

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT MAINTENANCE INDUSTRIELLE



MEMOIRE DE MASTER

Filière : Génie Mécanique

Option Mécatronique

-Thème-

*Contribution à la détection et l'identification des défauts de roulement
par la logique floue*

Présenté par

MAHAMI Amine & BERKANE Med El Mehdi

JURY

Président Mr. BENZAOUZ.D

Encadreur Mr. RAHMOUNE.Ch

Examineur Mr. ADJERID.S

Examineur Mr. TOUATI.Y

Examineur Mr. ALEM.S

2016 / 2017

Remerciement

*Tout d'abord nous remercions Dieu qui nous a aidés à élaborer
notre mémoire.*

*Nous exprimons nos profondes gratitude à notre promoteur **Mr Ch. RAHMOUNE** pour nos avoir dirigé ce travail, nous la remercions pour la qualité de ses conseils, sa patience et son aide tout au long de notre thèse.*

Nos remerciements s'adressent aussi à Mr D. BENZAZZOUZ pour son aide et ces conseils durant notre cursus universitaire, et à tous les membres de jury qui ont bien voulu juger et examiner le présent mémoire.

Nous remercions toute personnes ayant contribues de près ou de loin au bon déroulement de ce travail.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Etat de l'art sur la surveillance industrielle	
Introduction.....	3
I.1 Définitions relatives à la surveillance	3
I.2 Les principales étapes de surveillance	8
I.3 Etat de l'art des méthodes de surveillance	9
I.3.1 Méthodes de surveillance avec modèle.....	9
I.3.1.1 Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelles et matérielles.....	10
I.3.1.2 Méthodes de surveillance par modélisation physique.....	10
I.3.2 Méthodes de surveillance sans modèle	11
I.3.2.1 Surveillance par reconnaissance des formes.....	11
Conclusion	13
Chapitre II : Etude théorique sur les roulements	
Introduction.....	14
II.1 Constitution générale d'un roulement.....	14
II.2 principaux types de roulement	15
II.2.1 Roulement à une rangée de billes oblique.....	15
II.2.2 Roulement à rotule sur deux rangées de billes.....	15
II.2.3 roulement à une rangée de rouleaux cylindriques	16
II.2.4 Roulement à aiguille	16
II.3 charge supportées par les roulements.....	16
II.4 choix du roulement	17
II.5 durée de vie d'un roulement.....	17
II.6 Défaillance des roulements	18
II.6.1. Endommagement primaire	18
II.6.2 Endommagement secondaire	18
Conclusion	20
Chapitre III : Traitement de signal et démarche expérimentale	
Introduction.....	21
III .1 Traitement de signal.....	21

Sommaire

III .1. 1 Définitions de base	21
III.1.2 Classification des signaux	21
III.1.1.1 Classification phénoménologique	22
III.1.1.2 Classification morphologique	22
III.1.3 Echantillonnage	23
III.1.3.1 Définition	23
III.1.3.2 Théorème de Shannon	23
III.1.4 Les indicateurs d'un signal	24
III.2 Démarche expérimentale	26
III.2.1 Extraction des indicateurs temporels	27
Conclusion	34
Chapitre IV : Théorie de la logique floue	
Introduction.....	35
IV.1 Définition.....	35
IV.2 Création et historique	35
IV.3 Intérêt d'utilisation de la logique floue.....	36
IV.4 Théorie des sous-ensembles flous	37
IV.4.1 Concept de sous-ensemble flou.....	37
IV.4.2 Définition d'un sous-ensemble flou	37
IV.4.3 Fonction d'appartenance	37
IV.4.3.1 Degré d'appartenance (Fuzzification)	40
IV.4.4 Caractéristiques d'un sous-ensemble flou.....	41
IV.4.5 Opérations sur les sous-ensembles flous.....	42
IV.4.6 Opérateurs logiques flous	43
IV.5 Système floue.....	44
IV.6 Conclusion	49
Chapitre V : Contribution de la logique floue pour la surveillance des roulements	
Introduction.....	50
V.1 Type de système.....	50
V.2 Constitution des variables d'entrées et de sorties du (SIF)	50
V.2.1 Constitution des variables d'entrées.....	50
V.2.2 Constitution des variables de sorties	51
V.3 Implémentation de système d'inférence flou sous Matlab	51

Sommaire

V.3.1 Structure du système d'inférence floue (SIF)	51
V.3.2 Fuzzification des variables d'entrées et de sorties	52
V.3.2.1 Fuzzification de la variable d'entrées (RMS).....	52
V.3.2.2 Fuzzification de la variable d'entrées (P2P):.....	53
V.3.2.3 Fuzzification de la variable d'entrées (Maxval)	53
V.3.2.4 Fuzzification de la variable d'entrées (Talf)	54
V.3.2.5 Fuzzification de la variable de sortie (Etat1)	54
V.3.2.6 Fuzzification de la variable de sortie (Etat2)	55
V.3.3 La base des règles.....	55
V.3.4 Defuzzification	56
V.4 Test et résultats de système d'inférence flou (fis)	56
V.4.1 Test 1	56
V.4.2 Test 2	57
V.4.3 Test 3	57
V.4.4 Test 4	58
V.4.5 Test en temps réel.....	59
V.6 Conclusion	61
Conclusion générale	62

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 Deux défauts conduisent à la même panne ce qui complique l'opération inverse.	5
Figure I.2 Architecture générale d'un système de surveillance.	7
Figure I.3 Les principales étapes de processus de surveillance.	8
Figure I.4 Principe de surveillance avec modèle.	10
Figure II.1 Principaux éléments constitutifs d'un roulement.....	14
Figure II.2 roulement a une rangé de billes a contact oblique.....	15
Figure II.3 Roulement a rotule sur deux rangées de billes.	15
Figure II.4 roulement a une rangée de rouleaux cylindriques.	16
Figure II.5 Roulement à aiguille.	16
Figure II.6 charge supportées par les roulements.....	17
Figure III.1 Classification morphologique des signaux.	22
Figure III.2 L'échantillonnage d'un signal $S(t)$	23
Figure III.3 Exemple d'un échantillonnage parfait.	24
Figure III.4 Exemple d'un mauvais échantillonnage (recouvrement).	24
Figure.III.5 Le banc d'essai de roulement.....	27
Figure.III.6 Variation de K_u en fonction de diamètre de défaut affectant la bague intérieure.	28
Figure.III.7 Variation de K_u en fonction de diamètre de défaut affectant la bille 28	28
Figure.III.8 Variation de K_u en fonction de diamètre de défaut affectant la bague extérieure.	28
Figure.III.9 Variation de RMS en fonction de diamètre de défaut affectant la bague intérieure.	29
Figure.III.10 Variation de RMS en fonction de diamètre de défaut affectant la bille.	29
Figure.III.11 Variation de RMS en fonction de diamètre de défaut affectant la bague extérieure.	29
Figure.III.12 Variation de P2P en fonction de diamètre de défaut affectant la bague intérieure.	30
Figure.III.13 Variation de P2P en fonction de diamètre de défaut affectant la bille.	30
Figure.III.14 Variation de P2P en fonction de diamètre de défaut affectant la bague extérieure.....	30
Figure.III.15 Variation de Maxval en fonction de diamètre de défaut affectant la bague intérieure..	31
Figure.III.16 Variation de Maxval en fonction de diamètre de défaut affectant la bille.....	31
Figure.III.17 Variation de Maxval en fonction de diamètre de défaut affectant la bague extérieure. 31	31
Figure.III.18 Variation de Talaf en fonction de diamètre de défaut affectant la bague intérieure.....	32
Figure.III.19 Variation de Talaf en fonction de diamètre de défaut affectant la bille.....	32
Figure.III.20 Variation de Talaf en fonction de diamètre de défaut affectant la bague extérieure.	32
Figure.III.21 Variation de Thikat en fonction de diamètre de défaut affectant la bague intérieure ...	33
Figure.III.22 Variation de Thikat en fonction de diamètre de défaut affectant la bile.	33
Figure.III.23 Variation de Thikat en fonction de diamètre de défaut affectant la bague extérieure... 33	33

Liste des figures

Figure IV.1 Fonction caractéristique.	38
Figure IV.2 Fonction d'appartenance	38
Figure IV.3 Fonction d'appartenance, variable et termes linguistique	38
Figure IV.4 Type de représentation des sous-ensembles floue.	39
Figure IV.5 Fonction d'appartenance linéaire par morceaux.....	39
Figure IV.6 Fonction d'appartenance singleton.	40
Figure IV.7 Fuzzification	40
Figure IV.8 Système flou.....	45
Figure IV.9 Méthode d'inférence max min	46
Figure IV.10 Méthode d'inférence max produit	47
Figure IV.11 Méthode d'inférence somme produit.....	48
Figure IV.9 Défuzzification par valeur maximale.....	49
Figure IV.9 Défuzzification par de centre de graviter.....	49
Figure V.1 Le schéma bloc du SIF.	52
Figure V.2 Fuzzification de la variable d'entrée « RMS ».	52
Figure V.3 Fuzzification de la variable d'entrée « P2P ».	53
Figure V.4 Fuzzification de la variable d'entrée « maxval ».	53
Figure V.5 Fuzzification de la variable d'entrée « Talaf ».	54
Figure V.6 fuzzification de la variable d'entrée « Etat1 ».	54
Figure V.7 fuzzification de la variable d'entrée « Etat2 ».	55
Figure V.8 Résultat test 1	56
Figure V.9 Résultat test 2.	57
Figure V.10 Résultat test 3.	58
Figure V.11 Résultat test 4.	58
Figure V.12 Test en temps réel des défauts affectant la bague intérieure.....	59
Figure V.13 Test en temps réel des défauts affectant la bague extérieure.	60
Figure V.14 Test en temps réel des défauts affectant la bille.	60

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau V.1 Les variables d'entrées du SIF.	50
Tableau V.2 La variable d'entrée « Etat 1 ».	51
Tableau V.3 La variable d'entrée « Etat 2 ».	51
Tableau V.4 Les entrées de test 1.	56
Tableau V.5 Les entrées de test 2.	57
Tableau V.6 Les entrées de test 3.	57
Tableau V.7 Les entrées de test 4.	58

Introduction générale

Introduction générale

Le rôle premier de la surveillance industrielle est d'augmenter la disponibilité des installations industrielles afin de réduire les coûts de maintenance directs relatifs aux diverses pièces de rechanges et main d'œuvres, et les couts indirects dus au manque à gagner engendré par un arrêt de production.

Le diagnostic est une composante principale du module de surveillance. Il consiste à déterminer à chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve. Pour cela, beaucoup de travaux ont été dédiés à l'élaboration des systèmes d'aide au diagnostic. La majorité de ces travaux se base sur des outils informatiques qui couplent des méthodologies de l'intelligence artificielle comme la logique floue, les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques.

La logique floue par sa caractéristique principale de simulation du raisonnement humain, elle est classée parmi les techniques de l'intelligence artificielle, la logique floue a contribué dans le développement de plusieurs domaines, En maintenance industrielle la logique floue est utilisée pour résoudre les problèmes complexes du diagnostic. L'objectifde ce travail est l'application de cette dernière pour l'automatisation du diagnostic de défaut des roulements à base d'indicateurs des signaux vibratoire, l'outil de classification utilisé est un système d'inférence floue de type Mamdani.

Nous allons faire une étude sur une expérience qui a été élaboré au niveau de l'université de « CASE WESTERN RESERVE » en prenant en considération les donnée de cette dernière recueillis sur des roulements avec plusieurs défauts, et la contribution de la logique floue pour la détecter et l'identification des défauts.

Ce mémoire est composé d'une introduction générale qui met en exergue l'objectif du travail.

-Le premier chapitre traite les concepts généraux du diagnostic et des définitions de différents points de la surveillance industrielle.

-Dans le deuxième chapitre nous présentons quelque principaux type de roulements et leurs défaillances.

-Le troisième chapitre représente quelque définition de base sur le traitement de signal et la démarche expérimentale.

Introduction générale

-Dans quatrième chapitre, on va présenter l'application de la logique floue pour la surveillance des roulements à partir des indicateurs temporels des signaux vibratoire réels.

- Le dernier chapitre est conçu pour le teste de l'application, pour vérifier l'efficacité de la logique floue à la détection et l'identification des défauts.

Chapitre I

Etat de l'art sur la surveillance industrielle

Introduction

La complexité croissante des systèmes industriels, leurs utilisations de plus en plus fréquentes rendent nécessaire la surveillance des défauts pouvant affecter le fonctionnement normal de ces systèmes.

La surveillance d'un système matériel désigne toute méthode permettant de déterminer si ce système est affecté par un défaut quelconque et de discriminer l'origine du défaut. Cette méthode s'effectue grâce à des algorithmes de détection utilisant les informations relevées par observations, contrôles et tests [1].

Nous présentons dans la suite du chapitre, quelques définitions relatives à la surveillance, ensuite les principales étapes de surveillance et on finira par leurs principales méthodes utilisées en industrie.

I.1 Définitions relatives à la surveillance

Pour bien présenter les techniques les plus courantes en surveillance des équipements industriels, nous présentons quelques définitions que nous avons jugées importantes pour la compréhension du présent travail, ces définitions ont été extraites à partir des références suivantes:[2],[3],[4].

●Dégradation

Une dégradation représente une perte de performance d'une des fonctions assurées par un équipement. Si les performances sont au-dessous du seuil d'arrêt défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, il n'y a plus dégradation mais défaillance.

●Défaillance

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.

On peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité par:

- Défaillance critique : nécessite une intervention d'urgence.
- Défaillance significative : nécessite un processus de traitement.
- Défaillance absorbable : pouvant être ignorée dans un premier temps.

●Panne

Une panne est l'inaptitude d'une entité (composant ou système) à assurer une fonction requise. La différence entre la panne et la défaillance est que la défaillance correspond à un événement et la panne à un état. sur le plan temporel, la défaillance correspond à une date et la panne à une durée comprise entre la date d'occurrence de la défaillance et la date de fin de réparation.

●Mode de fonctionnement

Un système présente généralement plusieurs modes de fonctionnement. On peut observer des modes de plusieurs types parmi lesquels :

Mode de fonctionnement nominal : c'est le mode où l'équipement ou le système industriel remplit sa mission dans les conditions de fonctionnement requises par le constructeur et avec les exigences attendues de l'exploitant.

Mode de fonctionnement dégradé : qui correspond soit à l'accomplissement partiel de la mission, soit à l'accomplissement de celle-ci avec des performances dégradées. En d'autres termes il y a eu dégradation dans l'équipement ou le système mais pas de défaillance.

Mode de défaillance : qui correspond à des mauvais fonctionnements du système, c'est-à-dire qu'il y a eu défaillance soit après dégradation soit défaillance brusque. Un mode de défaillance est caractérisé par les effets causés par cette défaillance. Ces effets peuvent être mesurables ou qualifiables. En faisant une analyse de cause à effet de la défaillance, on peut associer le mode de défaillance à toute cette analyse faite par un expert. En d'autres termes, à chaque mode de défaillance on associe une décision et une interprétation possible. Chaque équipement ou système ne peut posséder qu'un seul mode nominal par contre, il possède plusieurs modes de défaillance.

●Surveillance

La surveillance est un dispositif passif, informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières.

La surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont la **détection** et le **diagnostic**.

●Détection

Pour détecter les défaillances du système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales. Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement la situation anormale. Une simplification communément adoptée consiste à considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale.

●Diagnostic

L'objectif de la fonction diagnostic est de rechercher les causes et les organes qui ont entraîné une observation particulière. Cette fonction se décompose en deux fonctions : **localisation** et **identification**. A partir de l'observation d'un état anormal, la fonction diagnostic est chargée de retrouver le défaut qui en est l'origine. Ce problème est difficile à résoudre. En effet si, pour un défaut donné, il est facile de prédire la panne résultante, la démarche inverse qui consiste à identifier le défaut à partir de ses effets, est beaucoup plus ardue. Une défaillance peut généralement être expliquée par plusieurs défauts. Il s'agit alors de confronter les observations pour fournir la bonne explication.

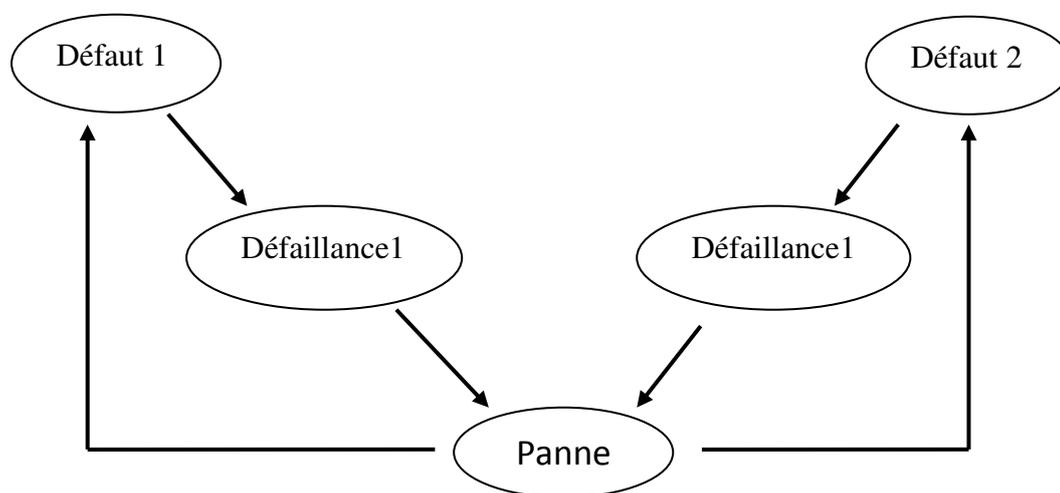


Figure I.1 Deux défauts conduisent à la même panne ce qui complique l'opération inverse.

●Localisation

La localisation permet de déterminer les sous-ensembles fonctionnels défaillants.

● Identification de la cause

Cette dernière étape consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale. Ces causes peuvent être internes (sous-ensembles défectueux faisant partie de l'équipement), ou bien externes à l'équipement.

Les principales raisons qui conduisent à surveiller un système sont :

● La conduite

Il s'agit d'optimiser et qui est une tâche en ligne (production maximale, sécurité, non-dégradation des équipements). Ceci passe par la surveillance du procédé afin de détecter toute anomalie de fonctionnement et de l'identifier aussi bien que possible. Ce type d'action est aussi appelée supervision: surveillance + conduite.

● La maintenance

Qui pour objet d'optimiser le remplacement ou la réparation d'équipements usés ou défectueux. On peut citer trois types de maintenance :

Maintenance corrective : intervient après la détection et la localisation d'un défaut.

Maintenance préventive systématique : maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. C'est une intervention de maintenance prévue, préparée et programmée avant la date probable d'apparition d'une défaillance. Elle est systématique, c'est-à-dire une maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage.

Maintenance préventive conditionnelle : alternative à la maintenance préventive systématique, faite l'objet d'une demande croissante dans un grand nombre d'applications industrielles. Cette maintenance est basée sur la surveillance en continu de l'évolution du système, afin de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive. Elle n'implique pas la connaissance de la loi de dégradation. La décision d'intervention préventive est prise lorsqu'il y a évidence expérimentale de défaut imminent, où approche d'un seuil de dégradation prédéterminé. Elle impose donc des traitements en ligne, au moins en partie.

La Figure suivante montre une architecture générale d'un système de surveillance.

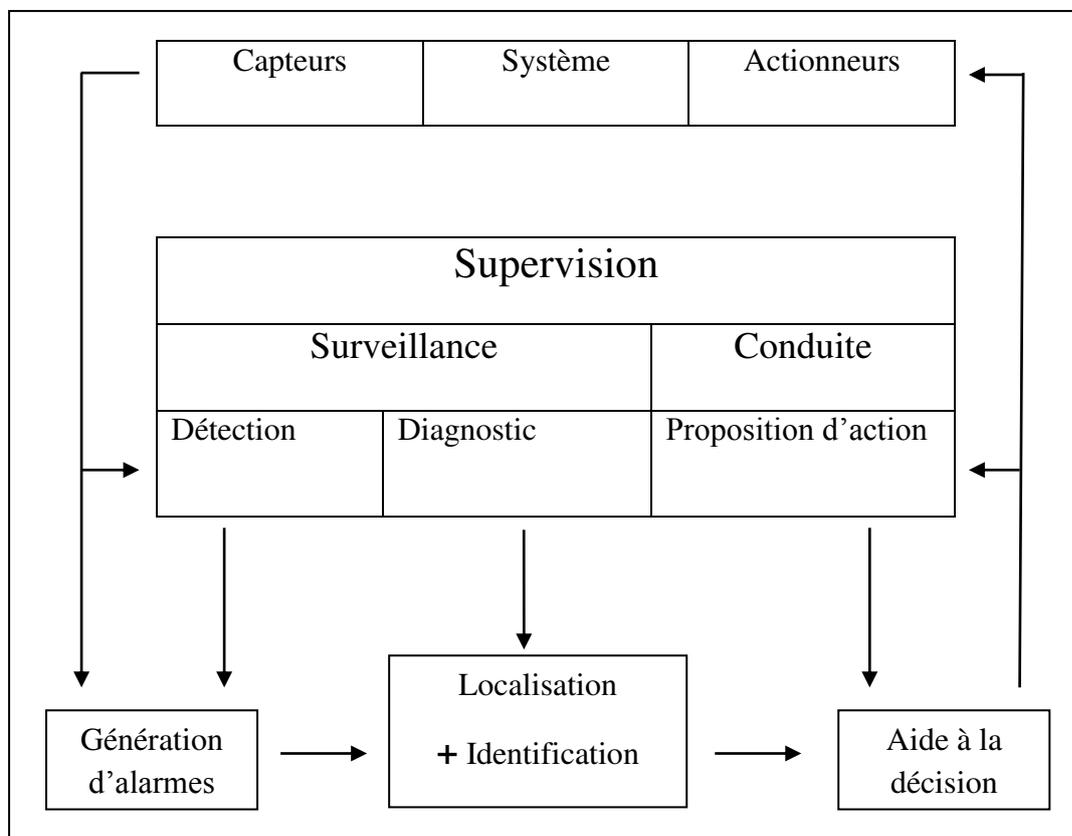


Figure I.2 Architecture générale d'un système de surveillance.

- **La surveillance prédictive (dynamique).**

Comme pour la surveillance classique, la surveillance prédictive est un dispositif passif, informationnel qui analyse l'état présent et l'état passé du système et fournit des indicateurs sur les tendances d'évolution future du système. La surveillance prédictive se compose de la **détection prédictive** et du **diagnostic prédictif**.

- **Détection prédictive**

Elle consiste à prédire une défaillance future. En d'autres termes, le but de la détection prédictive est de détecter une dégradation au lieu d'une défaillance pour le cas de la détection classique.

