54$  mm ( $0,1$  po) ( $100$  mils), alors qu'il faut seulement  $0,2$  mm ( $0,08$  po) ( $80$  mils) pour la linéarité.

Lorsqu'il existe de la matière conductrice dans le champ RF, des courants de Foucault pénètrent à la surface de cette matière. La profondeur de pénétration des courants de Foucault dépend de la conductivité et de la perméabilité de la matière. La pénétration de l'acier 4140 se situe à environ  $0,00762$  mm ( $0,003$  po) ( $3$  mils).

## 2. Accéléromètre

Un accéléromètre piézoélectrique MONO AXE (AC 210\_1D) est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte qui crée une tension et qui transfère signal de vibration.

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles jus ca  $10000$  Hz ;
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement  $140$  dB) ;
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse dans Bon du mesure unité de sonelgaz utilise accéléromètre type AC 210\_ 1D.

Accéléromètre 1D : Un accéléromètre 1D mesure l'accélération dans une seule direction. Il fournit des informations sur l'accélération linéaire dans cette direction spécifique. Par exemple, il peut mesurer l'accélération dans l'axe X uniquement. Il est limité à une seule dimension et ne fournit pas d'informations sur les mouvements dans d'autres directions.

### 2.1 : Caractéristique

Sensibilité :  $-100$  mV/g  $\pm 5\%$  ;  $-10$  mV/°C de  $0$  à  $100^\circ\text{C}$  (version sortie température uniquement) ; Réponse fréquentielle :  $0.32$  Hz -  $10$  kHz ( $\pm 3$  dB) ; Gamme dynamique :  $\pm 50$  g, crête ; Temps de réglage :  $2$  secondes ; Plage de température :  $-54$  à  $85^\circ\text{C}$  ; Matériau : Acier inoxydable 316L.

La figure III.5, montre le capteur Absolue.



**Figure III.5:** Accéléromètre AC210\_1D.

Sortie : En haut du capteur (CMCP 1100) ; Sur le côté du capteur (CMCP 1100-S/1100-SR) ; Câblage : Câble à gaine TPE (blindage en acier inoxydable en option) ; Fixation : 1/4-28 UNF inclus ; Poids : 70.7g ; Technologie : Piézoélectrique en cisaillement ; Protection : IP68.

**3<sup>ème</sup> partie: Turbine à gaz TG9001E**

Les caractéristiques de la TG9001E, montrée dans le tableau suivant :

<b>Marque</b>	GENERALE ELECTRIQUE
<b>Fabricant</b>	NUOVO PIGNONE
<b>Série du model</b>	MS 9001E
<b>Cycle</b>	Simple
<b>Rotation de l'arbre</b>	Sens inverse des aiguilles d'une montre
<b>Type de fonctionnement</b>	Continu
<b>Vitesse de l'arbre</b>	3000 tr/min
<b>Commande</b>	MARK V
<b>Température à l'échappement</b>	560°C
<b>Débit carburant</b>	5.77 kg/s
<b>Système de démarrage</b>	Moteur électrique
<b>Rendement thermique</b>	≈ 33%
<b>Atténuation du bruit</b>	silencieux d'admission et d'échappement selon lesexigences locales

**Tableau III.1 :** Plaque signalétique TG9001E.

La plaque signalétique d'un compresseur de TG9001E, montrée dans le tableau suivant :

<b>Nombre des étages de la turbine</b>	03
<b>Plan de joint</b>	Bride horizontale
<b>Directrice du premier étage</b>	Fixe
<b>Directrice du deuxième étage</b>	Fixe
<b>Directrice du troisième étage</b>	Fixe

**Tableau III.2 :** Plaque signalétique d'un compresseur de TG9001E.

Les conditions de combustion, montrée dans le tableau suivant :

<b>Type</b>	14 multiples foyers, types à flux inverses
<b>Configuration des chambres</b>	Concentrique autour du compresseur
<b>Combustible</b>	Gaz naturel
<b>Bougies d'allumage</b>	2 types à électrodes à ressort, auto rétractant
<b>Détecteur de flamme</b>	4 types ultraviolets

**Tableau III.3** : Conditions de combustion.

Les conditions de lubrification, montrée dans le tableau suivant :

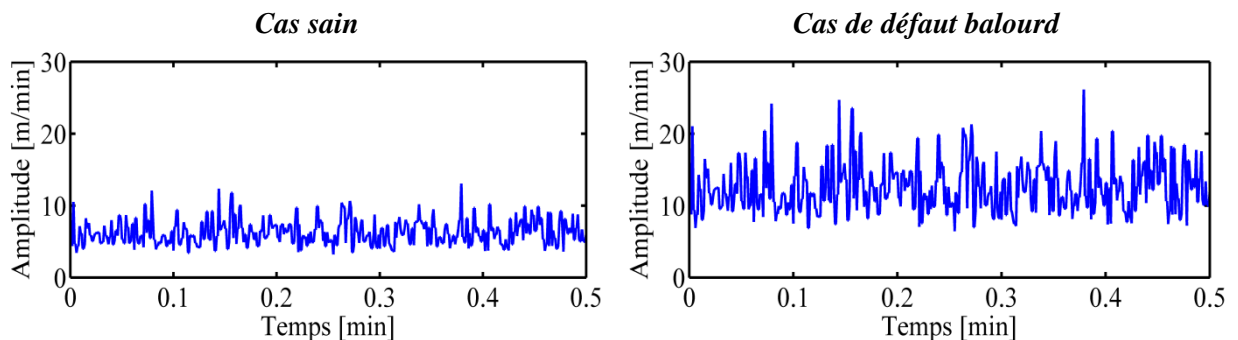
<b>Quantité</b>	04
<b>Lubrification</b>	sous pression

**Tableau III.4** : Ensemble paliers.

### III.3 : Paramètres d'acquisition

Vu le caractère aléatoire des signaux mesurés et afin d'avoir une analyse fiable, nous avons réalisé 10 acquisitions pour chaque cas de figure. Le temps d'acquisition utilisé est  $T_{acq}=0.5$  min et la fréquence  $F_e = 1000$  Hz et la vitesse de rotation de la turbine TG9001E  $n= 3000$  tr/min. Enfin et pour voir l'effet de la charge sur les signaux de la turbine à gaz TG9001E, un seul mode de fonctionnement a été pris en compte: le fonctionnement à charge nominale.

