

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Par :

SALHI Nassim

BRAHIMI Djafer

Thème

**SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DES DEFAUTS MECANQUES
DES MACHINES TOURNANTES PAR UTILISATION DES SYSTEMES
A INFERENCE FLOUE**

Soutenu le 02/07/2023 devant le jury composé de:

Mr. Bensaid Naserddine

Président

Mr. Harrouche Fateh

Rapporteur

Mr. Boutaani Md Said

Examineur

Année Universitaire 2022-2023

Remerciements

Dieu merci pour la santé, la volonté, le courage et la détermination qui nous ont accompagnés tout au long de la préparation de ce mémoire de Master et qui nous ont permis d'achever ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur **Mr HARROUCHE** pour Son soutien, et ses conseils et ses et surtout son encouragement.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Comme j'exprime mes appréciations envers nos professeurs du département de mécanique de l'université de Bejaïa pour tous leurs efforts constants pour nous enseigner.

Toutes nos pensées vont vers nos honorables parents en reconnaissance à leur esprit de sacrifice et de dévouement ainsi que leur soutien constant moral et matériel, pour nous avoir permis de construire un avenir certain et en même temps réaliser nos rêves.

A la fin, nous remercions tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet.

Dédicace

À Ma très chère Mère et mon cher père

Je dédie ce modeste travail à mes parents qui on était toujours à mes côtés ; Pour votre soutien indéfectible, votre amour et tous les efforts conjugués dans mon instruction et mon épanouissement.

À Mes grandes Mères et mes grands pères pour vos prières.

Je dédie ce travail pour toute la famille BRAHIMI, pour tous les sacrifices qu'ils n'ont cessé de m'apporter tout au long de mes années. Que dieu leur apporte le bonheur, les aides à réaliser tous leurs vœux et leur offre un avenir plein de succès.

A tous Mes amis

Lesquelles j'ai partagé les meilleurs moments de ma vie.

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

DJAFER

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À Mes très chers parents

À Mes chers frères et sœurs qui m'ont toujours soutenu

*Et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à
la réalisation de ce travail.*

NASSIM

Sommaire

-Remerciement.....	i
-Dédicace	ii
-Dédicace	iii
-Sommaire	iv
-Liste des figures	vii
-Liste des tableaux	ix
-Liste des abréviations.....	x
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Défauts mécaniques des machines tournantes

I. Introduction.....	3
II. Définition de la surveillance	3
II.1. La chaîne de mesure des vibrations mécanique	3
III. Indicateurs de surveillance :.....	4
III.1. Type d'indicateurs :.....	4
IV. Défauts mécaniques des machines tournantes :	7
IV.1. Balourd :	7
IV.1.1. Origine de balourd [1] :	8
IV.1.2. Types de balourd :	8
IV.1.3. Manifestation vibratoire du balourd :	9
IV.2. Défaut d'alignement :	10
IV.2.1. Manifestation de défaut d'alignement : [10]	10
IV.3. Défaut d'engrenage :	11
IV.3.1. Défauts réparties :	11
IV.3.2. Défauts localisés :	12
IV.3.3. Manifestation vibratoires des défauts d'engrènement :	13
IV.4. Défauts de roulement :	15
V. Conclusion :	17
I. INTRODUCTION :	18
II. Notion d'ensembles flous :	18
II.1. Caractéristique d'un sous ensemble flou :	19
III. Opérations sur les ensembles flous :	20
III.1. Egalité [11]:.....	20

III.2.	L'union [12]:	20
III.3.	L'intersection :	21
III.4.	Le complément [12] :	21
III.5.	Inclusion [12] :	21
IV.	Variables linguistiques et termes flou :	21
V.	Propositions floues [13].....	22
VI.	Système à inférence floue :	24
VI.1.	Description générale d'un système flou :	24
VII.	CONCLUSION :	29
I.	Introduction :	30
II.	Déroulement de la classification des défauts par un système à inférence flou (SIF) :	30
II.1.	Acquisition des signaux :	31
II.2.	Prétraitement des données :	31
II.3.	Traitement des données :	31
II.4.	Construction du vecteur forme :	32
II.5.	Création du système à inférence floue et implémentation sous Matlab.....	32
II.5.1.	Implémentation du système à inférence flou (FIS) par les commandes Matlab[18] : ..	32
II.5.2.	Implémentation du système à inférence floue avec l'interface graphique de Matlab :	35
III.	Description du banc d'essai :	37
III.1.	Introduction :	37
III.2.	Définition du banc d'essai :	37
IV.	Conclusion :	40
Chapitre IV : Résultats et discussion.....		41
I.	Introduction :	41
II.	Division des signaux :	41
III.	Prétraitement et calcul des indicateurs :	42
IV.	Constitution du vecteur forme :	43
V.	Classification par système à inférence floue (SIF) :	44
V.1.	Création et implémentation du (SIF) sous Matlab :	44
V.1.1.	Implémentation par l'interface graphique :	44
V.1.2.	Implémentation du (SIF) à l'aide des commandes de la boîte à outil:	50
V.2.	Classification de la base de données à l'aide du système à inférence floue :	51
V.3.	Résultat et discussions :	51
V.3.1.	Représentation graphique des résultats :	51
V.3.2.	Interprétation du résultat de classification :	52
VI.	Conclusion :	53

Conclusion générale	54
Références bibliographiques.....	56

Liste des figures

Figure 1 : Illustration d'une chaine de mesure des vibrations	3
Figure 2 : Spectre d'une vibration harmonique	6
Figure 3 : Surveillance par suivi d'évolution spectrale par comparaison de gabarit de gabarit.....	7
Figure 4 :Défaut de balourd dans un rotor	7
Figure 5 : Quelques causes de déséquilibres (ou balourds).....	8
Figure 6 : types de balourd.....	8
Figure 7 : Mise en évidence d'un défaut de balourd	9
Figure 8 : désalignement deux arbres liés par un accouplement	10
Figure 9 : désalignement de deux paliers soutenant le même axe.....	10
Figure 10 : Signal temporel d'un défaut d'alignement.....	11
Figure 11 : image vibratoire d'un défaut de désalignement	11
Figure 12 : L'usure de dentures d'engrenages	12
Figure 13 : Pitting ou piqûres "Engrenages"	12
Figure 14 : Écaillage ou Spalling de denture d'engrenage	13
Figure 15 : Fissuration ou cracks "Engrenages"	13
Figure 16 : Image vibratoire théorique d'un engrenage saint	14
Figure 17 : image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée.....	14
Figure 18 : spectre réel d'une dent détériorée sur un engrenage. La fréquence de rotation du pignon l est de 8,9 Hz	14
Figure 19 : Constitution des roulements.....	15
Figure 20 : Quelques défaillances affectant les roulements : a- Usure généralisée b- Cage détériorée c- Corrosion d- Présence de cratères e- Écaillage f- Fissure et cassure g- Grippage h- Traces.....	15
Figure 21 : Fonctions d'appartenance.	19
Figure 22 : support, noyau et hauteur d'un sous ensemble flou.....	20
Figure 23 : Union de deux sous-ensembles flous avec l'opérateur max.	20
Figure 24 : Intersection de deux sous-ensembles flous avec l'opérateur min.	21
Figure 25 : exemple de variable linguistique (V, X, Tv) utilisée pour décrire des êtres humains.....	22
Figure 26 : Structure d'un système flou	24
Figure 27 : Représentation d'un pendule inversée	25
Figure 28 : fuzzification de (θ)	25
Figure 29 : fuzzification de (θ).....	25
Figure 30 : fuzzification de la sortie (tension).....	26
Figure 31 : définition de degrés d'appartenance de l'entrée à la variable (θ)	26
Figure 32 : définition de degrés d'appartenance de l'entrée à la variable (θ)	26
Figure 33 : inférence de type mamdani	28
Figure 34 : <i>défuzzification de la sortie de l'inférence</i>	29
Figure 35 : Organigramme de Déroulement de la classification des défauts par un système à inférence flou (SIF)	31
Figure 36 : schéma bloc en interface.....	36
Figure 37 : fonctionnalités s'affichant en cliquant sur edit.	36
Figure 38 : éditeur des règles d'inférences.....	37
Figure 39 : image du banc d'essai.....	37
Figure 40 :Représentation des signaux temporels pour différents diamètres du défaut sur la bague intérieure.....	39

Figure 41 : Variation de l'indicateur (ET).....	41
Figure 42 : Variation de l'indicateur (Fc).....	42
Figure 43 : Variation de l'indicateur (Acc).....	42
Figure 44 : Variation de l'indicateur (Va).....	43
Figure 45 : Variation de l'indicateur (Ku).....	43
Figure 46 : Schéma bloc du (SIF).	45
Figure 47 : Fuzzification de la variable d'entrée «l'écart_type(ET)».....	45
Figure 48 : Fuzzification de la variable d'entrée «valeur crête-crête (Acc)».....	46
Figure 49 : Fuzzification de la variable d'entrée «Variance (Var)».....	46
Figure 50 : Fuzzification de la variable de sortie «état du roulement (etat)».....	47
Figure 51 : Défuzzification de la variable de sortie (état).....	50
Figure 52 : classification de la base de données (roulements).....	52

List des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des défauts de roulement	38
Tableau 2 : caractéristiques des roulements et leurs fréquences des défauts	38

Liste des abréviations

SIF : Système à inférence floue.

Dcc : Déplacement crête-crête.

Veff : Vitesse efficace.

Acceff : Accélération efficace.

TFD : Transformée de Fourier discrète.

FFT : Fast Fourier Transform.

ET : Ecart type.

Fc : Facteur de crête.

Va : Variance.

Ku : Kurtosis.

Introduction générale

Introduction générale

Le secteur industriel connaît une avancée spectaculaire avec l'automatisation des moyens de production ; dans un souci de productivité ses systèmes gagnent en performance mais deviennent de plus en plus complexe.

Cette complexité rend l'établissement de modèle mathématiques caractérisant le fonctionnement du système difficile voire impossible. Une nouvelle théorie émerge en 1965 établit par le professeur Lotfi Zadeh c'est la théorie des ensembles floue qui donnera naissance quelque années plus tard à ce qu'on appelle la logique floue celle-ci n'a pas besoin de modèle mathématique du système à automatiser contrairement à la logique booléenne classique qui s'attache à la précision et exclu tout ce qui est ambigu celle-ci prend compte des incertitude et les intègre.

Les machines tournantes font partie de ces système industrielle, et occupe une part importante comme moyen de production. Le fait que ces machines sont sujettes à des défaillances qui réduisent considérablement leur disponibilité qui influence sur la qualité et la productivité, qu'on ne peut pas se permettre dans un secteur industriel extrêmement concurrentiel. La maintenance qui était autre fois corrective s'oriente vers une maintenance préventive voir prévisionnelle ou l'on essaye de prévoir les défaillances avant que la panne surviennent, ce qui diminuera les temps des interventions et du coup une augmentation de la disponibilité de la machine, et la durée de vie de la machine est augmenté.

La mise en œuvre de ce type de maintenance nécessite la surveillance de l'équipement et le suivi d'indicateur révélateur de l'état de la machine. L'analyse vibratoire constitue une bonne source d'information; l'apparition d'une défaillance ou son aggravation se manifeste par un changement du niveau vibratoire de la machine.

La mesure de la vibration est faite par un capteur qui transforme la vibration mécanique en un signal électrique qui passe par un ensemble d'étapes avant d'arriver vers une unité de visualisation et d'analyse. Le signal mesuré n'est pas facilement interprétable voire impossible à interpréter alors un ensemble d'indicateurs est défini à partir de ce signal.

Le chapitre 1 est consacré à la définition de la surveillance et introduit la notion d'indicateur de surveillance, et aussi les principaux défauts des machines tournantes et la

manifestation vibratoire de ces défauts ce qui permet de les distinguer et de pouvoir établir le bon diagnostic.

Dans le chapitre 2 nous introduirons la logique floue est le principe de mise en œuvre de systèmes à inférence floue qui sont une application industrielle de la logique floue.

Pour le troisième chapitre nous aborderons la démarche expérimentale système de diagnostic basée sur la logique floue et l'implémentation de celui-ci sous Matlab et finirons par la définition du banc d'essai et des signaux prélevés.

Le dernier chapitre sera consacré à la présentation des résultats expérimentaux et leur interprétation.

Et nous finirons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I :
Défauts mécaniques des
machines tournantes

Chapitre I : Défauts mécaniques des machines tournantes

I. Introduction

Les machines tournantes ont une part très importante dans l'industrie comme moyen de production ; assurer leur disponibilité est devenu une priorité. La maintenance qui était autre fois corrective s'oriente vers une maintenance préventive prévisionnelle. La mise en œuvre de ce type de maintenance nécessite la surveillance des machines tournantes à travers le suivi d'indicateur représentatif de l'état de la machine parmi ces indicateurs ceux issus de la mesure de vibration engendrée par la machine.

Dans ce chapitre nous allons définir ce qui est la surveillance, la chaîne de mesure de l'information vibratoire qui nous permettra de définir les indicateurs de surveillance pour enfin conclure avec les principaux défauts mécanique des machines.

II. Définition de la surveillance

La surveillance est le concept de base sur lequel reposent les deux formes de maintenance préventive, que sont la maintenance conditionnelle et la maintenance prévisionnelle. Surveiller une machine nécessite de choisir un certain nombre d'indicateurs, de les mesurer soit de manière continue (surveillance « online »), soit de manière périodique (surveillance « off line ») et d'en suivre les évolutions dans le temps. Toute évolution significative de la valeur d'un indicateur doit conduire immédiatement à l'application d'une procédure adaptée (validation de l'évolution, identification de l'anomalie et sa gravité ...) [4].

II.1. La chaîne de mesure des vibrations mécanique

La figure (1) illustre les composantes d'une chaîne de mesure :

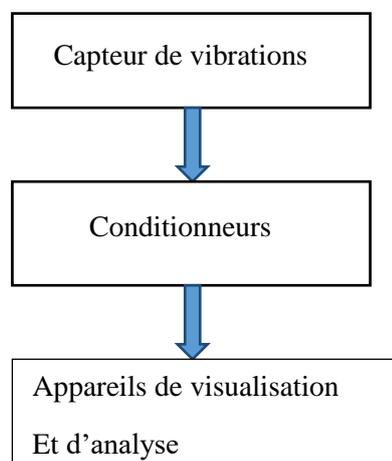


Figure 1 : Illustration d'une chaîne de mesure des vibrations

Le capteur transforme la vibration mécanique en un signal électrique. Le signal délivré par le capteur est conditionné pour le rendre transportable et exploitable ; et transmis au prochain maillon de la chaîne de mesure qui est des appareils de visualisation et d'analyse.

III. Indicateurs de surveillance :

Un indicateur est un quantificateur plus ou moins élaborés issus d'une grandeur dont l'acquisition est le plus souvent possible en fonctionnement. Il doit par définition caractériser un ou plusieurs aspects de performance de l'état de la machine surveillée. Son évolution ou sa transformation dans le temps doit être significative de l'apparition ou l'aggravation d'un dysfonctionnement [4].

III.1. Type d'indicateurs :

Nous pouvons classer les de surveillance en trois famille :

- Les indicateurs scalaires.
- Les indicateurs spectraux.
- Les indicateurs typologiques.
- **Indicateurs scalaires :**

Définition : [4] [9]

L'amplitude est une grandeur caractéristique d'un signal vibratoire ; l'apparition ou l'aggravation d'un défaut se manifestera par une variation de celle-ci le principe de ces indicateurs est d'associer un scalaire à l'amplitude crête ou efficace du signale ou à une combinaison des deux, ce dernier peut ne pas avoir une signification intrinsèque mais son sens se trouve dans son évolution.

Ces indicateurs sont généralement calculés dans le domaine temporel sur une durée de temps déterminée dans une bande de fréquence définie.

La finalité des indicateurs dérivant de l'amplitude crête est de détecter des défauts induisant des forces impulsionnelles (dégradation de roulements, écaillage de denture, jeux de palier, d'accouplement, de clavettes, frottement ...)

La finalité des indicateurs dérivant de l'amplitude efficace est de détecter des défauts les plus énergétiques (desserrages, balourds...).

Exemples d'indicateur scalaire :

1) Déplacement crête-crête entre 10 et 1 000 Hz (BF) [2] :

Dcc[10–1000Hz] (en μm)

Cet indicateur est recommandé par l'API (American Petroleum Institute). Le niveau acceptable est donné par la formule suivante [8] :

$$Dcc_{max} = 25,4 \sqrt{\frac{12000}{N}}$$

Dcc : Déplacement crête-crête (μm)

N : Vitesse de rotation (*tr/min*)

2) Vitesse efficace entre 10 et 1 000 Hz (BF) [8] :

Veff[10–1000Hz] (en mm/s)

Cet indicateur est révélateur de défauts dits « basses fréquences ». Ces phénomènes sont les plus énergétiques donc les plus destructeur.

3) Accélération efficace entre 1 et 10 kHz [2] :

Acceff[1000–10000Hz] (en g)

g : Accélération due à la pesanteur ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$).

C'est un indicateur révélateur des phénomènes dits « hautes fréquences », tel que les défauts de roulement de denture.

Limite des indicateurs scalaires :

Leur fiabilité est entachée par l'effet de masque et leur sensibilité à une multitude de défauts rend difficile la définition d'un seuil unique, la surveillance par ce type d'indicateurs est encore très largement utilisée en dépit des défauts qu'elle a, mais dans la mesure où son champ d'utilisation est restreint à la surveillance d'installations simple elle présente un certain nombre d'avantages tel que sa facilité de mise en œuvre, faibles cout de mise en œuvre.

➤ **Indicateurs spectraux : [1]**

Ces indicateurs sont définis dans le domaine fréquentiel, le signal temporel est représenté dans l'espace des fréquences. Cette opération se réalise mathématiquement en effectuant la transformée de Fourier du signal temporel, on obtient une représentation qu'on appelle spectre.

Soit un signal temporel $x(t)$ à t continu, la transformée de Fourier de ce signal est obtenu par l'équation suivante :

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{2i\pi ft} dt$$

Dans la pratique un signal temporel est discret une approximation sophistiquée de $x(f)$ est utilisée c'est la transformée de Fourier discrète (TFD) qui est introduite dans les algorithmes de calcul sous le nom de 'Fast Fourier Transform (FFT)'.