- **Diagnostic prédictif (pronostic)**

Son objectif est d'identifier les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une

dégradation particulière. La Figure I.3 nous permet d'éclaircir et de situer ce type de diagnostic dans la surveillance.

I.2 Les principales étapes de surveillance

Effectuer une surveillance nécessite un certain nombre d'étapes qui s'enchainent. La figure suivante synthétise ses différentes étapes [2,5].

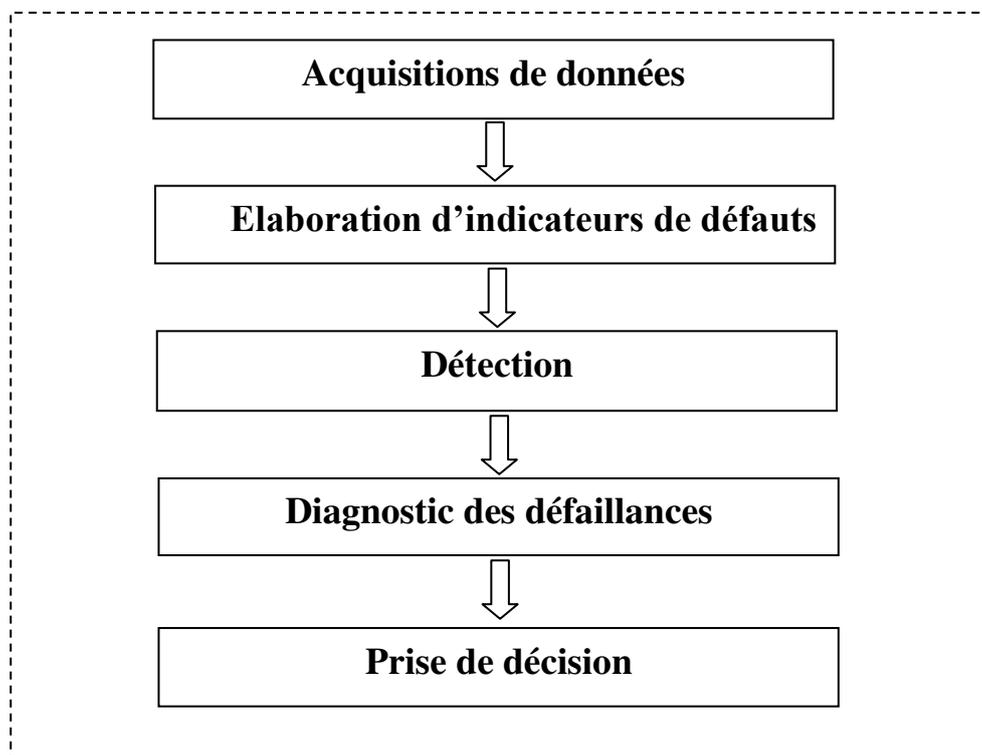


Figure I.3 Les principales étapes de processus de surveillance.

•Étape 1 : Acquisitions de données

Dans la prise en place d'un dispositif de surveillance, l'implantation des capteurs appropriés permettant de mesurer les différentes variables du processus.

La procédure de surveillance nécessite une disponibilité d'information sur le fonctionnement du système à surveiller. Ces informations sont recueillies lors d'une phase d'acquisition de données suivie d'une validation.

•Étape2 : Elaboration d'indicateurs de défauts

A partir des mesures réalisées et des observations issues des opérateurs en charge de l'installation, il s'agit de construire des indicateurs permettant de mettre en évidence les

éventuels défauts pouvant apparaître au sein du système. Ces indicateurs de défauts sont couramment dénommés les résidus ou symptômes.

●Étape 3. Détection

Les connaissances capitalisées au cours des deux étapes précédentes, permettent de disposer d'informations sur le comportement du système en cas de défaut, de défaillance les plus probables et sur les signes de leur manifestation.

Cette étape doit permettre de décider si le système se trouve ou non dans un état de fonctionnement normal.

●Étape 4. Diagnostic des défaillances

Cette étape consiste à analyser les données issues de la détection pour identifier et de localiser la ou les causes probables de la défaillance. Les méthodes de diagnostic peuvent utiliser toutes les connaissances disponibles sur leur relation de cause à effet.

Le diagnostic fournit des informations permettant de déterminer le degré de criticité du défaut et de cibler les moyens d'action possible pour le contenir.

●Étape 5. Prise de décision

Enfin, l'étape décisionnelle intervient pour appliquer les actions les plus appropriées afin de répondre aux exigences du cahier des charges de sûreté de fonctionnement.

I.3 État de l'art des méthodes de surveillance

Les méthodologies de surveillance sont généralement divisées en deux groupes : méthodologies de surveillance avec modèle et sans modèle .les premiers se basent sur l'existence d'un modèle formel de l'équipement et utilisent les techniques de l'automatique. La deuxième catégorie est plus intéressante dès lors qu'un modèle de l'équipement est inexistant ou difficile à obtenir. Dans ce cas, on utilise les outils de traitement du signal ou la reconnaissance des formes [2].

I.3.1 Méthodes de surveillance avec modèle

Cette catégorie de méthode comprend des outils industriels comme l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) et l'arbre de défaillance (ADD), utilisés essentiellement pour le diagnostic [6].

I.3.1.1 Les méthodes de diagnostic par modélisation fonctionnelle et matérielle

Le principe de ces méthodes consiste à établir a priori et de la manière la plus complète possible, les liens entre les causes initiales des défaillances et leurs effets mesurables. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont l'AMDEC et les ADD

Une autre catégorie de méthodes avec modèle est représentée par les méthodes basées sur une modélisation physique des processus surveillés [2].

I.3.1.2 Méthodes de surveillance par modélisation physique

Les méthodes de surveillance avec modèle physique ont pour principe de comparer les mesures effectuées sur le système aux informations fournies par modèle. Tout écart est alors synonyme d'une défaillance. Les outils de la théorie de la décision sont ensuite utilisés pour déterminer si cet écart est dû à des aléas normaux, par exemple le bruit de mesure ou s'il traduit une défaillance de système.

Ces méthodes utilisent un modèle décrit par des relations mathématiques représentant les différentes relations physiques du procédé. Généralement, ces relations physiques découlent de lois fondamentales de divers domaines (physique, chimie, électricité, thermodynamique, mécanique, etc.). Ainsi, il est possible de créer une modélisation du système qui, en lui appliquant les entrées similaires au système réel (lois de commande, paramètres du procédé, etc.), fournit une réponse estimée du système. Il est alors possible de calculer l'écart entre la réponse réelle du système et sa réponse estimée, comme indiqué sur la figure. Cet écart est usuellement appelé résidu (R) [2,6].

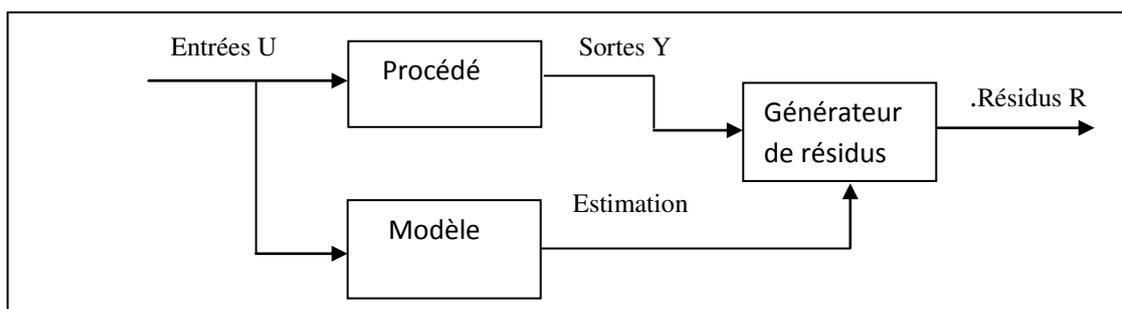


Figure I.4 Principe de surveillance avec modèle.

En d'autres termes, on peut dire que les résidus sont les écarts entre les observations du système et le modèle mathématique. L'objectif de ce type d'approche est de réussir à faire la distinction des résidus causés par des défauts et les résidus causés par les autres sources de variation. Les résidus sont relativement élevés lorsqu'un défaut est présent dans le procédé, et sont plutôt faibles en l'absence du défaut, dans ce cas, la présence du défaut est détectée en appliquant des seuils adéquats sur les résidus.

Il existe plusieurs approches de génération de résidus, cependant trois sont essentielles, il s'agit de :

Estimation des paramètres : Les résidus sont la différence entre les paramètres nominaux du modèle et les paramètres estimés du modèle

Observateurs : Les méthodes à base d'observateurs reconstruisent une estimation de la sortie à partir de toutes ou parties des sorties réelles du système. Les résidus sont alors classiquement la différence entre les sorties mesurées et les sorties estimées.

Équation de parité : Cette méthode consiste à vérifier l'exactitude des équations mathématiques du modèle en se basant sur les sorties du procédé.

I.3.2 Méthodes de surveillance sans modèle

Nombreuses sont les applications industrielles dont le modèle est difficile, voire impossible à exploiter suite à une complexité accrue ou à de nombreuses reconfigurations intervenant durant le processus de production pour ce type d'applications industrielles, les seules méthodes de surveillance opérationnelles sont celles sans modèle. Deux solutions existent dans ce cas : surveillance avec les outils du traitement du signal (approche signal) et surveillance par reconnaissance des formes.

I.3.2.1 Surveillance par reconnaissance des formes

L'approche de surveillance par reconnaissance des formes permet d'associer un ensemble de mesures (continues ou discrètes) effectuées sur le système à des états de fonctionnement connus. Cette fonction permet d'avoir une relation d'un espace caractéristique vers un espace de décision, de façon à minimiser le risque de mauvaise classification. Ces méthodes reposent sur l'utilisation des algorithmes de classification des formes et des mesures

(continues ou discrètes).Le fonctionnement d'un système de diagnostic par reconnaissance des formes se déroule en trois phases [7]:

-une phase d'analyse qui consiste à déterminer et réduire l'espace de représentation des données et à définir l'espace de décision permettant de spécifier l'ensemble des classes possibles.

une phase de choix d'une méthode de décision permettant de définir une règle de décision qui a pour fonction de classer la nouvelle observation dans les différentes classes de l'ensemble d'apprentissage, une phase d'exploitation qui détermine, en appliquant la règle de décision, le mode de fonctionnement du système en fonction de chaque nouvelle observation recueillie sur le processus.

Ils existent trois techniques de reconnaissance des formes. La première technique est une classique de discrimination basé sur les outils de la probabilité. Cette technique peut se montrer insuffisantes car elle suppose une connaissance a priori de tous les états de fonctionnement et ne prend pas en compte l'évolution du système. Les deux autres techniques reposent sur la théorie de l'intelligence artificielle. Ces techniques ont l'avantage de ne pas se baser sur les connaissances a priori des états de fonctionnement mais plutôt sur une phase d'apprentissage .Ces deux techniques sont la reconnaissance des formes par la logique floue et la reconnaissance des formes par réseaux de neurones.

Les réseaux de neurones artificiels : imitent la structure neuronale d'un cerveau humain, ils sont formés par un réseau complexe de blocs arithmétiques simples. Ils peuvent facilement représenter les systèmes non linéaires multi entrés/ multi sorties .Cette technique a largement été utilisée dans le domaine du diagnostic des machines électrique selon plusieurs démarches et techniques :

•Apprentissage à partir de signaux temporels ou fréquentiels issus de simulation ou d'expérimentation.

•Diagnostic en temps réel et autonome

•diagnostic en temps réel et autonome

•mise à jours dynamique de la structure du réseau

•filtrage des transitoires. Des perturbations et du bruit

•détection des défauts dès leur naissance.

La logique floue : traduit la perception humaine des valeurs, elle ne se limite pas à des valeurs «vrai, faux» comme la logique traditionnelle, Elle offre une large fourchette de valeurs intermédiaires. Les systèmes flous sont capables de traiter des variables naturelles via des conditions floues «si- alors». Les systèmes flous adaptatifs exploitent les facultés d'apprentissage des réseaux de neurones ou la robustesse des algorithmes génétiques dans le domaine de l'optimisation des paramètres du système à étudier. Afin de prendre en considération les connaissances à priori et l'expertise humaine dans le domaine ; Nous pouvons trouver dans la littérature. Plusieurs articles exploitant cette technique dans le domaine du diagnostic et de la surveillance des machines électriques. Avec des objectifs variés :

- Détection d'un fonctionnement anormal et localisation de la défaillance
- Evaluation des indices de performance
- construction de bases des données issues de l'expertise humaine, et formulation sous forme de règle conditionnelle « si- alors ».
- conception du système adaptatif pour le diagnostic

Pour des raisons de simplicité, l'approche basée sur la reconnaissance des formes est très utilisée actuellement en Surveillance. Nous détaillerons donc un peu plus la partie surveillance par logique floue.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une présentation de quelques définitions relatives à la surveillance dans le domaine industriel, suivi par les différentes étapes utilisées et finalisé par les méthodes de surveillance.

Grâce à sa simplicité et sa rapidité d'extraire les résultats, la méthode par logique floue est parmi les méthodes les plus utilisées pour la détection et le diagnostic des défauts.

Dans les chapitres qui suivent on s'intéressera à la détection des défauts de roulements en n'appliquant la méthode de la logique floue sur des signaux réels.

Chapitre II

Etude théorique sur les roulements

Introduction

Le roulement est un organe de base qui assure une liaison mobile entre deux éléments d'un mécanisme en rotation l'un par rapport à l'autre. Sa fonction est de permettre la rotation relative de ces éléments, sous charge, avec précision et avec un frottement minimal". On peut trouver les roulements sur un nombre important d'applications (L'industrie, automobile, aéronautique, robotique).

Les roulements se distinguent par la forme et la disposition des éléments roulants. À chaque modèle correspondent des performances particulières et donc un usage spécifique. Par exemple, les roulements à rouleaux supportent des charges supérieures par rapport aux roulements à billes (de taille équivalente), car le contact des éléments roulants avec les bagues est linéaire. Cependant, ils acceptent des fréquences de rotation moins élevées.

II.1 Constitution générale d'un roulement

Un roulement est composé normalement de quatre éléments essentiels:

- **Une bague extérieure** : elle sera montée dans un logement ménagé dans un bâti fixe ou un moyeu tournant.
- **Une bague intérieure** : rendue solidaire du tourillon de l'arbre tournant ou fixe.
- **Des éléments roulants** : qui permettent la rotation relative d'une bague par rapport à l'autre.
- **Une cage** : qui maintient l'écartement des éléments roulants et les empêchent de frotter l'un contre l'autre [9].

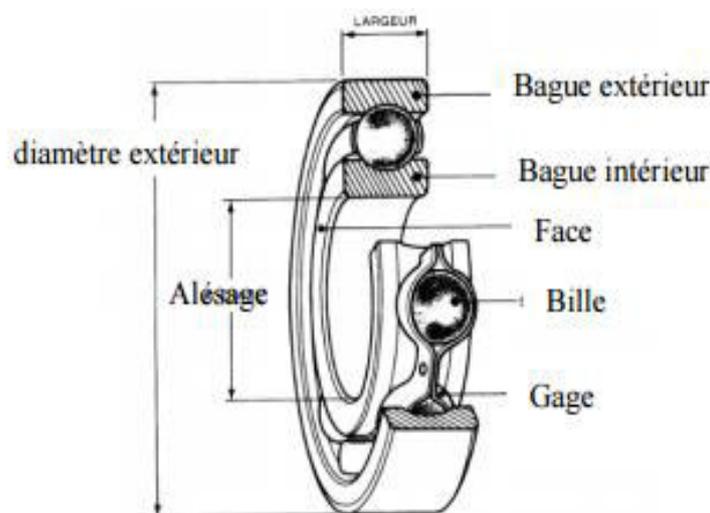


Figure II.1 Principaux éléments constitutifs d'un roulement.

II.2 Principaux types de roulements

II.2.1 Roulement à une rangée de billes oblique

Dans les roulements à une rangée de billes à contact oblique, le contact des billes sur les pistes donne une capacité de charge axiale importante. Ce type de roulement peut supporter des charges axiales pures ou des charges axiales combinées à condition que la proportion charge axiale sur charge radiale reste supérieure à une valeur qui dépend de l'angle de contact [11].

Ce type de roulement est utilisé principalement dans les moteurs électriques verticaux avec charge axiale, paliers de butée de pompes, machines-outils, roues avant d'automobiles...etc .



Figure II.2 roulement à une rangée de billes à contact oblique

II.2.2 Roulement à rotule sur deux rangées de billes

Ce roulement comporte deux rangées de billes roulantes sur les deux pistes de la bague intérieure et dans la même piste sphérique de la bague extérieure.

Ces types de roulements sont utilisés dans les paliers de transmission et les ventilateurs centrifuges [11].



Figure II.3 Roulement à rotule sur deux rangées de billes.

II.2.3 Roulement à une rangée de rouleaux cylindriques

Ce roulement peut supporter des charges radiales assez élevées mais pas de charges axiales, il convient aux grandes vitesses.

L'utilisation principale de ce type des roulements est dans : les moteurs électriques, les turbocompresseurs, les ventilateurs [11].



Figure II.4 roulement à une rangée de rouleaux cylindriques.

II.2.4 Roulement à aiguille

Les roulements à aiguille comportent des éléments roulants cylindriques d'un diamètre relativement petit par rapport à leurs longueurs. Ayant une faible hauteur de section, ils conviennent bien dans les applications où l'espace radial est limité. Leur capacité de charge est relativement élevée [11].



Figure II.5 Roulement à aiguille.

II.3 Charge supportées par les roulements

Les actions mécaniques de contact exercées par les éléments roulants sur l'une ou l'autre bague sont généralement schématisées par des forces ou des charges [9]. (Figure 6)

On observe trois cas : axiale, radiale, combinée.

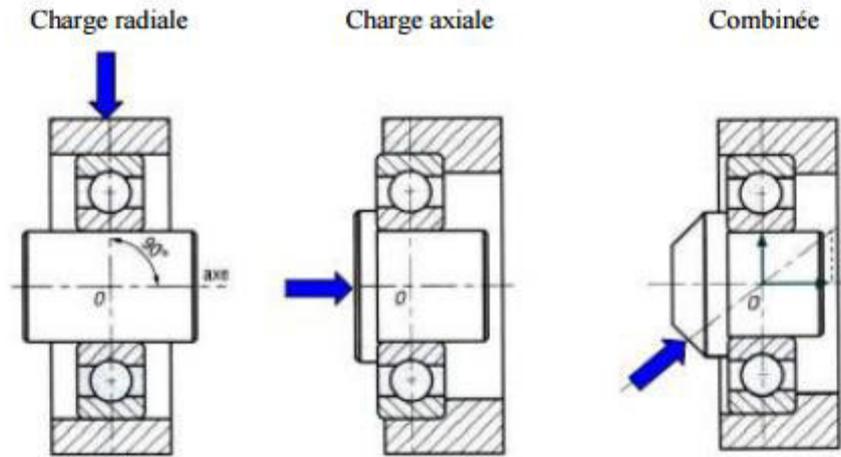


Figure 6 : charge supportées par les roulements.

II.4 Choix du roulement

Le choix du type de roulements à utiliser dépend des exigences techniques propres à chaque cas selon [11] :

- durée de vie exigée
- importance des charges appliquées au roulement
- place disponible
- vitesses de rotation.
- Température de fonctionnement.
- Jeux, précision et lubrification.

Et le choix ne peut se faire que dans la connaissance parfaite des caractéristiques techniques de chaque type.

II.5 Durée de vie d'un roulement

La durée de vie d'un roulement est définie par le nombre de tours ou d'heures exigé, à une vitesse constante donnée, avant que le roulement ne montre les premiers signes de fatigue du matériau qui le compose.

La théorie de Hertz permet une estimation assez juste de cet effet. La durée de vie d'un roulement est le nombre de tours qu'il peut effectuer avant que n'apparaissent les premiers signes d'écaillage, c'est-à-dire l'altération de l'état de surface des chemins de roulement ou des éléments roulants eux-mêmes. Cet écaillage peut entraîner un grippage net de la liaison, voire la destruction du roulement et donc des pièces qu'il guide. [10]

$$L_h = \left(\frac{c}{p} \right)^n \frac{10^6}{60.N}$$

Avec :

L_h : Durée de vie nominale en heure de fonctionnement.

c : La charge dynamique de base (N).

p : La charge dynamique équivalente (N).

n : Exposant, $n=3$ pour roulements à billes, et $n=3/10$ pour les roulements à rouleaux.

N : Nombre de tours par minute.

II.6 Défaillance des roulements

Chaque cause de défaillance d'un roulement génère son propre endommagement caractéristique. L'endommagement en question, connu sous le nom d'endommagement primaire, donne lieu à un endommagement secondaire (écaillage et fissures) qui mène à la défaillance. Même les endommagements primaires peuvent entraîner le besoin de remplacement des roulements en raison d'un jeu interne excessif, de vibrations, de bruit, etc. Un roulement défaillant présente souvent un endommagement primaire et un endommagement secondaire. [11]

Les types d'endommagement peuvent être classés comme suit :

II.6.1 Endommagement primaire

- Usure.
- Empreintes.
- Grippage.
- Fatigue de surface.
- Corrosion.

II.6.2. Endommagement secondaire

- Écaillage.
- Fissures.
- Endommagement de la cage.

Les endommagements primaires et secondaires indiqués ci-dessus peuvent être divisés en plusieurs sous-catégories selon leur cause :

- **Usure**
 - Usure causée par des particules abrasives.
 - Usure causée par une lubrification inadéquate.
 - Usure causée par des vibrations.
- **Empreintes**
 - Empreintes causées par un mauvais montage ou une surcharge
 - Empreintes causées par des corps étrangers
- **Grippage**
 - Grippage des extrémités de rouleaux et des épaulements de guidage
 - Grippage des rouleaux et des chemins de roulement.
 - Grippage des chemins à des intervalles correspondant à l'espace entre les rouleaux.
 - Grippage des surfaces externes.
 - Grippage dans les butées.
- **Corrosion**
 - Rouille profonde.
 - Corrosion de contact.
 - Passage de courant électrique.
- **Écaillage**
 - Écaillage causé par une pré-charge.
 - Écaillage causé par une compression ovale.
 - Écaillage causé par une compression axiale.
 - Écaillage causé par un défaut d'alignement
 - Écaillage causé par des empreintes
 - Écaillage causé par un grippage
 - Écaillage causé par de la rouille profonde
 - Écaillage causé par de la rouille de contact
 - Écaillage causé par des cannelures ou des cratères
- **Rupture**
 - Fissures causées par une mauvaise manipulation
 - Fissures causées par un enfoncement excessif
 - Fissures causées par un grippage
 - Fissures causées par de la rouille de contact.

