

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Présenté par : Youcef Hachem

Mohamed Lamine Guendouz

Thème

**Prédiction de la Rugosité des Surfaces
Usinées lors du Fraisage de l'Acier AISI
1060 en Utilisant la Logique Floue**

Soutenue publiquement le 09/05/2018 devant le jury :

BOUAKBA Mustapha	MCA	Université KasdiMearbah Ouargla	Président
BELLOUFI Abderrahim	MCA	Université KasdiMearbah Ouargla	Rapporteur
ABDELKRIM Mourad	MCB	Université KasdiMearbah Ouargla	Examineur

Année universitaires : 2017/2018

Remerciement

Avant tout, nous remercions en premier lieu Allah le tout puissant de nous avoir illuminé et ouvert les voies du savoir, et pour nous avoir accordé la volonté et le courage pour élaborer ce travail.

Au terme de ce modeste travail, Nous tenons à exprimer toute nos gratitude et reconnaissance à notre encadreur Dr. Abderrahim Belloufi d'avoir accepté de diriger ce travail et d'avoir mis à nos disposition tous les moyens qui nous permis de mener à terme cette étude et aussi pour ses précieux conseils et ses encouragements.

Nous tenons aussi à remercier Dr. M. Bouakba pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail ainsi que pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury.

Nos remerciements vont également au : Dr. M. Abdelkrim pour avoir accepté d'évaluer ce travail et d'en faire partie du jury de soutenance.

Mes remerciements s'adressent également à tous ce qui nous avons aidé faire aboutir ce travail.

Enfin, à tous les étudiants de notre promotion et nous souhaitons le bon courage à tous les étudiants pour finir ces études, et à tous les enseignants de l'université KASDI MERBAH OUARGLA.

Dédicace

Nous tiens à dédier ce modeste travail à :

À nos parents.

À nos frères,

À nos sœurs,

À nos familles,

À tous nos amis et nos collègues

Table des Matières

Introduction générale	03
------------------------------------	----

Chapitre I

Etude Bibliographique

I.1 Introduction.....	05
I.2 Le fraisage.....	05
I.2.1 Définition.....	05
I.2.2 Fraisage en opposition et en concordance	06
I.2.3 Caractéristiques du fraisage.....	06
I.2.4 Fraisage en bout et fraisage en roulant	07
I.2.5 Fraiseuses.....	07
I.3 Les conditions de coupe.....	08
I.3.1 La vitesse de coupe V_c	08
I.3.2 La vitesse d'avance V_f et l'avance par tour f	09
I.3.3 La profondeur de passe axiale (a_p) et profondeur de coupe radiale (a_e).....	10
I.4 L'acier AISI 1060.....	11
I.4.1 Composition Chimique	11
I.4.2 Propriétés physiques	11
I.4.3 Propriétés mécaniques.....	11
I.4.4 Propriétés thermiques.....	12
I.5 La rugosité des surfaces usinées	12
I.5.1 La rugosité	12
I.5.2 Principaux défauts de surface	12
I.5.3 Principaux critères de rugosité	13
I.5.4 Influence des principaux paramètres de coupe sur la rugosité	14
I.6 Usure des outils de coupe	15
I.7 Mesure de la rugosité des surfaces	17
I.7.1 Méthodes de mesure des états de surface.....	18
I.8 Conclusion.....	21

Chapitre II

Théorie de la Logique Floue

II.1 Introduction.....	22
------------------------	----

II.2 La logique floue.....	22
II.2.1 Le Principe	22
II.2.2 Utilisation de la logique floue.....	22
II.2.3 Logique floue et la logique classique.....	23
II.2.4 Les Variables linguistiques.....	24
II.2.5 Les sous-ensembles flous.....	24
II.2.6 Fonctions d'appartenance.....	25
II.2.7 Les opérateurs en logique floue.....	26
II.2.8 Structure d'un système de commande floue.....	28
II.3 Conclusion.....	30

Chapitre III

Résultats et Discussions

III.1 Introduction.....	31
III.2 Procédure et données expérimentales.....	31
III.3 Système floue.....	32
III.4 Modélisation floue.....	32
III.4.1 Les variables flous.....	32
III.4.2 Définition des variable linguistiques.....	32
III.5 Les fonction d'appartenance.....	35
III.6 Les règles flous.....	38
III.7 Résultats et discussion	39
III.7.1 Validation des modèles élaborés	42
III.7.2 Etude de la précision et de l'erreur du système flou.....	44
III.7.3 Validation des résultats	44
III.7.4 Représentation schématique des résultats	45
III.8 Conclusion.....	47
Conclusion générale.....	48
Références bibliographiques.....	49

Liste des Figures

Chapitre I

Etude Bibliographique

Figure I.1	Procédé de fraisage.....	5
Figure I.2	fraisage en opposition et en concordance.....	6
Figure I.3	Fraisage en bout et frisage en roulant.....	7
Figure I.4	Fraiseuse Universelle.....	8
Figure I.5	La vitesse de coupe.....	9
Figure I.6	La vitesse d'avance.....	9
Figure I.7	La profondeur de passe.....	10
Figure I.8	Principaux défauts de surfaces.....	13
Figure I.9	Rugosité arithmétique.....	14
Figure I.10	Principaux critères de rugosité.....	14
Figure I.11	Usure en dépouille.....	15
Figure I.12	Usure en cratère.....	15
Figure I.13	Déformation plastique.....	16
Figure I.14	Écaillage.....	16
Figure I.15	Usure en entaille.....	17
Figure I.16	Arête rapportée.....	17
Figure I.17	Profilomètre.....	18
Figure I.18	Appareille de mesure tridimensionnelle.....	19
Figure I.19	Méthodes par profilométrie laser.....	20
Figure I.20	Principe de mesure interférométrique.....	21

Chapitre II

Théorie de la Logique Floue

Figure II.1	Classification des températures d'une pièce en deux ensembles	23
Figure II.2	Variables linguistiques.....	24
Figure II.3	Fonctions Triangulaire.....	25
Figure II.4	Fonction Trapézoïdale.....	26
Figure II.5	Fonction Gaussienne.....	26

Figure II.6	Exemple pour l'opérateur ET (intersection).....	27
Figure II.7	Exemple pour l'opérateur OU (Union).....	27
Figure II.8	L'opérateur NON (complément).....	28
Figure II.9	Structure interne d'un Régulateur de la logique floue.....	28

Chapitre III

Résultats et Discussions

Figure III.1	les entrées et sorties du système floue.....	32
Figure III.2	Variables linguistiques pour la profondeur de passe.....	33
Figure III.3	Variables linguistiques pour l'avance.....	33
Figure III.4	Variables linguistique pour vitesse de coupe.....	33
Figure III.5	Les valeurs de la rugosité pour l'ensemble des essais.....	34
Figure III.6	Variables linguistiques pour la rugosité pour l'ensemble des essais.....	34
Figure III.7	Fonctions d'appartenance (triangulaires) pour la profondeur de passe.....	35
Figure III.8	Fonctions d'appartenance (triangulaires) pour Avance	35
Figure III.9	Fonctions d'appartenance (triangulaires) pour Vitesse de coupe.....	35
Figure III.10	Fonctions d'appartenance (triangulaires) pour Rugosité.....	36
Figure III.11	Fonctions d'appartenance (trapézoïdales) pour profondeur de passe.....	36
Figure III.12	Fonctions d'appartenance (trapézoïdales) pour Avance.....	36
Figure III.13	Fonctions d'appartenance (trapézoïdales) pour vitesse de coupe.....	37
Figure III.14	Fonctions d'appartenance (trapézoïdales) pour Rugosité.....	37
Figure III.15	Fonctions d'appartenance (gaussienne) pour profondeur de passe.....	37
Figure III.16	Fonctions d'appartenance (gaussienne) pour Avance.....	38
Figure III.17	Fonctions d'appartenance (gaussienne) pour vitesse de coupe.....	38
Figure III.18	Fonctions d'appartenance (gaussienne) pour Rugosité.....	38
Figure III.19	Variation des rugosités (trapézoïdales, triangulaires, gaussienne) en fonction du nombre d'essais.....	42
Figure III.20	Comparaison de la prédiction des modèles de la logique floue avec les résultats mesurés de la rugosité de la surface	43
Figure III.21	Comparaison de la rugosité de surface prédite et expérimentale.....	45
Figure III.22	Variation des rugosités de surface prévue la logique floue en fonction des paramètres de coupe.....	46

Liste des tableaux

Chapitre I

Etude Bibliographique

Tableau I.1	Composition chimique acier AISI1060.....	11
Tableau I.2	Propriétés phtisiques acier AISI 1060.....	11
Tableau I.3	Propriétés mécaniques acier AISI 1060.....	11
Tableau I.4	Propriétés thermiques acier AISI 1060.....	12
Tableau I.5	Influence des paramètres de coupe sur la rugosité arithmétique.....	15

Chapitre III

Résultats et Discussions

Tableau III.1	Données expérimentales.....	31
Tableau III.2	Valeurs limites pour les entrées et les sorties.....	32
Tableau III.3	Les règles floues.....	39
Tableau III.4	Les résultats du système flou.....	40
Tableau III.5	résultats du système flou pour les dix essais de vérification.....	42
Tableau III.6	Les résultats du système flou.....	44

Nomenclature

<u>Symbole</u>	<u>Unité</u>	<u>Désignation</u>
V_c	m / min	vitesse de coupe
fz	mm / dent	Avance par dent
N	tr / min	vitesse de rotation
D	mm	Diamètre
Z		Nombre de dent de l'outil
V_f	mm / min	vitesse d'avance
f	mm / tr	Avance par tour
a_p	mm	Profondeur de passe radial
a_e	mm	Profondeur de passe axial
R_a	μm	Rugosité moyenne arithmétique
R_t	μm	Rugosité total
r_ε	μm	Rayon du bec d'outil
R_{\max}	μm	Rugosité maximale de hauteur
R_p	μm	Rugosité maximale de saillie
R_z	μm	Profondeur moyenne de la rugosité
γ	Degré	Angle d'attaque de l'outil
σ		L'écart type
e_i	%	Erreur
A	%	Précision

Introduction générale

Introduction Générale

Malgré le développement de nouvelles techniques permettant d'élargir le champ d'application des procédés de fabrication par enlèvement de matière, telles que l'électroérosion ou la découpe par laser, l'usinage par outil coupant garde une place dominante parmi ces procédés, en raison du rendement énergétique très favorable de ce processus traditionnel. Cette position se trouve d'ailleurs renforcée, grâce aux gains de productivité et à la flexibilité accrue, que permet l'utilisation de plus en plus étendue de la commande numérique et de la programmation automatique des machines-outils [1].

L'usinage entre dans la gamme de fabrication d'une pièce mécanique. Elle est définie par un plan portant une cotation exhaustive. Celle-ci a pour but de définir les dimensions de la pièce finie, la précision, la géométrie ainsi que l'état de surface de l'ensemble des surfaces qui constituent la pièce usinée. À chaque phase de la gamme de fabrication, le concepteur et/ou l'usineur choisissent le type d'usinage à réaliser, la machine, l'outil ainsi que le support de pièce permettant l'obtention de tous les éléments de cotation de la surface considérée. D'une manière générale, les formes des surfaces usinées peuvent être planes ou de révolution. Les principaux usinages sont le fraisage (surfaces planes) et le tournage (surfaces de révolution). Avec l'apparition de la commande numérique, il est désormais possible d'usiner une multitude de surfaces courbes. Toutefois, il convient de noter que les outils utilisés sont sensiblement les mêmes que pour les machines traditionnelles et que leurs trajectoires sont constituées de segments de droites et d'arcs de cercles [2].

La logique floue permet de résoudre tous les problèmes dans lesquels on dispose de connaissances imprécises, soumises à des incertitudes de nature non probabiliste. Elle peut être appliquée dans presque tous les domaines. Dans ce travail, nous explorons cette technique, présentons ses éléments de base et l'utilisons pour prédire notre problème.

Dans ce travail, nous touchons une méthode pour le suivi de la rugosité pendant les opérations de fraisage de l'acier AISI1060 en se basant sur les paramètres de coupe (profondeur de passe, avance par dent et vitesse de coupe).

Ce travail est divisé en trois chapitres de la façon suivante :

Le premier chapitre porte une étude bibliographique est incluse définir le procédé fraisage, les conditions de coupe ensuite il présente un aperçu sur la rugosité de la surface, les principaux défauts de la surface, les principaux critères de la rugosité et l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité.

Le deuxième chapitre présente quelques informations sur l'approche utilisée dans notre travail (logique floue), les domaines d'application ainsi que leur utilisation dans l'outil Toolboxes MATLAB.

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter et examiner les résultats obtenus par la logique floue, enfin, nous conclurons ce mémoire en analysant les principaux résultats de cette étude.

Chapitre I

Étude Bibliographique

I.1 Introduction

L'usinage est un procédé de génération de surfaces. Il consiste à créer une nouvelle surface par enlèvement de matière en utilisant un outil coupant. Les caractéristiques de cette surface dépendent du couple outil-matière, c'est-à-dire des paramètres mis en jeu pendant la coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe ...).

Dans ce chapitre nous présentons des généralités sur le procédé du fraisage, des définitions et des informations : sur les conditions de coupe, les propriétés de l'acier AISI 1060 ainsi un aperçu sur la rugosité des surfaces usinées.

I.2 Le fraisage

I.2.1 Définition

Le fraisage est, dans son principe, un procédé de fabrication mécanique par coupe (l'enlèvement de matière) faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes (mouvement de coupe) et l'avance rectiligne d'une pièce (dit mouvement d'avance). Aujourd'hui, toute fois, on a également un déplacement de l'outil par rapport à la pièce, lequel peut s'effectuer pratiquement dans n'importe quelle direction [3].

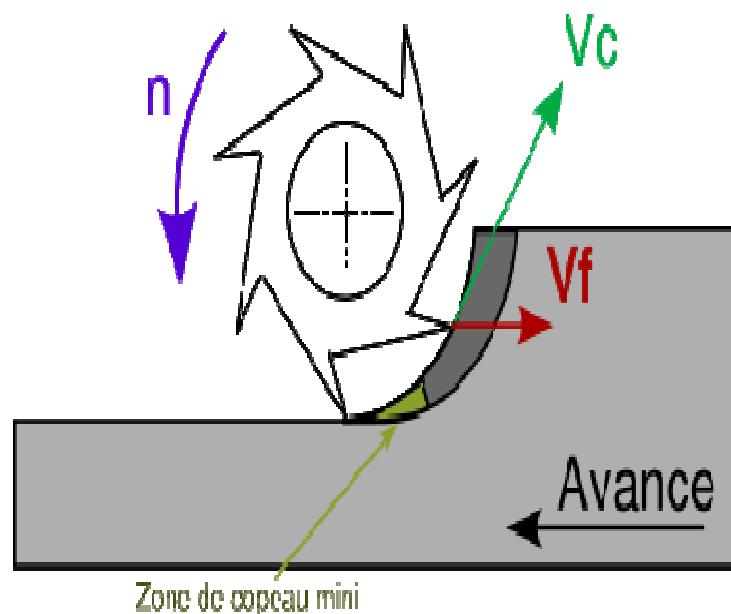


Figure I.1 Procédé de fraisage [4].

I.2.2 Fraisage en opposition et en concordance

Fraisage en opposition

L'avance de la dent est opposée à l'avance de la pièce

Fraisage en concordance

L'avance de la dent de même sens que l'avance de la pièce

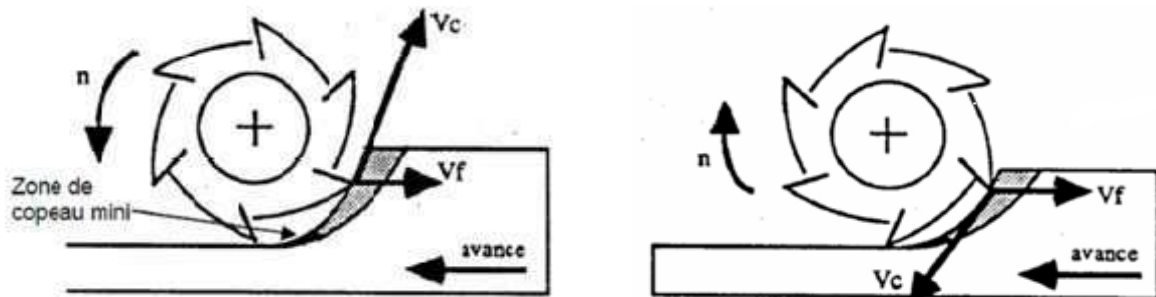


Figure I.2 Fraisages en opposition et en concordance [5].