La figure (2) montre le spectre d'une vibration harmonique sinusoïdale ($x(t) = X_0 \sin(2\pi f_0 t)$)

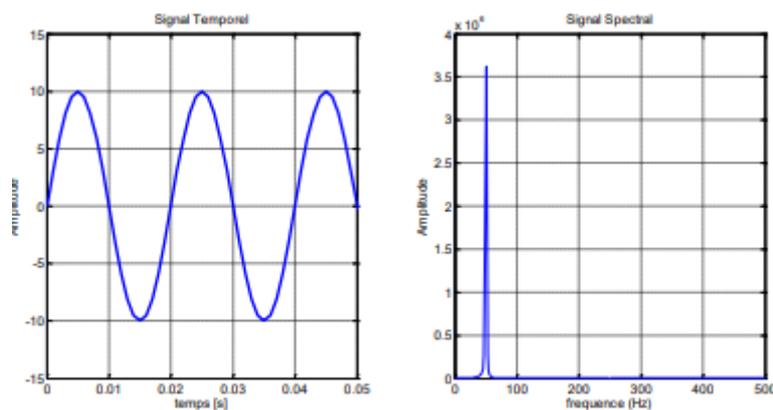


Figure 2: Spectre d'une vibration harmonique [1]

Exemple d'indicateur spectral :

- 1) Suivi d'évolution d'images spectrale par comparaison de gabarit [2] :

La signature vibratoire de la machine qu'on veut surveiller est établit en mesurant les vibrations engendrées par son fonctionnement normale (machine saine de défaillance), le signal mesuré est pris comme référence, un gabarit sera dressé il jouera le rôle de seuil. La figure (3) représente le principe de cet indicateur.

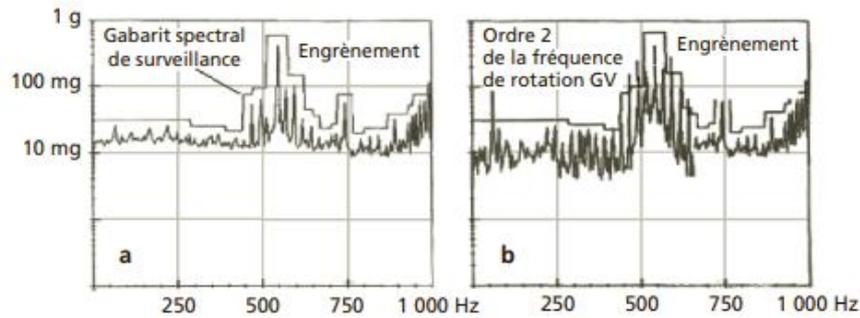


Figure 3 : Surveillance par suivi d'évolution spectrale par comparaison de gabarit .[5]

IV. Défauts mécaniques des machines tournantes :

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. [2]

A présent nous allons présenter les principaux défauts mécaniques des machines tournantes ainsi que leurs manifestations vibratoires.

IV.1. Balourd :

Le balourd est le résultat d'un ensemble de forces engendrées par les écarts existant entre les centres de gravité des différents éléments constituant le rotor et son axe de rotation. Cette force centrifuge, issue de ces défauts de « non-concentricité » ou d'ajustage, est proportionnelle à la masse de matière qui crée ce déséquilibre et au carré de la vitesse. Elle génère des efforts tournants qui vont agir sur les différents éléments constitutifs du rotor, les ancrages de la machine et les paliers jusqu'à entraîner leur dégradation. Il fait l'objet de normes importantes, tant pour son évaluation que pour sa correction. Ainsi, pour une classe d'équilibrage donnée, comparer l'amplitude de la vibration induite à des seuils fixés dans des normes ou à des spécifications de constructeurs, permettra de statuer sur le caractère acceptable ou non du déséquilibre [2].

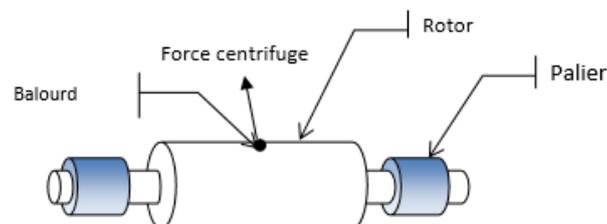


Figure 4 : Défaut de balourd dans un rotor [1]

IV.1.1. Origine de balourd [1] :

Le balourd peut avoir principalement deux causes :

1) Le balourd de conception, résulte de défauts dus à l'hétérogénéité, l'anisotropie de la matière, l'usinage et le montage.

2)-Le balourd accidentel, conséquence d'une modification de l'inertie (arrachement ou dépôt de matière), ou d'une éventuelle modification géométrique (déformation plastique ou thermique).

La figure (5) montre quelque cause de balourd.

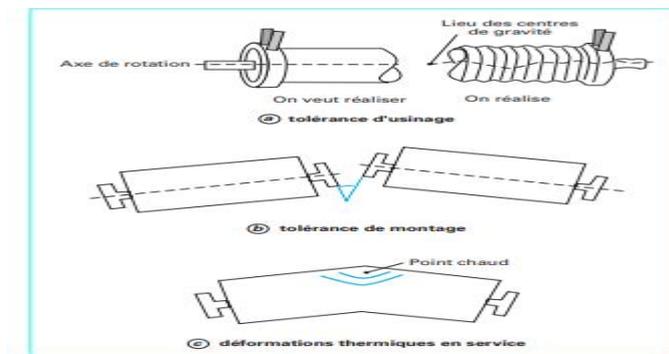


Figure 5 : Quelques causes de déséquilibres (ou balourds) [9]

IV.1.2. Types de balourd :

La figure (6) représente les types de balourd.

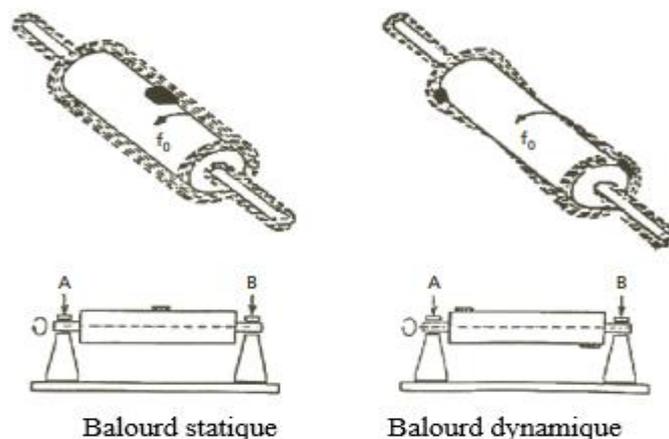


Figure 6: types de balourd [1]

IV.1.3. Manifestation vibratoire du balourd :

Augmentation du niveau global choisi en basses fréquences [9]

- soit D_{cc} [10-1 000 Hz],
- soit V_{eff} [10-1 000 Hz] ;

Ce déséquilibre induit un effort circulaire qui se confond avec la rotation. L'image vibratoire sera donc constituée d'une composante d'amplitude prépondérante à la fréquence de rotation du rotor (nette augmentation de l'amplitude de la fréquence fondamentale (fréquence de rotation, fr). [2]

$$Fr = N/60$$

Avec N : vitesse de rotation (tr/min)

Exemple [9] : mise en évidence d'un défaut de balourd (figure 7).

Spectre bleu (machine en bon état de fonctionnement) : amplitude de la fréquence fondamentale 1,323 mg pour 16,25 Hz ;

Spectre rouge (machine en fonctionnement dégradé : défaut d'équilibrage) : amplitude de la fréquence fondamentale 14,199 mg pour 16,25 Hz.

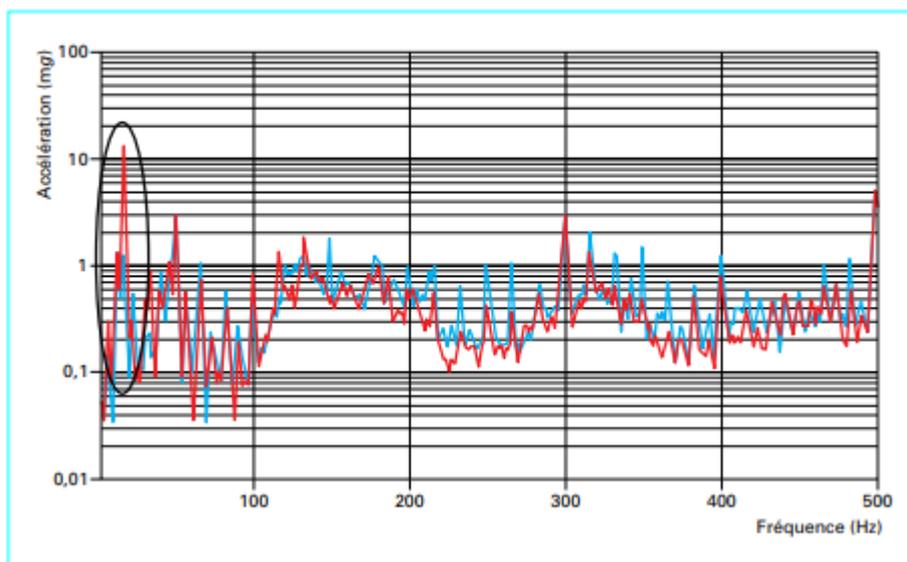


Figure 7 : Mise en évidence d'un défaut de balourd [9]

Le balourd n'est évidemment pas le seul défaut se produisant à cette fréquence, puisque c'est aussi le cas d'une dent endommagée sur un pignon, d'une pale déformée sur un ventilateur, du matage d'une clavette... Mais contrairement à ces derniers, le balourd engendrant une vibration quasi sinusoïdale, le spectre, à la différence des défauts de type chocs (desserrage, écaillage de roulements ou d'engrenages, mauvaise lubrification, détérioration d'accouplement, cavitation d'une pompe...), ne présentera que très peu (ou pas) d'harmoniques de la fréquence de rotation. [2]

IV.2. Défaut d'alignement :

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement (figure 8) , soit deux palier soutenant le même axe (figure 9) [10].

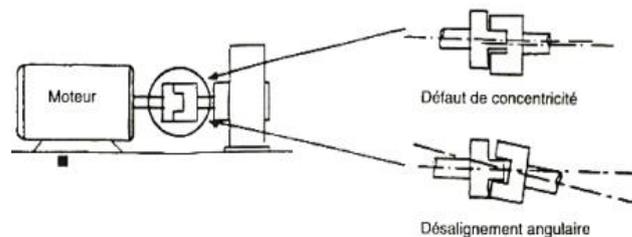


Figure 8 : désalignement deux arbres liés par un accouplement [2]

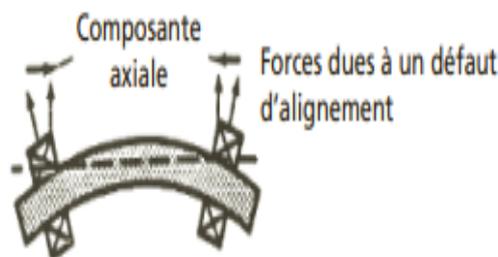


Figure 9 : désalignement de deux paliers soutenant le même axe [2]

IV.2.1. Manifestation de défaut d'alignement : [10]

Le signal temporel d'un défaut de désalignement a l'allure de la figure (10). On trouve un phénomène périodique à la fréquence de rotation (période 1 tour), mais également des phénomènes se répétant chaque $\frac{1}{2}$ tour et $\frac{1}{3}$ de tour. Cela se traduira le plus souvent par la présence des composantes de l'ordre 2,3 ou même 4 avec des amplitudes supérieures à celle de la composante d'ordre 1.(figure 11)

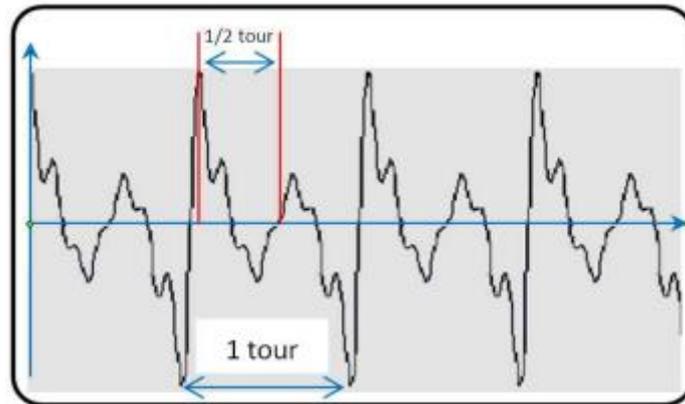


Figure 10 : Signal temporel d'un défaut d'alignement [10]

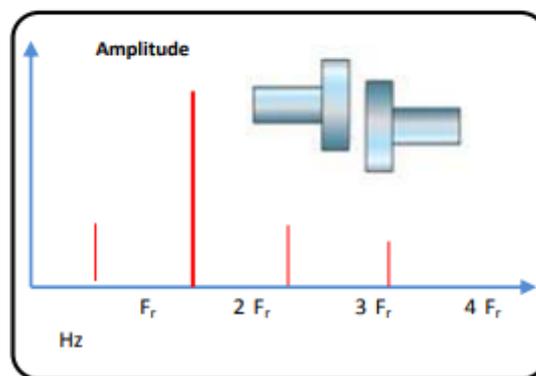


Figure 11 : image vibratoire d'un défaut de désalignement [10]

IV.3. Défaut d'engrenage :

On distingue principalement deux catégories de défauts d'engrenage : les défauts répartis affectant toute les dents (à l'exemple de l'usure, piqures), et ceux localisé sur des dents particulière (à l'exemple de la fissuration et de l'écaillage).

Les défauts localisés conduisent rapidement à la rupture des de la dent, contrairement aux défauts tel que l'usure normale [7].

IV.3.1. Défauts répartis :

IV.3.1.1 Usure :

Phénomène présent sur une grande partie de la denture se caractérisant par un enlèvement de matière dû au glissement des deux surfaces en contact. Le développement de cette usure est lié à la charge mécanique à transmettre et à la vitesse de glissement, ainsi qu'à la présence d'éléments abrasifs dans le lubrifiant. Elle peut être normale, inversement proportionnelle à la dureté superficielle de la denture et progressant lentement, ou anormale

lorsque le lubrifiant est pollué de particules abrasives ou corrosives. Elle conduit à un mauvais fonctionnement voir à une mise hors service. [3]



Figure 12 : L'usure de dentures d'engrenages [7]

IV.3.1.2 Pitting ou piqûres :

Il s'agit de trous plus ou moins profonds qui affectent toutes les dents. Se produisant surtout sur des engrenages en acier de construction relativement dur. Cette avarie peut apparaître à la suite de légers désalignements d'axes par exemple, à cause de surpressions locales. [3]



Figure 13 : Pitting ou piqûres "Engrenages" [3]

IV.3.2. Défauts localisés :

IV.3.2.1 .Ecaillage :

Il se manifeste aussi sous forme de trous, mais ceux-ci sont beaucoup moins nombreux, plus profonds et plus étendus que ceux des piqûres. L'écaillage se trouve dans les engrenages cémentés, qui sont les plus répandus à l'heure actuelle car ils permettent de passer des couples importants avec des dimensions faibles.

Ce type d'engrenage ne présente pratiquement pas de phénomène d'usure, l'écaillage, qui est le principal défaut, évolue rapidement vers la rupture. La cause est connue : la pression superficielle est trop importante. [7]

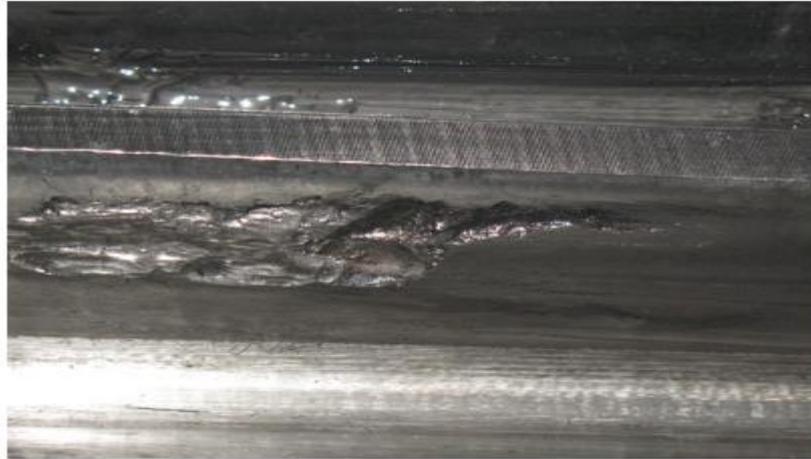


Figure 14 : Écaillage ou Spalling de denture d'engrenage [3]

IV.3.2.2 Fissuration :

Généralement au pied de la dent, elle progresse à chaque mise en charge. Son apparition est due à un dépassement de la limite élastique en contrainte au pied de dent, du côté de la dent en traction.[3]

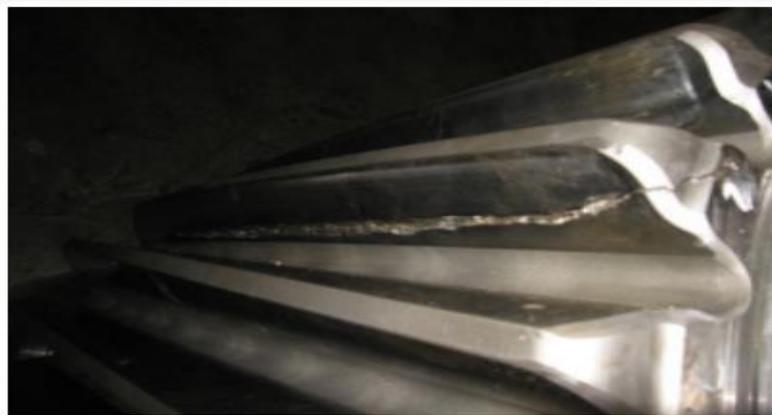


Figure 15 : Fissuration ou cracks "Engrenages" [3]

IV.3.3. Manifestation vibratoires des défauts d'engrènement :

Si l'un des deux mobiles présente une dent détériorée, il se produit un choc périodique dont la cadence de répétition correspond à la fréquence de rotation du mobile possédant la denture altérée [2].

Le spectre correspondant montre un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de rotation du pignon détérioré s'étalant jusqu'aux hautes fréquences [10].

