



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية  
الشعبية

La République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de L'Enseignement Supérieur & la Recherche  
Scientifique



جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم

Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem

كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الهندسة الميكانيكية

Département Génie Mécanique

N° d'ordre : M...../GM/2024

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction mécanique

*Thème*

**Diagnostic du défaut de balourd d'une  
Turbine à Gaz MS 3002 .**

Présenté par :

BOUZEKRI Omar

Soutenu le 23/09/ 2024 devant le jury composé de :

Président : Mr .ZENASNI Ramdane

Pr UMAB Mostaganem

Examineur : Mr .BENKABOUCHE Salah-Eddine MCB UMAB Mostaganem

Encadreur : Mr.SAIDANI Djamel-Eddine

MAA UMAB Mostaganem

Année Universitaire : 2023 / 2024

## **Remerciement**

Je remercie tout d'abord ALLAH, le Tout-Puissant, qui m'a donné la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail, et grâce à qui je suis arrivé à ce moment.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadreur pour m'avoir accompagné tout au long de ce chemin, en créant une ambiance de travail agréable et propice à l'accomplissement de ce projet.

Je remercie également les membres du jury pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer mon travail. Enfin, je souhaite exprimer toute ma gratitude à ma famille, dont le soutien et les prières m'ont permis de mener à bien ce travail.

## **Dédicaces**

Je dédie ce travail à ma chère famille, pilier de ma vie et source inépuisable de soutien et d'amour. À mon père, dont la sagesse et les conseils m'ont toujours guidé sur le droit chemin, et à ma mère, pour son amour inconditionnel et ses sacrifices infinis qui m'ont permis d'atteindre cet instant. À ma femme, mon roc et ma plus grande alliée, merci pour ta patience, ton soutien et ta présence constante à mes côtés. Et enfin, à mon enfant, source de joie et d'inspiration, que ce travail soit un témoignage de tout ce que l'on peut accomplir avec amour et persévérance.

## **Résumé:**

Ce mémoire explore les fondements théoriques de la maintenance industrielle, en se concentrant particulièrement sur les problèmes de balourd et les techniques d'équilibrage. Il commence par définir la maintenance comme l'ensemble des actions visant à garantir le bon fonctionnement des équipements tout au long de leur cycle de vie. Le document souligne l'importance cruciale de la maintenance dans le secteur industriel, notamment pour réduire les temps d'arrêt, optimiser la production, assurer la sécurité des opérations, et prolonger la durée de vie des équipements.

Une attention particulière est portée au phénomène de balourd, ses effets néfastes sur les machines tournantes, et les méthodes d'équilibrage pour y remédier.

Le mémoire détaille les différentes techniques d'équilibrage, leurs applications, et leur importance dans la maintenance préventive et corrective. Il explore également l'utilisation de technologies avancées pour la détection et la correction des balourds, soulignant leur rôle dans l'optimisation des performances et la réduction des vibrations indésirables.

Le document présente les différents types de maintenance, en mettant l'accent sur la maintenance préventive et corrective dans le contexte de l'équilibrage. Il examine comment ces approches peuvent être appliquées efficacement pour prévenir et corriger les problèmes de balourd, améliorant ainsi la fiabilité et la longévité des équipements industriels.

**Mots-clés :** Equilibrage dynamique du rotor HP, Balourd, Analyse vibratoire, diagnostique des défauts d'une turbine à gaz.

## **Abstract:**

This study explores the theoretical foundations of industrial maintenance, with a particular focus on balancing issues and techniques. It begins by defining maintenance as the set of actions aimed at ensuring the proper functioning of equipment throughout its lifecycle.

The document underlines the crucial importance of maintenance in the industrial sector, particularly in reducing downtime, optimizing production, ensuring operational safety, and extending equipment lifespan.

Special attention is given to the phenomenon of unbalance, its detrimental effects on rotating machinery, and the balancing methods used to address it. The study details various balancing techniques, their applications, and their importance in preventive and corrective maintenance. It also explores the use of advanced technologies for detecting and correcting unbalance, highlighting their role in optimizing performance and reducing unwanted vibrations.

The document presents different types of maintenance, emphasizing preventive and corrective maintenance in the context of balancing. It examines how these approaches can be effectively applied to prevent and correct unbalance issues, thereby improving the reliability and longevity of industrial equipment.

This comprehensive overview provides a solid foundation for understanding the critical role of balancing in industrial maintenance and its impact on productivity, safety, and cost-effectiveness.

**Keywords:** Dynamic balancing of the HP rotor, Unbalance, Vibration analysis, Fault diagnosis of a gas turbine.

#### ملخص:

يستكشف هذا البحث الأسس النظرية للصيانة الصناعية، مع التركيز بشكل خاص على مشاكل البالانس وتقنيات التوازن. يبدأ بتعريف الصيانة على أنها مجموعة الإجراءات التي تهدف إلى ضمان التشغيل السليم للمعدات طوال دورة حياتها. يبرز أهمية الصيانة في القطاع الصناعي، خاصة في تقليل فترات التوقف، تحسين الإنتاج، وضمان سلامة العمليات، وإطالة عمر المعدات

يتم إيلاء اهتمام خاص لظاهرة البالانس وتأثيراتها الضارة على الآلات الدوارة، مع توضيح طرق التوازن المستخدمة لحلها. يوضح البحث أيضًا استخدام التكنولوجيا المتقدمة للكشف عن مشاكل البالانس وتصحيحها، ويؤكد على دورها في تحسين الأداء وتقليل الاهتزازات غير المرغوبة

كما يعرض البحث الأنواع المختلفة من الصيانة، مع التركيز على الصيانة الوقائية والتصحيحية في سياق التوازن، ويستكشف كيفية تطبيق هذه النهج بشكل فعال لمنع وتصحيح مشاكل البالانس، مما يحسن من موثوقية المعدات الصناعية وطول عمرها

#### الكلمات المفتاحية:

التوازن الديناميكي للدوار HP، البالانس، تحليل الاهتزازات، تشخيص أعطال التوربينات الغازي

## Liste des figures

### Chapitre I

**Figure I.1:** Organigramme descriptif de la structure de maintenance.....6

### Chapitre II

**Figure II. 2:** Signal sinusoïdal d'amplitude 1, de fréquence 2 Hz et de phase à l'origine  $\pi/4$ rad..... 12

**Figure II.3:** Signal transitoire d'un système après une impulsion ..... 12

**Figure II.4:** Spectre de puissance pour des vibrations aléatoires ..... 13

**Figure II.5:** Spectre en 2D d'amplitude en fonction de la fréquence ..... 14

**Figure II.6 :** Résonance et relation amplitude-fréquence.....15

**Figure II.7 :** Schéma d'un système masse-ressort d'un accéléromètre piézoélectrique....19

**Figure II.8:** Schéma d'un système de fonctionnement d'un capteur inductif ..... 19

**Figure II.9:** Analyseur Vibromètre multifonctions .....20

### Chapitre III

**Figure III.10:** Position du capteur de vibration et Key-phaser sur palier 1 de MS 3002 .. 28

**Figure III.11:** Schéma détaillé de DCS qui définit les vibrations de la turbine MS 3002..29

**Figure III.12:** Graphe de vibration et vitesse en fonction du temps de turbine MS 3002...29

**Figure III.13:** Vibration du palier 1 de la turbine MS 3002 .....30

**Figure III.14:** Trois étapes (démarrage, stabilité et arrêt) de la turbine MS 3002 de RNS .....30

**Figure III.15:** Tableau de la norme ISO 10816 de taux des vibrations mécaniques .....31

**Figure III.16:** Graphes de vibration du palier 1 pendant le fonctionnement de la machine .....31

**Figure III.17 :** signal amplitude de la vibration – fréquence de vibration de palier 1.....32

### Chapitre IV

**Figure IV.18:** Balourd statique .....36

**Figure IV.19:** Balourd couple .....36

<b>Figure IV.20:</b> Balourd dynamique .....	37
<b>Figure IV.21:</b> Balourd quasi statique .....	37
<b>Figure IV.22 :</b> Graphe de Correction du Balourd Résiduel en Fonction de la Vitesse de Rotation et de l'Amplitude Vibratoire.....	41
<b>Figure IV.23:</b> Tableau de valeur de qualité G lié à la vitesse (ISO2372) .....	42
<b>Figure IV.24:</b> Graphe de Correction du Balourd Résiduel en Fonction de la Vitesse de Rotation .....	43
<b>Figure IV.25:</b> Vibration générée par un balourd au niveau de palier 1 .....	44
<b>Figure IV.26:</b> Définition graphique de balourd de 6mm/s .....	45
<b>Figure IV.27:</b> Définition graphique de Résonance de 5mm/s .....	45
<b>Figure IV.28:</b> Accouplement de rotor HP .....	46
<b>Figure IV.29:</b> Présentation et installation de la masse de test 1 (114g) sur le rotor HP ...	46
<b>Figure IV.30:</b> Mesures de vibration avec masse de test 1 (114g) .....	46
<b>Figure IV.31:</b> Le niveau global de vibration de palier 1 (masse 114g) .....	47
<b>Figure IV.32:</b> Présentation et installation de la masse de test 2 (335g) sur le rotor HP ...	47
<b>Figure IV.33:</b> Niveau global de vibration avec masse de test 2 (355g) .....	48
<b>Figure IV.34:</b> Présentation et installation de la masse de test 3 (234g) sur le rotor HP ...	48
<b>Figure IV.35:</b> Niveau global de vibration après test 3 (masse de correction 234g) .....	49
<b>Figure IV.36:</b> Tableau de la norme ISO 10816 de taux des vibrations mécaniques .....	49
<b>Figure IV.37:</b> Graphe de comparaison des vibrations en fonction des tests .....	50

# Sommaire

1. Remerciement et dédicace.....	I
2. Résumé, abstract .....	II
3. Liste des figure .....	III

## Introduction Générale

1.introduction.....	1
2.Organisation du mémoire .....	1

## Chapitre I : Fondements théoriques de la maintenance

<b>I.1. Définition de la maintenance .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. Normes et concepts clés (AFNOR X60-010) .....</b>	<b>3</b>
<b>I.3. Importance de la maintenance dans le secteur industriel .....</b>	<b>4</b>
I.3.1. Réduction des Temps d'Arrêt et Optimisation de la Production .....	4
I.3.2. Sécurité des Opérations .....	4
I.3.3. Allongement de la Durée de Vie des Équipements .....	4
I.3.4. Réduction des Coûts de Maintenance .....	4
I.3.5. Conformité Réglementaire et Qualité des Produits .....	5
<b>I.4.Types de maintenance .....</b>	<b>5</b>
I.4.1. Maintenance Corrective .....	5
I.4.2. Maintenance Préventive .....	5
I.4.3. Maintenance Prédictive .....	5
I.4.4. Maintenance Conditionnelle .....	6
I.4.5. Maintenance Curative .....	6
I.4.6. Maintenance Améliorative .....	6
<b>I.5. Maintenance préventive (objectifs et méthodes) .....</b>	<b>7</b>
I.5.1. Objectifs de la Maintenance Préventive .....	7
I.5.2. Méthodes de la Maintenance Préventive .....	8
<b>I.6. Maintenance corrective (processus et applications) .....</b>	<b>8</b>
I.6.1. Processus de la Maintenance Corrective .....	8
I.6.2. Applications de la Maintenance Corrective .....	9

## Chapitre II : Théorie des vibrations et analyse vibratoire

<b>II.1. Concepts de base des vibrations</b> .....	11
<b>II.2. Définition et types de vibrations (périodiques, transitoires, aléatoires)</b> .....	11
II.2.1. Vibrations Périodiques .....	11
II.2.2. Vibrations Transitoires .....	12
II.2.3. Vibrations Aléatoires .....	13
<b>II.3. Caractéristiques des vibrations (amplitude, fréquence)</b> .....	13
II.3.1. Amplitude des Vibrations .....	13
II.3.2. Fréquence des Vibrations .....	14
<b>II.4. Méthodes d'analyse vibratoire</b> .....	15
II.4.1. Analyse Fréquentielle .....	16
II.4.2. Analyse Temporelle .....	17
II.4.3. Analyse Modale .....	17
II.4.4. Analyse de la Densité Spectrale de Puissance (DSP) .....	18
<b>II.5. Appareils de mesure et capteurs</b> .....	18
II.5.1. Accéléromètres .....	18
II.5.2. Capteurs de Déplacement .....	19
II.5.3. Analyseurs de Spectre .....	20
II.5.4. Systèmes de Surveillance en Temps Réel .....	20
<b>II.6. Techniques d'analyse pour les méthodes temporelles et fréquentielles</b> .....	21
II.6.a. Méthodes Temporelles .....	21
II.6.b. Méthodes Fréquentielles .....	21
II.6.c. Applications et Limitations .....	22

## Chapitre III : Mise en œuvre expérimentale

<b>III.1. Introduction</b> .....	23
<b>III.2. Analyse de la turbine MS 3002</b> .....	23
<b>III.3. Description de la turbine et de ses composants</b> .....	24
III.3.1. Compresseur .....	24
III.3.2. Chambre de Combustion .....	24
III.3.3. Étages de la Turbine .....	24
III.3.4. Système de Refroidissement .....	24
III.3.5. Système de Lubrification .....	24
III.3.6. Système de Contrôle .....	25

<b>III.4. Problématiques rencontrées</b> .....	25
III.4.1. Vibrations .....	25
III.4.2. Balourds .....	25
III.4.3. Conséquences .....	25
<b>III.5. Procédures Expérimentales</b> .....	26
III.5.1. Préparation des Instruments .....	26
III.5.2. Collecte des Données de Vibration .....	26
III.5.3. Analyse Spectrale des Vibrations .....	26
III.5.4. Diagnostic du Balourd .....	26
III.5.5. Vérification des Paliers .....	27
III.5.6. Tests de Résonance .....	27
III.5.7. Surveillance Continue .....	27
III.5.8. Rapport et Documentation .....	27
<b>III.6. Problématique à examiner et réalisation de mesures vibratoires</b> .....	28
III.6.1. Objectifs .....	28
III.6.2. Présentation du Problème .....	28
III.6.3. Démonstration Graphique des Vibrations .....	30
III.6.4. Analyse des Données .....	31
III.6.5. Résultats Obtenus .....	32
<b>III.7. Conclusion</b> .....	33

## Chapitre IV : Équilibrage et optimisation

<b>IV.1. Balourd et ses effets</b> .....	34
IV.1.1. Définition .....	34
IV.1.2. Les Principaux Effets du Balourd .....	35
<b>IV.2. Définition des types de balourd et leurs origines</b> .....	36
IV.2.1. Balourd Statique .....	36
IV.2.2. Balourd Couple .....	36
IV.2.3. Balourd Dynamique .....	37
IV.2.4. Balourd Quasi Statique .....	37
IV.2.5. Balourd Résiduel .....	37
IV.2.6. Origines du Balourd .....	38
<b>IV.3. Impact sur la performance de la turbine</b> .....	38
IV.3.1. Effets sur les Composants .....	38
IV.3.2. Réduction du Rendement Thermique .....	38
IV.3.3. Conséquences sur la Consommation Spécifique de Carburant (SFC) .....	38
IV.3.4. Charges Dynamiques Excessives .....	39

<b>IV.4. Processus d'équilibrage de la turbine à gaz</b> .....	39
IV.4.1. Analyse des Vibrations .....	39
IV.4.2. Localisation du Balourd .....	39
IV.4.3. Calcul du Contrepoids .....	39
IV.4.4. Placement du Contrepoids .....	40
IV.4.5. Nouvelle Analyse Vibratoire .....	40
IV.4.6. Contrôle Final .....	40
<b>IV.5. Quantification des balourds et équilibrage du rotor HP</b> .....	41
IV.5.1. Données Techniques de la Turbine MS 3002 .....	41
IV.5.2. Classes de Qualité et Groupes de Rotors .....	41
IV.5.3. Calcul du Balourd .....	42
IV.5.4. Localisation de balourd .....	44
IV.5.5. Equilibrage du rotor HP.....	44
IV.5.6. Résultats d'équilibrage.....	49
IV.5.7. Control finale.....	50
IV.5.8..Recommandations sur Résultats de l'équilibrage.....	50
<b>Conclusion Générale</b> .....	52

# **Introduction**

### 1. Introduction :

Le domaine de la maintenance industrielle joue un rôle essentiel dans la gestion efficace des actifs et des équipements dans de nombreux secteurs, tels que la production manufacturière, l'énergie, les transports, etc.

Une approche de maintenance bien structurée permet d'assurer la fiabilité, la disponibilité et la sécurité des systèmes, tout en optimisant les coûts opérationnels.

Cependant, l'évolution rapide des technologies, l'augmentation de la complexité des équipements et les exigences de plus en plus strictes en matière de performance, de qualité et de sécurité posent de nouveaux défis pour les professionnels de la maintenance.

Il est donc crucial de comprendre en profondeur les fondements théoriques de la maintenance et d'explorer les différentes stratégies et méthodes disponibles afin d'adapter au mieux les pratiques aux besoins spécifiques de chaque entreprise.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier de manière approfondie les concepts clés de la maintenance industrielle, en mettant l'accent sur les différents types de maintenance (corrective, préventive, prédictive), leurs objectifs, leurs processus et leurs applications pratiques. Cette analyse permettra de mieux comprendre comment les entreprises peuvent optimiser la gestion de leurs actifs et améliorer la fiabilité de leurs systèmes de production.

### 2. Organisation du mémoire :

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres principaux :

Le Chapitre I établit les fondements théoriques de la maintenance en définissant les concepts clés, les normes et l'importance de la maintenance dans le secteur industriel. Il présente en détail les différents types de maintenance (corrective, préventive, prédictive) et leurs caractéristiques.

Le Chapitre II approfondit la théorie des vibrations et l'analyse vibratoire, qui constituent des outils essentiels pour la surveillance de l'état des équipements et la mise en œuvre de la maintenance prédictive.

Le Chapitre III décrit la mise en œuvre expérimentale des différentes techniques de maintenance, en mettant l'accent sur les méthodes d'analyse des données, les technologies de surveillance de l'état des machines et les processus d'optimisation des stratégies de maintenance.

Enfin, le Chapitre IV se concentre sur l'équilibrage et l'optimisation des programmes de maintenance, en explorant des approches telles que la maintenance basée sur la fiabilité, la

maintenance axée sur la disponibilité et l'utilisation d'outils d'aide à la décision pour une gestion optimale des actifs.

Ce mémoire vise à fournir une compréhension approfondie des fondements théoriques et des meilleures pratiques en matière de maintenance industrielle, dans le but d'aider les entreprises à relever les défis actuels et à améliorer la performance de leurs systèmes de production.