- **Endommagement de la cage**
 - Vibrations
 - Vitesse excessive
 - Usure
 - Blocage

Conclusion

Dans ce chapitre on a donné une idée sur la constitution des roulements avec les principaux types des roulements et les défauts qui peuvent les affecter.

Dans le chapitre suivant on verra quelques notions sur le traitement de signal et la démarche expérimentale.

Chapitre III

*Traitement de signal et démarche
expérimentale*

Introduction

Le traitement de signal est une discipline indispensable de nos jours, il a pour objet l'élaboration ou l'interprétation des signaux porteurs d'informations. Son but est de réussir à extraire le maximum d'information utile sur un signal perturbé par un bruit en s'appuyant sur les ressources de l'électronique et de l'informatique.

III .1 Traitement de signal

III .1. 1 Définitions de base

Le signal est la représentation d'une grandeur physique mesurable (vibration, courant, tension, force, température, pression.....) [13].

Les signaux vibratoires par exemple, ont une structure complexe, et sont constitués de différentes composantes:

* Une partie du signal provient des phénomènes cycliques (déterministes ou non) se produisant dans le système, comme la rotation des arbres, les chocs des engrènements, les mouvements existants au sein d'un roulement.....

* Une partie aléatoire, due aux phénomènes parasites générés lors du fonctionnement d'un système (jeu, frottement,...) ces signaux ne sont pas globalement stationnaires. En effet, ils ne sont pas indépendants du temps même si la vitesse du fonctionnement reste constante.

Le bruit est défini comme tout phénomène perturbateur gênant la perception ou l'interprétation d'un signal. La différenciation entre le signal et le bruit est artificielle et dépend de l'intérêt de l'utilisateur: les ondes électromagnétiques d'origine galactique sont du bruit pour un ingénieur de télécommunication par satellites et un signal pour un radioastronome [13].

Le traitement de signal est la théorie permettant une description mathématique et l'interprétation des signaux porteurs d'informations. Le but de traitement de signal est d'extraire le maximum d'information utile pour un signal perturbé par le bruit [14].

III.1.2 Classification des signaux

On peut envisager plusieurs modes de classification pour les signaux suivant leurs propriétés.

III.1.2.1 Classification phénoménologique

On considère la nature de l'évolution du signal en fonction du temps, il apparaît deux classes de signaux [12] :

- **Les signaux déterministes:** Sont des signaux dont l'évolution en fonction du temps peut être parfaitement décrite par un modèle mathématique. Ces signaux proviennent de phénomènes pour lesquels on connaît les lois physiques correspondantes et les conditions initiales, permettant ainsi de prévoir le résultat.

On trouve dans cette classe les signaux périodiques, les signaux transitoires, les signaux pseudopériodiques.

- **Les signaux aléatoires:** Leur comportement temporel est imprévisible. Il faut faire appel à leurs propriétés statistiques pour les décrire. Si leurs propriétés statistiques sont invariantes dans le temps, on dit qu'ils sont stationnaires.

III.1.2.2 Classification morphologique

Le temps et l'amplitude sont deux paramètres importants de classification des signaux.

On distingue les signaux à variable continue, des signaux à variables discrète ainsi que ceux dont l'amplitude est discrète ou continue [12].

Cette classification est représentée dans la figure suivante :

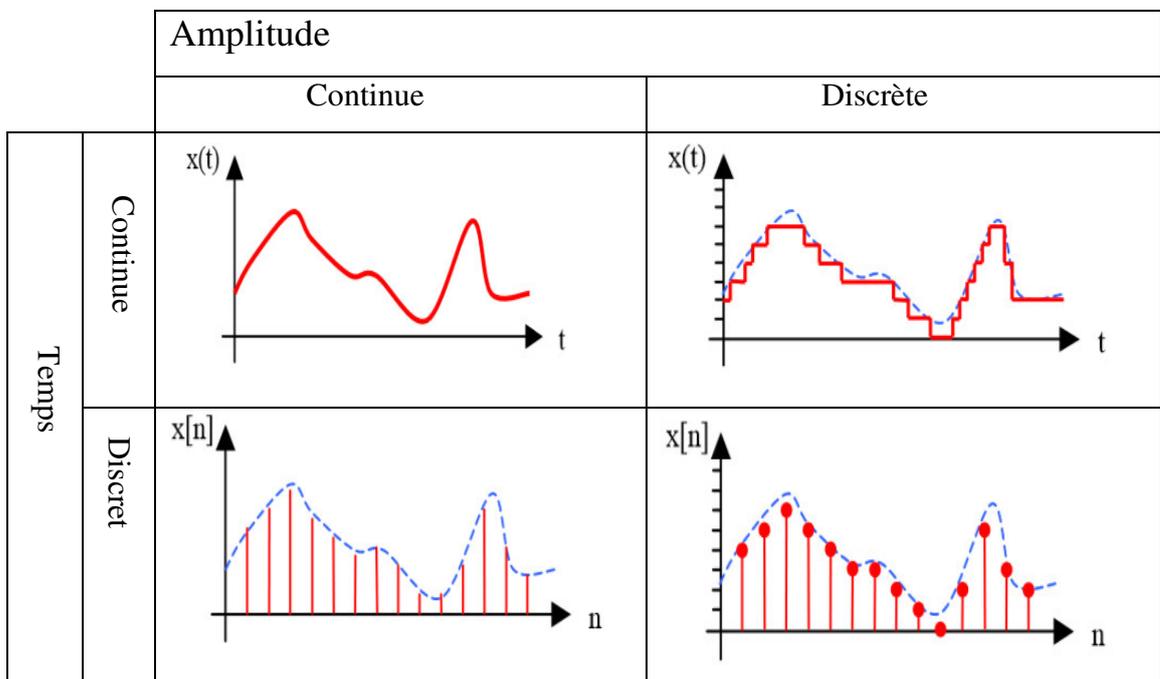


Figure III.1 Classification morphologique des signaux.

On obtient donc quatre classes des signaux.

- **Les signaux analogiques:** dont l'amplitude et le temps sont continus.
- **Les signaux quantifiés:** dont l'amplitude est discrète et le temps continu.
- **Les signaux échantillonnés:** dont l'amplitude est continue et le temps discret.
- **Les signaux numérique:** dont l'amplitude et le temps sont discrets.

III.1.3 Echantillonnage

III.1.3.1 Définition

L'échantillonnage consiste à prélever à des instants précis, le plus souvent équidistants, les valeurs instantanées d'un signal. Le signal analogique $S_e(t)$, continu dans le temps, est alors représenté par un ensemble de valeurs discrète. [5]

$$\dots(1) \quad \boxed{S_e(t) = S(n.T_e)}$$

Avec: **n** Entier.

T_e période d'échantillonnage.

Cette opération est réalisée par un échantillonneur souvent symbolisé par un intercepteur.

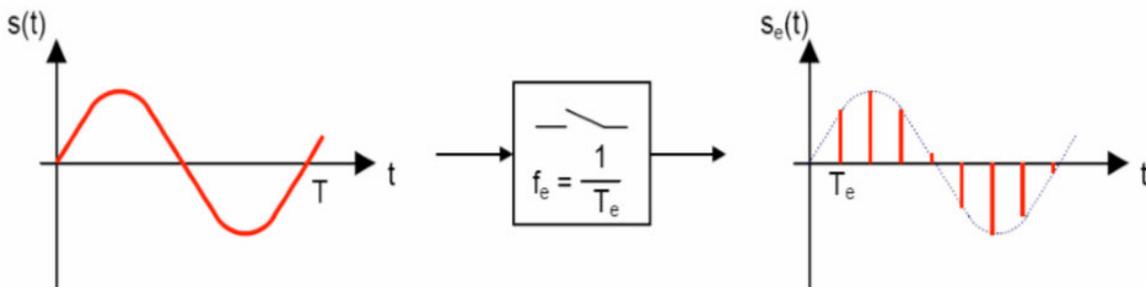


Figure III.2 L'échantillonnage d'un signal $S(t)$.

On appelle période d'échantillonnage T_e (en s), le temps entre deux mesures successives. La fréquence d'échantillonnage F_e correspond au nombre de mesure effectuées par seconde.

$$\boxed{F_e = 1/T_e} \quad \dots(2)$$

III.1.3.2 Théorème de Shannon

Le choix de la fréquence d'échantillonnage est très important afin de reproduire fidèlement le signal étudié.

Le théorème de **Shannon** montre que la reconstitution correcte d'un signal nécessite que la fréquence d'échantillonnage F_e soit au moins deux fois plus grande que la plus grande des fréquences F_{\max} du spectre du signal [].

...(3)

$$F_e > 2 * F_{\max}$$

En pratique, la valeur couramment choisie pour la fréquence d'échantillonnage est:

$$F_e = 2,56 * F_{\max}$$

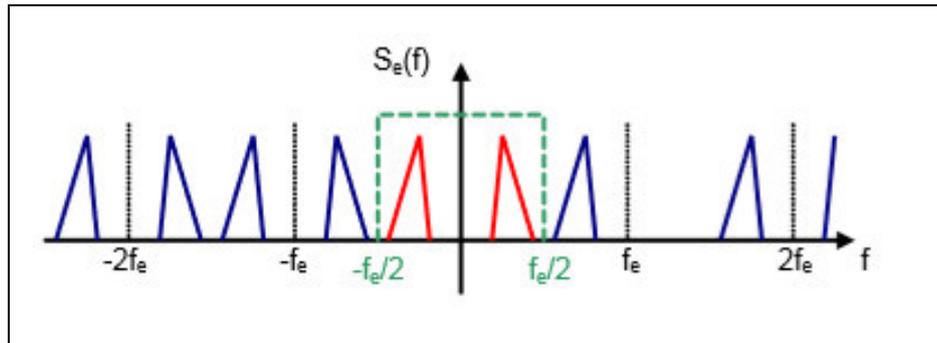


Figure III.3 Exemple d'un échantillonnage parfait.

Si F_{\max} , la fréquence maximale du spectre du signal à échantillonner, est supérieure à $F_e/2$, la restitution du signal sera impossible car il va apparaître un recouvrement spectral lors de l'échantillonnage. On dit qu'on est en sous-échantillonnage.

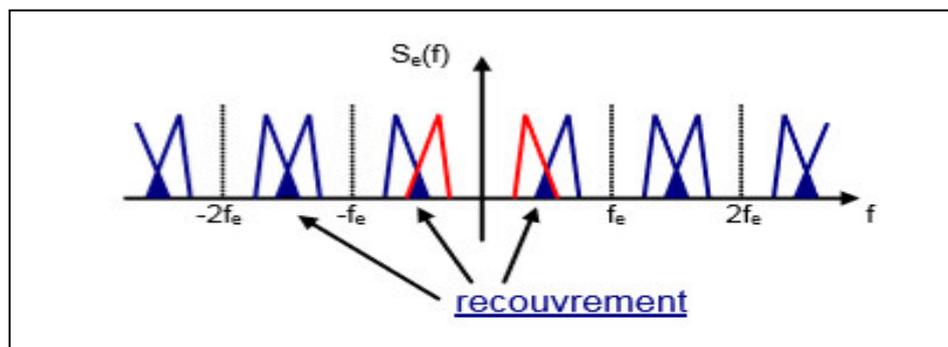


Figure III.4 Exemple d'un mauvais échantillonnage (recouvrement).

III.1.4 Les indicateurs d'un signal

Il existe plusieurs méthodes permettant d'extraire des informations dans un signal recueilli. Parmi ces méthodes, la méthode temporelle basée sur l'analyse statistique du signal. Cette méthode utilise des indicateurs scalaires qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant de la puissance ou l'amplitude d'un signal [15,12].

Parmi ces indicateurs on trouve:

RMS (Root Mean Square)

Le RMS, nommée aussi valeur efficace ou moyenne quadratique d'un signal, correspond à la racine carrée du moment d'ordre deux et est calculé comme montré par l'équation suivante.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [S(t)]^2} \quad \dots(4)$$

Le RMS est un des premiers indicateurs utilisés en industrie. Une variation excessive du niveau RMS signifie un changement de l'état de fonctionnement et donc une défaillance.

Valeur maximale

La valeur maximale (peak) d'un signal est la grande valeur prise dans l'un des deux sens positif ou négatif, cette valeur augmente au fur et à mesure que le défaut se développe, en fin de vie du roulement la valeur crête se stabilise.

Elle est calculée par la formule suivante.

$$\text{Maxval} = \sup_{1 \leq k \leq N} |S(t)| \quad \dots(5)$$

Valeur crête à crête

Nommée aussi "peak to peak", il s'agit de la différence entre l'amplitude maximale et l'amplitude minimale d'un signal.

Elle est calculée par la formule suivante:

$$\text{P2P} = \frac{1}{2} (\sup_{1 \leq k \leq N} X_k - \min_{1 \leq k \leq N} X_k) \quad \dots(6)$$

Facteur crête

Le facteur crête FC est un indicateur plus spécifique, qui permet d'observer de plus près le signal vibratoire.

Le FC est défini comme étant le rapport entre la valeur maximale du moule du signal (valeur crête) sur la valeur efficace (RMS) comme montré par l'équation suivante :

$$\text{FC} = \text{Maxval} / \text{RMS} \quad \dots(7)$$

Le facteur crête suit une distribution normale, sa valeur varie en générale entre 3 et 6 pour un fonctionnement sans défaut et peut aller au-delà de 6 dès l'apparition d'une défaillance.

Kurtosis

Plus spécifique au diagnostic des défauts de roulement, le Kurtosis est une grandeur statistique permettant d'analyser le caractère pointu ou plat d'une distribution, et donc d'observer la forme du signal.

Le Kurtosis est dérivé du moment statistique d'ordre quatre, il est définie comme le rapport de la valeur moyenne du signal élevé à la puissance quatre sur le carré de son énergie.

Il est donné par la formule suivante:

$$Ku = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (S(n) - \bar{S})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (S(n) - \bar{S})^2 \right]^2} \quad \dots(8)$$

Le Kurtosis approche la valeur de 3 pour un fonctionnement sans défaut de roulement, et augmente de façon remarquable dès l'apparition d'impulsion dû à la naissance d'un défaut. Le Kurtosis tend à revenir à 3 dès que la dégradation entre en phase terminale.

Talaf et **Thikat** : Deux nouveaux indicateurs.

En plus des indicateurs conventionnels, deux autres ont été développé, permettant une meilleure connaissance de l'état du dispositif étudié, ces indicateurs sont:

$$\text{Talaf} = \log \left[Ku + \frac{RMS}{RMS_0} \right] \quad \dots(9)$$

$$\text{Thikat} = \log \left(Ku \right)^{\frac{maxval}{RMS}} + \left(\frac{RMS}{RMS_0} \right)^{maxval} \quad \dots(10)$$

Où RMS_0 représente la valeur efficace du dispositif sans défaut ou bien une valeur initiale qu'on relève au début de la surveillance vibratoire.

III.2 Démarche expérimentale

Le site web "www.eecs.cwru.edu/laboratory/bearing/welcome_overview.htm", permet d'accéder à la base de données d'essai des roulements à billes pour les roulements normaux et défectueux.

Comme il est représenté sur la Figure (III.6), le support de test américain se compose d'un moteur (à gauche), d'un accouplement transducteur / encoder (au centre), d'un dynamomètre (à droite) et des circuits de commande (non représentés).

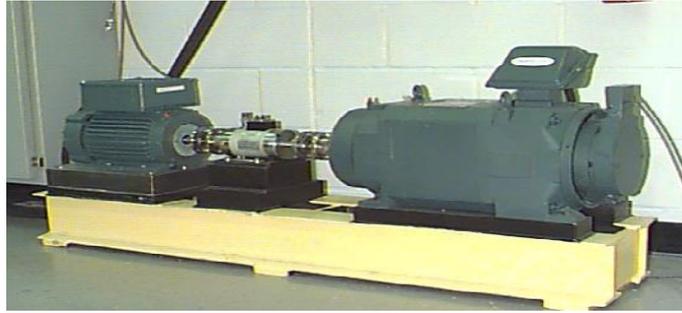


Figure.III.5 Le banc d'essai de roulement.

Les roulements testés soutiennent l'arbre du moteur des deux côtés (coté entraînement et ventilateur). Des simples défauts sous forme de point ont été créés sur ces roulements d'essai en utilisant l'usinage électro-décharge. Des roulements SKF ont été utilisés pour des défauts de diamètre 0.007, 0.014 et 0.021 inch, et des roulements équivalents NTN ont été utilisés pour des défauts de 0.028 et 0.040 inch.

Les signaux ont été enregistrés à l'aide des accéléromètres qui ont été fixés à la cage du moteur par aimant. Ces capteurs ont été placés à la position 12 heures « vertical » des deux côtés « accouplement et ventilateur » de la cage du moteur.

Au cours de certaines expériences, les signaux de vibrations ont été collectés, traités et enregistrés dans un environnement Matlab.

Les données numériques ont été recueillies à 12 kHz (fréquence d'échantillonnage de signal). Pour notre étude, nous avons considéré, seulement, les signaux coté accouplement avec des défauts de roulement de diamètre 0.007 jusqu'à 0.028 inch pour la bague intérieurs et les éléments roulants, et des défauts de diamètre 0.007 et 0.014 inch pour la bague extérieur.

La charge du moteur été de 3 hp avec une vitesse de rotation égale à 1772 tr/min.

III.2.1 Extraction des indicateurs temporels

Pour avoir une large base de données, les indicateurs temporels [Ku, RMS, P2P, Maxval, Talaf et Thikat] sont calculés dans dix (10) tranches issues de la décomposition de chaque signal. Pour chaque indicateur, on a choisi de calculer son minimum et maximum.

Il est à noter que pour la division des signaux en tranches et le calcul des indicateurs temporels un programme sous environnement Matlab est conçu pour cet objectif représenté dans l'annexe.

Les figures suivantes représentent graphiquement la variation des indicateurs temporels en fonction de diamètre de défaut affectant les organes de roulement (bague intérieure, extérieure et billes).

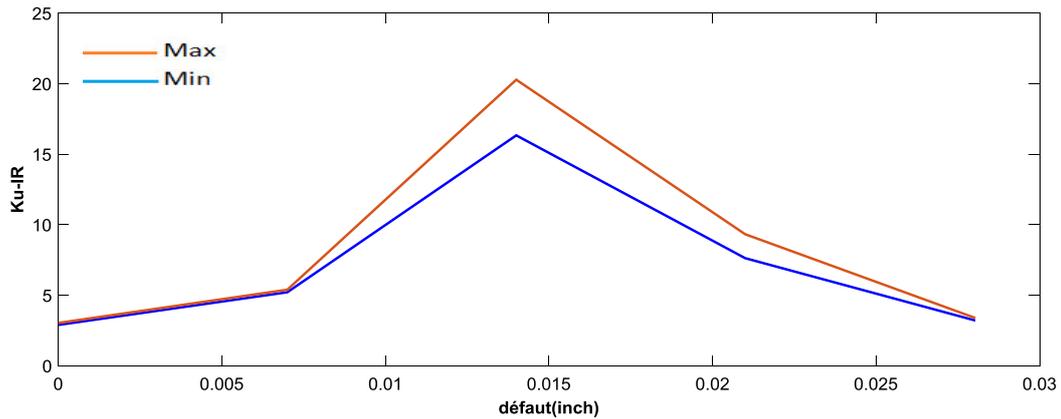


Figure.III.6 Variation de Ku en fonction de diamètre de défaut affectant la bague intérieure.

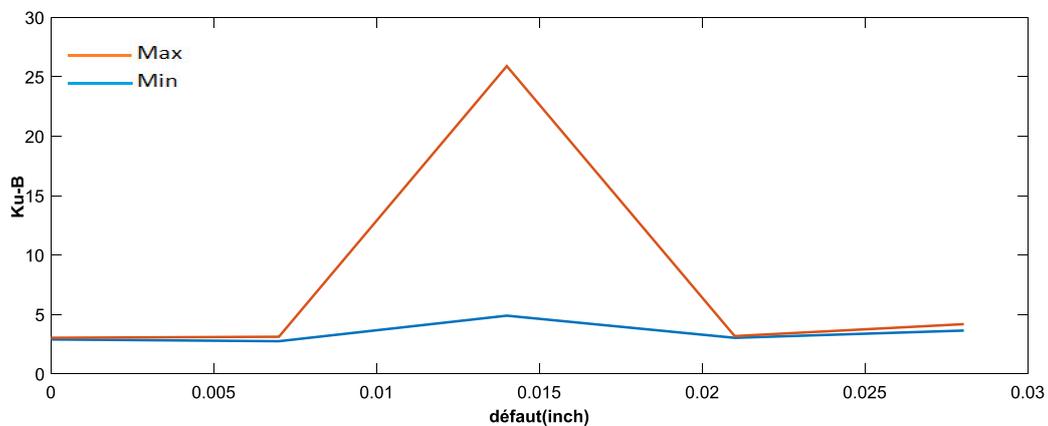


Figure.III.7 Variation de Ku en fonction de diamètre de défaut affectant la bille

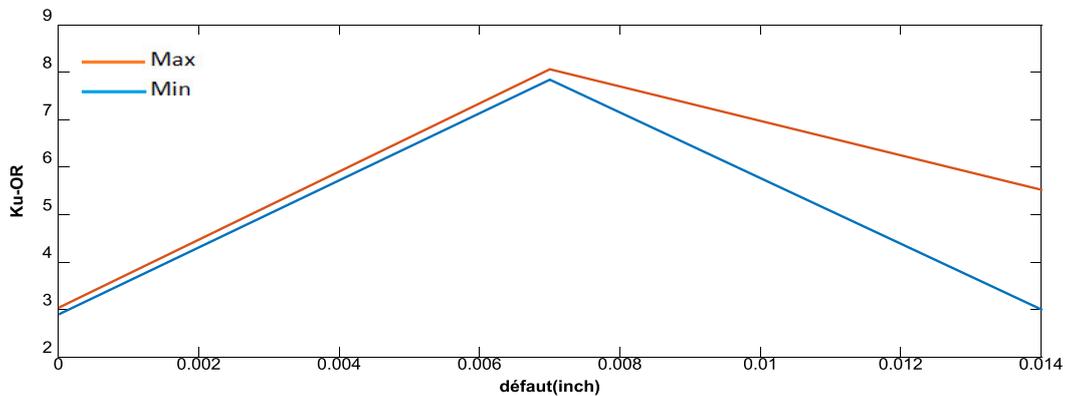


Figure.III.8 Variation de Ku en fonction de diamètre de défaut affectant la bague extérieure.

D'après les figures précédentes correspondantes aux variations de Kurtosis des trois défauts, on voit que la kurtosis est sensible à la gravité du défaut jusqu'à une certaine valeur où elle décroît, ou on constate que pour deux diamètres de défauts différents on aura une même valeur de kurtosis, donc on ne peut pas compter sur cet indicateur pour différencier ces deux défauts.