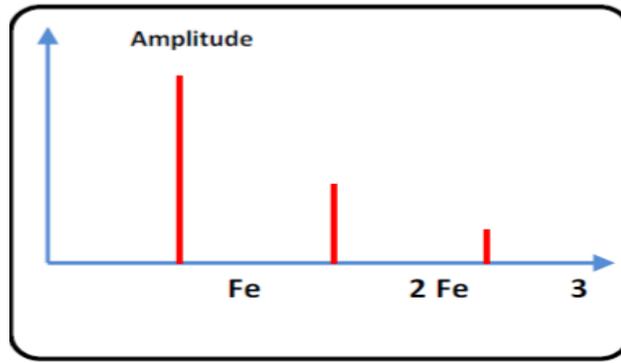


Figure 16 : Image vibratoire théorique d'un engrenage saint [10]

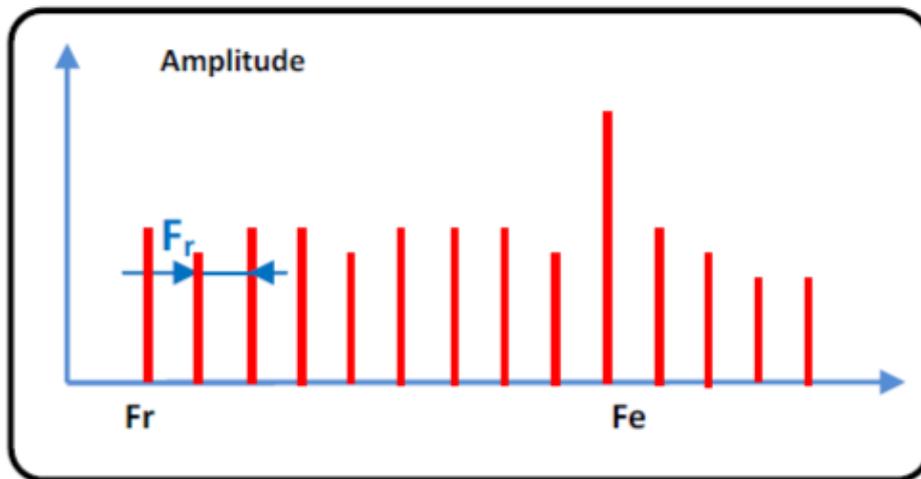


Figure 17 : image vibratoire théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée [10]

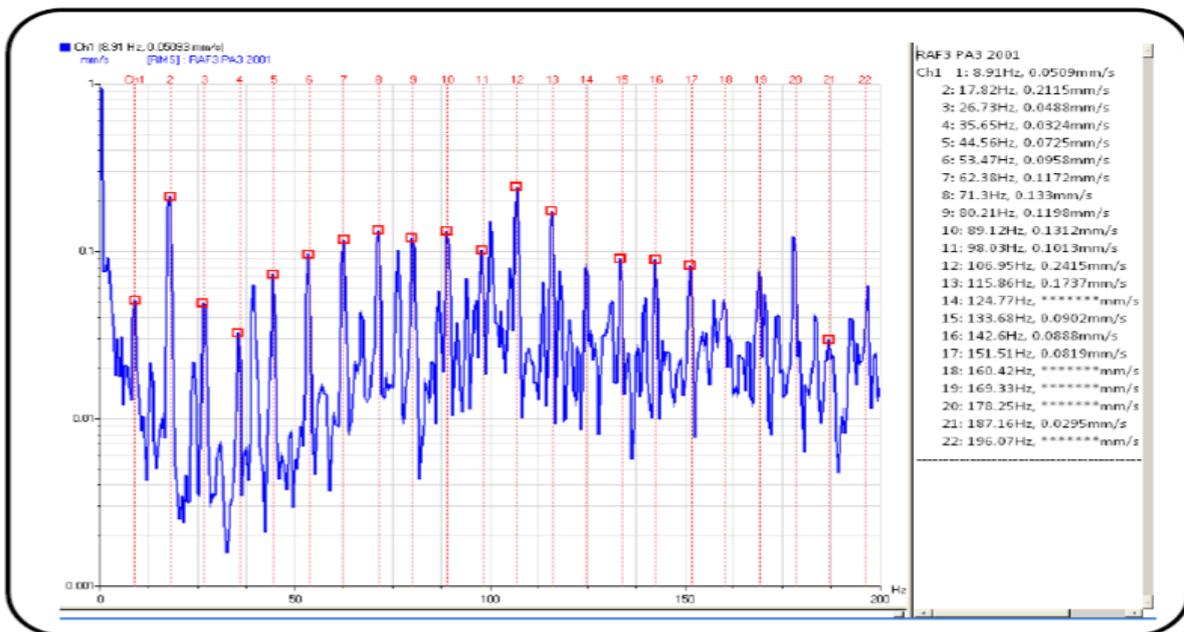


Figure 18 : spectre réel d'une dent détériorée sur un engrenage. La fréquence de rotation du pignon est de 8,9 Hz [10].

IV.4. Défauts de roulement :

Un roulement est un élément mécanique qui s'interpose entre deux parties d'une machine dont l'une est tournante et l'autre est fixe. Il est composé de bague interne et externe, d'élément roulant interposé entre elles et d'une cage séparant et guidant ces éléments.

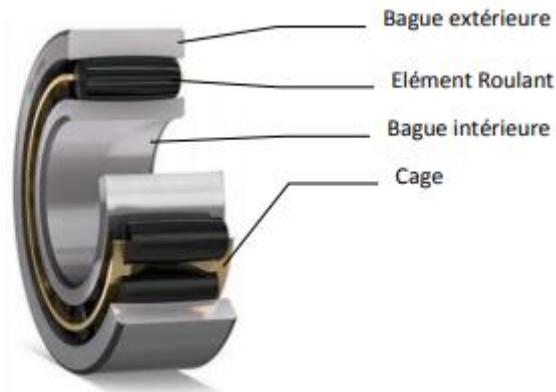


Figure 19 : Constitution des roulements [1]

Les roulements sont parmi les organes les plus sollicités d'une machine tournante ce qui représente une source de pannes fréquentes, les principales défaillances affectant les roulements sont illustrées dans la figure (1.20)



Figure 20 : Quelques défaillances affectant les roulements [3] a- Usure généralisée b- Cage détériorée c- Corrosion d- Présence de cratères e- Écaillage f- Fissure et cassure g- Grippage h- Traces

Manifestation des défauts :

L'apparition d'un défaut sur un élément du roulement produit un choc à chaque passage sur le défaut ou à chaque contact du défaut avec une des deux pistes. Ce choc se produit à une fréquence caractéristique de l'élément endommagé.

Fréquences caractéristique des roulements :

Pour chaque type de roulement et en fonction des cotes de fabrication de chacun de ses éléments (figure 19), on peut considérer quatre fréquences caractéristiques :*

- **Bague extérieure**

La fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague extérieure " (Fb_{ext}) " est donnée par l'équation suivante :

$$Fb_{ext} = 0,5 F_r n \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right]$$

- **Bague intérieure**

La fréquence de passage d'un élément roulant sur un défaut de bague intérieure, supposée montée sur l'arbre tournant, " (Fb_{int}) " est donnée par l'équation suivante :

$$Fb_{int} = 0,5 F_r n \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right) \right]$$

- **Billes**

La fréquence de passage d'un défaut de bille (ou de rouleau) sur la bague externe ou sur la bague interne " (F_{bille}) " est donnée par l'équation suivante:

$$F_{bille} = 0,5 F_r \frac{D}{d} \left[1 - \left(\frac{d \cos \alpha}{D} \right)^2 \right]$$

- **Cage**

La fréquence de passage d'un défaut de cage " (F_{cage}) ", est donnée par l'équation suivante :

$$F_{cage} = 0,5 F_r \frac{D}{d} \left[1 - \left(\frac{d \cos \alpha}{D} \right) \right]$$

Avec :

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

V. Conclusion :

La signature vibratoire des défauts permettra de les détecter, les indicateurs de surveillance sont sélectionnés à cet effet leur diagnostic peut parfois nécessiter la mise en œuvre d'outils plus avancés que nous n'avons pas cités dans ce chapitre.

Chapitre II :

La logique floue

.Chapitre II : La logique floue

I. INTRODUCTION :

Est une extension de la logique booléenne, elle se base sur la théorie mathématique des ensembles flous qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. Elle est utilisée comme un moyen pour modéliser les situations approximatives et non précis. Le raisonnement humain peut traiter les données non exactes. Elle prend son origine de la théorie des ensembles flous dans ce chapitre nous allons présenter les notions d'ensembles flous, et la manière elle est mise en œuvre dans des systèmes à inférence floue qui une application industrielle de la logique floue

II. Notion d'ensembles flous :

La notion d'ensembles flous a été introduite pour la première fois par le professeur Lotfi Zadeh en 1965 qui l'a défini dans [5] un ensemble flou est une classe d'objets avec un continuum de degrés d'appartenance. Un tel ensemble est caractérisé par une fonction d'appartenance qui attribue à chaque objet un degré d'appartenance compris entre 0 et 1.

La manière traditionnelle de représenter les éléments u d'un ensemble A est par la fonction caractéristique :

Si u est un élément de l'ensemble A : $\mu_A(u) = 1.$

Si u n'est pas un élément de l'ensemble A : $\mu_A(u) = 0.$

C'est-à-dire qu'un objet appartient ou n'appartient pas à un ensemble donné.

Dans les ensembles flous, un objet peut appartenir partiellement à un ensemble. Le degré d'appartenance est défini par une fonction caractéristique généralisée appelée fonction d'appartenance :

$$\mu_A(u) : U \longrightarrow [0,1]$$

Où U est appelé l'univers et A un sous ensemble flou de U .

Les valeurs de ma fonction d'appartenance sont des nombres réels dans l'intervalle $[0,1]$, ou 0 signifie que l'objet n'est pas membre de l'ensemble et 1 signifie qu'il en fait entièrement partie.

Chaque valeur de la fonction d'appartenance est appelé degrés d'adhésion ou d'appartenance.

La figure (21) montre trois fonctions d'appartenances représentant trois ensembles flous étiquetés « short », « medium » et « tall » tous étant des valeurs floues d'une variable « height ».

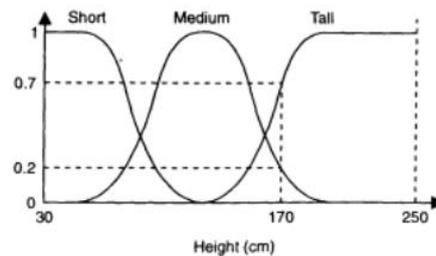


Figure 21 : Fonctions d'appartenance.[6]

Comme on peut le voir, la valeur 170 cm appartient à l'ensemble flou "medium" à un degré de 0,2 et en même temps à l'ensemble "tall" à un degré de 0,7. [6]

II.1. Caractéristique d'un sous ensemble flou :

Un ensemble flou est complètement défini par la donnée de sa fonction d'appartenance.

A partir d'une telle fonction un certain nombre de caractéristique peuvent être défini.

1. Support d'un sous-ensemble flou :[11]

Le support d'un sous-ensemble flou A est caractérisé par l'ensemble des éléments de X, qui ont des degrés d'appartenances supérieur à zéro, et que l'on note par (A) défini par :

$$(A) = \{x \in X / \mu_A(x) > 0\}$$

2. Noyau d'un sous-ensemble flou

Un sous-ensemble flou est normalisé si sa hauteur $h(A) = 1$. Le noyau d'un ensemble flou A de X, noté (A), est l'ensemble de tous les éléments qui appartiennent totalement ou de façon certaine à A, c'est-à-dire dont le degré d'appartenance à A vaut 1. Formellement on écrit :

$$(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\}$$

3. Hauteur d'un sous-ensemble flou

La hauteur H d'un sous-ensemble flou A est le plus fort degré avec lequel un élément de X appartient à A , la hauteur est définie à l'aide de l'opérateur Sup telle que :

$$h(A) = \sup\{\mu_A(x)/x \in X\}$$

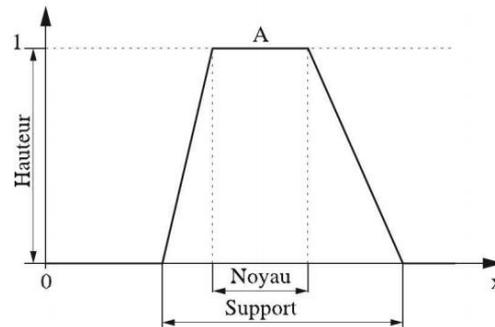


Figure 22 : support, noyau et hauteur d'un sous ensemble flou [12]

III. Opérations sur les ensembles flous :

On présente ici les opérations les plus couramment utilisées.

III.1. Egalité [11]:

On dit que deux ensembles flous A et B de X sont égaux, si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur pour tous les éléments x de X .

Formellement $A = B$ si et seulement si :

$$\forall x \in X, \mu_A(x) = \mu_B(x).$$

III.2. L'union [12]:

L'union de deux ensembles flous A et B de X est l'ensemble flou constitué des éléments de X affectés du plus grand des degrés avec lesquels ils appartiennent à A et B .

Formellement, $A \cup B$ est donné par:

$$\forall x \in X, \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)).$$

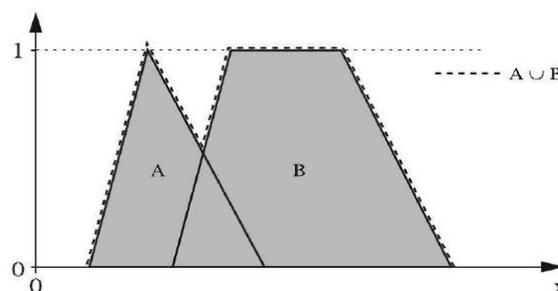


Figure 23 : Union de deux sous-ensembles flous avec l'opérateur max.[12]

III.3. L'intersection :

L'intersection de deux ensembles flous A et B de X est l'ensemble flou constitué des éléments de X affectés du plus petit des degrés avec lesquels ils appartiennent à A et B .

Formellement, $A \cap B$ est donné par :

$$\forall x \in X, \mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

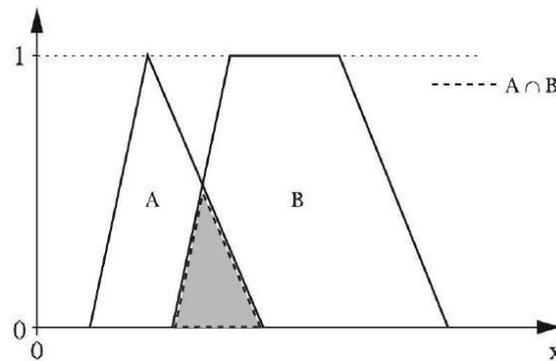


Figure 24 : Intersection de deux sous-ensembles flous avec l'opérateur min.[12]

III.4. Le complément [12] :

La fonction d'appartenance $\mu_{\bar{A}}$ du complément de l'ensemble A , notée \bar{A} , est définie pour tout $x \in X$ par :

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x)$$

III.5. Inclusion [12] :

Soient A et B sous-ensembles flous de X . si pour n'importe quel élément x de X , x appartient toujours moins à A qu'à B , alors on dit que A est inclus dans B ($A \subset B$).

Formellement, $A \subset B$ si et seulement si :

$$\forall x \in X, \mu_A(x) \leq \mu_B(x).$$

IV. Variables linguistiques et termes flous :

L'expression « variable linguistique » introduite par (Zadeh, 1971), propose que les valeurs de cette variable ne soient pas numériques mais symboliques comme les mots du langage courant (naturel) ou dans un langage artificiel. [11]

Une variable linguistique est représentée par un triplé (V, X, Tv) dans le quel :

- V est le nom de la variable (ex : taille,)

- X est l'univers du discours (ex : R^+)

$-T(V) = A_1, A_2, \dots, A_n$ est un ensemble des termes linguistiques (ex : minuscule, petit, moyen, grand, immense) qui sont des nombres flous, définissant des restrictions sur les valeurs que prend V dans X . [13]

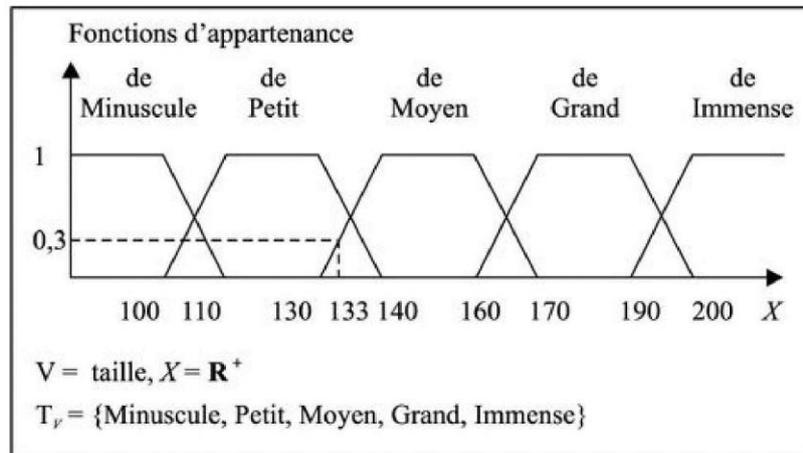


Figure 25 : exemple de variable linguistique (V, X, T_v) utilisée pour décrire des êtres humains.[14]

V. Propositions floues [13]

Une proposition floue est définie à partir d'un ensemble de variables linguistiques afin de représenter une connaissance.

Définition (Propositions floues élémentaires) :

Une forme élémentaire de proposition floue est définie à partir d'une seule variable linguistique ($V, T(V), X$) et exprimée simplement par la phrase :

$$p : V \text{ est } A$$

où V est une variable qui prend sa valeur dans l'univers du discours X , et A est l'un des termes linguistiques de $T(V)$. Une valeur particulière $V = v$ appartient à A avec le degré d'appartenance $\mu_A(v)$.

Cela permet de définir la valeur de vérité $T(p)$ de la proposition lorsque V vaut v :

$$T(p) = \mu_A(v).$$

Définition (Propositions floues générales) :

Une proposition floue générale est obtenue par la composition de propositions élémentaires avec l'opérateur de conjonction (et) , de disjonction(ou) ou d'implication (si.....Alors) ou une combinaison de ceci.

