



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE: DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MASTER

Réalisé par :

Doumin Ismail & Djellouli abdelhamid

DOMAINE : *Science et Technologie*

FILIERE : *Electronique*

OPTION : *Instrumentation*

Thème

Caractérisation des défauts mécaniques des machines tournantes par divers techniques de traitement de signal pour une éventuelle surveillance conditionnelle.

Jury de soutenance :

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>
<i>M^r. ROUGAB Ilyes</i>	<i>MAA</i>	<i>Président</i>
<i>M^r. BIRANE Abdelkader</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>
<i>Mr. KIOUS Mechri</i>	<i>Prof</i>	<i>Encadreur</i>

Promotion : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَالصَّلَاةَ وَالسَّلَامَ عَلَى أَشْرَفِ الْمُرْسَلِينَ

سَيِّدِنَا مُحَمَّدٍ وَعَلَى آلِهِ وَصَحْبِهِ وَمَنْ تَبِعَهُمْ بِإِحْسَانٍ

إِلَى يَوْمِ الدِّينِ

DÉDICACE

GRACE À DIEU TOUT PUISSANT, JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL :

*À LA LUMIÈRE DE MA VIE, MES CHERS PARENTS EN TÉMOIGNAGE
POUR LEUR AMOUR ET LEUR SACRIFICE SANS LIMITES QUI JE
SOUHAITE LA BONNE SANTÉ ET QUE DIEU ME LES GARDE.*

À MON CHER PÈRE ET MA CHÈRE MÈRE.

À MES FRÈRES ET SŒURS.

À MES COUSINS,

À MES AMIS ET TOUS MES PROCHEs.

*À TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE LOIN À LA
RÉALISATION DE CE TRAVAIL.*

DOUMIN ISMAIL

DEDICACE

DÉDICACE

GRACE À DIEU TOUT PUISSANT, JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL :

*À LA LUMIÈRE DE MA VIE, MES CHERS PARENTS EN TÉMOIGNAGE
POUR LEUR AMOUR ET LEUR SACRIFICE SANS LIMITES QUI JE
SOUHAITE LA BONNE SANTÉ ET QUE DIEU ME LES GARDE.*

À MON CHER PÈRE ET MA CHÈRE MÈRE.

À MES FRÈRES ET SŒURS.

À MES COUSINS,

À MES AMIS ET TOUS MES PROCHES.

*À TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE LOIN À LA
RÉALISATION DE CE TRAVAIL.*

DJELLOULI ABDELHAMID

REMERCIEMENTS

Avant tout et particulièrement, nous tenons à vouer notre infinie reconnaissance au tout puissant ALLAH qui nous a créé du néant, guidé au droit chemin, nous a donné la santé,....Et notamment, la patience, le courage, et la volonté pour bien terminer ce modeste travail. Nos remerciements exclusifs et éternels vont également au messenger MOHAMMED que la prière et la paix d'Allah soient sur lui ainsi que sur sa famille et ses compagnons.

A l'issue de ce travail nous tenons à exprimer toute notre gratitude et notre remerciement à notre promoteur Mr. KIOUS MECHRI pour nous avoir proposé ce sujet et nous avoir soutenu et dirigé tout au long de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier le président et les membres de jury qui ont bien voulu nous faire l'honneur de juger notre travail.

Nous remercions également les êtres les plus chers aux mondes « Nos Parents » pour tous les efforts et sacrifices qu'ils ont entrepris afin de nous voir réussir. A toute la communauté scientifique à travers le monde entier

Résumé

المخلص :

يقدم هذا العمل تشخيص الأعطال الميكانيكية في الآلات الدوارة وذلك من خلال تقنيات مختلفة لمعالجة الإشارات الاهتزازية, حيث تم أخذ بيانات حقيقية من تجرب تمت على محامل في ظروف صحية مختلفة (صحي, خلل في السباق الداخلي, خلل في السباق الخارجي) وسرعة دوران متغيرة (متزايدة, متناقصة, متزايدة تم متناقصة, متناقصة ثم متزايدة).
وقمنا بتطبيق خمس تقنيات مختلفة علي هذه البيانات.

الكلمات المفتاحية تشخيص الأعطال الميكانيكية؛ الآلات الدوارة ؛ تقنيات معالجة الإشارات؛ الإشارات الاهتزازي, سرعة دوران .

Résumé :

Ce travail présente le diagnostic des dysfonctionnements mécaniques des machines tournantes à travers différentes techniques de traitement des signaux vibratoires, où des données réelles ont été extraites d'une expérimentation réalisée sur des roulements dans différentes conditions fonctionnement (sain, défaut de course interne, défaut de course externe) et vitesse de rotation variable (augmentation, diminution, augmentation puis diminution, diminution puis augmentation). Nous avons appliqué cinq techniques différentes à ces données.

Les mots clés : Diagnostic des défauts mécaniques, machines tournantes, techniques de traitement du signal, signaux vibratoires, vitesse de rotation.

Abstract :

This work presents the diagnosis of mechanical malfunctions in rotating machines through various techniques for processing vibrational signals, where real data were taken from an experiment carried out on bearings in different health conditions (healthy, internal race defect, external race defect) and variable rotational speed (increasing, decreasing, increasing then decreasing, decreasing and increasing). We applied five different techniques to this data.

key words : Diagnostics of mechanical defects, rotating machines, signal processing techniques, vibration signals, rotational speed.

Table des matières

Table des matières

DÉDICACE	II
REMERCIEMENTS.....	IV
Résumé :.....	V
Table des matières.....	V
Liste des tables	VIII
Liste des figures.....	IX
Introduction générale :.....	1
Chapitre I : Généralités sur la maintenance.....	2
I.1 Introduction :.....	3
I.2 Maintenance :.....	3
I.2.1 Définition de la maintenance :.....	3
I.2.2 Objectifs de la maintenance :.....	3
I.2.3 Les différents types de la maintenance :.....	4
I.3 Défaillances qui sont liées aux machines tournantes :	5
I.3.1 Défaillances :	5
I.3.2 Classification de la défaillance :.....	5
I.4 Surveillance :.....	7
I.4.1 Les différents modes de surveillance :	7
I.5 Détection :	8
I.6 Le diagnostic :.....	8
I.7 Conclusion :	8
Chapitre II : Notions de traitement du signal.....	9
II.1 Introduction :.....	10
II.2 Les signaux :.....	10
II.2.1 Définition d'un signal :.....	10
II.2.2 Classification des signaux :	10
II.3 Les vibrations :.....	12
II.3.1 Définition :.....	12
II.3.2 Les types de vibrations :.....	12
II.3.3 Caractéristique d'une vibration:.....	14
II.4 Les Techniques de traitement de signal :.....	14
II.4.1 Analyse temporelle :.....	14

Table des matières

II.4.2	Analyse fréquentielle :.....	15
II.4.3	Analyse cepstrale :.....	16
II.4.4	Modélisation Autorégressive :	16
II.4.5	Analyse temps – fréquence :	21
II.5	Conclusion :	23
Chapitre III : Machines tournantes.....		24
III.1	Introduction :.....	25
III.2	Classement « VIS » des machines tournantes :	25
III.3	Les défauts de roulements :	25
III.3.1	Fréquences caractéristiques :.....	26
III.3.2	Définition type de défauts de roulements :	28
III.4	Chaîne de mesure :.....	29
III.4.1	Les capteurs :.....	29
III.4.2	L'échantillonnage:	33
III.4.3	Le filtrage :.....	34
III.4.4	L'amplification	34
III.4.5	La numérisation:.....	34
III.5	Conclusion :	35
Chapitre IV: Diagnostic de défauts par traitement du signal		36
IV.1	Introduction :.....	37
IV.2	Données :.....	37
IV.3	Conception expérimentale, matériaux et méthodes :	37
IV.3.1	Montage expérimental :.....	37
IV.3.2	Paramètre des roulements :.....	38
IV.3.3	Paramètres d'acquisition de données :	39
IV.4	Représentation du signal temporel :	40
IV.4.1	Etat sain :	40
IV.4.2	Etat défectueux (défaut de la bague interne) :	42
IV.4.3	Etat défectueux (défaut de la bague externe) :	43
IV.5	Analyse spectrale :.....	46
IV.5.1	Augmentation de la vitesse :	46
IV.5.2	Diminution de la vitesse :	47
IV.5.3	Augmentation puis diminution de la vitesse :	47
IV.5.4	Diminution puis augmentation de la vitesse :	48

Table des matières

IV.6	Analyse cepstrale:.....	50
IV.6.1	Augmentation de la vitesse :	50
IV.6.2	Diminution de la vitesse :	50
IV.6.3	Augmentation puis diminution de la vitesse :	51
IV.6.4	Diminution puis augmentation de la vitesse :	51
IV.7	Analyse paramétrique :	52
IV.7.1	Augmentation de la vitesse :	52
IV.7.2	Diminution de la vitesse :	52
IV.7.3	Augmentation puis diminution de la vitesse :	53
IV.7.4	Diminution puis augmentation de la vitesse :	53
IV.8	Analyse temps-fréquence :	54
IV.8.1	Augmentation de la vitesse :	55
IV.8.2	Diminution de la vitesse :	56
IV.8.3	Augmentation puis diminution de la vitesse :	58
IV.8.4	Diminution puis augmentation de la vitesse :	59
IV.9	Conclusion :	61
	Conclusion générale :	62
	Bibliographie.....	63
	ANNEXE A	66
	ANNEXE B	68

Liste des tables

Liste des tables

Tableau II-1:Nomenclature entre spectre et cepstre.....	16
Tableau IV-1:Paramètres des roulements.	38
Tableau IV-2:Numérotation des ensembles de données.	40
Tableau IV-3:l'amplitude des sgnaux à crête à crête.....	45
Tableau IV-4:les spectres de fréquence optimale du signal de défaut	49

Liste des figures

Liste des figures

Figure I-1:Les différent types de maintenance.....	4
Figure I-2:classification de la défaillance fonction sa cause	6
Figure II-1 signal physique	10
Figure II-2 Les types des signaux.	11
Figure II-3:Exemple d'un signal aléatoire	12
Figure II-4:Composition de tous les mouvements.	13
Figure II-5:Vibration aléatoire [7].....	13
Figure II-7:le spectre de signal.....	15
Figure II-8:Coordonnées tridimensionnelles montrant le temps, la fréquence et l'amplitude d'un signal [8].....	22
Figure III-1:Architecture d'un roulement à bille	26
Figure III-2:Caractéristiques géométriques d'un roulement	26
Figure III-3:Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure [13].....	28
Figure III-4:Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure..	28
Figure III-5: Image vibratoires théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant [13].....	29
Figure III-6:Image vibratoires théorique d'un défaut de type déversement de bague [13].....	29
Figure III-8:Bandes fréquentielles associées aux différents modes de fixation.....	31
Figure III-9:capteur d'accélération	32
Figure III-10:Mode de fixation du capteur.....	33
Figure IV-1:Montage expérimental.....	38
Figure IV-2:Le Signal temporelle d'un roulement sain	41
Figure IV-3: Signal temporel d'un roulement défectueux (défaut de la bague intérieure).....	43
Figure IV-4: Signal temporel d'un roulement défectueux (défaut de la bague extérieure)	45
Figure IV-5: les signaux de spectre avec augmentation de la vitesse	46
Figure IV-6: les signaux de spectre avec diminution de la vitesse	47
Figure IV-7: les signaux de spectre avec augmentation puis diminution de la vitesse	47
Figure IV-8: les signaux de spectre avec diminution puis augmentation de la vitesse	48
Figure IV-9: les signaux de cepstre avec augmentation de la vitesse	50
Figure IV-10: les signaux de cepstre avec diminution de la vitesse	50
Figure IV-11: les signaux de cepstre avec augmentation puis diminution de la vitesse	51

Liste des figures

Figure IV-12: les signaux de cepstre avec diminution puis augmentation de la vitesse	51
Figure IV-13: la densité spectrale avec augmentation de la vitesse.....	52
Figure IV-14: la densité spectrale avec diminution de la vitesse.....	52
Figure IV-15: la densité spectrale avec augmentation puis diminution de la vitesse.....	53
Figure IV-16: la densité spectrale avec diminution puis augmentation de la vitesse	53
Figure IV-17: le spectrogramme de signal de roulement sain avec augmentation de la vitesse.	55
Figure IV-18: le spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec augmentation de la vitesse.....	55
Figure IV-19: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec augmentation de la vitesse.....	56
Figure IV-20: spectrogramme de signal de roulement sain avec diminution de la vitesse.....	56
Figure IV-21: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec diminution de la vitesse.....	57
Figure IV-22: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec diminution de la vitesse.....	57
Figure IV-23: spectrogramme de signal de roulement sain avec augmentation puis diminution de la vitesse	58
Figure IV-24: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec augmentation puis diminution de la vitesse	58
Figure IV-25: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec augmentation puis diminution de la vitesse	59
Figure IV-26: spectrogramme de signal de roulement sain avec diminution puis augmentation de la vitesse	59
Figure IV-27: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec diminution puis augmentation de la vitesse	60
Figure IV-28: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec diminution puis augmentation de la vitesse	60

Introduction générale :

La production en milieu industriel est caractérisée par une complexité toujours plus croissante. Ceci entraîne la conception de systèmes de plus en plus complexes qui ne peuvent être exempts de perturbations et de défaillances de plusieurs types. D'importantes machines tournantes industrielle sont très souvent nécessairement présentent au cœur de ces systèmes industriels. On peut citer par exemple les machines tournantes de production telle que les alternateurs de centrales, les broyeurs dans les cimenteries etc. Dans ce contexte de production, l'arrêt inattendu d'une machine tournante peut porter atteinte à sa disponibilité et à celle de tout le système de production. Les défaillances inhérentes aux machines tournantes et pouvant amener à de pareilles situations sont très nombreuses parmi lesquels les défauts de balourd, de jeu, de roulement, d'accouplement etc. beaucoup de ces défaillances entraînent des vibrations de la machine défaillante. Les vibrations peuvent alors être vues comme des symptômes de défaillances qui permettraient de traduire l'état mécanique d'une machine tournante. Pour cela, ces vibrations doivent être traitées au travers d'outil d'aide à la détection et au diagnostic de défaillances.

Cette étude sera répartie en quatre chapitres, le premier sera consacré à la présentation des généralités sur la maintenance par analyse vibratoire, dans le deuxième, on présente des généralités sur les signaux vibratoires et les techniques de traitement des signaux vibratoires.

Le troisième chapitre, on définit les principaux défauts des machines tournantes par l'analyse vibratoire avec les différentes signatures qui représentent les défauts.

Le dernier et quatrième chapitre, est consacré à l'application de cinq méthodes de traitement de signal sur un ensemble de données contenant des signaux de vibration collectés à partir de roulements dans des conditions de vitesse de rotation variant dans le temps.

Et enfin nous terminons ce modeste mémoire par une conclusion générale et perspective.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

I.1 Introduction :

L'activité de maintenance des installations industrielles fait appel depuis une vingtaine d'années à des techniques de diagnostic de plus en plus sophistiquées. Parmi celles-ci on peut citer la thermographie infrarouge, pour la détection de défauts d'origine électrique ou mécanique, l'analyse des huiles pour le suivi de dégradation et la contamination des fluides hydrauliques ainsi que l'évaluation du stade d'usure des pièces mécanique, la détection ultrasonore et l'analyse des vibrations mécaniques. En maintenance conditionnelle, l'analyse vibratoire est couramment utilisée pour le diagnostic des machines tournantes et fait appel à des outils de traitement du signal qui ont vu leur champ d'application s'élargir d'année en année. Il existe plusieurs techniques pour mettre en œuvre les outils classiques de traitement du signal vibratoire, tels que la transformée de Fourier (pour le tracé et l'analyse du spectre), la transformation de Hilbert, (utilisée pour la recherche démodulations d'amplitude et/ou de fréquence), ainsi que le calcul d'indicateurs scalaires tels que la valeur efficace, le facteur crête et kurtosis. L'un des problèmes les plus importants parmi ceux que pose la maintenance par analyse vibratoire est celui du diagnostic des roulements (les pièces les plus sensibles dans une machine tournante). On retrouve ces composants mécaniques dans de nombreuses machines tournantes comptes tenus de leur simplicité et leur capacité à éviter les frottements mécaniques. La détection de pannes de ces roulements se fait en analysant les vibrations enregistrées avec des accéléromètres mis en place pour le diagnostic. Ce travail a pour but d'appliquer le traitement de signal dans la maintenance industrielle.

I.2 Maintenance :

I.2.1 Définition de la maintenance :

Selon la norme NF-X60-010 « la maintenance est définie comme étant un ensemble d'activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise » [1]. Les activités de maintenance permettent une diminution des coûts de production et l'amélioration de la qualité des produits.

I.2.2 Objectifs de la maintenance :

Assurer le maintien (disponibilité) des équipements de production et diminuer les pannes car ces dernières occasionnent :

- Coûts de maintenance (intervention)
- Coûts d'indisponibilité (non production)

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

- Problèmes de sécurité (biens et personnes)
- La maintenance intègre également
- Amélioration de la sécurité des biens et des personnes,
- Intégration de nouveaux biens
- Organisation des activités de maintenance

L'animation et l'encadrement des équipes d'intervention [2].

I.2.3 Les différents types de la maintenance :

Il existe deux façons complémentaires d'organiser les actions de maintenance :

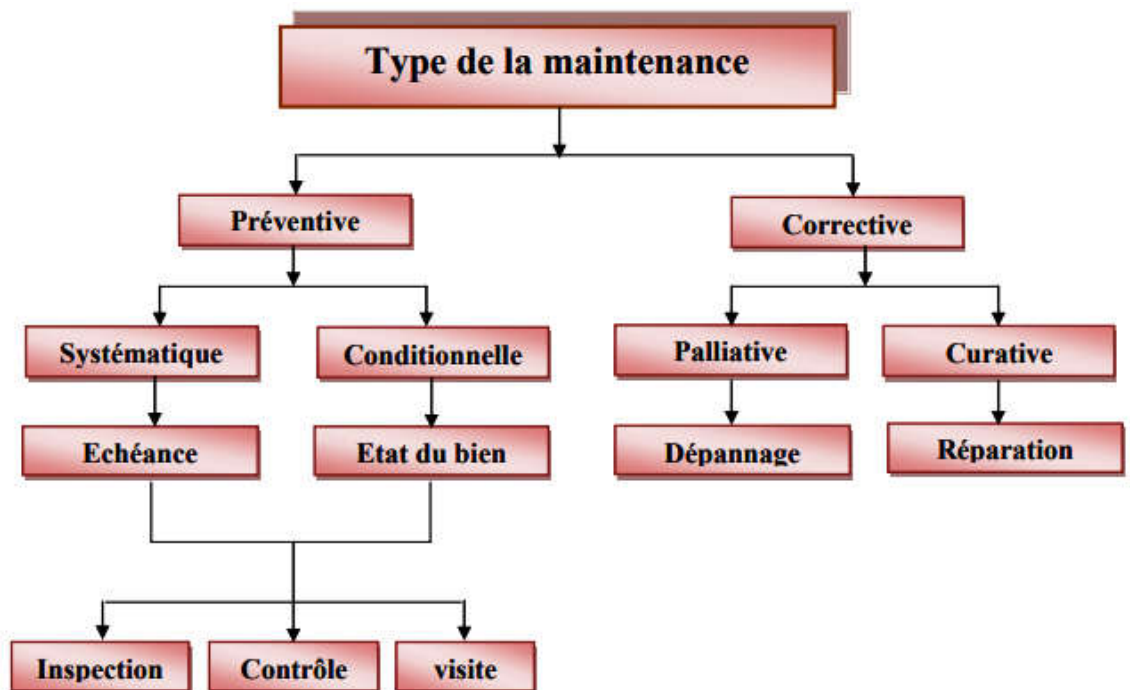


Figure 0-1: Les différents types de maintenance

I.2.3.1 Maintenance préventive :

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien, elle est subdivisée en :

- Maintenance conditionnelle : maintenance préventive basé sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

- Maintenance prévisionnelle : maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.
- Maintenance systématique : maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien.

I.2.3.2 Maintenance corrective :

maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

- Maintenance palliative: caractérise les actions de dépannage : remise en état provisoire.
- Maintenance curative: caractérise les actions de réparation au sens de « guérir ».

I.3 Défaillances qui sont liées aux machines tournantes :

Dans le milieu industriel, les systèmes de production sont de plus en plus complexes et ne peuvent être exempts de perturbations et de défaillances, influant sur la qualité du produit, pouvant provoquer l'arrêt immédiat d'une machine et porter atteinte au bon fonctionnement d'un système de production entier

I.3.1 Défaillances :

En dit défaillance quand un défaut apparaît, c'est un écart entre ce qui devrait être et ce qui est. Pour mettre en place une politique de maintenance efficace, il importe de comprendre les phénomènes de dégradation et de défaillance de matériels [3].

I.3.2 Classification de la défaillance :

Ces classifications portent sur les causes des défaillances, leurs impacts sur les performances du système.

I.3.2.1 Classification de la défaillance par cause :

Cette classification distingue les défaillances dites aléatoires et des défaillances dites systématiques.

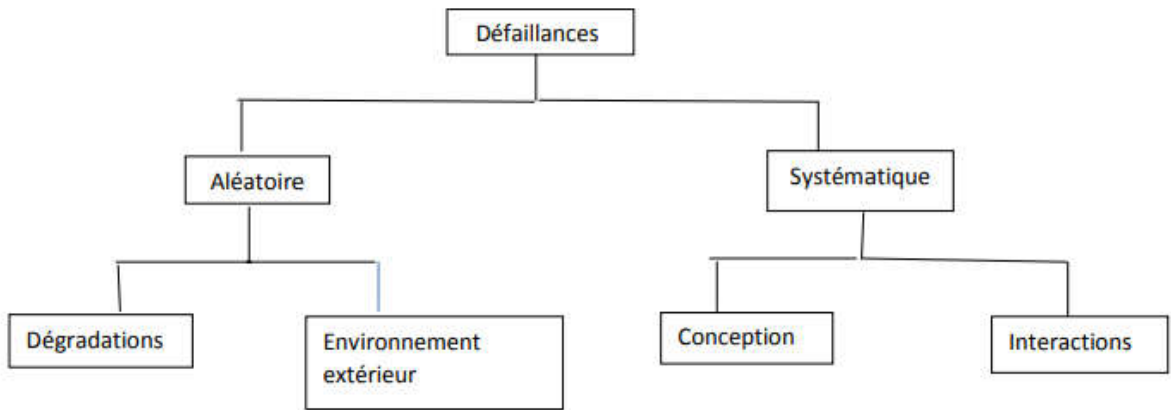


Figure 0-2:classification de la défaillance fonction sa cause

➤ Défaillances aléatoires :

Les défaillances aléatoires sont des défaillances physiques pour lesquelles les performances du système diminuent à cause d'une dégradation physique. Dans les défaillances aléatoires, on distingue :

- Les défaillances liées à la dégradation du système.
- Les défaillances liées à l'environnement extérieur

➤ Défaillances systématiques :

Les défaillances systématiques ne sont pas physiques. Les performances du système diminuent alors que ce dernier n'est physiquement pas dégradé. Ces défaillances peuvent être éliminées uniquement par une modification de sa conception ou du processus de fabrication, des procédures d'opération ou la documentation On distingue :

- Les défaillances liées à la conception
- Les défaillances liées aux interactions

I.3.2.2 Classification des défaillances par impact sur les performances du système :

On peut également classer les défaillances en fonction de leurs impacts sur les performances du système.

A. Défaillances intermittentes : elles résultent d'une perte de certaines des fonctions pour une très courte durée dans le temps. Le bloc fonctionnel retrouve ses performances d'opération

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

tout de suite après la défaillance c'est-à-dire le système retrouve son aptitude à sa fonction requise sans avoir été soumis à une action corrective extérieure.

B. Défaillances étendues : elles résultent d'une perte de certaines des fonctions qui perdure dans le temps jusqu'à ce que le bloc fonctionnel soit remplacé ou réparé. On trouve pour les défaillances étendues les défaillances complètes et défaillances partielles. Ces deux défaillances (défaillances complètes et défaillances partielles) peuvent elles-mêmes être divisées en deux types : défaillances soudaines et défaillances graduelles [3].

I.4 Surveillance :

La comparaison des mesures vibratoires effectuées à intervalles de temps déterminés dans des conditions de fonctionnement identiques permet de suivre l'évolution d'un défaut en exploitant le signal vibratoire. A partir de ces mesures, il est possible d'obtenir un historique de l'évolution du défaut par rapport à un niveau de référence caractérisé par la signature vibratoire de la machine en bon état. La norme [ISO10816] fixe des critères d'évaluation des niveaux vibratoires permettant d'estimer la sévérité des défauts et donc de l'état de fonctionnement de la machine. La sévérité vibratoire représente la valeur efficace de la vitesse de vibration mesurée dans la bande fréquentielle [10-1000 Hz] sachant que les critères d'évaluation dépendent de la classe dans laquelle la machine se situe. Mais ces méthodes dites « mesures des niveaux globaux » restent imprécises et ne permettent pas la détermination de la cause de l'augmentation du niveau vibratoire [4].

I.4.1 Les différents modes de surveillance :

A partir de la nature des indicateurs et des familles dans les quelles on les regroupe, on peut définir trois modes de surveillance :

- Surveillance par indicateurs scalaires énergétiques globaux ou large bande :

Il s'agit d'une comparaison à un seuil d'une valeur caractéristique de l'amplitude et de l'énergie du signal, mesurée dans le domaine temporel dans une bande de fréquence plus au moins étendue.

- Surveillance par indicateurs spectraux :

Il s'agit d'une comparaison d'une image spectrale du signal à un gabarit défini à partir de la même image spectrale obtenue lors de la mise en service de l'installation ou après remise en état.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

- Surveillance par indicateurs typologiques ou comportementaux :

Ce mode s'attache à la détection de défauts particuliers à partir de leur manifestation vibratoire ou de leurs interactions avec d'autres grandeurs dynamiques [5].

I.5 Détection :

Mettre en évidence l'existence d'une anomalie, le défaut est découvert à l'intérieur du système mécanique en utilisant des descripteurs scalaires temporels ou fréquentiels.

I.6 Le diagnostic :

Permet d'identifier avec précision la nature de l'anomalie et si possible d'en préciser la gravité. Le diagnostic est habituellement exécuté après la détection d'une anomalie suite à une surveillance de l'état de la machine.

I.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter de manière générique le domaine des machines tournantes. Nous avons aussi vu de près un nombre important et non exhaustif de défaillances pouvant altérer leurs fonctionnements. Pour l'exploitation optimale de ces machines, une surveillance accrue de leurs conditions de fonctionnement est souvent nécessaire. Pour cela, plusieurs techniques existent, dont un bon nombre est décrit au prochain chapitre, avec une attention particulière donnée aux techniques à base de surveillance et diagnostic par analyse vibratoire.