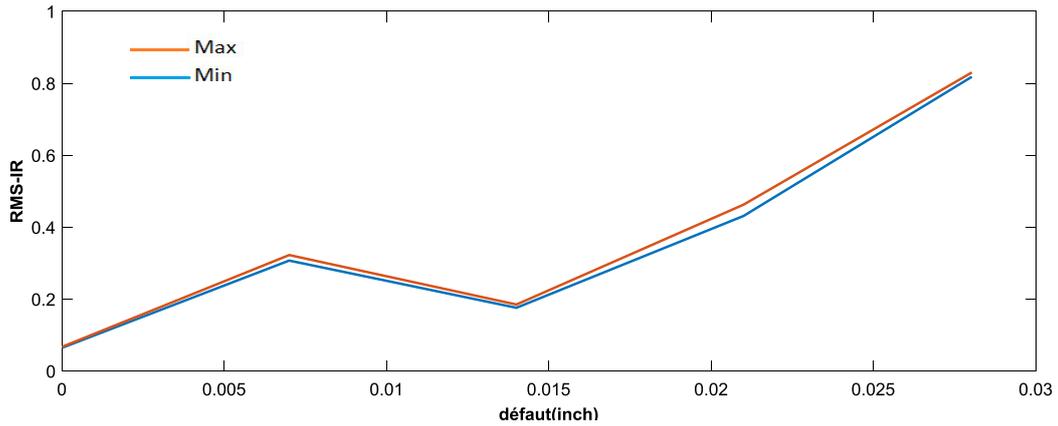


Figure.III.9 Variation de RMS en fonction de diamètre de défaut affectant la bague intérieure.

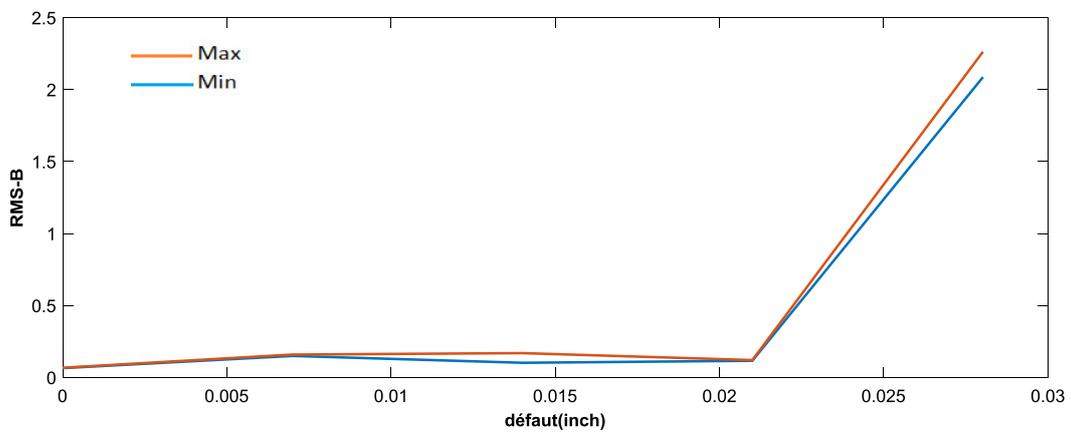


Figure.III.10 Variation de RMS en fonction de diamètre de défaut affectant la bille.

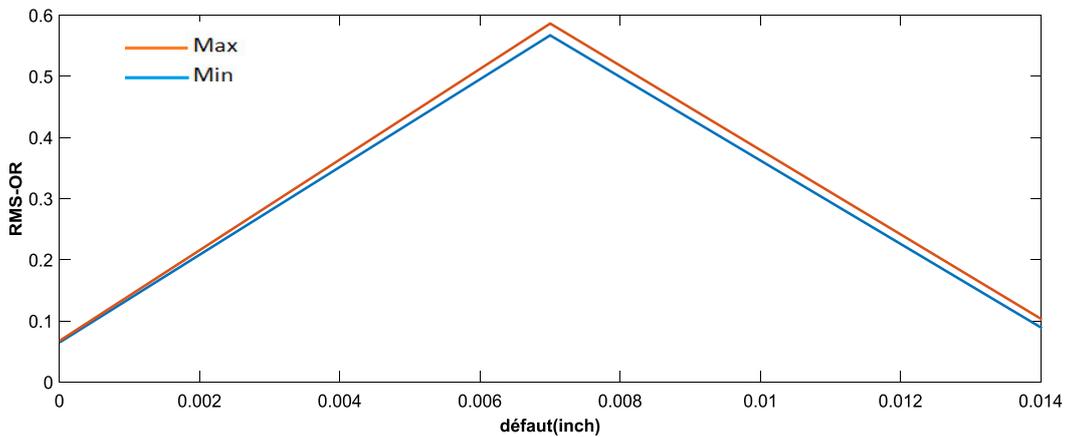


Figure.III.11 Variation de RMS en fonction de diamètre de défaut affectant la bague extérieure.

D'après les trois figures précédentes, on peut constater que le RMS est sensible à la gravité du défaut dans la bague intérieure et bille seulement pour la phase finale de dégradation, contrairement pour la bague extérieure, où il est sensible au début de la

dégradation, en effet, il est croissant jusqu'à un certain seuil ou il perd sa sensibilité et décroît.

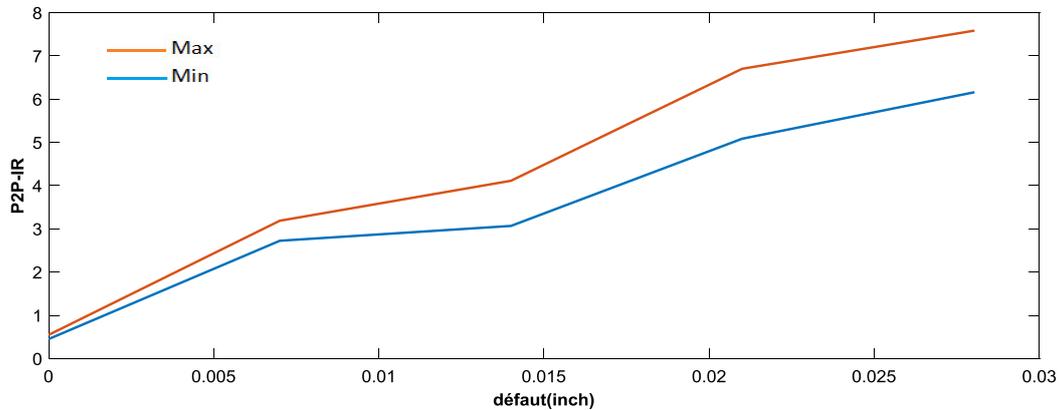


Figure.III.12 Variation de P2P en fonction de diamètre de défaut affectant la bague intérieure.

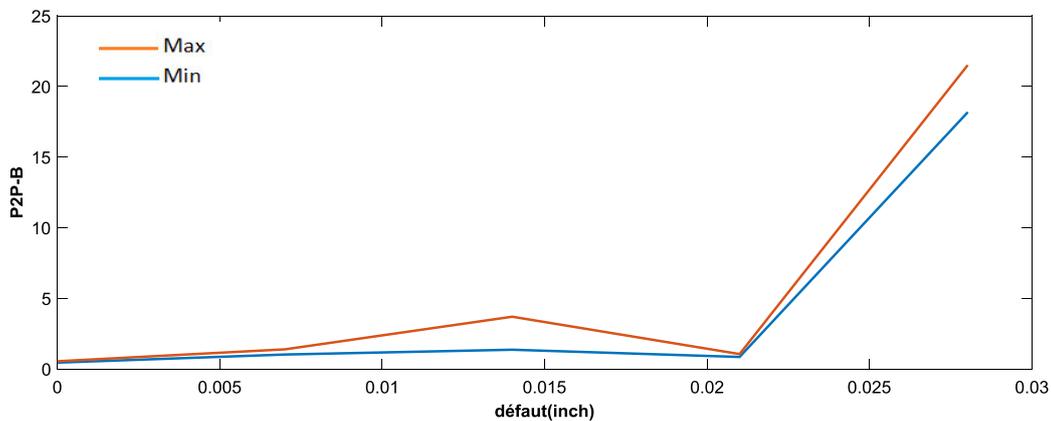


Figure.III.13 Variation de P2P en fonction de diamètre de défaut affectant la bille.

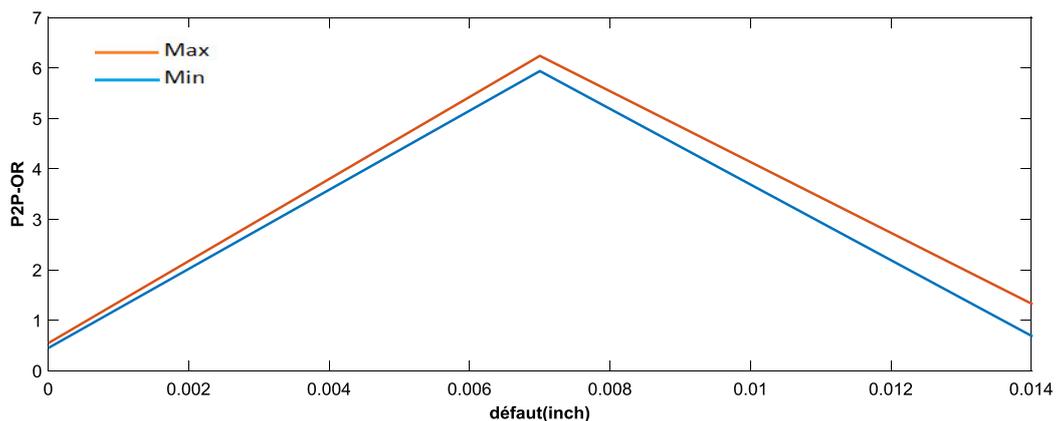


Figure.III.14 Variation de P2P en fonction de diamètre de défaut affectant la bague extérieure.

D'après les figures de P2P, on constate que pour la bague intérieure, le signal est croissant jusqu'à la phase finale de dégradation, donc cet indicateur est sensible et suit la dégradation de roulement.

Pour le cas de défaut affectant la bille, la sensibilité de P2P est négatif jusqu'à la valeur de 0.021 inch, après cette valeur il réagit et augmente avec l'évolution du défaut. Contrairement pour le cas de la bague extérieure, ou il est sensible au début de la dégradation jusqu'à un certain seuil après il décroît.

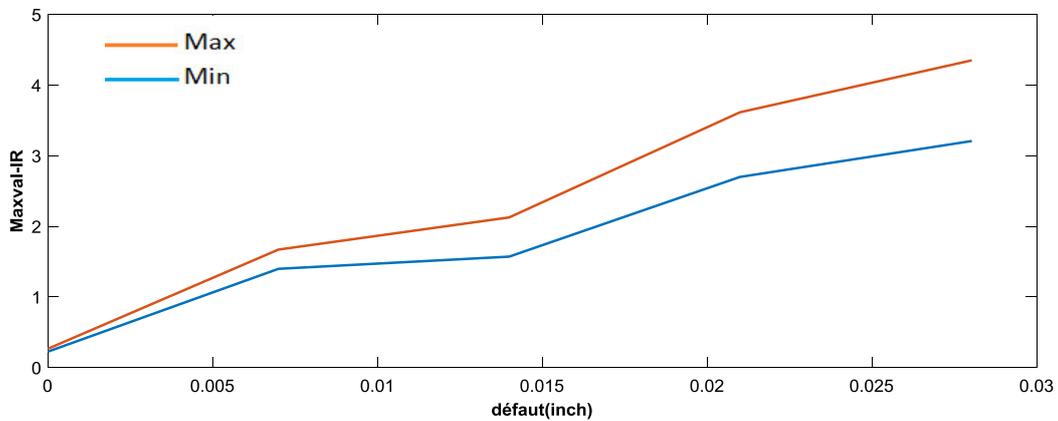


Figure.III.15 Variation de Maxval en fonction de diamètre de défaut affectant la bague intérieure.

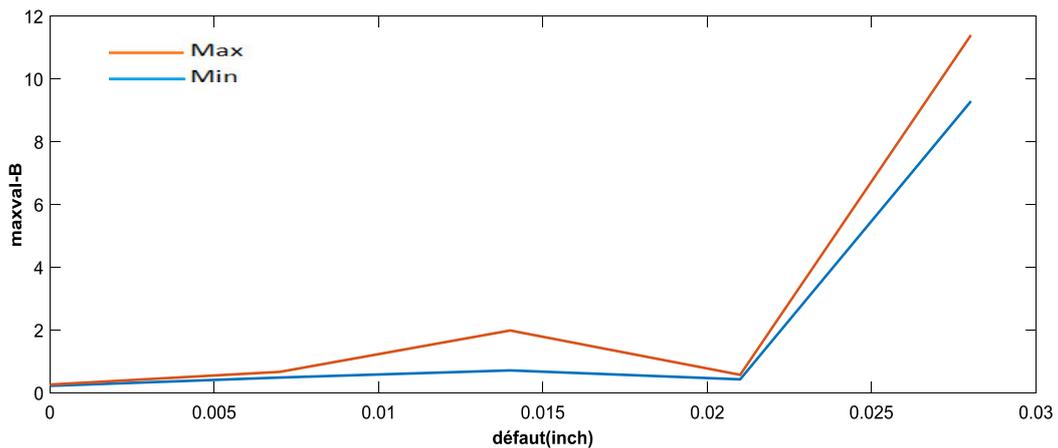


Figure.III.16 Variation de Maxval en fonction de diamètre de défaut affectant la bille.

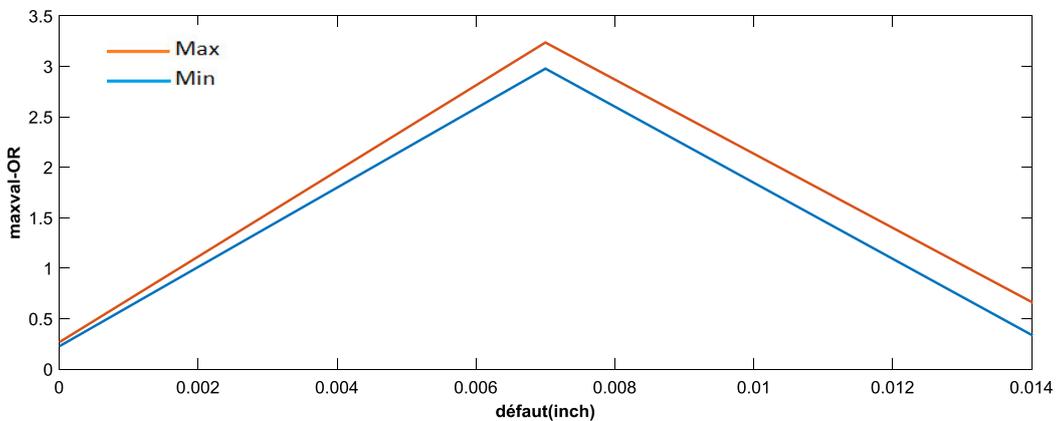


Figure.III.17 Variation de Maxval en fonction de diamètre de défaut affectant la bague extérieure.

Même remarque pour l'indicateur Maxval, il est sensible et suit la dégradation du roulement seulement pour le cas de défaut de la bague intérieure.

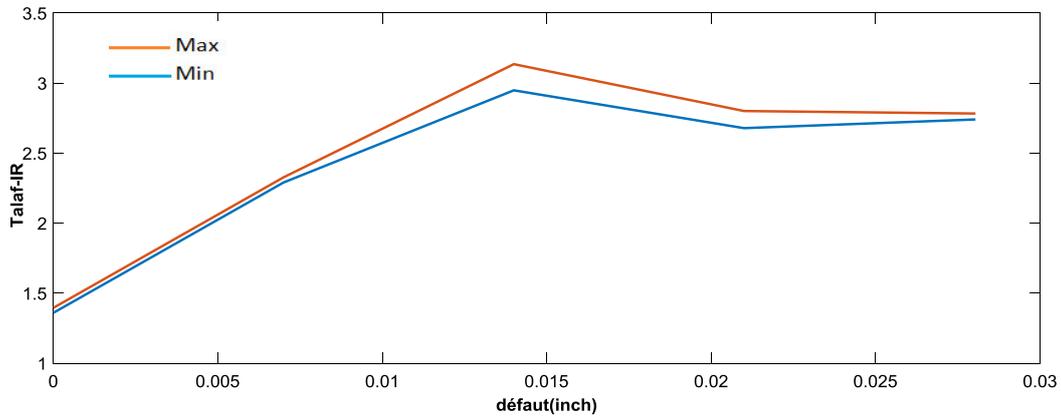


Figure.III.18 Variation de Talaf en fonction de diamètre de défaut affectant la bague intérieure.

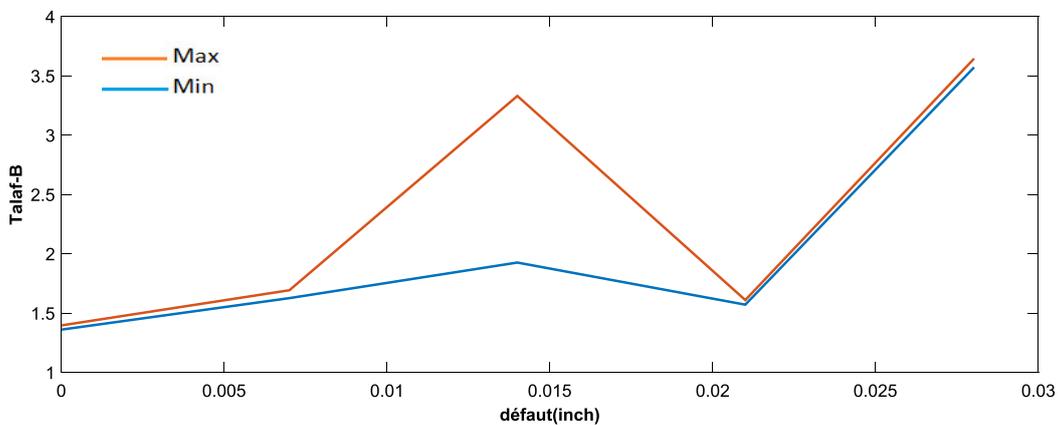


Figure.III.19 Variation de Talaf en fonction de diamètre de défaut affectant la bille.

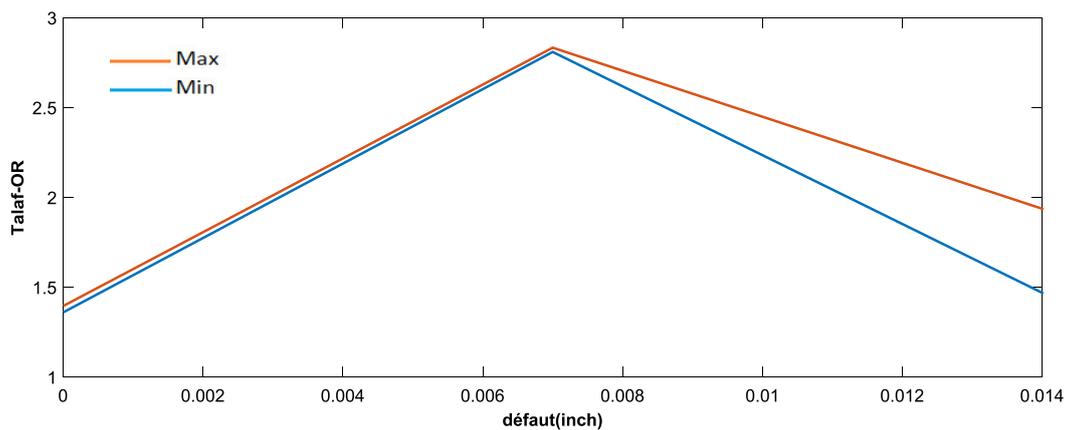


Figure.III.20 Variation de Talaf en fonction de diamètre de défaut affectant la bague extérieure.

Le Talaf est sensible, croissant et augmente avec l'évolution de défaut dans la bague intérieure seulement, et il perd cette sensibilité pour le cas de défaut de la bague extérieure et bille car il est une fois croissant après il commence à décroître.

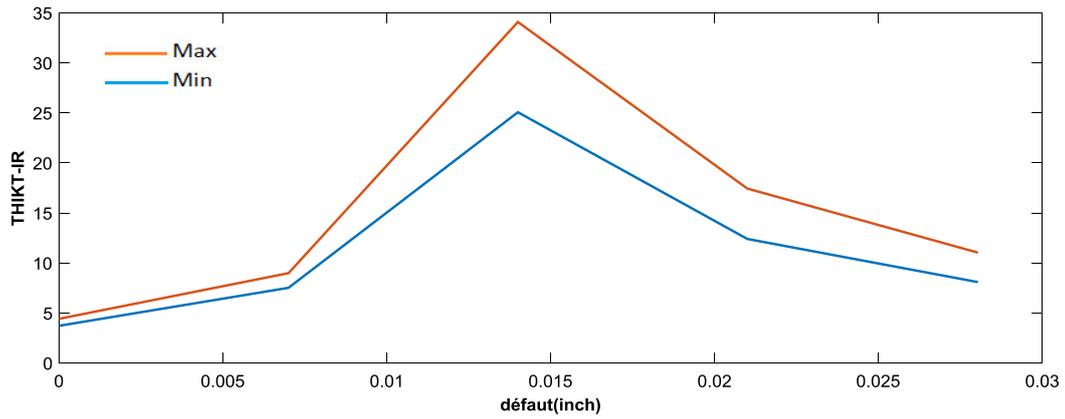


Figure.III.21 Variation de Thikat en fonction de diamètre de défaut affectant la bague intérieure.

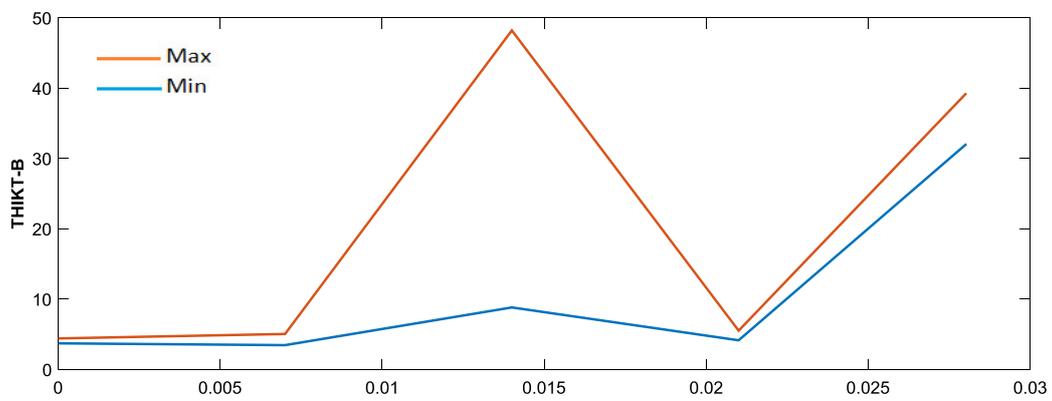


Figure.III.22 Variation de Thikat en fonction de diamètre de défaut affectant la bille.