La figure III.6, montre le signal vibratoire dans le cas sain et le cas d'un défaut de balourd.



**Figure III.6** : Signal vibratoire.

### III.4 : Conclusion

L'objectif principale de ce chapitre, présenter chaque partie de banc de mesure concernant les cartes d'acquisition (Bently Nevada et l'OROS36), les capteurs de vibration (Proximité et Accéléromètre AC210\_1D) et aussi présenter les caractéristiques de la turbine TAG9001E. A la fin présenter le signal vibratoire dans les deux cas sain et le cas de défaut balourd.

# Chapitre IV: Application de la Transformée Hilbert Huang Mode de décomposition CEEMDAN

## IV.1 : Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons une présentation générique sur l'algorithme de décomposition en mode empirique (EMD) et leur version : ensemble EMD, EMD ensemble complémentaire (CEEMD) et complète ensemble EMD avec bruit adaptatif (CEEMDAN) avec des explications sur leur performance, limitation et inconvénients. Avec l'application de l'algorithme CEEMDAN sur les signaux vibratoire pour le diagnostic de la turbine à gaz TAG 9001E.

## IV.2 : Algorithme EMD

La décomposition en modes empiriques (EMD pour Empirical Mode Decomposition) a été développée par Huang, pour pouvoir décomposer d'une façon adaptative un signal en une somme de composantes oscillantes appelées les fonctions de modes intrinsèques (IMF's pour Intrinsic Mode Function) [44].

### IV.2.1 : Fonction de mode intrinsèque (IMF)

Une IMF est une fonction qui doit satisfaire deux conditions:

- Le nombre de passages par zéros et le nombre d'extrema différent d'au plus un ;
- La moyenne de l'enveloppe définie par les maxima et minima locaux est nulle.

### IV.2.2 : Processus de tamisage (Sifting Process)

L'algorithme EMD décompose un signal en une série des IMF's via une procédure de tamisage appelée 'Sifting process'. Pour un signal  $x(t)$ , cet algorithme est donné par les étapes suivantes:

**Étape 1 :** Identifier tous les extrema (maxima et minima locaux) du signal  $x(t)$ .

**Étape 2 :** En utilisant les interpolations splines cubiques pour interpoler les minima et les maxima de manière à construire l'enveloppe inférieure  $e_{min}$  et l'enveloppe supérieure  $e_{max}$  respectivement.

**Étape 3 :** Calculer la moyenne de deux enveloppes :

$$m_1(t) = \frac{e_{\max}(t) + e_{\min}(t)}{2} \quad (\text{IV.1})$$

**Étape 4 :** L'enveloppe moyenne est soustraite du signal d'entrée :

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (\text{IV.2})$$

**Étape 5 :** Si  $h_1(t)$  satisfait les deux conditions d'IMFs, alors  $h_1(t)$  est le premier IMF. Sinon  $h_1(t)$  n'est pas une IMF, alors répéter les étapes (1-4) en remplaçant  $x(t)$  par  $h_1(t)$ .

$$h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t) \quad (\text{IV.3})$$

Où  $m_{11}(t)$  l'enveloppe moyenne des enveloppes inférieure et supérieure de  $h_1(t)$ .

**Etape 6 :** Répéter les étapes précédentes fois jusqu'à ce que  $h_{1k}(t)$  soit un IMF.

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) \quad (IV.4)$$

**Etape 7 :** Enregistrer le premier IMF comme suit :

$$IMF_1(t) = h_{1k}(t) \quad (IV.5)$$

Un critère d'arrêt doit être défini pour assurer que le signal obtenu vérifie les propriétés d'une fonction IMF tout en limitant le nombre d'itérations. De ce fait, Huang propose un critère d'arrêt basé sur le calcul de la déviation standard (SD) du signal entre deux itérations consécutives :

$$SD = \sum_{t=0}^T \frac{|(h_{(k-1)}(t) - h_k(t))|^2}{h_{(k-t)}^2(t)} \quad (IV.6)$$

Typiquement, la valeur de SD est entre 0.2 et 0.3.

**Etape 8 :** Calculer le résidu  $r_i(t)$  comme suit :

$$r_1(t) = x(t) - IMF_1(t) \quad (IV.7)$$

Traiter  $r_1(t)$  comme un nouveau signal.

**Etape 9 :** Répéter les étapes (1-8) n fois pour calculer

$$r_1(t) - IMF_2(t) = r_2(t) \quad (IV.8)$$

$$r_{(n-1)}(t) - IMF_n(t) = r_n(t)$$

**Etape 10:** La décomposition est terminée lorsque  $r_n(t)$  remplit au moins l'une de ces 3 conditions :

- $r_n(t)$  est une fonction monotone.
- Le nombre d'extrema dans  $r_n(t)$  soit inférieur à 2.
- $r_n(t)$  est une constante.

A partir des équations (IV.7) et (IV.8), on aura finalement une décomposition de la forme :

$$x(t) = r_n(t) + \sum_{i=1}^n IMF_i \quad (IV.9)$$

Cependant, l'algorithme EMD a un inconvénient majeur qui est le mixage des modes. Il se traduit par le fait qu'une IMF peut être présente dans une ou plusieurs IMFs. Pour remédier à ce problème, une version améliorée de l'EMD qui s'appelle l'EMD d'ensemble (EEMD) (Ensemble Empirical Mode Decomposition) a été proposée.

### IV.3 : Algorithme EEMD

L'EMD d'ensemble est une décomposition semblable à l'EMD, mais la séparation fréquentielle est améliorée et permet de réduire le mixage des modes. Le principe de la méthode EEMD est le suivant [45] :

**Etape 1 :** On génère I réalisation du  $X^{(i)} = x + \epsilon w_n^{(i)}$  où  $w_n^{(i)}$  ( $i = 1, \dots, I$ ) est le bruit blanc de Variance  $\epsilon^2$  et  $\epsilon > 0$ .

