الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electromecanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Electromecanique

Spécialité : Electromecanique

Par : - BENDJEDDOU ABDERRAHMANE

- GUESSABI BAIZID

Sujet

Diagnostic des défauts dans les turbines à gaz par la technique d'ondelette

Soutenu publiquement, le : 01/ 07 / 2025 ,**Devant le jury composé de :**

Zaoui Fares	MCA	Univ-BBA	Président
Meghlaoui Issam	MCB	Univ-BBA	Examinateur
Nacib Leila	MCA	Univ-BBA	Encadrant
Sakhara Saadi	MCA	Univ-BBA	Co-Encadrant

Année Universitaire 2024/2025

REMERCIEMENTs

« Seigneur, permets-moi de Te remercier pour le bienfait dont Tu m'as comblé ainsi que mes parents, et de faire le bien que Tu agrées. Et fais-moi entrer, par Ta miséricorde, parmi Tes serviteurs vertueux. »

Louange à Allah qui nous a permis d'achever ce modeste travail. Sans Son aide, nous n'aurions pu atteindre cet objectif. Que la paix et la bénédiction soient sur le Prophète Mohammed, paix et salut sur lui.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements les plus sincères vont en particulier à Monsieur Sakhara Saadi et Madame Nasib Lilia, pour avoir accepté d'encadrer ce travail. Leur accompagnement, leurs conseils précieux et leur disponibilité tout au long de cette aventure académique ont été d'une grande valeur pour nous.

Nous remercions également l'ensemble de nos enseignants, depuis l'école primaire jusqu'à l'enseignement supérieur, pour leur dévouement et les connaissances qu'ils nous ont transmises.

Nos pensées reconnaissantes vont aussi à nos amis, nos proches et à toutes les personnes qui nous ont soutenus, encouragés ou aidés, ne serait-ce que par un mot aimable ou un geste d'encouragement.

Nous adressons également nos remerciements aux membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail.

Enfin, nous implorons Dieu le Tout-Puissant d'accepter ce travail, de le rendre utile et bénéfique, et de le compter parmi les bonnes œuvres en ce jour où ni richesse ni enfants ne seront d'aucune utilité, sauf pour celui qui viendra à Lui avec un cœur pur.

DEDICACE

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux

Par la grâce d'Allah, j'ai l'honneur d'achever mon parcours universitaire à l'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj, en spécialité Électromécanique.

Mon parcours académique touche à sa fin… Ce fut un voyage parsemé d'obstacles, de défis, mais aussi de réussites et de leçons. Il n'était pas censé être facile, et quelle que soit sa durée, il finit toujours par passer. Me voici, par la grâce d'Allah, à accomplir ce travail.

À mon père, source de force et de sagesse, que Dieu te protège et te récompense pour tout.

À ma tendre mère, ton amour, tes prières et ta patience ont été ma lumière dans les moments d'obscurité. Qu'Allah Le Tout Miséricordieux te protège de tout mal.

À mes frères bien-aimés, avec qui j'ai partagé les plus belles étapes de ma vie. Votre présence m'est précieuse.

À mon ami et partenaire dans ce travail (Guessabi Baizid), qu'Allah veille sur toi.

À tous ceux qui ont cru en moi, soutenu ou encouragé, que cette réussite soit un hommage à votre bienveillance.

Que ce travail soit, par la volonté de Dieu, un pas béni vers l'accomplissement de ce qu'Il a destiné pour moi.

- ABDERRAHMANE -

DEDICACE

Au nom de Dieu, le Miséricordieux, le Compatissant

Par la grâce de Dieu, à l'occasion de la fin de mes études universitaires à l'Université Mohamed Al-Bashir Al-Ibrahimi à Burj Bouaririg, spécialité mécanique électrique.

Mon parcours universitaire touche à sa fin... Ce fut un parcours semé d'embûches et de défis, mais aussi de réussites et de leçons apprises. Ce n'était pas censé être facile, mais peu importe le temps que cela prend, il y a toujours une fin. Me voici, par la grâce de Dieu, en train de faire ce travail.

À la lumière qui a éclairé mon chemin et à la lampe qui ne s'éteindra jamais dans mon coeur, à celui qui m'a tant donné et dont je tire force et réconfort. .... Mon père.....

A celle qui a mis le ciel sous ses pieds et m'a soulagé de l'adversité par ses prières au grand être humain .... Maman...

À mon ombre constante et à la sécurité de mes jours, à ceux qui ont renforcé mon ombre avec eux. .... Mes frères...

À mon ami et partenaire dans ce travail (Bendjeddou Abderrahmane), que Dieu te protège.

A tous ceux qui ont cru en moi, m'ont soutenu et encouragé, mes amis fidèles (Hassam, Fares, Imad, Saleh, Raouf ,Mohammed, Lyes...)

Que ce succès soit le fruit de votre gentillesse et de votre gratitude.

"Ce diplôme n'est pas la fin, mais le début d'un nouveau chemin..."

- Guessabi Baizid -

الملخص

تتناول هذه الدراسة موضوع تشخيص الأعطال في الآلات الدوارة باستعمال تقنية التحويل المويجي (التحليل بالمويجات)، وهي تقنية حديثة أثبتت فعاليتها في تحليل الإشارات غير الثابتة المرتبطة بالأعطال الميكانيكية.

في بداية العمل، تم تقديم لمحة نظرية حول التوربينات الغازية، أهميتها، وأنواع الأعطال التي قد تصيبها، مع عرض لأهم تقنيات التشخيص الكلاسيكية مثل التحليل الطيفي والاهتزازي .بعد ذلك، تم التطرق إلى مبادئ التحليل بالمويجات وميزته في تحليل الإشارات المعقدة زمنياً وترددياً.

أما الجزء التطبيقي فقد تم تنفيذه على علبة سرعة متعددة المراحل تم ربطها بمحرك ومولد، حيث تم تسجيل الإشارات في حالتين: حالة سليمة وأخرى مع وجود عطب (كسر سن ترس). استُعملت تقنيات تحليل مختلفة مثل: التحليل الزمني، الطيفي، السيبسترالي، وأخيرًا التحليل بالمويجات الذي مكّن من تحديد العيب بدقة في التروس.

أظهرت النتائج أن تقنية المويجات تتفوق على الطرق الكلاسيكية، خاصة في الحالات المعقدة، ما يجعلها أداة فعالة في أنظمة الصيانة التنبؤية الذكية.

الكلمات المفتاحية: علبة السرعة، التحليل بالمويجات، الأعطال الميكانيكية، الإشارات غير المستقرة، الصيانة التنبؤية، الاهتزازات، تحليل FFT، تحليل Cepstrum

Résumé

Cette étude porte sur le diagnostic des défauts dans les machines tournantes en utilisant la technique de transformation en ondelettes (analyse par ondelettes), une méthode moderne qui a prouvé son efficacité dans l'analyse des signaux non stationnaires liés aux défaillances mécaniques.

Dans un premier temps, une revue théorique a été présentée sur les turbines à gaz, leur importance et les types de défauts possibles, accompagnée d’un aperçu des techniques de diagnostic classiques telles que l’analyse spectrale et vibratoire. Ensuite, les principes de l’analyse par ondelettes ont été détaillés, soulignant sa capacité à traiter des signaux complexes en temps et en fréquence.

La partie pratique a été réalisée sur un réducteur de vitesse multi-étagé couplé à un moteur et un générateur, avec enregistrement des signaux dans deux états : normal et avec un défaut (cassure d’une dent d’engrenage). Différentes analyses ont été effectuées : temporelle, spectrale, cepstrale, et enfin par ondelettes, permettant de localiser précisément la défaillance.

Les résultats ont montré la supériorité de la méthode par ondelettes sur les approches classiques, en particulier dans les systèmes complexes, ce qui en fait un outil prometteur pour la

maintenance prédictive intelligente.

Mots clés : réducteur de vitesse, analyse par ondelettes, défaillances mécaniques, signaux non stationnaires, maintenance prédictive, vibrations, analyse FFT, analyse cepstrale

Abstract

This study addresses the fault diagnosis of rotating machines using the wavelet transform technique (wavelet analysis), a modern method proven effective in analyzing non-stationary signals related to mechanical faults.

The work begins with a theoretical overview of gas turbines, their importance, and the types of possible failures, followed by a presentation of classical diagnostic techniques such as spectral and vibration analysis. The principles of wavelet analysis are then introduced, emphasizing its capability to handle complex signals in both time and frequency domains.

The practical part was carried out on a multi-stage gearbox connected to a motor and a generator, with signals recorded under two conditions: healthy and faulty (broken gear tooth). Several types of analysis were performed: time-domain, spectral, cepstral, and wavelet-based, which allowed for precise fault identification.

The results demonstrated the superiority of wavelet techniques over traditional methods, especially in complex systems, making it a powerful tool for intelligent predictive maintenance.

Keywords: gearbox, wavelet analysis, mechanical faults, non-stationary signals, predictive maintenance, vibrations, FFT analysis, cepstral analysis

Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I : Généralité sur les turbines à gaz et leurs défauts 3
I.1 Introduction 3
I.2 Fonctionnement des turbines à gaz : 4
I.2.1 Les composants principaux 4
I.2.1.1 Le compresseur 4
I.2.1.2 La chambre de combustion 5
I.2.1.3 La turbine 5
I.2.2 Principe de fonctionnement 6
I.2.2.1 Le cycles de Brayton d'une turbine à gaz 7
I.3 Types de défauts courants 8
I.3.1 Les défauts mécaniques 8
I.3.1.1 Les fissures 8
I.3.1.2 Le Déséquilibre 9
I.3.1.3 Usure des roulements 10
I.3.1.4 Le désalignement 11
I.3.1.5 Les engrenages dans le réducteur de vitesse 12
I.3.2 Les défauts thermiques 14
I.3.2.1 Le surchauffement 14
I.3.2.2 La corrosion 15
I.3.3 Les défauts liés aux fluides 16
I.3.3.1 Encrassement 16
I.3.3.2 La contamination 17
I.4 Techniques de diagnostic existantes 18
I.4.1 Surveillance vibratoire 18
I.4.1.1 Principe de la surveillance vibratoire 19
I.4.1.2 Capteurs utilisés pour la surveillance vibratoire 19
I.4.1.3 Types de défauts détectés par la surveillance vibratoire 19
I.4.1.4 Instruments et techniques utilisés pour la surveillance vibratoire 20
I.4.1.5 Analyse des données vibratoires et identification des défauts spécifiques 20
I.4.2 Analyse spectrale 21
I.4.2.1 Définition et principe de l'analyse spectrale 21
I.4.2.2 Avantages de l'analyse spectrale 21
I.4.2.3 Limites de l'analyse spectrale classique 21
I.4.2.4 Techniques avancées d'analyse spectrale 22
I.4.2.5 Application de l'analyse spectrale dans les turbines à gaz 22
I.4.3 Conclusion 22
I.5 Introduction à l'analyse par ondelettes 23
I.5.1 Principes mathématiques des ondelettes 23
I.5.2 Les avantages des ondelettes pour l'analyse des signaux non stationnaires 24
I.6 Conclusion 25

Table des Matières

Chapitre II : Classification des défauts par la technique d'ondelettes 26
II.1 Introduction 26
II.2 Collecte de données 26
II.2.1 Sources de données : 27
II.2.1.1 Capteur de vibration piézoélectrique (Accéléromètre piézoélectrique) 27
II.2.1.2 Capteur de température Pt100 27
II.2.1.3 Capteur de pression piézoélectrique 28
II.2.2 Méthode de collecte des données dans une turbine à gaz 29
II.2.3 Types de signaux à analyser 30
II.2.3.1 Analyse temporelle 30
II.2.3.2 Analyse fréquentielle 30
II.3 Prétraitement des signaux: 31
II.3.1 Filtrage et normalisation des données 31
II.3.1.1 Filtrage des données 31
II.3.1.2 Normalisation des données : 32
II.3.2 Sélection des signaux pertinents 32
II.4 Application de la transformée en ondelettes 33
II.4.1 Choix de l'ondelette mère 33
II.4.2 Décomposition des signaux en coefficients d'ondelettes 35
II.5 Extraction des caractéristiques 36
II.5.1 Identification des motifs caractéristiques des défauts 36
II.5.2 Utilisation des coefficients d'ondelettes pour la détection des anomalies 37
II.6 Validation des résultats 38
II.7 Conclusion 39
Chapitre III : L'application de la technique d'ondelette au diagnostic des défauts dans les machines tournantes 40
III.1 Introduction 40
III.2 Concepts et terminologie: 40
III.3 Materiel utilise : 41
III.3.1 Vibromètre : SCHENCK « VIBRO PORT 41 » : 41
III.3.2 Capteurs : 41
III.4 Choix de l'ondelette et du nombre de niveaux de calcul pour la décomposition 42
III.5 Etude exprimentale sur un banc d'essai d'un reducteur de vitesse 43
III.6 Résultats et discussions 44
III.6.1 L'analyse temporelle de forme d'onde 44
III.6.2 L'analyse spectrale (FFT) 45
III.6.3 L'analyse cepstral 46
III.6.4 Analyse d'ondelette 47
III.6.4.1 Cas du signal sans défaut: 47
III.6.4.2 Cas du signal avec défaut 47
III.7 Conclusion 49
CONCLUSION GENERALE 50
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 51

Liste des Figures

Figure I.1 : Vue d'ensemble d'une turbine à gaz.....3
Figure I.2 : Arbre de compresseur axial d'une turbine à gaz.....4
Figure I.3 : Schéma présentatif d'une chambre de combustion.....5
Figure I.4 : Turbine à gaz – section turbine.....6
Figure I.5 : Schéma d'un moteur à turbine à gaz.....7
Figure I.6 : Représentation schématique des cycles de Brayton ouverts et fermés.....7
Figure I.7 : Diagrammes P-V et T-S du cycle de Brayton.....8
Figure I.8 : Vue macro d'une fissure formée dans une aube de turbine à gaz.....9
Figure I.9 : Dommages aux aubages causés par un déséquilibre dynamique.....10
Figure I.10 : Usure des roulements due au fretting.....11
Figure I.11 : Le défaut d'alignement des arbres.....12
Figure I.12 : Défaillance des dents d'engrenage.....13
Figure I.13 : Surchauffe des paliers – Effets visibles sur le métal.....14
Figure I.14 : Corrosion chimique perforante sur une aube.....15
Figure I.15 : Encrassement des aubes du compresseur.....17
Figure I.16 : Contamination sévère à l'entrée de la turbine.....18
Figure II.1 : Capteur de vibration piézoélectrique.....27
Figure II.2 : Capteurs de température (Pt100).....28
Figure II.3 : Capteur de pression piézoélectrique.....29
Figure II.4 : Schéma fonctionnel de la chaîne de mesure.....29
Figure II.5 : Appareils vibromètres de la centrale électrique de Messila.....32
Figure II.6 : Représentation tridimensionnelle de l'ondelette de Daubechies.....34
Figure II.7 : Signal mère et signal filtré – conditions normales.....35
Figure II.8 : Signal de charge brut – conditions défectueuses.....36
Figure III.1 : VIBRO PORT 41 SCHENCK (vibromètre).....41
Figure III.2 : Démonstration de différentes fréquences de rotation correspond à chaque arbre..44
Figure III.3.a : Le signal original des données réelles dans le domaine temporel avec défaut...44
Figure III.3.b : Le signal original des données réelles dans le domaine temporel sans défaut…45
Figure III.4 : Comparaison des deux spectres du signal à engrenage (sans défaut et avec défaut)……45

Figure III.5 : Cepstres du signal avec défaut.....46

Figure III.6 : Bande latérale autour de quéfrence de rotation du pignon dans cepstre du signal avec défaut…….46

Figure III.7.a : La forme ondelette du signal sans défaut.....47

Figure III.7.b:Décomposition DWT en 3D des signaux avec charge de 5.625kW sans défaut..47

Figure III.8.a : Forme d'ondelette du signal avec défaut.....48

Figure III.8.b : Décomposition DWT en 3D des signaux avec charge de 5.625kW et un défaut de cassure de dent……...……...48

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Table des équations liées à l'analyse par ondelettes.....24

Tableau II.1 : Types de signaux générés par les capteurs étudiés.....31

Tableau III.1 : Bandes de fréquences du signal ondelettes.....43

Tableau III.2 : Les paramètres du réducteur.....44

Symboles

Indice	Mot clé
x(t),x[n] :	Signal d'entrée (continu ou discret)
ψ(t) :	Fonction mère (ondelette mère)
ψ^* :	Conjugué complexe de l'ondelette mère
ψ̂(ω) :	Transformée de Fourier de ψ(t)
a :	Facteur d'échelle (scale) – inversement proportionnel à la fréquence
b :	Facteur de translation (translation) – position temporelle de l'analyse
j :	Niveau de résolution dans DWT ou MRA
k:	Index de translation dans DWT
h[k] :	Filtre passe-bas
g[k] :	Filtre passe-haut dérivé de h[k]
A_j (t) :	Composante approchée du signal au niveau j
D_K (t) :	Composantes détaillées du signal au niveau k
ω,ω₀ :	Fréquence angulaire
x̂[n] :	Signal reconstruit
N :	Nombre total d'échantillons
RMSE :	Erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error)
Cψ :	Constante d'admissibilité liée à ψ

INTRODUCTION GENERALE

Les turbines à gaz jouent un rôle crucial dans le paysage industriel moderne, que ce soit dans le secteur aéronautique, énergétique ou encore dans diverses applications industrielles. Depuis leur essor pendant la Seconde Guerre mondiale, elles ont profondément transformé la propulsion des aéronefs, remplaçant progressivement les moteurs à pistons grâce à leur fiabilité, leur compacité et leur performance élevée, aussi bien dans l'aviation civile que militaire. Leur contribution dans la production énergétique est tout aussi marquante : utilisées initialement pour les pics de consommation, elles sont aujourd'hui intégrées dans des centrales à cycle combiné avec des rendements supérieurs à 55 %, et jouent également un rôle dans la cogénération et l'alimentation des plateformes offshore [1]. En tant qu'étudiants en électromécanique, nous étions particulièrement intéressés par la polyvalence et l'efficacité des turbines à gaz, ce qui nous a incités à choisir ce sujet comme domaine de recherche de fin d'études.

Toutefois, comme toute machine complexe comportant des pièces mobiles, les turbines à gaz sont vulnérables aux défauts mécaniques et structurels tels que les fissures, jeux excessifs ou usures anormales. Ces anomalies peuvent entraîner une baisse significative de performance, une augmentation des risques de défaillance, et surtout des conséquences graves en matière de sécurité, notamment dans le domaine aéronautique où la fiabilité est une exigence incontournable. De plus, les défauts non détectés à temps peuvent engendrer des coûts élevés liés à la maintenance corrective, à l'indisponibilité des équipements, ainsi qu'à la planification des interventions techniques [2].