**Chapitre I :**  
**Fondements théoriques de la maintenance**

**I.1. Définition de la maintenance :**

La maintenance désigne l'ensemble des actions techniques, administratives et managériales réalisées tout au long du cycle de vie d'un équipement, d'une machine ou d'une infrastructure, afin de garantir leur bon fonctionnement, de prévenir les pannes et d'assurer leur durabilité. On distingue généralement trois types de maintenance : corrective, préventive et prédictive. La maintenance corrective intervient après l'apparition d'une défaillance pour restaurer le fonctionnement normal. La maintenance préventive, quant à elle, est planifiée pour éviter l'apparition de pannes en réalisant des inspections, des remplacements ou des réparations à intervalles réguliers. Enfin, la maintenance prédictive utilise des données en temps réel et des analyses pour anticiper les pannes potentielles, permettant ainsi une intervention avant qu'un problème ne survienne.

Ces pratiques sont essentielles pour optimiser la performance des systèmes, réduire les coûts liés aux arrêts de production imprévus et prolonger la durée de vie des équipements.

En résumé, la maintenance est une composante clé de la gestion des actifs dans de nombreux secteurs industriels, garantissant sécurité, fiabilité et efficacité opérationnelle.

**I.2. Normes et concepts clés (AFNOR X60-010) :**

La norme AFNOR X60-010 joue un rôle crucial dans la gestion des activités de maintenance en définissant les concepts et termes clés relatives à ce domaine.

Publiée initialement en 1994, cette norme standardise le vocabulaire utilisé dans la maintenance, ce qui est essentiel pour assurer une communication claire entre les professionnels, qu'ils soient techniciens, gestionnaires ou fournisseurs de services.

La norme couvre divers aspects de la maintenance, y compris les niveaux de maintenance qui vont de simples interventions de routine à des opérations complexes nécessitant une expertise spécialisée. Par exemple, les interventions de niveau 1 sont généralement simples et peuvent être réalisées par l'opérateur lui-même, tandis que les interventions de niveau 5 sont des actions complexes souvent confiées aux fabricants ou à des entreprises agréées. Cette classification permet de déterminer le niveau de compétence nécessaire pour chaque opération et de décider si l'intervention peut être réalisée en interne ou nécessite une externalisation.

La norme a été remplacée en 2001 par la NF EN 13306, qui continue d'améliorer et de structurer les pratiques de maintenance en introduisant de nouvelles terminologies et concepts adaptés aux évolutions technologiques et industrielles [1].

Toutefois, la norme X60-010 reste une référence historique importante qui a établi les bases de nombreuses pratiques actuelles dans le domaine de la maintenance industrielle.

### **I.3. Importance de la maintenance dans le secteur industriel :**

La maintenance joue un rôle crucial dans le secteur industriel, car elle garantit le bon fonctionnement des équipements et des machines, essentiels à la production continue et à la qualité des produits. L'importance de la maintenance se manifeste sous plusieurs aspects:

#### **I.3.1. Réduction des Temps d'Arrêt et Optimisation de la Production:**

L'un des principaux objectifs de la maintenance industrielle est de minimiser les temps d'arrêt non planifiés des équipements. Des machines qui fonctionnent efficacement réduisent les interruptions de production, ce qui augmente la productivité globale de l'usine. Un programme de maintenance bien planifié permet d'identifier et de résoudre les problèmes potentiels avant qu'ils ne provoquent des pannes majeures, ce qui peut entraîner des pertes de production importantes [1].

**I.3.2. Sécurité des Opérations :** La maintenance régulière des équipements est essentielle pour assurer la sécurité des opérations. Les machines mal entretenues peuvent devenir dangereuses pour les opérateurs et le personnel environnant. Des inspections régulières, le remplacement des pièces usées, et la correction des défauts identifiés sont nécessaires pour prévenir les accidents et protéger la santé des travailleurs [1].

**I.3.3. Allongement de la Durée de Vie des Équipements :** La maintenance proactive permet de prolonger la durée de vie des équipements industriels. En effectuant des interventions régulières telles que le graissage, le nettoyage, et la vérification des composants critiques, les entreprises peuvent éviter l'usure prématurée des machines, ce qui réduit les coûts liés à l'achat de nouveaux équipements et optimise le retour sur investissement.

**I.3.4. Réduction des Coûts de Maintenance :** Un programme de maintenance préventive bien conçu peut également contribuer à réduire les coûts globaux de maintenance. Bien que la maintenance proactive implique des dépenses régulières, elle permet d'éviter des réparations coûteuses associées aux pannes inattendues et aux arrêts prolongés de la production. En outre, elle permet de mieux gérer les ressources et de planifier les budgets de manière plus précise [1].

**I.3.5. Conformité Réglementaire et Qualité des Produits :** Dans de nombreuses industries, la maintenance est également cruciale pour se conformer aux normes de sécurité et de qualité imposées par les régulateurs. Les équipements en bon état de fonctionnement sont moins susceptibles de produire des produits défectueux, ce qui contribue à maintenir la réputation de l'entreprise et à satisfaire les exigences des clients et des régulateurs.

**I.4. Types de maintenance :** La maintenance industrielle se divise en plusieurs types, chacun ayant des objectifs spécifiques et des méthodes adaptées pour assurer le bon fonctionnement des équipements et minimiser les interruptions de production. Voici un aperçu des principaux types de maintenance [1]:

**I.4.1. Maintenance Corrective :** La maintenance corrective, également appelée maintenance curative, intervient après qu'une panne ou un dysfonctionnement a été détecté. L'objectif est de réparer ou de remplacer les composants défectueux pour remettre l'équipement en état de fonctionnement.

Ce type de maintenance peut être planifié (si les pannes sont attendues) ou non planifié (en cas de panne soudaine). Bien que nécessaire, la maintenance corrective est souvent plus coûteuse et peut entraîner des temps d'arrêt prolongés.

**I.4.2. Maintenance Préventive :** La maintenance préventive vise à prévenir les pannes avant qu'elles ne surviennent.

Elle consiste en des inspections régulières, des nettoyages, des lubrifications, et des remplacements de pièces en fonction d'un calendrier prédéfini ou basé sur l'utilisation des machines. L'objectif est de maintenir les équipements en bon état de fonctionnement, de prolonger leur durée de vie et de minimiser les interruptions imprévues. Ce type de maintenance est généralement moins coûteux à long terme et améliore la fiabilité des équipements.

**I.4.3. Maintenance Prédicative :** La maintenance prédictive repose sur la surveillance continue de l'état des équipements grâce à des capteurs et des outils de diagnostic. Les données recueillies sont analysées pour détecter les signes avant-coureurs de défaillance, permettant ainsi d'intervenir avant que la panne ne se produise. Ce type de maintenance est plus sophistiqué et nécessite des technologies avancées, mais il offre un excellent compromis entre la réduction des coûts et l'amélioration de la fiabilité des machines.

**I.4.4. Maintenance Conditionnelle :** La maintenance conditionnelle, parfois considérée comme une sous-catégorie de la maintenance prédictive, repose sur l'évaluation de l'état réel des équipements plutôt que sur un calendrier fixe. Les interventions sont déclenchées en fonction de l'usure réelle ou des conditions de fonctionnement, telles que les vibrations, la température ou les niveaux d'usure mesurés. Cela permet de maximiser l'utilisation des composants tout en minimisant les risques de pannes.

**I.4.5. Maintenance Curative :** La maintenance curative est une forme de maintenance corrective où l'intervention est réalisée dès que le défaut est détecté, avant même que l'équipement ne tombe en panne complète. Ce type de maintenance est particulièrement utile pour les systèmes où une panne totale pourrait avoir des conséquences graves ou coûteuses.

**I.4.6. Maintenance Améliorative :** La maintenance améliorative vise à améliorer les performances des équipements en modifiant ou en optimisant certaines de leurs caractéristiques.

Il s'agit de rendre les machines plus fiables, plus efficaces ou plus sûres en intégrant des technologies plus récentes ou en révisant les conceptions existantes. Ce type de maintenance est souvent planifié et peut faire partie d'une stratégie de modernisation des installations.

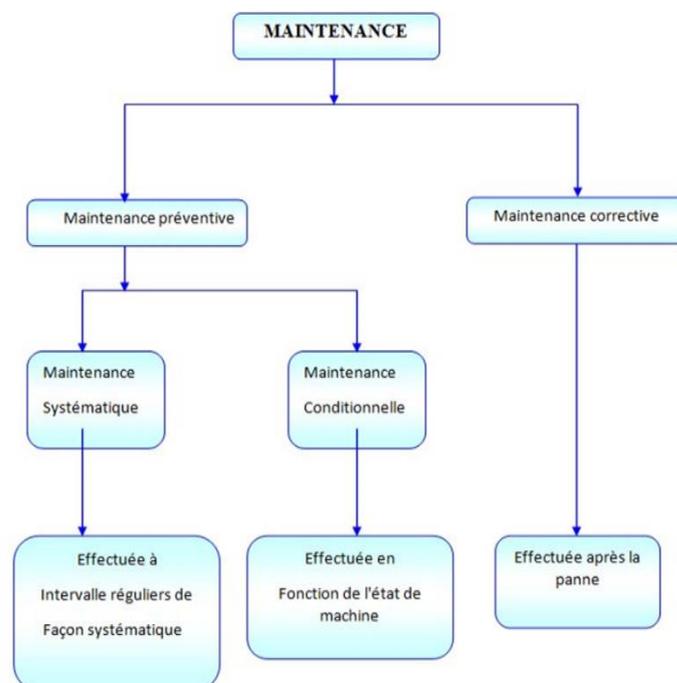


Figure I.1: Organigramme descriptif de la structure de maintenance [1].

**I.5. Maintenance préventive (objectifs et méthodes) :**

La maintenance préventive est une stratégie essentielle dans la gestion des actifs industriels, visant à prévenir les pannes et à assurer le bon fonctionnement des équipements. Voici un aperçu détaillé de ses objectifs et méthodes [2]:

**I.5.1. Objectifs de la Maintenance Préventive :**

❖ **Réduction des Pannes et des Temps d'Arrêt** : L'objectif principal de la maintenance préventive est de réduire la fréquence des pannes en anticipant et en corrigeant les problèmes potentiels avant qu'ils ne causent des interruptions majeures.

En planifiant des interventions régulières, les entreprises peuvent éviter les arrêts de production non planifiés, qui sont souvent coûteux et perturbateurs.

❖ **Prolongation de la Durée de Vie des Équipements** : En entretenant régulièrement les machines, la maintenance préventive aide à prolonger leur durée de vie.

Les interventions planifiées, telles que le graissage, le nettoyage, et le remplacement de pièces usées, permettent de maintenir les équipements en bon état de fonctionnement, retardant ainsi le besoin de remplacements coûteux.

❖ **Amélioration de la Sécurité** : La maintenance préventive joue un rôle crucial dans la sécurité des opérations industrielles.

En identifiant et en corrigeant les défauts avant qu'ils ne deviennent des risques pour la sécurité, cette approche contribue à protéger les travailleurs et à réduire le nombre d'accidents sur le lieu de travail.

❖ **Optimisation des Coûts** : Bien que la maintenance préventive nécessite un investissement initial en temps et en ressources, elle permet de réaliser des économies à long terme en réduisant les coûts associés aux pannes imprévues, aux réparations d'urgence, et aux interruptions de production.

Elle aide également à planifier les budgets de manière plus précise.

**I.5.2. Méthodes de la Maintenance Préventive :**

❖ **Inspections Régulières** : Les inspections régulières des équipements permettent de détecter les signes de défaillance potentielle, comme l'usure des composants ou les anomalies de performance. Ces inspections sont souvent réalisées à intervalles réguliers, selon un calendrier prédéfini basé sur les recommandations du fabricant ou l'expérience opérationnelle.

❖ **Lubrification et Nettoyage** : Une partie importante de la maintenance préventive consiste à maintenir les équipements propres et bien lubrifiés. Le nettoyage régulier aide à prévenir l'accumulation de poussière et de débris, qui peuvent causer des dysfonctionnements, tandis que la lubrification réduit l'usure des pièces mobiles et minimise les frottements.

❖ **Remplacement Proactif des Pièces** : Au lieu d'attendre qu'une pièce tombe en panne, la maintenance préventive recommande le remplacement des pièces susceptibles de s'user, comme les courroies, les filtres, ou les roulements, avant qu'elles n'atteignent la fin de leur durée de vie. Cela permet de prévenir les pannes majeures et d'assurer un fonctionnement continu.

❖ **Suivi des Paramètres Opérationnels** : La surveillance continue des paramètres opérationnels, tels que les vibrations, la température, ou la pression, permet de détecter les anomalies et de prendre des mesures correctives avant qu'un problème ne survienne. Cette approche peut être renforcée par des technologies de maintenance conditionnelle ou prédictive, qui utilisent des capteurs pour surveiller l'état des machines en temps réel.

**I.6. Maintenance corrective (processus et applications) :**

La maintenance corrective est une approche réactive de la gestion des équipements, qui consiste à réparer ou à remplacer des composants défaillants après l'apparition d'une panne. Elle joue un rôle crucial dans le maintien de la disponibilité opérationnelle des équipements et est souvent utilisée en complément d'autres stratégies de maintenance. Voici un aperçu des processus et applications de la maintenance corrective [2]:

**I.6.1. Processus de la Maintenance Corrective :**

❖ **Identification et Diagnostic** : Le processus de maintenance corrective commence par la détection d'une panne ou d'un dysfonctionnement.

Cette détection peut être déclenchée par des alarmes automatiques, des inspections visuelles, ou des retours d'expérience des opérateurs. Une fois la panne identifiée, un diagnostic est effectué pour déterminer la cause profonde du problème. Cette étape est essentielle pour éviter des réparations superficielles qui pourraient ne pas résoudre le problème sous-jacent.

❖ **Planification de l'Intervention** : Après le diagnostic, une planification de l'intervention est effectuée. Cette phase inclut la définition des ressources nécessaires, telles que les pièces de rechange, les outils, et le personnel qualifié. Dans certains cas, il peut être nécessaire de faire appel à des experts externes pour gérer des réparations complexes. La planification doit également tenir compte des impacts potentiels sur la production et la sécurité.

❖ **Réalisation de la Réparation** : L'étape suivante consiste à exécuter la réparation ou le remplacement des pièces défectueuses. Cela peut impliquer des réparations mineures sur place, comme le remplacement d'un fusible, ou des interventions plus complexes nécessitant le démontage de l'équipement pour accéder à des composants internes. Dans les cas où la réparation immédiate n'est pas possible, l'équipement peut être mis hors service temporairement.

❖ **Tests et Vérifications** : Une fois la réparation terminée, des tests sont effectués pour s'assurer que l'équipement fonctionne correctement et que la panne a été résolue. Ces tests peuvent inclure des essais de fonctionnement à vide, des tests de charge, ou des vérifications de sécurité. L'objectif est de confirmer que l'équipement peut reprendre son fonctionnement normal sans risque de nouvelle panne.

❖ **Documentation et Analyse** : La dernière étape du processus de maintenance corrective est la documentation des actions réalisées. Cette documentation comprend les détails de la panne, les réparations effectuées, les pièces remplacées, et toute autre information pertinente. Cette étape est cruciale pour l'amélioration continue, car elle permet d'identifier des tendances de pannes récurrentes et d'ajuster les stratégies de maintenance préventive pour éviter des incidents similaires à l'avenir.

### **I.6.2. Applications de la Maintenance Corrective :**

❖ **Industries Manufacturières** : Dans les usines de production, la maintenance corrective est couramment utilisée pour traiter les pannes imprévues qui interrompent la chaîne de production.

Elle permet de remettre rapidement les machines en état de marche pour minimiser les pertes de production.

❖ **Secteur des Services Publics** : Dans les services publics tels que l'électricité, l'eau, et les télécommunications, la maintenance corrective est essentielle pour rétablir rapidement les services en cas de panne. Les interruptions dans ces secteurs peuvent avoir des impacts majeurs sur la société, ce qui rend la rapidité d'intervention cruciale.

❖ **Industrie des Transports** : Dans le secteur des transports, la maintenance corrective est utilisée pour réparer les véhicules et les équipements de transport en cas de panne en cours d'utilisation.

Cela inclut les réparations d'urgence des avions, des trains, ou des véhicules routiers pour assurer la sécurité des passagers et des marchandises.

**Chapitre II :**  
**Théorie des vibrations et analyse vibratoire**

**II.1. Concepts de base des vibrations :**

Les vibrations se réfèrent aux oscillations périodiques autour d'une position d'équilibre, qui peuvent se produire dans divers systèmes physiques tels que les structures mécaniques, les circuits électriques et les milieux fluides.

En mécanique, une vibration peut être modélisée comme un mouvement oscillatoire autour d'un point d'équilibre, souvent décrit par une équation différentielle du second ordre.

Les paramètres clés dans l'étude des vibrations incluent la fréquence naturelle, l'amortissement, et la force appliquée :

- ❖ La fréquence naturelle est la fréquence à laquelle un système oscille lorsqu'il est perturbé de son état d'équilibre et est déterminée par les propriétés physiques du système, comme la masse et la rigidité.

- ❖ L'amortissement, quant à lui, représente la dissipation d'énergie dans le système et influence la durée des vibrations avant que le système ne revienne à l'état stable.

- ❖ Les vibrations peuvent être excitée par des forces externes, ce qui peut entraîner des résonances si la fréquence d'excitation correspond à la fréquence naturelle du système, conduisant à des amplitudes de vibration élevées [3].

**II.2. Définition et types de vibrations (périodiques, transitoires, aléatoires) :**

Les vibrations désignent des oscillations répétitives autour d'une position d'équilibre, et elles se manifestent dans divers systèmes physiques, qu'il s'agisse de structures mécaniques, de composants électroniques, ou même de fluides en mouvement. Ces oscillations peuvent être classifiées en trois types principaux : les vibrations périodiques, transitoires, et aléatoires, chacun ayant des caractéristiques distinctes et des implications différentes pour l'analyse et le contrôle [3].

**II.2.1. Les vibrations périodiques :** se caractérisent par une répétition régulière et prévisible dans le temps. Elles peuvent être représentées par des fonctions mathématiques simples, comme les fonctions sinusoïdales, qui décrivent les oscillations en termes d'amplitude, de fréquence, et de phase.