-La conjonction de propositions floues elle est sous la forme suivante :

$$p : (V1 \text{ est } A1) \text{ et } \dots \text{ et } (Vn \text{ est } An).$$

Où V1 jusqu'à Vn sont des variables définies sur les univers de discours $X1 \times X2 \times \dots \times Xn$. Sa valeur de vérité T(p) est alors définie par :

$$T(p) = \min \{ \mu_{A1}(X1), \dots, \mu_{An}(Xn) \}$$

– La disjonction de propositions floues élémentaires, elle est sous la forme :

$$p : (V1 \text{ est } A1) \text{ ou } \dots \text{ ou } (Vn \text{ est } An).$$

Où V1 jusqu'à Vn sont des variables définies sur les univers de discours $X1 \times X2 \times \dots \times Xn$. Sa valeur de vérité T(p) est alors définie par :

$$T(p) = \max \{ \mu_{A1}(X1), \dots, \mu_{An}(Xn) \}$$

-Implication entre propositions floue, elle est sous la forme :

$$\text{Si } (X \text{ est } A) ; \text{ alors } (Y \text{ est } B)$$

Elle permet de définir une liaison entre la prémisse «X est A» et la conclusion «Y est B» de cette règle. L'implication floue est la forme élémentaire d'une règle floue. Sa valeur de vérité T(p) s'exprime par une fonction d'appartenance relation des deux fonctions d'appartenances respectives des deux variables $\mu_A(x)$ et $\mu_B(y)$, l'une des plus couramment utiliser est l'implication de Mamdani dont la valeur de vérité T(p) est définie par [13] :

$$T(p) = \min (\mu_A(x), \mu_B(y))$$

– Les combinaisons de conjonction, disjonction et implication de propositions floues élémentaires c'est ce qu'on appelle règle floue : exemple «Si (X est A_i) et (Y est B_i) ; alors (Z est C_i)»

VI. Système à inférence floue :

Également appelé base de règles floues est considéré comme un système logique qui repose sur des règles linguistiques «si-alors » pour établir des relations entre leurs variables d'entrée et de sortie du système. Les champs d'applications de ce type de système sont diversifiés dans l'industrie notamment dans l'automatisme (la commande de systèmes industriels), ils sont largement utilisés pour la modélisation, le diagnostic et la reconnaissance de formes [15]. Ce succès est dû à leur facilité de mise en œuvre et leurs performances inégalées dans certaine application.

VI.1. Description générale d'un système flou :

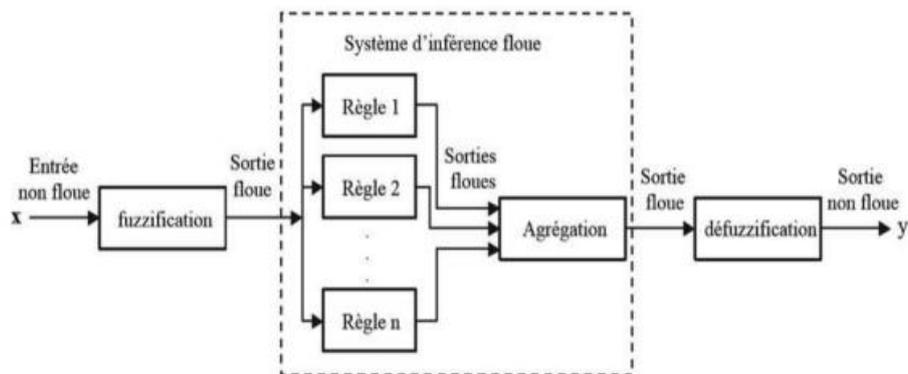


Figure 26 : Structure d'un système flou [11]

La structure conventionnelle d'un système d'inférence flou (SIF) est présentée par la Figure (26).

Elle est composée de trois étapes distinctes (fuzzification, inférence, défuzzification) dont les définitions son données ci-dessous.

La fuzzification :

Consiste à évaluer les degrés d'appartenances d'une valeur réelle aux différents sous-ensembles flous associés aux différents termes linguistiques représentatifs d'une variable linguistique. Et par ce processus transformé la valeur réelle d'entrée en une valeur floue.

Prenant l'exemple d'un pendule inversé illustré dans la figure (27)

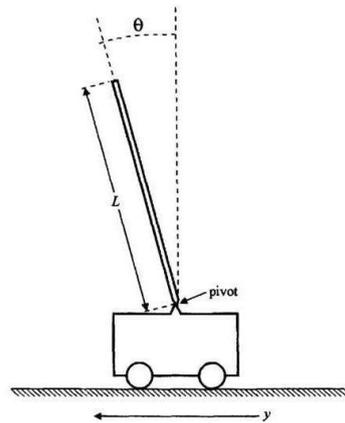


Figure 27 : Représentation d'un pendule inversée [16]

Le système consiste en un petit véhicule muni d'une perche rigide qui lui est reliée par un pivot, tel qu'illustré dans la figure (27) Le véhicule, propulsé par un servomoteur, peut se déplacer vers l'avant et vers l'arrière sur un rail rectiligne. Pour équilibrer la perche, ce mouvement doit se faire à une vitesse appropriée qui change constamment.[16]

Les variables linguistiques d'entrée du système peuvent être définies comme l'angle (θ) mesurée par un capteur Et la vitesse angulaire ($\dot{\theta}$) qui reflète la variation (θ) peut être obtenue par dérivation ; et la variable de sortie est la vitesse (\dot{y}) vu que la vitesse de rotation du moteur est influencée par la tension électrique (u) alors peut être contrôlée en contrôlant la tension nous prendrons comme sortie de ce système la tension (u) en Volt.

Chacune des variables est représentée par un ensemble de fonctions d'appartenances associées sur les figures (28 ; 29 ;30)

Avec μ : le degré d'appartenance.

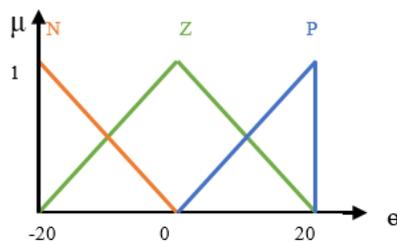


Figure 28 : fuzzification de (θ)

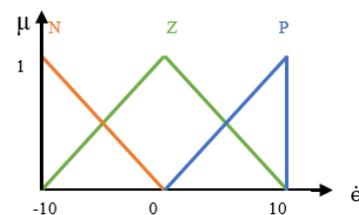


Figure 29 : fuzzification de ($\dot{\theta}$)

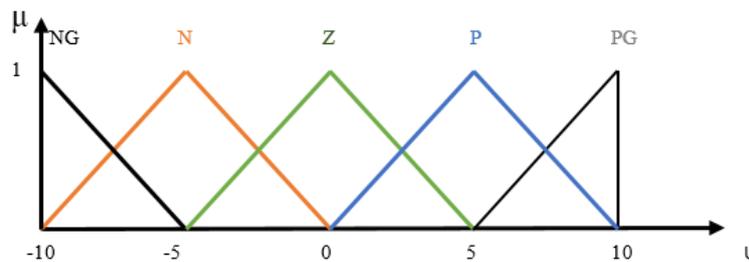


Figure 30 : fuzzification de la sortie (tension)

Prenant comme variables d'entrées ($\theta(t_0) = 5 \text{ deg}$; $\text{teta.} = 2.5$) la fuzzification de ces deux variables donne les résultats suivant représentés sur les figures 31 et 32:

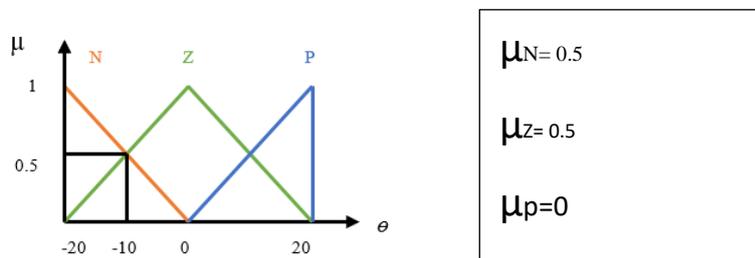


Figure 31 : définition de degrés d'appartenance de l'entrée à la variable (θ)

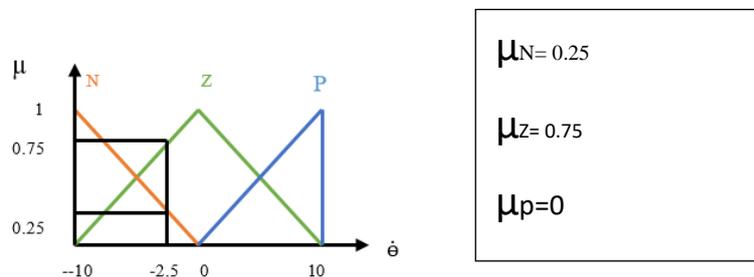


Figure 32 : définition de degrés d'appartenance de l'entrée à la variable ($\dot{\theta}$)

L'inférence :

Le mécanisme d'inférence est l'élément clé qui émule la prise de décision de l'expert dans l'interprétation et l'application de connaissances sur la meilleure façon [17].

Elle consiste à appliquer les règles floue qui constitue la base de règles aux entrées floues obtenues après fuzzification (les règles floue lient les entrées du système à ces sorties) et définir les degrés d'appartenance de la variable de sortie aux ensembles flous. Il existe deux méthodes fondamentales la méthode de Mamdani et la méthode de Sugeno qui permettent

de calculer ces degrés d'appartenance. D'autre méthode, la différence entre elles se définit essentiellement par la façon de réaliser les opérateurs flous (ET, OU et NON).

Pour le moteur d'inférence de Mamdani, les degrés d'appartenance de la variable de sortie, sont calculés à l'aide des opérateurs ET et OU réalisés par les deux fonctions Min et Max respectivement. [17]

Les règles s'activent simultanément et la sortie de chaque règle est un sous ensemble floue.

Puis vient une étape qui permet d'obtenir un seul ensemble floue de sortie à partir de ceux obtenus des règles, c'est ce qu'on appelle l'agrégation. Pour un système de type mamdani elle est faite par la fonction Max.

Les règles floues établies pour notre exemple sont énumérées ci-dessous :

Règle 1 : **si** l'angle (θ) est **N** et la vitesse angulaire est **N** **alors** la tension est **PG**.

Règle 2 : **si** l'angle (θ) est **N** et la vitesse angulaire est **Z** **alors** la tension est **P**.

Règle 3 : **si** l'angle (θ) est **N** et la vitesse angulaire est **P** **alors** la tension est **Z**.

Règle 4 : **si** l'angle (θ) est **z** et la vitesse angulaire est **N** **alors** la tension est **P**.

Règle 5 : **si** l'angle (θ) est **z** et la vitesse angulaire est **N** **alors** la tension est **Z**.

Règle 6 : **si** l'angle (θ) est **z** et la vitesse angulaire est **N** **alors** la tension est **N**.

Règle 7 : **si** l'angle (θ) est **pet** la vitesse angulaire est **N** **alors** la tension est **Z**.

Règle 8 : **si** l'angle (θ) est **pet** la vitesse angulaire est **N** **alors** la tension est **N**.

Règle 9 : **si** l'angle (θ) est **p** et la vitesse angulaire est **N** **alors** la tension est **NG**.

Pour notre exemple nous avons obtenu suite à la fuzzification de nos valeurs d'entrées les degrés d'appartenance :

Pour θ ($\mu_N = 0.5$; $\mu_Z = 0.5$; $\mu_P = 0$)

Pour $\dot{\theta}$ ($\mu_N = 0.25$; $\mu_Z = 0.75$; $\mu_P = 0$)

L'inférence de ces entrées floues avec un mécanisme de type mamdani est illustrée sur la figure (33) ou juste les règles 1, 2, 4 et 5 parce que les autres règles ne sont pas schématisées par ce que leur valeur de sortie est nulle alors ils n'influencent pas sur la sortie de système.

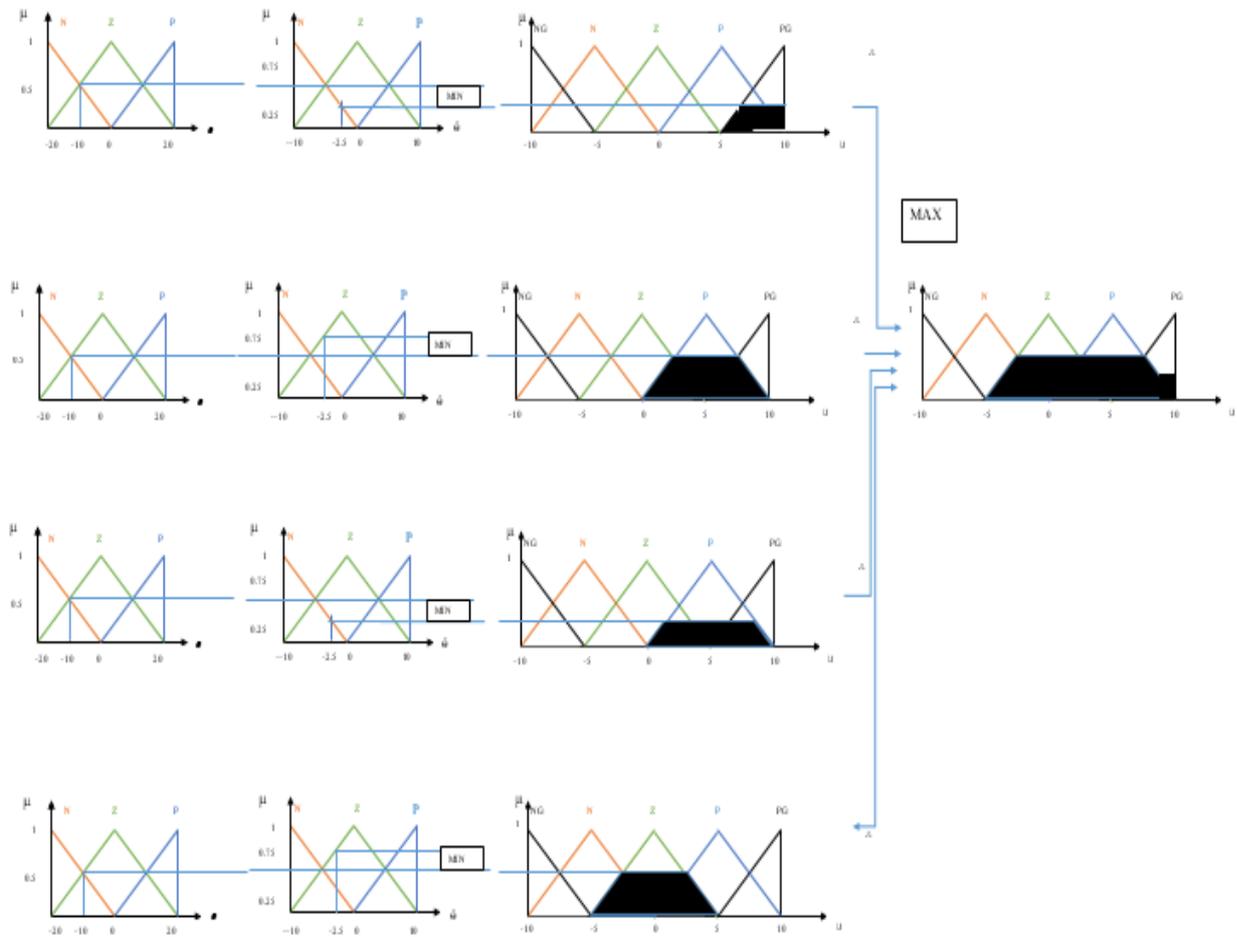


Figure 33 : inférence de type mamdani

La défuzzification

La sortie du mécanisme d'inférence est un ensemble flou celui-ci ne peut être utilisable directement pour donner l'information précise à l'opérateur. Une dernière opération est appliquée pour la conversion de l'ensemble flou en valeur réelle c'est la défuzzification.

Il existe plusieurs méthodes de défuzzification la plus utilisée est la méthode du centre de gravité de la surface.

Pour notre exemple la défuzzification par la méthode de centre de gravité donne en sortie une tension $u=2.7\text{ V}$.

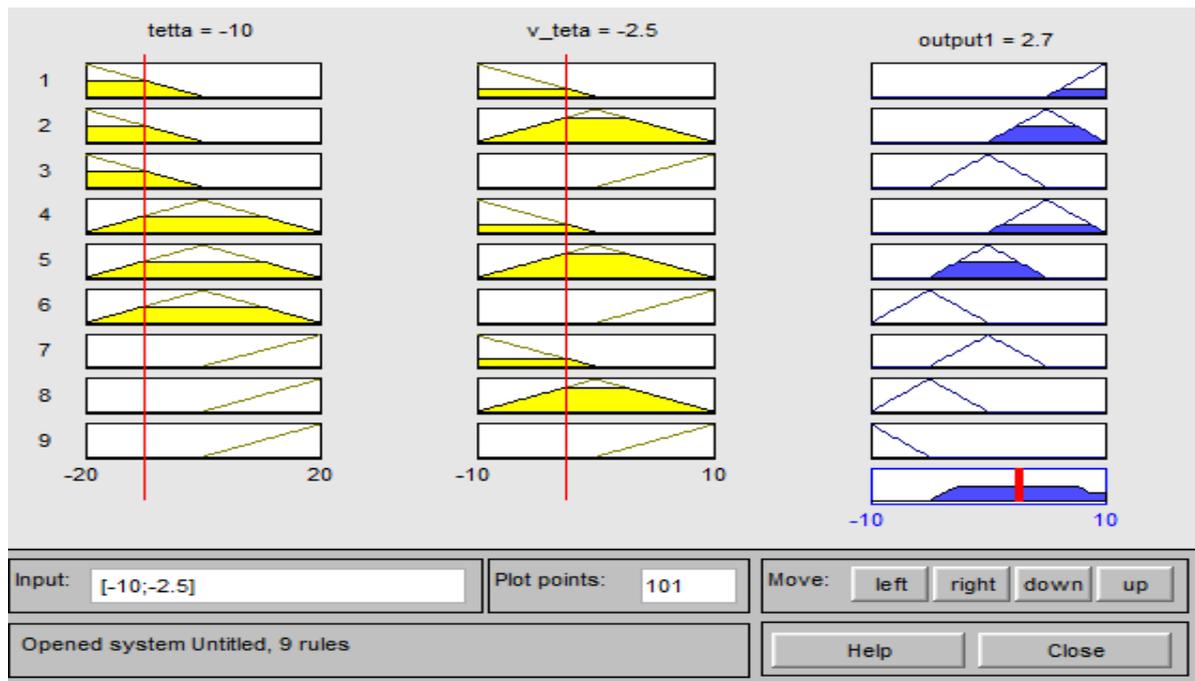


Figure 34 : défuzzification de la sortie de l'inférence

VII. CONCLUSION :

Dans ce deuxième chapitre, on constate que la logique floue à contribuer dans le développement de recherche d'un moyen qui traite et manipule les mesures non précis et vague, elle est considérée comme un outil qui se concentrer sur la résolution du problème au lieu de la modélisation mathématique. Aussi, elle offre des avantages importants au secteur industriel qui se présente dans le domaine de la maintenance. Souvent, la logique floue conduit à des solutions moins couteuse et plus rapide c'est ça qui la rend irremplaçables.