I.2.3 Caractéristiques du fraisage

a) En opposition :

- L'attaque de la dent se fait avec une épaisseur nulle, ce qui peut entraîner un refus de coupe (copeau mini) sur la surface à générer.
- Ce frottement entraîne une usure supplémentaire.
- L'attaque se fait sur une surface écrouie par la dent précédente.
- Les efforts de coupe sont importants (refus de coupe).
- Les efforts de coupe tendent à faire sortir la pièce de la mise en position (efforts vers le haut).
- Seul ce mode de travail peut être utilisé sur les fraiseuses ayant des vis sans rattrapage de jeux [5].

b) En concordance :

- L'attaque de la dent se fait avec l'épaisseur maximale (pas de copeau mini).
- La sortie de la dent se fait sur la surface à générer avec une épaisseur nulle mais le copeau est déjà créé ce qui facilite la coupe.
- Les dents attaquent sur l'épaisseur maxi ce qui génère des chocs, il est intéressant d'avoir plusieurs dents en prise pour limiter les chocs.
- Si on attaque sur une surface brute de fonderie on a une usure rapide [5].

I.2.4 Fraisage en bout et fraisage en roulant

Fraisage en bout

- La surface plane est obtenue par l'enveloppée la trajectoire de la pointe d'outil.
- Si l'axe de rotation n'est pas perpendiculaire à la surface on usine une surface concave.
- Croisées, le copeau ayant une épaisseur sensiblement constante si largeur fraisée $< 0.7 \cdot \text{diamètre}$ de la fraise.
- On préférera toujours le fraisage en bout.

Fraisage en roulant

- La surface plane est obtenue par le profil de la fraise qui se déplace et génère un plan (travail de forme).
- Le copeau varie de 0 à l'avance /dent ce qui crée des vibrations.
- La surface est composée d'ondulations. Un défaut sur l'arrête coupante est reporté sur la surface.



Figure I.3 Fraisage en bout et fraisage en roulant [5].

I.2.5 Fraiseuses

Les fraiseuses ont supplanté certaines machines (raboteuses, étaux limeurs) pour l'usinage de surfaces planes. Ces machines peuvent également servir pour des opérations de contournage. L'outil, une fraise, est fixé dans la broche et est animé d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe). Il peut se déplacer en translation par rapport à la pièce suivant trois directions [5].

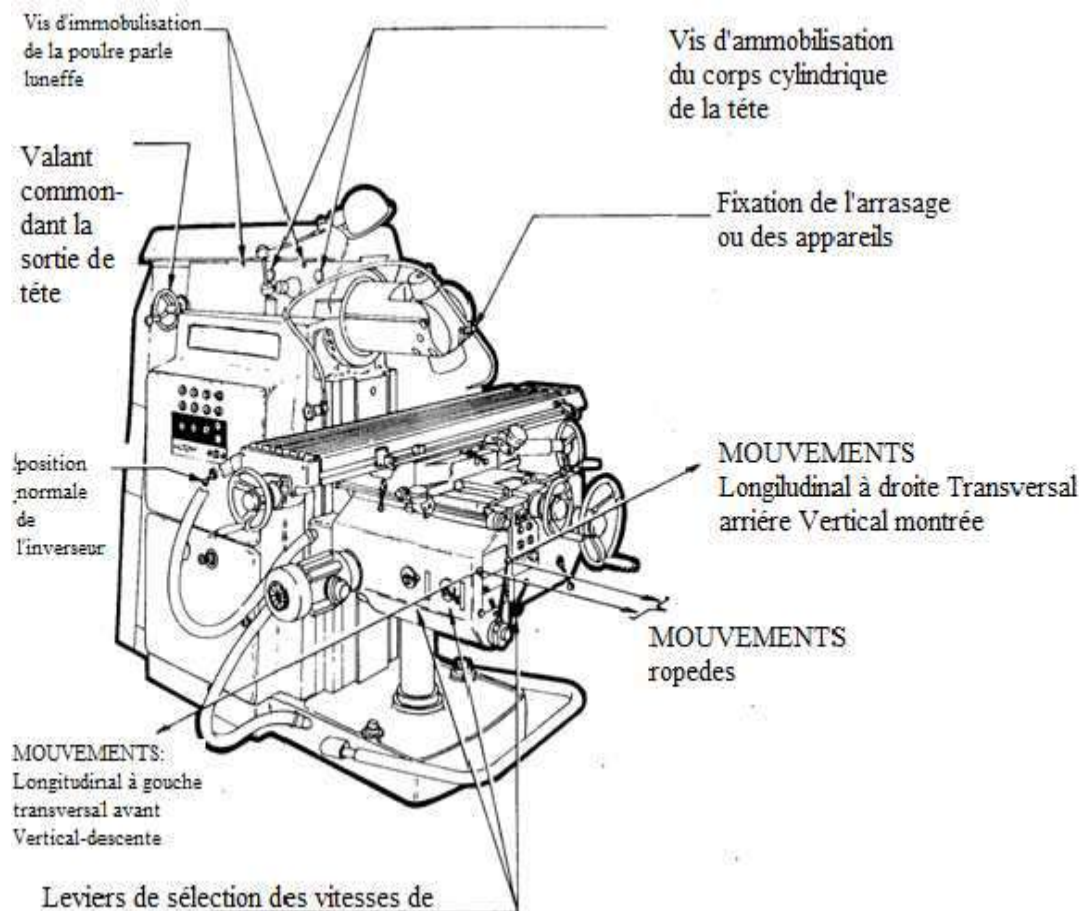


Figure I.4 Fraiseuse Universelle [5].

I.3 Les conditions de coupe

Les paramètres de coupe sont : la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe. Ces paramètres fondamentaux ont une influence significative sur les mécanismes de dégradation des outils de coupe [6].

Avant de réaliser une opération de fraisage, il est nécessaire de bien choisir les conditions de coupe pour obtenir un bon résultat (précision, état de surface ...). Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les conditions de coupe notamment [6] :

- Le type de la machine (mécanisme, gamme des vitesses,...)
- La puissance de la machine
- La matière de l'outil (ARS, carbure...)
- La matière usinée (acier, aluminium...) [6].

I.3.1 La vitesse de coupe (V_c en m/min)

Indique pour sa part la vitesse à laquelle l'arête de coupe travaille la surface de la pièce. C'est un important paramètre de l'outil, qui fait partie intégrante des conditions de

coupe avec, pour fonction, de garantir que l'opération est effectuée dans les meilleures conditions d'efficacité par l'outil concerné [6].

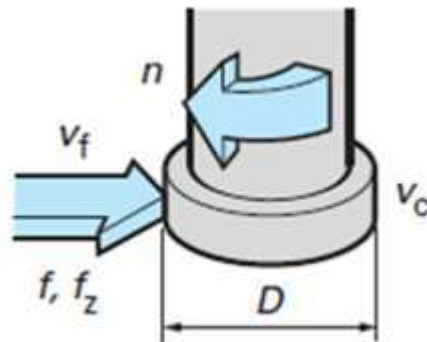


Figure I.5 Vitesse de coupe [7]

$$V_c = \frac{n \pi D}{1000} \quad (\text{I.1})$$

$$n = \frac{1000 V_c}{\pi D} \quad (\text{I.2})$$

Avec

D : Diamètre de l'outil de fraisage (mm).

n : vitesse de broche (tr/min).

V_c : vitesse de coupe (m/min).

I.3.2 La vitesse d'avance V_f et avance par tour f

L'avance de l'outil en direction de la pièce, exprimée en unités de distance par unité de temps. On parle également ici d'avance de table.

Est une valeur spécialement utilisée pour calculer l'avance et déterminer l'aptitude d'une fraise à surfaçer à travailler en finition. Elle indique de combien l'outil avance au cours d'une rotation [3].

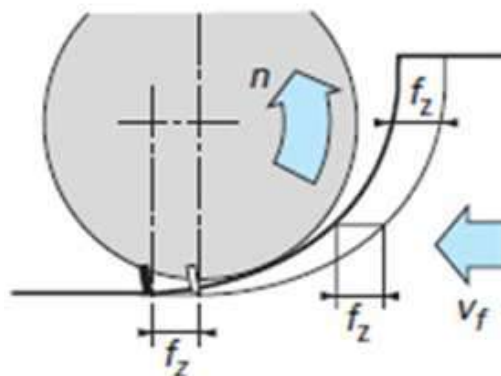


Figure I.6 Vitesse d'avance [7]

Dans le cas de fraisage la vitesse d'avance V_f [mm / min] est donnée par la formule suivante :

$$V_f = f_z n z \quad (I.3)$$

$$f_z = \frac{V_f}{n z} \quad (I.4)$$

Avec

V_f : Vitesse d'avance en mm/min.

f_z : Avance par dent en mm/tr/dent.

n : Fréquence de rotation en tours par minute (tr/min).

Z : Nombre de dents de l'outil.

I.3.3 La profondeur de passe axiale (a_p) et profondeur de coupe radiale (a_e)

En fraisage est fonction du type d'opération réalisée et du type de denture (Ravageuse ou Lisse). Les dentures ravageuses limitent les efforts de coupes. Elles permettent de prendre des profondeurs de passe et des avances plus importantes [8].

En surfacage ou radiale (a_e) pour le fraisage d'épaulements, correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. C'est la distance à laquelle l'outil est réglé au-dessous de la surface initiale de la pièce [3].

En surfacage et axiale (a_p) pour le fraisage d'épaulements, est la distance parcourue par l'outil sur la surface de la pièce [3].

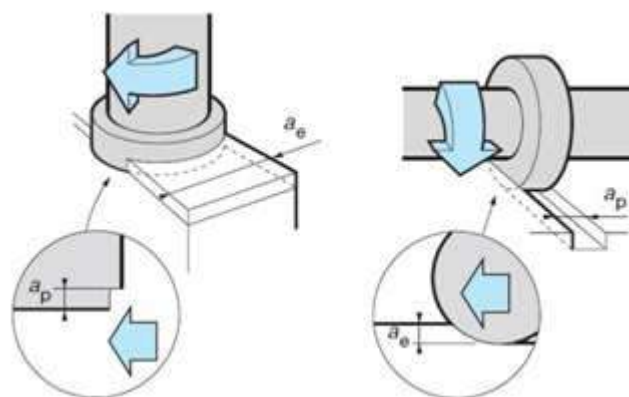


Figure I.7 Profondeur de passe [7].

I.4 L'acier AISI 1060

Les aciers contenant du carbone comme principal élément d'alliage sont appelés aciers au carbone. Ils contiennent jusqu'à 0,4% de silicium et 1,2% de manganèse. Des éléments

résiduels tels que le cuivre, le molybdène, l'aluminium, le chrome et le nickel peuvent également être présents dans ces aciers [9].

I.4.1 Composition chimique

Le tableau suivant présente les différents composants chimiques de l'acier au carbone AISI 1060 :

Tableau I.1 Composition chimique acier AISI1060 [9].

Elément	Contenu(%)
Fer, Fe	98.35-98.85
Manganèse, Mn	0.60-0.90
Carbone, C	0.55-0.660
Soufre, S	≤ 0.050
Phosphoreux, P	≤ 0.040

I.4.2 Propriétés physiques

Le tableau suivant présente les différentes propriétés physiques de l'acier au carbone AISI 1060.

Tableau I.2 Propriétés physiques acier AISI 1060 [9].

Propriétés	Métriques	Impériales
Densité	7.85 g / cm	0.284 lb / in ³
Point de fusion	1510 °C	2750 °F

I.4.3 Propriétés mécaniques

Le tableau suivant montre les propriétés mécaniques de l'acier au carbone AISI 1060 étiré à froid.

Tableau I.3 Propriétés mécaniques acier AISI 1060 [9].

Propriétés	Métriques	Impériales
Résistance à la traction, ultime	620 Mpa	89900 psi
Résistance à la traction, rendement	485 Mpa	70300 psi
Module d'élasticité	190-210 Gpa	29700-30485 psi
Module en vrac (typique pour l'acier)	140 V _c	20300 Ksi
Module de cisaillement (typique pour l'acier)	80 Gpa	11600 Ksi
Poissons ratio	0.27-0.30	0.27-0.30
Allongement à la rupture	10%	10%
Réduction de la surface	45%	45%
Dureté, Brinell	183	183

Dureté, Knoop (à partir de la dureté Brinell)	204	204
Dureté, Rockwell B (à partir de la dureté Brinell)	89	89
Dureté, Vickers (à partir de la dureté Brinell)	192	192

I.4.4 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques de l'acier au carbone AISI 1060 sont données dans le tableau suivant :

Tableau I.4 Propriétés thermiques acier AISI 1060 [9].

Propriétés	Métriques	Impériales
Coefficient de dilatation thermique	11 $\mu m / m^{\circ}C$	6.11 $\mu in / in^{\circ}F$
Conductivité thermique	49.8 W / mK	346 $BTU in / hr ft^2 \cdot^{\circ}F$

I.5 La rugosité des surfaces usinées

I.5.1 La rugosité

On la mesure avec un rugosimètre ou un Profilomètre. La rugosité concerne les défauts micro géométriques de la surface. Ils sont évalués après filtrage de la surface réelle à l'aide d'un filtre passe-haut ne retenant que les longueurs d'onde latérales les plus courtes.

Les paramètres de rugosité en profilométrie commencent par la lettre majuscule R suivie d'une ou plusieurs lettres déterminant le type de paramètre. Par exemple, le paramètre 'Ra' est la rugosité moyenne arithmétique du profil. 'Rz' est la rugosité maximale du profil. La rugosité d'une pièce usinée est une signature du type d'usinage (tournage, polissage, pierrage, etc.) La cotation des états de surface en mécanique fait essentiellement référence à l'usinage par enlèvement de matière. Les défauts sont des stries et des sillons creusés par les arêtes coupantes des outils (outils de tournage, fraises, meules, etc.) [10].

I.5.2 Principaux défauts de surface

L'aptitude d'une pièce à une fonction donnée dépend d'un ensemble de conditions notamment des caractéristiques de ses états de surface. En général les défauts de surface jouent un rôle important pour une pièce à remplir une fonction donnée. Ces défauts sont de nature géométrique ou physico-chimique. On ne s'intéresse ici qu'aux défauts géométriques, qui sont classés conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (figure I.8) [1].

- **Défauts du premier ordre** : Ce sont des défauts de forme (écart de rectitude, écarts de circularité), défaut aperiodique.
- **Défauts du deuxième ordre** : Ils sont caractérisés par une ligne ondulée à un caractère périodique du essentiellement à des vibrations de basses fréquence de la pièce et de l'outil générateur.

- **Défauts du troisième et quatrième ordre** : Ils caractérisent la rugosité de la surface, les défauts du 3ème ordre sont constitués par des stries ou sillons, ce type de défaut à un caractère périodique ou pseudo périodique. Par contre les défauts du quatrième ordre sont constitués par des arrachements, fente, piqûre ... etc. Ce type de défaut a un caractère apériodique.

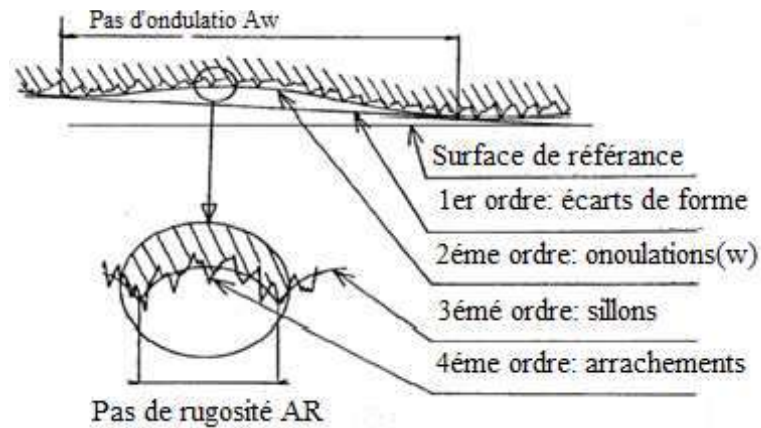


Figure I.8 Principaux défauts de surfaces [1].

I.5.3 Principaux critères de rugosité

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage (figure I.9) soit OX la ligne moyenne tel que :

$$\int_0^l y dx = 0 \quad (I.5)$$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne [1].

a) Rugosité totale R_t

R_t Représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil.

b) Rugosité R_z

R_z Représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas.

c) Rugosité moyenne arithmétique R_a

R_a Représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX.

