

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Electronique

Spécialité : Instrumentation

Par : MELIH Asma et MESSAOUDENE Fethi

Sujet

Localisation des Défauts Mécaniques par l'Analyse Spectrale

Soutenu publiquement, le 09/06/2024, devant le jury composé de :

Mr NEMMICHE A.	MCA	Université de Tlemcen Président
Mr SLAMI A.	MAB	Université de Tlemcen Examineur
Mr BENAÏSSA M	Professeur	Université de Tlemcen Encadreur
Mr CHORFI S.M	MCA	Université de Tlemcen Encadreur

Année universitaire : 2023/2024



Dédicaces

À ma chère mère Houria, qui a toujours été la lumière qui éclaire mon chemin. Grâce à ton amour et à ton soutien inconditionnel, j'ai pu relever tous les défis et réaliser mes rêves. Merci pour tes conseils précieux et pour ta présence constante à mes côtés à chaque instant.

À mon cher père Abderrahmane, qui a toujours été mon modèle et mon exemple dans la vie. À travers ta sagesse et ta force, j'ai appris l'importance du travail acharné et du dévouement. Merci pour ta foi en moi, ton soutien continu et tout ce que tu m'as offert en amour et en soin.

À mes frères Mohammed et Walid, à mes très chères sœurs Amina et Chaimaa et mon intime Benmehdi Chaima vous êtes mes piliers et mes complices, toujours là pour partager rires et défis. Merci pour votre amour indéfectible et votre soutien constant.

À toute ma famille sans exception,

À tous ceux qui m'ont aidé durant ma vie universitaire.

À mon Binôme Fethi Messaouden et tous mes amis de la promo génie Electronique sans citer les noms.

Melih Asma



Dédicaces

A mes chers parents

*qui ont sacrifiés toutes leurs forces pour assurer ma réussite dans
mes études.*

A mon cher frère et mes chères sœurs.

A mes chères cousines.

A toute ma famille. A tous mes amis.

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

REMERCIEMENTS

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en instrumentation au Département de Génie Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Nous tenons à remercier nos encadrants Mohamed BENAÏSSA professeur au département de génie électrique et électronique et Sidi Mohamed CHORFI maître de conférences classe A au département de génie mécanique de la faculté de technologie pour le soutien technique et moral qu'ils nous ont apporté tout au long de notre mémoire.

Nous les remercions et nous leur exprimons notre gratitude pour leurs conseils et leurs observations sévères, leurs gentillesse et leurs encouragements. Nous tenons à remercier Ahmed NEMMICHE maître de conférences au département de génie électrique et électronique pour avoir accepté de présider le jury, ainsi que le Docteur SLAMI Ahmed enseignant au département de génie électrique et électronique pour avoir accepté d'examiner notre mémoire.

Nous tenons à remercier vivement l'équipe 5 du laboratoire mécanique computationnelle de la faculté de technologie de l'université de Tlemcen pour avoir accepté de nous fournir les signaux temporaires de vibration pour la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Merci à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce mémoire de fin d'études.

Asma Melih & Fethi Messaoudene

Table des matières

Dédicace	
Remerciement	
Table des matières	
Table des figures	
Liste des tableaux	

Chapitre I : Analyse vibratoire des machines tournantes

INTRODUCTION GENERALE.....	1
I.1.1 Définitions et principes de base :	3
I.1.2 Importance de l'analyse vibratoire pour la maintenance prédictive.....	3
I.1.3 Analyse vibratoire et entreprises mondiales	5
I.2 ACQUISITION DES SIGNAUX VIBRATOIRES.....	6
I.2.1 Méthodes d'acquisition	6
I.2.2 Capteurs de vibrations.....	7
I.2.2.1 Accéléromètres	7
I.2.2.2 Vibromètres	10
I.2.2.3 Capteurs de déplacement.....	13
I.3 TECHNIQUES D'ANALYSE VIBRATOIRE	15
I.3.1 Transformée de Fourier (FFT)	15

Chapitre II : Simulation des défauts des machines tournantes

II.1. INTRODUCTION AUX MACHINES TOURNANTES	19
II.1.1 Présentation des machines tournantes	19
II.1.2 Types de machine Tournantes	21
II.3 DIFFERENTS TYPES DE DEFAUTS MECANIQUES DES MACHINES TOURNANTES	23
II.3.1 Déséquilibre.....	23
II.3.2 Mauvais alignement.....	25

II.3.3 Jeu dans les roulements	26
II.3.4 Usure des roulements.....	28
II.3.5 Usure des engrenages	30
II.3.6 Défauts de résonances	32
II.3.7 Défauts d'arbre et de balourd.....	34
II.3.8 Défauts de courroies ou poulies.....	35
II.3.9 Défauts d'amortissement.....	38
CONCLUSION.....	38

Chapitre III : Expérimentation et interprétation des résultats

III.1 INTRODUCTION.....	39
III.2 BANC D'ESSAI	40
III.3 EXPERIMENTATION ET PRESENTATION DES RESULTATS	46
III.3.1 Détection de la vitesse de rotation.....	46
III.3.2 Détection des défauts d'alignement	47
III.3.3 Détection des fréquences des roulements.....	48
III.3.3 Détection des fréquences d'engrenages	50
III.3.4 Vérification des résultats	51
III.3.4.1 Détection des défauts d'alignement.....	52
III.3.4.2 Détection des fréquences des roulements	53
III.4 Spectre de vibrations pour les basses et hautes fréquences.....	55
CONCLUSION :	56
CONCLUSION GENERALE	57

Liste des figures

Chapitre I : Analyse vibratoire des machines tournantes

Figure I.1 : Accéléromètres piézoélectriques	8
Figure I.2 : Accéléromètres MEMS	9
Figure I.3 : Accéléromètres capacitifs	9
Figure I.4 : Vibromètres piézoélectriques	10
Figure I.5 : Vibromètres électrodynamiques	11
Figure I.6 : Vibromètres laser	11
Figure I.7 : Vibromètres à induction électromagnétique	12
Figure I.8 : Vibromètres optiques	12
Figure I.9 : Capteur de déplacements inductifs	13
Figure I.10 : Capteur de déplacements capacitifs	14
Figure I.11 : Capteur à ultrason	14
Figure I.12 : Capteur de laser	15
Figure I.13 : Spectre d'un signal carré de 210 Hz.	17

Chapitre II : Simulation des défauts des machines tournants

Figure II.1 : Schéma de Constitution d'une machine tournante typique ..	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.2 : Diagramme des fréquences de vibrations liées aux défauts courants tels que le déséquilibre, l'usure des roulements et le mauvais alignement.....	22
Figure II.3 : Rotor avec une masse déséquilibrée	23
Figure II.4 : Spectre d'un rotor en déséquilibre.....	24
Figure II.5 : Arbres mal alignés	25
Figure II.6 : Spectre d'une machine avec mauvais alignement.....	26
Figure II.7 : Schéma d'un roulement.....	26
Figure II.8 : Spectre d'une machine avec jeu dans les roulements	27
Figure II.9 : Spectre avec ses harmoniques d'une machine avec jeu dans les roulements	27
Figure II.10 : Fissure de la bague extérieure d'un roulement.....	28
Figure II.11 : Spectre d'une machine avec usure des roulements	30
Figure II.12 : Engrenage présentant des signes d'usure.....	30
Figure II.13 : Spectre de vibrations d'un système à engrenages	31
Figure II.14 : Exemple de spectre avec ses harmoniques	32
Figure II.15 : Spectre des vibrations d'un système en résonance.....	33
Figure II.16 : Spectre des vibrations d'un système en résonance.....	34
Figure II.17 : différents types de désalignements dans des assemblages d'arbres mécaniques	34
Figure II.18 : Spectre de fréquence d'une machine avec défauts d'arbre et de balourd	35
Figure II.19 : Exemple de banc d'essai pour l'étude des défauts de poulies	36
Figure II.20 : Spectre avec ses harmoniques d'une machine avec défauts de courroies	37
Figure II.21 : Spectre avec ses harmoniques d'une machine avec défauts d'amortissement ..	38

Chapitre III : Expérimentation et interprétation des résultats

Figure III.1 : Moteur SEIPEE modèle JM71A4	40
Figure III.2 : Banc d'essai	41
Figure III.3 : Réducteur de vitesse.....	42
Figure III.4 : Inspection directe des éléments du banc d'essai	43
Figure III.5 : schéma synoptique du Banc d'essai	45
Figure III.6 : Détection des pics de vitesse INPUT et OUTPUT	47
Figure III.7 : Détection des pics dus aux défauts d'alignements	48
Figure III.8 : Détection des pics des fréquences de roulements	49
Figure III.9 : Détection du déséquilibre de l'arbre à la fréquence de roulement.....	50
Figure III.10 : Détection des pics de vitesse INPUT et OUTPUT	52
Figure III.11 : Détection des pics dus aux défauts d'alignements	53
Figure III.12 : Détection des pics des fréquences de roulements	54
Figure III.13 : Détection du déséquilibre de l'arbre à la fréquence de roulement.....	55
Figure III.14 : Spectre du banc d'essai pour une fréquence d'échantillonnage de 25600 Hz	55

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Caractéristiques du moteur JM71A4.....	39
Tableau III.2 : Pics de vitesse INPUT et OUTPUT	46
Tableau III.3 : Pics de vitesse INPUT et OUTPUT	51

INTRODUCTION GENERALE

La localisation des défauts mécaniques est une préoccupation essentielle dans le domaine de l'ingénierie et de la maintenance industrielle. La capacité à identifier rapidement et précisément les défauts au sein des machines est cruciale pour garantir leur bon fonctionnement, minimiser les temps d'arrêt, et réduire les coûts de maintenance.

L'analyse vibratoire est une méthode essentielle dans le domaine de la maintenance prédictive des machines tournantes, permettant de détecter et de diagnostiquer les défauts mécaniques avant qu'ils ne provoquent des pannes coûteuses. Cette technique repose sur l'étude des vibrations émises par les équipements industriels, offrant ainsi des informations précieuses sur leur état de santé et leur performance [1] [2].

Les principes de base de l'analyse vibratoire impliquent l'acquisition de signaux vibratoires à l'aide de capteurs spécialisés, suivie par des techniques d'analyse telles que la Transformée de Fourier (FFT) pour décomposer les signaux en composantes fréquentielles. Cette approche permet d'identifier divers types de défauts mécaniques courants tels que le déséquilibre, le mauvais alignement, l'usure des roulements et des engrenages, les défauts de résonances...

Ainsi, l'analyse spectrale consiste à décomposer un signal complexe en ses composantes fréquentielles pour identifier des signatures spécifiques associées à différents types de défauts mécaniques. Cette méthode repose sur le principe que les défauts génèrent des vibrations ou des signaux acoustiques particuliers qui peuvent être détectés et analysés en termes de fréquence, d'amplitude et de phase. En analysant ces signaux, il est possible de déterminer la nature et l'emplacement des défauts au sein des machines.

Les premiers travaux sur l'analyse spectrale des vibrations ont été réalisés dans les années 1950, avec l'avènement des premiers analyseurs de spectre et des logiciels de traitement de signal [3].

Dans ce mémoire, nous utilisons un moteur SEIPEE modèle JM71A4 pour effectuer des essais d'analyse vibratoire sur un banc d'essai en appliquant la Transformée de Fourier Rapide (FFT). L'analyse vibratoire vise à identifier les fréquences de rotations des différents composants du banc d'essai ainsi que d'éventuels défauts. Le banc d'essai comprend un API pour le contrôle de vitesse, un réducteur de vitesse robuste, un tachymètre, et un capteur de vibrations de Dytran Instruments. Une inspection directe du moteur a été réalisée pour identifier les roulements, engrenages et arbres, afin de compléter les données nécessaires pour une analyse précise.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous introduisons l'analyse vibratoire, en commençant par les définitions et principes de base, ainsi que son importance pour la maintenance prédictive et son utilisation par les entreprises mondiales. Ensuite, nous abordons l'acquisition des signaux vibratoires, détaillant les différentes méthodes et types de capteurs utilisés, tels que les accéléromètres, les vibromètres et les capteurs de déplacement. Enfin, le chapitre se concentre sur les techniques d'analyse vibratoire, avec une attention particulière sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT), essentielle pour l'analyse des signaux vibratoires.

Dans le deuxième chapitre, nous introduisons les machines tournantes, en commençant par une présentation générale et en décrivant les différents types de machines tournantes. Ensuite, nous explorons les différents types de défauts mécaniques auxquels ces machines sont souvent confrontées, tels que le déséquilibre, le mauvais alignement, le jeu et l'usure des roulements, l'usure des engrenages, les défauts de résonance, les défauts d'arbre et de balourd, ainsi que les défauts des courroies ou poulies et d'amortissement. Tous ces défauts ont été simulés pour mieux comprendre leur impact sur les machines.

Dans le dernier chapitre, nous présentons les expérimentations et l'interprétation des résultats obtenus. Après une introduction générale, nous détaillons le banc d'essai utilisé pour les analyses vibratoires. Ensuite, nous décrivons les différentes étapes de l'expérimentation, incluant la détection de la vitesse de rotation, des défauts d'alignement, des fréquences des roulements et des engrenages. Chaque détection est suivie par une vérification des résultats obtenus. Enfin, nous analysons les spectres de vibrations pour les basses et hautes fréquences, fournissant une compréhension complète des comportements vibratoires des machines tournantes.

Nous terminons le mémoire par une conclusion générale qui synthétise les principaux résultats obtenus, souligne l'importance de l'analyse vibratoire pour la maintenance prédictive des machines tournantes.

Chapitre I : Analyse vibratoire des machines tournantes

I.1 Introduction à l'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est une méthode qui permet d'évaluer l'état des machines en mesurant les vibrations produites par leur fonctionnement. Elle est largement utilisée dans les domaines de l'ingénierie, de l'industrie et de la maintenance pour détecter les anomalies mécaniques et prévenir les pannes.

I.1.1 Définitions et principes de base :

L'analyse vibratoire est une technique de diagnostic qui consiste à mesurer les niveaux de vibration d'une machine pour déterminer son état de fonctionnement. Les vibrations sont des oscillations mécaniques autour d'un point d'équilibre, et elles peuvent être mesurées à l'aide de capteurs tels que les accéléromètres ou les capteurs de vitesse.

Les principes de base de l'analyse vibratoire incluent la mesure de différents paramètres vibratoires, tels que l'amplitude, la fréquence et la phase, qui peuvent être analysés pour identifier les modes de fonctionnement normaux ou anormaux de la machine. L'analyse spectrale, qui consiste à transformer les données de temps en fréquence à l'aide de la transformée de Fourier, est également couramment utilisée pour comprendre les fréquences caractéristiques des composants d'une machine.

Des études comme celle de [4] [5] et [6] ont montré que l'analyse vibratoire peut être utilisée pour diagnostiquer des problèmes mécaniques tels que les déséquilibres, les désalignements, les roulements défectueux et les problèmes de lubrification.

I.1.2 Importance de l'analyse vibratoire pour la maintenance prédictive

L'analyse vibratoire est un outil clé pour la maintenance prédictive, qui vise à prévoir et à prévenir les pannes avant qu'elles ne se produisent [7]. En identifiant les changements subtils dans les vibrations d'une machine, les ingénieurs peuvent anticiper les défaillances potentielles et planifier les interventions de maintenance de manière plus efficace.

L'ISO 20816-1 met en lumière l'importance de l'analyse vibratoire pour la maintenance prédictive en définissant des lignes directrices pour l'évaluation des vibrations des machines

rotatives. La norme ISO 20816-1 énumère l'importance de l'analyse vibratoire pour la maintenance prédictive par les points suivants :

✓ **Détection précoce des anomalies**

L'analyse vibratoire permet de détecter les changements subtils dans les niveaux de vibration des machines rotatives, indiquant ainsi des problèmes potentiels tels que déséquilibres, désalignements, usure de roulements, et autres défauts mécaniques. Une détection précoce aide à prendre des mesures correctives avant que les problèmes ne deviennent graves.

✓ **Surveillance continue**

L'ISO 20816-1 recommande une surveillance régulière ou continue des niveaux de vibration des machines. Cette approche permet de suivre l'évolution des vibrations au fil du temps et de réagir rapidement en cas de déviation par rapport aux niveaux acceptables.

✓ **Évaluation des niveaux de vibration**

La norme fournit des critères pour évaluer les niveaux de vibration mesurés. Les seuils d'alerte et d'action permettent aux ingénieurs et techniciens de comprendre quand une machine pourrait nécessiter une inspection ou une maintenance.

✓ **Planification de la maintenance**

Grâce à l'analyse vibratoire, les entreprises peuvent planifier les activités de maintenance en fonction de l'état réel de la machine, plutôt que d'opter pour une maintenance programmée ou réactive. Cela aide à réduire les temps d'arrêt non planifiés et à optimiser les ressources de maintenance.

✓ **Amélioration de la fiabilité et de la sécurité**

En identifiant et en corrigeant les problèmes de machines à un stade précoce, l'analyse vibratoire contribue à améliorer la fiabilité globale des équipements et à garantir la sécurité des opérations.

✓ **Optimisation des performances**

En surveillant les vibrations, les entreprises peuvent assurer le bon fonctionnement de leurs machines rotatives, ce qui peut mener à des performances optimales et à une meilleure efficacité.

✓ **Réduction des coûts**

En identifiant les problèmes à un stade précoce, les réparations peuvent être planifiées de manière à minimiser les temps d'arrêt et les coûts associés aux pannes imprévues.

I.1.3 Analyse vibratoire et entreprises mondiales

De nombreuses entreprises de renommée mondiale intègrent l'analyse vibratoire dans leurs stratégies de maintenance prédictive pour améliorer leur efficacité opérationnelle et leur rentabilité. Voici quelques exemples d'entreprises internationales réputées qui utilisent cette approche :

- General Electric (GE) : GE utilise l'analyse vibratoire pour surveiller ses équipements industriels, notamment les turbines et les générateurs. Cette surveillance aide l'entreprise à maintenir ses installations en bon état de fonctionnement, à anticiper les problèmes et à optimiser la performance de ses équipements.
- Siemens : Siemens est une entreprise mondiale qui utilise l'analyse vibratoire pour la surveillance de ses machines industrielles, notamment les turbines à gaz, les moteurs électriques et les compresseurs. L'entreprise emploie cette technique pour optimiser la maintenance et réduire les coûts d'exploitation.
- SKF : SKF, un leader mondial dans les roulements et les solutions de lubrification, propose également des solutions d'analyse vibratoire pour la surveillance des machines. L'entreprise aide ses clients à intégrer ces techniques dans leurs stratégies de maintenance prédictive.
- Emerson Electric : Emerson est une entreprise multinationale qui propose des solutions d'automatisation industrielle, y compris des systèmes de surveillance vibratoire. Ses outils et services aident les entreprises à surveiller et à maintenir leurs équipements pour réduire les temps d'arrêt.
- Honeywell : Honeywell propose également des solutions d'automatisation et de contrôle industriel, y compris des outils d'analyse vibratoire. L'entreprise aide ses clients à surveiller leurs équipements pour optimiser les performances et la fiabilité.

Ces entreprises, parmi d'autres, ont largement adopté l'analyse vibratoire dans leurs stratégies de maintenance prédictive. Elles utilisent des systèmes avancés de surveillance et d'analyse des vibrations pour aider leurs clients à gérer efficacement les équipements industriels, à anticiper les pannes et à optimiser les opérations.