Dans cette optique, les approches classiques de surveillance, notamment vibratoires, montrent rapidement leurs limites, surtout face à des phénomènes transitoires ou des signaux bruités. C’est là que les méthodes avancées comme l’analyse par ondelettes trouvent tout leur intérêt. Grâce à leur capacité à localiser avec précision des variations à différentes échelles, à identifier des singularités ou encore à travailler efficacement sur des signaux non stationnaires, les ondelettes offrent des outils puissants pour améliorer le diagnostic des défauts et fiabiliser les systèmes [3]. Cette technique permet ainsi d’aller au-delà des outils classiques, en offrant une lecture plus fine et plus robuste des comportements dynamiques des machines tournantes.

Ce travail vise à évaluer l'utilisation de la technique des ondelettes pour la détection et la classification des défauts dans les systèmes mécaniques tournants, en s'appuyant sur un cas pratique représentatif : un réducteur de vitesse multi-étagé. En analysant les signaux de vibration ou les ondes ultrasonores, les ondelettes permettent de décomposer le signal en plusieurs niveaux

de fréquence et de temps, ce qui aide à détecter et localiser des défauts tels que les fissures, l'usure ou le déséquilibre dynamique, tout en contribuant à classifier les anomalies en fonction des empreintes fréquentielles extraites.

Dans ce contexte, le travail vise également à évaluer l'efficacité de la technique des ondelettes par rapport aux méthodes traditionnelles actuellement utilisées, telles que l'analyse de Fourier et le traitement temporel classique des signaux. Bien que ces méthodes soient largement utilisées pour la surveillance de l'état et la détection des défauts, elles restent limitées lorsqu'il s'agit de traiter des signaux complexes et non linéaires, caractéristiques des défauts dans les systèmes mécaniques complexes. Par conséquent, cette étude cherche à mettre en évidence la capacité des ondelettes à fournir une représentation précise dans le domaine temps-fréquence, ce qui améliore la détection précoce des défauts et accroît la fiabilité des estimations diagnostiques, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité des processus de surveillance et de maintenance préventive [4]

Chapitre I : Généralité sur les turbines à gaz et leurs défauts

I.1 Introduction

L'histoire de la turbine à gaz remonte à la fin du 18e siècle, lorsque certains inventeurs ont imaginé des dispositifs visant à exploiter l'énergie produite par la combustion de carburants. Malgré ces premières idées, les limitations technologiques de l'époque ont retardé leur concrétisation. Ce n'est qu'au début du 20e siècle, grâce aux avancées techniques, que les premières turbines à gaz fonctionnelles ont vu le jour, notamment avec les travaux de Whittle et von Ohain dans les années 1930.

Sur le plan technique, la turbine à gaz est un moteur à combustion interne convertissant l'énergie chimique en énergie mécanique. Elle est composée d'un compresseur, d'une chambre de combustion et d'une turbine. Son fonctionnement repose sur le cycle de Brayton, caractérisé par une compression, une combustion à pression constante, puis une détente. Aujourd'hui, cette technologie joue un rôle essentiel dans plusieurs domaines, tels que l'aéronautique, la production d'énergie et les systèmes de propulsion industrielle [5]

Ce chapitre vise à fournir une vue d'ensemble sur les turbines à gaz, en expliquant leur fonctionnement de manière détaillée à travers les principes de base et les composants essentiels. Nous aborderons également les différents types de défauts qui peuvent affecter ces turbines. Enfin, ce chapitre introduira les techniques de diagnostic actuelles, en mettant particulièrement l'accent sur l'analyse par ondelettes, une méthode prometteuse pour l'étude des signaux non stationnaires, qui joue un rôle clé dans la détection précoce des défauts.

Figure I.1 : Vue d'ensemble d'une turbine à gaz [44]

I.2 Fonctionnement des turbines à gaz :

I.2.1 Les composants principaux

La turbine à gaz repose sur trois composants principaux : le compresseur, la chambre de combustion et la turbine. Ces éléments sont indispensables à son bon fonctionnement, chacun remplissant un rôle spécifique qui contribue à la performance globale du système. Grâce à leur conception avancée, les turbines à gaz sont utilisées dans divers secteurs, où elles offrent une source d'énergie fiable et efficace. L'optimisation de ces composants permet d'améliorer le rendement énergétique, de réduire la consommation de carburant et de limiter les émissions polluantes. Ainsi, l'étude de ces trois composants permettra de mieux comprendre leur rôle et leur impact sur les performances globales de la turbine à gaz.

I.2.1.1 Le compresseur

Le compresseur initie le cycle actif de la turbine à gaz en augmentant la pression et la température de l'air ambiant avant son entrée dans la chambre de combustion.

- **Compresseur axial :** Utilisé principalement dans les turbines de grande capacité, notamment dans les secteurs aéronautique et industriel, il est constitué de plusieurs étages alternant rotors et stators. Cette configuration permet d'atteindre des rapports de compression élevés avec une efficacité aérodynamique optimale.
- **Compresseur centrifuge** : Plus compact et robuste, il est souvent employé dans les turbines de plus petite taille. Il fonctionne en projetant l'air radialement à travers une roue en rotation, augmentant ainsi sa pression.

La performance du compresseur influence directement l'efficacité globale de la turbine. Sa conception vise à minimiser les pertes de charge, les fuites internes et à prévenir les phénomènes de pompage ou de décrochage. [1][6]

Figure I.2 : Arbre de compresseur axial d'une turbine à gaz [45]

I.2.1.2 La chambre de combustion

Située au cœur du système, la chambre de combustion transforme l'énergie chimique du carburant en énergie thermique en brûlant le carburant injecté dans l'air comprimé à pression quasi constante, générant ainsi des gaz à haute température.

Trois configurations principales sont utilisées :

- **Annulaire :** Compacte et légère, cette conception est couramment utilisée dans les moteurs d'avion.
- **Can-annulaire :** Combinant les avantages des chambres tubulaires et annulaires, elle est souvent utilisée dans les turbines industrielles.
- **Tubulaire :** Composée de conduits distincts, elle est adaptée aux installations industrielles.

Une combustion efficace nécessite une flamme stable, une température uniforme en sortie et une réduction maximale des émissions polluantes telles que les oxydes d'azote (NOx), le monoxyde de carbone (CO) et les hydrocarbures imbrûlés. Les matériaux utilisés doivent résister à des températures extrêmes, ce qui impose l'utilisation de revêtements thermiques et de systèmes de refroidissement à air.

La température des gaz brûlés à la sortie de la chambre de combustion peut typiquement atteindre entre 1100°C et 1400°C, selon le type de turbine. [1][6]

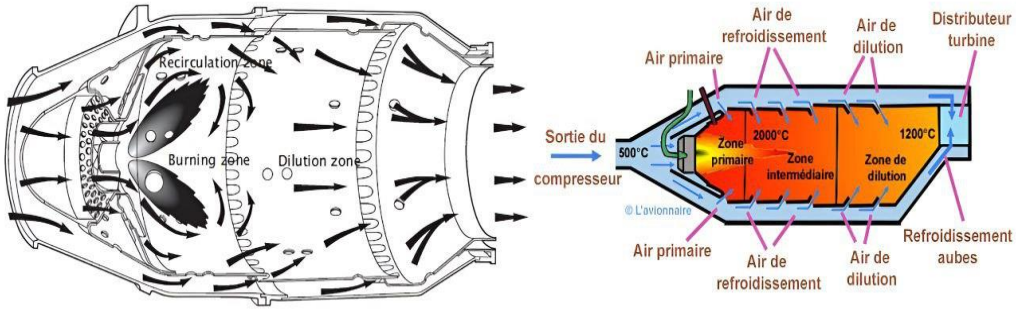

Figure I.3 : Schéma présentatif d'une chambre de combustion [46]

I.2.1.3 La turbine

La turbine récupère l'énergie contenue dans les gaz chauds produits par la combustion. Une partie de cette énergie est utilisée pour entraîner le compresseur via un arbre coaxial, tandis que le reste sert à fournir de la puissance mécanique ou électrique selon l'application.

Elle est composée de plusieurs étages formés d'aubages fixes (stators) et mobiles (rotors), profilés de manière à optimiser l'expansion des gaz.

La température d'entrée des gaz dans la turbine peut atteindre jusqu'à 1500°C dans les modèles modernes, nécessitant des technologies de refroidissement avancées.

Les aubages sont soumis à des contraintes thermiques et mécaniques intenses. Pour y faire face, on utilise des superalliages, des techniques avancées de refroidissement interne ainsi que des traitements de surface spécifiques. Ces mesures visent à garantir la performance et la durabilité des matériaux. [1][6]

Figure I.4 : Turbine à gaz – section turbine [47]

I.2.2 Principe de fonctionnement

La turbine à gaz fonctionne selon le cycle de Brayton, un cycle thermodynamique basé sur une combustion à pression constante. Elle permet de convertir l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique, utilisée notamment pour la production d'électricité ou la propulsion .

Son fonctionnement repose sur trois éléments principaux : le compresseur, la chambre de combustion et la turbine.

- **Compression de l'air :** L'air extérieur est aspiré et comprimé à l'aide d'un compresseur. Cette opération augmente la pression et la température de l'air tout en réduisant son volume, ce qui améliore le rendement de la combustion . Le type de compresseur (axial ou centrifuge) influe sur le mode de compression .
- **Combustion :** L'air comprimé entre ensuite dans la chambre de combustion où il est mélangé à un carburant, puis enflammé. Cette combustion, réalisée à pression quasi constante, produit des gaz très chauds riches en énergie thermique. Pour protéger la chambre contre les températures élevées, des systèmes de refroidissement sont utilisés .
- **Détente et production d'énergie :** Les gaz chauds sont dirigés vers la turbine où ils se détendent à travers plusieurs étages, transformant leur énergie thermique en énergie mécanique rotative . Une partie de cette énergie est utilisée pour faire fonctionner le compresseur, tandis que le reste peut être exploité pour générer de l'électricité ou de la poussée .

➢ **Éjection des gaz :** Les gaz résiduels sont ensuite évacués. Dans le domaine aéronautique, cette expulsion contribue à la propulsion . Dans les systèmes industriels, elle peut être utilisée pour alimenter un récupérateur de chaleur, comme dans les cycles de cogénération .[1][6]

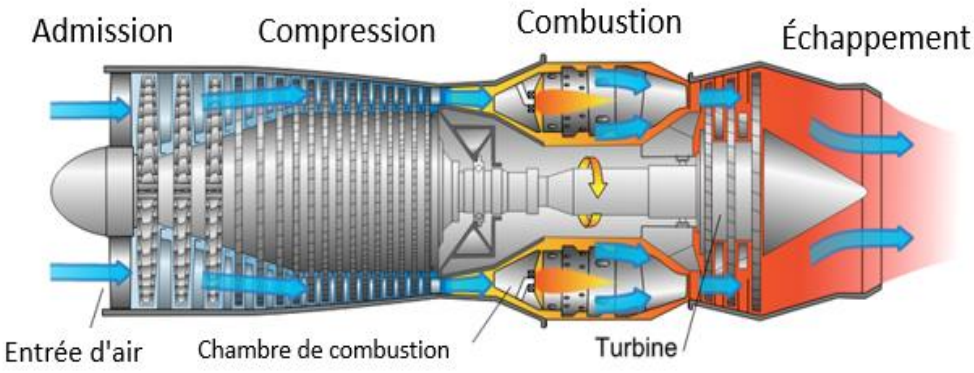

Figure I.5 : Schéma d'un moteur à turbine à gaz [48]

I.2.2.1 Le cycles de Brayton d'une turbine à gaz

Le cycle de Brayton, déjà évoqué lors de le cadre du fonctionnement général de la turbine à gaz, constitue le cadre thermodynamique fondamental sur lequel repose ce type de machine. Il permet d'analyser comment l'énergie thermique issue de la combustion est convertie en énergie mécanique utile, à travers une série de transformations subies par un fluide de travail.

Ce cycle est particulièrement intéressant car il peut être adapté en système ouvert ou système fermé :

➢ **Cycle ouvert :** L'air est aspiré de l'extérieur, utilisé dans le système, puis rejeté dans l'atmosphère après son passage dans la turbine.

➢ **Cycle fermé :** le même fluide circule en boucle fermée, ce qui permet une utilisation plus efficace de l'énergie.

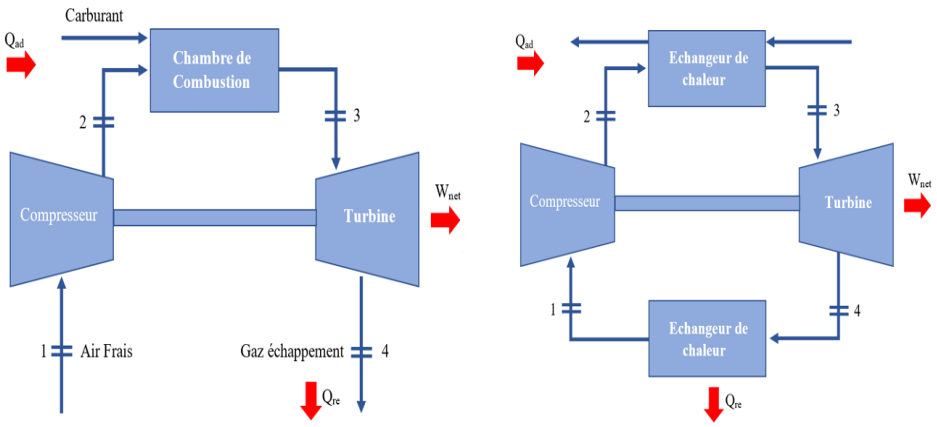

Figure I.6 : Représentation schématique des cycles de Brayton ouverts et fermés

Dans sa forme idéale et fermée, le cycle comprend quatre transformations thermodynamiques principales, chacune essentielle pour le bon fonctionnement de la turbine, que l'on peut illustrer par des diagrammes thermodynamiques (p-V et T-s) :

1. **Compression isentropique (1→2) :** Le fluide est comprimé dans le compresseur, entraînant une augmentation de sa pression et de sa température, sans changement d'entropie.
2. **Apport de chaleur isobare (2→3) :** Le fluide comprimé reçoit de l'énergie thermique dans la chambre de combustion, à pression constante.
3. **Détente isentropique (3→4) :** Le gaz se détend dans la turbine, produisant un travail mécanique, toujours sans variation d'entropie.
4. **Rejet de chaleur isobare (4→1) :** Le fluide cède de la chaleur dans un échangeur thermique à pression constante, revenant ainsi à son état initial. [7]

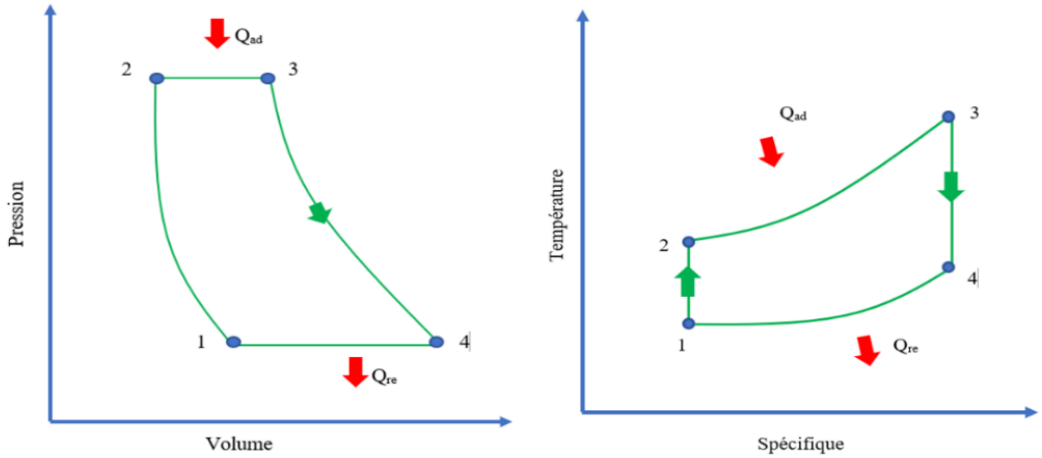

Figure I.7 : Diagrammes P-V et T-S du cycle de Brayton

I.3 Types de défauts courants

I.3.1 Les défauts mécaniques

I.3.1.1 Les fissures

Les fissures dans les turbines représentent un mode de dégradation progressive, induit par des sollicitations mécaniques répétées. Elles s'amorcent généralement à la base des dents, zone critique soumise à des concentrations de contraintes, avant de se propager lentement vers la surface. Une fois établies, ces fissures peuvent exciter les modes propres de vibration des bagues de roulement, en raison du passage des éléments roulants sur les zones endommagées .

- **Causes du fissure:**

Ce phénomène se manifeste principalement dans les aciers durcis par traitement thermique, particulièrement sensibles aux gradients de contraintes mécaniques. Les fissures apparaissent

lorsque les sollicitations localisées dépassent la limite de fatigue du matériau . L'effet est amplifié par les pressions de contact de type Hertzienne, générant des endommagements sous-surface au niveau des chemins de roulement.

- **Solutions du fissure:**

La détection précoce de ces fissures repose sur des techniques avancées d'analyse du signal, telles que la démodulation spectrale, permettant de localiser l'énergie vibratoire sur des fréquences caractéristiques des défauts. Par ailleurs, l'analyse combinée de l'amplitude et de la phase du signal vibratoire constitue un indicateur pertinent pour la mise en évidence de fissures à un stade avancé. [8][9]

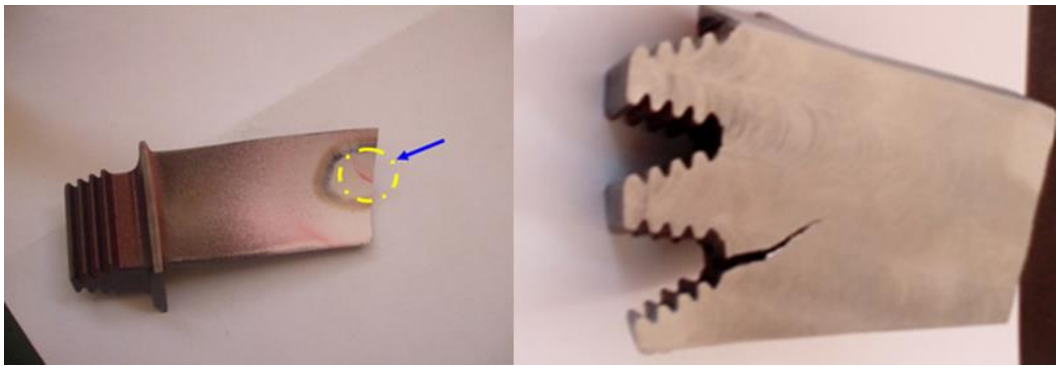

Figure I.8 : Vue macro d'une fissure formée dans une aube de turbine à gaz. [49]

I.3.1.2 Le Déséquilibre

Le déséquilibre, ou balourd, est une cause fréquente de vibrations dans les turbines à gaz . Il résulte d'une répartition inégale de la masse autour de l'axe du rotor, déplaçant le centre de gravité et générant une force centrifuge proportionnelle à la masse en déséquilibre et au carré de la vitesse. Cette force peut affecter les paliers, les ancrages et réduire la durée de vie de l'équipement .
On distingue trois types principaux :

- Déséquilibre statique
- Déséquilibre de couple
- Déséquilibre dynamique

Chacun nécessite une méthode de correction adaptée.