II. Chapitre II : Notions de traitement du signal

Chapitre II : Notions de traitement du signal

II.1 Introduction :

Les chercheurs veulent développer la vie et se débarrasser des problèmes quotidiens, dont les défaillances mécaniques, qui ont attiré l'attention des chercheurs dans les domaines du traitement du signal, notamment vibratoire, et qui ont produit plusieurs méthodes, dont certaines sont connues dans ce chapitre, et concepts généraux sur les signaux et le signal vibratoire.

II.2 Les signaux :

II.2.1 Définition d'un signal :

Un signal expérimental est une grandeur physique est la représentation physique de l'information, qu'il convoie de sa source à son destinataire. La description mathématique des signaux est l'objectif du traitement du signal. Elle offre les moyens d'analyser, de concevoir et de caractériser des systèmes de traitement de l'information. Et doit donc être physiquement réalisable. Les mesures macroscopiques analogiques, réalisées à partir d'appareils de mesures comme un oscilloscope, fournissent des courbes « tension en fonction du temps » du type de celle représentée sur la Figure II-1. Ces signaux physiques sont représentés par des fonctions $s(t)$ à valeurs réelles d'une variable réelle. [3]

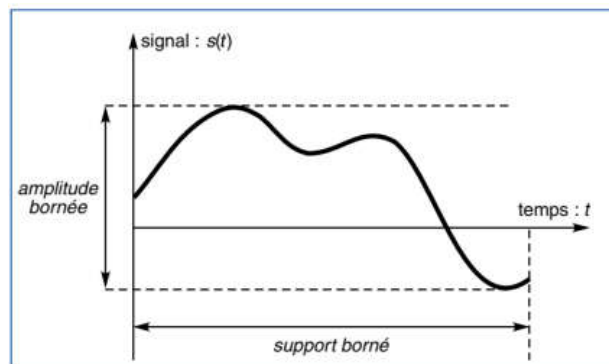


Figure II-1 signal physique

II.2.2 Classification des signaux :

Les techniques utilisées pour traiter des signaux ou analyser la réponse d'un système à un signal dépendent énormément des attributs et des caractéristiques de ces signaux. Ainsi, tout traitement du signal doit nécessairement commencer par une classification de ces signaux

Qui peuvent être envisagés par :

- Représentation temporelle des signaux
- Caractéristique énergétique

- Représentation spectrale
- Caractéristique morphologique (continu ou discret) [3]

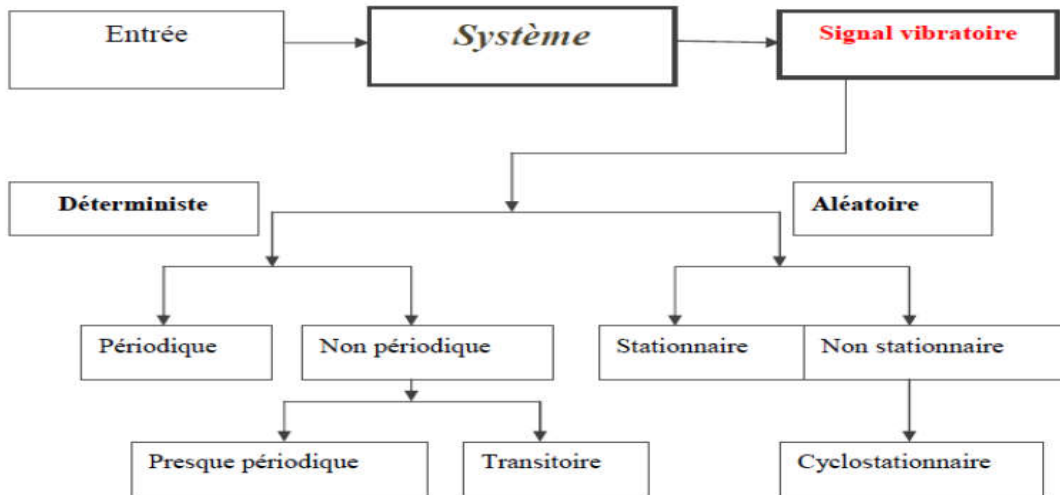


Figure II-2 Les types des signaux.

II.2.2.1 Signaux déterministes :

Ils sont appelés aussi des signaux certains, car ils sont parfaitement déterminés par la connaissance ou la mesure d'un nombre fini de paramètres. Ces signaux dont l'évolution en fonction du temps peut être parfaitement décrite par un modèle mathématique. Ces signaux proviennent de phénomènes pour lesquels on connaît les lois physiques correspondantes et les conditions initiales, permettant ainsi de prévoir le résultat

II.2.2.2 Signaux aléatoires :

Un signal est dit aléatoire ses valeurs ou réalisations dépendent du hasard et s'il ne possède pas de représentation analytique. Par contre l'observation de ce signal peut être caractérisée par des grandeurs statistiques ou fréquentielles. Le signal aléatoire ou variable aléatoire évoluant en fonction du temps (donnée continue), nous nous plaçons dans le domaine des variables aléatoires continues (infinité de valeurs déterminée par le résultat de chaque expérience ou épreuve). La plupart des signaux naturels sont aléatoires, car ils ont un caractère non-reproductible et imprévisible, exemple de tels signaux : signaux reçus par un radar, de la parole, de l'électrocardiogramme [3]

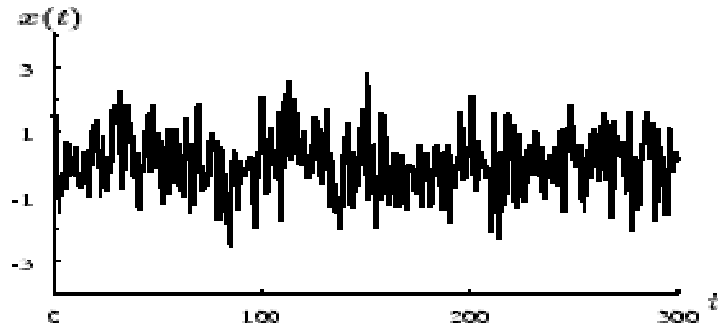


Figure II-3: Exemple d'un signal aléatoire

II.3 Les vibrations :

II.3.1 Définition :

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va-et-vient autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre. Une vibration est généralement traduite par :

- Un déplacement : la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre ;
- Une vitesse : variation du déplacement par rapport au temps ;
- Une accélération : variation de la vitesse par rapport au temps [6].

II.3.2 Les types de vibrations :

Il existe plusieurs types dont les principaux sont les suivants :

II.3.2.1 Vibration périodique simple :

C'est un mouvement oscillatoire qui se répète identiquement à lui-même à un intervalle régulier et qui peut être décrit par trois paramètres : sa fréquence, son amplitude et sa phase.

- $X(t) = A_0 \cos(W t + \beta)$
- W : pulsation de mouvement.
- β : Phase de la vibration.
- A_0 : Amplitude maximale de vibration [5].

II.3.2.2 Vibration périodique complexe :

Deux ou plusieurs vibrations périodiques peuvent se superposer et donner comme résultante un mouvement qui est la composition de tous les mouvements élémentaires.

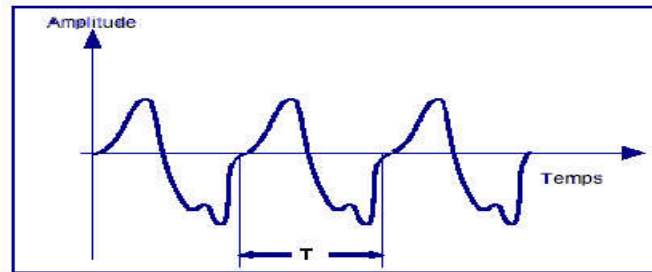


Figure II-4:Composition de tous les mouvements.

II.3.2.3 Vibration aléatoire :

C'est une vibration continue pour laquelle il n'est pas possible de déterminer une période de répétition. Elle ne peut donc pas être représentée par une fonction mathématique exacte, et nécessite l'utilisation de grandeurs statistiques pour sa caractérisation.

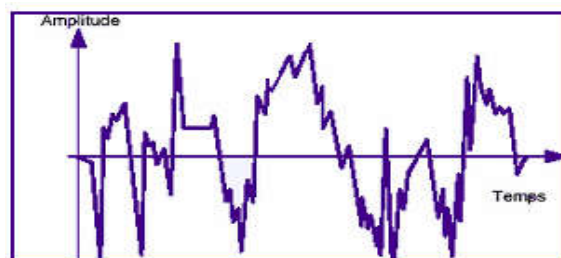


Figure II-5:Vibration aléatoire [7]

II.3.2.4 Vibration transitoire :

Elle est non continue et n'est observable que pendant un temps très bref (cas d'un choc ou impact).

II.3.3 Caractéristique d'une vibration:

L'Amplitude :

On appelle amplitude d'un mouvement vibratoire la valeur de ses écarts par rapport à sa position d'équilibre. De cette définition générale, la complexité d'un signal vibratoire réel conduit à définir plusieurs grandeurs d'amplitude : L'Amplitude crête (A_c) : Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre. L'Amplitude crête à crête (A_{cc}) : Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné. Dans le cas d'une vibration sinusoïdale, elle est parfois appelée amplitude double. Il est noté que :

$$A_{cc} = 2A_c \quad (\text{II-1})$$

- L'Amplitude efficace (A_{eff}) ou RMS (Root Mean Square) : Elle indique l'énergie donnée par le mouvement vibratoire [6].

II.3.3.1 La fréquence :

La fréquence représente la cadence de répétition d'un phénomène ou le nombre de fois qu'il se reproduit en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisi est la seconde, la fréquence s'exprime en Hertz (Hz). Une vibration qui se produira 50 fois/seconde aura donc une fréquence de 50 Hz. La fréquence f est l'inverse de la période T qui est la durée d'un cycle. [6]

II.4 Les Techniques de traitement de signal :

La détection de défauts nécessite d'une part une prise de mesure du signal vibratoire et d'autre part une exploitation du signal recueilli. La prise de mesure est une étape essentielle dans la procédure d'analyse vibratoire car elle conditionne l'efficacité des méthodes de traitement mises en œuvre. Le choix du ou des point(s) de mesure, le mode de fixation des capteurs, les paramètres de l'appareil de mesure (gamme de fréquence, résolution spectrale) sont des paramètres à prendre en considération.

II.4.1 Analyse temporelle :

L'analyse temporelle permet d'extraire des paramètres indicateurs de défauts à partir des Données brutes du capteur. Elle consiste à étudier le comportement vibratoire de la machine à partir de ces indicateurs. Un indicateur temporel est une grandeur qui caractérise la puissance, l'amplitude ou la répartition des amplitudes du signal vibratoire. L'évolution de ces indicateurs est significative de l'apparition d'un défaut et donc de son aggravation. Ces

Chapitre II : Notions de traitement du signal

indicateurs évaluent l'état de fonctionnement global des équipements mais ne localisent pas le défaut. De nombreux indicateurs existent dans la littérature et certains sont le résultat de la combinaison de plusieurs d'entre eux. [3]

II.4.2 Analyse fréquentielle :

Faute de pouvoir représenter le signal vibratoire en fonction du temps sous une forme facilement exploitable, on a recherché à le représenter dans un diagramme amplitudes–fréquences appelé spectre. L'analyse du spectre fréquentiel d'un signal est la technique la plus couramment utilisée pour identifier les défauts dans un système. Cette technique est basée sur le fait qu'un défaut localisé génère un signal périodique avec une fréquence caractéristique unique. À l'inverse de l'analyse temporelle, l'analyse fréquentielle permet d'identifier le défaut présent dans le système en identifiant sa fréquence caractéristique. Cette technique est généralement appliquée pendant le régime permanent du système.

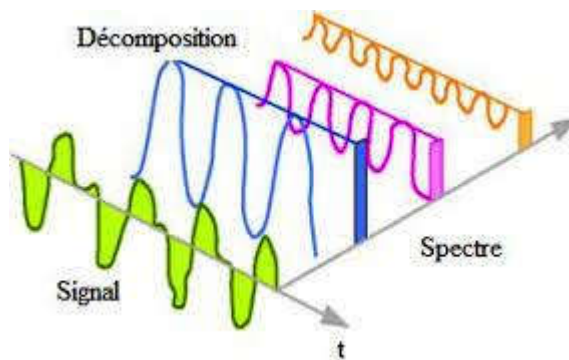


Figure II-6: le spectre de signal

Un classique parmi les techniques utilisées dans le domaine fréquentiel est l'analyse spectrale par transformée de Fourier rapide FFT. Définis par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad \text{II-2)}$$

Son calcul pour un signal discret $x(k)$ de longueur N est donné par :

$$X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-\frac{2\pi mk}{N}} \quad \text{(II-3)}$$

Le contenu fréquentiel d'un signal à énergie finie peut être représenté par la densité spectrale d'énergie (DSE). Dans le cas de signaux discrets, la DSE et le spectre d'amplitude sont définis via la transformée de Fourier discrète respectivement par les équations suivant :

$$P_x(m) = |X(m)|^2$$

Chapitre II : Notions de traitement du signal

$$S_x(m) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{N} |X(m)|^2 \quad (\text{II-4})$$

II.4.3 Analyse cepstrale :

Le cepstre est un outil mathématique qui permet la mise en évidence des périodicités dans un spectre. Le cepstre d'énergie d'un signal est défini par :

$$C_{(\tau)} = T F^{-1}(\text{Ln}(|S(f)|^2)) \quad (\text{II-5})$$

Il résulte de la transformée de Fourier inverse ($T F^{-1}$) du logarithme d'un spectre de puissance ($|S(f)|^2$) Le cepstre associe à une famille de raies harmoniques ou un ensemble de bandes latérales une raie unique dans sa représentation graphique. Chaque raie s'appelle le "rhamonique" et leur position sur l'axe des abscisses s'appelle le "quefrence". Le cepstre est utilisé pour le diagnostic des phénomènes de chocs périodiques (desserrages, défauts de dents, écaillage de roulements) et des phénomènes de modulation en fréquence ou en amplitude [8].

- La dénomination des concepts a été obtenue par permutation des lettres correspondant dans le champ fréquentiel (tableau) :

Tableau II-1: Nomenclature entre spectre et cepstre.

Analyse spectrale	Analyse cepstrale
Spectre	Cepstre
Fréquence	Quefrence
Harmonique	Rhamonique
Phase	Saphe
Filtre	Lifter

II.4.4 Modélisation Autorégressive :

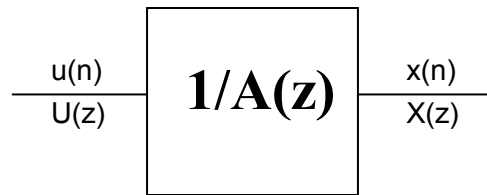
Le problème de la prédiction linéaire consiste à prédire la valeur $x(n)$ du signal à l'instant n , inobservée, à partir de son passé $\{x(n-1), \dots, x(n-p)\}$, observé, et plus précisément par une combinaison linéaire du passé de $x(n)$ à l'aide de coefficients $(a_i, i=1, \dots, p)$.

$$\hat{x}(n) = -\sum_{i=1}^p a_i \times x(n-i) \quad (\text{II-6})$$

les coefficients (poids) (a_i $i=1, \dots, p$) sont choisis de sorte qu'on minimise l'énergie de l'erreur prédiction $u(n)$.

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= E \{ (u(n))^2 \} \\ &= E \{ [x(n) - \hat{x}(n)]^2 \} \end{aligned} \quad (\text{II-7})$$

Le processus décrit par $x(n)$ étant supposé stationnaire, les coefficients a_i sont indépendants du temps. On minimise σ^2 utilisant le principe d'orthogonalité. La modélisation AR de la séquence $x(n)$ peut être vue comme étant le filtrage d'un bruit blanc gaussien de variance σ^2 par un filtre tout pôle.



Ce filtre est aussi un filtre à blanchissement, puisque partant d'une séquence $x(n)$ on aboutit à une séquence qui est un bruit blanc $u(n)$ de variance σ^2 .

II.4.4.1 Densité spectral AUTOREGRESSIVE :

Trois raisons, au moins, nous incitent à estimer la densité spectrale d'un processus en effectuant une modélisation autorégressive.

Le spectre AR autorise une meilleure résolution fréquentielle.

L'estimation des paramètres du modèle s'effectue par résolution d'équation linéaires, ce qui entraîne une réduction du nombre d'opérations, et par conséquent du temps de calcul.

Le respect du principe de parcimonie implique la représentation du signal, ainsi modélisé, par un faible nombre de paramètres.

La densité spectrale du processus Autorégressif $x(n)$ est donnée par.

$$S_x(z) = E \{ X(z) \cdot X^*(z) \} \quad \text{II-8}$$

Chapitre II : Notions de traitement du signal

* : désigne la quantité conjuguée.

E : désigne l'espérance mathématique

$X(z)$: la transformée en Z du processus $x(n)$.

Puisque $x(n)$ est la sortie d'un filtre tout-pôle de fonction de transfert $1/A(z)$ et d'entrée $u(n)$, il peut donc être exprimé dans le domaine complexe z .

$$X(z) = H(z)$$

$$U(z) = U(z)/A(z)$$

Or, $u(n)$ est un bruit blanc stationnaire de moyenne nulle et de variance σ^2 , donc le signal généré sera aussi stationnaire si le filtre de fonction de transfert $1/A(z)$ est stable, c'est à dire si l'ensemble des pôles de cette fonction de transfert se trouve à l'intérieur du cercle unité.

$$S_x(z) = \frac{E\{U(z)U^*(z)\}}{|A(z)|^2} \quad (II-9)$$

L'entrée étant un bruit blanc, nous aurons.

$$E\{U(z)U^*(z)\} = S_u(z) = \sigma^2 \quad II-10$$

Et finalement :

$$S_x(z) = \frac{\sigma^2}{|A(z)|^2} = \frac{\sigma^2}{\left|1 + \sum_{i=1}^p a_i z^{-i}\right|^2} \quad (II-11)$$

Avec $z = \exp(2\pi j f)$ où f représente la fréquence réduite définie sur l'intervalle $-0.5 \leq f \leq 0.5$.

Par conséquent, estimer la densité spectrale d'un processus AR revient à calculer les coefficients AR a_i (a_1, a_2, \dots, a_p), la variance σ^2 et l'ordre du modèle.

II.4.4.2 Déterminations des coefficients AR:

Les paramètres a_i (a_1, a_2, \dots, a_p), la variance σ^2 et l'ordre p sont déterminés par résolution des équations de YULE - WALKER.

II.4.4.3 Equation de YULE-WALKER

Le principe consiste à déterminer le lien entre les paramètres AR inconnus et la fonction d'autocréation $C_{xx}(k)$ supposée connue.

$$\begin{aligned}
 C_{xx}(k) &= E\{x(n+k).x^*(n)\} \\
 &= E\left\{x^*(n).\left[-\sum_{i=1}^p a_i.x(n-i-k)+u(n+k)\right]\right\} \\
 &= -\sum_{i=1}^p a_i.E\{x(n-i+k).x^*(n)\}+E\{x^*(n).u(n+k)\} \\
 &= -\sum_{i=1}^p a_i.C_{xx}(k-i)+E\{x^*(n).u(n+k)\}
 \end{aligned} \tag{II-12}$$

Si $H(z)$ est la fonction de transfert d'un filtre stable et causal alors :

$$\begin{aligned}
 E\{u(n+k).x^*(n)\} &= E\left\{u(n+k).\sum_{l=0}^{\infty} h^*(l).u^*(n-l)\right\} \\
 &= \sum_{l=0}^{\infty} h^*(l).E\{u(n+k).u^*(n-l)\} \\
 &= \sum_{l=0}^{\infty} h^*(l).C_{uu}(-(l+k))
 \end{aligned} \tag{II-13}$$

Où $h(l)$ est la réponse impulsionnelle d'un filtre causal et stable dont l'entrée est un bruit blanc centré et réduit.

Or,

$$C_{uu}(-(l+k)) = C_{uu}(l+k) \quad \text{et} \tag{II-14}$$

$$C_{uu}(l+k) = \sigma^2.\delta(l+k)$$

Donc :

$$\begin{aligned}
 E\{u(n+k).x^*(n)\} &= \sum_{l=0}^{+\infty} h^*(l).\sigma^2.\delta(l+k) \\
 &= \sigma^2.h^*(-k)
 \end{aligned} \tag{II-15}$$

La réponse impulsionnelle à l'origine étant égale à

$$h^*(0) = \left[\lim_{z \rightarrow +\infty} H(z)\right]^* = 1 \tag{II-16}$$

Nous aboutissons à

$$E \{u(n+k).x^*(n)\} = \begin{cases} 0 & \text{si } k > 0 \\ \sigma^2 & \text{si } k = 0 \end{cases} \quad (II-17)$$

Ce qui permet d'exprimer la matrice d'autocréation par les équations suivantes :

$$C_{xx}(k) = \begin{cases} \sum_{i=1}^p a_i \cdot C_{xx}(k-i) & \text{si } k \geq 1 \\ \sum_{i=1}^p a_i \cdot C_{xx}(k-i) + \sigma^2 & \text{si } k = 0 \end{cases} \quad II-18)$$

Ce système équations est appelé équation de YULE-WALKER.

$C_{xx}(k)$ est définie positive c'est à dire que les valeurs propres de cette matrice sont positives. Cette propriété assure la positivité de la densité spectrale estimée.

$C_{xx}(k)$ est une matrice hermitienne : $C_{xx}^*(k) = C_{xx}(-k)$

(Symétrique dans le cas des signaux réels)

$C_{xx}(k)$ Est une matrice de Toeplitz car les éléments de chaque diagonale (principale et secondaire) sont égaux.

Ces deux dernières propriétés inspirent, naturellement, l'utilisation d'un algorithme rapide pour déterminer les paramètres AR. C'est l'objet des algorithmes de LEVINSON-DURBIN et BUR [8].

II.4.4.4 Déterminations de L'ORDRE :

Le meilleur choix de l'ordre du modèle AR étant souvent inconnu a priori, il est donc nécessaire, en pratique, de postuler plusieurs ordres et de choisir l'ordre qui semble le plus approprié. A cet effet, différents critères fondés sur l'erreur de prédiction sont évalués pour indiquer quel ordre du modèle à choisir.

L'expérience montre que si le processus original est un AR(p), c'est à dire un processus autorégressif d'ordre p, alors le choix d'un modèle ordre inférieur à p entraîne une estimation spectrale lissée.

En fait, tout ordre fini d'un modèle AR introduit un biais du à l'inadéquation de la modélisation. un compromis doit donc être réalisé entre le désir de choisir un ordre élevé pour réduire le biais et un ordre faible pour réduire les erreurs d'estimation .

Chapitre II : Notions de traitement du signal

Différentes mesures visant à déterminer l'ordre du modèle ont été proposées, elles sont fondées sur la puissance de l'erreur d'estimation. Généralement, elles tentent de choisir un ordre qui minimise la puissance de l'erreur de prédiction mais en même temps un ordre aussi faible que possible. Puisqu'à partir de la récursion de *LEVINSON*, σ_k^2 décroît de façon monotone en fonction de k et atteint un minimum en $k=p$ pour un ordre AR(p).

Il est donc raisonnable que la puissance de l'erreur de prédiction soit l'indicateur central pour la sélection de l'ordre du modèle. Deux méthodes ont été proposées par *AKAIKE* pour le choix de l'ordre optimal.

La première méthode, connue l'appellation de critère FPE (Erreur de Prédiction Finale ou Final Prediction Error), estime l'ordre du modèle qui minimise.

$$FPE(k) = \frac{N+k}{N-k} \sigma_k^2 \quad (II-19)$$

σ_k^2 : représente la variance estimée du bruit (ou puissance de l'erreur de prédiction)

N : nombre d'échantillons du signal analysé $x(n)$.

Il est clair que lorsque σ_k^2 décroît avec k (c'est à dire pour k croissant), le terme $(N+k)/(N-k)$ croît avec k et rend compte de la croissance de la variance de la puissance de l'erreur de prédiction due à une mauvaise estimation des coefficient de prédiction.

Le critère FPE est un estimateur de la puissance de l'erreur de prédiction adapté à l'estimation des coefficients de prédiction directement à partir des données.

La seconde méthode, de loin la plus utilisée, est appelée critère AIC (*ou AKAIKE Information Critèrion*). Ce critère minimise

$$AIC(k) = N \cdot \log(\sigma_k^2) + 2 \times k \quad II-20)$$

II.4.5 Analyse temps – fréquence :

La présence des chocs dus aux défauts de roulements donne au signal vibratoire un caractère non stationnaire, ce qui interdit en principe l'utilisation de la transformée de Fourier qui suppose une stationnarité d'ordre 2. Cela nécessite donc des outils permettant une analyse des caractéristiques spectrales dépendantes du temps. L'analyse temps-fréquence permet de décrire l'évolution temporelle des caractéristiques fréquentielles du signal. Ainsi, cette analyse

Chapitre II : Notions de traitement du signal

permet d'avoir une description plus satisfaisante que l'analyse spectrale classique grâce aux deux degrés de libertés offerts par les deux dimensions du plan temps-fréquence [8].

Les méthodes temps-fréquence permettent :

- de fournir une représentation du signal en trois dimensions (amplitude-temps-fréquence) voir figure.
- de détecter et de suivre le développement des défauts qui génèrent une faible puissance vibratoire.
- de superviser des machines dans lesquelles le processus de fonctionnement normal produit une amplitude élevée des chocs périodiques.

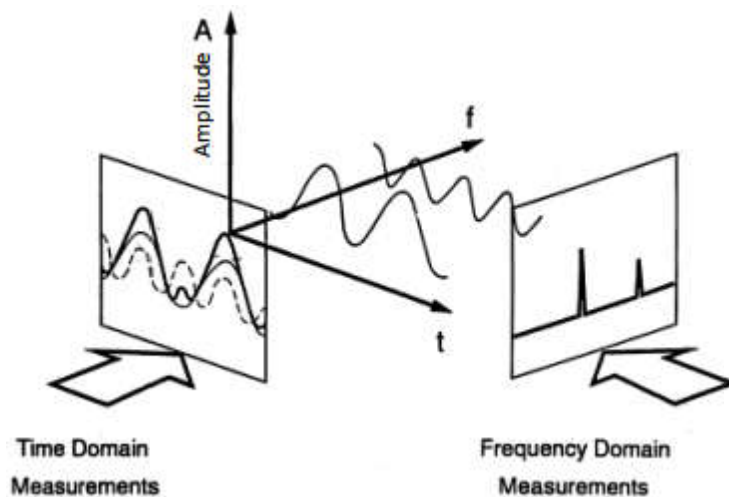


Figure II-7: Coordonnées tridimensionnelles montrant le temps, la fréquence et l'amplitude d'un signal [8].

On peut noter deux variantes de l'analyse temps-fréquence : la transformée de Fourier à court terme et la transformée de Wigner-Ville.