Chapitre III :
Démarche
expérimentale

Chapitre III : Démarche expérimentale

I. Introduction :

La logique floue a fait son apparition dans le domaine de la maintenance à partir du milieu des années 90. Nombreux les travaux qui ont suivis utilisant des systèmes à inférence floue comme outil de classification en vue du diagnostic des machines tournante pour ultérieurement permettre l'automatisation de celui-ci. Cette rué est justifié par le fait que la logique floue contrairement à la logique classique prend compte de ce qui est incertain, mal défini et les machines tournantes sont des systèmes assez complexe pour permettre l'établissement de modèle mathématique.

Dans ce chapitre nous allons aborder la démarche expérimentale de notre travail qui consiste à utiliser un système à inférence flou pour la classification et le diagnostic de roulements. Nous commencerons par exposé le déroulement de la classification par un système à inférence flou(les étapes de mise en œuvre d'un système à inférence floue pour le diagnostic), puis sont implémentation sous environnement Matlab, pour finir avec l'exposition du banc d'essai que nous allons utiliser et les signaux prélevés pour la réalisation de l'étude expérimentale.

II. Déroulement de la classification des défauts par un système à inférence flou (SIF) :

La méthodologie choisie pour la classification des défauts mécaniques (application au roulement) dans les machines tournantes par un système à inférence floue (FIS) est représentée par l'organigramme de la Figure(35)

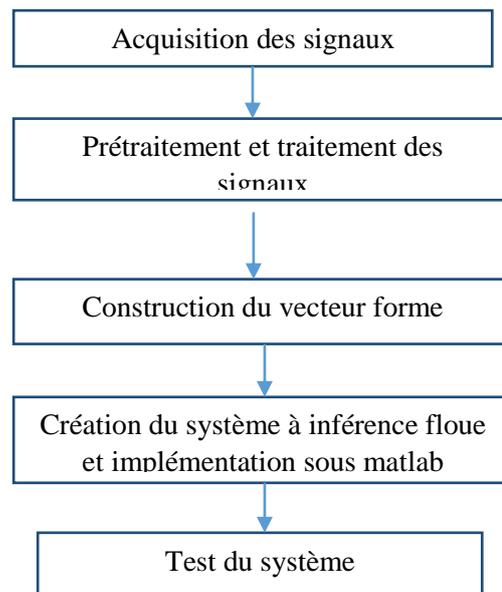


Figure 35 : Organigramme de Déroulement de la classification des défauts par un système à inférence flou (SIF)

II.1. Acquisition des signaux :

L'acquisition des signaux est faite à l'aide d'une chaîne de mesure dont le premier maillon est le capteur de vibration (accéléromètre) qui transforme la vibration mécanique en un signal électrique qui est ensuite conditionné pour être transmis vers une unité de calcul (enregistrement et traitement). Les signaux ont été recueillis pour différents états de la machine (sans défaut avec défauts).

II.2. Prétraitement des données :

En vue de rendre le signal vibratoire exploitable et interprétable un prétraitement est nécessaire où toute sorte d'informations inutiles sont éliminées, ce prétraitement comprend des opérations à l'exemple du filtrage...etc.

II.3. Traitement des données :

Dans cette étape on procède à une analyse temporelle des signaux et un ensemble d'indicateurs (paramètres) scalaires sont calculés parmi ceux-ci un certain nombre de paramètres les plus pertinents sera intuitivement choisis en fonction des défauts qu'on veut étudier (dans notre cas c'est l'étude des défauts de roulement).

II.4. Construction du vecteur forme :

Le vecteur de forme est une matrice de forme $(N \times M)$ où N est le nombre d'observation de la base donnés (signaux) et M le nombre d'indicateur retenu après sélection.

Il constituera l'entrée de notre système à inférence floue alors de base de données pour la classification.

II.5. Création du système à inférence floue et implémentation sous Matlab

La première étape consiste à choisir le type de système qu'on veut implémenter, un système de type 'mamdani' ou 'sugeno' la structure de système est la même, la différence majeure entre ces deux type se situe dans la définition des variables de sortie en fonctions des entrées dans le système 'mamdani' elle est obtenu en réalisant les opérateur d'implication par l'opérateur « min » et l'agrégation par l'opérateur « max » et dans le cas 'sugeno' les sorties sont une combinaison des entrées sous forme d'une formule mathématique[17][13]. pour notre cas nous avons choisi un système de type mamdani.

L'implémentation du système à inférence floue sous Matlab s'est faite de deux manières la première par les commandes Matlab présentée dans la section (II.5.1) de ce chapitre , et la seconde par l'interface graphique succinctement présentée dans la section (II.5.2) de ce chapitre.

II.5.1. Implémentation du système à inférence flou (FIS) par les commandes Matlab[18] :

Pour l'implémentation du système à inférence floue on a utilisés les commandes Matlab : `newfis`, `addvar`, `addmf`, et `addrule`.

II.5.1.1 Création du système à inférence floue :

La création est faite avec La commande `newfis`

Syntaxe :

```
a = newfis ('nom_syst', 'type', 'ET_method', 'OU_method', 'imp_method', 'agg_method', 'defuzz_method');
```

Description :

Cette fonction permet de créer une nouvelle structure du (SIF). Elle accepte jusqu'à 7 argument, qui sont :

- 'nom_syst' : le nom du (SIF)
- 'Type' : Le type du système, spécifié comme 'mamdani' ou 'sugeno'.
- 'ET_method', 'OU_method', 'imp_method', 'agg_method' : donnent respectivement :

La méthode utilisée pour l'opérateur ET (min, prod, custom),

La méthode utilisée pour l'opérateur OU (max, probor, custom)

La méthode d'implication pour Madani (min, prod où custom), pour Sugeno on n'a pas d'implication.

La méthode d'agrégation des règles (max, sum, probor, custom), pour Mamdani, pour Sugeno on n'a pas d'agrégation.

La méthode de Défuzzification (centroid, bisector, mom, lom, som, Custom), pour Sugeno on a les méthodes (wtaver, wtsum).

II.5.1.2 Fuzzification des variables d'entrée et de sortie :

La fuzzification s'est faite en utilisant les commandes **addvar** et **addmf**,

La commande **addvar** nous a permis de définir les variables d'entrées et de sortie.

Syntaxe :

```
a= addvar('nom_syst', 'type', 'nom', 'intervalle');
```

Description :

nom_syst : nom du système flou,
 type : variable d'entrée 'input' ou de sortie 'output',
 nom : nom de la variable
 intervalle : intervalle de définition que prend la variable.

La commande **addmf** nous a permis de définir les fonctions d'appartenance associées variables d'entrées et de sortie.

Syntaxe :

```
a=addmf('nom_syst','type','num','nom','interv',params);
```

Descriptions :

nom_syst : nom du système flou,
 type : variable d'entrée 'input' ou de sortie 'output',
 nom : nom de la fonction d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale,...).
 num : numéro de la variable (la variable n° 1 est la 1^{ère} créée),

interv : intervalle de valeurs que prend la variable,

params : paramètres de la fonction d'appartenance (ex:moyenne et écart_type d'une fonction d'appartenance de type Gaussienne, etc.).

II.5.1.3 Édition de règles floues :

-La base de règles

Pour l'édition des règles sous Matlab il existe deux formes une forme symbolique et une forme textuelle. Dans notre application nous avons utilisés le forme symbolique ; ou la base de règles est mise sous forme d'une matrice de dimensions (N*M).

Le nombre de colonne $M = m+n+2$; avec m : le nombre d'entrées et n : le nombre de sortie.

Le nombre de lignes N correspond au nombre de règles, la première ligne est la première règles est ainsi de suite.

Prenant la règle suivante comme exemple pour illustrer la façon dont la matrice est formé :

SI X est A1 ET Y est b4 ALORS Z est c3.

X,Y sont les entrées et Z est la sortie.

Prenant le cas ou :

A1 est le premier sous ensemble flou ajouter à la variable X, par la commande addmf qui permet d'ajouter la fonction d'appartenance caractéristique de ce sous ensemble. Alors la première composante de la ligne associée à cette règle sera (1).

B4 est le quatrième sous ensemble flou ajouté à la variable Y, Alors la deuxième composante de la ligne associée à cette règle sera (4).

C3 est le troisième sous ensemble flou ajouté à la variable Z, Alors la deuxième composante de la ligne associée à cette règle sera (3).

Nous obtiendrons la ligne de la matrice de règle suivant :

$$\text{Rulelist} = \left[\begin{array}{c} 1 \ 4 \ 3 \ 1 \ c \\ \text{Ligne } n \end{array} \right]$$

La quatrième composante égale à 1 de cette ligne signifie que l'opérateur qui a servi à relier les propositions floues du prédicat de la règle, qui est dans cet exemple le (ET), alors une valeur égale à 1 est attribuer, si c »est propositions était relier par l'opérateur (OU) cette composant prendrais une valeur égal à 2.

La cinquième composante que nous avons représentés par la lettre 'c'est un coefficient de pondération la valeur de sortie de la règle est multiplier par ce coefficient.

Une fois la matrice de règles définit on procède à l'édition des règles qui est faite par la commande **addrule**.

Syntaxe :

a = **addrule** ('a', 'nom de la matrice qui contient la base de règles')

II.5.1.4 Test du système à inférence floue :

La commande **evalfis** nous permet de tester notre système a inférence floue.

Syntaxe :

Y=**evalfis**(X,a)

Descriptions :

X contient les valeurs numériques que prennent les entrées du système à inférence floue. Il est sous la forme :

$X=[x_1, x_2, \dots, x_m]$

On obtient en sortie les valeurs réelles des variables de sortie.

II.5.2. Implémentation du système à inférence floue avec l'interface graphique de

Matlab :

L'exécution de la commande **fuzzy** permet d'afficher l'interface représentée sur la figure (36)

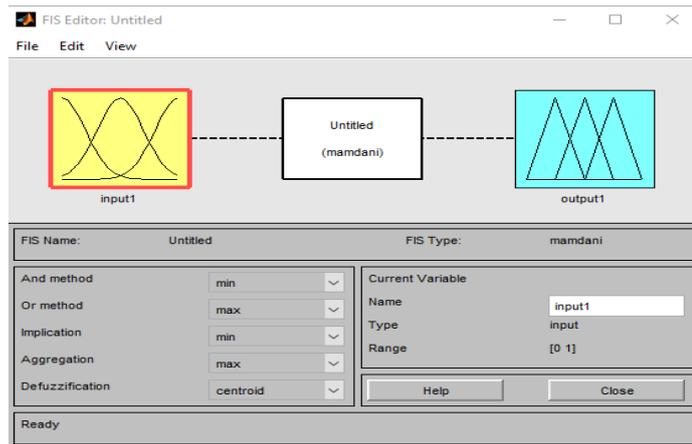


Figure 36 : schéma bloc en interface

A partir de cette interface on sélectionne les arguments du système à inférence flou présentés dans la section (II.5.1.2) de ce chapitre.

On ajoute des variables en cliquant sur edit un ensemble de fonctionnalités (outil) s'affiche (figure 37)

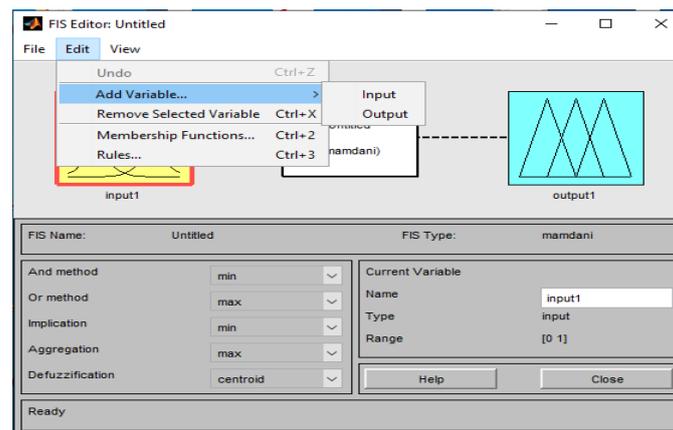


Figure 37 : fonctionnalités s'affichant en cliquant sur edit.

L'outil add variable nous permet d'ajouter des variables d'entrées et de sortie, pour ajouter les fonctions d'appartenance associées aux variables on clique sur membership functions.

La base de règles floues est éditée en cliquant sur rules, et l'éditeur de règles présenté sur la figure (38) s'affiche.

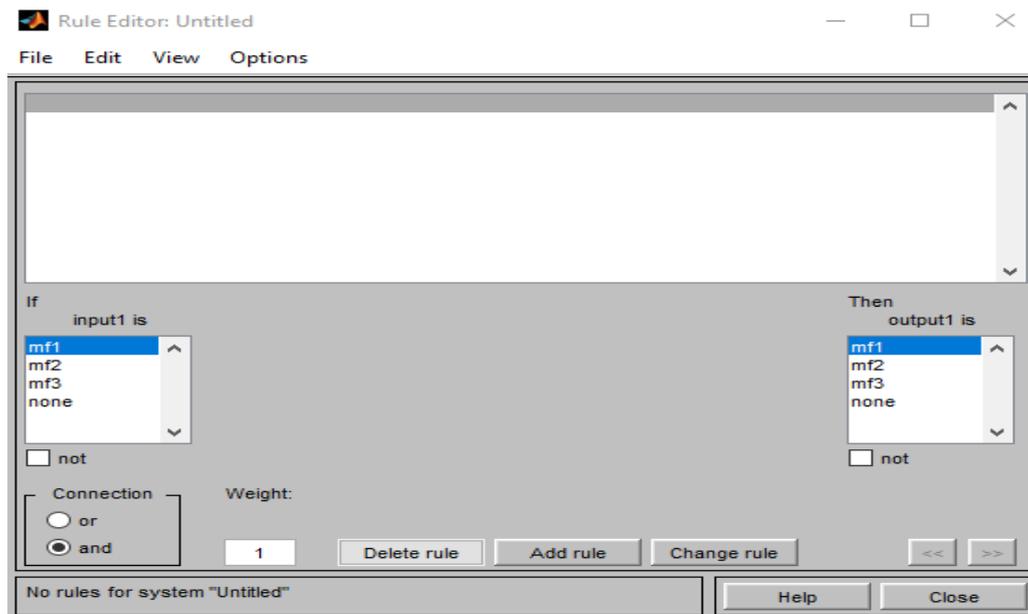


Figure 38 : éditeur des règles d'inférences

III. Description du banc d'essai :

III.1. Introduction :

Les signaux vibratoires utilisés pour la modélisation de notre (SIF) proviennent de la base de données du centre de recherche « The case western reserve university –Bearing data center, Cleveland, Ohio, Usa », accessible en ligne par le lien <https://engineering.case.edu/bearingdatacenter> . Ce web site donne accès aux données de test de roulement à billes (normaux et défectueux), réalisé sur un banc d'essai.

Dans cette partie nous allons présenter le banc d'essai ainsi que les données recueillies.

III.2. Définition du banc d'essai :

La figure (39) montre le banc d'essai.

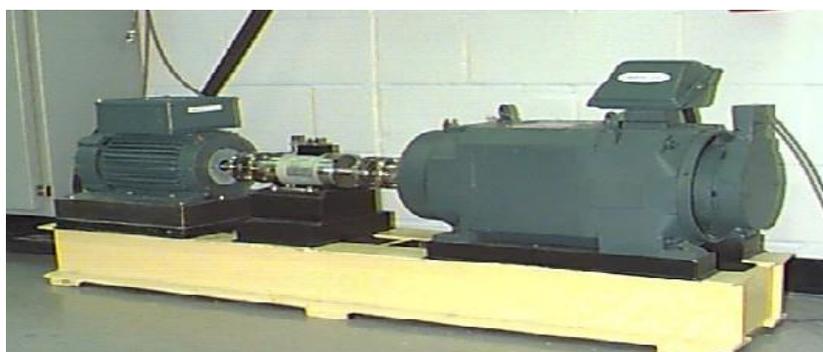


Figure 39 : image du banc d'essai.

Il est composé d'un moteur à induction '2 HP' et d'un dynamomètre (dynamometer) la transmission est assurée par des accouplements (coupling) un dispositif pour mesurer la puissance et la vitesse (torque transducer/encoder).

L'arbre du moteur est soutenu par deux roulement à billes coté entraînement (drive end bearing) et coté ventilateur (fan-end bearing).

De simples défauts sous forme de point ont été créés sur les roulements par électro-érosion. Le Tableau 1 Représente les diamètres des défauts, leurs profondeurs et les marques de roulements utilisés.

Position du roulement	Emplacement du défaut	Diamètre [inches ¹]	profondeur [inches]	Marque du roulement
coté entraînement	bague Intérieur	0.007	0.011	SKF
coté entraînement	bague Intérieur	0.014	0.011	SKF
coté entraînement	bague Intérieur	0.021	0.011	SKF
coté entraînement	bague Intérieur	0.028	0.050	NTN
coté entraînement	bague extérieur	0.007	0.011	SKF
coté entraînement	bague extérieur	0.014	0.011	SKF
coté entraînement	bague extérieur	0.021	0.011	SKF
coté entraînement	bague extérieur	0.040	0.050	NTN
coté entraînement	Bille	0.007	0.011	SKF
coté entraînement	Bille	0.014	0.011	SKF
coté entraînement	Bille	0.021	0.011	SKF
coté entraînement	Bille	0.028	0.150	NTN
coté ventilateur	bague Intérieur	0.007	0.011	SKF
coté ventilateur	bague Intérieur	0.014	0.011	SKF
coté ventilateur	bague Intérieur	0.021	0.011	SKF
coté ventilateur	bague extérieur	0.007	0.011	SKF
coté ventilateur	bague extérieur	0.014	0.011	SKF
coté ventilateur	bague extérieur	0.021	0.011	SKF
coté ventilateur	Bille	0.007	0.011	SKF
coté ventilateur	Bille	0.014	0.011	SKF
coté ventilateur	Bille	0.021	0.011	SKF

Tableau 1 : Caractéristiques des défauts de roulement

Des roulements SKF ont été utilisés pour les défauts de diamètre 0.007, 0.014 et 0.021 [inches]. Et des roulements équivalents NTN ont été utilisés pour les défauts de diamètre 0.028 et 0.04 [inches].