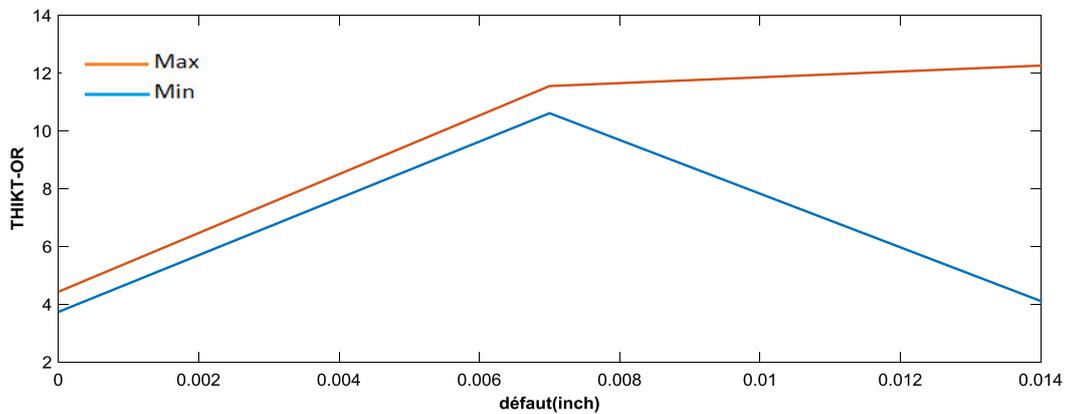


Figure.III.23 Variation de Thikat en fonction de diamètre de défaut affectant la bague extérieure.

L'indicateur Thikat est sensible à la gravité du défaut seulement au début de la dégradation de roulement pour les deux bagues intérieure et extérieure, et à la fin de dégradation pour la bille.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthode de traitement de signal utilisable pour la détection des défauts des roulements. Cette méthode est basée sur l'évolution des différents indicateurs temporels en fonction du diamètre de défaut. Les signaux utilisés sont des signaux réels des roulements à l'état sain et défaillant obtenus du banc d'essai Américain " Bearing Data Center".

Les résultats de cette méthode est conçus pour l'utilisés comme des entrées d'un système intelligent sera plus détaillé dans les chapitres qui suit.

Chapitre IV

Théorie de la logique floue

Introduction

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par **Lotfi_ Zadeh** en 1965 se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que vrai ou faux, la logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes.

La logique floue par sa caractéristique principale pour formaliser le raisonnement humain et que les règles sont énoncées en langage naturel, elle est classée parmi les techniques de l'intelligence artificielle. Cette technique permet de traiter les problèmes tels qu'ils se présentent dans la nature, et elle a fait ses preuves dans les systèmes experts, dans le contrôle de processus et dans les programmes d'aide à la décision.

IV.1 Définition

La logique floue est une sorte de logique dans laquelle les variables ont des degrés de vérité compris entre 0(faux) et 1(vrai). Cela permet entre autres d'exprimer les résultats comme des probabilités plutôt que des certitudes.

Le terme de "logique floue" a deux acceptions :

- La première, que nous avons adoptée correspond à tous les développements concernant la théorie de sous-ensembles flous.
- La seconde représente une extension de la logique classique, dans le but de raisonner sur des connaissances imparfaites. [16,17]

IV.2 Création et historique

Dans les années Trente, Max Back a initié le mouvement en travaillant sur une logique plurivalente appliquée aux ensembles.

Le terme d'ensemble flou apparaît pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi Zadeh, de l'université de Berkeley aux USA, publie un article intitulé « Ensembles flous » (Fuzzy Sets). Il a réalisé depuis de nombreuses avancées théoriques majeures dans le domaine et a été rapidement accompagné par de nombreux chercheurs développant des travaux théoriques.

Parallèlement, certains chercheurs se sont penchés sur la résolution par logique floue de problèmes réputés difficiles. Ainsi en 1975, le professeur Mamdani à Londres développe une

stratégie pour le contrôle des procédés et présente les résultats très encourageants qu'il a obtenus sur la conduite d'un moteur à vapeur. En 1978, la société danoise F.L.Smidth réalise le contrôle d'un four à ciment. C'est là la première véritable application industrielle de la logique floue.

C'est au Japon, où la recherche n'est pas seulement théorique mais également très applicative, que la logique floue connaît son véritable essor. A la fin des années 1980, c'est d'un véritable boum qu'il faut parler. Les produits grand public, machines à laver, appareils photographiques et autres caméscopes estampillés « Fuzzy Logic » ne se comptent plus. Dans l'industrie, le traitement des eaux, les grues portuaires, les métros, les systèmes de ventilation et de climatisation sont touchés. Enfin, des applications existent dans des domaines très différents tels que la finance ou le diagnostic médical. [18]

IV.3 Intérêt d'utilisation de la logique floue

La logique floue trouve ses origines dans un certain nombre de constatations :

- la connaissance que l'être humain aura à une situation quelconque est généralement imparfaite :
 - Elle peut être incertaine (il doute de sa validité).
 - Ou imprécise (il a du mal à l'exprimer clairement).
 - L'être humain résout souvent des problèmes complexes à l'aide de données approximatives: la précision des données est souvent intitulée ; par exemple pour choisir un appartement, il pourra prendre en compte la surface, la proximité de commerce, la distance du lieu de travail, le loyer...etc.
- Dans l'industrie, les opérateurs résolvent souvent des problèmes complexes de manière relativement simple et sans avoir besoin de modéliser le système. De même, tout le monde sait qu'un modèle mathématique n'est pas nécessaire pour conduire une voiture et pourtant une voiture est un système très complexe.
- Plus la complexité d'un système augmente, moins il est possible de faire des affirmations précises sur son comportement.

De ces constatations viennent naturellement les déductions suivantes :

- Plutôt que de modéliser le système, il est souvent intéressant de modéliser le comportement d'un opérateur humain face au système ;
- Plutôt que par des valeurs numériques précises, le fonctionnement doit être décrit par des qualificatifs globaux traduisant l'état approximatif des variables. [19,17]

IV.4 Théorie des sous-ensembles flous

IV.4.1 Concept de sous-ensemble flou

Le concept de sous-ensemble flou a été introduit pour éviter les passages brusques d'une classe à une autre (dans la classe noire à la classe blanche par exemple) et autoriser des éléments à n'appartenir complètement ni à l'une ni à l'autre (à être gris, par exemple), ou encore à appartenir partiellement à chacune (avec un fort degré à la classe noire et un faible degré à la classe blanche dans le cas du degré foncé). La notion de sous-ensemble flou permet de traiter [16]:

- des catégories aux limites mal définies (comme "centre-ville" ou "ancien").
- des situations intermédiaires entre le tout et le rien ("presque noire").
- le passage progressif d'une propriété à une autre de "proche" à "éloigné" selon la distance.

IV.4.2 Définition d'un sous-ensemble flou

Un sous-ensemble classique A de X est défini par une fonction caractéristique $F(x)$ qui prend la valeur 0 pour les éléments de X n'appartenant pas à A et la valeur 1 pour ceux qui appartiennent à A :

$$F : X \rightarrow \{0,1\}$$

Par contre un sous-ensemble flou A de X est défini par une fonction d'appartenance qui associe à chaque élément x de X , le degré $f(x)$, compris entre 0 et 1, avec lequel x appartient à A : $f : X \rightarrow [0, 1]$.

Le cas particulier où $f(x)$ ne prend que des valeurs égales à 0 ou 1, le sous ensemble flou A est un sous-ensemble classique de X . Un sous-ensemble classique est donc un cas particulier de sous-ensemble flou. [20]

IV.4.3 Fonction d'appartenance

Un ensemble flou est défini par sa « fonction d'appartenance », qui correspond à la notion de « fonction caractéristique » en logique classique.

Supposons que nous voulions définir l'ensemble des personnes de « taille moyenne ». En logique classique, nous conviendrons par exemple que les personnes de taille moyenne sont celles dont la taille est comprise entre 1,60 m et 1,80 m. la fonction caractéristique de l'ensemble (Figure IV.1) donne « 0 » pour les tailles hors de l'intervalle [1,60 m ; 1,80m] et « 1 » dans cet intervalle. L'ensemble flou des personnes de « taille moyenne » sera défini par une « fonction d'appartenance » qui diffère d'une fonction caractéristique par le fait qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle [0,1]. A chaque taille possible

correspondra un « degré d'appartenance » à l'ensemble flou des « tailles moyennes » (Figure IV.2), comprises entre 0 et 1. [19]

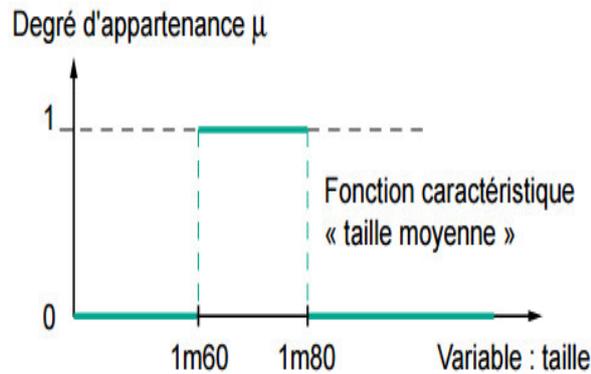


Fig. 2 : fonction caractéristique.

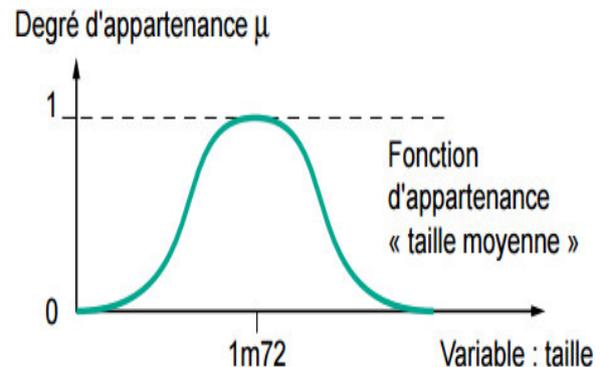


Fig. 3 : fonction d'appartenance.

Figure IV.1 Fonction caractéristique.

Figure IV.2 Fonction d'appartenance.

Plusieurs ensembles flous peuvent être définis sur la même variable, par exemple les ensembles « taille petite », « taille moyenne » et « taille grande », notions explicitées chacune par une fonction d'appartenance (Figure IV.3).

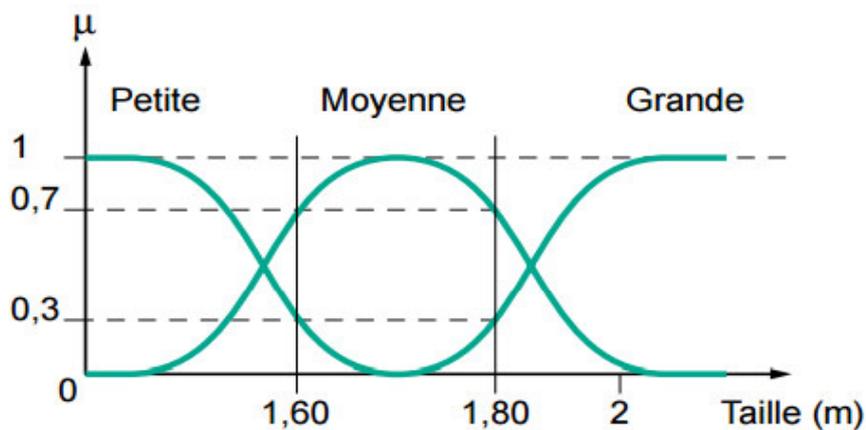


Figure IV.3 Fonction d'appartenance, variable et terme linguistique.

Cet exemple montre la gradualité que permet d'introduire la logique floue. Une personne de 1,80 m appartient à l'ensemble « taille grande » avec un degré 0,3 et à l'ensemble « taille moyenne » avec un degré de 0,7. En logique classique, le passage de moyen à grand serait brusque. Une personne de 1,80 m serait par exemple de taille moyenne alors qu'une personne de 1,81 m serait grande, ce qui choque l'intuition. La variable (par exemple : taille) ainsi que

les termes (par exemple : moyenne, grande) définis par les fonctions d'appartenance portent respectivement les noms de variables linguistiques et de termes linguistiques.

Comme cela sera vu plus loin, variables et termes linguistiques peuvent être utilisés directement dans des règles.

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme.

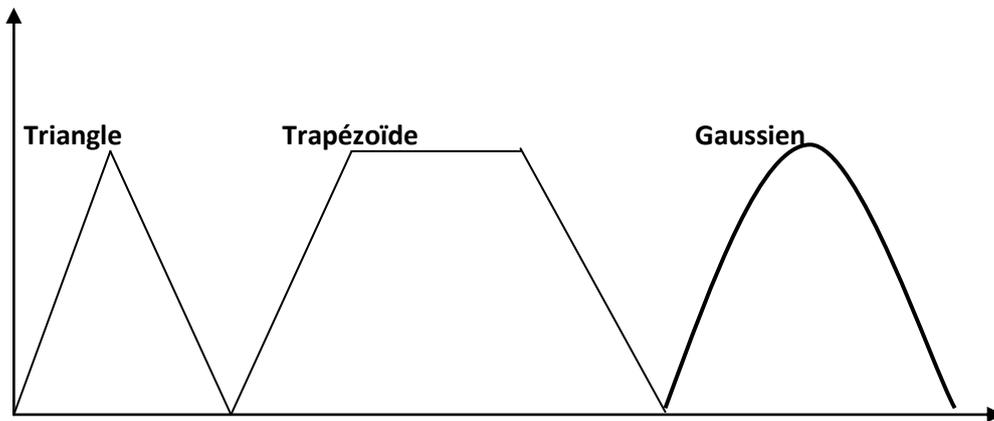


Figure IV.4 Type de représentation des sous-ensembles floue.

Toutefois, elles sont souvent définies par des segments de droites, et dites « linéaires par morceaux ». (**Figure IV.5**).

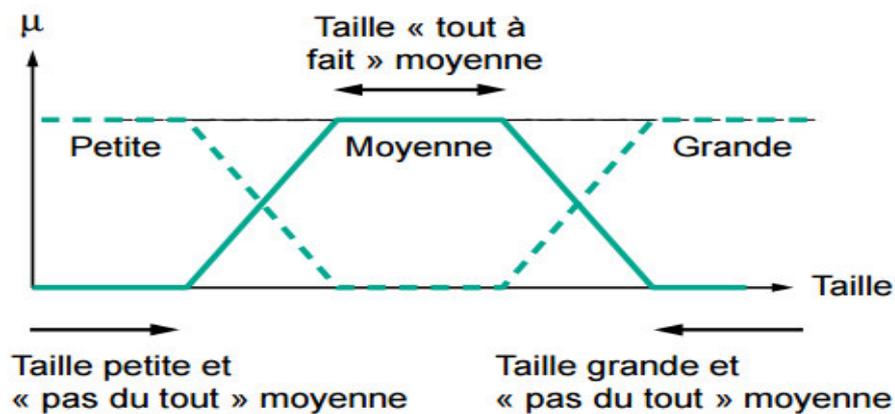


Figure IV.5 Fonctions d'appartenance linéaires par morceaux.

Les fonctions d'appartenance « linéaires par morceaux » sont très utilisés car :

- Elles sont simples,
- Elles comportent des points permettant de définir les zones où la notion est vraie, les zones où elle est fautive, ce qui simplifie le recueil d'expertise.

Ce sont des fonctions d'appartenance de ce type qui seront utilisées dans la suite de ce document.

Dans certains cas, les fonctions d'appartenance peuvent être égales à 1 pour une seule valeur de la variable et égales à 0 ailleurs, et prennent alors le nom de « fonctions d'appartenance singletons ». Un singleton flou (Figure IV.6) défini sur une variable réelle est la traduction dans le domaine flou d'une valeur particulière. [19]

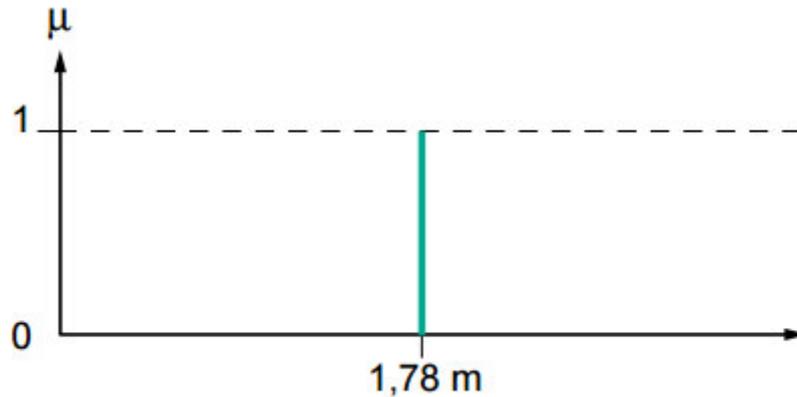


Figure IV.6 fonction d'appartenance singleton.

IV.4.3.1 Degré d'appartenance (Fuzzification)

L'opération de fuzzification permet de passer du domaine réel au domaine du flou. Elle consiste à déterminer le degré d'appartenance d'une valeur à un ensemble flou. Par exemple (Figure IV.7), si la valeur courante de la variable « entrée » est de 2, le degré d'appartenance à la fonction d'appartenance « entrée faible » est égal à 0,4 qui est le résultat de la fuzzification. [19]

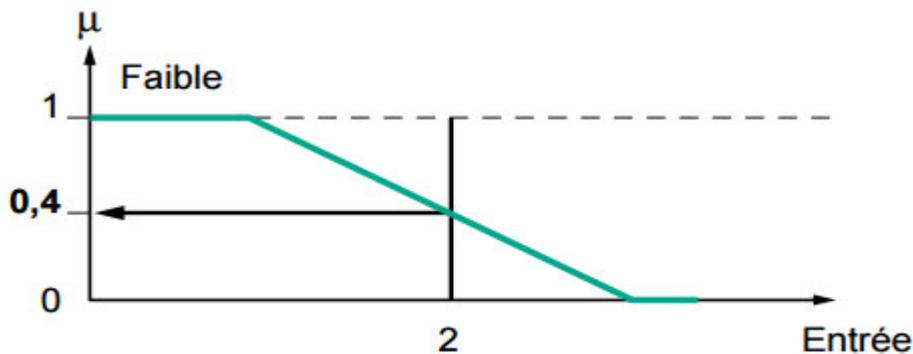


Figure IV.7 Fuzzification.

On peut aussi dire que la proposition « entrée faible » est vraie à 0,4. On parle alors de degré de vérité de la proposition. Degré d'appartenance et degré de vérité sont donc des notions similaires.

IV.4.4 Caractéristiques d'un sous-ensemble flou

Les caractéristiques d'un sous-ensemble flou A de X les plus utiles pour le décrire sont celles qui montrent à quel point il diffère d'un sous-ensemble classique de X . [20]

a. Support :

La première de ses caractéristiques est le support de A , c'est-à-dire l'ensemble des éléments de X qui appartiennent, au moins un peu, à A .

Le support de A , noté $\text{Supp}(A)$, est la partie de X sur laquelle la fonction d'appartenance de A n'est pas nulle :

$$\boxed{\text{Supp}(A) = \{x \in X / f_A(x) \neq 0\}} \quad \dots (1)$$

b. Hauteur :

La deuxième caractéristique de A est sa hauteur, notée $h(A)$, c'est-à-dire le plus fort degré avec lequel un élément de X appartient à A .

La hauteur, notée $h(A)$, du sous-ensemble flou A de X est la plus grande valeur prise par sa fonction d'appartenance :

$$\boxed{h(A) = \sup_{x \in X} f_A(x)} \quad \dots (2)$$

c. Normalisé :

On utilise souvent des sous-ensembles flous normalisés, c'est-à-dire pour lesquels il existe au moins un élément de X appartenant de façon absolue (avec un degré 1) à A .

La théorie des possibilités, faite appel à des sous-ensembles flous normalisés.

Le sous-ensemble flou A de X est normalisé si sa hauteur $h(A)$ est égale à 1.

d. Noyau :

Un sous-ensemble flou normalisé suppose qu'il existe des éléments de X typiques de la propriété à laquelle il est associé. Ce sont des éléments appartenant de façon absolue à A , dont l'ensemble est appelé le noyau de A . Le noyau de A , noté $\text{noy}(A)$, est l'ensemble des éléments de X pour lesquels la fonction d'appartenance de A vaut 1 :

$$\boxed{\text{noy}(A) = \{x \in X / f_A(x) = 1\}} \quad \dots (3)$$

e. Cardinalité :

Lorsque X est finie, on caractérise également le sous-ensemble flou A de X par sa cardinalité, qui indique le degré global avec lequel les éléments de X appartiennent à A . La cardinalité du sous-ensemble flou A de X est défini par :

$$\boxed{|A| = \sum_{x \in X} f_A(x)} \quad \dots (4)$$

Si A est un sous-ensemble flou ordinaire de X , sa hauteur est égale à 1 ; il est normalisé et identique à son support et à son noyau ; sa cardinalité est le nombre d'éléments qui le composent, selon la définition classique.

f. α -coupes :

Pour un seuil donné α de $[0, 1]$, on définit la α -coupe du sous-ensemble flou A de X (ou sous-ensemble de niveau α associé à A) comme le sous-ensemble

$$\mathbf{A\alpha = \{x \in X / f_A(x) \geq \alpha\} \text{ de } X} \quad \dots (5)$$

Dont la fonction caractéristique $X A \alpha$ est telle que :

$$X A \alpha(x) = 1 \text{ si et seulement si } f_A(x) \geq \alpha.$$

IV.4.5 Opérations sur les sous-ensembles flous

La description d'un sous-ensemble flou A de l'ensemble de référence X correspond à l'identification des degrés avec lesquels une propriété Prop (A) est satisfaite, éventuellement imparfaitement, par les éléments de X . peut-on construire le sous ensemble flou défini par les règles avec lesquelles Prop (A) n'est pas satisfaite ? Peut-on construire celui définit par les degrés avec lesquels deux propriétés Prop (A) est Prop (B) sont satisfaites simultanément ? Des opérations sur les ensembles flous sont définies pour répondre à de telles questions. Le concept de sous-ensemble flou de X étant une généralisation de la notion sous-ensemble classique de X , ces opérations sont choisies de façon à être équivalentes aux opérations classiques de la théorie des ensembles lorsque les fonctions d'appartenance ne prennent que la valeur 0 ou 1. [20]

a. Egalité et inclusion de sous-ensembles flous :

Deux sous-ensembles flous A et B de X sont égaux si leurs fonctions d'appartenances prennent la même valeur pour tout élément de X :

$$\mathbf{\forall x \in X f_A(x) = f_B(x)} \quad \dots (6)$$

Etant donné deux sous-ensembles flous A et B de X , on dit que A est *inclus* dans B et on note $A \subseteq B$, si leurs fonctions d'appartenance sont telles que :

$$\mathbf{\forall x \in X f_A(x) \leq f_B(x)} \quad \dots (7)$$

b. Intersection et union de sous-ensembles flous :

L'intersection de deux sous-ensembles flous A et B de X est le sous-ensemble flou C, que l'on note $A \cap B$, tel que :

$$\forall x \in X f_C(x) = \min(f_A(x), f_B(x)). \quad \dots (8)$$

L'union de deux sous-ensembles flous A et B de X est le sous-ensemble flou D, que l'on note $A \cup B$, tel que :

$$\forall x \in X f_D(x) = \max(f_A(x), f_B(x)). \quad \dots (9)$$

c. Complément d'un sous-ensemble flou :

Le complément A^c d'un sous-ensemble flou A de X défini comme le sous-ensemble flou de X de fonction d'appartenance :

$$\forall x \in X f_{A^c}(x) = 1 - f_A(x). \quad \dots (10)$$

IV.4.6 Opérateurs logiques flous

Ces opérateurs permettent d'écrire des combinaisons logiques entre notions floues, c'est-à-dire de faire des calculs sur des degrés de vérité. Comme pour la logique classique, on peut définir des opérateurs ET, OU, négation.