**Etape 2 :** Décomposer le signal  $x^{(i)}$  pour obtenir les modes  $IMF_k^{(i)}$ .

**Etape 3 :** Les IMF's finales sont les moyennes d'ensembles des IMF's précédentes :

$$IMF_k = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I IMF_k^{(i)} \quad (IV.10)$$

L'augmentation de nombre d'ensembles d'itérations ( $I = 100$ ) permet éliminer l'effet de bruit ajouté. De nombreux auteurs ont appliqué EEMD sur l'analyse des signaux vibratoires. Ils ont montré que cette technique donne une bonne séparation fréquentielle et des résultats fiables avec le choix rationnel de la variance du bruit. D'autre part, une augmentation considérable du temps d'exécution a été constatée. Une version améliorée d'EEMD qui a été développée par Yeh. Dite EMD d'Ensemble Complémentaire (CEEMD), a pour but de diminuer le temps de calcul et réduire le bruit résiduel tout en gardant sa capacité à éliminer le mixage des modes.

#### IV.4 : Algorithme CEEMD

Dans l'algorithme CEEMD, on rajoute une paire de bruit blanc gaussien au signal original (i.e. un bruit de signe positif et un autre de signe négatif), pour générer deux séries d'ensembles d'IMF's. L'algorithme de CEEMD est résumé dans les étapes suivantes [46]:

**Etape 1 :** On ajoute une paire de bruit blanc  $W_n^{(i)}(t)$  au signal original  $x(t)$  pour construire deux nouveaux signaux  $x^+$  et  $x^-$  :

$$\begin{pmatrix} x^+ \\ x^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (IV.11)$$

**Etape 2 :** Les deux mélanges positif et négatif sont décomposés par EMD pour obtenir deux ensembles d'IMF's :  $IMF_i^+, IMF_i^-$ .

**Etape 3 :** Répéter les étapes précédentes  $I$  fois pour obtenir les deux ensembles  $IMF_{ij}^+, IMF_{ij}^-$ . Où  $IMF_{ij}^+ (IMF_{ij}^-)$  est la  $i^{eme}$  IMF obtenue lors de l'ajout du  $j^{eme}$  bruit positif (négatif).

**Etape 4 :** Les IMF's finales sont obtenues par :

$$IMF_i = \frac{1}{2I} \sum_{j=1}^I (IMF_{ij}^+ + IMF_{ij}^-) \quad (IV.12)$$

Donc, le signal original  $x(t)$  peut être exprimé par :

$$x(t) = r_n(t) + \sum_{i=1}^n IMF_i \quad (IV.13)$$

#### IV.5 : Algorithme CEEMDAN

Dans la décomposition par l'algorithme CEEMD, il n'y a aucune garantie pour que  $x^+$  et  $x^-$  produisent le même nombre des modes. Pour résoudre ce problème et conserver les caractéristiques de CEEMD, un algorithme appelé Complète ensemble EMD avec bruit adaptatif (CEEMDAN) est présenté dans les étapes suivantes [47]:

**Etape 1 :** Décomposer par EMD  $I$  réalisations de  $x^{(i)} = x + \epsilon_0 w_n^{(i)}$  où  $w_n^{(i)} (i = 1, \dots, I)$  est le bruit blanc de variance  $\epsilon_0^2$  et  $\epsilon_0 > 0$  pour obtenir ses premiers modes et calculer :

$$IMF_1 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I IMF_1^{(i)} \quad (IV.14)$$

**Etape 2 :** Calculer le premier résidu :

$$r_1 = X - IMF_1 \quad (IV.15)$$

**Etape 3 :** Décomposer par EMD  $r_1 + \epsilon_1 E_1(w_n^{(i)})$ ,  $i = 1, \dots, I$  pour obtenir ses premiers modes. Le deuxième mode du CEEMDAN est définie par :

$$IMF_2 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_1 \left( r_1 + \epsilon_1 E_1(w_n^{(i)}) \right) \quad (IV.16)$$

**Etape 4 :** Pour  $k=2, \dots, n$ , le  $k^{eme}$  résidu est donné par la formule suivante :

$$r_k = r_{k-1} - IMF_k \quad (IV.17)$$

**Etape 5 :** Décomposer la réalisation  $r_k + \epsilon_k E_k(w_n^{(i)})$ ,  $i = 1, \dots, I$  par EMD et définie le  $(k+1)^{eme}$  mode comme suit :

$$IMF_{k+1} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E_k \left( r_k + \epsilon_k E_k(w_n^{(i)}) \right) \quad (IV.18)$$

Où  $E_k(\cdot)$  est la fonction qui extrait le  $k^{eme}$  IMF obtenu par EMD.

**Etape 6 :** Aller à l'étape 4 pour le prochain  $K$ .

**Etape 7 :** Itérer les étapes 4 à 6 jusqu'à ce que le résidu obtenu ne puisse plus être décomposé par EMD. Le résidu final est donné par :

$$r_n = x - \sum_{i=1}^n IMF_i \quad (IV.19)$$

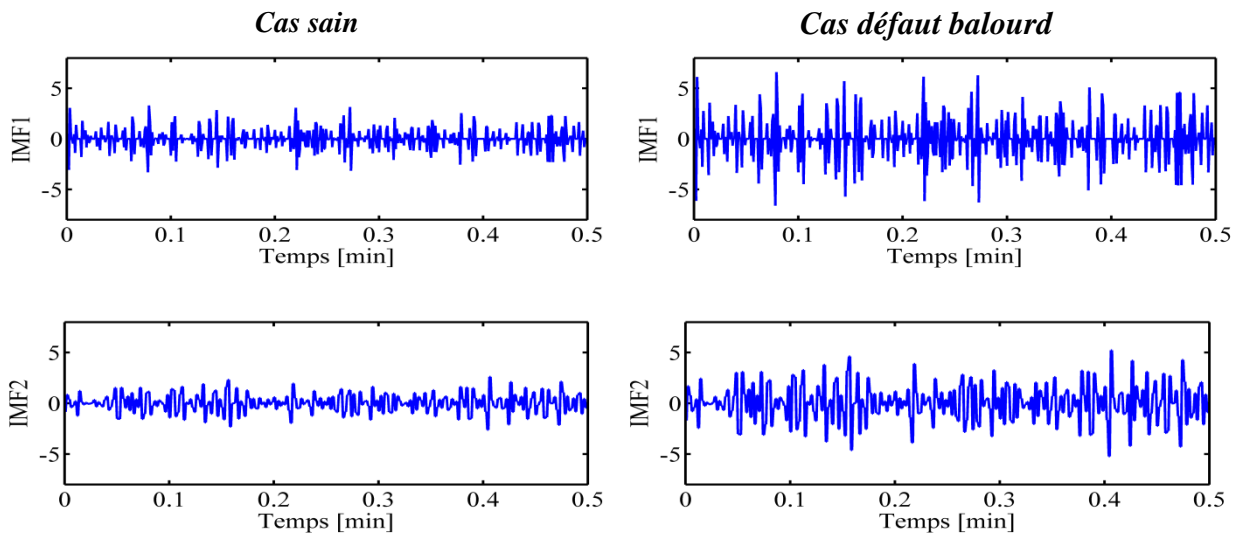
Le signal original  $x(t)$  peut être exprimé par :