Par exemple, un système mécanique avec un déplacement sinusoïdal oscillant autour d'un point d'équilibre montre une vibration périodique, typiquement régie par les lois de l'harmonique simple. Ce type de vibration est souvent rencontré dans des applications où les systèmes sont soumis à des forces cycliques, comme dans les moteurs ou les ponts suspendus soumis à des charges régulières.

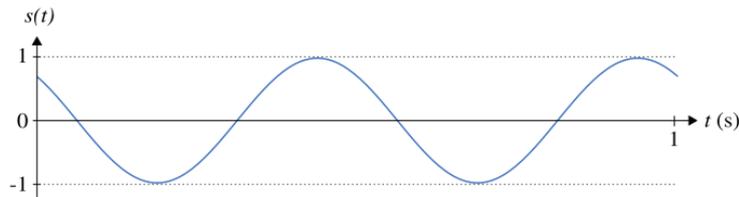


Figure II.2 : Signal sinusoïdal d'amplitude 1, de fréquence 2 Hz et de phase à l'origine  $\pi/4$ rad [3].

**II.2.2. Les vibrations transitoires :** quant à elles, sont des vibrations temporaires qui se produisent en réponse à une perturbation soudaine dans le système. Elles apparaissent généralement après un choc ou une impulsion, et s'atténuent progressivement à mesure que le système dissipe l'énergie introduite par cette perturbation.

Ces vibrations peuvent être critiques à étudier, par exemple lors du démarrage ou de l'arrêt des machines, ou lors de l'impact des structures par des objets extérieurs. La réponse transitoire est analysée pour comprendre comment le système retourne à son état d'équilibre et peut être modélisée par des fonctions impulsionnelles ou des réponses en échelon.

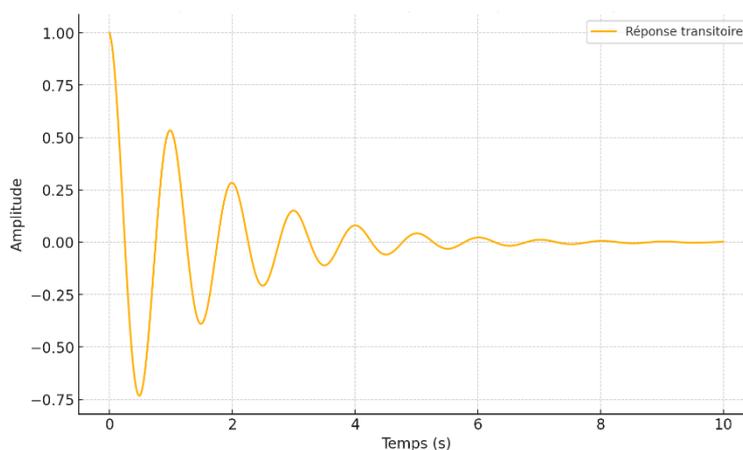


Figure II.3 : Signal transitoire d'un système après une impulsion [3].

**II.2.3. Les vibrations aléatoires** : sont caractérisées par un comportement imprévisible et irrégulier, sans période ou fréquence définie. Elles résultent de forces extérieures qui varient de manière aléatoire dans le temps, telles que les turbulences atmosphériques, les irrégularités dans les routes, ou les vibrations causées par le trafic ferroviaire.

Ce type de vibration est souvent décrit par des méthodes statistiques, utilisant des outils comme le spectre de puissance pour analyser la distribution de l'énergie vibratoire à différentes fréquences. L'analyse des vibrations aléatoires est essentielle dans la conception de systèmes devant fonctionner dans des environnements non contrôlés ou sujets à des forces imprévisibles.

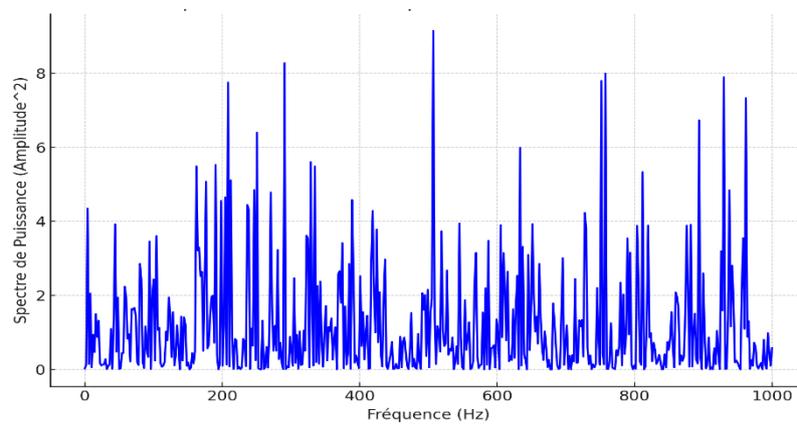


Figure II.4 : spectre de puissance pour des vibrations aléatoires [3].

### II.3. Caractéristiques des vibrations (amplitude, fréquence) :

Les vibrations se caractérisent principalement par deux paramètres fondamentaux : l'amplitude et la fréquence, qui jouent un rôle crucial dans la description et l'analyse du comportement oscillatoire d'un système [4].

**II.3.1. L'amplitude d'une vibration** : se réfère à la mesure du déplacement maximal d'un point du système par rapport à sa position d'équilibre.

Elle représente l'intensité de la vibration et peut être exprimée en termes de déplacement, de vitesse ou d'accélération. En mécanique, l'amplitude est souvent mesurée en millimètres, centimètres ou mètres, selon l'échelle du système en question.

L'amplitude est directement liée à l'énergie transportée par la vibration ; plus l'amplitude est grande, plus l'énergie de la vibration est élevée, ce qui peut avoir des implications importantes pour la fatigue des matériaux et la durabilité des structures.

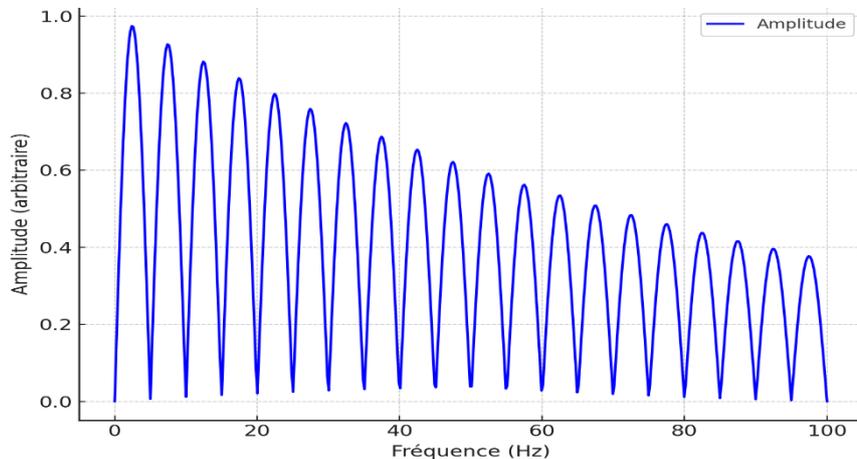


Figure II.5 : Spectre en 2D d'amplitude en fonction de la fréquence [4].

**II.3.2. La fréquence** : quant à elle, désigne le nombre de cycles de vibration que le système effectue par unité de temps, généralement exprimée en Hertz (Hz) [4].

La fréquence est une caractéristique clé qui influence la réponse dynamique d'un système. Les systèmes mécaniques possèdent des fréquences naturelles, qui sont les fréquences auxquelles ils ont tendance à osciller lorsqu'ils sont perturbés.

Si une force extérieure agit sur le système à une fréquence proche de cette fréquence naturelle, une résonance peut se produire, conduisant à des amplitudes de vibration beaucoup plus élevées, ce qui peut causer des dommages importants ou même une défaillance du système.

Il est important de noter que la relation entre amplitude et fréquence est complexe. Par exemple, dans un système sous-amorti, une augmentation de la fréquence d'excitation au-delà de la fréquence naturelle tend à diminuer l'amplitude des vibrations, alors qu'à la fréquence de résonance, l'amplitude atteint son maximum.

De plus, les vibrations à haute fréquence peuvent avoir des effets différents sur les systèmes comparés à celles à basse fréquence ; par exemple, les vibrations à haute fréquence sont souvent plus nuisibles pour les composants électroniques sensibles, tandis que les basses fréquences peuvent être plus destructrices pour les grandes structures mécaniques.

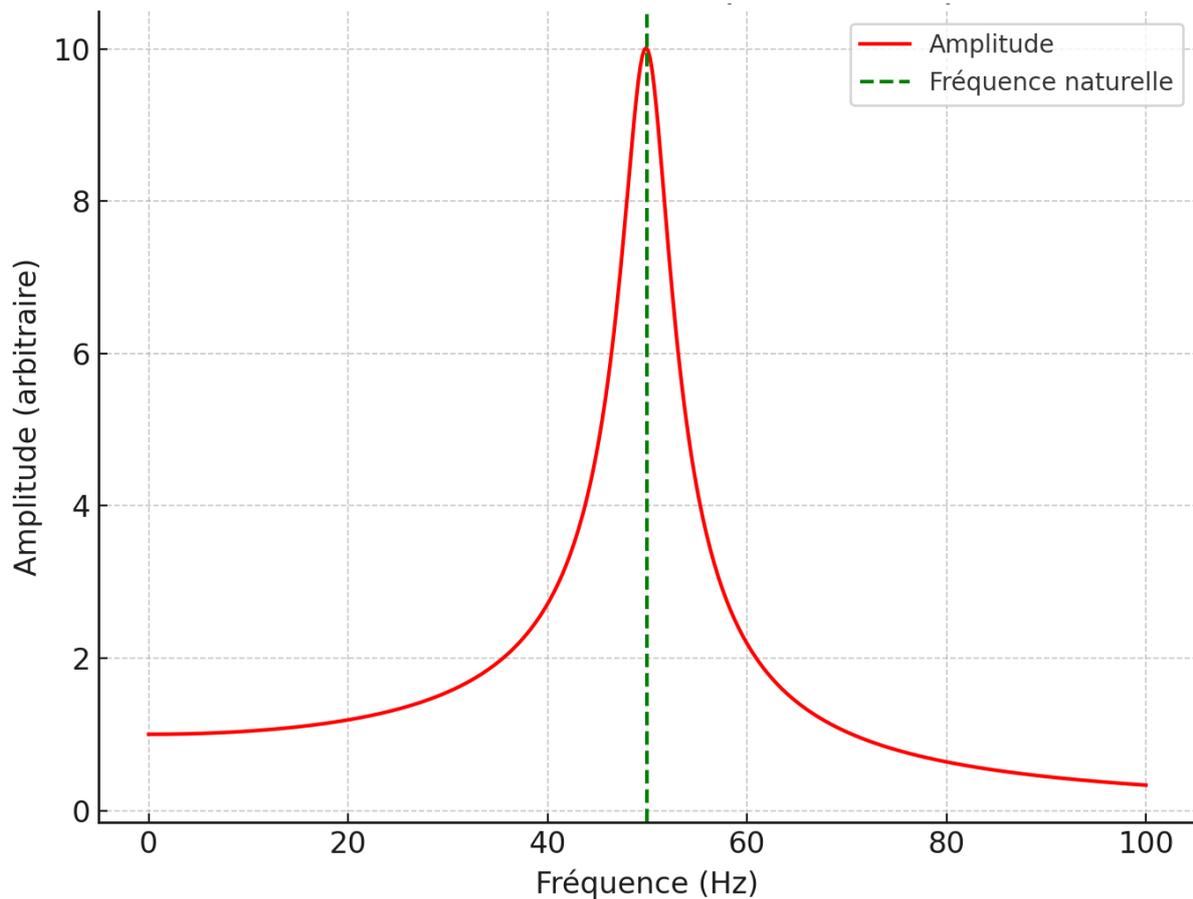


Figure II.6 : Résonance et relation amplitude-fréquence[4].

Enfin, la combinaison de ces deux caractéristiques, l'amplitude et la fréquence, permet de décrire complètement le spectre vibratoire d'un système, facilitant ainsi l'analyse des effets dynamiques sur le système et permettant la mise en œuvre de stratégies de contrôle et de réduction des vibrations, telles que l'amortissement, l'isolation vibratoire, ou l'utilisation de matériaux absorbants.

#### II.4. Méthodes d'analyse vibratoire :

Les méthodes d'analyse vibratoire jouent un rôle crucial dans la compréhension, la prédiction et le contrôle des phénomènes vibratoires dans les systèmes mécaniques et les structures.

Ces méthodes se basent sur des principes mathématiques et physiques pour analyser les signaux vibratoires et en extraire des informations essentielles pour le diagnostic et l'amélioration des performances des systèmes.

Les principales techniques d'analyse vibratoire incluent l'analyse fréquentielle, l'analyse temporelle, l'analyse modale, et l'analyse de la densité spectrale de puissance (DSP).

**II.4.1. L'analyse fréquentielle :** est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour étudier les vibrations. Elle repose sur la Transformée de Fourier (TF), qui décompose un signal temporel en une somme de sinusoides de différentes fréquences. Pour un signal  $x(t)$ , la Transformée de Fourier est définie par [3]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t)e^{-j2\pi ft} dt \dots\dots\dots(II.1)$$

Où :  $X(f)$  représente le spectre de fréquence du signal,

$T$  est la variable temps.

$f$  est la variable fréquence.

La Transformée de Fourier Discrète (TFD), et plus particulièrement la Transformée de Fourier Rapide (FFT), sont utilisées pour calculer le spectre de fréquence à partir d'échantillons numériques. L'analyse fréquentielle permet d'identifier les fréquences dominantes dans un système, comme les fréquences naturelles où la résonance pourrait se produire. Cette information est cruciale pour éviter des conditions de résonance qui peuvent entraîner des dommages structurels importants.

Une application typique de l'analyse fréquentielle est l'identification des fréquences propres d'un système mécanique. Supposons un système à un degré de liberté (SDOF) modélisé par l'équation différentielle suivante [3] :

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(T)\dots\dots\dots(II.2)$$

Où  $m$  est la masse,  $c$  le coefficient d'amortissement,  $k$  la raideur,  $x(t)$  le déplacement, et  $F(T)$  la force excitatrice.

La solution de cette équation, en supposant une excitation harmonique [3] :

$$F(T) = F_0 \cos(\omega t)\dots\dots\dots(II.3)$$

Révèle que le système présente une amplification maximale de l'amplitude de  $x(t)$  lorsque la fréquence d'excitation  $\omega$  est proche de la fréquence naturelle  $\omega_n = \sqrt{K/m}$ . L'analyse en fréquence permet donc de détecter ces fréquences critiques pour éviter la résonance.

**II.4.2. L'analyse temporelle :** quant à elle, se concentre sur l'évolution des vibrations dans le domaine temporel. Cette méthode est essentielle pour étudier les réponses transitoires, c'est-à-dire les réponses du système à des impulsions ou des perturbations soudaines.

Par exemple, une analyse des réponses transitoires d'un système SDOF sous une force d'impulsion  $F(t) = F_0 \delta(t)$  donne une solution sous forme de décroissance exponentielle, représentée par [3] :

$$x(t) = \frac{F_0}{m\omega_n} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t) \dots\dots\dots (II.4)$$

Où  $\tau$  est le facteur d'amortissement,

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{est la fréquence de vibration amortie,}$$

$\delta(t)$  est la fonction d'impulsion de Dirac.

Cette analyse est cruciale pour prédire la réponse d'un système à des événements soudains, tels que des chocs ou des impacts, qui sont courants dans de nombreux environnements industriels.

**II.4.3. L'analyse modale :** est une technique avancée utilisée pour déterminer les modes de vibration d'un système. Chaque mode est caractérisé par une fréquence naturelle et une forme modale, qui décrivent comment différentes parties du système se déplacent en réponse à une excitation. Mathématiquement, pour un système à plusieurs degrés de liberté (MDOF), l'analyse modale implique la résolution du problème aux valeurs propres suivant [3]:

$$(K - \omega^2 M)\Phi = 0 \dots\dots\dots (II.5)$$

Où  $K$  est la matrice de raideur,  $M$  est la matrice de masse,  $\omega$  est la fréquence naturelle, et  $\Phi$  est le vecteur des formes modales.

En résolvant cette équation, on obtient les fréquences naturelles  $\omega$  et les formes modales associées. Ces informations permettent de comprendre comment une structure complexe, comme un bâtiment ou un pont, réagit aux vibrations et de concevoir des stratégies pour minimiser les risques de résonance et de défaillance.

**II.4.4. L'analyse de la densité spectrale de puissance (DSP) :** est une autre méthode clé pour étudier les vibrations, particulièrement dans les systèmes soumis à des excitations aléatoires ou stochastiques.

La DSP  $S_{xx}(f)$  d'un signal  $x(t)$  est définie comme la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation  $R_{xx}(\tau)$  du signal [3]:

$$S_{xx}(f) = \int_{-\alpha}^{+\alpha} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \dots \dots \dots \text{(II. 6)}$$

Où  $\tau$  est le décalage temporel.

La DSP permet d'analyser comment l'énergie d'un signal vibratoire est distribuée en fonction de la fréquence. Cela est particulièrement utile pour caractériser les vibrations aléatoires, qui ne sont pas facilement analysables par des méthodes classiques de transformée de Fourier.

Enfin, ces méthodes d'analyse sont souvent combinées pour obtenir une compréhension complète des comportements vibratoires complexes. Par exemple, dans le diagnostic de machines rotatives, l'analyse fréquentielle permet d'identifier les fréquences d'instabilité, tandis que l'analyse modale est utilisée pour étudier la distribution des modes de vibration dans le système. Les résultats de ces analyses sont utilisés pour concevoir des mesures correctives, telles que l'équilibrage dynamique, l'ajout d'amortisseurs, ou la modification de la conception structurelle pour réduire l'amplitude des vibrations à des fréquences critiques.

## II.5. Appareils de mesure et capteurs :

Les appareils de mesure et les capteurs de vibration sont essentiels pour la détection, le diagnostic et la surveillance des phénomènes vibratoires dans divers systèmes industriels et mécaniques. Les principaux types de capteurs utilisés pour mesurer les vibrations sont les accéléromètres, les capteurs de déplacement, et les capteurs de vitesse, chacun ayant des principes de fonctionnement distincts [5].

**II.5.1. Les accéléromètres :** sont les capteurs de vibration les plus couramment utilisés. Ils mesurent l'accélération des vibrations, qui est proportionnelle à la force appliquée sur un système selon la deuxième loi de Newton :  $F=ma$ .

Les accéléromètres piézoélectriques sont les plus répandus. Ils fonctionnent sur le principe de l'effet piézoélectrique, où un matériau piézoélectrique, comme le quartz ou la céramique,

génère une charge électrique proportionnelle à l'accélération appliquée. Cette charge est ensuite convertie en un signal électrique mesurable.