I.2 Acquisition des signaux vibratoires

L'acquisition des signaux vibratoires des machines tournantes est une étape cruciale dans le cadre de la maintenance prédictive et de la surveillance de la santé des équipements industriels. Le processus implique la collecte de données sur les vibrations générées par les machines pendant leur fonctionnement et leur conversion en signaux numériques pour une analyse ultérieure. Cette acquisition permet d'identifier les anomalies, d'évaluer la performance des machines et d'anticiper les problèmes potentiels.

L'acquisition des signaux vibratoires est une composante clé de la surveillance de l'état des machines tournantes dans divers secteurs industriels.

I.2.1 Méthodes d'acquisition

a- Mesure directe

Dans la mesure directe, les capteurs sont placés directement sur les machines pour mesurer les vibrations à des endroits stratégiques tels que les paliers, les supports de l'arbre, ou d'autres parties critiques.

Exemple dans l'industrie pétrochimique : Une raffinerie peut installer des accéléromètres sur les paliers d'une grande pompe pour mesurer les vibrations et surveiller l'état de la machine. Les mesures obtenues permettent de détecter des problèmes comme un déséquilibre ou un désalignement, qui pourraient sinon entraîner une panne de la pompe.

Exemple dans l'industrie automobile : Les fabricants de moteurs peuvent placer des capteurs de déplacement sur les moteurs en cours d'assemblage pour mesurer les vibrations pendant les tests de fonctionnement. Ces données permettent de vérifier la qualité de la fabrication et de s'assurer que les moteurs fonctionnent dans des plages de vibrations acceptables.

b- Acquisition continue

L'acquisition continue implique l'utilisation de systèmes de surveillance en ligne qui permettent une collecte constante de données sur les vibrations. Ces systèmes fournissent des informations en temps réel pour une surveillance constante des machines.

Exemple dans l'industrie de l'énergie : Une centrale électrique peut utiliser un système de surveillance en ligne pour surveiller les turbines à vapeur en continu. Les capteurs mesurent les vibrations pendant le fonctionnement et envoient des données en temps réel à un système de surveillance central. Cela permet d'identifier rapidement des anomalies telles que des problèmes de roulements ou des déséquilibres.

Exemple dans l'industrie minière : Dans une mine, les convoyeurs à bande et les concasseurs peuvent être équipés de capteurs de vibration qui transmettent des données en temps réel sur leur état. Cette surveillance constante aide à prévenir les pannes et à assurer le bon fonctionnement des équipements.

c- Acquisition périodique

L'acquisition périodique implique la collecte de données vibratoires à intervalles réguliers ou à des moments stratégiques.

Exemple dans l'industrie manufacturière : Une usine de fabrication peut effectuer des relevés de vibrations périodiques sur ses machines de production, telles que les presses et les tours. Les techniciens effectuent des mesures hebdomadaires ou mensuelles pour évaluer l'état des machines et planifier la maintenance préventive.

Exemple dans l'industrie des transports : Les compagnies ferroviaires peuvent effectuer des relevés périodiques des vibrations des roues et des bogies des trains. Ces relevés permettent de surveiller l'usure des roues et de planifier leur remplacement avant qu'elles ne deviennent dangereuses.

I.2.2 Capteurs de vibrations

Les capteurs de vibration jouent un rôle clé dans la surveillance des machines mécaniques tournantes. Ils permettent de mesurer les oscillations mécaniques et de détecter les anomalies qui pourraient indiquer des problèmes potentiels. Dans ce qui suit, on illustre les types de capteurs les plus couramment utilisés, accompagnés d'exemples concrets de leur application dans le monde réel et des plages de fréquence qu'ils peuvent acquérir.

I.2.2.1 Accéléromètres

Les accéléromètres mesurent l'accélération des vibrations des machines tournantes. Ils offrent une large gamme de fréquences, généralement de quelques hertz à plusieurs dizaines de kilohertz, et fournissent des mesures précises.

Exemple dans l'industrie pétrochimique : Les accéléromètres sont utilisés pour surveiller les vibrations des pompes et des compresseurs dans les raffineries. Les données recueillies aident à identifier les déséquilibres ou les problèmes de roulements.

Exemple dans l'industrie papetière : Dans les usines de papier, les accéléromètres sont installés sur les rouleaux pour surveiller les vibrations pendant la production. Cela permet de détecter les usures et les anomalies avant qu'elles ne deviennent des problèmes majeurs.

Dans le domaine des vibrations des machines tournantes, les accéléromètres sont des capteurs clés pour mesurer l'accélération des oscillations mécaniques et surveiller l'état de santé des équipements. Les types d'accéléromètres les plus couramment utilisés dans ce domaine sont les suivants :

a- Accéléromètres piézoélectriques

Les accéléromètres piézoélectriques sont largement utilisés dans le domaine des vibrations des machines tournantes. Ils utilisent un matériau piézoélectrique qui produit une charge électrique proportionnelle à l'accélération. Ces capteurs offrent une haute sensibilité et une large plage de fréquences, allant de quelques hertz à plusieurs dizaines de kilohertz.

Avantages : Sensibilité élevée, grande plage de fréquences, robustesse.

Applications : Mesure des vibrations des moteurs électriques, des turbines, des pompes, des compresseurs, et autres équipements rotatifs.



Figure I.1 : Accéléromètres piézoélectriques

b- Accéléromètres MEMS (Systèmes micro électromécaniques)

Les accéléromètres MEMS sont de plus en plus utilisés dans les applications de surveillance des vibrations. Ils sont compacts, légers, et consomment peu d'énergie. Leur plage de fréquences est généralement plus restreinte par rapport aux accéléromètres piézoélectriques.

Avantages : Petite taille, faible consommation d'énergie, coût abordable.

Applications : Surveillance des équipements de petite taille, intégration dans des systèmes de surveillance embarqués, ou applications spécifiques telles que les capteurs de vibrations sur les drones.



Figure I.2 : Accéléromètres MEMS

c- Accéléromètres capacitifs

Les accéléromètres capacitifs sont parfois utilisés dans le domaine des vibrations des machines tournantes, en particulier pour des mesures de basse fréquence ou d'accélération statiques. Ils mesurent les changements de capacité causés par le mouvement d'une masse suspendue entre des électrodes.

Avantages : Bonne précision à basse fréquence, capacité à mesurer des accélérations statiques.

Applications : Surveillance de l'état des machines, mesure des mouvements des parties mécaniques, applications de faible fréquence.



Figure I.3 : Accéléromètres capacitifs

d- Accéléromètres à inductance variable

Les accéléromètres à inductance variable mesurent les changements d'inductance causés par le mouvement d'une masse oscillante. Ils sont moins couramment utilisés dans le domaine des vibrations des machines tournantes, mais peuvent être adaptés à certaines applications spécifiques.

Avantages : Bonne sensibilité, large plage de fréquences.

Applications : Applications spécialisées, mesure des vibrations dans des environnements avec des perturbations électromagnétiques.

I.2.2.2 Vibromètres

Les vibromètres mesurent la vitesse de vibration, couvrant une plage de fréquence de quelques hertz à quelques kilohertz. Ils sont moins sensibles aux bruits à haute fréquence, ce qui les rend adaptés à la surveillance de machines complexes.

Exemple dans l'industrie électrique : Les vibromètres sont utilisés pour surveiller les générateurs électriques, en mesurant la vitesse de vibration pour détecter les déséquilibres et les problèmes de paliers.

Exemple dans l'industrie minière : Dans les mines, les vibromètres sont utilisés sur les concasseurs pour surveiller les vibrations pendant l'écrasement des matériaux. Les données de vitesse de vibration aident à évaluer l'état des machines.

Les vibromètres mesurent la vitesse des vibrations des machines tournantes. Les types d'accéléromètres les plus couramment utilisés dans ce domaine sont les suivants :

a- Vibromètres piézoélectriques

Les vibromètres piézoélectriques utilisent un matériau piézoélectrique pour mesurer la vitesse des vibrations. Ils transforment les vibrations mécaniques en signaux électriques proportionnels à la vitesse de vibration.

Avantages : Haute sensibilité, large gamme de fréquences, robustesse.

Applications : Surveillance des moteurs électriques, des turbines, des pompes et autres équipements rotatifs.



Figure I.4 : Vibromètres piézoélectriques

b- Vibromètres électrodynamiques

Les vibromètres électrodynamiques (ou vibromètres à bobine mobile) mesurent la vitesse des vibrations en utilisant le mouvement relatif entre une bobine et un aimant permanent. La vitesse des vibrations est convertie en un signal électrique.

Avantages : Bonne linéarité, grande plage de fréquences, sensibilité élevée.

Applications : Surveillance des machines rotatives telles que les compresseurs, les turbines et les pompes.



Figure I.5 : Vibromètres électrodynamiques [8]

c- Vibromètres laser

Les vibromètres laser utilisent des faisceaux laser pour mesurer la vitesse des vibrations à distance. Ils sont très précis et peuvent être utilisés pour des applications à distance où un contact direct n'est pas possible.

Avantages : Mesure sans contact, haute précision, large plage de fréquences.

Applications : Surveillance à distance de machines rotatives, mesure de vibrations sur des machines difficiles d'accès.



Figure I.6 : Vibromètres laser [9]

d- Vibromètres à induction électromagnétique

Ces vibromètres mesurent la vitesse des vibrations en utilisant l'induction électromagnétique. Le mouvement des parties oscillantes génère une tension dans une bobine, qui est proportionnelle à la vitesse de vibration.

Avantages : Sensibilité élevée, large plage de fréquences, robustesse.

Applications : Surveillance de machines rotatives dans des environnements industriels exigeants.



Figure I.7 : Vibromètres à induction électromagnétique [10]

e- Vibromètres optiques

Les vibromètres optiques utilisent des méthodes optiques pour mesurer les vibrations. Ils peuvent être utilisés pour mesurer les vibrations à distance sans contact direct avec la machine.

Avantages : Mesure sans contact, haute précision, large plage de fréquences.

Applications : Mesure de vibrations à distance sur des équipements sensibles ou difficiles d'accès.



Figure I.8 : Vibromètres optiques [11]

I.2.2.3 Capteurs de déplacement

Les capteurs de déplacement mesurent les déplacements absolus ou relatifs des éléments de la machine, généralement dans une plage de fréquence allant de quelques hertz à environ 1 kHz.

Exemple dans l'industrie de la production alimentaire : Dans les usines de transformation alimentaire, les capteurs de déplacement sont utilisés pour surveiller les moteurs des convoyeurs et d'autres équipements rotatifs. Cela aide à assurer la continuité des opérations et à prévenir les pannes.

Exemple dans l'industrie automobile : Les fabricants de moteurs utilisent des capteurs de déplacement pour mesurer les mouvements relatifs des composants lors des tests de fonctionnement.

Ces capteurs permettent d'identifier des problèmes tels que les désalignements, les jeux mécaniques, et d'autres anomalies de mouvement. Les types de capteurs de déplacements les plus couramment utilisés dans ce domaine sont les suivants :

a- Capteurs inductifs (capteurs de courant de Foucault)

Les capteurs inductifs, ou capteurs de courant de Foucault, mesurent les déplacements relatifs entre une cible métallique et le capteur. Ils fonctionnent en générant un champ magnétique qui induit des courants de Foucault dans la cible métallique, et en mesurant les variations de ce champ en fonction de la distance entre la cible et le capteur.

Avantages : Haute précision, grande gamme de mesures, robustesse.

Applications : Surveillance des machines tournantes telles que les compresseurs, les turbines et les moteurs électriques.

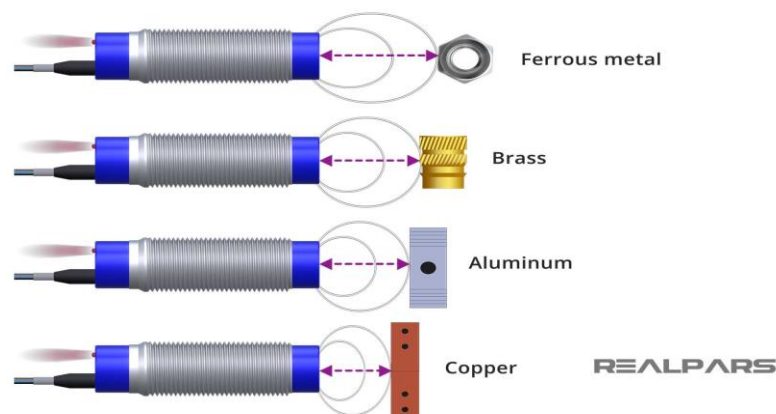


Figure I.9 : Capteur de déplacements inductifs [12]

b- Capteurs capacitifs

Les capteurs capacitifs mesurent les variations de capacité électrique entre deux électrodes, dont l'une est en mouvement. Ils offrent une haute résolution et sont utilisés pour mesurer les déplacements absolus ou relatifs des éléments de la machine.

Avantages : Haute résolution, sensibilité élevée, réponse rapide.

Applications : Mesure des désalignements, surveillance de machines rotatives et d'ensembles mécaniques.



Figure I.10 : Capteur de déplacements capacitifs [13]

c- Capteurs à ultrason

Les capteurs à ultrason utilisent des ondes sonores pour mesurer les déplacements et les distances. Ils émettent des ondes ultrasonores vers une cible, puis mesurent le temps qu'il faut pour que les ondes soient réfléchies de retour vers le capteur.

Avantages : Capacité à mesurer des déplacements absolus, mesure sans contact.

Applications : Surveillance des équipements rotatifs, mesure des jeux mécaniques.



Figure I.11 : Capteur à ultrason [14]

d- Capteurs laser

Les capteurs laser mesurent les déplacements en projetant un faisceau laser sur une cible et en analysant le faisceau réfléchi pour déterminer les déplacements absolus ou relatifs.

Avantages : Mesure sans contact, haute précision, large gamme de distances mesurables.

Applications : Mesure des déplacements sur des équipements sensibles ou difficiles d'accès, tels que les roulements ou les arbres de transmission.



Figure I.12 : Capteur de laser [15]

I.3 Techniques d'analyse vibratoire

Les techniques d'analyse vibratoire sont des outils essentiels pour comprendre le comportement vibratoire des machines tournantes. Ces techniques permettent d'analyser les signaux de vibration pour diagnostiquer et surveiller l'état de santé des équipements. Voici une explication détaillée des techniques d'analyse vibratoire mentionnées :

I.3.1 Transformée de Fourier (FFT)

La Transformée de Fourier Rapide (FFT) est l'une des techniques les plus utilisées dans le domaine de l'analyse vibratoire des machines tournantes. Elle permet de convertir un signal de vibration dans le domaine temporel en un spectre de fréquences, offrant une vue précise des différentes composantes fréquentielles présentes dans le signal.

Principe de la FFT

La FFT transforme un signal de vibration dans le domaine temporel (signal d'amplitude en fonction du temps) en un spectre de fréquences (amplitude en fonction de la fréquence). Cela permet de visualiser les différentes fréquences présentes dans le signal et d'identifier les

fréquences dominantes. La fréquence d'acquisition des vibrations du signal est très importante quant à la qualité des résultats d'analyses.

Le spectre d'un signal carré est un outil puissant pour comprendre la composition fréquentielle du signal. En général, un signal carré est une onde périodique qui alterne entre deux niveaux d'amplitude (haut et bas). Lorsqu'on effectue une analyse fréquentielle d'un signal carré, on observe qu'il peut être représenté comme une somme de sinus et de cosinus de différentes fréquences.

Composition fréquentielle d'un signal carré

- **Harmonies impaires** : Un signal carré peut être décomposé en une somme de sinus et de cosinus à des fréquences qui sont des harmoniques impaires (multiples impairs) de la fréquence fondamentale. Par exemple, si la fréquence fondamentale d'un signal carré est $f = 210 \text{ Hz}$, les 3 premières harmoniques impaires seront :

$$3f = 3 \times 210 = 630 \text{ Hz}$$

$$5f = 5 \times 210 = 1050 \text{ Hz}$$

$$7f = 7 \times 210 = 1470 \text{ Hz}$$

- **Amplitude décroissante** : L'amplitude de chaque harmonique diminue proportionnellement à l'inverse de l'harmonique. Par exemple, l'amplitude de l'harmonique de fréquence $3f$ sera $1/3$ de celle de l'harmonique fondamental (f), l'harmonique de fréquence $5f$ aura une amplitude de $1/5$, et ainsi de suite.
- **Spectre de fréquence** : Le spectre d'un signal carré est donc composé d'un pic dominant à la fréquence fondamentale $f = 210 \text{ Hz}$, puis de pics plus petits aux harmoniques impaires 630 Hz, 1050 Hz, 1470 Hz, ...

La figure I.13 représente le spectre du signal carré de 210 Hz.

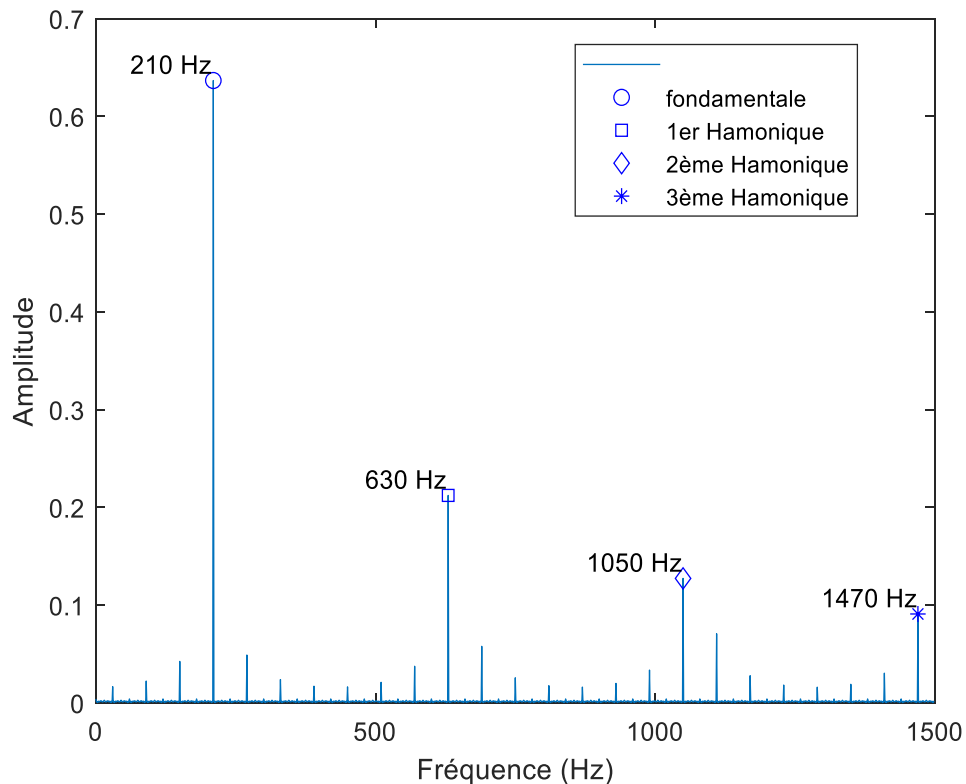


Figure I.13 : Spectre d'un signal carré de 210 Hz.