Caractéristique du roulement coté accouplement: 6205-2RS JEM SKF, roulement à Billes de cannelure profonde.				
Taille: (inches)				
Diamètre Intérieur	Diamètre Extérieur	Épaisseur	Diamètre de Bille	Diamètre primitif
0.9843	2.0472	0.5906	0.3126	1.537
Fréquences du défaut : (multiple de vitesse courante en Hz)				
Bague Intérieur	Bague Externe	Cage	Élément Roulant	
5.4152	3.5848	0.39828	4.7135	

Caractéristique du roulement coté ventilateur: 6203-2RS JEM SKF, roulement à billes de cannelure profonde.				
Taille: (inches)				
Diamètre Intérieur	Diamètre Extérieur	Épaisseur	Diamètre de bille	Diamètre primitif
0.6693	1.5748	0.4724	0.2656	1.122
Fréquences du défaut : (multiple de vitesse courante en Hz)				
Bague Intérieur	Bague extérieur	Cage	Élément Roulant	
4.9469	3.0530	0.3817	3.9874	

Tableau 2 : caractéristiques des roulements et leurs fréquences des défauts

Les informations relative aux roulements utilisés (coté entraînement et coté ventilateur) incluant leur géométries et les fréquences des défauts sont représentées dans le tableau 2.

Les signaux vibratoires ont été enregistrés à l'aide des accéléromètres, fixés à la cage du moteur par aimant, à une position vertical "12 heures" des deux côtés " accouplement et ventilateur" de la cage du moteur, et ont été post-traités dans un environnement Matlab. Tous les fichiers de données sont au format Matlab (*.mat). Les données numériques ont été collectées à 12 000 échantillons par seconde « coté entraînement et coté ventilateur » et les données ont également été collectées à 48 000 échantillons par seconde pour les défauts de roulement côté entraînement. La Puissances et la vitesse de rotation du moteur ont été enregistrées manuellement.

Pour notre étude ; nous avons pris les signaux de bagues intérieures mesurés du coté entraînement pour une puissance de (3HP) et une vitesse approximant 1730 tour/min

La Figure (40) représente les signaux temporels recueillis du coté de entraînement, pour différents diamètres de défauts, réalisés sur la bague intérieure, pour un couple moteur de 3HP. (HP: Horse Power).

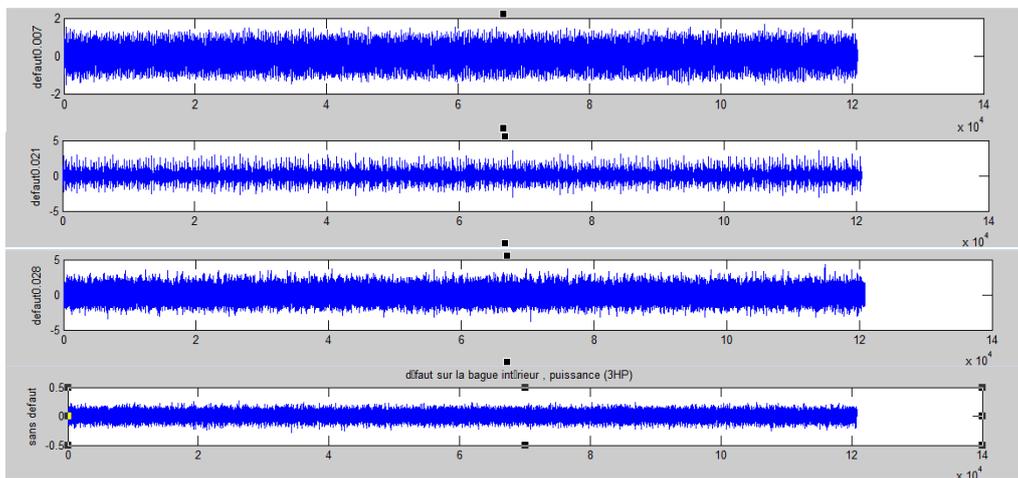


Figure 40 :Représentation des signaux temporels pour différents diamètres du défaut sur la bague intérieure.

IV. Conclusion :

Nous avons consacré ce chapitre à l'exposition de la démarche suivie pour la réalisation d'un système à inférence pour le diagnostic de l'état du roulement par classification des différents signaux représentant les différents états du roulement. Ces signaux qui proviennent de la base de données du centre de recherche « The case western reserve university –Bearing data center, Cleveland, Ohio, Usa », obtenu sur le banc d'essai précédemment défini

Chapitre IV :
Résultats et
discussions

Chapitre IV : Résultats et discussion

I. Introduction :

Afin d'effectuer la classification par le système à inférence floue on a besoin d'une base de données de taille (>100 observations) [19] [20], dans notre cas on ne dispose que de quatre signaux prélevés du banc d'essai défini dans la section. Alors la première étape qu'on réalise est la division des signaux en un nombre de tranche K_t , pour la satisfaction de cette condition et la création de notre base de données.

Un certain nombre de paramètres (indicateurs de surveillance) a été calculé pour chaque tranche, les plus pertinents d'entre eux ont été retenus pour construire le vecteur de forme qui constituera l'entrée de notre système à inférence floue.

II. Division des signaux :

Nous disposant de quatre signaux un signal sans défauts et trois signaux avec défauts, chacun est d'une longueur (N) égale à 120800 points, afin d'avoir une base de données suffisante on les divise chacun en un nombre de tranche K_t d'une longueur de N_m points tout en faisant en sorte que les tranches obtenues soit représentative du mouvement vibratoire de la machine alors couvrir un nombre suffisant du plus grand cycle possédant la plus grande période de répétition alors la plus petite fréquence qui est dans notre cas la fréquence de la cage qui représenter dans le tableau (2) du chapitre 3 égale à :

$$f_{\text{cage}} = 11.48 \text{HZ}$$

Alors, le nombre de tranche est défini comme suit :

La période de la cage est égale à :

$$T_{\text{cage}} = \frac{1}{f_{\text{cage}}} = 0.0871 \text{ sec.}$$

La fréquence d'échantillonnage est égale à :

$$F_e = 12000 \text{ HZ}$$

Le nombre de points par période est égale à :

$$N_p = \frac{Fe}{f_{cage}} = \frac{12000}{11.48} = 1046 \text{ points.}$$

Si nous prenons un nombre de cycle égale à 5, la longueur nécessaire pour chaque tranche sera : $N_t=5230$ points.

Si on prend pour N_m une valeur de 2^n supérieure à N_t :

$$N_m=8192 \text{ points}$$

Alors le nombre de tranches K_t dans le cas d'un recouvrement s de 50%, soit $S1 = \frac{N_m}{2} = 4096$ points, est égale à :

$$K_t = \frac{N-S1}{N_m-S1} = \frac{120800-4096}{4096} \cong 28 \text{ Tranches}$$

Donc, nous avons obtenu 112 signaux; 28 signaux pour chaque classe.

III. Prétraitement et calcul des indicateurs :

Dans cette partie nous avons calculé des indicateurs de type statistiques qui sont les suivants : l'écart type (ET), le facteur de crête (F_c), la valeur crête-crête (A_{cc}), la variance (var) et le facteur d'aplatissement Kurtosis (K_u). Ces indicateurs temporels sont calculés dans 5 bandes fréquentielles pour chaque tranche, ces bandes fréquentielle sont: [0-1500HZ], [1500-3000HZ], [3000-4500HZ],[4500-6000HZ] et [0-6000HZ]. Les indicateurs considérés sont les moyennes des indicateurs calculés dans les cinq bandes. Un prétraitement qui consiste en un filtrage passe bande était effectué.

Les figures 41, 42, 43, 44 et 45 représentent graphiquement la variation des 5 indicateurs en fonction des 112 observations (nombre de tranches).

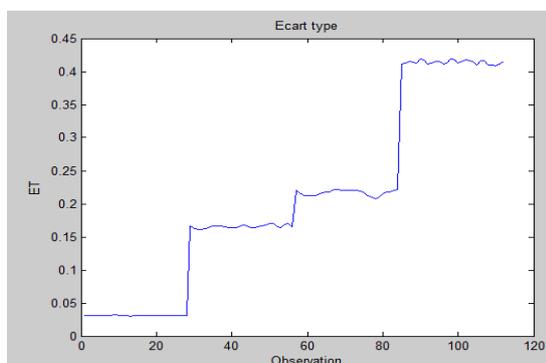


Figure 41 : Variation de l'indicateur (ET).

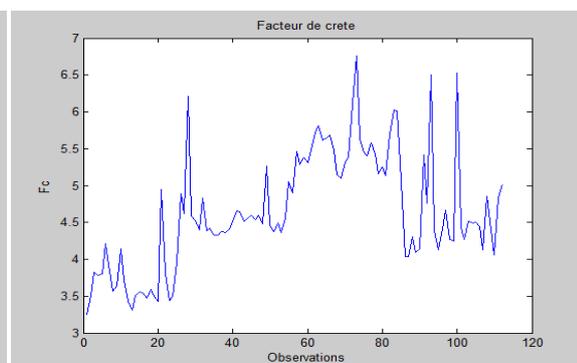


Figure 42 : Variation de l'indicateur (Fc).

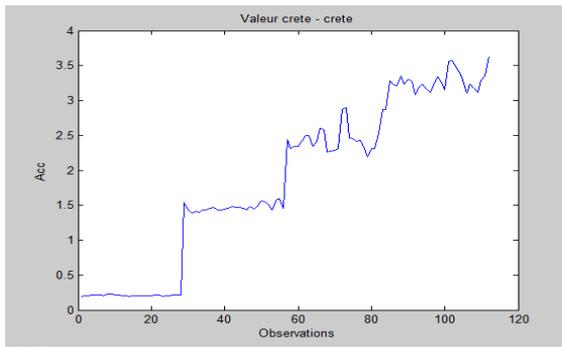


Figure 43 : Variation de l'indicateur (Acc)

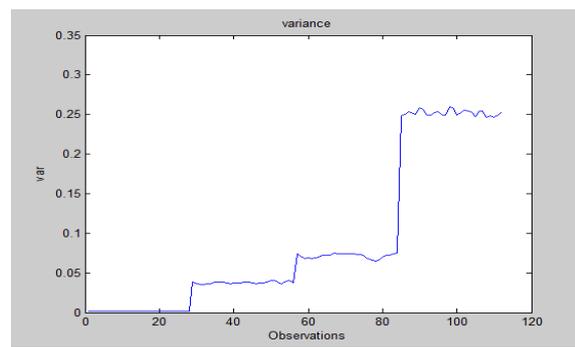


Figure 44 : Variation de l'indicateur (Va)

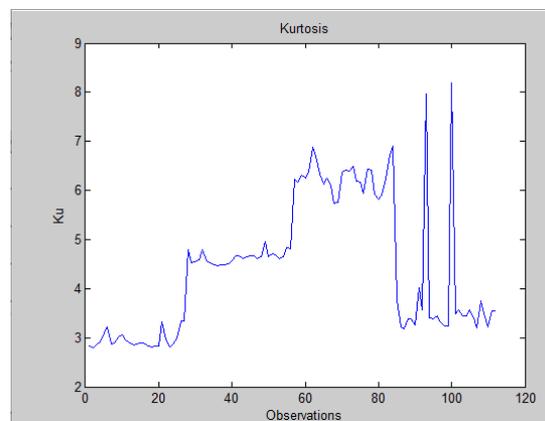


Figure 45 : Variation de l'indicateur (Ku).

D'après ces graphes représentant la variation des indicateurs calculés on remarque que le plus représentatifs de l'état du roulement sont les indicateurs représentés sur les figures (41, 43, et 44) qui sont respectivement l'écart type (ET), la valeur crete-crete (Acc) et la variance (Var). Les valeurs numériques des trois indicateurs sont réparties en 4 niveaux séparés totalement l'un de l'autre, Ces niveaux correspondent aux quatre états de fonctionnement étudiés, et par conséquent les trois indicateurs ET, Acc, et Var sont les plus pertinents pour la classification

Remarque : pour la matrice des 5 paramètres calculés voir annexe 1.

IV. Constitution du vecteur forme :

Le vecteur forme regroupe les données que nous devons classer (base de données) qui sont les entrées de notre système à inférence floue. Dans notre cas ils sont sous la forme suivante :

$$\text{Vecteur forme} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ X_{1121} & X_{1122} & X_{1123} \end{pmatrix}$$

Les données sont stockés dans une matrice (N*M), où :

- N correspond aux nombres d'observations (tranches) qui est égal à 112 (de 1 à 28 c'est pour le signal sans défaut c'est ce que nous appellerons la classe 1, de 29 à 56 c'est pour le signal avec le défauts de 0.007inches c'est la classe 2 , de 57 à 84 c'est pour le signal avec le défauts de 0.021 inches c'est la classe 3 et de 85 à 112 c'est pour le signal avec le défauts de 0.028 inches c'est la classe 4);

- M est le nombre d'indicateurs qui égale aux trois sélectionnés ((ET), (Acc), (Var)). Représenté par les colonnes 1, 3 et 4 dans le tableau de l'annexe (1)

V. Classification par système à inférence floue (SIF) :

Après la constitution du vecteur forme qui sera l'entrée de notre système (la base de données à classifier (roulements)) nous créons notre système à inférence flou.

V.1. Création et implémentation du (SIF) sous Matlab :

V.1.1. Implémentation par l'interface graphique :

Nous avons choisi, un système du type Mamdani avec trois variables d'entrée ((ET), (Acc), (Var)) et une variable à la sortie (Etat). Et les paramètres suivant ont été choisi pour le système :

- ET_méthode: méthode utilisée pour l'opérateur ET (**min**),
- OU_méthode: méthode utilisée pour l'opérateur OU (**max**),
- Imp_méthode: méthode d'implication (**min**),
- Agg_méthode: méthode d'agrégation des règles (**max**),
- Deffuz_méthode: méthode dedéfuzzification (**centroid**),

Le schéma en bloc du (SIF) est représenté sur la figure (4.6)

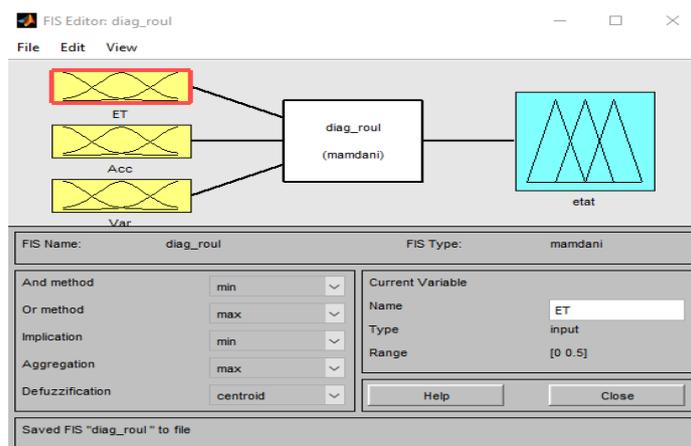


Figure 46 : Schéma bloc du (SIF).

V.1.1.1 Fuzzification des variables d'entrées et de sortie :

➤ Fuzzification de la variable d'entrée « écart-type (ET) » :

L'intervalle de variation choisit pour cette variable est $[0 ; 0.5]$ et nous lui avons associée 4 fonction d'appartenance de type triangulaire. La première représentative de terme « P » avec trois paramètres $[0 ; 0.05 ; 0.1]$, La deuxième représentative de terme « M » avec trois paramètres $[0.1 ; 0.15 ; 0.2]$, La troisième représentative de terme « G » avec trois paramètres $[0.2 ; 0.25 ; 0.3]$ et La quatrième représentative de terme « TG » avec trois paramètres $[0.3 ; 0.4 ; 0.5]$.

La figure (47) montre la fuzzification de cette variable.

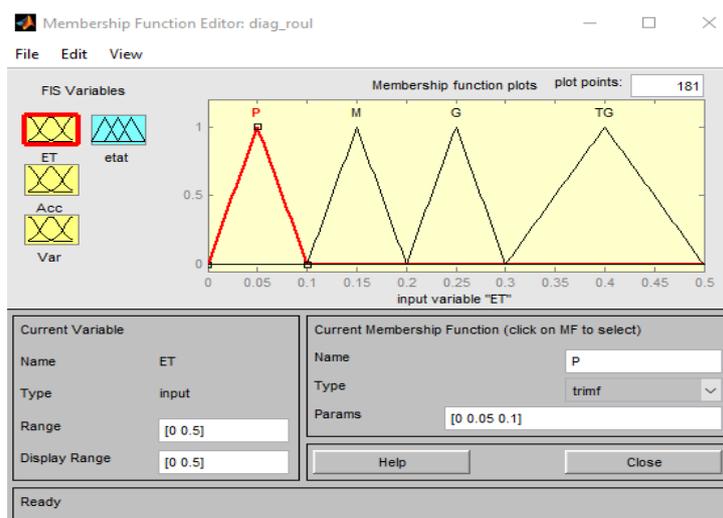


Figure 47 : Fuzzification de la variable d'entrée « l'écart_type(ET) ».

➤ **Fuzzification de la variable d'entrée « valeur crête-crête (Acc) » :**

L'intervalle de variation choisit pour cette variable est $[0 ; 4]$ et nous lui avons associée 4 fonctions d'appartenances de type triangulaire. La première représentative de terme « P » avec trois paramètres $[0 ; 0.5 ; 1]$, La deuxième représentative de terme « M » avec trois paramètres $[1 ; 1.5 ; 2]$, La troisième représentative de terme « G » avec trois paramètres $[2 ; 2.5 ; 3]$ et La quatrième représentative de terme « TG » avec trois paramètres $[3 ; 3.5 ; 4]$. La figure (48) montre la fuzzification de cette variable.

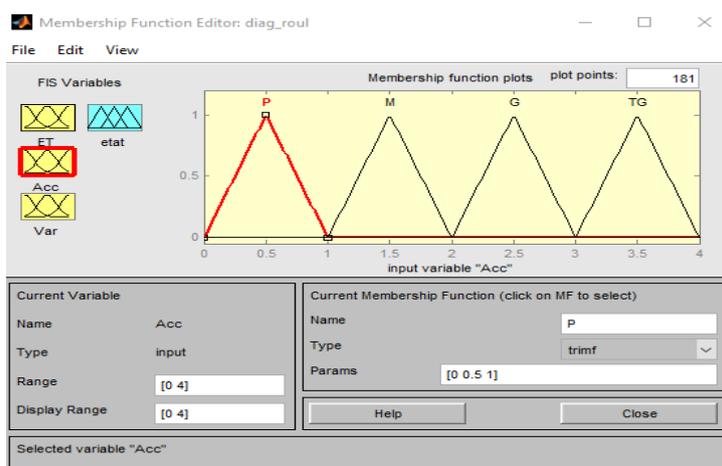


Figure 48 : Fuzzification de la variable d'entrée «valeur crête-crête (Acc)».