Par exemple, un accéléromètre piézoélectrique produit un signal de tension proportionnel à l'accélération  $a$ , selon la relation  $V=k \cdot a$ , où  $k$  est la sensibilité du capteur.

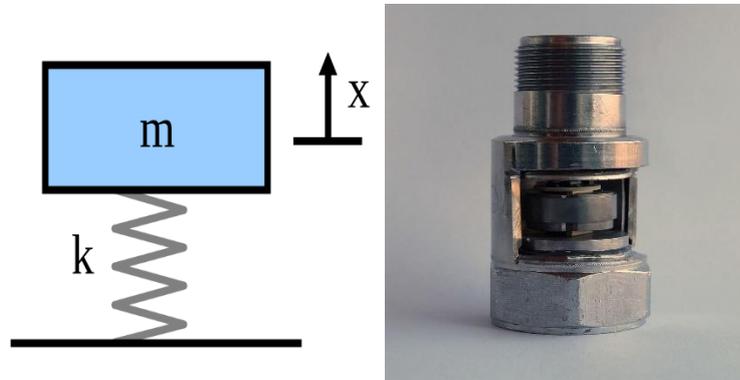


Figure II.7 : Schéma d'un système masse-ressort d'accéléromètre piézoélectrique [5]

**II.5.2. Les capteurs de déplacement** : mesurent directement le déplacement vibratoire d'un point spécifique. Les capteurs de déplacement à courant de Foucault (ou capteurs inductifs) fonctionnent en mesurant les variations de champ magnétique causées par le mouvement d'un objet métallique par rapport à une bobine inductive. Le déplacement modifie l'inductance de la bobine, ce qui est traduit en une variation de tension :

$$V(t) = K_d \cdot d(t)$$

Où  $V(t)$  est la tension de sortie,  $K_d$  est la constante de sensibilité, et  $d(t)$  est le déplacement. Ces capteurs sont fréquemment utilisés dans les machines-outils et les turbines pour surveiller le jeu entre les composants critiques et prévenir les contacts destructeurs.

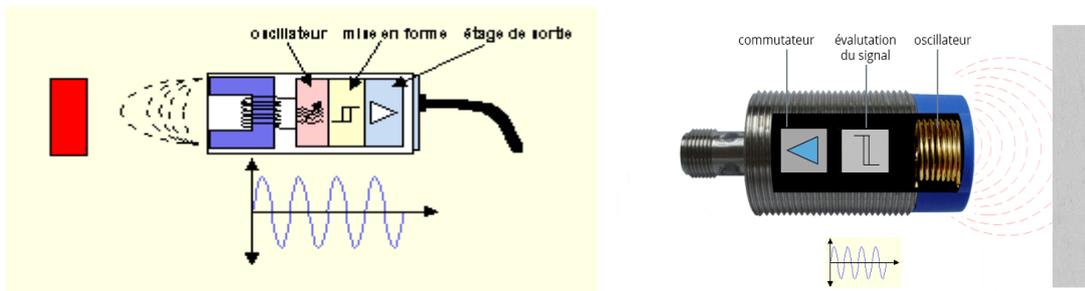


Figure II.8 : Schéma de fonctionnement d'un capteur inductif [5]

**II.5.3. Les analyseurs de spectre :** sont des dispositifs électroniques qui, associés à ces capteurs, permettent de décomposer le signal vibratoire en ses composantes fréquentielles. Ils fonctionnent en utilisant des algorithmes de transformée de Fourier rapide (FFT) pour calculer le spectre de fréquence à partir des signaux de vibration capturés par les capteurs. Ces analyseurs sont essentiels pour diagnostiquer les problèmes de résonance, identifier les fréquences naturelles, et surveiller la condition des machines en temps réel.

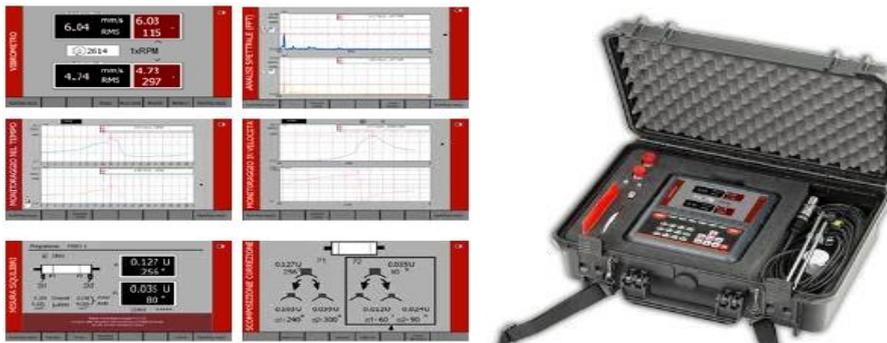


Figure II.9 : Analyseur Vibromètre multifonctions [5].

**II.5.4. Les systèmes de surveillance en temps réel :** combinent plusieurs capteurs et instruments de mesure pour fournir une vue d'ensemble complète des vibrations dans un système.

Ces systèmes sont capables de traiter et d'analyser les données en temps réel, alertant les opérateurs en cas de dépassement des seuils de vibration critiques. Cela permet une intervention rapide et efficace pour prévenir des défaillances coûteuses ou catastrophiques.

De plus, des technologies avancées comme les capteurs à fibre optique et les capteurs MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) sont de plus en plus utilisées dans des applications spécialisées.

Les capteurs à fibre optique utilisent des variations de la lumière dans une fibre pour mesurer les déformations et les vibrations, offrant une grande résistance aux interférences électromagnétiques et une capacité de mesure sur de longues distances. Les capteurs MEMS, quant à eux, intègrent des microstructures sensibles aux vibrations sur une puce de silicium, offrant des solutions compactes et à faible coût pour des applications telles que les smartphones, les dispositifs portables, et les drones.

**II.6. Techniques d'analyse pour les méthodes temporelles et fréquentielles :**

Les techniques d'analyse des signaux peuvent être classées en deux catégories principales : les méthodes temporelles et les méthodes fréquentielles. Chaque méthode a ses propres avantages, limitations, et applications spécifiques, souvent déterminées par la nature du signal et l'objectif de l'analyse[3].

**II. 6.a. Méthodes temporelles :**

Les méthodes temporelles consistent à analyser un signal dans le domaine du temps, c'est-à-dire en observant comment le signal varie en fonction du temps. Cette approche est particulièrement utile pour les signaux dont les caractéristiques changent au fil du temps, comme les signaux transitoires ou les signaux modulés. Les techniques les plus courantes incluent :

**1.Analyse des valeurs instantanées** : Elle consiste à observer directement la forme d'onde du signal pour en tirer des informations, comme l'amplitude, la période, ou les caractéristiques des impulsions.

**2. Analyse de corrélation** : La corrélation croisée entre deux signaux permet de déterminer la similitude entre ces signaux, ce qui est utile dans la détection des motifs et des correspondances temporelles.

**3.Analyse statistique** : Des paramètres statistiques comme la moyenne, la variance, l'écart type, etc., sont calculés pour fournir une description succincte des propriétés globales du signal sur une période donnée.

Les méthodes temporelles sont particulièrement efficaces pour les signaux dont les caractéristiques principales sont directement visibles dans le domaine temporel, mais elles deviennent limitées lorsqu'il s'agit de signaux plus complexes ou de la nécessité d'une analyse plus détaillée des fréquences contenues dans un signal.

**II.6.b. Méthodes fréquentielles :**

Les méthodes fréquentielles se concentrent sur l'analyse des signaux dans le domaine des fréquences, c'est-à-dire en observant comment l'énergie du signal est distribuée parmi différentes fréquences. Cette approche est essentielle pour comprendre les propriétés spectrales d'un signal, ce qui est particulièrement utile dans les systèmes de communication, le traitement du son, et la détection des défauts mécaniques.

Les principales techniques d'analyse fréquentielle incluent [3]:

**1.Transformée de Fourier (FFT) :** La FFT est l'une des méthodes les plus utilisées pour convertir un signal du domaine temporel au domaine fréquentiel. Elle permet d'obtenir le spectre de fréquence d'un signal, révélant ainsi les composantes fréquentielles majeures et mineures. La FFT est rapide et efficace pour les signaux stationnaires.

**2.Analyse spectrale :** Cette méthode implique la décomposition du signal en une série de sinusoïdes, permettant une représentation du signal en fonction de ses composantes fréquentielles. Elle est souvent utilisée pour analyser les signaux stationnaires et périodiques.

**3.Analyse temps-fréquence (transformée de Fourier à court terme, STFT) :** Pour les signaux non stationnaires, dont les propriétés fréquentielles évoluent au fil du temps, la STFT permet de visualiser comment le spectre de fréquence change avec le temps. Elle offre une représentation temps-fréquence qui est essentielle pour l'analyse de signaux transitoires ou modulés.

**4.Transformée en ondelettes :** C'est une méthode qui décompose un signal en ondelettes de différentes fréquences et localisations temporelles, offrant ainsi une résolution variable en temps et en fréquence. Elle est particulièrement utile pour les signaux ayant des structures à plusieurs échelles et est devenue populaire dans les applications comme la compression de données, la détection de défauts, et l'analyse des signaux biologiques.

### **II.6.c. Applications et limitations :**

Chaque méthode d'analyse a ses applications et ses limitations. Les méthodes temporelles sont simples et offrent une bonne compréhension des signaux qui sont principalement définis dans le domaine du temps. Cependant, elles ne fournissent aucune information sur les fréquences présentes dans le signal, ce qui limite leur utilité pour les signaux complexes ou à large bande. D'autre part, les méthodes fréquentielles fournissent des informations détaillées sur la distribution des fréquences dans un signal, ce qui est crucial pour l'analyse de signaux complexes. Cependant, elles supposent souvent que le signal est stationnaire, ce qui n'est pas toujours le cas. L'analyse temps-fréquence et la transformée en ondelettes tentent de surmonter cette limitation en offrant une résolution simultanée en temps et en fréquence, mais cela se fait souvent au prix d'une plus grande complexité computationnelle et d'une interprétation plus complexe des résultats.

# **Chapitre III :**

## **Mise en œuvre expérimentale**

**III.1. Introduction :**

Ce chapitre présente la mise en œuvre expérimentale de l'analyse vibratoire d'une turbine à gaz MS 3002. Nous commencerons par décrire les caractéristiques et composants principaux de cette turbine industrielle de haute performance. Ensuite, nous aborderons les problématiques courantes rencontrées, notamment les vibrations et balourds.

La partie centrale du chapitre détaillera les procédures expérimentales utilisées pour détecter et analyser ces défauts.

Enfin, nous examinerons un cas concret de diagnostic vibratoire sur une turbine MS 3002, en présentant la méthodologie d'analyse des données et les résultats obtenus.

Cette étude de cas illustrera l'application pratique des techniques d'analyse vibratoire pour identifier l'origine des vibrations excessives et proposer des solutions.

**III.2. Analyse de la turbine MS 3002 :**

L'analyse de la turbine MS 3002 implique une évaluation détaillée de ses caractéristiques, performances et maintenance. Voici une description générale de ce que pourrait inclure une telle analyse [5]:

- **Type de Turbine** : turbine à gaz
- **Applications** : production d'électricité, propulsion.
- **Dimensions et Poids** : Longueur : Environ 5 à 6 mètres (16 à 20 pieds),  
Largeur : Environ 2 à 3 mètres (6,5 à 10 pieds)  
Hauteur : Environ 2,5 à 3,5 mètres (8 à 11,5 pieds)  
Poids : Environ 15 à 25 tonnes métriques
- **Capacité** : Puissance nominale : Environ 30 MW (mégawatts). Capacité de production d'énergie : Approximativement 240 GWh par ans (en fonction des conditions d'exploitation). Plages de fonctionnement : Fonctionne efficacement à des températures d'entrée de turbine entre 850°C et 1250°C, avec une plage de vitesses de rotation d'environ 3000 à 3600 tr/min
- **Type de Combustible** : le gaz naturel, diesel léger ou d'autres hydrocarbures liquides.
- **Efficacité** : Rendement thermique : Environ 30% à 35%.  
Rendement mécanique : Généralement supérieur à 90%.

Cette analyse permet de garantir que la turbine MS 3002 fonctionne de manière optimale et durable, tout en minimisant les risques de pannes et en assurant une maintenance appropriée

### III.3. Description de la turbine et de ses composants :

La turbine MS 3002 est une machine industrielle de haute performance, souvent utilisée dans la production d'énergie et d'autres applications nécessitant une source d'énergie fiable et continue. Cette turbine à gaz est conçue pour offrir une efficacité énergétique maximale tout en étant robuste et adaptable à diverses conditions opérationnelles. Elle se compose de plusieurs composants essentiels qui travaillent en harmonie pour convertir l'énergie chimique du combustible en énergie mécanique, puis en énergie électrique [5].

**III.3.1. Compresseur :** est l'un des principaux composants de la turbine MS 3002. Il aspire l'air ambiant et le comprime à haute pression avant de l'envoyer dans la chambre de combustion. Ce processus de compression augmente la densité de l'air, ce qui améliore l'efficacité de la combustion et, par conséquent, la puissance générée par la turbine.

**III.3.2. Chambre de combustion :** est le cœur de la turbine. C'est ici que le combustible, souvent du gaz naturel, est mélangé à l'air comprimé et enflammé. La combustion produit des gaz chauds à haute pression, qui sont ensuite dirigés vers les étages de la turbine. Cette chambre est conçue pour supporter des températures extrêmement élevées et des pressions importantes tout en assurant une combustion complète et efficace du carburant.

**III.3.3. Les étages de la turbine :** sont les composants où l'énergie des gaz chauds est convertie en énergie mécanique. La MS 3002 est équipée de deux étages, chacun étant constitué d'une série de pales montées sur un rotor. Les gaz en expansion font tourner ces pales, ce qui fait tourner le rotor de la turbine. Cette rotation est ensuite utilisée pour entraîner un générateur électrique.

**III.3.4. Le système de refroidissement :** est crucial pour maintenir la turbine à des températures de fonctionnement sécuritaires. Compte tenu des températures extrêmes dans la chambre de combustion et les étages de la turbine, des circuits de refroidissement sophistiqués sont intégrés pour prévenir la surchauffe et assurer une longue durée de vie des composants.

**III.3.5. Le système de lubrification :** Un composant important qui maintient les paliers et autres parties de la turbine bien lubrifiés, réduisant ainsi la friction et l'usure. Ce système est vital pour garantir un fonctionnement en douceur et prolonger la durée de vie de la turbine.

**III.3.6. Le système de contrôle** est un autre composant clé de la turbine MS 3002. Il surveille et régule les différents paramètres de la turbine, comme la température, la pression, et la vitesse de rotation, afin d'optimiser les performances et d'assurer la sécurité de l'opération. Les systèmes modernes incluent souvent des contrôles automatisés qui permettent des ajustements en temps réel pour répondre aux fluctuations de la demande énergétique ou aux variations des conditions d'exploitation.

#### **III.4. Problématiques rencontrées :**

Les turbines à gaz MS 3002 rencontrent fréquemment des problématiques complexes liées aux vibrations et aux balourds, qui sont des défis critiques pour leur fonctionnement optimal [5].

**III.4.1. Les vibrations :** peuvent être provoquées par divers facteurs, tels que des déséquilibres rotatifs où la répartition de la masse du rotor est inégale, entraînant des forces centrifuges non uniformes.

Ce déséquilibre peut résulter de : L'accumulation de dépôts, L'usures des composants ou de défauts de fabrication. En outre, La défaillances des paliers peuvent engendrer des vibrations en introduisant des irrégularités dans le mouvement rotatif.

Les vibrations peuvent aussi être causées par des anomalies dans la combustion, telles que des fluctuations dans la pression de la chambre de combustion, générant des perturbations dans le flux de gaz.

**III.4.2. Les balourds :** ou déséquilibres dynamiques, se manifestent lorsque la masse des composants rotatifs n'est pas uniformément répartie autour de l'axe de rotation.

Ce problème peut être dû à : une accumulation de dépôts sur le rotor, des déformations dues à des charges excessives, ou des erreurs lors de l'assemblage. Ces déséquilibres créent des forces centrifuges inégales qui intensifient les vibrations et affectent la stabilité de la turbine.

**III.4.3. Les conséquences :** ces problématiques sont significatives, elles peuvent entraîner une usure prématurée des composants, réduire l'efficacité énergétique de la turbine, et augmenter les coûts de maintenance et les risques de pannes mécaniques.

**III.5. Procédures Expérimentales :**

La détection des défauts de vibration et de balourd dans la turbine à gaz MS 3002 nécessite des procédures expérimentales rigoureuses, impliquant plusieurs étapes méthodologiques pour identifier, analyser, et corriger ces problèmes critiques.

**III.5.1. Préparation des Instruments :** La première étape consiste à préparer les instruments de mesure. Des capteurs de vibration, tels que des accéléromètres et des capteurs de déplacement, sont installés à des points critiques de la turbine, notamment sur le rotor, les caches paliers, et la base de la machine. Ces capteurs doivent être correctement calibrés pour garantir des mesures précises. Des dispositifs de mesure laser peuvent également être utilisés pour analyser les mouvements du rotor et détecter tout déséquilibre.

**III.5.2. Collecte des Données de Vibration :** Une fois les capteurs installés, la turbine est mise en marche pour collecter les données de vibration en temps réel. Les mesures doivent être effectuées sur une période prolongée et à différentes vitesses de fonctionnement pour capturer les caractéristiques vibratoires sous diverses conditions de charge. Les données sont ensuite enregistrées pour une analyse ultérieure.

**III.5.3. Analyse Spectrale des Vibrations :** Les données collectées sont analysées à l'aide de techniques d'analyse spectrale. Cette méthode permet de décomposer les vibrations en leurs composantes fréquentielles, identifiant ainsi les fréquences spécifiques associées aux défauts, comme les fréquences de déséquilibre et les fréquences de résonance structurelle. Un pic à une fréquence spécifique peut indiquer un déséquilibre, tandis que des harmoniques ou des sous-harmoniques peuvent signaler des problèmes de roulement ou de frottement.

**III.5.4. Diagnostic du Balourd :** Pour diagnostiquer un balourd, l'équilibrage dynamique est effectué. Cette procédure implique de faire tourner la turbine à différentes vitesses et de mesurer les vibrations résultantes. Les données obtenues permettent de déterminer la répartition de la masse sur le rotor. Si un déséquilibre est détecté, des contrepoids sont ajoutés ou retirés pour corriger le balourd, et la procédure est répétée jusqu'à ce que l'équilibre optimal soit atteint.