Application dans l'analyse vibratoire

- Identification des problèmes : Les pics dans le spectre de fréquences peuvent indiquer différents problèmes mécaniques :
- Balourd : Un pic dominant à la fréquence de rotation de la machine.
- Désalignement : Pics harmoniques à des multiples de la fréquence de rotation.
- Défauts de roulements : Pics à des fréquences spécifiques liées aux caractéristiques du roulement.
- Engrenages endommagés : Pics associés à la fréquence de maillage.
- Suivi des tendances : La FFT permet de surveiller les variations dans le spectre de fréquences au fil du temps, ce qui peut aider à détecter les tendances et les changements de comportement vibratoire.

Avantages de la FFT

- Rapidité : La FFT est très efficace et peut être calculée rapidement, même pour de grands ensembles de données.

- Précision : Elle fournit des mesures précises des niveaux de vibration à différentes fréquences.
- Utilisation répandue : La FFT est une méthode standard dans l'analyse vibratoire, donc largement connue et comprise par les ingénieurs et techniciens.

Limites de la FFT

- Manque de localisation temporelle : La FFT ne fournit pas d'informations sur quand exactement les événements se produisent dans le temps.
- Signal non stationnaire : Pour les signaux non stationnaires (dont les caractéristiques changent dans le temps), la FFT peut ne pas être la meilleure approche car elle assume un signal stationnaire.

Combinaisons avec d'autres méthodes

La FFT peut être combinée avec d'autres techniques, comme la transformée en ondelettes, pour fournir à la fois une analyse temporelle et fréquentielle.

Cette approche hybride peut améliorer la détection et le diagnostic des problèmes dans les signaux de vibration.

Conclusion :

L'étude vibratoire des machines en mouvement est un instrument essentiel pour évaluer leur état de fonctionnement et repérer les éventuelles problématiques avant qu'elles ne deviennent critiques. En analysant les mouvements de ces machines, il est possible de repérer les déséquilibres, les jeux excessifs, les défauts de roulement et d'autres anomalies. En conséquence, une maintenance préventive peut être effectuée pour éviter les pannes coûteuses et prolonger la durée de vie utile des équipements. Dans, le chapitre suivant, nous allons simuler des défauts mécaniques des machines tournantes.

Chapitre II : Simulation des défauts des machines tournantes

II.1. Introduction aux machines tournantes

II.1.1 Présentation des machines tournantes

Les machines tournantes sont des dispositifs mécaniques qui transforment l'énergie d'une source en mouvement rotatif pour effectuer un travail mécanique [16]. Elles sont utilisées dans de nombreux secteurs industriels tels que l'énergie, la fabrication, la production de pétrole et de gaz, et bien d'autres encore. Les machines tournantes sont constituées de plusieurs composants essentiels [16] :

✓ **Arbre**

- L'arbre est un composant mécanique qui transmet le mouvement rotatif d'une partie de la machine à une autre.
- Il peut varier en taille et en forme en fonction de l'application et de la puissance à transmettre.

✓ **Roulements**

- Les roulements sont des dispositifs qui réduisent les frottements entre les parties mobiles de la machine et soutiennent les charges.
- Il existe différents types de roulements (à billes, à rouleaux, sphériques, etc.) adaptés à diverses applications.

✓ **Stator**

- Le stator est la partie fixe de la machine tournante.
- Dans un moteur électrique, par exemple, il contient les bobines qui génèrent le champ magnétique.

✓ **Rotor**

- Le rotor est la partie rotative de la machine tournante.
- Il est souvent constitué de bobines ou d'aimants permanents qui interagissent avec le champ magnétique du stator pour créer un mouvement rotatif.

- ✓ **Entraînement mécanique**
 - Comprend les éléments qui transmettent le mouvement rotatif de l'arbre à d'autres parties de la machine ou à d'autres dispositifs.
 - Cela peut inclure des engrenages, des courroies ou des chaînes.
- ✓ **Système de refroidissement**
 - Les machines tournantes génèrent de la chaleur en fonctionnement, et un système de refroidissement est souvent nécessaire pour maintenir des températures de fonctionnement sûres.
 - Cela peut inclure des systèmes de refroidissement par air, par eau ou d'autres méthodes.
- ✓ **Système de lubrification**
 - Les systèmes de lubrification permettent de réduire les frottements et l'usure des composants mécaniques, tels que les roulements et les engrenages.
 - Cela peut inclure des lubrifiants à l'huile ou à la graisse.
- ✓ **Carcasse ou boîtier**
 - La carcasse protège les composants internes de la machine tournante et maintient l'intégrité structurelle.
 - Elle peut également servir de support pour le montage de la machine.
- ✓ **Systèmes de contrôle et de surveillance**
 - Les systèmes de contrôle et de surveillance permettent de réguler et de surveiller le fonctionnement de la machine tournante.
 - Cela peut inclure des capteurs, des automates programmables et d'autres dispositifs électroniques.

La figure II.1 illustre les principaux composants d'une machine tournante montrant les principaux composants tels que le moteur, l'arbre, les roulements et les engrenages.



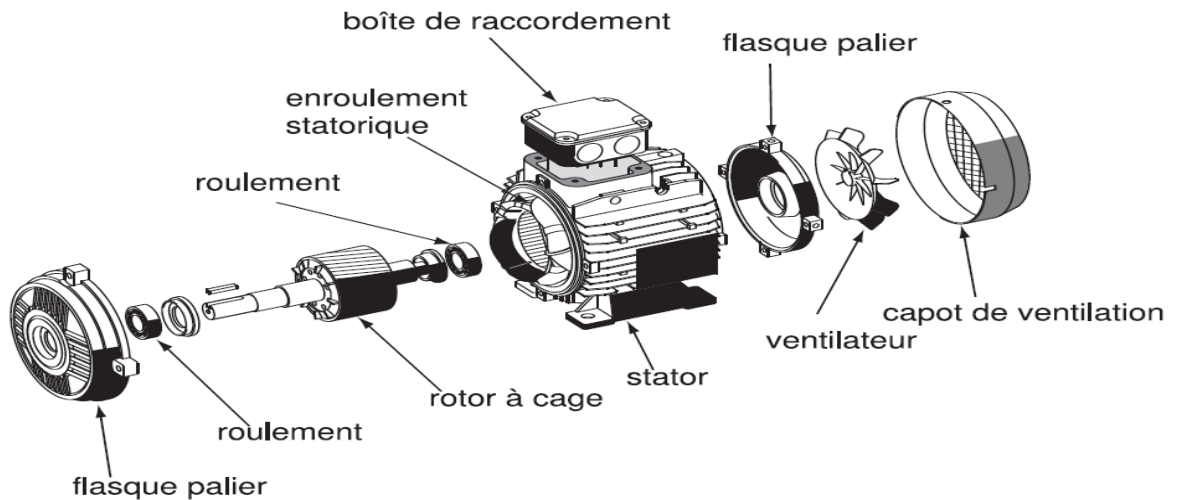


Figure II.1 : Schéma de Constitution d'une machine tournante typique [18]

II.1.2 Types de machine Tournantes

Les différents composants des machines tournantes interagissent entre eux pour permettre le fonctionnement efficace et fiable. Selon le type spécifique de machine tournante, il peut y avoir des variations dans la conception et les composants [17]. Les différents types de machine tournantes sont les suivantes :

✓ **Moteurs électriques**

- Convertissent l'énergie électrique en mouvement rotatif mécanique.
- Types : moteurs à courant continu (CC), moteurs à courant alternatif (CA), moteurs pas à pas.

✓ **Générateurs électriques**

- Convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Types : générateurs à courant alternatif (CA), générateurs à courant continu (CC).

✓ **Pompes**

- Déplacent des liquides d'un endroit à un autre en utilisant de l'énergie mécanique rotative.
- Types : pompes centrifuges, pompes à déplacement positif.

✓ **Turbines**

- Convertissent l'énergie d'un fluide (gaz ou liquide) en mouvement rotatif mécanique.

- Types : turbines à vapeur, turbines à gaz, turbines hydrauliques, turbines éoliennes.

✓ **Compresseurs**

- Augmentent la pression des gaz ou des liquides en les comprimant.
- Types : compresseurs centrifuges, compresseurs à déplacement positif.

II.2 Importance de l'analyse vibratoire pour la maintenance prédictive

L'analyse vibratoire est une technique clé pour surveiller l'état de santé des machines tournantes et détecter les défauts avant qu'ils ne causent une panne. Elle consiste à mesurer les vibrations générées par la machine et à les analyser pour identifier les signatures de défaut spécifiques figure II.2 [19]. Voici pourquoi l'analyse vibratoire est importante pour la maintenance prédictive.

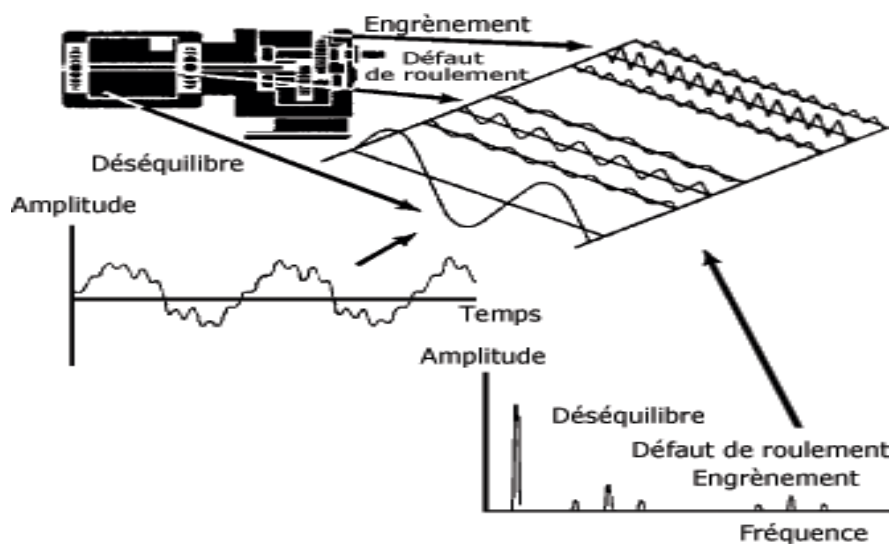


Figure II.2 : Diagramme des fréquences de vibrations liées aux défauts courants tels que le déséquilibre, l'usure des roulements et le mauvais alignement.[20]

L'analyse vibratoire a des avantages suivants :

✓ **Détection précoce des défauts**

L'analyse vibratoire permet de détecter les premiers signes de défauts mécaniques, tels que le déséquilibre, l'usure des roulements ou le mauvais alignement, bien avant qu'ils ne provoquent une panne [21].

✓ **Réduction des coûts**

En identifiant et en corrigeant les défauts à un stade précoce, les coûts de réparation et d'arrêt de la production sont réduits [19].

✓ **Amélioration de la sécurité**

La détection précoce des défauts permet d'éviter les pannes soudaines qui pourraient entraîner des accidents [21].

✓ **Optimisation de la production**

Les machines tournantes en bon état fonctionnent plus efficacement, ce qui contribue à améliorer la productivité [21].

✓ **Allongement de la durée de vie des machines**

La maintenance prédictive fondée sur l'analyse vibratoire prolonge la durée de vie des machines en évitant les surcharges et les dommages [19].

II.3 Différents types de défauts mécaniques des machines tournantes

Dans ce qui suit du chapitre, nous allons effectuer des simulations sous l'environnement Matlab pour représenter le spectre des différents types de défauts mécaniques des machines tournantes.

II.3.1 Déséquilibre

Le déséquilibre se produit lorsque la répartition de la masse d'un rotor est inégale, ce qui entraîne des vibrations excessives et peut endommager la machine. La figure II.3 illustre un rotor avec une masse déséquilibrée. Une partie du rotor est plus lourde, créant ainsi un déséquilibre. Cela provoque une force centrifuge anormale pendant la rotation, entraînant des vibrations excessives.

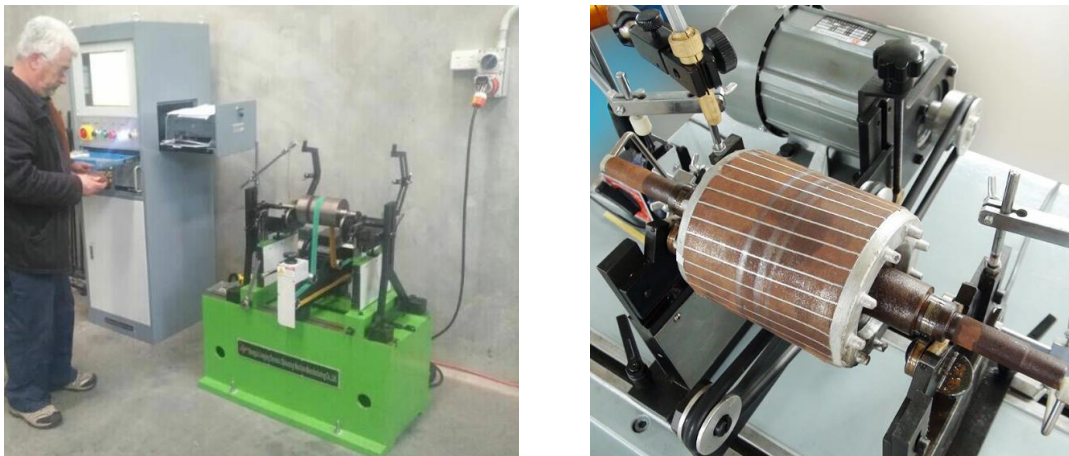


Figure II.3 : Rotor avec une masse déséquilibrée [22]

La figure II.4 montre illustre le spectre de fréquence simuler la simulation d'un rotor à la fréquence de rotation (RPM : Rotation Par Minute) de 5100 RPM, qui est un indicateur clé des vibrations causées par le déséquilibre.

Le spectre de fréquence d'un rotor déséquilibré d'une machine tournante montre comment l'énergie vibratoire est répartie en fonction de la fréquence. Lorsqu'un rotor tourne à une vitesse spécifique, comme 5100 tours par minute, il génère des forces de vibration à cette fréquence de rotation.

Dans le cas d'un rotor déséquilibré, ces forces de vibration ne se limitent pas uniquement à la fréquence de rotation fondamentale (85 Hz), mais elles se propagent également à ses multiples entiers. Ces multiples entiers sont appelés les harmoniques et sont des fréquences de 170 Hz (2ème harmonique), et ainsi de suite.

Le déséquilibre du rotor entraîne des forces centrifuges inégales lorsque la machine tourne. Cela peut provoquer des interactions avec d'autres parties mobiles ou fixes de la machine, telles que des paliers ou des supports. Ces interactions peuvent produire des forces supplémentaires qui modulent l'amplitude de la vibration principale et ses harmoniques comme le montre la figure II.4. En effet, il apparait clairement les Bandes Latérales Inférieures et les Bandes Latérales supérieures pour une fréquence modulante de 10 Hz.

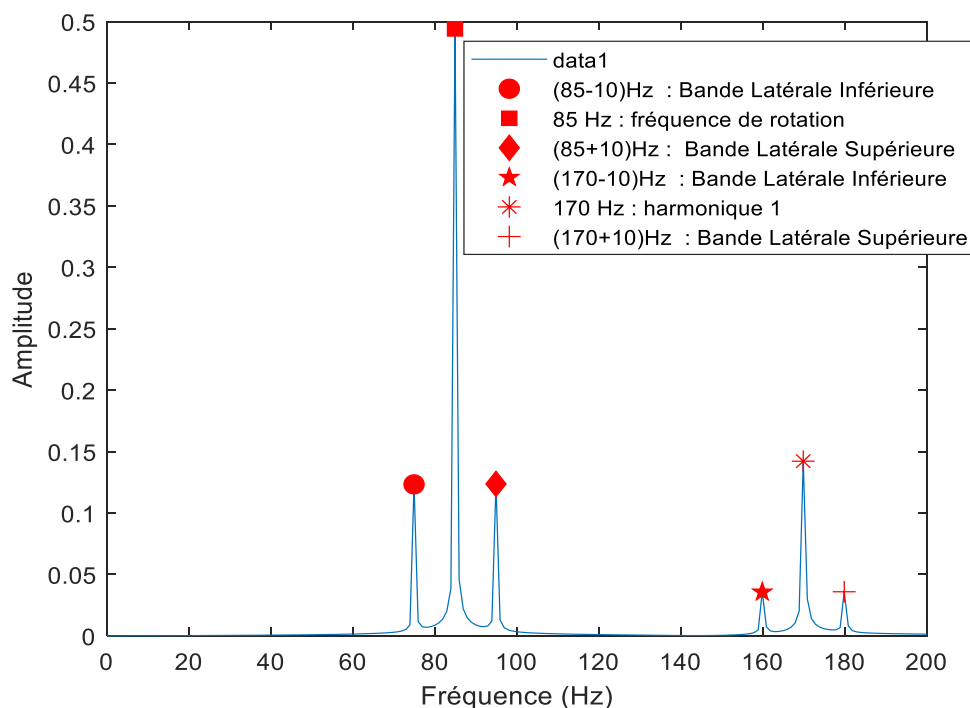


Figure II.4 : Spectre d'un rotor en déséquilibre

II.3.2 Mauvais alignement

Le mauvais alignement se produit lorsque les axes de rotation de différentes parties de la machine ne sont pas correctement alignés, ce qui entraîne des vibrations excessives et peut endommager la machine. Cela peut provoquer des vibrations, une usure prématurée des roulements et d'autres composants [20]. La figure II.5 montre deux arbres mal alignés, ce qui crée un écart angulaire ou parallèle entre eux.

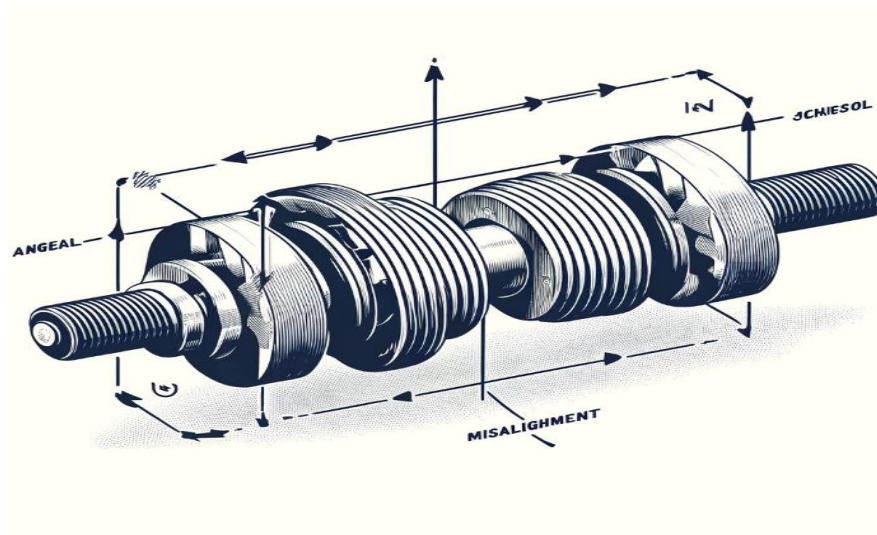


Figure II.5 : Arbres mal alignés [23]

La figure II.6 montre le pic à la fréquence de rotation de 5100 RPM ce qui correspond à 85 Hz, qui est un indicateur clé des vibrations causées par le mauvais alignement.