R_a Est calculée sur une longueur d'évaluation :

$$R_a = \frac{l}{L} \int_L^l |y| dx \quad (I.6)$$

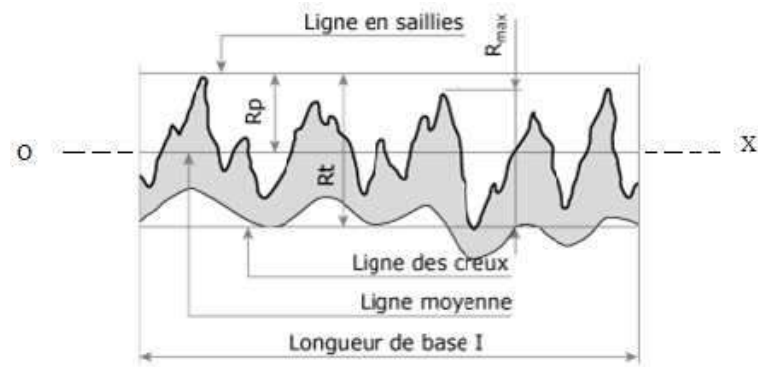


Figure I.9 Rugosité arithmétique [11].

d) Rugosité maximum R_{max}

C'est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité R_{max} étant pris sur une saillie et un creux consécutif.

e) Rugosité R_p

C'est la hauteur maximale de saillie de rugosité. R_p Est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L).

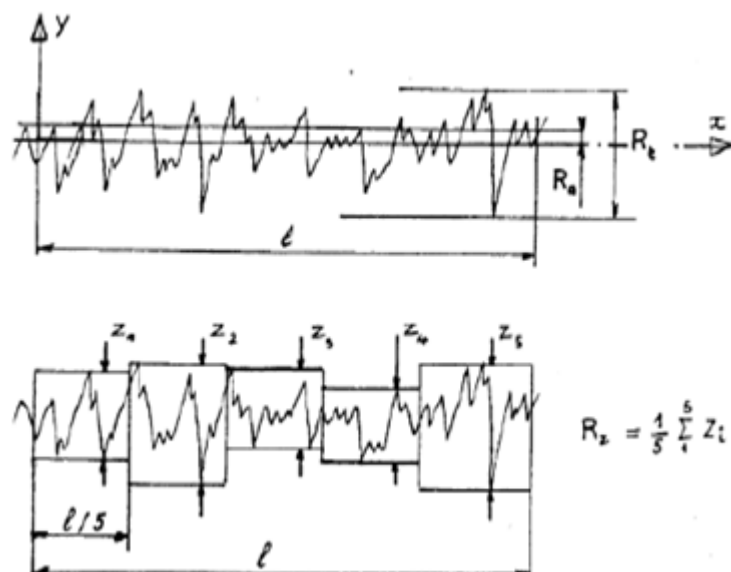


Figure I.10 Principaux critères de rugosité [1].

I.5.4 Influence des principaux paramètres sur la rugosité

Le tableau représente l'influence des principaux paramètres de coupe sur la rugosité de la surface usinée par tournage [1].

Tableau I.5 Influence des paramètres de coupe sur la rugosité arithmétique [1].

Paramètres d'usinage	Variation de la rugosité arithmétique
Dureté du matériau usiné ↗	↘
Avance f ↗	↗
Rayon du bec d'outil $r\epsilon$ ↗	↘
Angle d'attaque de l'outil γ ↗	↘
Acuité d'arête ↗	↘
Profondeur de passe ↗	↗
Usure de l'outil ↗	↗
Lubrification ↗	↘
Vibrations ↗	↗

I.6 Usure des outils de coupe

a) Usure en dépouille

L'usure en dépouille sert de témoin. Lorsqu'elle devient trop importante, les efforts de coupe augmentent et l'état de surface se détériore. Cette usure obtenue parce que Vitesse de coupe trop élevée la solution est Réduire la vitesse de coupe [12].



Figure I.11 Usure en dépouille [12].

b) Usure en cratère

L'usure en cratère est un phénomène qui se rencontre plutôt en tournage. Cette usure obtenue parce que Vitesse de coupe trop élevée ou Résistance à l'usure de la plaquette trop faible la solution est Réduire la vitesse de coupe, Choisir une nuance plus dure, Choisir une nuance revêtue [12].



Figure I.12 Usure en cratère [12].

c) Déformation plastique

Affaissement ou renfoncement de coupe (dû à une température de l'arête trop élevée) entraînant un mauvais état de surface. L'usure en dépouille devient importante et la plaquette peut se rompre. Cette usure obtenue parce que Température de coupe trop élevée, Vitesse de coupe trop élevée, Effort de coupe trop important, la solution est Choisir une nuance plus dure. Choisir une nuance revêtue, Réduire la vitesse de coupe, Réduire l'avance [12].

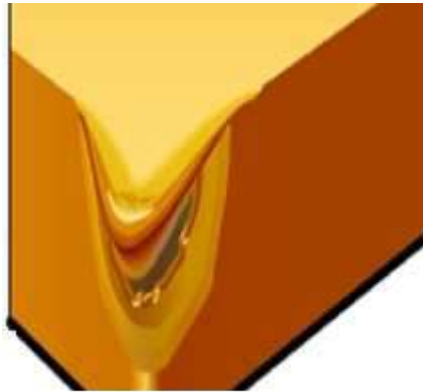


Figure I.13 Déformation plastique [12].

d) Écaillage

De petites particules de carbure se sont décollées de la plaquette, il en résulte un mauvais état de surface et une usure en dépouille trop importante. Cette usure obtenue parce que Nuance trop fragile, Géométrie de la plaquette trop fragile, Arête rapportée, la solution de cette usure est Choisir une nuance plus tenace, Choisir une géométrie avec une arête de coupe plus robuste, Augmenter la vitesse de coupe, Vérifier l'absence de vibrations [12].

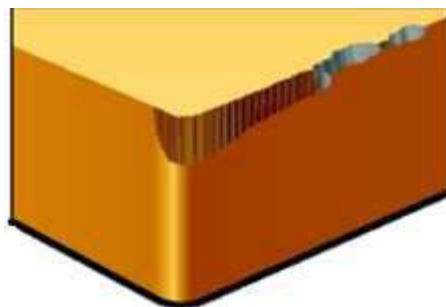


Figure I.14 Écaillage [12].

e) Usure en entaille

Usure en entaille entraînant un état de surface médiocre et un risque de rupture de l'arête. Cette usure obtenue parce que Matières sujettes à l'écaillage en coupe, Croûte la solution est Réduire la vitesse de coupe, V_c Choisir une nuance plus tenace Augmenter la vitesse de coupe V_c [12].

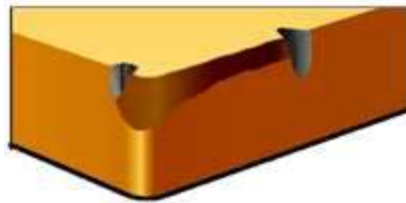


Figure I.15 Usure en entaille [12].

f) Arête rapportée

Une température de coupe trop basse occasionne du collage de matière sur l'arête de coupe. L'état de surface est mauvais et le décollement de la matière peut provoquer l'effritement de l'arête, Cette usure obtenue parce que Vitesse de coupe trop faible, Géométrie de coupe négative, Caractéristique de la matière trop collante. Exemple : acier inoxydable, aluminium .la solution est Augmenter la vitesse de coupe, Choisir une géométrie de coupe positive, Augmenter la vitesse de coupe [12].

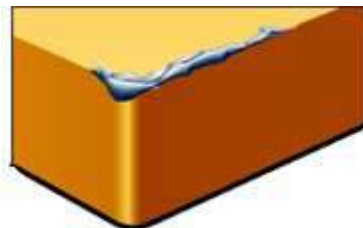


Figure I.16 Arête rapportée [12].

I.7 Mesure de la rugosité des surfaces

La mesure des états de surface peut être réalisée avec un rugosimètre, un Profilomètre à contact ou optique, ou un microscope capable de mesurer la hauteur de surface. Aujourd'hui les états de surface sont évalués numériquement à partir de profils ou de surfaces numérisées. Les technologies les plus courantes pour la mesure d'état de surface sont [10] :

- la profilométrie à contact.
- la profilométrie optique à capteur confocal chromatique.
- la profilométrie optique à focalisation dynamique.
- la microscopie confocale.
- la microscopie par interférence en lumière blanche.

I.7.1 Méthodes de mesure des états de surface

a) Méthodes mécaniques

En raison de leurs simplicités et leurs grandes diversités, les méthodes mécaniques peuvent englober une vaste gamme de paramètres de rugosité, les instruments conventionnelles de mesure de surfaces utilisant ces méthodes présentent certains inconvénients tels que :

- Technique relativement lente.
- La force du palpeur peut parfois endommager la surface.
- Limitation sur des secteurs de mesure.

Les avantages évidents sont :

- Souplesse pour adopter une large diversité de forme.
- Très haute résolution dans la direction verticale.

Dans l'industrie le moyen le plus utilisé est l'appareil de mesure d'état de surface à palpeur, avec contact de ce dernier sur la surface à caractériser (Profilomètre mécanique 2D). Suivant son degré de perfectionnement, ce type d'équipement permet la mesure de tous ou parties des paramètres d'états de surface. En effet, l'évaluation des paramètres de profil primaire et d'ondulation nécessite une référence de guidage externe. La figure I.17 représente, de façon schématique, un appareil à palpeur dont les différents composants [13].

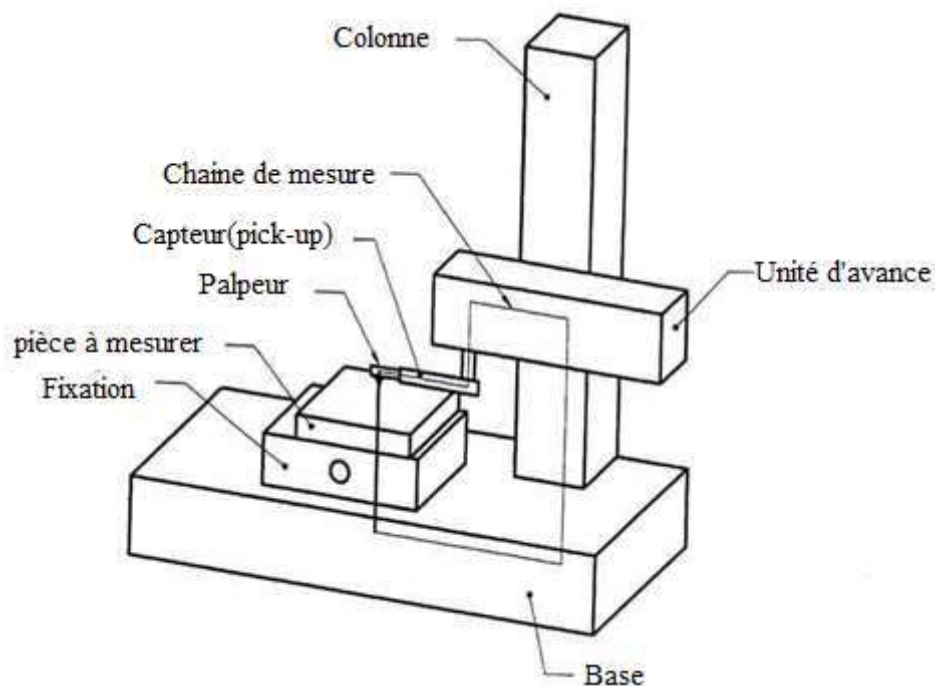


Figure I.17 Profilomètre [14].

b) Mesure tridimensionnelle

La caractérisation de l'état d'une surface ne peut se limiter à l'analyse d'une trajectoire. L'objectif recherché est la caractérisation et l'analyse de l'intégralité d'une surface ou d'une portion de surface est pour connaître son relief, sa texture et ses défauts de surface. Les avancées technologiques repoussent toujours la connaissance et la mesure des états de surface. Ces dernières années ont vues un grand développement d'équipements destinés à la quantification de la topographie de surface, grâce à l'évolution :

- des appareils de mesure à contact (ajout d'un troisième axe de mesure).
- de la microscopie à haute résolution.
- du traitement de l'information et du traitement d'image.

La mesure tridimensionnelle des états de surface dépasse le cadre du contrôle qualité des surfaces sur des produits industriels. L'image tridimensionnelle permet d'augmenter les possibilités d'analyse de la texture des surfaces [13].

Vue par l'œil, chaque maxima correspond à une différence de marche de $\lambda/2$ entre l_1 et l_2 , le balayage des deux miroirs M_1 et M_2 est normal (perpendiculaire) [13].



Figure I.18 Appareille de mesure tridimensionnelle [15].

c) Méthodes optiques

Profilomètre laser

Ces méthodes sont très proches de la méthode par contact, à savoir qu'elles nécessitent l'exploration de la surface au moyen d'une série de trajectoires parallèles régulièrement espacées par déplacement de l'échantillon ou de la source. Les coordonnées Z sont acquises à l'aide d'un capteur optique à source laser. La méthode peut être coaxiale ou basée sur le principe de la triangulation suivant que le faisceau émis et le faisceau réfléchi suivent le même trajet ou une trajectoire différente. La figure I.19 illustre le principe d'un Profilomètre laser. La méthode coaxiale nécessite un système de déplacement vertical permettant l'asservissement du point de focalisation du faisceau laser sur la surface. L'exploitation des données, calcul des paramètres et visualisation de la surface, se fait avec les mêmes outils que ceux utilisés par la méthode avec contact [13].

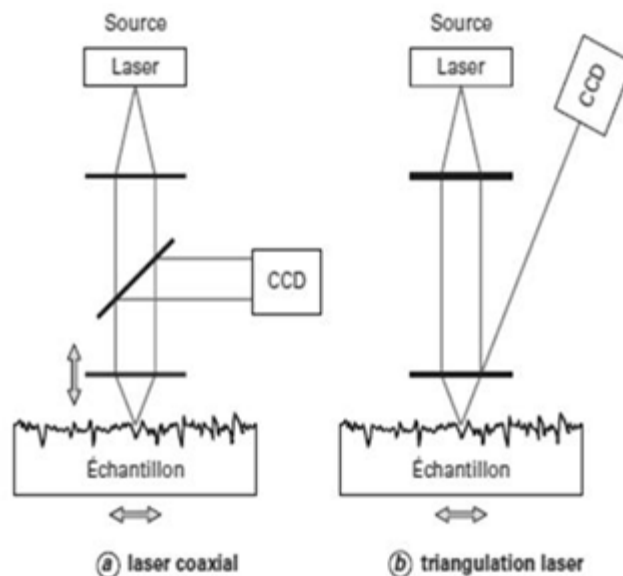


Figure I.19 Méthodes de mesure de la rugosité [13].

d) Méthodes de mesure interférométrique

L'interférométrie est habituellement utilisée pour la mesure d'une longueur donnée par comparaison de deux chemins optiques. La figure I.20 montre d'une façon simplifiée ce principe [13].

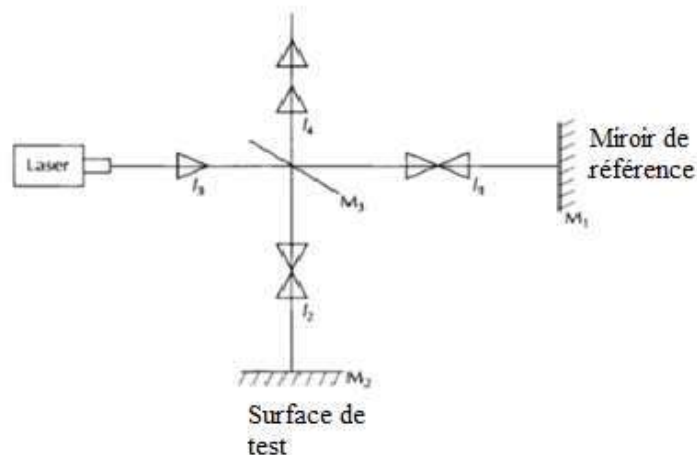


Figure I.20 Principe de mesure interférométrique [13].

La lumière d'une source est divisée à l'aide d'un miroir séparateur, une partie du faisceau est dirigé sur la pièce, l'autre sur un miroir de référence. Après réflexion, les deux faisceaux sont de nouveau superposés au niveau du miroir séparateur. Le chemin de référence est $l_3 + l_1 + l_4$ tandis que le chemin d'essai (à mesurer) a une longueur $l_3 + l_2 + l_4$, la comparaison doit se faire entre l_1 et l_2 et leurs combinaison dépend de leurs différences de phase parfois en les additionnant et parfois en les soustrayant sous une lumière cohérente. Si le miroir M_1 est fixe, la longueur l_2 peut être déterminée en comptant le nombre de maxima vue par l'œil, chaque maxima correspond à une différence de marche de $\lambda/2$ entre l_1 et l_2 , le balayage des deux miroirs M_1 et M_2 est normal (perpendiculaire) [13].