**III.5.5. Vérification des paliers :** Les paliers sont inspectés pour détecter des signes d'usure ou de défaillance. Des capteurs acoustiques peuvent être utilisés pour écouter les bruits émis par les paliers en fonctionnement, ce qui permet de détecter des anomalies sonores associées à des défauts mécaniques internes. Les données vibratoires des paliers sont également analysées pour repérer des fréquences spécifiques qui indiquent des problèmes de lubrification ou des dommages structuraux.

**III.5.6. Tests de Résonance :** Les tests de résonance sont réalisés pour identifier les fréquences naturelles de la turbine et vérifier si elles coïncident avec les fréquences de fonctionnement.

Si une résonance est détectée, des modifications peuvent être apportées à la structure de la turbine ou à ses conditions de fonctionnement pour éviter les amplifications vibratoires dangereuses.

**III.5.7. Surveillance Continue :** Après avoir détecté et corrigé les défauts, un système de surveillance en continu est généralement mis en place pour suivre les niveaux de vibration et assurer que la turbine fonctionne dans des conditions optimales. Cette surveillance permet de réagir rapidement en cas de reprise des défauts, évitant ainsi des dommages potentiellement coûteux.

**III.5.8. Rapport et Documentation :** Enfin, toutes les données recueillies, les analyses effectuées, et les corrections apportées sont documentées dans un rapport détaillé. Ce rapport inclut des recommandations pour la maintenance préventive et les ajustements nécessaires pour éviter de futurs problèmes de vibration et de balourd.

Ces procédures sont essentielles pour assurer la fiabilité et la performance des turbines à gaz MS 3002, en minimisant les risques de défaillance et en prolongeant la durée de vie des équipements.

**III.6. Problématique à examiner et réalisation de mesures vibratoires :**

Comme dans tous les équipements tournants, il existe sensiblement les mêmes phénomènes de vibrations pendant la rotation de la machine. Les vibrations produites par les machines tournantes traduisent les efforts dynamiques engendrés par les pièces en mouvement. Ces vibrations peuvent conduire à des ruptures inopinées en raison de la fatigue et de l'usure qu'elles engendrent.

**III.6.1. Objectifs :** Nos travail a pour buts de :

- Diagnostiqué un problème de vibration dans la turbine GE MS 3002 .
- Utilisé l'analyse vibratoire pour analyser un graphe de vibration de la turbine .
- Déterminer l'origine de cette vibration de la turbine GE MS 3002 .
- Résolution le problème de vibration de la turbine GE MS 3002 .

**III.6.2. Présentation de problème :** Après un fonctionnement de la turbine à gaz GE MS 3002 de la région RNS (87-DGT-01-A), de 180118 H de marche et 1187 fois (nombre de démarrage), le capteur de vibration qui est installé au niveau de palier 01 indique une augmentation de vibration de 13 mm/s (vitesse de vibration) après une révision générale de la turbine.



Figure III.10 : position du capteur de vibration et Key-phaser sur palier 1 de MS 3002

Après le démarrage de la turbine, la valeur de vibration affichée dans le système DCS, cette valeur indiquée le niveau global de la vibration du palier.

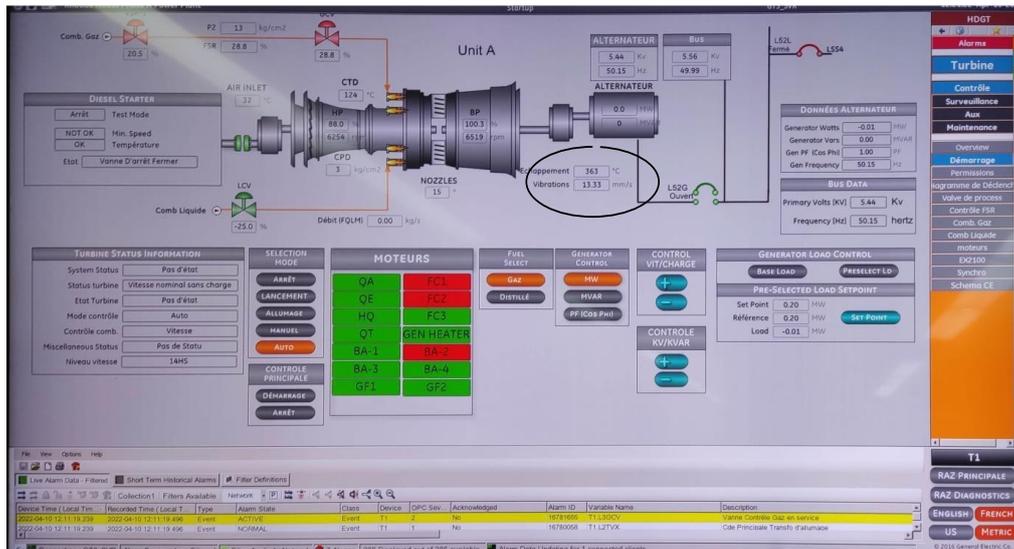


Figure III.11 : schéma détaillé de DCS qui définit les vibrations de la turbine MS 3002.

La vibration de palier 1 de la turbine MS 3002 de RNS est représentée dans le graphe suivant :

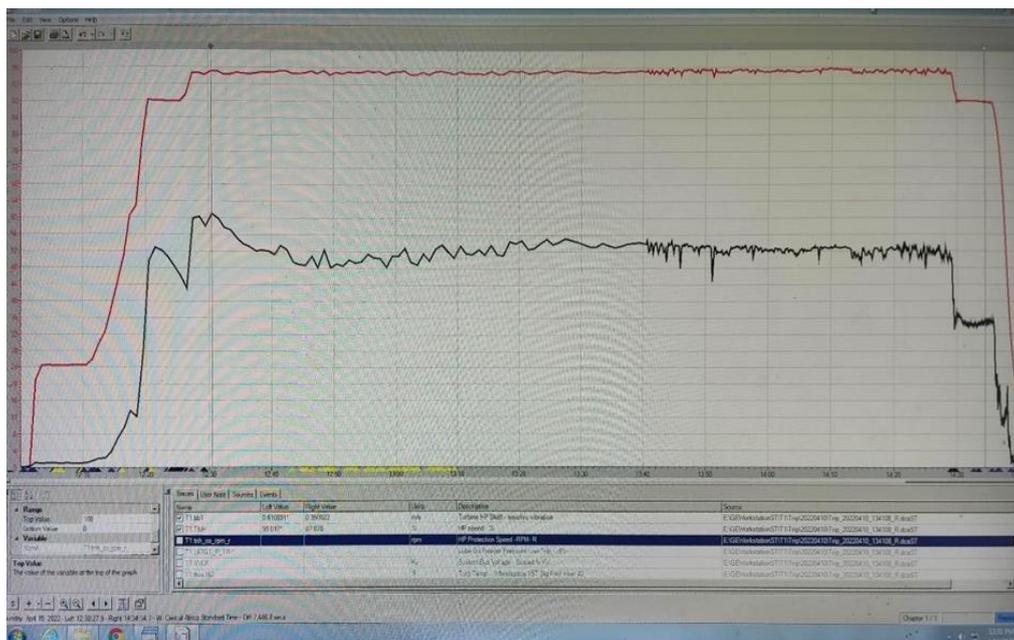


Figure III.12 : graphe de vibration et vitesse en fonction de temps de turbine MS 3002.

Le graphe représente la variation de la vibration en fonction de temps (mm/s)

- Graphe noir est l'évolution de la vitesse de vibration en fonction de temps (mm/s), on peut le partager en trois phases : démarrage, fonctionnement et arrêt de la machine .
- Graphe rouge est la vitesse de rotation (pourcentage).

III.6.3. Démonstration graphique des Vibrations :

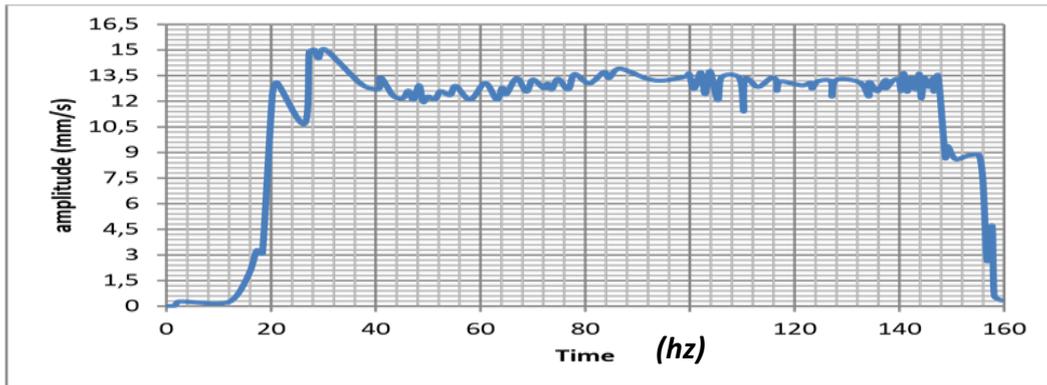


Figure III.13 : vibration du palier 1 de la turbine MS 3002.

Ce graphe représente la vitesse de vibration du palier 1 de démarrage jusqu'à l'arrêt de la turbine MS 3002.

Pour faciliter l'analyse du signal le capteur de vibration du palier 1 donne 03 graphes, démarrage, fonctionnement (stabilisée), et arrêt.

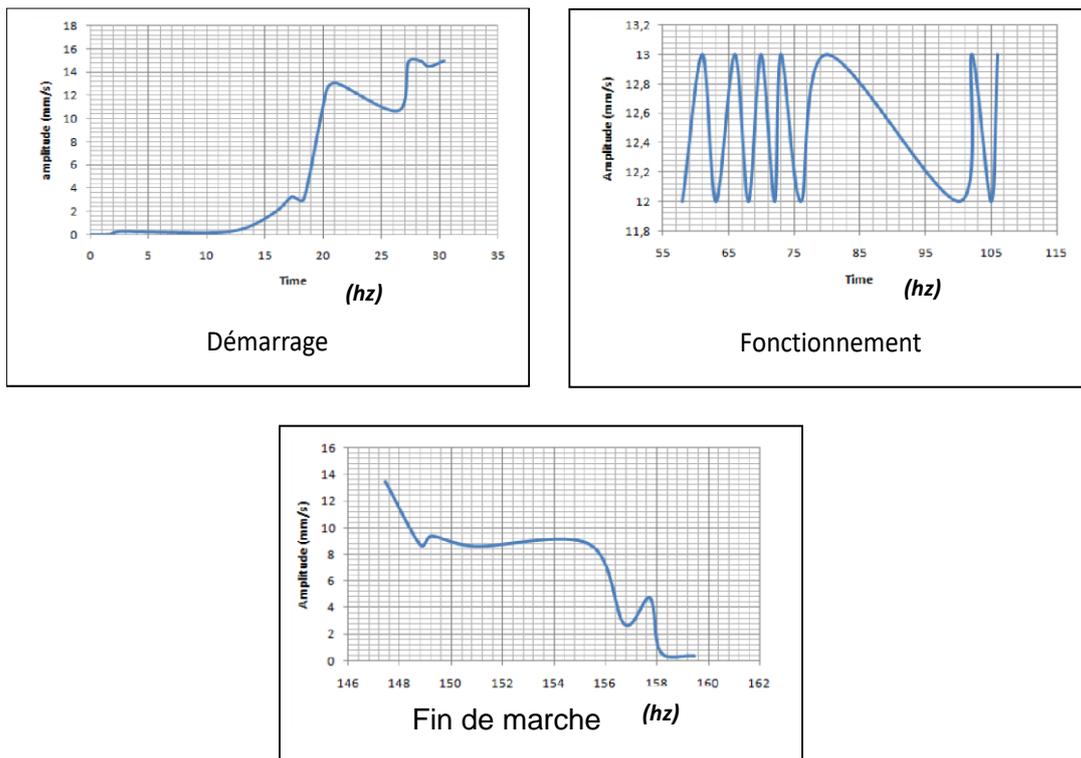


Figure III.14 : trois étapes (démarrage, stabilité et arrêt) de la turbine MS 3002 de RNS .

III.6.4. Analyse des données :

Pendant le fonctionnement de la machine MS 3002, on remarque la valeur de la vibration du palier 1 est 13 mm/s, cette valeur inaccessible par port à la valeur des normes de vibration mécanique qui sont résumé sur le tableau suivant [10]:

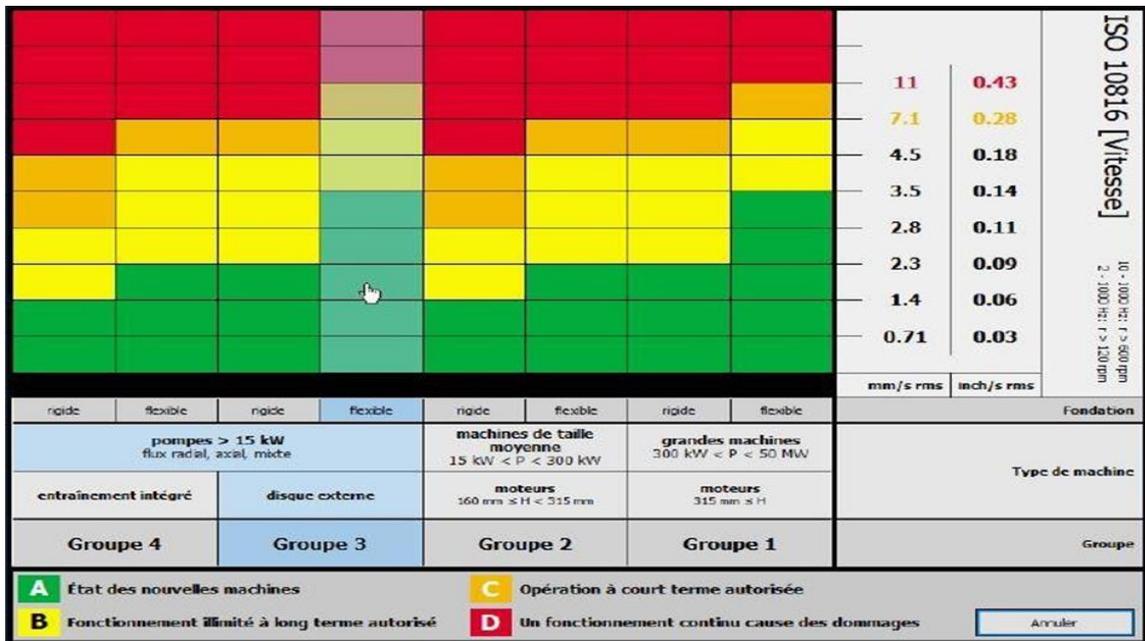


Figure III.15 : tableau de la norme ISO 10816 de taux des vibrations mécanique[10].

La puissance de la turbine MS 3002 est 4 MW, alors on le mettre dans le groupe 1 (grandes machines), avec un accouplement rigide (deuxième case a droit). Alors la valeur de 13 mm/s est donc dans la zone rouge (un fonctionnement continu cause des dommages), d’après cette remarque, on doit chercher l’origine de cette valeur de vibration.

Pendant le fonctionnement de la turbine MS 3002, le capteur nous donnons un graphe de vibration (amplitude) en fonction de temps, après le découpage et le filtrage de signal on a obtenu un signal sinusoïdale périodique résume dans le graphe suivant :

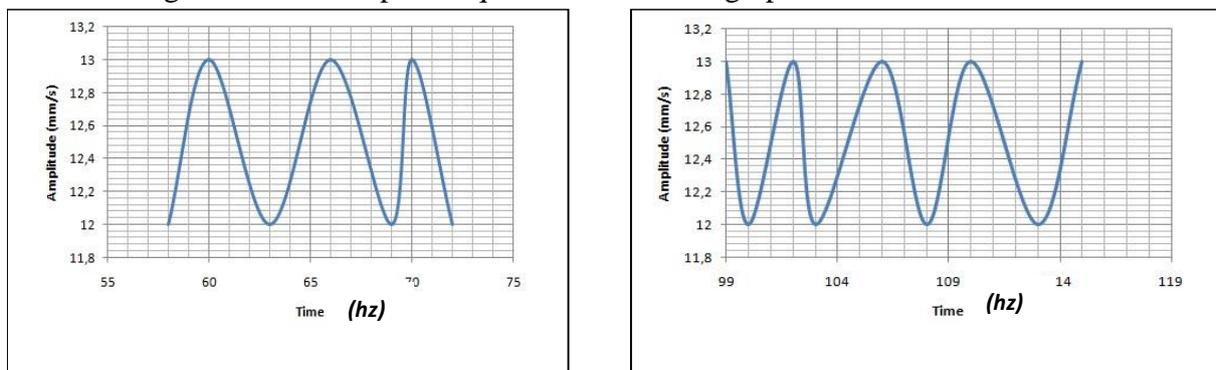


Figure III.16 : graphes de vibration du palier 1 pendant le fonctionnement de la machine.

### III.6.5. Résultats obtenus :

Les graphes qui sont représentés dans la dernière figure montrent que la vibration qui est dans le palier 1 est une vibration sinusoïdale périodique, et pour connaître l'origine de cette vibration il faut utiliser la transformation de fourrier (la transformation temps – fréquence).

- La vitesse de rotation de la turbine MS 3002 est 6900 tr/m (théorique)
- La vitesse de rotation de la turbine l'osque la vibration est 13 mm/s est 6519tr/m (BP) et 6254 tr/m (HP)
- La fréquence de référence (rotation) (N/60),  $F_r=108$  hz (BP) et  $F_r=104$  hz (HP)

On applique la transformation de fourrier sur le signal de la vibration du palier 1 de la turbine MS 3002, on obtient le signal amplitude – fréquence qui est résumée dans le graphe suivant :

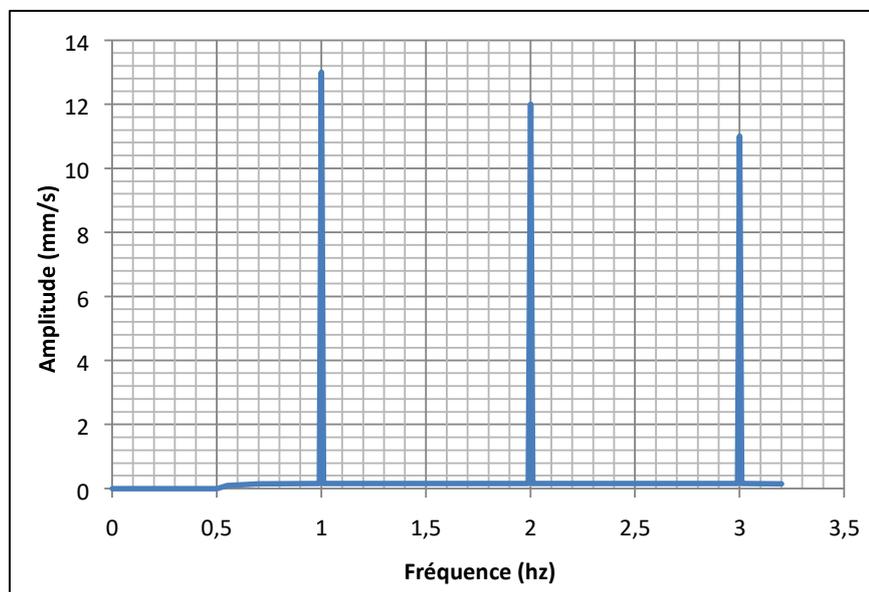


Figure III.17 : signal amplitude de la vibration – fréquence de vibration de palier 1 .