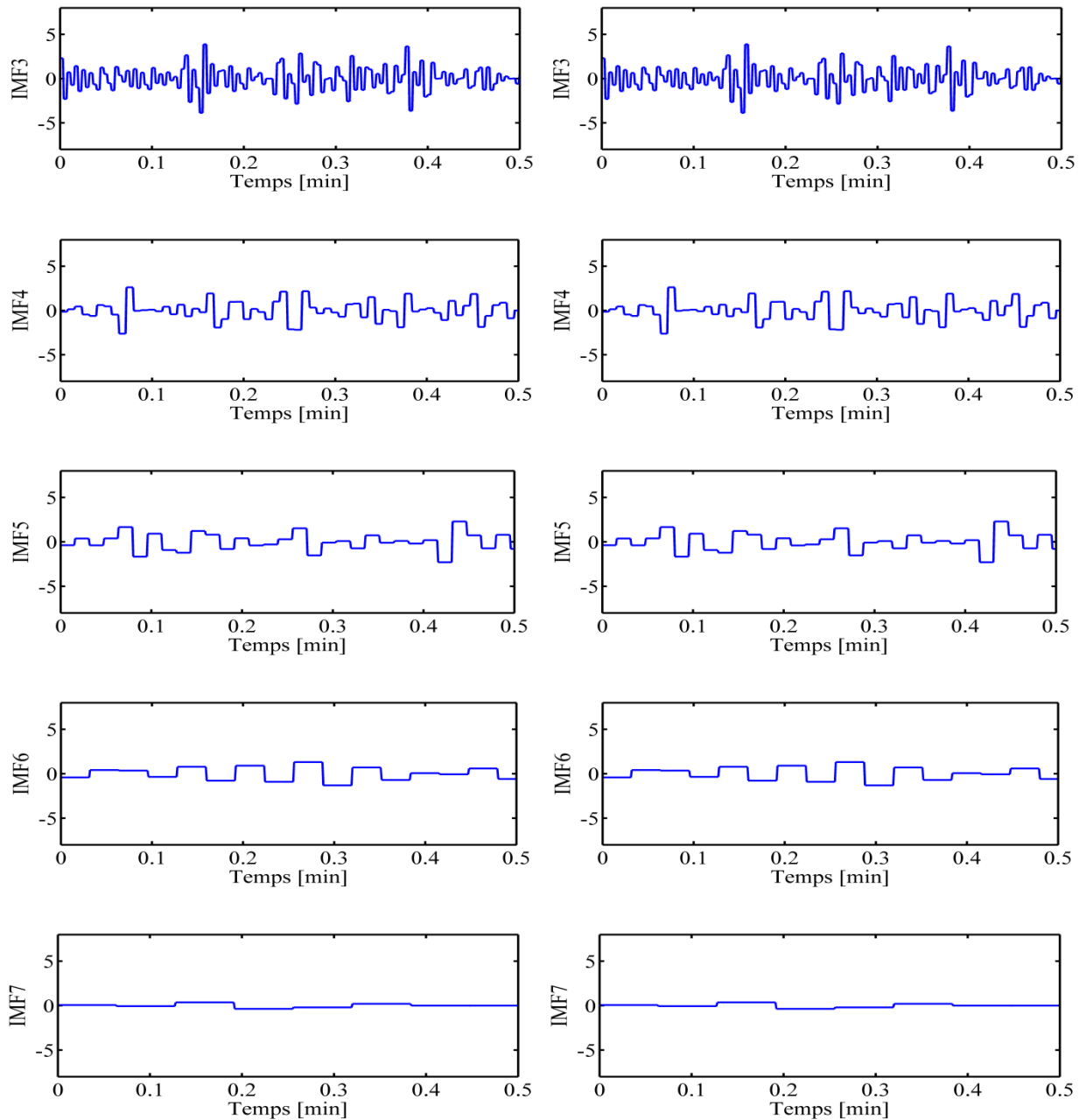
$$x(t) = r_n(t) + \sum_{i=1}^n IMF_i \quad (IV.20)$$

Où  $n$  est le nombre total des modes et  $\epsilon$  est l'amplitude de bruit blanc ajouté.

#### IV.6 : Application de l'algorithme CEEMDAN pour le diagnostic de TAG-9001E

La figure IV.1, montre les IMF's dans le cas sain et le cas d'un défaut balourd.





**Figure IV.1 : IMF's.**

Par comparaison cas sain avec cas défaut balourd, comme illustré dans la Figure IV.1, on remarque un changement notable des deux détails  $IMF_1$  et  $IMF_2$ , et facilement observé. Le changement des deux IMF's  $IMF_1$  et  $IMF_2$  indique l'existence de certaines informations dans notre signal vibratoire. Pour extraire et expliquer cette information, une analyse spectrale de signal vibratoire basée sur l'enveloppe spectrale d'Hilbert après l'étude statistique est effectuée pour les deux IMF's.