- **Causes du déséquilibre**

Le déséquilibre peut être causé par:

- Défauts d'usinage ou d'assemblage
- Dépôts, encrassement ou érosion
- Perte d'ailette ou de matière

- Déformations thermiques
- Erreurs de montage ou différences de dilatation

Ces défauts déplacent le centre de masse et, s'ils ne sont pas corrigés, peuvent entraîner des dommages.

➢ **Solutions et corrections**

Le déséquilibre peut être corrigé efficacement s'il est détecté à temps. Les principales méthodes sont:

- Équilibrage dynamique, en atelier ou in situ, guidé par l'analyse vibratoire (ex. FFT)
- Maintenance préventive, incluant nettoyage et vérification d'alignement
- Surveillance vibratoire continue, dans un programme de maintenance conditionnelle [10][6]

Figure I.9 : Dommages aux aubages d'une turbine à gaz causés par un déséquilibre dynamique [50]

I.3.1.3 Usure des roulements

Les roulements constituent des composants essentiels des systèmes mécaniques rotatifs, assurant la transmission des charges tout en minimisant les frottements. Ils sont composés de deux bagues concentriques entre lesquelles se déplacent des éléments roulants, leur conférant une fonction de guidage précise.

➢ **Causes de usure des roulements**

Les modes de défaillance courants incluent :

- L'écaillage dû à la fatigue de contact
- Le grippage en cas de lubrification insuffisante
- La corrosion liée à des conditions d'exploitation défavorables
- La rupture de la cage, souvent provoquée par des charges axiales excessives ou un mauvais alignement

Des études, notamment celle menée par SKF, indiquent que près de 27 % des défaillances proviennent d'erreurs lors de la manipulation ou du montage.

- **Solutions de usure des roulements**

La maintenance préventive repose principalement sur :

- La surveillance vibratoire, en particulier sur l'axe axial, pour détecter les anomalies dynamiques
- Le remplacement des roulements dès l'apparition de signes clairs de dégradation de stade avancé
- L'analyse du facteur de kurtosis, servant d'indicateur fiable pour diagnostiquer les problèmes de lubrification et déclencher des opérations de regraissage ciblées

Cette approche permet d'optimiser la durée de vie des roulements tout en réduisant les risques de défaillance critique. [9][11]

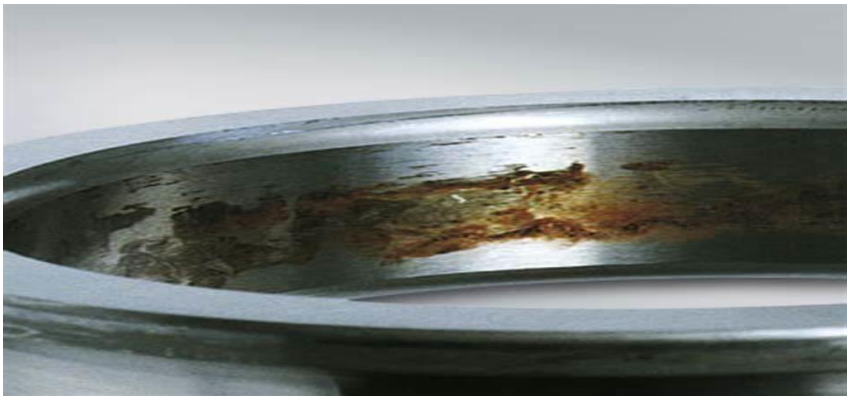

Figure I.10 : Usure des roulements due au fretting dans les turbines à gaz [51]

I.3.1.4 Le désalignement

Le désalignement constitue l'un des défauts les plus courants et les plus nuisibles dans les machines tournantes. Ce phénomène, souvent lié à une mauvaise installation ou à des déformations progressives, se traduit par une perte de colinéarité entre les arbres couplés. Il peut être de nature angulaire, radiale (défaut de concentricité), ou une combinaison des deux . Ce défaut engendre des contraintes mécaniques supplémentaires sur les éléments de liaison et les paliers.

Quand quelque chose n'est pas aligné, on peut le sentir avec des vibrations plus fortes à certains moments, qui correspondent à des multiples de la vitesse de rotation. Par exemple, ça peut être 2×, 3× ou 4×. On observe souvent une vibration radiale d'ordre 2, parfois avec des composantes d'ordre 3 ou 4. En plus, il y a parfois une composante axiale marquée aux ordres 1, 2, 3 ou 4. Elle a des amplitudes plus grandes que les composantes radiales .

➢ **Causes des le désalignement**

- Problème de forme.
- Le problème est un désalignement radial, c'est-à-dire un défaut de concentricité.
- Montage mécanique à refaire.
- Les fondations sont abîmées.

➢ **Conséquences des le désalignement**

- Apparition de pics vibratoires aux multiples de la fréquence de rotation (2×, 3×, 4×)
- Vibration axiale dominante
- Échauffement anormal des paliers
- Rupture ou instabilité du film d'huile
- Dégradation accélérée des accouplements et roulements
- Bruit mécanique excessif

➢ **Solutions recommandées**

- Analyse des vibrations pour trouver la cause du problème.
- Réalignement précis au laser des arbres couplés
- Équilibrage dynamique (ex. : placement d'une masse d'essai de 105 g à la position 270°)
- Vérification et renforcement des fondations
- Maintenance préventive incluant un contrôle régulier des vibrations [12]

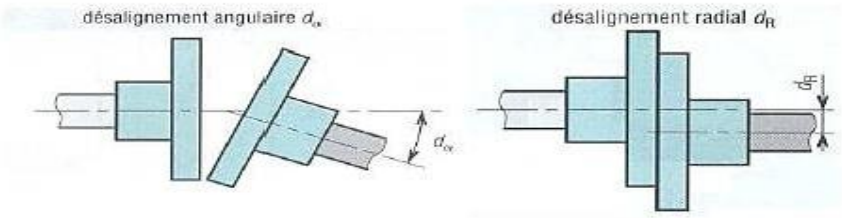

Figure I.11 : Le défaut d'alignement des arbres [52]

I.3.1.5 Les engrenages dans le réducteur de vitesse

Les engrenages assurent la transmission de puissance avec un rapport de vitesse constant entre deux arbres. Cependant, ces composants peuvent présenter plusieurs défauts liés à l'usure, à des erreurs de fabrication, ou à de mauvaises conditions de fonctionnement. Parmi les problèmes les plus fréquents : dent endommagée, défaut d'angle d'hélice, déformation du profil de denture, ou défaut de répartition de la charge .

Ces défauts créent des vibrations qui forment un spectre en « peigne de raies ». La fréquence de rotation de l'engrenage défectueux détermine l'écart entre les raies. Si deux dents abîmées se rencontrent, elles peuvent vibrer fortement. Cela peut affecter la stabilité du réducteur et la vitesse de sortie .

- **Causes**

- Dent endommagée ou usée
- Détérioration du profil de denture
- Défauts géométriques ou de montage
- Fatigue mécanique et contraintes cycliques
- Défaut de transmission uniforme de la charge
- Chocs, échauffements localisés et vibrations excessives

- **Conséquences**

- Spectre vibratoire en peigne (lié à la fréquence de rotation)
- Fréquences de coïncidence (Fco) dues à des dents endommagées simultanément
- Perte de rendement mécanique du réducteur
- Instabilité de la vitesse de sortie
- Bruits d'impact répétitifs et vibrations haute fréquence

- **Solutions recommandées**

- Analyse vibratoire spectrale pour détecter et localiser le défaut
- Augmentation du rapport de recouvrement pour lisser l'erreur de transmission
- Reprofilage ou remplacement des engrenages usés
- Simulation dynamique pour prévoir le comportement vibratoire
- Maintenance conditionnelle basée sur une surveillance vibratoire continue [13][14].

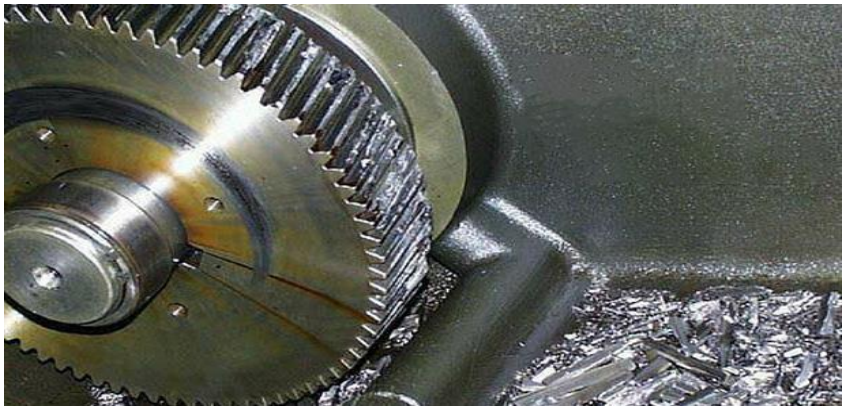

Figure I.12 : Défaillance des dents d'engrenage due à une lubrification insuffisante ou à une surcharge [53]

I.3.2 Les défauts thermiques

I.3.2.1 Le surchauffement

Le surchauffement correspond à une augmentation excessive de la température dans certaines zones du moteur, notamment la turbine, où les températures actuelles peuvent dépasser 1850 K, bien au-delà de la résistance thermique des matériaux des aubes (environ 1300 K). Ce phénomène entraîne des contraintes thermo-mécaniques susceptibles de provoquer des dommages structurels. Bien qu'une température plus élevée à l'entrée améliore le rendement et la puissance du moteur, elle rend indispensable un refroidissement interne efficace pour préserver l'intégrité des composants et prolonger leur durée de vie.

- **Causes de la surchauffe**

Les phénomènes de surchauffe observés dans l'industrie sont généralement liés à plusieurs facteurs, parmi lesquels :

- Des températures d'entrée extrêmement élevées.
- Des contraintes dues à une pression importante.
- Des charges mécaniques qui accentuent les efforts subis par les matériaux.
- La nature intrinsèque des matériaux utilisés, notamment leur limite thermique.

- **Solutions à la surchauffe (systèmes de refroidissement)**

Les aubes de turbine à gaz font l'objet d'une attention particulière en matière de refroidissement. Diverses techniques sont mises en œuvre, chacune utilisant un fluide caloporteur circulant à travers l'aube pour maintenir sa résistance mécanique face aux températures extrêmes.

Les critères d'efficacité d'un bon système de refroidissement reposent sur les principes du transfert thermique en milieu fermé. Ainsi, pour maximiser l'échange de chaleur dans ces dispositifs, deux conditions essentielles doivent être réunies :

- Un écoulement du fluide de refroidissement bien conçu et maîtrisé.
- Une surface d'échange thermique suffisamment grande. [15]

Figure I.13 : Surchauffe des paliers dans une turbine à gaz [54]

I.3.2.2 La corrosion

La corrosion, dans le contexte des turbines à gaz, désigne une dégradation progressive et irréversible des composants métalliques, provoquée par des réactions chimiques avec des contaminants tels que les sels (sodium, potassium), les acides minéraux ou des métaux réactifs comme le plomb et le vanadium . Ces substances pénètrent dans le système via l'air d'admission, le carburant ou les fluides d'injection, entraînant une perte de matière qui compromet la performance et l'intégrité des éléments exposés.

- **Causes de la corrosion**

On distingue principalement deux types de corrosion :

- La corrosion humide, causée par des dépôts en suspension dans l'air combinés à l'humidité, affectant surtout les aubes du compresseur .
- La corrosion à haute température (ou sulfidation), provoquée par les gaz de combustion contenant des éléments corrosifs capables de former des sels fondus, attaquant les composants de la section chaude de la turbine.

Ces formes de corrosion sont fortement influencées par la température des gaz, ainsi que par la qualité de l'air et du carburant utilisés.

- **Solutions proposées**

Pour limiter les effets de la corrosion, plusieurs mesures sont mises en œuvre :

- L'application de revêtements protecteurs sur les surfaces exposées, servant de barrière contre les réactions chimiques .
- Un entretien régulier, incluant le nettoyage des aubes, afin de réduire l'accumulation de contaminants et préserver les performances des composants. [16][17]

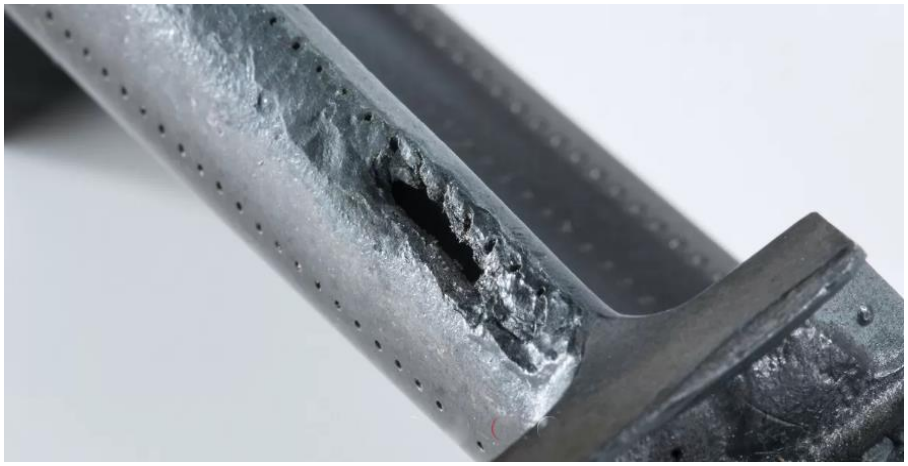

Figure I.14 : Corrosion chimique perforante sur une aube de turbine [55]

I.3.3 Les défauts liés aux fluides

I.3.3.1 Encrassement

L'encrassement dans les turbines à gaz correspond à l'accumulation progressive de particules solides, de sels, d'hydrocarbures et d'autres contaminants présents dans l'air ambiant sur les aubes du compresseur, en particulier dans les premiers étages (généralement les 5 à 6 premiers). Cette accumulation modifie le profil aérodynamique des aubes, entraînant une réduction du débit d'air et de l'efficacité isentropique du compresseur, ce qui provoque une chute de la puissance délivrée par la turbine ainsi qu'une baisse du rendement global.

- **Causes principales**

Les causes de l'encrassement sont nombreuses et dépendent fortement de l'environnement d'exploitation :

- Présence de sels marins ou de particules en suspension dans l'air (poussières, sable, matières organiques).
- Pollution industrielle : hydrocarbures, cendres volantes, brouillards urbains, émanations de circulation.
- Ingestion de vapeurs d'huile de lubrification, de gaz d'échappement, ou encore de produits chimiques comme la peinture en aérosol.
- Utilisation d'eau non traitée dans les systèmes de refroidissement par évaporation, ce qui introduit des impuretés supplémentaires dans le flux d'air.

- **Solutions proposées**

- Pour limiter les effets de l'encrassement, plusieurs méthodes sont mises en œuvre : Le lavage en ligne, effectué durant le fonctionnement de la turbine, consiste à injecter un mélange d'eau et de détergent afin de réduire continuellement les dépôts.
- Le lavage hors ligne, réalisé à l'arrêt, permet un nettoyage plus en profondeur du compresseur.
- L'installation de filtres haute efficacité, souvent en acier inoxydable pour les environnements sévères, permet de piéger les particules fines en amont.
- La maintenance préventive régulière vise à détecter et corriger les fuites internes, notamment celles liées aux huiles, qui favorisent la formation de dépôts. [18]

Figure I.15 : Encrassement des aubes du compresseur par des particules fines [55]

I.3.3.2 La contamination

La contamination désigne la dégradation chimique ou biologique des composants internes d'une turbine à gaz, causée par des substances corrosives telles que les sels (NaCl, KCl), les gaz acides (SO_2, HCl) ou la matière organique. Cela provoque la corrosion par piqûres, l'érosion des aubes et l'obstruction des circuits de refroidissement.

- **Causes principales**

La contamination se manifeste sous différentes formes :

- **Corrosion chimique :** Les sels hygroscopiques forment des solutions acides en présence d'humidité, entraînant la corrosion des surfaces métalliques.
- **Acidification :** Les gaz comme le dioxyde de soufre ou l'acide chlorhydrique provoquent une acidité élevée, endommageant les matériaux sensibles.
- **Contamination biologique :** Les insectes, la matière végétale et les débris organiques peuvent se déposer sur les aubes, formant des couches contaminants.
- **Fuites internes :** Les fuites d'huile favorisent la présence de résidus acides et carbonés dans le flux d'air.
- **Conditions météorologiques :** La pluie et l'humidité facilitent la migration des sels à travers les filtres d'admission.

- **Solutions proposées**

Les solutions suivantes permettent de minimiser les effets de la contamination :

- **Contrôle chimique :** Il est essentiel de surveiller le niveau des contaminants selon le débit d'air, de carburant et d'eau injectée.
- **Revêtements protecteurs :** Des couches protectrices réduisent l'adhésion des sels et ralentissent la corrosion.

- **Lavage ciblé :** Utiliser des détergents alcalins pour les sels et des solvants pour les graisses permet un nettoyage efficace.
- **Entretien des joints :** Maintenir les joints en bon état pour prévenir les fuites d'huile internes.
- **Respect des seuils critiques :** Suivre les limites des fabricants (OEM) concernant les contaminants pour préserver la durabilité des composants. [18]

Figure I.16 : Contamination sévère à l'entrée d'une turbine à gaz par des particules fines et grasses [56]

I.4 Techniques de diagnostic existantes

Les systèmes de surveillance de l'état des machines (condition monitoring) reposent principalement sur le diagnostic des équipements et des ensembles mécaniques. La source d'information la plus importante pour ce diagnostic provient de la mesure des vibrations mécaniques. L'objectif principal de cette mesure est de recueillir suffisamment de données pour analyser l'état de fonctionnement des machines et maintenir les niveaux de vibration dans des limites acceptables. Une interprétation appropriée de ces signaux vibratoires permet également d'obtenir des indications précieuses sur les conditions opérationnelles des systèmes mécaniques [19].