La transformée de Fourier fenêtrée ou à court terme TFCT évite l'inconvénient du caractère global de la transformée de Fourier, une idée naturelle consiste à « tronquer » le signal en fractions supposées localement stationnaires. On localise ainsi l'analyse en sélectionnant une portion autour d'une position temporelle, puis en calculant la transformée de Fourier de ce segment. On peut ensuite recommencer pour d'autres positions, ce processus est appelé la transformée de Fourier fenêtrée ou la transformée de Fourier à court terme TFCT. La transformée de Fourier fenêtrée est la plus ancienne des méthodes temps-fréquence, elle consiste à réaliser une transformée de Fourier sur une fenêtre du signal, $x(t)$, qui glissera temporellement.

$$S_x(\tau, f) = \int x(t)h(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt \quad \text{II-21)}$$

Le signal est découpé au moyen d'une fenêtre $h(t)$ où l'indice τ représente le positionnement temporel de cette fenêtre et donc le positionnement de ce spectre. La série de spectre ainsi reconstituée représente une forme de transformée temps-fréquence du signal appelé spectrogramme. On peut cependant noter un inconvénient majeur de la méthode de TFCT sur le fait que le signal est supposé stationnaire durant la durée de la fenêtre. Ainsi la longueur de fenêtre est choisie pour respecter cette hypothèse. La taille de la fenêtre influence également la résolution temporelle et donc fréquentielle. Lorsque la taille de la fenêtre est petite la résolution en temps est grande mais la résolution en fréquence est médiocre, et vice versa, selon le principe d'incertitude de Heisenberg. Comme la fenêtre est de longueur fixe cela représente un handicap important lorsqu'on veut traiter des signaux dont les variations peuvent avoir des ordres de grandeur très variables.

Il serait donc intéressant d'adapter les fenêtres d'observation successives aux variations de structure du signal de façon que les hypothèses de stationnarité locale soient satisfaites. L'analyse temps fréquence du signal fournit un moyen efficace d'analyse des phénomènes physiques non stationnaires permettant de décrire l'évolution temporelle du spectre de ces phénomènes. Elle possède des avantages significatifs sur d'autres méthodes voisines car elle ne fait pas appel aux méthodes issues du cas stationnaire.

En résumé la transformée de Fourier et la transformée de Fourier à fenêtre présentent un inconvénient majeur. La transformée de Fourier est une transformation globale tandis que la TFCT ou la transformée de Wigner-ville est locale mais toutes les deux sont de résolution temporelle fixe. La transformée en ondelettes (ou transformation temps-échelle) permet de pallier cet inconvénient car il est nécessaire de disposer d'un outil qui adapte sa résolution à la taille de l'objet ou du détail analysé [8].

II.5 Conclusion :

Le processus de surveillance et de diagnostic des défaillances mécaniques des machines tournantes repose sur la capture du signal vibratoire, sa numérisation et son traitement de diverses manières pour traiter le signal.

Ce chapitre contient les définitions du signal vibrant et quelques méthodes de traitement à utiliser dans le dernier chapitre appliqué.

III. Chapitre III : Machines tournantes

Chapitre III : Machines tournantes

III.1 Introduction :

Turbines, pompes, moteurs, compresseurs, alternateurs, centrifugeuses, ventilateurs... toutes ces machines, que l'on dit "tournantes", ont un point commun : elles comprennent des organes en rotation. Suivant les cas, il peut s'agir de structures relativement simples, constituées d'un seul arbre en rotation à travers un ou plusieurs roulements, ou de machines plus complexes composées de plusieurs arbres tournant à des vitesses de rotation différentes.

Une machine tournante est composée d'organes complexes soumis à des contraintes mécaniques importantes et à des environnements industriels difficiles qui sont la source de défaillance

III.2 Classement « VIS » des machines tournantes :

Afin de ne pas surveiller inutilement des machines qui n'ont pas une importance capitale, les industriels établissent souvent le classement suivant :

- machines Vitales : machines non doublées dont la panne entraîne l'arrêt de la production. Les frais et les délais de remise en état sont importants. Les pertes de production sont inacceptables.
- machines Importantes : machines doublées ou non dont la panne entraîne une baisse sensible de la production. Les frais et délais de remise en état sont importants, les pertes de production aussi.
- machines Secondaires : machines doublées ou dont une panne ne remet pas en cause les capacités de production [9].

L'identification d'anomalies à un stade précoce, le suivi de leurs évolutions et le diagnostic de l'état d'une machine ne sont possibles que si, préalablement, l'on connaît les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible de l'affecter, c'est-à-dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts.

III.3 Les défauts de roulements :

Un roulement est un corps formé par deux bagues concentriques appelées bagues intérieure et extérieure comportant des chemins de roulement entre lesquelles existent des corps roulants uniformément espacés par une cage. Cette cage est placée entre les bagues et a pour rôle de réduire les frottements en empêchant les éléments de se frotter les uns contre les autres [10].

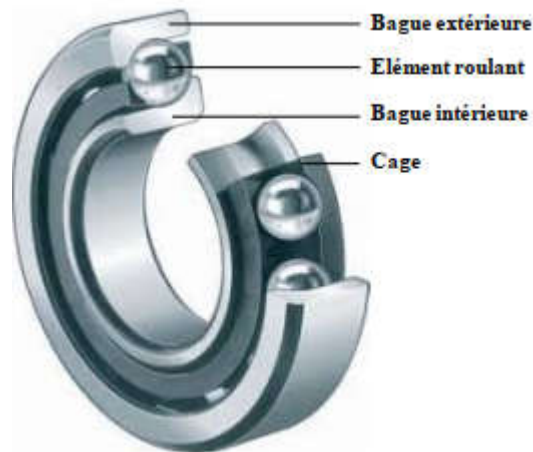


Figure III-1: Architecture d'un roulement à bille

III.3.1 Fréquences caractéristiques :

Les roulements sont parmi les composants les plus sollicités des machines et représentent une source de panne fréquente. Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage), etc. Dans la plupart des cas, la dégradation se tr par un écaillage d'une des pistes ou d'un élément roulant du roulement, produisant un choc à chaque passage. Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues.

Pour chaque type de roulement et en fonction de ses cotes de fabrication, on peut considérer les fréquences caractéristiques données formules ci-dessous.

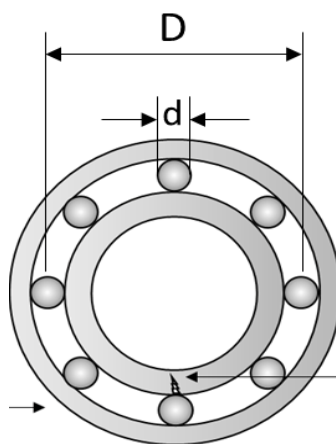


Figure III-2: Caractéristiques géométriques d'un roulement

- n : le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).
- D : le diamètre primitif.

Chapitre III : Machines tournantes

- d : le diamètre des éléments roulants.
- α : angle de contact.
- f_r : la fréquence de rotation de la bague interne (la bague externe étant supposée fixe).

Ainsi, nous avons :

BPF_O =Ballpass frequency, outer race : La fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague extérieure, " BPF_O " est donnée par l'équation suivante:

$$BPF_O = f_r \frac{n}{2} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right] \quad (III-1)$$

BPF_I = Ballpass frequency, inner race : La fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague intérieure, supposée montée sur l'arbre tournant, " BPF_I " est donnée par l'équation suivante:

$$BPF_I = f_r \frac{n}{2} \left[1 + \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right] \quad (III-2)$$

FTF =Fundamental train frequency : La fréquence de passage d'un défaut de cage " FTF ", est donnée par l'équation suivante:

$$FTF = f_r \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right] \quad III-3)$$

BSF = Ball (roller) spin frequency : La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau) sur la bague externe ou sur la bague interne " BSF " est donnée par l'équation suivante:

$$BSF = f_r \frac{d}{2D} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right] \quad (III-4)$$

Un défaut situé sur une bille entre en contact avec la bague intérieure ainsi qu'avec la bague extérieure à chaque révolution de la bille. La fréquence du défaut sera donc [11] [12] :

$$2BSF = f_r \frac{d}{D} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right] \quad III-5)$$

III.3.2 Défient type de défauts de roulements :

III.3.2.1 Défaut de type écaillage affectant la bague externe :

Un défaut de type écaillage affectant la bague externe d'un roulement a pour image vibratoire un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence du défaut. À chaque *composante* de ce peigne, est associée une paire de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique importante.

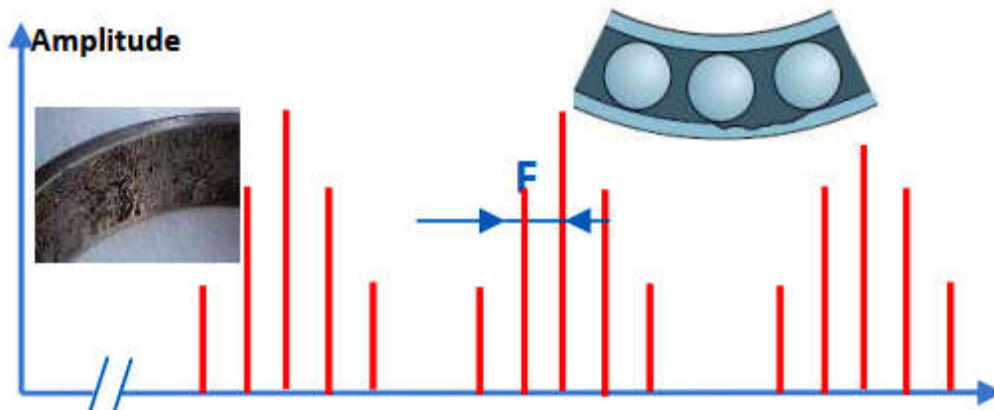


Figure III-3: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague extérieure [13].

III.3.2.2 Défaut de type écaillage affectant la bague interne :

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation.

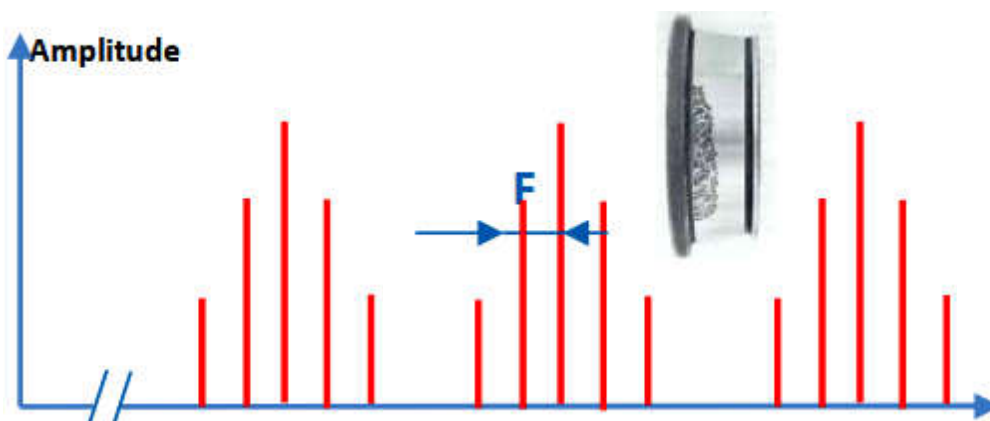


Figure III-4: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur bague intérieure

III.3.2.3 Défaut de type écaillage sur un élément roulant :

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant (bille, rouleau ou aiguille) a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de la cage.

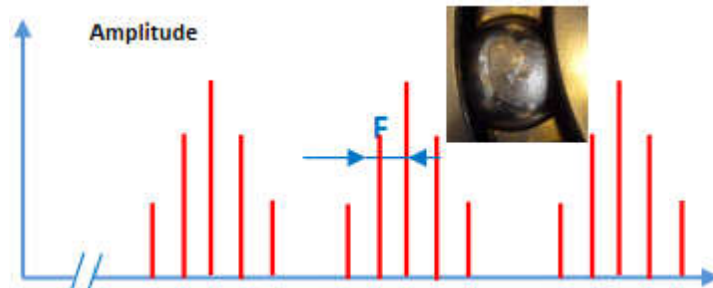


Figure III-5: Image vibratoire théorique d'un défaut de type écaillage sur un élément roulant [13].

III.3.2.4 Défauts de type déversement de bague :

Le défaut de type déversement de bague extérieure s'exprime par une composante fondamentale d'amplitude élevée dont la fréquence correspond à la fréquence du défaut de la bague déversée, et par des composantes d'ordre supérieur d'amplitude très faible [11] [12].

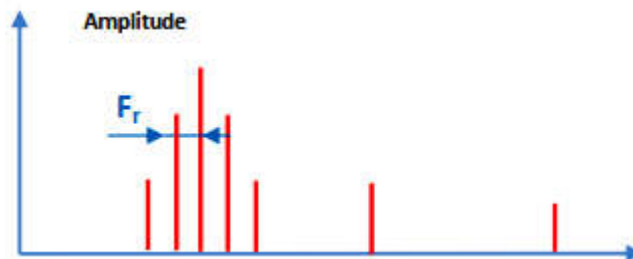


Figure III-6: Image vibratoire théorique d'un défaut de type déversement de bague [13].

III.4 Chaîne de mesure :

Afin de pouvoir acquérir de manière correcte un signal vibratoire représentatif des efforts agissant sur la structure, plusieurs procédures sont accomplies par les éléments constitutifs de la chaîne de mesure :

III.4.1 Les capteurs :

Un capteur est un organe de prélèvement d'informations qui élabore, à partir d'une grandeur physique (information entrante), une autre grandeur physique de nature différente (la plupart du temps électrique) utilisable à des fins de mesures ou de commandes.

III.4.1.1 Paramètres des capteurs :

Il existe un certains nombre de paramètres électriques communs à tous les capteurs tels que :

- La précision : qui est caractérisée par l'incertitude absolue obtenue sur la grandeur électrique en sortie du capteur.
- L'étendue de mesure : qui définit la plage de fonctionnement du capteur pour la grandeur à mesurer.
- La linéarité qui permet de savoir si le capteur présente la même sensibilité sur toute l'étendue de sa plage d'emploi.
- La fidélité : Un capteur est dit fidèle si le signal qu'il délivre ne varie pas pour une série de mesure concernant la même valeur de la grandeur d'entrée.

III.4.1.2 Différents types de capteurs :

Les capteurs de vibrations utilisés actuellement en industrie pour la maintenance conditionnelle sont les capteurs de déplacement, les capteurs de vitesse et les capteurs d'accélération (les accéléromètres).

Capteurs de déplacement :

Il existe en effet trois types :

- Capteurs de déplacement à courant de Foucault:

Ces capteurs mesurent les déplacements vibratoires, ils ont une réponse aux déplacements quasi statiques, mais ont une gamme de fréquence limitée et ils nécessitent souvent un calibrage sur site.

De plus la surface vibrante doit être électriquement conductrice.

- Capteurs de déplacement capacitifs :

Ces capteurs de petite dimension sont libres de tout contact. Ils sont sensibles aux déplacements vibratoires relatifs à une grande sensibilité sur une large gamme fréquentielle.

Ce type de capteur est difficile à calibrer, il faut appliquer une différence de potentiel entre le capteur et la pièce en mouvement.

- Potentiomètre de position :

Ce capteur est capable de mesurer les déplacements statiques. Cependant, la gamme fréquentielle est très limitée et le capteur a une courte durée de vie et une faible résolution [5].

Chapitre III : Machines tournantes

Capteur de vitesse :

Les vélocimètres (capteurs de vitesse) sont constitués d'une sonde à contact mesurant le mouvement absolu de la structure sur lequel elle est fixée. En général, constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine se déplaçant dans un champ magnétique permanent. La vibration de la structure provoque un déplacement de la bobine, générant une tension proportionnelle à sa vitesse. Avec une gamme dynamique n'excédant pas les 2000 Hz, l'utilisation de ce type de capteurs tend à disparaître au profit d'accéléromètres piézo-électriques moins encombrants et possédant une gamme dynamique plus importante [14].

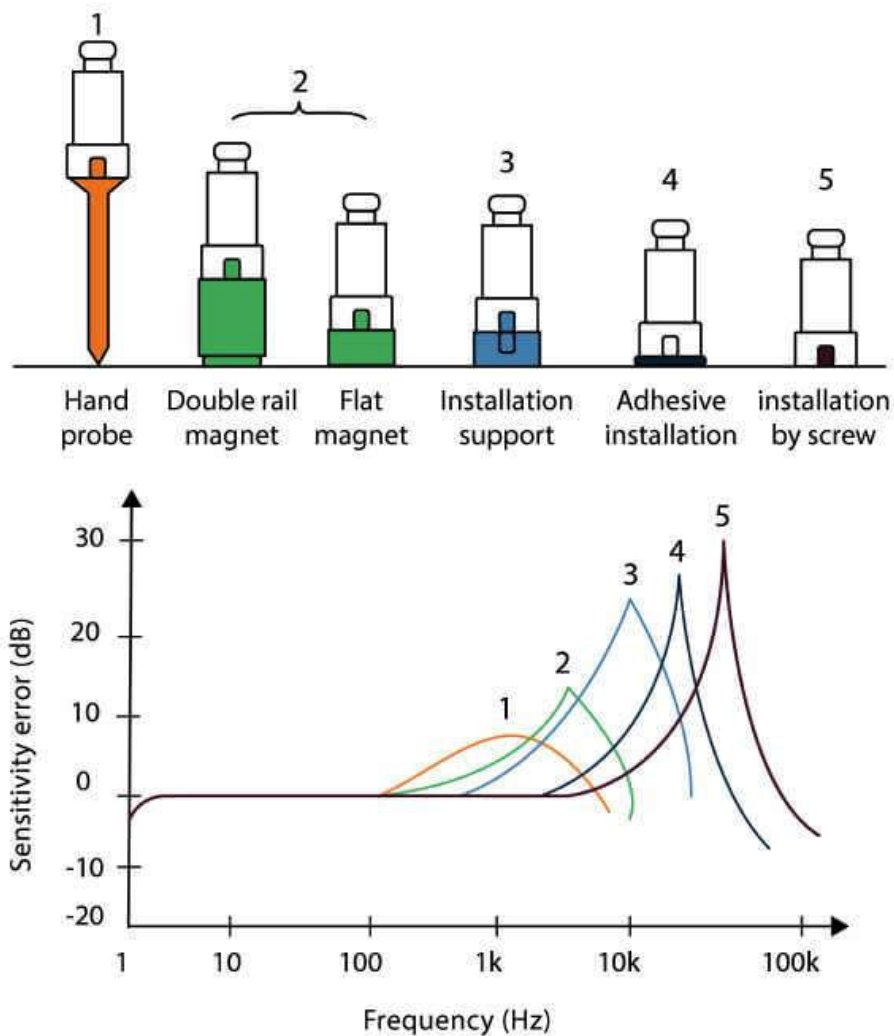


Figure III-7: Bandes fréquentielles associées aux différents modes de fixation

Capteur d'accélération :

Chapitre III : Machines tournantes

C'est un capteur vibratoire qui est capable de mesurer les accélérations quasi statiques. La gamme fréquentielle est très large, il possède une excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique. Etant lui-même, générateur, il est donc indépendant de toute alimentation externe. Le signal d'accélération peut être intégré électriquement pour donner le déplacement et la vitesse, c'est le meilleur capteur disponible pour la mesure de vibrations.



Figure III-8:capteur d'accélération

Dans un capteur d'accélération, on utilise un cristal piézo-électrique, ce cristal a la propriété de produire une charge électrique lorsqu' il est soumis à une pression. Quand une masse est placée au-dessus de ce cristal mince, subit des accélérations, et une force est générée suivant la loi de newton :

$$F = Ma \quad \text{III-6)}$$

Cette force crée une pression sur le cristal. Les accéléromètres actuels sont tous munis d'un amplificateur interne qui transforme la charge en une tension. Cet amplificateur est alimenté de manière externe au moyen d'une source de courant continu. Vu le caractère universel de ce capteur, la plupart des appareils de mesures modernes contient de telle source de courant [15].

III.4.1.3 Mode de fixation du capteur :

Plusieurs modes de fixation existent : par goujon vissé ou embase collés, par embase magnétique ou par simple pression avec une pointe de touche. Le mode de fixation d'un capteur a une incidence considérable sur la bande passante de ce dernier et surtout sur la répétitivité de la mesure qui est le fondement même de la surveillance. Seuls les modes de fixation par goujon vissé ou par embase collée offrent une réelle garantie sur la répétitivité des prises des mesures et une bande passante maximale. Cependant, avec quelques précautions, la

Chapitre III : Machines tournantes

fixation par embase magnétique donne des résultats acceptables. Par contre, l'utilisation d'une pointe de touche offre une mauvaise répétitivité des mesures et une très mauvaise bande passante. Malgré sa facilité de mise en œuvre, cette technique de prise de mesure doit donc vivement être déconseillée.

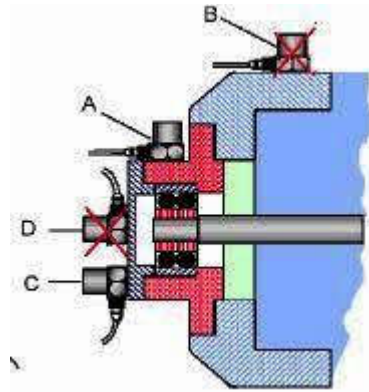


Figure III-9: Mode de fixation du capteur

III.4.1.4 Nombre de points de mesure par palier :

Il est extrêmement important de ne pas oublier qu'une force est une grandeur vectorielle et qu'un capteur de vibration est un capteur directionnel. Certains défauts induisent des forces d'excitations directionnelles selon des directions bien définies (radiale, verticale, horizontale, ...) et ne seront révélés que si le capteur est correctement positionné. Et pour une bonne fiabilité de la surveillance, il faut effectuer les prises de mesures selon trois directions orthogonales : l'une parallèle à l'axe de rotation et les deux autres radiales.

III.4.2 L'échantillonnage:

L'échantillonnage du signal consiste à en prendre des valeurs représentatives à des intervalles de temps Δt donnés. Cependant pour des raisons de fiabilité de mesure, et à cause des variations possibles du signal d'entrée, cet échantillonnage doit être effectué dans un délai extrêmement court.

Le nombre d'échantillons doit être suffisamment grand pour décrire le signal complet sans perte d'informations, mais suffisamment faible pour en limiter le traitement et réduire ainsi les temps de calcul. Le théorème de Shannon nous indique que la fréquence d'échantillonnage f_e doit être supérieure à deux fois la fréquence maximale du signal analysé:

$$f_e \geq 2f_{max} \quad (III-7)$$

Chapitre III : Machines tournantes

Dans la pratique, les constructeurs de matériels définissent un facteur compris entre 2,5 et 5 mais le plus couramment 2,56.

La fréquence de Nyquist correspond à la moitié de la fréquence d'échantillonnage:

$$f_N = \frac{f_e}{2} \quad \text{III-8)}$$

III.4.3 Le filtrage :

Les opérations de filtrages sont utilisées pour extraire une partie des informations contenues dans un signal dans un domaine fréquentiel donné et sont le plus souvent réalisées à l'aide de systèmes linéaires invariant dans le temps dont on connaît à priori les réponses fréquentielles.

Les filtres analogiques sont généralement mis en œuvre, soit pour éviter les phénomènes de repliement de spectre associé à l'échantillonnage d'un signal analogique avant le traitement numérique sur ordinateur, soit pour traiter analogiquement un signal.

Les filtres analogiques se réalisent matériellement avec des composants passifs (résistance, capacité,...), des composants actifs tels que des amplificateurs opérationnels ou des matériaux piézo-électriques.

Les filtres numériques sont réalisés dans la majorité des cas à l'aide d'algorithmes de traitement numériques sans réalité matérielle. [5]

III.4.4 L'amplification

L'amplification à ce stade permet d'avoir un signal net exploitable. En effet les amplitudes des vibrations générées par les machines diffèrent d'un cas à l'autre, elles peuvent aller de quelques g jusqu'à des centaines de g. De ce fait l'amplification du signal doit s'adapter afin de rendre visibles et observables tous les phénomènes à surveiller, et de pleinement profiter de la gamme dynamique du système d'acquisition [14].

III.4.5 La numérisation:

La numérisation d'un signal se fait à l'aide d'un convertisseur analogique/numérique, ce dernier transforme le signal analogique issu du capteur en une suite de valeurs numériques permettant de reconstruire la courbe du signal sans perdre aucune information.

Un paramètre important de cette numérisation, pour la précision de mesure en amplitude, est le nombre de pas de quantification par rapport à la valeur maximale de l'échelle nécessaire

Chapitre III : Machines tournantes

à la définition de l'amplitude d'une raie discrète. Ce nombre est une caractéristique du convertisseur analogique/numérique. On parle de bits de résolution [5].

III.5 Conclusion :

Les machines tournantes ont des classifications qui font la différence dans le diagnostic de leurs défauts mécaniques, car les roulements ont des types, des normes et des conditions qui contrôlent le diagnostic de leurs défauts. Le chapitre suivant présente un diagnostic pratique basé sur des données réelles et prenant en compte le type, la mesure et les conditions du roulement dans l'expérience.

iv. Chapitre IV: Diagnostic de défauts par traitement du signal

Chapitre IV : Diagnostic de défauts par traitement du signal

IV.1 Introduction :

L'analyse du signal de vibration est un moyen important pour la détection / le diagnostic des défauts de roulements et les roulements fonctionnent souvent dans des conditions de vitesse de rotation variant dans le temps. Cette base de données contient des ensembles de données de vibrations collectées à partir de roulements présentant différentes conditions de santé dans différentes conditions de vitesse variant dans le temps. Les conditions de santé du roulement sont saines, défectueuses avec un défaut de la bague intérieure et défectueuses avec un défaut de la bague extérieure. Les conditions de vitesse de rotation de fonctionnement pour l'ensemble de données comprennent l'augmentation de la vitesse, la diminution de la vitesse, l'augmentation puis la diminution de la vitesse et la diminution puis l'augmentation de la vitesse. Une base de données est disponible sur internet contenant des données pour une expérience réalisée sur un roulement dans diverses conditions.

IV.2 Données :

Les données contiennent des signaux de vibration collectés à partir de roulements dans des conditions de vitesse de rotation variant dans le temps. Les données peuvent être utilisées pour évaluer l'efficacité des méthodes développées pour le diagnostic des défauts de roulement dans des conditions de vitesse variant dans le temps.

IV.3 Conception expérimentale, matériaux et méthodes :

IV.3.1 Montage expérimental :

Les expériences sont effectuées sur un simulateur de défauts de machines SpectraQuest (MFS-PK5M). Le montage expérimental est illustré à la Figure IV.1. L'arbre est entraîné par un moteur et la vitesse de rotation est contrôlée par un entraînement à courant alternatif. Deux roulements à billes ER16K sont installés pour soutenir l'arbre, le gauche est un roulement sain et le droit est le roulement expérimental, qui est remplacé par des roulements de différentes conditions de santé. Un accéléromètre (accéléromètre ICP, modèle 623C01) est placé sur le boîtier du roulement expérimental pour collecter les données de vibration. De plus, un codeur incrémental (modèle EPC 775) est installé pour mesurer la vitesse de rotation de l'arbre.