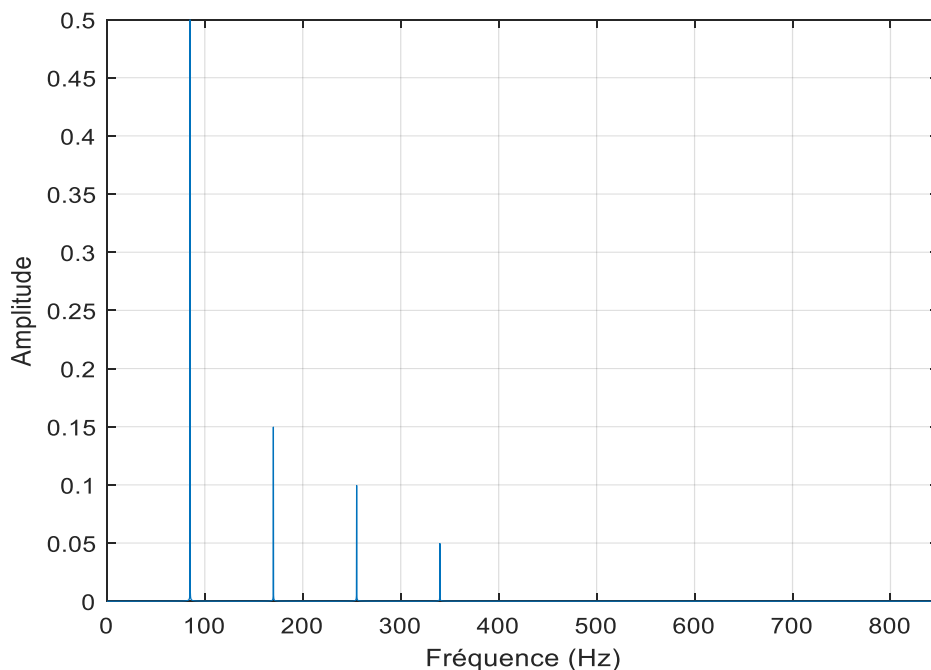


Figure II.6 : Spectre d'une machine avec mauvais alignement

Les pics à la fréquence de rotation et à ses multiples (harmoniques) peuvent être observés, mais le pic à la fréquence de rotation est le plus significatif pour diagnostiquer un mauvais alignement.

Une modulation d'amplitude peut apparaître au niveau du spectre comme pour les défauts de déséquilibre.

II.3.3 Jeu dans les roulements

Le jeu dans les roulements se produit lorsqu'il y a un espace excessif entre les éléments roulants et les bagues, ce qui provoque un mouvement indésirable pendant la rotation [23]. Cela entraîne des vibrations et des impacts, ce qui peut causer des dommages aux roulements et d'autres composants de la machine.



Figure II.7 : Schéma d'un roulement

La figure II.8 montre le spectre de fréquence d'une machine avec jeu dans les roulements. Les pics significatifs peuvent être observés à la fréquence de rotation $RPM = 1800$ (soit 30 Hz), ainsi qu'à des fréquences multiples de la fréquence de rotation, indiquant la présence de vibrations dues au jeu dans les roulements.

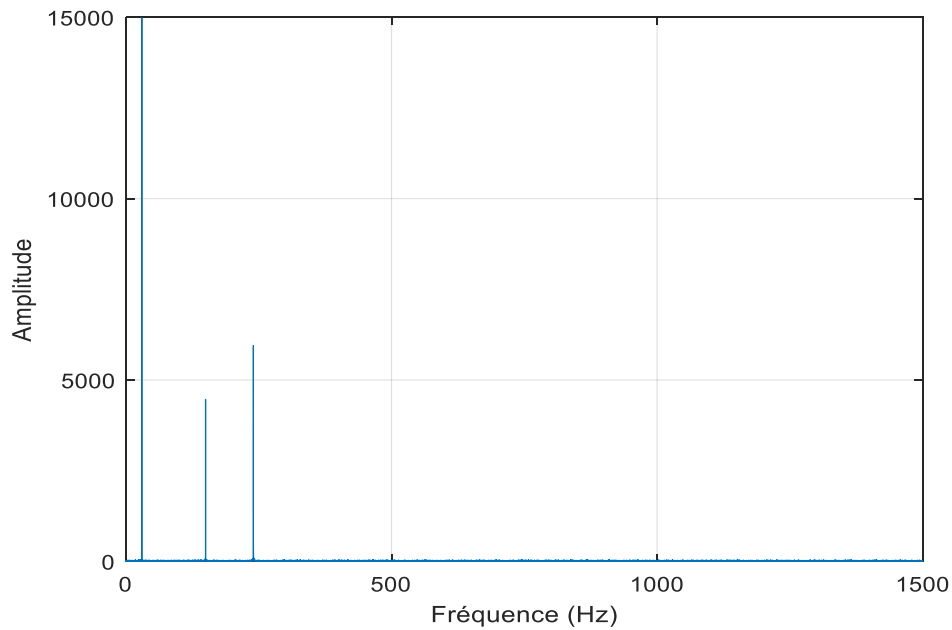


Figure II.8 : Spectre d'une machine avec jeu dans les roulements

Les pics à la fréquence de rotation et à ses multiples peuvent être observés, mais d'autres pics distincts peuvent également apparaître, indiquant la présence de défauts spécifiques dans les roulements. Le spectre de la figure II.9 montre les pics à la fréquence de rotation, aux fréquences de passage des éléments roulants, et à leurs harmoniques.

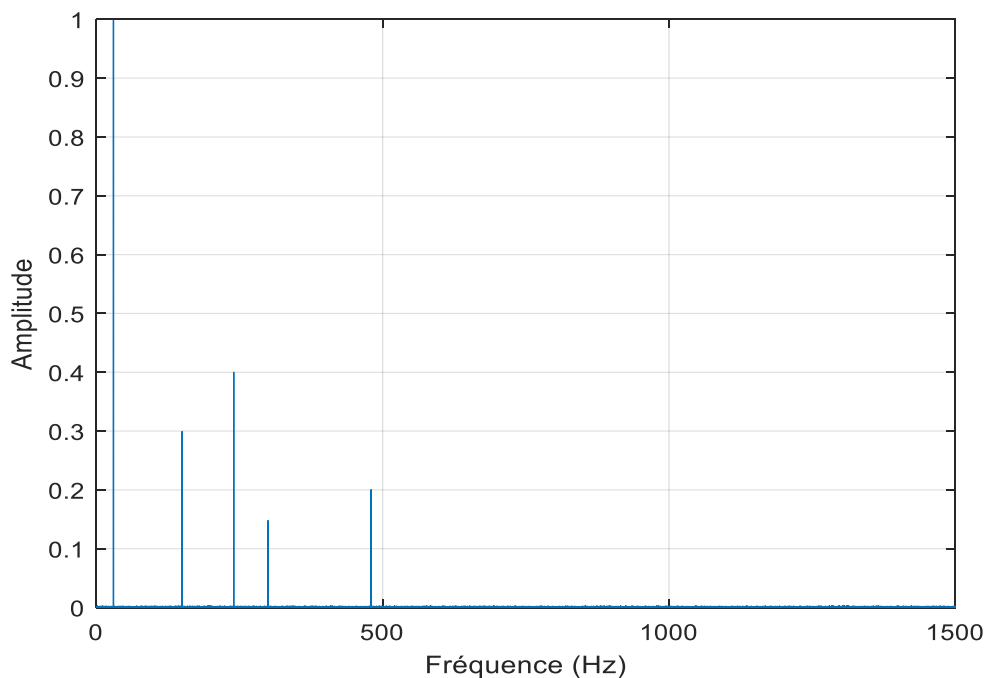


Figure II.9 : Spectre avec ses harmoniques d'une machine avec jeu dans les roulements

II.3.4 Usure des roulements

L'usure des roulements se produit en raison du vieillissement, de la fatigue ou de conditions de fonctionnement difficiles [25]. Cela peut entraîner des vibrations anormales, des bruits de roulement et, éventuellement, des pannes prématurées de la machine.

La figure II.10 montre un roulement avec des signes d'usure, comme des fissures ou des dégradations sur les éléments roulants et les bagues.



Figure II.10 : Fissure de la bague extérieure d'un roulement

La figure II.11 illustre la simulation du spectre de vibration d'une machine présentant une usure ou une fissure des roulements. Chacun des pics correspond à une fréquence caractéristique des composants en mouvement du roulement. Les principaux pics observés dans un spectre de vibration ont les significations suivantes :

- Pic à la fréquence de rotation (f_{rot})

La fréquence de rotation (RPM = 1800 ce qui donne 30 Hz) est la fréquence fondamentale de la machine. Le pic à cette fréquence indique des vibrations liées au mouvement de rotation général de la machine.

- Pics à la fréquence de passage des billes internes (BPFI)

BPFI signifie "Ball Pass Frequency Inner race" et représente la fréquence à laquelle une bille passe devant un point fixe sur la bague intérieure du roulement. Un pic à cette fréquence indique des vibrations liées à des défauts sur la bague intérieure, comme des fissures ou des usures.

- Pics à la fréquence de passage des billes externes (BPFO)

BPFO signifie "Ball Pass Frequency Outer race" et représente la fréquence à laquelle une bille passe devant un point fixe sur la bague extérieure du roulement. Un pic à cette

fréquence indique des vibrations liées à des défauts sur la bague extérieure, comme des fissures ou des usures.

- Pics à la fréquence de passage des billes (BSF)
BSF signifie "Ball Spin Frequency" et représente la fréquence de rotation des billes elles-mêmes dans le roulement. Un pic à cette fréquence peut indiquer des vibrations causées par des défauts sur les billes ou par un jeu dans les roulements.
- Pics à la fréquence de passage de la cage (FTF)
FTF signifie "Fundamental Train Frequency" et représente la fréquence à laquelle la cage du roulement passe devant un point fixe. Un pic à cette fréquence peut indiquer des vibrations liées à des défauts ou des problèmes avec la cage du roulement.
- Pics harmoniques de BPFI et BPFO
Les harmoniques sont des multiples entiers des fréquences de base, comme BPFI et BPFO. Ces pics sont le résultat de la modulation des vibrations à des fréquences plus élevées et peuvent également indiquer des défauts plus complexes ou des interactions mécaniques.

Dans un spectre de vibration, l'amplitude des pics peut varier en fonction de l'intensité des vibrations causées par chaque source. Des pics plus élevés à certaines fréquences peuvent indiquer des problèmes plus graves ou plus prononcés dans la machine.

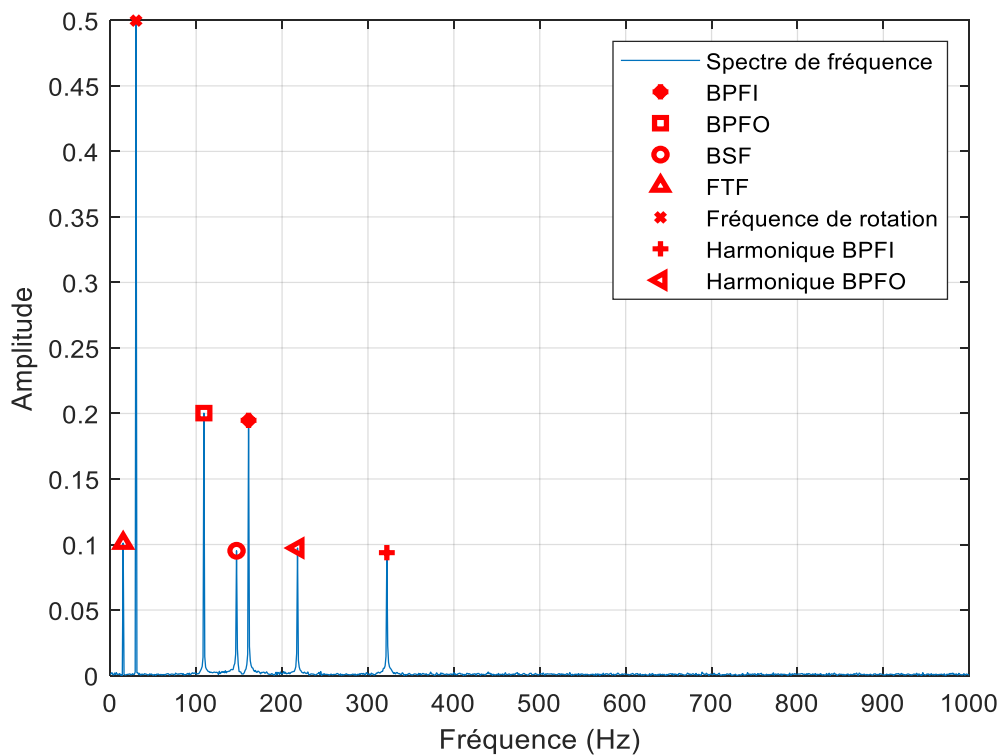


Figure II.11 : Spectre d'une machine avec usure des roulements

II.3.5 Usure des engrenages

L'usure des engrenages se produit lorsque les surfaces dentées s'érodent avec le temps ou en raison de charges excessives [26]. Cela peut entraîner une perte d'efficacité, un jeu excessif et des vibrations dans le système.

La figure II.12 montre un engrenage présentant des signes d'usure. Les dents de l'engrenage sont usées et endommagées, ce qui peut causer des dysfonctionnements dans le mécanisme.

L'usure des engrenages peut provoquer des bruits de grincement ou de cliquetis, en plus d'un mauvais engrenage entre les dents, ce qui peut entraîner une défaillance prématurée de l'engrenage.



Figure II.12 : Engrenage présentant des signes d'usure

La figure II.13 représente la simulation des vibrations d'un système d'engrenage mécanique à une fréquence de rotation de 1600 tours par minute (RPM) avec un engrenage ayant 25 dents. Le spectre de fréquence montre un pic d'amplitude élevé à la fréquence d'impact des dents de l'engrenage. Cette fréquence est calculée en multipliant la fréquence de rotation par le nombre de dents de l'engrenage :

$$\frac{1600 \text{ RPM}}{60} = 26.67 \text{ Hz}$$

$$26.67 \text{ Hz} \times 25 \text{ dents} = 666.75 \text{ Hz}$$

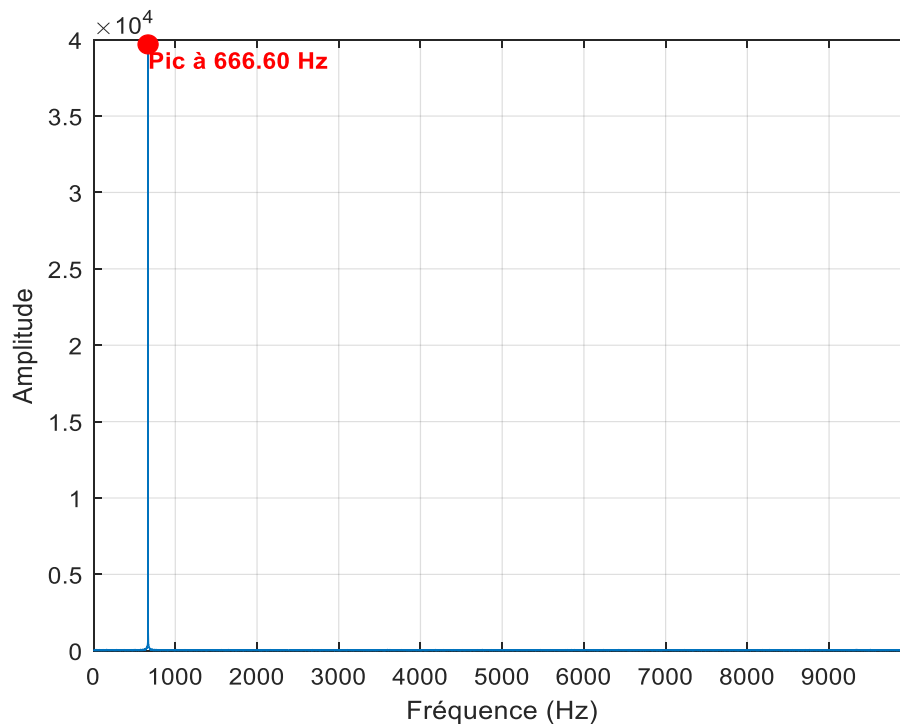


Figure II.13 : Spectre de vibrations d'un système à engrenages

Les pics à des fréquences multiples de la fréquence de rotation peuvent également être présents, indiquant l'impact de l'usure sur les engrenages et leur interaction avec d'autres composants du système. L'usure des engrenages peut se manifester aussi par des dents cassées ou une usure inégale, ce qui peut provoquer des bruits inhabituels et des dysfonctionnements.

La figure II.14 montre comment les différentes composantes fréquentielles du signal d'engrenage sont influencées par la fréquence de rotation et les dents cassées. Les pics mis en évidence par les marqueurs révèlent les fréquences associées aux dents cassées et à la fréquence de passage des dents, ce qui peut aider à diagnostiquer des problèmes potentiels dans l'engrenage.

Le pic à la fréquence de passage des dents, calculée à partir de la fréquence de rotation et du nombre de dents. Cette fréquence est égale à

$$f_{engrenage} = f_{rotation} \times num_{dents} = \frac{1600}{60} \times 25 = 666.67 \text{ Hz.}$$

Dent cassée 4 : Le deuxième pic indique la fréquence associée à la dent cassée 4, calculée à partir de la fréquence de rotation et du numéro de la dent cassée. Cette fréquence est égale à

$$f_{cassée_4} = \frac{1600}{60} \times 4 = 106.67 \text{ Hz}$$

Dent cassée 13 : Le troisième pic indique la fréquence associée à la dent cassée 13, calculée à partir de la fréquence de rotation et du numéro de la dent cassée. Cette fréquence est égale

$$f_{cassée_13} = \frac{1600}{60} \times 13 = 346.674 \text{ Hz}$$

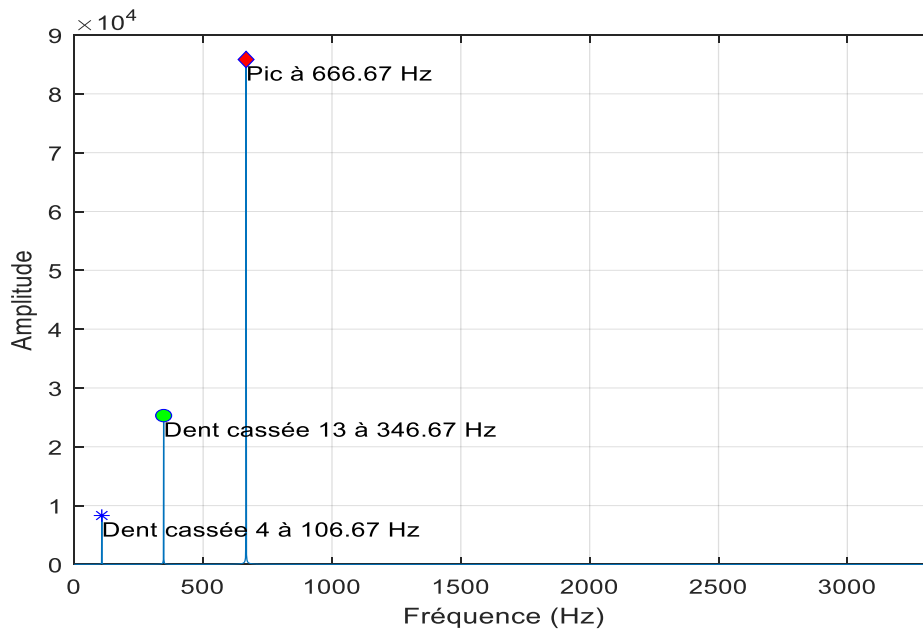


Figure II.14 : Exemple de spectre avec ses harmoniques

II.3.6 Défauts de résonances

La résonance se produit lorsque les vibrations d'un système atteignent une fréquence naturelle qui amplifie ces vibrations, souvent en réponse à une excitation externe ou interne [27]. Cela peut entraîner des déformations excessives, des dommages structuraux ou des pannes catastrophiques de la machine.