Dans ce contexte, nous concentrerons notre étude sur deux types de techniques de diagnostic classiques, à savoir la surveillance vibratoire et analyse spectrale, car nous aurons l'occasion d'explorer chacune d'elles.

I.4.1 Surveillance vibratoire

Même en bon état, les machines produisent naturellement des vibrations. Celles-ci sont généralement associées à des événements périodiques tels que la rotation des arbres, l'engrènement des engrenages, ou les champs électriques tournants. L'analyse de la fréquence de

répétition de ces phénomènes permet d'identifier leur origine, ce qui fait de l'analyse fréquentielle une méthode centrale dans cette approche

I.4.1.1 Principe de la surveillance vibratoire

La surveillance vibratoire repose sur l'idée que chaque composant mécanique d'une machine génère un motif vibratoire propre, qualifié de « signature vibratoire ». Une modification de cette signature, qu'il s'agisse d'un changement d'amplitude ou de fréquence, peut signaler l'apparition d'un défaut. Cette méthode s'est imposée comme un pilier de la maintenance conditionnelle, car elle permet de détecter précocement les anomalies au sein des équipements rotatifs, en analysant les vibrations émises durant leur fonctionnement normal. La surveillance repose notamment sur le suivi des niveaux vibratoires et sur la comparaison avec des seuils prédéfinis, ce qui permet une intervention ciblée avant la survenue d'une défaillance . [19][20]

I.4.1.2 Capteurs utilisés pour la surveillance vibratoire

La mesure des vibrations s'effectue à l'aide de capteurs spécifiques, dont le choix dépend du type de défaut ciblé, de la plage de fréquences à analyser, et des conditions de fonctionnement. Trois types de capteurs sont les plus couramment utilisés :

- Les accéléromètres, qui mesurent l'accélération des vibrations
- Les capteurs de vitesse (vélocimètres), qui évaluent la vitesse vibratoire
- Les capteurs de déplacement, qui quantifient les déplacements relatifs

Le capteur le plus répandu reste l'accéléromètre piézoélectrique, en raison de sa sensibilité élevée et de sa capacité à couvrir une large gamme de fréquences. Il peut être fixé magnétiquement ou mécaniquement sur la structure de la machine. De plus, l'émergence des capteurs sans fil a permis de réduire les coûts d'installation tout en assurant une surveillance continue, même dans des environnements difficiles d'accès [21] [22].

I.4.1.3 Types de défauts détectés par la surveillance vibratoire

L'analyse vibratoire permet d'identifier divers types de dysfonctionnements mécaniques à partir des caractéristiques spectrales du signal. Parmi les défauts les plus fréquemment détectés, on retrouve :

- Le balourd, associé à des vibrations à basse fréquence proportionnelles à la vitesse de rotation
- Le désalignement, qui produit des vibrations harmoniques régulières
- Les défauts de roulements, caractérisés par des pics à haute fréquence

- Les anomalies d'engrenage, décelables à travers des modulations spécifiques de fréquence
- La résonance, qui se manifeste par une amplification excessive des vibrations à certaines vitesses critiques .

Chaque type de défaut laisse une empreinte vibratoire distincte. Par exemple, un roulement endommagé produit un spectre typique contenant des fréquences bien précises comme le BPFO (Ball Pass Frequency Outer), le BPFI (Ball Pass Frequency Inner), le BSF (Ball Spin Frequency) ou le FTF (Fundamental Train Frequency) [20].

I.4.1.4 Instruments et techniques utilisés pour la surveillance vibratoire

Un système complet de surveillance vibratoire comprend généralement :

- Un capteur (souvent un accéléromètre)
- Un module de conditionnement du signal (filtrage, amplification)
- Un système d'acquisition équipé de convertisseurs analogique-numérique
- Un logiciel d'analyse, capable de traiter les signaux à l'aide de techniques comme la FFT (Fast Fourier Transform) ou l'analyse d'enveloppe

Selon la criticité de la machine, deux types de systèmes sont utilisés : les systèmes portables, utilisés pour des inspections périodiques, et les systèmes fixes (ou en ligne), conçus pour la surveillance continue des équipements sensibles. Les systèmes les plus modernes offrent une surveillance en temps réel, avec des seuils d'alerte configurables et une intégration possible dans des réseaux industriels tels que SCADA ou ERP [23].

I.4.1.5 Analyse des données vibratoires et identification des défauts spécifiques

Le traitement des données vibratoires suit généralement plusieurs étapes. Il débute par un prétraitement du signal brut (filtrage, amplification), suivi par une transformation en domaine fréquentiel, notamment via la FFT. Pour certains défauts comme ceux des roulements, une analyse par enveloppe est souvent appliquée afin de mettre en évidence les impacts cycliques. Pour les signaux non stationnaires, l'analyse temps-fréquence, notamment basée sur les ondelettes, permet d'obtenir des informations plus fines sur l'évolution du signal au cours du temps.

La précision du diagnostic dépend largement de la base de données des fréquences caractéristiques de chaque composant, qui sert de référence pour l'interprétation des pics spectraux. Sans cette base, l'identification exacte du défaut devient difficile, voire impossible.[20][21]

I.4.2 Analyse spectrale

I.4.2.1 Définition et principe de l'analyse spectrale

L'analyse spectrale est une technique de traitement du signal permettant d'extraire des informations sur le contenu fréquentiel d'un signal vibratoire. Elle repose sur le principe selon lequel chaque type de défaut mécanique génère des vibrations à des fréquences spécifiques. En transformant le signal temporel en un spectre de fréquences, il devient possible d'identifier la présence d'anomalies à partir de l'apparition de composantes fréquentielles anormales ou inattendues .

La méthode la plus couramment utilisée dans ce cadre est la transformée de Fourier rapide (FFT), qui permet de représenter l'amplitude du signal en fonction de la fréquence. Cela facilite la détection de signatures vibratoires caractéristiques de défauts tels que le déséquilibre, les défauts d'alignement, ou les usures de roulements [20].

I.4.2.2 Avantages de l'analyse spectrale

L'analyse spectrale présente plusieurs avantages :

- **Simplicité et rapidité de traitement :** la FFT est rapide à mettre en œuvre, même en temps réel
- **Clarté des résultats :** les spectres de fréquence permettent une visualisation intuitive des anomalies
- **Efficacité pour les signaux stationnaires** : lorsque les signaux ont des caractéristiques constantes dans le temps, l'analyse spectrale est particulièrement pertinente .

De plus, les systèmes de maintenance industrielle intègrent souvent cette technique comme première étape dans l'analyse vibratoire, permettant ainsi un tri préliminaire avant des traitements plus avancés [19].

I.4.2.3 Limites de l'analyse spectrale classique

Malgré son efficacité, l'analyse spectrale classique présente plusieurs limites, notamment face aux signaux non stationnaires dont les caractéristiques évoluent au cours du temps. Dans ce cas, la FFT ne permet pas de localiser dans le temps l'apparition des fréquences anormales. Par exemple, dans une turbine à gaz, un défaut intermittent peut ne pas être détecté si l'analyse se fait sur une période où le phénomène ne se manifeste pas .

D'autres limitations incluent :

- La perte d'information temporelle
- L'incapacité à détecter certains défauts précoces (faible énergie)

- La nécessité d'une interprétation experte des spectres .

I.4.2.4 Techniques avancées d'analyse spectrale

Pour pallier ces limitations, plusieurs techniques avancées ont été développées :

- L'analyse d'enveloppe, particulièrement efficace pour détecter les défauts de roulements à partir des impacts cycliques
- La transformée de Fourier à court terme (STFT), qui permet une localisation temporelle limitée
- L'analyse temps-fréquence par ondelettes, qui offre une résolution adaptative selon la fréquence, ce qui est particulièrement utile pour les signaux transitoires .

Ces techniques permettent une analyse plus fine et plus sensible, surtout dans les cas complexes où les défauts apparaissent brièvement ou évoluent rapidement.

I.4.2.5 Application de l'analyse spectrale dans les turbines à gaz

Dans le contexte des turbines à gaz, l'analyse spectrale est couramment utilisée pour :

- Surveiller l'état des roulements et des paliers
- Détecter les problèmes de déséquilibre ou d'alignement des rotors
- Identifier des phénomènes de résonance ou de vibrations d'origine aérodynamique .

La fiabilité du diagnostic dépend toutefois de la qualité de l'acquisition du signal, du positionnement des capteurs, et de la pertinence des fréquences de référence utilisées dans l'analyse. C'est pourquoi l'analyse spectrale est souvent couplée à d'autres méthodes, comme l'analyse d'enveloppe ou l'analyse par ondelettes, dans une démarche de diagnostic plus robuste et plus complète .[20][21]

I.4.3 Conclusion

La surveillance vibratoire et l'analyse spectrale constituent deux approches complémentaires indispensables au diagnostic des machines tournantes. Alors que la première détecte les anomalies globales grâce au suivi des niveaux vibratoires, la seconde permet de localiser précisément les défauts par l'identification de leurs fréquences caractéristiques.

Cependant, isolément, chacune présente des limitations, particulièrement pour les signaux non stationnaires ou les défauts intermittents. Leur utilisation conjointe améliore considérablement la fiabilité du diagnostic, comme le démontrent leurs applications dans les industries critiques (énergie, aéronautique), où elles réduisent les arrêts imprévus et optimisent les coûts de maintenance .

À titre d'exemple, dans les turbines à gaz, cette synergie permet de différencier un déséquilibre rotorique (détecté par surveillance vibratoire) d'un défaut de roulement (identifié par analyse spectrale). Pour dépasser les limites actuelles, des approches innovantes comme l'analyse temps-fréquence (ondelettes), les capteurs intelligents et l'intelligence artificielle s'avèrent prometteuses, ouvrant la voie à une surveillance industrielle plus robuste et prédictive [24].

I.5 Introduction à l'analyse par ondelettes

Les signaux se divisent en deux grandes catégories : stationnaires, dont le contenu fréquentiel reste constant dans le temps, et non stationnaires, dont les fréquences varient avec le temps. La majorité des signaux réels appartiennent à cette seconde catégorie .

L’analyse des signaux non stationnaires représente un défi, car les méthodes classiques comme la transformée de Fourier ne permettent pas de localiser les changements fréquentiels dans le temps. Elles offrent uniquement une vue globale en fréquence, ce qui limite leur efficacité face à des phénomènes transitoires.

La transformée en ondelettes s’impose alors comme une solution performante, capable d’extraire à la fois les informations temporelles et fréquentielles.

Elle permet une représentation temps-fréquence adaptée, essentielle pour l’étude de signaux complexes et évolutifs .

I.5.1 Principes mathématiques des ondelettes

Une ondelette est une fonction oscillante de courte durée utilisée pour analyser des signaux à différentes échelles. La fonction de base, appelée mother wavelet, génère une famille d’ondelettes par translation et dilatation, permettant ainsi une exploration fine du signal .

La décomposition multi-résolution (MRA) divise le signal en niveaux successifs d’approximation et de détails, offrant une bonne résolution temporelle pour les hautes fréquences, et fréquentielle pour les basses .

La transformée en ondelettes continue (CWT) fournit une analyse détaillée du signal à toutes les échelles et positions, mais elle est coûteuse en calcul . À l’inverse, la transformée en ondelettes discrète (DWT) permet une analyse plus efficace numériquement tout en conservant la possibilité de reconstruire le signal initial .

Les ondelettes les plus utilisées sont :

- **Haar :** simple et rapide .
- **Daubechies :** précises et adaptées à la reconstruction .
- **Morlet :** idéale pour les signaux oscillatoires . [25][26]

- **Table des équations liées à l'analyse par ondelettes**

Description	Équation
Condition d'admissibilité – permet la reconstruction fidèle du signal	$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\lvert\hat{\psi}(\omega)\rvert^2}{\lvert\omega\rvert} d\omega < \infty$
Transformée en ondelettes continue (CWT)	$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{\lvert a\rvert}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi^*\left(\frac{(t-b)}{a}\right) dt$
Transformée en ondelettes discrète (DWT)	$W[j,k] = \sum_n x[n] \cdot \psi_{j,k}[n]$ $avec : \psi_{j,k}[n] = 2^{-j/2}\psi\left(2^{-j}n - k\right)$
Reconstruction du signal (CWT inverse)	$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W(a,b) \cdot \psi_{a,b}(t) \frac{da\, db}{a^2}$
Relation entre filtres passe-bas et passe-haut	$g[k] = (-1)^k h[1-k]$
Analyse multi-résolution (MRA)	$x(t) = A_j(t) + \sum_{k=1}^{j} D_k(t)$
Ondelette de Morlet	$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}$
Ondelette de Haar	$\psi(t) = \begin{cases} 1 & si 0 \le t < 0.5 \\ -1 & si 0.5 \le t < 1 \\ 0 & ailleurs \end{cases}$
Erreur quadratique moyenne entre le signal original et reconstruit	$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \lvert x[n] - \hat{x}[n]\rvert^2\right)}$

Tableau I.1 : Table des équations liées à l'analyse par ondelettes

I.5.2 Les avantages des ondelettes pour l'analyse des signaux non stationnaires

L'analyse par ondelettes offre plusieurs avantages importants pour l'étude des signaux non stationnaires, notamment :

- **Représentation temps-fréquence :** permet de visualiser simultanément l'évolution temporelle et fréquentielle du signal .
- **Résolution adaptative :** offre une bonne résolution temporelle pour les hautes fréquences et une bonne résolution fréquentielle pour les basses fréquences.
- **Détection des phénomènes transitoires :** idéale pour identifier les changements soudains dans le signal, souvent invisibles avec les méthodes classiques .
- **Analyse localisée :** les ondelettes permettent d'isoler les caractéristiques locales du signal, ce qui facilite l'interprétation des comportements complexes .
- **Visualisation claire des composantes fréquentielles instantanées :** utile pour séparer et reconstruire les composantes significatives du signal [25][26].

I.6 Conclusion

Ce chapitre ne constitue donc pas un simple rappel théorique, mais un fondement sur lequel repose l'ensemble de notre travail. Nous avons établi une vision globale et détaillée des turbines à gaz : leur fonctionnement, leurs composants, ainsi que les types de défauts susceptibles de survenir. Cette compréhension approfondie nous a permis de mieux cerner les défis auxquels elles font face sur le plan opérationnel. Il est apparu clairement que les méthodes classiques de diagnostic, telles que l'analyse spectrale et vibratoire, s'avèrent insuffisantes lorsque les signaux sont non stationnaires ou varient dans le temps.

Partant de ce constat, nous avons orienté nos recherches vers des techniques modernes, notamment l'analyse par ondelettes, qui s'est révélée prometteuse grâce à sa capacité à traiter ce type de signaux. Dans ce cadre, nous avons également introduit les fondements mathématiques de cette méthode, afin de mieux comprendre son fonctionnement et ses avantages dans l'analyse des signaux complexes.

Ainsi, ce chapitre a constitué un véritable point de départ vers une compréhension plus approfondie et une analyse pratique, avec pour objectif de développer une méthode de diagnostic efficace, précise et adaptée aux réalités du terrain.

Dans les chapitres à venir, nous aborderons la classification des défauts à l'aide des ondelettes, depuis la collecte et le prétraitement des données jusqu'à la discussion des conclusions finales de notre travail

Chapitre II : Classification des défauts par la technique d'ondelettes

II.1 Introduction

Après avoir établi, dans le premier chapitre, les bases du fonctionnement des turbines à gaz ainsi que les types de défauts pouvant affecter leur performance, nous avons également examiné les méthodes classiques de diagnostic telles que l'analyse spectrale et la surveillance vibratoire. Il est apparu que ces approches présentent des limites notables lorsqu'il s'agit d'analyser des signaux non stationnaires ou complexes, évoluant dans le temps. Cette situation nous a conduits à adopter une approche plus précise : l'analyse par ondelettes, reconnue pour sa capacité à localiser finement les phénomènes dans les domaines temporel et fréquentiel.

Cependant, malgré son potentiel, l'analyse par ondelettes soulève plusieurs défis techniques et pratiques. L'un des principaux défis réside dans le choix de la fonction ondelette mère, car les propriétés idéales telles que la symétrie et l'orthogonalité sont rarement réunies dans une seule base. De plus, l'analyse de signaux complexes nécessite une base adaptée au contexte de l'application, mais il existe un manque de méthodologie structurée pour sélectionner la base optimale en fonction des caractéristiques spécifiques des signaux à étudier. À cela s'ajoute la difficulté liée à la structure multidimensionnelle de certaines données industrielles, qui rend l'application directe des théories classiques de l'ondelette — principalement conçues pour des signaux unidimensionnels — peu efficace.[27]

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur la démarche de classification des défauts à l'aide de l'analyse par ondelettes, en exposant les principales étapes du processus, depuis la collecte et le prétraitement des données jusqu'à l'extraction des caractéristiques nécessaires à la détection des anomalies. L'objectif est d'élaborer une méthodologie rigoureuse, adaptable aux spécificités des signaux issus des turbines à gaz.

II.2 Collecte de données

La collecte de données revêt une importance majeure dans le cadre du diagnostic, de la surveillance et de la détection précoce des défauts des turbines à gaz. Cette démarche s'appuie sur l'utilisation de capteurs dédiés qui ont la capacité de transformer diverses grandeurs physiques, telles que la pression, la température ou les vibrations, en signaux électriques traités de manière exploitable. Intégrés dans une chaîne de mesure complète, ces capteurs permettent une analyse fine basée sur les ondelettes, comme cela est approfondi dans cette étude.