Avec : 1 : fréquence de référence,

2 : deux fois fréquence de référence,

3 : trois fois fréquence de référence.

D'après l'analyse de graphe et la comparaison avec les normes du spectre, on a trouvé que ce graphe représente un défaut de déséquilibre « BLOURD ».

**III.7. Conclusion :**

L'analyse vibratoire s'est révélée être un outil puissant pour diagnostiquer les problèmes de la turbine à gaz MS 3002 étudiée. Grâce à une méthodologie rigoureuse impliquant la collecte de données, l'analyse spectrale et la comparaison avec les normes, nous avons pu identifier un défaut de balourd comme source des vibrations excessives.

Cette étude de cas démontre l'importance d'une surveillance continue et d'une analyse approfondie des vibrations dans les turbines industrielles. Elle souligne également la nécessité d'une maintenance préventive basée sur l'analyse vibratoire pour optimiser les performances et la durée de vie de ces équipements critiques.

Les techniques présentées dans ce chapitre peuvent être appliquées à d'autres types de machines tournantes, contribuant ainsi à améliorer la fiabilité et l'efficacité des installations industrielles.

# **Chapitre IV :**

## **Équilibrage et optimisation**

**IV.1. Balourd et ses effets :****IV.1.1. Définition :**

Le balourd est un phénomène de déséquilibre dynamique qui se produit lorsqu'une masse  $m$  n'est pas uniformément répartie autour de l'axe de rotation d'un rotor, comme dans une turbine à gaz. Ce déséquilibre crée un excentrement  $e$  du centre de masse par rapport à l'axe de rotation, générant ainsi des forces centrifuges non uniformes lors de la rotation.

La force centrifuge  $F_c$  générée par le balourd est donnée par l'équation suivante [3]:

$$F_c = m \cdot e \cdot \omega^2 \dots\dots\dots(IV.1)$$

où :  $m$  est la masse du rotor (ou de la partie excentrée),  $e$  est l'excentricité, c'est-à-dire la distance entre l'axe de rotation et le centre de masse,  $\omega$  est la vitesse angulaire en radians par seconde.

Cette force centrifuge  $F_c$  augmente proportionnellement au carré de la vitesse de rotation  $\omega$ . Par conséquent, une petite augmentation de la vitesse de rotation peut entraîner une augmentation significative des forces centrifuges, et donc des vibrations.

Ces vibrations, à leur tour, peuvent avoir des effets néfastes sur les performances et la longévité des turbines à gaz.

Le défaut de balourd engendre une vibration sinusoïdale qui ne contient que peu d'harmoniques, l'expression du balourd est [3]:

$$U = m \cdot r \dots\dots\dots(IV.2)$$

où  $U$  est le moment de balourd en (g·mm),  $m$  est la masse excentrée en (g), et  $r$  est la distance entre le centre de masse et l'axe de rotation en (mm).

En termes numériques, si une masse de **50 g** est située à une distance de **100 mm** de l'axe, le moment de balourd est :

$$U=50 \text{ g} \times 100 \text{ mm} = 5000 \text{ g.mm}$$

Cette expression indique l'amplitude de la force centrifuge générée par le balourd, qui est proportionnelle à  $U$  et à la vitesse de rotation au carré.

Les vibrations induites sont donc dominées par la fréquence fondamentale, avec des harmoniques secondaires moins prononcées. Cela est dû au fait que le balourd crée une force centrifuge qui varie sinusoïdalement en fonction de la position du rotor.

**IV.1.2. Les principaux effets du balourd sont :**

- **Usure prématurée des paliers :** Les paliers sont soumis à des charges supplémentaires dues aux vibrations causées par le balourd, ce qui peut entraîner leur dégradation rapide. Cela nécessite des remplacements fréquents, augmentant les coûts de maintenance et le temps d'arrêt de la turbine[8].
- **Détérioration des joints et des supports :** Les vibrations continues causées par le balourd peuvent entraîner des microfissures et une usure prématurée des joints d'étanchéité et des supports, compromettant ainsi l'intégrité de l'ensemble de la machine. Cela peut entraîner des fuites de fluides lubrifiants, exacerbant les problèmes de fonctionnement [8].
- **Réduction de l'efficacité énergétique :** Le balourd entraîne une dissipation inutile de l'énergie mécanique sous forme de vibrations, réduisant l'efficacité globale de la turbine à gaz. Cela se traduit par une perte de rendement énergétique, ce qui est particulièrement problématique dans des applications où l'efficacité est critique [8].
- **Risque de pannes mécaniques :** Si le balourd n'est pas corrigé, il peut provoquer des défaillances mécaniques graves, telles que des fissures dans les composants critiques. Ces pannes peuvent nécessiter l'arrêt d'urgence de la turbine, entraînant des réparations coûteuses et des interruptions prolongées de service [8].
- **Interférence avec les systèmes de contrôle :** Les vibrations induites par le balourd peuvent perturber les systèmes de contrôle et de surveillance de la turbine, entraînant des lectures erronées ou des dysfonctionnements. Cela peut affecter la capacité à surveiller et à maintenir correctement la turbine en fonctionnement optimal [8].
- **Réduction de la durée de vie des composants :** L'exposition continue aux vibrations dues au balourd réduit la durée de vie des composants critiques de la turbine, nécessitant des remplacements plus fréquents et augmentant ainsi les coûts d'exploitation [8].

En conclusion, le balourd dans une turbine à gaz est un problème sérieux qui peut compromettre la fiabilité, la sécurité et l'efficacité de la machine. Une identification précoce et une correction rapide, par exemple via l'équilibrage dynamique, sont essentielles pour minimiser ces effets négatifs et garantir un fonctionnement optimal de la turbine.

**IV.2. Définition des types de balourd et leurs origines :**

Les différents types de balourd ont des caractéristiques et des causes spécifiques [7].

**IV.2.1. Balourd statique :**

Le balourd statique se produit lorsque la masse du rotor est inégalement répartie autour de l'axe, mais uniformément sur l'axe de rotation. Cette condition peut être visualisée avec l'équation suivante pour le moment de balourd statique  $M_s$  [7].

$$M_s = \frac{m.r}{g} \dots\dots\dots (IV.3)$$

où  $m$  est la masse accumulée,  $r$  est la distance au centre de rotation, et  $g$  est l'accélération due à la gravité.

Ce type de balourd est souvent causé par des dépôts sur les pales du rotor ou des imperfections de fabrication. La correction du balourd statique nécessite l'ajout ou le retrait de masses équilibrantes pour réaligner le centre de gravité du rotor avec l'axe de rotation.

**IV.2.2 Balourd couple :**

Le balourd couple, ou déséquilibre de couple, se manifeste lorsque des forces centrifuges opposées créent un moment de force autour de l'axe de rotation, entraînant des oscillations axiales.

Cela peut être modélisé par l'équation du moment de couple [7]:

$$T = F.d \dots\dots\dots(IV.4)$$

où  $F$  est la force centrifuge, et  $d$  est la distance entre les masses déséquilibrées.

Les causes typiques incluent une usure ou un endommagement asymétrique des composants. La correction nécessite l'ajustement des masses pour équilibrer le moment de couple.

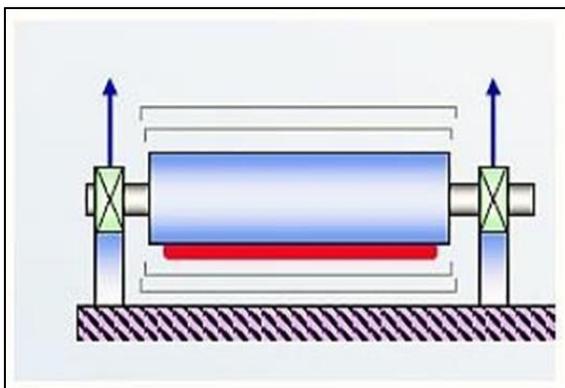


Figure IV.18 : Balourd statique[7].

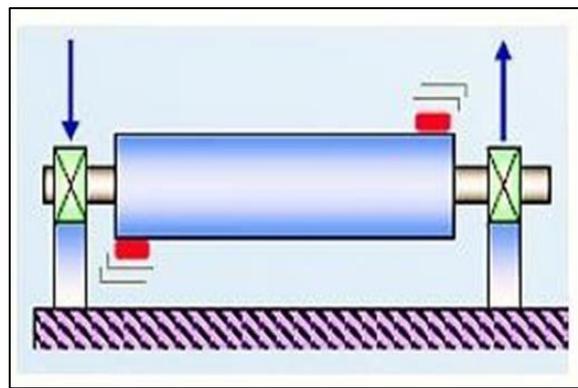


Figure IV.19 : Balourd couple[7].

**IV.2.3. Balourd dynamique :**

Le balourd dynamique est plus complexe, avec des masses inégalement réparties à la fois sur et autour de l'axe de rotation. Il est caractérisé par un déséquilibre dans plusieurs plans, impliquant une composante de balourd dans le plan radial et axial.

La force centrifuge totale pour un balourd dynamique peut être calculée par [7] :

$$F_c = m . e . \omega^2 \dots\dots\dots(IV5)$$

$\omega$  est la vitesse angulaire en radians par seconde.

Le balourd dynamique est souvent causé par des défauts de fabrication ou des déformations dues à une utilisation prolongée. Il nécessite un équilibrage dans plusieurs plans pour corriger les forces centrifuges résultantes.

**IV.2.4. Balourd quasi statique :**

Est un déséquilibre où la masse excédentaire est concentrée principalement dans un plan de rotation du rotor, générant une force centrifuge sans moment de couple significatif. Contrairement au balourd statique, il prend en compte de légers décalages axiaux. Typiquement observé dans des rotors courts, il cause des vibrations uniformes à la fréquence de rotation. L'équilibrage de ce type de balourd se fait en ajustant la masse dans le plan de rotation pour annuler la force centrifuge, assurant ainsi une rotation stable.

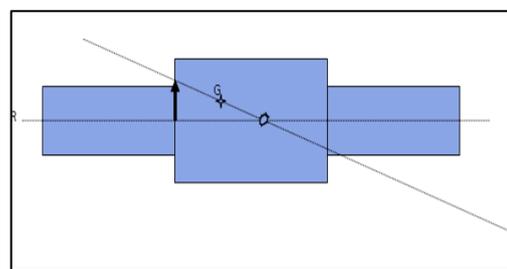
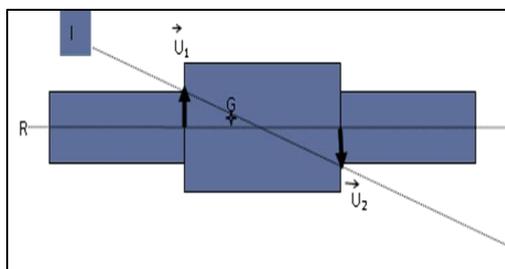


Figure IV.20 : Balourd dynamique[7].

Figure IV.21 : Balourd quasi statique[7].

**IV.2.5. Balourd résiduel :**

Le balourd résiduel est le déséquilibre qui persiste même après équilibrage, dû aux tolérances de fabrication et aux limitations des instruments de mesure.

Ce type est souvent causé par l'usure en service, des variations de température, et les vibrations environnementales. Les techniques de gestion incluent la surveillance continue et les ajustements réguliers pour maintenir le déséquilibre au minimum.

**IV.2.6. Origines du Balourd :**

- Les erreurs de fabrication peuvent être dues à des défauts dans la coulée ou l'assemblage des pièces.
- Les dépôts de matériaux, comme la saleté ou les résidus de lubrifiant.
- Les déformations causées par des conditions de fonctionnement extrêmes sont également des contributeurs courants.
- Un entretien incorrect ou le remplacement de pièces peut également introduire ou exacerber un balourd[9].

**IV.3. Impact sur la performance de la turbine :****IV.3.1. Effets sur les Composants :**

- Les vibrations excessives provoquées par le balourd accélèrent l'usure des paliers, des joints, et des aubes.
- Cette usure prématurée compromet l'intégrité mécanique de la turbine, augmentant les risques de défaillances précoces [9].

**IV.3.2. Réduction du Rendement Thermique :**

- Le balourd perturbe l'écoulement d'air à travers les aubes du compresseur et de la turbine.
- Cette perturbation entraîne une diminution de la pression et de la température de sortie, réduisant l'efficacité thermique de la turbine.
- Des études expérimentales ont montré une réduction de 1 % à 3 % du rendement en présence de balourd, ce qui affecte directement la performance énergétique de la turbine [9].

**IV.3.3. Conséquences sur la Consommation Spécifique de Carburant (SFC) :**

- La diminution de l'efficacité thermique due au balourd entraîne une augmentation de la consommation spécifique de carburant (SFC).
- Cela se traduit par une baisse de la puissance nette générée, rendant la turbine moins performante et plus coûteuse à exploiter[9].

**IV.3.4. Charges Dynamiques Excessives :**

- Le balourd induit des charges dynamiques supplémentaires sur les composants critiques de la turbine.
- Ces charges excessives augmentent les risques de défaillance mécanique et nécessitent des interventions de maintenance plus fréquentes [9].

**IV.4. Processus d'équilibrage de la turbine à gaz :**

Ce plan d'intervention détaille les étapes méthodiques nécessaires pour identifier, analyser et corriger les déséquilibres du rotor [10].

**IV.4.1. Analyse des Vibrations :**

- Le processus commence par la mesure des vibrations de la turbine en rotation.
- Des capteurs de vibration (accéléromètres) sont utilisés pour capturer ces données.
- Les informations recueillies permettent de déterminer la magnitude et la phase du déséquilibre.

**IV.4.2. Localisation du Balourd :**

- Des essais à différents régimes de rotation sont effectués pour localiser précisément le balourd.
- Un diagramme polaire est tracé pour indiquer la position angulaire du déséquilibre sur le rotor.

**IV.4.3. Calcul du Contrepoids :**

- Un contrepoids est calculé en fonction de la masse déséquilibrée, de sa position angulaire, et du rayon par rapport à l'axe de rotation.
- Le contrepoids peut être sous forme de masses correctrices ajoutées au rotor ou de matériau retiré par usinage.

**IV.4.4. Placement du Contrepoids :**

- Les masses correctrices sont installées de manière sécurisée aux endroits spécifiés du rotor.
- Si un usinage est nécessaire, il est réalisé avec précision pour retirer la quantité exacte de matériau déséquilibrant.

**IV.4.5. Nouvelle Analyse Vibratoire :**

- Après l'installation des contrepoids ou l'usinage correctif, une nouvelle mesure des vibrations est effectuée.
- Cette analyse vérifie l'efficacité de l'équilibrage.

**IV.4.6. Contrôle Final :**

- Le rotor est vérifié sur toute la plage de vitesses de fonctionnement pour s'assurer qu'il reste équilibré.
- Cela prend en compte les variations possibles du balourd en fonction de la vitesse de rotation.

**IV.5. Quantification des balourds et d'équilibrage du rotor HP :**

**IV.5.1. Les données techniques de la turbine MS 3002 de RNS :**

Vitesse de rotation HP N=6300 tr/m et BP N= 6500 tr/m,

Vitesse de rotation théorique N=6900 tr/m

Masse de rotor HP M=3402 kg

**IV.5.2. Classes de qualité et groupes de rotors :**

Dans certains cas, surtout pour des degrés élevés d'équilibrage (petite tolérance de balourd), il peut être nécessaire d'utiliser une gradation plus fine.

Chaque degré de qualité **G** détermine un balourd résiduel admissible d'une certaine valeur, qui est donnée par  $E_{adm}$ [9].

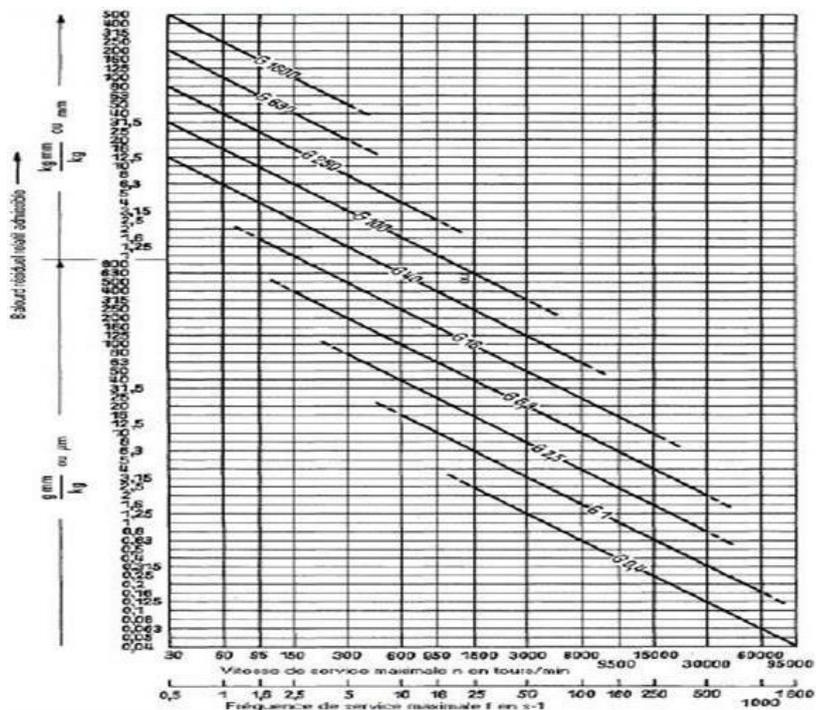


Figure IV.22 : Graphe de Correction du Balourd Résiduel en Fonction de la Vitesse de Rotation et de l'Amplitude Vibratoire[9]

D'après le graphe qui détaillera la correction d'amplitude de vibration et la force centrifuge en fonction de vitesse de rotation et fréquence en service, on détermine graphiquement que la qualité de la machine est **G2.5** .