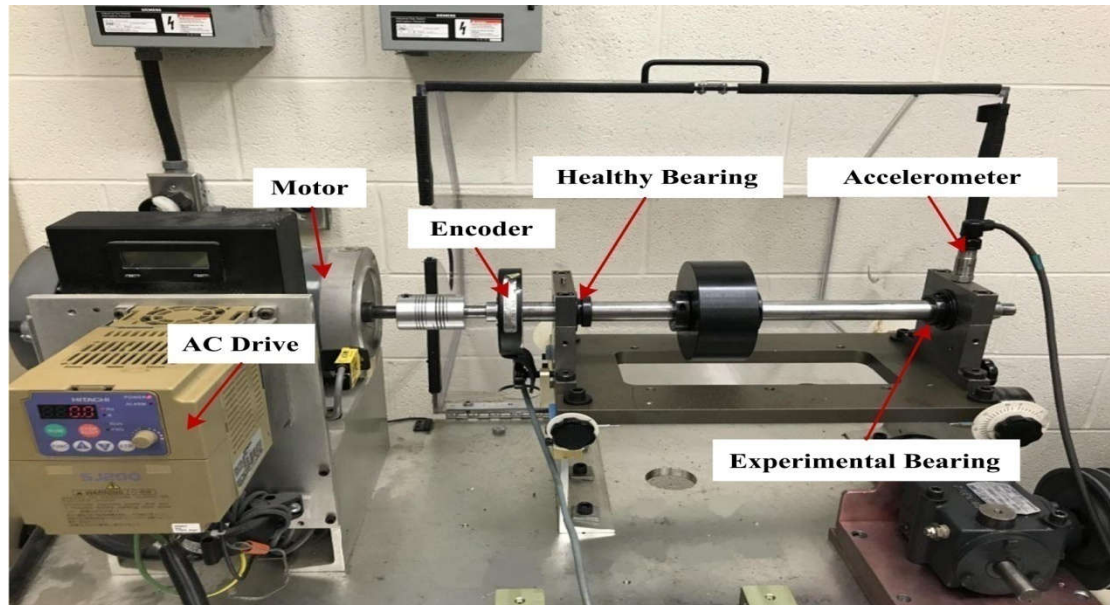


Figure IV-1:Montage expérimental.

IV.3.2 Paramètre des roulements :

Les défauts de roulement peuvent être détectés et diagnostiqués en observant la fréquence caractéristique de défaut (FCF) dans le domaine fréquentiel. Pour chaque type de défaut, il a un FCF spécifique, qui est proportionnel à la fréquence de rotation de fonctionnement, et le coefficient est déterminé par les paramètres structurels du roulement. Les paramètres structurels des roulements utilisés dans les expériences sont donnés dans le tableau 1 . Selon les paramètres des roulements, le coefficient FCF de la bague intérieure du roulement est de 5,43, c'est-à-dire que la fréquence de passage des billes de la bague intérieure (BPFI) est égale au produit du coefficient FCF (5,43) par la rotation de l'arbre fréquence f_r , soit $BPFI = 5,43 f_r$. De même, le FCF de la bague extérieure du roulement, c'est-à-dire la fréquence de passage des billes de la bague extérieure (BPFO) = $3,57 f_r$.

Tableau IV-1:Paramètres des roulements.

Type de roulement	Diamètre de pas	Diamètre de billes	Nombre de billes	BPFI	BPFO
ER16K	38,52 millimètre	7,94 millimètre	9	$5,43 f_r$	$3,57 f_r$

Chapitre IV : Diagnostic de défauts par traitement du signal

IV.3.3 Paramètres d'acquisition de données :

Les données sont acquises par les cartes d'acquisition de données NI (NI USB-6212 BNC). L'accéléromètre mesure les données de vibration et le codeur mesure les données de vitesse de rotation. Chaque jeu de données échantillonné contient deux canaux, et les deux sont enregistrés dans un fichier.mat. «Channel_1» correspond aux données de vibration mesurées par l'accéléromètre et «Channel_2» correspond aux données de vitesse de rotation mesurées par le codeur.

IV.3.3.1 Fréquence et longueur d'échantillonnage :

Dans toutes les expériences, à la fois «Channe_1» et «Channel_2», les signaux sont échantillonnés à 200 000 Hz et la durée d'échantillonnage est de 10 s.

IV.3.3.2 Conception d'ensembles de données :

Il y a 36 ensembles de données au total. La numérotation de l'ensemble de données est donnée dans le tableau 2. Pour chaque jeu de données, il existe deux paramètres expérimentaux: l'état de santé du roulement et l'état de vitesse variable. Les conditions de santé du roulement comprennent (i) sain, (ii) défectueux avec un défaut de la bague intérieure, et (iii) défectueux avec un défaut de la bague extérieure. Les conditions de vitesse de rotation de fonctionnement sont (i) une vitesse croissante, (ii) une vitesse décroissante, (iii) une vitesse croissante puis décroissante, et (iv) une vitesse décroissante puis croissante. Par conséquent, il existe 12 cas différents pour le réglage. Pour garantir l'authenticité des données, 3 essais sont collectés pour chaque cadre expérimental, ce qui donne un total de 36 ensembles de données.

Chapitre IV : Diagnostic de défauts par traitement du signal

Tableau IV-2: Numérotation des ensembles de données [16].

Conditions de santé du roulement	Conditions variables de vitesse			
	Augmentation de la vitesse	Diminution de la vitesse	Augmentation puis diminution de la vitesse	Diminution puis augmentation de la vitesse
Sain	HA-1	HB-1	HC-1	HD-1
	HA-2	HB-2	HC-2	HD-2
	HA-3	HB-3	HC-3	HD-3
Défectueux (défaut de la bague interne)	IA-1	IB-1	IC-1	ID-1
	IA-2	IB-2	IC-2	ID-2
	IA-3	IB-3	IC-3	ID-3
Défectueux (défaut de la bague externe)	OA-1	OB-1	OC-1	OD-1
	OA-2	OB-2	OC-2	OD-2
	OA-3	OB-3	OC-3	OD-3

Pour donner une meilleure idée des jeux de données collectés, les conditions de fonctionnement détaillées des jeux de données numérotés dans le tableau 2 sont données comme suit (les données sont toutes échantillonnées à 200 000 Hz et la durée d'échantillonnage est de 10 s) [20].

IV.4 Représentation du signal temporel :

IV.4.1 Etat sain :

- Jeu de données HA-1: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement sain et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 14,1 Hz à 23,8 Hz.
- Jeu de données HA-2: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement sain et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 14,1 Hz à 29,0 Hz.
- Jeu de données HA-3: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement sain et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 15,2 Hz à 26,7 Hz.
- Jeu de données HB-1: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement sain et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 28,9 Hz à 13,7 Hz.
- Jeu de données HB-2: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement sain et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 25,7 Hz à 11,6 Hz.
- Jeu de données HB-3: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement sain et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 28,6 Hz à 13,9 Hz.

Chapitre IV : Diagnostic de défauts par traitement du signal

- Jeu de données HC-1: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement sain et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 14,7 Hz à 25,3 Hz, puis diminue à 21,0 Hz.
- Jeu de données HC-2: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement sain et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 14,4 Hz à 24,0 Hz, puis diminue à 18,7 Hz.
- Jeu de données HC-3: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement sain et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 15,4 Hz à 24,8 Hz, puis diminue à 19,1 Hz.
- Jeu de données HD-1: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement sain et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 24,2 Hz à 14,8 Hz, puis augmente à 20,6 Hz.
- Jeu de données HD-2: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement sain et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 24,6 Hz à 14,0 Hz, puis augmente à 18,6 Hz.
- Jeu de données HD-3: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement sain et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 26,0 Hz à 16,9 Hz, puis augmente à 23,2 Hz.

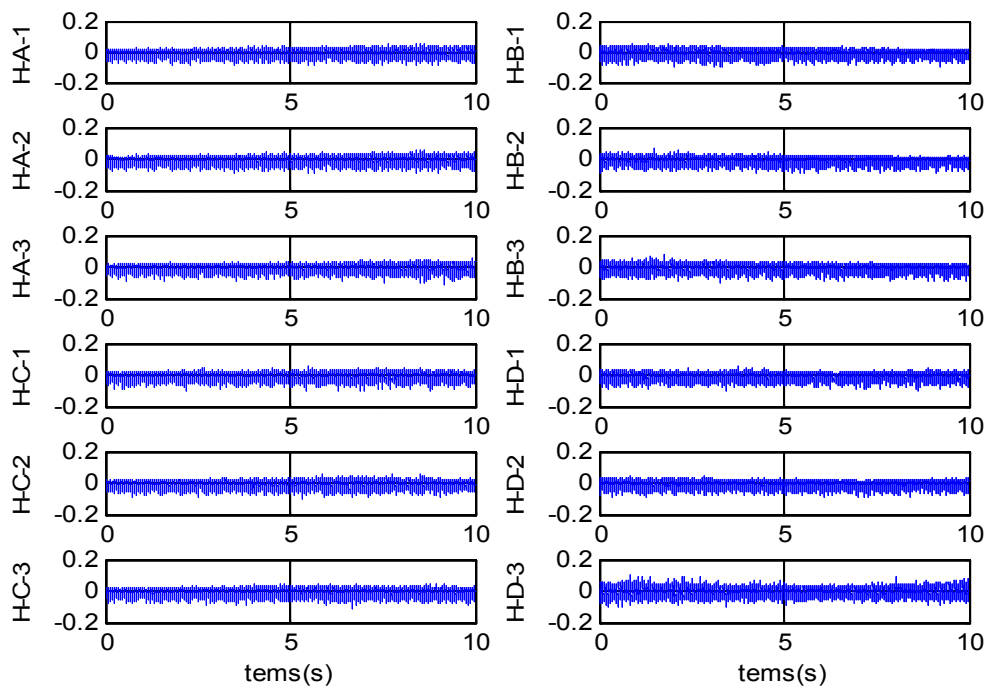


Figure IV-2: Le Signal temporelle d'un roulement sain

IV.4.2 Etat défectueux (défaut de la bague interne) :

- Jeu de données IA-1: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de la bague intérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 12,5 Hz à 27,8 Hz.
- Jeu de données IA-2: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de la bague intérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 13,0 Hz à 25,7 Hz.
- Jeu de données IA-3: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de la bague intérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 13,5 Hz à 28,5 Hz.
- Jeu de données IB-1: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de la bague intérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 24,3 Hz à 9,9 Hz.
- Jeu de données IB-2: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de la bague intérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 25,1 Hz à 13,1 Hz.
- Jeu de données IB-3: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de la bague intérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 25,8 Hz à 12,0 Hz.
- Jeu de données IC-1: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de la bague intérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 15,1 Hz à 24,4 Hz, puis diminue à 18,7 Hz.
- Jeu de données IC-2: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de la bague intérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 14,1 Hz à 23,5 Hz, puis diminue à 18,0 Hz.
- Jeu de données IC-3: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de la bague intérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 14,8 Hz à 21,7 Hz, puis diminue à 13,6 Hz.
- Jeu de données ID-1: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de la bague intérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 25,3 Hz à 14,8 Hz, puis augmente à 19,4 Hz.
- Jeu de données ID-2: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de la bague intérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 25,3 Hz à 15,1 Hz, puis augmente à 19,8 Hz.

- Jeu de données ID-3: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de la bague intérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 23,1 Hz à 15,7 Hz, puis augmente à 23,6 Hz.

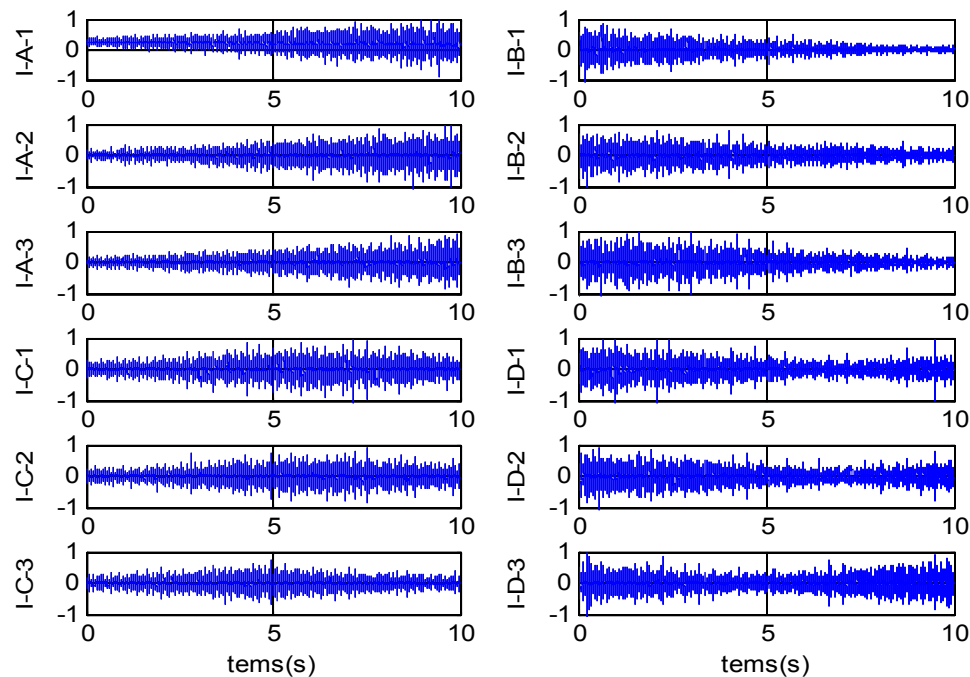


Figure IV-3: Signal temporel d'un roulement défectueux (défaut de la bague intérieure)

IV.4.3 Etat défectueux (défaut de la bague externe) :

- Jeu de données OA-1: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de bague extérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 14,8 Hz à 27,1 Hz.
- Jeu de données OA-2: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de bague extérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 12,9 Hz à 23,0 Hz.
- Jeu de données OA-3: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de bague extérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 13,3 Hz à 26,3 Hz.
- Jeu de données OB-1: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de bague extérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 24,9 Hz à 9,8 Hz.

Chapitre IV : Diagnostic de défauts par traitement du signal

- Jeu de données OB-2: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de bague extérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 24,7 Hz à 10,2 Hz.
- Jeu de données OB-3: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de bague extérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 25,4 Hz à 10,3 Hz.
- Jeu de données OC-1: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de bague extérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 14,0 Hz à 21,7 Hz, puis diminue à 14,5 Hz.
- Jeu de données OC-2: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de bague extérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 14,0 Hz à 24,5 Hz, puis diminue à 19,8 Hz.
- Jeu de données OC-1: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de bague extérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement augmente de 14,2 Hz à 23,4 Hz, puis diminue à 17,6 Hz.
- Jeu de données OD-1: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de bague extérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 26,0 Hz à 18,9 Hz, puis augmente à 24,5 Hz.
- Jeu de données OD-2: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de bague extérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 25,2 Hz à 14,9 Hz, puis augmente à 19,5 Hz.
- Jeu de données OD-3: les données de vibration sont collectées à partir d'un roulement défectueux avec un défaut de bague extérieure et la vitesse de rotation de fonctionnement diminue de 25,5 Hz à 15,0 Hz, puis augmente à 19,6 Hz.

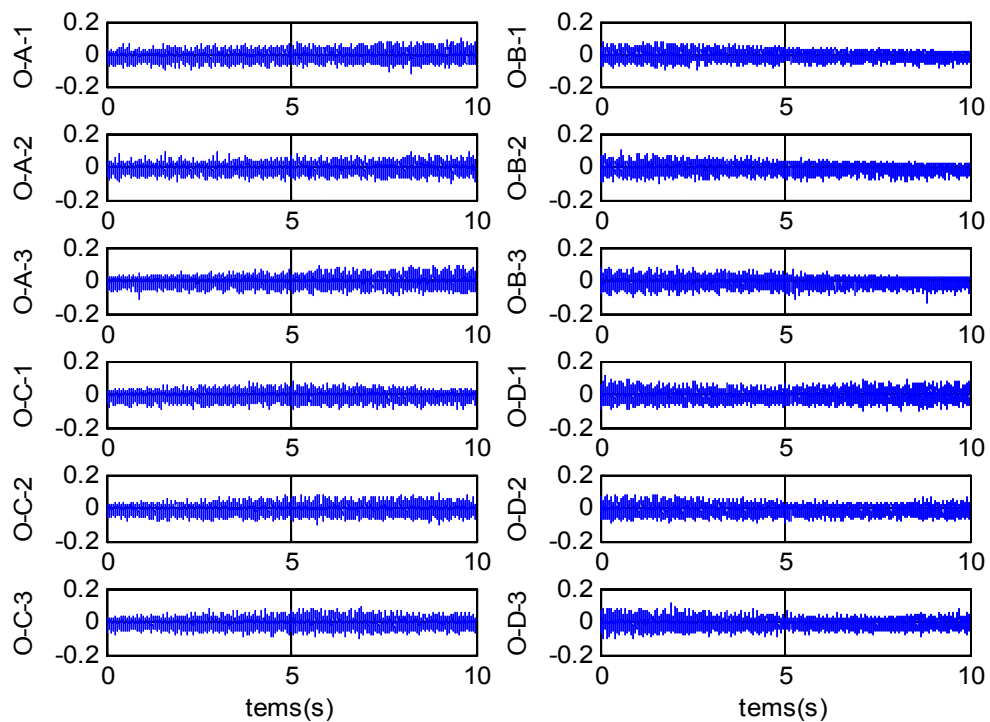


Figure IV-4: Signal temporel d'un roulement défectueux (défaut de la bague extérieure)

On remarque sur les figures précédentes une augmentation notable de l'amplitude du signal temporel du roulement défectueux par rapport au signal du roulement sain, le tableau suivant donne les valeurs de l'amplitude des signaux à crête à crête dans le cas maximum de vitesse et le cas minimum :

Tableau IV-3: l'amplitude des signaux à crête à crête

Etat De roulement \ Vitesse	minimum	Maximum
Sain	0.079	0.41
défectueux à la bague interne	0.26	1.21
défectueux à la bague externe	0.088	0.12

Des trois méthodes suivantes, Les figures représentent la comparaison des signaux du roulement à deux étapes :

- roulement sain et défectueux à la bague interne

Chapitre IV : Diagnostic de défauts par traitement du signal

➤ roulement sain et défectueux à la bague externe

IV.5 Analyse spectrale :

Les signaux spectraux suivants sont classés en fonction des conditions de changement de vitesse :

IV.5.1 Augmentation de la vitesse :

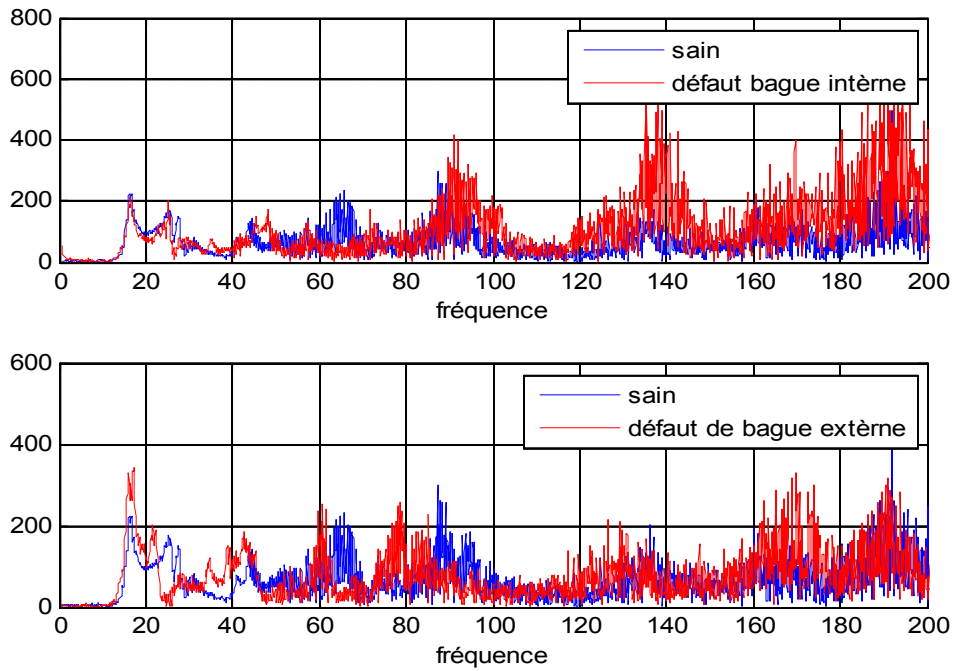


Figure IV-5: les signaux de spectre avec augmentation de la vitesse

IV.5.2 Diminution de la vitesse :

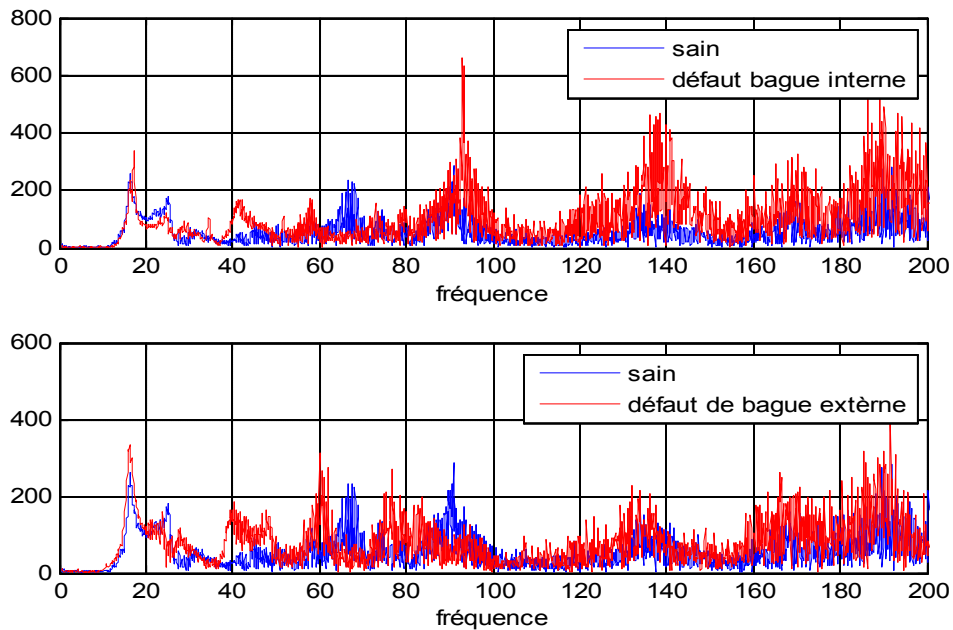


Figure IV-6: les signaux de spectre avec diminution de la vitesse

IV.5.3 Augmentation puis diminution de la vitesse :

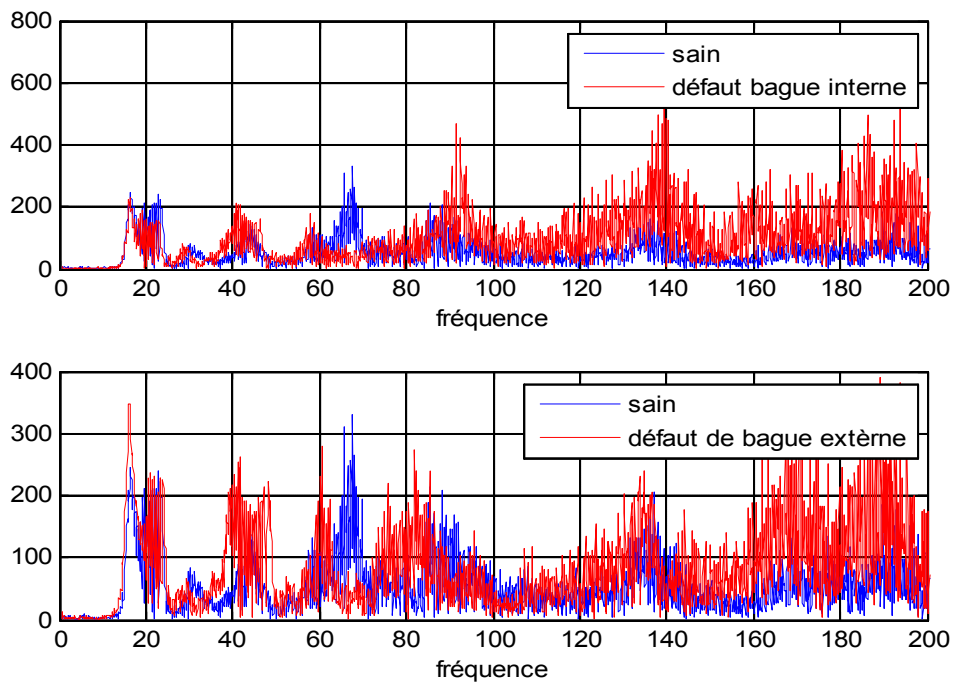


Figure IV-7: les signaux de spectre avec augmentation puis diminution de la vitesse

IV.5.4 Diminution puis augmentation de la vitesse :

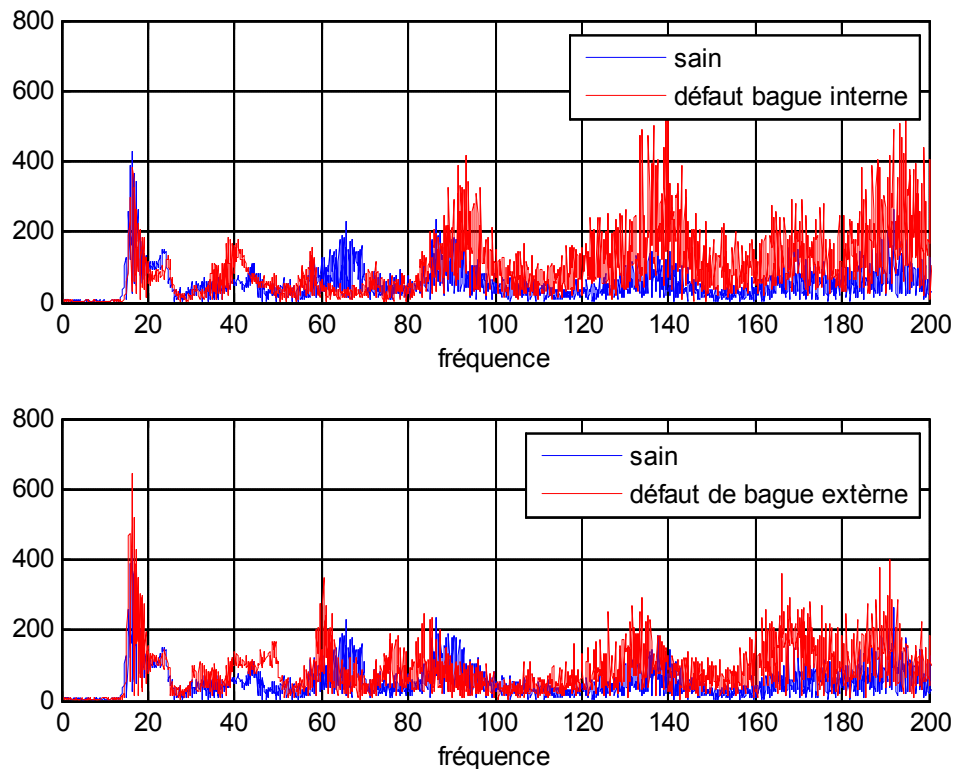


Figure IV-8: les signaux de spectre avec diminution puis augmentation de la vitesse

On note l'apparition des pics fréquentielles qui augmentent selon la variation entre les deux états (sain et défectueux) dans toutes les expériences pour chaque cas de changement de vitesse (croissant, décroissant, croissant puis décroissant, décroissant puis croissant) mais il est irrégulier et change avec les conditions changeantes de rotation. vitesse (conditions indiquées à l'étape précédente).