Exemple : Appartement Intéressant = Loyer Raisonnable **ET** Surface Suffisante. [18]

a. Choix des opérateurs :

Il existe de nombreuses variantes dans ces opérateurs. Cependant, les plus répandus sont ceux dits « de Zadeh » décrits ci-dessous.

Dans ce qui suit, le degré de vérité d'une proposition A sera noté $\mu(A)$.

b. Intersection :

L'opérateur logique correspondant à l'intersection d'ensembles est le ET. Le degré de vérité de la proposition « A ET B » est le minimum des règles de vérités de A et de B :

$$\mu(A \text{ ET } B) = \text{MIN}(\mu(A), \mu(B)) \quad \dots (11)$$

Exemple :

« Température Basse » est vraie à 0,7

« Pression Faible » est vraie à 0,5

« Température Basse ET Pression Faible » est donc vraie à $0,5 = \text{MIN}(0,7 ; 0,5)$

Remarque : L'opérateur ET de la logique classique est bien respecté : $0 \text{ ET } 1$ donne 0.

c. Union :

L'opérateur logique correspondant à l'union d'ensembles est le **OU**. Le degré de vérité de la proposition « A OU B » est le maximum des degrés de vérité de A et de B :

$$\mu (A \text{ OU } B) = \text{MAX} (\mu(A), \mu(B)) \quad \dots (12)$$

Exemple :

« Température Basse » est vraie à 0,7

« Pression Faible » est vraie à 0,5

« Température Basse Ou Pression Faible » est donc vraie à 0,7.

Remarque : L'opérateur Ou de la logique classique est bien respecté : $0 \text{ OU } 1$ donne 1.

d. Complément :

L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est la négation.

$$\mu (\text{NON } A) = 1 - \mu(A) \quad \dots (13)$$

Exemple :

« Température Basse » est vraie à 0,7

« NON Température Basse », que l'on utilisera généralement sous la forme « Température NON Basse », est donc vrai à 0,3.

Remarque : L'opérateur négation de la logique classique est bien respecté:

NON(0) donne bien 1 et **NON**(1) donne bien 0.

IV.5 Système flou

Un système flou peut être regardé comme un système expert particulièrement simple, fonctionnant à partir d'une représentation des connaissances basée sur ses ensembles flous.

Un système flou est composé de 4 blocs principaux : [16,21]

- . Base de connaissances floues.
- . Interface de fuzzification.
- . Mécanisme d'inférence flou.
- . Interface de défuzzification.

Il est décrit dans la figure suivante :

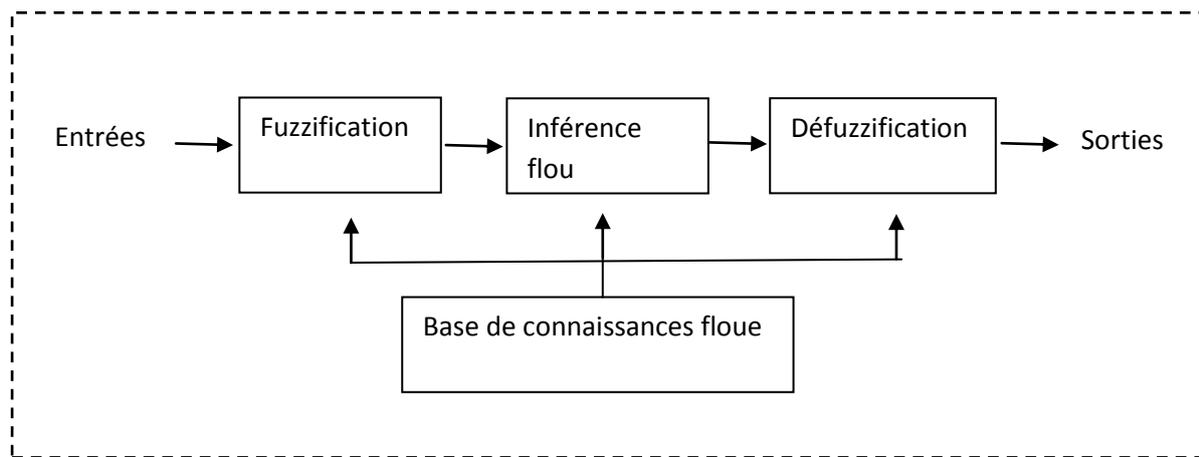


Figure IV.8 Système flou.

a. Base de connaissances :

La base de connaissances comprend les connaissances de l'expert humain pour le système ainsi le domaine de variation des variables d'E/S. Elle est donc constituée de :

- **Base de données:**

Regroupe dans ce bloc, l'ensemble des définitions utilisées dans les règles floues.

- **Base des règles floues :**

La connaissance de l'expert est généralement exprimée par des règles et donc une collection de règles de la forme « SI-ALORS ».

b. Fuzzification :

La fuzzification est la première étape dans la réalisation d'un système flou. Elle transforme chaque valeur réelle d'entrée en un ensemble flou, en lui attribuant sa fonction d'appartenance à chacune des classes préalablement définie.

c. Mécanisme d'inférence floue :

A partir de la base des règles (fournie par l'expert) et du sous ensemble correspond à la fuzzification. Le mécanisme d'inférence calcule le sous ensemble flou qui est la sortie floue du système.

Il existe plusieurs méthodes d'inférence floue qui dépendent des applications et de la forme des fonctions d'appartenance:

- **Méthode d'inférence Max-Min:**

La méthode d'inférence **Max-Min** ou appelée aussi méthode de "Mamdani" est la méthode utilisée dans notre travail, elle peut être décrite de la manière suivante :

Cette méthode réalise au niveau de la combinaison des prémisses et implication, l'opérateur "ET" par la formation de minimum, l'opérateur "OU" par la formation maximum et la conclusion dans chaque règle introduite par "Alors" par la formation minimum.

Enfin, Sachant que pour un état donné des entrées, plusieurs règles peuvent être validées ce qui implique des valeurs différentes. L'opérateur "OU" lit les différents règles est réalisé par la formation du maximum.

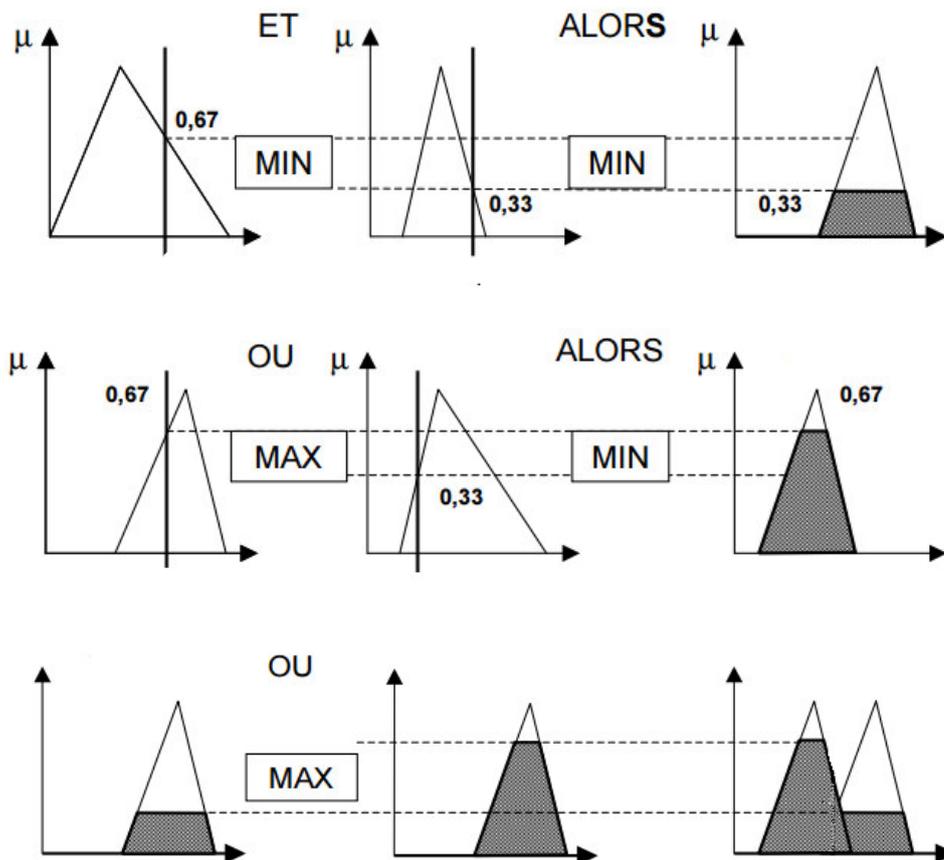


Figure IV.9 Méthode d'inférence Max-Min.

▪ **Méthode d'inférence Max-Produit:**

Cette méthode réalise, au niveau de la condition, l'opérateur "OU" par la formation du maximum et l'opérateur "ET" par la formation du minimum.

Par contre, la conclusion dans chaque règle, introduite par "Alors" est réalisé par la formation produit.

Enfin, l'opérateur "OU" qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum.

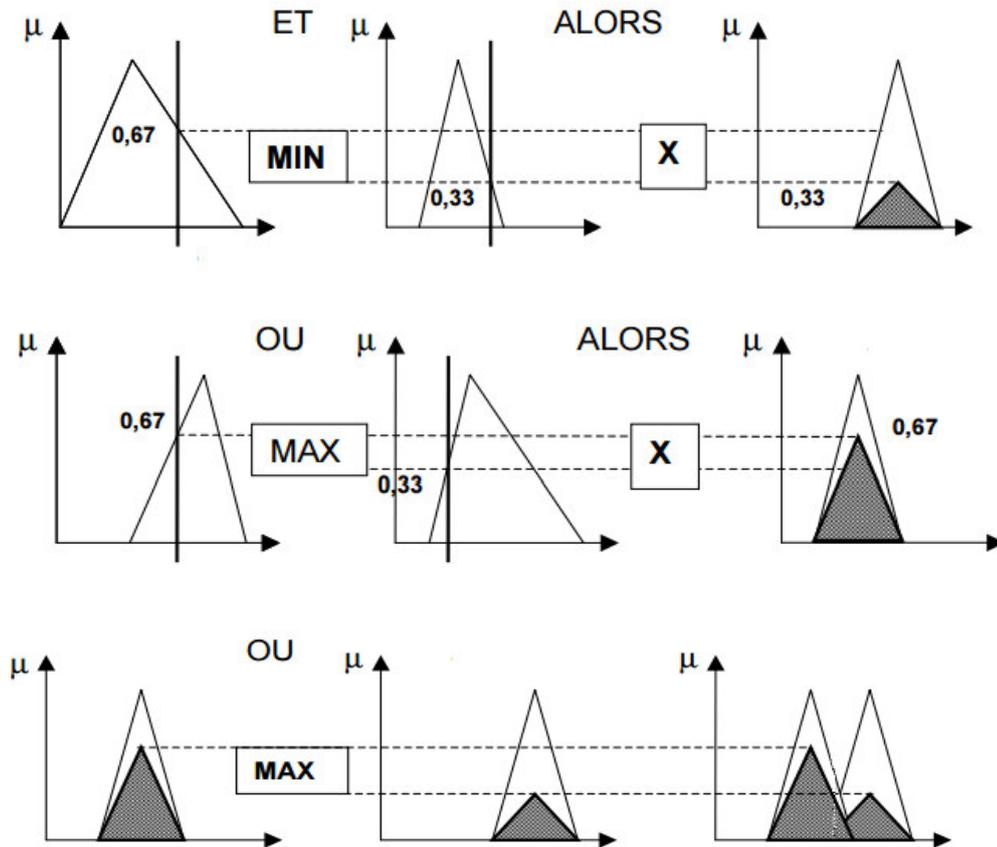


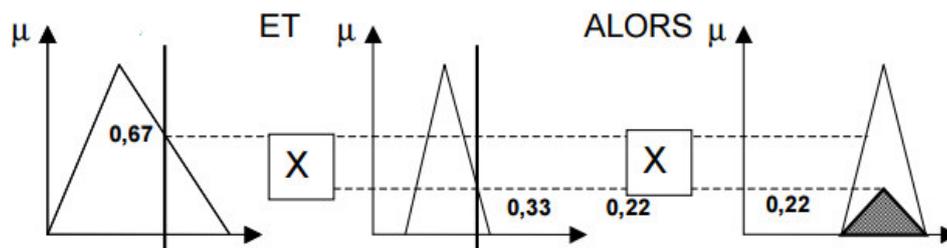
Figure V.10 Méthode d'inférence Max-Produit.

▪ **Méthode d'inférence Somme-Produit:**

Par opposition aux méthodes d'inférence précédentes, cette méthode réalise, au niveau de la condition, l'opérateur "OU" par la formation de la somme, plus précisément par la valeur moyenne, tandis que l'opérateur "ET" est réalisé par la formation du produit.

La conclusion de chaque règle, introduite par "Alors" est réalisé par la formation du produit.

Enfin, l'opérateur "OU" qui lie les différentes règles est réalisé par la formation de la somme, donc la valeur moyenne.



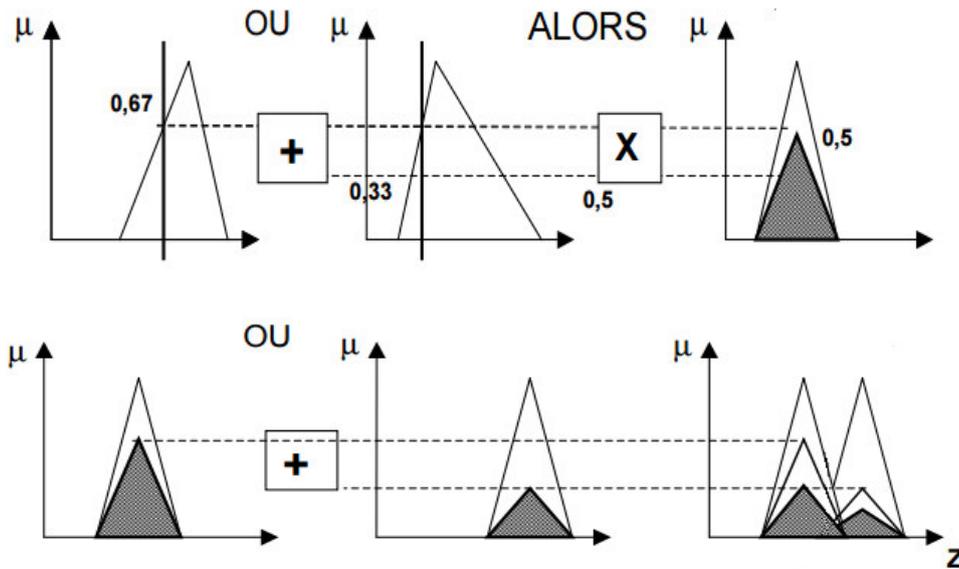


Figure V.11 Méthode d'inférence Somme-Produit.

d. Défuzzification :

Le sous ensemble flou de l'univers de discours ayant été calculé par le mécanisme d'inférence, l'interface de défuzzification pour objectif de la transformer en une valeur non floue permettant ainsi la choie effective du système.

Les deux techniques les plus utilisées en défuzzification sont :

- **La technique de la valeur maximale :**

C'est la plus simple surtout du point de vue de volume de calcul, la valeur de sortie est choisie comme l'abscisse moyenne des valeurs pour lesquelles l'appartenance est maximale.

Cette technique est montrée par la figure suivante :

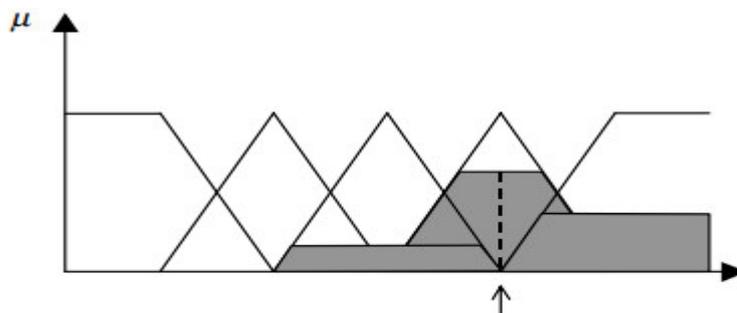


Figure IV.12 Défuzzification par valeur maximale.

La technique du centre de gravité :

Consiste C'est la technique de défuzzification la plus courante, la valeur de sortie correspond à l'abscisse de centre de gravité de la surface obtenue après l'étape d'inférence.

C'est la technique utilisée dans notre système inférence flou.

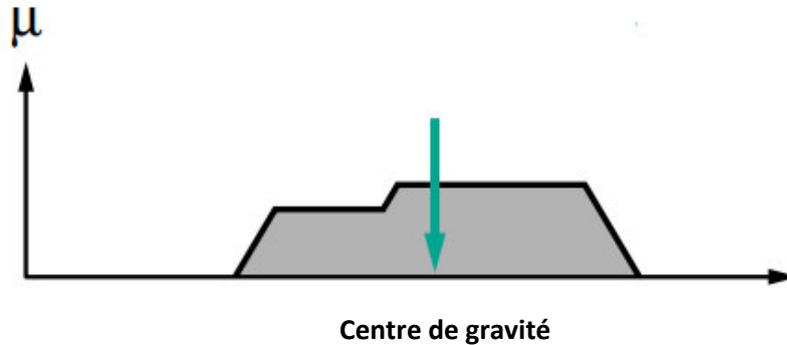


Figure IV.13 Défuzzification par centre de gravité.

Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que la résolution d'un problème en intelligence artificielle par la logique floue passe par trois phases:

- la quantification floue des entrées et des sorties du système (fuzzification).
- l'établissement des règles liant les sorties aux entrées (l'inférence des règles).
- la combinaison des règles pour la génération des sorties (défuzzification).

Les systèmes à base de logique floue ont un grand degré d'autonomie et une capacité de prise de décision à l'aide d'un moteur d'inférence floue plus proche du raisonnement humain.

Le chapitre qui suit sera consacré à l'application de logique floue pour la détection et le diagnostic des défauts de roulements en utilisant des indicateurs des signaux réels.

Chapitre V

*Contribution de la logique floue à la
surveillance des roulements*

Introduction

L'application de la logique floue au diagnostic des machines tournantes commence à apparaître progressivement au domaine de maintenance industrielle et surtout sur les pièces les plus sensibles comme les roulements.

L'objectif de ce chapitre est la contribution à la détection et l'identification des défauts au niveau des roulements en utilisant la logique floue.

V.1 Type de système

Le système de diagnostic utilisé dans cette application est un système d'inférence flou (SIF) de type Mamdani, implémenté sous Matlab.

Nous lui avons choisi les arguments suivant:

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 de défuzzification (centroid).

V.2 Constitution des variables d'entrées et de sorties du (SIF)

V.2.1 Constitution des variables d'entrées

Les variables d'entrées du système d'inférence floue choisi pour la détection et l'identification des défauts de roulements sont constitué de quatre indicateurs les plus pertinents calculés précédemment et qui sont: valeur efficace (RMS), valeur crête a crête (P2P), valeur crête (Maxval), Talaf et Thikat.

Chaque variable d'entrée est constituée de sept (7) ensembles qui sont : Sain, IR7, IR14, B7, B14, IR7, IR14. Les intervalles de ces indicateurs sont classés dans le tableau suivant:

	RMS [min, max]	P2P [min, max]	Maxval [min, max]	Talaf [min, max]
Sain	[0.0646, 0.0673]	[0.4517, 0.5482]	[0.2255, 0.2660]	[1.3603, 1.3958]
IR7	[0.3071, 0.3225]	[2.7248, 3.1883]	[1.3989, 1.6715]	[2.2908, 2.3276]
IR14	[0.1759, 0.1849]	[3.0679, 4.1125]	[1.5716, 2.1269]	[2.9485, 3.1353]
B7	[0.1494, 0.1590]	[1.0258, 1.3921]	[0.4902, 0.6715]	[1.6257, 1.6922]
B14	[0.1018, 0.1689]	[1.3662, 3.7021]	[0.7172, 1.9892]	[1.9255, 3.3296]
OR7	[0.5669, 0.5863]	[5.9374, 6.2391]	[2.9774, 3.2361]	[2.8098, 2.8335]
OR14	[0.0892, 0.1033]	[0.6924, 1.3303]	[0.3389, 0.6651]	[1.4691, 1.9370]

Tableau V.1 Les variables d'entrées du SIF.

V.2.2 Constitution des variables de sorties

Nous avons choisi pour la sortie du système (SIF) deux variables qui sont :

- **Etat1**: représente l'état de santé du dispositif étudié, pour cette variable, on a choisi quatre ensembles flous: Sain, OR, IR et B.

Le tableau suivant représente les différents ensembles flous associés à cette variable de sorties.

Etat de roulement	Sain	OR	B	IR
Etat 1	[0.2, 0.7]	[0.9, 1.4]	[1.6, 2.1]	[2.3, 2.8]

Tableau V.2 La variable d'entrée « Etat 1 ».

- **Etat2**: représente les différents diamètres des défauts, pour cette variable, on a choisi deux ensembles flous: 0,7 et 14. Inch.

Le tableau suivant représente les différents ensembles flous associés à cette variables de sorties.