La figure II.15 montre le spectre des vibrations d'un système soumis à un phénomène de résonance. Des pics à la fréquence de résonance et à ses harmoniques peuvent être observés dans le spectre, mettant en évidence l'amplification des vibrations à ces fréquences spécifiques.

Les pics d'amplitude sont généralement élevés à la fréquence de résonance, mais aussi potentiellement à d'autres fréquences harmoniques associées.

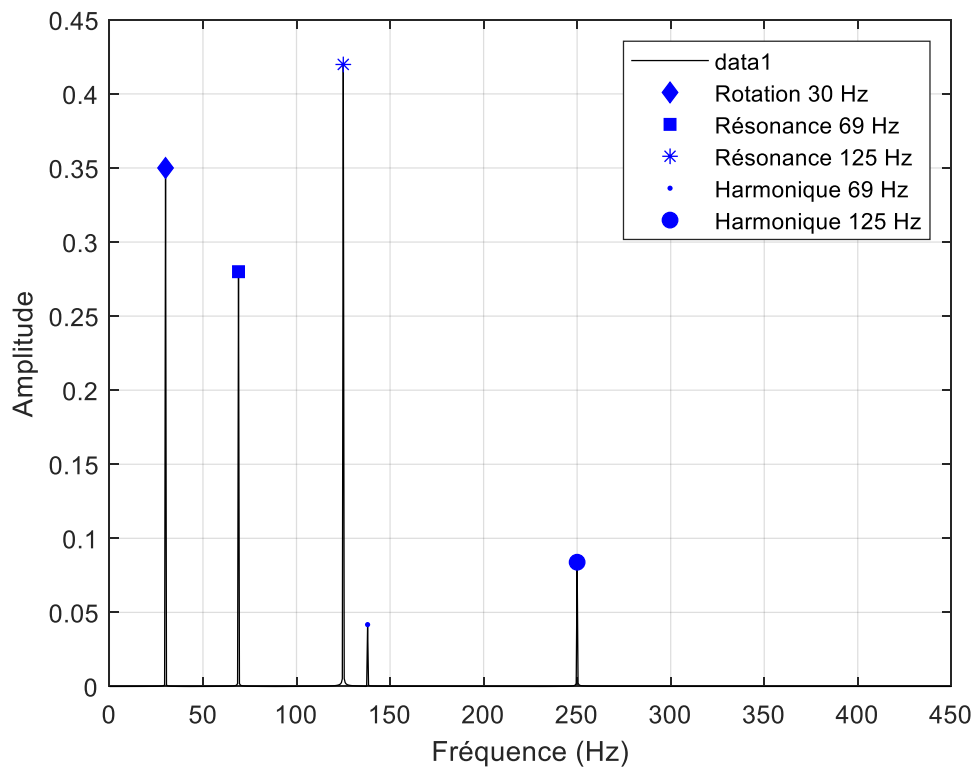


Figure II.15 : Spectre des vibrations d'un système en résonance

La figure II.16 illustre l'apparition de modulations de fréquences au niveau des différents pics de fréquences liée aux variations dans la fréquence des vibrations, souvent provoquées par des interactions non linéaires des effets de résonance.

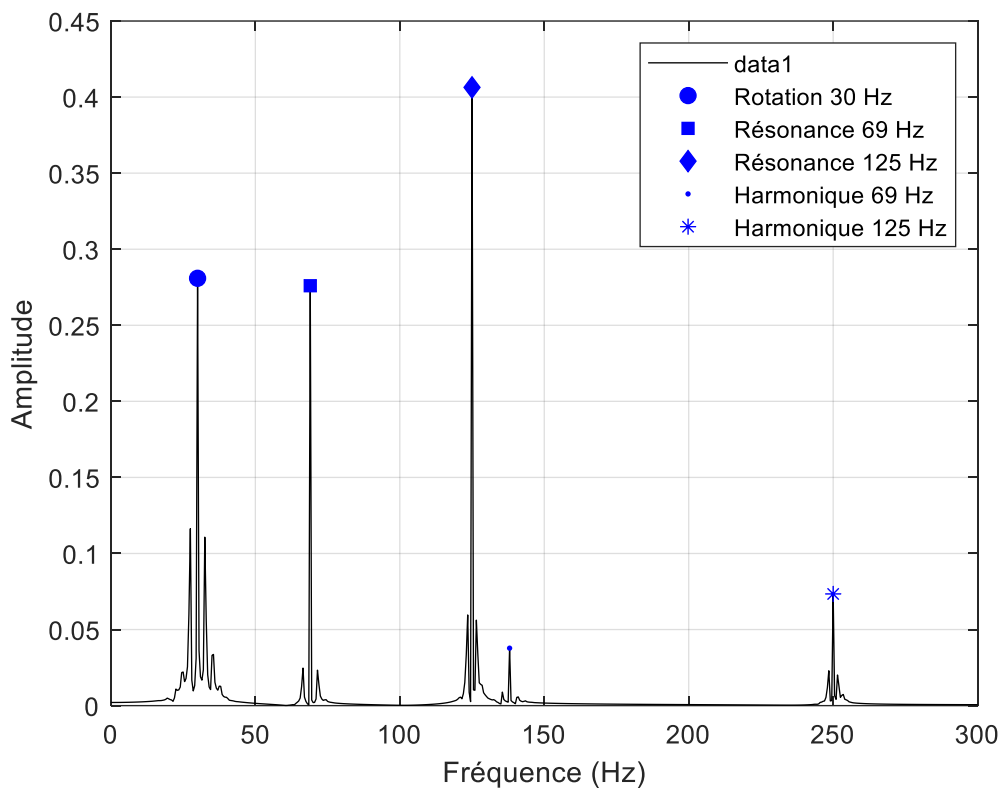


Figure II.16 : Spectre des vibrations d'un système en résonance

II.3.7 Défauts d'arbre et de balourd

Les défauts d'arbre et de balourd peuvent se produire lorsqu'un arbre est déformé, usé ou mal aligné, ou lorsque l'équilibrage de l'arbre est incorrect [28]. Ces défauts peuvent entraîner des vibrations excessives et des dommages mécaniques, affectant la performance de la machine.

La figure II.17 montre un arbre avec un défaut tel qu'une courbure ou une déformation. Cela peut être causé par des forces de charge inappropriées, une usure, ou d'autres facteurs mécaniques.

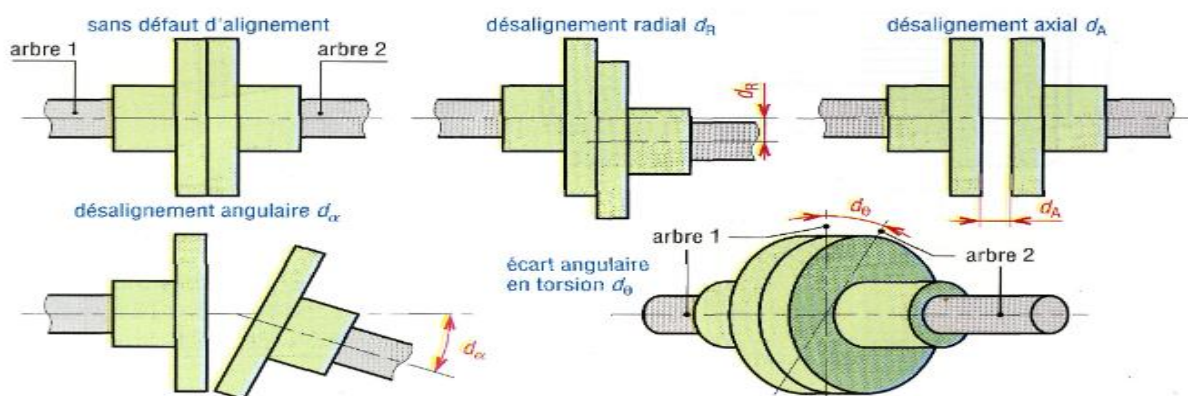


Figure II.17 : différents types de désalignements dans des assemblages d'arbres mécaniques[29]

La figure II.18 montre le spectre de fréquence d'une machine à une fréquence de rotation de 1800 tours par minute (RPM) soit 30 Hz, avec des défauts d'arbre et de balourd. Le spectre de fréquence montre un pic d'amplitude élevé à la fréquence de rotation. Les pics aux multiples de la fréquence de rotation peuvent être observés, avec des amplitudes élevées indiquant des problèmes de déséquilibre ou de balourd.

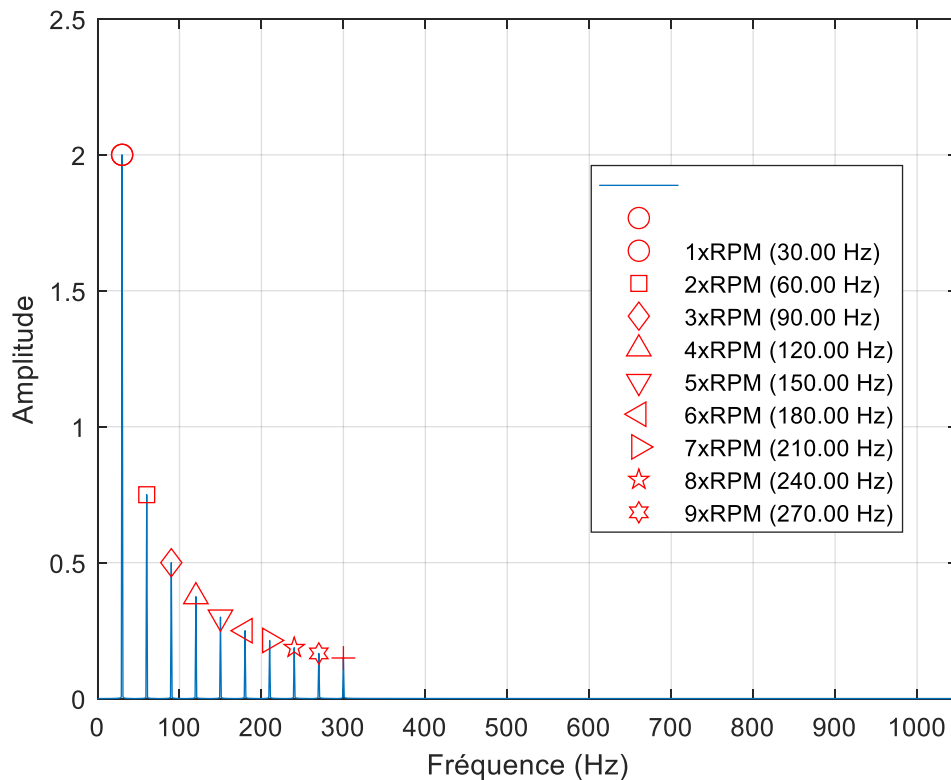


Figure II.18 : Spectre de fréquence d'une machine avec défauts d'arbre et de balourd

II.3.8 Défauts de courroies ou poulies

Les défauts de courroies ou poulies se produisent généralement en raison d'une usure ou d'un mauvais alignement entre les poulies et les courroies [30]. Cela peut entraîner des vibrations anormales, un glissement de la courroie, et des bruits excessifs. Ces problèmes peuvent également conduire à une usure prématurée de la courroie ou des poulies.

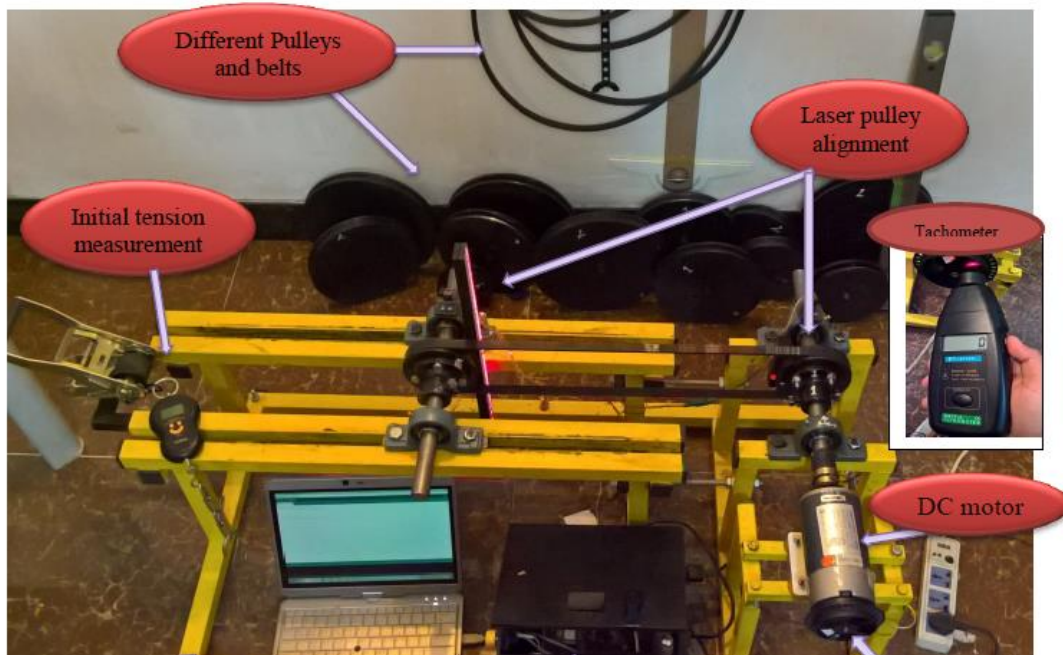


Figure II.19 : Exemple de banc d'essai pour l'étude des défauts de poulies [30]

Le spectre de fréquence, figure II.20, d'une machine tournante simulée avec des défauts de courroie ou de poulie à une fréquence de rotation de 2100 tours par minute soit 35 Hz peut montrer plusieurs caractéristiques intéressantes liées aux défauts spécifiques de la machine. Voici quelques éléments à observer dans ce spectre :

- Fréquence de rotation principale : La fréquence de rotation principale, qui est la fréquence de rotation du moteur, est clairement identifiable comme un pic majeur dans le spectre. Dans ce cas, elle est d'environ 35 Hz (car 2100 tours par minute équivaut à 35 tours par seconde).
- Harmoniques de la fréquence de rotation : Les harmoniques de la fréquence de rotation (multiples entiers de la fréquence principale) peuvent également apparaître comme des pics dans le spectre. Ces harmoniques sont caractéristiques des systèmes tournants et sont le résultat de phénomènes naturels tels que les forces de rotation ou les caractéristiques du moteur.
- Fréquences caractéristiques liées aux défauts de courroie ou de poulie : Des défauts spécifiques, tels que le désalignement ou l'usure de la courroie ou des poulies, peuvent introduire des fréquences spécifiques dans le spectre. Ces

fréquences peuvent apparaître comme des pics supplémentaires dans le spectre, à des fréquences différentes de la fréquence principale et de ses harmoniques.

- Amplitude des pics : Les amplitudes des pics dans le spectre donnent des indications sur l'intensité des vibrations à ces fréquences particulières. Des amplitudes plus élevées peuvent indiquer des défauts plus graves ou des déséquilibres plus importants dans le système.
- Forme globale du spectre : La forme globale du spectre peut fournir des informations sur la santé globale du système tournant. Par exemple, un spectre contenant de nombreux pics à des fréquences spécifiques peut indiquer la présence de plusieurs défauts.

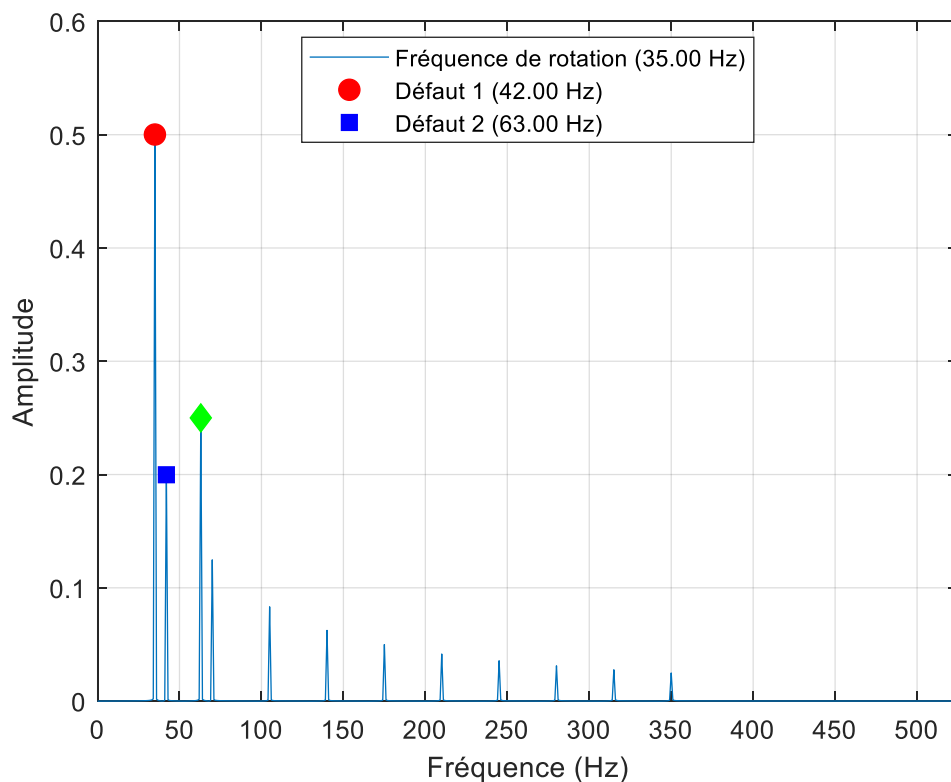


Figure II.20 : Spectre avec ses harmoniques d'une machine avec défauts de courroies

II.3.9 Défauts d'amortissement

Les défauts d'amortissement se produisent lorsque le système de support d'une machine tournante ne parvient pas à absorber correctement les vibrations, entraînant des niveaux de vibrations plus élevés dans la machine [31].

La figure II.21 montre le spectre de fréquence d'une machine avec un défaut d'amortissement. Les pics à la fréquence de rotation de 40 Hz et à ses multiples (harmoniques) peuvent être observés car les éléments de support ne parviennent pas à atténuer les vibrations de manière adéquate. Cela conduit à des niveaux de vibrations excessifs et à une fatigue plus rapide des composants de la machine.