Le tableau suivant montre les spectres de fréquence optimale du signal de défaut classés selon les conditions de changements de vitesse

Chapitre IV : Diagnostic de défauts par traitement du signal

Tableau IV-4: les spectres de fréquence optimale du signal de défaut

étapes de vitesse	Etat du roulement	1ère pic du spectre	2ème pic du spectre	3ème pic du spectre	4ème pic du spectre
augmentation	Défaut sur la bague interne	91.8	139.6	191.2	
	Défaut sur la bague externe	59.8	78.8	134.9	169
Diminution	Défaut sur la bague interne	92.5	138.6	194.2	
	Défaut sur la bague externe	60.3	78	131.7	166.5
Augmentation puis diminution	Défaut sur la bague interne	91.4	139.3	193.9	
	Défaut sur la bague externe	60.5	78	130	168
diminution puis augmentation	Défaut sur la bague interne	92.8	140	194.2	
	Défaut sur la bague externe	60.4	75.5	132.1	166

Chapitre IV : Diagnostic de défauts par traitement du signal

IV.6 Analyse cepstrale:

Dans cette méthode, les figures sont disposées dans la même position que dans la méthode précédente.

IV.6.1 Augmentation de la vitesse :

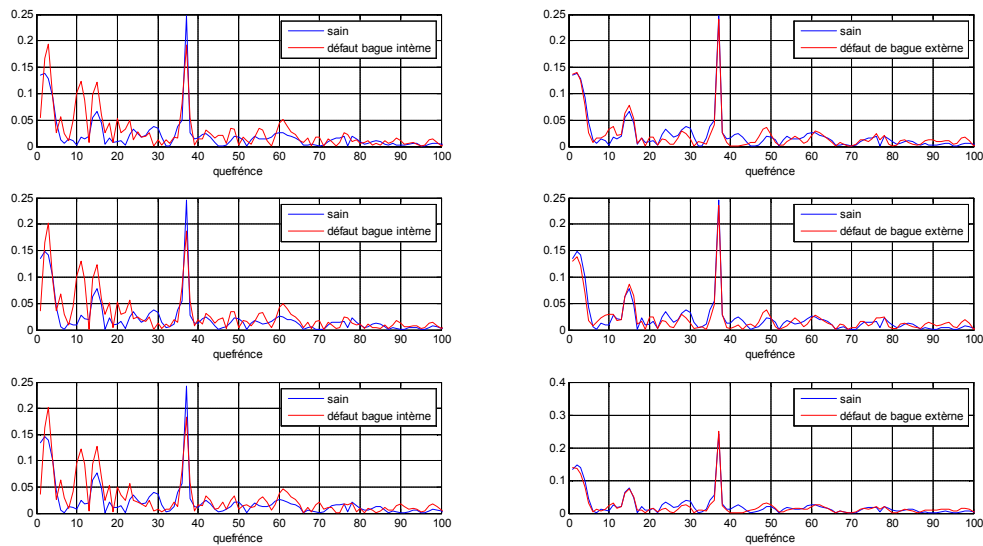


Figure IV-9: les signaux de cepstre avec augmentation de la vitesse

IV.6.2 Diminution de la vitesse :

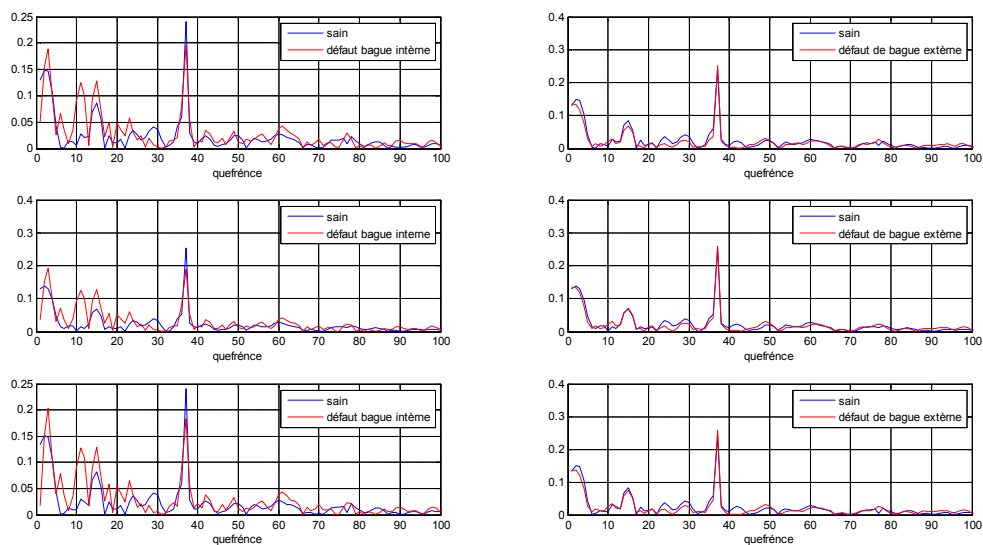


Figure IV-10: les signaux de cepstre avec diminution de la vitesse

IV.6.3 Augmentation puis diminution de la vitesse :

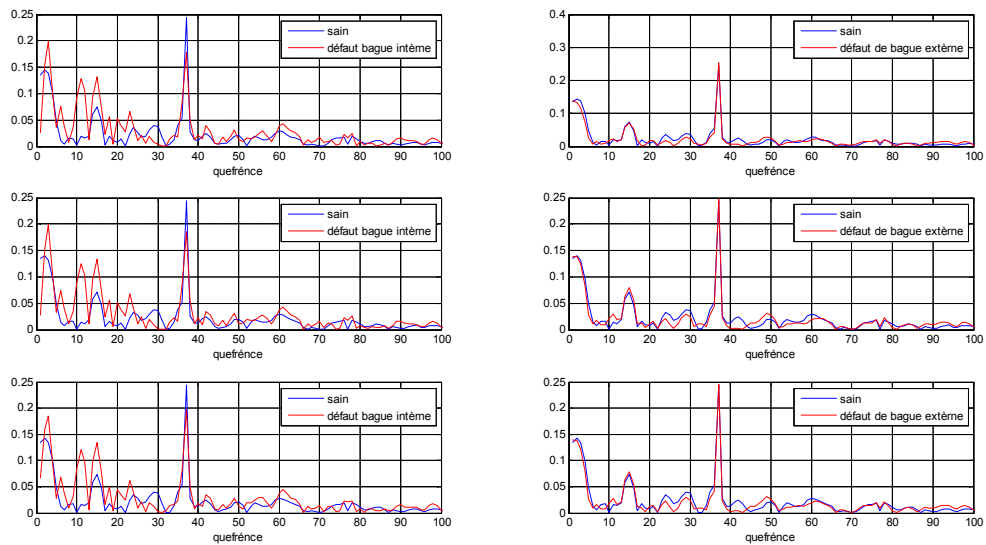


Figure IV-11: les signaux de cepstre avec augmentation puis diminution de la vitesse

IV.6.4 Diminution puis augmentation de la vitesse :

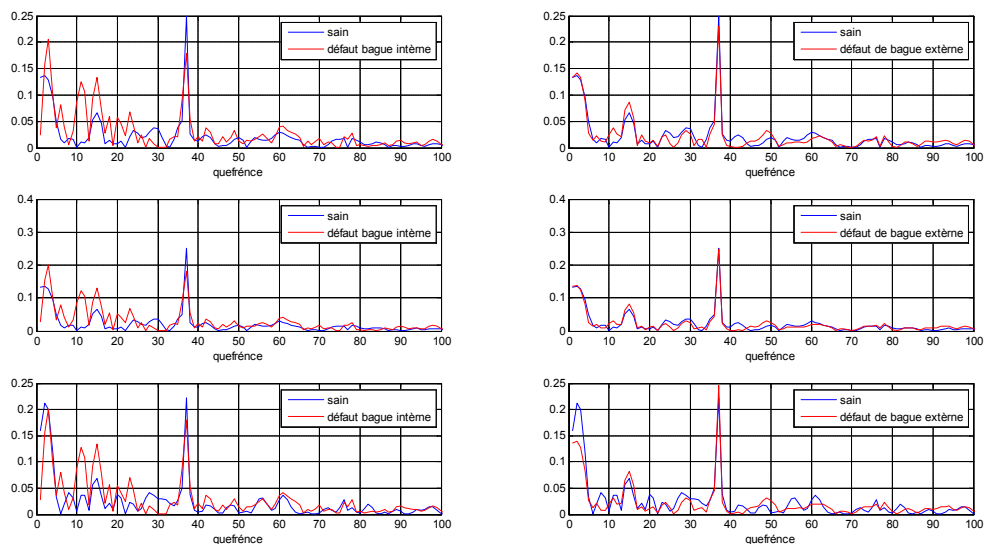


Figure IV-12: les signaux de cepstre avec diminution puis augmentation de la vitesse

Dans cette méthode, une correspondance apparaît entre les deux conditions du roulement sain et celle avec le défaut de la bague intérieure, parce que dans l'axe des 'x' le

Chapitre IV : Diagnostic de défauts par traitement du signal

cepstre représente le temps, donc ces pics représentent la variation de vitesse de rotation. En plus en présence d'un défaut dans la bague, les cepstres augmentent de niveaux.

IV.7 Analyse paramétrique :

IV.7.1 Augmentation de la vitesse :

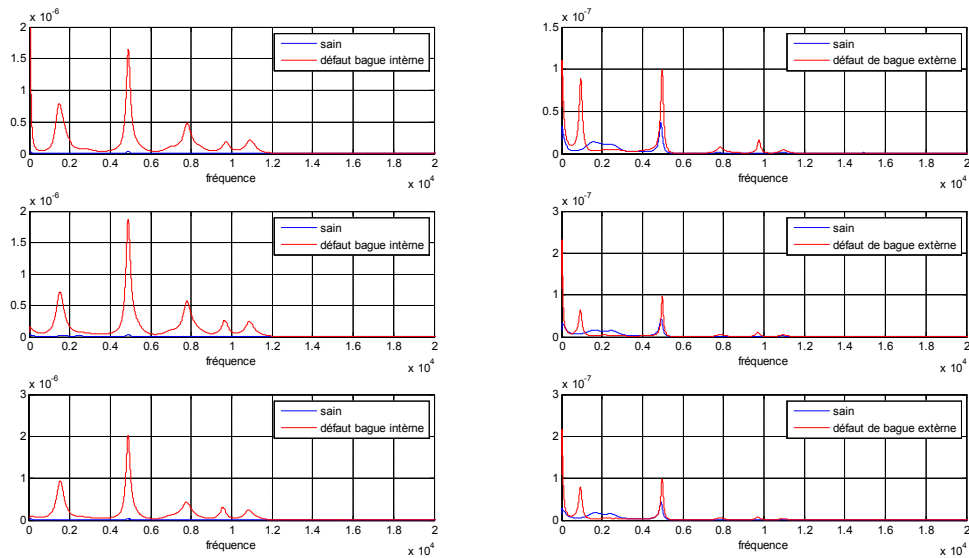


Figure IV-13: la densité spectrale avec augmentation de la vitesse

IV.7.2 Diminution de la vitesse :

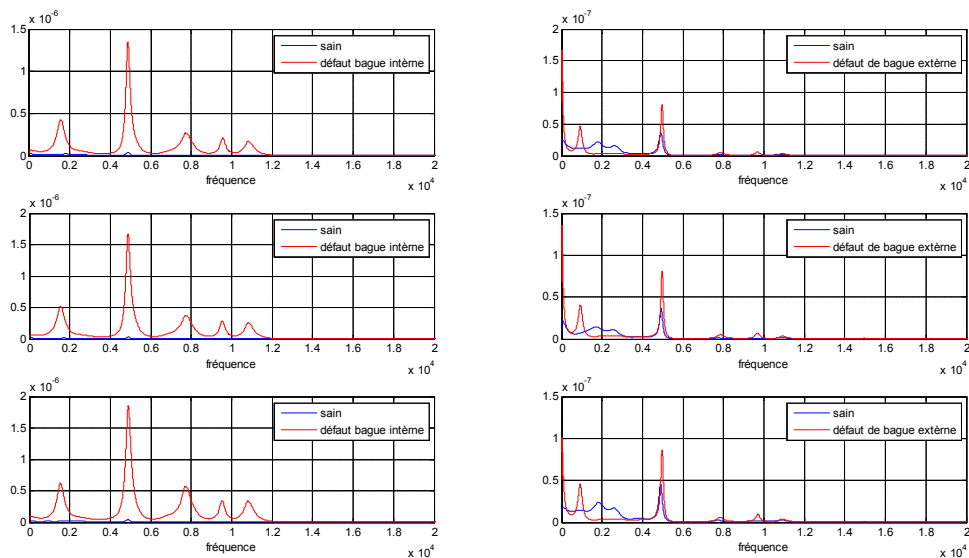


Figure IV-14: la densité spectrale avec diminution de la vitesse

IV.7.3 Augmentation puis diminution de la vitesse :

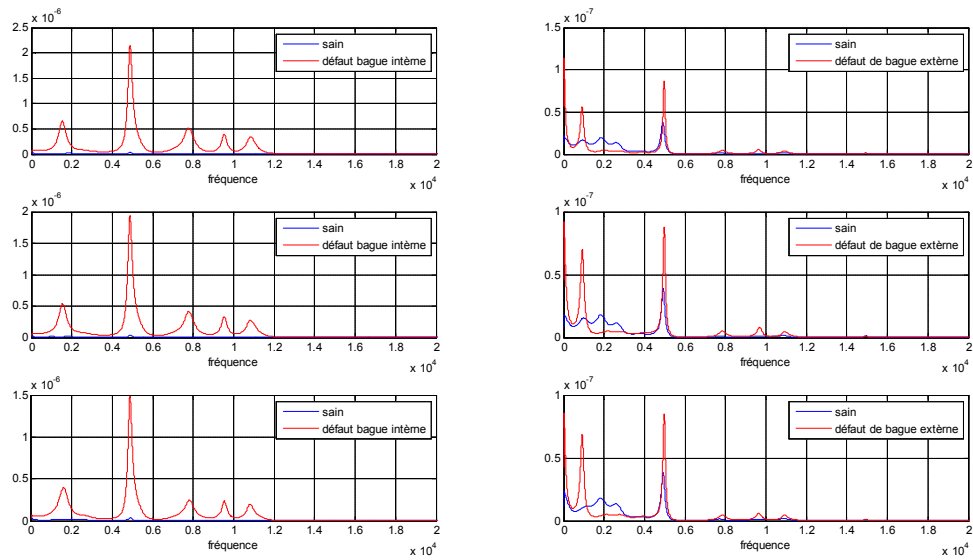


Figure IV-15: la densité spectrale avec augmentation puis diminution de la vitesse

IV.7.4 Diminution puis augmentation de la vitesse :

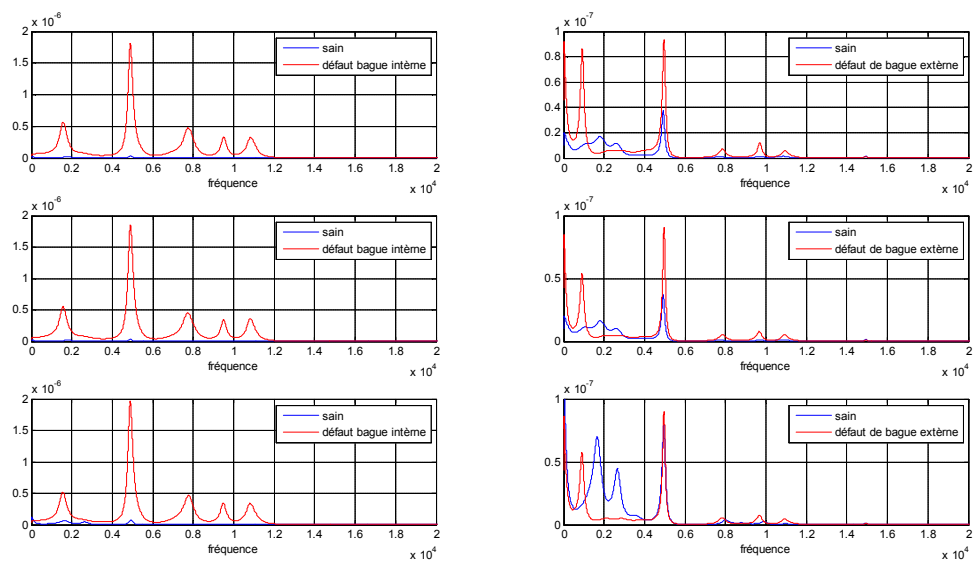


Figure IV-16: la densité spectrale avec diminution puis augmentation de la vitesse

Chapitre IV : Diagnostic de défauts par traitement du signal

Le spectre issu de l'analyse par un modèle autorégressif est lissé, ceci représente un avantage car il permet de réduire le nombre de raies d'un signal riche en fréquence qui est le cas d'un signal vibratoire.

La différence entre un état sain et défectueux est nettement visible sur tous les signaux traités. Les résultats obtenus sont très intéressants et concluant pour tout éventuel diagnostic.

IV.8 Analyse temps-fréquence :

Les signaux vibratoires recueillis sur des machines alternatives (tournantes) présentent une structure de type périodique ainsi qu'un autre type transitoire. La première regroupe principalement les réponses de la machine à une ou plusieurs excitations périodiques. Celles-ci proviennent de façon générale des parties tournantes de la machine. La deuxième contient les réponses à des excitations du type impulsif. Elles sont dues à des chocs. Un examen du signal temporel permet dans la plupart du temps de délimiter la portion intéressante recueillie pour un cycle machine. La caractérisation peut alors s'effectuer sur cette portion du signal vibratoire. L'énergie est non seulement localisée suivant un axe temporel mais aussi suivant un axe fréquentiel. L'analyse temps-fréquence permet d'effectuer ce type d'analyse. En particulier, les représentations temps-fréquence permettent d'améliorer les connaissances sur des phénomènes physiques qui se déroulent lors de différentes phases du cycle machine. Parmi les nombreuses méthodes, nous nous sommes d'abord intéressés au spectrogramme ou transformée de Fourier à court terme (TFCT) qui constitue certainement la forme la plus simple des RTF.

Cela nous permet de caractériser conjointement l'événement intéressant suivant un axe temporel mais aussi suivant un axe fréquentiel. On trouve d'ailleurs de plus en plus d'applications concernant ces techniques comme moyen de contrôle lors de certaines phases de fonctionnement de la machine. Un des problèmes majeurs de la TFCT réside dans le choix de la longueur de la fenêtre d'analyse $h(t)$. Une fenêtre courte autorise une bonne résolution temporelle au détriment de la résolution fréquentielle et inversement pour une fenêtre longue.

IV.8.1 Augmentation de la vitesse :

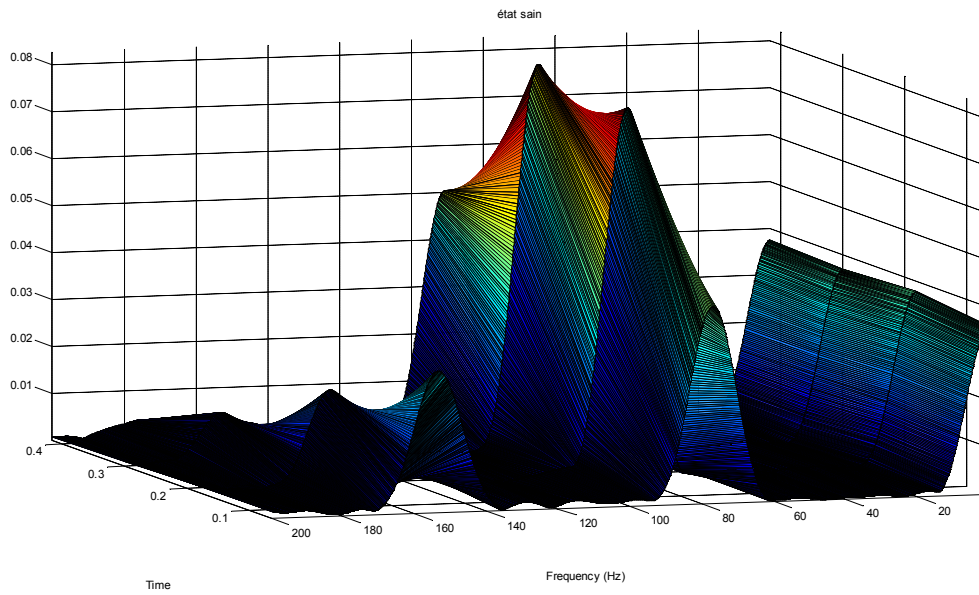


Figure IV-17: le spectrogramme de signal de roulement sin avec augmentation de la vitesse

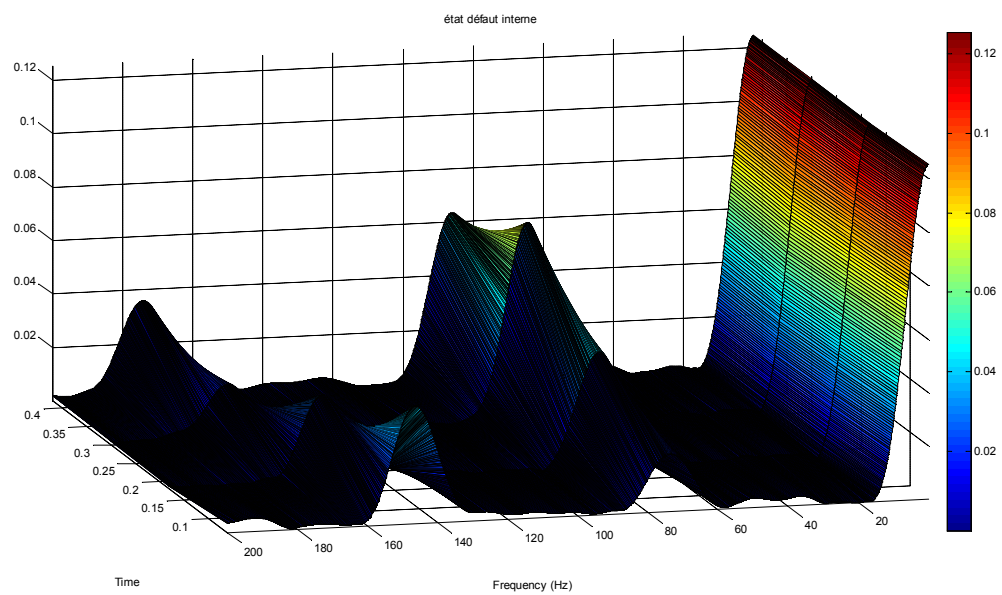


Figure IV-18: le spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec augmentation de la vitesse

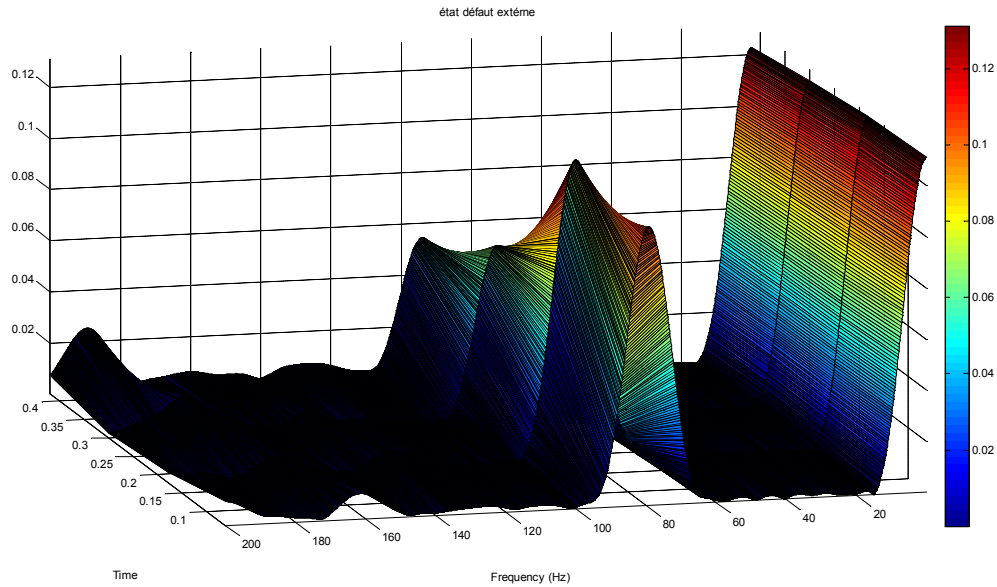


Figure IV-19: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec augmentation de la vitesse

IV.8.2 Diminution de la vitesse :

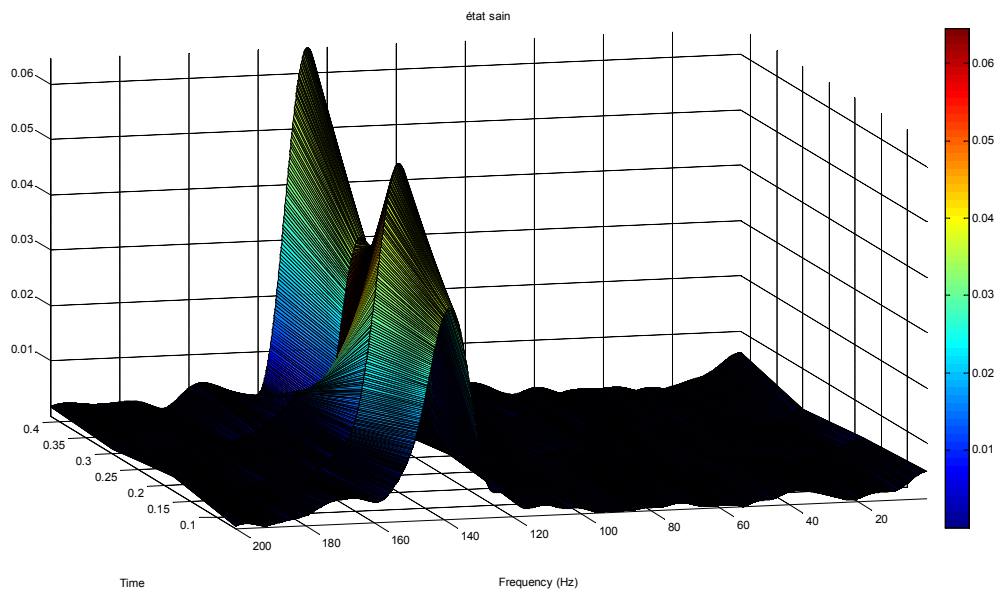


Figure IV-20: spectrogramme de signal de roulement sain avec diminution de la vitesse