➤ **Fuzzification de la variable d'entrée « Variance (Var) » :**

L'intervalle de variation choisit pour cette variable est $[0 ; 0.3]$ et nous lui avons associée 4 fonction d'appartenance de type triangulaire. La première représentative de terme « P » avec trois paramètres $[0 ; 0.01 ; 0.02]$, La deuxième représentative de terme « M » avec trois paramètres $[0.02 ; 0.03 ; 0.05]$, La troisième représentative de terme « G » avec trois paramètres $[0.05 ; 0.07 ; 0.1]$ et La quatrième représentative de terme « TG » avec trois paramètres $[0.1 ; 0.2 ; 0.3]$. La figure (49) montre la fuzzification de cette variable.

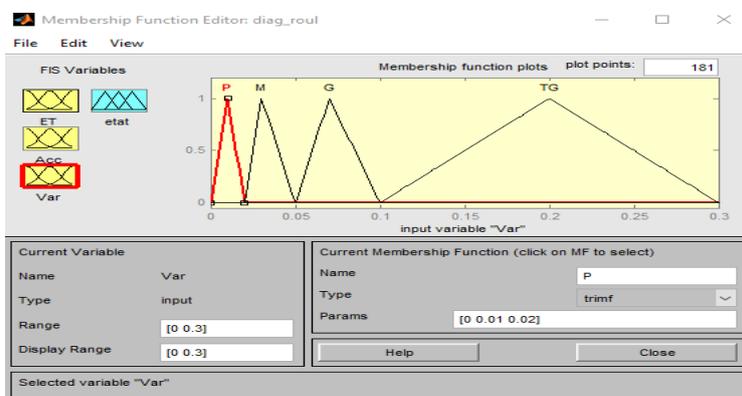


Figure 49 : Fuzzification de la variable d'entrée «Variance (Var)».

➤ **Fuzzification de la variable de sortie « état de roulement (etat) » :**

L'intervalle de variation choisit pour cette variable est [0 ; 8] et nous lui avons associée 4 fonction d'appartenance de type triangulaire. La première représentative de terme « CL1 » pour la classe sans défaut avec trois paramètre [0 ; 1 ; 2], La deuxième représentative de terme « CL2 » pour la classe avec défaut de diamètre (0.007 inches) avec trois paramètre [2 ; 3 ; 4], La troisième représentative de terme « CL3 » pour la classe avec défaut de diamètre (0.021 inches) avec trois paramètre [4 ; 5 ; 6] et La quatrième représentative de terme « CL4 » pour la classe avec défaut de diamètre (0.028 inches) avec trois paramètres [6 ; 7 ; 8]. La figure (50) montre la fuzzification de cette variable.

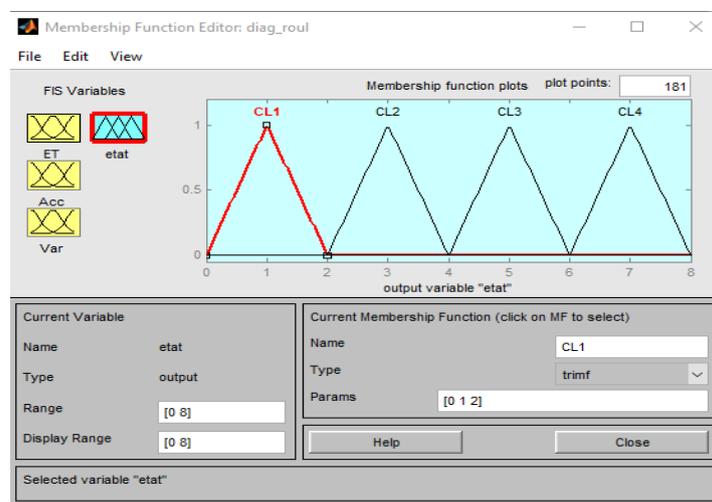


Figure 50 : Fuzzification de la variable de sortie «état du roulement (etat)».

V.1.1.2 Règles d'inférence :

Le nombre de règles d'inférence représentant toute les combinaisons possibles des variables d'entrées est égale à $64 = (4^3)$ sont énumérées ci-dessous :

1. SI [(ET est P) et (Acc est P) et (Var est P)] ALORS (état est CL1) (1)
2. SI [(ET est P) et (Acc est P) et (Var est M)] ALORS (état est CL1)(1)
3. SI [(ET est P) et (Acc est P) et (Var est G)] ALORS (état est CL3)(1)
4. SI [(ET est P) et (Acc est P) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4) (1)
5. SI [(ET est P) et (Acc est M) et (Var est P)] ALORS (état est CL1) (1)
6. SI [(ET est P) et (Acc est M) et (Var est M)] ALORS (état est CL2) (1)
7. SI [(ET est P) et (Acc est M) et (Var est G)] ALORS (état est CL3)(1)
8. SI [(ET est P) et (Acc est M) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)
9. SI [(ET est P) et (Acc est G) et (Var est P)] ALORS (état est CL3) (1)

10. SI [(ET est P) et (Acc est G) et (Var est M)] ALORS (état est CL3)(1)
11. SI [(ET est P) et (Acc est G) et (Var est G)] ALORS (état est CL3)(1)
12. SI [(ET est P) et (Acc est G) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4) (1)
13. SI [(ET est P) et (Acc est TG) et (Var est P)] ALORS (état est CL4) (1)
14. SI [(ET est P) et (Acc est TG) et (Var est M)] ALORS (état est CL4) (1)
15. SI [(ET est P) et (Acc est TG) et (Var est G)] ALORS (état est CL4)(1)
16. SI [(ET est P) et (Acc est TG) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)
17. SI [(ET est M) et (Acc est P) et (Var est P)] ALORS (état est CL1)(1)
18. SI [(ET est M) et (Acc est P) et (Var est M)] ALORS (état est CL2) (1)
19. SI [(ET est M) et (Acc est P) et (Var est G)] ALORS (état est CL3)(1)
20. SI [(ET est M) et (Acc est P) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)
21. SI [(ET est M) et (Acc est M) et (Var est P)] ALORS (état est CL2)(1)
22. SI [(ET est M) et (Acc est M) et (Var est M)] ALORS (état est CL2)(1)
23. SI [(ET est M) et (Acc est M) et (Var est G)] ALORS (état est CL3)(1)
24. SI [(ET est M) et (Acc est M) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)
25. SI [(ET est M) et (Acc est G) et (Var est P)] ALORS (état est CL3)(1)
26. SI [(ET est M) et (Acc est G) et (Var est M)] ALORS (état est CL3)(1)
27. SI [(ET est M) et (Acc est G) et (Var est G)] ALORS (état est CL3)(1)
28. SI [(ET est M) et (Acc est G) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)
29. SI [(ET est M) et (Acc est TG) et (Var est P)] ALORS (état est CL4)(1)
30. SI [(ET est M) et (Acc est TG) et (Var est M)] ALORS (état est CL4)(1)
31. SI [(ET est M) et (Acc est TG) et (Var est G)] ALORS (état est CL4)(1)
32. SI [(ET est M) et (Acc est TG) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)
33. SI [(ET est G) et (Acc est P) et (Var est P)] ALORS (état est CL3)(1)
34. SI [(ET est G) et (Acc est P) et (Var est M)] ALORS (état est CL3)(1)
35. SI [(ET est G) et (Acc est P) et (Var est G)] ALORS (état est CL3)(1)
36. SI [(ET est G) et (Acc est P) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)
37. SI [(ET est G) et (Acc est M) et (Var est P)] ALORS (état est CL3)(1)
38. SI [(ET est G) et (Acc est M) et (Var est M)] ALORS (état est CL3)(1)

39. SI [(ET est G) et (Acc est M) et (Var est G)] ALORS (état est CL3)(1)
40. SI [(ET est G) et (Acc est M) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)
41. SI [(ET est G) et (Acc est G) et (Var est P)] ALORS (état est CL3)(1)
42. SI [(ET est G) et (Acc est G) et (Var est M)] ALORS (état est CL3)(1)
43. SI [(ET est G) et (Acc est G) et (Var est G)] ALORS (état est CL3)(1)
44. SI [(ET est G) et (Acc est G) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)
45. SI [(ET est G) et (Acc est TG) et (Var est P)] ALORS (état est CL4)(1)
46. SI [(ET est G) et (Acc est TG) et (Var est M)] ALORS (état est CL4)(1)
47. SI [(ET est G) et (Acc est TG) et (Var est G)] ALORS (état est CL4)(1)
48. SI [(ET est G) et (Acc est TG) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)
49. SI [(ET est TG) et (Acc est P) et (Var est P)] ALORS (état est CL4)(1)
50. SI [(ET est TG) et (Acc est P) et (Var est M)] ALORS (état est CL4)(1)
51. SI [(ET est TG) et (Acc est P) et (Var est G)] ALORS (état est CL4)(1)
52. SI [(ET est TG) et (Acc est P) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)
53. SI [(ET est TG) et (Acc est M) et (Var est P)] ALORS (état est CL4)(1)
54. SI [(ET est TG) et (Acc est M) et (Var est M)] ALORS (état est CL4)(1)
55. SI [(ET est TG) et (Acc est M) et (Var est G)] ALORS (état est CL4)(1)
56. SI [(ET est TG) et (Acc est M) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)
57. SI [(ET est TG) et (Acc est G) et (Var est P)] ALORS (état est CL4)(1)
58. SI [(ET est TG) et (Acc est G) et (Var est M)] ALORS (état est CL4)(1)
59. SI [(ET est TG) et (Acc est G) et (Var est G)] ALORS (état est CL4)(1)
60. SI [(ET est TG) et (Acc est G) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)
61. SI [(ET est TG) et (Acc est TG) et (Var est P)] ALORS (état est CL4)(1)
62. SI [(ET est TG) et (Acc est TG) et (Var est M)] ALORS (état est CL4)(1)
63. SI [(ET est TG) et (Acc est TG) et (Var est G)] ALORS (état est CL4)(1)
64. SI [(ET est TG) et (Acc est TG) et (Var est TG)] ALORS (état est CL4)(1)

V.1.1.3 Défuzzification de la variable de sortie :

Exemple de teste :

On prend un exemple d'application pour une observation de la deuxième classe(CL2) :

$$X = [0.1625, 1.43, 0.036]$$

On a posé écart-type= 0.1625 et la valeur crete-crete = 1.43 et la variance = 0.036 alors l'état du dispositif étudié est considéré comme CL2 (état = 3)

Ces valeurs sont portées à titre d'exemple, le système proposé accepte toutes les combinaisons possibles.

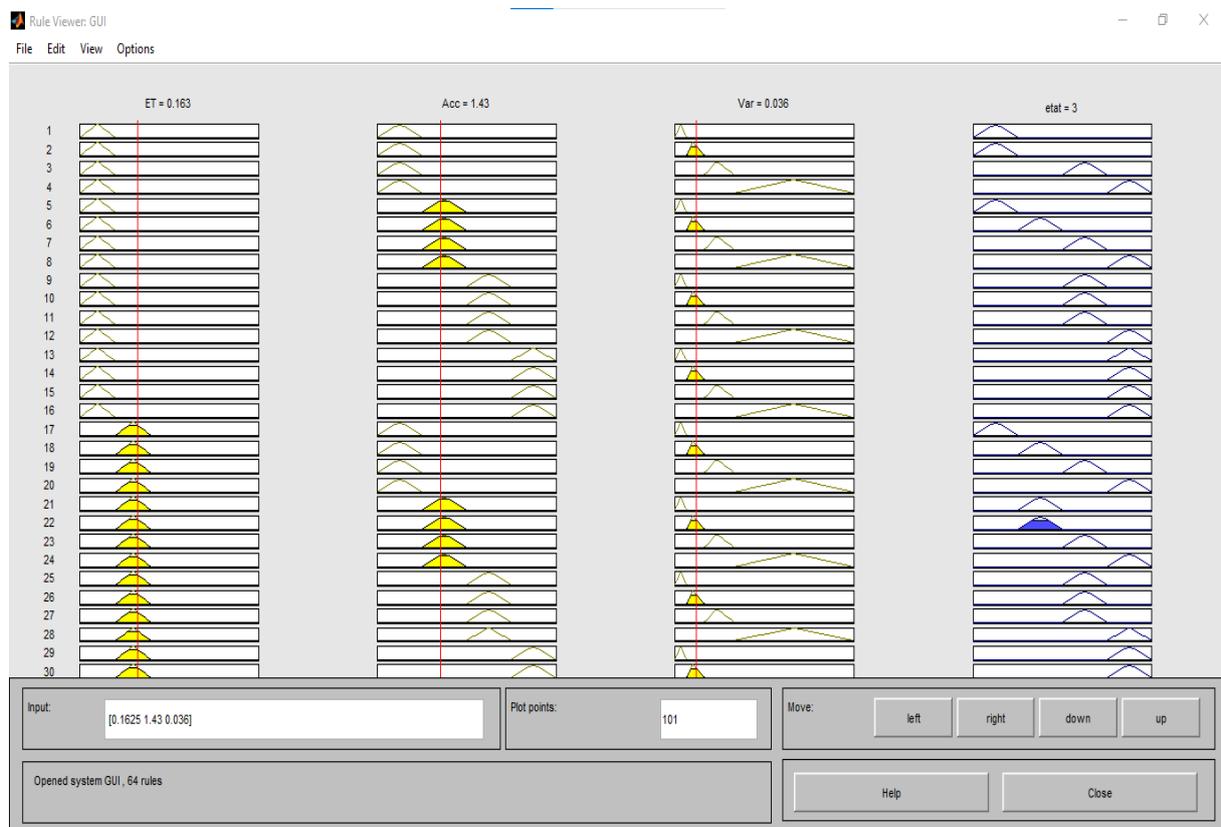


Figure 51: Défuzzification de la variable de sortie (état).

V.1.2. Implémentation du (SIF) à l'aide des commandes de la boîte à outil:

Nous avons conçu un programme sous l'environnement Matlab pour l'implémentation du système d'inférence floue (SIF) pour la classification et le diagnostic des défauts de roulements à l'aide des commandes de la boîte à outils

« fuzzy logic ». Le programme développé est présenté dans l'annexe (2).

V.2. Classification de la base de données à l'aide du système à inférence floue :

Le programme développé dans la section V.1.2., permet la classification des observations de la base de données. Les résultats de cette classification sont présentés dans l'annexe (3).

Les résultats présentés dans l'annexe sont sous formes d'une matrice de deux lignes la première contient le numéro de l'observation (de 1 à 112) et la seconde contient les résultats de sortie de la classification des observations qui représente la variable de sortie de notre système « état du roulement (etat) ».

Lors de la fuzzification de la variable de sortie (etat) on lui a défini l'intervalle de variation $[0 ; 8]$ et quatre sous ensemble flou représentant les termes CL1, CL2, CL3, et CL4 ; SI la valeur de la sortie (état) $\in[0 ; 2]$, on est dans la classe CL1, SI état $\in[2 ; 4]$, on est dans le niveau CL2, SI état $\in[4 ; 6]$, on est dans la classe CL3, et SI état $\in[6 ; 8]$, on est dans la classe CL4.

V.3. Résultat et discussions :

V.3.1. Représentation graphique des résultats :

Les résultats obtenus pour la classification de la base de données par notre système à inférence floue sont graphiquement représentés sur la figure (4.12).

Sur l'axe des abscisses sont représentées les 112 observations de notre base de données et l'axe des ordonnées comporte les valeurs que prend la variable de sortie (état du roulement) qui varie dans l'intervalle $[0 ; 8]$.

Pour les 28 premières observations on obtient une valeur de sortie égale à $1 \in [0 ; 2]$ alors cette sortie appartient à la classe (CL1) ce qui implique que ces observations sont classées correctement par notre système vu que ces 28 premières observations proviennent du signal sans défaut.

Pour les observations de 29 à 56 on obtient une valeur de sortie égale à $3 \in [2 ; 4]$ alors cette sortie appartient à la classe (CL2) ce qui implique que ces observations sont classées correctement par notre système vu que ces 28 observations proviennent du signal avec un défaut de diamètre 0.007 inch.

Pour les observations de 57 à 84 on obtient une valeur de sortie égale à $5 \in [4 ; 6]$ alors cette sortie appartient à la classe (CL3) ce qui implique que ces observations sont classées correctement par notre système vu que ces 28 observations proviennent du signal avec un

défaut de diamètre 0.021inch

Pour les observations de 85 à 112 on obtient une valeur de sortie égale à $7 \in [6 ; 8]$ alors cette sortie appartient à la classe (CL4) ce qui implique que ces observations sont classées correctement par notre système vu que ces 28 observations proviennent du signal avec un défaut de diamètre 0.028inch

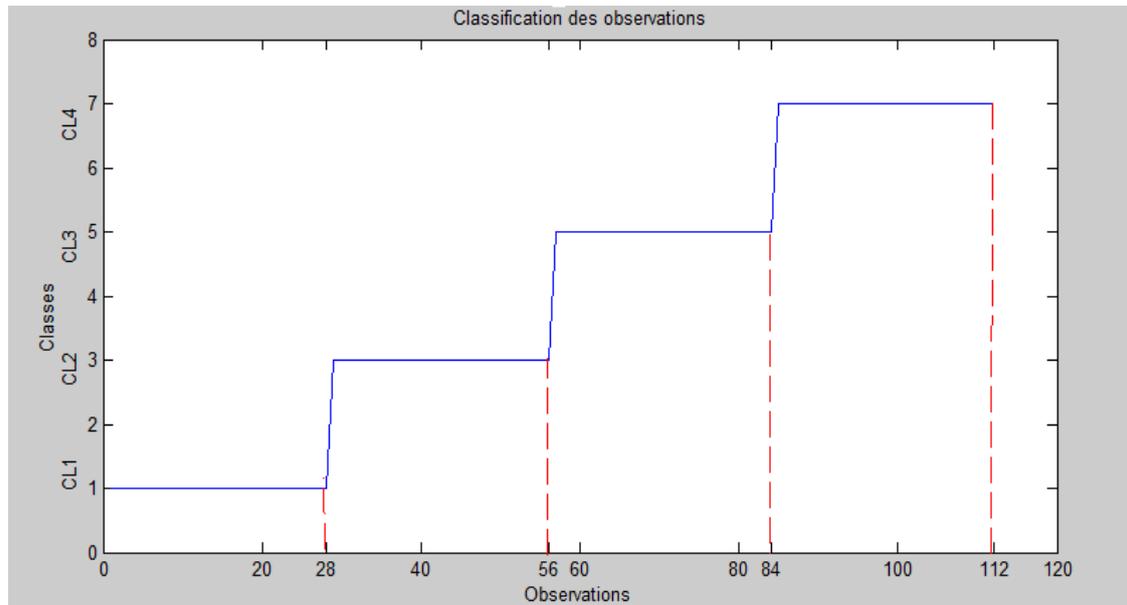


Figure 52 : classification de la base de données (roulements).