I.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, les procédés de fraisage ainsi que les conditions de coupe puis certaines définitions de l'acier à utiliser dans notre étude (AISI1060).

Nous avons également étudié dans ce chapitre un aperçu sur la rugosité de la surface, les principaux défauts de la surface, des paramètres de coupe sur la rugosité, et la Méthode de mesure de la rugosité des surfaces ainsi qu'une revue de littérature.

Chapitre II

Théorie de la Logique Floue

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons une méthode moderne de contrôle, la logique floue, la logique floue est un axe de recherche important sur lequel se focalisent des nombreuses recherches scientifiques, tant dans le domaine grand public (appareils photos, machines à laver,...) que dans le domaine industriel (réglage et commande de processus complexes liés à l'énergie, aux transports, à la transformation de la matière, à la robotique, aux machines-outils). ce chapitre commence par définition de logique floue, principe, utilisation, etc.

II.2 .La logique floue

De nos jours, la logique floue (fuzzy logic) est un axe de recherche important sur lequel se focalisent de nombreux scientifiques. Des retombées technologiques sont d'ores et déjà disponibles, tant dans le domaine grand public (appareils photos, machines à laver, fours à micro-onde), que dans le domaine industriel (classification, aide à la décision, réglage et commande de processus, complexes liés à l'énergie, aux transports, à la transformation de la matière, à la robotique, aux machines-outils).

Les bases théoriques de la logique floue ont été formulées en 1965 par le professeur Lotfi A. Zadeh, de l'Université de Berkeley en Californie. Il a introduit la notion de sous ensemble flou pour fournir un moyen de représentation et de manipulation des connaissances imparfaitement décrites, vagues ou imprécises. A cette époque, la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux excepté par quelques experts [16].

II.2.1 Le principe

La logique floue a été introduite en 1965 par le Professeur L. Zadeh. Elle permet de faire correspondre un degré de vérité (d'appartenance) à une variable qui peut être linguistique. Cette graduation dans l'appartenance d'un élément à une situation permet la modélisation de l'observation humaine exprimée sous forme linguistique.

À partir des années 70 cette théorie a été appliquée à la commande des systèmes. Ces travaux permettaient de mettre en œuvre des commandes de façon heuristique. Dans les années 80 la communauté des automaticiens a commencé à bâtir une théorie de mise en œuvre de commande floue où l'étude de la stabilité a été introduite de façon systématique [17].

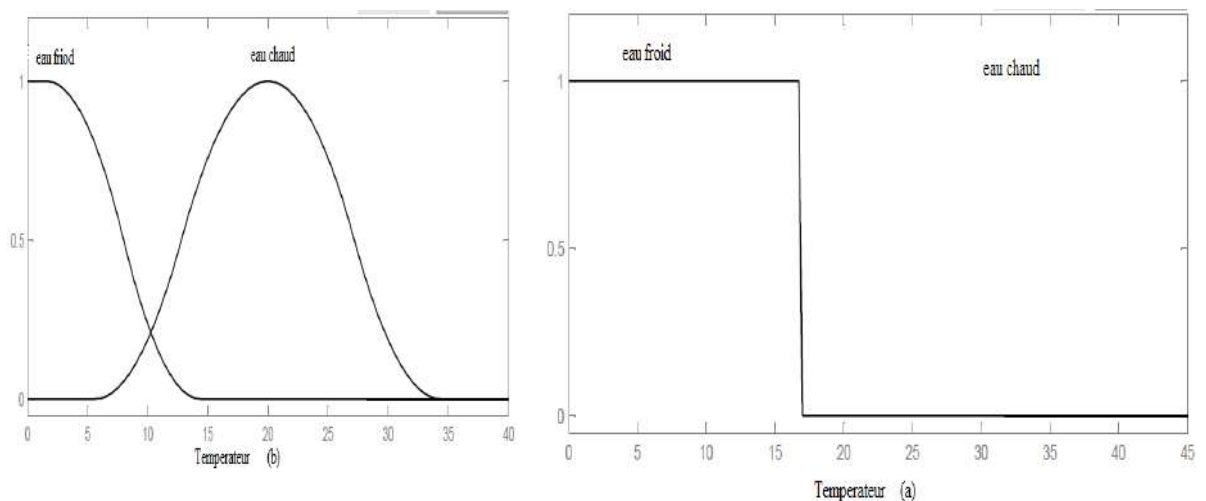
II.2.2 Utilisation de la logique floue

La logique floue est une technique de résolution de problèmes très puissants avec une large applicabilité dans le control et la prise de décision. Elle est très utile lorsque le modèle mathématique du problème à traiter n'existe pas ou existe mais difficile à implémenter, ou il

est trop complexe pour être évalué assez rapidement pour des opérations en temps réel. Ou bien lorsque des experts humains sont disponibles pour fournir des descriptions subjectives du comportement du système avec des termes en langage naturel. La logique floue est aussi supposée de travailler dans les situations où il y a de large incertitude et des variations inconnues dans les paramètres et la structure du système [6].

II.2.3 Logique floue et la logique classique

En logique classique, une proposition est vrai ou faux (1 ou 0). Par exemple, la logique classique peut facilement diviser la température de l'eau en deux sous-groupes, «eau froide» et «eau chaude». La figure II.1 montrée le résultat de cette division. Toutes les températures inférieures à 15 degrés sont alors considérées comme appartenant au groupe «cool». La valeur de ceux-ci est définie sur 1. Toutes les températures allant jusqu'à 15 ou plus degrés sont considérées comme appartenant à un «chaud». On leur attribue une valeur de 0. Cependant, la logique humaine est souvent basée sur des connaissances ou est inexacte, peu fiable ou inexacte [16].



(a) Deux ensembles selon la logique classique (b) Deux ensembles selon la logique floue

Figure II.1 Classification des températures d'une pièce en deux ensembles [16].

En partant de la constatation que les programmes basés sur la logique classique répondaient mal aux exigences humaines qui sont rarement tout ou rien, A. Zadeh dans les années 60 a imaginé un système traduisant cette part d'imprécision. Pour cela il va donner des degrés d'appartenance aux variables comprises entre 0 et 1 au lieu d'un état soit 0 soit 1. C'est ainsi que les programmes rigides utilisés en électronique et en informatique deviennent plus souples et s'adapte mieux aux réflexes humains [18]. Exemple La logique floue permet de définir des sous-ensembles, comme «froid» ou «chaud» [16].

II.2.4 Les variables linguistiques

La notion de variable linguistique permet de modéliser les connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur précise est inconnue. Une variable linguistique, ou variable floue, est donc une variable dont les valeurs floues appartiennent à des ensembles flous pouvant représenter des mots du langage naturel. Ainsi une variable floue peut prendre simultanément plusieurs valeurs linguistiques. Le domaine sur lequel ces termes et ces variables sont définies, constitue l'univers de discours. Le découpage de cet univers de discours par les termes flous est appelé une partition floue. Lorsque l'univers de discours est totalement recouvert par les termes flous, et que pour toutes valeurs, la somme des degrés d'appartenance est égale à 1, on parle alors de partition floue forte [6].

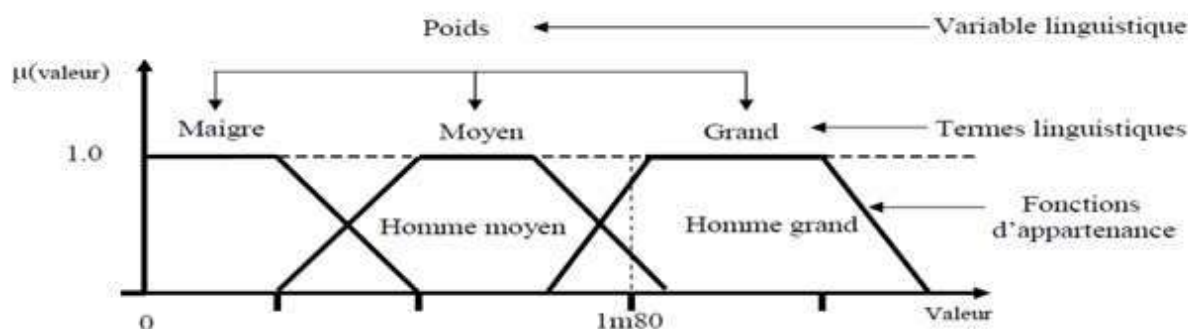


Figure II.2 Variables linguistiques [6].

La variable linguistique peut être représentée par un triplé $(x, T(x), U)$ dans lequel x est le nom de la variable linguistique, $T(x)$ l'ensemble des valeurs linguistiques de x et U l'univers de discours [6].

II.2.5 Les sous-ensembles flous

Dans la théorie des ensembles classiques, il n'y a que deux situations acceptables pour un élément, appartenir ou ne pas appartenir à un sous-ensemble. Le mérite de Zadeh a été de tenter de sortir de cette logique booléenne en introduisant la notion d'appartenance pondérée : permettre des graduations dans l'appartenance d'un élément à un sous-ensemble, c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus moins fortement à ce sous-ensemble [19].

Soit X un ensemble de référence et soit x un élément quelconque de X . Un sous-ensemble flou A de X est défini comme l'ensemble des couples :

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\} \quad (\text{II.1})$$

Avec

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1]$$

Ainsi, un sous-ensemble flou A de X est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ qui associe, à chaque point x de X un réel dans l'intervalle $[0,1]$, $\mu_A(x)$ représente le degré d'appartenance de x à A . On observe les trois cas possibles suivants :

$$\begin{cases} \mu_A(x) = 0 \\ 0 < \mu_A(x) < 1 \\ \mu_A(x) = 1 \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Où, $\mu_A(x) = 0$ si x n'appartient pas à A ; $0 < \mu_A(x) < 1$ si x appartient partiellement à A , et $\mu_A(x) = 1$ si x appartient entièrement à A . La fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ inclut ou exclut donc à ses extrémités tout élément x au sous-ensemble A . Entre les valeurs extrêmes, le degré d'appartenance varie à proportion de la proximité à l'ensemble [19].

II.2.6 Fonction d'appartenance

Les fonctions d'appartenance les plus utilisées : les fonctions triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes... Etc.

a) La fonction triangulaire

Elle est caractérisée par trois paramètres (a, b, c); les sommets du triangle [25]:

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{a-x}{a-b} \\ \frac{x-c}{b-c} \\ 0 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

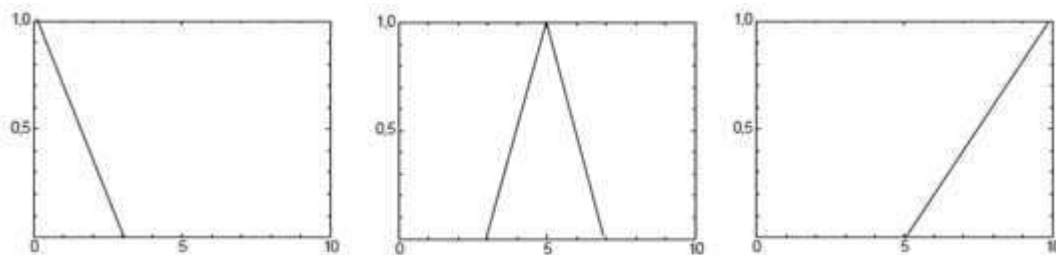


Figure II.3 Fonctions Triangulaire [16].

b) La fonction trapézoïdale

Définie par quatre paramètres (a, b, c, d) [25] :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{II.4})$$

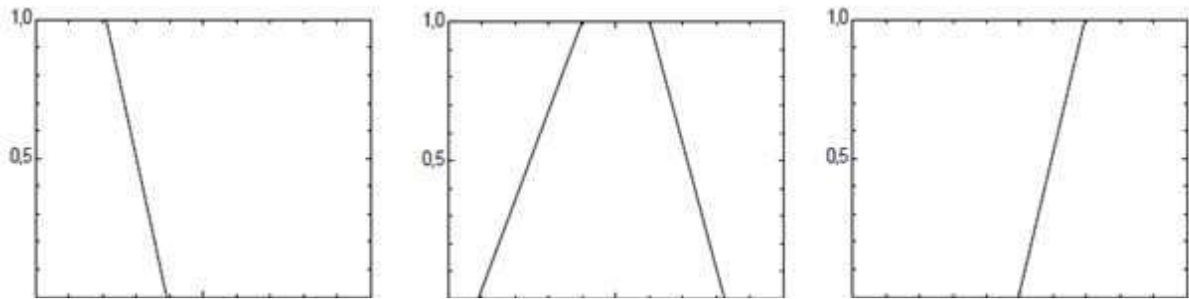


Figure II.4 Fonction Trapézoïdale [16].

c) La fonction Gaussienne

Définie par c et σ le centre, et l'épaisseur [20] :

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{\sigma^2}\right) \quad (\text{II.5})$$

σ : L'écart type

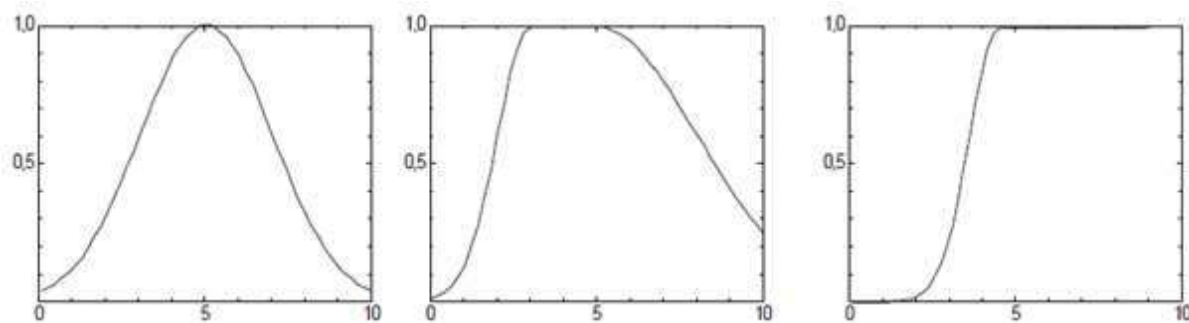


Figure II.5 Fonction Gaussienne [16].

II.2.7 Les opérateurs en logique floue

Il s'agit de généralisation des opérateurs de : négation intersection et union de la théorie de ensembles classique [19].

a) L'opérateur ET (intersection)

Il est défini mathématiquement par :

$$A \cap B = \{X / X \in A \wedge X \in B\} \quad (\text{II.6})$$

Et il est représenté par la fonction

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{II.7})$$

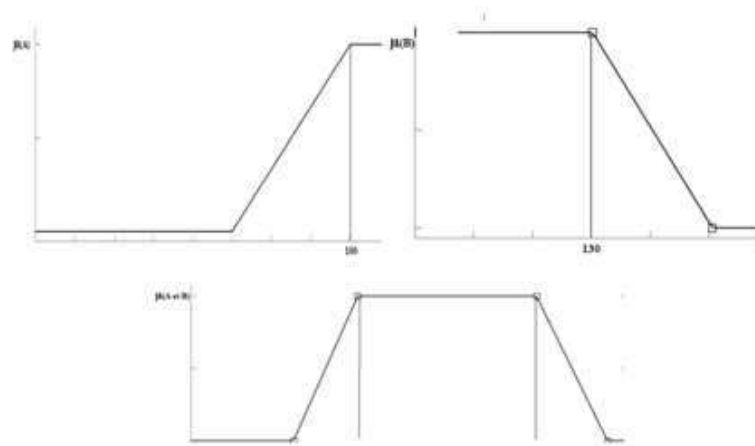


Figure II.6 Exemple pour l'opérateur ET (intersection) [19].

b) L'opérateur OU (Union)

Il est défini mathématiquement par [19] :

$$A \cup B = \{X / X \in A \vee X \in B\} \tag{II.8}$$

Et il est représenté par la fonction

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{II.9}$$

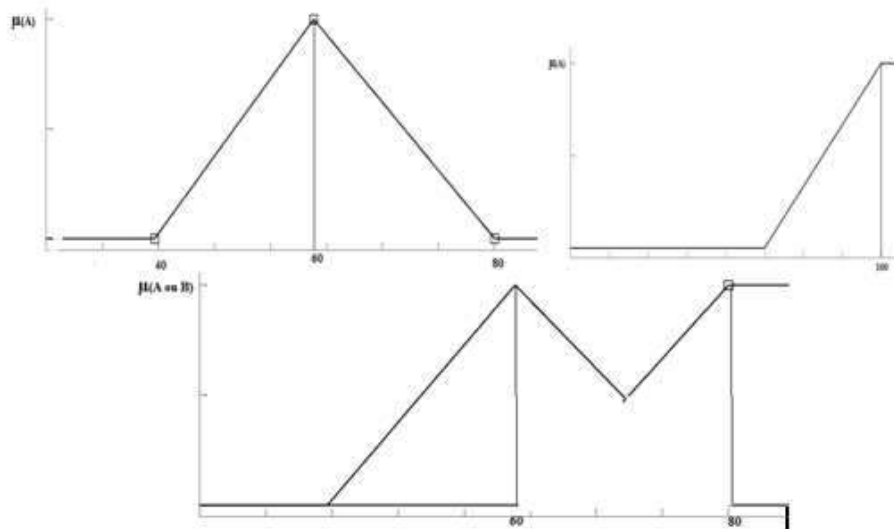


Figure II.7 Exemple pour l'opérateur OU (Union) [19].

c) L'opérateur NON (complément)

Il est défini mathématiquement par :

$$\bar{A} = \{X / X \notin A\} \tag{II.10}$$

Et il est représenté par la fonction

$$non(\mu_A(x)) = \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \tag{II.11}$$

La figure II.8 montre graphiquement l'opérateur NON (complément) sur une fonction d'appartenance.