#### **IV.7 : Etude statistique**

Dans cette section, on va calculer deux facteurs statistiques :

### IV.7.1 : Kurtosis

Qui, mathématiquement est le moment d'ordre 4, est couramment nommé en traitement de signal par « *Kurtosis* ». Il représente le taux d'aplatissement de la distribution, il donne une évaluation de l'importance du pic du sommet de la courbe, il est défini par [48]:

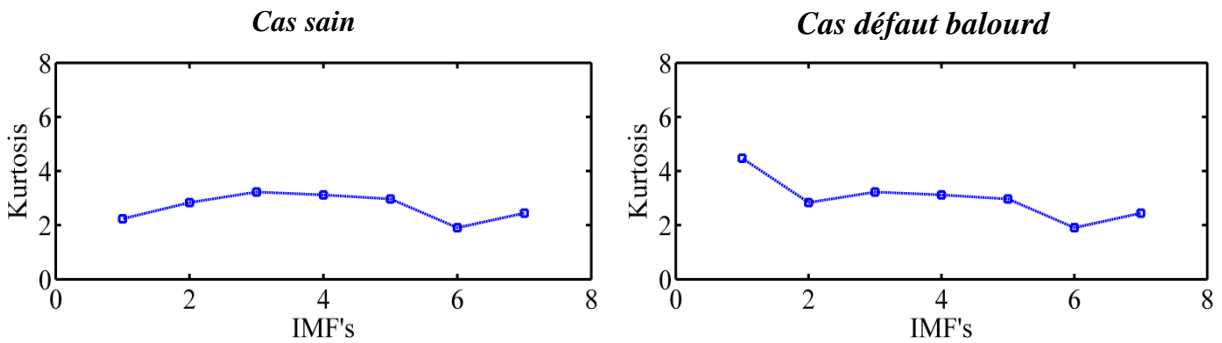
$$K_u = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right]^4 \quad (IV.21)$$

Ce moment est utilisé pour détecter la présence de chocs dans le signal vibratoire. En effet, pour un signal de distribution gaussienne, le kurtosis est égal à 3.

<b>Kurtosis</b>	<b>Sévérité</b>
1.5	Bon : signal harmonique
2.8 à 3.2	Passable : signal aléatoire
3.2 à 4	Elevé
>4	Critique

**Tableau IV.1:** Critère de sévérité du kurtosis.

La figure IV.2, montre le facteur Kurtosis dans le cas sain et cas défaut balourd.



**Figure IV.2 :** Kurtosis.

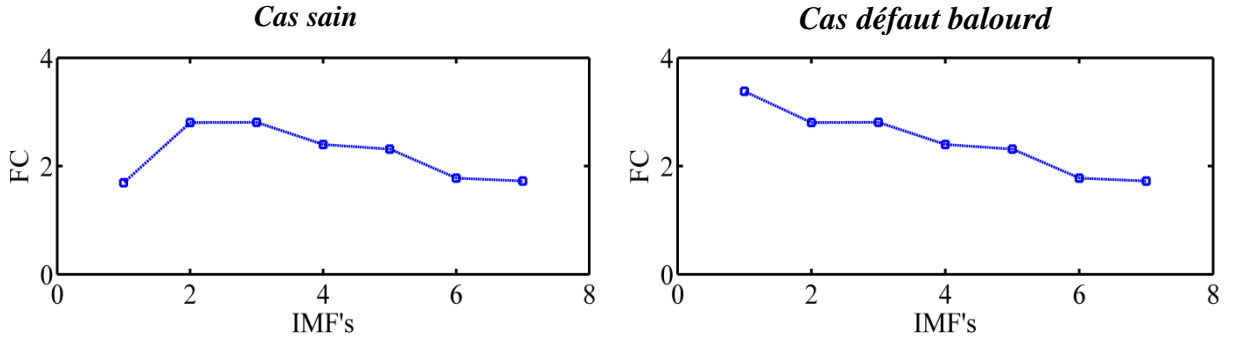
### IV.7.2 : Facteur de crête

C'est un indicateur de surveillance simple à calculer, car c'est le rapport entre la valeur de crête du signal et sa valeur efficace (RMS), comme il peut se calculer par le rapport entre la valeur maximale du signal et son écart type [49].

$$F_c = \frac{V_{crête}}{RMS} \quad (IV.22)$$

Cet indicateur est utilisé pour la détection spécifique d'impulsions ou de choc présents dans le signal vibratoire.

La figure IV.3, montre le facteur de crête dans le cas sain et cas défaut balourd.



**Figure IV.3 :** Facteur de crête.

D'après l'étude statistique et par comparaison cas sain avec cas défaut balourd. On remarque qu'IMF1 remplit les conditions de Kurtosis et facteur de crête. Pour extraire et expliquer cette information, une analyse basée sur l'enveloppe spectrale de Hilbert effectuée pour l'IMF<sub>1</sub>.

#### IV.8 : Enveloppe spectrale

L'analyse d'enveloppe est une technique de détection précoce des défauts du type choc. Elle est basée sur la transformée d'Hilbert [50].

La transformée d'Hilbert d'un signal  $x(t)$  est définie par la formule suivante :

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = \hat{x}(t) \quad (\text{IV.23})$$

Où  $\hat{x}(t)$  est la partie imaginaire du signal analytique,  $z(t)$  qui est défini comme suit :

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = x(t) + jH[x(t)] = A(t)e^{j\varphi(t)} \quad (\text{IV.24})$$

Où :  $H[x(t)]$  est la transformée d'Hilbert de  $x(t)$ .