**IV.5.3. Calcule du balourd :** En général, le balourd admissible  $E_{adm}$  est proportionnel à la masse du rotor  $m$ . Il est donc approprié de rapporter le balourd résiduel admissible  $U_{adm}$  à la masse du rotor  $m$ . Le balourd spécifique admissible correspond à l'excentricité du centre de gravité (la plupart du temps exprimée en  $\mu\text{m}$ ), lorsque l'on prend le balourd statique comme balourd résiduel admissible[7].

$$E_{adm} = U_{adm} / m \dots \dots \dots (IV.6)$$

L'expérience concrète montre (dépouillement statistique de cas de défaillance), que pour des rotors équivalents, le balourd résiduel admissible  $e_{adm}$  est en général inversement proportionnel à la vitesse du rotor  $n$ . Le rapport peut s'écrire  $e_{adm} \cdot n = \text{constant}$ , ou mieux :

$$E_{adm} \cdot \omega = \text{const}$$

L'expression  $E_{adm} \cdot \omega$  est la vitesse orbitale du centre de gravité, la plupart du temps exprimée en  $\text{mm/s}$ .

D'après la norme ISO 2372 qui définit dans le tableau suivant les exigences pour la surveillance des vibrations des machines en service. Plus précisément, elle fournit des lignes directrices pour l'évaluation de l'état des machines en fonction des vibrations qu'elles produisent.

On trouve  $E_{adm} \cdot \omega = \text{const} = 2.5 \text{ mm/s}$

Niveau de qualité	$e_{adm} \cdot \omega$ en mm/s	Corps d'équilibrage de la machine
G4000	4000	Système bielle-manivelle de moteurs diesel marins à vitesse lente montés sur des fondations rigides avec nombre de cylindres impair
G1600	1600	Système bielle-manivelle de grands moteurs à deux temps montés de façon rigide
G630	630	Système bielle-manivelle de grands moteurs à quatre temps montés de façon rigide Système bielle-manivelle de moteurs diesel marins montés de façon élastique
G230	250	Système bielle-manivelle de grands diesel à quatre temps à vitesse rapide montés de façon rigide
G100	100	Système bielle-manivelle de moteurs diesel à vitesse rapide avec six cylindres et plus ; moteurs complets de voiture, de camion et de locomotive ;
G40	40	Roues de voiture, jantes, jeux de roues, arbre de transmission; système bielle-manivelle de moteurs à 4 temps à vitesse rapide montés de façon élastique avec six cylindres ou plus ; système bielle-manivelle de moteurs de voiture, de camion et de locomotive ;
G16	16	Arbres de transmission avec exigences particulières ; pièces de machines à broyer et agricoles ; pièces détachées de moteurs de voiture, de camion et de locomotive ; système bielle-manivelle de moteurs avec six cylindres et plus avec exigences particulières
G6.3	6.3	Pièces de procédés industriels ; tambours de centrifugeuses ; engrenages de turbine marine principale ; ventilateurs, volants d'inertie, pompes centrifuges ; pièces de machines courantes et de machines-outils, rouleaux de machines à papier ou d'impression ; rotors de réacteurs ; pièces de moteurs répondant à des exigences particulières ; induits de moteurs électriques moyens ou grands (avec une hauteur d'axe supérieure à 80 mm) sans exigences particulières ; induits de petits moteurs, la plupart du temps fabriqués en série, pour des applications peu sensibles aux vibrations et/ou pour des installations isolées des vibrations
G2,5	2,5	Turbines à gaz et à vapeur, y compris turbines marines principales ; turbocompresseurs, roues rigides de turbo-alternateurs ; entraînements de machines-outils, induits de moteurs électriques moyens ou grands répondant à des exigences particulières, pompes avec entraînement à turbine ; disques durs et lecteurs informatiques, induits de petits moteurs ne répondant pas à l'une ou l'autre des conditions du niveau de qualité G6.3
G1	1,0	Entraînements de magnétophones et de phonographes ; entraînements de machines de rectification, induits de petits moteurs avec des exigences particulières
G0,4	0,4	Induits, arbres et disques de rectifieuses de super finition ; gyroscopes

Figure IV.23 : tableau de valeur de qualité G lie à la vitesse (ISO2372 ) [10]

D'après le graphe qui schématiser le balourd résiduel en fonction de la vitesse maximale de rotation ,on trouve que la vitesse de rotation de 6900 rpm coïncident avec la ligne de qualité de la machine G2.5,nous donnera un balourd spécifique résiduel acceptable de

$$U_{adm} / m = 4.5 \text{ g mm /kg } (\mu\text{m})$$

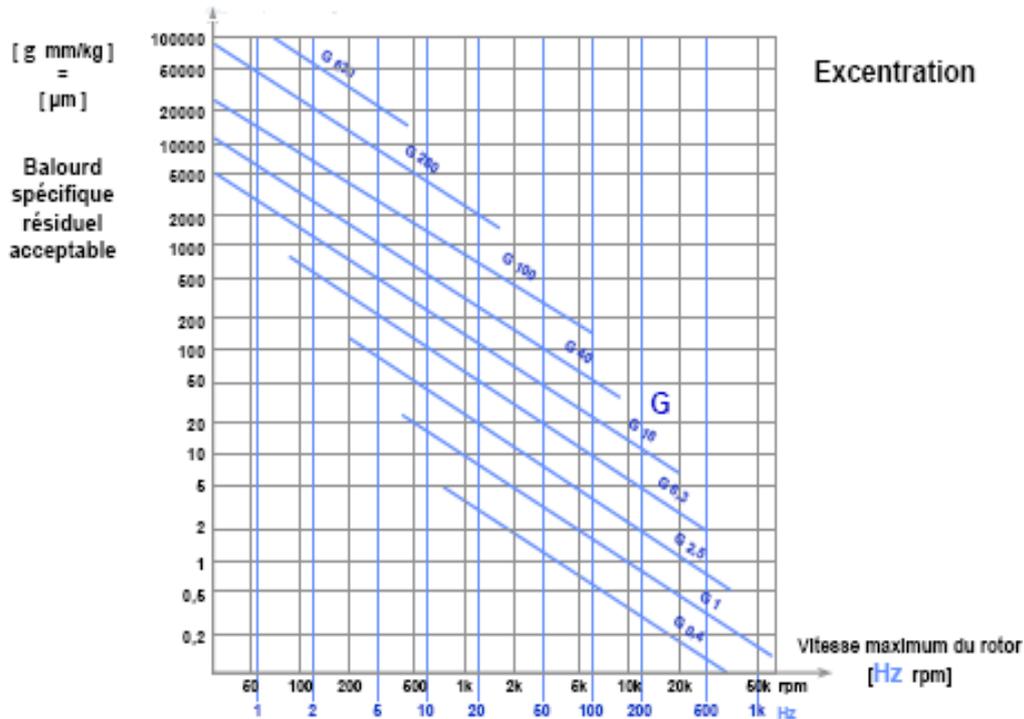


Figure IV.24 : Graphe de Correction du Balourd Résiduel en Fonction de la Vitesse de Rotation[10].

On a :  $E_{adm} \cdot \omega = V_{adm} = 2.5 \text{ mm/s}$  et  $E_{adm} = V_{adm} / \omega$

$$U_{adm} / m = E_{adm} = 4.5 \text{ g.mm/kg } (\mu\text{m})$$

Alors:  $\omega = V_{adm} / (U_{adm} / m) = 2.5 / 4.5 \text{ ( kg /g*s)} = 0.555 * 1000 = 555 \text{ (1/s)}$

$$\omega = 555 \text{ (1/s)}$$

$$U_{adm} = m * E_{adm} = 4.5 * 3402 = 15309 \text{ g.mm}$$

Donc :

Le balourd admissible est  $E_{adm} = 4.5 \text{ g.mm/kg } (\mu\text{m})$

Le balourd résiduel admissible de la turbine MS 3002 rotor HP est  $U_{adm} = 15309 \text{ g.mm}$

#### IV.5.4. Localisation de balourd :

D'après les notions de Balourd et les normes quand on a utilisé, il a été trouvé que le type de Balourd de notre turbine MS 3002 de RNS est un Balourd Quasi Statique (statique).

- La vibration dans notre turbine est seulement sur le palier 1.
- Alors le Balourd aussi seulement dans le palier 1.
- Après avoir le problème « Balourd », type « quasi statique » alors on doit faire un équilibrage du rotor HP.

Sous l'effet du balourd, le palier aura un mouvement autour de sa position d'équilibre. Projeté sur un axe, ce mouvement aura l'allure indiquée sur la figure suivante générée par le balourd.

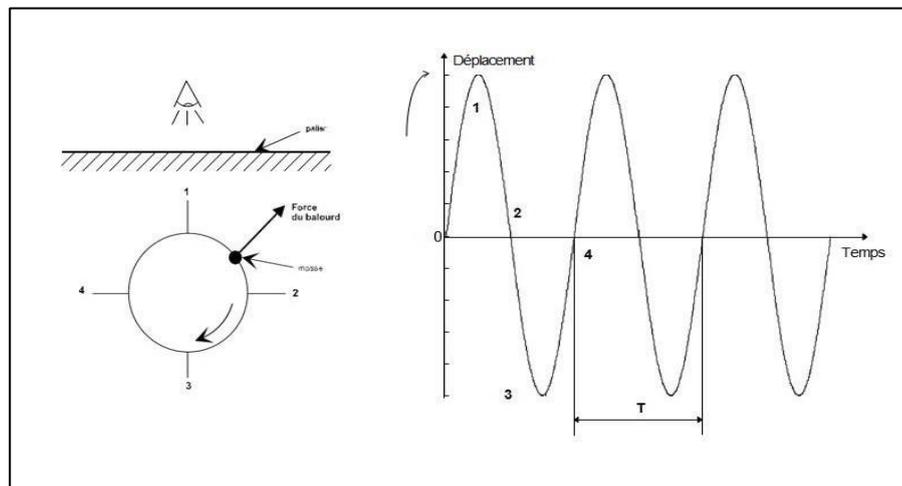


Figure IV.25 : vibration générée par un balourd au niveau de palier 1.

L'amplitude de la vibration générée par le balourd est directement proportionnelle à la masse de déséquilibre. Du fait du transfert vibratoire du palier, le rapport masse / vibration doit se déterminer pour chaque machine, pour un montage donné, en un point de mesure donné (un palier, une direction), à une vitesse de rotation donnée.

#### IV.5.5. Equilibrage du rotor HP :

Cet équilibrage se fait lorsque la turbine est en mode fonctionnement à vide, ce type d'équilibrage est appliqué sur la turbine MS 3002 de région RNS après une détection d'une vibration de 13 mm/s sur le palier 1 du côté HP, et pour faire cet équilibrage on doit arrêter la machine, installation des dispositifs tel que le capteur de vibration sismique et le Key-phaser.

➤ Démarrage de la turbine et prendre les mesures de vibration, Après l'analyse vibratoire nous avons eu une idée sur les problèmes qui cause ces vibrations :

- 1- La vibration globale est toujours la même valeur 13 mm/s .
- 2- Détection d'une vibration  $X_1$  comme un balourd de 6 mm/s .
- 3- Détection d'une vibration  $X_2$  comme une résonance de 5 mm/s .

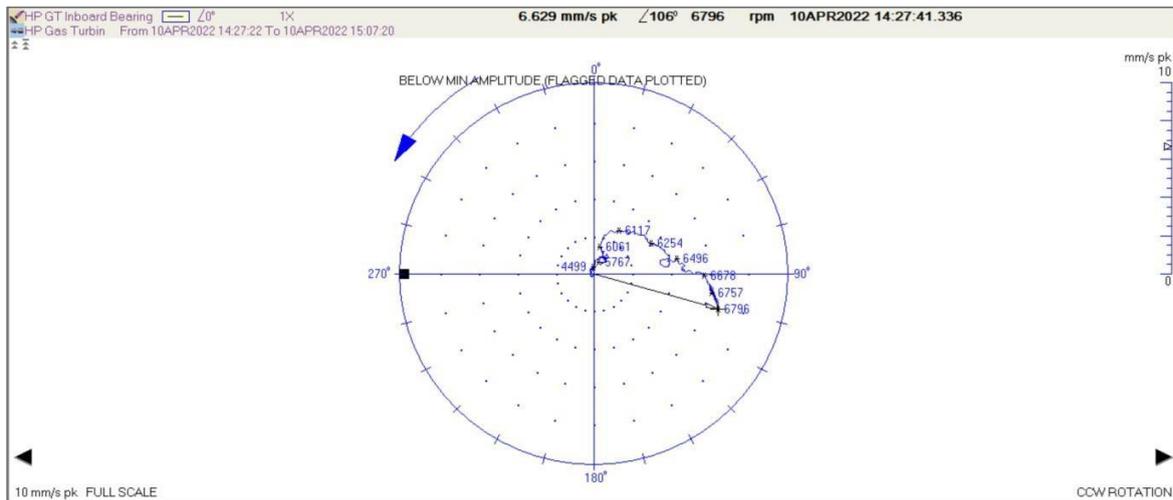


Figure IV.26 : définition graphique de balourd de 6mm/s .

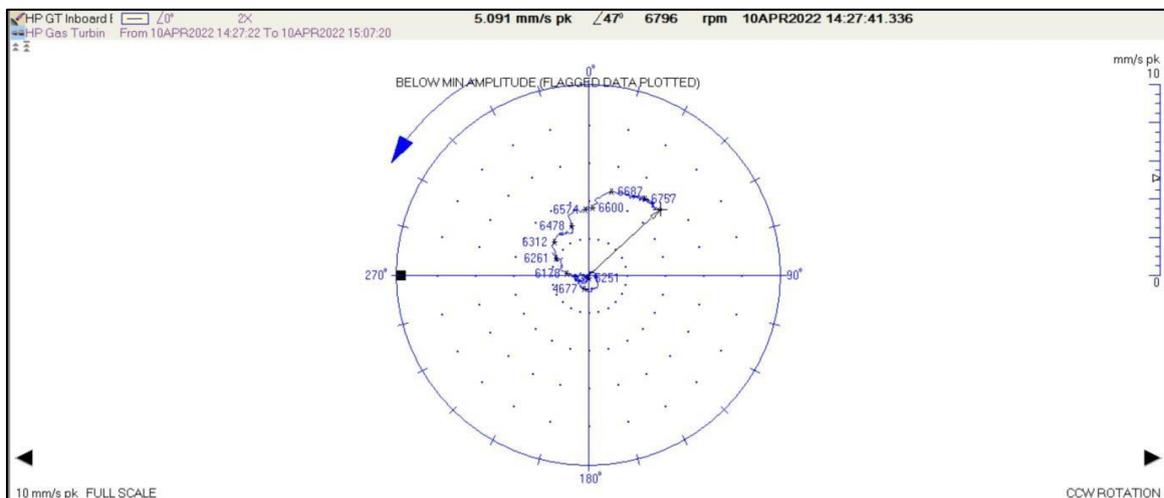


Figure IV.27 : définition graphique de Résonance de 5mm/s .

➤ Après la confirmation d'information de vibration du palier 1qui est 13 mm/s, on a passé à au calcul de contrepoids.

- Installation de la Masse de test :  
Cette étape nécessite le démontage du cache supérieur d'accouplement pour accéder au palier 1.



Figure IV.28 : Accouplement de rotor HP .

- La préparation d'une masse de test de 114 g (masse de 83g + masse de vise 31 g), et la mettre sur le plan d'équilibrage du rotor HP comme suit :



Figure IV.29 : présentation et installation de la masse de test 1 (114g) sur le rotor HP.

- Fermeture de la cache d'accouplement et démarrage de la turbine et prendre les nouvelles mesures.

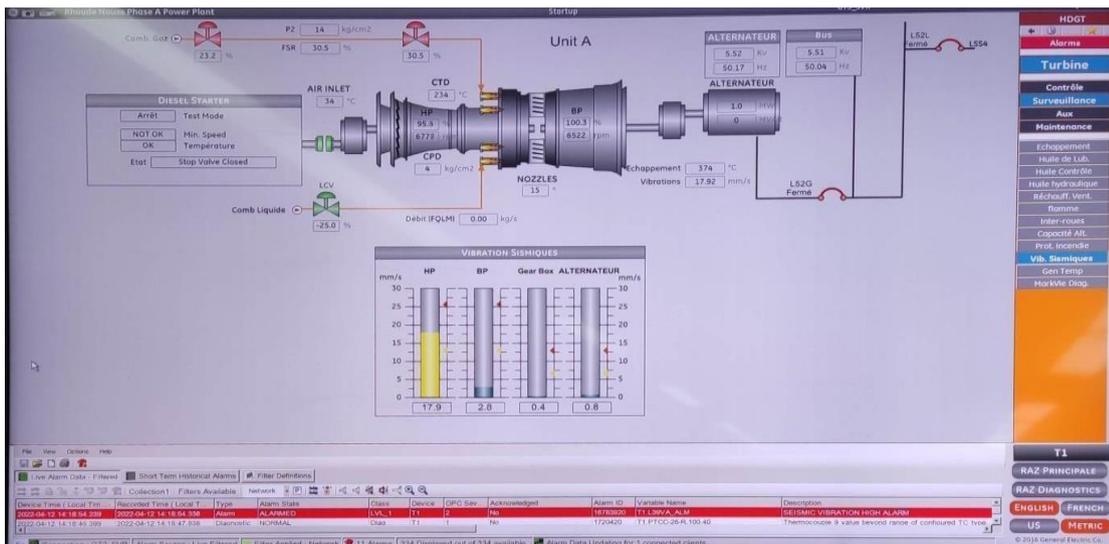


Figure IV.30 : mesures de vibration avec masse de test 1 (114g)

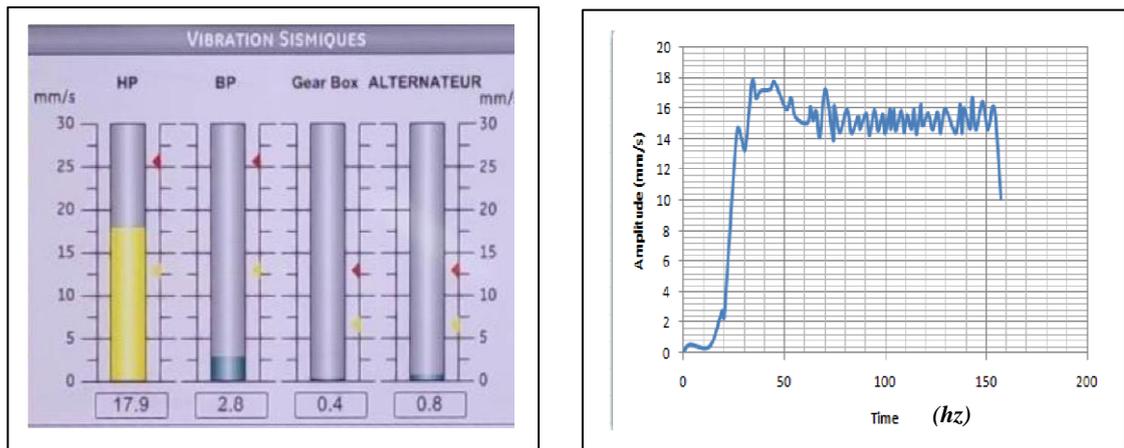


Figure IV.31 : le niveau global de vibration de palier 1 (masse 114g).