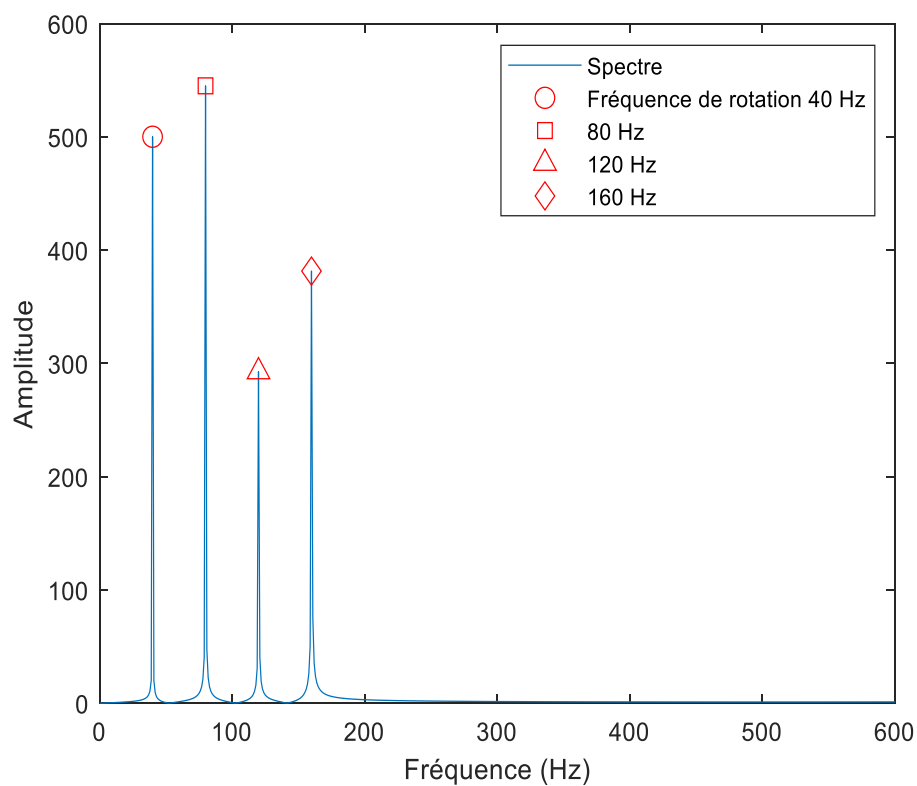


Figure II.21 : Spectre avec ses harmoniques d'une machine avec défauts d'amortissement

Conclusion

L'analyse vibratoire se présente comme une clé essentielle dans la prévention des machines en mouvement. Cette méthode permet aux équipes de maintenance d'intervenir de manière proactive en repérant des défauts mécaniques tels que le déséquilibre, le mauvais alignement et le jeu dans les roulements, ce qui permet de réduire les interruptions coûteuses de production. Dans le chapitre suivant, nous allons effectuer une l'analyse vibratoire réelle sur un banc d'essai fourni par l'équipe 5 du laboratoire mécanique computationnelle de la faculté de technologie de Tlemcen.

Chapitre III : Expérimentation et interprétation des résultats

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons utiliser un moteur SEIPEE modèle JM71A4 pour effectuer des essais d'analyse vibratoire en utilisant la Transformée de Fourier Rapide (FFT). Ce moteur se caractérise par les spécifications suivantes, présentées dans le tableau III.1 :

Caractéristiques	Valeur
Modèle	JM71A4
Puissance nominale	0,75 kW
Fréquence	50 Hz
Vitesse maximale à 50 Hz	1330 tr/min
Matériau de construction	Aluminium
Poids	6 kg

Tableau III.1 : Caractéristiques du moteur JM71A4

Ce moteur n'intègre pas de système de réduction de vitesse, ce qui signifie que la vitesse de sortie est directement proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur. La vitesse du moteur peut être contrôlée pour simuler différentes conditions de fonctionnement.

Les roulements jouent un rôle crucial en réduisant la friction entre les parties mobiles, permettant une rotation fluide et réduisant l'usure des composants. Les arbres transmettent le mouvement et la puissance du moteur aux différentes parties de la machine. Ces composants sont essentiels pour garantir la précision et la fiabilité des mesures lors de l'analyse FFT, permettant ainsi d'identifier les fréquences de résonance et de détecter d'éventuelles anomalies de fonctionnement.

La figure III.1 présente le moteur utilisé.

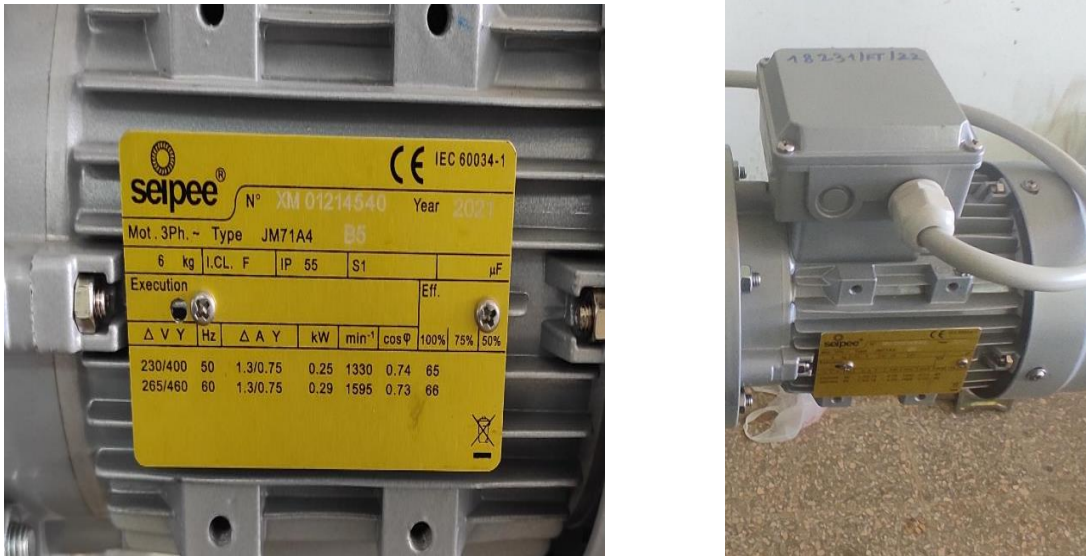


Figure III 1 : Moteur SEIPEE modèle JM71A4

III.2 Banc d'essai

La figure III.2 illustre le banc d'essai utiliser dans notre mémoire pour l'analyse vibratoire.

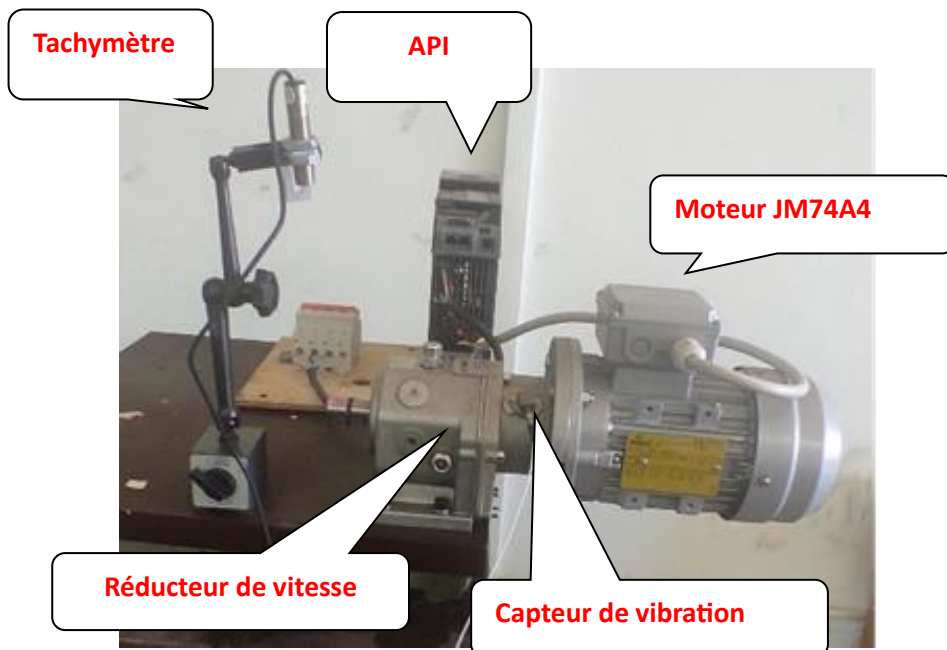




Figure III.2 : Banc d'essai

Il est constitué essentiellement :

1. Le moteur SEIPEE modèle JM71A4 constitue le cœur du système, fournissant la puissance nécessaire à son fonctionnement. Il est crucial de surveiller son état de fonctionnement pour assurer des performances optimales.
2. L'API joue un rôle essentiel dans le système en permettant de régler la vitesse à l'entrée du système (Input). Sa capacité à contrôler efficacement la vitesse et à maintenir la stabilité du système à différentes vitesses est primordiale.

3. Le réducteur de vitesse utilisé est un modèle de la série MHL fabriqué par SITI S.p.A., un fabricant italien réputé dans le domaine des réducteurs de vitesse mécaniques. Le modèle spécifique est MHL20/2/24.1 PAM14/100. Ce réducteur est conçu pour offrir une réduction efficace de la vitesse, adapté à diverses applications industrielles. Ce réducteur se distingue par sa robustesse et sa fiabilité, assurant une performance optimale dans des environnements exigeants. Il est important de surveiller son fonctionnement pour détecter tout problème potentiel, tel que des désalignements ou des défauts de roulement.



Figure III.3 : Réducteur de vitesse

4. Le tachymètre est utilisé pour mesurer la vitesse de sortie du système. Il fournit des données cruciales pour évaluer la performance globale du système et détecter tout écart par rapport aux valeurs attendues.
5. Le capteur de vibration de Dytran Instruments, Inc. est un dispositif spécialement conçu pour mesurer les vibrations dans divers contextes industriels et scientifiques. Ces capteurs sont élaborés pour détecter et quantifier les vibrations sur une large gamme de fréquences et d'amplitudes.

Après avoir constaté l'absence d'informations détaillées sur les composants internes du notre moteur SEIPEE modèle JM71A4 dans les fiches techniques disponibles, et du réducteur de vitesse, nous avons opté pour une approche proactive. Nous avons réalisé une inspection directe en ouvrant le moteur dans le but d'identifier avec précision les roulements, les engrenages et les arbres utilisés dans notre banc d'essai. Cette démarche nous a permis de scruter de près chaque composant, de prendre des mesures sur le nombre de billes et de dents des roulements et

engrenages respectivement, et de rechercher des références et des marques afin de compléter nos données. Bien que cette méthode ait exigé une manipulation minutieuse du moteur pour éviter tout dommage potentiel, elle s'est révélée essentielle pour obtenir les informations détaillées nécessaires à notre analyse vibratoire.

Les photos de la figures III.4 illustrent les éléments inspectés.



Figure III.4 : Inspection directe des éléments du banc d'essai

La figure III.5 illustre le schéma synoptique de notre banc d'essai dédié à l'analyse vibratoire issu de l'inspection directe. Ce schéma se compose principalement de l'entrée, représentée par "INPUT", et de la sortie, symbolisée par "OUTPUT" reliées par :

- Trois arbres identifiés par arbre 1, arbre 2 et arbre 3
- Cinq roulements identifiés par R1, R2, R3, R4 et R5 de marque Niko.

Roulement	N = Nombre de billes ou éléments
R1	11
R2	9
R3	7
R4	7
R5	Inaccessible

- Quatre engrenages identifiés par Z1, Z2, Z3 et Z4

Engrenages	M = Nombre de dents
Z1	11
Z2	58
Z3	64
Z4	14

Un élément clé de ce schéma est le rapport de vitesse entre l'INPUT et l'OUTPUT, qui est de 24. Ce rapport est déterminé par les caractéristiques et le nombre de dents des engrenages, et il joue un rôle essentiel dans le fonctionnement global du système.

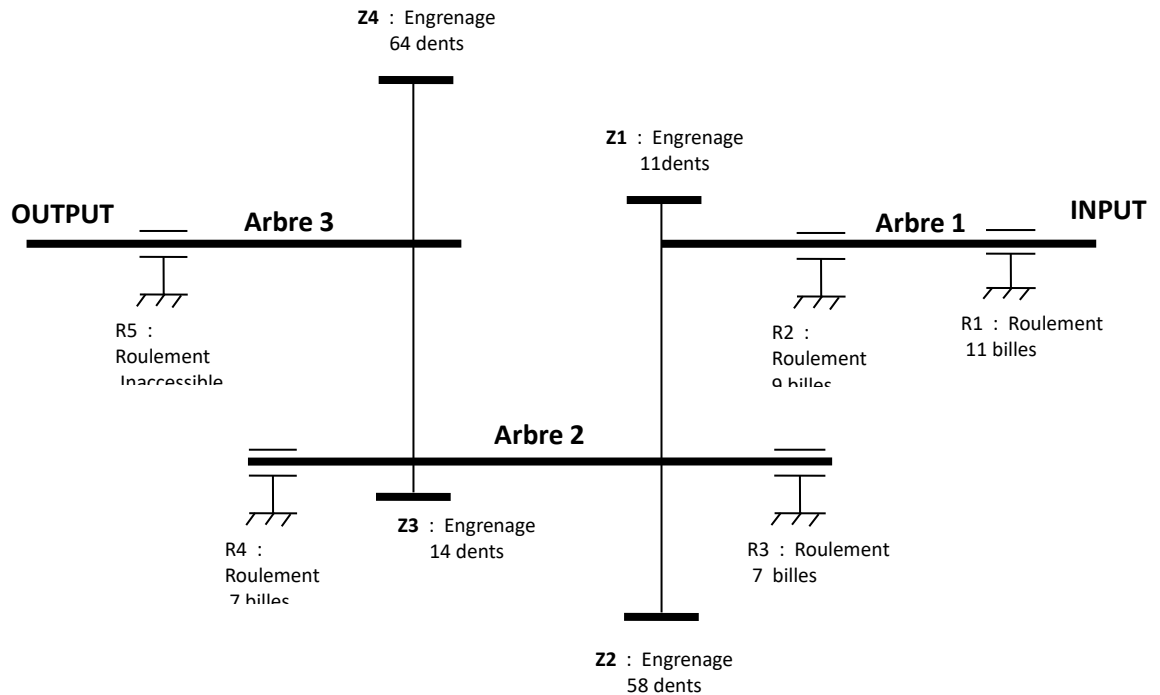


Figure III.5 : schéma synoptique du Banc d'essai

Dans une analyse vibratoire, les roulements et les engrenages peuvent se manifester dans le spectre des vibrations sous forme de pics à des fréquences spécifiques. La vitesse de rotation en INPUT du système, exprimée en tr/min (RPM), est un facteur crucial pour déterminer les fréquences caractéristiques associées aux roulements et aux engrenages.

Pour les roulements

La fréquence de passage des éléments roulants, souvent appelée fréquence de rotation du roulement (f_{rb}), peut être calculée en fonction de la vitesse de rotation du moteur (RPM) et du nombre d'éléments roulants (N) à l'aide de la formule :

$$f_{rb} = \frac{N \times RPM}{60} \text{ [Hz]}$$

Cette fréquence apparaîtra généralement comme un pic dans le spectre des vibrations.

Pour les engrenages

La fréquence de rotation des engrenages (f_g) dépend de la vitesse de rotation du moteur (RPM) et du nombre de dents de l'engrenage (M) selon la formule :

$$f_g = \frac{M \times RPM}{60} \text{ [Hz]}$$

De plus, les engrenages peuvent générer des harmoniques de cette fréquence de rotation en fonction des caractéristiques de l'engrenage et des conditions de fonctionnement.

Pour les arbres

Leur contribution au spectre des vibrations peut être plus complexe et dépendra de plusieurs facteurs, notamment la vitesse de rotation du moteur, les dimensions de l'arbre, les caractéristiques de la charge, et tout déséquilibre ou défaut d'alignement.

Ces vibrations peuvent se manifester dans le spectre des vibrations à différentes fréquences harmoniques de la vitesse de rotation du moteur avec des amplitudes supérieures à la fréquence de rotation [32].

III.3 Expérimentation et présentation des résultats

III.3.1 Détection de la vitesse de rotation

Nous avons utilisé un tachymètre pour mesurer la vitesse de rotation du moteur en tours par minute (RPM= 46.15 tours/min) en sortie. Afin de s'assurer de cette vitesse, nous avons appliqué une transformation de Fourier rapide (FFT) sur les données recueillies par le capteur de vibration, figure III.6. Cette analyse FFT a permis de détecter la fréquence de rotation du moteur, matérialisée par l'apparition d'un pic distinct à 18.46 Hz dans le spectre de fréquence. Ce pic correspond à la fréquence de rotation du moteur, confirmant ainsi la précision de nos mesures obtenues par le tachymètre. De plus, la fréquence en entrée (INPUT), réglée par l'API, est 24 fois plus élevée que la vitesse en entrée, et cette fréquence de l'INPUT apparaît également sous forme de pic à 0.76 Hz dans le spectre de fréquence, validant ainsi notre contrôle des conditions de fonctionnement du moteur. Le tableau III.2 illustre les valeurs de fréquences obtenues avec un léger décalage entre la valeur du tachymètre et celle du spectre. Ceci est dû essentiellement à deux paramètres essentiels :

- Placer un régulateur pour fixer de vitesse à la sortie de l'API
- Augmenter la résolution du spectre, ce qui engendre plus de calcul.

Tachymètre OUTPUT (tours/min)	INPUT (tours/min)	Fréquence INPUT [Hz]	Fréquence OUTPUT [Hz]
46.15	1107.6	18.46	0.76

Tableau III.2 : Pics de vitesse INPUT et OUTPUT

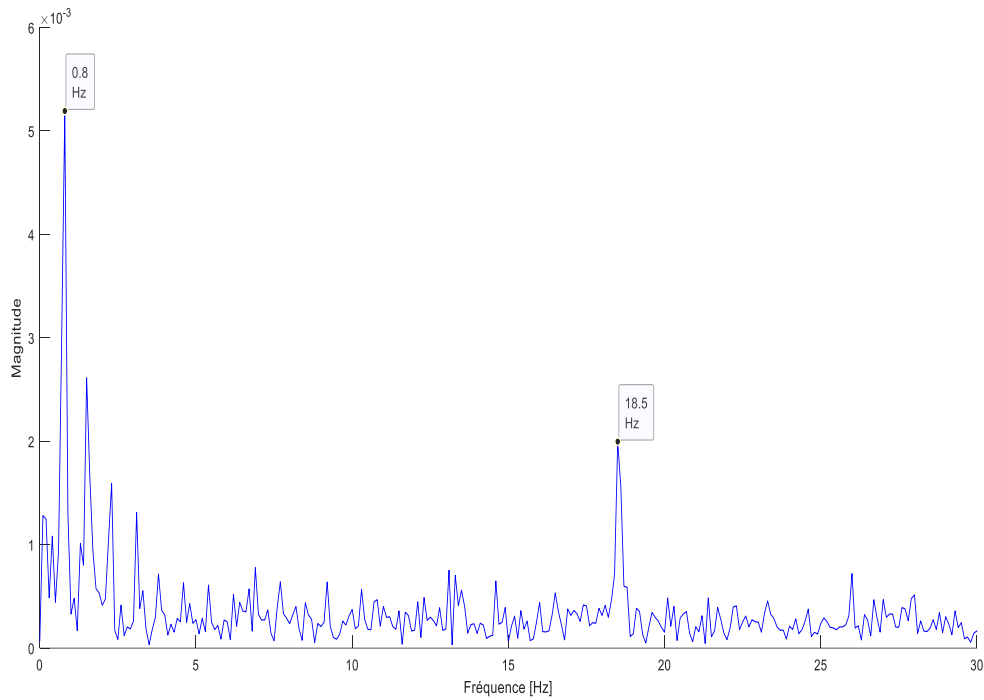


Figure III.6 : Détection des pics de vitesse INPUT et OUTPUT

III.3.2 Détection des défauts d'alignement

La figure III.7 montre le spectre des données recueillies par le capteur de vibration positionné sur notre banc d'essai, à une fréquence de rotation de $\text{RPM} = 46.15$ tours/minute. On observe un pic distinct à 0.8 Hz, correspondant à la fréquence de rotation en sortie (Output). Des harmoniques apparaissent également à 1.5 Hz et 2.3 Hz, probablement dues à un faible désalignement de l'arbre 3.