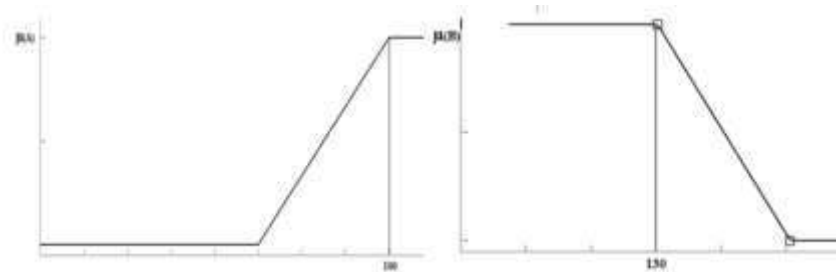


Figure II.8 L'opérateur NON (complément) [19].

II.2.8 Structure d'un système de commande floue

Contrairement aux techniques de réglage classique, le réglage par la logique floue n'utilise pas des formules ou des relations mathématiques bien déterminées ou précises. Mais, il manipule des inférences avec plusieurs règles floues à base des opérateurs flous (ET, OU, ALORS,...) appliquées à des variables linguistiques [6].

On peut distinguer trois parties principales constituant la structure d'un régulateur floue :

- une interface de fuzzification,
- un mécanisme d'inférence,
- une interface de Défuzzification,

La figure II.9 représente les étapes (la structure) de la logique floue

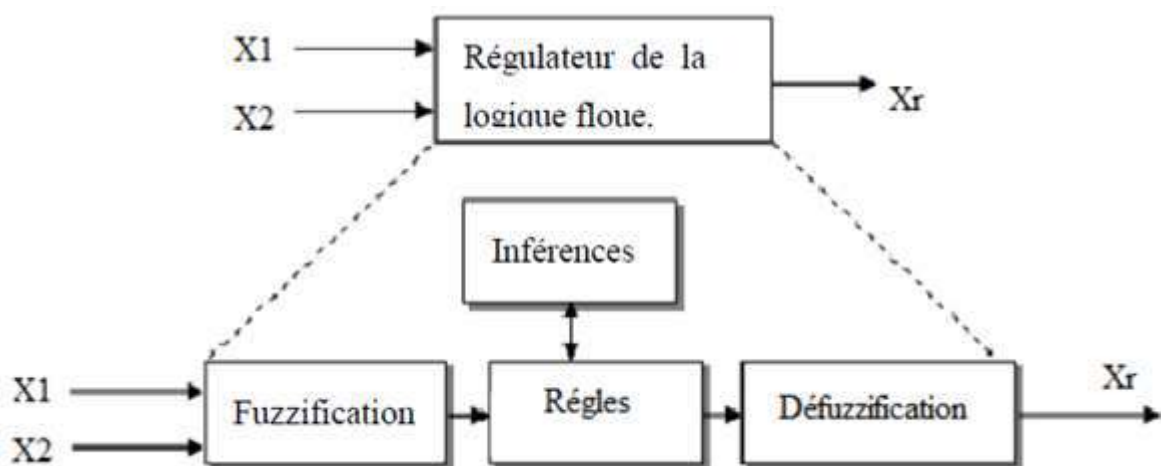


Figure II.9 Structure interne d'un Régulateur de la logique floue [6].

X_1, X_2 : Les valeurs d'entrées.

X_r : Valeur de sortie.

a) Interface de fuzzification

La Fuzzification transforme une valeur numérique de l'entrée en une partie floue définie sur un espace de représentation lié à l'entrée. Du choix de cet espace de représentation (numérique ou linguistique) dépend de la nature de la partie floue E résultante de la Fuzzification. Cette dernière peut être un sous-ensemble flou numérique (élément de $F(x)$) ou un sous-ensemble [20].

b) Mécanisme d'inférence floue

Cette étape consiste à relier les variables physiques d'entrée du régulateur (grandeurs mesurées ou estimées), qui sont transformées en variables linguistiques pendant l'étape de fuzzification, la variable de sortie du contrôleur sous sa forme linguistique, par des règles mentales traduisant une action ou une décision linguistique sur la commande à la sortie du régulateur, face à toute situation se présentant à l'entrée de ce régulateur.

Ces inférences sont basées sur plusieurs règles établies par l'expertise et le savoir-faire humain concernant le système à régler. Elles sont structurées sous forme compacte dans une matrice multidimensionnelle dite matrice d'inférence [6].

c) Défuzzification

A la fin de l'inférence. L'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. Il est nécessaire de passer du « monde flou » au « monde réel », c'est la défuzzification.

Il existe plusieurs méthode de défuzzification : centre de gravité de la surface, bissecteur de la surface ,moyen des maximas, plus petit des maximas en valeur absolue ,plus grand des maximas en valeur absolue.la plus souvent rencontrée étant la méthode de calcul du « centre de gravité » de l'ensemble flou [19].

a) Défuzzification par centre de gravité

La défuzzification par centre de gravité consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance selon :

$$y_{cg} = \frac{\int y \cdot \mu_{B_{res}}(y) dy}{\int y \cdot \mu_{B_{res}}(y) dy} \quad (\text{II.12})$$

En pratique, on estime le centre de gravité en calculant la moyenne d'un certain nombre de points échantillonnés sur la fonction :

$$y_{cg} = \frac{\sum y_i \cdot \mu_{Bres}(y_i)}{\sum \mu_{Bres}(y_i)} \quad (\text{II.13})$$

Le temps nécessaire au traitement est directement proportionnel au nombre de points retenus pour le calcul de la moyenne. Selon les contraintes fixées par l'application, il y a un compromis à réaliser entre la précision souhaitée et le temps de calcul disponible [6].

b) Défuzzification par valeur maximum :

Cette méthode ne s'utilise que dans le cas discret. On choisit comme sortie y_m l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante $\mu_{Bres}(y)$. Lorsque $\mu_{Bres}(y)$ est échantillonnée, on prend la moyenne des abscisses du maximum [6] :

$$y_m = \frac{\sum y_i \in M y_i}{|M|} \quad (\text{II.14})$$

M est l'ensemble des points pour lesquels la fonction d'appartenance est maximale :

$$M = \{y \in [-c, c] / \mu_{Bres}(y) = H(Bres)\} \quad (\text{II.15})$$

II.3 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation des concepts fondamentaux de la logique floue, cela se fait pour expliquer les détails des étapes, et les méthodes les plus répandues pour la réalisation d'un système basé sur la logique floue.

Chapitre III

Résultats et Discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous utilisons la logique floue, pour prédire la rugosité de surface, pendant les opérations de fraisage de l'acier AISI 1060 en fonction des conditions de coupe (vitesse de coupe, la vitesse d'avance, profondeur de passe), en se basant sur une base de données élaborer expérimentalement.

III.2 Procédure et données expérimentale

Les données ci-dessous (Tableau III.1) représentent les résultats obtenus à partir de d'une étude expérimentale de mesure de la rugosité du surfaçage d'une pièce d'acier AISI1060 en utilisant une rugosimètre.

Tableau III.1 Données expérimentales.

(a_p)		0.25	0.5	0.75
f_z	V_c			
0.09	100	0.34	0.35	0.8
	150	0.28	0.32	0.75
	200	0.28	0.31	0.85
	250	0.34	0.26	0.72
	300	0.41	0.29	0.71
0.12	100	0.48	0.31	0.87
	150	0.26	0.33	0.76
	200	0.4	0.35	0.68
	250	0.29	0.31	0.7
	300	0.29	0.31	0.52
0.15	100	0.52	0.52	1.02
	150	0.55	0.49	0.75
	200	0.57	0.45	0.72
	250	0.5	0.46	0.98
	300	0.5	0.41	0.94
0.18	100	0.33	0.3	0.89
	150	0.28	0.45	0.47
	200	0.39	0.33	0.8
	250	0.42	0.33	0.72
	300	0.35	0.37	0.7

III.3 Système flou

La figure III.1 ci-dessous représente les variables d'entrées et de sortie du système flou utilisé pour la prédiction de la rugosité pendant les opérations de surfacage de l'acier AISI1060.

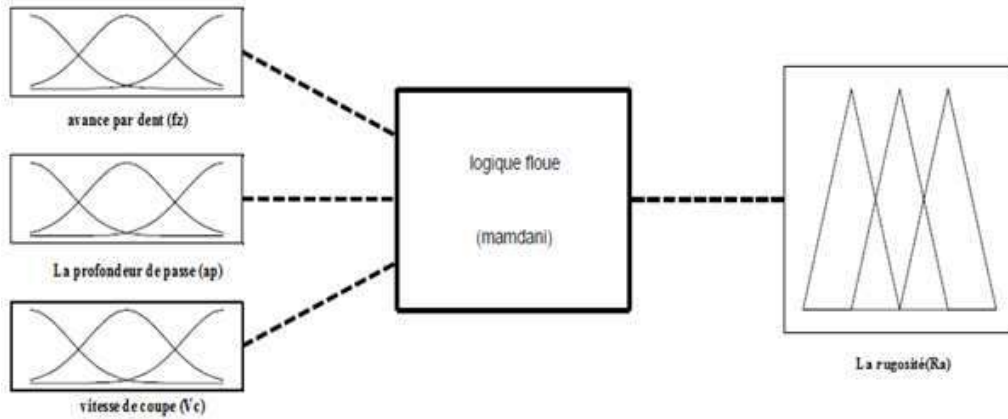


Figure III.1 Les entrées et les sorties du système flou.

III.4 Modélisation floue

III.4.1 Les variables floues

Pour définir l'univers de discours associé à cette étude, nous présentons dans le tableau ci-dessous (tableau III.2) les valeurs limites des paramètres d'entrée et de sortie, pour le modèle flou utilisé.

Tableau III.2 Valeurs limites pour les entrées et les sorties.

Paramètre	Valeur MIN	Valeur MAX
a_p (mm)	0.25	0.75
V_c (m/min)	100	300
f_z (mm/dent)	0.09	0.18
R_a (μm)	0.1	1.2

III.4.2 Définition des variable linguistiques

A partir de la base expérimentale utilisée, nous définissons dans cette partie l'ensemble des variables linguistique associées à chaque paramètre utilisé.

Les variables linguistiques qui définissent les valeurs expérimentales du premier paramètre (profondeur de passe) sont illustrées dans la figure III.2.

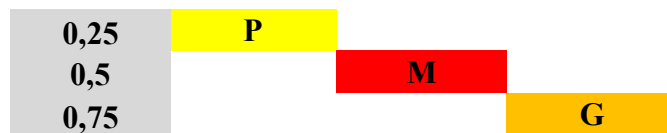


Figure III.2 Variables linguistiques pour la profondeur de passe.

Les variables linguistiques qui définissent les valeurs expérimentales du deuxième paramètre (avance par dent) sont illustrées dans la figure III.3

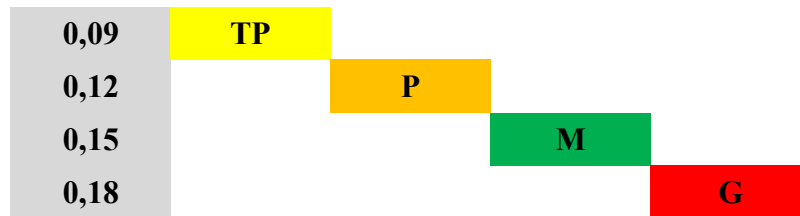


Figure III.3 Variables linguistiques pour Avance.

Les variables linguistiques qui définissent les valeurs expérimentales du troisième paramètre (vitesse de coupe) sont illustrées dans la figure III.4

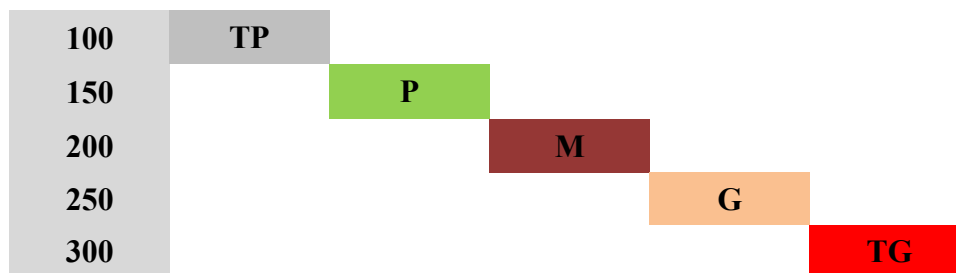


Figure III.4 Variables linguistiques pour Vitesse de coupe.

Pour bien définir les variables linguistiques associées au paramètre de sortie (rugosité de la surface), nous proposons, de représenter les valeurs expérimentales de la rugosité pour tous les essais expérimentales sous forme d'un nuage de points.

Cette représentation nous permis de diviser l'univers de discours en un ensemble d'intervalles, dont le but est de minimiser le nombre d'intervalles.

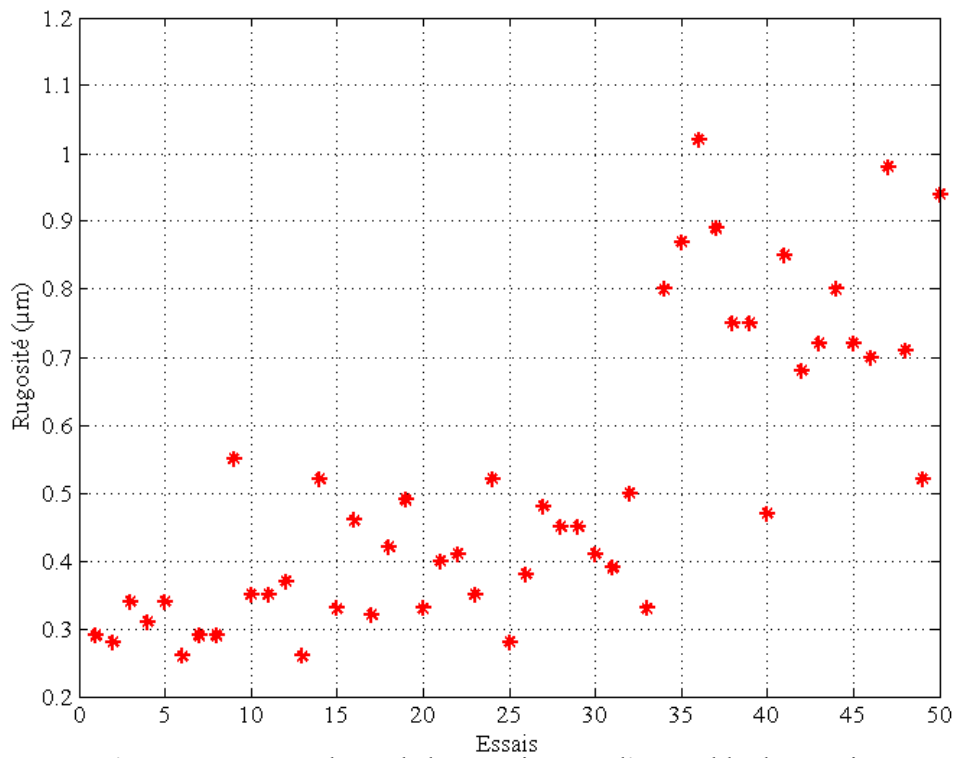


Figure III.5 Les valeurs de la rugosité pour l'ensemble des essais.