Diamètre de défaut (10 ⁻³ inch)	0	7	14
Etat 2	[0.2, 0.6]	[0.8, 1.2]	[1.4, 1.8]

Tableau V.3 La variable d'entrée « Etat 2 ».

V.3 Implémentation de système d'inférence flou sous Matlab

L'implémentation du système d'inférence floue sous Matlab est réalisée par l'interface graphique de la boîte à outils.

V.3.1 Structure du système d'inférence floue (SIF)

Nous avons choisi un système d'inférence floue avec quatre variables à l'entrés et deux variables à la sortie.

La figure suivante montre le schéma bloc de notre système.

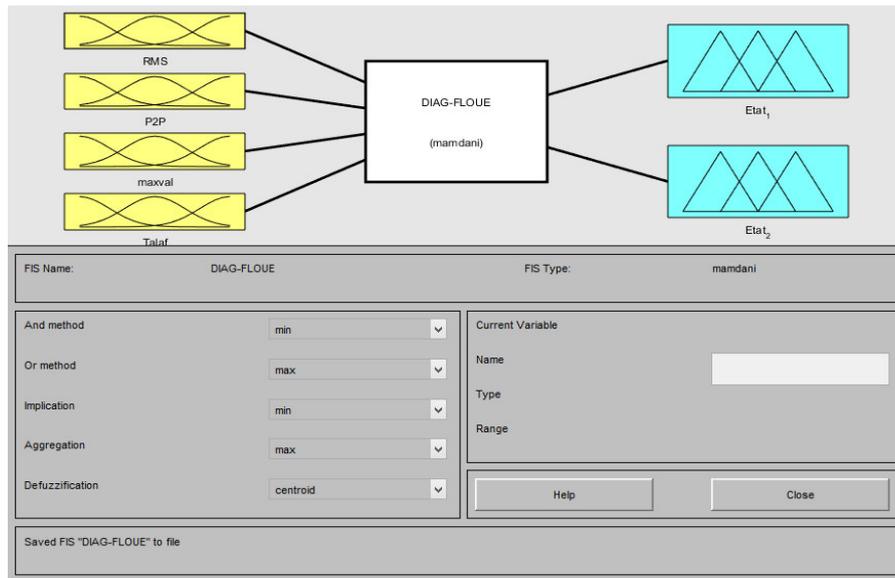


Figure V.1 Le schéma bloc du SIF.

V.3.2 Fuzzification des variables d’entées et de sorties

Elles permettent de définir le sous-ensemble flou et de mesurer le degré d’appartenance d’un élément à l’ensemble flou. Nous allons travailler dans ce chapitre avec une fonction d’appartenance de type trapézoïdale.

V.3.2.1 Fuzzification de la variable d’entées (RMS)

La variable "RMS" varie dans l’intervalle [0.0646, 0.5863]. Donc, on a choisi un domaine de variation de [0, 0.6], cette variable a sept fonctions d’appartenance de type trapézoïdale qui sont:[Sain, IR7, IR14, B7, B14, OR7, OR14].

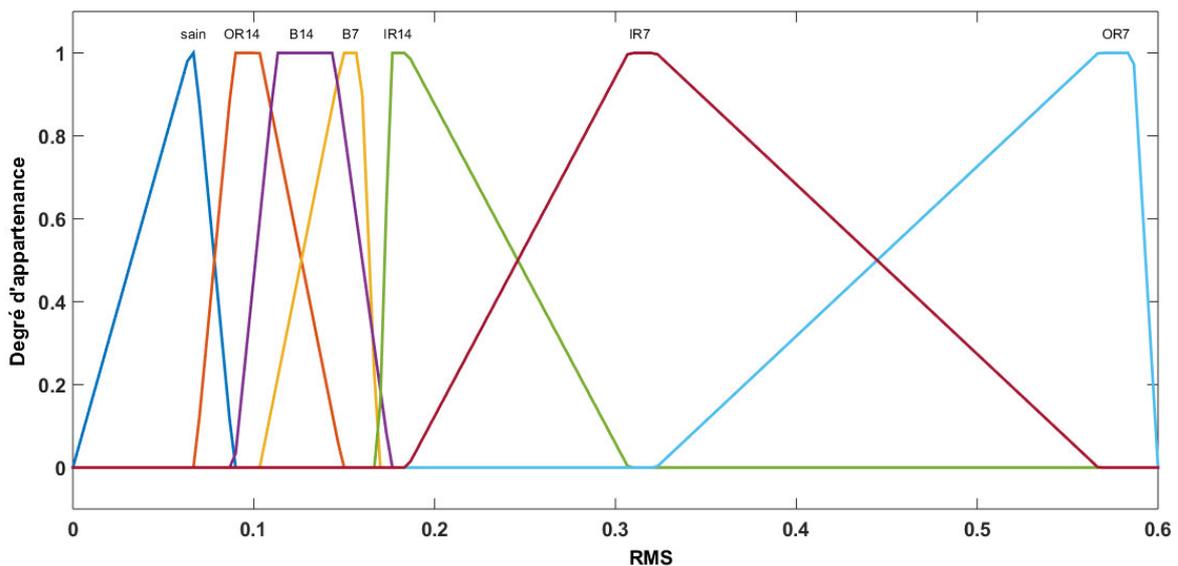


Figure V.2 Fuzzification de la variable d’entrée « RMS ».

V.3.2.2 Fuzzification de la variable d'entées (P2P):

La variable "P2P" varie dans l'intervalle [0.4517, 6.2391]. Donc, on a choisi un domaine de variation de [0, 7], cette variable a sept fonctions d'appartenance de type trapézoïdale qui sont: [Sain, IR7, IR14, B7, B14, OR7, OR14].

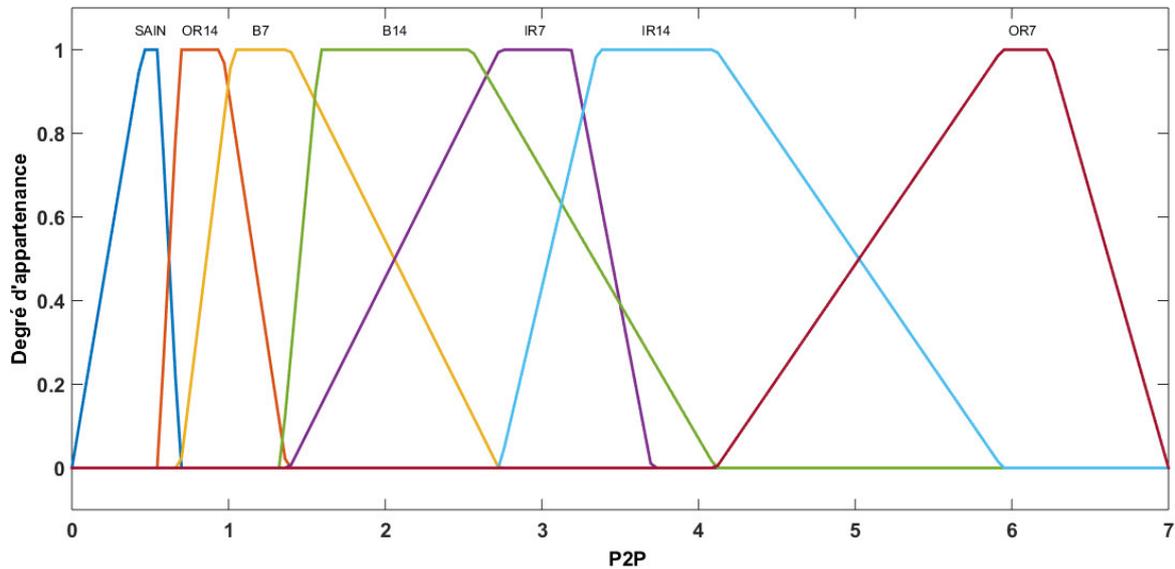


Figure V.3 Fuzzification de la variable d'entrée « P2P ».

V.3.2.3 Fuzzification de la variable d'entées (Maxval)

La variable "Maxval" varie dans l'intervalle [0.2255, 3.2361]. Donc, on a choisi un domaine de variation de [0, 4], cette variable a sept fonctions d'appartenance de type trapézoïdale qui sont: [Sain, IR7, IR14, B7, B14, OR7, OR14].

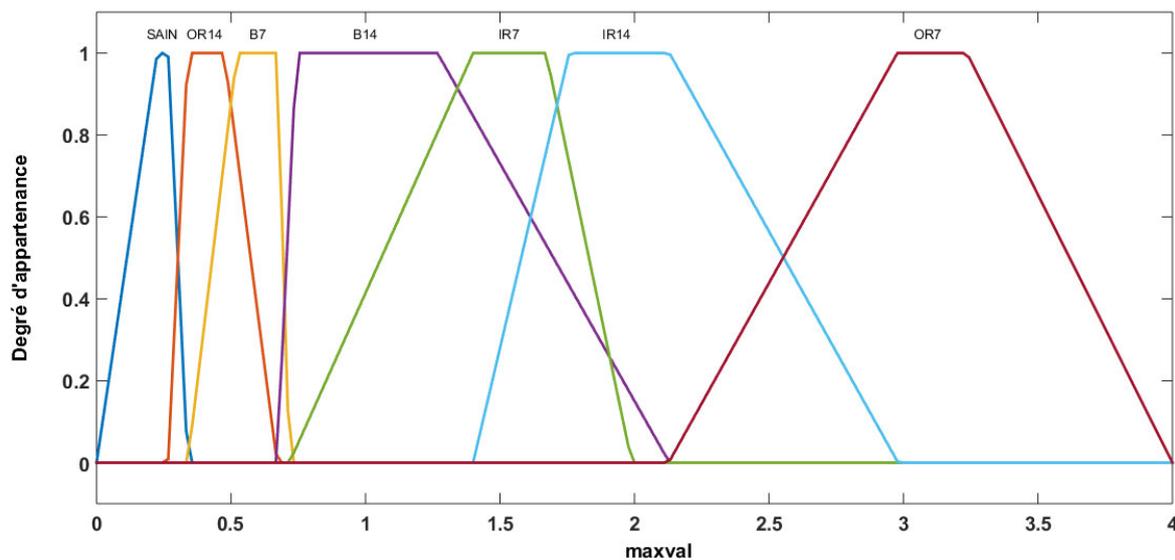


Figure V.4 Fuzzification de la variable d'entrée « maxval ».

V.3.2.4 Fuzzification de la variable d'entées (Talaf)

La variable "Talaf" varie dans l'intervalle [1.3603, 2.8335]. Donc, on a choisi un domaine de variation de [0, 3], cette variable a sept fonctions d'appartenance de type trapézoïdale qui sont: [Sain, IR7, IR14, B7, B14, OR7, OR14].

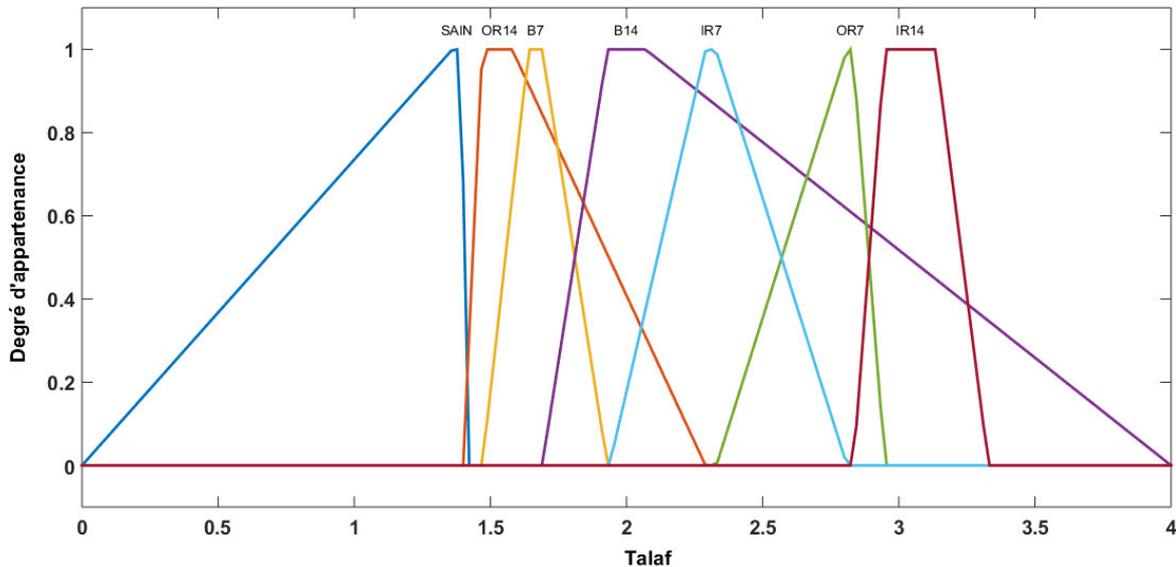


Figure V.5 Fuzzification de la variable d'entrée « Talaf ».

V.3.2.5 Fuzzification de la variable de sortie (Etat1)

La variable "Etat1" varie dans l'intervalle [0.2, 2.8]. Donc, on a choisi un domaine de variation de [0, 3], cette variable a quatre fonctions d'appartenance de type trapézoïdale qui sont: [Sain, IR, B, OR].

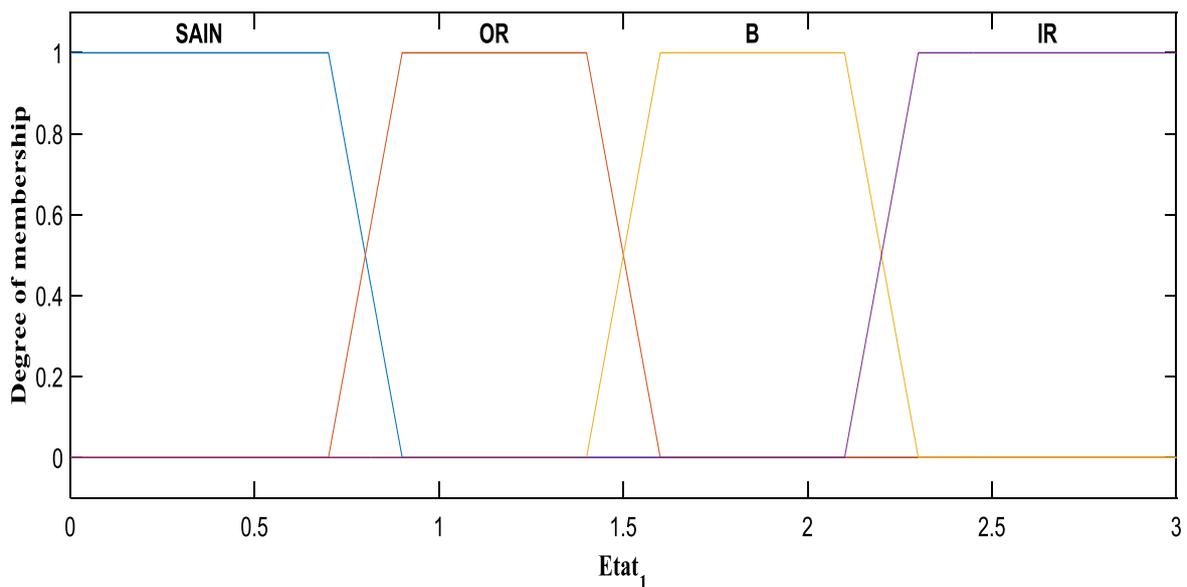


Figure V.6 fuzzification de la variable d'entrée « Etat1 ».

V.3.2.6 Fuzzification de la variable de sortie (Etat2)

La variable "Etat2" varie dans l'intervalle [0.2, 1.8]. On a choisi un domaine de variation de [0, 2], cette variable a trois fonctions d'appartenance de type trapézoïdale qui sont: [0, 7, 14].

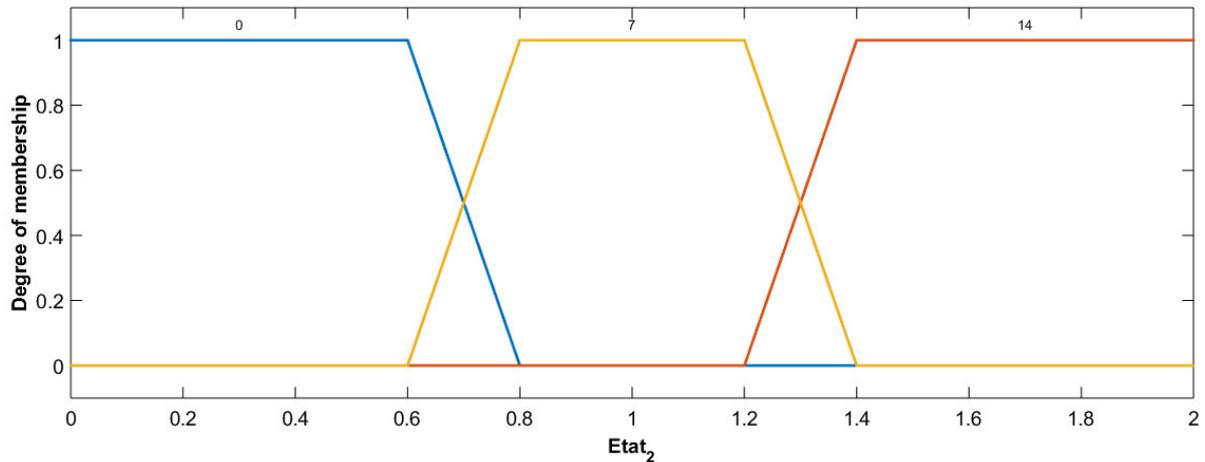


Figure V.7 fuzzification de la variable d'entrée « Etat2 ».

V.3.3 La base des règles

Cette étape consiste à décrire le diagnostic de roulement à partir des indicateurs temporels (RMS, P2P, Maxval et Talaf) et les états de roulement (Etat1, Etat2), par l'élaboration des règles floues, ces derniers sont de la forme « SI-ALORS ».

Les règles proposées sont :

- Si (RMS est Sain) et (P2P est Sain) et (Maxval est Sain) et (Talaf est Sain) **alors** (Etat1 est Sain).et (Etat2 est 0)
- Si (RMS est OR14) et (P2P est OR14) et (Maxval est OR14) et (Talaf est OR14) **alors** (Etat1 est OR) et (Etat2 est 14)
- Si (RMS est B14) et (P2P est B14) et (Maxval est B14) et (Talaf est B14) **alors** (Etat1 est B) et (Etat2 est 14).
- Si (RMS est IR14) et (P2P est IR14) et (Maxval est IR14) et (Talaf est IR14) **alors** (Etat1 est IR) et (Etat2 est 14).
- Si (RMS est OR7) et (P2P est OR7) et (Maxval est OR7) et (Talaf est OR7) **alors** (Etat1 est OR) et (Etat2 est 7).
- Si (RMS est IR7) et (P2P est IR7) et (Maxval est IR7) et (Talaf est IR7) **alors** (Etat1 est IR) et (Etat2 est 7).

- **Si** (RMS est B7) et (P2P est B7) et (Maxval est B7) et (Talap est B7) **alors** (Etat1 est B) et (Etat2 est 7).

V.3.4 Défuzzification

C'est la dernière étape, elle converti les valeurs de diagnostic du domaine flou vers le domaine non flou (réel), dans notre travail nous avons utilisé la technique du centre de gravité.

V.4 Test et résultats de système d'inférence flou (fis)

Pour valider les résultats de notre système destiné à la détection et identification des défauts de roulements, il est nécessaire de faire des tests pour vérifier l'efficacité de cette approche.

Un programme Matlab "programme test" est conçu pour les données de test (voir annexe).

V.4.1 Test 1

Les entrées de système sont des indicateurs temporels (RMS, P2P, Maxval, Talaf) d'un signal de roulement sans défaut, ces valeurs sont représentées dans le tableau suivant :

	RMS	P2P	max	Talap
Entrées	0.0659	0.5482	0.2660	1.3752

Tableau V.4 Les entrées de test 1.

La figure ci-dessous montre le résultat obtenu par le système (SIF) sur le logiciel Matlab.

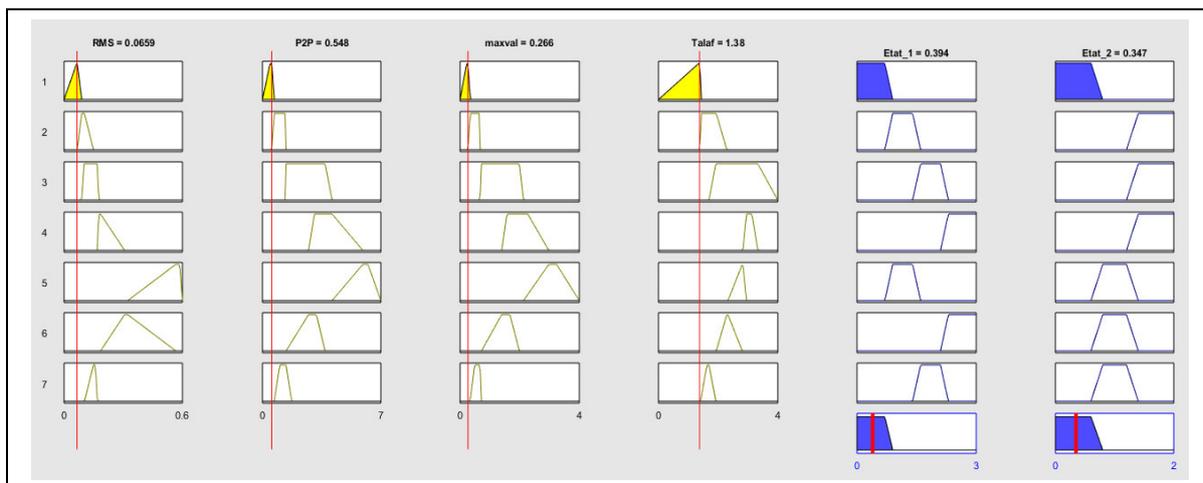


Figure V.8Résultat test 1

Etat 1 = 0.394 € à la fonction Sain [0.09], et Etat 2 = 0.347 € à fonction 0 [0, 0.8].

Le résultat obtenu par le système (SIF) est confondu avec l'hypothèse que nous avons considérée, donc notre système à bien classer notre diagnostic.

V.4.2 Test 2

Les valeurs de test sont des indicateurs temporels d'un signal de roulement avec défaut dans la bague intérieur de diamètre 0.007 inch, ces valeurs sont représentées dans le tableau suivant.

	RMS	P2P	max	Talaf
Entrées	0.3138	3.2070	1.6715	2.3078

Tableau V.5 Les entrées de test 2.

La figure ci-dessous montre le résultat obtenu par le système (SIF) sur le logiciel Matlab.