On note un autre pic à 18.5 Hz, correspondant à la fréquence de rotation en entrée (Input). De plus, une harmonique significative à 37.8 Hz, d'amplitude plus élevée, est présente. Cette harmonique élevée pourrait être attribuée à un déséquilibre considérable au niveau de l'arbre 1 ou de l'arbre 2.

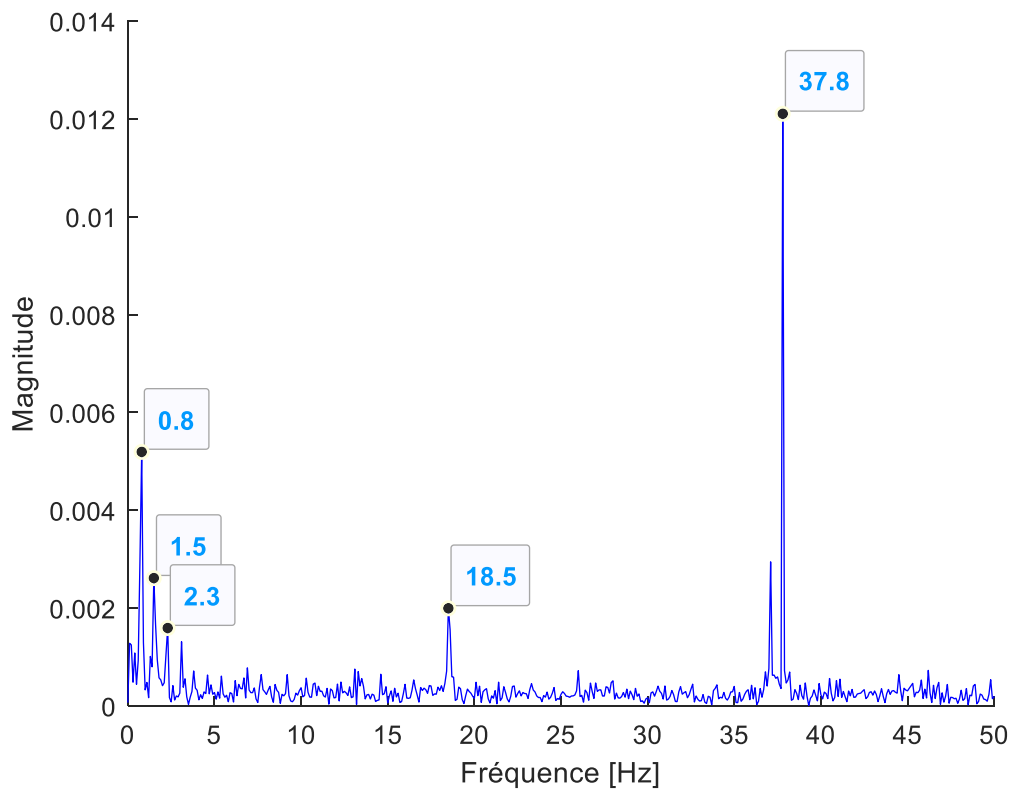


Figure III.7 : Détection des pics dus aux défauts d'alignements

III.3.3 Détection des fréquences des roulements

Notre banc d'essai contient des roulements ayant respectivement 7, 9, et 11 éléments et un roulement inaccessible au nombre d'élément inconnu. En utilisant la fréquence de rotation en entrée (INPUT), qui est de 46.15 RPM multipliée par 24, soit 1107.6 RPM, nous avons calculé les fréquences de roulement pour ces roulements :

- Pour le roulement à 7 éléments

$$f_{rb} = \frac{N \times RPM}{60} = \frac{7 \times 1107.6}{60} = 129.22 \text{ [Hz]}$$

- Pour le roulement à 9 éléments

$$f_{rb} = \frac{9 \times 1107.6}{60} = 166.14 \text{ [Hz]}$$

- Pour le roulement à 11 éléments

$$f_{rb} = \frac{11 \times 1107.6}{60} = 203.06 \text{ [Hz]}$$

Ainsi, les fréquences de roulement pour les roulements à 7, 9, et 11 éléments sont respectivement d'environ 129.22 Hz, 166.14 Hz, et 203.06 Hz. Ces fréquences apparaissent comme des pics dans le spectre des vibrations représenté par la figure III.8, permettant de valider le bon fonctionnement et l'alignement des composants de notre banc d'essai.

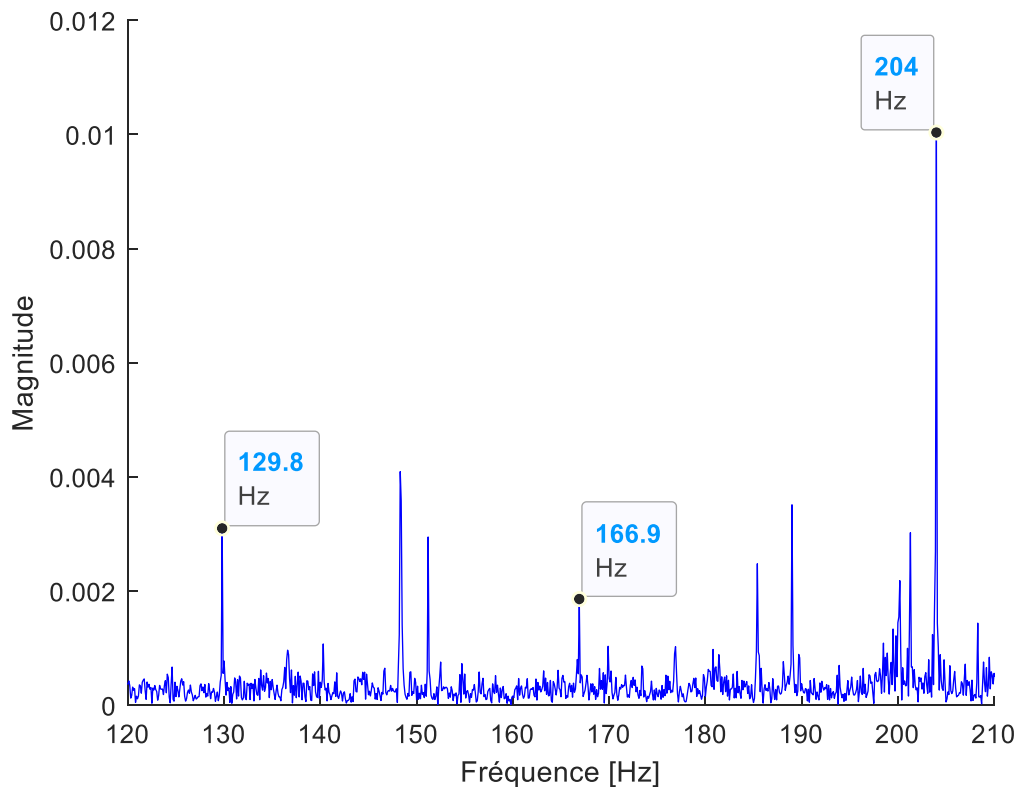


Figure III.8 : Détection des pics des fréquences de roulements

Le déséquilibre des arbres, qui existe dans notre banc d'essai, entraîne des forces centrifuges inégales lorsque la machine tourne. Cela peut provoquer des interactions avec d'autres parties mobiles ou fixes de la machine, telles que les supports ou les roulements. Ces interactions peuvent produire des forces supplémentaires qui modulent l'amplitude de la vibration principale et ses harmoniques comme le montre la figure III.9. En effet, il apparaît clairement une Bande Latérale Inférieure à 148.3 Hz et une Bande Latérale Supérieure à 185.4 pour une fréquence modulante égale à la fréquence INPUT de 18.5 Hz et une porteuse égale à la fréquence du roulement à 9 éléments soit 166.9 Hz.

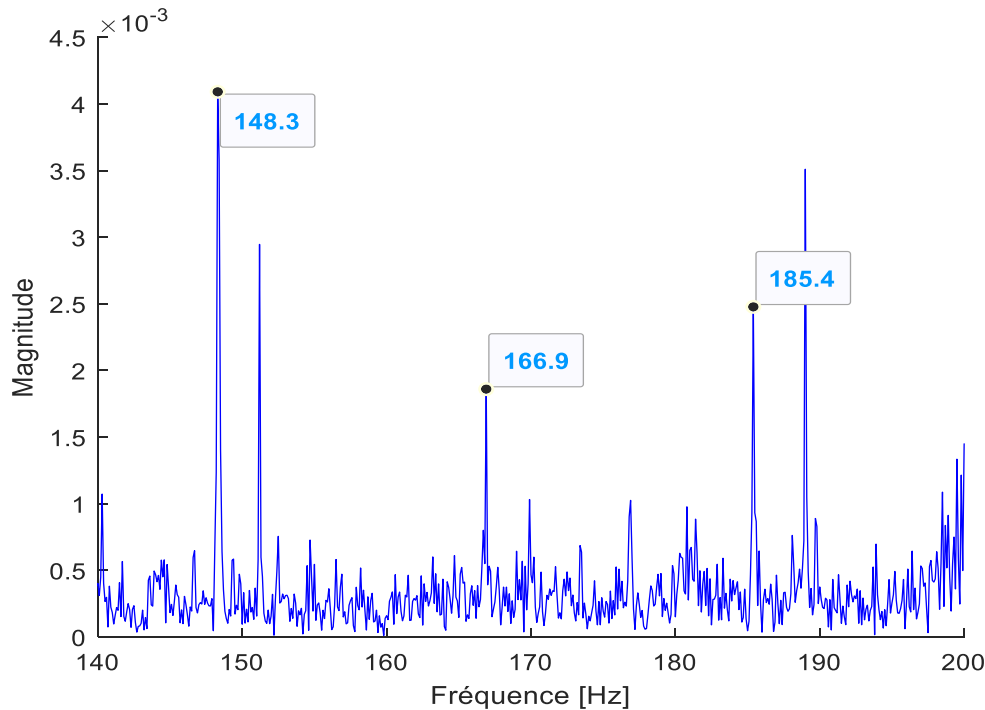


Figure III.9 : Détection du déséquilibre de l'arbre à la fréquence de roulement

Dans les figures précédentes il apparaît des pics de fréquences qui pour certains d'entre eux peuvent probablement être causés par la fréquence de rotation du roulement inaccessible.

III.3.3 Détection des fréquences d'engrenages

Notre banc d'essai contient quatre engrenages ayant respectivement 11, 14, 58 et 64 dents. En utilisant la fréquence de rotation en entrée (INPUT), qui est de 46.15 RPM multipliée par 24, soit 1107.6 RPM, nous avons calculé les fréquences d'engrenage :

- Pour l'engrenage à 11 dents

$$f_g = \frac{11 \times 1107.6}{60} = 203.06 \text{ [Hz]}$$

- Pour l'engrenage à 14 dents

$$f_g = \frac{14 \times 1107.6}{60} = 258.44 \text{ [Hz]}$$

- Pour l'engrenage à 58 dents

$$f_g = \frac{58 \times 1107.6}{60} = 1070.68 \text{ [Hz]}$$

- Pour l'engrenage à 64 dents

$$f_g = \frac{64 \times 1107.6}{60} = 1181.44 \text{ [Hz]}$$

Ces fréquences d'engrenage n'apparaissent pas dans le spectre FFT. Cela peut être dû à plusieurs raisons. Tout d'abord, leurs amplitudes peuvent être très faibles par rapport aux autres vibrations présentes dans le banc d'essai, ce qui rend ces fréquences difficiles à détecter. De plus, les vibrations des engrenages peuvent être masquées par des bruits de fond ou des interférences provenant d'autres sources de vibration dans le système. Enfin, il est possible que la résolution ou la sensibilité de l'analyse FFT ne soit pas suffisante pour capturer ces fréquences spécifiques, surtout si elles sont très proches d'autres fréquences plus dominantes.

III.3.4 Vérification des résultats

Dans ce qui suit nous allons changer la valeur de la vitesse de rotation pour confirmer l'analyse effectuée du titre III.3.1 au titre III.3.4.

Nous prenons une fréquence de rotation RPM de 59.2 tours/min. le tableau III.3 résume les fréquences obtenues en INPUT et OUTPUT.

Tachymètre OUTPUT (tours/min)	INPUT (tours/min)	Fréquence INPUT [Hz]	Fréquence OUTPUT [Hz]
59.2	1420.8	23.68	0.98

Tableau III.3 : Pics de vitesse INPUT et OUTPUT

L'analyse FFT a permis de détecter la fréquence de rotation du moteur, matérialisée par l'apparition d'un pic distinct à 23.8 Hz dans le spectre de fréquence. Ce pic correspond à la fréquence de rotation du moteur, confirmant ainsi la précision de nos mesures obtenues par le tachymètre. De plus, la fréquence en entrée (INPUT), réglée par l'API, est 24 fois plus élevée que la vitesse en entrée, et cette fréquence de l'INPUT apparaît également sous forme de pic à 1 Hz dans le spectre de fréquence, validant ainsi notre contrôle des conditions de fonctionnement du moteur.

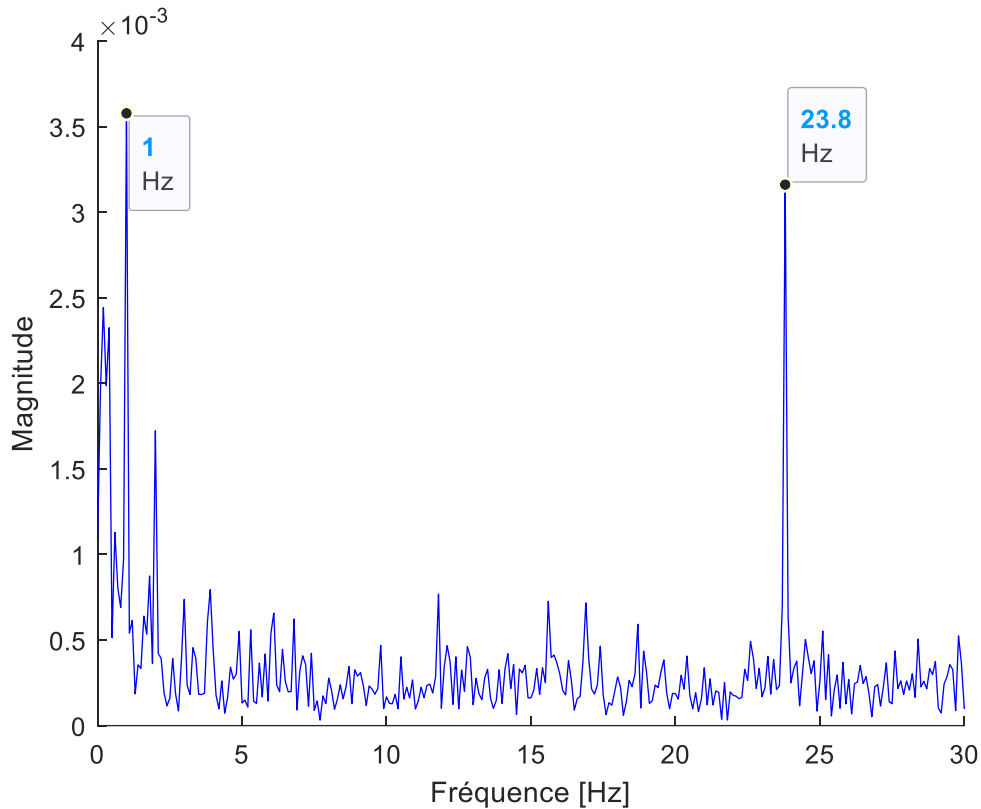


Figure III.10 : Détection des pics de vitesse INPUT et OUTPUT

III.3.4.1 Détection des défauts d'alignement

La figure III.10 montre le spectre des données recueillies par le capteur de vibration positionné sur notre banc d'essai, à une fréquence de rotation de $RPM = 59.2$ tours/minute. On observe un pic distinct à 1 Hz, correspondant à la fréquence de rotation en sortie (Output). Des harmoniques apparaissent également à 2 Hz et 3 Hz, probablement dues à un faible désalignement de l'arbre 3.

On note un autre pic à 23.8 Hz, correspondant à la fréquence de rotation en entrée (Input). De plus, des harmoniques significatives à 47.6 Hz et 71.3 Hz. Ces harmoniques prouvent un déséquilibre au niveau de l'arbre 1 ou de l'arbre 2.

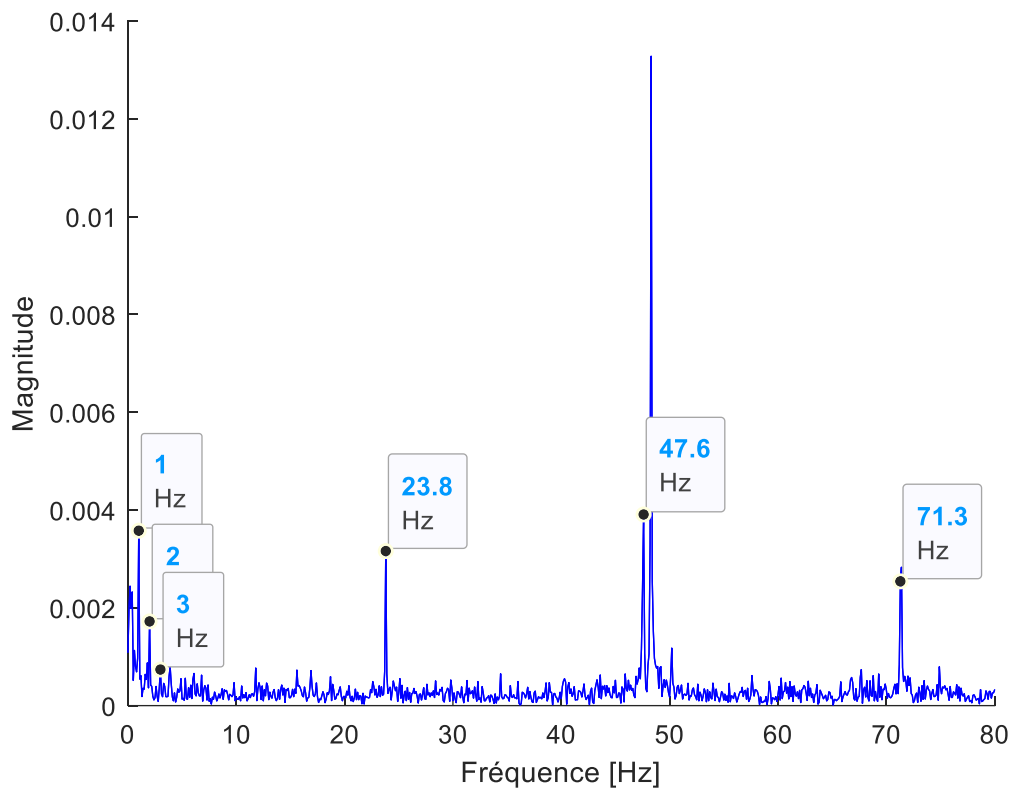


Figure III.11 : Détection des pics dus aux défauts d'alignements

III.3.4.2 Détection des fréquences des roulements

Pour la fréquence de rotation en entrée (INPUT), de 59.2 tours/min, soit 1420.8 Hz, nous obtenons les fréquences de roulement pour ces roulements :

- Pour le roulement à 7 éléments

$$f_{rb} = \frac{7 \times 1420.8}{60} = 165.76[\text{Hz}]$$

- Pour le roulement à 9 éléments

$$f_{rb} = \frac{9 \times 1420.8}{60} = 213.12 [\text{Hz}]$$

- Pour le roulement à 11 éléments

$$f_{rb} = \frac{11 \times 1420.8}{60} = 260.48 [\text{Hz}]$$

Ces fréquences apparaissent comme des pics dans le spectre des vibrations comme le montre la figure III.11. Il existe un léger décalage par rapport aux calculs théoriques, cependant les pics obtenus permettent de valider les résultats.