Les variables linguistiques pour la sortie sont représentées dans la figure III.6.

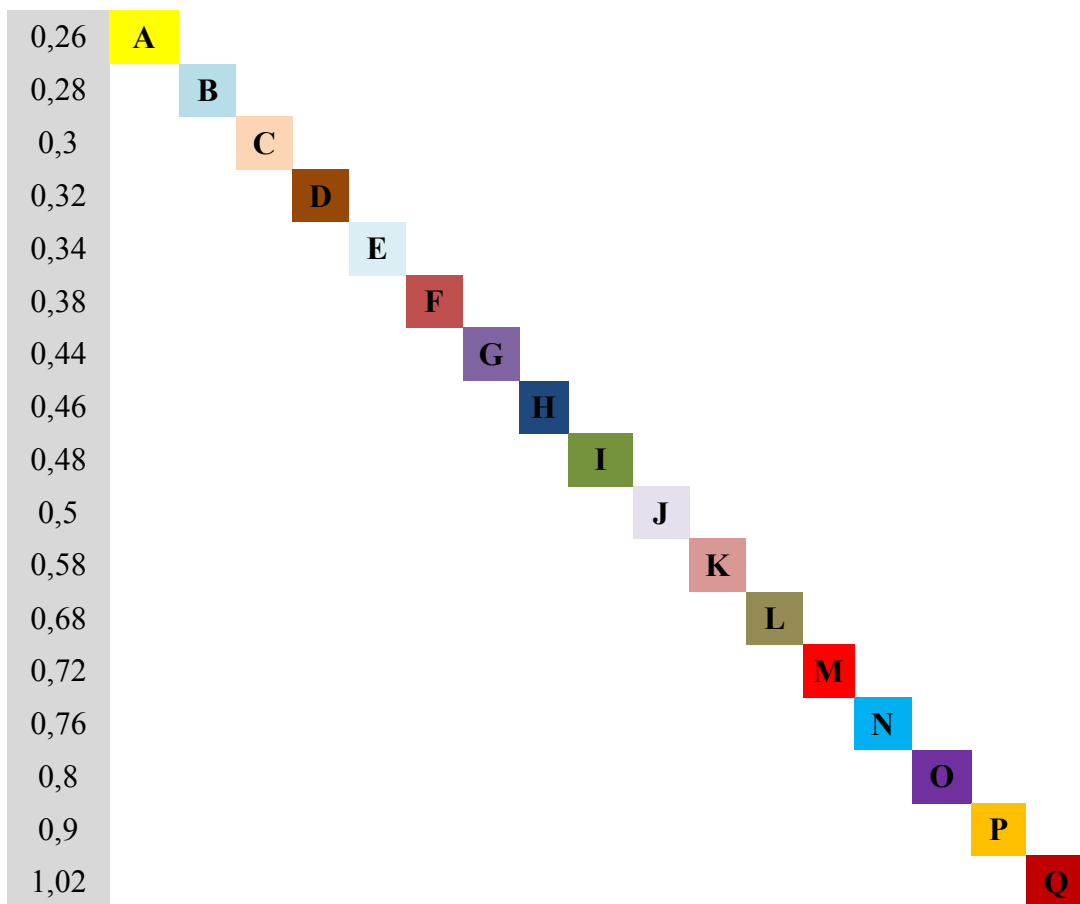


Figure III.6 Variables linguistiques pour la rugosité pour l'ensemble des essais.

III.5 Les fonctions d'appartenance

Trois types de fonctions d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale et Gaussienne) sont utilisés dans cette étude.

a) Utilisation des fonctions d'appartenance de type triangulaire

Les paramètres d'entrées

En utilisant les intervalles flous présentés précédemment, les fonctions d'appartenance de type triangulaire pour les paramètres d'entrée sont présentées dans les figures III.7, III.8 et III.9 :

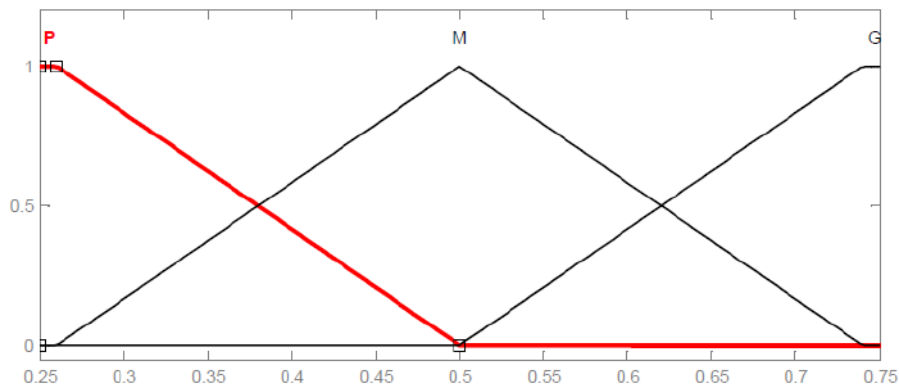


Figure III.7 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la profondeur de passe.

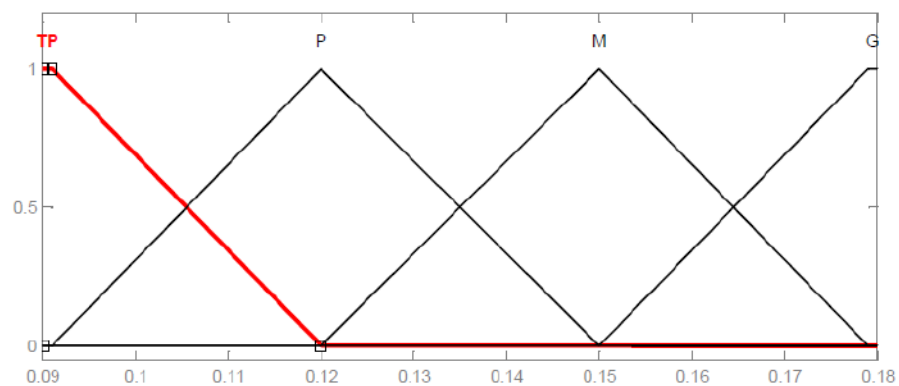


Figure III.8 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour l'avance par dent.

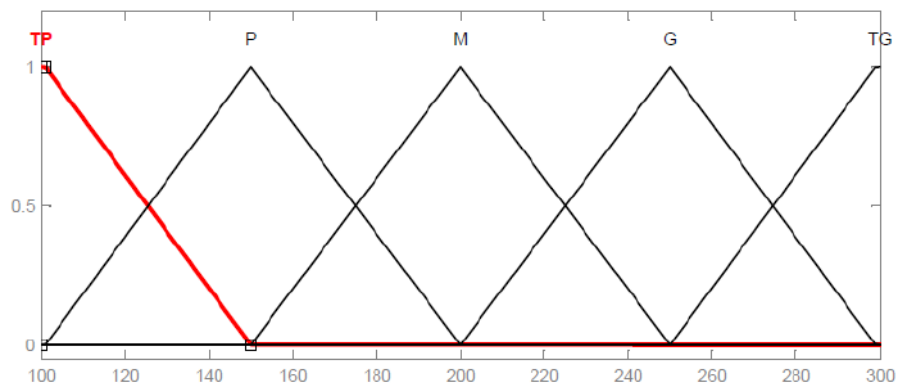


Figure III.9 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la vitesse de coupe.

Le paramètre de sortie

En utilisant les intervalles présentés dans la figure III.6, les fonctions d'appartenance pour le paramètre de sortie (rugosité de la surface) sont illustrées dans la figure III.10 :

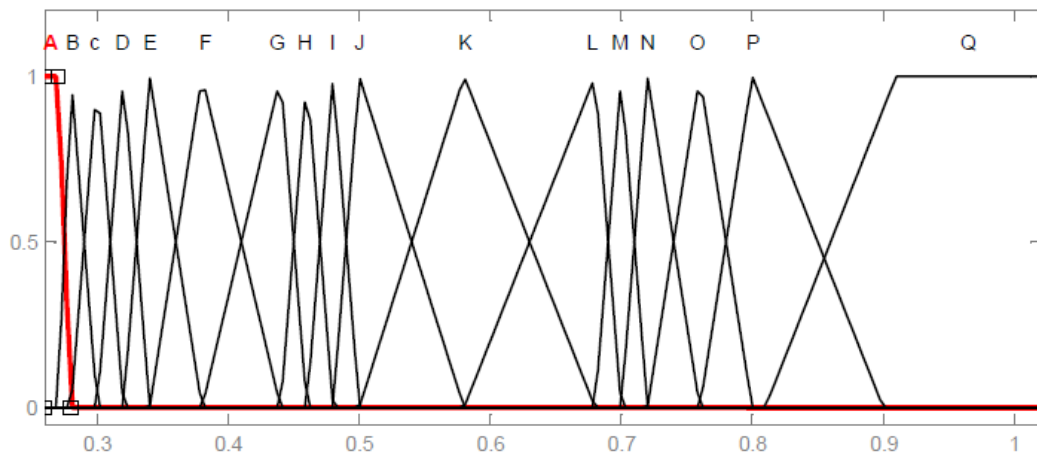


Figure III.10 Fonctions d'appartenance (type triangulaire) pour la rugosité de la surface.

b) Utilisation des fonctions d'appartenance de type trapézoïdale

Les paramètres d'entrées

En utilisant les intervalles flous présentés précédemment, les fonctions d'appartenance de type trapézoïdale pour les paramètres d'entrée sont présentées dans les figures III.11, III.12 et III.13 :

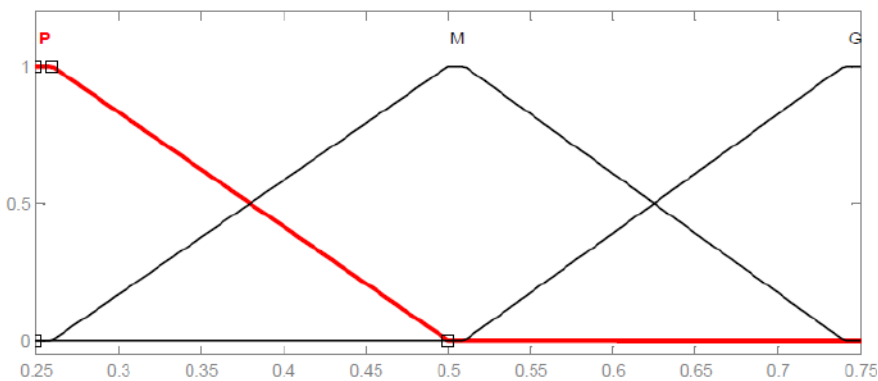


Figure III.11 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la profondeur de passe.

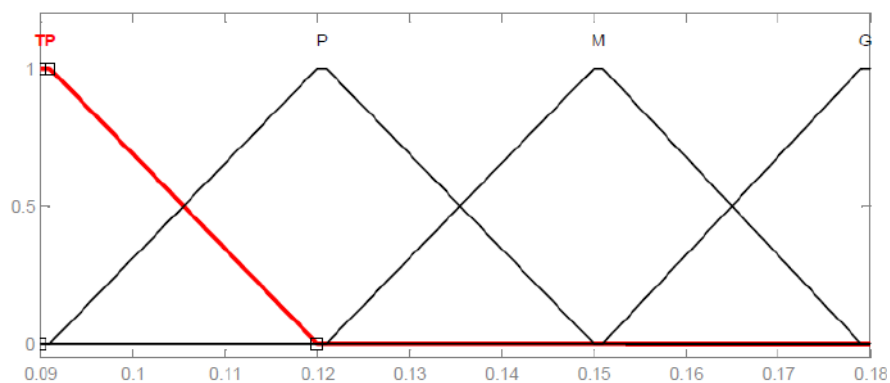


Figure III.12 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour l'avance par dent.

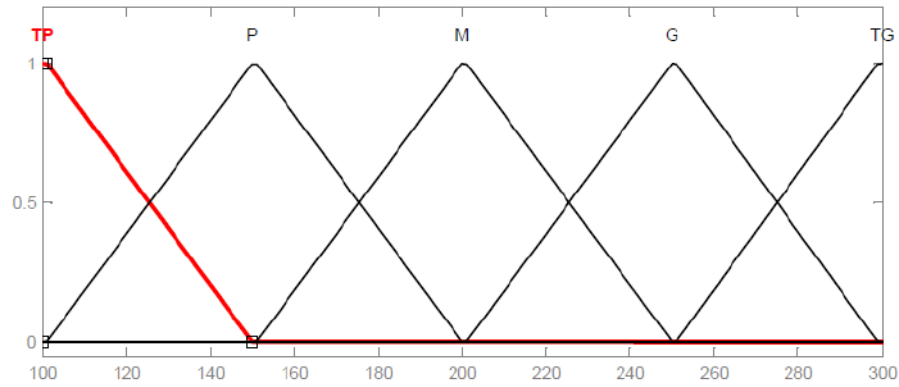


Figure III.13 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la vitesse de coupe.

Le paramètre de sortie

En utilisant les intervalles présentés dans la figure III.6, les fonctions d'appartenance pour le paramètre de sortie (rugosité de la surface) sont illustrées dans la figure III.14 :

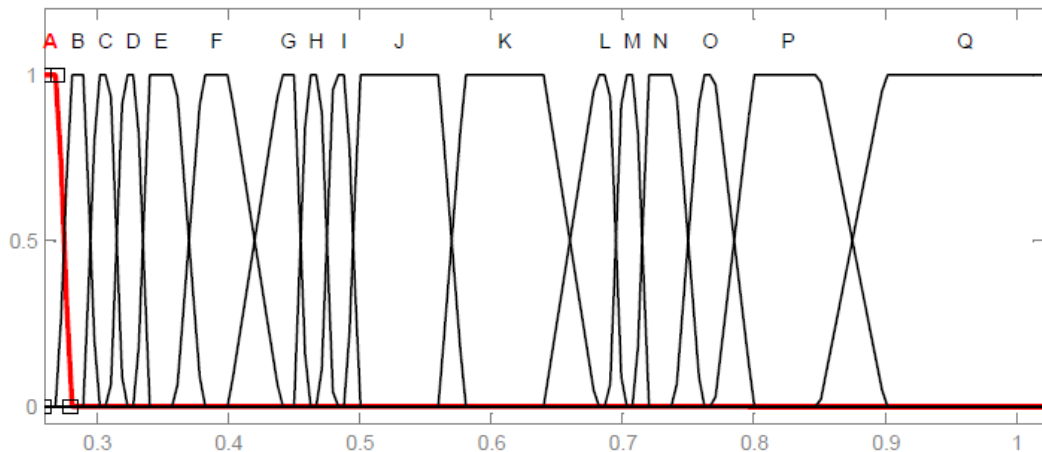


Figure III.14 Fonctions d'appartenance (type trapézoïdale) pour la rugosité de la surface.

c) Utilisation des fonctions d'appartenance de type Gaussienne

Les paramètres d'entrée

En utilisant les intervalles flous présentés précédemment, les fonctions d'appartenance de type Gaussienne pour les paramètres d'entrée sont présentées dans les figures III.11, III.12 et III.15 :

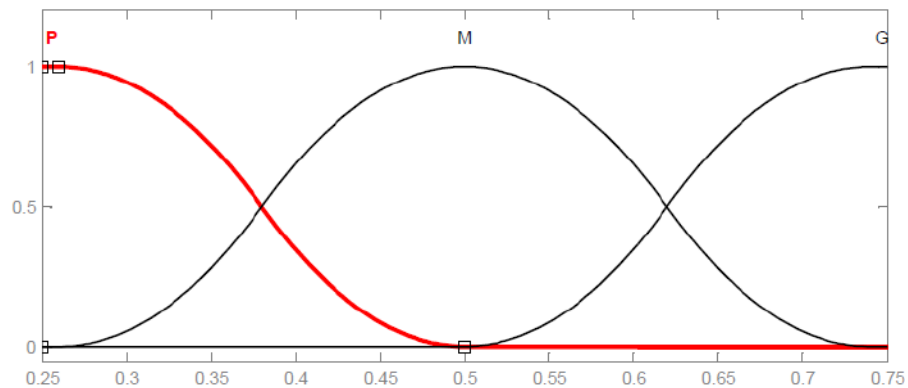


Figure III.15 Fonctions d'appartenance (de type Gaussienne) pour la profondeur de passe.