II.2.1 Sources de données :

II.2.1.1 Capteur de vibration piézoélectrique (Accéléromètre piézoélectrique)

L'accéléromètre piézoélectrique est un capteur spécialement conçu pour la mesure des vibrations mécaniques dans les turbines à gaz. L'effet piézoélectrique, qui correspond à la capacité d'un cristal à produire une charge électrique en réponse à une contrainte mécanique, est à l'origine de ce phénomène. Cette charge est ensuite traitée électroniquement afin d'obtenir la vitesse ou le déplacement. Ce procédé permet de détecter d'éventuels défauts, tels que les désalignements, les jeux mécaniques ou l'usure des roulements. Dans la plupart des cas, le capteur est fixé de manière permanente au niveau des chaises porteuses ou du châssis de l'équipement. Cette fixation rigide est assurée par un goujon, un élément de fixation qui garantit une stabilité optimale du capteur. En effet, l'orientation des vibrations influe sur la configuration optimale de l'installation, qui peut être horizontale, inclinée, ou même triaxiale, permettant une surveillance exhaustive dans les trois dimensions

- **Type de signal délivré :**

La sortie du capteur est une charge électrique, convertie en un signal de tension représentant soit l'accélération, soit la vitesse des vibrations . [28][30]

Figure II.1 : Capteur de vibration piézoélectrique [57]

II.2.1.2 Capteur de température Pt100

Le capteur Pt100, appartenant à la famille des détecteurs de température à résistance (RTD), est fabriqué à partir de platine et possède une résistance de 100 ohms à 0°C. Dans le cadre de l'ingénierie des turbines à gaz, ce type de capteur joue un rôle crucial dans la surveillance de la température. Il est en effet employé pour contrôler avec précision la température dans des zones critiques telles que les paliers de roulement et les circuits de refroidissement de l'huile. Le

fonctionnement de ce dispositif repose sur la variation linéaire de la résistance électrique du platine en fonction de la température. Cette variation est ensuite convertie en signal électrique par l'intermédiaire d'un pont de Wheatstone. Afin d'assurer une installation optimale, le capteur est inséré dans un puits thermométrique et monté horizontalement ou en biais, à proximité des zones de transfert thermique. Dans le cas où les conditions seraient instables, il est possible de recourir à l'utilisation d'un liquide absorbant les chocs afin de protéger le capteur des perturbations mécaniques.

- **Type de signal délivré :**

Le capteur fournit une résistance électrique, convertie ensuite en tension afin de représenter la température mesurée [28][29]

Figure II.2 : Capteurs de température (Pt100) [58]

II.2.1.3 Capteur de pression piézoélectrique

Le capteur de pression piézoélectrique est un dispositif de mesure de la pression qui est couramment utilisé dans le cadre des turbines à gaz. Il permet de déterminer les variations de pression au sein des conduites ou des chambres de compression. Ce dispositif est basé sur une membrane dotée d'une jauge de contrainte qui subit une déformation sous l'effet de la pression, induisant ainsi une réponse électrique mesurable. Le fonctionnement de ce dispositif s'articule autour de la conversion d'une déformation mécanique en une tension électrique proportionnelle. Ce type de capteur présente une grande versatilité en matière de configuration. Il est disponible en versions à membrane, à piston ou à tube. Sa robustesse face aux environnements extrêmes en fait un choix privilégié dans le secteur des turbines à gaz. L'installation de ces dispositifs s'effectue généralement sur les conduites de vapeur ou de gaz, de manière verticale ou latérale, à l'aide de raccords filetés ou de membranes d'étanchéité. Afin de garantir la fiabilité des mesures, il est préconisé de l'installer dans des zones caractérisées par des vibrations faibles

- **Type de signal délivré :**

Le signal de sortie est généralement une tension ou un courant analogique, proportionnel à la pression exercée. [28]

Figure II.3 : Capteur de pression piézoélectrique [69]

II.2.2 Méthode de collecte des données dans une turbine à gaz

Le processus de collecte de données dans une turbine débute par la transformation d'une grandeur physique en signal électrique à l'aide d'un capteur spécifique. Ce signal subit ensuite un conditionnement, incluant un filtrage et une amplification, avant d'être converti en signal numérique par le biais d'un convertisseur analogique-numérique (CAN). Les données ainsi obtenues sont alors analysées, visualisées et stockées à l'aide d'un système embarqué ou informatique dédié . [28]

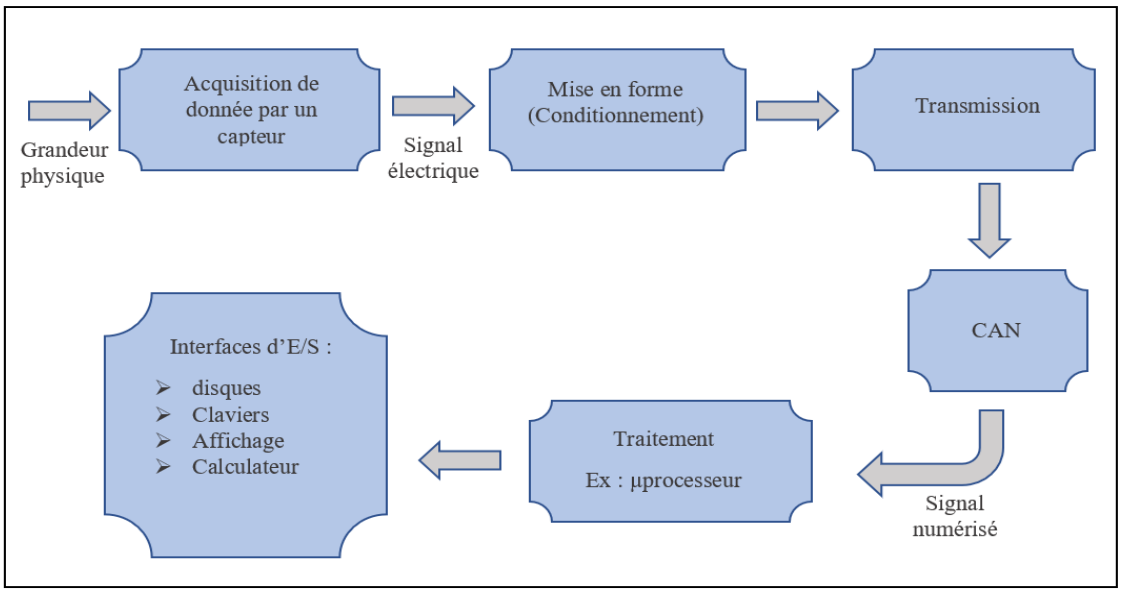

Figure II.4 : Schéma fonctionnel de la chaîne de mesure

II.2.3 Types de signaux à analyser

Lors de la surveillance des systèmes industriels tels que les turbines à gaz, l'analyse des signaux issus des capteurs constitue une étape cruciale dans le processus de diagnostic et de maintenance préventive.

Ces signaux, mesurés par des capteurs de pression, de température ou de vibration, sont généralement traités dans deux domaines principaux : le domaine temporel et le domaine fréquentiel.

Chaque type d'analyse permet de mettre en évidence des caractéristiques spécifiques du comportement de la machine, et leur complémentarité offre une vision plus précise de l'état de fonctionnement du système surveillé.

II.2.3.1 Analyse temporelle

Le traitement du signal dans le domaine temporel comprend l'utilisation de filtres de décimation programmables ainsi que de fonctions de fenêtrage sélectionnables. Les signaux de vibration sont acquis directement au niveau du nœud capteur sous forme d'un signal temporel , permettant ainsi une caractérisation locale de l'état vibratoire à l'aide de méthodes statistiques ou d'analyses basées sur l'évolution temporelle.

Dans le mode de collecte manuel, chaque axe enregistre 512 échantillons, ce qui assure une représentation détaillée du signal. Avant toute analyse numérique, les signaux analogiques captés dans la nature – tels que la vitesse, l'accélération, la température, la pression ou la vibration – doivent être convertis en forme numérique afin de pouvoir être traités. De plus, la plateforme de capteurs intègre un système de stockage local permettant d'enregistrer les valeurs brutes du signal d'accélération en domaine temporel avant leur transmission.

II.2.3.2 Analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle repose sur la transformation du signal vibratoire du domaine temporel vers le domaine fréquentiel. Cette conversion permet d'éliminer les composantes de faible énergie, en ne conservant que celles qui capturent l'essentiel de l'information utile du signal.

Concrètement, un signal temporel réel de 512 points est transformé en un spectre fréquentiel de 256 points par axe, grâce à un traitement basé sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT). Cette transformation peut être réalisée directement au niveau du capteur, équipé d'un module d'analyse fréquentielle intégré. Les signaux obtenus après FFT sont ensuite transmis à la station de base pour exploitation ultérieure. [31]

Capteur	Grandeur mesurée	Effet utilisé	Type de signal généré	Analyse recommandée
Capteur de pression piézoélectrique	Pression	Piézoélectricité	Signal analogique – Charge	Temporelle (et parfois fréquentielle)
Capteur de température Pt100	Température	Résistance thermique (RTD)	Signal analogique – Tension (via résistance)	Temporelle uniquement
Capteur de vibration piézoélectrique ou accéléromètre piézoélectrique	Vibration / Accélération	Piézoélectricité	Signal analogique – Charge	Temporelle et fréquentielle

Tableau II.1 : Types de signaux générés par les capteurs étudiés

II.3 Prétraitement des signaux:

II.3.1 Filtrage et normalisation des données

II.3.1.1 Filtrage des données

Processus consistant à affiner les informations les plus pertinentes d'un vaste ensemble de données à l'aide de conditions ou de critères spécifiques afin d'éliminer les fréquences indésirables. Cela rend l'analyse plus précise et efficace, permettant de filtrer les données et d'analyser rapidement les données pertinentes sans avoir à les examiner en profondeur. L'objectif est d'améliorer la qualité du signal avant de l'analyser.

L'un des appareils les plus efficaces que nous utilisons dans le processus de filtration est levibrometre, qui permet de mesurer les vibrations très fines des objets, [32]

Figure II.5 : Appareils vibrometre de la centrale électrique de Messila (SBE)

II.3.1.2 Normalisation des données :

Unir les normes et valeurs de données provenant de différentes sources dans un format unique en définissant et en appliquant différents standards et protocoles afin de les maintenir dans une plage cohérente. Cela permet de faciliter la comparaison et l'analyse de différentes données sur une base commune. [33]

II.3.2 Sélection des signaux pertinents

La sélection des signaux contenant des informations relatives aux défauts et aux phénomènes physiques est un processus important dans de nombreux domaines. Ce processus implique l'analyse de divers signaux afin d'identifier tout changement ou écart pouvant indiquer la présence de défauts ou de phénomènes physiques. [34]

- **Identifier les signaux pertinents**

Les signaux analysés peuvent inclure une variété de données, y compris :

- **Signaux acoustiques :** l'analyse des signaux acoustiques peut être utilisée pour détecter des fissures ou des dommages sur des structures, ou pour évaluer l'état d'un équipement.
- **Signaux de capteurs :** Divers capteurs, tels que des appareils de mesure de la température, de la pression ou des vibrations, peuvent être utilisés pour collecter des données permettant d'identifier les défauts.

- **Identifier les phénomènes physiques associés aux défauts**

L'analyse des signaux permet d'identifier les phénomènes physiques susceptibles d'indiquer la présence de défauts. Ces phénomènes peuvent être les suivants :

- **Fissuration :** Une modification des signaux acoustiques ou ondulatoires peut indiquer la présence de fissures dans les structures ou les matériaux.

- **Corrosion :** Les changements de température ou de pression peuvent indiquer la présence de corrosion dans les matériaux ou les dispositifs.
- **Fissuration :** Une modification des vibrations ou des signaux d'ondes peut indiquer la présence de fissures dans les structures.
- **Changements de densité :** Une modification des signaux acoustiques ou ondulatoires peut indiquer une modification de la densité ou de la structure interne des matériaux.

➢ **Analyse statistique et modélisation**

L'analyse statistique et la modélisation mathématique sont utilisées pour identifier les signaux qui contiennent des informations relatives aux défauts ou aux phénomènes physiques. Diverses techniques peuvent être utilisées, notamment :

- **L'analyse de fréquence :** L'analyse de fréquence peut être utilisée pour identifier les changements de fréquence des signaux qui peuvent indiquer la présence de défauts.
- **L'analyse temporelle :** L'analyse temporelle peut être utilisée pour identifier les changements dans la durée ou le temps des signaux qui peuvent indiquer des défauts.
- **Modèles prédictifs :** La modélisation prédictive peut être utilisée pour identifier les signaux susceptibles d'indiquer l'apparition de défauts à l'avenir.

➢ **l'évaluation finale**

Les signaux analysés sont évalués afin d'identifier tout changement ou écart pouvant indiquer la présence de défauts ou de phénomènes physiques. Cette évaluation peut comprendre :

- **Comparaison avec des données de référence :** Les signaux analysés peuvent être comparés à des données de référence afin d'identifier tout écart susceptible d'indiquer des défauts.
- **Validation des résultats :** Les résultats peuvent être validés en utilisant d'autres sources de données ou en effectuant des tests supplémentaires.[34]

II.4 Application de la transformée en ondelettes

La transformée en ondelettes, qui permet l'analyse de signaux non stationnaires, est un outil puissant dans de nombreuses applications, y compris le traitement du signal Le choix de l'onde mère est critique et dépend de la nature du signal à analyser. Il existe des ondes telles que les ondes de Dobsches et les ondes de Morlet, chacune ayant ses propres caractéristiques et applications.

II.4.1 Choix de l'ondelette mère

➢ **Ondelette de Morlet**

Une onde de Morlet est une onde à valeur complexe constituée d'une onde plane bien adaptée à l'analyse des signaux continus et périodiques .

Les ondes de Morlet ont une bonne résolution temporelle et fréquentielle et sont couramment utilisées dans les applications d'analyse temporelle et fréquentielle (analyse des données sismiques).

La nature complexe des ondes de Morlet permet d'extraire des informations sur l'amplitude et la phase du signal.

- **Ondes de Daubechies**

Les ondes de Daubechies sont une famille d'ondes orthogonales avec support intégré. Elles sont caractérisées par leurs propres moments de fuite et sont nommées en fonction du nombre de moments de fuite (Daubechies 4 ou db4)

Les ondes de Daubechies sont largement utilisées dans les applications de traitement des signaux en raison de leur capacité à fournir une bonne approximation. Les ondes de Daubechies ont une bonne localisation temporelle et sont capables de représenter des signaux plus ou moins lisses.

Lorsque le nombre de moments de fuite augmente, la fonction d'onde devient plus lisse, mais au prix d'une augmentation du volume de support.

Les ondes de Daubechies sont couramment utilisées dans les algorithmes de compression (JPEG2000) et les applications de suppression du bruit. [35]

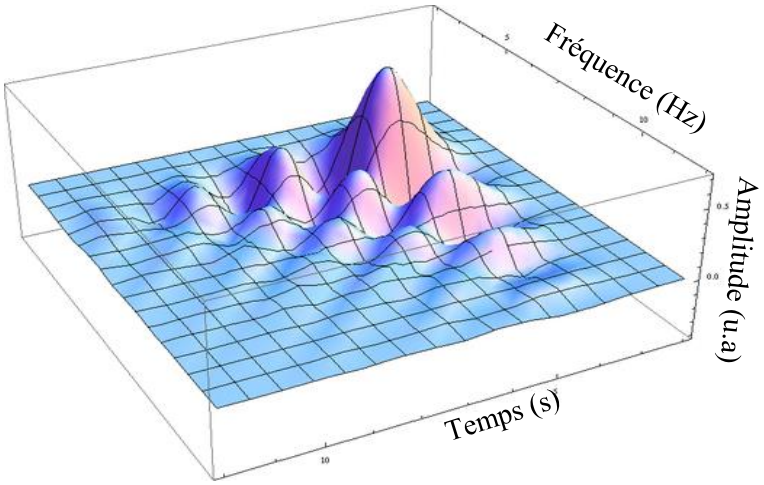

Figure II.6 : Représentation tridimensionnelle de l'ondelette de Daubechies [35]

- **Caractéristiques des ondes de Daubechies et mode de sélection**

La forme de l'onde mère détermine sa capacité à capturer des caractéristiques spécifiques du signal, telles que des transitions nettes, des variations douces ou des motifs oscillatoires. La symétrie est importante pour éviter les distorsions de phase dans les coefficients d'ondelettes, les ondes symétriques, telles que le chapeau mexicain, sont privilégiées dans certaines applications où les informations de phase sont critiques (traitement audio), les ondes asymétriques, telles que

les ondes de Daubechies, peuvent introduire des déphasages dans les ondelettes mais offrent une meilleure résolution temporelle. Outre le type de signal, la nature du défaut et le niveau de détail, les ondes de Daubechies sont couramment utilisées dans les algorithmes de compression (JPEG2000) et les applications de suppression du bruit. [36]

II.4.2 Décomposition des signaux en coefficients d'ondelettes

Il s'agit d'un processus de décomposition des ondes en un ensemble de signaux à plusieurs niveaux qui peut être appliqué aux données soit une seule fois, soit de manière répétée Lorsqu'il est utilisé de manière répétée après l'analyse des données originales, les approximations successives sont analysées alternativement, de sorte que l'ensemble de données est divisé en plusieurs ensembles de données à faible résolution qui sont progressivement lissés Le choix du type d'ondelettes (Haar, famille de Daubechies, Morlet, Shannon, etc.) pour la décomposition DWT peut affecter les coefficients résultants.) pour la décomposition DWT peut affecter les coefficients résultants. Le choix entre des filtres d'ondelettes de faible largeur (par exemple Haar et Daubechies) et des filtres de plus grande largeur (Daubechies, Morlet, etc.) se justifie par les effets indésirables qui peuvent résulter de la sélection des filtres. Par exemple, les vagues de très faible largeur produisent parfois des effets tels que des blocs, des ailerons de requin et des triangles irréalistes. D'autre part, les vagues plus longues peuvent être affectées par l'effet des conditions aux limites sur les coefficients, la réduction de la localisation et l'augmentation de la charge de calcul. Une stratégie suggérée dans la pratique consiste à choisir la plus petite largeur qui donne des résultats acceptables. Toutefois, c'est généralement le contexte de l'application qui détermine les résultats acceptables.[37]

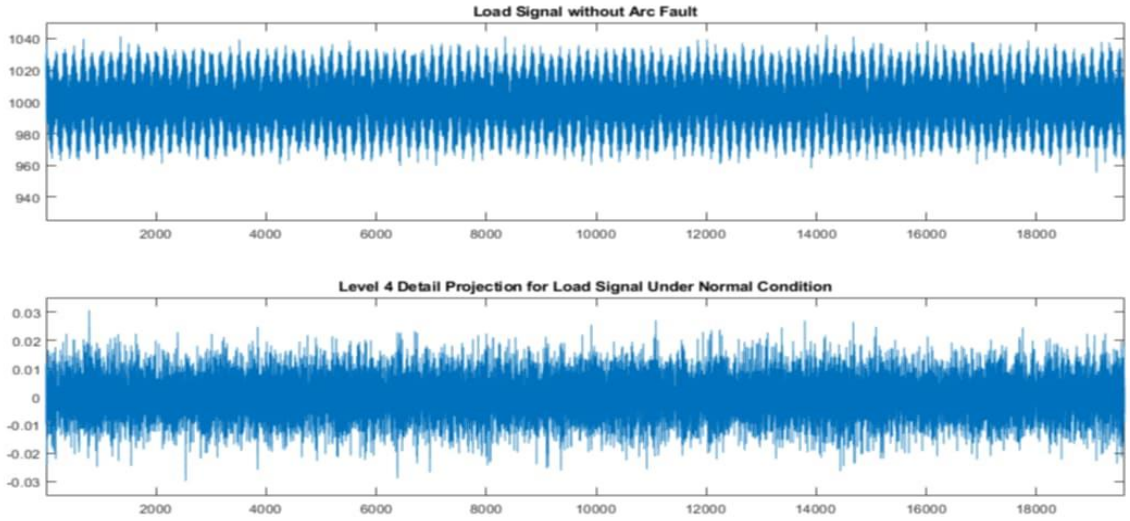

Figure II.7 : Signal mère et signal filtré par onde dans des conditions normales.[38]