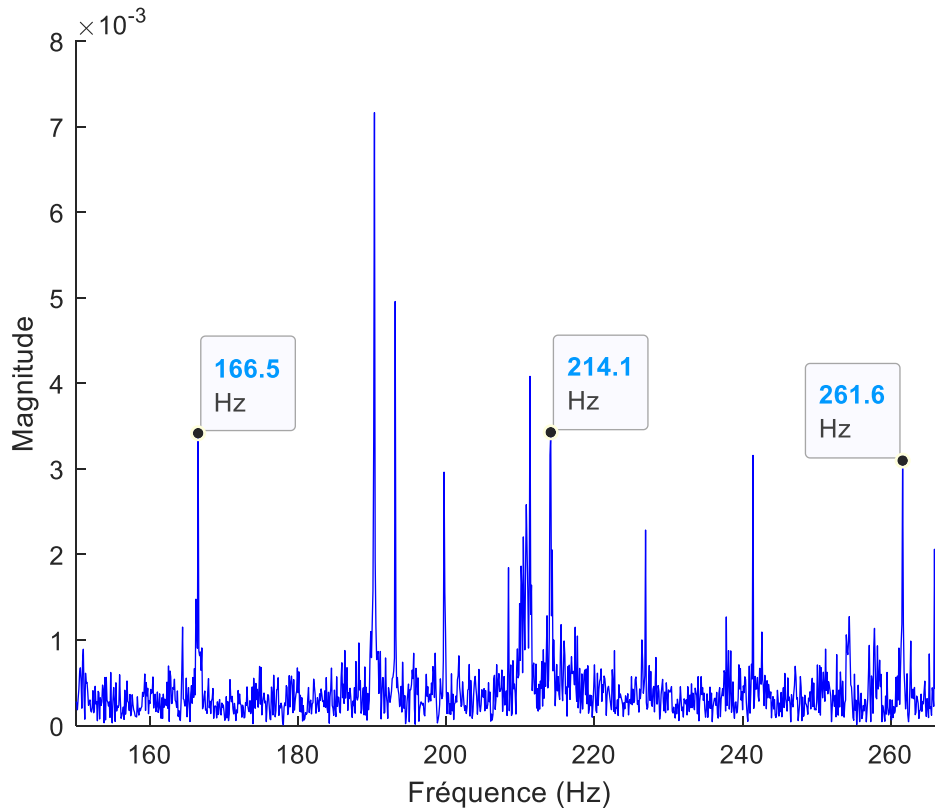


Figure III.12 : Détection des pics des fréquences de roulements

Il apparaît clairement sur la figure III.12 une Bande Latérale Inférieure à 142.7 Hz et une Bande Latérale Supérieure à 190.3 pour une fréquence modulante égale à la fréquence INPUT de 23.7 Hz et une porteuse égale à la fréquence du roulement à 9 éléments soit 214.1 Hz. Cela prouve l'existence d'un déséquilibre dans l'arbre 2 ou l'arbre 3.

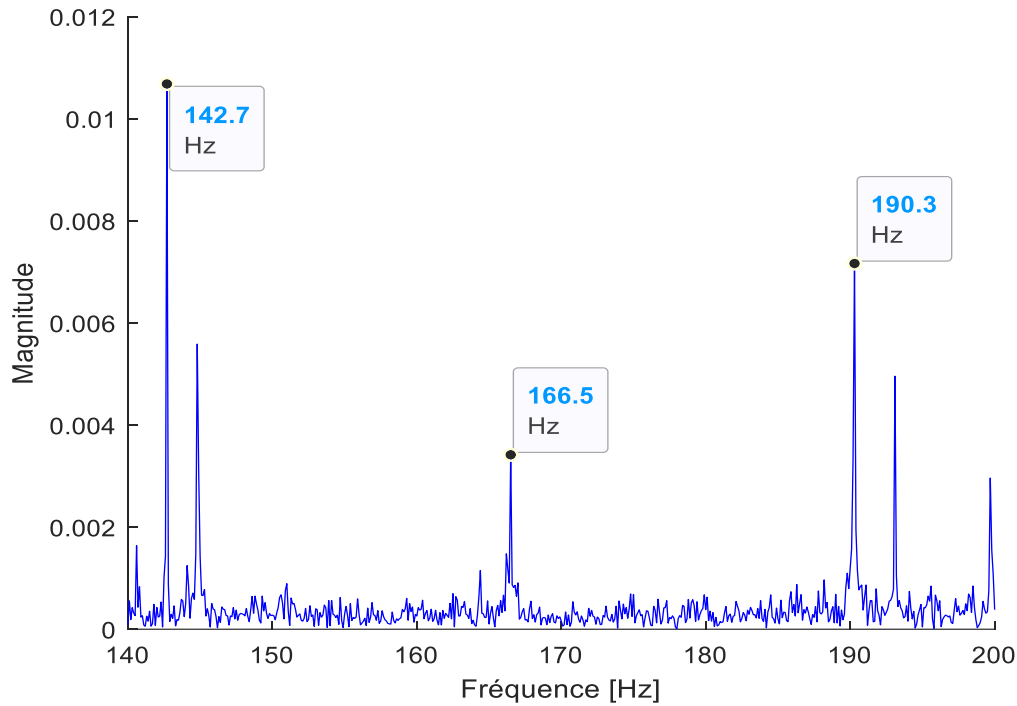


Figure III.13 : Détection du déséquilibre de l'arbre à la fréquence de roulement

Dans les figures précédentes il apparaît des pics de fréquences qui pour certains d'entre eux peuvent probablement être causés par la fréquence de rotation du roulement inaccessible.

III.4 Spectre de vibrations pour les basses et hautes fréquences

En réalité le spectre de fréquence du banc d'essai a l'allure présenté sur la figure III.13 pour une fréquence de rotation de 59.2 tours/min.

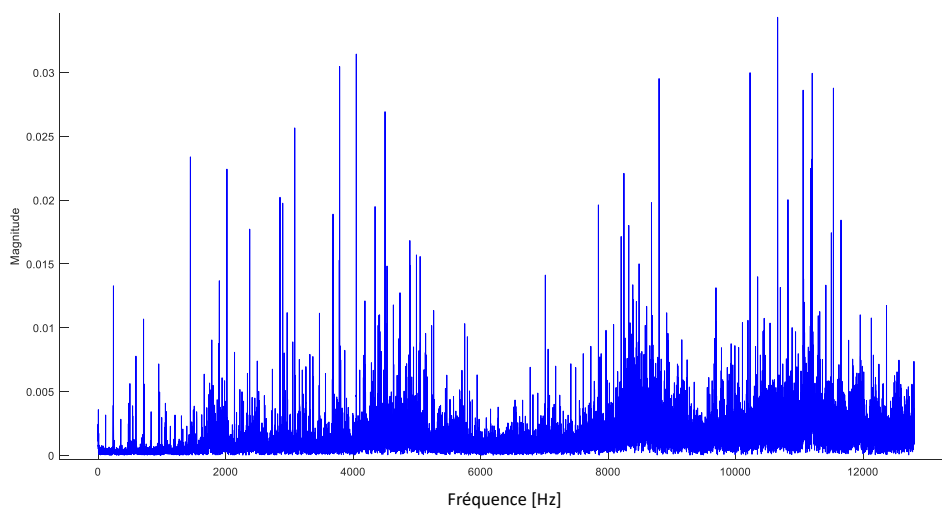


Figure III.14 : Spectre du banc d'essai pour une fréquence d'échantillonnage de 25600 Hz

On rappelle que

- La fréquence de rotation de sortie est de 59,2 tours/min, ce qui correspond à 0,987 Hz.
- La fréquence de rotation d'entrée est 24 fois plus grande, donc $59,2 * 24 = 1420,8$ tours/min, ce qui correspond à 23,68 Hz.

En examinant le spectre fourni :

1- **Pics à basses fréquences (0 - 2000 Hz)** : Ces pics peuvent correspondre :

- Fréquences fondamentales : La fréquence de rotation d'entrée (23,68 Hz) et la fréquence de rotation de sortie (0,987 Hz) produiront des pics distincts dans le spectre.
- Harmoniques des fréquences de rotation : Les multiples entiers de 23,68 Hz (47,36 Hz, 71,04 Hz, etc.) et de 0,987 Hz (1,974 Hz, 2,961 Hz, etc.) apparaîtront dans le spectre sous forme de pics réguliers.
- Fréquences d'engrenages
- Fréquences de Roulements

2- **Pics significatifs entre 2000 et 8000 Hz** : Ces pics peuvent être associés à des fréquences des résonances mécaniques.

3- **Bandes de fréquences plus élevées (8000 - 12800 Hz)** : Ces fréquences élevées peuvent être dues à des harmoniques de haute fréquence de la rotation d'entrée, des résonances structurelles, ou des fréquences de défaut de roulements.

Il est donc très difficile d'interpréter le spectre de vibration sans avoir toutes les données du banc d'essai dans son état intact.

Conclusion :

En conclusion, la présentation et l'analyse vibratoire du le banc d'essai mettent en lumière l'importance cruciale de la surveillance vibratoire dans la gestion des moteurs modernes. Les résultats obtenus démontrent que l'analyse vibratoire est un élément clé pour assurer la fiabilité, la performance et la longévité des systèmes mécaniques. Cette étude pave la voie à des innovations futures dans le domaine de l'ingénierie, offrant des perspectives pour des moteurs encore plus performants et durables.

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire de fin d'études a mis en lumière l'importance cruciale de l'analyse vibratoire dans l'évaluation des performances et la maintenance des systèmes mécaniques. À travers l'utilisation d'un moteur SEIPEE modèle JM71A4 et d'un banc d'essai dédié, nous avons obtenu des signaux vibratoires.

En examinant les spécifications du moteur et en effectuant des essais d'analyse vibratoire à l'aide de la Transformée de Fourier Rapide (FFT) sur les signaux obtenus, nous avons pu identifier les fréquences caractéristiques associées aux roulements, aux engrenages et aux arbres du système. Les résultats ont révélé l'importance de surveiller attentivement l'alignement des composants et de détecter tout déséquilibre ou défaut potentiel, soulignant ainsi l'impact crucial de l'analyse vibratoire sur la prévention des défaillances.

Nos expériences ont également démontré l'efficacité de l'API pour contrôler la vitesse du système et maintenir sa stabilité à différentes vitesses. De plus, l'inspection directe des composants du banc d'essai a fourni des informations détaillées nécessaires à une analyse approfondie des vibrations, renforçant ainsi l'importance d'une approche proactive dans la maintenance préventive.

Alors que nous avons réussi à détecter avec précision les fréquences associées aux composants du système, des défis subsistent dans l'interprétation des spectres de vibration, en particulier pour les fréquences plus élevées. Cela souligne la nécessité de développer des méthodes d'analyse plus sophistiquées et de poursuivre la recherche dans ce domaine.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Braun, S. (2012). *Mechanical Signature Analysis : Theory and Applications*. Academic Press
- [2] Braun, S. (2012). **Mechanical Signature Analysis : Theory and Applications**. Academic Press.
- [3] Harris, C.M. (2002). **Shock and Vibration Handbook**. McGraw-Hill
- [4] Xu, J., Ding, X., Gong, Y., Wu, N., & Yan, H. (2022). Rotor imbalance detection and quantification in wind turbines via vibration analysis. *Wind Engineering*, 46(1), 3-11.
- [5] Tsytkin, M. (2017, September). Induction motor condition monitoring : Vibration analysis technique—diagnosis of electromagnetic anomalies. In *2017 IEEE Autotestcon* (pp. 1-7). IEEE.
- [6] Gangsar, P., Pandey, R. K., & Chouksey, M. (2021). Unbalance detection in rotating machinery based on support vector machine using time and frequency domain vibration features. *Noise & Vibration Worldwide*, 52(4-5), 75-85.
- [7] ISO. (2016). *Vibrations mécaniques – Mesurage et évaluation des vibrations des machines – Partie 1 : Directives pour l'évaluation des vibrations des machines (ISO 20816-1 : 2016)*. Organisation internationale de normalisation.
- [8] <https://encrypted.tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQlIXudpwWSXmRl8bdZkAxL0Hcn4tkxS6Nhn3PpX8n1l8OuFHQX9EyS71yMtgwr>
- [9] tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcS4zI7P6A8BKOvYjZsNUf5Jo6OuxW4r17rc8yVo2cQj5QRD4sUWFjHT6gvmQho
- [10] https://encryptedtbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSFVN3_UXV92yrjdgSEOWmauhE177SjhpGWilzAT6SmKStZPwKMEEYdKOuQ4DX7
- [11] https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSzTov88Af8LZ7VTER9Cgdg1FigF8Z2sdLuQFH1Qy62C6hyVtdq5jdcyO_TKCW
- [12] https://assets-global.website-files.com/65f854814fd223fc3678ea53/65f854814fd223fc3678f4c2_Inductive-sensor-sensing-range.jpeg
- [13] <https://www.biomaker.org/block-catalogue/2021/12/17/soil-moisture-sensor-aideepen-v12>
- [14] <https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcS7OVU2kNVxa5anIhb1BLSf-Sr3ZKxavphUAOQQBfabz8dzGX7rhOUQmD6zZ1tM>
- [15] https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRbXLPY1ALa9KJlx67uUd_VkX59_YqD7Dc5_klAmRgq1-XfXwszAFgYgzNRhpPh
- [16] Chapman, S. J. (2011). *Electric machinery fundamentals* (5e éd.). McGraw-Hill Education.
- [17] ISO (Organisation internationale de normalisation). (s.d.). Normes ISO relatives aux machines tournantes.

- [18] Moteurs asynchrones triphasés | Dossiers Techniques (dossiers-techniques.fr)
- [19] Smith, J. (2021). *Vibration analysis techniques for rotating machinery*. New York, NY : Mechanical Engineering Press.
- [20] Vibrations mécaniques (2) - myMaxicours
- [21] Brown, T. (2020). *Predictive maintenance in industrial machinery*. Chicago, IL : Industrial Tech Publications.
- [22] Motor rotor balancing machine for 50 kg rotors. (s.d.). Made-in-China. https://fr.made-in-china.com/co_shjpbalancer/image_Motor-Rotor-Balancing-Machine-for-50-Kg-Rotors_ruunosoug_2f1j00LpmRkUYBJCbE.html
- [23] Hines, J. W., Jesse, S., & Edmondson, A. (2000). Effects of motor misalignment on rotating machinery.
- [24] Kappaganthu, K. K., & Nataraj, C. (2011). Nonlinear modeling and analysis of a rolling element bearing with a clearance. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 16(10), 4141–4155.
- [25] Nabhan, A., Ghazaly, N., Samy, A., & Mousa, M. O. (2015). Bearing fault detection techniques – A review. *Turkish Journal of Engineering, Sciences and Technology*, 3.
- [26] Feng, K., Ji, J. C., Ni, Q., & Beer, M. (2023). A review of vibration-based gear wear monitoring and prediction techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 182, 109605.
- [27] Lu, S., He, Q., & Wang, J. (2019). A review of stochastic resonance in rotating machine fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 116, 230-260.
- [28] Verma, A. K., Sarangi, S., & Kolekar, M. H. (2014). Experimental investigation of misalignment effects on rotor shaft vibration and on stator current signature. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14(1), 125–138.
- [29] Chapitre 5. Accouplements et freins : Accouplements et freins (univ-jijel.dz)
- [30] Hassan, A., & Mohsen, K. (2018). Diagnosis of pulley-belt system faults using vibration analysis technique. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 26, 2018.
- [31] Vervisch, B. (2016). *Experimental analysis of rotating damping in high speed machinery* (Doctoral dissertation, Ghent University).
- [32] Boulenger, A., & Pachaud, C. (2009). *Surveillance des machines par analyse des vibrations*.

Résumé :

La localisation des défauts mécaniques est essentielle en ingénierie et maintenance industrielle pour assurer le bon fonctionnement des machines et réduire les coûts. L'analyse vibratoire, reposant sur l'étude des vibrations émises par les équipements, permet de détecter les défauts avant qu'ils ne causent des pannes coûteuses. Utilisant la Transformée de Fourier (FFT), cette méthode identifie les fréquences caractéristiques des composants comme les roulements et engrenages. Les essais effectués avec un moteur SEIPEE JM71A4 ont montré l'importance de surveiller l'alignement et le déséquilibre des composants. Des défis subsistent pour interpréter les fréquences élevées, nécessitant des analyses plus sophistiquées.

Mots clés: Défauts mécaniques, analyse spectrale.

Summary:

The localization of mechanical defects is essential in engineering and industrial maintenance to ensure the proper functioning of machines and reduce costs. Vibration analysis, based on the study of vibrations emitted by equipment, allows for the detection of defects before they cause costly failures. Using the Fast Fourier Transform (FFT), this method identifies the characteristic frequencies of components such as bearings and gears. Tests conducted with a SEIPEE JM71A4 motor have demonstrated the importance of monitoring the alignment and balance of components. Challenges remain in interpreting higher frequencies, necessitating more sophisticated analysis methods.

Keywords: Mechanical faults, spectral analysis.

ملخص:

تعد تحديد الأعطال الميكانيكية أمرًا أساسيًا في الهندسة والصيانة الصناعية لضمان التشغيل السليم للألات وتقليل التكاليف. يتيح تحليل الاهتزازات، الذي يعتمد على دراسة الاهتزازات الصادرة من المعدات، الكشف عن الأعطال قبل أن تتسبب في فشل مكلف. باستخدام تحويل فورييه (FFT)، تحدد هذه الطريقة الترددات المميزة للمكونات مثل المحامل والتروس. أظهرت الاختبارات التي أجريت باستخدام محرك SEIPEE JM71A4 أهمية مراقبة محاذاة وتوازن المكونات. تظل التحديات قائمة في تفسير الترددات العالية، مما يستلزم أساليب تحليل أكثر تطورًا.

الكلمات المفتاحية: العيوب الميكانيكية، التحليل الطيفي.