L'enveloppe du signal  $A(t)$  est représentée par le module du signal analytique  $A(t)=[x(t)]$ . La phase et la fréquence instantanée du signal sont données par les équations suivantes :

$$\varphi(t) = \arctg \left[ \frac{\hat{x}(t)}{x(t)} \right] \quad (\text{IV.5})$$

$$w(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (\text{IV.6})$$

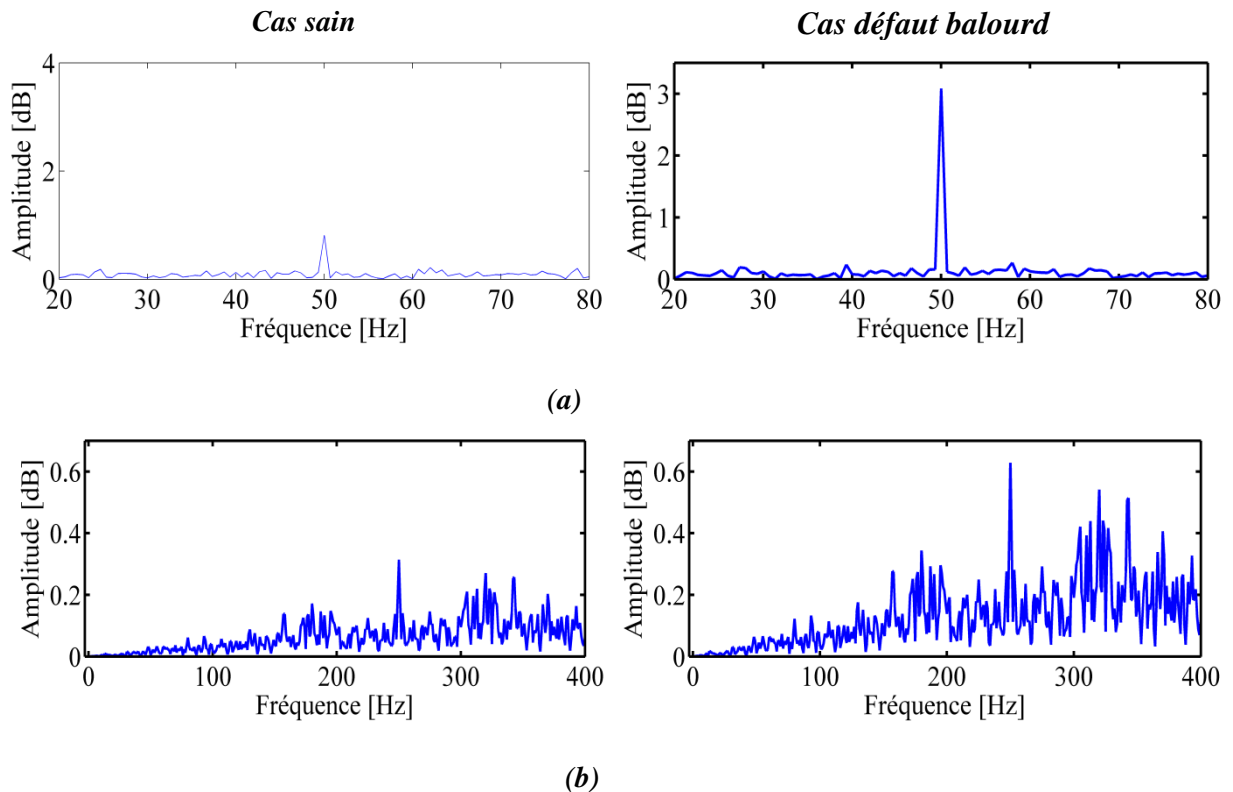
En pratique, la méthode d'enveloppe demande une série de traitements du signal temporel brut avant d'obtenir le résultat. Ces étapes sont résumées comme suit :

**Etape 01 :** Filtrage du signal brut afin d'éliminer les composantes indésirables.

**Etape 02 :** Nous appliquons la transformée d'Hilbert pour calculer l'enveloppe.

**Etape 03 :** Le spectre d'enveloppe est calculé et à partir duquel on peut extraire les informations sur le défaut.

La figure IV.4, montre l'enveloppe spectrale d'Hilbert dans les deux cas sain et défaut balourd.



**Figure IV.4 :** Enveloppe spectrale.

Une étude comparative entre le spectre de l'état sain et l'état défaut montre avec plus de observé une signature de fréquence particulière autour 50 Hz, et 250Hz dans le spectre de détail IMF<sub>1</sub>. Noté que la fréquence 50 Hz si la fréquence qui caractérisé le défaut balourd de palier et aussi noté que la fréquence 250Hz si la fréquence qui caractérisé le défaut d'alignement angulaire.

#### IV.9 : Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre, présenter une technique de diagnostic et surveillance a permis de détecter une anomalie ou une évolution dangereuse du signal vibratoire. L'effet d'alignement se manifeste comme une composante d'amplitude élevée à la fréquence de rotation du rotor. La réponse des rotors aux balourds est un phénomène vécu tous les jours par les exploitants sur leurs machines lorsqu'ils surveillent les niveaux vibratoires ou qu'ils traversent les vitesses critiques lors des arrêts et démarrages. La validation réalisée sur des cas conduit à des résultats tout à fait acceptables dans la mesure où l'on connaît suffisamment bien les caractéristiques dynamiques des paliers (rotors).

# Conclusion générale

Ce travail de mémoire a été consacré aux détections et diagnostic des défauts de turbine à gaz par analyse des signaux vibratoires. En premier lieu, nous avons présenté quelques notions sur la maintenance et une généralité sur les turbines à gaz et leurs types, suivies d'un aperçu sur les défauts de balourd.

En deuxième lieu nous avons présenté une étude de l'état de l'art sur les techniques de traitement des signaux vibratoires utilisées dans la surveillance de roulements. Nous avons passé en revue quelques méthodes qui ont été développées dans ces dernières années.

Une méthode de diagnostic de défaut turbine à gaz ont été proposée dans cette mémoire. Méthode est basée sur la version de l'algorithme CEEMDAN combinée avec les deux facteurs statistiques Kurtosis et facteur de crête, l'algorithme CEEMDAN et une nouvelle technique de sélection des IMF's appropriées qui contiennent l'information utile sur le défaut de balourd.

Les signaux simulés par le modèle développé ont été utilisés pour évaluer les performances et l'efficacité de la méthode proposée. Les résultats obtenus montrent que ces méthodes peuvent efficacement extraire le signal utile de défaut et par conséquent l'amélioration des indicateurs de détection.

Ce méthode préconisée ont été validées par la suite en utilisant les data de signaux réels des défauts de turbine à gaz de la société SPE-SONALGAZ de M'Sila. A travers les résultats obtenus par ce méthode, nous avons pu démontrer leur efficacité dans la détection précoce et le diagnostic des défauts de la turbine à gaz.