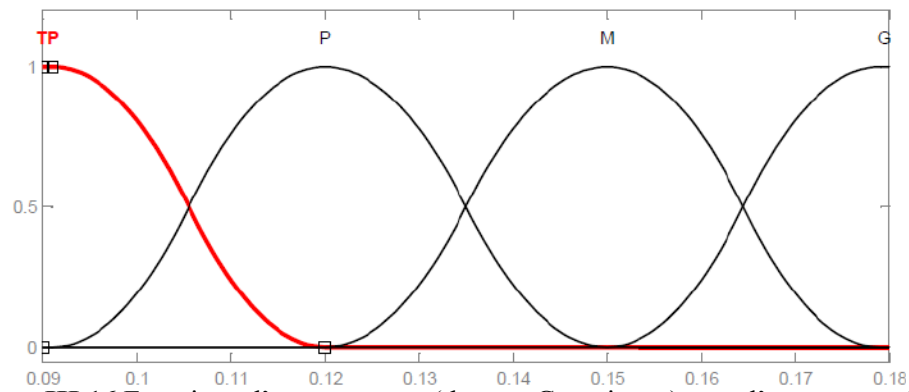


Figure III.16 Fonctions d'appartenance (de type Gaussienne) pour l'avance par dent.

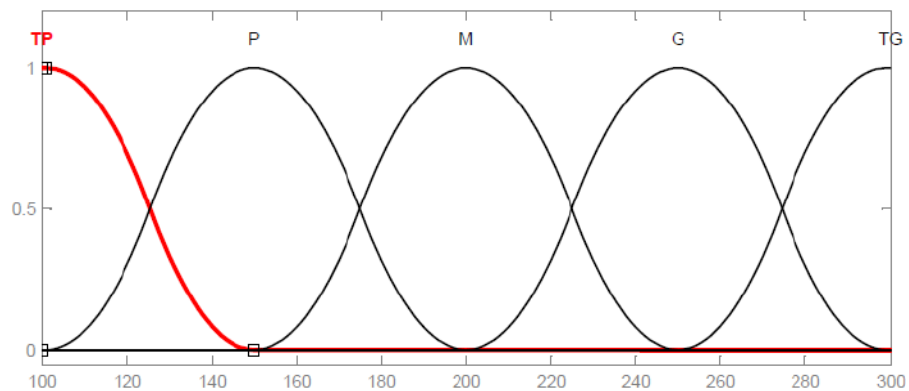


Figure III.17 Fonctions d'appartenance (de type Gaussienne) pour la vitesse de coupe.

Le paramètre de sortie

En utilisant les intervalles présentés dans la figure III.6, les fonctions d'appartenance pour le paramètre de sortie (rugosité de la surface) sont illustrées dans la figure III.18 :

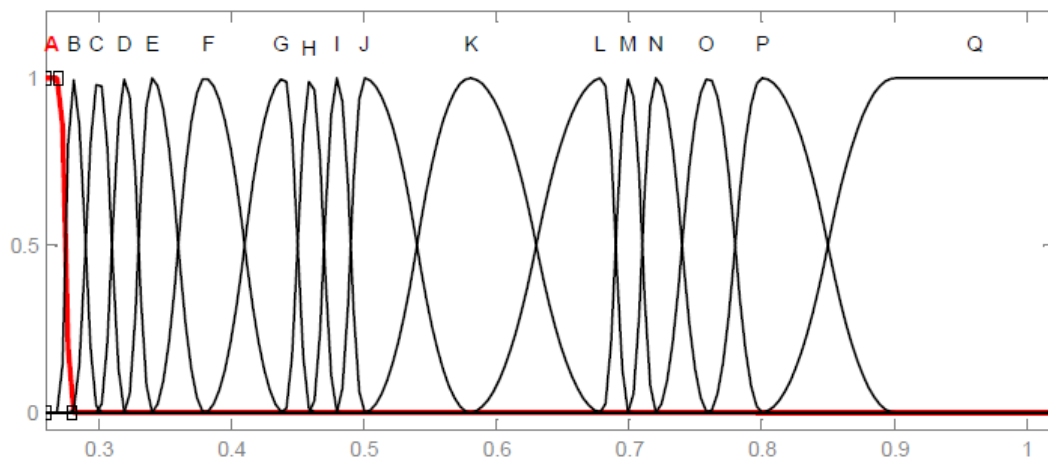


Figure III.18 Fonctions d'appartenance (de type Gaussienne) pour Rugosité.

III.6 Les règles floues

Les cinquante règles floues, du tableau III.3, ont été établies en fonction des conditions expérimentales.

Chaque règle prend la forme suivante :

Si f_z est (variable linguistique) et V_c est (variable linguistique) et a_p est (variable linguistique) Alors R_a est (variable linguistique) L'ensemble de règles floues élaborées sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

L'ensemble de règles floues élaborées sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.3 Les règles floues.

		a_p		
		P	M	G
f_z	V_c			
TP	TP	E	E	P
	P	B	D	O
	M	B	C	O
	G	E	A	N
	TG	F	B	N
P	TP	I	C	P
	P	A	D	-
	M	F	E	-
	G	B	-	M
	TG	B	-	J
M	TP	J	J	Q
	P	J	I	O
	M	-	H	N
	G	I	H	Q
	TG	-	F	Q
G	TP	D	-	P
	P	B	H	I
	M	F	D	P
	G	G	-	-
	TG	E	F	-

III.7 Résultats et discussion

Après le traitement des règles floues on doit passer à la dernière étape, la défuzzification. Cette étape consiste à transformer les valeurs linguistiques issues du régulateur flou en valeurs numérique.

Le tableau III.4 présente les valeurs, de la rugosité de surface, obtenus en utilisant le modèle flou, avec les trois types de fonctions d'appartenance.

Tableau III.4 Les résultats du système flu.

Essais	Paramètres de coupe			Résultats de la rugosité de surface			
	V_c	f_z	a_p	$R_{a_{Exp.}}$	$R_{a_{Triang.}}$	$R_{a_{Trap.}}$	$R_{a_{Gauss.}}$
1	300	0.09	0.5	0.29	0.283	0.285	0.283
2	150	0.09	0.25	0.28	0.283	0.285	0.283
3	100	0.09	0.25	0.34	0.347	0.353	0.346
4	100	0.12	0.5	0.31	0.3	0.305	0.3
5	250	0.09	0.25	0.34	0.347	0.353	0.346
6	250	0.09	0.5	0.26	0.266	0.266	0.266
7	300	0.12	0.25	0.29	0.283	0.285	0.283
8	250	0.12	0.25	0.29	0.283	0.285	0.283
9	150	0.15	0.25	0.55	0.52	0.533	0.518
10	300	0.18	0.25	0.35	0.347	0.353	0.346
11	100	0.09	0.5	0.35	0.347	0.353	0.346
12	300	0.18	0.5	0.37	0.378	0.353	0.386
13	150	0.12	0.25	0.26	0.266	0.266	0.266
14	100	0.15	0.25	0.52	0.52	0.533	0.518
15	200	0.18	0.5	0.33	0.32	0.325	0.32
16	250	0.15	0.5	0.46	0.453	0.465	0.428
17	150	0.09	0.5	0.32	0.32	0.325	0.32
18	250	0.18	0.25	0.42	0.427	0.436	0.428
19	150	0.15	0.5	0.49	0.48	0.485	0.48
20	150	0.12	0.5	0.33	0.32	0.325	0.32
21	200	0.12	0.25	0.4	0.387	0.396	0.386
22	300	0.15	0.5	0.41	0.387	0.396	0.386
23	200	0.12	0.5	0.35	0.347	0.353	0.346
24	100	0.15	0.5	0.52	0.52	0.533	0.518
25	150	0.18	0.25	0.28	0.266	0.285	0.266
26	200	0.09	0.25	0.38	0.387	0.396	0.386
27	100	0.12	0.25	0.48	0.48	0.485	0.48
28	150	0.18	0.5	0.45	0.46	0.465	0.428
29	200	0.15	0.5	0.45	0.46	0.465	0.428
30	300	0.09	0.25	0.41	0.393	0.396	0.386
31	200	0.18	0.25	0.39	0.387	0.396	0.386

32	250	0.15	0.25	0.5	0.52	0.485	0.518
33	100	0.18	0.25	0.33	0.32	0.325	0.32
34	100	0.09	0.75	0.8	0.82	0.831	0.818
35	100	0.12	0.75	0.87	0.82	0.831	0.818
36	100	0.15	0.75	1.02	0.935	0.949	0.936
37	100	0.18	0.75	0.89	0.857	0.831	0.818
38	150	0.09	0.75	0.75	0.76	0.733	0.76
39	150	0.15	0.75	0.75	0.76	0.733	0.76
40	150	0.18	0.75	0.47	0.48	0.465	0.48
41	200	0.09	0.75	0.85	0.826	0.831	0.76
42	200	0.12	0.75	0.68	0.653	0.676	0.657
43	200	0.15	0.75	0.72	0.727	0.733	0.726
44	200	0.18	0.75	0.8	0.8	0.831	0.726
45	250	0.09	0.75	0.72	0.727	0.733	0.726
46	250	0.12	0.75	0.7	0.7	0.705	0.7
47	250	0.15	0.75	0.98	0.935	0.949	0.936
48	300	0.09	0.75	0.71	0.727	0.705	0.726
49	300	0.12	0.75	0.52	0.52	0.533	0.518
50	300	0.15	0.75	0.94	0.935	0.949	0.936

La figure suivante représente la superposition des valeurs obtenues avec les trois fonctions d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale et Gaussienne).

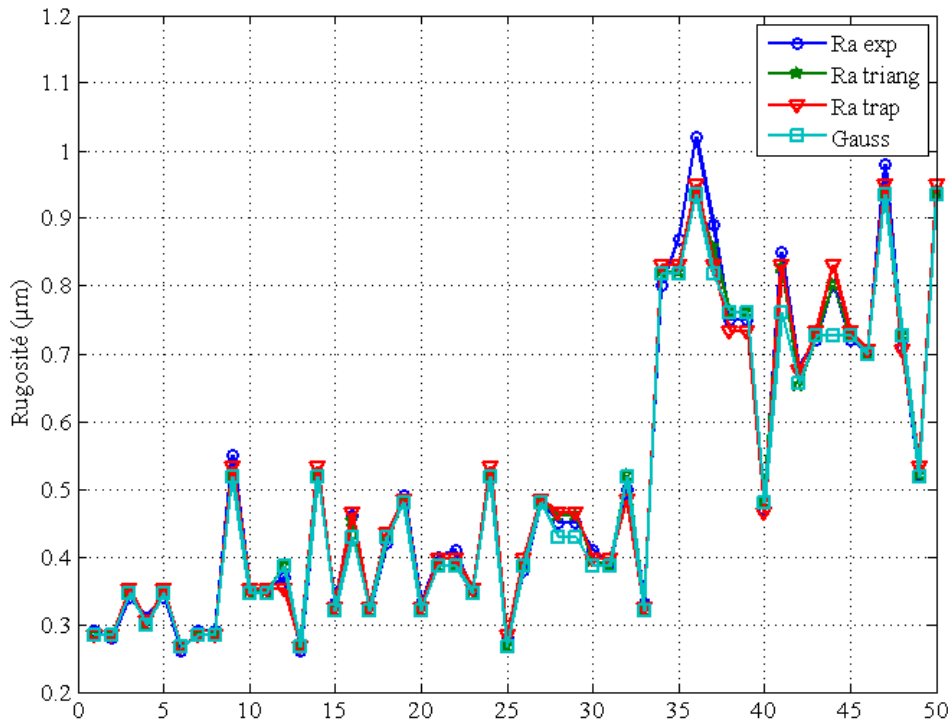


Figure III.19 Variation des rugosités (trapézoïdales, triangulaires, gaussienne) en fonction du nombre d’essais.

III.7.1 Validation des modèles élaborés

Pour la vérification du système en teste dix valeurs expérimentales du modèle flou comme le présente le tableau III.5.

Le tableau III.5 montre les prédictions du modèle de logique floue pour dix nouveaux essais qui ne sont pas utilisées dans la construction du modèle flou.

Tableau III.5 Résultats du système flou pour les dix essais de vérification.

Essais	Paramètres de coupe			Rugosité de la surface			
	V_c	f_z	a_p	$R_{a_{Exp}}$	$R_{a_{Triang}}$	$R_{a_{Trap}}$	$R_{a_{Gauss}}$
1	200	0.12	0.75	0.68	0.64	0.64	0.64
2	300	0.12	0.5	0.31	0.3	0.353	0.346
3	200	0.15	0.25	0.57	0.587	0.615	0.586
4	200	0.09	0.5	0.31	0.3	0.305	0.3
5	100	0.18	0.5	0.3	0.3	0.305	0.3
6	250	0.18	0.5	0.33	0.32	0.325	0.32
7	150	0.12	0.75	0.76	0.76	0.768	0.76
8	300	0.15	0.25	0.5	0.48	0.485	0.48
9	250	0.18	0.75	0.72	0.727	0.733	0.726
10	300	0.18	0.75	0.7	0.7	0.705	0.7

La figure III.20 montre des similitudes entre les valeurs de la rugosité de surface prédite et expérimentale.

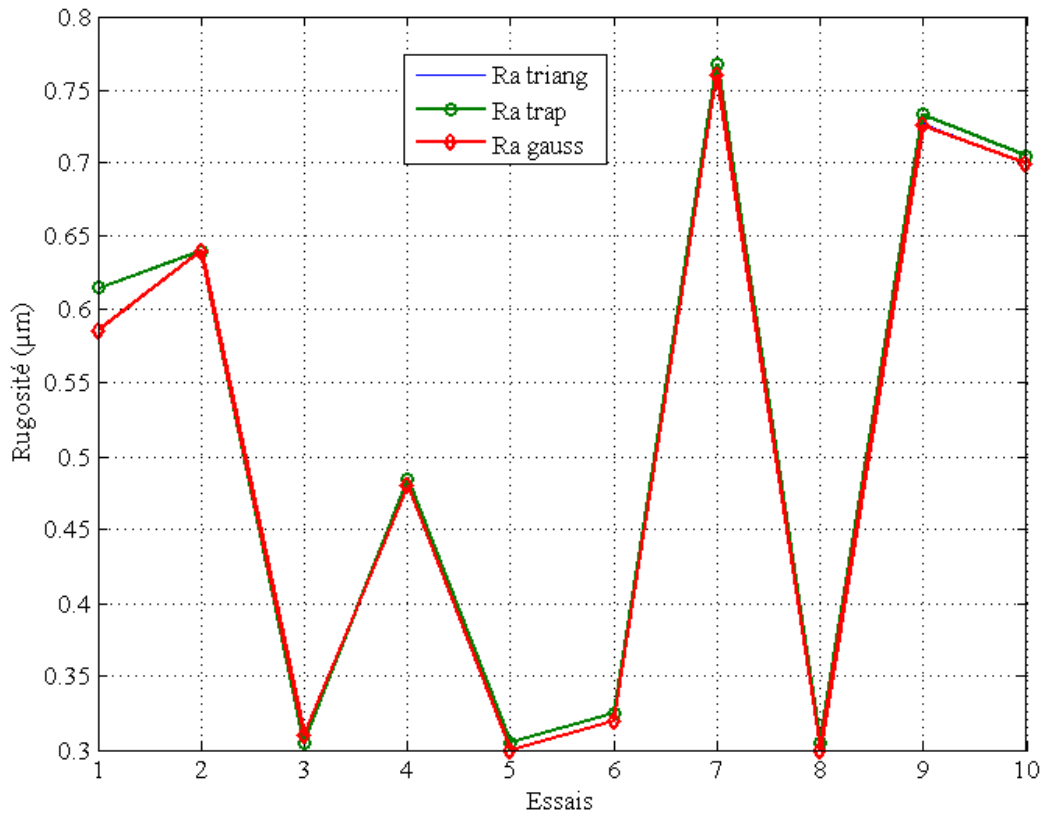


Figure III.20 Comparaison de la prédiction des modèles de logique floue avec les résultats mesurés de la rugosité de la surface.

La variation de la rugosité en utilisant les trois types de fonctions d'appartenance est presque la même. Donc, cette représentation, ne nous permettons pas de déterminer le bon modèle entre les trois modèles. Alors nous proposons d'utilisé l'écart-type afin de définir les résultats les plus proches des résultats expérimentales.

La relation de L'écart-type est :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Ra_{pré} - Ra_{exp})^2} \quad (III.1)$$

Ra_{exp} : La rugosité expérimentale.

$Ra_{pré}$: La rugosité prédite.

Dans notre cas $N=10$ essais.