V.3.2. Interprétation du résultat de classification :

Le taux de bonne classification des observations par notre système à inférence floue est de 100%.

Ce taux de bonne classification est dû à :

-La pertinence des indicateurs sélectionnés pour construire le vecteur forme qui permettent de distinguer les différentes classes de défauts, cette pertinence vient de fait que ces indicateurs ont été calculés dans les bandes fréquentielles adéquates suite à un traitement des signaux de la base de données (filtrage).

-Le nombre de sous ensemble flou associer à chaque variables d'entrée est de quatre pareil aux nombre de classes de la sortie qui est l'état du roulement et l'intervalle de définition de chacun de ces sous-ensembles flous était établi suivant les valeurs que prennent ces indicateurs pour chaque observation.

- les paramètres choisis pour notre système à inférence floue et la base de règles établis permettent d'accorder la sortie avec les entrées.

Enfin, on peut dire que le système d'inférence floue (SIF) établi, avec cette configuration,

Permet la dissociation claire des quatre classes.

VI. Conclusion :

L'identification et la caractérisation du problème pour lequel le système à inférence floue va être conçu pour servir de système expert, système d'aide à la décision, système de classification ou autre est l'étape la plus importante ; les variables d'entrées et de sortie sont définies ainsi que leur intervalle de définitions, les fonctions d'appartenance associées et la base de règles reliant les entrées aux sorties sont définies dans cette étape ; dans la pratique ces données sont issues d'expert ou d'opérateur leur précieuse information permet la caractérisation de problème et systèmes complexes.

La facilité de mise en œuvre de ce type de système est un atout majeur qui commence à faire ses entrées dans le secteur de la maintenance en vue de pouvoir un jour l'automatiser et contribuer au développement industriel.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce projet de fin d'études, nous avons abordé le domaine de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes en utilisant des systèmes à inférence floue. Notre objectif principal était de développer une approche capable de détecter et de classer les défauts mécaniques à partir des mesures de vibrations.

Dans le premier chapitre, nous avons introduit la notion de surveillance et expliqué la chaîne de mesure des vibrations mécaniques. Nous avons également examiné les différents types d'indicateurs de surveillance utilisés pour évaluer l'état des machines tournantes, en mettant l'accent sur leur importance dans la détection des défauts.

Le deuxième chapitre a été consacré à la logique floue. Nous avons défini les principes de base de la logique floue, en mettant en évidence les ensembles flous et leurs caractéristiques. Nous avons également présenté les opérations sur les ensembles flous, ainsi que les variables linguistiques et les propositions floues, qui sont des éléments clés de la logique floue. Enfin, nous avons abordé les systèmes à inférence floue, décrivant leur fonctionnement général et les étapes de leur mise en œuvre.

Dans le troisième chapitre, nous avons détaillé le processus de classification des défauts par un système d'inférence floue. Nous avons discuté des étapes de l'acquisition des signaux, du prétraitement des données, du traitement des données et de la construction du vecteur forme. Nous avons également décrit la mise en œuvre du système à inférence floue en utilisant MATLAB et présenté le banc d'essai utilisé dans notre étude.

Le quatrième chapitre s'est concentré sur la division des signaux, le prétraitement des données et le calcul des indicateurs. Nous avons ensuite expliqué comment constituer le vecteur forme et effectuer la classification des données à l'aide du système à inférence floue. Nous avons présenté deux méthodes d'implémentation, à la fois par l'interface graphique de MATLAB et en utilisant les commandes de la boîte à outils. Enfin, nous avons analysé les résultats de classification et discuté de leur interprétation.

En conclusion, notre étude a démontré l'efficacité de l'utilisation des systèmes à inférence floue dans la surveillance et le diagnostic des machines tournantes. La logique floue nous a permis de traiter l'incertitude et l'imprécision inhérentes aux mesures de vibrations

mécaniques, offrant ainsi une approche robuste et adaptative pour la détection des défauts. Nous avons réussi à mettre en place un système de classification fiable basé sur les principes de la logique floue et à obtenir des résultats prometteurs.

Cependant, il convient de souligner que des améliorations et des validations supplémentaires peuvent être nécessaires pour une application pratique et industrielle de notre approche. Des études supplémentaires pourraient être menées pour évaluer les performances du système sur un plus large éventail de défauts et de conditions de fonctionnement. Malgré cela, notre projet ouvre des perspectives intéressantes pour l'utilisation de la logique floue dans le domaine de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes, offrant ainsi une contribution significative à ce domaine de recherche en évolution constante.

**Références
bibliographique**

Références bibliographiques

- [1] MEHDIA, Ghazlane. Techniques de surveillance des machines tournantes. 1ere édition. Tunisie, 2013,
- [2] ALAIN, Boulenger. CHRISTIAN, Pauchaud. Aide-mémoire, surveillance des machines par analyse des vibrations 3eme édition. Paris : duond,2009.
- [3] Ilyes KHELF, DIAGNOSTIC DES MACHINES TOURNANTES PAR LES TECHNIQUES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, thèse de doctorat en génie mécanique, UNIVERSITE BADI MOKHTAR – ANNABA, 2014.
- [4] ALAIN, Boulenger. CHRISTIAN, Pauchaud. Analyse vibratoire en maintenance, surveillance et diagnostic des machines. Paris : duond,2007,419p.
- [5] (Zadeh, 1965) L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets, Information and Control", Vol. 8, PP 338-352, 1965.
- [6] Kasabov, N. K. (1996). Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering. Cambridge, MA: The MIT Press
- [7] Leila NACIB, DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS DANS LES MACHINES TOURNANTES PAR L'ANALYSE VIBRATOIRE, thèse doctorat en électromécanique , UNIVERSITE BADI MOKHTAR – ANNABA, 2015
- [8] AUGÉIX, David. Analyse Vibratoire Des Machines Tournantes [en ligne]. In : Technique de l'ingénieur.
- [9] Jacques MOREL, Surveillance vibratoire et maintenance prédictive In : Technique de l'ingénieur
- [10] Landolsi Foued « partie I, surveillance des machines par analyse vibratoire » cours de techniques de surveillance.

- [11] HARROUCHE Fateh, Etude Comparative de Deux Méthodes D'optimisation d'un Système de Classification des Défauts Mécaniques par la Logique Floue, thèse de doctorat, UFAS, Sétif, 2019.
- [12] Bernadette Bouchon-Meunier - Logique floue, principes, aide à la décision, éditions Lavoisier, 2003.
- [13] Mokeddem, D. (2010). Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques. Thèse de doctorat en Sciences en Electronique, Université Ferhat Abbas de Sétif.
- [14] BOUCHON-MEUNIER, Bernadette. *La logique floue: «Que sais-je?» n° 2702*. Que sais-je, 2007.
- [15] Barkati, H. (2019/2020). Modélisation floue d'un système non linéaire. Mémoire de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf- M'sila.
- [16] SANGALLI, Arturo. Éloge du flou : Aux frontières des mathématiques et de l'intelligence artificielle. Nouvelle édition [en ligne]. Montréal : Presses de l'Université de Montréal, 2001 (généré le 26 juin 2023). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/pum/14176>>. ISBN : 9791036513572. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.pum.14176>.
- [17] Boukaka, S. (2015). Réalisation d'une bibliothèque de lois de commande adaptative pour MSAP. Mémoire de maîtrise en génie électrique, Université du Québec à Trois-Rivières
- [18] HARROUCHE Fateh, Application de la logique floue aux machines tournantes, Mémoire de magister, UFAS, Sétif, 2011.
- [19], Jian-Da Wu, Chuang-Chin Hsu, "Fault gear identification using vibration signal with discrete wavelet transform technique and fuzzy-logic inference", *Expert Systems with Applications* 36(2009) 3785-3794.
- [20], Xincheng Lou, Kenneth A Loparo, "Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference", *Mechanical Systems and Signal Processing* 18 (2004) 1077-1095.

ANNEXES

ANNEXE (1)

Matrice des 5 indicateurs calculés pour les 112 tranches de signal.

Remarque : on a :

En lignes : les tranches obtenus par la division des signaux de 1 à 112.

En colonnes : les indicateurs calculés de 1 à 5, et qui sont ; respectivement ET, F_c , A_{cc} , Var, K_u .

	1	2	3	4	5
1	0.0310	3.2566	0.1907	0.0016	2.8269
2	0.0310	3.5109	0.2037	0.0017	2.7847
3	0.0310	3.8276	0.2034	0.0016	2.8565
4	0.0308	3.7729	0.2119	0.0016	2.9176
5	0.0314	3.8035	0.2132	0.0017	3.0986
6	0.0311	4.2071	0.2190	0.0017	3.2119
7	0.0306	3.8370	0.2054	0.0016	2.8706
8	0.0313	3.5703	0.2306	0.0017	2.8901
9	0.0317	3.6375	0.2317	0.0017	3.0041
10	0.0311	4.1436	0.2131	0.0017	3.0593
11	0.0312	3.7193	0.2112	0.0017	2.9514
12	0.0306	3.4267	0.2053	0.0016	2.8852
13	0.0301	3.3094	0.2032	0.0015	2.8535
14	0.0312	3.5077	0.1962	0.0017	2.8711
15	0.0313	3.5513	0.2079	0.0017	2.8934
16	0.0310	3.5381	0.2068	0.0017	2.8831
17	0.0311	3.4771	0.1992	0.0017	2.8268
18	0.0310	3.5872	0.2057	0.0016	2.8169
19	0.0306	3.4983	0.2033	0.0016	2.8225
20	0.0312	3.4325	0.2078	0.0017	2.8361
21	0.0315	4.9532	0.2158	0.0017	3.3266
22	0.0309	3.8135	0.2131	0.0016	2.9604
23	0.0310	3.4383	0.1939	0.0017	2.7992
24	0.0311	3.4994	0.1999	0.0017	2.8696
25	0.0311	3.9521	0.2080	0.0017	2.9889
26	0.0315	4.8908	0.2190	0.0017	3.3431
27	0.0311	4.6204	0.2141	0.0017	3.3488
28	0.0306	6.2096	0.2135	0.0016	4.7840
29	0.1665	4.5867	1.5349	0.0383	4.5190

30	0.1625	4.5268	1.4311	0.0362	4.5388
31	0.1611	4.4029	1.3838	0.0354	4.5837
32	0.1614	4.8301	1.4050	0.0355	4.7950
33	0.1620	4.3806	1.4026	0.0359	4.5768
34	0.1639	4.4167	1.4373	0.0368	4.5348
35	0.1667	4.3239	1.4371	0.0383	4.4883
36	0.1667	4.3222	1.4589	0.0384	4.4750
37	0.1666	4.3783	1.4659	0.0383	4.4961
38	0.1656	4.3621	1.4321	0.0377	4.4774
39	0.1637	4.4137	1.4353	0.0367	4.5129
40	0.1641	4.5190	1.4495	0.0369	4.5735
41	0.1643	4.6574	1.4523	0.0370	4.6687
42	0.1656	4.6400	1.4825	0.0376	4.6711
43	0.1672	4.5186	1.4717	0.0385	4.6170
44	0.1661	4.5660	1.4695	0.0379	4.6532
45	0.1639	4.5999	1.4529	0.0369	4.6731
46	0.1634	4.5403	1.4317	0.0366	4.6660
47	0.1645	4.5922	1.4741	0.0372	4.6065
48	0.1659	4.4845	1.4470	0.0379	4.6588
49	0.1675	5.2683	1.4867	0.0387	4.9620
50	0.1703	4.4653	1.5609	0.0402	4.6521
51	0.1700	4.3757	1.5515	0.0401	4.7079
52	0.1656	4.4906	1.5025	0.0377	4.6717
53	0.1637	4.3626	1.4280	0.0367	4.6019
54	0.1686	4.5515	1.5702	0.0394	4.6478
55	0.1710	5.0472	1.5909	0.0406	4.8301
56	0.1652	4.9027	1.4550	0.0375	4.8177
57	0.2208	5.4580	2.4406	0.0743	6.2342
58	0.2162	5.2821	2.3094	0.0712	6.1750
59	0.2120	5.3845	2.3458	0.0685	6.3004
60	0.2130	5.3048	2.3426	0.0688	6.2466
61	0.2124	5.4832	2.4175	0.0683	6.3647

62	0.2130	5.7164	2.4919	0.0692	6.8715
63	0.2142	5.8085	2.4959	0.0700	6.7074
64	0.2169	5.6193	2.3500	0.0718	6.3290
65	0.2173	5.6532	2.4175	0.0720	6.1281
66	0.2173	5.6859	2.5989	0.0722	6.2371
67	0.2217	5.4716	2.5784	0.0753	6.1065
68	0.2215	5.1407	2.2688	0.0747	5.7305
69	0.2206	5.1011	2.2694	0.0738	5.7601
70	0.2201	5.3219	2.2833	0.0739	6.3773
71	0.2199	5.3771	2.3131	0.0739	6.4035
72	0.2208	6.1087	2.8734	0.0741	6.3999
73	0.2202	6.7603	2.8967	0.0736	6.4966
74	0.2195	5.6261	2.4608	0.0733	6.1782
75	0.2162	5.4500	2.4486	0.0709	6.1684
76	0.2124	5.4080	2.4156	0.0683	5.9299
77	0.2095	5.5813	2.4286	0.0661	6.4233
78	0.2077	5.4269	2.3062	0.0649	6.4174
79	0.2097	5.1636	2.1955	0.0664	5.9176
80	0.2157	5.2491	2.3076	0.0704	5.8256
81	0.2180	5.1350	2.3079	0.0722	5.9045
82	0.2182	5.6939	2.5313	0.0726	6.2491
83	0.2203	6.0242	2.8705	0.0741	6.7221
84	0.2217	6.0126	2.8684	0.0749	6.9045
85	0.4111	5.0600	3.2809	0.2483	3.7778
86	0.4128	4.0384	3.2203	0.2499	3.2244
87	0.4153	4.0356	3.2061	0.2535	3.1782
88	0.4132	4.2989	3.3485	0.2516	3.3743
89	0.4127	4.0969	3.2322	0.2506	3.3864
90	0.4190	4.1376	3.3094	0.2582	3.2490
91	0.4167	5.4115	3.2711	0.2557	4.0182
92	0.4117	4.7564	3.0821	0.2494	3.5734
93	0.4120	6.5057	3.1953	0.2495	7.9580
94	0.4147	4.3851	3.2345	0.2520	3.4096

95	0.4150	4.1305	3.1635	0.2533	3.3884
96	0.4114	4.4140	3.1149	0.2493	3.4328
97	0.4119	4.6613	3.2276	0.2489	3.3301
98	0.4193	4.2632	3.3408	0.2591	3.2375
99	0.4183	4.2513	3.2548	0.2575	3.2400
100	0.4129	6.5317	3.1513	0.2495	8.1944
101	0.4150	4.4295	3.5572	0.2524	3.4840
102	0.4176	4.2738	3.5760	0.2550	3.5713
103	0.4165	4.5098	3.4938	0.2542	3.4417
104	0.4137	4.4889	3.3922	0.2522	3.4478
105	0.4101	4.5040	3.2938	0.2471	3.5743
106	0.4166	4.4492	3.1093	0.2548	3.4081
107	0.4163	4.1295	3.2369	0.2546	3.1920
108	0.4099	4.8529	3.1785	0.2463	3.7460
109	0.4102	4.4020	3.1214	0.2477	3.4268
110	0.4090	4.0549	3.2877	0.2458	3.2275
111	0.4117	4.8457	3.3520	0.2487	3.5445
112	0.4155	5.0192	3.6323	0.2538	3.5518

Résumé

Le projet de fin d'études porte sur la surveillance et le diagnostic des défauts mécaniques des machines tournantes en utilisant des systèmes à inférence floue. Le but de ce projet est d'explorer les avantages de l'utilisation de systèmes à inférence floue pour la surveillance et le diagnostic des défauts mécaniques dans les machines tournantes telles que les moteurs, les pompes et les turbines. Le projet comprendra une revue de la littérature sur les techniques de surveillance et de diagnostic des défauts mécaniques et une analyse approfondie des systèmes à inférence floue. Des études de cas seront menées pour évaluer l'efficacité des systèmes à inférence floue dans la surveillance et le diagnostic des défauts mécaniques dans les machines tournantes. Les résultats de cette étude permettront de déterminer si les systèmes à inférence floue peuvent être une solution efficace pour la surveillance et le diagnostic des défauts mécaniques dans les machines tournantes. Les conclusions de cette étude peuvent être utilisées par les ingénieurs et les professionnels de la maintenance pour améliorer la fiabilité et la disponibilité des machines tournantes.

Mots clés : système d'inférence floue, les machines tournantes, indicateur de surveillance, surveillance et diagnostic des défauts mécaniques.

Abstract :

The end-of-study project focuses on the monitoring and diagnosing mechanical faults in rotating machines using fuzzy inference systems. The purpose of this project is to explore the advantages of using fuzzy inference systems for monitoring and diagnosing mechanical faults in rotating machines such as motors, pumps, and turbines. The project will include a literature review on monitoring and diagnosing mechanical fault techniques and an in-depth analysis of fuzzy inference systems. Case studies will be conducted to evaluate the effectiveness of fuzzy inference systems in monitoring and diagnosing mechanical faults in rotating machines. The results of this study will determine if fuzzy inference systems can be an effective solution for monitoring and diagnosing mechanical faults in rotating machines. The conclusions of this study can be utilized by engineers and maintenance professionals to improve the reliability and availability of rotating machines.

Key Word : fuzzy inference systems, rotating machines, surveillance indicator, monitoring and diagnosing mechanical faults.