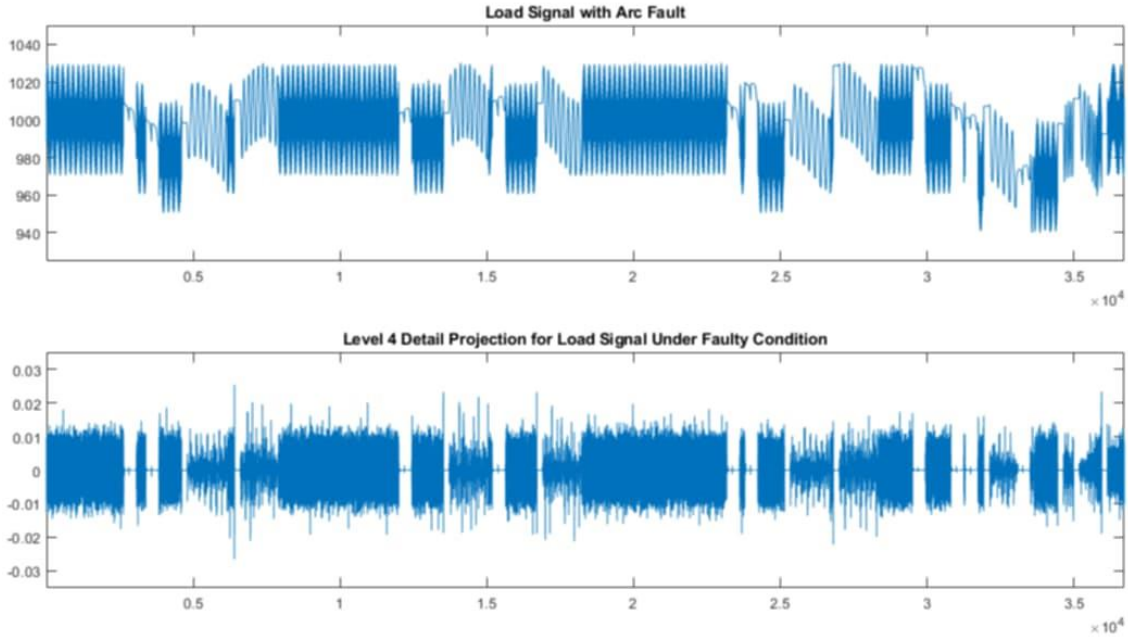

Figure II.8 : Signal de charge brut et signal filtré par ondes dans des conditions défectueuses. [38]

II.5 Extraction des caractéristiques

II.5.1 Identification des motifs caractéristiques des défauts

Les modèles de défauts sont identifiés en connaissant les caractéristiques des ondes extraites des signaux qui contiennent des signatures, des empreintes digitales ou des modèles caractéristiques du défaut, c'est-à-dire la présence de défauts tels que des défaillances mécaniques comme des dommages au support ou des vibrations, en utilisant la transformée en ondelettes (DWT) pour extraire des informations des signaux de vibration ou du domaine temporel.

- **Conversion des signaux dans le domaine temps-fréquence**

Transformée en ondelettes discrète (DWT) :

- Utilisée pour analyser les signaux non stationnaires (tels que les vibrations ou les ondes sonores).
- Elle divise le signal en différentes composantes de fréquence (ondelettes).
- Elle détecte les changements brusques ou les modèles subtils associés aux défauts.

- **Extraction des caractéristiques**

Après la transformation, les paramètres suivants sont extraits :

- Énergie dans des bandes de fréquences spécifiques (indiquant les zones défectueuses).
- Écart-type (mesure la dispersion du signal par rapport à la normale).

- Symétrie (révèle l'irrégularité de la distribution du signal).
- Pics et creux inhabituels (signes d'anomalies).

➢ **Analyse des schémas**

- Comparaison des caractéristiques avec des données de référence
- Identifier les schémas récurrents (par exemple, certaines fréquences qui apparaissent en présence d'une fissure).
- Détection d'anomalies à l'aide de
- l'analyse statistique (par exemple, le score Z).
- des algorithmes de regroupement

➢ **Utilisation de l'apprentissage automatique pour la classification**

Algorithmes courants :

- Arbres de décision : Interprétation facile des modèles.
- SVM (Support Vector Machines) : Efficace pour séparer des modèles complexes.
- Réseaux neuronaux (NN) : Grande précision dans la reconnaissance de modèles non linéaires. [38]

✓ **Exemple d'application**

dans la surveillance de l'état des moteurs :

- Les signaux de vibration sont transformés à l'aide de la DWT.
- Les caractéristiques telles que l'énergie dans la plage de 5 à 10 kHz (indiquant une détérioration du roulement) sont extraites.
- Le défaut est classé à l'aide d'un SVM avec une précision pouvant atteindre 98 %.

✓ **Avantages :** Précision dans la détection des défauts précoces avant qu'ils ne s'aggravent, ce qui réduit les coûts de maintenance.

✓ **Outils suggérés**

- **Python :** Avec des bibliothèques telles que PyWavelets pour la transformation en ondelettes.
- **MATLAB :** Pour les outils avancés de traitement du signal.[38]

II.5.2 Utilisation des coefficients d'ondelettes pour la détection des anomalies

Extracting features using waveform coefficients to detect anomalies is an effective approach that exploits the properties of waveform transformations to identify changes or deviations from

normal behavior. By analyzing the signal at different frequencies and scales, it is possible to highlight the abnormal features that may be hidden in the original signal. Les coefficients d'ondelettes représentent une forme comprimée du signal, l'analyse de ces coefficients permet de:

- Détecter des variations anormales.
- Comparer les signaux endommagés et les signaux sains. [38]

II.6 Validation des résultats

➢ Importance de la validation

La validation est essentielle pour s'assurer que les approches adoptées sont réellement capables de détecter et de caractériser les défauts, malgré la diversité des signatures vibratoires pouvant résulter de différents types de pannes. Dans les systèmes rotatifs, les réponses dynamiques peuvent varier selon la nature de l'anomalie ou même selon la structure de la machine. Par conséquent, valider les résultats permet de confirmer la pertinence des algorithmes développés et leur capacité à traiter des signaux complexes et non stationnaires. [39]

➢ Objectifs de la validation

Les objectifs principaux de la validation consistent à :

- Évaluer la capacité de classification du système entre états normaux et défaillants ;
- Vérifier l'efficacité des bases ondelettes choisies pour représenter fidèlement les signaux;
- Tester la stabilité des performances face à des données réelles et bruitées ;
- S'assurer que la matrice de covariance des coefficients est quasi diagonale, facilitant ainsi l'utilisation de techniques de seuillage.

En outre, la validation permet de juger si les caractéristiques statistiques extraites via l'apprentissage profond sont suffisamment représentatives pour permettre un diagnostic fiable.

➢ Méthodes et outils de validation

Divers outils sont mobilisés pour évaluer la qualité des résultats. Parmi eux :

- L'analyse des performances à l'aide de métriques telles que la précision, le rappel et le taux d'erreur ;
- La comparaison des représentations du signal avant et après transformation ondelette pour s'assurer de la conservation des composantes essentielles ;
- L'application de méthodes de seuillage dans des bases mères quasi-diagonalisées, ce qui améliore l'estimation du signal ;
- L'adaptation des bases ondelettes ou multi-ondelettes aux caractéristiques spécifiques des défauts pour maximiser la sensibilité du diagnostic.

L'utilisation conjointe de ces outils assure une évaluation approfondie de la robustesse des méthodes proposées.[40][41]

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur l'aspect théorique de la technique des ondelettes et sur son utilisation dans la classification des défauts affectant les turbines à gaz. Nous avons étudié les différentes étapes de la collecte et du traitement des données, et appris à choisir l'ondelette mère appropriée ainsi qu'à utiliser les coefficients de transformation pour extraire les indicateurs révélant la présence de défauts. Nous avons également cherché à comprendre la relation entre les caractéristiques du signal et la nature du défaut, et il est apparu que les signaux collectés à partir des capteurs contiennent des informations cachées et importantes, que l'analyse par ondelettes permet de révéler et d'exploiter avec une grande précision.

Nous avons compris par ailleurs que le choix du type d'ondelette et du nombre de niveaux de décomposition influe considérablement sur la qualité des résultats, et que chaque étape du processus – de la collecte des données à l'extraction des caractéristiques – joue un rôle essentiel dans la réussite de la classification. Cette prise de conscience nous a permis de mesurer l'importance d'une analyse rigoureuse à chaque étape de la méthodologie.

Cette chapitre s'est révélée indispensable pour établir une base solide qui nous permettra de passer au chapitre suivant, consacré à l'application pratique. Nous y mettrons en œuvre la technique sur une turbine à gaz , afin d'évaluer son efficacité dans la détection des défauts en conditions de fonctionnement réelles, et d'identifier les difficultés éventuelles rencontrées.

Chapitre III : L'application de la technique d'ondelette au diagnostic des défauts dans les machines tournantes

III.1 Introduction

De nombreux signaux sont non stationnaires, ce qui exclut l'utilisation de la transformée de Fourier (TF) ou de la transformée de Fourier à court terme (TFCT), car elles ne permettent pas d'analyser ce type de signal. Dans ce chapitre, nous aborderons certaines méthodes conçues pour ce type de signal. Il s'agit des méthodes de transformée par ondelettes. La première section décrit en détail la méthode de transformée par ondelettes : son historique, son principe de fonctionnement, les différents types d'ondelettes et leur mode de calcul. Elle présente également l'état actuel de l'art de certaines recherches utilisant la méthode (WT) dans le domaine du diagnostic mécanique La deuxième partie du chapitre est consacrée à l'étude expérimentale sur un banc d'essais composés d'un réducteur à plusieurs étages entrainés par un moteur asynchrone. [42].

III.2 Concepts et terminologie:

Certaines demandes de l'énergie électrique peuvent être très localisées, il n'est donc pas intéressant de faire venir l'énergie de loin, compte tenu des frais du transport d'énergie .
Il est plus judicieux d'avoir à proximité de la demande des installations de faible puissance à démarrage très rapide.

Ces groupes dits, groupes de pointe ou turbines à gaz nécessitent des investissements bien plus faibles que des centrales importantes (turbines à vapeur)
La turbine à gaz est une machine rotative à combustion interne qui transforme l'énergie calorifique en énergie mécanique par un procédé continu qui comprime, chauffe et évacue un gaz.

- ✓ **Diagnostic :** Nous adopterons la définition qui a été retenue par les instances nationales et internationales de normalisation (AFNOR, CEI) « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test». [43]
- ✓ **Analyse vibratoire :** Parmi les techniques permettant la surveillance d'une machine, l'analyse vibratoire est la plus usitée en maintenance conditionnelle, qui nécessite d'analyser et de suivre l'évolution du spectre dans un ou plusieurs points de la machine, afin de cerner l'apparition d'éventuelles raies de défauts. Une simple mesure de vibration à l'aide d'un capteur, nous permet d'identifier et d'analyser la majorité des défauts qui peuvent apparaître.

III.3 Materiel utilise :

III.3.1 Vibromètre : SCHENCK « VIBRO PORT 41 » :

est un appareil d'analyse, d'enregistrement et de mesure de l'intensité vibratoire, fonctionne sur batterie et sur réseau. Sa légèreté est son côté fonctionnel lui procurent une grande mobilité.

Le VIBRO 41 permet d'effectuer les mesures suivantes :

- Équilibrages statiques et dynamiques du rotor en service ;
- Analyse temporelle et fréquentielle du rotor de la machine tournante ;
- Mesure de l'intensité vibratoire en accord avec la norme ISO 10816 ;
- Mesure de la vitesse de rotation et de phase ;

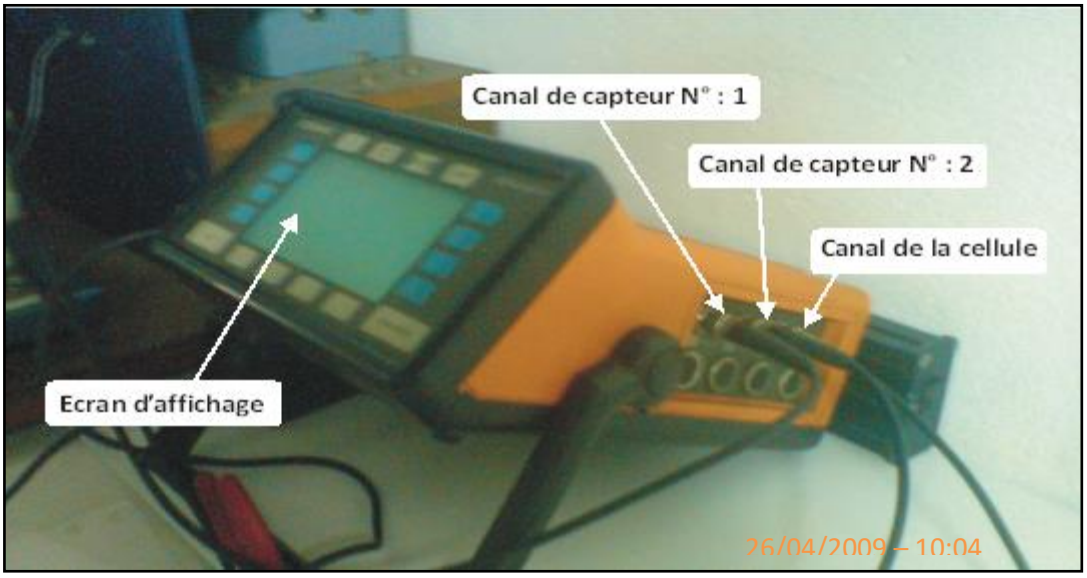

Figure III.1 : VIBRO PORT 41 SCHENCK (vibromètre)

❖ **Caractéristiques :**

- C'est un appareil qui assure la surveillance de deux paliers (bi-voies) avec une troisième voie réservée pour la cellule photoélectrique.
- Différents modes de mesure :
  - ✓ **Mode global :** c'est la valeur efficace du signal vibratoire.
  - ✓ **Mode analyse :** permet la visualisation des signaux vibratoires des différents ordres (fréquences).
  - ✓ **Mode de filtre suiveur :** permet d'obtenir les valeurs numériques des différents ordres avec leurs phases.

III.3.2 Capteurs :

- (02) Capteurs vélocimétriques type VS 080.
- (01) Cellule photoélectrique pour la mesure de phase et de la vitesse de rotation.

- **Micro portable :** équipé d'un logiciel de traitement de signal CM-400 fourni par le constructeur SCHENCK.

III.4 Choix de l'ondelette et du nombre de niveaux de calcul pour la décomposition

Pour chacune des approches de diagnostic des défauts par ondelettes, le nombre de niveaux doit être choisi avec soin afin de garantir que les niveaux élevés du signal (approximation et détails) couvrent toute la plage de fréquences le long de laquelle le composant défectueux évolue dans toutes les conditions de fonctionnement. La condition (III.1) permet de déduire le nombre minimal de niveaux de décomposition nécessaires pour obtenir un signal approximativement borné en fréquence sous la fréquence fondamentale. [42]:

$$2^{-(n_{ls}+1)} f_s < f \qquad \text{(III.1)}$$

En effet, le niveau de décomposition du signal d'approximation qui inclut les harmoniques autour du fondamental, est le nombre entier (n_{ls}) exprimé par l'équation (III.2) :

$$n_{ls} = \text{int}\left(\frac{log\left(\frac{f_s}{f}\right)}{\log(2)}\right) \qquad \text{(III.2)}$$

Avec:

- ✓ «int» pour les entiers,
- ✓ fs: fréquence d'échantillonnage,
- ✓ f: fréquence principale.

Donc pour une fréquence d'échantillonnage de 20KHz, et pour la fréquence de rotation de 16.67 Hz, en appliquant l'équation (III.2), le nombre de décomposition recommandé est :

$$n_{ls} = \text{int}\left(\frac{log\left(2*\frac{10^4}{16.67}\right)}{\log(2)}\right) = 10 \qquad \text{(III.3)}$$

Le choix de l'ondelette (type et ordre) appropriée à l'analyse de signaux tels que ceux des engrenages et des roulements n'est pas aisé. Pour répondre à la complexité du choix du type d'ondelette et de son ordre, et pour faciliter l'analyse de ces types de signaux en fonction de l'importance de leurs bruits, le nombre de niveaux de décomposition (nls) dépend de la fréquence d'échantillonnage (fs) du signal étudié [42].

L'arbre de décomposition en paquets d'ondelettes est leur représentation dans le tableau (III.1).

Niveau n_{ls}	Bandes de fréquences (Hz)
D1	10000 – 20000 Hz
D2	5000 – 10000 Hz
D3	2500 – 5000 Hz
D4	1250 – 2500 Hz
D5	625 – 1250 Hz
D6	312.5 – 625 Hz
D7	156.25-312.5Hz
D8	78.125-156.25Hz
D9	39..0625-78.125Hz
D10	19.53-39.0625Hz

Tableau III.1. Bandes de fréquences du signal ondelettes

Dans l'analyse en paquets d'ondelettes, les détails aussi bien que les approximations peuvent être décomposés. Ceci rapporte plus de (2n+1) de différentes décompositions du signal.

La méthode de paquets d'ondelettes est une généralisation de la décomposition en ondelettes qui offre une gamme plus riche de possibilités pour l'analyse du signal. L'approximation est alors elle-même coupée en approximation et détail de deuxième niveau, et le processus est répété. Pour une décomposition de « n »niveau, il y a (n+1) manières possibles de décomposition ou coder le signal [42]**.**

III.5 Etude exprimentale sur un banc d'essai d'un reducteur de vitesse.

Le dispositif expérimental est constitué d'un moteur à deux pôles à induction triphasé relié à une boîte de vitesses 4 étages. L'arbre de sortie du réducteur est relié à un générateur de courant continu à excitation séparée par un joint homocinétique. L'induit de la génératrice à courant continu est connecté à une charge à résistance variable 5.625kW. En faisant varier la résistance de charge à l'aide d'interrupteurs électriques. La boîte de transmission à quatre vitesses est illustrée dans la Fig. III.2. [42]**.**

La spécification particulière de la boîte de transmission est indiquée dans le tableau III.2.