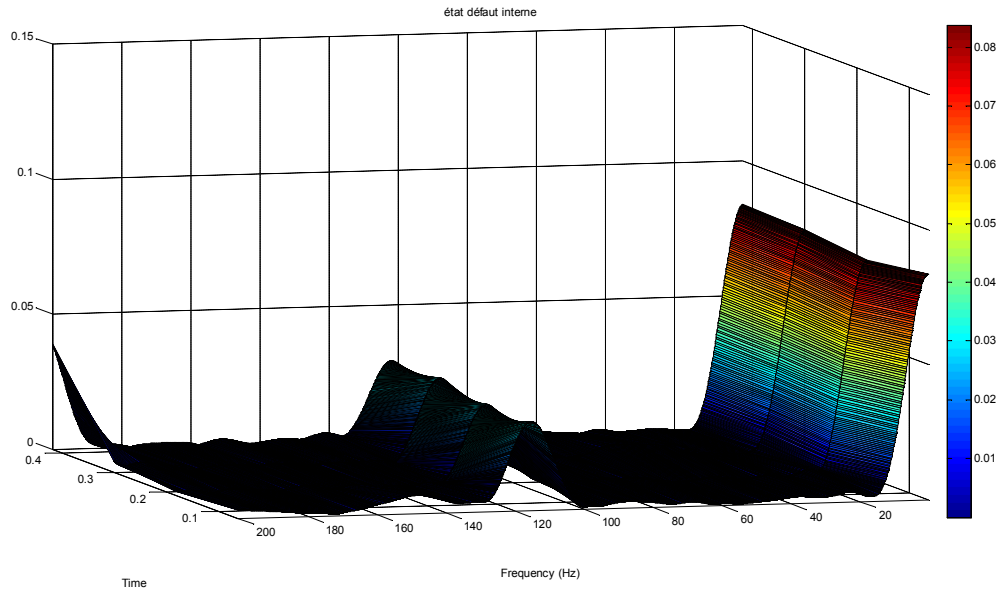


Figure IV-21: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec diminution de la vitesse

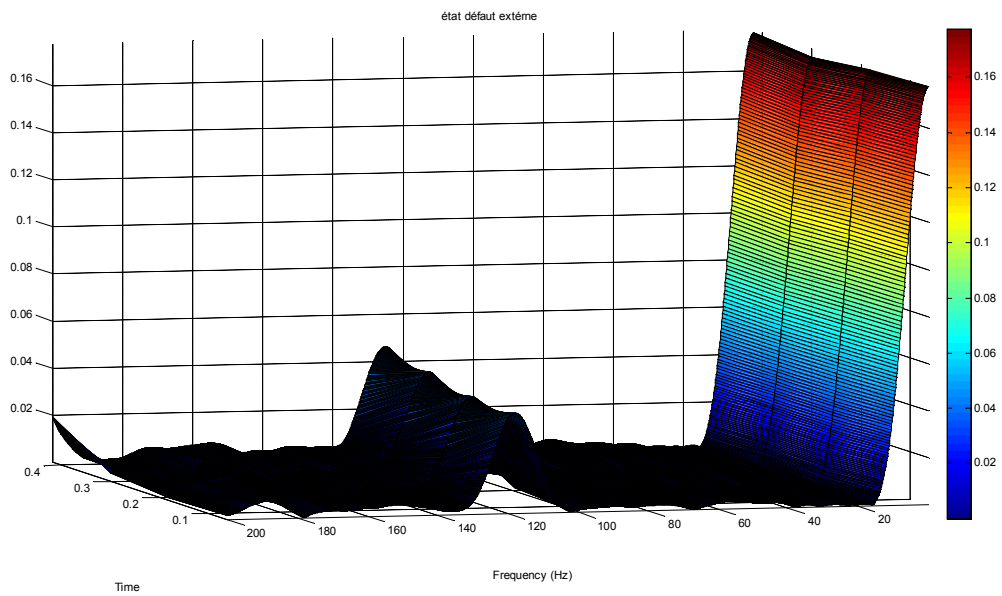


Figure IV-22: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec diminution de la vitesse

IV.8.3 Augmentation puis diminution de la vitesse :

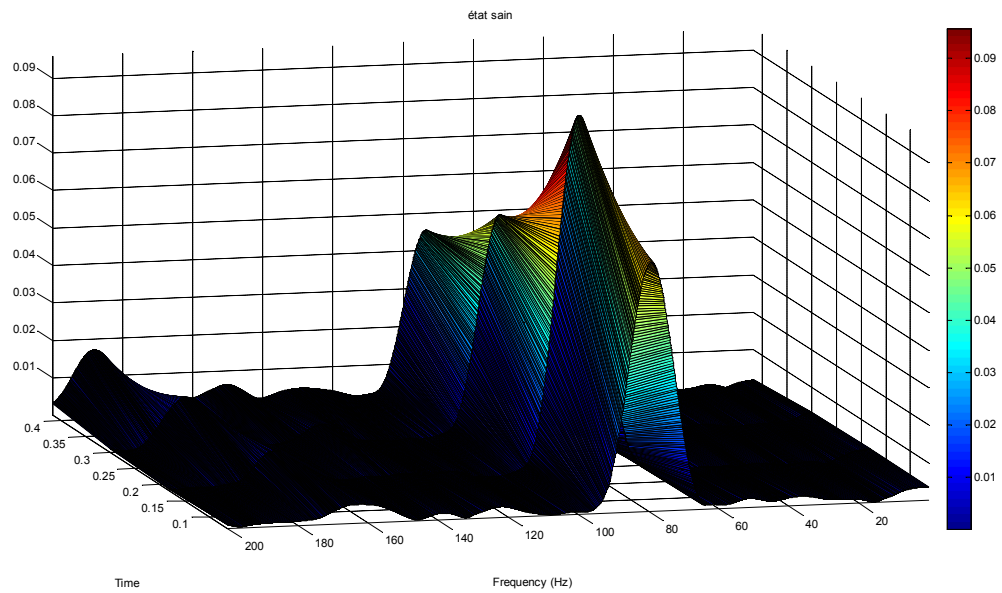


Figure IV-23: spectrogramme de signal de roulement sain avec augmentation puis diminution de la vitesse

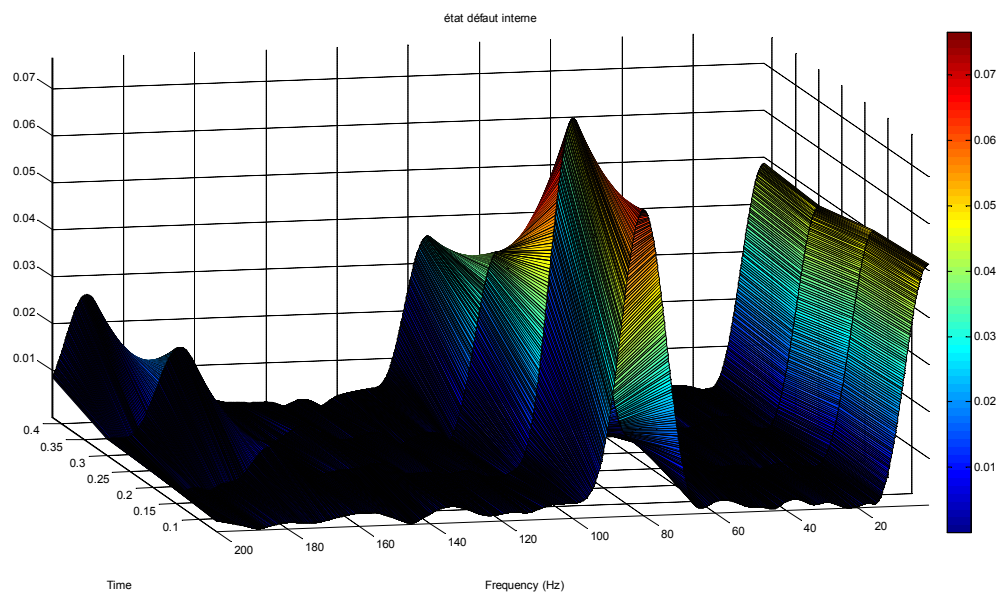


Figure IV-24: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec augmentation puis diminution de la vitesse

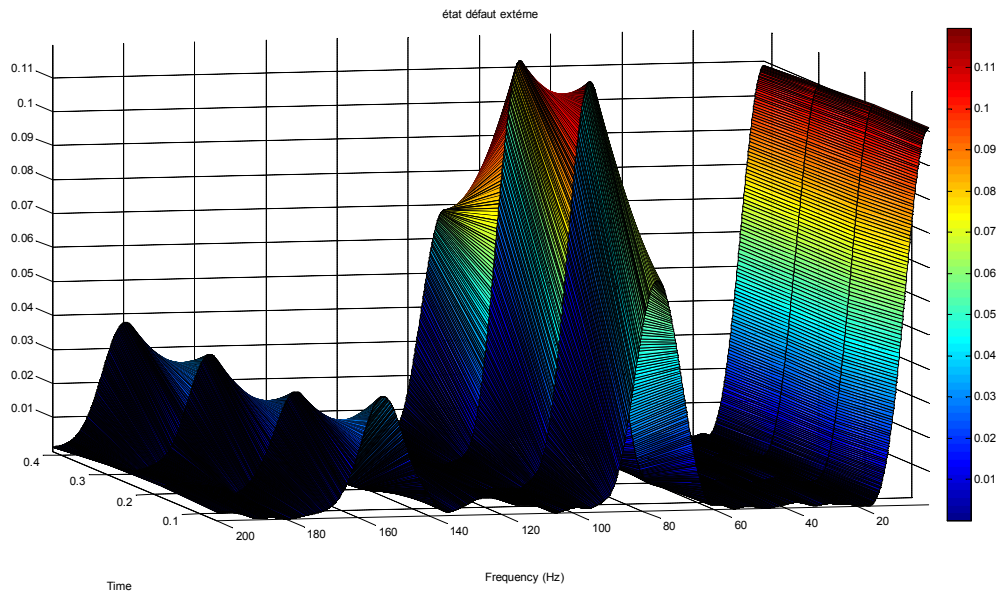


Figure IV-25: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec augmentation puis diminution de la vitesse

IV.8.4 Diminution puis augmentation de la vitesse :

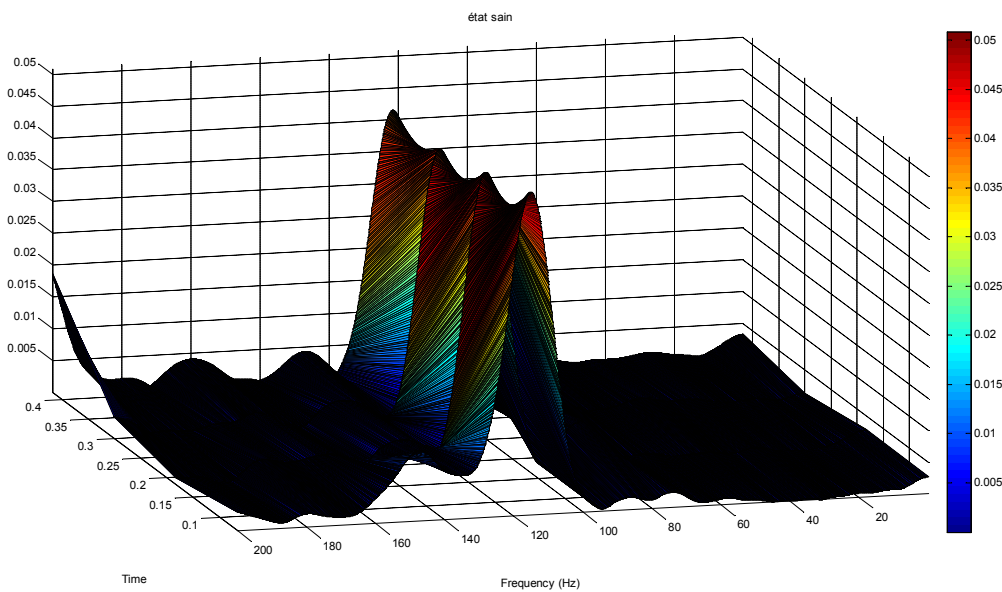


Figure IV-26: spectrogramme de signal de roulement sain avec diminution puis augmentation de la vitesse

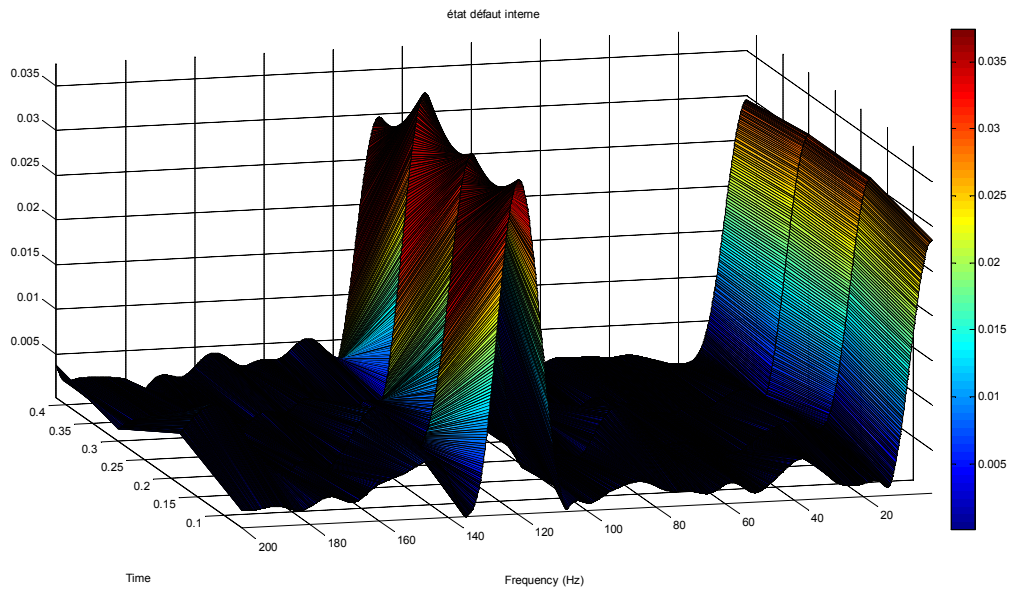


Figure IV-27: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec diminution puis augmentation de la vitesse

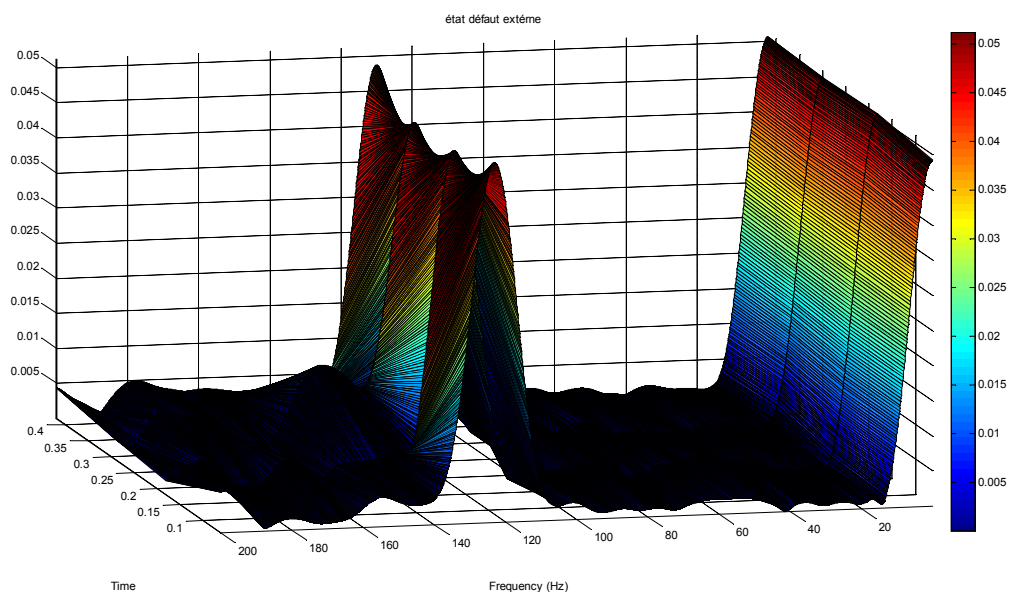


Figure IV-28: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec diminution puis augmentation de la vitesse

Dans beaucoup de cas, vibrations et/ ou chocs donnent naissance à des signaux non-stationnaires dont l'analyse requiert des outils spécifiques allant au-delà de ce que permettent les méthodes de type FOURIER. La transformée de TFCT est parmi ces différents outils disponible. La TFCT permet de caractériser les signaux vibratoires non-stationnaires.

Chapitre IV : Diagnostic de défauts par traitement du signal

Dans notre cas la TFCT a permis de mettre en évidence l'évolution dans le temps de la modulation en présence de défauts ou dans le cas sain mais de point de vue diagnostic, il est difficile de donner un bon pronostic.

Selon notre humble avis ce n'est pas toujours la méthode récente qui donne le bon diagnostic.

La méthode temps-fréquence donne une bonne caractérisation du signal mais son application reste à désirer. La seule chose qui peut apporter cette méthode est la mise en évidence des fréquences de résonances, le complément d'analyse à cette méthode et la sélection des bandes de fréquences puis appliquer une autre méthode pour extraire le maximum d'information sur l'état de l'élément mécanique.

IV.9 Conclusion :

Dans ce chapitre on a appliqué cinq méthodes de traitement de signal, les résultats obtenus sont encourageants puisque tout défaut se caractérise par un changement de niveau sur le signal dans le domaine temporel ou fréquentiel.

Les résultats obtenus par la modélisation autorégressive et le cepstre sont les plus convaincants. Néanmoins il existe d'autres méthodes à explorer pour faire un bon diagnostic.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Grâce aux efforts des émetteurs et à la coordination entre les différents domaines, il a grandement facilité la vie humaine dans tous les domaines, car le diagnostic des défauts mécaniques en traitant le signal a contribué à réduire leur effets, à accélérer les opérations de maintenance et à éliminer les efforts physiques.

Le changement des conditions internes et externes des machines industrielles, y compris celles de rotation a conduit à de nouvelles idées pour les chercheurs scientifiques, qui les ont fait développer des techniques de traitement du signal et en découvrir de nouvelles, et parmi ces conditions se trouve le changement de la vitesse de rotation, comme c'est le cas de notre modeste travail. Nous avons appliqué cinq méthodes sur les données réelles d'une expérience menée sur des roulements dans le but de diagnostiquer leurs défauts en qualité et en quantité.

Quatre chapitres ont été préparés. Dans le premier chapitre, l'entretien de ses types a été défini. Dans le second, nous avons fait une définition générale du signal vibratoire et de ses techniques de traitement.

Le troisième chapitre présente des concepts sur les machines tournantes et les caractéristiques des roulements défectueux et comment les surveiller, et le dernier est une application des techniques de traitement aux données expérimentales. Il est devenu clair pour nous que les conditions de changement de vitesse ont conduit à l'incapacité de certaines techniques à diagnostiquer le défaut.

Les résultats obtenus diffèrent d'une méthode à une autre, les meilleurs résultats sont obtenus par l'analyse cepstrale et modélisation autorégressive.

L'analyse temps-fréquence permet bien de caractériser le signal mais de point de vue diagnostic il est difficile d'extraire des informations qui peuvent être en bonne corrélation avec le défaut, selon notre avis cette méthode nécessite un traitement complémentaire qui se focalise sur une bande fréquentielle caractériser par l'analyse temps fréquence.

A l'issu de ce projet de fin étude, nous avons pu combler nos lacunes de formation et de maitriser un nouveau domaine qui est le diagnostic des machines tournantes par analyse du signal vibratoire, tres important dans l'industrie.

Bibliographie

- [1] Mohamed EL Habib Boukhobza, Application du traitement du signal pour le suivi des défauts de composants mécaniques soumis à des vibrations, Mémoire de Magister 2010, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf,
- [2] Oustani Mebrouk Mokhtar and Mohammed Nedjaa, Etude de maintenance preventive d'unturbocompresseur par analyse des huiles, mémoire master professionnel 2014, Université Kasdi Merbah .
- [3] MEDJEKDOUD Yahia and LACENE Ferhat, Détection des défauts mécaniques d'une machine tournante à une vitesse variable, Mémoire de Master 2020, Université Abderrahmane Mira-Bejaïa.
- [4] Hacem Khirani, diagnostic des machines tournantes par traitement de signal vibratoire, memoire de master 2015, Universite Amar Thelidji – Laghouat.
- [5] Kahina Boucherk and Naima Hamdidi, Traitement des signaux vibratoires :Application au diagnostic des défaillances, MEMOIRE DE Master 2009, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERY, TIZI-OUZOU.
- [6] Younes Debbah, , Cours demécanique de vibration, Université des Frères Mentouri Constantine.
- [7] Rachid Chaib, Contribution A L'optimisation De La Maintenance Conditionnelle Par L'analyse Vibratoire, Thèse De Doctorat 2018, Universite Mentouri De Constantine,
- [8] Rasolofondraibe Lanto, Extraction des paramètres et classification dynamique dans le cadre de la détection et du suivi de défaut de roulements, thèse de doctorat 2016, université de reims champagne-ardenne.
- [9] Mohamed Gheribi, Analyse de quelques défaillances mécaniques d'une machine tournante industrielle et solutions proposées, Mémoire de Master2013, UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA.
- [10] Souhayb Kass, Diagnostic Vibratoire Autonome des Roulements, THÈSE de Doctorat 2019, UNIVERSITE DE LYON.

Bibliographie

- [11] Foued Landolsi, cours de techniques de surveillance (étude des principaux défauts) Université Saad Dahleb Blida.
- [12] https://fr.mathworks.com/help/predmaint/ug/Rolling-Element-Bearing-Fault-Diagnosis.html?searchHighlight=dataInner.bearing.gs&s_tid=srchtitle2021
- [13] Mohammed Mr. HACHEMI, Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration des machines tournantes, Mémoire Master 2012, Université de Tlemcen.
- [14] Ilyes Khelf, diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificielle, Thèse de Doctorat 2014, Université Badj Mokhtar - Annaba.
- [15] AYAD Mouloud, recherche de signatures robustes des défauts dans une machine tournante à travers l'analyse de signaux vibratoires, Thèse de Doctorat 2015, Université Ferhat Abbas – Sétif.
- [16] Nazim Adel Refes, Diagnostic des défauts de roulements par analyse spectrale, , mémoire de master, 2016, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [17] Oulmane Abdelhak, Surveillance Et Diagnostic Des Défauts Des Machines Tournantes Dans Le Domaine Temps-Fréquences Utilisant Les Réseaux De Neurones Et La Logique Floue, Thèse de doctor 2014, Université De Montréal.
- [18] Thevenot Vincent, Contribution à la maîtrise des phénomènes vibratoires en usinage de parois minces : Application à l'usinage de pales aéronautiques, Thèse de doctorat 2005, Université De Montréal.
- [19] RMILI W, Suivi d'usure des outils de coupe en tournage par analyse vibratoire, PFE 2006, Université François Rabelais de Tours.
- [20] Huan Huang Natalie Baddour, Bearing vibration data collected under time-varying rotational speed conditions, Data in Brief Vol 21, December 2018, pp 1745-1749
- [22] Brahim GAGI and ELHachemi SAHRAOUI, Détection des défauts des aubes des turbines par analyse du signal vibratoire et acoustique, mémoire de master 2018, Université Amar Thelidji.
- [23] CHAIB Sid Ali. BOUSSAIDI Azeddine, détection et caractérisation des défauts ,

Bibliographie

Mémoire de Master, 2016, Université M'hamed Bougara Boumerdes.

[24] Arquès Philippe, *Diagnostic prédictif et défaillances des machines: théorie, traitement, analyse, reconnaissance, prédiction.*: Editions TECHNIP, 2009.

[25] DJAMAL ZAROOUR, Approche numérique et expérimentale d'aide à la détection des défauts dans le cadre d'une maintenance préventive conditionnelle par l'analyse vibratoire : application aux roulements, Thèse de Doctorat 2019, Université Des Frères Mentouri - Constantine 1.