- L'écart-type des fonctions d'appartenance de type triangulaire est de l'ordre de 0.0162
- L'écart-type des fonctions d'appartenance de type trapézoïdale est de l'ordre de 0.0205
- L'écart-type des fonctions d'appartenance de type Gaussienne est de l'ordre de 0.0160

Alor les résultats des fonctions d'appartenance de type Gaussienne sont les plus proches aux résultats expérimentaux.

III.7.2 Etude de la précision et de l'erreur du système flou

Pour calculer le pourcentage d'erreur des 10 tests, on utilise la formule suivante :

$$e_i = \left(\frac{(Ra_{Exp} - Ra_{pred.})}{Ra_{Exp}} \right) \times 100 \quad (III.2)$$

Pour calculées le pourcentage de la précision des 10 tests, on utilise la formule suivante :

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{(Ra_{Exp} - Ra_{pred.})}{Ra_{Exp}} \right) \times 100 \quad (III.3)$$

Tableau III.6 Les résultats du système flou.

Essais	Paramètres de coupe			Rugosité de la surface			
	V_c	f_z	a_p	$Ra_{Exp.}$	$Ra_{Gauss.}$	Erreur %	Précision %
1	200	0.12	0.75	0.68	0.64	5.8823	94.11
2	300	0.12	0.5	0.31	0.346	3.3333	96.77
3	200	0.15	0.25	0.57	0.586	2.8070	97.19
4	200	0.09	0.5	0.31	0.3	4.0000	96.00
5	100	0.18	0.5	0.3	0.3	0.0000	100.0
6	250	0.18	0.5	0.33	0.32	3.0303	96.96
7	150	0.12	0.75	0.76	0.76	0.0000	100.0
8	300	0.15	0.25	0.5	0.48	3.2258	96.77
9	250	0.18	0.75	0.72	0.726	0.8333	99.16
10	300	0.18	0.75	0.7	0.7	0.0000	100.0
Précision moyenne							97.68%

III.7.3 Validation des résultats

La figure III.21 compare les prédictions du modèle de logique floue avec la rugosité mesurée réelle pendant le fraisage des pièces.

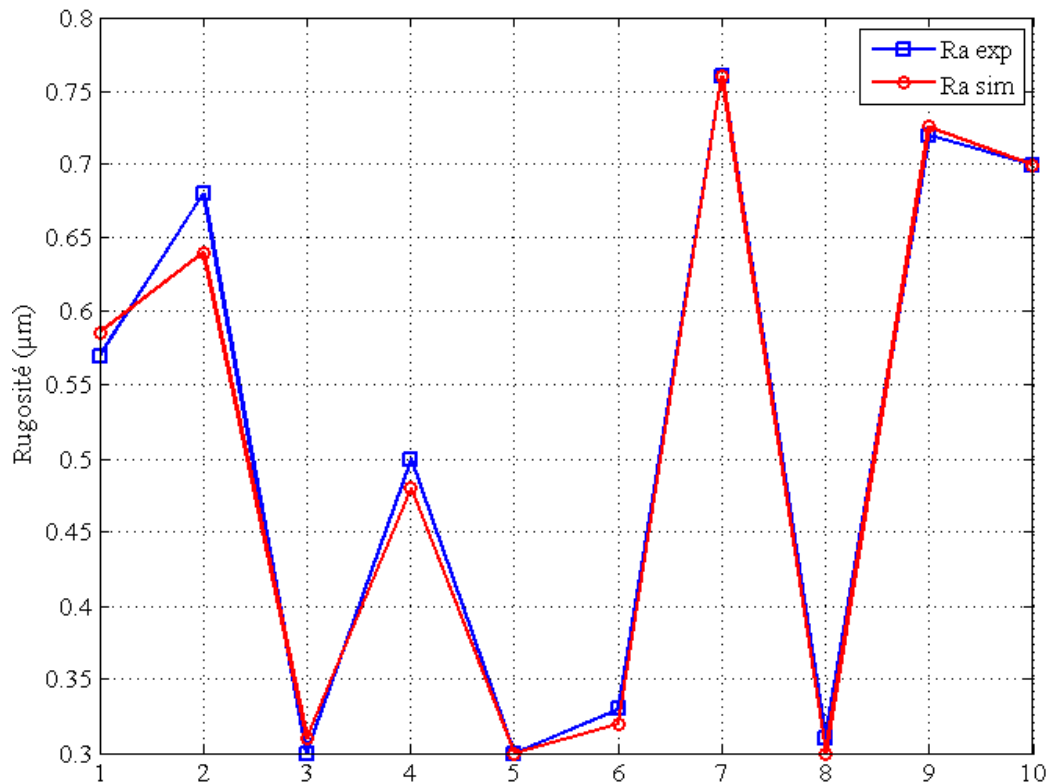


Figure III.21 Comparaison de la rugosité de surface prédite et expérimentale.

La figure III.21 montre que le modèle proposé était capable de prédire avec précision la rugosité de surface pendant les opérations de fraisage. Les similitudes entre les valeurs de la rugosité de la surface signifient que le modèle de logique floue est une solution efficace qui peut être utilisée pour prédire les valeurs de la rugosité de surface pour une plage spécifique de paramètres.

Il est très important d'observer que le gradient de la sortie floue soit très similaire à celui des données expérimentales. Cela signifie que la prédiction floue peut être précise si la construction des fonctions d'appartenance de sortie est correcte. La différence entre la sortie prédite et Ra expérimentale est montrée sur la figure III.21. Les résultats des tests montrent que le modèle de la rugosité de surface a été construit avec succès, donc on peut prédire la rugosité de surface avant que le processus d'usinage soit exécuté.

III.7.4 Représentation schématique des résultats

La figure III.22 représente les fonctions obtenues en utilisant une simulation par logique floue comme suite :

- la surface (1) représente la variation de la rugosité de surface en fonction de l'avance par dent et la profondeur de passe.

- La surface (2) représente la variation de la rugosité de surface en fonction de la profondeur de passe et la vitesse de coupe.
- La surface (3) représente la variation de la rugosité de surface en fonction de l'avance par dent et la vitesse de coupe.

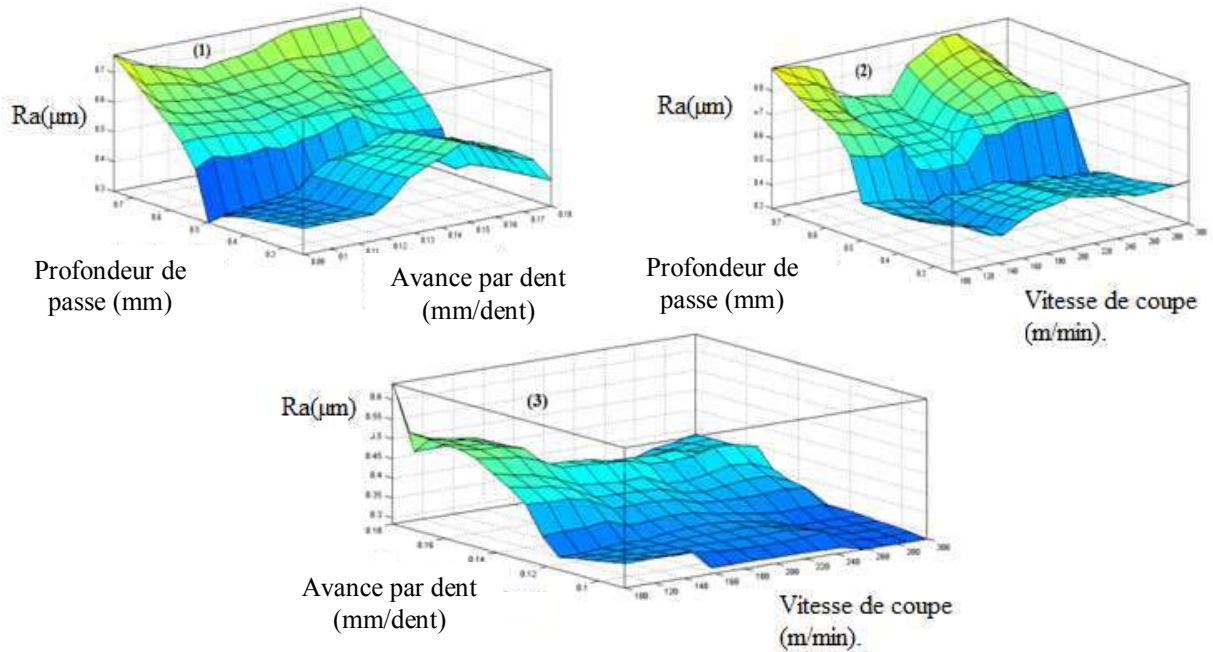


Figure III.22 Variation de la rugosité de surface prévue la logique floue en fonction des paramètres de coupe.

La figure III.22 illustre l'effet des paramètres d'usinage et leur interaction sur la rugosité de surface pendant les opérations de fraisage.

De la figure III.22 (1) on constate que la valeur la rugosité de surface devienne maximale pour des valeurs maximales de l'avance par dent et des valeurs maximales de la profondeur de passe. Tandis que les valeurs minimales de la rugosité sont obtenues pour des valeurs minimales de l'avance par dent et de la profondeur de passe.

D'autre part, une profondeur de passe plus élevée entraîne une augmentation de la rugosité des surfaces usinées.

De la figure III.23 (2) on constate que la rugosité de surface devienne maximale pour des valeurs maximales de la profondeur de passe quelle que soit la valeur de la vitesse de coupe.

La vitesse de coupe à un effet limité sur la rugosité des surfaces usinées pour des valeurs minimales de la profondeur de passe et de l'avance par dent.

Les rugosités minimales sont obtenues pour des valeurs maximales de la vitesse de coupe.

De la figure III.23 (3) l'augmentation de l'avance par dent conduit à une augmentation de la rugosité des surfaces usinées quelle que soit la vitesse de coupe, mais la valeur de la rugosité devienne plus petite si on augmentant la vitesse de coupe.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre les règles floues et les fonctions d'appartenance sont construites en utilisant le logiciel MATLAB à partir duquel la sortie floue (rugosité de surface) est dérivée. La rugosité des surfaces usinées est la sortie du processus qui est ensuite comparée aux données expérimentales. L'erreur minimum du modèle est obtenue en utilisant dix essais. Le modèle de logique floue construit est capable de prédire rugosité des surfaces usinées pour un ensemble donné d'entrées (vitesse de coupe, avance par dent et profondeur de passe).

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'augmentation des besoins des consommateurs pour des produits de qualité liés à la coupe des métaux avec des tolérances plus précises et une meilleure rugosité de la surface du produit a poussé l'industrie de la coupe à améliorer continuellement le contrôle qualité des procédés de coupe.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif de développer un modèle de prédiction de la rugosité de surface. Ce système est conçu pour fournir les valeurs de la rugosité de surface en temps réel nécessaire, et la prise de décision dans un environnement industriel plus réaliste.

Un modèle flou de 50 règles a été développé pour prédire la rugosité de surface, pour un ensemble donné d'entrées : vitesse de coupe, avance par dent et profondeur de passe. Le modèle flou obtenu est capable de prédire la rugosité de surface pour un l'ensemble d'entrées. Par conséquent, l'opérateur peut prédire la qualité de la surface pour un ensemble donné de paramètres de coupe et sera en mesure de définir les paramètres d'usinage pour obtenir une certaine qualité de surface.

Le modèle est vérifié en comparant la sortie floue avec les données expérimentales utilisées pour construire le modèle empirique. Les résultats de ces expériences sont en bon accord avec ceux prédits en utilisant le modèle flou.

La précision du modèle obtenu est fonction du nombre de règles et dépend des paramètres de coupe. La modification de ces paramètres peut augmenter le nombre de règles qui, à leur tour, affectent la précision du modèle obtenu.

L'erreur en pourcentage était le critère pour juger l'efficacité de prédiction du modèle flou et leur adéquation. La conclusion la plus importante à signaler est que le système mis au point pour la prédiction et le contrôle de la rugosité des surfaces usinées en fraisage, de l'acier AISI 1060, à une précision de 97.68%.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1]. **M. A. Yellas**, Etude du Comportement à l'Usure des Matériaux de Coupe Moderne en Tournage Dur, Thés de Doctorat d'état, Université de Annaba, 2005.
- [2]. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Usinage>
- [3]. **H. Aouici**, Fraisage, TP 2^{ème} Année Génie Mécanique et Productique, Ecole Nationale Supérieure de Technologie, 2013.
- [4]. https://fr.wikiversity.org/wiki/Fraisage/Fraisage_en_opposition_et_en_concordance
- [5]. **A. Belloufi**, Cours Procédés de Fabrication, Master Maintenance Industrielle, Université d'Ouargla, 2010.
- [6]. **M. Arbaoui, A. Tebib**, Surveillance de la Température de Coupe Pendant le Tournage de l'Acier AISI 1060 en Utilisant la Logique Floue, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [7]. **Société SANDVIK-COROMANT**, Fraisage, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, BM 7 082, pp. 1-5, 2001.
- [8]. kera-industry.com/wp-content/uploads/2014/09/Les-conditions-de-coupes.pdf
- [9]. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6542>
- [10]. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89tat_de_surface&oldid=143285569
- [11]. **C. Barlier, L. Girardin**, Memotech Productique : Matériaux et usinage, ISBN-13 : 978-2713507564, Casteilla, 2ème édition, 1986.
- [12]. https://www.sandvik.coromant.com/frfr/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear
- [13]. **F. Lakhdari**, Etude de l'Endommagement des Surfaces Optiques par des Particules Abrasives, Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.
- [14]. <http://mip2.insa-lyon.fr/>
- [15]. <http://3dcolors.fr/machine-mesure-tridimensionnelle-2/>
- [16]. **M.Diab**, Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques, thèse de Doctorat, Université de Sétif, 2010.
- [17]. **A.Chaiba**, Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par des Techniques de L'intelligence Artificielle, Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2010.
- [18]. <http://ebrois.free.fr/logique/logique.htm>

- [19]. **F. Harrouche**, Application de la Logique Floue aux Machines Tournantes, Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.
- [20]. **A. Aouiche**, Contribution à l'Etude des Structures Microruban Cylindriques par la Méthode Neuro-Spectrale, Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, 2016.

Résumé

Dans cette étude, l'approche de la logique floue est présentée pour la prédiction de la rugosité des surfaces usinées en fraisage de l'acier AISI 1060. Les données utilisées pour la formulation et la vérification de la performance model de la logique floue sont dérivées des expériences menées sur une fraiseuse CNC. Afin d'obtenir une meilleure rugosité de surface, l'ensemble de paramètres de coupe appropriés sont déterminés avant le processus. Les facteurs pris en compte dans cette étude étaient la profondeur de passe, l'avance par dent et la vitesse de coupe. Les résultats des tests montrent un bon accord entre la sortie réelle du processus et la rugosité de surface prévue (une précision de 97.68%). Les résultats obtenus, justifient l'application et le développement d'un système d'inférences flous pour la prédiction de la rugosité des surfaces usinées en fraisage.

Mots clés : fraisage, Rugosité de la surface, prédiction, logique floue.

Abstract

In this study, the fuzzy logic approach is presented for the prediction of the roughness surfaces of AISI 1060 steel machined by milling. The data used for the formulation and verification of fuzzy logic model, performance are derived from experiments ,realized on a CNC milling machine. In order to obtain a better surface roughness, the appropriate cutting parameters are determined before the machining. Factors considered in this study were depth of cut, tooth feed, and cutting speed. The test results show a good agreement between the real output of the process and the expected surface roughness (an accuracy of 97.68%). The results obtained justify the application and development of a fuzzy inference system for predicting the roughness of machined surfaces in milling.

Keywords: milling, surface roughness, prediction, fuzzy logic.

المخلص

في هذه الدراسة، تم تقديم منهج المنطق الضبابي للتنبؤ بخشونة السطوح المشغلة بالتفريز للفولاذ AISI1060. المعطيات المستخدمة لإنشاء ومراقبة النموذج الضبابي أخذت من تجارب أجريت باستعمال آلة تفريز ذات تحكم عددي. من أجل الحصول على خشونة سطح أفضل، يتم تحديد شروط القطع المناسبة قبل عملية التشغيل. العوامل التي أخذتها هذه الدراسة بعين الاعتبار هي عمق التمريرة، التغذية وسرعة القطع. أظهرت نتائج التجارب توافقاً جيداً بين خشونة السطح الحقيقية والمتوقعة (كانت دقة النموذج تساوي 97.68٪). النتائج المتحصّل عليها تبرر تطبيق وتطوير نظام استدلال ضبابي للتنبؤ بخشونة الأسطح المشغلة باستعمال التفريز.

الكلمات المفتاحية: التفريز، خشونة السطح، التنبؤ، المنطق الضبابي.