- **Nombre des dents:**
- ✓ Première étage: 19/31
- ✓ Deuxième étage: 24/26
- ✓ Troisième étage: 29/21
- **Vitesse de rotation**

- ✓ Première étage: 2946 rpm (entré)
- ✓ Deuxième étage: 1806 rpm (milieu)
- ✓ Troisième étage: 1302 rpm (Sortie)

	Première étage	Deuxième étage	Troisième étage
Fréquence	49.1 Hz	30.1 Hz	21.7 Hz
	933 Hz	782 Hz	632 Hz

Tableau III.2 : Les paramètres du réducteur

La vitesse d'entrée de boîte de vitesses mécanique est la vitesse de moteur à induction (fréquence f_1). La vitesse de l'arbre intermédiaire (f_2). Le schéma unifilaire de l'engrènement est montré dans la Fig.III.2.

Où f_{m2}; f_{m3} *et* f_{m4} sont les fréquences d'engrènement des fréquences correspondant à la 2eme vitesse, 3ème et 4ème vitesse, respectivement. L'arbre de sortie est de fréquence (f_3) .

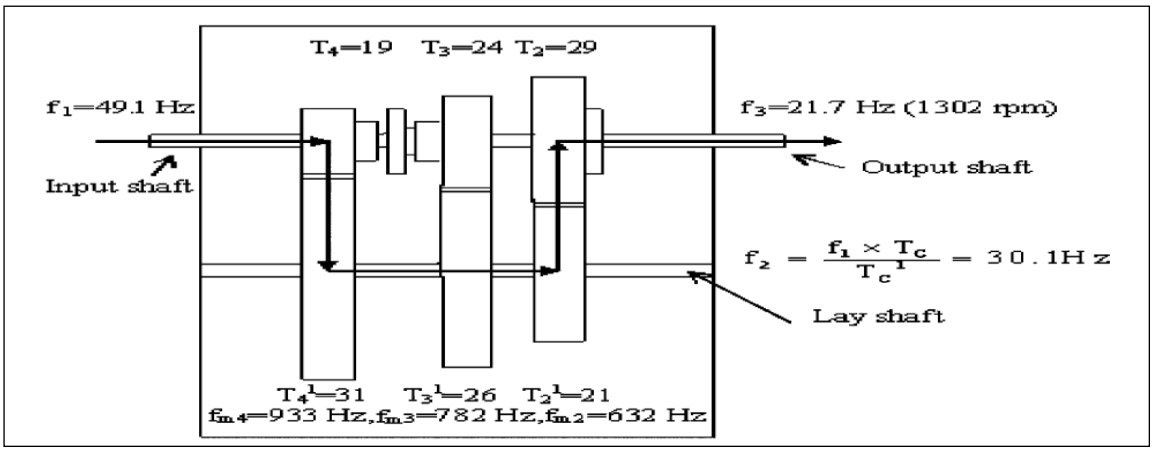

Figure.III.2 : Démonstration de différentes fréquences de rotation correspond à chaque arbre .

III.6 Résultats et discussions

III.6.1 L'analyse temporelle de forme d'onde

Comprendre la forme d'onde temporelle est difficile, mais elle peut souvent révéler des problèmes que les autres méthodes ne peuvent identifier.

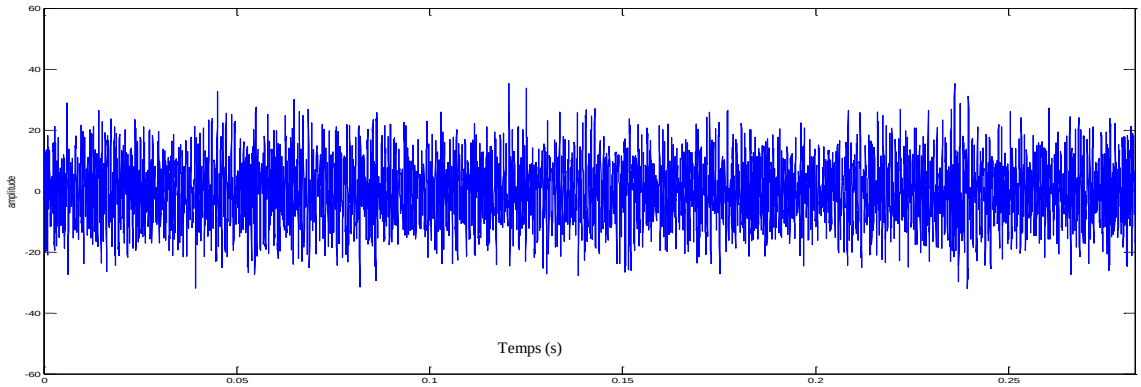

Figure III.3.a : Le signal original des données réelles dans le domaine temporel avec défaut

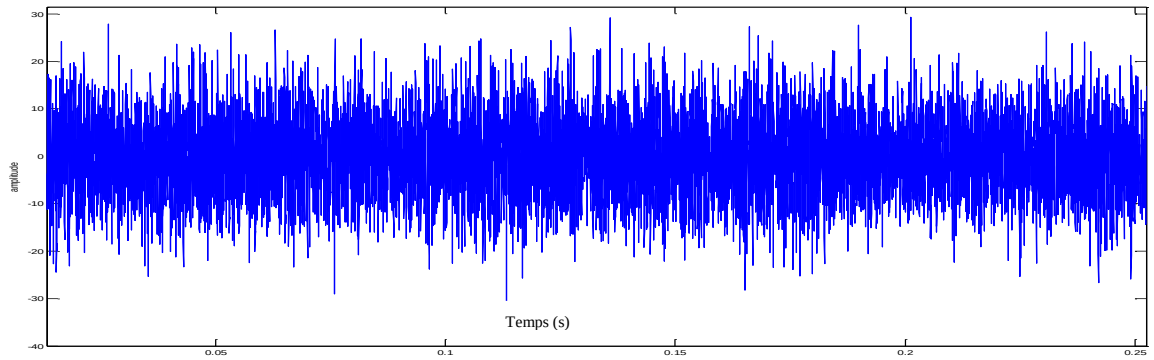

Figure III.3.b : Le signal original des données réelles dans le domaine temporel sans défaut

Discusion 1: D'aprés la Fig III.3 (a et b); Les problèmes spéculaires peuvent produire des vibrations très similaires avec un spectre très similaire, mais aussi des signaux apparemment différents et d'amplitudes différentes. Un argument majeur en faveur de l'utilisation des formes d'onde temporelles est la période d'endommagement ou d'irrégularité associée. De plus, la forme d'onde temporelle est la principale source d'autres analyses, et son utilisation appropriée peut produire des résultats précis.

III.6.2 L'analyse spectrale (FFT)

Nous avons éxaminé le spectre relatif au défaut de cassure d'une dent de pignion .

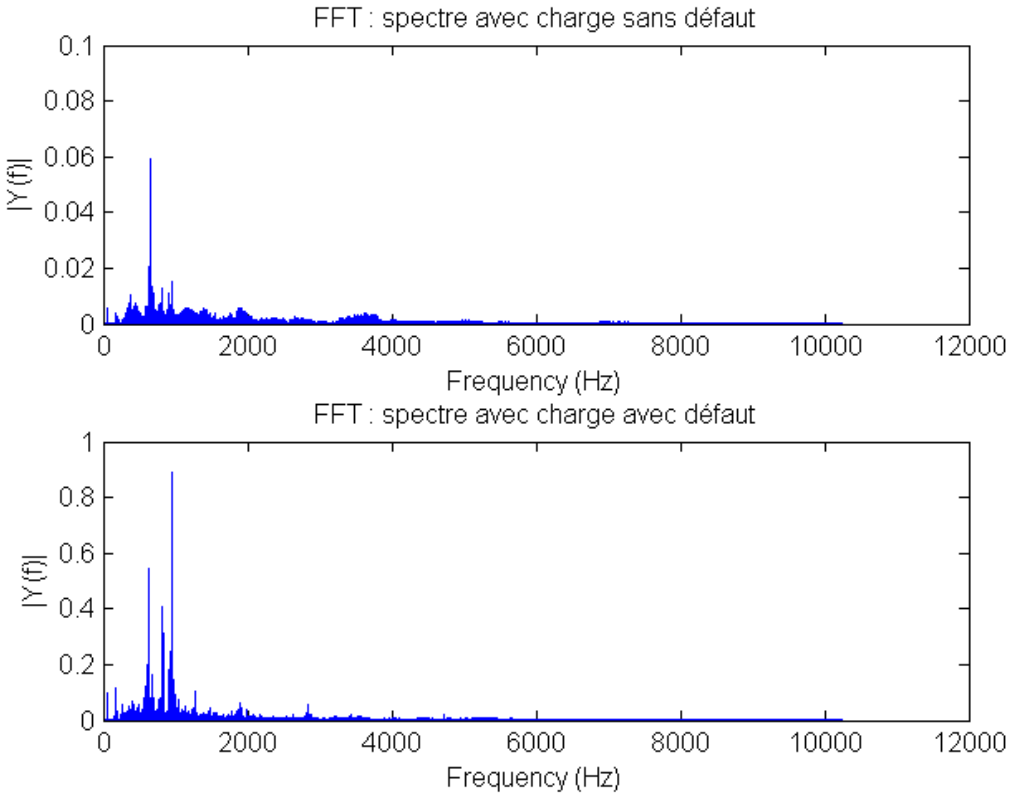

Figure III.4 : Comparaison des deux spectres du singal à engrenage (sans défaut et avec défaut)

Discusion 2: La Fig. III.4 montre l'allure du spectre ou la FFT du signal de vibration avec et sans défaut d'un reducteur d'une boite de vitesse, cette figure nous montre, dans le cas sans défaut, un pic de 945 Hz qui correspond à la fréquence d'engrènement de l'ensemble pignon/roue de 19 /31 dents. Par contre, l'allure de spectre du même signal vibratoire de boite de vitesse comportant un défaut de cassure de dent sur la roue de 19 dent. Il apparait une augmentation dans l'amplitude de la raie de fréquence de l'engrènement à 945 Hz.

III.6.3 L'analyse cepstral

L'analyse cepstral du signal avec et sans défaut nous a permis d'obtenir les cepstres présentés dans les Fig. III.5 et Fig. III.6.

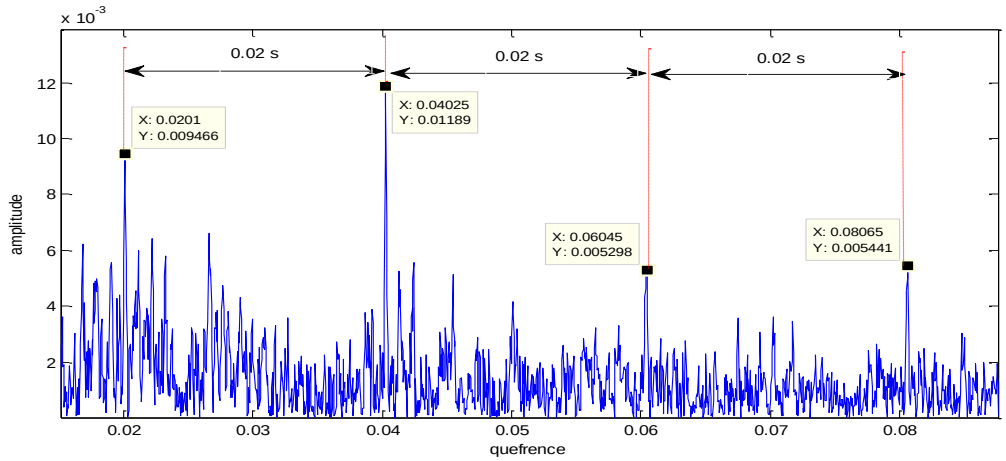

Figure III.5 : Cepstres du singal avec défaut

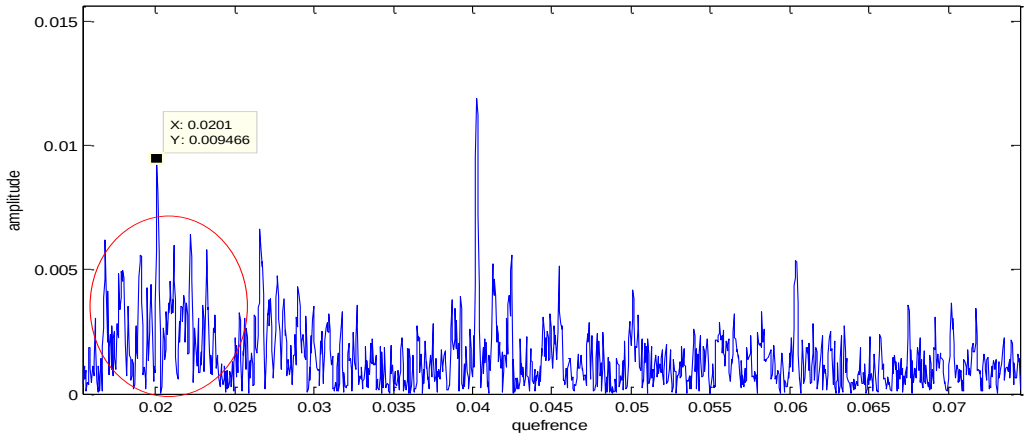

Figure III.6 : Bande latérale autour de quéfrence de rotation du pignon dans cepstre du signal avec défaut

Discusion 3: On observe la présence d'un pic à 923 Hz qui correspond à la valeur de la fréquence d'engrènement de l'ensemble pignon/roue de 19 /31 dents, dans le premier étage, le première harmonique est aussi présent à l'amplitude 0,009. Avec ces seules informations, la présence du défaut est détectée dans le premier étage.

III.6.4 Analyse d'ondelette

III.6.4.1 Cas du signal sans défaut:

Pour le signal sans défaut les résultats suivant sont obtenus :

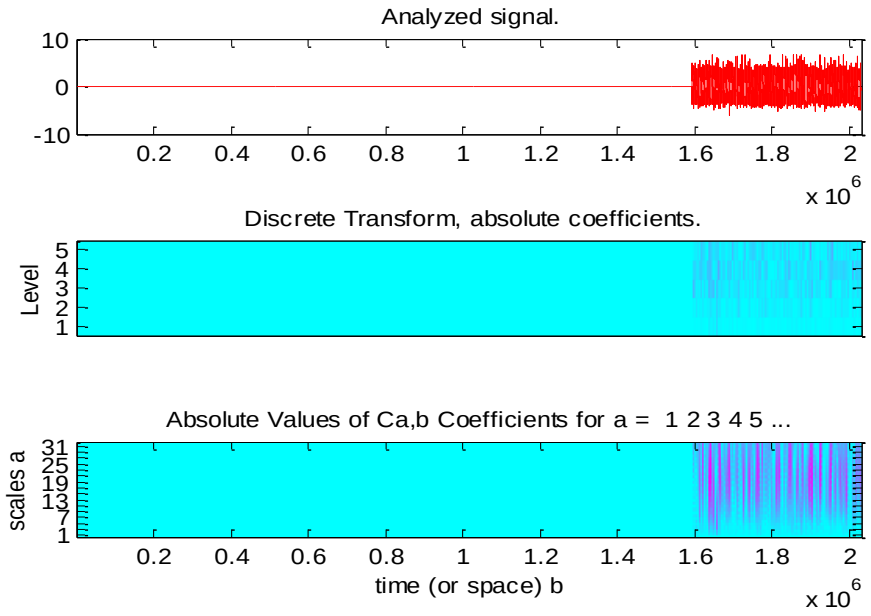

Figure III.7.a : La forme ondelette du signal sans défaut

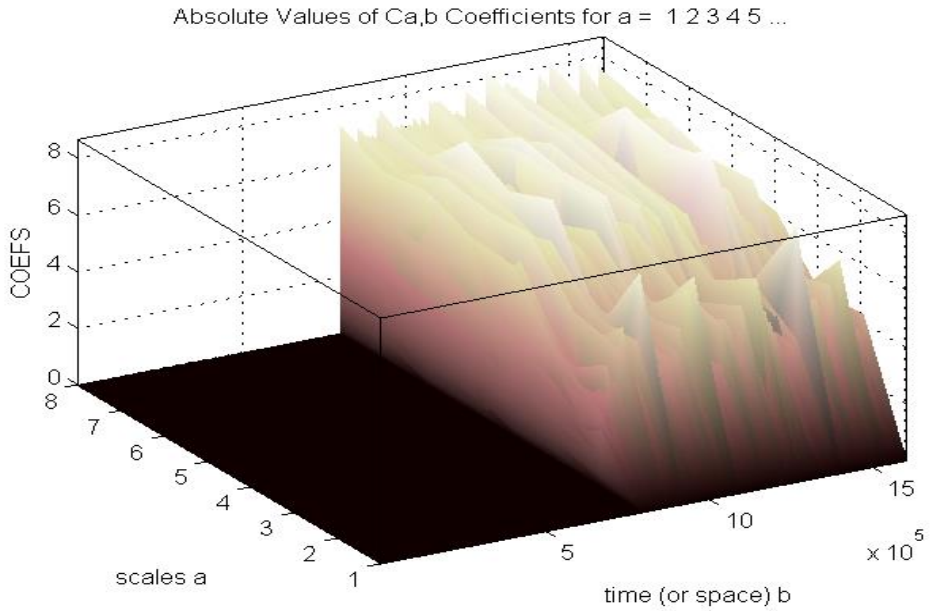

Figure III.7.b : Décomposition DWT en 3D des signaux avec charge de 5.625kW sans défaut

III.6.4.2 Cas du signal avec défaut

Pour le signal sans défaut les résultats suivant sont obtenus :