# Bibliographie

- [1] : Etude de base de la turbine à GAZ SONELGAZ
- [2] : [https://www.cder.dz/download/Art11-2\\_13.pdf](https://www.cder.dz/download/Art11-2_13.pdf)
- [3] : <https://diren.minesparistech.fr/Sites/Thopt/DiapJS/doc/S20/TechnoTAG>
- [4] : (AFNOR X 60-010-1994) : Association française de Normalisation.
- [5]: Jérôme Antonie, R.B. Randall : « The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines”. Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2006) 308–331
- [6]: Ayad Mouloud :” Etude comparative d’algorithme de la transformée en ondelettes: Application à l’analyse des signaux empiriques ». Thèse de magister. Université Ferhat Abbas Sétif. 2005
- [7] El badaoui Mohamed, « Contribution au diagnostic vibratoire des réducteurs complexes à engrenages par l’analyse cepstrale ». Thèse de l’Université Jean Monnet. 1999.
- [8] Belhour Samira : « Contribution à l’optimisation de la maintenance predictive par l’utilisation du logiciel OMNITREND (Système on line) cas : Cimenterie HAMMA BOUZIANE ». Thèse de l’université de Mentouri CONSTANTINE. 2008.
- [9] Boulenger A., Pachaud C., « Analyse vibratoire en maintenance. Surveillance et diagnostic des machines », 2ème édition, Edition Dunod, Paris 2003
- [10] Boulenger A., Pachaud C : « Aide mémoire : Surveillance des machines par analyse des vibrations ». Edition Dunod, Paris 2009.
- [11] Breneur Claire « Éléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d’engrenage et de roulements », Thèse de l’INSA de Lyon, Décembre 2002.
- [12] Jean-Christophe Cexus : « Analyse des signaux non-stationnaires par Transformation de Huang, Opérateur de Teager-Kaiser, et Transformation de Huang-Teager (THT) ». Thèse de doctorat. Université de Rennes 1. 12 décembre 2005.
- [13] :Cheng Junsheng\_, Yu Dejie, Yang Yu « A fault diagnosis approach for roller bearings based on EMD method and AR model”. Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2006) 350–362
- [14] Chiementi Xavier : « Localisation et quantification des sources vibratoire dans le cadre d’une maintenance préventive conditionnelle en vue de fiabiliser le diagnostic et le suivi de l’endommagement des composants mécaniques tournantes : application aux roulements à billes ». Thèse de l’université de REIMS CHAMPAGNE ARDENNE. 2007
- [15] Ammar Chiter « Détection et diagnostic des défauts de roulements : Contribution à la maintenance des machines tournantes ». Thèse de magister UFAS – SETIF. 2001.
- [16] Flandrin Patrick : « Empirical Mode Decomposition as a Filtre Bank ». IEEE signal processing letters. Vol 11, pp.112-114. 2004.
- [16] Fred Truchetet : « Ondelettes pour le signal numérique ». Edition Hermes, paris 1998.
- [17] Q.Gao, C.Duan, H.Fan, Q.Meng “Rotating machine fault diagnosis using empirical mode decomposition” .Mechanical Systems and Signal Processing. Vol (22), pp1072- 1081. 2008.

- [18] : Guang-ming Xian « Mechanical failure classification for spherical roller bearing of hydraulic injection molding machine using DWT–SVM”. Expert Systems with Applications 37 (2010).pp 6742–6747
- [19] Kiral Zeki, Hira Karagulle :( Vibration analysis of rolling element bearings with various defects under the action of an unbalanced force). Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2006) 1967–1991
- [20] Ericssona Stefan, Niklas Gripa, Elin Johanssona, Lars-Erik Perssona, Ronny Sj obergb, Jan-Olov Str .ombergc : (Towards automatic detection of local bearing defects in rotating machines). Mechanical Systems and Signal Processing 19 (2005) 509–535
- [21]: Hualou Liag, Qui-Hua Lin, J.D.Z. Chen.” Application of the empirical mode decomposition to analysis of Esophageal Manometric Data in gastroesophageal reflux disease”, IEEE vol 52, NO 10, 2005.
- [22]: Li Hong-guang, Meng Guang.”Harmonic component extraction from a chaotic signal based on empirical mode decomposition method”, Appled Mathematics and Mechanics, 27(2):221-225, 2006.
- [23]: Mahgoun Hafida : « Analyse et caractérisations des signaux vibratoires cyclostationnaire ».Thèse de magister, IOMP, Université Ferhat Abbas Sétif,2000.
- [24] **Belhor Samira**, Contribution à l’optimisation de la maintenance prédictive par l’utilisation du logiciel omnitrend (système on line) cas : cimenterie Hamma Bouziane, Thèse de Magister 2008, Université de Constantine, Juillet 2008.
- [25] **Omar Djebili**, Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement, Thèse de Doctorat, Universite de Reims Champagne Ardenne, Septembre 2013.
- [26] **Mahgoun Hafida**, Analyse non stationnaire des signaux vibratoires dans la surveillance des machines et la prévention des défaillances, Thèse de Doctorat, Université de Sétif 1, 2012.
- [27] **Baptiste TRAJIN**, Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [28] **Abid Zohra**, Etudes des effets vibratoires sur la durée de vie des roulements a rouleaux, Thèse de Magister, Université d’Annaba, 2010.
- [29] “Roulement à bille et à rouleaux. (2007), document NTN (for new technology network) corporation. CAT. NO. 2202-VIII/F.
- [30] **Sanaa KERROUMI**, Extraction des paramètres et classification dynamique dans le cadre de la détection et du suivi de défaut de roulements, Thèse de Doctorat, Universite De Reims Champagne-Ardenne, Octobre 2016.
- [31] **Ilyes Khelf**, Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l’intelligence artificielle, Thèse de Doctorat, Université d’Annaba, 2014.
- [32] **Y. Zhang, H. Zuo and F. Bai**, Classification of fault location and performance degradation of a roller bearing, Measurement, 46 (3), pp. 1178–1189, April 2013.