ANNEXE A

Analyse spectrale :

Augmentation de la vitesse :

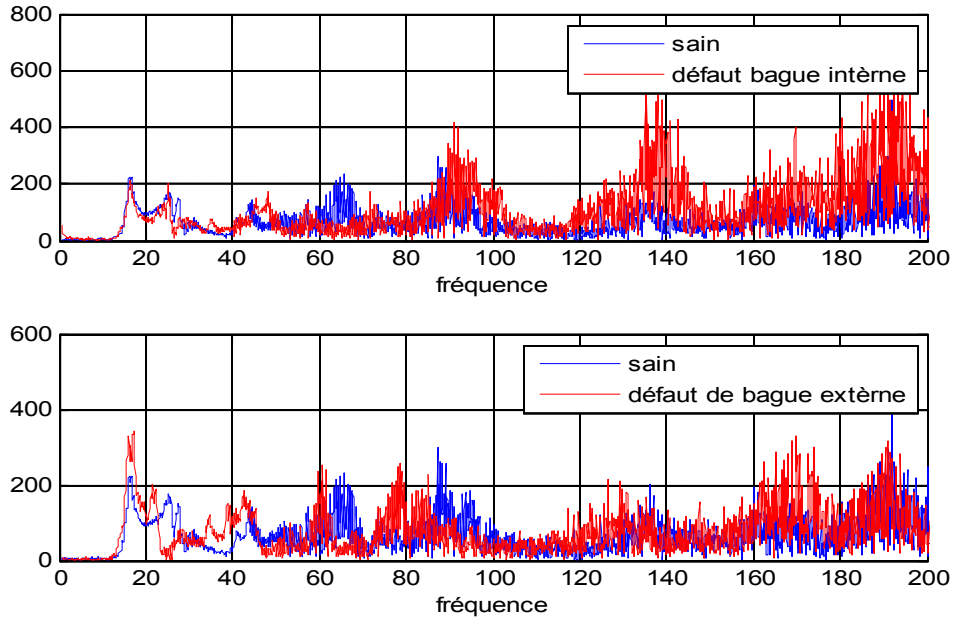


Figure: les signaux de spectre avec augmentation de la vitesse

Diminution de la vitesse :

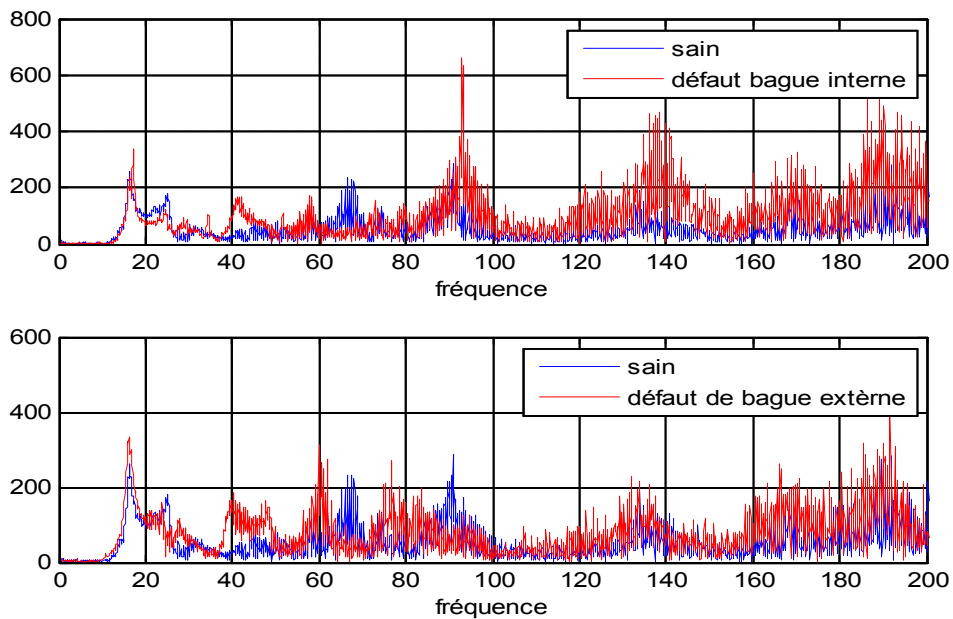


Figure: les signaux de spectre avec diminution de la vitesse

ANNEXE A

Augmentation puis diminution de la vitesse :

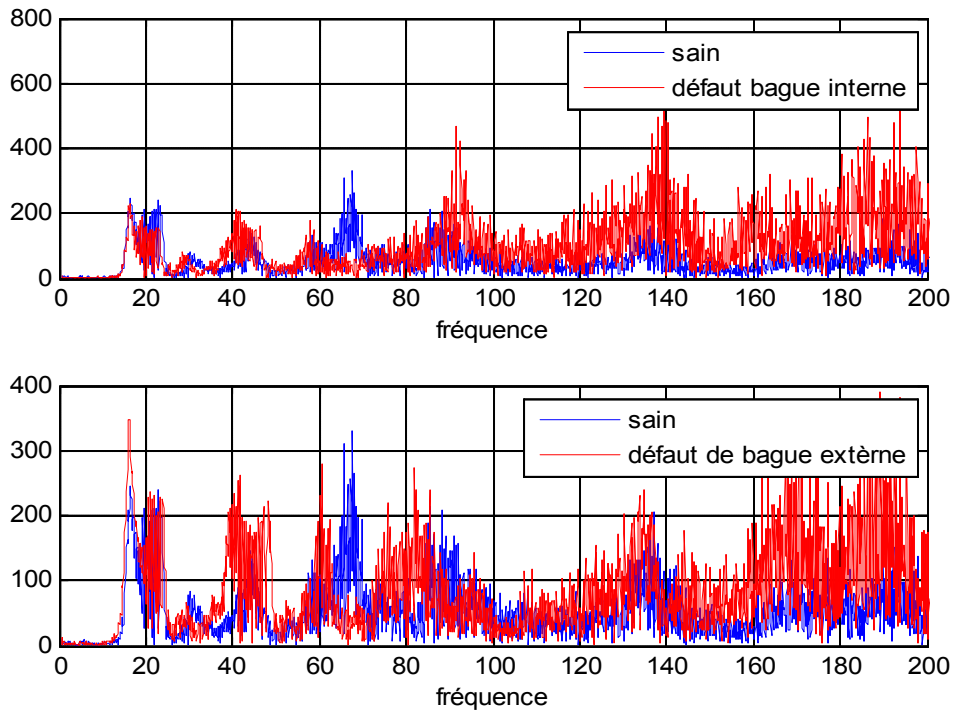


Figure: les signaux de spectre avec augmentation puis diminution de la vitesse

Diminution puis augmentation de la vitesse :

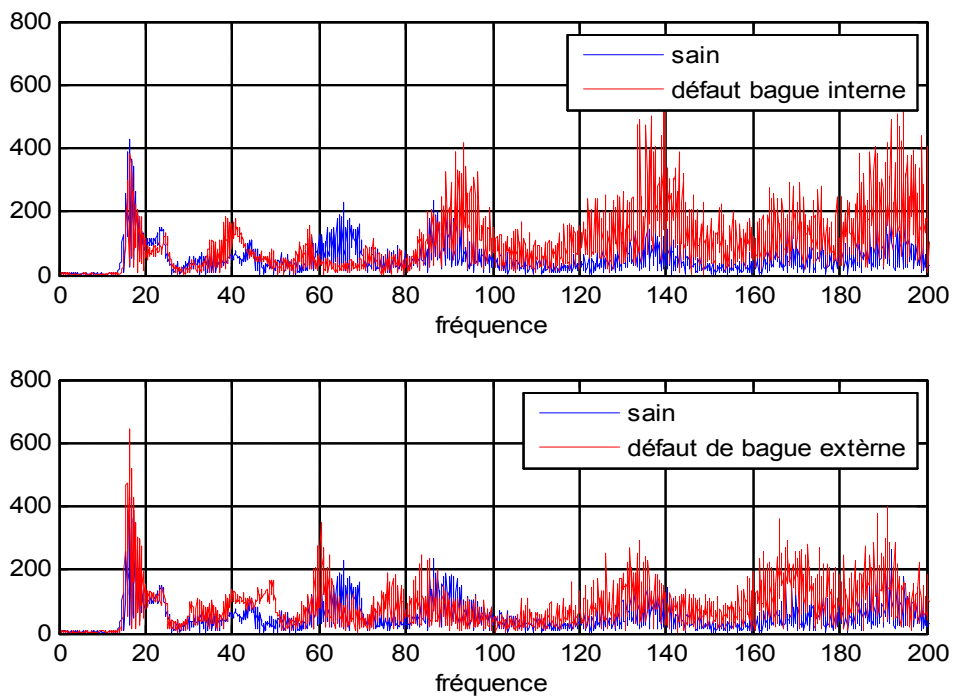


Figure: les signaux de spectre avec diminution puis augmentation de la vitesse

ANNEXE B

Analyse tempe-fréquence :

Augmentation de la vitesse :

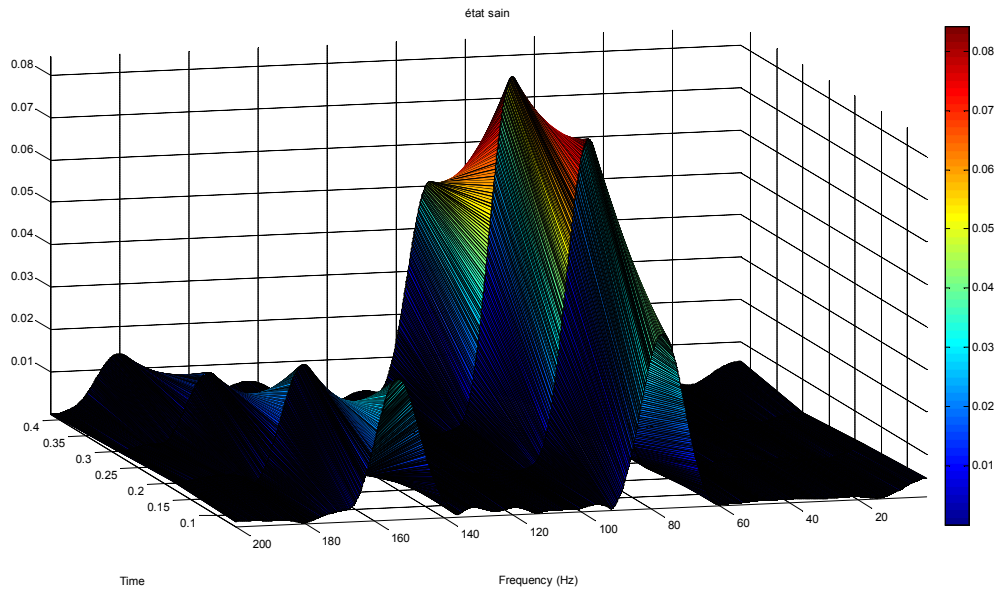


Figure : le spectrogramme de signal de roulement sin avec augmentation de la vitesse

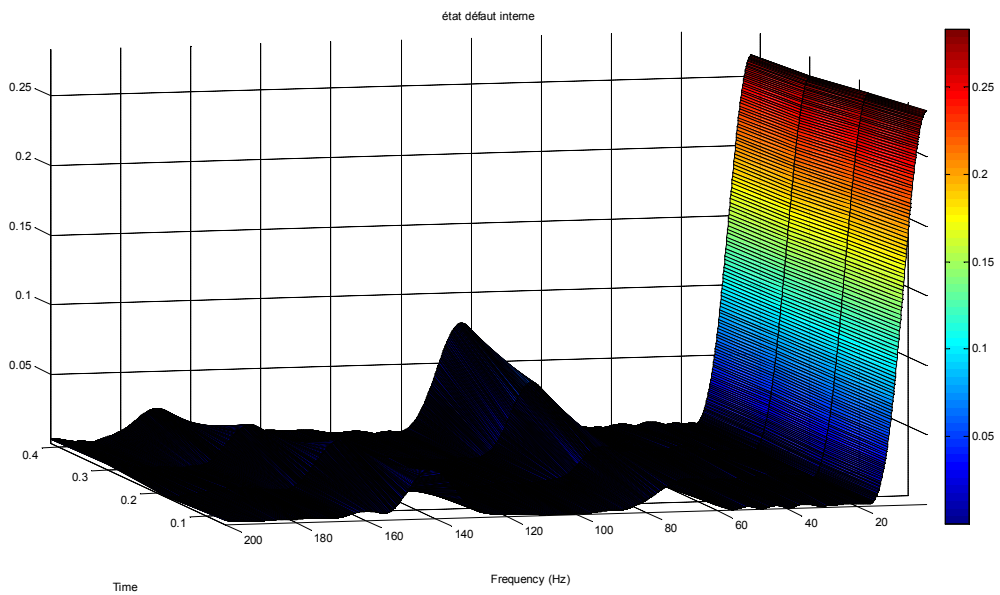


Figure: le spectrogramme de signal de roulement defectueux par la bague interne avec augmentation de la vitesse

ANNEXE B

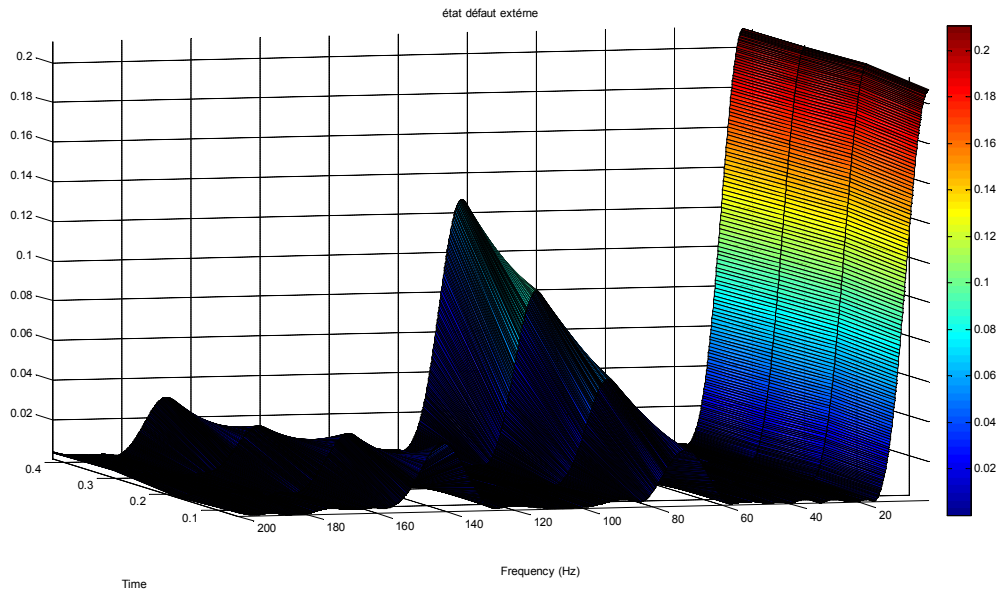
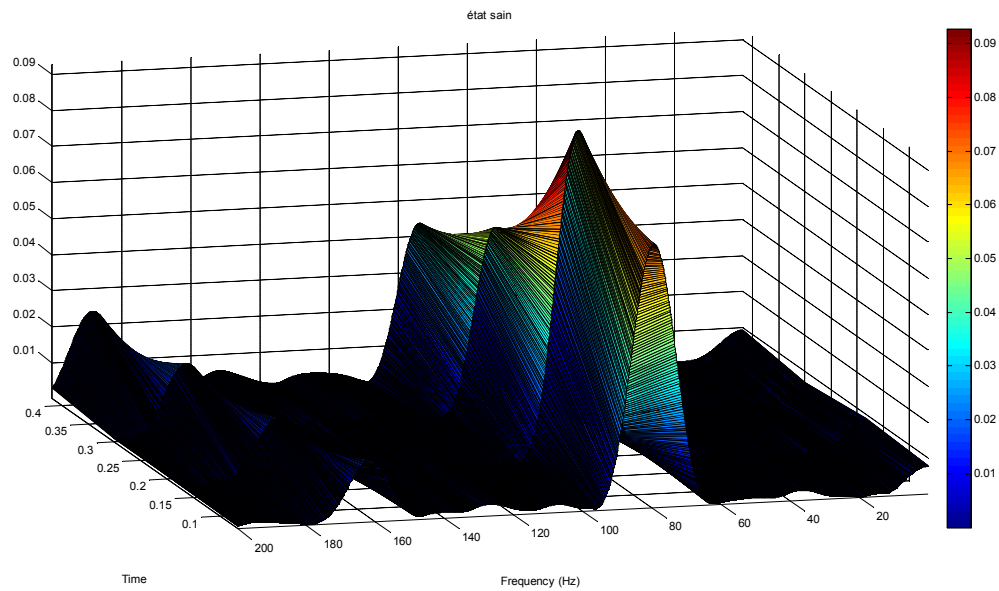


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec augmentation de la vitesse



: le spectrogramme de signal de roulement sin avec augmentation de la vitesse

ANNEXE B

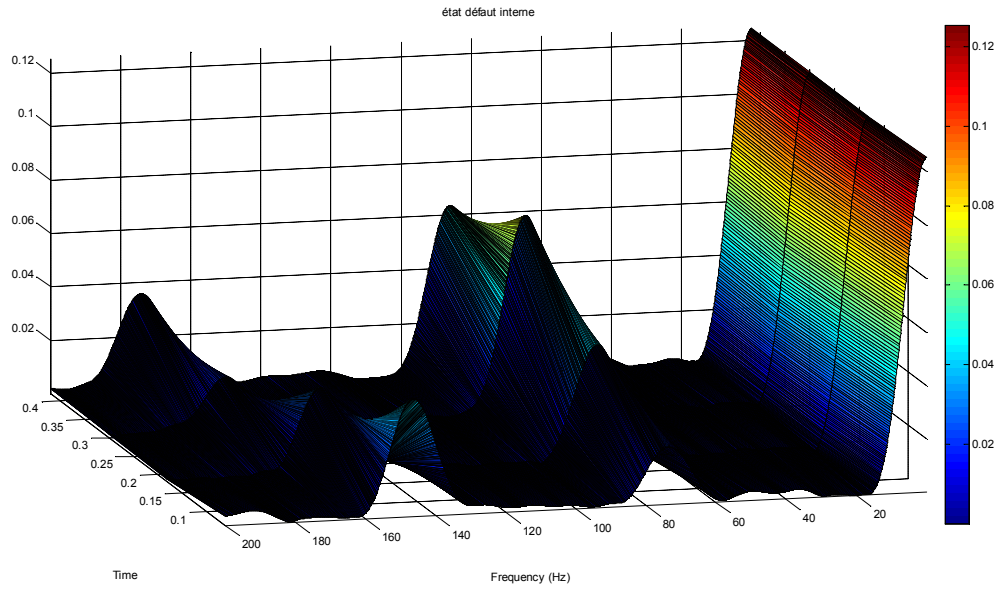


Figure: le spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec augmentation de la vitesse

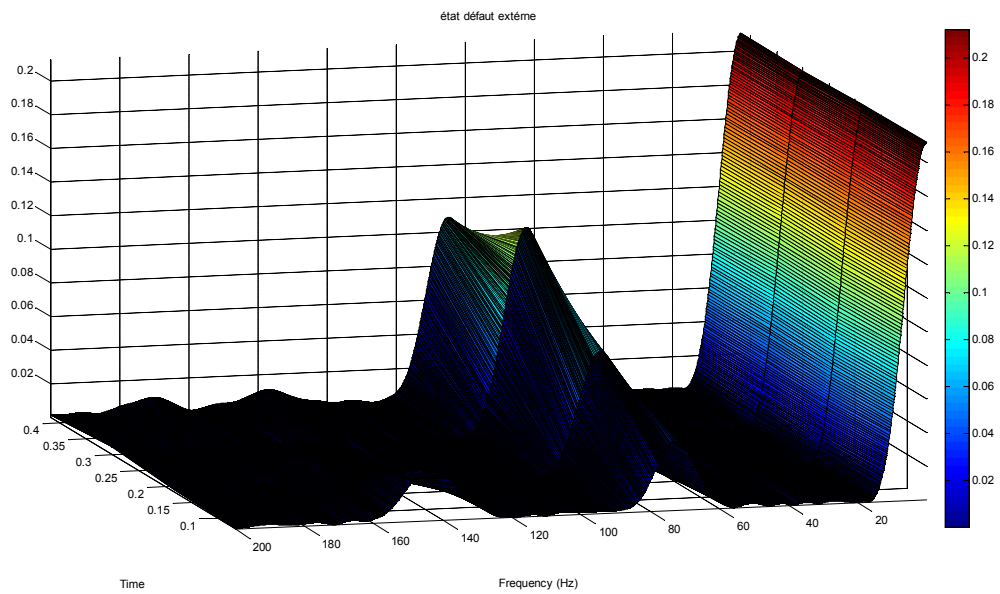


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec augmentation de la vitesse

Diminution de la vitesse :

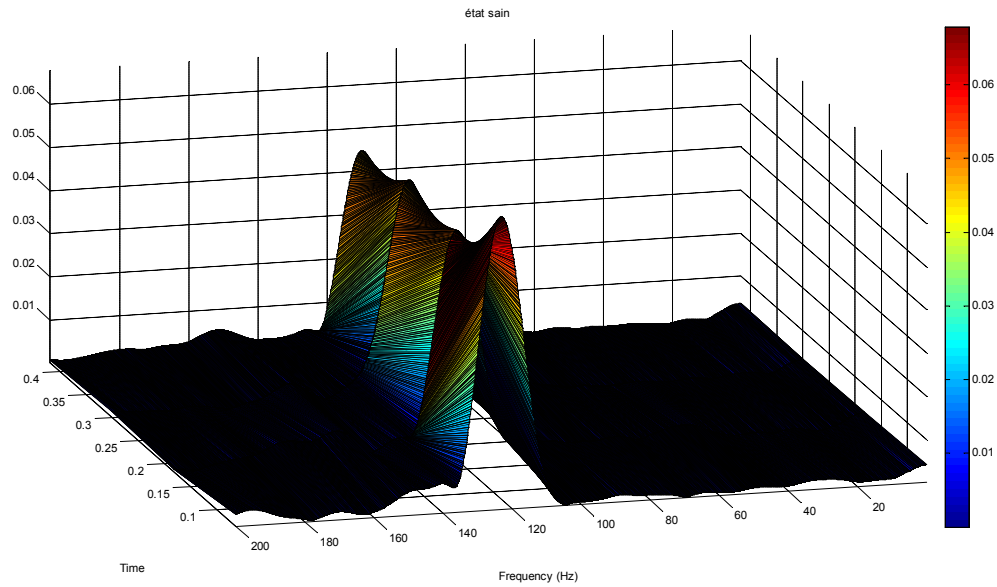


Figure: spectrogramme de signal de roulement sain avec diminution de la vitesse

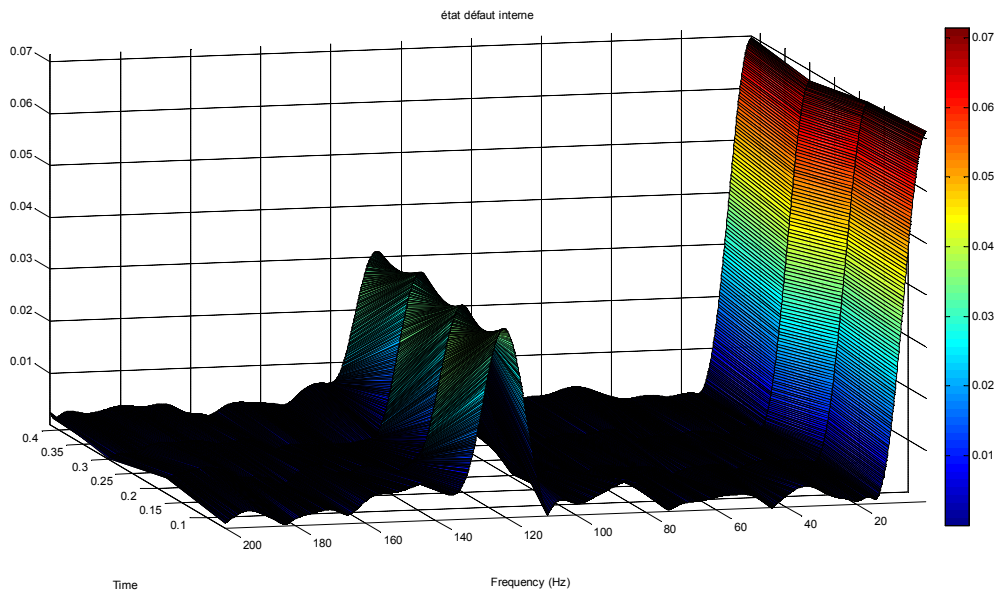


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec diminution de la vitesse

ANNEXE B

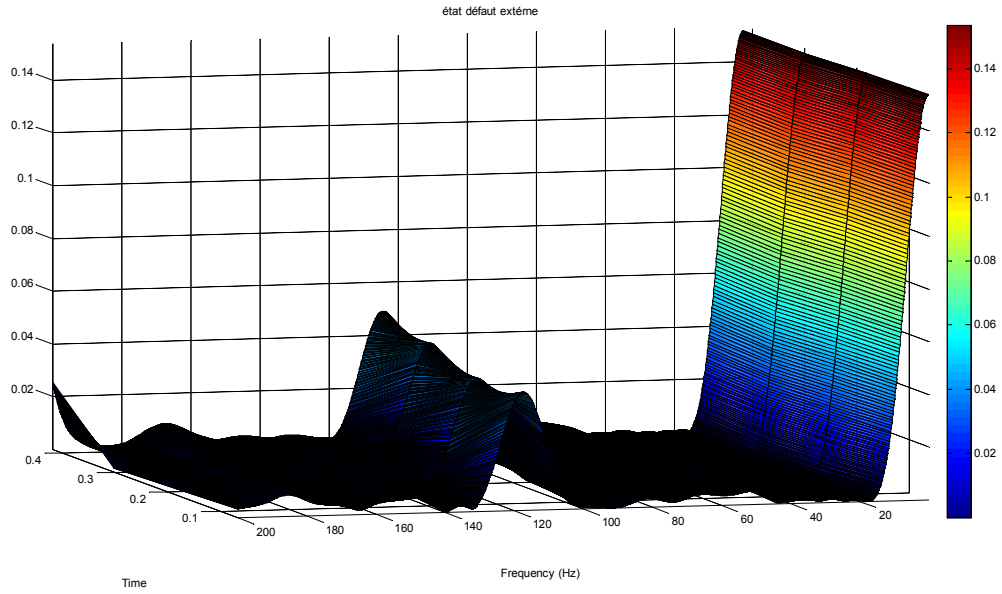


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec diminution de la vitesse

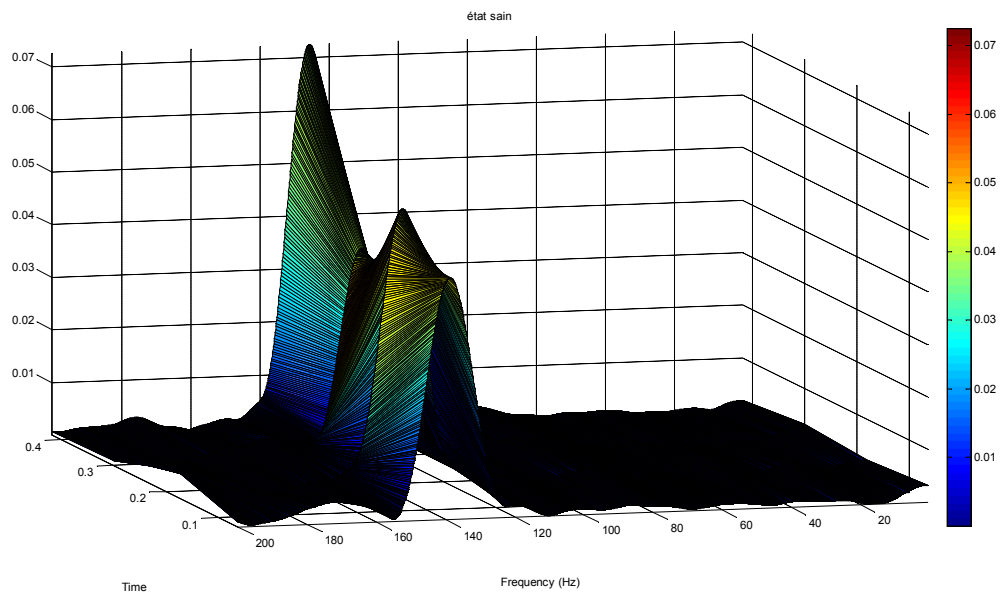


Figure: spectrogramme de signal de roulement sain avec diminution de la vitesse

ANNEXE B

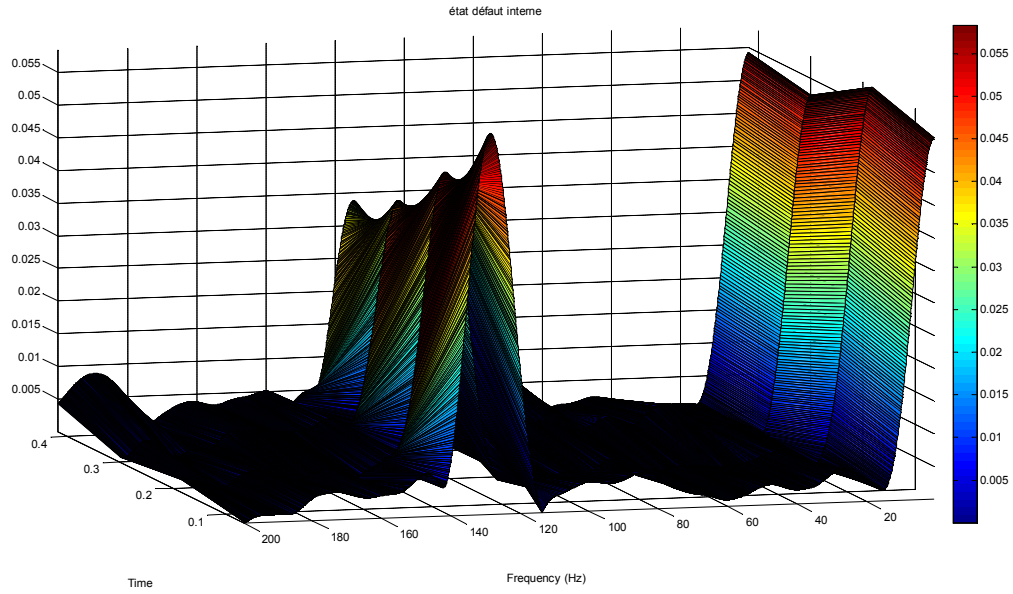


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec diminution de la vitesse

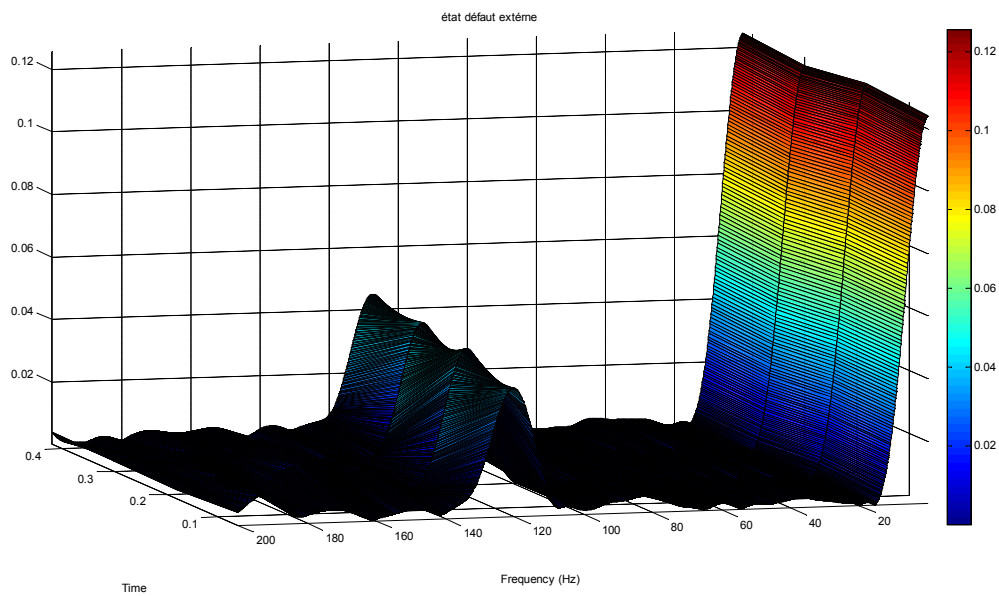


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec diminution de la vitesse

Augmentation puis diminution de la vitesse :