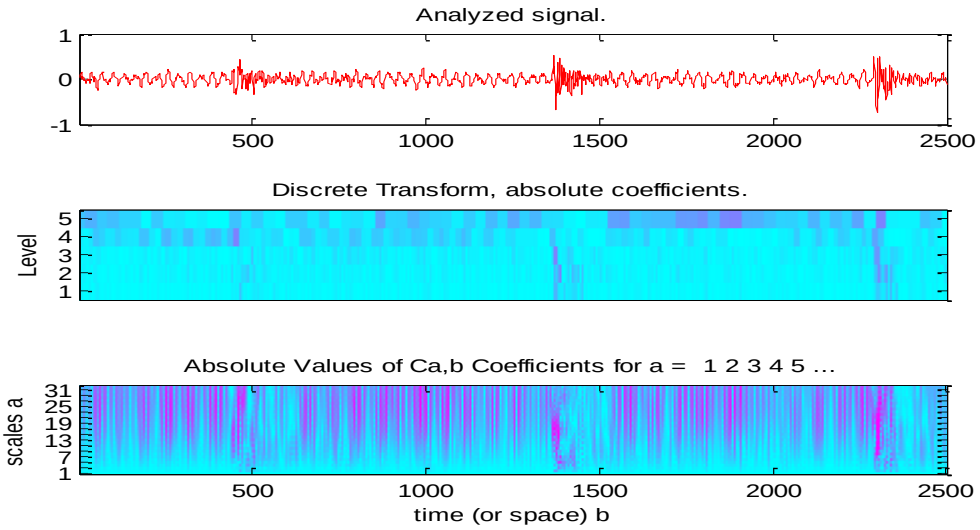

Figure III.8.a : Forme d'ondelette du signal avec défaut

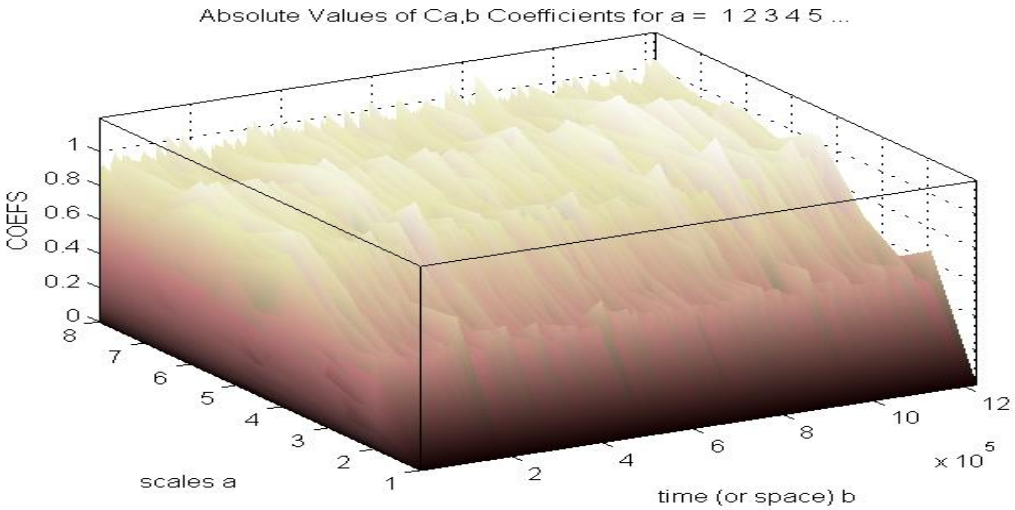

Figure III.8.b : Décomposition DWT en 3D des signaux avec charge de 5.625kW et un défaut de cassure de dent

Discusion 4:

- ✓ Dans les Fig. (III.7. a et b) on a présenté le signal d'un engrenage avec charge et sans défaut ; dans les courbes de figure (III.7.a) le traitement du signal dans le domaine temporel ne montre pas des anomalies sur le signal ainsi que la transformé discret d'ondelette a 5 niveau montre que les résultats sont bonne. La Fig. III.7. b) montre une portion de l'espace {temps - fréquence-coefficients}.
- ✓ Dans le cas des dents défectueuses Fig. (III.8. a) qui viennent en prise une fois l'évolution est clairement visible sur le graphique en ondelettes avec l'intensité de taches brillantes dans tracé 3D se répètent à chaque tour. Toutefois, l'analyse par ondelettes est supérieure

parce qu'elle peut capturer le temps caractéristiques liées à une signature qui peut être utilisé pour la dent identité spécifique défectueux dans un engrenage.

- ✓ Dans la Fig.III.8.b. Nous avons représenté une portion de l'espace {temps - fréquence-coefficients}. Nous pouvons voir assez clairement les crêtes de couleur très clair (presque blanc) dans ce domaine : soit un choc se répète qui correspond a la fréquence de 933 Hz est y la fréquence d'engrènement de l'ensemble roue pignon (31/19).

III.7 Conclusion

En maintenance préventive, la détection précoce d'un défaut est l'une des étapes les plus importantes. De nos jours, de nombreuses techniques d'analyse vibratoire des équipements industriels ont été proposées par les chercheurs. Dans le cadre du diagnostic des réducteurs, l'application de ces techniques est présentée après un bref rappel des théories de la transformée discontinue en ondelettes. Les caractéristiques du dispositif expérimental sont notamment détaillées, notamment les fréquences de défauts.

Chaque technique est appliquée et les résultats sont discutés en termes d'efficacité et de précision. À travers tous les résultats, il ressort que les méthodes classiques d'analyse vibratoire ont montré leurs limites pour un système constitué de plusieurs organes mécaniques. Ceci est dû à l'existence d'éléments pouvant se coupler dans le spectre, ce qui rend difficile la distinction des apparitions et des évolutions des différentes composantes fréquentielles suite à des défauts. Il apparaît que la transformée discontinue en ondelettes présente des avantages dans ce contexte. Cette méthode se prête en effet bien à l'analyse de signaux comportant des singularités telles que des impulsions périodiques.

CONCLUSION GENERALE

Les signaux vibratoires jouent un rôle important dans le diagnostic des pannes des machines tournantes dans les systèmes de transmission mécaniques, par exemple un réducteur de vitesse, car ils sont souvent porteurs de l'information dynamique à partir d'élément mécaniques. Ces signaux mécaniques normalement constitués d'une combinaison de la fréquence fondamentale avec une composante de fréquence à bande étroite et les harmoniques. De nombreuses méthodes basées sur l'analyse du signal de vibration ont été développés. Ces méthodes comprennent l'estimation du spectre de puissance, transformée de Fourier rapide (FFT), analyse du spectre ,cepstre et la technique d'ondelette révélées efficaces dans la détection des défauts.

Bien que de nombreuses réalisations soient encore possibles, le travail est arrivé à un résultat intéressant, qui remplit les objectifs fixés dans le plan de travail initial de ce mémoire. Nous avons donc réussi à déployer plusieurs moyens pour la détection précoce des défauts dans le réducteur de la boite de vitesse et donc la reconnaissance des défauts d'engrenages de type «Cassure de dent », en les visualisant sur MATLAB, et ce, en ayant recours aux méthodes de surveillance, basées sur l'analyse vibratoire des signatures fréquentielles issues des accéléromètres liés à ces engrenages.

Notons que ces méthodes restent qualitatives dans la mesure où leurs résultats admettent une présence obligatoire d'une personne pour comparer à chaque vue des résultats les différences entre les signaux et en déduire l'existence ou non de l'erreur. Ces méthodes restent donc insuffisantes et peuvent être l'objet d'une étude plus poussée, qui a pour but l'automatisation des résultats, c'est-à-dire la création d'un programme automatique, capable de détecter les défauts sans l'indispensabilité de la présence d'un spécialiste derrière chaque réducteur.

Cette étude nous a permis de découvrir plusieurs outils MATLAB en mettant en œuvre des connaissances. Cela nous a permis notamment de les développer en utilisant plusieurs fonctions : FFT, spectre, cepstre, signaux temporels, et la technique d'ondelette qui ont pour but le diagnostic de ces pannes.

La technique d'ondelette a été l'objet d'une étude plus poussée dans le but d'automatiser des résultats, c'est-à-dire la création d'un programme automatique, capable de détecter les défauts sans la présence d'un spécialiste derrière chaque mécanisme.

Références bibliographiques

[1] H.I.H. Saravanamuttoo, H. Cohen et G.F.C. Rogers, « Gas Turbine Theory », 6e édition, Pearson Education, 2017. pp : 12, 13, 14, 21, 22, 25, 26, 30, 47-138.

[2] Natra Groupe, « Livre blanc : Maintenance prédictive », 2023. Disponible sur : https://www.natrangroupe.com/sites/default/files/2023-02/livre-blanc-maintenance-predictive_0.pdf. pp : 12, 14, 17, 26, 30.

[3] C. Riveret, « Surveillance et diagnostic des systèmes dynamiques : vers une hybridation entre approche modèle et approche apprentissage », Éditions QUAE, 2010. pp : 66, 73, 59, 60.

[4] A. Bensalem, « La transformée en ondelettes (T.O.) : Un outil efficace pour l'analyse des spectres changeant avec le temps », Revue ASJP, 2015. pp : 18, 19, 22, 23.

[5] W. W. Bathie, « Fundamentals of Gas Turbines », 2e édition, John Wiley & Sons, 1996.

[6] Meherwan P. Boyce, « Gas Turbine Engineering Handbook », 2e édition, Gulf Professional Publishing, 2002. pp: 139-144.

[7] Thermal Engineering, « Quelle est la théorie du cycle de Brayton ? », Disponible sur : https://www.thermal-engineering.org/fr/quelle-est-la-theorie-du-cycle-de-brayton-moteur-brayton-definition/

[8] F. Gomaa, « Contribution à l'étude de la surveillance des turbines à gaz industrielles », Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2008.

[9] R. Meziane et A. Boukhelifa, « Analyse des performances d'une turbine à gaz sous l'effet de l'encrassement du compresseur », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2021.

[10] A. Mekki et M. Bensaid, « Diagnostic et modélisation des défauts dans une turbine à gaz », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2021.

[11] B. Ghezal, « Défaillance et stratégie de maintenance dans les systèmes énergétiques », Revue des Energies Renouvelables, vol. 15, n°3, 2012 , pp : 423-430

[12] M. Fekih et M. Boutoumi, « Étude et modélisation des défauts dans une turbine à gaz », Mémoire de Master, Université Yahia Fares de Médéa, 2022. Disponible sur : https://dspace.univ-medea.dz/server/api/core/bitstreams/593e90fa-97c5-425f-8051-5dcafe925d3b/content. pp : 70–75, 92–99

[13] E.H. Mechkour, « Surveillance de l'état de santé d'un moteur d'avion par capteurs intelligents », Mémoire de Master, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2021. Disponible sur : https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/2218/1/MECHKOUR.El-Haddi.pdf. pp : 2, 30–32, 53–54

[14] A. Zerguine, « Détection et diagnostic des défauts dans les turbines à gaz par des méthodes hybrides », Thèse de doctorat, Thèses Algérie, 2023. Disponible sur : https://bucket.theses-algerie.com/files/repositories-dz/2820730141890245.pdf.pp:72–73

[15] A. Khellaf, « Étude de l'influence de la température d'entrée turbine sur les performances d'une turbine à gaz », Mémoire de Master, Université de Tébessa, 2024.

[16] C. Djeddi, « Modélisation et analyse d'un cycle combiné pour la récupération de la chaleur », Mémoire de Master, Université de Djelfa, 2022.

[17] A. Hanifi, « Technoeconomic study of engine deterioration and compressor washing for military gas turbine engines », Academia.edu, 2023.

[18] **M. MacIsaac,** « Gas Turbine Performance Degradation: Detection, Causes and Solutions », METS2 Tutorial, TurboLab Texas A&M, 2018.

[19] **Kious Mohammed Moncef et Ammar Bousbia Salah,** « Surveillance et diagnostic vibratoire des machines tournantes », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021. pp : 38 - 53

[20] Mechanical Vibrations and Condition Monitoring, Vdoc.pub. Disponible sur : https://vdoc.pub/download/mechanical-vibrations-and-condition-monitoring-5sj14fd1ueu0. pp: 59 – 98, 101 – 115

[21] **R. Belhamel,** « Rappels de dynamique et vibrations mécaniques », Silanus.fr. Disponible sur : https://silanus.fr/sin/formationSTI2D/ET22A-B/ET22A/Ressources/r6100.pdf. pp : 3, 4, 6, 7

[22] **R. Ganeriwala,** « Vibration-based condition monitoring: Industrial, automotive and aerospace applications », John Wiley & Sons, 2010. Disponible sur : https://dokumen.pub/vibration-based-condition-monitoring-industrial-automotive-and-aerospace-applications-0470747854-9780470747858.html. pp : 111 – 158

[23] **A. Hadj-Hamou ,** « Surveillance vibratoire d'une turbine à gaz avec une prise de décision basée sur une analyse spectrale », ResearchGate, 2016. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/311788883. pp : 4

[24] **A. Bouazza,** « Implémentation de la maintenance prédictive dans les systèmes de production », ResearchGate, 2016. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/306056886. pp : 5 - 8

[25] **S. Gupta,** « Wavelet Tutorial », Indian Institute of Technology Delhi, 1999. Disponible sur : https://web.iitd.ac.in/~sumeet/WaveletTutorial.pdf

[26] **D. Van der Walt,** « Application of wavelet transform in condition monitoring », Dissertation, University of Missouri–St. Louis, 2014. Disponible sur : https://irl.umsl.edu/dissertation/1196

[27] **S. Ali ,** « A Review of Wavelet Analysis and Its Applications: Challenges and Opportunities », ResearchGate, 2022. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/361020478

[28] **Y. Belhadji,** « Polycopie de cours : Capteurs et Instrumentation », ResearchGate, 2021. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/355573538. pp : 5–15, 98–135

[29] **Beamex,** « Capteur de température Pt100 – Livre blanc », Beamex White Papers, 2022. Disponible sur : https://resources.beamex.com/hubfs/Beamex_White_Papers/Beamex%20White%20Paper%20-%20Pt100%20temperature%20sensor%20FRA.pdf.

[30] **Brüel & Kjær,** « Capteurs de vibration – Guide technique », B&K Vibro, 2020. Disponible sur : https://www.bksv.com/media/doc/bb0695.pdf. pp : 11–14, 18–19

[31] **A. V. Muralidharan,** « Condition Monitoring of Gas Turbines Using Advanced Signal Processing Techniques », Thèse de doctorat, University of Sheffield, 2018. Disponible sur : https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/22103/1/Thesis_AVM130250007.pdf. pp :29 - 76

[32] **Astera,** « Filtrage des données : Pourquoi et comment ? », Blog Astera. Disponible sur : https://www.astera.com/fr/type/blog/data-filtering/.

[33] **Astera,** « Normalisation des données : Définition, avantages et techniques », Blog Astera. Disponible sur : https://astera.com/fr/type/blog/data-standardization/.

[34] Monolithic Power, « Analog vs Digital Signal – Quelle est la différence ? », MPS. Disponible sur : https://www-monolithicpower-com.translate.goog/en/learning/resources/analog-vs-digital-signal.

[35] Wikipédia, « Ondelette de Daubechies », Wikipédia. Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Ondelette_de_Daubechies.

[36] Fiveable, « Mother Wavelets Characteristics », Guide d'étude. Disponible sur : https://library.fiveable.me/fourier-analysis-wavelets-and-signal-processing/unit-10/mother-wavelets-characteristics/study-guide/FKC0XPl8UJTvPgC5.

[37] ScienceDirect, « Wavelet Decomposition – Computer Science », ScienceDirect. Disponible sur : https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/wavelet-decomposition.

[38] MathWorks, « Anomaly Detection Using Autoencoder and Wavelets », MathWorks. Disponible sur : https://la.mathworks.com/help/wavelet/ug/anomaly-detection-using-autoencoder-and-wavelets.html.

[39] Z. Yang et al., « Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps Using Wavelet Packet Energy Entropy and a Support Vector Machine Model », *Sensors*, vol. 16, n°6, p. 895, 2016. Disponible sur : https://www.mdpi.com/1424-8220/16/6/895. pp : 1-5

[40] S. Mallat, « A Wavelet Tour of Signal Processing », Academic Press, 3e édition, 2008. Disponible sur : https://coehuman.uodiyala.edu.iq/.../Mallat_Wavelet-Tour-of-Signal-Processing.pdf. pp : 845-847

[41] P. Samantaray et al., « Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications », ResearchGate, 2013. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/259098512. pp: 1-12

[42] L. Nacib, « Diagnostic des défauts dans les machines tournantes par l'analyse vibratoire »,Badji Mokhtar, Annaba, 2015.

[43] L. Nacib, S. Saad et S. Sakhara, « A comparative study of various methods of gear faults diagnosis », Journal of Failure Analysis and Prevention, vol. 14, pp. 645-656, 2014.

[44] Reddit, "The many blades inside a turbine engine", Disponible sur : https://www.reddit.com/r/pics/comments/5thhls/the_many_blades_inside_a_turbine_engine/?rdt=53734

[45] Artikel Teknologi, "Komponen-komponen turbin gas", Disponible sur : https://artikel-teknologi.com/komponen-komponen-turbin-gas/

[46] TermoBlog, "Câmaras de combustão de uma turbina a gás", Disponible sur : https://termoblog.com.br/camaras-de-combustao-de-uma-turbina-a-gas/

[47] PE Professional, "Warburg Pincus acquires turbine technologies group", Disponible sur : https://peprofessional.com/2012/11/warburg-pincus-acquires-turbine-technologies-group/

[48] Energy Education, "Turbine", Disponible sur : https://energyeducation.ca/fr/Turbine

[49] Juniper Publishers, "Vue macro d'une fissure formée dans une aube de turbine à gaz", Disponible sur : https://juniperpublishers.com/ttsr/pdf/TTSR.MS.ID.555710.pdf

[50] Dashangu, "Dommages aux aubages causés par un déséquilibre dynamique", Disponible sur : http://www.dashangu.com/postimg_16787046_5.html

[51] BearingStore, "Usure des roulements due au fretting", Disponible sur : https://bearingstore.ru/blog/sovety-pokupatelyam/fretting-korroziya-podshipnikov/

[52] **ResearchGate,** "Le défaut d'alignement des arbres", Disponible sur : https://www.researchgate.net/figure/Le-defaut-dalignement-des-arbres-4-Desalignement-des-paliers_fig39_262280982

[53] **Linear Rotary,** "Eight common causes of gear failure of planetary gears", Disponible sur : https://fr.linear-rotary.com/info/eight-common-causes-of-gear-failure-of-planeta-58544422.html

[54] **Kingsbury,** "Overheating effects on metal", Disponible sur : https://www.kingsbury.com/overheating

[55] **AAF International,** "Impacts d'une mauvaise filtration de l'air sur le rendement des turbines à gaz", Disponible sur : https://www.aafintl.com/fr-fr/industry/insights/comprendre-les-impacts-dune-mauvaise-filtration-de-lair-sur-le-rendement-des-turbines-a-gaz/

[56] **BibLus,** "Contamination sévère à l'entrée de la turbine", Disponible sur : https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5030/fichero/2.+Cap%C3%ADtulo+2+-+Descripci%C3%B3n+del+fouling.pdf

[57] **Monitran (DirectIndustry),** "Capteur de vibration piézoélectrique", Disponible sur : https://www.directindustry.fr/prod/monitran/product-7101-1037969.html

[58] **Sterling Sensors,** "Capteurs de température (Pt100)", Disponible sur : https://www.sterlingsensors.co.uk/screw-in-rtd-with-plug-in-hirschmann-rtd.html

[59] **PM Instrumentation,** "Capteur de pression piézoélectrique haute température", Disponible sur : https://www.pm-instrumentation.com/cp-capteur-de-pression-piezoelectrique-haute-temperature