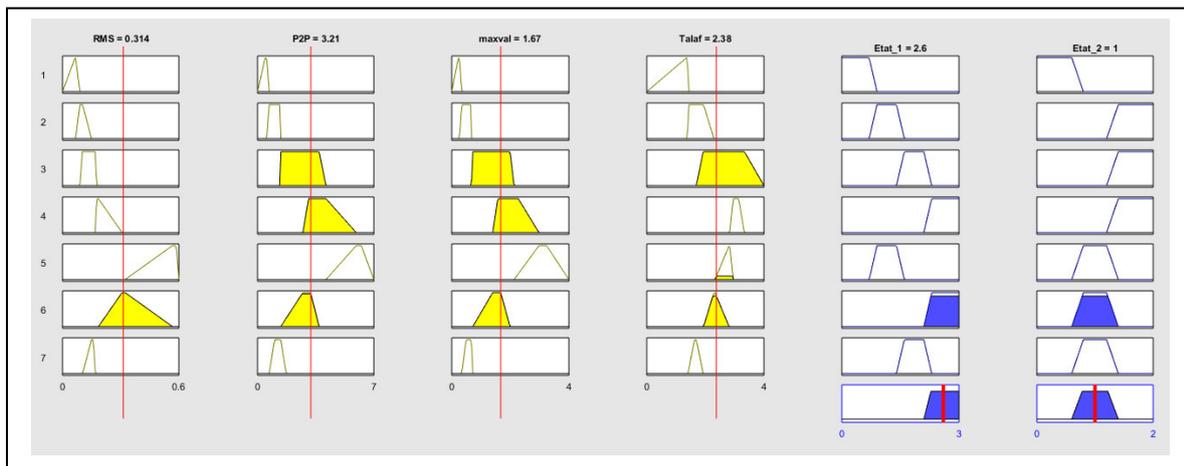


Figure V.9 Résultat test 2.

Etat 1 = 2.6 € à la fonction IR [2.1, 3], et Etat 2 = 1 € à fonction 7 [0.6, 1.4].

Donc le résultat obtenu par le système (SIF) est confondu avec l'hypothèse que nous avons considérée, donc notre système à bien classer notre diagnostic.

V.4.3 Test 3

Les valeurs de test sont des indicateurs temporels d'un signal de roulement avec défaut dans la bague extérieur de diamètre 0.014 inch, ces valeurs sont représentées dans le tableau suivant.

	RMS	P2P	Maxval	Talaf
Entrées	0.0948	1.3303	0.6651	1.6565

Tableau V.6 Les entrées de test 3.

La figure ci-dessous montre le résultat obtenu par le système (SIF) sur le logiciel Matlab.

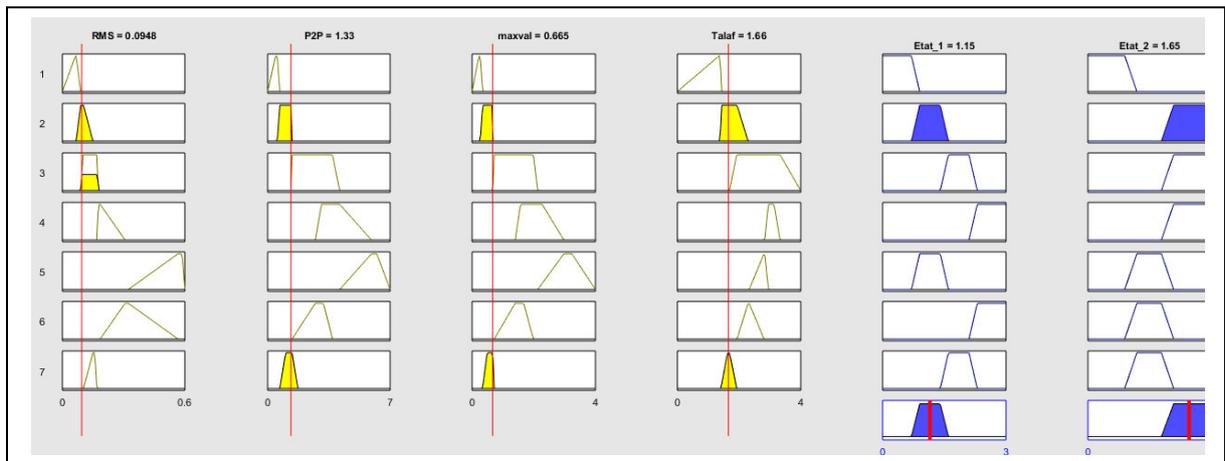


Figure V.10 Résultat test 3.

Etat 1 = 1.15 \in à la fonction OR [0.7, 1.6], et Etat 2 = 1.65 \in à fonction 14 [1.2, 2].

Donc le résultat obtenu par le système (SIF) est confondu avec l'hypothèse que nous avons considérée, donc notre système à bien classer notre diagnostic.

V.4.4 Test 4

Les valeurs de test sont des indicateurs temporels d'un signal de roulement avec défaut dans la bille de diamètre 0.007 inch, ces valeurs sont représentées dans le tableau suivant.

	RMS	P2P	max	Talaf
Entrées	0.1536	1.3921	0.6715	1.6529

Tableau V.7 Les entrées de test 4.

La figure ci-dessous montre le résultat obtenu par le système (SIF) sur le logiciel Matlab.

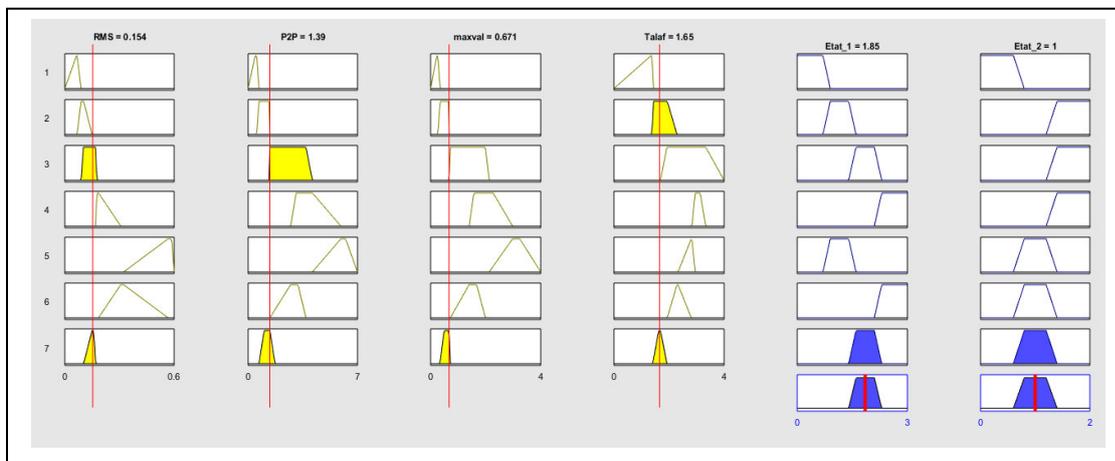


Figure V.11 Résultat test 4.

Etat 1 = $1.85 \in$ à la fonction B [1.4, 2.3], et Etat 2 = $1 \in$ à fonction 7 [0.6, 1.4].

Donc le résultat obtenu par le système (SIF) est confondu avec l'hypothèse que nous avons considérée, donc notre système à bien classer notre diagnostic.

V.4.5 Test en temps réel

Pour tester le système en temps réel, on a choisi les entrées suivantes [RMS, P2P, Maxval, Talaf] qui correspond à des signaux des roulements à l'état sain et avec différents défauts sur les bague intérieur, extérieur et bille. Les tests sont en fonction de temps.

Les résultats des tests du système d'inférence flou (SIF) sont modifiés et réorganisés dans un programme Matlab "Time _test" représenté dans l'annexe.

Les résultats des tests sont montrés par les figures suivantes.

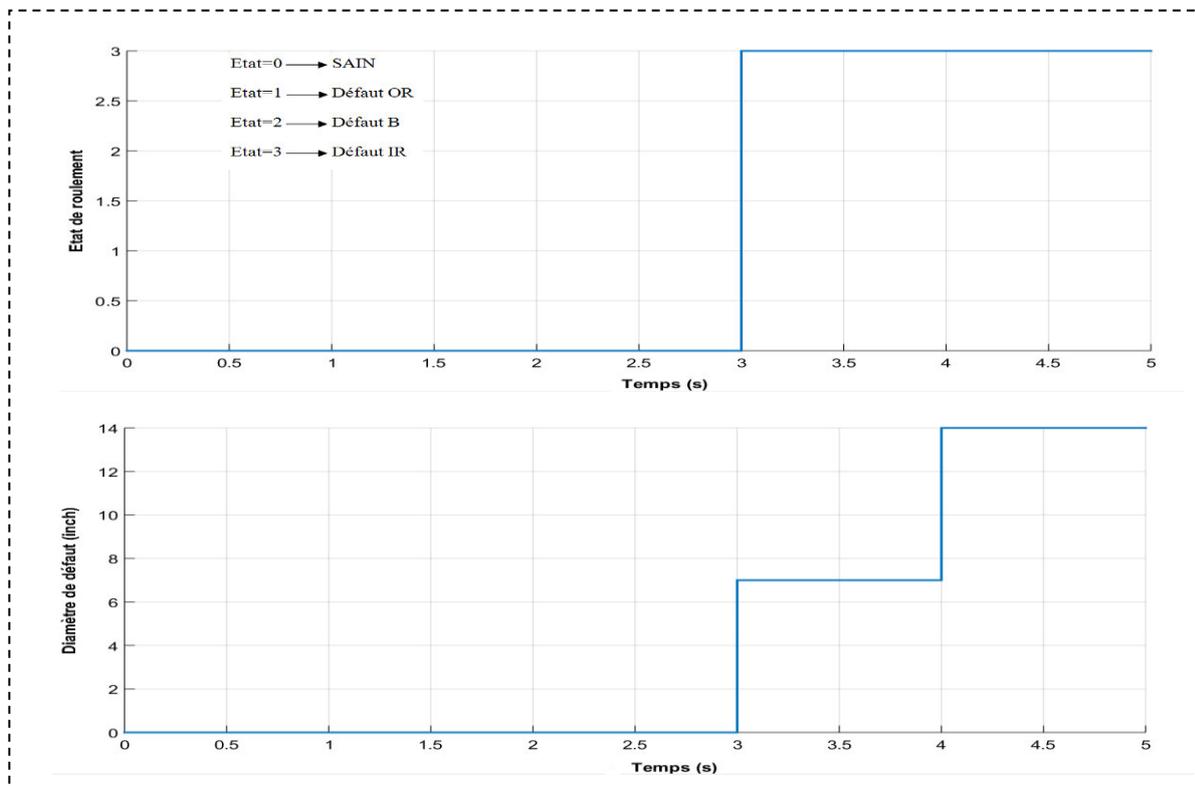


Figure V.12 Test en temps réel des défauts affectant la bague intérieure.

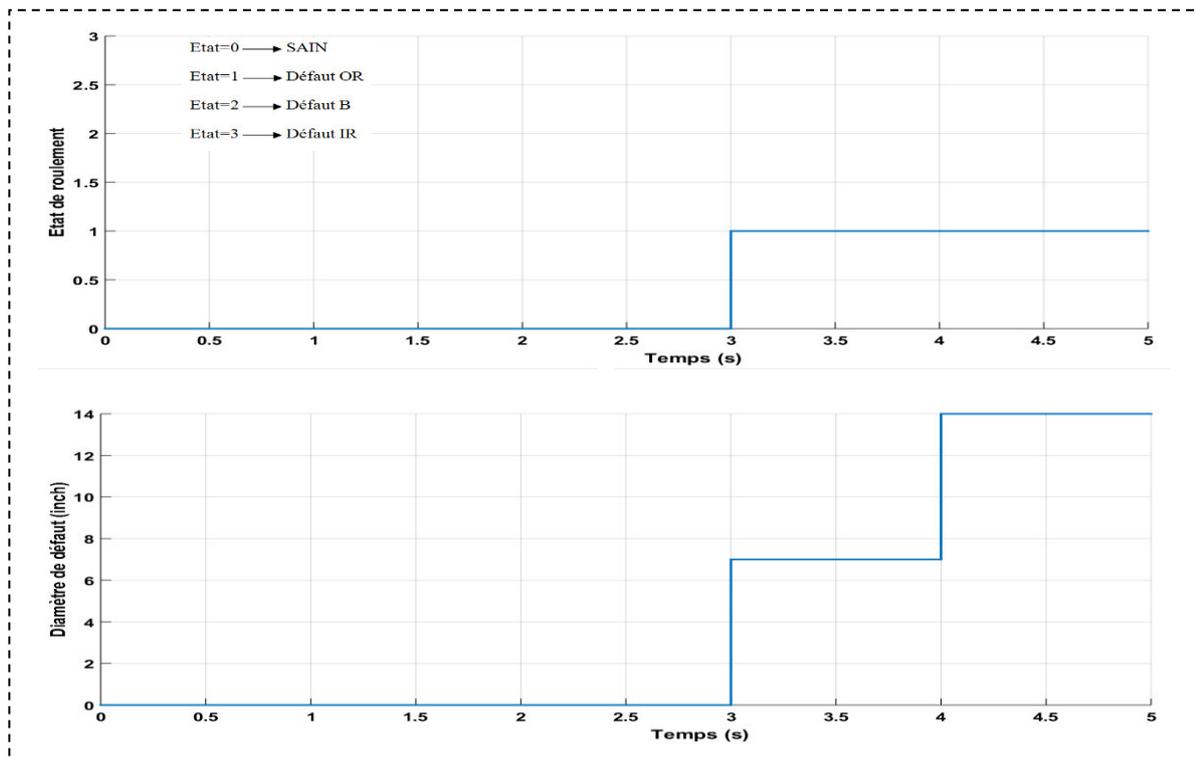


Figure V.13 Test en temps réel des défauts affectant la bague extérieure.

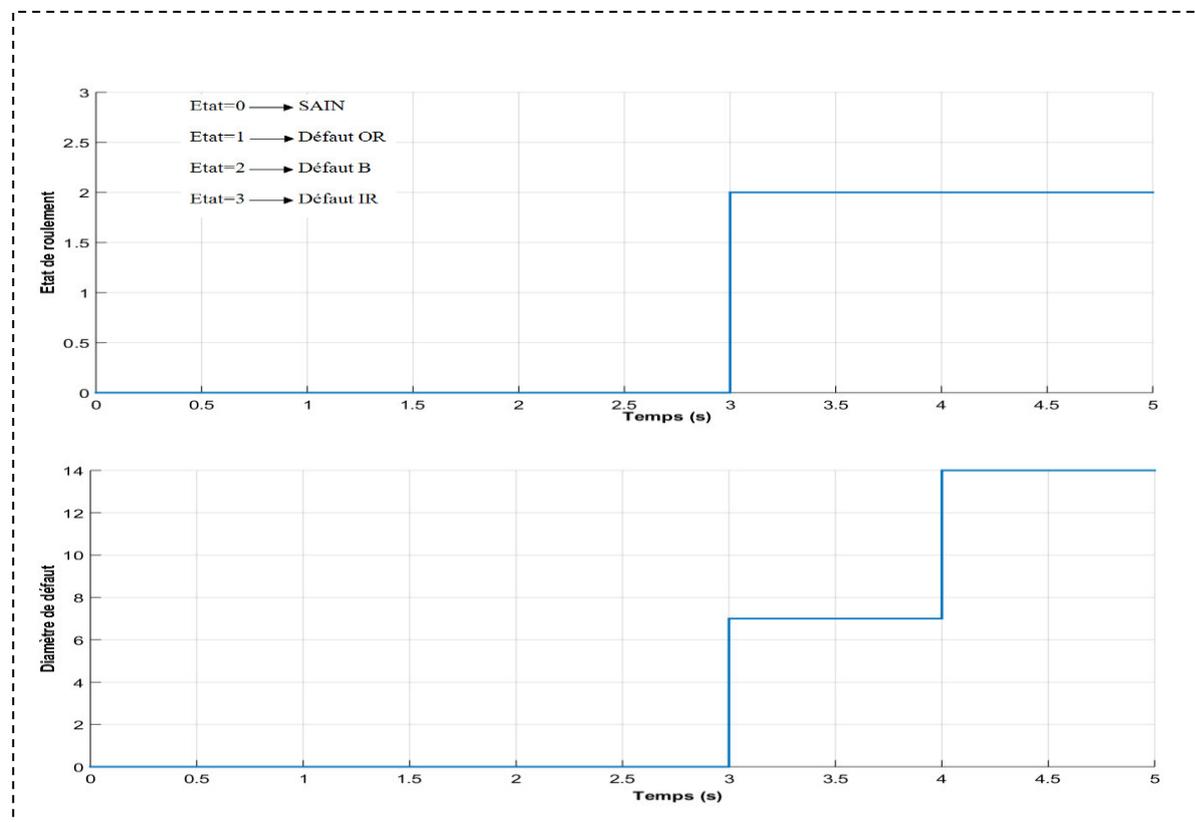


Figure V.14 Test en temps réel des défauts affectant la bille.

D'après les figures des tests, on constate que notre système à bien classer les résultats des tests à partir des signaux de roulements sain et défectueux, car non seulement ces résultats varient en fonction du temps, mais aussi il affiche pour la première sortie de (SIF) qui est l'état de roulement, une valeur de 0 pour un roulement sain, 1 pour un défaut dans la bague extérieure de roulement défectueux, 2 pour défaut dans la bille et une valeur 3 pour un défaut affectant la bague intérieure. Plus, il affiche en parallèle le diamètre de défaut (0,7,14) sur la deuxième sortie du système.

V.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthode d'intelligence artificielle basée sur la logique floue utilisable pour l'automatisation de surveillance des roulements en temps réel. Cette méthode a donné des résultats très satisfaisants, car non seulement elle assure la détection précoce d'un défaut, mais elle permet aussi de localisé le défaut sur l'organe affecté et identifier son diamètre.

Conclusion générale

Une action de maintenance consiste à remplacer les équipements du système qui sont en panne et qui ne sont plus capables d'accomplir leur fonction. La décision d'une action de maintenance est très complexe et doit reposer sur une surveillance et une analyse intelligente de l'état du système. Elle doit idéalement être réduite aux opérations qui consistent à remplacer, sans tâtonnement, les équipements réellement en panne. Plus la phase de maintenance est longue, plus elle est coûteuse.

Un diagnostic de défaut est donc nécessaire pour déterminer le plus précisément possible les équipements qui doivent être réparés. Le diagnostic lorsqu'il est réalisé avec efficacité et s'il permet de détecter de façon précoce une dégradation, et représente un des moyens pour contribuer à obtenir un meilleur gain de productivité.

La logique floue basée sur les entrées de traitement du signal, nous a montré leur efficacité pour la conception de nouveaux algorithmes conçus pour la détection automatique et l'identification des défauts.

Le travail présent dans ce mémoire porte sur l'étude d'application de la logique floue pour la surveillance industrielle, notre étude concerne la détection et l'identification des défauts de roulements à base des signaux réels.

Le premier chapitre a été consacré à quelque définition de la surveillance et le diagnostic industrielle, et les méthodes utilisées en surveillance

Dans le deuxième chapitre on a définie quelques principaux types des roulements et les défauts qui peuvent les affecter.

Le troisième chapitre c'était un rappel relatif au traitement de signal (signal, bruit, échantillonnage, type des signaux..), et la démarche expérimentale sur le diagnostic des roulements.

Le quatrième chapitre a permis la présentation des notions fondamentales et les principes de base de la logique floue, nous avons limités aux points indispensables à la compréhension du principe et étapes de mise en œuvre d'un mécanisme d'inférence floue que nous avons utilisé pour la détection et l'identification des défauts de roulements.

Dans le dernier chapitre on à tester notre système pour vérifier l'efficacité de cette approche à la détection et l'identification des défauts roulements.

Bibliographie

Bibliographie

[1] : AYAN MAHAMOUD M. « Observation et diagnostic de processus industriels a modèle non linéaire. Application aux machines électriques, thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, 2010.

[2] : RAHMOUNE. Ch « Analyse et traitement du courant statorique pour la détection des défauts dans les systèmes électromécanique », mémoire de magistère, université de Boumerdes, 2011.

[3] : ZEMOURI. M. R « Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamique : Application à la e-maintenance, thèse de doctorat, université de Franch conte, France, 2003.

[4] : COMBACOU M. « Commande et surveillance des systèmes à événements discrets complexes », thèse de doctorat, université Paul Sabatier, Toulouse, 1991.

[5] : CHAIB S., BOUSSAIDI A. « détection et caractérisation des défauts de roulements par l'analyse spectrale, mémoire de master, université de Boumerdes, 2016.

[6] : AMRANI M. « Surveillance et diagnostic d'une ligne de production par les réseaux de neurones artificiels », mémoire de magistère, université de Boumerdes, 2010.

[7] : ONDEL O. « diagnostic par reconnaissance de formes, application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone, thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006.

[8] : HAITHEM D. « diagnostic à base de modèles des systèmes temporisé et d'une sous classe de systèmes dynamiques hybrides, thèse de doctorat, université de Grenoble, France, 2009.

[9] : BOUKHOBZA M. « Application de traitement de signal pour le suivi des défauts de composants mécaniques soumis à des vibrations », mémoire de magister, Université d'Oran Mohamed Boudiaf , 2010.

[10] : DADIA A., PAREDE M., FERRAND A. « Modélisation des systèmes mécaniques, semestre 8, INSA Toulouse, 2006,2007.

[11] : ABDI Z. « Etude des effets vibratoires sur la durée de vie des roulements à rouleaux », mémoire de magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2000.

[12] : NABTI M.T. «étude de l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques », mémoire de Magister, université Ferhat Abbas, Setif , 2011.

[13] : SERGE DOS SANTOS « cours de traitement de signal » institue national de sciences appliquées de centre Val de loire, année 2015, 2016.

Bibliographie

[14] : James L. Crowley « Traitement De signal » 8 Octobre 2001.

[15] : BADRI. B., THOMAS M., SASSI S. «Etude et développement d'un système expert basé sur les réseaux de neurones pour le diagnostic des défauts de roulements », Ecole de technologie supérieur, Montréal, Canada et institut national des sciences appliquées et de technologie Tunisie.

[16] : BABA N., DJAMAI M., LAOUFI M. « planification de la trajectoire d'un robot mobile par la logique floue », université Bechar 2010.

[17] : P. Borne «Introduction à la logique floue», Edition technip, 1998.

[18] : MALLEM A. «Algorithme d'aide a la navigation d'un robot mobile », université Batna 2011.

[19] : BOUDJIT K. «Introduction à la logique floue et à la commande floue», université Blida

[20] : BERNADETTE B. M. «la logique floue et ses applications », Edition Addison Wesley, France, 1995.

[21] : GACOGNE et LOUIS «Eléments de logique floue », Edition Herms, Paris, 1997.