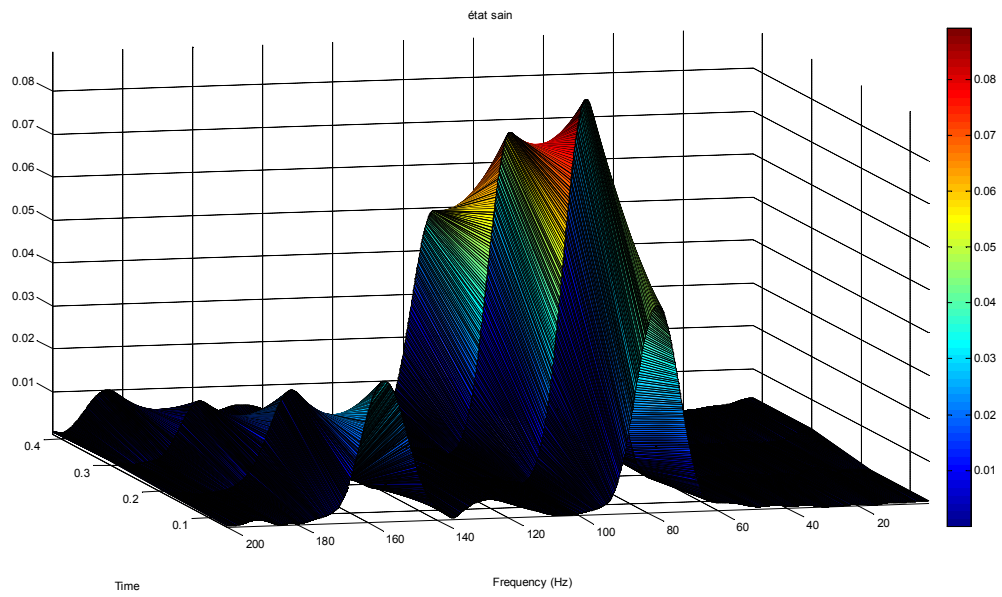


Figure: spectrogramme de signal de roulement sain avec augmentation puis diminution de la vitesse

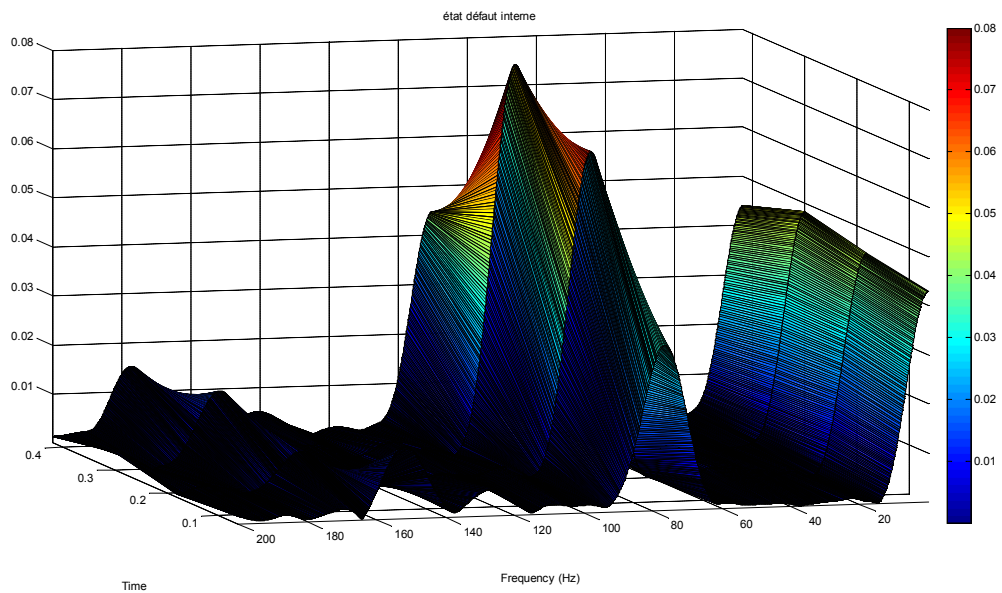


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec augmentation puis diminution de la vitesse

ANNEXE B

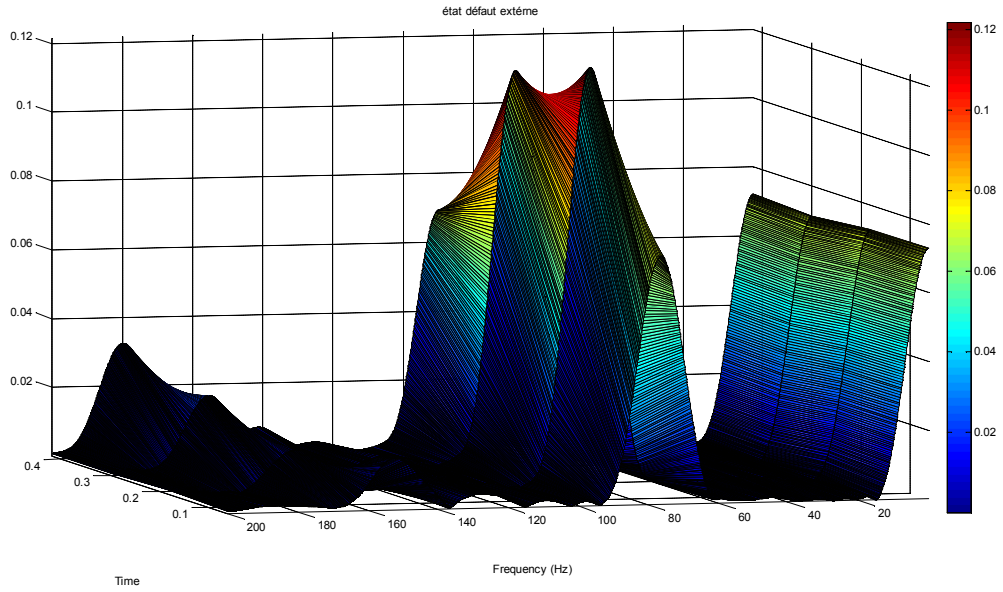


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec augmentation puis diminution de la vitesse

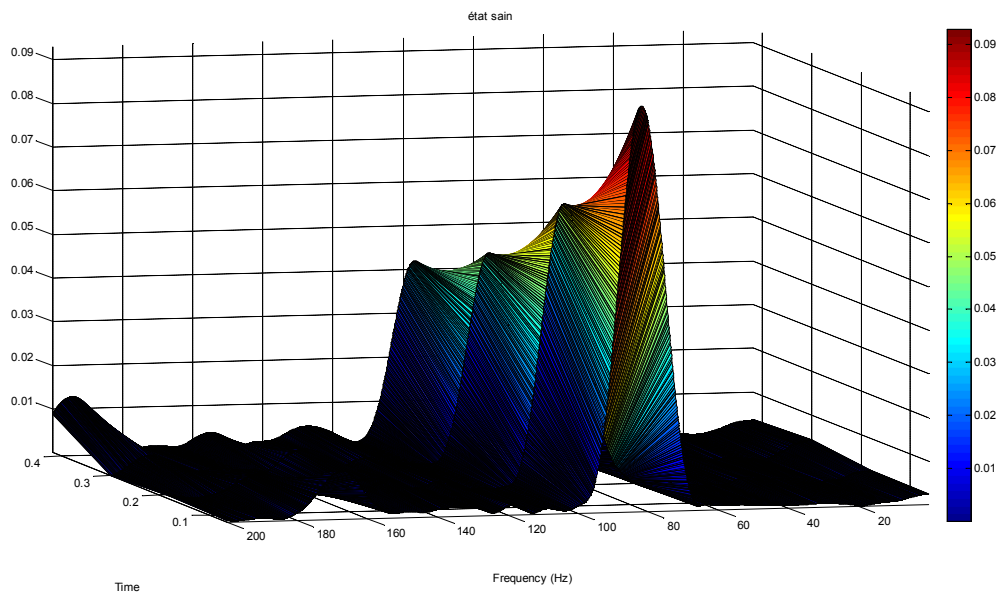


Figure: spectrogramme de signal de roulement sain avec augmentation puis diminution de la vitesse

ANNEXE B

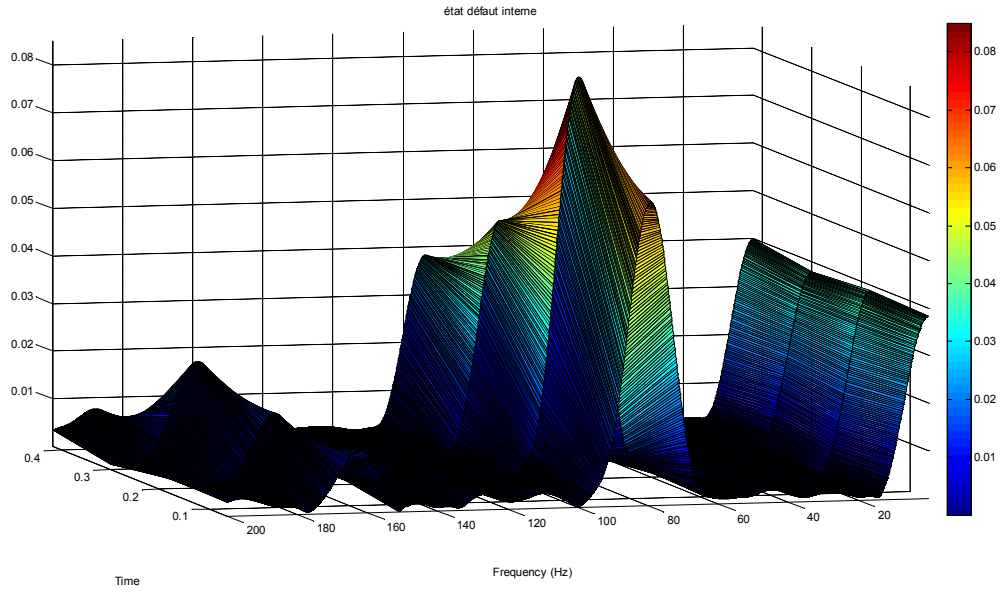


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec augmentation puis diminution de la vitesse

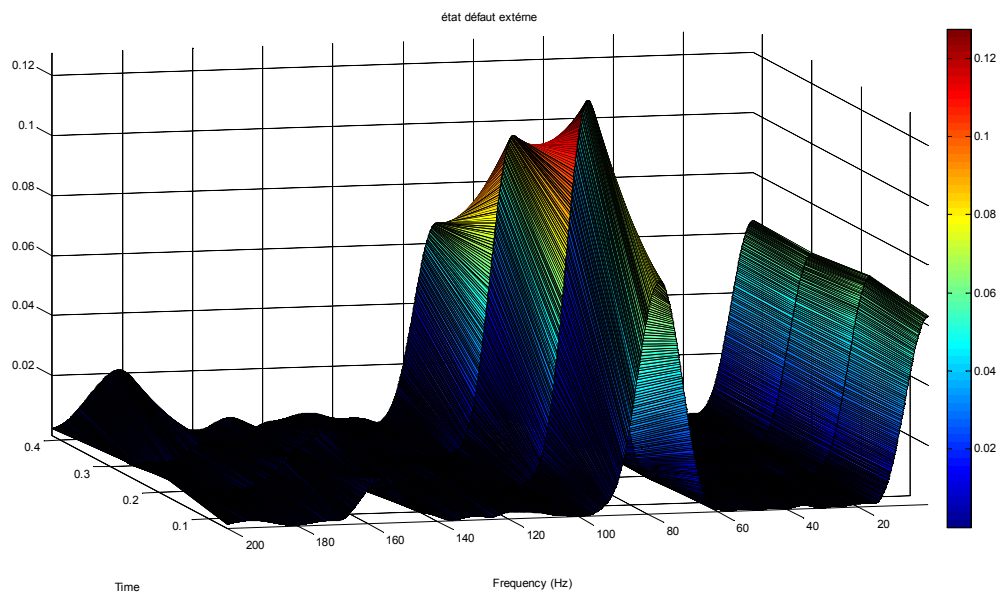


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec augmentation puis diminution de la vitesse

ANNEXE B

Diminution puis augmentation de la vitesse :

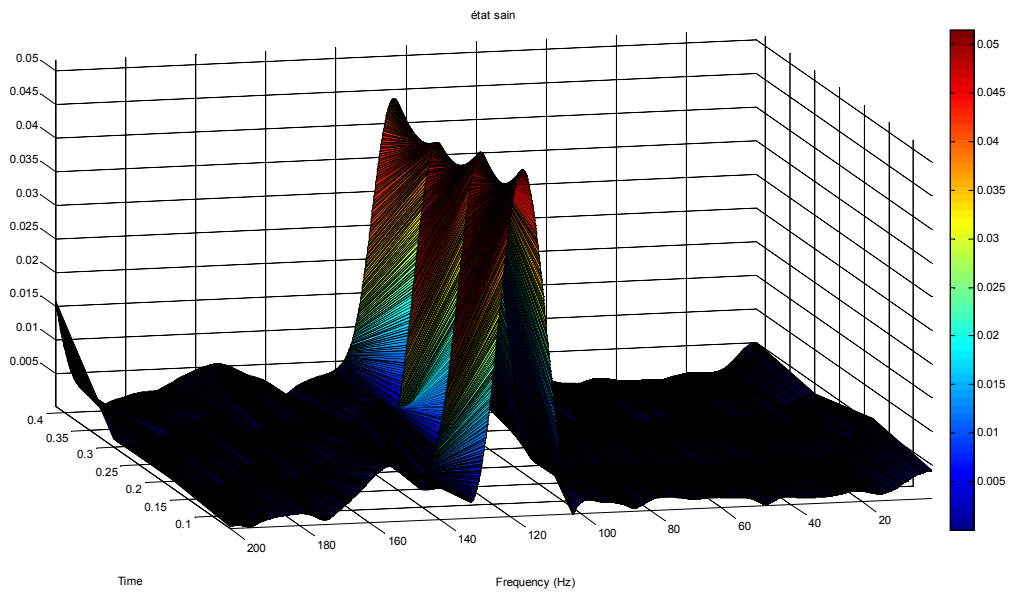


Figure: spectrogramme de signal de roulement sain avec diminution puis augmentation de la vitesse

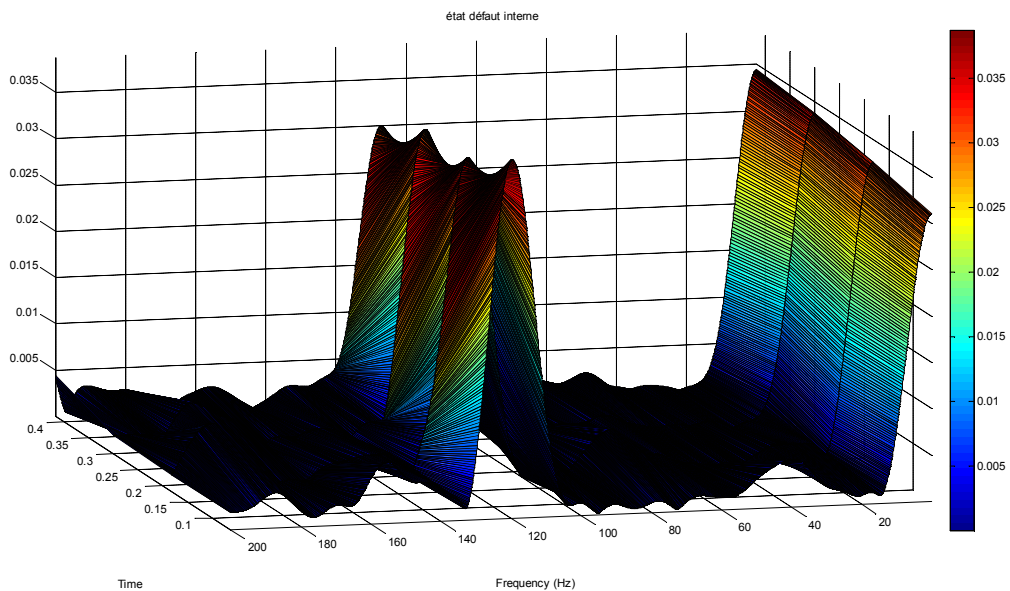


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec diminution puis augmentation de la vitesse

ANNEXE B

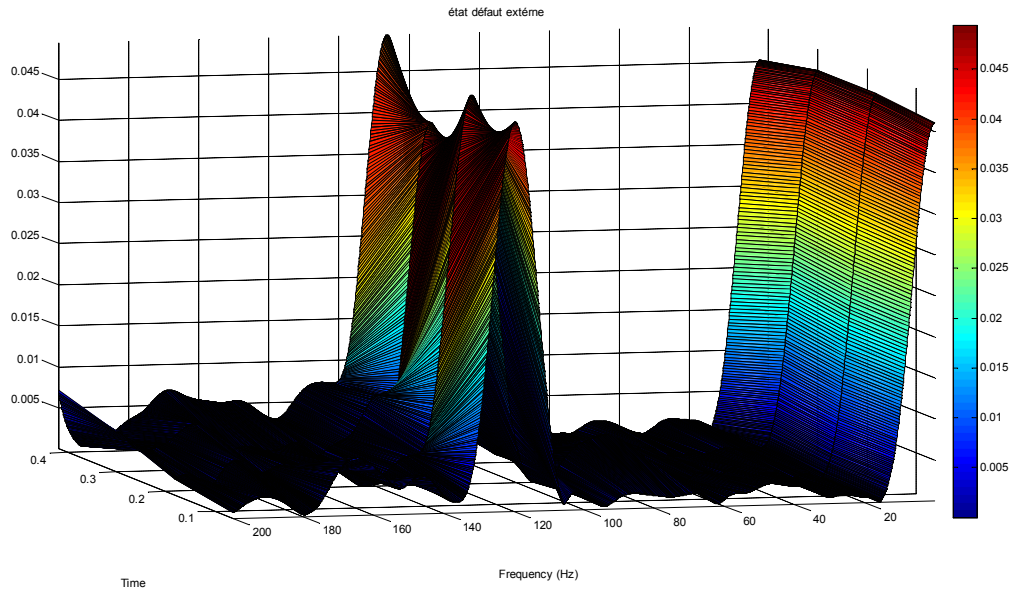


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec diminution puis augmentation de la vitesse

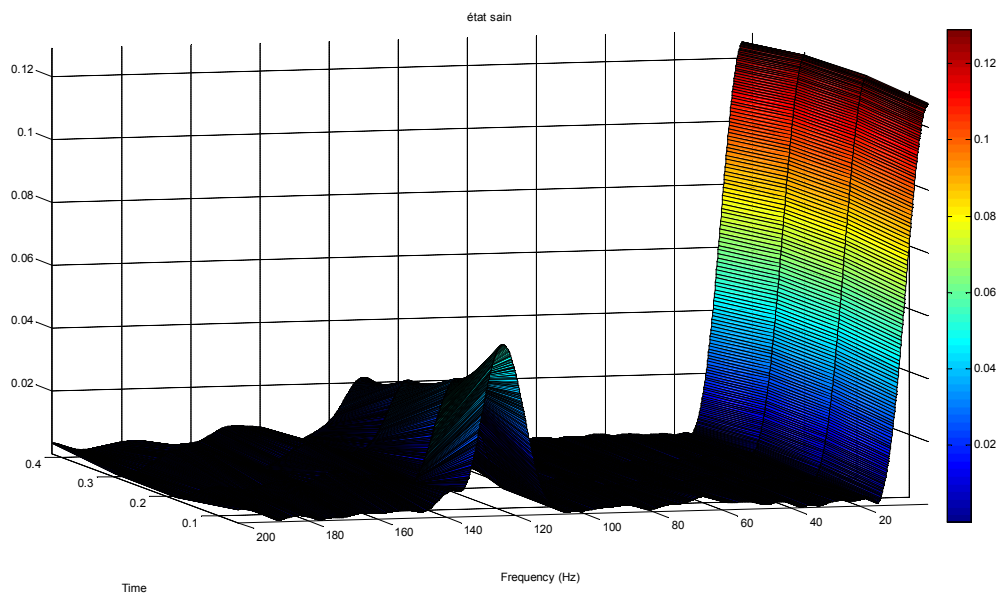


Figure: spectrogramme de signal de roulement sain avec diminution puis augmentation de la vitesse

ANNEXE B

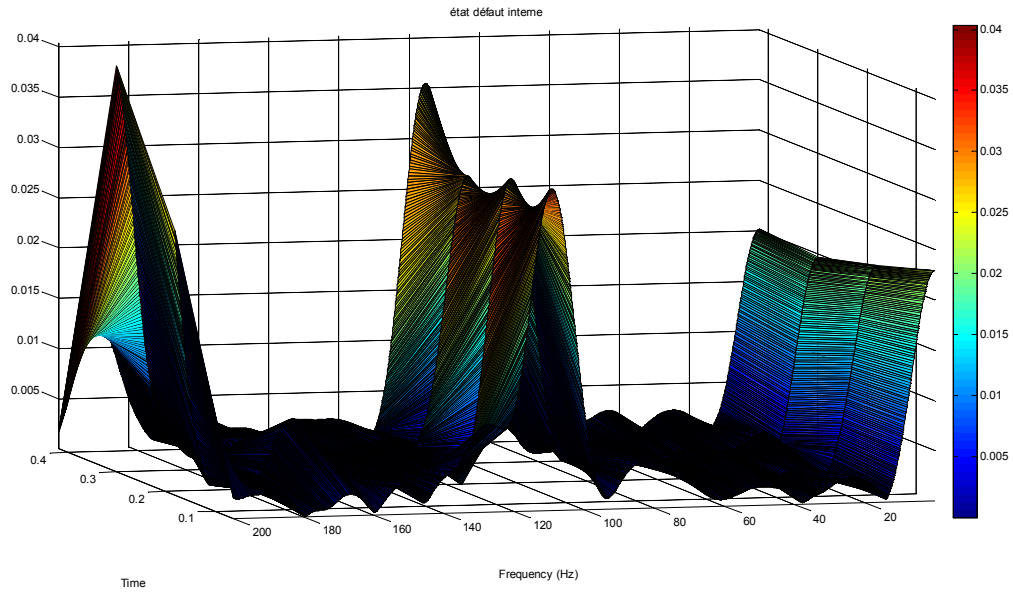


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague interne avec diminution puis augmentation de la vitesse

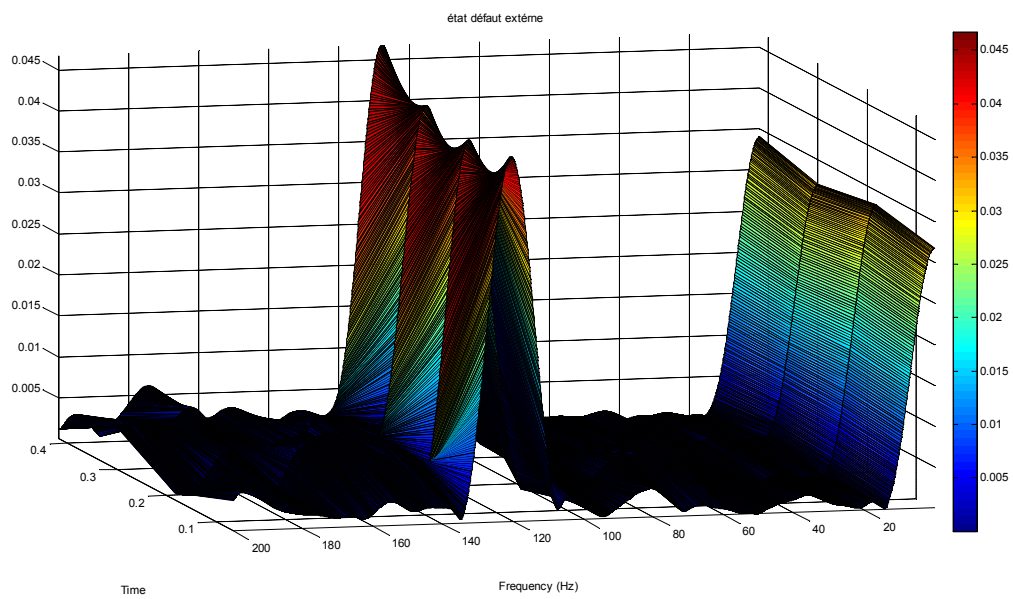


Figure: spectrogramme de signal de roulement défectueux par la bague externe avec diminution puis augmentation de la vitesse