- [34] **J. P. Drona, F. Bolaersa, I. Rasolofondraibeb**, Improvement of the sensitivity of the scalar indicators (crest factor, kurtosis) using a denoising method by spectral subtraction: application to the detection of defects in ball bearings, *Journal of Sound and Vibration*, 270 (1-2), pp. 61-73, February 2004.
- [35] **C. Pachaud, R. Salvetat and C. Fray**, Crest factor and kurtosis contributions to identify defects inducing periodical impulsive forces, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11(6), pp. 903-916, November 1997.
- [36] **P. Stepanic, I. V. Latinovic and Z. Djurovic**, A new approach to detection of defects in rolling element bearings based on statistical pattern recognition, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45 (1-2), pp. 91–100, November 2009.
- [37] V.Meunier, O. Cousinard, F. Bolaers, J.P. Dron : « Mise en place d'une procédure de surveillance vibratoire de roulements sur une presse transfert du secteur automobile ». 19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique. Marseille, 24-28 août 2009.
- [38] Yves Meyer, Stéphane Jaffard, Olivier Rione : « L'analyse par ondelettes ». *Pour la science*. Septembre 1987. mensuel N°119, pp. 28-37.
- [39] Michel Misiti, Yves Misiti, : « Les ondelettes et leurs applications ». Edition Hermes, Paris 2003.
- [40] Djouada Mohamed : « Etude des performances de la classification par couplage réseaux de neurones artificiels (RNA) – algorithmes génétiques (AG) : application au diagnostic vibratoire ». Thèse magister.UFAS. 2008
- [41] Jaques Morel : « Surveillance vibratoire et maintenance prédictive ». *Technique de l'ingénieur R6100*.
- [42] Palaise\_David « Simulation numérique du comportement vibratoire d'engrenage endommages ». Thèse de l'école de technologie supérieure de MONTRÉAL. 2011.
- [43] Z.K. Penga, Peter W. Tsea, F.L. Chub: “An improved Hilbert–Huang transform and its application in vibration signal analysis ». *Journal of Sound and Vibration* 286 (2005) 187–205.
- [44] **M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. M. Poggi**, *Les ondelettes et leurs applications*, Hermes, Paris, 2003.
- [45] **S. Mallat**, A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machines Intelligence*, 11 (7), pp. 674-693, July 1989.
- [46] **LALLOUANI\_Abdelkrim**, débruitage d'un signal de la parole corrompu par un bruit coloré en utilisant la transformée en ondelettes et mplantation sur un processeur de traitement numérique des signaux, Thèse de Maîtrise en Génie Electrique, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal 2004.
- [47] **Rabah Abdelkader, Ziane Derouiche et Mohamed Fawzi Belbachir**, Débruitage de signaux vibratoires par seuillage des coefficients d'ondelettes, *The 5 international conference on electronics engineering ICEE 2013*, Novembre 2013, Oran, Algeria.
- [48] **Rabah Abdelkader, Abdelhafid Kaddour**, Débruitage des signaux vibratoires par l'analyse des ondelettes: cas de défaut de roulement, *Algerian Conference on Electrical Machines and Drives ACEMD'17*, 2017, Algiers, Algeria.
- [49] **D. L. Donoho**, Denoising by soft thresholding, *IEEE Transaction on Information Theory*, 41(3), pp. 613-627, 1995.

[50] **Hong-Ye Gao**, Wavelet Shrinkage Denoising Using the Non-Negative Garrote, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 7 (4), pp. 469-488, 1998.

## Résumé

L'analyse vibratoire, en vue d'une maintenance préventive conditionnelle, s'avère un outil essentiel pour les industries. Son emploi vise à servir trois niveaux d'analyse : la surveillance, le diagnostic et le suivi de l'état d'endommagement des équipements. Les vibrations captées, collectées et analysées peuvent renseigner sur l'état d'un système mécanique en mouvement. Un traitement approprié de ces signaux vibratoires permet de définir un état normal ou anormal de la machine en mouvement dans sa globalité ou de l'un de ses éléments en particulier. L'objectif de ce travail est d'appliquer des nouvelles techniques de traitement des signaux vibratoires issus des turbines à gaz pour une détection fiable et précoce des défauts. Ceci peut être atteint par l'amélioration des indicateurs temporels et fréquentiels calculés sur les signaux vibratoires mesurés.

## Mots clés

Analyse vibratoire ; Défaut ; Balourd ; Turbines à gaz.

## Summary

Vibration analysis, with a view to conditional preventive maintenance, is an essential tool for industries. Its use aims to serve three levels of analysis: monitoring, diagnosis and monitoring of the state of damage to equipment. The vibrations captured, collected and analyzed can provide information on the state of a moving mechanical system. Appropriate processing of these vibration signals makes it possible to define a normal or abnormal state of the moving machine as a whole or of one of its elements in particular. The objective of this work is to apply new techniques for processing vibration signals from gas turbines for reliable and early detection of faults. This can be achieved by improving the time and frequency indicators calculated on the measured vibration signals.

## Key words

Vibration analysis; Default ; Unbalance; Gas turbines.

## ملخص

يعد تحليل الاهتزاز ، بهدف الصيانة الوقائية المشروطة ، أداة أساسية للصناعات. يهدف استخدامه إلى خدمة ثلاثة مستويات من التحليل: مراقبة وتشخيص ومراقبة حالة الأضرار التي لحقت بالمعدات. يمكن أن توفر الاهتزازات التي يتم التقاطها وجمعها وتحليلها معلومات عن حالة النظام الميكانيكي المتحرك. تتيح المعالجة المناسبة لإشارات الاهتزاز هذه تحديد الحالة الطبيعية أو غير الطبيعية للألة المتحركة ككل أو لأحد عناصرها على وجه الخصوص. الهدف من هذا العمل هو تطبيق تقنيات جديدة لمعالجة إشارات الاهتزاز من التوربينات الغازية للكشف المبكر والموثوق عن الأعطال. يمكن تحقيق ذلك من خلال تحسين مؤشرات الوقت والتردد المحسوبة على إشارات الاهتزاز المقاسة

## الكلمات المفتاحية

تحليل الاهتزاز تقصير ؛ عدم اتزان؛ توربينات الغاز