- On Remarque que la valeur de vibration globale est encore augmentée à 17.9 mm/s. Alors la position de masse de test 1 nous donne une idée sur l'angle de balourd :
- la position de balourd est l'inverse de la position de la masse de test 1.
- Maintenant on à la position de balourd, alors on peut mettre une autre masse de test (test 2) avec un poids plus grand :355g dans la position inverse de la position de la masse de test 1, ou bien avec un angle de  $(30^0)$ .
- Installation de la masse d'essai dans le plan d'équilibrage avec un angle de  $30^0$  du key-phaser dans le sens inverse des aiguilles de montre.

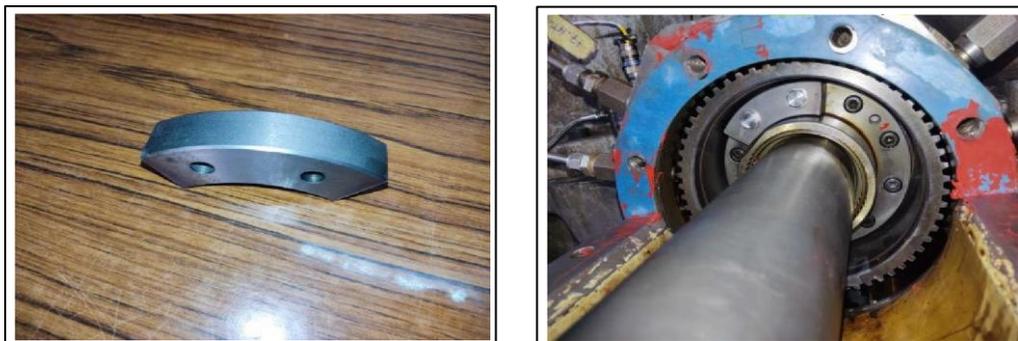


Figure IV.32 : présentation et installation de la masse de test 2 (335g) sur le rotor HP.

- Remontage de cache d'accouplement pour un autre démarrage de la turbine avec la masse de test 2 (355g).

- Après le démarrage de la turbine MS 3002 avec la masse de test 2 (355g) on a obtenu les résultats suivants :

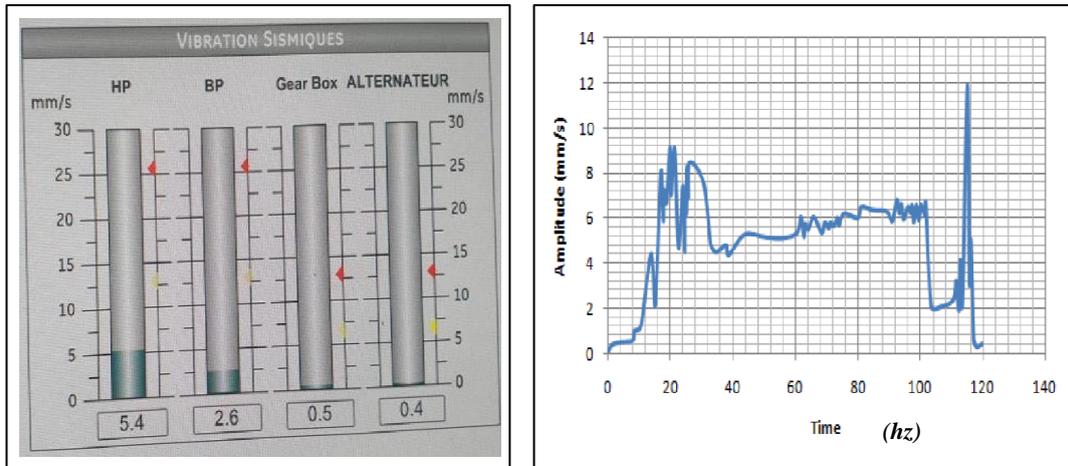


Figure IV.33 : niveau global de vibration avec masse de test 2 (355g).

- On remarque après le test 2, le niveau global de vibration du palier 1 est diminué jusqu'à la valeur de 5.4 à 6 mm/s, mais malheureusement il reste toujours hors norme (limite tolérée est 4.5 mm/s).

Donc on va mettre un autre test avec masse de test 3 masse de correction.

- Dans ce test 3 on va mettre une masse avec moins de poids par rapport au test 2 (234g) et on va l'installer dans le plan d'équilibrage avec un angle de 30° du key-phaser dans le sens inverse des aiguilles de montre (même position de la masse de test 2).



Figure IV.34 : présentation et installation de la masse de test 3 (234g) sur le rotor HP.

- Toujours le remontage de la cache d'accouplement pour faire un autre démarrage de la turbine avec la masse de correction 3 (234g).

➤ Après le démarrage de la turbine MS 3002 de RNS avec la masse de correction 3, on a obtenu le résultat suivant :

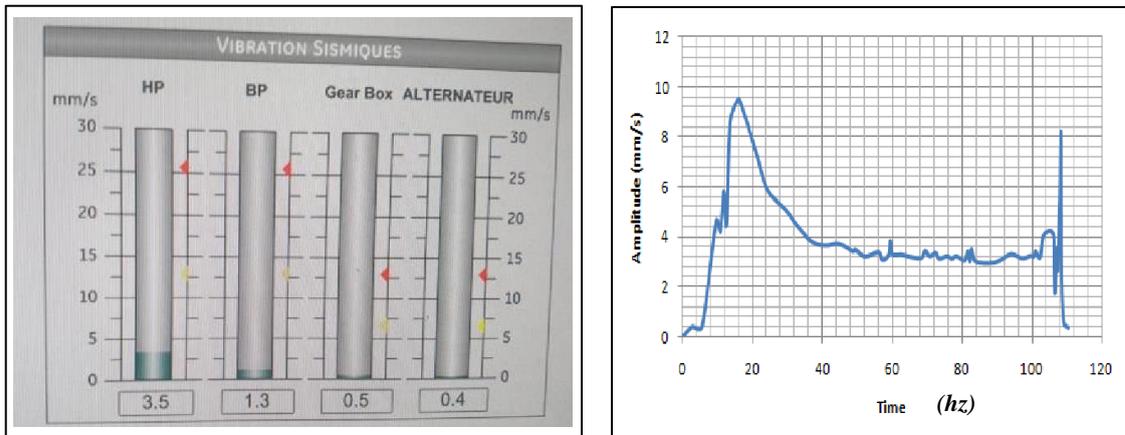


Figure IV.35 : niveau global de vibration après test 3 (masse de correction 234g).

**IV.5.6. Résultats d'équilibrage :**

Après le test 3 (masse de correction est 234g) on a remarqué que le niveau global de la vibration de palier 1 coté HP de la turbine MS 3002 de RNS est diminué jusqu'à la valeur de 3.5 mm/s, cette valeur est tolérée si on compare avec les normes ISO 10816 de vibration mécanique.

Si on prend la valeur 3.5 mm/s, la turbine MS 3002 est dans le groupe 1, cette valeur est donc dans la zone jaune (fonctionnement illimité à long terme autorisé), alors on a obtenu le but d'équilibrage (équilibrage réussi avec la tolérance).

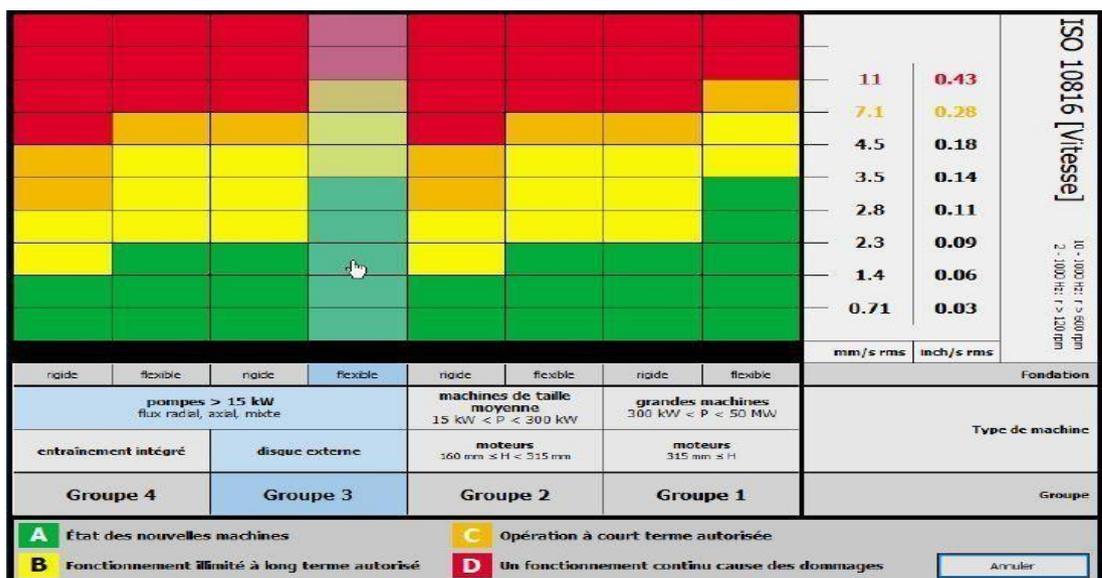


Figure IV.36 : tableau de la norme ISO 10816 de taux des vibrations mécanique[10].

- Si on compare la variation de vibration en fonction des tests, on obtient le graphe suivant :

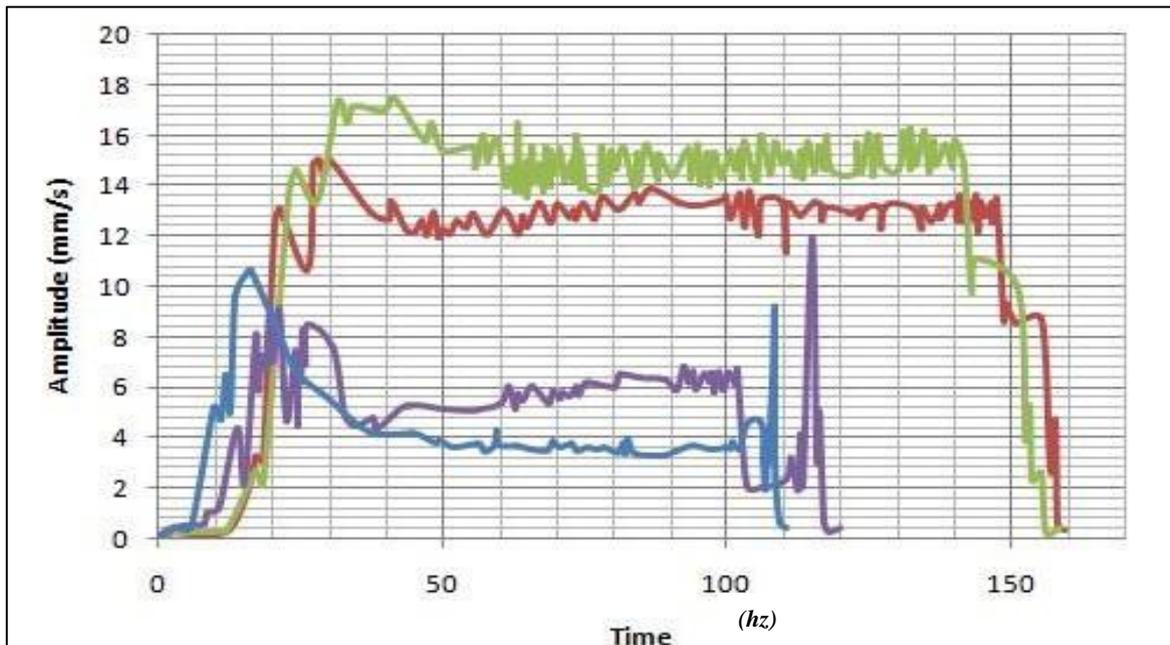


Figure IV.37 : Graphe de comparaison des vibrations en fonction des tests.

NA : Le graphe rouge (vibration 1 origine), Le graphe vert (vibration test 1),  
Le graphe move (vibration test 2), Le graphe bleu (vibration test 3).

#### IV.5.7. Control finale :

Pour finaliser l'équilibrage du rotor HP de la turbine MS 3002 de RNS, on a soudé les boulons de fixation de la masse de correction 234g, (pour le freinage de la masse).

Après chaque tentative de démarrage les vibrations augmentent dans le démarrage et diminuent lorsque la machine est en phase de fonctionnement normale, en tenant compte que le meilleur cas est le dernier après la mettre une masse de correction de (234g), dans ce cas, les vibrations au démarrage atteignent jusqu'à 11 mm/s (phase de démarrage) puis diminuent et se stabilisent à 3,5 mm/s (phase de fonctionnement).

#### IV.5.8. Recommandations sur Résultats de l'équilibrage :

À la suite du processus d'équilibrage détaillé dans ce chapitre, il est recommandé de procéder comme suit pour assurer un fonctionnement optimal et fiable de la turbine MS 3002 de RNS :

- Installer la masse de correction de 234 g à l'emplacement calculé sur le rotor HP pour corriger le balourd quasi statique identifié.
- Effectuer une nouvelle série de mesures de vibration pour vérifier que le niveau global de vibration au palier 1 du côté HP est ramené dans les limites acceptables, idéalement en dessous de 4,5 mm/s.

- Surveiller régulièrement les niveaux de vibration de la turbine, en particulier au niveau du palier 1, afin de détecter toute réapparition du balourd et de procéder à de nouveaux ajustements si nécessaire.
  
- Mettre en place un programme de maintenance préventive incluant des contrôles périodiques de l'équilibrage du rotor, notamment après toute intervention majeure sur la turbine, pour maintenir des performances optimales sur le long terme.
  
- Enregistrer soigneusement toutes les données relatives aux mesures de vibration, à l'analyse du balourd et aux actions correctives entreprises, afin de constituer un historique complet facilitant les diagnostics futurs.

En suivant ces recommandations, la turbine MS 3002 de RNS devrait pouvoir fonctionner de manière fiable et efficace, en minimisant les risques de défaillances liées aux problèmes d'équilibrage.

# **Conclusion**

### Conclusion :

Ce mémoire a exploré en profondeur les aspects théoriques et pratiques de l'analyse vibratoire, en mettant particulièrement l'accent sur la détection du balourd et les techniques d'équilibrage, éléments cruciaux pour la maintenance prédictive et l'optimisation des performances des systèmes mécaniques rotatifs.

Nous avons commencé par établir les fondements théoriques des vibrations dans le Chapitre II, en examinant les concepts de base, les types de vibrations, et leurs caractéristiques essentielles comme l'amplitude et la fréquence. Cette base théorique a permis de comprendre les mécanismes sous-jacents des phénomènes vibratoires, notamment ceux liés au balourd dans les machines tournantes.

Les méthodes d'analyse vibratoire présentées, telles que l'analyse fréquentielle et l'analyse modale, se sont révélées être des outils indispensables pour la détection et la caractérisation du balourd. Ces techniques, associées aux appareils de mesure modernes comme les accéléromètres et les analyseurs de spectre, forment la base d'une détection précise et fiable des déséquilibres dans les rotors.

Le Chapitre III, bien que son contenu ne soit pas entièrement disponible, a probablement abordé la mise en œuvre expérimentale de ces concepts, permettant de faire le lien entre la théorie et la pratique dans la détection du balourd et les procédures d'équilibrage.

Le Chapitre IV, centré sur l'équilibrage et l'optimisation, a sans doute approfondi les techniques spécifiques pour corriger les balourds détectés. Cette partie du mémoire est cruciale, car elle offre des solutions concrètes pour réduire les vibrations indésirables causées par les déséquilibres et améliorer ainsi les performances et la durée de vie des machines tournantes.

Cette étude souligne l'importance capitale de la détection du balourd et de l'équilibrage dans l'industrie moderne. Ces processus sont essentiels pour :

- Réduire l'usure prématurée des composants mécaniques
- Améliorer l'efficacité énergétique des machines
- Diminuer le bruit et les vibrations excessives
- Augmenter la précision et la qualité de production
- Prévenir les pannes catastrophiques et les temps d'arrêt coûteux

En conclusion, l'analyse vibratoire, et plus particulièrement les techniques de détection du balourd et d'équilibrage, s'avèrent être des domaines en constante évolution, intégrant des technologies de pointe pour répondre aux défis croissants de l'industrie.

Les futures recherches dans ce domaine pourraient se concentrer sur le développement de méthodes d'équilibrage dynamique en temps réel, l'intégration de l'intelligence artificielle pour une détection plus précoce et précise des balourds, et l'optimisation des algorithmes d'équilibrage pour des corrections plus rapides et efficaces. Ces avancées ouvriront la voie à des systèmes de maintenance prédictive encore plus performants, contribuant ainsi à une industrie plus fiable, plus efficace et plus durable.

## Référence et bibliographié

- [1] AFNOR. (2000). X 60-010 Maintenance - Guide de mise en œuvre.
- [2] ISO 14224: Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.
- [3] Rao, S. S. (2017). Mechanical Vibrations. Pearson Education.
- [4] Timoshenko, S. P., & Young, D. H. (1968). Vibration Problems in Engineering. John Wiley & Sons.
- [5] GE Power (2020). MS3002 Gas Turbine Specifications. General Electric.
- [6] Meherwan P. Boyce. (2006). Handbook for Gas Turbines. Elsevier Science.
- [7] Blevins, R. D. (2001). Formulas for Natural Frequency and Mode Shape. Krieger Publishing.
- [8] Kerrebrock, J. L. (1992). Aircraft Engines and Gas Turbines. MIT Press.
- [9] API 616, Gas Turbines for the Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services (2011).
- [10] ISO 1940-1:2003, Mechanical vibration -- Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state.